

Jussi Niemi

Osittaispurkausmittauksen tuotteistaminen jakeluverkonrakennusprojekteihin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

17.5.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jussi Niemi Osittaispurkausmittauksen tuotteistaminen jakeluverkonrakennusprojekteihin 46 sivua + 1 liite 17.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Sampsa Kupari asennuspäällikkö Pekka Kanervo
<p>Tämä insinööri työ tehtiin Suomen Energia-Urakointi Oy:lle. Työssä tutkittiin osittaispurkausten teoreettista taustaa, purkausten vaikutusta maakaapeleiden eristeisiin ja osittaispurkaustasojen mittaamista käyttöpaikalla. Tavoitteena oli suunnitella tilaajatahoille myytävä osittaispurkausmittauspalvelu SEU:lle. Osittaispurkausten mittaamista tutkittiin kirjallisuuslähteiden ja asiantuntijahaastattelujen perusteella. Mittauspalvelun kysynnän ja tulevan tilauskannan selvittämiseen käytettiin kyselymenettelyä.</p> <p>Työssä selvitettiin, mitkä tekijät vaikuttavat osittaispurkausten syttymiseen kaapelieristeissä, ja miten ne vaikuttavat erityyppisiin kaapelieristeisiin. Osittaispurkauksilla todettiin olevan vaikutusta maakaapelin ja kaapelivarusteiden käyttöikään.</p> <p>Maakaapeleissa purkausten havaitseminen on mahdollista ainoastaan mittaamalla. Kunnossapitotoimien suunnittelussa osittaispurkausmittausten todettiin olevan käyttökelpoinen työkalu. Asennuksen jälkeisellä purkaustason mittauksella voidaan varmentaa asennustyön laatu. Osittaispurkausmittauksen avulla voidaan paikallistaa vikaantuneet komponentit ja löytää tarkat vikapaikat. Työssä vertailtiin keskijännitemaakaapeleiden osittaispurkausmittauksia tuotannon ja käyttöpaikkamittausten välillä.</p> <p>Osittaispurkauksia voidaan mitata erityyppisillä mittalaitteilla. Mittauksia voidaan suorittaa sekä käytönaikaisina että käyttökeskeytyksen vaatimina mittauksina. Työssä tutkittiin eri laitetyyppien sopivuutta käyttöpaikkamittauksiin.</p> <p>Työn tuloksena saatiin kattava tutkielma osittaispurkausten vaikutuksista maakaapeleihin ja kaapelivarusteisiin sekä osittaispurkausten mittaamisesta käyttöpaikalla. Työtä käytetään myöhemmin lopullisen osittaispurkausmittauspalvelun suunnitteluun.</p>	
Avainsanat	keskijänniteverkko, osittaispurkaus, PD-mittaus, käyttöpaikka

Author Title Number of Pages Date	Jussi Niemi The Productisation of Partial Discharge Measurements for Constructing Distribution Networks 46 pages + 1 appendix 17 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Pekka Kanervo, Manager of Installation Services Sampsa Kupari, Principal Lecturer
<p>This thesis was done for Suomen Energia-Urakointi Oy. The thesis studies the theoretical background of partial discharges, the effect that the partial discharges have on underground cable compounds, and the measuring of the partial discharge levels on-site. The objective was to design a partial discharge measuring service for SEU Oy to sell to their customers. The partial discharge measurements were studied via literature and expert interviews. The demand for a measuring service was explored with a questionnaire.</p> <p>The thesis explores the factors that cause partial discharges in the cable compounds and how the partial discharges affect cable compounds of a different type. The partial discharges were found to have an influence on the durability of underground cables and cable equipment.</p> <p>In underground cables, detecting partial discharges is possible only by performing measurements. Partial discharge measurements were found to be a useable tool in designing maintenance actions. Measurements performed after the installations enable verifying the quality of the installation work. The malfunctioning parts and the exact fault locations can be found with partial discharge measurements. This thesis compares the partial discharges of medium voltage underground cables between production and on-site measurements.</p> <p>The partial discharges can be measured by using different kinds of devices. The measurements can be performed during both usage and usage interruption. This thesis examines the suitability of different devices in on-site measurements.</p> <p>As a result, this thesis includes extensive knowledge of the effects the partial discharges have on underground cables and on cable equipment, and also of the partial discharge measurements on-site. This thesis will later be used as a basis for developing a partial discharge measuring service.</p>	
Keywords	medium voltage power supply, partial discharge, PD-measurement, on-site

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Keskijänniteverkko	2
2.1	Verkon komponentit	3
2.1.1	Kytkinlaitokset	3
2.1.2	Ilmajohdot ja maakaapelit	4
2.1.3	Maakaapelijatkot ja päätteet	6
2.1.4	Keskijännitekojeistot	9
2.1.5	Jakelumuuntamot	10
2.2	Maakaapeliverkon kunnossapito ja kunnonvalvonta	11
2.3	Maakaapelieristeiden vanheneminen	12
3	Osittaispurkaus	14
3.1	Osittaispurkaustyypit	18
3.1.1	Sisäiset osittaispurkaukset	18
3.1.2	Pintapurkaukset	19
3.1.3	Koronapurkaukset	19
3.2	Purkausten syntyminen ja ilmeneminen	19
3.3	Vaikutus kaapeleihin ja eristeeseen	22
4	Osittaispurkausten mittaaminen	23
4.1	PD-mittaukset komponenttien tuotannossa	24
4.2	PD-mittaukset jakeluverkossa käyttöpaikalla	26
4.2.1	Akustinen PD-mittaus	27
4.2.2	Off-line-mittauksen tekniikat	29
4.3	Eri sähköiset PD-mittaustekniikat	31

4.4	PD-mittaustulosten käsittely ja arviointi	32
5	Verkkoyhtiöiden näkemys PD-mittauksista	35
5.1	Verkkoyhtiöiden tilaamat PD-mittaukset nykyisin	36
5.2	PD-mittausten tulevaisuuden näkymät	36
6	PD-käyttöpaikkamittauspalvelun tuotteistus	37
6.1	PD-mittauspalvelun sisältö	39
6.1.1	PD-mittaus käyttöönottomittauksena	39
6.1.2	PD-mittaus kunnonvalvontamittauksena	39
6.2	PD-mittalaitteivaihtoehtojen kartoitus	40
7	Mittauspalvelun liiketoiminnan suunnittelu	41
7.1	Mittauspalvelun kustannusten muodostuminen	41
7.2	Palvelun hinnoittelun tekijät	42
7.3	Markkinointi	43
8	Yhteenveto	44
	Lähteet	45
Liite	Verkkoyhtiöille lähetetty kysely osittaispurkausmittauksista	

Lyhenteet

DAC	<i>Damped Alternating Current</i> ; vaimeneva vaihtovirta
EMV	energiamarkkinavirasto
IEC	<i>International Electro technical Commission</i> ; kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio
kj	keskijännite
PD	<i>Partial Discharge</i> ; osittaispurkaus
pC	pico Coulomb; osittaispurkauksen näennäisvarauksen mittayksikkö
PEX	ristisilloitettu polyeteeni
q	osittaispurkauksen näennäisvaraus
SEU	Suomen Energia-Urakointi Oy
SF ₆	rikkiheksafluori; eristekaasu
VES	Vantaan Energia Sähköverkot Oy
VLF	<i>Very Low Frequency</i> ; erittäin matala taajuus

1 Johdanto

Tämä insinööriyö on tehty Suomen Energia-Urakointi Oy:lle. Työssä selvitetään osittaispurkausten (*PD*) mittaamisen mahdollisuuksia jakeluverkon maakaapelin kunnonhallinnan työkaluna, sekä käyttöönottomittauksena uudisrakentamisprojekteissa. Työssä suunnitellaan verkkoyhtiöille myytävää *PD*-mittauspalvelua.

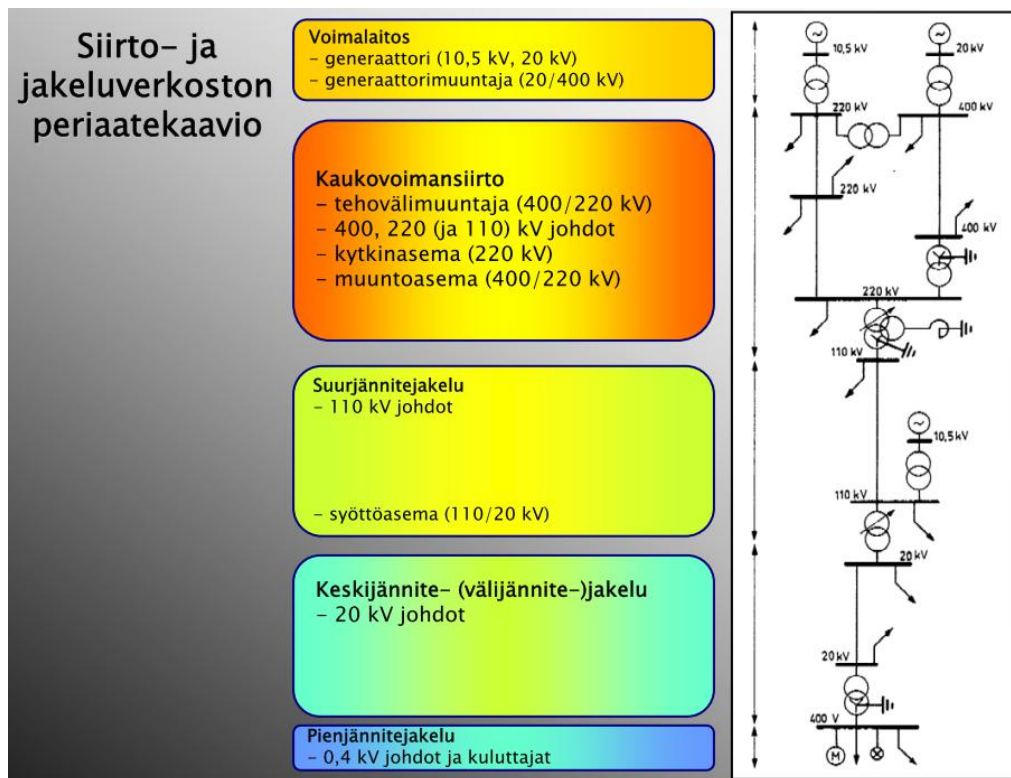
Maakaapeleiden eristeessä olevat viat aiheuttavat osittaispurkauksia ja eristeen heikentymistä. Kaapeleiden käyttöikä laskee osittaispurkausten seurauksena ja samalla sähköverkon luotettavuus vähenee. Kunnonvalvontamittauksena suoritettu osittaispurkausmittaus ja sen perusteella tehty kaapelin kuntoarvio auttavat verkkoyhtiötä maakaapeliverkon kunnossapidon suunnittelussa. Asennuksen jälkeisenä mittauksena, ennen kaapeliyhteyden käyttöönottoa, voidaan osittaispurkausmittauksella varmentaa asennetun kaapelin ja siihen liitettyjen kaapelivarusteiden laatu.

Suomen Energia-Urakointi Oy on Uudellamaalla ja Päijät-Hämeessä toimiva sähköurakointi yhtiö, jonka päätoimialana on sähkönjakeluverkkojen urakointi. SEU perustettiin vuonna 1998, kun Helsingin Energia ja Vantaan Energia luopuivat sähköverkkojen asennustoiminnasta. Myöhemmin toiminta-alue laajeni Espoon ja Lahden alueille. Yhtiö työllistää nykyisin noin 200 henkilöä ja kuuluu maan johtaviin energia-alan palveluntuottajiin. SEU on erikoistunut kaupunki- ja taajama-alueiden sähköverkkojen rakentamiseen. Merkittävimpiä asiakkaita ovat sähköverkkoyhtiöt ja ulkovalaistusverkkojen omistajat.

2 Keskijänniteverkko

Suomessa keskijänniteverkkoja hallinnoivat ja rakennuttavat alueelliset sähköverkkoyhtiöt. Sähköverkkoyhtiöillä on omalla alueellaan monopoliasema. Niiden toimintaa valvoo energiamarkkinavirasto (EMV), joka myös määrittää jakelualueet kullekin verkko-yhtiölle. Keskijänniteverkkolla ja sen kunnolla on tärkeä merkitys sähköjakeluun, sillä lähes 90 % sähkökäyttäjien kokemista sähkökeskeytyksistä johtuu vioista keskijänniteverkkoissa. Tämä edellyttää jatkuvaa verkon kunnan tarkkailua ja kehitystyötä. Myös jakeluyhtiöiden verkonkäyttäjien ammattitaidon ja verkon luonteen tunteminen ovat jatkuvasti kehitettäviä asioita.

Keskijänniteverkko alkaa sähköasemalta päämuuntajan jälkeen, jolla suurjännitejake-lun 110 kV:n jakelujännite muunnetaan keskijännitteeksi. Päämuuntajia voi sähköase-milla olla useita. Kuvassa 1 esitetään periaatekaavio sähköjakelusta Suomessa:



Kuva 1. Jakeluverkon rakenne [1]

Keskijänniteverkossa on Suomessa tyypillisesti käytössä kaksi jännitetasoa: 10 ja 20 kV. Kaupunkien keskusta-alueilla – esimerkiksi Helsingissä – sähköjakelu toteutetaan 10 kV:lla, koska sähköasemien, muuntamoiden ja kuluttajien välimatkat ovat lyhyitä. Muualla taajamissa ja haja-asutusalueilla sähköjakeluun käytetään 20 kV.

Keskijänniteverkot on monin paikoin rakennettu silmukkaverkoiksi, mutta niitä käytetään usein säteittäisinä. Silmukoidun verkon etuna on, että mahdollisten kaapelivikojen aikana sähköteho voidaan syöttää toisesta syöttösuunnasta ja viat korjata ilman pitkiä sähköjakelun keskeytyksiä kuluttajille. [2, s. 125.]

Nykyisin puisto- ja kiinteistömuuntamoiden keskijännitekojeistojen kuormaerottimet ja pylväsmuuntamoiden pylväserottimet ovat moottorikäyttöisiä. Tämä mahdollistaa erottimien kauko-ohjauksen. Verkonkäyttöä valvovat henkilöt voivat ohjata erottimia ja vaihtaa sähkönsyöttösuunta vikatapauksissa hyvin nopeasti suoraan valvomon käyttöliittymästä. Näin saadaan sähkökatkojen kestoajoja lyhennettyä ja vika-alueen laajuutta pienennettyä.

2.1 Verkon komponentit

Keskijänniteverkon pääkomponentteja ovat päämuuntajien (110/20 kV) jälkeen olevat keskijännitekytkinlaitokset, niiltä lähtevät maakaapelit ja ilmajohtot, ja osittain jakelumuuntamot (20/0,4 kV) keskijännitekojeistoihin. Lisäksi kaapeliverkossa on kaapelijatkoja, ja kaapelit muuntajiin ja kojeistoihin liittäviä kaapelipäätteitä. Yleisesti ottaen maaseudulla ja haja-asutusalueilla verkko on rakennettu ilmajohtoja käyttäen, taajamissa ja kaupungeissa käytetään maakaapeleita. Vanhaa ilmajohtoverkkoa saneerataan maakaapeleiksi valtion linjauksen mukaan. Sen tarkoituksena on saada ilmastollisista syistä johtuvia sähkökeskeytysaikoja ja määriä pienemmiksi. Maakaapeliverkolla saavutetaan myös parempi sähkölaatu ja maisemointi, pylväsrakenteiden ja ilmajohtojen poistuessa katukuvasta.

2.1.1 Kytkinlaitokset

Keskijännitekytkinlaitoksen tehtävä on siirtää sähköenergia päämuuntajalta johtolähtöihin. Kytkinlaitokset rakennetaan nykyisin SF₆-kaasueristeisinä rakenteina, ulkonäkö ja tilankäyttö syistä, myös huoltovälit ovat pidempiä verrattaessa vanhoihin

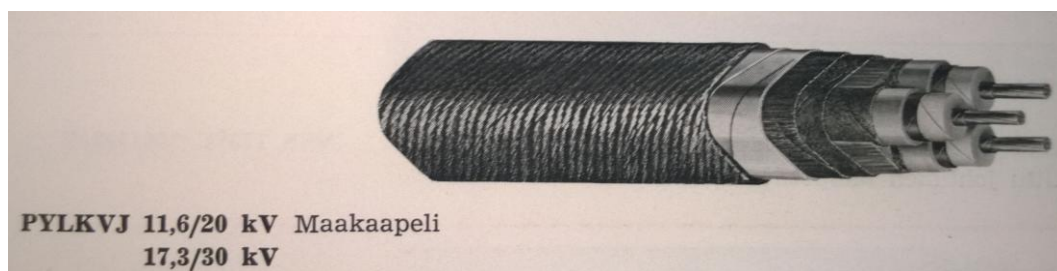
vähäjännitekytkinlaitoksiin. Kytkinlaitoksissa on kokoojakiskot, joihin johtolähdöt liitetään johtolähtökenttien avulla. Kokoojakiskot toteutetaan usein kaksoiskisko- eli ns. *duplex*-järjestelmän avulla, joissa käytetään johtolähtökennosta toiseen siirrettäviä vaunukatkaisijoita. Molempia kiskoja syöttää oma päämuuntaja.

Vaunukatkaisijat sisältävät katkaisijan sekä virta- ja jännitemuuntajat mittauksia että relesuojauksia varten. Erillisiä erottimia ei tarvita, sillä ulosvedetty vaunukatkaisija muodostaa tarvittavan erotusvälin. [2, s. 119–124.]

2.1.2 Ilmajohdot ja maakaapelit

Ilmajohdoverkon lähdöt tuodaan kytkinlaitokselta maakaapeleilla kytkinaseman laitamille ja nostetaan siellä pylvääseen, josta ilmajohto alkaa. Yleisimpiä päällystettyjä ilmajohtotyyppisiä ovat *PAS* ja riippukierrekaapeli *SAMKA*, avojohdoista *Sparrow* ja *Raven* ovat käytetyimmät. Ilmajohdosten johdinmateriaalina käytetään alumiinia sen keveyden takia. Päällystetyt johdot ovat kalliimpia, mutta niillä saavutetaan luotettavampi jakelu ja johtoalueen vaatima leveys on avojohdorakennetta pienempi. Myös sähköturvallisuuden kannalta suojattu rakenne on parempi.

Keskijänniteverkon maakaapeleissa eristemateriaalina käytetään öljypaperiseosta tai PE-muoveja, yleisin käytetty muovityyppi on *PEX*. Vanhat maassa jo olevat kaapelit ovat öljypaperieristeisiä. Paperikerros koostuu useista limittäin toistensa päällä olevista ohuista 50 - 200 µm paperiliuskoista. Paperikerrokset kyllästetään öljyllä, joka virtaa vapaasti kaapelin sisällä. Suurjännitetekniikassa käytetyissä öljypaperikaapeleissa öljy on paineistettu. Myös maakaapeleissa virtajohtimet ovat alumiinia pois lukien öljypaperieristeinen *PYLKVJ*, joka on kuparikaapeli. Vanhoissa asennuksissa *PYLKVJ* on paljon edelleen käytössä oleva öljypaperieristeinen kaapelityyppi. Se on suojattu vahvalla kaikki johtimet peittävällä alumiiniarmeerauksella ja uloimpana kerroksena on tervattu juuttivaippa. Kaapelin rakenne esitetään seuraavassa kuvassa 2.

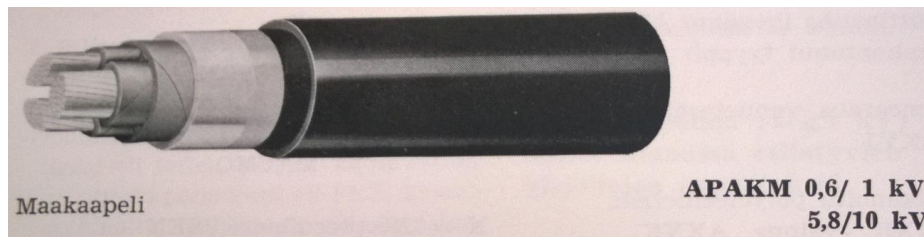


Kuva 2. PYLKVJ-kaapeli [3]

Öljypaperieristeisiä, mutta muovivaippaisia maakaapeleita ovat APYAKMM (kuvassa 3) ja 10 kV:n jännitteellä käytetty APAKM (kuvassa 4).



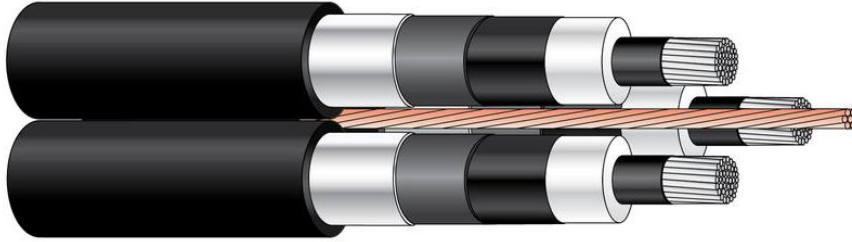
Kuva 3. APYAKMM-kaapeli [3]



Kuva 4. APAKM-kaapeli [3]

1960-luvun loppupuolella alettiin käyttää muovieristeisiä kaapeleita öljypaperikaapelin lisäksi. Nykyisin keskijänniteverkon uudisrakentamisessa ja kaapelivikojen korjaamisessa käytetään pääosin PEX-eristeistä alumiinivoimakaapelia AHXAMK-W (kuva 5, ks. seur. s.). Ammattikielessä käytetään nimitystä *Wiski*. PEX-muovin heikkous on sen herkkyys osittaispurkauksille, koska valmistusprosessin aikana ei voida välttää pienten onteloiden, halkaisijaltaan alle 30 μm , syntymistä ja epäpuhtaushiukkasten jäämistä eristekerroksen sisään. Tämän vuoksi kaapelirakenteessa käytetään eristeen molemmin puolin sileää puolijohtavaa kerrosta.

Alumiinijohtimen ja eristekerroksen välistä puolijohtavaa kerrosta kutsutaan johdin-suojaksi, ja eristeen ja vaipan välistä puolijohtavaa kerrosta hohtosuojaksi [4, s. 150]. Eristekerros, johdin- ja hohtosuojat vulkanoidaan valmistusvaiheessa johtimen päälle. Vulkanoinnin jälkeen eriste jäähdytetään, minkä seurauksena eriste voi hieman vetäytyä ja aiheuttaa mekaanista jännitystä eristerakenteeseen. Jännitys voi puolestaan vaikuttaa kaapelin sähköisiin ominaisuuksiin heikentävästi ja edesauttaa osittaispurkausten syttymistä. [5, s. 11–13.]



Kuva 5. AHXAMK-W kaapeli [6]

2.1.3 Maakaapelijatkot ja päätteet

Kaapelijatkon tarkoituksena on liittää kaksi kaapelia yhteen. Maakaapeliverkossa kaapelit joudutaan usein jatkamaan pitkistä kaapelinvetomatkoista ja hankalista kaapelireiteistä johtuen. Myös kaapeleiden vikaantuminen johtaa jatkosten teon tarpeeseen. Vanhojen paperikaapelien vikaantuessa vikavälit korjataan muovikaapeleilla ja tällöin tarvitaan kaksi erityyppistä kaapelia toisiinsa liittäviä sekajatkvoja.

Normaaleja *wiski-wiski*-jatkvoja on kaapelivarusteiden valmistajilla kaikille käytössä oleville kaapelin poikkipinta-aloille, myös sekajatkopaketteja on valmiina. Joskus – harvinaisen kaapelientyyppien tai johtimen poikkipinta-alan ollessa kyseessä – jatkopaketti joudutaan kasaamaan käsin eri komponenteista jatkoasiantuntijoiden toimesta. Jatkon rakenne pyritään tekemään mahdollisimman lähelle itse kaapelin rakennetta, jotta saadaan aikaiseksi homogeeninen sähkökentän jatkuvuus jatkos läpi.

Johtimet liitetään toisiinsa ruuvattavilla tai puristettavilla holkeilla. Holkista on liitoksen jälkeen pyöristettävä kaikki terävät kulmat, jotta sähkökenttä ei muodostu liian voimakkaaksi teräviin kulmiin. Holkkien ja eristeen väliin jäävä väli peitetään usein väriltään keltaisella kentänohjausnauhalla. Kentänohjausnauha kiedotaan myös jatkoholkin päälle sekä eristeen ja hohtosuojan väliin. Tämän päälle tulee puolijohtavaa kutistemuovia oleva kentänohjausletku. Lopuksi kiinnitetään suojaava ja armeeraukset yhdistävä kuparipalmikko ja kutistetaan ulkovaippa jatkos päälle. Jatkon on annettava jäähtyä ennen altistamista mekaaniselle rasitukselle. Asentajan ammattitaito ja huolellisuus on tärkeää jatkos teossa. Kuvasta 6 (ks. seur. s.) havaitaan jatkos rakenne. Kyseinen jatkos on avattu vian takia. [7.]



Kuva 6. Avattu kaapelijatko, AHXAMK-W 240

Kaapelipäätteen tarkoitus on liittää maakaapeli keskijännitekojeistoon tai muuntajaan. Pääte eristää kaapelin ulkoisilta vaikutuksilta ja suojaa kaapelin päätä mekaanisesti. Se estää kosteuden ja lian pääsemisen kaapelin sisään. Osa päätetyypeistä antaa myös suojan sähköiskulta kosketettaessa päätettä. Ne ovat rakenteeltaan kosketussuojattuja (kuva 7). Öljypaperikaapelissa on ennen käytetty letku- tai eristysputkipäätteitä sisäasennuksissa ja posliinieristeisiä päätteitä ulkoasennuksissa. Nykyisin PEX-kaapelit päätetään kutistemuovi- tai silikonipäätteillä. Kutistemuovipäätteet soveltuvat sekä sisä- että ulkoasennuksiin. Sisäasennuksiin on vaihtoehtona silikonikumipäätteitä tai pelkällä kentänohjauskeilalla varustettuja päätteitä [5, s. 18–19.].



Kuva 7. Kosketussuojattu kaapelipääte muuntajan kannella

Päätteet ovat joko suoria (kuvassa 8) tai kulmamallisia riippuen siitä, minkä tyyppiseen laitteistoon ja liittimiin kaapeli tulee liittää. Myös liittintyyppjä on erilaisia. Toiset päätteet liitetään kohteeseen pulttiliitoksella ja toiset ovat tapilla liitettäviä. Kohteeseen tarvittava päätetyyppi on tarkastettava ennen varusteiden tilaamista. Päätteen tekovaiheet ovat hyvin samanlaiset kuin jatkon.



Kuva 8. Suora päätte SF₆-kojeistoon

2.1.4 Keskijännitekojeistot

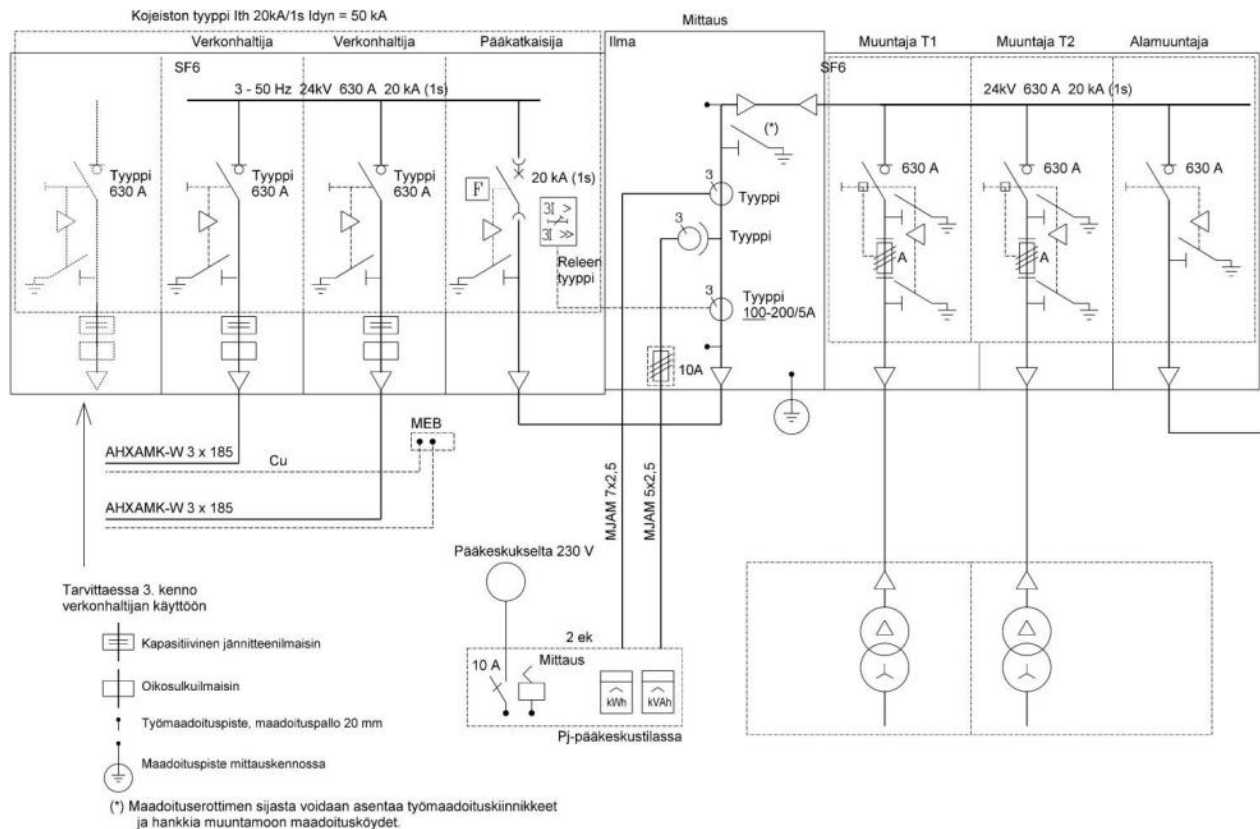
Keskijännitekojeistolla tarkoitetaan laitteistoa johon keskijännitekaapelit päätetään puisto- ja kiinteistömuuntamoissa. Kytkinlaitosten tavoin kj-kojeistot tehdään nykyisin SF₆-eristeisinä rakenteina. Vanhat kojeistot ovat ilmaeristeisiä ja kooltaan paljon suurempia, johtuen ilmaeristeen vaatimasta pitkästä eristysvälistä. Kojeistot kootaan yksittäisistä kennoista, jotka on yhdistetty yhteisellä virtakiskolla kojeiston sisällä. Kennotyyppejä ovat johtolähtökenno, pääkytkinkenno, mittauskenno ja muuntajalähtöjenkenno. Johtolähtökennoihin tuodaan keskijännitekaapelit sähköasemilta ja muilta muuntamoilta. Rengasverkossa johtolähtökennoja on vähintään kaksi. Keskijännitekojeiston pääkaaviosta (kuva 9, ks. seur. s.) nähdään kojeistotilassa, mitä kojeisto sisältää. Pääkaavion on aina oltava helposti luettavissa kojeiston läheisyydessä.

Johtolähtökennot sisältävät moottori- ja käyttökampitoimiset jousiviritteiset kuormaerotimet, joihin liitetään kaapelipääte. Kuormaerotimen kautta sähkö johdetaan kojeiston virtakiskoille. Kapasitiiviset jännitemittaukset on liitetty kuormaerotimen tulopuolelle. Sen tarkoituksena on ilmaista, onko kyseinen johtolähtö jännitteinen vai ei. Sähkönsyöttösuunnasta ja tavasta riippuen molemmat tai vain toinen johtolähdöistä on kytketty kiskostoon. Lisäksi kukin johtolähtökenno on varustettu maadoituserottimella. Kaapelipääte-tilassa tuleviin kaapeleihin liitetään nykyisin oiko- ja maasulkuilmmaisimet tai -mittaukset, esimerkiksi Rogowskin kela, jolta virtatiedot viedään kaukokäyttölaitteiston välityksellä verkonkäyttövalvomoon. Vikatapauksissa valvomohenkilökunta näkee suoraan mittaustiedoista, kumpaan suuntaan vikavirta on kulkenut. Vikapaikan paikannus on helpompaa, kun virtatiedot pystytään lukemaan reaaliajassa.

Pääkatkaisijakennon avulla saadaan katkaistua virran kulku mittauskennolle ja jakelumuuntajalle. Pääkatkaisija on varustettu moottoritoimisella SF₆-katkaisijalla, ylivirtareleellä ja maadoituserottimella. Pääkatkaisija voi olla myös sulakkeellinen, jolloin ylivirtareleettä ei ole. Ylivirtarele saa mittaustietonsa mittauskennosta. Ylivirtarelelen tarkoitus on suojata kojeisto ylivirroilta. Se ei katkaise jännitettä tulevilta johtolähdöiltä, mutta virran kulku kojeiston sisällä katkeaa ylivirtarelelen lauettua.

Mittauskenno mittaa muuntajalähdölle kulkevaa virtaa ja kojeiston kiskoston jännitettä. Mittaustieto viedään pääkatkaisijan ylivirtareleelle ja siihen voidaan liittää myös energiamittaus. Mittauskennon kautta virta johdetaan muuntajalähtöihin.

Muuntajälähtökennoja on yksi kutakin jakelumuuntajaa kohden. Muuntajälähdöt on varustettu myös kuormanerottimilla johtolähtökennojen tavoin. Koska kuormanerotin ei katkaise ylivirtoja, muuntajälähdöt varustetaan suurjännitesulakkeilla. Sulakkeet suojaavat jakelumuuntajaa, joka on muuntamon kallein yksittäinen komponentti.



Kuva 9. Keskijännitekojeiston pääkaavio [8]

2.1.5 Jakelumuuntamot

Jakelumuuntamolla tarkoitetaan sellaista laitteistokokoonpanoa, joka sisältää keskijännitekojeiston tai erottimet ja relesuojaukseen tarvittavat mittamuuntajat. Kojeiston tai erottimien kautta keskijännite siirretään jakelumuuntajalle ja siitä eteenpäin pienjännitekeskuksiin ja asiakkaille. Muuntajat ovat joko öljyeristeisiä tai valuhartsieristeisiä kuivamuuntajia. Jakelumuuntamoissa keskijännite loppuu jakelumuuntajan ensiöliittimiin.

Ilmajohdoverkossa jakelumuuntajat ovat monesti pylväisiin rakennettuja. Pylväsmuuntamoissa keskijännitejohdot on kytketty erottimien, jotka ovat monesti kaukokäyttöisiä, kautta jakelumuuntajan ensiöliittimiin. Loput pylväsmuuntamon osista ovat

pienjännitteisiä. Ulkoilman takia muuntajina käytetään ainoastaan öljyeristeisiä malleja, sillä kuivamuuntajat eivät kestä kosteutta.

Maakaapeliverkon muuntamotyyppinä ovat puistomuuntamot ja kiinteistömuuntamot. Puistomuuntamot ovat katukuvassa näkyviä pelti-, betoni- tai tiilirakenteisia pienehköjä rakennuksia. Puistomuuntamo sisältää tiiviisti sijoitettuna keskijännitekojeiston tulevine kaapeleineen, jakelumuuntajan ja pienjännitekeskuksen, josta sähkö jaetaan kuluttajille. Puistomuuntamon laitteistot kasataan jo tehtaalla valmiiksi ja sijoitetaan oikeille paikoilleen, joten sen lopullinen asentaminen jakelukuntoon on suhteellisen nopeaa. Kiinteistömuuntamot sijaitsevat usein kaupunkien ja taajamien keskusta-alueilla kiinteistöjen kellareissa tai katutasossa.

Kiinteistömuuntamot sisältävät samat laitteistot kuin puistomuuntamot, mutta ovat tiloiltaan usein isompia kuin puistomuuntamot. Suuremman tilan ansiosta jakelumuuntajia voidaan sijoittaa samaan tilaan useita ja myös keskijännitekojeistot voidaan varustaa useilla johtolähdöillä. Kiinteistömuuntamoihin johtavat kulkureitit on syytä merkitä hyvin varsinkin jos muuntamotila on rakennuksen kellarissa. Vikatapauksissa päivystävien asentajien ja mahdollisesti paloviranomaisten on syytä löytää paikalle ilman kulkuongelmia ja epäselvyyksiä.

2.2 Maakaapeliverkon kunnossapito ja kunnonvalvonta

Maakaapeliverkon kunnossapidon ja kunnonvalvonnan tarkoituksena on taata luotettava sähkönjakelu kuluttajille ja minimoida käytönaikaiset kokonaiskustannukset. Kunnossapito voidaan jakaa kahteen ryhmään: ennakoivaan ja korjaavaan kunnossapitoon.

Korjaavalla kunnossapidolla tarkoitetaan vikaantuneiden kaapeliyhteyksien ja verkon komponenttien korjaamista niiden vioituessa. Tämä edellyttää sitä, että korjaushenkilöstö ja tarvittavat materiaalit ovat koko ajan saatavilla. Etenkin pienjänniteverkon maakaapelit ja komponentit on vaikea ylläpitää muuten kuin korjaavalla kunnossapidolla.

Ennakoivalla kunnossapidolla tarkoitetaan verkon komponenttien ja kaapeleiden huoltamista tai vaihtamista suunnitellusti ennen niiden käyttöiän loppua. Ennakoiva kunnossapito vaatii kunnossapito-ohjelman tekemistä ja sen ylläpitämistä. Lisäksi tietyille

komponenteille, kuten muuntajille, tehdään määräaikaistarkastuksia viranomaisten säädösten mukaan. Verkon komponenttien huolto- ja tarkastustoimet voidaan ajoittaa kahdella eri periaatteella: ajanhallintaan perustuvalla periaatteella ja verkon käyttövarmuuteen perustuvalla periaatteella. Usein kunnossapito-ohjelma suunnitellaan käyttäen kumpaakin periaatetta sekoittaen. Ajanhallinnalla tarkoitetaan komponentin tarkastamista tai huoltamista tietyin aikaväleihin. Esimerkiksi jakokaappeja ja muuntamoita tarkastetaan ja huolletaan järjestelmällisesti, pienet viat voidaan korjata heti ja isommille vioille tehdään korjaussuunnitelmat.

Verkon käyttövarmuuden kannalta komponentit jaotellaan keskeytysriskin mukaan. Suurimman käyttökeskeytysriskin omaavat komponentit ovat ensisijaisia huollon ja valvonnan kohteita. Esimerkiksi sähköasemilta lähtevät keskijännitekaapelit ja niiden päässä olevat muuntamot ovat kriittisiä kohteita. Kunnonvalvontamittauksena PD-mittausta käytetään nykyään paljon juuri sähköasemalähtöjen kunnonvalvontaan, muita kaapeliyhteyksiä mitataan satunnaisesti. Muita mittauksia ei maakaapeleille juurikaan tehdä kunnonvalvonnassa. [2, s. 228–230; 9.]

2.3 Maakaapelieristeiden vanheneminen

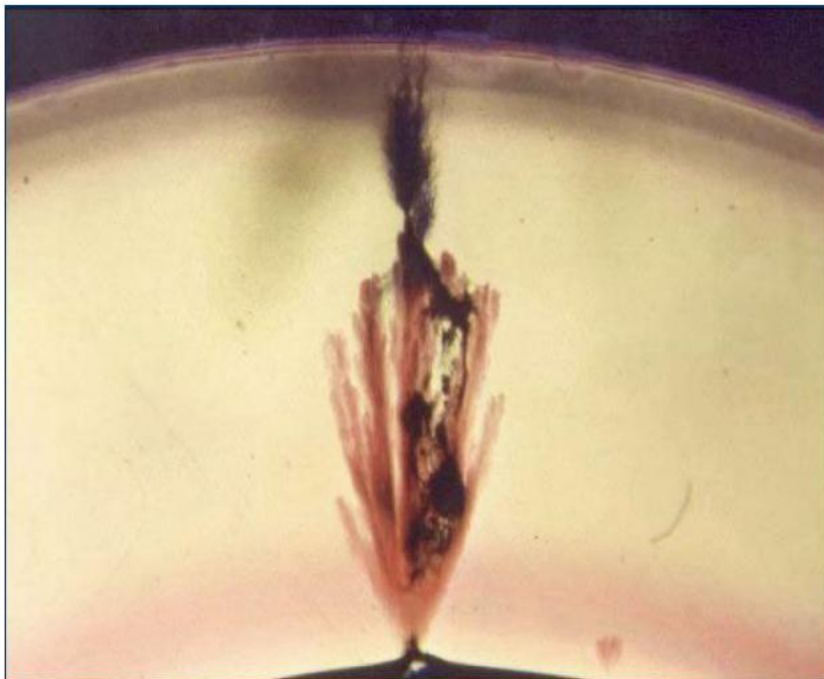
Öljypaperieristeen ominaisuudet heikkenevät kaapelin ikääntyessä. Muutosta kaapelieristeeseen aiheuttavat kaapeleihin kohdistuvat mekaaniset, termiset ja sähköiset kuormitustekijät. Öljy, joka on orgaaninen aine, vanhenee hapen vaikutuksesta kun hiilivetymolekyylit hapettuvat vetyperoksidiksi. Öljyyn muodostuu epäpuhtauksia, kun vetyperoksidi hajoaa ja muodostaa vapaita radikaaleja. Ilman ulkoista vauriota öljyn vanheneminen on hidasta, koska öljyosan suojavaippa estää hapen ja kosteuden tunkeutumista öljyyn.

Paperi haurastuu eliniän aikana selluloosakuitujen katkeillessa. Vesi ja happamat yhdisteet nopeuttavat hajoamisprosessia. Paperin hajoaminen on kiihtyvä prosessi, sillä hajotessaan paperi synnyttää vettä, hiilidioksidia ja happamia yhdisteitä. Hajoamistuotteena syntyvät kaasut muodostavat kaasuonteloita eristeeseen syrjäyttäen öljyn. Ontelot edistävät osittaispurkausten syntyä ja vanhenemisprosessi kiihtyy entuudestaan. Öljypaperieriste on hieman itseään korjaava, sillä eristeen öljy täyttää onkaloita liikkessaan. Tämän takia öljypaperieristeiset maakaapelit kestävät osittaispurkauksia kohtuullisen hyvin.

Muovieristeisissä maakaapeleissa keskijänniteverkossa nykyisin eniten käytetty eristemateriaali on *ristisilloitettu polyeteeni* eli *PEX*. PEX-muovit vanhenevat mekaanisen, kemiallisen ja sähköisen rasituksen vaikutuksesta.

Polyeteenin polymeerin kiderakenteet muokkautuvat ajan kuluessa lopulliseen muotoonsa, tämän vuoksi eristeen kiderakenteeseen saattaa muodostua pieniä koloja tai tihentymiä. Myös mekaaniset rasitukset muokkaavat kiderakennetta. Eristeen sisäiset onkalot ja tihentymät ovat alttiita osittaispurkauksille sähkökentän muutoksista johtuen.

Vesipuu voi muodostua eristeen sisään valmistusvaiheessa jäävästä, ulkokuoren läpi diffuusion kautta johtuvasta tai reiän ja kaapelipäänteen kautta kulkeutuvasta kosteudesta. Sähkökentän vaikutuksesta kosteus saa puumaisen rakenteen. Pahin vesipuu-tyyppi on *vented*-puu. Vesipuun vaikutus eristeeseen esitetään kuvassa 10. Se syntyy kosteuden kuljettua PEX-eristeen ja puolijohtavan kerroksen rajapintaa. Ajan myötä vesipuu kasvaa sähkökentän vaikutuksesta ja saattaa lopulta lävistää koko eristekerroksen, mikäli eriste ei missään vaiheessa ehdi kuivua.



Kuva 10. Eristeen läpäisevä vesipuu [10]

Sähköpuut (kuva 11, ks. seur. s.) saavat alkunsa PEX-eristeessä olevista likahiukkasisista, onkaloista ja vesipuista, jotka muodostavat eristeeseen epähomogeenisen rakenteen. Tästä syystä sähkökenttä eristeessä on myös epähomogeeninen.

Se aiheuttaa osittaispurkauksia, joiden vaikutuksesta epäpuhtaudet, vesipuut ja onkalot muodostuvat puuta tai pensasta muistuttaviksi onkaloiksi eli sähköpuiksi. Puut suurenevat ajan kuluessa kun osittaispurkauksia tulee lisää.

Toisin kuin vesipuut, sähköpuut eivät koskaan korjaannu vaan kasvavat molempiin suuntiin ja johtavat lopulta läpilyöntiin hohtosuojaan ja johtimen välillä. Läpilyönti tapahtuu muutaman päivän tai vasta kymmenien vuosien päästä, vaurion tyypistä riippuen.



Kuva 11. Sähköpuu eristeessä [10]

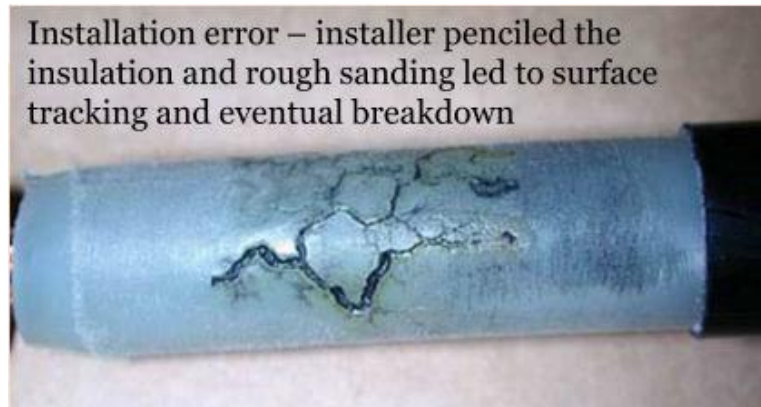
Osittaispurkausten kannalta PEX-eriste on huonompi kuin öljypaperieriste, joka saattaa korjata itsensä, kun eristevaurio on pieni. Jo pienetkin osittaispurkaukset ovat ajan myötä tuhoisia PEX-eristeiselle kaapelille. [4, s. 178–182; 10, s. 7-11.]

3 Osittaispurkaus

Osittaispurkaus (*partial discharge, PD*) on pieni sähköinen purkaus tai kipinä, joka esiintyy suurjänniteverkon komponenttien eristeen sisällä tai pinnalla, mikäli eristeen sähkökenttä ylittää kyseisen komponentin sähköisenlujuuden paikallisesti. Osittaispurkaus ei nimensä mukaisesti sulje johtavaa elektrodiväliä kokonaan. *IEC 60270* -standardi määrittelee osittaispurkauksen paikalliseksi sähköpurkaukseksi, joka vain osittain yhdistää eristeen elektrodien välillä [11, s. 11.]. Purkauksien syntymistä auttavat eristeen valmistusvirheet, asennuksen (kuva 12, ks. seur. s.) ja kuljetuksen aikainen vioittuminen sekä ylikuormitustilanteet ja käyttöympäristö. Komponenttien nimellis-

jännite, toimintalämpötila, eristeen materiaali sekä eristeaurion tyyppi, laajuus ja sijainti vaikuttavat siihen, millainen on purkauksen tyyppi ja suuruus. Purkaustyyppejä on useita, mutta maakaapeliverkon kannalta eristeen sisäiset osittaispurkaukset ovat tärkeimmät ymmärtää. Purkaustyyppejä käsitellään tarkemmin luvussa 3.1.

Ajan saatossa purkaukset laajentavat eristeauriota entuudestaan ja lopulta päivien tai jopa kymmenien vuosien kuluessa komponentti hajoaa purkausten johdosta. [12.]



Kuva 12. Asennuksen aikainen virhe johtaa läpilyöntiin [13]

Eristeaineella tai käyttöjännitteellä ei ole merkitystä purkauksien syntyyn, sillä osittaispurkauksia esiintyy tasa- ja vaihtojännitteellä kaasu-, neste- ja kiinteäeristeissä. Kuitenkin vaihtojännitteellä osittaispurkausten merkitys on suurin, koska purkaukset usein toistuvat joka jaksolla. Tasajännitteellä purkauksia esiintyy vain jännitteen muutostilassa. [4, s. 76–91.]

Osittaispurkauksessa siirtyvä sähkövaraus olisi selkein purkausten suuruutta kuvaavaksi mitaksi, sillä vian suuruus ja eristyksen heikentyminen ovat verrattavissa purkauksen voimakkuuteen. Koska siirtyvää varausta ei voida mitata, käytetään mittana osittaispurkauksen näennäisvarausta (q), joka kuvaa varauksen muutosta eristysrakenteen liittimissä. Näennäisvaraus ei ole samansuuruinen kuin todellinen purkauksessa siirtyvä varaus, mutta osittaispurkauksen teho ja energia sekä vian suuruus ovat verrattavissa näennäisvaraukseen. *IEC 60270* -standardi määrittelee näennäisvarauksen seuraavasti:

Osittaispurkauksen virtapulssin näennäisvaraus on se yksinapainen varaus, joka tuotuna hyvin lyhyen ajan sisällä koekappaleen liittimiin tietyssä testauskytkennässä antaisi saman mittauslaitteen näyttämän kuin osittaispurkauksen virtapulssi itse. Näennäisvarauksen mittayksikkönä käytetään tavallisesti pikocoulombia (pC). [11 s, 20.]

Näennäisvarauksen mittana käytön huonona puolena on se, että näennäisvaraus on verrannollinen koko eristeen paksuuteen. Tällöin ohuella eristerakenteella purkaus näyttää suuremmalta kuin paksulla rakenteella.

Osittaispurkauksen voimakkuutta voidaan myös kuvata syttymisjännitteellä U_i ja sammumisjännitteellä U_e , joita käsitellään seuraavassa kappaleessa.

Purkauksia voidaan tutkia useilla integroiduilla kaavoilla, jotka kerrotaan alla. Tärkeimpinä arvoina voidaan pitää purkauksen lukumäärää n aikayksikössä, keskimääräistä purkausvirtaa I , purkauksen energiaa w , purkaustehoa P ja koejännitteen vaihekulmaa ϕ_i , jossa purkaus syttyy.

$$I = \frac{\sum_i |q_i|}{T} \quad (1)$$

missä,

q_i on kunkin purkauksen näennäisvaraus

T on koejännitteen jakson aika

$$w \approx \frac{1}{2} q_i u_i \quad (2)$$

missä,

u_i on kunkin eristysrakenteen yli vaikuttavan jännitteen hetkellisarvo kunkin purkauksen q_i esiintymishetkellä. [4.]

$$P = \frac{\sum_i q_i * u_i}{T} \quad (3)$$

$$\phi_i = 360 \frac{t_i}{T} \quad (4)$$

missä,

t_i on mitattu aikaero koejännitteen polariteetin vaihtumisen negatiivisesta positiiviseksi ja purkauspulssin esiintymisen välillä [5.].

Integroituja suureita tarkastellessa on syytä ottaa huomioon se, että harvat suuret ja monet pienet purkaukset voivat keskimäärin antaa samat arvot. Parhaan kokonaiskuvan purkauksista saa tarkastellessa integroitujen suureiden kanssa purkauksen tilastollisia arvoja sekä vaihe- ja aikajakaumia. [4, s. 84–86.]

Yksi keskeinen tieto mittaustuloksen kannalta on määrittää osittaispurkauksen aikaansaaman virtapulssin etenemisnopeus (v) kaapelissa. Etenemisnopeus riippuu kaapelin ominaisuuksista.

Mittausvaiheessa kalibroinnin aikana mitataan etenemisnopeus, joka on laskettavissa kaavalla 5. Jotta etenemisnopeus voidaan selvittää, tulee tietää mitattavan kaapeliyhteyden pituus l .

$$v = \frac{2l}{\Delta t_{cal}} \quad (5)$$

, missä

Δt_{cal} on kalibrintipulssin ja heijastuspulssin välinen aikaero

Osittaispurkauksesta syntyy virtapulssi, joka kulkee samansuuruuisena molempiin suuntiin kaapelia. Mittauksessa havaitun osittaispurkauksen sijainti (x) kaapelissa mittauspäästä lukien voidaan selvittää seuraavien kaavojen avulla. Kuvassa 13 esitetään (ks. seur. s.) osittaispurkauspaikan sijainnin selvittämisen mallipiirros. [14.]

$$t_1 = \frac{x}{v} \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{2l-x}{v} \quad (7)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (8)$$

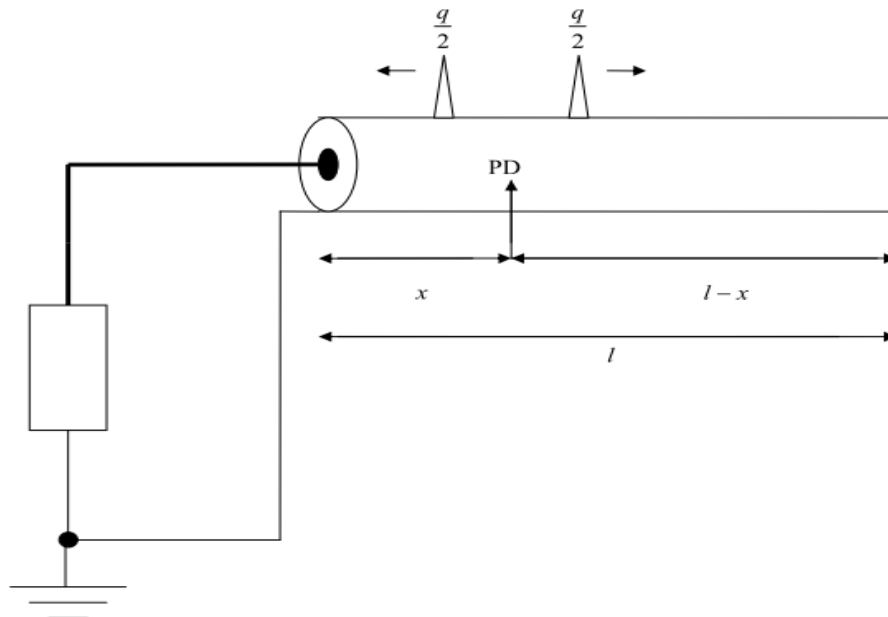
$$x = l - \frac{v\Delta t}{2} \quad (9)$$

, joissa

t_1 on osittaispurkauspulssin kulku-aika mittauspäähän

t_2 on heijastuneen pulssin kulku-aika mittauspäähän

Δt on pulssien välinen aikaero



Kuva 13. Osittaispurkauksen sijainti kaapelissa [14]

3.1 Osittaispurkaustyypit

Osittaispurkauksilla on monenlaisia fysikaalisia ja kemiallisia vaikutuksia eristerakenteeseen ja ympäristöön. Vaikutukset ovat erilaisia eri purkaustyypeillä. Osittaispurkaukset luokitellaan niiden esiintymispaikan perusteella kolmeen eri luokkaan, joita ovat eristeen sisäiset osittaispurkaukset, eristeen pinnalla tapahtuvat pintapurkaukset ja avoimella johtimen pinnalla tapahtuvat koronapurkaukset. Luokittelun avulla purkauksen havainnon vakavuutta on helpompi arvioida, sillä toiset osittaispurkaustyypit ovat toisia haitallisempia. Maakaapeleille ja myös muille komponenteille vaihtojännitteellä tapahtuvat sisäiset osittaispurkaukset ovat haitallisimpia. Osittaispurkauksiin luetaan yleensä myös kahden elektrodin välillä tapahtuvat kipinäpurkaukset. [11.]

3.1.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Eristeen sisäinen osittaispurkaus tapahtuu eristeessä olevissa onteloissa, halkeamissa ja sähkö- tai vesipuissa. Tästä purkaustyypistä erityisen haitallisen tekee purkauksen havaitsemisen vaikeus, sillä purkauksen vaikutusta ei voida nähdä eristeen pinnalta suoraan ilman sitä varten tehtyjä mittalaitteita. Lisäksi sisäinen purkaus jättää aina pysyviä kulumia eristerakenteeseen.

Purkaus ontelon sisällä synnyttää erilaisia kaasuja ja happoja, jotka syövyttävät eristettä. Maakaapeleiden kunnonhallinnan kannalta sisäiset osittaispurkaukset ovat merkittävimpiä haittatekijöitä. [4, s. 77–81.]

3.1.2 Pintapurkaukset

Pintapurkaus tarkoittaa kahden eristeenrakenteen rajapinnalla syntyvää osittaispurkausta. Erityisesti nesteen tai ilman ja kiinteän eristeen rajapinnat ovat alttiita purkauksille. Liukupurkaus on voimakkain ja haitallisin pintapurkaus. Se syntyy eristeiden rajapinnalla, kun sähkökentällä on riittävän suuri rajapinnan suuntainen komponentti. Rajapintaa vastaan kohtisuora sähkökentän komponentti korostaa purkauksen ilmiötä. Liukupurkaukset kuluttavat orgaanisia eristeitä nopeasti vaurioittaen kiinteän eristeen pintaa – erityisesti pitkät ja voimakkaat liukupurkaukset ovat ongelmallisia. Myös radiohäiriöt ovat mahdollisia. Maakaapeliverkon kannalta liukupurkaukset ovat haitallisia, koska läpivientieristimet ja kaapelipäätteet ovat niille alttiita. [4, s. 81–83.]

3.1.3 Koronapurkaukset

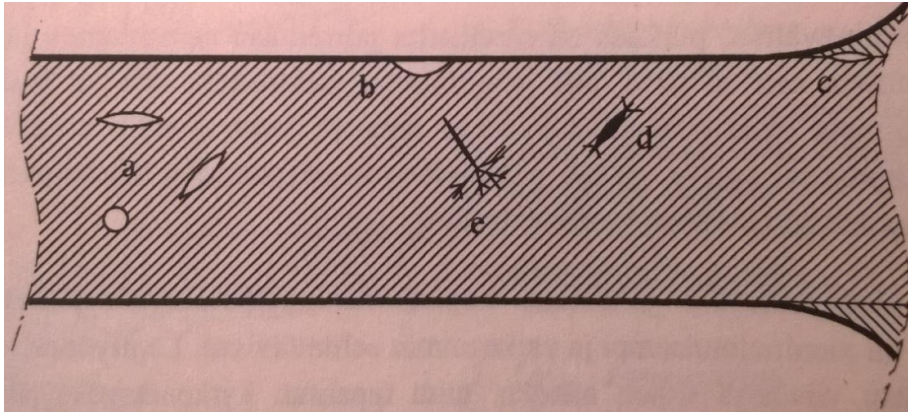
Koronapurkaus tapahtuu elektrodin pinnalla ilmassa tai muussa kaasussa. Niille alttiita paikkoja ovat avojohdot ja suurjännitteisten osien terävät kärjet esimerkiksi kytkinlaitteissa. Koronaa voi esiintyä myös maapotentiaalissa terävien särmien ympärillä, jos sähkökenttä on riittävän voimakas ja vääristynyt. Negatiiviset ja positiiviset puolijaksot aiheuttavat erilaiset koronapurkaukset. Koronapurkaukset eivät ole yhtä haitallisia kuin pinta- ja eristeen sisäiset purkaukset, mutta mittaustekniikan kannalta ne voivat peittää alleen haitallisimpia osittaispurkaussignaaleja. Hyvää hyötysuhdetta sähkönjakeluun ei voida saavuttaa, jos koronapurkauksia sallitaan, koska ne tuottavat huomattavia tehohäviöitä. Koronapurkausten synnyttämät otsoni ja typpihapot voivat vaurioittaa lähellä olevia muita eristemateriaaleja ja rakenteita.[4, s. 86–87.]

3.2 Purkausten syntyminen ja ilmeneminen

Sisäiset osittaispurkaukset ovat maakaapeleiden kannalta haitallisimmat. Muutkin purkaustyytit muistuttavat syntymekanismiltaan sisäistä osittaispurkausta. Keski- ja suurjänniteverkon komponenttien eristeissä erilaiset kaasuontelot, epäpuhtaudet, eristeiden

rajapinnat ja terävät kärjet aiheuttavat pienille alueille epähomogeenistä sähkökentän tihentymää.

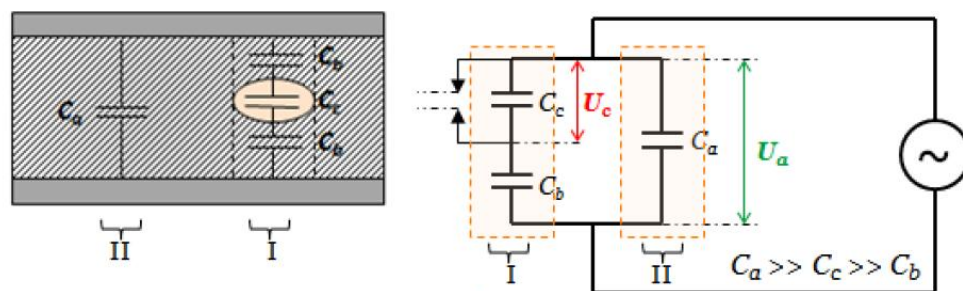
Näille pienille alueille syntyy normaalia ympäröivää sähkökenttää voimakkaampia kenttiä. Mikäli kohdissa syntyvän kentän voimakkuus on eristeen sähköistä lujuutta suurempi, voi osittaispurkauksia syntyä [11.]. Kuvassa 14 esitetään vioille alttiita paikkoja eristeessä.



Kuva 14. Osittaispurkauksille alttiita vika paikkoja eristeessä [4]

- a) kaasuontelo eristeessä b) ontelo eristeen ja metallin rajapinnalla c) ontelo eristeiden rajapinnalla d) eristeessä olevan metallihiukkasen tai muun vieran hiukkasen ja varsinaisen eristeen rajapinnat e) jo kehittyneet sähköpuu

Teoreettisella tasolla osittaispurkauksiin liittyviä perussuureita ja ilmiöitä kuvataan eristerakenteeseen perustuvalla kolmikapasitanssimallilla. Eristeen sisällä olevassa pienessä kaasuohtelossa osittaispurkaus on hyvin nopea, eikä ulkoinen piiri ehdi vaikuttaa ilmiöön. Kolmikapasitanssimalli esitetään kuvassa 15, jossa C_a on ehjän eristeen kapasitanssi, C_b on ontelon kanssa sarjassa olevan eristeen kapasitanssi ja C_c on ontelon kapasitanssi [4, s. 77–81].



Kuva 15. Sisäisen osittaispurkauksen kolmikapasitanssimalli [4]

Kaasuontelon syntyvä jännite U_c (kaava 10) on verrannollinen koko eristerakenteeseen vaikuttavaan vaihtojännitteeseen U_a , joka puolestaan jakautuu kääntäen kapasitanssien suhteessa.

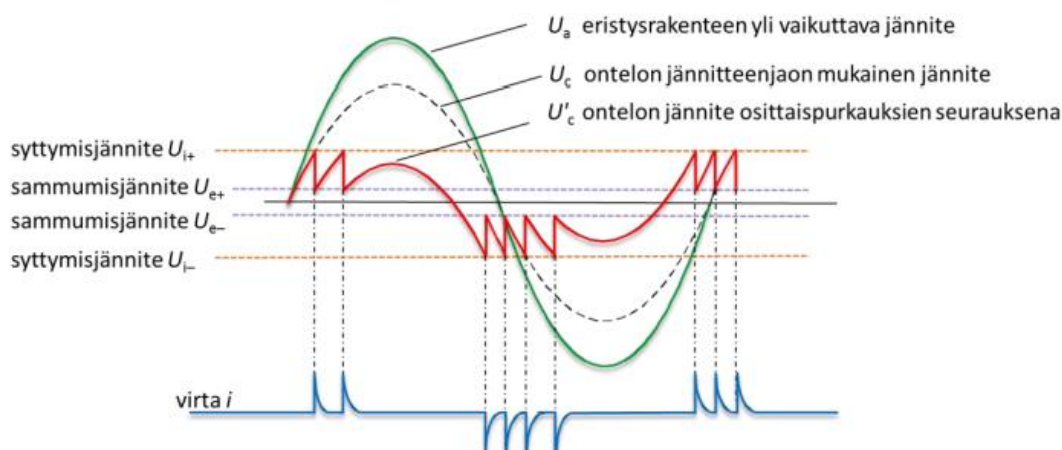
$$U_c = \frac{C_b}{C_c + C_c} U_a \quad (10)$$

Kuten todettua, sähkökentän voimakkuus ontelossa on suurempi kuin ympäröivässä eristeessä. Kun ontelon yli vaikuttavaa jännitettä nostetaan, ontelossa syttyy osittaispurkaus tietyllä syttymisjännitteellä U_i . Purkauksen seurauksena osa ontelon varauksesta siirtyy ontelon toiselle seinälle, joka johtaa ontelon jännitteen pienenemiseen ja lopulta purkaus sammuu tietyllä sammumisjännitteellä U_e . Standardi *IEC 60270* määrittelee syttymis- ja sammumisjännitteet seuraavasti:

U_i , eristysrakenteeseen vaikuttava jännite, jolla havaitaan ensimmäisen kerran toistuvia tietyn suuruisia osittaispurkauksia, kun jännitettä suurennetaan vähitellen.

U_e , eristysrakenteeseen vaikuttava jännite, jolla toistuvia tietyn suuruisia osittaispurkauksia ei enää esiinny, kun jännitettä lasketaan vähitellen. [11, s. 21.]

Koska eristeen johtavuus on hyvin pieni, säilyy tämä varauksen muutos aina uuteen purkaukseen asti. Purkauksen sammuttua ontelon jännite alkaa seurata alkuperäisen kapasitiivisen jännitejaon mukaista vaihtojännitteen käyrää, korjattuna varauksen muutosta vastaavalla syttymisjännitteen suuruisella tasajännitekomponentilla. Osittaispurkaus ja varauksen muutos näkyvät virtapulsseina eristysrakenteen liittimistä. Virtapulssi tuo purkauksessa poistuneen energian takaisin eristysrakenteeseen energiatasapainon säilyttämiseksi. Tapahtumaketju esitetään kuvassa 16. [11.]



Kuva 16. Osittaispurkauksen aikaiset jännitteen ja virran käyrämuodot [11]

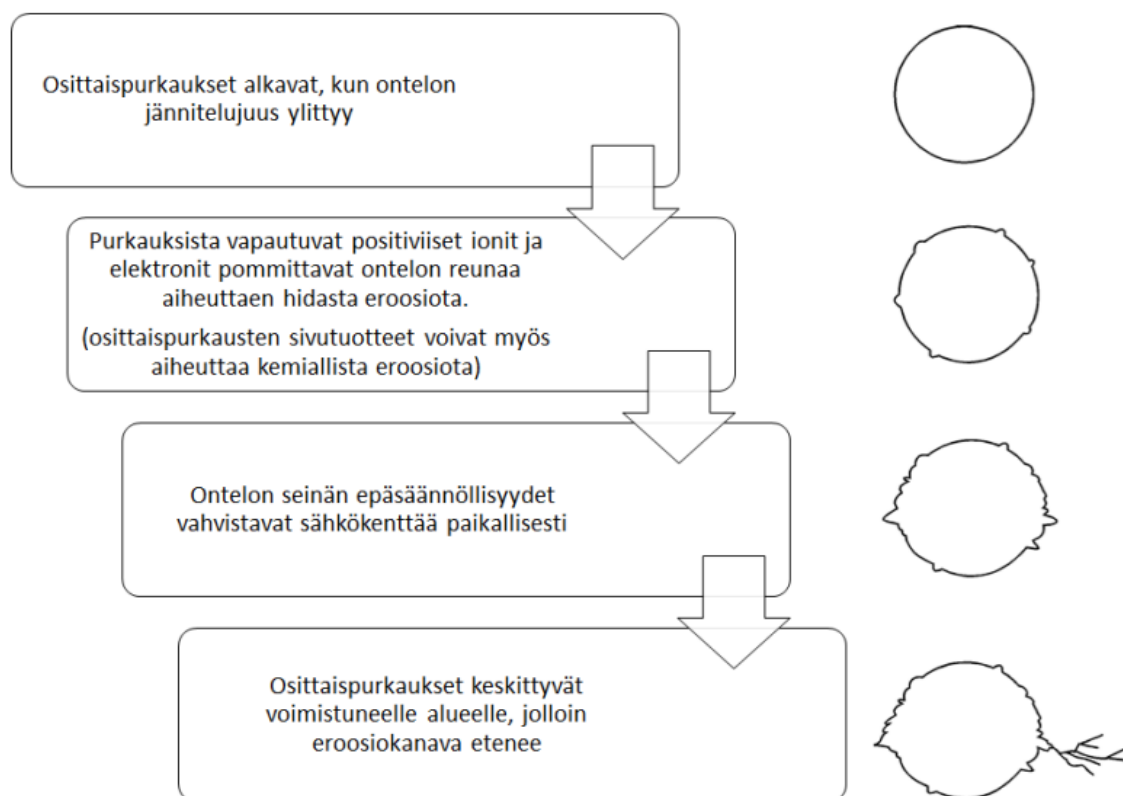
3.3 Vaikutus kaapeleihin ja eristeeseen

Osittaispurkauksilla on monia fyysisiä ja kemiallisia vaikutuksia maakaapeleihin ja niiden eristeisiin. PEX-eristeisille kaapeleille osittaispurkaukset ovat vahingollisempia kuin öljypaperieristeelle.

Osittaispurkaukset kuluttavat öljypaperieristettä kemiallisesti sekä fyysisesti. Purkauksen seurauksena vapautuva energia kuumentaa eristettä paikallisesti ja aiheuttaa eristeelle mekaanista rasitusta ja kulumista. Purkauksen aiheuttamat kaasuntelot sekä kemiallisen reaktion synnyttämät hiilihiukkaset syrjäyttävät eristeöljyä, jonka seurauksena eristeen sähköinen lujuus heikkenee. Sähköisen lujuuden heikentyminen johtaa helposti laajenevaan osittaispurkausalueeseen ja lopulta ajan kuluessa lopulliseen läpilyöntiin ja kaapelin hajoamiseen.

Myös PEX -eristeellä purkausten energia tuottaa lämpöä, joka kuormittaa eristettä mekaanisesti. Jo 30 °C lämpötilan nousu normaalista 90 °C lämpötilasta aiheuttaa eristerakenteelle pysyviä muutoksia. Pitkään jatkuva voimakas lämpeneminen pehmentää eristettä, jonka seurauksena johdin voi siirtyä eristeen keskeltä sivulle. Kun johdin ei ole keskellä eristettä tapahtuu sähkökentän vääristymistä eristeessä, joka puolestaan altistaa uusille ja voimakkaammille purkauksille tai suoraan läpilyöntiin.

Kemialliset vaikutukset saavat alkunsa kun purkausonteloon vapautuu purkauksen seurauksena positiivisia ioneja ja elektroneja, jotka pommittavat ontelo reunoja. Purkauksen kemiallisen vaikutuksen seurauksena syntyy typpioksidia ja otsonikaasua, joka rappeuttaa eristemuovia. Typpioksidin reagoiessa esimerkiksi vesipuussa olevan kosteuden kanssa syntyy typpihappoa, joka myös rappeuttaa eristettä. Eristeen sisäisen ontelon kasvamisprosessi osittaispurkausten vaikutuksesta kuvataan kuvassa 17 (ks. seur. s.). [4, s. 76; 14; 15.]



Kuva 17. Sähköpuun syntymekanismi [11.]

4 Osittaispurkauksen mittaaminen

Osittaispurkausmittauksia tehdään, jotta varmistetaan, että kaapeleiden ja kaapelivarusteiden laatu tuotannossa ja asennuksen jälkeen ja, että kaapeliverkon komponentit täyttävät standardien mukaiset vaatimukset. Kansainvälinen sähkötekniikan standardointiorganisaatio *IEC* säätelee tuotannonaikaisille osittaispurkauksille raja-arvoja, jotka kerrotaan seuraavassa osiossa. Maakaapeleiden kunnonvalvonnassa ja elinikätkimyksissä käytetään myös osittaispurkausmittauksia käyttöpaikalla tehtävänä mittauksena.

Keskijänniteverkon uudisrakentamisessa käytettävät maakaapelit, esimerkiksi alumiini-voimakaapeli AHXAMK-W, ovat polyetyleni-eristeisiä kuten PEX-muovi. Polyetyleenit ovat herkkiä osittaispurkauksille, joten tehtailta valmistuvat kaapelit mitataan aina valmistajan toimesta heidän omissa testilaboratorioissaan ennen tuotteen toimitusta [16.]. Kaapeleihin ja kaapelivarusteisiin saattaa tulla vaurioita asennus- tai kuljetusvaiheessa.

Asennuksen jälkeisenä mittauksena osittaispurkausmittauksella voidaan muiden käyttöönottomittausten lisäksi varmentaa asennuksen laatu ennen kaapeleiden käyttöönottoa. Kaapeleiden käyttöön aikana niihin vaikuttavat mekaaninen rasitus ja ympäristölliset olosuhteet. Kunnonvalvontamittauksena PD-mittauksella voidaan käytönaikaiset vauriot ja eristeen kuluminen havaita ennen lopullista läpilyöntiä ja kaapelin hajoamista ja näin ehkäistä hajoamisesta johtuvaa sähkönjakelukeskeytystä.

Tehtaiden laboratoriotestit poikkeavat käyttöpaikkatesteistä joihin verran. Pelkästään testiolosuhteet ja mittaustoimenpiteet aiheuttavat sen, että mittatulokset laboratorioissa ja kentällä tehtäessä eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Laboratoriot ovat taustahäiriöiltä suojattuja, kun taas käyttöpaikalla kaikki samassa maadoituspiirissä olevat laitteistot aiheuttavat häiriötä mittaukseen. Teollisuusympäristö on hyvin altis taustahäiriölle taajuusmuuttaja- ja moottorikäyttöjen vuoksi. Häiriötaso laboratorioissa on tyypillisesti 2 - 3 pC ja kentällä tehtävissä mittauksissa 10 - 100 pC. [17;18.]

4.1 PD-mittaukset maakaapelikomponenttien tuotannossa

IEC 600270 -standardissa on määritetty 20 kV maakaapelien tyyppitestaukselle vaadittavaksi herkkyudeksi 5 pC. Reka-Kaapeli Oy:llä on testilaboratorio, jossa he mittaavat tehtaalta lähtevät kaapelit ja varmistavat, ettei valmistuksen aikana ole syntynyt vikoja. Täytyy kuitenkin muistaa, että vaadittavien tulosten saavuttamiseksi taustahäiriöt on eliminoitava, siksi tyyppimittaukset tehtailla tehdään erillisissä taustahäiriöiltä suojatuissa laboratorioissa. [16.]

Myös maakaapeliverkon varusteet, kuten kaapelijatkat ja -päätteet, mitataan aina uuden tuotteen tullessa tuotantoon tai tuotteisiin tehtävien muutosten jälkeen. Osittaispurkausmittausten lisäksi tuotteille tehdään jännitekokeet, joilla varmistetaan tuotteiden riittävä sähköinen lujuus. Testit tehdään komponentit asennettuna kiinni kaapeliin. Näin varmistutaan siitä, mikäli asennus tehdään ohjeiden mukaisesti, että varusteiden purkaustaso on laboratorioissa hyväksytyllä tasolla. Ensto Oy soveltaa *HD629.1S2*-standardia maakaapeliverkon varusteille. Testi alkaa jännitekokeella, jossa viiden minuutin ajan käytetään kaapelia ja komponentteja $4,5 \times U_0$ tyhjäkäyntijännitteellä (kuva 18, ks. seur. s.). U_0 jännitteellä tarkoitetaan normaalia käyttöjännitettä maapotentiaaliin verrattuna.



Kuva 18. Jännitelujuuskoe kaapelipäätteille ja jatkolle [17.]

Tämän jälkeen tehdään osittaispurkauskoe. Osittaispurkaustaso mitataan jännitteen arvolla $2 \times U_0$. Purkausmittauksessa jännite nostetaan ensin vähän yli mittaustason ja lasketaan $2 \times U_0$ tasolle, jossa osittaispurkausarvot kirjataan. Kun osittaispurkaus syttyy, jännite lasketaan hiljalleen nolnaan. Mittauksessa kirjataan ylös myös purkausten syttymis- ja sammumisjännitteet. Vaatimuksena purkauksille on 10 pC. Tyypillinen taustakohinataso Ensto Oy:n laboratoriossa on 3 pC. Osittaispurkausmittauslaitteisto on kuvassa 19 (ks. seur. s.). [17.]



Kuva 19. Osittaispurkausmittaus laboratorio olosuhteissa [17.]

4.2 PD-mittaukset jakeluverkossa käyttöpaikalla

Käyttöpaikalla tehtävät mittaukset voidaan jakaa kahteen ryhmään, *on-line*- ja *off-line*-mittaukset. *On-line*-mittauksella tarkoitetaan mittausta, joka suoritetaan kaapelin ollessa normaalissa käytössä ja *off-line*-mittaus taas suoritetaan erillisellä jännitelähteellä käyttöjännitteestä irtikytkettynä.

Käytönaikaiset eli *on-line*-mittaukset, voidaan toteuttaa erillisten mitta-antureiden avulla, esimerkiksi Rogowskin kela ja kaapeliverkossa jo asennettuna olevat mittamuuntajat. Suurjännitekaapeleille on kehitetty käytönaikaiseen mittaukseen soveltuvia anturiratkaisuja kaapelivarusteisiin integroituna. Mittatulosten käsittely on avainasemassa *on-line*-mittauksissa. *On-line*-mittausjärjestelmien kalleus on kuitenkin johtanut siihen, että *on-line*-mittauksia tehdään Suomessa ainoastaan tärkeimmille suurjänniteyhteyksille. Mittaajalta vaaditaan laajaa kokemusta ja perehtymistä tulosten analysointiin. [18.]

Toinen *on-line*-tekniikka on akustinen osittaispurkausmittaus. Akustisella menetelmällä voidaan paikantaa tarkat vikapaikat, mutta se soveltuu ainoastaan näkyvillä oleville kaapeleille ja kaapelivarusteille. Käytön aikaiset mittaukset suoritetaan käyttöjännitteellä [5.]. Akustinen mittaus on yksi käyttökelpoisimmista käytön aikaisista käyttöpaikkamittauksista, ks. 4.2.1.

Off-line-mittaukseen tarvitaan mitattavan kaapeliyhteyden irtikytkentä verkosta mittauksen ajaksi. Kaapelipäätteet irrotetaan kojeistoista molemmista päistä kaapelia ja mitataan kukin vaihe kerrallaan. Mittaus edellyttää ulkoista jännitelähdettä ja mittauslaitteistoa. Lähes kaikki Suomessa tehtävät keskijännitekaapeleiden PD-mittaukset suoritetaan nykyisin *off-line*-tekniikoita käyttäen. Käyttökelpoisimpia *off-line*-tekniikoita käyttöpaikkamittauksiin ovat *VLF*, eli matala taajuisella vaihtojännitteellä suoritettava PD-mittaus, ja *DAC* eli vaimenevalla vaihtojännitteellä suoritettava mittaus. Eri tekniikoilla tehtyjen mittausten vertailu on kuitenkin vaikeaa, sillä saadut tulokset poikkeavat hieman toisistaan. [18]. Useista julkaisuista ei suoraa syytä tulosten poikkeavuuteen löytynyt, mutta todennäköinen syy tähän on jännitteen erilaiset taajuustasot. Useiden toimittajien *off-line*-mittalaitteet mahdollistavat myös muita mittauksia. Suurimman hyödyn saa *tan-delta*-mittauksella. Kyseisellä mittauksella määritetään eristeen sähkönjohtavuus.

4.2.1 Akustinen PD-mittaus

Akustisella mittauksella voidaan helposti havaita kaapelipäätteissä, näkyvillä olevissa kaapeliosissa, muuntajissa ja SF₆-laitteissa esiintyvät osittaispurkaukset. Mittaus perustuu purkauksessa tapahtuvan värähtelyn muodostamaan äänisignaaliin. Mittalaitteet ovat ultraäänialueella toimivia. Nykyisin mittalaitteet ovat pienikokoisia ja akkutoimisia, tämän ansiosta mittaus on helppo suorittaa hankalissakin paikoissa eikä mittaus vaadi erillisiä mittauksen aikaisia toimenpiteitä. Mittauslaitteisto esitetään kuvassa 20 (ks. seur. s.).



Kuva 20. Akustinen PD-mittauslaite [13]

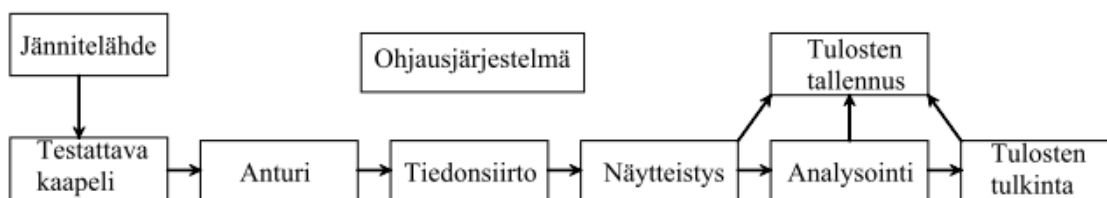
Koska mittaus tehdään käyttöjännitteellä ja kaapelin ja laitteiston ollessa normaalissa käytössä, täytyy mittaajan olla riittävän kaukana mitattavasta kohteesta turvallisuussyistä. Tämän takia mittaajan on käytettävä kohteen ja äänisignaalin vastaanottolaitteen välissä eristinsauvaa, joka kantaa signaalin mahdollisimman hyvin. Parhaan kontaktin mittauskohteeseen saamiseksi sauvan ja esimerkiksi kaapelipäätteen välissä käytetään ultraäänigeeliä. Äänisignaali vaimenee eristeessä nopeasti, siksi mittaus on tehtävä hyvin monesta eri kohdasta tutkittavaa kappaletta. Mittalaitteen on saatava jännitteen aaltomuoto tietoonsa, jotta voidaan arvioida, missä kohdassa jänniteaallon jaksoa purkaukset syttyvät. Tutkittavan vaiheen ja vertailujännitteen vaiheen ei tarvitse olla samat. Mittaustapahtuma esitetään kuvassa 21:



Kuva 21. Akustinen PD-mittaus turvaetäisyydeltä.

4.2.2 Off-line-mittauksen tekniikat

Sähköinen *off-line*-mittaus vaatii laajempaa mittalaitteistoa kuin akustinen mittaus. Lisäksi on huomioitava verkonkäyttöön ja sähkötyöturvallisuuteen liittyvät toimenpiteet, jotta mitattava kaapeliyhteys saadaan jännitteettömäksi. Oheinen lohkokaavio (kuva 22, ks. seur. s.) kuvaa mittalaitteiston vaatimuksista.



Kuva 22. Mittalaitteiston toiminnan kuvaus [5]

Systeemin jännitelähteen tehtävä on tuottaa mittauksen ajaksi vaadittava jännite, joka valitaan testattavan kaapelin mukaan. Jännitelähde voi olla joko VLF- tai DAC-tyyppinen. Anturin, joka on integroituna jännitelähteen rakenteeseen, tehtävä on mitata osittaispurkauspulssit ja tarvittaessa vahvistaa niitä. Anturilta tulevat pulssitiedot siirretään tiedonsiirtokaapelin, esimerkiksi optisen kuidun tai koaksiaalikaapelin, avulla analysointia varten analysaattoriyksikölle.

Analysaattorin avulla näytteet kerätään yhteen ja tehdään tarvittavat muokkaukset, esimerkiksi poistetaan selkeästi havaittavat mittavirheet. Tämän jälkeen tulokset tallennetaan ja tehdään johtopäätökset mitattavan kohteen kunnosta tulosten pohjalta. Tietojen tallennus on tärkeää, jotta saadaan kerättyä mahdollisimman laajasti mittatuloksia samantyyppisistä kaapeleista. Tämä helpottaa vertailua, kun seuraavan kerran testataan samaa tai samalla eristeellä olevia kaapeliyhteyksiä. Mittausta suorittavalta henkilöltä vaaditaan tarkkaa perehtymistä laitteistoon ja kaapelityyppien ominaisuuksien tuntemista, jotta saaduista tuloksista pystytään tulkitsemaan vikapaikat ja vikojen laajuus.

Ennen kuin mittaus voidaan aloittaa, mittalaitteisto täytyy kalibroida ja mitattavan kaapelin kapasitanssi mitata. Kalibroinnin tarkoituksena on löytää sopiva skaalauskerroin mittaukselle. Jo kalibrointivaiheessa tulee jännitelähde olla kytkettynä kaapeliin, koska myös sen ominaisuudet vaikuttavat mittaukseen. Mittausjännite ei kuitenkaan saa olla kytkettynä. Kalibrointi tulee suorittaa aina, kun mitattava kohde muuttuu, sillä kaapelin kapasitanssi vaikuttaa oleellisesti mittausherkkyyteen.

Kapasitanssiin vaikuttavat kaapelin pituus ja eristeen ominaisuudet. Kalibrointi tapahtuu liittämällä mitattavan kaapelin rinnalle kalibraattori mahdollisimman lyhyillä liitosjohdtimilla. Kalibraattori syöttää mittauspiirille kapasitiivisen varauksen kalibrintipulseina. Kolmivaiheissa kaapelissa yhden vaiheen kalibrointi riittää, sillä kaikki vaiheet ovat keskenään verrattavissa.

Kalibrointi aloitetaan suurella varauksella, esimerkiksi 50 nC, ja pienennetään kalibraattorin ominaisuuksien mukaisin askelin, kunnes saavutetaan taustahäiriöiden taso, esimerkiksi 100 pC. Kunkin askeleen kohdalla säädetään mittalaitteen vahvistus tai näyttämä vastamaan pulssin arvoa ja säädöt tallennetaan. Tällöin voidaan itse mittauksen aikana hakea osittaispurkausta vastaava säätöarvo. Mittauksen tarkkuus ja luotettavuus paranee, kun kalibrointi suoritetaan tarkasti ja valmistajan ohjeiden mukaisesti. [5;18;19.].

Mittausten kannalta normaalin käyttötaajuuden (50 Hz) käyttö mittauksissa olisi paras ratkaisu vertailtaessa tuloksia normaaliin käyttöön. Tässä ongelmana on suuri tehontarve jännitelähteeltä, siksi käyttötaajuuksista mittausta ei suoriteta. Mittauksessa kuluva teho on käytännössä kapasitiivista loistehoa (Q), joka on verrannollinen käyttötaajuuteen (f) ja -jännitteeseen (U) kaavan 11 mukaisesti. Mittauspiiri kuluttaa myös resistiivistä pätötehoa mm. lämpöhäviöiden muodossa, mutta pätötehohäviöt ovat verrattain pieniä.

$$Q = 2\pi f U^2 C \quad (11)$$

, missä

C on mittavan kaapelin ominaiskapasitanssi

Loistehon tarve korostuu varsinkin mitattaessa pitkiä kaapeliyhteyksiä, joissa maakaapelin kapasitanssi on suuri, ja käytettäessä mittausjännitteitä yli normaalin U_0 arvon. Kapasitiivinen loisteho olisi mahdollista kompensoida induktanssilla, mutta säädettävän kelan koko ja paino tulisi niin suureksi, että se ei ole kannattavaa. Tähän ongelmaan on kehitetty vaihtoehtoisia ratkaisuja, hyvin pieneen taajuuteen perustuva VLF-tekniikka ja resonanssiin perustuva DAC-tekniikka. [5.]

4.3 Eri sähköiset PD-mittaustekniikat

VLF-tekniikalla toteutetussa mittauksessa mitattavaan kaapeliin syötetään hyvin matalataajuisista vaihtojännitettä, joka on mittalaitteesta riippuen 0,1 - 0,01 Hz. Pienellä taajuudella toimivan laitteen etuna on noin 500 kertaa pienempi tehontarve verrattuna normaalilla 50 Hz käyttötaajuudella suoritettavaan mittaukseen. Tästä syystä mittalaitteistoista voidaan tehdä kooltaan pienempiä ja kustannuksiltaan alhaisimpia, ja käyttäjävälisempiä käyttöpaikalla suoritettavaan PD-mittaukseen.

Jännitelähde on rakenteeltaan yksinkertainen. Se sisältää tasajännitelähteen ja elektronisen ohjauspiirin, jonka avulla haluttu vaihtojännitemuoto saadaan aikaiseksi. Nykyisin laitteistot pystyvät tuottamaan pienitaajuisen siniaallon. Ennen on käytetty kosinikantti- ja puolisuunnikasaltoa.

Toinen jännitelähdetyyppi on DAC. Vaimeneva vaihtojännite perustuu resonanssipiiriin. Mitattavan kaapelin rinnalle kytketään mittauskuristin, joka toimii resonaattorina kaapelin kapasitanssille. Kaapelia ladataan ensin tasajännitteellä muutaman sekunnin ajan, jonka jälkeen jännitelähde kytketään irti ja kaapelin rinnalle kytketään kuristin. Jännite värähtelee piirissä kaavan 12 mukaisella resonanssitaajuudella (f). Taajuus on tyypillisesti 30 - 500 Hz. Jännite pienenee kohti nollaa piirin energian kuluessa lämpöenergiaksi kuristinkelassa ja kaapelin eristeessä.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

, missä

L on kuristimen induktanssi

C on kaapelin kapasitanssi

Matalataajuisen VLF-tekniikan on todettu soveltuvan parhaiten kaapelin eristeiden sisäisten vikojen löytämiseen ja DAC-tekniikan erilaisten rajapintavikojen ilmaisuun. Molemmilla tekniikoilla on kuitenkin mahdollista löytää kaikki merkittävät viat maakaapelista. Jännitteen muutosnopeus (du/dt) on VLF-jännitteellä pieni, joten eristeessä olevan ontelovaurion kasvu kestää kauemmin kuin DAC-jännitteellä. Tämä puoltaa VLF-tekniikan käyttöä, sillä eriste kestää mittauksen tuottamaa jänniterasitusta paremmin. Kuitenkin, jos ontelovaurio on jo kehittynyt sähköpuuksi, sen kasvunopeus on huomattavasti

suurempi matalataajuista jännitettä käyttäen, sillä jänniterasitus on VFL-mittauksessa pidempi kuin DAC-mittauksessa. Testausjännitteen taajuudesta riippuen näennäisvaraustasot, purkausten syttymisjännitteet, läpilyönnin riski ja purkausten havaitseminen saattavat vaihdella, tästä syystä eri tekniikalla tehtyjä mittauksia ei voida suoraan verrata toisiinsa. Mittatulosten käsittelijältä vaaditaan hyvää asiantuntemusta kaapelin kunnan arvioimiseen mittausten perusteella. Molempiin tekniikoihin perustuviin mittalaitteisiin voidaan myös yhdistää *tan-delta*-mittaus. [5.]

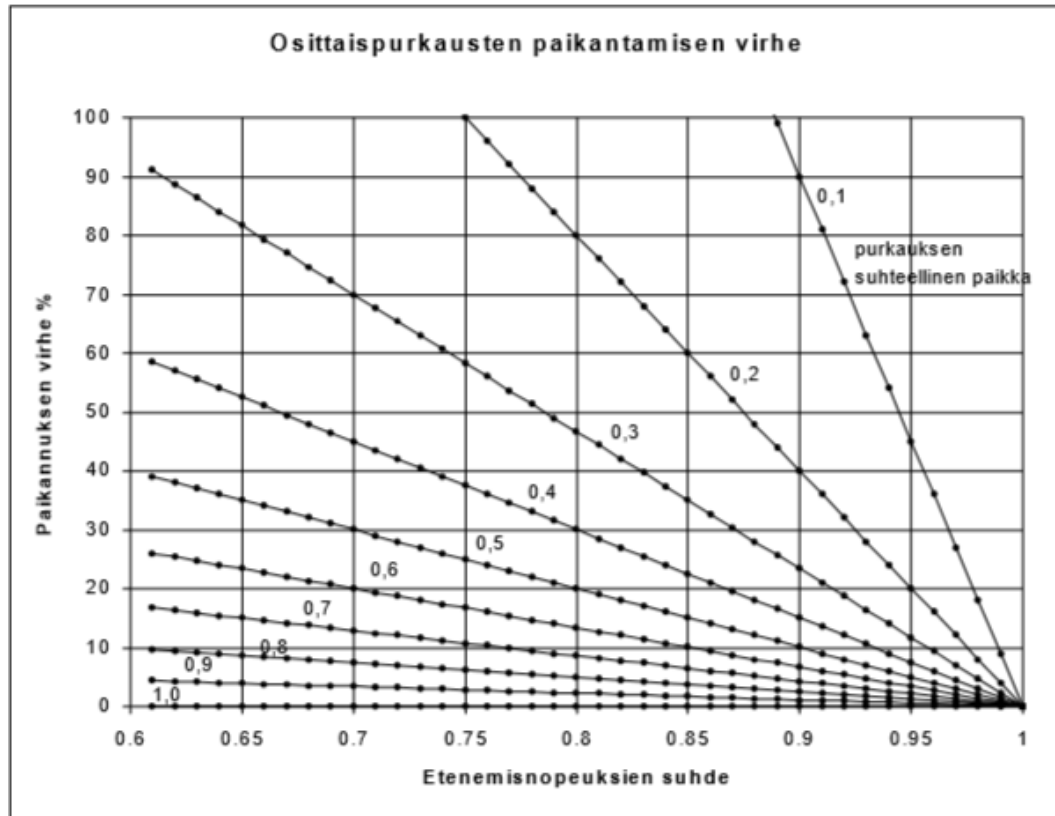
4.4 PD-mittaustulosten käsittely ja arviointi

Käyttöpaikalla mittausta tehtäessä voidaan jo mittauksen aikana tehtyjen havaintojen perusteella määrittää kaapelin kuntoa. Mikäli osittaispurkauksia alkaa ilmetä toistuvasti jo pienellä jännitetasolla, esimerkiksi $0,5 \cdot U_0$, voidaan todeta kaapelin olevan vahingoittunut. Mittaajan tulee tehdä päätös, nostetaanko jännitettä vielä vai tehdäänkö kyseiseltä jännitetasolta useampi mittaus ja tutkitaan mittadataa tarkemmin. Heti mittauksen jälkeen suoritetaan mittatuloksille nopea arvio mittavan kohteen kunnosta mittauspai- kalla. Tutkittavia asioita ovat syttymis- ja sammumisjännitteet, näennäisvaraustasot, purkausten lukumäärä, ja purkausten varaustason ja lukumäärän muutos jännitettä nosttaessa.

Kun jokaisen mittauksen tulokset on tallennettu mittauksen yhteydessä, voidaan niitä tutkia tarkemmin jälkeenpäin. Jotta osittaispurkaukset voidaan paikantaa, pitää mittausdatasta tunnistaa pulssiparit eli purkauksesta lähtenyt pulssi ja sen heijastunut pulssi. Monissa mittalaitteissa tunnistus tapahtuu automaattisesti, mutta tarvittaessa mittaajan on löydettävä ne manuaalisesti. Epäselvät tapaukset hylätään, jotta mittauksen tarkkuus paranee. Pulssiparien tunnistuksessa tulee ottaa seuraavat tekijät huomioon:

- Ensimmäinen pulssi on amplitudiltaan heijastunutta suurempi
- Heijastunut pulssi on leveämpi
- Polariteetit ovat molemmilla pulsseilla samat ja ne muistuttavat toisiaan
- Pulssit ovat taustakohinaa suurempia

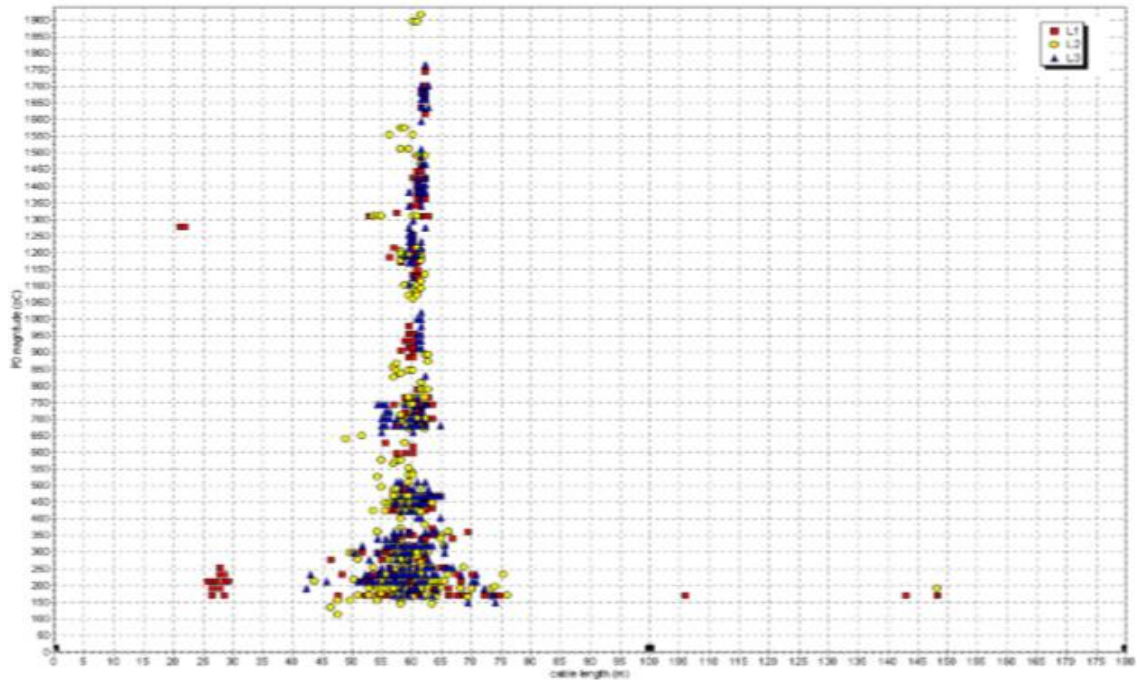
Kun pulssiparit on tarkastettu, nähdään ohjelmistosta osittaispurkausten paikka kaape-
lissa. Mikäli suuri määrä pulsseja osuu samalle kohtaa, voidaan todeta kyseisessä pai-
kassa olevan vika. Vikapaikkaa määrittäessä tulee huomioida mahdollinen virhe
pulssien etenemisnopeudessa. Virhettä voidaan arvioida mitatun ja laskennallisen ete-
nemisnopeuden suhteella. Kuvan 23 avulla virheprosentti voidaan määrittää.



Kuva 23. Paikannuksen virhe [5]

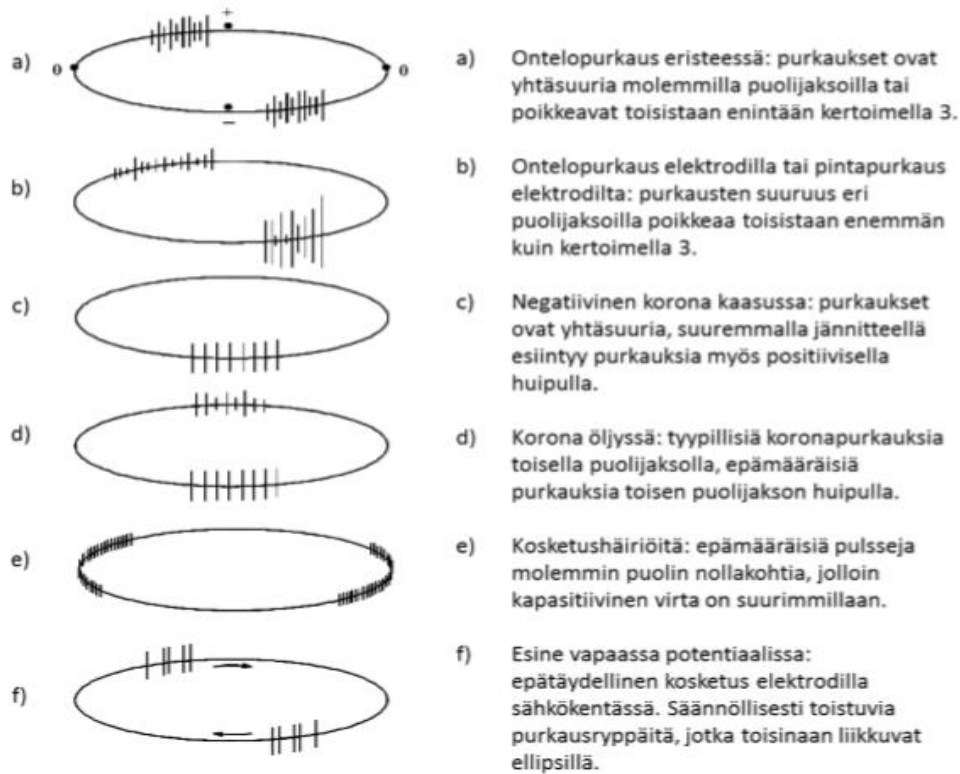
Purkausten näennäisvarausten suuruudesta ja syttymis- ja sammumisjännitteestä riip-
puen arvioidaan vian vakavuutta. Mitä alhaisemmalla jännitteellä purkaukset syttyvät,
sitä heikommin kaapeli kestää jänniterasitusta. Purkausten sammumisjännitteen tulisi
olla matalampi kuin syttymisjännitteen, koska purkaukset syttyvät aina helpommin en-
simmäisen havaitun purkauksen jälkeen. Purkaus on sitä vahingollisempi eristeraken-
teelle, mitä suurempi sen näennäisvaraus on.

Mittalaitteistojen ohjelmistot tekevät purkausten paikasta kuvaajan kaapelin pituuden suhteen. Kuvaajasta tulee hyvin tarkka, kun jokainen yksittäinen virheelliseltä vaikuttava purkauspiste tarkastetaan ja tehdään tarvittavat muokkaukset tai poistetaan piste kokonaan. Kuvasta 24 (ks. seur. s.) nähdään onnistuneen vianhaun tulos ja tarkka vikapaikka kaapelissa. Lähes kaikki pisteet sijoittuvat samaan kohtaan kaapelia ja korkeimmat pisteet, jotka omaavat korkeimman näennäisvarauksen sijoittuvat oletetun vikapaikan keskelle.



Kuva 24. Osittaispurkausten paikat kaapelin pituuden suhteen [5]

Purkaustyyppiä arvioitaessa pitää tutkia purkausten syttymistä koejännitteen vaihekulmaan nähden (kuva 25, ks. seur. s.). Ontelopurkaukset eristeen sisäisellä tai eristeiden rajapinnoilla syttyvät jännitteen nousevalla tai laskevalla reunalla, lähellä huippuarvoa. Koronapurkaus taas syttyy jännitteen negatiivisella tai positiivisella huipulla. Maakaapeleita ajatellen sisäiset ontelopurkaukset ovat haitallisimpia, eikä korona pitäisi edes ilmetä lukuun ottamatta kaapelipäätteitä. [11.].



Kuva 25. Purkausten syttymisen vaihekulma [11]

5 Verkko-yhtiöiden näkemys PD-mittauksista

Mittalaitteistoon investoinnissa, lisäkoulutautumisessa ja tuotteistustavan suunnittelussa tilaajien kiinnostus ja kysyntä maakaapeliverkon osittaispurkausmittauksia kohtaan on avainasemassa. Lopullisen kaupallisen tuotteen suunnitteluun ja mittauksen toteutustapaan vaikuttaa olennaisesti mittauksen määrä vuositasolla, mitattavien kohteiden määrän laajentuminen lähivuosina ja maantieteellinen alue, jossa mittauksia voitaisiin suorittaa.

Tulevan tilauskannan arvioimisen apuna käytettiin kyselymenettelyä eri verkkoyhtiölle pääkaupunkiseudun, Päijät-Hämeen ja Pirkanmaan alueilla. Kyselykaavake esitetään liitteessä 1. Kysely suoritettiin luottamuksellisena, joten tarkkoja verkkoyhtiöiden antamia vastauksia ei tässä työssä kerrota. Verkkoyhtiöiden lisäksi myös teollisuuden sähkökäytöissä on mitattavia kohteita. Erityisesti isojen teollisuuslaitosten omat sisäiset keskijänniteverkot ja keskijännitteellä toimivat sähkökäytöt ovat tehtaan tuotannon jatkuvuuden kannalta tärkeitä valvottavia ja kunnossapidettäviä kohteita, tästä syystä

niiden kunnonhallinta ja kunnossapito vaikuttavat myös teollisuuslaitoksen liiketoimintaan merkittävästi.

5.1 Verkkoyhtiöiden tilaamat PD-mittaukset nykyisin

Keskijänniteverkolle tehtäviä osittaispurkausmittauksia suoritetaan käytännössä vain kaupunkialueilla, joissa sähkönjakelu suoritetaan laajalti maakaapeleiden avulla. Tärkeimpiä mitattavia kohteita ovat sähkönjakelun kannalta suurimman keskeytysriskin omaavat kaapeliyhteydet. Esimerkiksi sähköasemalähdön ja ensimmäisen jakelumuuntamon välinen kaapeli ja tiettyjen valtion- ja kaupunkienlaitosten keskeytymätön sähkönjakelu on taattava. Mittauksia teetetään sekä uudisasennukselle, että kunnonvalvonnan osana. Erityyppisiä kaapeleita pyritään mittamaan, jotta saataisiin luotua niin sanottua sormenjälkikirjastoa kaapelityyppien ominaisuuksista ja niissä esiintyvistä osittaispurkauksista. Sormenjälkien keruulla helpotetaan mittatulosten arviointia ja vertailua keskenään samantyyppisissä kaapeleissa. Mittauksia on tehty vielä varsin vähän. Verkkoyhtiön kannalta mittauksen ja tulosten perusteella tehtävän kuntoarvion on oltava luotettava ja selkeä. Mittaustapana käytetään sekä *off-line*- että *on-line* -tekniikoita, riippuen mittavasta kohteesta, mittaavasta tahosta ja verkkoyhtiön tarpeesta.

5.2 PD-mittausten tulevaisuuden näkymät

Verkkoyhtiöiden kyselyvastausten perusteella tulevaisuuden mittauskantaa on vaikea arvioida, sillä useat vastanneista tahoista eivät ole tehneet suunnitelmia osittaispurkausmittausten käyttöönotosta. Kuitenkin yleisenä mielipiteenä todetaan osittaispurkausmittauksen olevan käyttökelpoinen sekä uudisasennuksella ja kunnonvalvonnessa. Lisääntyvän mittauskokemuksen ja laitteistojen kehityksen myötä mittausarkkuuteen ja mittatulosten perusteella tehtävään kunnonarviointiin ja vikapaikkojen eksaktiin paikantamiseen tulee lisää tarkkuutta ja luotettavuutta. Mittauslaitteiston käyttökokeemus lisää oman mittauspalvelun markkinointia. Pystyttäessä luotettavasti toteamaan kaapelin jäljellä oleva käyttöaika osittaispurkausmittauksen avulla ja laitteistojen hankintahintojen laskiessa, tulee kysyntä mittauspalveluista nousemaan.

Maaseutuverkkoja muutetaan koko ajan enenevässä määrin ilmajohdoista maakaapeleiksi. Kaapelointi toteutetaan nopealla ja kustannuksiltaan edullisella, mutta asennusteknisesti riskialttiilla aurausmenetelmällä, jossa kaapeliojaa tehdään kaivinkoneella auran avulla ja samanaikaisesti maakaapeli upotetaan kaapeliojaan. Maaperässä olevat kivet ja muu mekaanista rasitusta kaapelille aiheuttava maa-aines pyritään poistamaan esiaurauksella, mutta jos tämä työvaihe suoritetaan huolimattomasti jää maaperään helposti kaapeleita mekaanisesti rasittavia materiaaleja. Kaapelia ei asenneta suojaputkeen kuten tavallisesti. Auraustekniikassa käytettävät kaapelit ovat toki vahvempirakenteisia, mutta silti niihin voi tulla jo asennuksen aikana vikoja.

Oman näkemykseni mukaan käyttöönotettavien aurakaapelien osittaispurkausmittaus on tulevaisuudessa lisääntyvä asennuksen jälkeinen mittauspa. Kunnonvalvontamittauksena osittaispurkausmittaus antaisi hyvän mahdollisuuden aurakaapelien eliniän ja kulumisen seuraamiselle, sillä niiden käyttökokemus on vielä varsin vähäistä.

6 PD-käyttöpaikkamittauspalvelun tuotteistus

Insinööriyössä aikaisemmin tehdyn teoreettisen tutkimuksen perusteella ja huomioon ottaen omat sekä asiakkaidemme tarpeet nyt ja tulevaisuudessa, suunnittelimme asiakkaillemme myytävän osittaispurkausmittauspalvelun. Palvelu sisältää kaksi eri tuotetta, asennuksen jälkeisen osittaispurkausmittauksen ennen käyttöönottoa, sekä mittauksen kunnonvalvonnan työkaluna. Molemmat tuotteet hinnoitellaan erikseen, sillä kunnonvalvontamittaus sisältää enemmän valmistettavaa työtä sekä käyttökytkennät verkkoon. Tästä syystä mittausprojektit poikkeavat toisistaan ja vaativat eri hinnoitteluperusteet.

Mittaukset tehdään *off-line*-mittauksina, jota varten on hankittava mittalaitteisto. Mittalaitteiston vieminen kohteeseen vaatii pienen pakettiauton, joka sisältää suojarakenteita sähköturvallisuuden takaamiseksi. Lisäksi auton tulee sisältää käyttökytkentöihin vaadittavat laitteet, työmaadoitusköydet, invertteri ja pieni matkatoimisto Internet-yhteydellä, jotta saadaan tarvittaessa lisää esimerkiksi verkkokarttoja. Samalla kalustolla voidaan suorittaa sekä käyttöönotto- että kunnonvalvontamittaukset.

Alla luetellaan PD-mittauksen aikaiset työvaiheet pääpiirteittäin.

Enne mittausta:

- Lähtötietojen selvitys
- Käyttökytkennät, jos kyseessä kunnonvalvontamittaus
- Työmaadoitus, suojausten rakentaminen, päätteiden ja liitälaitteiden irrotus

Mittaus:

- Vaihekohtaisen kapasitanssin mittaus
- Kalibrointi
- Osittaispurkauskoe, lisäksi voidaan tehdä tan-delta-mittaus ja jännitelujuuskoe
- Nopea analyysin tuloksista ja mahdollisista vikapaikoista

Mittauksen jälkeen:

- Mittalaitteiston irrotus
- Suojausten purku ja päätteiden ja liitälaitteiden kiinnitys
- Kytkentöjen palautus
- Tarkempi kuntoanalyysi ja raportin laadinta toimistolla

6.1 PD-mittauspalvelun sisältö

6.1.1 PD-mittaus käyttöönottomittauksena

Tuote sisältää uuden tai korjatun kaapeliyhteyden käyttöpaikkamittauksen ennen kaapelin käyttöönottoa ja raportoinnin kaapeliyhteyden kunnosta. PD-mittaus tehdään kaikille uusille keskijännitekaapeliyhteyksille sekä vikaantuneille kaapeleille korjauksen jälkeen tilaajan toivomuksesta. Mittalaitteesta riippuen voidaan tehdä myös *tan-delta-mittaus*, sekä jännitelujuuskoe tilaajan vaatimusten mukaan.

Mittaukseen liittyvät valmistelut ovat varsin vähäisiä, sillä heti asennuksen jälkeen on tarkasti tiedossa kaapelipituus ja mahdollisten jatkojen paikat. Nämä lähtötiedot ovat kuitenkin tärkeitä mittauksen onnistumisen ja luotettavuuden kannalta. Ennen kaapelin varsinaista käyttöönottoa tehtävä mittaus on ajoitettava tarkasti osaksi verkonrakennusprojektia. Mittaus ei saa siirtää käyttöönottopäivää vaan se on ajoitettava tapahtuvaksi viimeistään suunniteltuna käyttöönottopäivänä. Mittaus itsessään vaatii aikaa muutaman tunnin työryhmän koosta riippuen. Sen lisäksi tehdään tarkempi analyysi kaapelin kunnosta, mutta se ei enää viivästyä kaapeliyhteyden käyttöönottoa. Jos heti käyttöpaikalla havaitaan selvä vika esimerkiksi kaapelijatkossa, voidaan se korjata ennen kuin verkonrakennushankkeen kaivutyöt tehdään loppuun. Tällöin vältetään turhata jatkomonttujen avaamiselta.

Uudisrakennus-projektissa tulisi tieto käyttöönottopäivästä saada vähintään viikkoa ennen mittauksia, jotta mittausjärjestelyt saadaan suunniteltua ja mitattavasta kohteesta saadaan kerättyä tarvittavat ennakkotiedot, joita ovat: kaapeliyhteys, kaapelityypit, jatkosten määrä ja sijainti sekä kaapelireitti. Tiedot vaikuttavat oleellisesti mittaukseen ja mittalaitteen kalibrointiin. Kuntoarvio ja vikapaikkojen löytäminen on sitä tarkempi, mitä tarkemmat ennakkotiedot ovat. Oman yhtiön verkonrakennus-projektissa tiedot ovat helposti saatavissa, mutta kun mittauksia tehdään muille, pitää riittävästä yhteydenpidosta huolehtia.

6.1.2 PD-mittaus kunnonvalvontamittauksena

Käyttöpaikkamittaus kunnonvalvontamittauksena sisältää myös PD-mittauksen sekä kohteen lähtötietojen hankinnan ja raportoinnin kaapelin kunnosta. Lisäksi *tan-delta*-mittauksen ja jännitelujuuskokeen tilaajan toivomuksesta.

Tarvittavat verkonkäyttökytkennät mittauskohteen jännitteettömäksi tekemiseksi tehdään tuntityönä, koska jokainen käyttökytkentä on erilainen riippuen kohteesta ja verkonkäyttötavasta.

Lähtötietojen hankinta ennen mittausta sisältyy kunnonvalvontamittaukseen. Tietojen tulee sisältää ainakin mitattavan kaapelin tyyppi, kokonaispituus sekä jatkojen ja päätteiden paikat. Lisäksi, jos kaapeliyhteys koostuu useammasta eri kaapelityypistä, on se tiedettävä, jotta voidaan laskea ja mitata osittaispurkauspulssien kulkunopeudet oikein. Lähtötietoihin kuuluu myös selvittää verkontila ja suunnitella käyttökytkennät ja työturvallisuuteen liittyvät asiat. Mittauksen aikana kaapelissa ei saa olla kytkettynä ylijännitesuojia, induktiivisia jännitemuuntajia, kuristimia, kondensaattoreita, pyöriviä koneita tai varokkeita [18.]. Tiedot kaapeliyhteyteen liitetystä laitteesta on hankittava kaapelin omistajalta ja ne on poistettava ennen mittauksen aloittamista.

6.2 PD-mittalaitteivaihtoehtojen kartoitus

Tuotteistukseen liittyy olennaisesti mittalaitteiston hankinta. Mittalaitteiston jälleenmyyjä on Suomessa muutamia, mutta itse laitevalmistajat toimivat Keski-Euroopassa ja Yhdysvalloissa. *Off-line*-mittaukseen on jokaisella valmistajalla tarjolla sekä DAC- että VLF-laitteistoja. Vaatimuksia mittalaitteelle on sen liikuteltavuus käyttöpaikalle, vähintään 28 kV tehollisen jännitteen tuotto sekä mittatulosten käsittelyohjelmiston on tuotettava raportti, josta ilmenee osittaispurkausten määrä, voimakkuus ja sijainti mitattavalla kaapelivälillä.

Mittalaitteiston tyyppin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat sen käytettävyys ja liikuteltavuus käyttöpaikalla, laitteiston tekninen monipuolisuus, mahdollisuus myös muihin mittauksiin ja hankintahinta. Laitteistovaihtoehtoista on tehty tarjouskysely, jonka perusteella laitevalinta tehdään.

Tarjouskyselyn perusteella VLF-laitteistot ovat hankintahinnaltaan halvempia. Hintaero selittyy sillä, että VLF-laitteet eivät tarvitse resonanssivaikutusta tuottavaa kelaa, vaan toimivat tehoelektronikalla. DAC-laitteissa on usein integroituna *tan-delta*-mittaus ja VLF-laitteisiin se pitää ostaa optiona. VLF-laitteilla voidaan tehdä jännitelujuuskoe, mikäli sen jännitteen tuotto on riittävä. Käytettävyydeltään VLF-laitteet ovat parempia, sillä niiden fyysiset mitat ja massat ovat pienempiä. Kaikista laitteista saa tarvittavan

raportin mittauksista. Mittatulosten käsittelyyn vaadittavasta ohjelmistoista emme ole saaneet käyttökokemuksia, mutta niiden käytettävyys ei riipu laitteiston tekniikasta, vaan valmistajan tuottaman ohjelmiston laadusta. Molemmat laitteet kykenevät mittaamaan sekä öljypaperi- että PEX-eristeisiä kaapeleita. DAC-laitteilla löydetään paremmin eristeiden välissä vaikuttavat liukupurkaukset ja VLF-laitteilla eristeen sisäiset purkaukset [14.].

Suomessa käytetään *off-line*-mittauksiin vain DAC-tekniikalla toimivia laitteita, mutta Keski-Euroopassa ja Ruotsissa käytetään VLF-laitteita. Erään laitetoimittajan mukaan DAC-tekniikka ei ole viime vuosina enää juurikaan kehittynyt, mutta VLF-tekniikkaan pohjautuvia laitteita kehitetään jatkuvasti. Suomessa on jo tehty PD-mittauksia DAC-laitteita käyttäen, joten sen tekniikan käyttö mittauksissa olisi perusteltua, sillä eri laitteilla tehtyjä mittauksia on hankala verrata keskenään.

7 Mittauspalvelun liiketoiminnan suunnittelu

7.1 Mittauspalvelun kustannusten muodostuminen

Mittalaitteistoille ei ole toistaiseksi näköpiirissä *leasing*-vaihtoehtoa, joten laitteiston ostoa tarkastellaan ensisijaisesti. Laitteiston hintaan vaikuttavat laitteen ominaisuudet, huippujännite ja lisäpalvelut. Näistä kaikista muodostuu kokonaishinta, joka tulee kattaa palvelun myyntituotolla jollakin ajanjaksolla. Tätä ajanjaksoa kutsutaan laitteiston takaisinmaksuajaksi. Mittalaitteiston tyyppi vaikuttaa myös siihen millaisen kaluston mittausryhmä tarvitsee. Isompi ja painavampi laitteisto vaatii myös raskaamman kuljetuskaluston, joka on kustannuksiltaan kalliimpi ja lisäksi sen käyttökelpoisuus kentällä on huonompi. Mittaustapahtumalle on varattava enemmän aikaa, jos laitteiston asettaminen toimintapaikalle vie kohtuuttomasti aikaa.

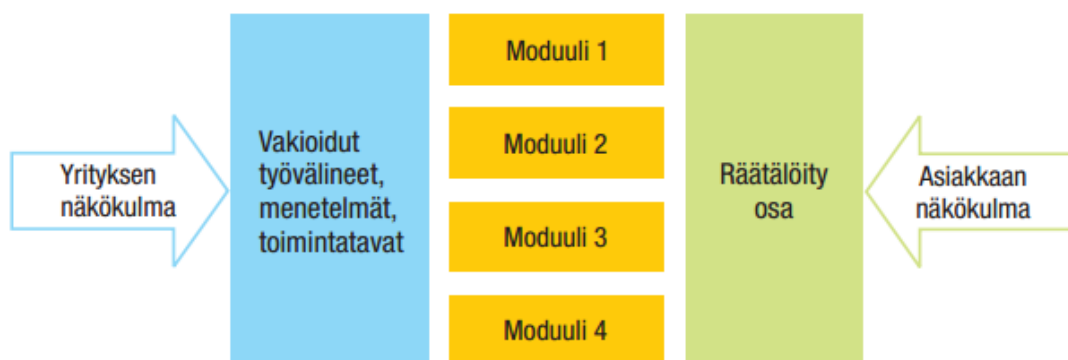
Muita kustannuksia tuottavat henkilöstökustannukset. Ennen mittausta kustannukset muodostuvat kohteeseen tutustumisesta, suojausten suunnittelusta mitattavan kaapelin avoinna olevaan päähän, ennakkotietojen hankkimisesta ja kohteen kulkuyhteyksien selvittämisestä. Mittauksen aikana mittausryhmän työaika ja mahdolliset käyttökytkenät, tarvittavien mittamuuntajien purku ja kaapelipäätteiden irrotus kojeistoista muodostavat kustannuksia. Tulosten käsittely ja kuntoarvioraportin laatiminen aiheuttavat mittauksen jälkeisiä henkilöstökustannuksia.

Muita huomioitavia kustannusten tekijöitä ovat laitteistojen ylläpito- ja huoltokustannukset sekä sähkötyöturvallisuuden takaamiseksi hankittavat suojarakenteet. Jotta saadaan tuotettua asiakkaille luotettava ja laadukas mittauspalvelu, on henkilöstöä koulutettava ja ammattitaito pidettävä ajan tasalla. Huollosta ja henkilöstön kouluttamisesta aiheutuvat kustannukset ovat kertaluontoisia. Niitä on vaikea arvioida suhteutettuna laitteen takaisinmaksuaikaan, mutta mittauspalvelun laatua niillä voidaan ylläpitää ja parantaa.

7.2 Palvelun hinnoittelun määrittäminen

Palvelun hinnoitteluun ja lopulliseen myyntihintaan vaikuttavat mittauksen aikaiset työ- kustannukset ja kaluston kustannukset sekä millaista lisäarvoa asiakas saa tuottamamme mittauspalvelusta ja kuinka suuri on haluttu tuottoprosentti. Tarjottavat lisäpalvelut, esimerkiksi käyttökytkennät ennen mittausta, aiheuttavat kuluja. Toisaalta lisäpalvelut ovat hyvä tapa erottua kilpailijoista. Parempi kilpailuasema antaa enemmän mahdollisuuksia palvelun hinnoittelulle. Hinnoitteluun vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon mittauksia uskomme myyvämme vuoden aikana, eli kuinka suuri on laitteiston käyttöaste.

Palvelu hinnoitellaan moduulimenetelmän avulla (kuva 26), jossa jokainen eri moduuli sisältää tietyn palveluosan. Näin yksittäisten palveluosien yhdistelmillä voidaan räätälöidä kutakin asiakasta parhaiten palveleva kokonaisuus. Moduulien hinnoitteluun vaikuttaa, kuinka paljon niihin kuluu työaika ja millaisen lisäarvon asiakas niillä saa. Mittauspalvelun lisäpalvelut, esimerkiksi käyttökytkennät jaotellaan omaksi moduuleiksi. Jos moduuleja on paljon, ne on helpompi hinnoitella, mutta asiakasta ajatellen liiallinen palvelun pilkkominen on hankaloittava tekijä. [20.]



Kuva 26. Palvelun moduulirakenne [20]

7.3 Markkinointi

Potentiaalisia asiakkaita ovat verkkoyhtiö toiminta-alueellamme. Erityisesti kaupunki- ja taajama-alueilla toimivat verkkoyhtiöt, joilla on laaja maakaapeliverkko. Haja-asutusalueiden ja maaseudun mittauskohteet ovat vielä vähäisiä, mutta lähivuosina laajentuvat maakaapeliverkot myös niillä alueilla, joten mittauspalvelun markkinoinnin aloittaminen haja-asutusalueille on syytä aloittaa ajoissa.

Toinen suuntautumissuunta verkkoyhtiöiden lisäksi on raskas teollisuus ja isot laitokset. Monissa teollisuuden kohteissa ja sairaaloissa on omia keskijänniteverkkoja, joiden toimintavarmuuden on oltava suuri. Näiden kaapeleiden mittaaminen ja kunnonarviointi olisi tärkeää, jotta voidaan arvioida ja suunnitella tulevaa huollon tarvetta. Mittaus kannattaisi ajoittaa huoltoseisakkeen ajaksi, jolloin sähkökatko ei ole haitallinen tehtaan tai laitoksen toiminnalle.

Mittauspalvelun markkinointi alkaa omien verkonrakennusprojektien yhteydessä. Tällöin voimme taata ja varmentaa oman asennuksen laadun. Samalla saamme arvokasta kokemusta mittauksista ja tulosten arvioinnista. Myöhemmin kyseeseen tulee kunnonvalvontamittaukset ja mittaukset myös muiden urakoitsijoiden hankkeisiin.

8 Yhteenveto

Osittaispurkausmittausten avulla verkonhaltija saa hyvän kuvan keskijännitekaapeleiden kunnosta ja eristeen tulevasta käyttöiästä. Verkkoyhtiöiden on myös tärkeää todeta asennusten laatu PD-mittauksen avulla. Kunnossapitoa ajatellen mittausten perusteella tehtävä kuntoarvio auttaa määrittelemään kriittisiä korjaustoimia vaativat kaapelit tai kaapelivarusteet. Kun osittaispurkausmittaukseen yhdistetään tan-delta-mittaus, havaitaan myös eristeessä olevat vesipuut, jotka eivät vielä aiheuta osittaispurkauksia. Vaikka merkittäviä osittaispurkauksia ei mittauksissa havaitaisikaan, saa kaapelin omistaja ja mittaava taho kasattua sormenjälkikirjastoa erityyppisistä kaapeleista. Tämän avulla voidaan myöhemmin vertailla mittatuloksia, ja käyttökunnon ja tulevan käyttöiän arviointi helpottuu.

Sähkökäyttäjien keskeytysaikoja voidaan lyhentää, kun tunnistetaan ajoissa riskialttiit kaapeliyhteydet ennen niiden hajoamista. Suunnitellun korjauksen aikaiset käyttökeskeytykset voidaan sopia etukäteen ja järjestää tarvittaessa varavoima kuluttajille, mikäli käyttöpaikka on kriittinen sähkönsaannista. Myös keskeytysaika on huomattavasti lyhyempi.

Teollisuuskohteissa sähkönsaannin jatkuvuus ja luotettavuus ovat yhtiön liiketoiminnan ja tuotannon jatkuvuuden kannalta tärkeitä. Laitoksen on toisin sanoen tiedettävä, missä kunnossa heidän sisäinen verkkonsa on ja suunniteltava kunnossapitotoimet sen avulla. Osittaispurkausmittaukset tärkeille keskijänniteyhteyksille huoltokeskeytyksen aikana helpottaisivat kunnossapitotoimien suunnittelua ja siten parantaisivat luotettavuutta.

Lopullisen osittaismittauspalvelun tuotteistuksen suunnittelu jatkuu vielä tämän insinöörityön tekemisen jälkeen. Teoreettisen taustatiedon hankinta ja sen omaksuminen osoittautui ennalta luultua isommaksi työksi. Kuitenkin tässä vaiheessa on selvää, että mittaukset tullaan suorittamaan *off-line*-tekniikalla. Sekä käyttöönottomittauksia että kunnonvalvontamittauksia tullaan tekemään PD-mittausta käyttäen, aluksi omissa verkonrakennusprojekteissa ja myöhemmin muille yhtiöille myytävänä palveluna. Mittalaitteiston hankintaa varten on tehtävä vielä vertailua ja jatkotutkimuksia.

Lähteet

- 1 Heikkinen Tuomo, Luentokalvot, Jakelujärjestelmien perusteet, Metropolia Ammattikorkeakoulu, luettu 5.2.2014
- 2 Lakervi Erkki, Partanen Jarmo, 2008, Sähkönjakelutekniikka, Gaudeamus Helsinki University Press, Otatieto, Helsinki, ISBN 978-951-672-357-3
- 3 Oy Nokia Ab Kaapelitehdas, Voimakaapelit ja asennusjohdot, Oy Kodaprint Ab, Espoo 1975, ISBN 951-99072-7-0
- 4 Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, Palva, 2011, Suurjännitetekniikka, Gaudeamus Helsinki University Press, Jyväskylä, ISBN 978-951-672-370-2
- 5 Hyvönen Petri, 2003, Lisensiaatintyö, Keskijännitteisten maakaapelijärjestelmien osittaispurkausmittaukset käyttöpaikalla, Espoo, ISBN 951-22-6547-8
- 6 Alumiinivoimakaapeli DRYREX - AHXAMK-W HF 12/20kV 3X185+35 - Reka Kaapeli, <http://www.sahkonumerot.fi/0627518/>, luettu 20.3.2014
- 7 Ensto Oy, AHXAMK-W-jatkon ohje, http://products.ensto.com/documents/ii/UN/UG/PEM1068FIN_II.pdf, luettu 20.3.2014
- 8 Välimäki Jussi, kj-kojeiston pääkaavio, Vantaan Energia Oy, <http://www.vantaanenergia.fi/fi/Sahko/sahkoliittyma/Documents/Keskij%C3%A4nnitekojeistojen%20p%C3%A4%C3%A4kaaviot.pdf>, luettu 21.2.2014
- 9 Vepsäläinen Jukka, asiantuntijahaastattelu, kunnossapitopäällikkö Helen Sähköverkko Oy, 02.4.2014
- 10 Estola Juha, 2010, Kandidaatintyö, Maakaapelien kuntomittaukset, Lappeenranta
- 11 Nepola Kimmo, 2013, Diplomityö, Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten soveltuvuus suurjännitteisten sähköasemalaitteiden kunnonvalvontaan, Espoo
- 12 IEEE, 2007, Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment, IEEE Power Engineering Society
- 13 Külss Joni, 2014, Luentokalvot, Condition Monitoring of Electrical Equipment, S-18.4149, Aalto-yliopisto, luettu 3.4.2014

- 14 Keränen Juha, 2008, Keskijännitteisten kaapeleiden diagnostiset menetelmät, Diplomityö, Espoo
- 15 Nurmi Juuso, 2005, Tutkintotyö, PD -mittaukset osana kunnonvalvontaa, Tampere
- 16 Kiiski Juha, Puhelinkeskustelu, Tuotesuunnittelija keski- ja suurjännitekaapelit, Reka-kaapeli Oy, 24.1.2014
- 17 Väkeväinen Kenneth, Sähköpostihaastattelu, Ensto Oy, luettu 18.2.2014
- 18 Hyvönen Petri, Asiantuntijahaastattelu, Aalto- Yliopisto, Espoo, 18.3.2014
- 19 Vierailu ja mittausten seuranta Aalto- Yliopistolla, 13.3.2014
- 20 Tekes, 2009, Palvelujen tuotteistamisesta kilpailuetua, Helsinki, ISBN 952-457-349-0

Verkkoyhtiöille lähetetty kysely osittaispurkausmittauksista

Suomen Energia-Urakointi Oy
Jussi Niemi
jussi.niemi@seu.fi
010 2726267

Insinööriyökysely

1

21.01.2014

Pyydän teitä vastaamaan alla oleviin kysymyksiin, joilla on tarkoitus kartoittaa verkkoyhtiönne kiinnostusta osittaispurkausmittauksia kohtaan, sekä verkkoyhtiössänne nyt ja tulevaisuudessa suoritettavien osittaispurkausmittausten suoritustapaa ja laajuutta.

Vastauksianne käytän apuna suunnitellessani urakointiyhtiöllemme sopivan ja asiakkaitamme parhaiten palvelevan osittaispurkausmittauspalvelun.

Pyydän vastaamaan tällä lomakkeella kunkin kysymyksen alle sille varattuun tilaan, ja palauttamaan lomakkeen sähköpostitse osoitteeseen jussi.niemi@seu.fi.

Opinnäytetyö sisältää salassa pidettävää materiaalia, joten myös vastuksianne käsitellään luottamuksellisina.

1. Mitattavat kohteet tällä hetkellä.

- Mikäli suoritate osittaispurkausmittauksia, niin minkälaisia kokonaisuuksia olette mitanneet? (kuvaus verkon osasta ja komponenteista, kaapelimetrejä yms.). Mikäli ette vielä ole mittauksia tehneet, millaisia verkon osia mittaisitte ja mikä olisi mittaustapa?

- Millaisia tuloksia ja havaintoja olette saaneet? Kuinka paljon esimerkiksi jatkoja on jouduttu uusimaan suhteessa mitattuihin kohteisiin? Minkälaiset raja-arvot olette asettaneet mittatuloksille?

Suomen Energia-Urakointi Oy
Jussi Niemi
jussi.niemi@seu.fi
010 2726267

Insinööriyökysely

2

21.01.2014

- Kuinka monipuoliseksi menetelmäksi PD -mittaukset on koettu? Mihin tarkoitukseen mittaus sopisi parhaiten teidän verkossa? (Osaksi kunnonvalvontaa, käyttöönottotyypiseksi mittaukseksi uudisrakentamiselle vai johonkin muuhun tarkoitukseen).

2. PD -mittaus osana prosessia.

- Mitä asioita mittausten sijoittamisessa ja ajoittamisessa asennusprosessiin tulisi huomioida? Mittaatteko kohteet ennen käyttöönottoa vai olisiko mitattavan verkon osan hyvä olla jonkin aikaa käytössä ennen mittausta?

Suomen Energia-Urakointi Oy
Jussi Niemi
jussi.niemi@seu.fi
010 2726267

Insinööriyksely

3

21.01.2014

- Ovatko mittaukset vaatineet mittaustoimenpiteeseen liittyviä katkoja, kytkentöjä tai käyttökytkentöjä?
Miten vastuut niistä on jaettu?

- Mitä muita asioita pitäisi ottaa huomioon, esimerkiksi sähkö- ja työturvallisuuteen liittyen?

3. Mittaukset tulevaisuudessa.

- Oletteko kaavailleet PD -mittauksia tehtävän tulevaisuudessa laajemmin verkkotöiden yhteydessä?
Millä aikataululla mittaukset tulevat ajankohtaiseksi? Kuinka monta mittausta vuosittaisin tehtäisiin?

Suomen Energia-Urakointi Oy
Jussi Niemi
jussi.niemi@seu.fi
010 2726267

Insinööriyökysely

4

21.01.2014

- Olisitteko tulevaisuudessa halukkaita ostaa PD -mittauksen verkonrakennusprojektiin kuuluvana palveluna? Millaisia toiminnallisia, laatu tms. kriteereitä palvelulle asettaisitte?

- Millaisen raportin vaaditte mittauksista?

- Mikä on näkemyksenne ja kokemuksenne mukaan suosituin ja toimivin mittaustekniikka?