

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Puistomuuntamoiden osittaispurkausmittaukset

Partial discharge measurements in compact substations

Työn tarkastaja ja ohjaaja: Esa Vakkilainen

Lappeenranta 21.12.2018

Tuukka Mönkkönen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Tuukka Mönkkönen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Esa Vakkilainen

Puistomuuntamoiden osittaispurkausmittaukset

Kandidaatintyö 2018, 31 sivua ja 13 kuvaa

Hakusanat: Puistomuuntamo, osittaispurkaus

Vuonna 2013 uudistuneen sähkömarkkinalain kiristyneet sähkökatkon aikarajat vaativat jakeluverkkoyhtiöiltä huomattavasti aiempaa parempaa toimitusvarmuutta. Asemakaava-alueilla uusi aikaraja on kuusi tuntia, joka aiheuttaa verkkoyhtiöille tarvetta kehittää puistomuuntamoiden mittausperusteista kunnonhallintaa. Tavoitteena on selvittää osittaispurkausmittausten soveltuvuutta puistomuuntamoiden mittauksiin.

Osittaispurkausmittaus on hyvä menetelmä alkavien vikojen havaitsemiseen. Osittaispurkaus on merkki heikentyneestä eristeestä tai muusta mahdollisesti vikaantumiseen johtavasta rakenneviasta. Osittaispurkaus lähettää sähköisiä, akustisia ja sähkömagneettisia signaaleja, jotka mahdollistavat purkausten mittaamisen.

Osittaispurkausmittauksia voidaan toteuttaa käytön aikana (online) tai käyttökatkon aikana (offline). Puistomuuntamoihin voisi ensisijaisesti soveltaa online-mittauksia, koska ne ovat nopeampia ja eivät aiheuta käyttökatkoa asiakkaille. Online-mittauksia voi tehdä osittaispurkauksen aiheuttamaan sähköiseen, akustiseen tai sähkömagneettiseen signaaliin perustuen. Lisäksi on mahdollista mitata osittaispurkauksen synnyttämiä indusoituneita jännitepulsseja muuntamon maadoitetuista suojarakenteista.

Potentiaaliselta online-mittaukselta vaikuttaa ainakin indusoituneiden jännitepulssien mittaus, koska mittaus tehdään turvallisesti suojarakenteiden ulkopuolella. Hyödyllistä olisi myös yhdistää useita eri mittausmenetelmiä parhaan tuloksen saavuttamiseksi.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Lyhenneluettelo

1	JOHDANTO	5
2	Maakaapeliverkko	7
2.1	Maakaapelit	7
2.1.1	Maakaapeleiden vikaantuminen.....	8
2.2	Muuntamot	9
2.3	Puistomuuntamot.....	10
2.3.1	Puistomuuntamoiden vikaantuminen	10
3	Osittaispurkaus	12
3.1	Sisäinen osittaispurkaus	12
3.2	Pintapurkaus	14
3.3	Korona	15
4	Osittaispurkausten mittaaminen	16
4.1	Kolmikapasitanssimalli	16
4.2	Online-menetelmät	17
4.2.1	RF- ja UHF-menetelmä.....	18
4.2.2	Akustinen osittaispurkausmittaus	19
4.2.3	TEV-menetelmä	20
4.2.4	HFCT-mittaus	22
4.3	Offline-menetelmät	23
4.3.1	DAC-mittaus	25
4.3.2	VLf-mittaus	25
5	Mittalaitteet	26
5.1	UltraTEV Plus2	27
5.2	Megger UHF PDD.....	28
6	Yhteenveto	30
	LÄHTEET	33

LYHENNELUETTELO

DAC	Damped Alternating Current
HFCT	High Frequency Current Transformer
RF	Radio Frequency
TEV	Transient Earth Voltage
UHF	Ultra High Frequency
VLF	Very Low Frequency

1 JOHDANTO

Vuonna 2013 uudistunut sähkömarkkinalaki vaatii jakeluverkkoyhtiöiltä huomattavasti aiempaa parempaa toimitusvarmuutta. Sähkömarkkinalain mukaan asemakaava-alueella sähkökatko ei saa kestää yli 6 tuntia ja haja-asutusalueella aikaraja on 36 tuntia. Sähkömarkkinalain uudet vaatimukset tulee täyttää vuoteen 2028 mennessä (Energiavirasto 2013, s. 8-9). Asiakkaan kokemista sähkökatkoista suurin osa johtuu keskijänniteverkon vioista (energiateollisuus 2014). Voidaan siis todeta, että keskijänniteverkon kunnonhallinnan kehittäminen on selkeästi keskeisin kehityskohde sähkömarkkinalain vaatiman toimitusvarmuuden saavuttamisessa.

Keskijänniteverkko koostuu avojohdosta, ilmakaapelista sekä maa- ja vesistökaapelista. Suurin osa keskijänniteverkosta on toteutettu avojohdoilla, mutta asemakaava-alueilla, joita kuuden tunnin aikaraja koskee, on keskijänniteverkko pääosin rengasverkkona toteutettua maakaapeliverkkoa. Rengasverkon alueella voidaan yllättävän maakaapelivian sattuessa muuntamon syöttö kääntää toisesta suunnasta, jolloin asiakkaiden kokema häiriö jää lyhyeksi ja kaapelivika voidaan korjata rauhassa. Muuntamon vikaantuessa asiakkaat taas ovat ilman sähköä niin kauan, että muuntamo saadaan korjattua. Kuuden tunnin aikarajaan pääsemisessä keskeisessä osassa on juuri muuntamoiden kunnonhallinta. Keskijänniteverkkoa on kuitenkin maakaapeloitu jonkin verran myös haja-asutusalueella. Harvemman asutuksen takia haja-asutusalueella keskijänniteverkko on toteutettu säteittäisenä verkkona rakennuskustannuksien säästämiseksi. Säteittäisessä verkossa myös kaapeliviat aiheuttavat asiakkaille yhtä pitkän katkon kuin mitä kaapelin korjaamiseen menee, sillä toista syöttösuuntaa ei ole. Sähkömarkkinalain vaatimusten täyttäminen vaatii panostusta asemakaava-alueella etenkin maakaapeliverkon muuntamoiden kunnonhallintaan ja haja-asutusalueella koko verkon kunnonhallintaan. (Mäkiranta 2018)

Maakaapeliverkko on niin kutsuttua säävarmaa verkkoa, joten sen kunnonhallinta ei liity puuston hallintaan. Maakaapeliverkon kunnonhallinta keskittyy komponenttien järjestelmälliseen huoltoon ja uusimiseen. Komponenteille on määritetty laskennalliset eliniät, mutta huollon suunnittelu laskennallisen eliniän pohjalta ei aina ole toimiva ratkaisu. Komponentin elinikään vaikuttaa komponentin ominaisuuksien lisäksi monet

ulkoiset tekijät, kuten asennustekniikka sekä sähköinen, kemiallinen ja mekaaninen rasitus. (Pakonen et al. 2018, s. 4)

Laskennallisen eliniän sijaan toimivampi ratkaisu olisi komponenttien kunnan mittaaminen. Mittauksilla saadaan selville komponenttien oikea nykykunto ja voidaan arvioida, tarvitseeko kyseinen komponentti huoltoa tai täytyykö se uusina lähivuosien aikana. Näin pystytään ennakoimaan mahdollinen vikatilanne ja uusimaan komponentti jo ennen sen laskennallisen eliniän päättymistä. Näin vältetään pitkiltä ja yllättäviltä katkoilta. Toisaalta mittauksilla voidaan myös arvioida laskennallisen elinikänsä lopussa olevien hyväkuntoisten komponenttien uusimistarvetta ja mahdollisesti säästää kustannuksia pitämällä komponentti vielä käytössä. (Pakonen et al. 2018, s. 4)

Maakaapeliverkon eri komponenttien kuntoa voi mitata eri tavoilla, mutta erityisesti osittaispurkausmittaus vaikuttaa hyvältä menetelmältä. Osittaispurkausmittauksia on aiemmin sovellettu keskijänniteverkon kunnonhallinnassa ainakin maakaapelien mittauksissa. Osittaispurkausmittauksella saadaan tietoa alkavista vioista komponenteissa, jolloin mahdolliset korjaukset voidaan ennakoita ja ajoittaa sopivasti. (Pakonen et al. 2018, s. 11-12)

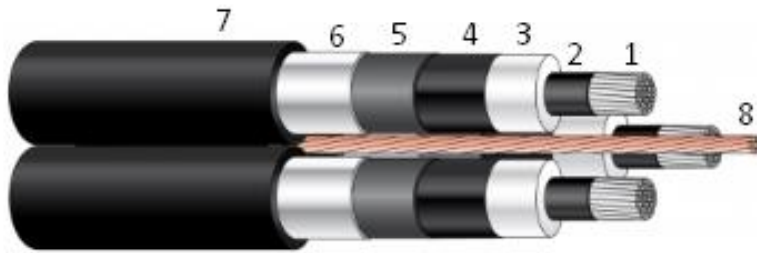
Tämän työn tavoitteena on perehtyä osittaispurkausmittausten menetelmiin ja arvioida eri menetelmien soveltuvuutta puistomuuntamoiden kunnan arviointiin. Puistomuuntamoiden osittaispurkausmittaukset ovat niin uusi asia, että käytännön tietoa ei vielä ole olemassa. Ongelmaa lähestytään perehtymällä osittaispurkausmittausten teoriaan sekä mittauksiin, joita on suoritettu muissa kohteissa kuin puistomuuntamoissa. Näin muodostetaan teoriaan pohjautuvat oletukset siitä, mitä menetelmiä puistomuuntamoiden mittauksissa kannattaa hyödyntää ja millaisia mittalaitteita mittauksissa voisi käyttää. Työssä esitellään osittaispurkaus ilmiönä ja kuinka se liittyy sähköverkon vikojen havaitsemiseen. Lisäksi esitellään menetelmät, joilla osittaispurkaus on mitattavissa. Lopuksi esitetään teoriaan pohjautuva arvio puistomuuntamoihin soveltuvista mittausmenetelmistä ja mittalaitteista.

2 MAAKAAPELIVERKKO

Maakaapeloinnin etuna on huomattavasti pienempi vikataajuus verrattuna ilmajohtoverkkoon. Vikataajuus on huomattavasti pienempi, sillä maakaapeliverkko on säävarmaa verkkoa, eli tuulessa kaatuvat tai tykkylumen painosta taipuvat puut eivät aiheuta vikoja kuten ilmajohtoverkossa. Maakaapeliverkon viat johtuvat komponenttien kulumisesta ikääntymisen seurauksena tai erilaisista asennusvirheistä aiheutuvista ongelmista. Huonona puolena maakaapeliverkossa on se, että vikojen korjaaminen vie huomattavasti enemmän aikaa, koska kaapelit on kaivettu maan alle. Tästä syystä on erityisen tärkeää kehittää uusia mittausperusteisia kunnonhallinnan menetelmiä, jotka antavat tietoa verkon todellisesta kunnosta ja korjaustarve pystytään ennakoimaan. (Pakonen et al. 2018, s. 11-12) Maakaapeleiden osalta erilaisia mittausmenetelmiä on jo tutkittu ja toteutettu, mutta puistomuuntamoiden osalta modernien mittausmenetelmien hyödyntämistä ei vielä ole laajemmin tutkittu tai hyödynnetty.

2.1 Maakaapelit

Yleisimmät asennettavat kaapelit ovat AHXAMK-W ja AHXAMK-WP. Molemmat kaapelit koostuvat kolmesta erikseen eristetyistä vaihejohtimesta. Kaapeleissa on täysin sama rakenne. Erona on, että AHXAMK-W-kaapelissa vaihejohtimet on kierretty kuparisen keskusköyden ympärille ja AHXAMK-WP-kaapelissa vaihejohtimet on kierretty samalla tavalla, mutta ilman keskusköyttä. Kaapelien vaihejohdin on valmistettu alumiinista ja sen päälle on puristettu puolijohtava johdinsuoja. Johdinsuojan päällä on muovinen pääeristyskerros, jonka päällä on puolijohtavasta materiaalista tehty hohtosuoja. Hohtosuojan päällä on pitkittäisen vesitiiviyden varmistava puolijohtava nauha ja sen päällä on poikittaisen vesitiiviyden varmistava kosketussuojakerros. Viimeisenä kerroksena on musta säänkestävästä PE-muovista valmistettu kerros. (Pakonen et al. 2018, s. 16-17) Kuvassa 1 on havainnollistettu AHXAMK-W-kaapelin rakenne.



Kuva 1. AHXAMK-W-kaapelin rakenne. 1. vaihejohdin 2. johdinsuoja 3. pääeristys 4. hohtosuoja 5. vesitiivistys 6. kosketussuoja 7. vaihevaippa 8. keskusköysi (Reka)

Uudet maakaapelit ovat erilaisia muovieristeisiä kaapeleita, mutta jakeluverkossa on vielä käytössä myös vanhoja öljypaperieristeisiä maakaapeleita. Öljypaperieristeisissä kaapeleissa pääeristeenä toimii öljy ja paperi toimii tukirakenteena öljylle sekä estää epäpuhtauksien siirtymisen kaapelissa. Yleisin käytössä oleva öljypaperieristeinen maakaapeli on APYAKMT, jonka ulkovaippa on muovia, mutta pääeristemateriaali on öljypaperia. (Pakonen et al. 2018, s. 16-17)

2.1.1 Maakaapeleiden vikaantuminen

Maakaapeleiden vikataajuus on kohtalaisen matala ja niiden vikaantumissyistä on melko vähän tilastotietoa. Maakaapelin eristeet kuluvat ajan myötä ja voivat aiheuttaa vikoja kaapelin käyttöään loppupuolella. Yleensä maakaapeliverkon viat, varsinkin yllättävät viat, johtuvat kuitenkin muista syistä kuin kaapelin luonnollisesta ikääntymisestä. Yksi yleinen vikaantumisen aiheuttaja on kolmannen osapuolen aiheuttamat mekaaniset vauriot. Mekaanisia vaurioita voi syntyä kaapelin kuljetuksessa, asennuksessa tai käytön aikana, jos kaapelin vieressä kaivetaan. (Pakonen et al. 2018, s. 14)

Toinen kaapelivikojen pääsyy on virheellisesti asennettu kaapelipääte. Kaapelipäätteen tarkoitus keskijännitekaapelissa on hallita sähkökentän muotoa kaapelin päässä, estää vuotovirrat kaapelin jännitteisen ja maadoitettujen osien välillä sekä suojata kaapelia kosteudelta ja epäpuhtauksilta. (Pakonen et al. 2018, s. 23)

Nykyään asennettavien muovikaapelien kanssa yleisimmin käytetyt kaapelipäätteet ovat lämpö- ja kylmäkutistepäätteitä. Päätteiden asennuksessa on mahdollista tehdä useita

virheitä, jotka saattavat aiheuttaa osittaispurkausten syttymistä päätteessä. Tyypillisiä kaapelipäätteiden asennusvirheitä ovat mm. seuraavat:

- Lämpökutistepäätettä asentaessa ei lämmitetä päätteen kutistetta riittävästi, jolloin päätteen sisäpinnan liima ei tartu riittävän hyvin kaapelin pääeristeen pintaan.
- Hohtosuojan pään teräväksi jäänyttä reunaa ei hiota tasaiseksi, jolloin sähkökenttään syntyy tihentymä.
- Kentänohjausmassa tai letku asennetaan väärin tai jätetään kokonaan pois.

Nämä ovat tyypillisiä asennusvirheitä, jotka kaikki aiheuttavat sähkökentän tihentymää. Sähkökentän tihentymä ja virhe eristeessä aiheuttavat eristeen paikallista rasittumista, mikä saattaa johtaa osittaispurkausten syttymiseen. Päätteiden asennuksessa on erittäin tärkeää, ettei pintojen väliin jää mitään epäpuhtauksia tai ilmaonteloita. (Pakonen et al. 2018, s. 26)

Tämän työn kannalta keskeisin kaapeleihin liittyvä ongelma on kaapelipäätteiden vikaantuminen, sillä päätteet ovat puistomuuntamoiden sisällä. Vaurioituneessa kaapelipäätteessä syttyy osittaispurkauksia helpommin kuin hyväkuntoisessa päätteessä. Osittaispurkauksien synnyttämät sähkömagneettiset signaalit puistomuuntamon sisällä mahdollistavat alkavan vian havaitsemisen ennen kuin kaapelipääte tuhoutuu. Näin korjaustarve voidaan ennakoida ja välttyään yllättäviltä keskeytyksiltä.

2.2 Muuntamot

Jakeluverkon jännite on Suomessa yleisesti 20 kV, mutta suurten kaupunkien keskustoissa jännite voi olla myös 10 kV. Esimerkiksi Helsingin jakeluverkon jännite on 10 kV, koska siirtomatkat ovat lyhyitä. Sähkökäyttäjille jännite tulee kuitenkin laskea 400 volttiin. Jännite muutetaan 20 tai 10 kilovoltista 400 volttiin jakelumuuntamoissa, joita on sijoitettu ympäri jakeluverkkoa. Muuntamot sijoitetaan mahdollisimman lähelle sähkökäyttäjää, jotta pienjänniteverkon siirtomatka olisi mahdollisimman lyhyt. Jakeluverkossa käytetään kolmea eri muuntamotyyppiä: kiinteistömuuntamo kaupungin keskustoissa, puistomuuntamo kaapeloiduilla taajama-alueilla ja pylväsmuuntamo ilmajohtoverkon alueella. (Lassila 2018)

2.3 Puistomuuntamot

Puistomuuntamoita käytetään jakeluverkon alueilla, missä jakeluverkko on toteutettu maakaapelointina, mutta asutus on niin harvaa ja rakennukset pieniä, että kiinteistömuuntamoita ei voida käyttää. Puistomuuntamot ovat nykyään pieniä metallisia rakennuksia (Kuva 2), joiden sisälle muuntaja on asennettu, mutta käytössä on edelleen myös vanhoja tiilirakenteisia puistomuuntamoita.



Kuva 2. Virolaisen Harju Elekterin valmistama puistomuuntamo. (Elenia)

Puistomuuntamossa on keskijännitepuoli, muuntajan tila ja pienjännitepuoli. Keskijännitepuolen kojeisto voi olla ilmaeristeinen, SF6-eristeinen tai näiden kahden yhdistelmä. Joissain muuntamoissa kojeistoa ei ole ollenkaan, jolloin kaapeli kytketään suoraan muuntajaan tai kiskostoon. (Niemi 2018)

2.3.1 Puistomuuntamoiden vikaantuminen

Yleisimpänä syynä puistomuuntamon ennenaikaiseen vikaantumiseen voidaan pitää virheellistä asennusta. Vaikea ympäristö voi lisäksi olla ainakin osasyynä muuntamon ennenaikaiseen vikaantumiseen. Muuntamon erottimissa ja kaapelipäätteissä on havaittu osittaispurkausten syttymistä etenkin hyvin kosteissa ja pölyisissä olosuhteissa. (Niemi 2018)

Yleisiä vikaantumiselle altistavia asennusvirheitä ovat huonot perustukset, muuntamon heikosti suunniteltu paikka tai kaapelipäätteiden virheellinen asennus. Huonot perustukset altistavat muuntamon routavaurioille, josta voi syntyä vetoa kaapeleihin. Tästä seuraa erottimien ylimääräistä rasitusta, mikä saattaa johtaa vikaantumiseen. Huonot perustukset voivat lisäksi osaltaan pahentaa kostean ympäristön vaikutuksia, sillä kosteus saattaa päästä nousemaan maaperästä muuntamoon. Myös pienitehoiset muuntamot korostavat kostean ympäristön vaikutusta, sillä pienitehoinen muuntajakone ei tuota tarpeeksi lämpöä muuntamon kuivana pitämiseksi. (Niemi 2018)

3 OSITTAISPURKAUS

Jokaisen eristeen läpi kulkee aina pieni vuotovirta, koska mikään eriste ei ole täydellinen (Aro et al. 2015, 21). Vuotovirran täytyy olla erittäin pieni, jotta sähkölaite voi toimia oikein, tehokkaasti ja turvallisesti. Eriste voi kuitenkin vaurioitua monella tapaa käytön aikana tai asennuksen yhteydessä, tai siinä voi olla valmistusvirheitä. Eristeen epäsäännöllisyydet altistavat eristeen paikalliseen sähköiseen rasittumiseen. Heikentyneen eristeen kohdalla vuotovirta on suurempi ja eristeen sähkölujuus on paikallisesti heikentynyt. Kun sähkökentän voimakkuus ylittää paikallisesti eristeen sähkölujuuden, syntyy heikentyneen eristeen osan yli sähköinen purkaus, eli osittaispurkaus. (Aro et al. 2015, s. 80)

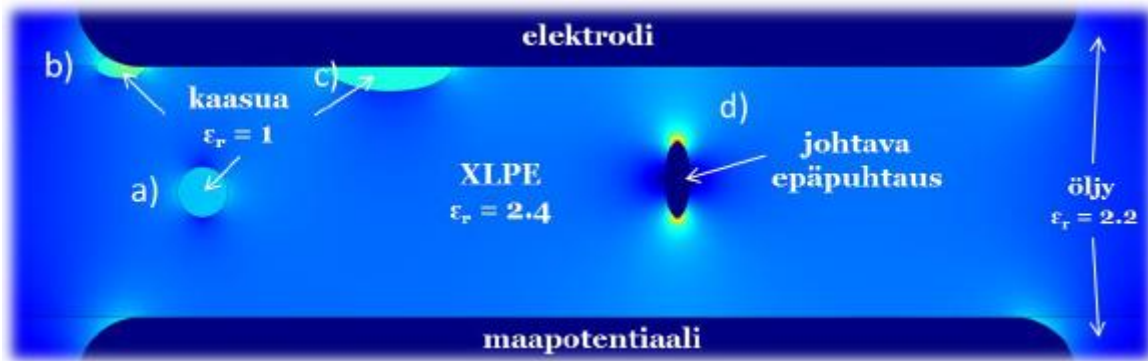
IEEE-standardin mukaan osittaispurkaus on paikallinen sähköinen purkaus, joka läpäisee sähköisesti rasittuneen eristeen osan, mutta ei koko eristettä. Osittaispurkaus esiintyy yleensä onteloissa, halkeamissa, liitoksissa tai suurjännitteisten komponenttien terävissä osissa. (IEEE 2009)

Osittaispurkaus on yleisesti merkki eristeen heikkenemisestä. Osittaispurkaukset heikentävät eristettä entisestään erilaisten kemiallisten ja fysikaalisten vaikutusten johdosta. Ajan mittaan osittaispurkaukset vaikuttavat eristeen sähkölujuuteen ja lopulta eristeen heikentyminen voi johtaa oikosulkuun eli täydelliseen purkaukseen. Täydellinen purkaus syntyy, kun sähkökentän voimakkuus ylittää koko eristeen sähkölujuuden. Eristeen tarkoitus on eristää kaksi eri potentiaalissa olevaa elektrodia toisistaan, mutta oikosulussa eriste pettää täysin ja elektrodien välinen potentiaaliero romahtaa, jolloin niiden välille syntyy erittäin suuri virta. Oikosulku suurjännitteisissä sähkölaitteissa on vaarallinen ja suurta tuhoa aiheuttava ilmiö. (Liu 2015, s. 71)

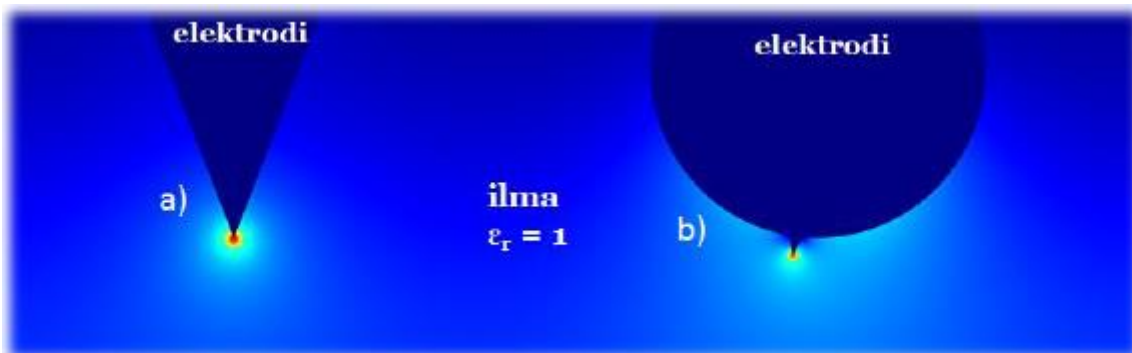
3.1 Sisäinen osittaispurkaus

Sisäinen osittaispurkaus on nimensä mukaisesti eristeen sisällä tapahtuva purkaus. Tästä syystä se on erityisen paljon vahinkoa aiheuttava purkaustyyppi. Sisäisiä purkauksia esiintyy yleisesti eristeen heikentyneissä kohdissa, onteloiden, epäpuhtauksien, mekaanisten vaurioiden tai johtimen terävien kärkien kohdalla, joista aiheutuu eristeeseen paikallisesti voimistunut sähköinen rasitus. (Aro et al. 2015, s. 81) Kuvassa 3 on esitetty

eristeen poikkeamia, jotka altistavat osittaispurkauksille ja kuvassa 4 on esitetty elektrodin osittaispurkauksille altistavat ominaisuudet.



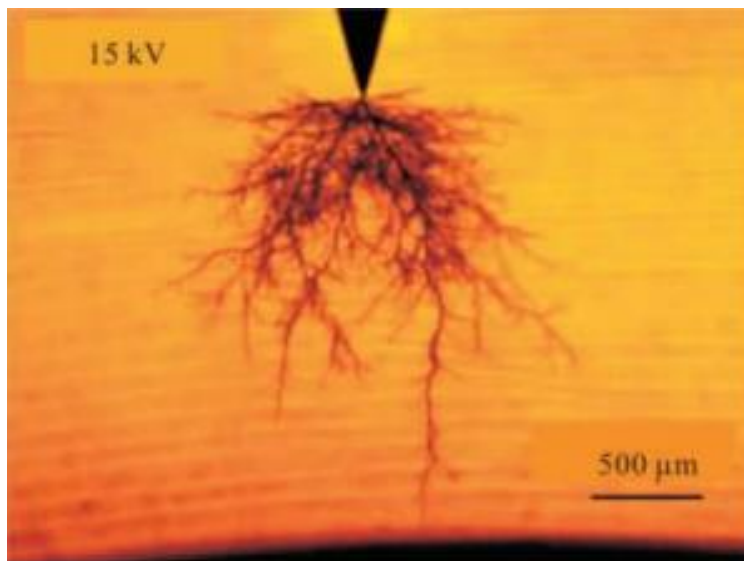
Kuva 3. Elektrodin ja maapotentiaalilin välillä olevia osittaispurkauksille altistavia poikkeamia. (Nepola 2013, s. 12)



Kuva 4. Elektrodin poikkeamia, jotka altistavat osittaispurkauksille. (Nepola 2013, s. 12)

Sisäiset osittaispurkaukset saattavat aiheuttaa sähköpuun syntymisen eristeeseen. Sähköpuuta syntyy erityisesti vaihtojännitteellä, jos osittaispurkauksia esiintyy jokaisella jaksolla. Sähköpuu on osittaispurkausten tapauksessa yleensä puun oksien muotoa muistuttava sähköisten purkausten aiheuttama kanava eristeessä. Kuvassa 5 on 15 kV:n jännitteellä syntynyt oksamainen sähköpuu. Sähköpuun syntyminen alkaa eristeessä olevasta ontelosta tai muusta heikentymästä, jolloin osittaispurkaus läpäisee elektrodin ja ontelon välisen eristeen osan ja synnyttää siihen kanavan, jossa eristeen ominaisuudet ovat heikentyneet. Poikkeamat elektrodin pinnassa saattavat myös laukaista sähköpuun syntymisen. (Guomin 2013, s. 12)

Eristeen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi sisäisen osittaispurkauksen haitallisuuteen. Kaapeleissa ja kaapelipäätteissä eristeenä käytetään kiinteää eristettä, koska kiinteät eristeet kestävät hyvin mekaanista rasitusta ja niillä on hyvät eristävät ominaisuudet. Kiinteät eristeet ovat kuitenkin erittäin herkkiä osittaispurkauksille. Erityisesti vaihtojännitteellä esiintyvät osittaispurkaukset aiheuttavat kiinteään eristeeseen sähköpuita (Kuva 5), joista eriste ei pysty palautumaan vaan sen ominaisuudet heikentyvät pysyvästi. Nestemäisten ja kaasumaisten eristeiden hyvänä puolena on osittaispurkauksista palautuminen. Kaasumaiset eristeet palautuvat täysin ennalleen purkauksen jälkeen ja nestemäisetkin eristeet palautuvat purkauksesta osittain. Kiinteän eristeen muut ominaisuudet ovat kuitenkin niin ylivoimaiset tietyissä käyttökohteissa, esimerkiksi kaapeleissa, että herkkyys osittaispurkauksille on suhteellisen pieni ongelma. (Guomin 2013, s. 11)



Kuva 5. 15 kV jännitteellä syntynyt oksamainen sähköpuu, joka on alkanut elektrodin terävän kärjen aiheuttamista osittaispurkauksista. (Chen 2015, s. 2843)

3.2 Pintapurkaus

Pintapurkaus on elektrodin pinnan suuntaisesti tapahtuva osittaispurkaus. Pintapurkaus syntyy, kun sähkökentällä on suuri pinnan suuntainen komponentti. Pintapurkaukset ovat haitallisimpia kaapelipäätteissä ja läpivienneissä, sillä niissä kahden eristeen rajapintaan voi syntyä erittäin haitallisia liukupurkauksia. Liukupurkaukset kuluttavat eristettä ja

lopulta muuttavat sähkökentän jakautumista, joka voi lopulta johtaa täydelliseen läpilyöntiin elektrodien välillä ja komponentin tuhoutumiseen. (Aro et al. 2015, s. 85)

3.3 Korona

Koronapurkaus on elektrodin ja kaasun rajapinnassa tapahtuva osittaispurkaus. Yleensä koronapurkaus tapahtuu suurjännitteisen elektrodin puolella, mutta sitä voi esiintyä myös maadoituksen terävissä reunoissa. (Aro et al. 2015, s. 90)

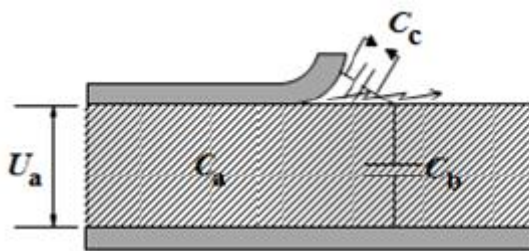
Koronapurkaus ei vahingoita eristettä samalla tavalla kuin pintapurkaukset ja sisäiset purkaukset, sillä koronapurkaus esiintyy elektrodin ja kaasun rajapinnalla. Koronapurkaus ei silti ole täysin harmiton ilmiö. Koronapurkauksesta syntyvä signaali saattaa vaikeuttaa vahingollisten osittaispurkausten havaitsemista ja siten vaikeuttaa laitteistojen kunnossapitoa. Koronapurkauksessa syntyy myös sivutuotteena esimerkiksi otsonia ja typpihappoa, jotka saattavat kemiallisen reaktioiden seurauksena vahingoittaa ympäröiviä materiaaleja. (Aro et al. 2015, s. 90)

4 OSITTAISPURKAUSTEN MITTAAMINEN

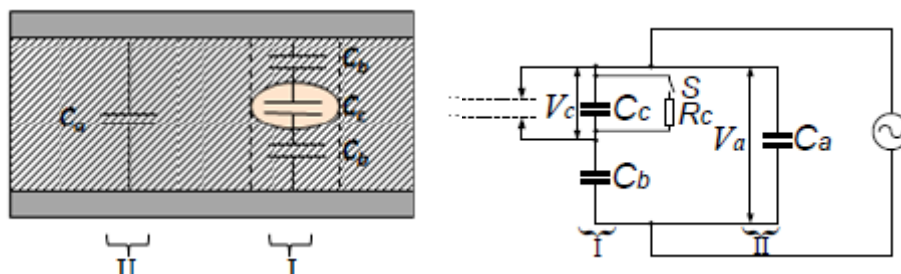
Mittausmenetelmät perustuvat osittaispurkausten aiheuttamiin signaaleihin. Signaalit voivat olla ääniaaltoja, sähkömagneettista säteilyä tai sähköisiä signaaleja. Ääniaallot ja sähkömagneettinen säteily antavat vain karkean kuvan osittaispurkausten voimakkuudesta ja sijainnista. Tarkimmat mittaukset perustuvatkin aina sähköisten signaalien mittaukseen. (Aro et al. 2015, s. 200-203)

4.1 Kolmikapasitanssimalli

Sähköisiä signaaleja analysoidaan ekvivalenttisen piirin avulla. Ekvivalenttinen piiri eli kolmikapasitanssimalli voidaan muodostaa jakamalla eristeen osat kolmeen eri kapasitanssiin. C_c kuvaa pintapurkauksessa elektrodin poikkeavan osan ja eristeen välistä ilmaa (Kuva 6) ja ontelopurkauksessa (Kuva 7) se kuvaa eristeessä olevaa onteloa. C_b kuvaa eristeen poikkeavan osan kanssa sarjassa olevaa eristeen ehjää osaa. C_a kuvaa C_c :n ja C_b :n kanssa rinnakkain olevaa eristeen ehjää osaa. (Aro et al. 2015, s. 82, 85)



Kuva 6. Pintapurkauksen ekvivalenttinen piiri. (Nepola 2013, s. 16)



Kuva 7. Vasemmalla on esitetty ontelopurkauksen ekvivalenttisen piirin kapasitanssit (Nepola 2013, s. 16) ja oikealla eräs ekvivalenttisen piirin esitystapa. (Guomin 2013, s. 15)

Kuvan 7 piirissä kytkin S kuvaa osittaispurkauksen syttymistä. Kun kytkin on auki, piiri on tilassa, jossa osittaispurkaus ei ole syttynyt ja osittaispurkauksen aikana kytkin S on kiinni. Osittaispurkauksen syttymisjännite on jännite, jolla sähkökentän voimakkuus ylittää heikentyneen eristeen osan sähkölujuuden ja syttyvä purkaus ylittää eristeen heikentyneen osan. (Guomin 2013, s. 15)

Osittaispurkauksen voimakkuudesta kertoo purkauksen virta ja siinä siirtyvä varaus. Niitä on kuitenkin mahdoton mitata, koska purkauksen kesto on vain joitakin nanosekunteja. Sen sijaan purkauksen haitallisuuden mittaamiseen käytetään näennäisvarausta. Näennäisvaraus on eristysrakenteen liittimissä näkyvä varauksen muutos osittaispurkauksen aikana, joten se on mitattavissa. Näennäisvaraus ei ole kuitenkaan täydellinen suure osittaispurkauksen voimakkuudelle, sillä näennäisvaraus on kääntäen verrannollinen eristeen paksuuteen, kun ontelossa tapahtuvan purkauksen suuruus on vakio. Tästä johtuen osittaispurkaus ilmenee mittauksissa herkemmin ohuissa eristerakenteissa ja ohuen eristerakenteen osittaispurkaus näyttää mittauksessa suuremmalta kuin paksun eristerakenteen, vaikka purkaus olisikin yhtä suuri. (Aro et al. 2015, s. 88)

4.2 Online-menetelmät

Online-menetelmä tarkoittaa, että mittaukset voidaan tehdä normaalin käytön aikana ilman käyttökatkoa. Hyvänä puolena on se, että menetelmä antaa tietoa komponenttien kunnosta normaalilla käyttöjännitteellä. Käytön aikainen mittaus mahdollistaa myös pidempikestoiset mittaukset, joissa tulee huomioitua sääolosuhteiden vaihtelut sekä vaihtelevan kuorman vaikutukset. Toisaalta online-mittauksen huonona puolena on se, että mitattavien komponenttien jännitettä ei yleensä voi säätää, joten alkavien vikojen tutkiminen vaikeutuu. (Pakonen et al. 2018, s. 35)

Online-mittauksilla voidaan mitata osittaispurkauksen synnyttämiä sähköisiä, akustisia tai sähkömagneettisia signaaleja. Sähköisiin signaaleihin perustuva mittaus on ainut, joka antaa tietoa osittaispurkauksen näennäisvarauksesta ja on siksi kaikista tarkimmin vian vakavuudesta kertova mittaus. Akustiseen tai sähkömagneettiseen signaaliin perustuvat mittaukset eivät pysty mittaamaan purkauksen näennäisvarausta, joten ne eivät yksittäisenä mittauksena pysty antamaan niin tarkkaa tietoa vian vakavuudesta. Mittauksista voidaan kuitenkin kerätä referenssiarvoja, joihin vastaavien muuntamoiden

arvoja voidaan verrata. Näin voidaan arvioida, mitkä muuntamot ovat mahdollisesti ensin huollon tarpeessa, vaikka yksittäisestä mittauksesta ei voitaisikaan arvioida tarkkaa vian vakavuutta. Lisäksi mittaus toimii aina referenssiarvona, kun samaa muuntamoita mitataan seuraavan kerran. Mittauksia tehtäessä referenssiarvojen datapankki ja mittaajien kokemus kasvaa, jolloin jatkossa myös yksittäisen mittauksen perusteella osataan paremmin arvioida vian vakavuutta.

4.2.1 RF- ja UHF-menetelmä

Osittaispurkauksien synnyttämät radiotaajuiset signaalit on tunnettu ilmiönä jo kauan. Sähköverkkojen kunnonhallintaan ne yhdistettiin ensimmäisen kerran 1980-luvulla, kun Iso-Britanniassa tuhoutui verkkoyhtiö National Gridin muuntaja tulipalossa. Ennen tulipaloa lähitöillä asuneet olivat havainneet televisio- ja radiolähetysissä häiriöitä, jotka lopuivat heti muuntajan tuhouduttua. Tämän tapauksen jälkeen havahduttiin radiotaajuisen mittauksen käyttökelpoisuuteen myös sähköverkkojen kunnonhallinnassa. (Nepola 2013, s. 8)

Osittaispurkaus synnyttää sähkömagneettista säteilyä erittäin laajalla taajuuspektrillä. RF (Radio Frequency) -mittausta käytetään alle 1 GHz:n taajuuksille. Tätä korkeammille taajuuksille voidaan hyödyntää UHF (Ultra High Frequency) -mittausta. UHF-mittausta voidaan käyttää 0.3-3GHz taajuuksilla. (Aro et al. 2015, s. 203)

Osittaispurkauksesta syntyvä sähkömagneettinen säteily havaitaan RF- ja UHF-menetelmissä antennien avulla, joten kytkentöjä ei tarvitse tehdä. Mittaus voidaan suorittaa normaalin käytön aikana nopeasti ja helposti. Mittauksia saattavat häiritä ulkopuoliset signaalit, joita voidaan kuitenkin osittain estää sopivan taajuuskaistan antennilla. (Aro et al. 2015, s. 203-204)

Radiotaajuisista osittaispurkausmittausta on sovellettu avojohtojen eristeiden ja sähköasemalaitteiden kunnon mittaamiseen (Aro et al. 2015, s. 203-204). Puistomuuntamoiden kunnon mittaamiseen ei RF- ja UHF-menetelmiä ole käytetty, joten niiden soveltavuudesta muuntamoiden kunnonhallintaan on vaikea antaa tarkkaa arviota. RF- ja UHF-menetelmät voivat olla hyödyllisiä kartoittaessa puistomuuntamoiden kuntoa, mutta niiden tarkkuus yksittäisenä mittauksena tuskin riittää tarkempaan kuntoanalyysiin. Mittauksilla voidaan kuitenkin saada tärkeitä referenssiarvoja

samankaltaisten muuntamoiden vertailuun sekä saman muuntamon myöhemmin tehtävien mittausten analysointiin.

4.2.2 Akustinen osittaispurkausmittaus

Osittaispurkaus aiheuttaa sähkömagneettisten signaalien lisäksi aina myös ääntä. Osittaispurkaus synnyttää ääntä hyvin korkealla taajuusalueella ja usein akustisen osittaispurkausmittauksen anturit toimivat ultraäänialueella. Ääniaallot leviävät äänilähteestä joka suuntaan ja vaimenevat eristeen läpi kulkiessa. Rakenteiden rajapinnoilla ääniaallot vaimenevat, absorboituvat rakenteeseen ja heijastuvat. Tyypillisesti mittaus suoritetaan jollain rajapinnalla ja muutetaan antureilla sähköiseksi signaaliksi. (Aro et al. 2015, s. 200)

Akustista osittaispurkausmittausta käytetään yleisesti suurien muuntajien ja SF₆-eristeisten kytkinlaitosten osittaispurkausten havainnointiin, tunnistamiseen ja paikantamiseen. Akustinen osittaispurkausmittaus soveltuu myös teollisuus- ja sähköasemaympäristöön, missä sähköinen häiriötaso on suuri ja sähköisten tai sähkömagneettisten signaalien avulla toimivat mittausmenetelmät eivät välttämättä ole toimivia. Lisäksi menetelmä on käyttökelpoinen myös kaapelin läpivientien ja päätteiden mittaamiseen. (Aro et al. 2015, s. 201)

Akustisissa osittaispurkausmittauksissa täytyy ottaa huomioon mitattavassa laitteessa tyypillisesti esiintyvän osittaispurkauksen aiheuttama taajuusalue. Mittaus onnistuu parhaiten, kun käytetään anturia, joka soveltuu parhaiten kyseiselle laitteelle tyypillisille taajuusalueille. Esimerkiksi kaapelipäätteille sopiva taajuusalue on noin 5-50 kHz. (Aro et al. 2015, s. 201)

Puistomuuntamoiden mittaamisessa akustinen menetelmä voisi olla toimiva ainakin muuntamon kunnan kartoitukseen. Muuntajatilassa tapahtuvat osittaispurkaukset olisivat parhaiten havaittavissa, sillä mittaaminen onnistuisi ilman, että väliin jäisi muuntamon rakenteita. Useissa nykyisissä muuntamoissa kaapelipäätteeseen ei käytön aikana saa näköyhteyttä, jolloin mittaaminen tapahtuisi muuntamon suojarakenteen läpi, mikä vaimentaa mitattavaa äänisignaalia. Akustinen mittaaminen ei vaadi kytkentöjä, joten se onnistuu täysin normaalin käytön aikana ja se pystyy potentiaalisesti antamaan

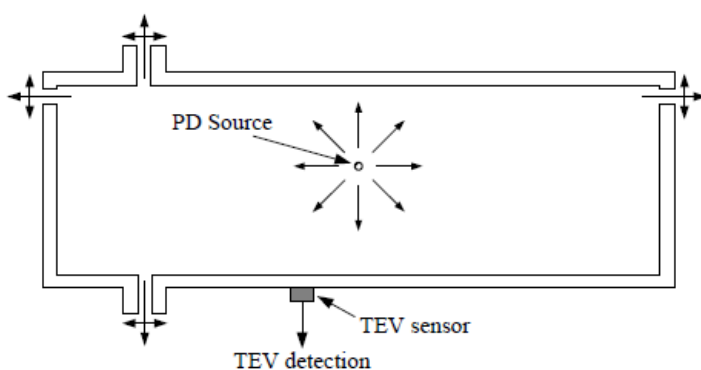
puistomuuntamon kunnosta arvokasta yleistietoa, joten menetelmä on ainakin tarkemman tutkimisen ja testaamisen arvoinen.

4.2.3 TEV-menetelmä

TEV-menetelmä (Transient Earth Voltage) perustuu induoituneiden pulssimaisten jännitesignaalien mittaamiseen suurjännitteisiä komponentteja suojaavista maadoitetuista metallirakenteista. Signaalit ovat erittäin lyhytkestoisia ja kulkevat maadoitettujen rakenteiden kautta maahan. Tästä tulee nimitys Transient Earth Voltage. TEV-menetelmän hyvä puoli on mittausjärjestelyjen helppous. Mittalaitteen anturi asennetaan suurjännitteisten komponenttien metallisiin suojausrakenteisiin, joten käyttökatkoa ei tarvita. (Davies 2015, s. 4)

TEV-ilmiön havaitsi ja nimesi John Reeves (EA-Technology) vuonna 1974. TEV-signaalien voimakkuuden havaittiin olevan verrannollisia osittaispurkausten voimakkuuteen, joten TEV-menetelmä tarjoaa tietoa suurjännitelaitteistojen eristeiden kunnosta ja on toimiva menetelmä vertailtaessa samantyyppisten laitteistojen kuntoa. (Davies 2015, s. 4)

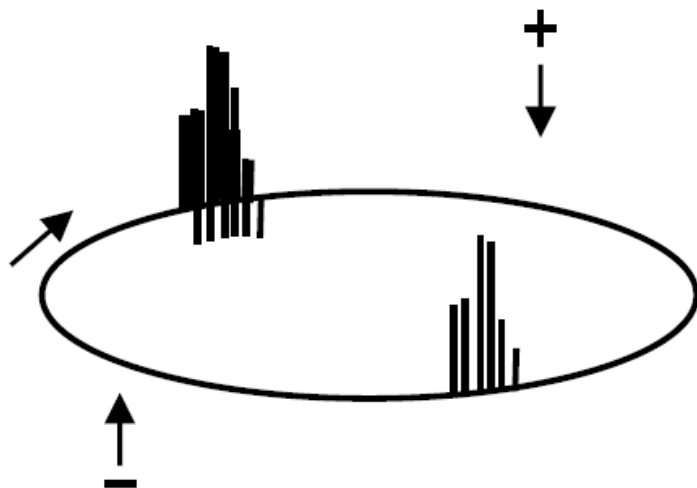
Osittaispurkaus synnyttää sähkömagneettisia signaaleja, jotka induoituvat suurjännitteisen komponentin ympäröiviin metallirakenteisiin erittäin suurtaajuisiksi jännitepulsseiksi. Jännitepulssit vaihtelee vain voltin sadasosista muutamiin voltteihin. Jännitepulssit kulkevat kuvan 8 mukaisesti metallirakenteen sisäpinnalla ja siirtyvät rakenteiden epäjatkuvuuskohdista rakenteen ulkopinnalle. Tällaisia epäjatkuvuuskohtia ovat mm. metallikotelon saumat ja läpiviennit. (Guomin 2015, s. 51)



Kuva 8. TEV-signaalin eteneminen osittaispurkauskohtasta suojarakenteen ulkopinnalle.

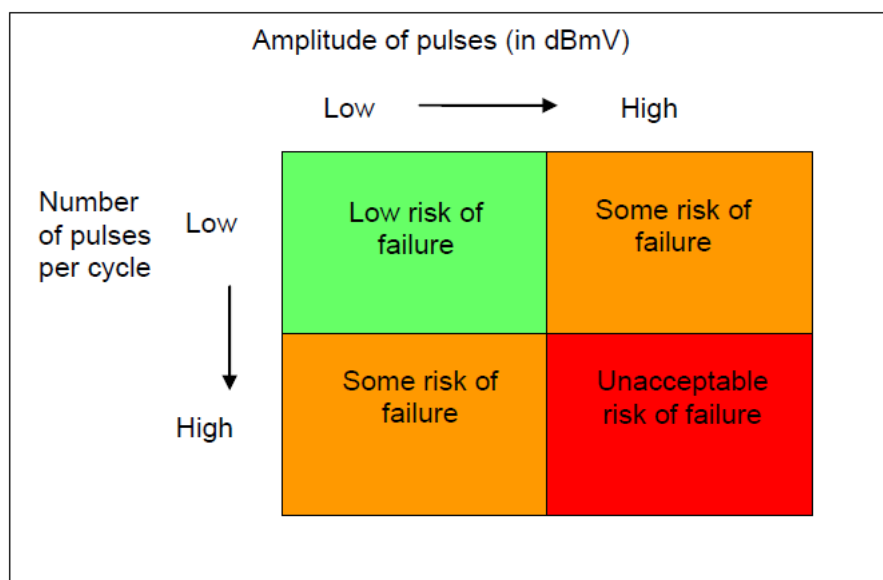
(Guomin 2015, s. 51)

TEV-menetelmällä mitataan suojarakenteissa kulkevien jännitepulssien voimakkuuden lisäksi pulssien määrää yhden jakson aikana. Kuva 9 esittää pulssien määrää, voimakkuutta ja toistumista jakson aikana. (Davies 2015, s. 5)



Kuva 9. Osittaispurkauksen voimakkuus ja toistuminen jakson aikana. (Davies 2015, s. 5)

TEV-menetelmällä ei ole mahdollista mitata osittaispurkauksen näennäisvarausta, joten on vaikea määrittää tarkasti osittaispurkauksien vakavuus ja arvioida vikaantumisen ajankohta. TEV-mittauksissa tulos saadaan yksikössä dBmV, joka ei suoraan kerro tilanteen vakavuudesta. TEV-mittauksissa laitteiston kuntoa arvioidaan osittaispurkauksen voimakkuuden lisäksi pulssien määrällä jaksoa kohti. Kuva 10 havainnollistaa TEV-menetelmässä sovellettua kunnonarviointia. Pulssien matala voimakkuus ja pieni määrä pulsseja jakson aikana tarkoittaa, että riski vikaantumiseen on kohtalaisen pieni. Suuri määrä matalan voimakkuuden pulsseja sekä pieni määrä suuren voimakkuuden pulsseja tarkoittavat kohtalaista vikaantumisriskiä, jolloin tarkempia tilannetta seuraavia mittauksia tulisi suorittaa. Korkea voimakkuus ja suuri määrä pulsseja tarkoittaa, että vikaantuminen on todennäköistä ja laitteisto tulisi tutkia tarkemmin. (Davies 2015, s. 6)



Kuva 10. TEV-menetelmässä sovellettu periaate laitteiston kunnan arviointiin mittaustiedon perusteella. (Davies 2015, s. 6)

EA-Technology on yksi merkittävistä osittaispurkausmittalaitteiden valmistajista ja kehittäjistä, etenkin TEV-mittalaitteiden osalta. EA-Technology on tehnyt TEV-mittauksia jo vuodesta 1983 ja kerännyt laajan tietokannan referenssiarvoista, joita se on myöhemmin hyödyntänyt mittalaitteiden kehityksessä. (Davies 2015, s. 6-7)

TEV-menetelmän ehdottomana hyvänä puolena on, että mitään kytkentöjä tai anturin asennuksia ei tarvitse tehdä suojarakenteiden sisäpuolella, vaan mittaus voidaan toteuttaa täysin puistomuuntamon ulkopuolelta normaalin käytön aikana. Tästä syystä mittausjärjestelyt ovat helpot ja mittaus on nopea ja turvallinen toteuttaa. Haasteena saattaa olla osittaispurkauksen paikantaminen sekä vakavuuden arviointi, ainakin yksittäisissä mittauksissa. Menetelmä voi kuitenkin mittausjärjestelyjen helppouden takia olla erinomainen referenssiarvojen keräämiseen. TEV-menetelmä vaikuttaa siis erittäin potentiaaliselta vaihtoehdolta puistomuuntamoiden mittauksiin ja on ehdottomasti tarkemman tutkimuksen ja testaamisen arvoinen menetelmä.

4.2.4 HFCT-mittaus

HFCT-mittauksessa mitataan osittaispurkauksien synnyttämiä virtapulsseja suurjännitteisten komponenttien maadoituksista. Anturina mittauksessa käytetään HFCT

(High Frequency Current Transformer) -anturia eli suurtaajuusvirtamuuntajaa. Mittalaitteena voidaan käyttää oskilloskooppia tai erilaisia osittaispurkausmittalaitteita. (Pakonen et al. 2018, s. 35) Nykyään on tarjolla melko laaja valikoima kentälle tarkoitettuja osittaispurkausmittalaitteita, joilla HFCT-mittaus on mahdollista toteuttaa.

HFCT-anturi kytketään kaapelipäätteen ja/tai kaapelipäätteen maadoitusjohdon ympärille. Mittauksen herkkyys riippuu asennustavasta. Paras herkkyys ja signaali/kohinasuhde saavutetaan kytkennällä, jossa anturi on asennettu kaapelipäätteen sekä maadoitusjohtimen ympärille. Anturin voi myös asentaa pelkästään kaapelipäätteen ympärille tai pelkästään suurjännitteisten osien maadoitusten ympärille. Näillä kytkentätavoilla ei kuitenkaan päästä parhaaseen tulokseen huonomman signaali/kohinasuhteen takia. (Pakonen et al. 2018, s. 35-36)

HFCT-mittaus perustuu osittaispurkauksen aiheuttamien sähköisten signaalien mittaamiseen, joten se antaa tietoa myös purkauksen näennäisvarauksesta (Pakonen et al. 2018, s. 37). Menetelmä on siis näistä online-menetelmistä tarkin kuvaamaan osittaispurkauksen voimakkuutta. HFCT-mittausta on aiemmin käytetty ainakin kaapeleiden osittaispurkauksien mittaukseen. Normaalisti kaapeleita mitattaessa HFCT-anturit kytketään muuntajaa syöttävän kaapelin päätteiden ympärille, jolloin se antaa tietoa kaapelissa ja päätteissä tapahtuvista osittaispurkauksista. HFCT-mittaus voisi toimia paremmin puistomuuntamon mittauksiin niin, että anturit kytkettäisiin muuntajaa syöttävien välikaapeleiden päätteiden ympärille. Tällaisella kytkennällä voisi olla mahdollista saada paremmin tietoa kaapelipäätteiden lisäksi myös erottimissa ja läpivienneissä esiintyvistä osittaispurkauksista. Tällaisessa kytkennässä on kuitenkin monia mahdollisia osittaispurkauslähteitä muutaman metrin sisällä, joten paikantaminen voi olla haasteellista. HFCT-mittaus on tästä huolimatta erittäin potentiaalinen menetelmä puistomuuntamoiden mittauksiin, ja parhaita kytkentätapoja kannattaa tutkia lisää.

4.3 Offline-menetelmät

Offline-menetelmässä mitattava verkon osa täytyy erottaa käytössä olevasta verkosta mittausten suorittamiseksi. Offline-mittaukset ovat osittaispurkauksen sähköistä mittaamista. Osittaispurkaus synnyttää virta- ja jännitepulssin, joiden perusteella osittaispurkaus voidaan havaita.

Offline-mittauksia on tehty etenkin kaapeleille. Mittauksessa kaapeli kytketään irti verkosta ja kytketään virtalähteeseen ja mittalaitteisiin. Virtalähde syöttää kaapeliin tiettyä testijännitettä ja mittalaitteet havaitsevat mahdolliset osittaispurkausten aiheuttamat virta- ja jännitepulssit. Vikapaikka pystytään näin myös paikantamaan, kun lasketaan suoraan mittalaitteelle kulkevan pulssin ja kaapelin toisesta päästä heijastuneen pulssin välinen aikaero. (Pakonen et al. 2018, s. 32)

Offline-mittaukset sopivat hyvin kaapeleille, sillä monet online-mittaukset ovat mahdottomia toteuttaa käytössä oleville kaapeleille, koska ne ovat haudattuna maahan. Offline-mittauksen etuna on testijännitteen säätömahdollisuus. Testijännite voidaan nostaa käyttöjännitettä korkeammaksi, jolloin hyvin aikaisessa vaiheessa olevat viat ovat paremmin havaittavissa. Offline-menetelmän huono puoli on, että se vaatii aina käyttökatkon ja käytössä olevien kytkentöjen purkamisen, jotta mitattavat osat saadaan kytkettyä virtalähteeseen ja mittalaitteisiin. Offline-mittalaitteet ovat myös erittäin suurikokoisia verrattuna online-mittalaitteisiin, sillä offline-laitteiden täytyy kyetä tuottamaan riittävä jännite ja virta mittauksen suorittamiseen. (Pakonen et al. 2018, s. 127-128)

Puistomuuntamoiden kuntotarkastusten yhteydessä online-mittaukset ovat relevantimpi mittausmenetelmä. Online-mittalaitteet ovat kompakteja ja mobiileja, mittaus ei vaadi käyttökatkoa tai valmiiden kytkentöjen purkamista ja mittaus on huomattavasti nopeampi toteuttaa. Offline-menetelmä on usein kuitenkin tarkempi ja antaa enemmän tietoa vian vakavuudesta, joten offline-menetelmää ei pidä suoraan hylätä puistomuuntamoiden mittauksissa. Online-mittaus on parempi menetelmä yleiseen kartoitukseen, mutta joissain tapauksissa offline-mittaus voisi toimia tarkentavana mittauksena suuremman prioriteetin kohteissa, kun selvitetään muuntamon jo havaitun vian vakavuutta.

Tähän asti offline-mittauksia on tehty pääasiassa vain kaapeleille, joten soveltuvuudesta puistomuuntamon mittaukseen ei tutkimustietoa ole olemassa. Tampereen teknillisen yliopiston tutkimuksessa (Pakonen et al. 2018) kaapelin mittauskytkennässä oli kuitenkin mukana kaapelin lisäksi myös kaapelin päässä olevan muuntamon erottimen toinen puoli. Tällaisessa kytkennässä mittaus kertoo myös erottimen toisessa päässä mahdollisesti tapahtuvat osittaispurkaukset. Offline-menetelmä voisi siis sopia puistomuuntamoiden mittaukseen siten, että päätetään mittaus vasta muuntajaa syöttäviin kaapeleihin, jolloin

mittauksessa olisi mukana erottimen toisen puolen sijaan koko erotin, kiskosto sekä välikaapelit muuntajalle.

4.3.1 DAC-mittaus

DAC (Damped Alternating Current) -mittauksessa testijännitteenä toimii vaimeneva sinimuotoinen vaihtojännite. DAC-mittauksessa kaapeliin syötetään ensin tasajännitettä, jonka jälkeen jännite puretaan ilmasydämisen kelan läpi. Jännitteen purkautuessa kela ja kaapelin kapasitanssi muodostavat resonanssipiirin, joka aiheuttaa vaimenevan värähtelyn. Vaimenevan vaihtojännitteen etuna on laitteiston verraten pieni koko, koska virtalähteen ei tarvitse syöttää kaapeliin suurta kapasitiivista virtaa koko ajan vaan kaapeli vain ladataan tasajännitelähteellä. Mittauskytkentä kuitenkin aiheuttaa sen, että värähtelyn taajuus riippuu kaapelin kapasitanssista ja poikkeaa erittäin paljon normaalin käyttöjännitteen taajuudesta. Toinen huono puoli on testijännitteen lyhytkestoisuus ja vaimeneminen. Näistä syistä johtuen DAC-mittauksella saadut tulokset eivät välttämättä aina ole vertailukelpoisia normaalilla käyttöjännitteellä tehtyjen mittauksien kanssa. (Pakonen et al. 2018, s. 31-34, 109-110)

4.3.2 VLF-mittaus

VLF (Very Low Frequency) -mittauksessa kaapeliin syötetään tasaista vaihtojännitettä, jonka taajuus on erittäin matala. Merkittävänä erona DAC-mittaukseen verrattuna on se, että testijännite on tasainen, mutta taajuus on erittäin matala. VLF-mittauksessa taajuus on yleensä 0.1 Hz, joten osittaispurkausmittaukseen tarvittavan pulssimäärän keräämiseen menee paljon aikaa verrattuna DAC-mittauksen tai käyttöjännitteellä suoritettavien mittauksien korkeampaan taajuuteen. Matalan taajuuden etuna on pieni tehon tarve, jolloin mittalaite voidaan tehdä paljon kompaktimmaksi kuin jos mittaus tehtäisiin normaalilla käyttöjännitteellä. (Pakonen et al. 2018, s. 31, 35)

5 MITTALAITTEET

Puistomuuntamoiden kuntotarkastuksien kohdalla online-mittalaitteet ovat hyvin olennaisessa roolissa, koska mittaaminen on nopeampaa kuin offline-mittalaitteilla, eikä käyttökatoa tarvita. Online-mittausta voisi pitää ensisijaisena menetelmänä puistomuuntamon yleisen kuntotilan tarkastukseen. Online-mittauksen tarkkuus ei välttämättä jokaisessa tilanteessa riitä määrittämään vian vakavuutta. Online-mittaus on silti epäilemättä olennainen osa puistomuuntamoiden mittauksia, sillä käytön aikaisilla mittauksilla saadaan nopeasti kerättyä referenssiarvoja, jotka ovat olennaisessa osassa muuntamoiden kunnan vertailua ja kartoitusta.

Puistomuuntamoissa voi esiintyä monentyyppisiä osittaispurkauksia erilaisissa komponenteissa. Eri tyyppisille ja eri paikoissa ilmeneville osittaispurkauksille on omat optimaaliset mittausmenetelmänsä, joten mittalaitteessa olisi hyvä olla monipuoliset ominaisuudet ja mahdollisuus käyttää useampaa mittausmenetelmää. Aiemmin esitettyjen mittausmenetelmien analysoinnin pohjalta olennaisimpina menetelminä voisi pitää TEV-mittausta ja HFCT-mittausta. TEV-mittaus on olennainen mittaus, koska se antaa nopeasti, helposti ja turvallisesti referenssiarvoja, joiden perusteella muuntamon kuntokartoitusta voidaan tehdä. HFCT-mittaus voisi toimia tarkempana vian vakavuudesta kertovana mittauksena, sillä HFCT-mittaus on ainut näistä online-menetelmistä, joka antaa tietoa osittaispurkauksen näennäisvarauksesta.

Nykyään erilaisia online-mittauksiin suunniteltuja osittaispurkausmittalaitteita on olemassa jo melko suuri valikoima. Mobiilien kenttäkäyttöön suunniteltujen mittalaitteiden pioneerina on toiminut EA-Technology, joka toi vuonna 2007 markkinoille UltraTEV detector -mittalaitteen. UltraTEV detector avasi markkinat kompakteille yksinkertaisille osittaispurkausmittalaitteille. UltraTEV detector käyttää osittaispurkausten tunnistamiseen ultraääni- ja TEV -antureita. (Davies 2015, s. 7) Sittemmin valikoima on laajentunut huomattavasti ja nykyään osa mittalaitteista sisältää erittäin laajasti ominaisuuksia. Alla on esiteltynä kaksi modernia mittalaitetta, jotka voisivat ominaisuuksiensa puolesta sopia hyvin puistomuuntamoiden osittaispurkausmittauksiin.

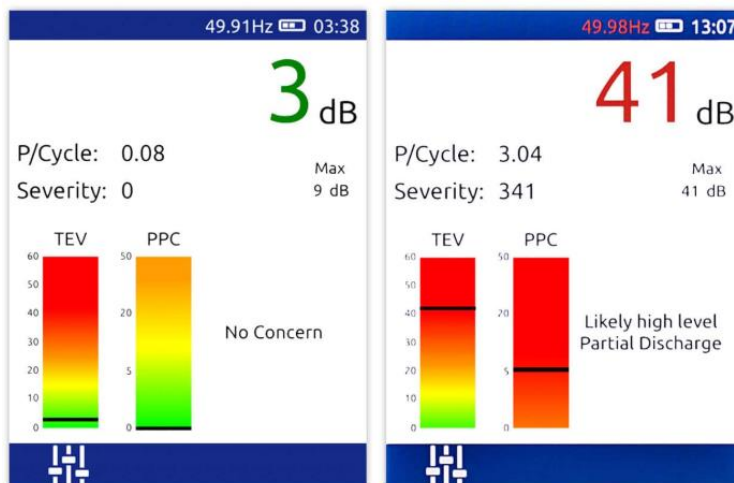
5.1 UltraTEV Plus2

UltraTEV Plus2 -mittalaitteen idea pohjautuu alkuperäiseen UltraTEV detector -laitteeseen. Se on pienikokoinen (Kuva 11), helppokäyttöinen, mutta silti melko monipuolinen. Mittalaite kykenee havaitsemaan osittaispurkauksia TEV-antureilla sekä akustisella menetelmällä käyttäen ultraääniantureita. Lisäksi mittalaitteen voi tilata lisävarusteilla, joihin kuuluu HFCT-anturit, jolloin mittalaitteella on mahdollista tehdä myös tarkempia sähköiseen signaaliin perustuvia mittauksia kaapeleista ja kaapelivarusteista. Lisäksi saatavilla on myös suuntaava akustinen anturi, jolla on mahdollista mitata esimerkiksi pylväaseen nousevan kaapelin kaapelipäätteissä tapahtuvia osittaispurkauksia maasta käsin. (EA-Technology 2018)

UltraTEV Plus2 -mittalaitteen suurena etuna on tulosten tulkinnan helppous. Laite kertoo näytöllään suoran palautteen osittaispurkauksien tasosta ja arvioi vian vakavuutta. Kuvassa 12 näkyy laitteen antama tieto vian vakavuudesta. Laite kertoo TEV-pulssien amplitudin yksikössä dBmV, pulssien määrän yhdessä jaksossa sekä sanallisen palautteen vian vakavuudesta. Osittaispurkausten vakavuuden arviointi perustuu EA-Technologyn keräämään dataan osittaispurkausten tasosta eri tilanteissa. (Davies 2015, s. 6) Laitteen antama suora palaute on hyvä ominaisuus, koska se helpottaa mittausten arviointia ja mittaajalta ei vaadita niin perusteellista kokemusta. Toisaalta riskinä on myös se, että mitataan kohdetta, jota laitteeseen ladatut vertailutiedot eivät ymmärrä. Tällaisessa tilanteessa laite saattaa antaa virheellistä tietoa vian vakavuudesta. Mittaajan kokemus ja ammattitaito ovat siis edelleenkin suuressa roolissa mittauksia tehtäessä. Erityisen tärkeää tämä on, kun tehdään mittauksia kohteessa, jossa ei osittaispurkausmittauksia ole aiemmin laajasti tehty, kuten puistomuuntamoissa.



Kuva 11. UltraTEV Plus2 -mittalaite lisävarusteineen. (EA-Technology 2018)



Kuva 12. Mittalaite antaa suoran tulkinnan osittaispurkausten vakavuudesta. (EA-Technology 2018)

UltraTEV Plus2 vaikuttaa käytettävyydeltään ja ominaisuuksiltaan erinomaiselta vaihtoehdolta puistomuuntamoiden osittaispurkausmittausten yleistyökaluksi. Mittalaite täyttää kaikki hyvälle mittalaitteelle teorian pohjalta tehdyt ennako-oletukset eli se kykenee TEV-mittauksiin, akustisiin mittauksiin ja lisäksi tarvittaessa myös HFCT-mittauksiin. Joissain tapauksissa laitteen tulosten ilmaus saattaa kuitenkin olla liiankin suoraviivaista. Tulosten tulkinta voi muuttua haasteelliseksi, jos mittausympäristö poikkeaa siitä, minkä pohjalta mittalaitteen algoritmi tulosten vakavuuden arvioi. Tulosten tulkintaan vaaditaan siis ammattitaitoa ja kokemusta mittalaitteen selkeästä ja informatiivisesta käyttöliittymästä huolimatta.

5.2 Megger UHF PDD

Megger UHF PDD on kompakti ja monipuolinen mittalaite osittaispurkausmittauksiin (Kuva 13). Sen mittaustekniikka perustuu pääosin UHF- ja RF-menetelmiin. Mittalaite tunnistaa osittaispurkauksien synnyttämää sähkömagneettista säteilyä UHF- ja RF-taajuusalueilla. Mittalaitteen antenni tunnistaa kaikkialta ympäriltä tulevan sähkömagneettisen säteilyn ja erottelee siitä mahdollisesti osittaispurkauksien aiheuttaman säteilyn. UHF PDD -mittalaite on mahdollista synkronoida verkon taajuuteen, jolloin se kykenee tehokkaammin erottamaan osittaispurkausten pulssimaiset taajuuden mukaan toistuvat signaalit muusta jatkuvasta kohinasta. Näistä syistä UHF PDD -mittalaite on erityisen hyvä etenkin sähköasemien yleiseen tarkkailuun. (Megger)



Kuva 13. Megger UHF PDD -mittalaitteessa on suuri ja selkeä kosketusnäyttö. (Megger)

UHF- ja RF-taajuusalueilla toteutettavat osittaispurkausmittaukset voisivat kuitenkin antaa myös tietoa puistomuuntamoiden osittaispurkauksista. UHF PDD kykenee erottamaan koronapurkausten ja pintapurkausten tyypilliset taajuusalueet haitallisemman sisäisen purkauksen taajuusalueesta, joten se voisi olla toimiva työkalu arvioitaessa tarkempien mittausten tarvetta puistomuuntamoissa. UHF PDD -mittalaitteeseen tulee lisävarusteena lisäksi TEV- ja HFCT-anturit. TEV-mittauksella saataisiin sähkömagneettisen säteilyn mittauksen ohella helposti ja nopeasti kerättyä referenssiarvoja muuntamoiden vertailuun ja analysointiin. Lisäksi HFCT-mittaus toimisi tarkentavana mittauksena. (Megger)

UHF PDD on kokonaisuutena tehokkaampi työkalu kuin UltraTEV Plus2, sillä se kykenee laajempiin sähköasemien mittauksiin ja lisäksi myös kohdistetumpiin yksittäisten komponenttien mittauksiin. UltraTEV Plus2 -mittalaitteen ominaisuudet on kuitenkin paremmin kohdistettu juuri puistomuuntamoiden mittausten tarpeisiin. Siksi se saattaisi olla parempi vaihtoehto ensimmäiseksi työkaluksi, mikäli mittausten pääpaino on puistomuuntamoissa.

6 YHTEENVETO

Sähkömarkkinalain uudistus aiheuttaa verkkoyhtiöille tarvetta kehittää keskijänniteverkon kunnonhallintaa. Yhä enemmän on myös kiinnostusta kehittää puistomuuntamoiden mittausperusteista kunnonhallintaa. Puistomuuntamoissa ei aiemmin ole ainakaan laajemmin tehty kunnonhallinnan mittauksia, eikä aihetta ole tarkemmin tutkittu.

Tämän työn tavoitteena oli perehtyä osittaispurkausmittausten menetelmiin ja nykyisiin käyttökohteisiin sekä soveltaa tätä tietoa puistomuuntamoiden osittaispurkausmittausten mahdollisuuksien selvittämiseen. Lisäksi tavoitteena oli löytää mittalaitteita, jotka tarjoavat mahdollisimman kattavat mahdollisuudet puistomuuntamoiden osittaispurkausmittauksiin.

Osittaispurkaus on sähköinen purkaus, joka ylittää eristeen osittain. Yleensä osittaispurkaus syttyy eristeessä olevan ontelon, halkeaman, liitoksen tai elektrodin terävien reunojen kohdalla. Osittaispurkausta voidaan pitää merkkinä eristeen heikentymisestä tai komponentin virheellisestä asennuksesta. Erilaiset komponentit ovat alttiita eri tyyppisille osittaispurkauksille. Haitallisin purkaustyyppi on sisäinen osittaispurkaus. Se mm. synnyttää eristeeseen sähköpuita ja rasittaa eristettä kemiallisten reaktioiden kautta. Täydellisen läpilyönnin riski kasvaa sähköpuun edetessä tai eristeen kuluessa muilla tavoin. Toinen erityisesti kaapelipääteissä ja läpivienneissä haitallinen purkaustyyppi on pintapurkaus. Kaapelipääteissä tai läpivienneissä voi eristeiden rajapinnalla tapahtua haitallisia purkauksia, jotka syövyttävät eristettä ja kasvattavat läpilyönnin riskiä. Kolmas erittäin yleinen purkaustyyppi on koronapurkaus. Koronapurkaus tapahtuu elektrodin ja kaasun rajapinnassa, joten itse purkaus ei ole haitallinen. Koronapurkauksessa syntyvät sivutuotteet saattavat kuitenkin kemiallisten reaktioiden kautta vahingoittaa ympäröiviä eristemateriaaleja. Lisäksi koronapurkauksen synnyttämät signaalit saattavat häiritä haitallisten purkausten synnyttämien signaalien havaitsemista.

Osittaispurkauksia ilmenee komponenteissa usein jo kauan ennen kuin lopullinen läpilyönti tapahtuu. Esimerkiksi uusissa kaapelipääteissä saattaa heti käyttöönoton jälkeen syttyä osittaispurkauksia virheellisen asennuksen seurauksena. Tästä syystä osittaispurkausmittaus on hyvä menetelmä havaitsemaan alkavia vikoja sähköverkossa.

Puistomuuntamoissa osittaispurkauksia mitataan kaapelipääteistä, erottimista, läpivienneistä ja muuntajasta. Osittaispurkaus synnyttää sähkömagneettista säteilyä, akustisia signaaleja ja sähköisiä signaaleja, jotka kaikki mahdollistavat osittaispurkauksien mittaamisen. Sähkömagneettiseen säteilyyn ja akustisiin signaaleihin perustuvat mittaukset eivät ole yhtä tarkkoja kuin sähköisiin signaaleihin perustuvat mittaukset. Ne voisivat kuitenkin olla hyvä ja nopea tapa saada puistomuuntamon kunnosta yleiskuva ja toimia työkaluna arvioitaessa tarkempien mittauksien tarvetta tai jopa korjaustarvetta.

Osittaispurkausten mittausmenetelmät jakautuvat online- ja offline-menetelmiin. Tässä työssä keskityttiin enemmän online-menetelmiin, koska online-mittaukset ovat hyvä tapa kartoittaa puistomuuntamoiden kuntoa nopeasti ja helposti. Online-mittausten suuri etu offline-mittauksiin verrattuna on, että käyttökatkoa ei tarvita eikä muuntamon kytkentöjä tarvitse muuttaa. Online-mittauksilla saatujen tulosten analysoinnissa olennaisessa osassa on kattavan referenssiarvopankin kerääminen. Yksittäisestä mittauksesta ei välttämättä pystytä vian vakavuutta tarkasti arvioimaan, mutta tulosta voidaan verrata vastaavien muuntamoiden mittauksiin ja näin analysoida muuntamoiden kuntoa paremmin. Mittaustulokset toimivat myös referenssinä saman muuntamon tulevaisuudessa tehtäville mittauksille, jolloin vian vakavuutta voidaan mittaustuloksen kehittymisen perusteella arvioida paremmin. Offline-mittaukset voisivat toimia hyvänä tarkentavana mittauksena tärkeille muuntamoille, joissa on jo havaittu osittaispurkauksia, mutta niiden kriittisyyttä ei online-menetelmillä ole pystytty arvioimaan luotettavasti.

TEV-menetelmä vaikuttaa erittäin potentiaaliselta online-menetelmältä. TEV-menetelmä perustuu suojarakenteisiin indusoituneiden jännitepulssien mittaamiseen. Osittaispurkaus aiheuttaa sähkölaitteen maadoitettuun metallikuoreen indusoituneita jännitepulsseja, jotka voidaan havaita käytön aikaisilla mittauksilla. TEV-menetelmällä osittaispurkauksen vakavuutta voidaan arvioida jännitepulssien määrän sekä niiden amplitudin perusteella. Akustinen osittaispurkausmittaus voisi myös olla käyttökelpoinen mittausmenetelmä puistomuuntamon kunnan yleisessä kartoituksessa. Akustinen mittaus perustuu osittaispurkauksen synnyttämän äänen havaitsemiseen. Akustisen mittauksen etuna on mittausmenetelmien yksinkertaisuus.

Lisäksi osittaispurkauksen havainnointiin voidaan käyttää RF- tai UHF-menetelmää, jotka perustuvat osittaispurkauksen aiheuttaman sähkömagneettisen säteilyn havaitsemiseen ilmasta antennien avulla. RF- ja UHF-menetelmät ovat samankaltaisia, mutta ne toimivat eri taajuusalueilla: RF -menetelmä alle 1 GHz ja UHF -menetelmä 0.3 GHz - 3 GHz.

HFCT-menetelmä on tässä työssä esitellyistä mittausmenetelmistä ainut sähköisen signaalin mittaukseen perustuva online-menetelmä. HFCT-mittaus vaatii antureiden asennuksen kaapelipäätteen ympärille, joten se on hieman haastavampi mittaus. HFCT-mittaus ei aina onnistu käytön aikana, sillä joskus antureiden asennus ilman käyttökeskeytystä ei ole mahdollista. HFCT-mittaus on näistä online-menetelmistä ainut, joka antaa tietoa osittaispurkauksen näennäisvarauksesta, joten se voisi antaa kaikista tarkinta tietoa purkauksen vakavuudesta puistomuuntamoissa.

Esitellyistä mittausmenetelmistä on vaikea sanoa tarkasti, mikä niistä sopii parhaiten juuri puistomuuntamoiden osittaispurkausmittauksiin. Selvää on, että tarvitaan lisätutkimusta ja käytännön kokeita, ennen kuin tarkkaa tietoa saadaan. Mitään näistä menetelmistä ei kuitenkaan tarvitse hylätä täysin vielä tässä vaiheessa, sillä on olemassa mittalaitteita, jotka pystyvät hyödyntämään useita näistä online-menetelmistä. EA-Technologyn UltraTEV Plus2 ja Meggerin UHF PDD vaikuttavat molemmat ominaisuuksiltaan hyviltä vaihtoehdoilta puistomuuntamoiden käytön aikaisiin osittaispurkausmittauksiin. UltraTEV Plus2 -laitteen ominaisuudet sopivat paremmin juuri puistomuuntamoiden mittauksiin, mutta Megger tarjoaa laajemmat ominaisuudet, mikäli halutaan suorittaa mittauksia myös sähköasemalla. Molemmat tarjoavat käyttöön hyvän valikoiman online-mittausmenetelmiä, joten kummallakin pääsisi varmasti alkuun puistomuuntamoiden osittaispurkausmittausten tutkimuksessa.

LÄHTEET

- Aro, M. Elovaara, J. Karttunen, M. Nousiainen, K. Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. painos. Helsinki: Otatieto
- Chen, X. Xu, Y. Cao, X. Gubanski, S.M. 2015. Electrical Treeing Behavior at High Temperature in XLPE Cable Insulation Samples. [verkkojulkaisu] vol. 22 pp. 2841-2851 [viitattu 20.7.2018]. saatavissa https://www.researchgate.net/publication/284985249_Electrical_Treeing_Behavior_at_High_Temperature_in_XLPE_Cable_Insulation_Samples
- Davies, N. 2015. Partial Discharge Techniques For Measuring Condition Of MV & HV Switchgear. [verkkojulkaisu] [viitattu 17.10.2018]. saatavissa [https://www.slideshare.net/thorneandderrick1985/partial-discharge-techniques-for-measuring-condition-of-mv-hv-switchgear?from_action=save,](https://www.slideshare.net/thorneandderrick1985/partial-discharge-techniques-for-measuring-condition-of-mv-hv-switchgear?from_action=save)
- EA-Technology. 2018. UltraTEV Plus2. [Verkkojulkaisu] [viitattu 2.12.2018]. saatavissa https://www.eatechnology.com/americas/wp-content/uploads/sites/5/2018/06/UltraTEV-Plus2-with-Locator_FINAL_USA_LR.pdf
- Elenia. 2017. Sähköverkko tutuksi. [verkossa] [viitattu 20.9.2018]. saatavissa <http://www.elenia.fi/yritys/s%C3%A4hk%C3%B6verkko-tutuksi>
- Energiateollisuus. 2014. Yleistietoa häiriöistä. [verkossa] [viitattu 2.12.2018] saatavissa https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkokatkot
- Energiavirasto. 2013. Sähkömarkkinalainsäädännön uudistamisen vaikutuksia sähköverkkotoimintaan. [verkkojulkaisu] [viitattu 2.12.2018]. saatavissa <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/simo+nurmi.pdf/ad9cda69-6353-406d-a36e-5d77de59bad2>
- Guomin, L. 2013. Transient earth voltage (TEV) based partial discharge detection and analysis. Nanyang Technological University. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.7.2018]. saatavissa <https://repository.ntu.edu.sg/handle/10356/54865>

IEEE. 2009. Standard for High-Voltage Switchgear (Above 1000 V) Test Techniques— Partial Discharge Measurements. [verkkojulkaisu] [viitattu 12.7.2018]. Saatavissa <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/4804311/>

Lassila, J. 2018. Sähköverkkotekniikan peruskurssi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luento

Liu, H. 2015 Acoustic partial discharge localization methodology in power transformers employing the quantum genetic algorithm. [verkkojulkaisu] vol. 102 pp. 71-78 [viitattu 12.7.2018] saatavissa https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0003682X15002340/1-s2.0-S0003682X15002340-main.pdf?_tid=e3007b36-ac45-49d0-9d05-34d8e32ade7d&acdnat=1531385285_c5005e150ff60e50e7d30df0e4cdeb70

Megger. UHF PD Detector. [Verkkojulkaisu] [viitattu 2.12.2018]. saatavissa https://content.megger.com/getattachment/08ec73b7-b7bb-443f-b97c-f5c82b68ebe0/UHF-PDD_BR_EN_V02.pdf?_ga=2.20589499.24279616.1543861233-1288346988.1543254064

Mäkiranta, M. 2018. Exsane Oy:n toimitusjohtaja. Haastattelu

Nepola, K. 2013. Radiotaajuisten osittaispurkausmittausten soveltuvuus suurjännitteisten sähköasemalaitteidenkunnonvalvontaan. Diplomityö. Aalto-yliopisto sähkötekniikan osasto. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.7.2018]. saatavissa https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10450/master_Nepola_Kimmo_2013.pdf

Niemi, H. 2018. Elenia Oy:n kunnossapitoinsinööri. [Sähköpostiviesti] henri.niemi@elenia.fi 10.8.2018

Pakonen, P. Verho, P. Keränen, J. Muranen, S. 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. [verkkojulkaisu] [viitattu 20.7.2018]. saatavissa https://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Keskij%C3%A4nnitekaapeleiden%20kunnon%20arviointi%20h%C3%A4vi%C3%B6kerroin-%20ja%20osittaispurkausmittauksilla_Loppuraportti.pdf

Reka, Keskijännitekaapeli AHXAMK-W 20 kV. [verkossa] [viitattu 2.12.2018].
saatavissa [https://www.reka.fi/keski-ja-
suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv](https://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv)