



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Paulus Kuronen

**Osittaispurkausten havaitseminen ja  
kunnonvalvonta XLPE-eristeisissä  
suurjännitekaapeleissa**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Tekniikan kandidaatin tutkielma  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Paulus Kuronen		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Osittaispurkausten havaitseminen ja kunnonvalvonta XLPE-eristeisissä suurjännitekaapeleissa		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Koulutusohjelma:</b>	Sähkö- ja energiatekniikka		
<b>Opintosuunta:</b>	Sähkötekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Kimmo Kauhaniemi		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	31

---

**TIIVISTELMÄ:**

Luotettava sähkönsiirto on keskeinen edellytys modernin yhteiskunnan toiminnalle. Suurjännitekaapeleiden eristeen kunto on merkittävä tekijä sähkönsiirron luotettavuuden kannalta, sillä kaapeliviivat voivat johtaa merkittäviin taloudellisiin sekä toiminnallisiin vaikutuksiin. XLPE-eriste on laajalti käytetty eristemateriaali suurjännitekaapeleissa sen monien teknisten etujen vuoksi. XLPE-eristeisissä suurjännitekaapeleissa osittaispurkaukset ovat keskeinen indikaattori eristeen kunnan arvioinnissa. Tämän vuoksi osittaispurkausten havaitseminen, paikantaminen ja tunnistaminen on välttämätöntä sekä jatkuvan kunnonvalvonnan että kaapelin eristeen kunnan kannalta.

Tutkielman tavoitteena on vertailla ja tunnistaa osittaispurkausten havaitsemismenetelmiä sekä tutkia niiden soveltuvuutta suurjännite XLPE-eristeisissä maakaapeleissa. Tutkielmassa pyritään muodostamaan kokonaiskuva mittausmenetelmien soveltuvuudesta kunnonvalvonnan näkökulmasta. Tutkielmassa myös tarkastellaan osittaispurkausten perusluonnetta, syntymekanismia sekä vaikutusta XLPE-eristeeseen maakaapeliin.

Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Aineistoina hyödynnetään kansainvälisiä standardeja, valmistajan teknisiä ohjeita sekä tieteellisiä julkaisuja. Tarkastelu kohde rajataan suurjännite XLPE-eristeisiin AC-maakaapeleihin. Tutkielma rajoittuu kirjallisuuteen, eikä työssä sisällä kokeellista tutkimusta.

Tutkielman perusteella voidaan todeta, että osittaispurkausten varhainen havaitseminen on tärkeää suurjännitekaapelin eristeen kunnan arvioinnissa. Tutkielman perusteella yksittäinen mittausmenetelmä ei välttämättä riitä kattavaan kunnonvalvontaan eikä yhtä ylivertaista havaitsemismenetelmää ole, vaan havaitsemismenetelmän valinta riippuu valittavasta kohteesta ja sen ominaisuuksista.

## Sisällys

1	Johdanto	5
2	Yleistä osittaispurkauksista	7
2.1	Osittaispurkausten luonne ja vaikutukset	8
2.2	XLPE-kaapelin rakenne	9
2.3	Osittaispurkaukset XLPE-kaapeleissa	10
3	Osittaispurkausten mittaaminen ja havaitseminen	12
3.1	Osittaispurkausmittausten standardit	13
3.2	HFCT-antureihin perustuva online-mittaus	14
3.3	UHF-antureihin perustuva online-mittaus	15
3.4	Optinen ja akustinen havaitseminen	16
3.5	PD-mittausten analyysi ja tulkinta	17
3.5.1	Signaalinkäsittely	17
3.5.2	Tekoäly	18
3.6	Mittausmenetelmien vertailu ja ominaisuudet	19
4	Kunnonvalvonnan kokonaisuus	22
4.1	PD-diagnostiikan prosessi	22
4.2	Teknologian kehitys ja haasteet	24
5	Johtopäätökset	25
	Lähteet	28

## Kuvat

Kuva 1. HV XLPE-kaapelin rakennekaavio (Wu ja muut, 2022).	10
Kuva 2. XLPE-liitoksen (keskijänniteliitos, 35 kV) vikaantuminen (muokattu lähteestä Govindarajan ja muut, 2023).	11
Kuva 3. IEC 60270 testipiiri (Chan ja muut, 2023).	14
Kuva 4. Osittaispurkauksen havaitsemiskokeen vakiomenettely (Wen ja muut, 2025).	18
Kuva 5. HV-kaapelijärjestelmän jatkuva kunnonvalvonta (Koltunowicz ja muut, 2016).	23

## Taulukot

Taulukko 1. Lista purkaustyyppien signaaliominaisuuksista (muokattu lähteestä Wen ja muut, 2025)	8
Taulukko 2. PD-havaitsemistekniikoiden vertaileva yhteenveto (Muokattu lähteestä Emdadi ja muut, 2025).	21

## Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternating current)
GIS	Kaasueroiteinen kytkinlaitos (Gas insulated switchgear)
HFCT	Korkeataajuusvirtamuuntaja (High-frequency current transformer)
HV	Suurjännite (High voltage)
IEC	Kansainvälinen sähkötekninen komissio (International Electrotechnical Commission)
MV	Keskijännite (Medium voltage)
PD	Osittaispurkaus (Partial discharge)
UHF	Ultrakorkea taajuus (Ultra-high frequency)
VHF	Erittäin korkea taajuus (Very-high frequency)
XLPE	Ristisilloitettu polyeteeni (Cross-linked polyethylene)

## 1 Johdanto

Sähkösiirron luotettavuus on keskeinen tekijä modernin yhteiskunnan toiminnalle, sillä teollisuus, eri palvelut ja kriittinen infrastruktuuri ovat vahvasti riippuvaisia jatkuvasta sähkösaannista. Sähkönkulutuksen jatkuva lisääntyminen edellyttää sähkösiirtojärjestelmiltä kasvavaa siirtokykyä sekä entistä korkeampaa käyttövarmuutta. Emdadin ja muiden (2025) mukaan suurjännitteiset (HV) ja keskijännitteiset (MV) kaapelijärjestelmät muodostavat nykyaikaisen sähkösiirto- ja jakeluverkkojen selkärangan. Nykyaikaisissa sähköjärjestelmissä suurjännitelaitteiden laajan käytön myötä, osittaispurkausilmiöiden (PD) tutkimuksesta ja seurannasta on tullut yhä tärkeämpää (Wen ja muut, 2025). Shafiq ja muut (2020) toteavat, että kaapelien yhteenliitäntöjen määrän kasvaessa, myös liitoksien ja päätteiden määrä lisääntyy. Nämä ovat kaapelijärjestelmän haavoittuvimpia osia eristyksen heikkenemisen kannalta. Kaapelin korjaus on yleensä aikaa vievä prosessi ja vian tarkan sijainnin määrittäminen on haastavaa (Govindarajan ja muut, 2023).

Ortego ja muut (2024) toteavat, että tyypillisesti suurjännitesähköasema voi koostua useista eristysjärjestelmistä, kuten ilmaeristysalijärjestelmästä, kaasueristysalijärjestelmästä (GIS), neste-eristysalijärjestelmästä (tehomuuntajat) ja kiinteäeristysalijärjestelmästä (tehokaapelit), joiden kaikkien maadoitusrakenteet on yhdistetty toisiinsa ja kytketty sähköaseman maahan. Erinomaisen eristyskyvyn, mekaanisen lujuuden ja lämmönjohtavuuden ansiosta ristosilloitettua polyeteeniä (XLPE) on käytetty laajalti suurjännitekaapelien eristysjärjestelmissä ja se toimii ensisijaisena eristemateriaalina 10 kV – 220 kV voimakaapeleille (Shang ja muut, 2025). Kansainvälisen sähkövoimajärjestön CIGRÉ:n (2020) mukaan melkein kaikki 2005 vuoden jälkeen asennetut AC-maakaapelit ovat XLPE-eristeisiä (98 %). Polymeeristen eristysmateriaalien, kuten ristosilloitettu polyeteeni (XLPE), on raportoitu hajoavan kokonaan muutamassa päivässä osittaispurkauksen ilmaantumisen jälkeen (Govindarajan ja muut, 2023). Koltunowiczin ja muiden (2016) mukaan asennuksen jälkeiset PD-mittaukset ovat pakollisia monissa maissa osana HV XLPE-kaapelijärjestelmien vaihtovirtakäyttöistä eristekestävyydestä.

Kansainvälinen sähkötekniikan toimikunta (IEC) hyväksyi vuonna 1967 nimikkeistön ”osittaispurkaukset”, joka auttaa aiheeseen liittyvän tutkimuksen muotoilussa (Zhang ja muut, 2021). Shadi ja muut (2025) toteavat, että maailmanlaajuisen maanalaisen kaapeli-infrastruktuurin ikääntyminen aiheuttaa kriittisen sähköjärjestelmän luotettavuusongelman, joka lisää eristysvikojen ja sähkökatkosten riskiä. Sähkökaapeleiden pitkäaikaista luotettavuutta haastavat useat rasiustekijät, kuten lämpövaihtelut, sähköiset ylikuormitukset, kosteuden pääsy, mekaaniset rasitukset ja ympäristön aiheuttama ikääntyminen (Emdadi ja muut, 2025). Nämä rasiustekijät heikentävät sähkökaapelia ja voivat lopulta johtaa osittaispurkauksiin. Osittaispurkausmittaukset tarjoavat arvokasta tietoa suurjännite eristysjärjestelmien kunnan arvioimiseksi ja edistävät niiden laadunvarmistusta (Álvarez ja muut, 2015). Monet kansainväliset tutkijat sekä sähköalan organisaatiot, kuten IEEE ja CIGRÉ, pitävät osittaispurkausten havaitsemista tehokkaimpana menetelmänä XLPE-kaapelien eristyksen kunnan arvioinnissa (Qin ja muut, 2024).

Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tunnistaa ja vertailla mittausmenetelmiä, joilla osittaispurkaukset voidaan havaita luotettavasti suurjännite maakaapeleissa. Työssä ei pyritä arvioimaan yksittäisten menetelmien paremmuutta, vaan niiden soveltuvuutta eri käyttötilanteissa. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, koska tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva olemassa olevista mittausmenetelmistä ja niiden ominaisuuksista. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan myös osittaispurkausten perusluonnetta, syntymekanismia sekä vaikutusta XLPE-maakaapeliin. Tähän etsitään vastausta seuraavien tutkimuskysymysten avulla:

1. Mitkä PD-mittausmenetelmät soveltuvat parhaiten XLPE-maakaapeleiden kunnan jatkuvaan arviointiin sekä valvontaan?
2. Voivatko offline- ja online-mittauksien yhdistetty lähestymistapa parantaa XLPE-kaapeleiden kunnanvalvonnan luotettavuutta?

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan, mitä osittaispurkaukset ovat sekä niiden luonnetta ja vaikutuksia.

## 2 Yleistä osittaispurkauksista

Osittaispurkauksella tarkoitetaan paikallista sähköpurkausta, joka tapahtuu eristysrakenteen viassa, kuten ilmaraossa, öljykalvossa tai johtimen reunassa, ilman eristyksen kokonaisläpimurtoa. Purkauksen aiheuttaa sähkökentän voimakkuuden kasvu eristemateriaalin tai sähkölaitteen paikallisella alueella (Wen ja muut, 2025; Wan ja muut, 2016). Zhang ja muut (2021) toteavat, että osittaispurkausten mittausta käytetään laajalti sähköasennusten testauksessa ja diagnostiikassa, koska se on laajalti hyväksytty vikojen indikaattori. Osittaispurkaussignaalit ovat yleensä lyhytkestoisia, matalatasoisia pulsseja, jotka voivat ajan myötä katkaista johtimien välisen eristyksen kokonaan, mikä johtaa suurjännitelaitteiden täydelliseen rikkoutumiseen (Ambikairajah ja muut, 2011).

Wenin ja muiden (2025) mukaan, kun sähkökentänvoimakkuus ylittää eristemateriaalin paikallisen läpilyöntivoimakkuuden, elektronit kiihtyvät vika-alueella ja muodostavat pieniä plasmoja. Tähän prosessiin liittyy jatkuvaa energian vapautumista, mikä johtaa eristemateriaalin fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien asteittaiseen heikkenemiseen (Wen ja muut, 2025). PD tapahtuu normaalisti, kun eristeessä on vika suuren sähkökentän alaisena (Pote ja muut, 2017). Zhang ja muut (2025) toteavat, että osittaispurkaus voi tapahtua missä tahansa kohdassa, jossa esiintyy eristysvikaa, kuten kaasueristeistä järjestelmistä öljyeristeisiin ja kiinteästi eristettyihin laitteisiin. PD haihduttaa energiaa lämmön, äänen, valon, kemiallisen reaktion ja sähkövirran muodossa (Govindarajan ja muut, 2023).

Ambikairajah ja muut (2011) toteavat, että on olemassa erilaisia PD-signaaleja, kuten koronapurkaus, pintapurkaus sekä sisäinen purkaus ja näistä jälkimmäinen on vaikein mitata ja havaita, mutta XLPE-kaapeleissa tärkein havaittava purkaustyyppi. Zhangin ja muiden (2021) mukaan koronapurkaus on purkausilmiö, jonka aiheuttaa ilman ionisaatio lähellä korkeajännite elektrodia ja ne voivat olla peräisin kaapeliliittimistä, kuten kojeistoista. Zhang ja muut (2021) myös toteavat, että pintapurkaus tapahtuu dielektrisen materiaalin pinnalla ja usein kahden materiaalin rajapinnassa ja tämän vuoksi tehokaapelit,

erityisesti kaapeliliitokset on valmistettu useista dielektristä kerroksista. Sisäinen purkaus tapahtuu heikon lujuuden omaavien dielektristen materiaalien sisällä, kuten halkeamat, ilmaraot ja sähköpuut (Zhang ja muut, 2021).

Erilaisilla PD-signaaleilla, kuten sisäisillä, pinta- ja ilmaraon purkauksilla on omat ominaisuutensa, jotka heijastavat eristysvirheiden erilaisia fysikaalisia mekanismeja (Wen ja muut, 2025). Taulukossa 1 esitetään eri osittaispurkaustyypeille toisistaan poikkeavat signaaliominaisuudet, mikä tekee niiden tunnistamisesta haastavaa käytännön mittauksissa. Taajuusalueen, spektrin laajuuden ja signaalin keston perusteella purkaustyypejä voidaan tunnistaa. PD-vian tyypistä (sisäinen, korona- tai pintapurkaus) riippuen PD-pulssit esiintyvät eri vaihekulmissa käytetyn jännitteen positiivisten ja negatiivisten puolijaksojen aikana (Shafiq ja muut, 2020).

**Taulukko 1.** Lista purkaustyyppien signaaliominaisuuksista (muokattu lähteestä Wen ja muut, 2025)

Osittaispurkaus tyyppi	Signaalin ominaisuudet
Koronapurkaus	Eri aikataajuusominaisuudet
Sisäinen purkaus	Voimakkaampi matalataajuinen komponentti, pidempi kesto, laajempi spektri
Pintapurkaus	Taajuus suunnilleen 30 MHz:n ja 800 MHz: välillä
Ilmavälipurkaus	Yleensä korkeataajuinen ja satunnainen

## 2.1 Osittaispurkausten luonne ja vaikutukset

Osittaispurkaus on suurjännitteisten sähkölaitteiden pääongelma (Pote ja muut, 2017). Erilaisten suurjännitesähköjärjestelmien eristemateriaalien vikatyyppeiden ja niiden heikkenemistapojen analyysi on osoittanut, että osittaispurkausten esiintyminen on hyvin yleinen ominaisuus kaikissa järjestelmissä (Álvarez ja muut, 2015). Shadi ja muut (2025) toteavat, että eristysvikoihin vaikuttavat sähköiset, mekaaniset, termiset ja kemialliset rasitukset ja osittaispurkaukset toimivat usein varhaisina indikaattoreina ja kiihdyttäjinä. Sakodan ja muiden (2020) mukaan osittaispurkaus kuluttaa eristysmateriaalia jatkuvasti

ilmetessään. Yksi eristyksen heikkenemisen tärkeimmistä tekijöistä on osittaispurkaukset, jotka voivat kiihdyttää suurjännitelaitteiden ikääntymisprosessia ja jos purkauksia ei valvota, voi se johtaa katastrofaalisiin vikoihin, jotka aiheuttavat merkittäviä fyysisiä ja taloudellisia tappioita (Habib ja muut, 2024).

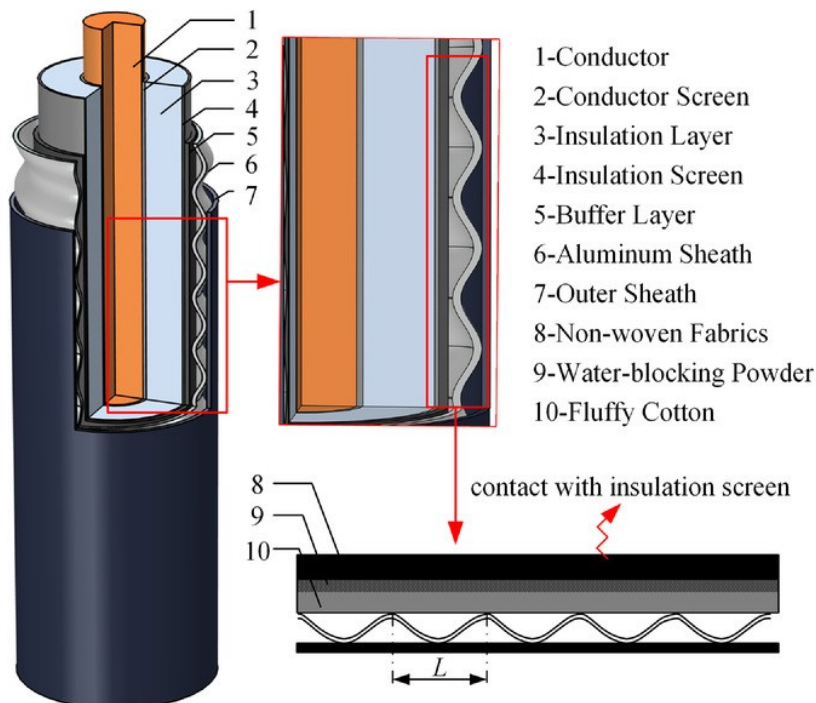
Emdadin ja muiden (2025) mukaan osittaispurkaukset voivat käynnistää sekä kiihdyttää sähköpuiden muodostumista, jotka ovat eristemateriaalin läpi kasvavia säikeellisiä kanavia. Nämä puut lopulta heikentävät dielektristä lujuutta ja aiheuttavat vikoja (Emdadi ja muut, 2025). Osittaispurkaus on niin monimutkainen ilmiö, että osittaispurkausmittauksen toistaminen on äärimmäisen vaikeaa (Zhang ja muut, 2021). Tämä asettaa erilaisia vaatimuksia mittausten menetelmille, joita tarkastellaan myöhemmin tässä työssä.

## **2.2 XLPE-kaapelin rakenne**

Kuten aiemmin todettiin, XLPE-kaapeli tunnetaan erinomaisesta eristyskyvystä, mekaanisesta lujuudesta ja lämmönjohtavuudesta. Kuvassa 1 esitetään suurjännitteisen XLPE-kaapelin tyypillinen rakenne. Kuvan 1 mukaisesti XLPE-kaapelin ydinosia ovat johdin, johdinsuoja sekä eristekerros, joita ympäröi eristyssuoja, puskurikerros, alumiinivaippa ja ulkovaippa. Lisäksi rakenteeseen kuuluu myös vedenestäviä materiaaleja, kuten kuitukangas, vedenestojauhe ja puuvillatäyte.

Wu ja muut (2022) toteavat, että HV XLPE-kaapelin rakenteessa, puskurikerros muodostaa hyvän sähköisen yhteyden eristyssuojakerroksen ja alumiinivaipan välille sekä sillä on aksiaalinen vedenpitävä tehtävä. Metallivaippa on välttämätön HV-kaapeleille, sillä se tarjoaa sille säteittäisen vesitiiviuden, oikosulkuvirran reitin ja mekaanisen suojan (Liu ja Chen, 2020). Wun ja muiden (2022) mukaan suurjännitteiset XLPE-kaapelit altistuvat helposti ulkoiselle kosteudelle. Liu ja Chen (2020) toteavat, että XLPE-maakaapeleissa metallivaipat on valmistettu pääasiassa alumiinista, kun taas kuparia, lyijyä, ruostumatonta terästä ja muita metalleja käytetään vain erityistilanteissa. Emdadin ja muiden (2025) mukaan XLPE-eristeen ja ulkovaippojen välinen puskurikerros on erityisen altis vaurioille

ja sen hajoaminen on yhdistetty paikalliseen purkausaktiivisuuteen sähkökosteuden aiheuttaman rasituksen alaisena.



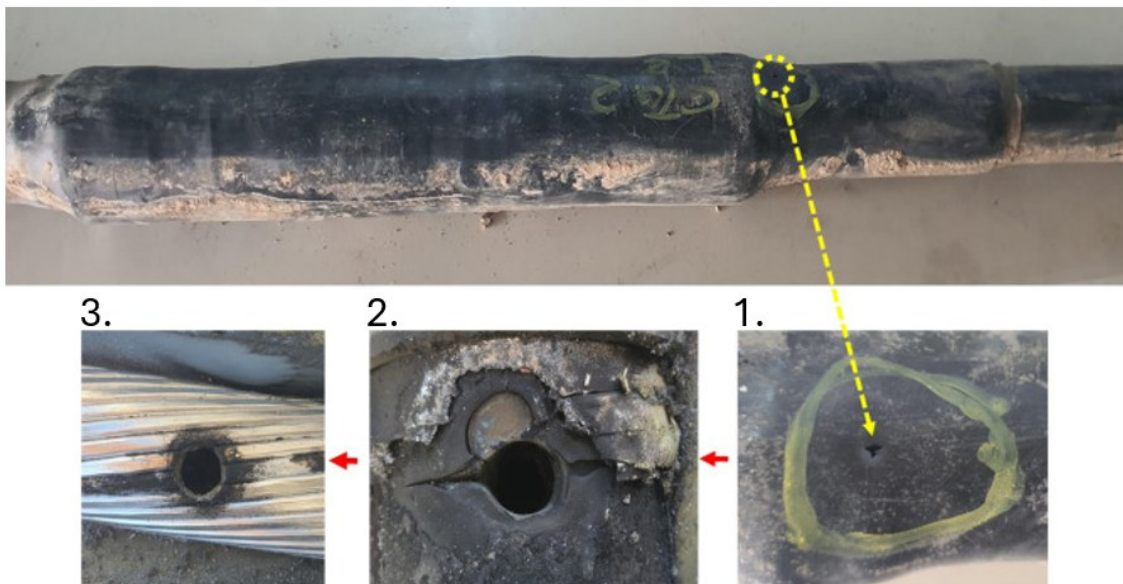
Kuva 1. HV XLPE-kaapelin rakennekaavio (Wu ja muut, 2022).

### 2.3 Osittaispurkaukset XLPE-kaapeleissa

Sakoda ja muut (2020) toteavat, että XLPE-kaapeli on tärkeässä roolissa vakaan sähkön jakelussa asiakkaille siirto- ja jakelulinjoissa. Monien XLPE-kaapeleiden lähestyessä 30 vuoden suunniteltua käyttöikää, on eristyksen heikkenemisestä tullut yhä merkittävämpi (Shang ja muut, 2025). Suurjännitteisten laitteiden, kuten XLPE-kaapeleiden, eristyksen heikkeneminen voi johtaa osittaispurkaussignaaleihin (Ambikairajah ja muut, 2011). Shang ja muut (2025) toteavat, että tekijät, kuten valmistusprosessit, asennuksen laatu ja käyttörasitukset (sähköiset, lämpö- ja mekaaniset rasitukset), vaikuttavat merkittävästi XLPE-eristyksen suorituskykyyn.

Osittaispurkaukset esiintyvät eristysjärjestelmän epähomogeenisuuksien, kuten onteloiden, halkeamien, epäpuhtauksien tai terävien ulkonemien vuoksi, joissa paikallinen sähkökenttä ylittää dielektrisen materiaalin läpilujuuden (Emdadi ja muut, 2025). PD-aktiivisuus kiinteässä dielektrisessä materiaalissa riippuu käytettävästä jännitteestä, materiaalin dielektrisyysvakiosta ja ontelon koosta (Pote ja muut, 2017). XLPE-eristeisissä kaapeleissa eristekerrosten väliin tai puolijohtavien suojakerrosten ympärille muodostuneet tyhjiöt ovat tyypillisiä osittaispurkausten lähteitä (Emdadi ja muut, 2025).

Koltunowicz ja muut (2016) toteavat, että suurin osa HV XLPE -kaapelijärjestelmien dielektrisistä vioista liittyy kaapelivarusteiden eristejärjestelmien vikoihin, jonka myötä osittaispurkauksia seurataan jatkuvasti kaikissa liitoksissa ja päätteissä. Qinin ja muiden (2024) mukaan XLPE-kaapeleiden eristystaso liittyy läheisesti osittaispurkauksiin, ja osittaispurkausten lukumäärä kuvaa XLPE-kaapelien eristyksen kuntoa. Kuvassa 2 esitetään keskijännitekaapeli XLPE-jatkoksen vikaantuminen osittaispurkauksen seurauksena, mutta ilmiö on vastaavanlainen myös suurjännitekaapeleilla. Kuvassa on esitetty: 1. alkuvaurio, 2. eristeen rappeutuminen ja 3. lopullinen läpilyönti.



**Kuva 2.** XLPE-liitoksen (keskijänniteliitos, 35 kV) vikaantuminen (muokattu lähteestä Govindaranjan ja muut, 2023).

### 3 Osittaispurkausten mittaaminen ja havaitseminen

Osittaispurkausten havaitseminen ja analysointi on ratkaisevassa roolissa kaapeleiden kunnonvalvonnassa (Zhang ja muut, 2021). Osittaispurkauksen havaitsemisen jälkeen, siihen liittyvän vikatyypin tunnistaminen ja sijainnin määrittäminen on erittäin tärkeää, jotta voidaan arvioida, ovatko purkaukset haitallisia vai eivät (Álvarez ja muut, 2015). Shadi ja muut (2025) toteavat, että osittaispurkausten aktiivisuuden havaitseminen ja analysointi on kuitenkin teknisesti haastavaa ja riippuu hyvälaatuisesta anturista ja signaalien onnistuneesta tulkinnasta.

Emdadi ja muut (2025) toteavat, että nykyaikaiset PD-ilmaisumenetelmät kattavat useita fysikaalisia alueita, kuten sähköisiä, akustisia, sähkömagneettisia sekä optisia. Jokainen fysikaalinen alue kohdistuu eri PD-aktiivisuuden tunnusmerkkiin, joka mahdollistaa monimuotoisia valvontaratkaisuja. Tehokaapeleille on olemassa online- ja offline-PD-mittauksia (Zhang ja muut, 2021). Shafiqin ja muiden (2020) mukaan perinteisesti PD-valvonta edellyttää paikan päällä tehtäviä mittauksia, joita tekevät asiantuntijat, ja joilla on useiden vuosien kenttäkokemus datan manuaalisesta analysoinnista. Osittaispurkausten mittauksissa käytetään yleisesti offline-mittauksia, mutta online-valvonta kehittyy nopeasti sen reaaliaikaisuuden vuoksi (Zhang ja muut, 2021).

Useimmat kehitetyt tekniikat toimivat offline-tilassa, mikä tarkoittaa, että mittauksen aikana kaapeliosuus on irrotettava verkosta ja sitä syötetään ulkoisella jännitelähteellä, esimerkiksi 50 Hz:n vaihtojännitteellä (Smit, 2001). Toisin kuin offline-PD-mittausjärjestelmät, online-mittausjärjestelmät eivät käytä ulkoista virtalähdettä kaapelinäytteen virransyöttöön, vaan ne käyttävät verkon verkkovirtaa (Wester ja muut, 2002). Tämän perusteella voidaan todeta, että online-mittausmenetelmät mahdollistavat kaapeleiden seurannan ilman käyttökatkoja, mikä tekee niistä tärkeän työkalun modernissa kunnonvalvonnassa.

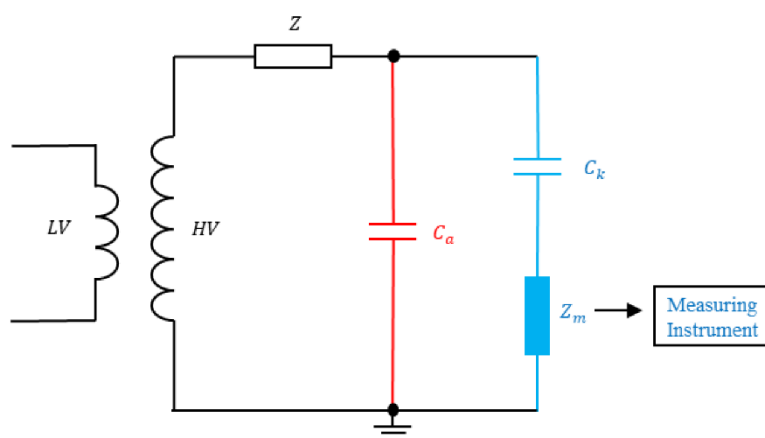
### 3.1 Osittaispurkausmittausten standardit

Yleinen PD-havainnointia koskeva standardi on määritelty standardissa IEC 60270, joka määrittää PD-tasot varausyksiköissä, erityisesti pikocoulombeina (pC) ja nanocoulombeina (nC) (Rajakrom ja muut, 2024). Standardi määrittelee useita parametreja, kuten testipiirin, mitattavat suureet, kalibrointivaatimukset ja ohjeet testausmenetelmiin (Sze ja Lachance, 2020). Rajakromin ja muiden (2024) mukaan PD-havainnointiin tarkoitettu taajuusalue on 30 kHz – 1MHz ja taajuuskaistanleveydet ovat 9 kHz – 30 kHz laajakaistahavainnointia varten. Taajuusalue 100 kHz – 900 kHz on kapeakaistahavainnointia varten (Rajakrom ja muut, 2024). IEC 60270 toimii keskeisenä PD-mittausten viitestandardina, mutta useat tutkimukset korostavat sen puutteita korkeataajuisissa, kohinaisissa ja epäperinteisissä kaapelisovelluksissa (Emdadi ja muut, 2025).

Tekninen spesifikaatio IEC 62478 sisältää yleiset säännöt sähkömagneettisia ja akustisia menetelmiä käyttäville online-PD-mittauksille, mutta ei anna suosituksia eristysdiagnostiikasta (Ortego ja muut, 2024). Rajakrom ja muut (2024) toteavat, että standardi luokittelee eri taajuusalueita, jotka kattavat alle 3 MHz:n matalataajuiset taajuusalueet (samanlainen kuin IEC 60270), 3–30 MHz:n korkeataajuiset (HF) taajuusalueet, 30–300 MHz:n erittäin korkeataajuiset (VHF) taajuusalueet ja 300–3000 MHz:n ultra korkeataajuiset (UHF) taajuusalueet. Rajakromin ja muiden (2024) mukaan standardi hyväksyy erilaisia PD-ilmaisuuksiin käytettäviä antureita. Näitä ovat mittausimpedanssiin kytketyt kytkentäkondensaattorit, korkeataajuusvirta-anturit, akustiset anturit ja sähkömagneettiset anturit.

Sze ja Lachance (2020) toteavat, että tyypillisessä osittaispurkausmittauksessa määritellään mittausjännite ja taajuus, jännitteen syöttöjärjestys, mittauksen kesto ja hyväksymis- ja hylkäyskriteerit. Näihin kriteereihin voi myös sisältyä osittaispurkausten jännitteen ja sammumisjännitteen määrittäminen (Sze ja Lachance, 2020). Edellä kuvattu tyypillinen osittaispurkaustestaus perustuu sähköiseen mittausmenetelmään. Kuvassa 3 on esitetty perinteinen testipiiri standardin IEC 60270 mukaan. Testipiiri koostuu kytkentäkondensaattorista, mittausimpedanssista ja mittauskohteesta. Govindarajan ja muiden

(2023) mukaan perinteinen IEC 60270 -tekniikka PD-mittaukseen vaihtojännitteellä soveltuu hyvin laboratorio- ja teollisuustestaukseen, mutta ei paikan päällä tapahtuvaan diagnostiikkaan. Suurjännitteisten instrumenttien käyttö PD-mittauksessa soveltuu hyvin ja on luotettava teholaitteiden offline-käyttöönottotestaukseen (Chan ja muut, 2023). Govindarajan ja muut (2023) toteavat, että paikan päällä tehtävässä testauksessa käytetty IEC 60270 on altis ulkoiselle kohinalle ja häiriölle ja sillä on mahdollisia rajoituksia, joten PD-havainnointiin on kehitetty epätavanomaisia menetelmiä. Näitä menetelmiä käydään seuraavaksi läpi.



Kuva 3. IEC 60270 testipiiri (Chan ja muut, 2023).

### 3.2 HFCT-antureihin perustuva online-mittaus

HFCT-anturit (High-Frequency Current Transformer) ovat yleisesti käytettyjä antureita online-PD-mittauksissa, mutta niiden tekniset ominaisuudet eivät ole hyvin tunnettuja (Ortego ja muut, 2024). Álvarez ja muut (2015) toteavat, että HFCT-anturi koostuu ferromagneettisella sydämellä varustetusta induktiokelasta ja soveltuu hyvin osittaispurkausten tai pulssimaisen kohinan mittaamiseen. Yleisesti online-PD-mittauksissa suurjännitelaitoksissa HFCT-anturit kiinnitetään maadoitusverkon maadoitusjohtimiin ja tämä menetelmä perustuu osittaispurkaussignaalien havaitsemiseen asentamalla korkeataajuisen virta-anturi virtakaapelin maadoitusjohtimen ympärille (Álvarez ja muut, 2015; Qin ja muut, 2024). Ortego ja muut (2024) toteavat, että useimmat diagnostiikkavirheet tapahtuvat, kun HFCT-anturien herkkyys heikkenee HV-sähköaseman kytkimen asennosta

(auki tai kiinni) riippuen. Ortegon ja muiden (2024) mukaan esimerkiksi metallikoteloituun kojeiston kytkettyjen kaapelipäätteiden päätekohtia ympäröivien HFCT-antureiden herkkyys on riittävän hyvä vain, kun kojeisto on jännitteinen.

Signaali-kohinasuhdetta voidaan parantaa analysoimalla tiettyjä taajuuskaistoja ja korkea herkkyys saavutetaan sekä lähellä että kaukana PD-lähteestä (Álvarez ja muut, 2015). Osittaispurkausten paikantaminen suurjännitekaapeleissa on tärkeää ja haastavaa. Álvarezin ja muiden (2015) mukaan, kun useampi HFCT-anturi on sijoitettu suurjänniteasennukseen, niin PD-pulssien mittaus yhteisellä aikaviitteellä mahdollistaa vikojen sijainnin määrittämisen matka-ajan analyysin avulla ja näin tallennettujen pulssien analyysi parantaa vikojen havaitsemista. HFCT-antureita käytetään laajemmin niiden korkean herkkyyden ja ei-invasiivisen asennuksen vuoksi (Habib ja muut, 2024).

### **3.3 UHF-antureihin perustuva online-mittaus**

Sähkömagneettisessa havaitsemisessa (UHF/VHF) käytetään antenneja sieppaamaan osittaispurkauslähteiden korkeataajuisista sähkömagneettista säteilyä (Emdadi ja muut, 2025). UHF-menetelmää on sovellettu laajasti sähköasemilla maailmanlaajuisesti erinomaisin tuloksin sekä suurjännitteisissä käyttöönottotesteissä, että käytön aikaisessa kunnonvalvonnassa (Wan ja muut, 2016). UHF-anturi nähdään PD-mittauksissa antennina ja se mittaa lähikentässä, jossa PD-signaalien sähkömagneettisen kentän teho on riittävän merkittävä (Álvarez ja muut, 2015). UHF-anturin mittataajuusalue on 300–3000 MHz (Zhang ja muut, 2021). Álvarezin ja muiden (2015) mukaan UHF-anturit voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin antureihin. Sisäiset UHF-anturit kootaan yleensä GIS-kammioiden koteloon, muuntajiin tai ne voidaan myös upottaa kaapelitarvikkeisiin (Álvarez ja muut, 2015). Álvarez ja muut (2015) toteavat, että ulkoiset UHF-anturit asennetaan tarkastusikkunoihin tai näkyviin reunoihin GIS-järjestelmissä, muuntajissa tai muissa suurjännite-elementeissä, kuten metallikoteloituissa kojeistoissa tai pyörivissä koneissa. Ulkoisia antureita voidaan kytkeä myös kaapeleiden vaippaan ja niiden lisävarusteisiin (Álvarez ja muut, 2015).

Beuran ja muiden (2019) mukaan UHF-anturimenetelmä on vähemmän altis ulkoisille häiriöille. UHF-anturin etuna on korkea häiriönsietokyky ilmassa esiintyvälle sähköisille kohinalle, häiriölle ja koronapurkauksille (Álvarez ja muut, 2015). Emdadi ja muut (2025) toteavat, että UHF-anturi on erittäin herkkä ja sopii kompakteihin asennuksiin, kuten kaapelipäätteisiin. UHF-anturi mahdollistaa tarkat vikojen paikat sekä kaapeleissa että kaapelin lisävarusteissa etäisyysselektiivisesti (Álvarez ja muut, 2015). Chanin ja muiden (2023) mukaan UHF-anturin korkea kestävyys ulkoista kohinaa vastaan mahdollistaa sen soveltuvuuden sekä online- ja offline-PD-paikannukseen, mikä tekee siitä täydentävän työkalun PD-diagnostiikkaan perinteisen menetelmän lisäksi.

### **3.4 Optinen ja akustinen havaitseminen**

Optiset ja ultraääniset/akustiset anturit ovat nousseet esiin ei-invasiivisina vianilmaisuratkaisuuksina pitkän matkan XLPE-asennuksissa (Emdadi ja muut, 2025). Akustisessa menetelmässä mitataan PD-tapahtuman aikana syntyviä ääniaaltoja ja sitä käytetään yleensä paikannustarkoituksiin yhdessä erillisen havaitsemismenetelmän kanssa (Beura ja muut, 2019). Menetelmä on erityisen hyödyllinen GIS-laitteille ja XLPE-liitoksille, vaikkakin sen havaitsemisalue on suhteellisen rajallinen (Emdadi ja muut, 2025). Emdadin ja muiden (2025) mukaan akustiset anturit ovat erityisen hyödyllisiä liitoksissa ja päätteissä, joissa osajännitteinen ylikuormitus ei välttämättä tuota voimakkaita sähköisiä transientteja. Tällaisten mittausten tarkkuus riippuu anturien sijoittelusta ja mekaanisesta kytkennästä kaapelin pintaan (Emdadi ja muut, 2025). Chanin ja muiden (2023) mukaan tekniikkaan vaikuttavat vähemmän sähköiset häiriöt, minkä vuoksi akustiset anturit voidaan asentaa ulkoisesti.

Optisen havaitsemisen viimeaikainen kehitys on mahdollistanut kuituoptisten antureiden sekä kaksikulotteisiin materiaaleihin perustuvien antureiden käytön osittaispurkausten havaitsemiseen ahtaissa tiloissa sekä vian varhaisessa vaiheessa (Emdadi ja muut, 2025). Optisia kuituantureita tai luotaimia voidaan käyttää optisen PD-mittauksen suorittamiseen ja vastaanottavan valon muuntamiseen sähköiseksi signaaliksi data-analyysiä varten (Chan ja muut, 2023). Emdadin ja muiden (2025) mukaan optiset kuituanturit

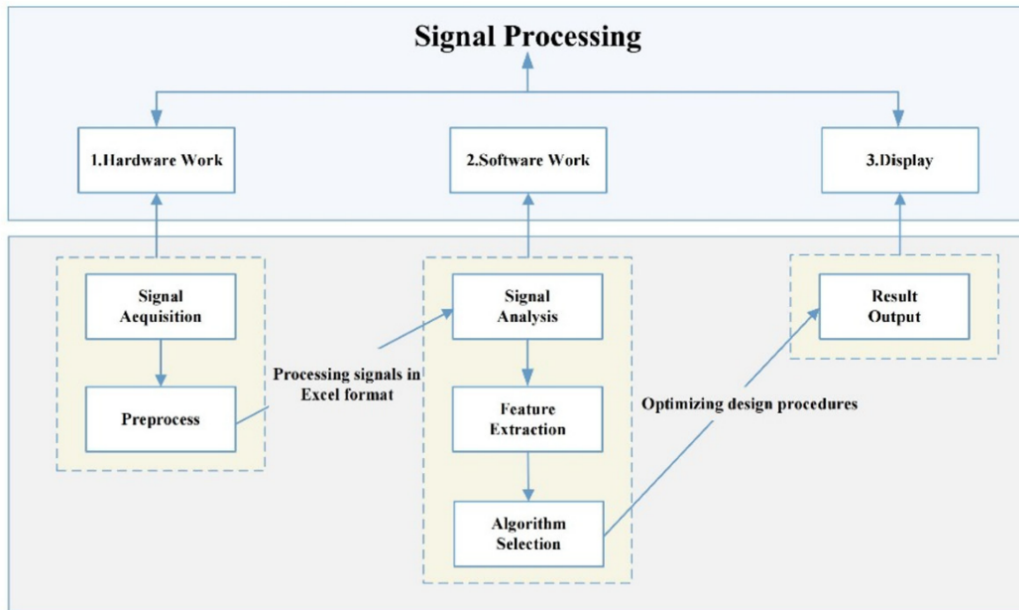
tarjoavat hajautetun tunnistusominaisuuden pitkillä etäisyyksillä, mikä on erityisen edullista HVDC- ja merikaapelisovelluksissa, mutta ne ovat kalliimpia ja monimutkaisempia ottaa käyttöön.

### **3.5 PD-mittausten analyysi ja tulkinta**

Tässä luvussa tarkastellaan, miten antureilla kerättyä dataa voidaan tulkita ja hyödyntää tekoälypohjaisten menetelmien avulla. Chan ja muut (2023) toteavat, että PD-häiriöiden havaitseminen on PD-diagnostiikan ensisijainen vaihe, koska se varmistaa tarkkojen ja luotettavien PD-signaalien saamisen ennen kuin sovelletaan muita signaalinkäsittelytekniikoita PD-lähteen paikantamiseksi ja PD-tyypin luokittelemiseksi.

#### **3.5.1 Signaalinkäsittely**

Signaalinkäsittely on olennainen osa PD-diagnostiikkaa. Govindarajan ja muiden (2023) mukaan osittaispurkauksia voidaan karakterisoida PD-signaalin aaltomuodolla, pulssin nousuajalla, leveydellä, suuruudella ja PD-toistotaajuudella. Kuvassa 4 on esitetty signaalinkäsittelyn tyypillinen vaiheistus, joka koostuu laitteistolla tapahtuvasta signaalin hankinnasta, ohjelmistolla suoritettavasta datan käsittelystä ja lopullisten tulosten esittämisestä. Wenin ja muiden (2025) mukaan osittaispurkaussignaalien käsittelyprosessi voi sisältää tietyn purkaussignaalin lähteen mittaamiseen antureiden avulla ja signaalin esikäsittelyn, kuten kohinanpoiston, suodatuksen ja vahvistuksen, signaalin laadun parantamisen ja hyvän pohjan luomiseksi myöhemmälle analyysille. Chanin ja muiden (2023) mukaan PD-tapahtuman aikana PD-lähteistä lähetetyt signaalit voidaan tallentaa UHF-, akustisilla tai optisilla antureilla, jotka ovat sijoitettu eri paikoille. Emdadi ja muut (2025) toteavat, että PD-anturit tuottavat raakadataa, mutta todellinen diagnostiikka-teho piilee siinä, kuinka näitä signaaleja käsitellään ja tulkitaan.



**Kuva 4.** Osittaispurkauksen havaitsemiskokeen vakiomenettely (Wen ja muut, 2025).

Shafiq ja muut (2020) toteavat, että vaikka mittausantureiden toiminnallinen suorituskyky on tärkeää, tiedonkeruujärjestelmällä on merkittävä rooli toimivan valvonta- ja diagnostiikkajärjestelmän kehittämisessä. Govindarajan ja muiden (2023) mukaan signaalinkäsittely tekniikoita on sovellettu PD-ominaisuusparametrien erottamiseen. Näitä ovat Fourier-muunnos, wavelet-muunnos, Hilbert-Huang-muunnos, Contourlet-muunnos, sisäinen modifunktio sekä Stockwell-muunnos parametrit. Käytännön olosuhteissa muuttuva ympäristö, vaihtelevat kohinatasot ja PD-signaalien vaimennus voivat haitata PD-signaalien keräämistä (Chan ja muut, 2023). Osittaispurkaussignaalien ominaisuuksien ja muuttumislakien perusteellinen ymmärtäminen mahdollistaa sähkölaitteiden kunnan paremman arvioinnin ja tieteellisten kunnossapitostrategioiden laatimisen (Wen ja muut, 2025). Shafiq ja muut (2020) toteavat, että signaalien ominaisuudet ja testattava laite tarjoavat korvaamatonta tietoa datan tulkitsemiseksi analyysin aikana.

### 3.5.2 Tekoäly

Osittaispurkauksen havaitsemisen lisäksi tarvitaan datan tulkintaa vikatyyppin määrittämiseksi. Koneoppimisen ja syväoppimisalgoritmien avulla tekoäly voi tehokkaasti erottaa

erityyppisiä vikoja, kuten pintapurkauksia ja koronapurkauksia, mikä nopeuttaa ja paikantaa vikalähteen tarkasti (Wen ja muut, 2025). Fyysisen mallinnuksen rinnalla koneoppimiseen perustuvat datalähtöiset lähestymistavat ovat nousseet tehokkaiksi työkaluiksi PD-kuvioiden tunnistamiseen, luokitteluun ja lokalisointiin (Emdadi ja muut, 2025). Koneoppimistekniikat kuitenkin perustuvat käsin tehtyihin ratkaisuihin tärkeiden ominaisuuksien erottamiseksi, minkä vuoksi on ratkaisevan tärkeää, että ihmiset valitsevat oikean mallin käsitellessään kohinan saastuttamaa dataa reaali maailman tilanteissa, jotka voivat vaarantaa PD-lokalisoinnin tarkkuuden (Chan ja muut, 2023). Tyypillisesti virheellisiä diagnooseja tapahtuu, kun käytetään virheellisiä PD-diagnostiikkamenetelmiä (Ortego ja muut, 2024).

Viime vuosina tekoälystä (erityisesti syväoppimisesta) on tullut tutkimuskohde osittaispurkaussignaalien käsittelyssä (Wen ja muut, 2025). Wenin ja muiden (2025) mukaan syväoppimismallit eroavat perinteisistä menetelmistä siten, että ne pystyvät poimimaan automaattisesti oleelliset ominaisuudet suoraan raakadatasta ilman monimutkaista käsin tehtyä ominaisuussuunnittelua. Tekoälyn soveltaminen PD-signaalinkäsittelyssä keskittyy pääasiassa kolmeen ydinalueeseen: massiivisten tietomäärien tehokkaaseen hallintaan, purkauskuvioiden tarkkaan tunnistamiseen ja järjestelmän tilan reaaliaikaiseen diagnosointiin (Wen ja muut, 2025). Wen ja muut (2025) toteavat, että vaikka tekoälyn potentiaali osittaispurkausdiagnostiikassa on valtava, sen laajamittainen teollinen soveltaminen kohtaa edelleen useita keskeisiä haasteita, joista toistettavuus ja yleistettävyydet ovat keskeisiä pullonkauloja. Tämän perusteella voidaan todeta, että tekoälyä voidaan hyödyntää PD-mittausmenetelmien tukena erityisesti signaalien analysoinnissa ja tulkinassa, mutta lähitulevaisuudessa perinteisten PD-menetelmien korvaaminen ei kuitenkaan vaikuta todennäköiseltä.

### **3.6 Mittausmenetelmien vertailu ja ominaisuudet**

PD-mittaukset voidaan jakaa offline- ja online-mittauksiin. Online-mittaukset tarjoavat mahdollisuuden kerätä kaikki PD-mittaustiedot (Zhang ja muut, 2021). Toisin kuin offline-PD-diagnosi, online-PD-tunnistuksen herkkyys sekä mittaustulosten tulkinta riippuvat

voimakkaasti paikallisista ulkoisista häiriöistä ja kaapeliosuuden käyttöolosuhteista (Wester ja muut, 2002). Tämä korostaa eroavaisuuksia mittausten käytännöllisyyden ja tarkkuuden välillä.

Eri anturityyppien soveltuvuus riippuu niiden fysikaalisista ominaisuuksista. Optiset ja sähköiset anturit tarjoavat laajemman keskialueen peittoalueen, kun taas akustiset ja magnetoresistiiviset anturit sopivat paremmin paikallisiin matalataajuisiin ympäristöihin (Emdadi ja muut, 2025). Chan ja muut (2023) toteavat, että useiden anturien käytössä PD-signaalit voivat vääristyä anturien epätasaisen sijoituksen ja ympäristöhäiriöiden vuoksi, mikä tekee asianmukaisten anturiryhmien järjestelytutkimuksista välttämättömiä PD-mittauksen saavuttamiseksi.

Taulukossa 2 esitetään PD-havaitsemismenetelmien suhteellista herkkyyttä, kohinan-sietoa, havaitsemisaluetta sekä tyypillisiä sovelluksia. Shadi ja muut (2025) toteavat, että jokaisella PD-mittausmenetelmällä on omat hyvät ja huonot puolensa, mikä heijastuu myös taulukosta. Taulukossa 2 esitetään, että UHF/VHF-antennit tarjoavat erittäin korkean herkkyyden ja laajan tunnistusalueen, mikä tekee niistä erittäin soveltuvia sähkö-asemille sekä kaapelijatkoksiin. Toisaalta HFCT-anturit tarjoavat korkean herkkyyden ja ei-invasiivisen asennuksen, mutta niiden tunnistusalue on rajallisempi kuin UHF/VHF-anturien. Ultraäänisen menetelmän suorituskyky jää keskimääräiseksi useilla osa-alueilla. Chanin ja muiden (2023) mukaan akustista tunnistustekniikkaa suositaan enemmän muuntajissa, koska ulkoiset sähkömagneettiset häiriöt eivät vaikuta siihen. HFCT- ja akustiset menetelmät soveltuvat lähikenttämittauksiin, kun taas UHF/VHF-menetelmät soveltuvat parhaiten laajamittaiseen havaitsemiseen. Voidaan todeta, että sopivan PD-mittausmenetelmän valinta riippuu käyttökohteen vaatimuksista ja olosuhteista.

**Taulukko 2.** PD-havaitsemistekniikoiden vertaileva yhteenveto (Muokattu lähteestä Emdadi ja muut, 2025).

Havaitsemismenetelmä	Herkkyys	Kohinansieto	Tunnistusalue	Yleisiä sovelluksia
Sähköinen	Korkea	Matala	Keskitaso	Kaapelijatkokset, päätteet
Ultraääninen	Keskitaso	Keskitaso	Lyhyt	GIS, XLPE-kaapelipäätteet
UHF/VHF antennit	Erittäin korkea	Korkea	Pitkä	Sähköasemat, kaapelijatkokset
Optinen	Keskitaso	Erittäin korkea	Lyhyt	Kompaktit järjestelmät, varhainen vianarviointi

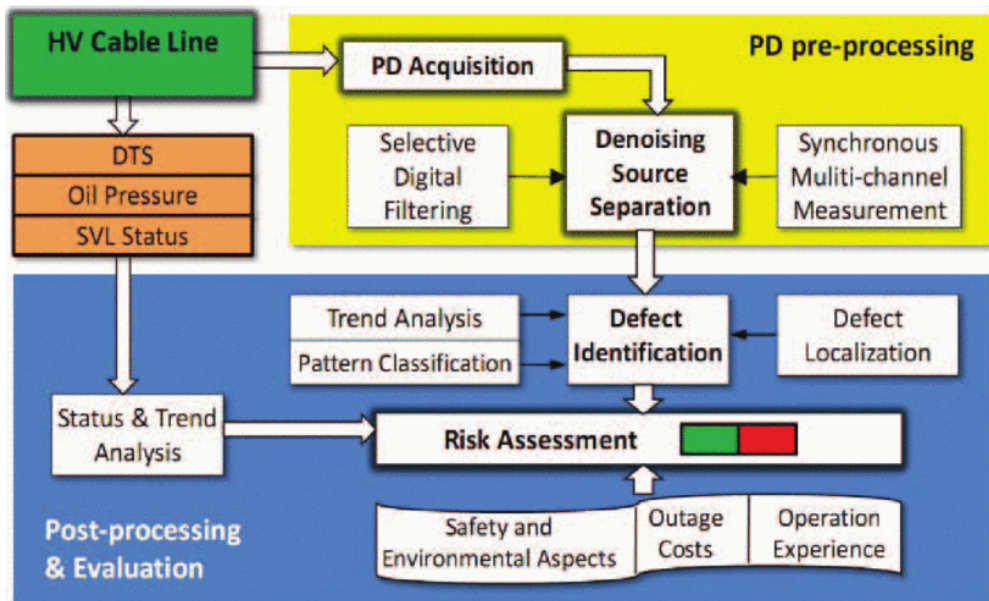
Useilla erilaisilla ominaisuuksilla, kuten etenemisviiveellä, amplitudilla, signaalin pituudella ja taajuusalueilla varustettujen antureiden mukauttaminen PD-mittauksiin, tekee tiedonkeruusta vähemmän alttiita kohinalle (Govindarajan ja muut, 2023). Taloudellisesta näkökulmasta offline-diagnostiikan soveltamiseen liittyvät verkkoyhteyksien kustannukset ovat tärkeä tekijä diagnostiikan käytössä (Smit, 2001). Govindarajan ja muiden (2023) mukaan online-diagnostiikkaa käytetään ensisijaisesti siksi, että se säästää kustannuksia ja vähentää sähkökatkojen todennäköisyyttä. Zhang ja muut (2021) puolestaan toteavat, että online-PD-mittaus on yleensä kalliimpaa, minkä vuoksi sitä käytetään pääasiassa tärkeiden laitteiden, kuten suurjännitekaapelitarvikkeiden mittaamiseen. Tämä ero selittyy tarkastelunäkökulmasta, sillä kustannuksia voidaan arvioida investointikustannusten tai käytönaikaisten säästöjen näkökulmasta. Vähemmän herkän online-PD-tunnistuksen ja herkän offline-diagnostiikan yhdistäminen voi olla hyödyllistä jakelu-kaapeliverkkojen eristyskunnan arvioinnissa (Wester ja muut, 2002). Emdadi ja muut (2025) toteavat, että ala vaatii vahvempia standarditoimia mittauskaistanleveyksien, epävarmuuden kvantifiointikäytäntöjen, anturien kalibrointimenetelmien ja arviointimetriikkojen yhdenmukaistamiseen.

## 4 Kunnonvalvonnan kokonaisuus

Jatkuvan kunnonvalvonnan tavoitteena on varmistaa kaapeleiden luotettava toiminta koko niiden käyttöiän ajan. Emdadi ja muut (2025) korostavat, että vankkojen kunnonvalvontajärjestelmien, mukaan lukien korkeataajuisten PD-antureiden ja synkronoitujen tiedonkeruujärjestelmien, integrointi sähköverkkoihin on olennaista vikojen ennustamiseksi varhaisessa vaiheessa. Luotettavien sähköjärjestelmien tarve on erittäin tärkeä ja siksi on tarpeen kehittää PD-valvontajärjestelmä, joka pystyy havaitsemaan PD:n esiintymisen ja sen suuruuden jopa eristyksen heikkenemisen alkuvaiheessa (Sakoda ja muut, 2020). Tämä on erityisen tärkeää, koska varhainen havaitseminen mahdollistaa ennakoivan kunnossapidon ja vähentää äkillisten vikojen riskiä.

### 4.1 PD-diagnostiikan prosessi

XLPE-kaapelieristyksen tehokas valvonta ja sen jäljellä olevan käyttöiän tarkka arviointi ovat välttämättömiä sähköjärjestelmän luotettavuuden parantamiseksi (Shang ja muut, 2025). Kuvassa 5 on esitetty monipuolinen suurjännitekaapeleiden kunnonvalvontajärjestelmän rakenne. Jatkuvan kunnonvalvonnan prosessi kattaa PD-mittauksen, signaalinkäsittelyn, vian tunnistuksen ja riskianalyysin. Emdadi ja muut (2025) toteavat, että voimakkaapeliijärjestelmien kunnonvalvonta ei ole enää ylellisyyttä, vaan välttämättömyys.



**Kuva 5.** HV-kaapelijärjestelmän jatkuva kunnonvalvonta (Koltunowicz ja muut, 2016).

Kattava PD-diagnostiikkaprosessi sisältää PD:n havaitsemisen, lokalisoinnin ja luokittelun (Chan ja muut, 2023). Shafiqin ja muiden (2020) mukaan PD-diagnostiikan luotettavuus riippuu hankitusta datasta ja sen tulkinnan tarkkuudesta. Online-PD-kuvio voidaan luokitella kolmeen ryhmään: selkeä PD-kuvio, epävarma PD-kuvio ja ei PD-kuviota (alhainen kohinataso) (Wester ja muut, 2002). PD-lähteen sijainnin varmistaminen on yksi tärkeimmistä menetelmistä suurjännitteisen eristysjärjestelmän kunnon diagnosoimiseksi ja arvioimiseksi nykyaikaisessa teollisuudessa (Wan ja muut, 2016). Chanin ja muiden (2023) mukaan, kun PD-signaalien havaitsemiskyky on saavutettu, PD-lähteen paikantamisesta tulee yhtä tärkeää nopean ja tehokkaan kunnossapidon varmistamiseksi.

Sähköisten, akustisten, lämpö- ja sähkömagneettisten tunnusten systemaattisen keräämisen ja tulkinnan avulla aikaperusteinen kunnossapito ei ainoastaan helpota kehittyvien vikojen varhaista havaitsemista, vaan luo myös tietopohjan ennakoivalle kunnossapidolle, luotettavuuden arvioinnille ja käyttöiän mallinnukselle (Emdadi ja muut, 2025). Näiden havaintojen perusteella voidaan todeta, että jatkuva kunnonvalvonta ei ole yksittäinen menetelmä, vaan kokonaisvaltainen prosessi.

Chanin ja muiden (2023) mukaan muuntajat, sähköasemat, kaapelit ja muut sovellukset lähettävät sähköisiä, sähkömagneettisia, akustisia ja optisia signaaleja PD-toiminnan aikana, ja PD-mittauksen soveltuvuus kuhunkin sovellukseen voi johtaa tarkempaan paikannukseen. Vikatilanteiden lukumäärän, vakavuuden ja sijainnin tunteminen antaa meille selkeän kuvan kaapelin kunnosta (Shadi ja muut, 2025). Sakoda ja muut (2020) toteavat, että PD-virheiden varhaisen havaitsemisen jälkeen on toivottavaa suorittaa yksiyiskohtainen PD-virheiden sijainnin paikantaminen XLPE-kaapeleissa.

## 4.2 Teknologian kehitys ja haasteet

Viimeaikaiset kehitysaskleet anturiteknologiassa, signaalikäsittelyalgoritmeissa ja tekoälyssä ovat merkittävästi edistäneet kunnonvalvontajärjestelmien ominaisuuksia (Emdadi ja muut, 2025). Lopuksi PD-havaitsemis- ja sijainninmääritysmenetelmän valinta riippuu valvottavan sähköjärjestelmän erityispiirteistä ja valvontaohjelman tavoitteista (Chan ja muut, 2023). Govindarajan ja muut (2023) toteavat, että voimakkaapeleiden online-valvonta on tulevaisuuden älykkään sähköverkon ensisijainen osa, jolla varmistetaan sen kestävyys sekä valvotaan ja ohjataan jatkuvasti verkkoinfrastruktuuria. Kuten aikaisemmin todettiin tekoälystä ja erityisesti syväoppimisesta on tullut tutkimuskohde PD-signaalien käsittelyssä, mutta se kohtaa edelleen useita keskeisiä haasteita.

Shangin ja muiden (2025) mukaan tekniikan alan kannalta soveltuvan kaapelin käyttöiän arviointimenetelmän kehittäminen mahdollistaa tieteellisesti optimoidun kunnossapitosuunnittelun ja resurssien tehokkaan kohdentamisen. Emdadi ja muut (2025) toteavat, että merkittävästä edistyksestä huolimatta HV/MV XLPE-kaapelijärjestelmien kunnonvalvonnassa, diagnostiikassa, ikääntymisanalyyysissä ja ennakoivassa kunnossapidossa on edelleen useita ratkaisemattomia haasteita, jotka rajoittavat teknologioiden laajamittaista ja luotettavaa käyttöönottoa kenttäolosuhteissa.

## 5 Johtopäätökset

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkasteltiin osittaispurkausten syntymekanismeja, vaikutuksia sekä mittaus- ja havaitsemismenetelmiä suurjännitteisissä AC XLPE-eristeisissä maakaapeleissa. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että osittaispurkaukset ovat keskeinen tekijä XLPE-eristeisten kaapeleiden eristyksen ikääntymisessä sekä viikaantumisessa. Sähkönkäytön kasvu ja energiamurros lisäävät sähköverkkojen kuormitusta, mikä korostaa suurjännitekaapelien eristysjärjestelmien kunnonvalvonnan ja diagnostiikan merkitystä. Osittaispurkausten varhainen havaitseminen on tärkeää sähkönsiirron käyttövarmuuden ja sähköturvallisuuden kannalta. Kuten luvussa 2.1 esitettiin, osittaispurkaus on erittäin monimutkainen ilmiö ja sen mittaaminen toistettavasti on hankalaa. Tarkastelu osoitti, että eri mittausmenetelmät eroavat toisistaan herkkyyden, kohinansietokyvyn, mittausetäisyyden ja käytännön osalta.

Aiemman tutkimuskirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että mikään menetelmä ei ole kaikissa tilanteissa yksiselitteisesti paras, vaan oikean menetelmän valinta riippuu käyttökohteesta. HFCT-anturit soveltuvat hyvin jatkuvaan online-valvontaan, erityisesti kaapelipääteissä niiden korkean herkkyyden ja helpon asennettavuuden vuoksi. UHF-anturien vahvuutena on erinomainen kohinansietokyky ja ne mahdollistavat tarkemman vikojen paikannuksen erityisesti sähköasemilla ja kaapelipääteissä. Akustinen menetelmä soveltuu puolestaan erityisesti paikannukseen ja häiriöympäristöihin, mutta sen havaitsemisalue on suhteellisen rajallinen. Optinen menetelmä mahdollistaa mittauksen pitkillä etäisyyksillä, mutta käyttöönotto kalliimpaa ja monimutkaisempaa. Jatkuvaan ja luotettavaan kunnonvalvontaan soveltuvat parhaiten online-menetelmät, mutta niiden tuottaman datan tulkinta edellyttää kehittyneitä signaalinkäsittelymenetelmiä.

IEC 60270-standardin mukainen offline-mittaus tarjoaa kalibroidun ja vertailukelpoisen pohjan mittauksille, mutta sen heikkoutena on epäjatkuvuus ja että mittauksen aikana kaapeliosuus on irrotettava verkosta. Online-menetelmät, kuten HFCT, UHF, akustiset ja optiset, mahdollistavat kehittyvien vikojen jatkuvan valvonnan, mutta omaavat omia

haasteita. Toisin kuin offline-menetelmä, online-menetelmä ei käytä ulkoista virtalähdettä vaan verkkovirtaa. Tämä tekee niistä riippuvaisia verkossa vallitsevista olosuhteista. Nämä kaksi lähestymistapaa yhdistämällä on mahdollista saavuttaa mittausten vertailukelpoisuus ja jatkuvuus. Kuten luvussa 3.5.1 esitettiin, vähemmän herkän online-menetelmän ja herkän offline-menetelmän yhdistäminen voi olla hyödyllistä kaapelin eristyksen kunnan arvioinnissa. Pääsääntöisesti online-diagnostiikka tarjoaa taloudellisesti halvemman ratkaisun sekä vähentää sähkökatkojen todennäköisyyttä.

Voidaan todeta, että kaapelin kunnonvalvonnan näkökulmasta pelkkä osittaispurkausten havaitseminen ei riitä, vaan tarvitaan kattava PD-diagnostiikkaprosessi, joka sisältää PD:n havaitsemisen, lokalisoinnin ja luokittelun. PD-lähteen paikantaminen on tärkeää nopean ja tehokkaan kunnossapidon varmistamiseksi. Eri vikatilojen lukumäärän, vakavuuden ja sijainnin paikantaminen antaa selkeän kuvan kaapelin kunnosta. Tulevaisuudessa kehitys etenee kohti enemmän älykkäitä kunnonvalvonnanjärjestelmiä. Kuten luvussa 3.5.2 esitettiin, erityisesti kone- ja syväoppiminen mahdollistaa PD-signaalien tehokkaan luokittelun ja vikojen paikantamisen. Tekoälyn potentiaali osittaispurkausdiagnostiikassa on valtava, mutta se kohtaa edelleen useita keskeisiä haasteita toistettavuudessa ja yleistettävyydessä. Älykkäiden sähköverkkojen kehittyminen lisää tarvetta jatkuvalla kunnonvalvonnalle.

Merkittävästä edistyksestä huolimatta HV/MV XLPE-kaapelijärjestelmien kunnonvalvon-  
nassa on edelleen ratkaisemattomia haasteita, jotka rajoittavat teknologioiden laajamittaista ja luotettavaa käyttöönottoa kenttäolosuhteissa. Kuten luvussa 3.5.1 todettiin, ala vaatii vahvempia standarditoimia mittauskaistanleveyksien, epävarmuuden kvantifiointikäytäntöjen, anturien kalibrointimenetelmien ja arviointimetriikkojen yhdenmukaistamiseen. IEC 60270 toimii keskeisenä PD-mittausten viitestandardina, mutta useat tutkimukset osoittavat sen puutteita korkeataajuisissa, kohinaisissa ja epäperinteisissä kaapelisovelluksissa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että luotettavan osittaispurkausten kunnonvalvonta sekä havaitseminen edellyttää monipuolista lähestymistapaa, jossa yhdistyvät eri mittausmenetelmien vahvuudet ja signaalienkäsittely. Osittaispurkaukset ovat tyypillinen ja laajalti esiintyvä ilmiö XLPE-eristeisissä maakaapeleissa. Tämä tekee niiden kunnonvalvonnasta ja havainnoinnista välttämätöntä kaapelin käyttöiän ja luotettavuuden varmistamiseksi. Ilman asianmukaista kunnonvalvontaa ja havainnointia osittaispurkaukset voivat johtaa kaapelin eristeen täydelliseen vaurioitumiseen, mikä aiheuttaa merkittäviä taloudellisia kustannuksia ja sähkönsiirron turvallisuusriskejä, kuten sähkökatkoja.

## Lähteet

- Ambikairajah, R., Phung, B. T., Ravishankar, J., Blackburn, T. R., & Liu, Z. (2011). Detection of partial discharge signals in high voltage XLPE cables using time domain features. *Electrical Insulation Conference (EIC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996179>
- Álvarez, F., Garnacho, F., Ortego, J., & Sánchez-Urán, M. Á. (2015). Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. *Sensors*, 15(4), 7360–7387. <https://doi.org/10.3390/s150407360>
- Beura, C. P., Beltle, M., & Tenbohlen, S. (2019). Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers Based on the Attenuation of UHF Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(4), 1520–1529. IEEE. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2909588>
- Chan, J. Q., Raymond, W. J. K., Illias, H. A., & Othman, M. (2023). Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress. *Energies*, 16(6), 2863. <https://doi.org/10.3390/en16062863>
- CIGRE Working Group B1.57. (2020). Update of Service Experience of HV Underground and Submarine Cable System. *Electra Technical Brochure, TB 815*, CIGRE. Noudettu 11.2.2026. osoitteesta. [Update of service experience of HV underground and submarine cable systems | ELECTRA](https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996179)
- Emdadi, K., Gandomkar, M., Aranizadeh, A., Vahidi, B., & Mirmozaffari, M. (2025). Overview of Monitoring, Diagnostic, Aging Analysis, and Maintenance Strategies in High-Voltage AC/DC XLPE Cable Systems. *Sensors*, 25(22), 7096. <https://doi.org/10.3390/s25227096>
- Govindarajan, S., Morales, A., Ardila-Rey, J. A., & Purushothaman, N. (2023). A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends. *Measurements*, 216, 112882. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112882>

- Habib, B., Zaabi, O. A., Harid, N., Hosani K., A., & Alkhatib, M. (2024). Condition Monitoring Based on Partial Discharge Diagnostics Using UHF Sensors: A Comprehensive State-of-the-Art Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31(6), 2860-2873. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3409517>
- Koltunowicz, W., Badicu, L.-V., Broniecki, U., & Belkov, A. (2016). Increased operation reliability of HV apparatus through PD monitoring. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(3), 1347-1354. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005579>
- Liu, Y. & Chen, J. (2020). Design of Smooth Aluminium Bonded Sheats in HV XLPE Cables Based on the Bending Performance Research. *IEEE Access*, 102493-102501. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998471>
- Ortego, J., Garnacho, F., Álvarez, F., Arcones, E., & Khamlichi, A. (2024). Locating Insulation Defects in HV Substations Using HFCT Sensors and AI Diagnostics Tools. *Sensors*, 21(16), 5312. <https://doi.org/10.3390/s24165312>
- Pote, R. S., Gohokar V. N., & Wakde, D. G. (2017). Identification and Detection of Partial Discharge and Electrical Breakdown within a Cavity by using Wavelet Transform under AC Condition. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering (IJREEICE)*, 5(1), 2321-2004. <https://doi.org/10.17148/IJREEICE.2017.5102>
- Qin, C., Zhu, X., Zhu, P., Lin, W., Liu, L., Che, C., Liang, H., & Hua, H. (2024). Partial Discharge Signal Pattern Recognition of Composite Insulation Defects in Cross-Linked Polyethylene Cables. *Sensors*, 24(11), 3460. <https://doi.org/10.3390/s24113460>
- Rajakrom, A., Cheechang, C., Laochu, P., Nimsanong, P., & Yutthagonwiht, P. (2024). Partial Discharge Detection Beyond the Frequency Range of IEC 60270. *IEE 5<sup>th</sup> International Conference on Dielectrics (ICD)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613175>

- Sakoda, T., Yamasaki, Y., Nakanose, S., Hayashi, N., Miyake, T., & Miyagawa, K. (2020). On-line PD system and PD Locator for XLPE Cables. *2020 8<sup>th</sup> International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/CMD48350.2020.9287182>
- Shadi, M. R., Mirshekali, H., & Shaker, H. R. (2025). Partial Discharge-Based Cable Vulnerability Ranking with Fuzzy and FAHP Models: Application in a Danish Distribution Network. *Sensors*, *25*(11), 3454. <https://doi.org/10.3390/s25113454>
- Shafiq, M., Kiitam, I., Kauhaniemi, K., Taklaja, P., Kütt, L., & Palu, I. (2020). Performance Comparison of PD Data Acquisition Techniques for Condition Monitoring of Medium Voltage Cables. *Energies*, *13*(16), 4272. <https://doi.org/10.3390/en13164272>
- Shang, Y., Qu, J., Wang, J., Chen, J., Ma, J., Xiong, J., Li, Y., & Lv, Z. (2025). Estimation of Remaining Insulation Lifetime of Aged XLPE Cables with Step-Stress Method Based on Physical-Driven Model. *Energies*, *18*(12), 3179. <https://doi.org/10.3390/en18123179>
- Smit, J. J. (2001). Insulation condition estimation of distribution power cables by on-line and off-line diagnostics. In *Proceedings of the 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001), Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001), and 33<sup>rd</sup> Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISEIM.2001.973716>
- Sze, M., & Lachance, M. (2020). A Guide for Partial Discharge Measurements on medium voltage (MV) and high voltage (HV) apparatus: Part 2 – Measurements according to IEC 60270. OMICRON. Noudettu 9.1.2026 osoitteesta. <https://www.omicronenergy.com/>
- Wan, L., Han, Q., Shu, L., Chan, S., & Feng, N. (2016). PD Source Diagnosis and Localization in Industrial High-Voltage Insulation System via Multimodal Joint Sparse Representation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *63*(4), 2506–2516. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2520905>

- Wen, H., Abu Talip, M. S., Othman, M., Kayser Azam, S. M., Mohamad, M, Ibrahim, M. F., Arof, H., & Ababneh, A. (2025). Advanced Signal Processing Methods for Partial Discharge Analysis: A Review. *Sensors*, 25(23), 7318. <https://doi.org/10.3390/s25237318>
- Wester, F., Gulski, E., Smit, J., & Groot, E. (2002). Aspect of on-line and off-line PD diagnosis of distribution power cables. *In Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2002.995996>
- Wu, Z., Lai, Q., Zhou, W., Liu, X., Chen, J., Hu, L., Hao, Y., & Liu, G. (2022). Analysis of influencing factors on buffer layer discharge for high-voltage XLPE cable. *IET Gener. Transm. Distrib.* 16, 4142-4157. Noudettu 19.2.2026 osoitteesta. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12585>
- Zhang, X., Pang, B., Liu, Y., Liu, S., Xu, P., Li, Y., Liu, Y., Qi, L., & Xie, Q. (2021). Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*, 14(22), 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>