Matias Teräväinen

Osittaispurkauksien perusteet

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

10.3.2019

Metropolia

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Matias Teräväinen Osittaispurkauksien perusteet 33 sivua 10.3.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	sähköinsinööri Joni Partanen yliopettaja Jarno Varteva

Insinöörityössä käsitellään osittaispurkauksia, niiden mittauksia maakaapeleilla ja niihin liittyviä laitteita. Osittaispurkausmittausten tarkoituksena on kartoittaa vanhojen kaapelijärjestelmien kuntoa sekä varmistaa uusien asennusten toimivuus. Osittaispurkausmittauksia ei ole pakko suorittaa, mutta se voi tuoda esiin ongelmia, jotka voivat olla riski sähköverkkojen toimivuudelle.

Tämän insinöörityön tavoite on toimia oppaana osittaispurkauksista ja niihin liityvistä mittauksista kiinnostuneille alan ammattilaisille. Teoriaosuudessa käsitellään erilaisia keskijännitekaapeleita ja varusteita, keskijänniteverkon häiriöitä, osittaispurkauksia ja erilaisia mittaustapoja. Työn lopussa tutustutaan kahteen erilaiseen mittalaitteeseen, jotka poikkeavat mittaustavallaan toisistaan.

Työn tuloksena ELTEL Networks Oy sai työnjohdolle sopivan oppaan, josta aiheesta kiinnostuneet voivat perehtyä asiaan. Työtä voi myös käyttää mahdollisesti oppaana mittalaite hankinnoissa.

Avainsanat	osittaispurkaukset, PD-mittaukset, maakaapeli, keskijännite-verkko

Author Title Number of Pages Date	Matias Teräväinen Basics of partial discharges 33 pages 10 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electric Power Engineering
Instructors	Joni Partanen, Electrical Engineer Jarno Varteva, Principal Lecturer

The thesis deals with partial discharges and partial discharge measurements with ground cables and related equipment. The purpose of partial discharge measurements is to map out the condition of old cable systems and to ensure the functionality of new installations. Partial discharge measurements are not required, but it may reveal problems that may be a risk to the functioning of the electrical networks.

The aim of this thesis is to serve as a guide for professionals interested in partial discharges and related measurements. The theoretical part deals with various medium voltage cables and equipment, medium voltage network interruptions, partial discharges and various measurement methods. At the end of the work, you will get acquainted with two different measuring devices that differ in their measuring methods.

As a result of the work, ELTEL Networks Oy got a suitable guide for the management, from which the people interested in the topic can get acquainted with the issue. The work can also be used as a guide to measuring equipment purchases.

Keywords	partial discharge measurements, ground cable, electrical grid

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

2 Sähkönjakeluverkko 2

2.1 Sähköasemat 3
2.2 Kaapelijärjestelmät 5
2.3 Keskijännitekaapelit 5
2.4 Kaapelijatkokset ja päätteet 10
2.5 Häiriöt jakeluverkossa 11

3 Verkon suojaukset 16

3.1 Suojareleet 17
3.2 Erilaiset suojarelelajit 18

4 Osittaispurkaukset 20

5 Osittaispurkausmittaukset 21

5.1 Osittaispurkausmittauksen suureet 21
5.2 Mittauksen periaate 22
5.3 Käyttökeskeytykselliset osittaispurkausmittaukset 22
5.4 Osittaispurkausmittausten kalibrointi 23
5.5 Osittaispurkausten tunnistaminen 24
5.6 Osittaispurkausten paikantaminen 24

6 Mittalaitteet 26

7 Yhteenveto 32

Lähteet 33

Lyhenteet

DAC damped AC, vaimeneva vaihtojännite.

Hz	hertsi.
PD	partial discharge, osittaispurkaus.
PE	polyeteeni.
PE	ristisilloitettu polyeteeni.
PE	ristisilloitettu polyeteeni.
V	voltti.
VLF	very flow frequency, erittäin matala taajuus.

1 Johdanto

Osittaispurkaukset ovat kaapeleissa tapahtuvia sähköpurkauksia ja ne vaikuttavat merkittävästi kaapeleiden elinkaareen. Osittaispurkausmittauksia tekemällä voidaan varmistua kaapeleiden kunnosta ja ennakoida mahdollisia riskitekijöitä sähköverkossa ja taata parempaa sähköntoimitusvarmuutta asiakkaille. Suomen isoimmissa kaupungeissa sähköverkot ovat lähes tulkoon kokonaan maan alla, joten aihe on ajankohtainen niin uuden verkon kaapeloinnissa kuin vanhan verkon kunnon valvonnassa. Lähtökohtana työlle on oma kiinnostus aihetta kohtaan, sekä työskentely sähköverkkojen parissa.

Työn tarkoituksena on toimia eräänlaisena oppaana yritykseni työnjohtoa varten. Tavoitteena on, että osittaispurkausmittaukset eivät ole vain suorituksia, vaan niiden tekemiselle löytyy myös syy. Osittaispurkausmittauksista löytyvä tiedon määrä on valtava. Tarkoituksena ei ole mennä pintaa syvemmälle, vaan ymmärtää osittaispurkauksien ja niiden toimintaympäristön perusperiaatteet.

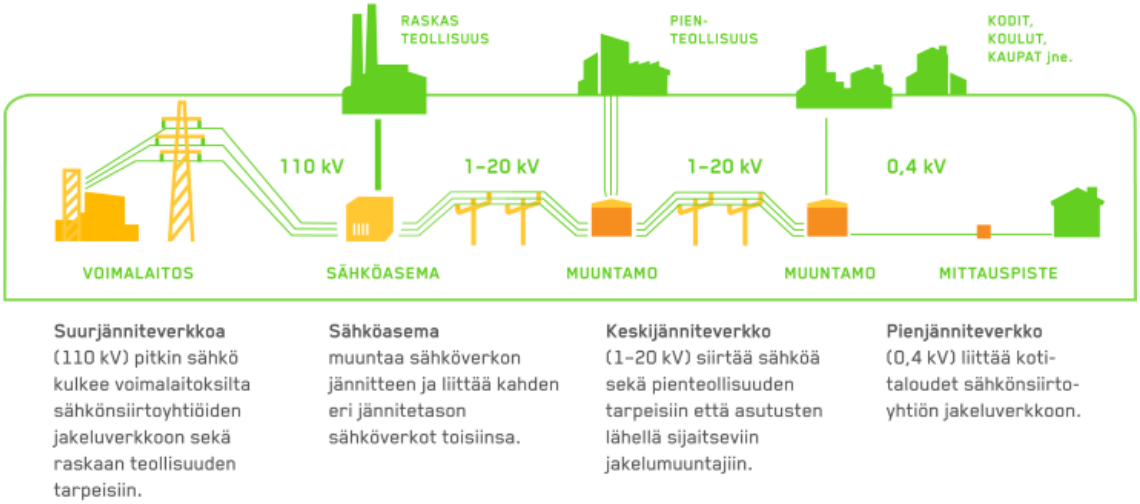
Työssä käsitellään osittaispurkauksia, niiden mittauksia ja teoriaa. Aihetta pohjustetaan perustiedoilla sähköverkosta ja siellä ilmenevistä vioista. Lisäksi kerron hieman erilaisista maakaapeleista ja maakaapelivarusteista. Lopussa esitellään kaksi eri mittaustapoihin perustuvaa osittaispurkausmittalaitetta.

Työ on tehty tutkimusperiaatteella, ja lähteinä käytetty aiheesta löytyvää kirjallisuutta sekä käyttäen muita aihetta käsitteleviä töitä. Tiedon löytäminen ei ollut hankalaa, mutta asioiden rajaaminen tuotti enemmän ongelmia.

2 Sähkönjakeluverkko

Sähkönjakelujärjestelmän osiin kuuluvat alueverkko, sähköasemat, keskijänniteverkko, jakelumuuntamot sekä pienjänniteverkko. Suomen jakelujärjestelmä koostuu noin 800 sähköasemasta 150 000 kilometristä keskijännitejohtoa, 100 000 jakelumuuntamosta ja 200 000 kilometristä pienjännitejohtoa. Jakeluverkoista pääosa on vielä ilmajohtoverkkoa. Kaupungit ja taajamat ovat usein maakaapeloituja. [1, s. 11.]

Sähkönjakelujärjestelmän siirtokykyä voidaan karkeasti kuvata, siten, että 110 kV johdolla pystytään siirtämään kymmeniä megawatteja n. 100 kilometriä. 20 kV johdoilla muutama megawatti n. 20—30 kilometriä. Pienjännitejohtojen siirtokyky on kymmeniä tai satoja kilowatteja muutamalla sadalla metrillä. Kuvassa 1 on sähkönjakeluverkon perusperiaate. [1, s. 11—12.]



Kuva 1. Sähkönjakeluverkon periaate [12].

Keskijänniteverkko rakennetaan usein silmukoiduksi, vaikkakin verkon rakentaminen säteittäiseksi olisi edullisinta. Silmukoidun rakenteen etuna on siitä syntyvä verkon käyttövarmuus erilaisissa vika- ja huoltotilanteissa. Renkaita käytetään avoimina, ja jakorajoina ovat käsin ohjattavat tai kauko-ohjattavat erottimet. Silmukoidussa verkossa johtovika pystytään usein rajoittamaan yhteen erotinväliin. Taajama-alueilla pyritään siihen, että jokaiselle jakelumuuntamolle tulisi vähintään kaksi keskijännitesyöttöä. Keskijännitekaapelin korjaus on hidasta, ja tästä syystä rengasyhteyksien rakentaminen on kannattavampaa kuin nopeammin korjattavassa avojohtoverkossa. [1, s. 13.]

Tyypillisesti keskijänniteverkon jännitetaso Suomessa on 20 kV ja joissain kaupungeissa kuten Helsingissä on käytössä 10 kV:n jännitetaso. Keskijännitelähtöä, joka lähtee sähköasemalta suojaa katkaisija ja siihen liitetyt maasulkurele, ylivirtarele sekä jälleenkytkentäreleet. Sähkönkäyttäjille aiheutuvat keskeytykset johtuvat 90 % keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista. [1, s. 125.]

2.1 Sähköasemat

Sähköasemalla muunnetaan suurempi jännite pienemmäksi ja syötetään keskijänniteverkkoon. Yleensä nämä jännitetasot ovat 110 kV ja 20 kV. Sähköaseman sijainti ja koko määrittelevät keskijänniteverkon runkojohtojen pituudet, mitoitukset ja varayhteydet. Pääosa verkon suojauksista ja automaatiosta sijaitsee sähköasemalla. Uusien sähköasemien rakentaminen on merkittävä syy laadun kannalta.

Sähköaseman rakenteeseen kuuluu suurjännitekytkinlaitos, yksi tai useampi päämuuntaja, keskijännitekytkinlaitos ja apujännitejärjestelmä. Maaseudulla käytetään tavallisia ilmaeristeisiä kytkinlaitoksia ja taajamissa usein SF_6 -kaasueristettyjä. SF_6 -eristeisten kytkinlaitosten käyttäminen perustuu usein tilansäästö ja ulkonäkösyihin.

Suurjännitelaitokseen voi tulla yhden syötön sijaan useampi, ja tällä tavalla saadaan asemalle vaihtoehtoisia syöttösuuntia ja pystytään muuttamaan suurjänniteverkon renkaiden jakorajoja tai ottaa asema silmukoituun käyttöön. Kiskostoratkaisut ja katkaisijat vaikuttavat siihen, millä tavoin sähköaseman syöttöjä voidaan käyttää. Suuret kuormitukset sähköasemien välillä ovat mahdollisia, jos ne on otettu huomioon verkon mitoituksessa. [1, s. 119—122.]

Sähköaseman kallein yksittäinen osa on muuntaja. Muuntajan nimellisteho vaikuttaa verkon oikosulkuvirtoihin. Suuremmalla nimellisteholla on pienempi impedanssi joka tarkoittaa isompaa oikosulkuvirtaa. Tyypillisesti sähköasemien muuntajat ovat kokoluokkaa 10-40 MVA. Normaalitilanteessa muuntajaa ei käytetä nimellisteholla vaan osa on varattava varatehoksi viereistä muuntajaa tai lähellä olevaa sähköasemaa varten. Häiriötilanteissa on mahdollista ylikuormittaa muuntajaa, jos ympäristön lämpötila on alhainen. Normaalitilanteessa muuntajan kuormitusaste on 60—80 %.

Päämuuntajia suojataan monin eritavoin. Pääsuojina toimivat ylivirtarele ja differentiaalirele. Differentiaalirele suojaa muuntajaa sen sisäisiä vikoja vastaan. Muuntajan sisäisiä vikoja ovat oikosulku, maasulku, käämisulku ja kierrossulku.

Päämuuntajalla on ylijännitekäämi, jonka yhteydessä on käämikytkin. Tämän kytkimen tehtävänä on pitää alajännitepuolen jännite vakiona, yläjännitteen jännitetasosta ja muuntajan kuormituksesta huolimatta. Maaseudulla toisiojännitettä korotetaan kun kuormitus lisääntyy. Tällä tasoitetaan keskijännitejohtojen jännitteenalenemia.

Keskijännitekytkinlaitos muodostaa sähkönsyötölle reitin päämuuntajalta keskijännitelähtöihin. Yhden muuntajan sähköasemalla kiskojärjestelmä on yksikisko tai kiskoapukiskojärjestelmä. Pääkiskon jokaisessa lähdössä on katkaisija, ja sen molemmin puolin on erotin. Kiskoapukisko järjestelmässä pystytään ohittamaan edellä mainittu toiminta pelkällä erottimella. Kaksikiskojärjestelmässä lähdöt voidaan jaotella eri muuntajille. Läheisen taajaman lähdöt ovat toisen muuntajan takana ja maaseudun lähdöt toisen. Taajamanmuuntajan toisiojännite voi olla alempi, sillä maaseutulähtöjen jännitteenaleneman on suurempi. Maaseudun ja joskus myös taajamien lähdöt saattavat olla ilmakaapeleita, mutta ne lähtevät sähköasemalta maakaapeleina. Releistys ja energianmittaus vaativat jännitetiedon ja se saadaan kiskosta. Tätä varten kojeistossa on yleensä jännitemittauskenno. [1, s. 119—122.]

2.2 Kaapelijärjestelmät

Kaapelijärjestelmässä tarvitaan kaapeli ja vähintään kaapelin päissä olevat päätteet. Pitkissä kaapeliyhteyksissä kaapelit liitetään toisiinsa kaapelijatkosten avulla. Kaapelia tehtaalla testattaessa voidaan testata pelkkää kaapelia. Käyttöpaikalla tehtävissä mittauksissa ja testauksissa tarkastellaan kaapelin lisäksi kaapelitarvikkeita. [2, s. 11.]

2.3 Keskijännitekaapelit

Keskijänniteverkossa käytettävät kaapelit jaetaan kahteen pääryhmään: muovikaapeleihin ja öljyeristeisiin kaapeleihin. 1980-luvun loppupuolelle asti lähes kaikki Suomessa asennetut kaapelit olivat öljyeristeisiä kaapeleita. Ensimmäiset AHXAMK-W—muovikaapelit asennettiin Helsinkiin vuonna 1986. [3, s. 17.]

Öljypaperisteiset keskijännitekaapelit

Öljypaperieristeiset kaapelit ovat paineistettuja tai paineistamattomia. Paperieriste on kyllästetty öljyllä ja kiedottu kerroksittain johtimen ympärille. Eriste on paksuudeltaan noin 5 mm. Paperieristeiden tehtävä on muodostaa tilaa öljylle, sekä estää epäpuhtauksien kulkeutuminen öljykerrosten väliin. Paperi ja kaapelin metallivaippa asettavat mekaaniset raja-arvot kaapelille. Taivutushalkaisija on noin 25 kertaa kaapelin halkaisija. Kaapelia ei tule taivuttaa niin paljon, että paperikerrokset eristeen sisällä koskevat toisiaan. Öljypaperieriste korjaa itseään, öljyt tasoittuvat kaapelissa ja torjuvat alkavia vikoja. [3, s. 19.]

Muovieristeiset keskijännitekaapelit

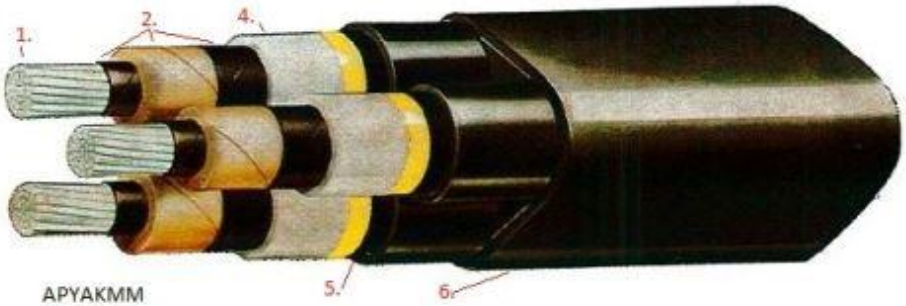
Muovieristeiset kaapelit ovat syrjäyttäneet öljypaperikaapelit lähes kokonaan. Eristysrakenteena niissä käytetään polyeteeniä tai ristisilloitettua polyeteeniä. Ristisilloitetulla polyeteenillä on saavutettu muoville korkeampi sulamispiste, jolloin sitä voidaan käyttää korkeammissa käyttölämpötiloissa. Muovieristeisen keskijännitekaapelin rakenne muodostuu johtimesta, johtimen pinnalla olevasta johtosuojasta ja pääeristeen päällä olevasta hohtosuojasta. [3, s. 19.]

Johdinsuojan tarkoituksena on pienentää johdinlankojen aiheuttamia kentänvoimakkuushuippuja poistamalla johtimien pintojen epätasaisuuksia. Se myös lieventää eristykseen kohdentuvia lämpörasituksia vikatilanteissa. Suurjännitemuovikaapeleilla johdinsuoja on välttämätön, sillä muovieristeet eivät kestä osittaispurkauksia, eivätkä korjaa itseään kuten öljypaperieristeiset kaapelit. Muovikaapeleihin jää valmistuksen aikana kaasuonteloita, joissa osittaispurkaukset syntyvät helpommin.

Hohtosuoja rajaa johtimen aiheuttamaa sähkökenttää yhdessä johdinsuojan kanssa. Hohtosuojat valmistetaan joko metallinauhoista tai puolijohtavasta materiaalista. Hohtosuojan tulee olla helposti kuorittava, jotta kaapeli on edelleen helposti asennettava. [4, s. 309—310]

APYAKMM -öljypaperieristeinen keskijännitekaapeli

APYAKMM-kaapelia käytettiin yleisesti 10—20 kV keskijänniteverkossa ennen muovieristeisten kaapelien yleistymistä aina 1980-luvun loppupuolelle saakka. Johdin kyseisessä kaapelissa on pyöreä alumiiniköysi ja eriste kyllästettyä paperia 10 kV:n kaapelilla 3,0 mm:n paksuista ja 20 kV:n kaapelilla 5,5 mm:n paksuista. Hohtosuoja on toteutettu nokipaperilla ja vaippa on alumiinia jonka päällä on lisäksi muovivaippa. Kuvassa 2 on esitelty kyseisen kaapelin rakenne. [2, s. 21.]

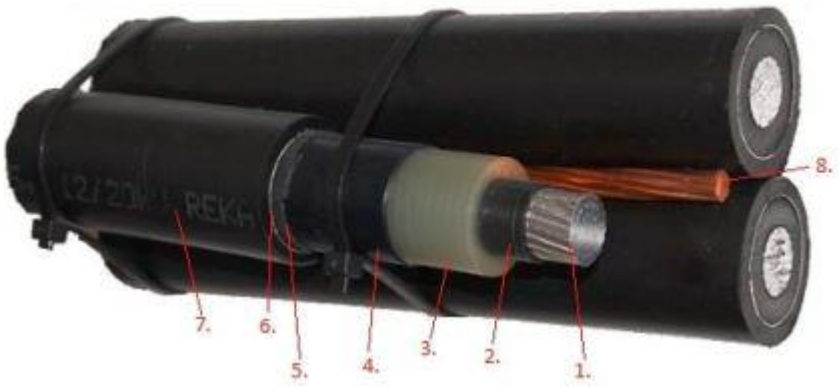


APYAKMM
1. Johdin, Tiivistetty pyöreä alumiiniköysi
2. Eriste, Kyllästetty paperi. Mustat puolijohtavat kerrokset eristeen alla ja päällä
3. Kyllästys, Valumaton kyllästysöljy
4. Vaippa, Alumiinia
5. Suoja, Korroosionestokerros ja musta muovivaippa
6. Vaippa, Vaipatut johtimet kerrattu yhteen muovitäyttein

Kuva 2. APYAKMM-kaapelin rakenne [3, s. 17].

AHXAMK-W -muovieristeinen keskijännitekaapeli

Suomessa käytetään nykyään yleisesti AHXAMK-W -muovieristeistä kaapelia. Sen vikataajuus on Helen Sähköverkko Oy:n mukaan 0,2 vikaa asennettua 100 kilometriä kohden. Ensimmäiset AHXMK-W -kaapelit asennettiin Helsinkiin vuonna 1986. Johdin tässä kaapelissa on pyöreä alumiiniköysi ja johdinsuoja puolijohtavaa muovia. Eriste on PEX-muovia ja hohtosuoja on toteutettu puolijohtavalla muovilla. Pitkittäisvesitiiveys on hoidettu veden vaikutuksesta paisuvalla puolijohtavalla nauhalla ja säteittäistiiveys sekä kosketussuojaus on tehty alumiini-muovilaminaatilla. Vaihevaippa on PE-muovia. Kuvassa 3 on esitelty kyseisen kaapelin rakenne. [2, s. 21.]



AHXAMK-W
1.Johdin, Vesitiivis pyöreä tiivistetty alumiinijohdin
2.Johdinsuoja, Puolijohtava muovi
3.Eriste, PEX-eriste
4.Hohtosuoja, Puolijohtava muovi
5.Täyte, Puolijohtava paisuva nauhoitus
6.Kosketussuoja, Alumiini-muovilaminaatti
7.Vaippa, Säänkestävä PE-muovi
8.Keskusköysi, Tiivistetty kuparijohdin.
Vaiheet kerrattu keskusköyden ympärille

Kuva 3. AHXAMK-W-kaapelin rakenne [3, s. 17].

Eristysten vanheneminen

Eristysten tulee kestää käytönaikana rasitukset siten, että niiden sähköiset, termiset ja mekaaniset ominaisuudet eivät olennaisesti heikkene. Vanhetessaan eristys saattaa muuttua, vaikka sitä ei käytettäisi.

Sähkölaitteiden vauriotiheys on yleensä suuri kun ne otetaan käyttöön. Tämä johtuu viallisista komponenteista tai siitä, että ne sopivat huonosti käyttötarkoitukseensa. Suurjännitelaitteissa tätä ongelmaa ei yleensä ole, sillä vialliset komponentit ja huonosti soveltuvat komponentit karsiutuvat tuotantoketjun testauksissa. Tämän jälkeen vauriotiheys pysyy melko vakiona ja niitä esiintyy erityisten rasitusten aikana. Laitteiden saavuttaessaan odotetun elinikänsä vauriotiheys taas kasvaa.

Kaikkein eniten eristysrakenteiden käyttöikää vähentää pitkäaikainen rasitus korkeissa lämpötiloissa. Orgaanista alkuperää olevien materiaalien molekyyliketjut pilkkoutuvat, jolloin materiaalin kemialliset, sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet muuttuvat. Nämä muutokset ovat peruuttamattomia. Lämpömuutos tapahtuu yleensä laajalla alueella eristeessä. Orgaaniset aineet hapettuvat joutuessaan kosketuksiin hapen kanssa. Joskus eristeessä syntyy eristettä vaurioittavia happoja, jotka tuottavat kemiallisia reaktioita. Kemialliset muutokset eivät yleensä johda merkittäviin muutoksiin sähköisissä ominaisuuksissa, mutta mekaaninen kestävyys saattaa huonontua. Eristerakenteiden haurastuminen ja sen myötä tulleet halkeamat voivat johtaa osittaispurkauksiin, sitä kautta eroosioon ja täten läpilyöntiin.

Lämpölaajeneminen, tärinä, sähkömagneettiset voimat tai muut mekaaniset rasitukset voivat aiheuttaa eristeen haurastumista. Mekaanisten rasitusten vaikutus voimistuu jos eriste on heikennyt termisistä vaikutuksista. [5, s.175—176.]

Öljypaperieristyksen vanheneminen

Öljy on orgaaninen aine ja vanhetessaan se hapettuu. Kemiallisten reaktioiden yhteydessä öljyyn syntyy saostumia, jotka johtavat epäpuhtauksiin kuten veteen ja happamiin yhdisteisiin. Nämä epäpuhtaudet vaikuttava haitallisesti paperiin. Öljyn laatua voidaan tarkkailla ottamalla siitä säännöllisesti näytteitä ja analysoimalla ne. Öljystä on mahdollista mitata läpilyöntilujuus, happamuusasteen kertova neutraloimisluku ja vesipitoisuus. Öljy voidaan kuivata kierrättämällä sitä kuivaimen kautta, mutta tästä ei ole hyötyä, jos koko eristystä ei kuivata.

Kemiallisissa reaktioissa syntyvät happamat yhdisteet heikentävät paperia. Nämä yhdisteet eivät niinkään vaikuta paperin sähköisiin ominaisuksiin, mutta sen mekaaniset ominaisuudet kärsivät ja paperin kuidut katkeilevat ja paperi haurastuu. [5, s. 178—179.]

Muovieristyksen vanheneminen

Muoveihin kohdistuu ajan kuluessa erilaisia rasituksia. Nämä rasitukset aiheuttavat kemiallisien mekaanisien ja sähköisten ominaisuuksien heikkenemistä. Mekaaniset rasitukset saattavat aiheuttaa onteloiden syntymistä eristeeseen, jotka voivat johtaa osittaispurkauksiin. Ultraviolettisäteily saattaa heikentää muoveja.

Muovieristeiden tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluvat mekaaninen lujuus sekä sähkölujuus. Sähkölujuuteen vaikuttavia asioita ovat lämpötila sekä rasitusaika. Näiden eristeiden kohdalla on olemassa lyhytaikaista sähkölujuutta, sekä pitkäaikaista sähkölujuutta. Käytännössä pitkäaikainen sähkölujuus on huomattavasti merkittävämpi tekijä.

Yleensä eristyksen pitkäaikainen jännitelujuus on paljon pienempi kuin lyhytaikainen jännitelujuus. Tämä on seurausta siitä, että muovien sähkölujuus heikkenee rasitusajan pidentyessä ja sähkölujuutta heikentää osittaispurkaukset ja lämpörasitus. Kun eristysrakenteita rasitetaan mekaanisesti, tulee niiden taivutus- ja vetolujuuden olla riittävän suuri. Mekaanisetkin ominaisuudet muuttuvat rasituksessa, jolloin eristykseen voi syntyä halkeamia tai se voi rikkoontua kokonaan. Muovit heikkenevät erityisesti matalissa lämpötiloissa. Muovi haurastuu ja saattaa murtua, mikä edesauttaa sähköisen läpilyönnin tapahtumista. [5, s. 181.]

2.4 Kaapelijatkokset ja päätteet

Kaapelijatkokset ja päätteet eli kaapelivarusteet ovat tärkeä osa kaapeliverkkoa. Uutta kaapelia asennettaessa päästään parhaimmillaan kilometrin matka ilman jatkoja, ja kaapelijärjestelmät vaativat ainakin yhden päätteen. Keskijännitteiset kaapelivarusteet ovat yleensä muovieristeisiä kylmä- tai lämpökutisteisia.

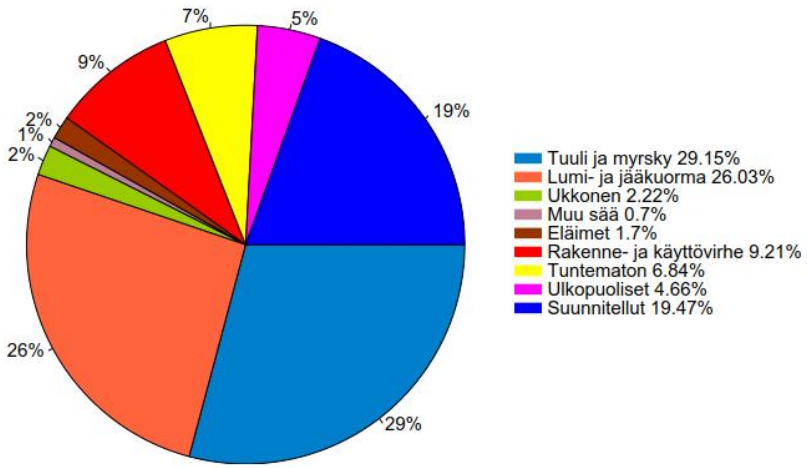
Kaapelit yhdistetään toisiinsa jatkoilla. Jatkoja tehdessä tulee ottaa huomioon, että jatkot täyttävät samat ominaisuudet kuin yhteen liitetyt kaapelit. Tällä varmistetaan, että verkon käyttövarmuus ja luotettavuus on samalla tasolla kuin olemassa olevien kaapeleiden. Johdineristys muokataan jatkoskohdassa kartion muotoiseksi ja johdinliitokseen laitetaan holkki, joka voi olla puristettava tai ruuvikiristeinen. Sähkökentän parantamiseksi holkin tulee olla ulkopinnaltaan lieriömäinen. Pintojen tasoittamiseksi holkin päälle voidaan laittaa puolijohtavia nauhoja. [3, s. 21.]

Jatkoksen eristämiseen käytetään kaapelin rakenteen mukaista eristettä. Tämä voi olla valumuovia, muoviteippiä, paperinauhoja kaapelimassaa tai kaapeliöljyä. Kaapelijatkos päällystetään vielä suojalla, joka antaa riittävän mekaanisen suojan. [4, s. 330.]

Kaapelipäätteitä käytetään, kun kaapeli halutaan liittää toiseen sähkökojeeseen. Kaapelia käsitellään siten, että kaapelijohdin saadaan esille kaapelikenkää varten. Ongelmaksi kaapelipäätteissä muodostuu kaapelin päässä olevan sähkökentän hallitseminen. Maadoitettu vaippa katkeaa kaapelin kohdalla, mutta jännitteinen johdin jatkuu ja syntyy kentänvoimakkuushuippuja. Näitä huippuja tulee hallita, jotta kaapelipäätteen elinkaari säilyy mahdollisimman pitkänä. Sähkökenttää voidaan ohjata geometrisella kentänohjauksella. [3, s. 22.]

2.5 Häiriöt jakeluverkossa

Pääasiassa sähköverkon häiriöitä aiheuttavat luonnonvoimat sekä tekniset viat. Puut, salamat, ja tulvat ovat tyypillisiä vikojen aiheuttajia jakeluverkossa. Teknisten vikojen aiheuttamat keskeytykset eivät tyypillisesti ole kovin pitkiä, sillä niiden vaikutuksen alla oleva vika-alue pystytään yleensä eristämään muusta verkosta. Kuvassa 4 näkyy vikatyyppien jakaantuminen



Kuva 4. Vikatyyppien jakaantuminen vuodelta 2018 [8, s. 3].

Iso osa vioista tapahtuu avonaisena kulkevalle ilmajohtoverkolle. Paras tapa näiden ehkäisyyn olisi kaivaa ilmajohdot maakaapeleiksi, mutta maahan kaivaminen on ilmajohdon rakentamista kalliimpaa. Taulukossa 1 nähdään jakeluverkonhaltijoiden keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon maakaapeloinnin kehityksen. Toinen hyvä keino parantaa toimitusvarmuutta on rakentaa varasyöttöjä ja rengasyhteyksiä. Johdon vikaantuessa voidaan varayhteys ottaa käyttöön. Täysin keskeytyksettömään sähkönjakeluun on kuitenkin käytännössä mahdotonta päästä. Kunnossapito on toimitusvarmuuden kannalta tärkein asia. Keskeytysaikoja on myös mahdollista lyhentää etäluettavien mittarien avulla. Verkonhaltija saa näiden mittareiden kautta tietoa automaattisesti myös pienjänniteverkon keskeytyksistä.

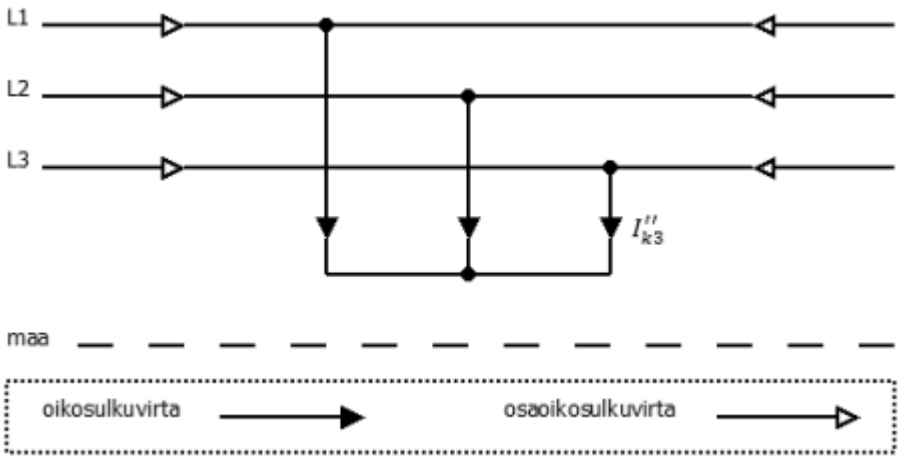
Taulukko 1. Jakeluverkonhaltijoiden keskijänniteverkon ja pienjänniteverkon maakaapeloinnin kehitys [9, s. 44].

Vuosi	Keskijänniteverkon maakaapelointiaste %	Pienjänniteverkon maakaapelointiaste %
2009	10,9	35,3
2010	11,6	36,3
2011	12,3	37,5
2012	13,2	38,6
2013	14,5	39,0
2014	16,4	40,8
2015	17,6	41,4
2016	18,8	42,0
2019	28	49
2023	37	57
2028	47	65

Oikosulut

Standardissa SFS 6001 käsitellään kolmivaiheista oikosulkua, vaiheiden välistä oikosulkua, maasulkua ja kaksoismaasulkua. Näiden tilanteiden syntyessä verkkoon rakennettujen oiko- ja maasulkusuojausten tulee toimia. Vaiheiden välisissä oikosuluissa voi myös ilmetä maakosketusta sekä vikaimpedanssi. Nämä kaksi tekijää pienentävät vikavirtaa, ja ne tulee ottaa huomioon, kun suojausta määritetään.

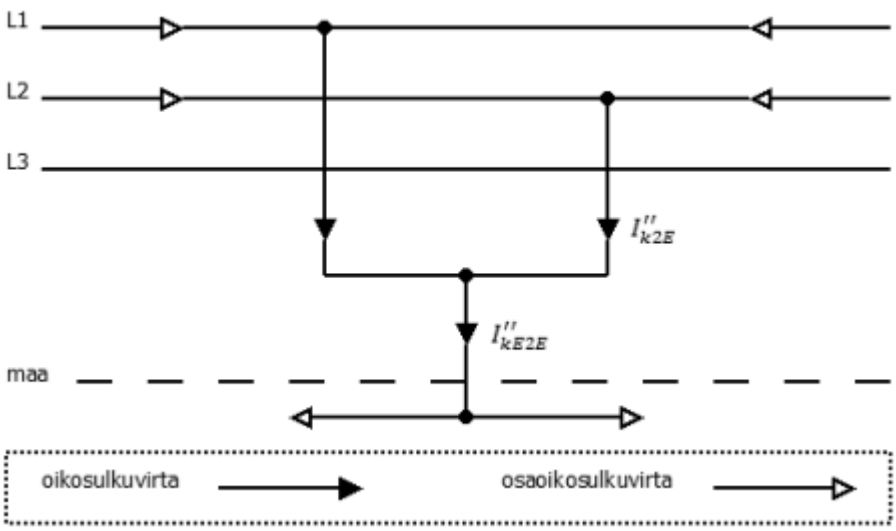
Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa suurimman vikavirran ja toimii täten määräävänä tekijänä verkon mitoituksessa. Tässä oikosulkutyypissä kaikki kolme vaihetta sulkeutuvat yhteen ja vikapaikan jännitteet ovat nollia ja syöttävät vikavirtaa symmetrisesti. Kuva 5 havainnollistaa kyseistä oikosulkua. [10, s. 10—11.]



Kuva 5. Kolmivaiheinen oikosulku [10, s. 11].

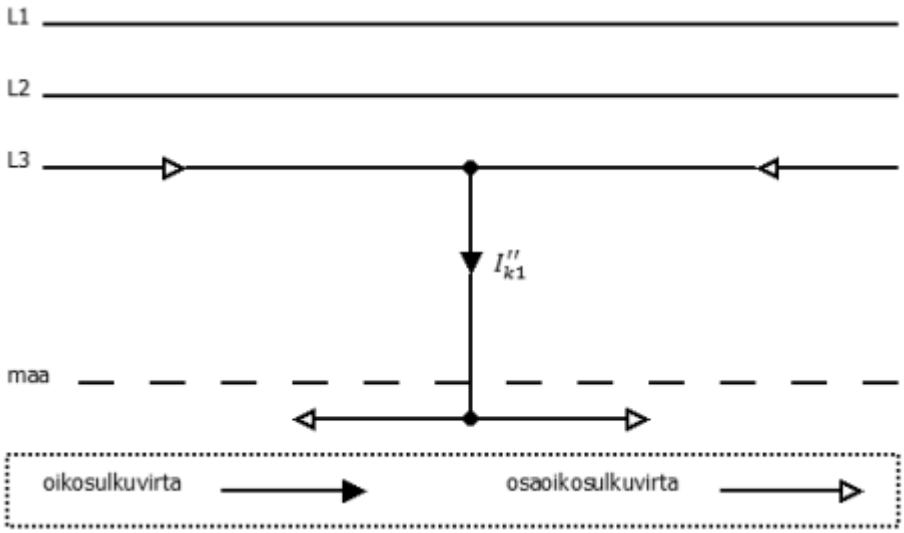
Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa usein vikavirran, jonka suuruus on noin 10-40 kertainen kuormitusvirtaan verrattuna. Suojausautomatiikan tulisi toimia mahdollisimman nopeasti, jotta laitteet eivät vaurioituisi. [11, s. 74.]

Kaksivaiheinen oikosulku muodostuu, kun vikapaikassa kaksi vaihetta kytkeytyy yhteen. Tällöin vaiheiden jännitteet ovat nollia, jos vikaimpedanssia ei ole. Kaksivaiheisessa oikosulussa oikosulkuvirta on lähes aina pienempi kuin kolmivaiheisessa oikosulussa. Jos kaksivaiheisessa oikosulussa on lisäksi maakosketus, oikosulkuvirta pienenee. Maasta erotetussa verkossa kyseinen oikosulku tuottaa pienimmän oikosulkuvirran. Tämä tulee ottaa huomioon kun suunnitellaan verkon oikosulkusuojausta. Tämän lisäksi maakosketus ja vikaimpedanssi tulee ottaa huomioon. Kuvassa 6 on kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella. [10, s. 11—13.]



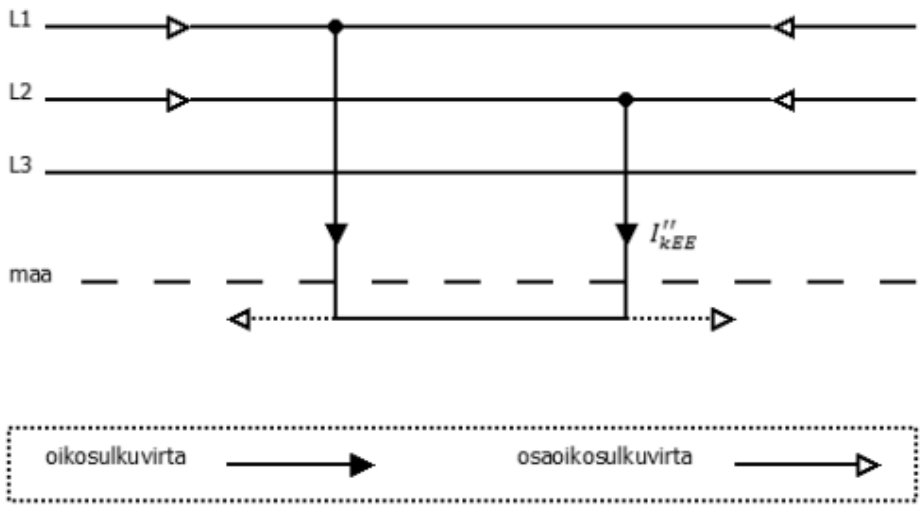
Kuva 6. Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella [10, s. 12].

Maasulku muodostuu, kun vaihejohtimen ja maan välille syntyy johtava yhteys. Tämä johtava yhteys voi muodostua galvaanisesti tai valokaaren yhteydessä. Täysi maasulku aiheuttaa vikaantuneeseen vaiheeseen nolla jännitteen ja maasulkupiiri sulkeutuu tähtipisteen kautta. Maadoitustapa vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka paljon virtaa kulkee maahan. Suoraan maadoitetussa verkossa yksivaiheinen maasulku aiheuttaa niin suuren oikosulkuvirran, että se kytkeytyy automaattisesti pois. Verrattaessa muihin oikosulkuvirtoihin yksivaiheinen maasulku aiheuttaa pienimmän oikosulkuvirran. Sammutetussa tai erotetussa verkossa maasulkuvirta jää yleensä kuormitusvirtaa ja oikosulkuvirtoja pienemmäksi. Laitteiston kannalta näillä maasulkujen vikavirroilla ei ole kovin suurta merkitystä, mutta verkon jännitteet saattavat aiheuttaa verkon laitteille. Maasulku aiheuttaa myös nollajännitteen nousemista, joka puolestaan aiheuttaa vaaraa vikapaikan läheisyydessä oleville henkilöille. Kuva 7 esittää maasulkua. [10, s.13.]



Kuva 7. Maasulku [10, s.13].

Kaksoismaasulussa vaiheet kytkeytyvät yhteen vikapaikkojen välisen maan välityksellä. Kaksoismaasulun aikana vaiheiden välillä kiertävä oikosulkuvirta on noin kaksivaiheisen oikosulkuvirran kokoinen. Osa vikavirrasta kulkee maahan ja se jää yleensä yksivaiheista maasulkuvirtaa pienemmäksi. Kaksoismaasulkuun vaikuttavat maadoitukset, vikapaikkojen sijainti sekä maasulkukohtien vikaimpedanssit. Kuvassa 8 on kaksoismaasulku. [10, s. 13-14]



Kuva 8. Kaksoismaasulku [10, s. 14].

3 Verkon suojaukset

Suomen sähköverkko on laaja ja kattava, ja se on suojattu erilaisilla suojajärjestelmillä. Niillä on keskeinen merkitys sähkönjakelun turvallisuuden ja luotettavuuden kannalta. Jakeluverkot varustetaan järjestelmällä, joka ohjaa vikaa lähinnä olevan katkaisijan auki. Laite, joka antaa katkaisijalle käskyn sanotaan suojareleeksi. Releitä voidaan myös ohjaustehtävien lisäksi hyödyntää merkinannoissa kuten hälytyksissä. Suojareleet on mahdollista liittää päävirtapiiriin, jolloin niitä kutsutaan ensiö primäärireleiksi. Ensiöreleitä saatetaan käyttää keskijänniteverkon oikosulkusuojina. Huomattavasti yleisempi tapa on kuitenkin päävirtapiireihin mittamuuntajien kautta liitetyt toisio sekundäärireleet. [11, s. 389—391].

Relesuojauksen tulisi olla yksinkertainen ja käyttövarma ja sen tulisi suojata koko järjestelmä. Sen tulisi toimia selektiivisesti siten, että mahdollisimman pieni osa verkosta lähtee pois käytöstä. Suojauksen pitää toimia nopeasti, jotta häiriön aiheuttamat vahingot olisivat mahdollisimman pienet. Suojaus pitää rakentaa myös siten, että se on mahdollista koestaa käytön aikana. Tärkeät suojaukset kantaverkossa tulee aina olla kaksi erillistä suojareleistystä.

Oikosulkusuojaus tehdään aina laukaisevaksi. Maasulkusuojaus on maadoitusresistansseista riippuen joko hälyttävä tai laukaiseva. 110 kV:n jännitteestä ylöspäin pyritään suojauksesta tekemään pelkästään laukaiseva. Laukaiseva maasulkusuojaus yritetään toteuttaa selektiivisenä 110—400 kV jännitteillä. Syy tähän on se, että todennäköisyys kaksoismaasulkujen syntymiseen terveiden vaiheiden jännitteennousun seurauksena on riittävän pieni. Kaksoismaasuluista syntyy aina vakava vaarajännitetilanne.

Relesuojauksessa toteutus riippuu melko lailla kohteesta, kohteen tärkeydestä, verkon rakenteesta, sekä verkon maadoitustavasta. Rakenteella tässä tapauksessa tarkoitetaan säteittäisverkkoa tai silmukkaverkkoa. Oikosulkuvirrat tehollisesti maadoitetussa 400 kV ovat Suomessa suurimmillaan 10 kA:n luokkaa. 110 kV:n verkko on osittain maadoitettu ja siellä oikosulkuvirrat ovat alle 5 kA:n suuruisia. Suomessa käytetty 110 kV:n maadoitustapa toimii siten, että vaara- ja haittatekijät pysyvät vähäisinä. Samalla selektiivisen ja nopean maasulkusuojauksen rakentaminen onnistuu ilman isompia ongelmia ja suurempia kustannuksia. Maasta erotettua tai sammutettua järjestelmää käytetään pääasiassa keskijänniteverkossa. Maasulkuvirran suuruus edellä mainituissa verkoissa riippuu maakapasitanssista ja täten galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituudesta. Laajoja 110 kV:n verkkoja ei ole mahdollista käyttää sammutettuna tai erotettuna maasta. Syy tähän on kapasitiivinen maasulkuvirta. Kyseinen maasulkuvirta kasvaa 110 kV verkossa isommaksi kuin valokaaren sammumisvirta, ja näin ollen kyseisten maadoitustapojen edut menetetään. [11, s. 389—391].

3.1 Suojareleet

Suojarele asetetaan tarkkailemaan suuretta, ja kun tämä releen toimintatarkoituksesta riippuen ylittää tai alittaa releen tarkkaileman arvon, rele havahtuu. Kun releen toimintaaika on kulunut, antaa rele katkaisijalle toimintavirikkeen. Tämän virikkeen antoa voidaan halutessa hidastaa. Rele koostuu havahtumiselimesta, mittaelimestä, aikaelimestä ja

usein myös suuntaelimestä, jolla voidaan määrittää esimerkiksi tehon virtaussuunta. Rakenteidensa puolesta releet voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään sähkömekaanisiin suojareleisiin sekä elektronisiin suojareleisiin. Mekaaniset releet sisältävät liikkuvia osia. Releiden toiminta perustuu sähkösuureen tehollis- tai keskiarvon mittaamiseen. Releiden koon, tehontarpeen ja nopeuden lisäämiseksi releet varustetaan usein kestomagneeteilla. Näiden releiden käyttö vaatii mitattavan virran tasasuuntaamista. Staattisissa releissä käytetään puolijohdekomponentteja sekä mikropiirejä sisältäviä kytkentöjä. Staattisilla releillä voidaan korvata sähkömekaanisia releitä ja niillä voidaan toteuttaa vaativampia suojauksia. Niillä pystytään käsittelemään informaatiota monipuolisesti ja ne pystyvät toteuttamaan vikakriteereitä, joita olisi aivan liian hankala toteuttaa sähkömekaanisilla releillä. Staattiset releet tarjoavat lisäksi lyhyen toiminta-ajan, pienen tehonkulutuksen, toiminta-arvojen tarkkuuden, vähäisen huollon tarpeen ja itsevalvonnan. Pieni tehonkulutus vaikuttaa suoraan suojauksen tarkkuuteen positiivisesti. Staattisten releiden haittoihin kuuluu herkkyys ylijännitteelle, sähkömagneettisille häiriölle ja jatkuva aputehon tarve [11, s. 391—392.]

Älykkäät releet, jotka ovat mikroprosessoripohjaisia, mittaavat muiden releiden tapaan suojattavan kohteen signaaleja, käyttävät asentotietoja ja katkaisijan ohjauksia hyväkseen sekä antavat ilmoituksia. Mikroprosessori tekniikka antaa mahdollisuuden monenlaisiin erilaisiin tarkoituksiin kuten, suojaukseen paikallisautomaatioon ja kaukokäyttöön. Älykäs suojarele rekisteröi tapahtumia ja niihin liittyviä mittausarvoja. Esimerkiksi älyrele voi rekisteröidä laukaisuhetken vikavirran, jälleenkytkentöjen määrän eriteltynä niiden vikatyypin mukaan tai ilmaista katkaisijan huoltotarpeen. Releet on mahdollista kytkeä väyläliitännällä ja kerätä relekohtaiset mittaukset, asettelut ja rekisteröidyt tiedot keskitetysti ja siirtää ne mahdollisesti valvomoon. Releet valvovat itse itseään ja ilmaisevat vian sijainnin ja lukitsevat releen ulostulon mahdollisen virhelaukaisun välttämiseksi. Väylää pitkin releelle voidaan lähettää erilaisia tietoja, kuten väliaikaisia asetteluja tai jälleenkytkentäsekvennsin muuttaminen. [11, s. 391—392.]

3.2 Erilaiset suojarelelajit

Suojareleet voidaan jakaa mitattavan suureen perusteella seuraavasti: ylivirtareleet, ali – ja ylijännitereleet, taajuusreleet ja tehoreleet, epäsymmetriareleet, vetoreleet ja ali-impedanssireleet.

Ylivirtareleistä oikosulkusuojina toimivat hetkelliset ylivirtareleet, vakioaikaylivirtareleet ja käänteisaikaylivirtareleet. Ylikuormitussuojina toimivat lämpöreleet. Ylivirtareleiden vaikuttava suure on mittauspisteen kautta kulkeva virta. Vakioaikaylivirtareleiden havahtumisaikaa voidaan säätää, kun taas hetkellisissä ylivirtareleissä releen toimintaa ei tarkoituksella hidasteta. Vakioaikaylivirtareleille voidaan asettaa myös virta-arvo, jos tämä arvo ylittyy, rele toimii hetkellisesti. Käänteisaikaylivirtareleiden laukaisuaika määrittyy virran perusteella tiettyjen asetteluiden rajoissa.

Jännitereleet toimivat, kun jännite ylittää tai alittaa sille asetellun arvon. Alijännitereleiden yleinen käyttökohde ovat moottorit. Moottori voidaan irrottaa verkosta alijännitereleen avulla, kun sitä uhkaa pysähtyminen alijännitteen takia. Alijännitereleitä käytetään myös vaihto ja tasajänniteverkojen jännitteen valvomiseen. Yleensä alijännitereleisiin on liitetty aikahidastus. Ylijännitereleitä käytetään tahtigeneraattoreiden yhteydessä, koska niille jännitteen nousu on vaarallista. Lisäksi ylijännitereleitä voidaan käyttää maasulun nollajännitereleinä.

Taajuusreleiden toiminnan aiheuttavat verkon taajuuden liiallinen nousu tai lasku. Alitaajuusrelettä käytetään tehonvajaussuojaukseen, jolloin kuormia irtikytketään. Alitaajuusreleitä on usein myös laitoksissa, joissa on omaa sähköntuotantoa. Ylitaajuusrelettä käytetään generaattorien suojauksessa ja kuormien takaisinkytkennässä, kun tuotanto normalisoituu.

Tehoreleet, joiden vaikuttava suure on pätö-, lois -tai sekateho käytetään tehon suuruudesta ja virtaussuunnasta riippuvien kytkentöjen suorittamiseen. Tehonsuuntarele- tai suuntarele -nimitystä käytetään releestä, jonka tehtävä on tehon virtaussuunnan ilmaiseminen. Suunnan perusteena voidaan käyttää loistehoa esimerkiksi maasta erotetun verkon maasulkua paikallistettaessa. Pätötehorelettä käytetään sammutetuissa verkoissa, sillä loisvirta on kompensoitu.

Epäsymmetriareleitä käytetään arvokkaiden koneiden suojaukseen. Roottoreille virta- ja jännite-epäsymmetriat ovat erityisen vaarallisia. Kyseisten releiden toiminta perustuu kytkentöihin, joilla kolmivaihejärjestelmien jännitteistä ja virroista pelkistetään vastakomponentti erilleen. [11, s. 392—394.]

4 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus on sähköpurkaus, joka syntyy, kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristeaineen sähkölujuuden. Osittaispurkaus ei ole sama asia kuin läpilyönti, sillä se ei sulje elektrodiväliä.

Osittaispurkauksia esiintyy sekä tasa- että vaihtojännitteellä, sekä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä eristeissä. Purkaukset jaetaan sisäisiin purkauksiin, pinta purkauksiin eristeen pinnalla ja koronapurkauksiin johtimen pinnalla. Osittaispurkaukset merkitsevät eniten vaihtosähköllä, sillä yleensä purkaukset toistuvat jokaisen jakson aikana.

Osittaispurkaukset vaikuttavat niin kemiallisesti kuin fysikaalisesti eristeisiin ja ympäristöön. Kaapeleihin osittaispurkaukset synnyttävät kaasuja ja happoja, jotka syövyttävät eristettä. Koronapurkaukset ovat havaittavissa valona, äänenä sekä otsonikaasuna.

Tavallisesti osittaispurkaukset ovat pieniä, mutta ne voivat vaikuttaa merkittävästi eristeen elinkaareen. Polyetyleenit ovat erityisen herkkiä osittaispurkauksille toisin kuin esimerkiksi kiille, lasi ja posliini. [4, s. 76—77.]

Eristeissä ja eristysrakenteissa on usein onteloita tai kaasukuplia. Näissä kohdissa jännitelujuus on alhaisempi kuin niitä ympäröivässä eristeessä. Kun ontelon täyttävän aineen permitiviteetti on pienempi kuin ympäröivän eristeen, on jänniterasitus ontelossa eristettä suurempi. Kun ontelossa olevan kaasun jännitelujuus ylittyy, tapahtuu osittaispurkauksia. Purkauksessa vapautuvat positiiviset ionit, ja elektronit törmäilevät ontelon seinämiin synnyttäen seinämissä eroosiota. Ontelon seinämässä oleva uloke tai epätasaisuus aiheuttaa sähkökentän tiheytymän. Purkaukset tässä kohtaa voivat kaivautua lopulta eristeeseen asti. [5, s. 126.]

Sähkö- ja vesipuut

Ajan kuluessa sähköpurkaukset vahingoittavat eristettä ja eristeen läpi kulkeutuu puumainen eroosiojälki, joka tunnetaan sähköpuuna. Lopullinen läpilyönti voi tapahtua sähköpuuta pitkin. Sähköpuun kehittyminen voi lähteä liikkeelle myös eristeen sisältämistä epäpuhtauksista. Kiinteä eriste ei palaudu, kun eristeessä on tapahtunut sähköpurkauksia, uudet purkaukset ovat mahdollisia pienelläkin jänniterasituksella. Kiinteän eristeen neste- tai kaasumaisen eristeen rajapinnat ovat eristeen heikoimmat kohdat.

Sähköpuiden lisäksi ongelmia aiheuttavat vesipuut. Vesipuut syntyvät eristeen sisään kulkeutuvasta kosteudesta. Vesi kulkee sähkökentän vaikutuksesta puumaisina muodostelmina ja heikentää myös eristyksen läpilyöntilujuutta. Puolijohtavista kerroksista kerroksista eristeeseen syntyneet puut ovat merkittävästi haitallisempia kuin keskeltä eristettä syntyneet puut. Vesipuita ei pystytä havaitsemaan osittaispurkausmittauksilla eikä käytönaikaisilla mittauksilla. Vesipuita pystytään ehkäisemään kunnollisella kosteuseristyksellä. Johtimen ja vaipan alla olevat kerrokset voidaan tehdä vesitiiviiksi pituussuunnassa erilaisten lisäaineiden avulla. [5, 126;156—157.]

5 Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausten mittauksia tehdään laadunvarmistukseen liittyvissä testauksissa sekä laitetoimituksiin liittyvissä testauksissa. Tällä tarkastetaan, että eristysrakenteet täyttävät standardien vaatimukset siten, että purkaukset eivät ylitä sallittua tai sovittua tasoa. Tällä varmistetaan, että tuotteet kestävät niille asetetut vaatimukset ja ne kestävät käyttöä. Mittauksia tehdään myös osana kunnonvalvontaa ja eristysrakenteiden elinikätutkimuksissa. [4, s. 470—471.]

5.1 Osittaispurkausmittauksen suureet

Näennäisvaraus *q,* on varaus, joka syötetään kaapeliin joka antaa saman mittaustuloksen kuin osittaispurkauksen virtapulssi. Näennäisvaraus ilmaistaan piko- tai nanocouloumbeina. Purkausten syttymisjännite U_i, on koejännite, jolla havaitaan toistuvia tietyn kokoisia tai isompia osittaispurkauksia silloin kun koejännitettä nostetaan ylöspäin arvosta jolla ei vielä havaittu purkauksia. Jos purkauksia syntyy, kun testijännite on vähemmän kuin normaali käyttöjännite on tilanne vaarallinen. Tällaiset purkaukset rasittavat kaapelia erityisesti. Purkausten sammumisjännite U_e, on koejännitteen arvo, jolloin osittaispurkaukset pienenevät tietyn tason alle, kun jännitettä lasketaan arvosta, jolloin purkauksia tapahtuu. Syttymis- ja sammumisjännitteet eivät yleensä ole samoja. Syttymisjännite on useimmiten suurempi. Purkauksen vaihekulma ϕ_i, on koejännitteen jaksonkohta, jolloin osittaispurkauspulssi havaitaan. Tätä tietoa hyödynnetään osittaispurkausten tunnistamisessa. Pulssin toistumistaajuus *n* on esiintyneiden pulssien ja ajanjakson välinen suhde tietyllä ajanjaksolla. [2, s. 28—27]

5.2 Mittauksen periaate

Sähköverkkoja mitattaessa käytetään kahta erilaista perusmittausmenetelmää: käytönaikaista ja käyttökeskeytyksen aikaista mittausta. Käytönaikaisen mittauksen etu on se, että ei tarvita erillistä jännitelähdettä vaan eristerakenteen jännitekestävyyden mittaamiseksi voidaan käyttää olemassa olevaa käyttöjännitettä. Käyttökeskeytyksen vaativassa mittauksessa tarvitaan erillinen jännitelähde testausjännitteen luomiseksi. [3, s. 27.]

5.3 Käyttökeskeytykselliset osittaispurkausmittaukset

Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkumittaukset tarvitsevat erillisen jännitelähteen eristysrakenteen rasittamista varten. Mittausten kannalta parasta olisi käyttää jännitelähdettä, joka toimii 50 Hz:n taajuudella. Kaapelijärjestelmiä mitattaessa tämä ei ole yleensä mahdollista johtuen kaapelijärjestelmien suuresta kapasitiivisesta kuormituksesta ja sen kautta suuresta näennäistehontarpeesta.

Osittaispurkausmittauksia varten on kehitetty paljon vaihtoehtoisia jännitelähteitä. Yleisimpiä näistä vaihtoehdoista ovat pienen taajuuden VLF-jännitelähteet, sarjaresonanssipiiriin perustuvat jännitelähteet sekä vaimenevaa vaihtojännitettä tuottavat DAC-jännitelähteet. [2, s. 31.]

Erittäin pieni taajuus (VLF)

VLF-laitteisto on rakenteeltaan yksinkertainen. Tarvitaan DC-lähde ja ohjausjärjestelmä joka muuttaa syötettävän kaapelin jännitteen polariteetin. Näiden lisäksi tarvitaan myös suodatus- ja suojauskondensaattori sekä kuristin. Uusimmat laitteet pystyvät tuottamaan sinimuotoista jännitettä. Suurimmat VLF-laitteet pystyvät tuottamaan 240 kV:n huippujännitteen. [2, s. 32.]

Sarjaresonanssilaitteet

Resonanssilaitteiden toiminta perustuu siihen, että testauspiiriin lisätään induktiivinen reaktanssi ja tällä kumotaan kaapelin aiheuttama kapasitiivinen reaktanssi. Kaapeleita

testattaessa käytetään yleensä sarjaresonanssikytkentää vaikka resonanssipiiri on mahdollista toteuttaa myös rinnankytkennällä. Resonanssilaitteet toimivat joko muutettavalla induktanssilla tai taajuudella.

Muuntajalle syötettävän jännitteen amplitudia ja taajuutta säädetään taajuusmuuttajan avulla. Taajuusmuuttajalla syötetty teho kompensoi piirissä olevat häviöt. Järjestelmät suunnitellaan siten, että resonanssitaajuus vaihtelee 25—300 Hz välillä, tämä mahdollistaa eri suuruisten kuormitusten testaamisen. [2, s. 32—33.]

Vaimeneva vaihtojännite (DAC)

Vaimenevan vaihtojännitteen mittaus perustuu resonanssipiiriin. Kaapelin kapasitanssi varataan tasajännitteellä ja sen jälkeen rinnalle kytketään ulkoinen kuristin. Kuristimen induktanssi ja kaapelin kapasitanssi muodostavat värähtelypiirin. Taajuus tässä kytkennässä on yleensä 50—1000 Hz.

Kaapeliin kohdistuva jänniterasitus on melko samanlainen kuin käytettäessä VLF-jännitelähdettä. Tasajänniterasitusta ei tule, sillä jännitetasoa ei pidetä yllä. Kaapelin varaus huippuarvoon kestää vain muutamia sekunteja ja syöttöteho on pieni. Kaapelin varaamiseksi voidaan käyttää normaalia DC-lähdettä, jossa on virranrajoitus laitteen suojaamiseksi. Varausaika on riippuvainen kaapelin kapasitanssista ja tasajännitelähteen virransyöttökyvystä. Kun kaapeli on saatu varattua, tasajännitelähde kytketään irti ja kuristin kytketään kaapelin rinnalle. [2, s. 34—35.]

5.4 Osittaispurkausmittausten kalibrointi

Yleensä suurjännitemittauksissa käytettävät mittausjärjestelmät kalibroidaan kerran vuodessa tai harvemmin, mutta osittaispurkausmittauksissa kalibroinnilla on erilainen merkitys. PD-mittausjärjestelmä pitää kalibroida joka kerta, kun sitä käytetään. Vähäinenkin muutos testipiirissä muuttaa sen skaalauskerrointa eli mittauslaitteen näyttämän ja osittaispurkauksen suhdetta. Esimerkiksi oskilloskooppia käytettäessä skaalauskerroin voi olla 0,5 mV/pC. Silloin 10 pC:n osittaispurkaus antaa mittalaitteessa 5 mV:n poikkeaman.

Kalibrointia varten tarvitaan osittaispurkauskalibraattori. Se voi olla askeljännitegeneraattori, joka kytketään kaapeliin pienen kapasitanssin välityksellä. Kapasitanssia

tai jännitettä suurentamalla saadaan suurempia kalibrointipulsseja. Kaapeleita mitattaessa on järkevää ensisijaisesti nostaa jännitettä, sillä kalibraattorin kapasitanssin suhde kaapelin ja kytkentäkondensaattorin kapasitanssiin ei saisi olla merkittävän suuri. Kalibrointia tehtäessä kaapeli ei saa olla jännitteinen eikä maadoitettu. Kalibrointigeneraattori kytketään kaapelin rinnalle. [5, s. 476—478.]

5.5 Osittaispurkausten tunnistaminen

Osittaispurkauksen sijainti ja tyyppi on mahdollista tunnistaa monissa tapauksissa oskilloskooppikuvasta koejännitteen sinikäyrän perusteella. Purkaustyyppejä voidaan myös tutkia tilastollisten jakautumien perusteella ja luokitella jakautumia. Pulssiainestoa kerätään usean minuutin ajan koejännitteellä. Aineistoa kerättäessä myös vaikuttavan jännitteen hetkellisarvo rekisteröidään. Aineistoiksi kerätyt pulssit jaetaan ikkunoihin ja pulsseja tarkastellaan ikkunoittain. Ikkunoista tarkastellaan seuraavia asioita, pulssien lukumäärän jakaumaa, pulssien korkeusjakaumaa ja lasketaan jakaumat erikseen positiiviselle ja negatiiviselle jaksolle.

Tällä tavalla saadaan neljä jakaumasarjaa, jotka jaetaan operaattoreihin terävyyden ja epäsymmetrisyyden avulla. Tämän lisäksi lasketaan huippujen lukumäärä ja korrelaatio erimerkkisten puolijakson samanvaiheisten ikkunoiden jakaumien välillä. [5, s.479—480.]

5.6 Osittaispurkausten paikantaminen

Osittaispurkausmittauksissa on lähes yhtä tärkeää pystyä määrittämään purkauspaikka kuin pystyä määrittämään purkauksen suuruus. Pulssien välistä aikaeron määrittämistä käytetään useimmiten osittaispurkausten paikantamisessa.

Paikantamisen tarkkuuteen vaikuttavat kaapelin pituuden tarkkuus ja pulssien etenemisnopeuden tarkkuus sekä aikaeron mittauksen tarkkuus. Kaapelin pituus saadaan yleensä asennustiedoista ja verkkotietojärjestelmästä. Vanhemmilla kaapeleilla tiedot saattavat vaihdella ja joudutaan tyytymään parhaaseen arvaukseen. Kun on kyse lyhyistä kaapeleista, on pulssinkulkunopeus melko helppo määrittää. Järjestelmän kaistanleveys, näytteistystaajuus ja resonanssin aiheuttamat värähtelyt sekä ylitykset ja

suurtaajuuskomponenttien vaimeneminen hankaloittavat aikaeron määritystä. Sekakaapelit aiheuttavat myös ongelmia purkauspaikan määrittelyssä. Öljypaperieristeisiä kaapeleita korjataan ja jatketaan nykyään muovikaapeleilla. Aallon etenemisnopeus on erilainen erityypin kaapeleilla. [2, s. 29—30.]

Pitkässä eristysrakenteessa, osittaispurkaus synnyttää kulkuaallon, joka etenee eristysrakenteen molempia päitä kohti. Näistä syntyvien heijastusten perusteella voidaan pyrkiä paikallistamaan purkauskohta. Tämä menetelmä on käyttökelpoinen yksinkertaisissa rakenteissa kuten kaapeleissa. [5, s. 480]

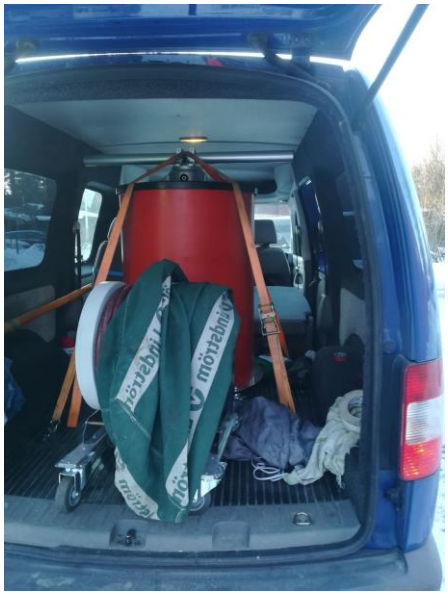
Kaapeleilla suoritettavissa osittaispurkaus-mittauksissa on kaksi erilaista mittausjärjestelmää: laajakaistainen ja erittäin laajakaistainen. Laajakaistaista käytetään näennäisvarauksen mittauksiin ja purkausten tunnistamiseen ja erittäin laajakaistaista paikantamiseen. Suurella kaistanleveydellä heijastuvat peräkkäiset pulssit erottuvat selkeämmin toisistaan.

Osittaispurkauksia on myös mahdollista paikantaa akustisesti. Purkaus aiheuttaa äänen, jonka intensiteetti on merkittävä ultraäänialueella. Taajuusalue näillä mittalaitteilla on 10 kHz—500 kHz. Taajuusalue 30 – 50 kHz on osoittautunut parhaaksi. [5, s. 480.]

6 Mittalaitteet

HDW Electronics OWTS M60

OWTS M60 (Oscillating Wave Test System) mittausjärjestelmää käytetään osittaispurkausten mittaamiseen ja paikantamiseen. Sen toiminta perustuu vaimenevaan vaihtojännitteeseen (DAC), ja laitteisto koostuu tietokoneesta ja korkeajänniteyksiköstä, johon kuuluvat jännitelähde, tehokytkimet, kela sekä mittausanturit. Tietokonetta käytetään mittausten tallentamiseen sekä analysoimiseen. Mittaustulokset siirtyvät langattomasti korkeajänniteyksiköstä tietokoneelle. Korkeajänniteyksikkö painaa n. 80 kg ja sitä pystytään kuljettamaan normaalilla henkilöautolla kuten kuvassa 9. Sähkönsyötöksi riittää normaali pistorasia, ja suurin koestusjännite on 42 kV.



Kuva 9. HDW Electronics OSW M60 pienen pakettiauton kyydissä.

Mittaustulokset kertovat osittaispurkausten voimakkuuden ja niiden syttymisen suhteen jännitteen vaiheeseen. Tuloksista näkee, syttyykö osittaispurkaus laskevalla vai nousevalla aallon reunalla vai molemmilla. Näistä tuloksista voidaan yrittää päätellä osittaispurkausten aiheuttajaa.

Laitteen ohjelmisto paikantaa purkausten paikan, edellyttäen, että mittalaitteisto on kalibroitu ja kaapelin pituus tiedetään. Kuvassa 10 on käynnissä mittalaitteiden kalibrointi. Näiden lähdetietojen valossa paikantaminen onnistuu yleensä muutamien metrien tarkkuudella. [6, s. 24.]

Kuva 10. Mittalaitteiden kalibrointi käynnissä.

Pry-Cam™

Pry-Cam on kaapelivalmistaja Prysmian Groupin osittaispurkausmittauksiin kehittämä laite. Pry-Cam-laitteilla pystytään suorittamaan kaapelijärjestelmien laadun tarkkailua, vanhempien kaapeliyhteyksien huoltotarpeiden ennakointia sekä niiden kunnon seurantaa. Laite soveltuu 3–600 kV:n vaihto- ja tasajännitteisten sähkölaitteiden osittaispurkausmittauksiin. Pry-Cam hyödyntää tekniikkaa, jossa käytetään langatonta sähkömagneettista anturia. Tämän tekniikan avulla pystytään mittaamaan esimerkiksi kaapelien, kaapelivarusteiden, muuntajien ja kytkinlaitteistojen kuntoa.

Osittaispurkausten mittaus tapahtuu verkon omalla käyttöjännitteellä, eli on-line-mittauksena ilman galvaanista kontaktia. Järjestelmän käyttö ei häiriinny mittauksen aikana, sillä mittaus ei vaadi erillisiä mittauskytkentöjä. Mittaukset pystytään suorittamaan kuorman ollessa kytkettynä tai ilman.

Pry-Cam laiteet keräävät 200 Ms/s näytettä 100 MHz:n kaistanleveydeltä, jopa 0,5 pC:n tarkkuudella, jonka ansiosta pystytään tarkemmin havaitsemaan alkutekijöissä olevat purkaukset. Taajuusalueita suodattamalla erilaiset purkausilmiöt, kuten osittaispurkaukset, pintapurkaukset ja koronapurkaukset voidaan erotella ja analysoida erikseen. Purkausten analysointi on tarkempaa verrattuna mittauksiin, joiden tulos perustuu ainoastaan purkauksen voimakkuuteen. [14]

Pry-Cam Portable™

Pry-Cam Portablea on kädessä kannettava, kevyt yksittäisiin mittauksiin tarkoitettu laite. Laite on iskunkestävä, ja sillä on IP67-kotelointiluokitus. Siinä on langaton sähkömagneettinen anturi, se toimii akulla ja sillä saa langattoman yhteyden esimerkiksi tablettitietokoneeseen. Kaikki tarvittavat välineet mahtuvat reppuun. Kuvassa 11 Pry-Cam Portable ja tabletti. [14]

Kuva 11. Pry-Cam Portable ja tablettitietokone [13].

Mittaus kyseisellä laitteella tapahtuu asettamalla mittalaite mahdollisimman lähelle mitattavaa kohdetta. Kaapelijärjestelmää mitattaessa mittalaite asetetaan kiinni kaapelin tai kaapelivarusteeseen. Keskijännitteellä mitattaessa laite antaa luotettavaa dataa 500 metrin matkalta molempiin suuntiin kaapeliyhteyttä. 110 kV:n suurjännitteellä noin yhden kilometrin matkalta. Muuntajaa tai kojeistoa mitattaessa Pry-Cam Portable tulee asettaa mahdollisimman lähelle mitattavaa kohdetta, mutta mittaus voidaan suorittaa jopa kahden metrin päästä, riippuen purkausten signaalin voimakkuudesta ja mitattavan järjestelmän jännitteen suuruudesta. Kuvassa 12 suoritetaan mittausta Pry-Cam Portablella Wiski™-tyypin keskijännitekaapelista. [14]

Kuva 12. Mittaus Pry-Cam Portablen kanssa [13].

Yksinkertaisin tapa mittauksen analysointiin on käyttää automaattista analysointia, joka antaa lausunnon välittömästi mittauksen jälkeen. Liikennevaloperiaatteella saatava automaattinen lausunto perustuu satojen tuhansien mittausten tietopankkiin. Prysmian tarjoaa myös asiantuntijapalveluita, esimerkiksi tarkempaa analysointia vaativissa tilanteissa. [14]

Pry-Cam Grids™

Pry-Cam Grids on tarkoitettu jatkuvaan tai pidempiaikaiseen järjestelmän kunnonvalvontaan. Järjestelmässä on Pry-Cam Dlog™ keskusyksikkö, Pry-Cam Wings™ -sensorit ja mahdolliset lisälaitteet. Järjestelmä kerää jatkuvasti tietoa mitattavasta kohteesta, ja tieto pystytään siirtämään valvomoon reaaliajassa. Laitteistolle on mahdollista asettaa rajaarvot, joiden ylitys aiheuttaa hälytyksen, ja tieto kulkeutuu esimerkiksi verkonhaltijan valvomoon. Pry-Cam Grids -järjestelmään voidaan liittää osittaispurkausten mittausten lisäksi myös esimerkiksi lämpötilan seuranta, jolla kaapelijärjestelmän kuormitusta voidaan optimoida. Kuvassa 13 on Pry-Cam Grids keskusyksikkö ja Pry-Cam Wings -sensori. [14]

Kuva 13. Pry-Cam Grids keskusyksikkö ja Pry-Cam Wings -sensori [13].

7 Yhteenveto

Insinöörityössä käsiteltiin osittaispurkausmittauksia ja niihin liittyvää teoriaa, keskijänniteverkkoja sekä niihin liittyviä maakaapeleita, sekä maakaapelivarusteita. Lisäksi työn lopussa käsitetiin kahta eri mittaustapoihin perustuvaa mittalaitetta. Tavoitteena oli, että ELTEL Networks Oy saisi työnjohdolleen osittaispurkausmittauksia käsittelevän oppaan, jossa käytäisiin läpi aiheen perusteet.

Työni perustui suomenkieliseen teoriaan, jota aiheesta löytyi runsaasti. Rajasin heti englanninkielisen teorian pois, sillä muuten aihe olisi paisunut tarpeettoman suureksi. Kävin läpi myös jakeluverkkojen perusteet läpi sekä nykyiset ja vanhat maakaapelit ja maakaapelivarusteet, sillä ne ovat olennainen osa jakeluverkkoja.

Haasteena työssä oli saada olennainen osittaispurkausmittauksista kasaan, sillä aiheesta löytyy paljon tietoa. Lisäksi laitteista kirjoittaminen oli haastavaa, sillä niistä taas ei ollut tietoa yhtään niin hyvin saatavilla kuin itse osittaispurkauksista.

Työn tavoitteet saavutettiin, ja ELTEL Networks Oy sai työstäni oppaan työnjohdolle siitä, mitä osittaispurkaukset ovat ja miksi osittaispurkausmittauksia tehdään. Työssä esitellyt helpottavat mahdollisia laitehankintoja tulevaisuudessa, koska työssä esitetyt laitteista kerrottiin lyhyesti ja ytimekkäästi.

Lähteet

1 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo 2012. Sähkönjakelutekniikka. Otatieto.

2 Hyvönen, Petri 2003. Keskijännitteisten maakaapelijärjestelmien osittaispurkausmittaukset käyttöpaikalla. Report TKK-SJT-60. Espoo.

3 Vepsäläinen, Jukka 2014. Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijännite-verkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa. Diplomityö. Espoo.

4 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot II. Otatieto.

5 Aro, Martti, 2003. Suurjännitetekniikka. Otatieto.

6 Estola, Juha 2010. Maakaapelien kuntomittaukset. Kandidaatintyö.

7 Yleistietoa häiriöistä. Verkkoaineisto. Energiateollisuus Ry. <https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkokatkot>. Luettu 6.9.2018

8 Keskeytystilasto 2017. Verkkoaineisto. 2018. Energiateollisuus Ry. <https://energia.fi/files/2785/Sahkon_keskeytystilasto_2017.pdf>. Luettu 6.9.2018.

9 Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus 2014. Verkkoaineisto. 16.12.2014. Energiavirasto. <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/S%C3%A4hk%C3%B6verkkoliiketoiminnan+kehitys+s%C3%A4hk%C3%B6verkon+toimitusvarmuus+ja+valvonnan+vaikuttavuus+2014_2419_402_2014.pdf/890eea2e-ece6-4d55-9309-d3ceba40aa4d>. Luettu 6.9.2018.

10 Eronen, Pekka 2013. Tehtaan Keskijännitejakelun selektiivisyystarkastelu. Diplomityö. Tampere.

11 Elovaara, Jarmo & Laiho, Yrjö 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otatieto.

12 Sähkönsiirto. Verkkoaineisto. Caruna. <https://www.caruna.fi/caruna/sahkoverkko>. Luettu 12.9.2018.

13 Lahti, Joonas. Prysmian. Arkisto 2018.

14 Pry-Cam. Verkkoaineisto. Prysmian. 2019. <https://pry-cam.com/en/>. Luettu 18.1.2019.