



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

JAKELUMUUNTAJAN LÄMPÖLAUKAISUPIIRIN TUTKIMINEN JA MARKKINAKARTOITUS PD-MITTALAITTEISTA SEKÄ JAKELUMUUNTAJIEN IKÄÄNTYMISEN ANALYSOINTI

Markus Kettunen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Sähkötekniikan ko.
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan ko.
Sähkövoimatekniikka

KETTUNEN, MARKUS:

Jakelumuuntajan lämpölaukaisupiirin tutkiminen ja markkinakartoitus PD-mittalaitteista sekä jakelumuuntajan ikääntymisen analysointi

Opinnäytetyö 67 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2018

Jakeluverkonhaltijoille on syntynyt tarve määrittää korvausinvestointeja oikea-aikaisesti, näitä investointeja voidaan arvioida ennakoivalla kunnonvalvonnalla. Tässä työssä perehdyttiin keskijänniteverkon ennakoivaan kunnonvalvontaan, joka muodostui kolmesta kokonaisuudesta. Ensimmäisessä osassa tehtiin jakelumuuntajan lämpötilamittarin markkinakartoitus, toisessa osassa tehtiin osittaispurkausmittalaitteiden ja palveluiden markkinakartoitus sekä lopuksi analysoitiin jakelumuuntamon mittausdataa.

Jakelumuuntajan öljyn lämpötilamittarin markkinakartoituksen tarkoituksena oli mahdollistaa keskijännitekojeiston varokeuormaerottimen etälaukaisu ja mittalaite tuli olla siirrettävissä. Valinta kohdistui ABB toimittamaan lämpötilamittariin, joka toteutti molemmat vaatimukset, lisäksi mittalaite täytti olosuhteille asetetut vaatimukset. Toisaalta kyseenalaistettiin lämpötilamittarin tarpeellisuus kustannustehokkuuden ja helppouden takia. Käytännössä lämpömittarin investointikulut jäivät alhaisiksi, tästä syystä investoinnille ei ollut estettä. Lisäksi on suositeltavaa säilyttää jakelumuuntajien paikallinen lämpötilan mittaus.

Osittaispurkausmittalaitteiden ja palveluiden markkinakartoituksen tavoitteena oli löytää mittalaitteisto sähköaseman 20kV lähtöjen jatkuvaan purkausten seurantaan, kunnonvalvontamittauksiin ja selvittää miten purkausten seurantaa voitaisiin kehittää. Valinta kohdistui jatkuvan seurannan osalta IPEC:n ASM laitteistoon, kunnonvalvontamittauksiin valittiin Eurolaitteen toimittama PD-TaD 60 mittalaitteisto ja mittauspalvelun osalta valinta kohdistui DEKRAAN. Seurantaa voidaan tulevaisuudessa kehittää päivittämällä Trimble NIS verkkotietojärjestelmää, joka mahdollistaa oleellisen mittausdatan liittämisen reaaliaikaisesti toimeksiantajan järjestelmään.

Jakelumuuntamoiden mittausdatan analysoinnin tavoitteena oli, selvittää muuntajan ikääntyminen ja lopuksi arvioida seurantalaitteiden tarpeellisuutta. Laskennan tulokset osoittivat, ettei muuntajat ikäänny alhaisen kuormitusasteen ja lämpötilan vuoksi. Tämän vuoksi seurantalaitteisiin investointi ei ole tarpeellista. Toisaalta seurantaa voidaan kohdistaa sellaisille verkon osille, joiden keskeytyksetön sähkönjakelu on erityisen tarpeellista. Lisäksi yksittäisten jakelumuuntamoiden kuormituksen tai jäähdytysolosuhteiden muuttuessa voidaan arvioida uudestaan seurantalaitteiden tarpeellisuutta.

Asiasanat: keskijänniteverkko, jakelumuuntaja, öljyn lämpötilamittari, osittaispurkausmittalaite, muuntajan ikääntyminen

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme of Electrical Engineering

KETTUNEN, MARKUS:

Study of Thermal Tripping Circuit for Distribution Transformers and Market Survey of PD-measurement Devices and Analysis of Ageing for Distribution Transformers

Bachelor's thesis 67 pages, appendices 0 pages
May 2018

There is a need for distribution system operators to timely determine replacement investments, these investments can be evaluated by proactive maintenance. The topics of this thesis are focused at proactive maintenance of medium voltage network. Purpose of the first topic was to make a market survey of oil temperature indicator for distribution transformers. Goal for the second topic was to perform a market survey for PD-measurement devices and services, lastly analyze of measurement data of secondary substation.

The aims of the market survey of the oil temperature indicator for distribution transformers was to allow the remote-control option for three position switch-disconnector of SF₆ gas insulated switchgear. Selection of the device was directed at ABB supply temperature indicator that fulfilled those requirements, in addition the measurement device fulfilled the condition requirements. On the other hand, the necessity of a temperature indicator was questioned because of cost effectiveness and ease of use. In practice costs of those devices was so low, why there was no need to cancel investment. In addition, it is recommended to keep local temperature metering for distribution transformer.

Goals of the market survey of partial discharge devices and services was to find a measuring system for continuous discharge monitoring of outputs of 20 kV substations, condition monitoring devices and to find out how to store measurement data effectively. For continuous monitoring system selection, IPEC: s ASM system was chosen, and selection of condition monitoring devices was directed at Eurolaite Oy supply PD-TaD 60 measurement equipment and PD-measurement services were targeted at DEKRA. The most important issue for development of store measurement data was to make updates to network information system, which enables the essential data to be connected to the client's system in real time.

The purpose of analysing the secondary substation measurement data was to estimate ageing rate of distribution transformers and estimate need of monitoring devices for that issue. The results of the calculation showed that transformer ageing rate is normal. For this reason, it is not necessary to make investment of monitoring devices for distribution transformers. On the other hand, distribution network consists of critical parts for uninterrupted power supply. For those parts of distribution network need to focus on monitoring devices for transformers ageing rate follow-up. In addition, if load of transformer or cooling condition changes rapidly, it is possible to re-evaluate the need for monitoring devices for ageing rate follow-up.

Key words: medium voltage network, distribution transformer, oil temperature indicator, PD-measurement device, ageing rate of distribution transformer

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	LÄHTÖTILANNE JA KARTOITUSTA KOSKEVAT LAITTEISTOT	7
2.1	Lämpötilamittarin kartoitusta koskeva muuntamolaitteisto	7
2.2	Osittaispurkausmittauksia koskevan laitteiston määrittäminen	12
2.3	Osittaispurkausmittaukset	14
2.3.1	Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset	16
2.3.2	Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset	18
2.4	Jakelumuuntajan ikääntyminen.....	21
2.4.1	Muuntajan ikääntymiseen vaikuttavat tekijät.....	21
2.4.2	Ikääntymisen luonnontieteellinen perustelu.....	24
2.4.3	Ratkaisuja ikääntymisen seurannalle	27
3	ÖLJYN LÄMPÖTILAMITTARIN MARKKINAKARTOITUS	30
3.1	Kartoituksen periaatteet ja markkinatilanteen selvittäminen	30
3.2	Näkökulmat jakelumuuntajan lämpötilan mittaukselle	31
3.2.1	Muuntajan lämpötilan mittaus lämpötilamittarilla.....	31
3.2.2	Muuntajan lämpötilan mittaus magneettinapilla.....	34
4	PD-MITTALAITTEIDEN MARKKINAKARTOITUS JA SEURANTA	36
4.1	PD-mittalaitteiden markkinatilanne ja käyttötarkoitus	36
4.2	PD-mittalaitteiden ominaisuuksien esittely	39
4.2.1	Megger	39
4.2.2	Eurolaite Oy	41
4.2.3	IPEC	42
4.2.4	EA Technology	45
4.3	Osittaispurkausmittausten palvelut	50
4.3.1	DEKRA	50
4.3.2	Kiwa Inspecta.....	51
4.3.3	Prysmian Group	51
4.4	Osittaispurkausten seurannan kehittäminen.....	51
5	MUUNTAMOAUTOMAATIODATAN ANALYSOINTI.....	55
5.1	Jakelumuuntamoiden mittausdatan käsittely	55
5.2	Analyysin pohjalta tehty arvio muuntajien käyttöiästä.....	57
5.2.1	Muuntaja 1	57
5.2.2	Muuntaja 2	59
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	61
	LÄHTEET.....	64

LYHENTEET JA TERMIT

K	Muuntamon pienjännitepuolen kuormitusvirran ja muuntajan nimellisvirran suhdeluku
I_L	Muuntamon pienjännitepuolen kuormitusvirta (A)
I_N	Muuntajan nimellisvirta (A)
U	Muuntajan pääjännite (V)
S_N	Muuntajan nimellisteho (kVA)
θ_a	Ympäristön lämpötila (°C)
θ_o	Öljyn pintalämpötila (°C)
θ_h	Muuntajan käämin kuumin piste (°C)
$\theta_{o(0)}$	Laskettu alkulämpötila öljyn pintalämpötilalle (°C)
$\Delta\theta_{h1(0)}$	Laskettu alkulämpötila Hot Spot lämpötilalle (°C)
$\Delta\theta_{h2(0)}$	Laskettu alkulämpötila Hot Spot lämpötilalle (°C)
R	Muuntajan kuormahäviöiden ja tyhjäkäyntihäviöiden suhdeluku
$\Delta\theta_{or}$	Hot Spot lämpötilan ja öljyn pintalämpötilan välinen gradientti nimellisvirralla (°C)
$\Delta\theta_{hr}$	Keskimääräisen öljyn lämpötilan nousu (°C)
k_{11}	Lämpötilamallin vakio
k_{21}	Lämpötilamallin vakio
k_{22}	Lämpötilamallin vakio
τ_o	Öljyn aikavakio (h)
τ_w	Käämityksen aikavakio (h)
Dt	Aika-askel (h)
V_1	Suhteellinen ikääntymisnopeus vahvistamattomalle eristepaperille
V_2	Suhteellinen ikääntymisnopeus vahvistetulle eristepaperille
L	Muuntajan ikääntyminen (h)

1 JOHDANTO

Tämän työn toimeksiantaja on Tampereen Sähköverkko Oy, joka vastaa paikallisen jakeluverkon suunnittelusta, rakennuttamisesta ja kunnossapidosta. Seuraavien vuosikymmenien aikana sähköverkkoon kohdistuu enenevässä määrin teknologista kehitystä, johon jakeluverkonhaltija pyrkii vastaamaan. Käytännössä tämä tarkoittaa automaation lisääntymistä jakeluverkossa ja sen osissa (Elovaara & Haarla 2011, 508-509). Automatisoinnilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi sähkön toimitusvarmuuteen ja ennakoivaan kunnossapitoon, joiden avulla pyritään estämään ennalta tarpeettomat keskeytykset sekä jakeluverkonhaltijalle aiheutuvat taloudelliset kustannukset.

Kiristynyt sähkömarkkinalaki (588/2013) velvoittaa jakeluverkonhaltijalta parempaa toimitusvarmuutta, joka lisää tarvetta ennakoivalle kunnossapidolle. Yksi suurjännitelaitteistoissa esiintyvä rakenteiden käyttöikään vaikuttava sähkötekninen ilmiö on osittaispurkaukset. Osittaispurkausmittaukset eli PD-mittaukset ovat niiden mittausmenetelmästä riippuen yksi potentiaalinen keskijänniteverkon kunnonvalvonnan mittausmenetelmä (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 489; Wagernaars 2010, 6; Pakonen 2018, 21)

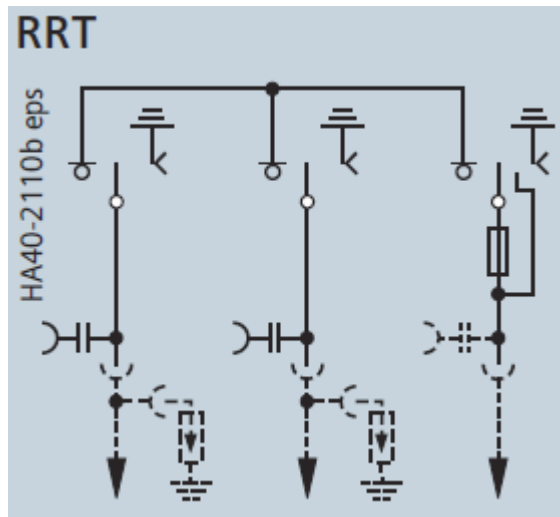
Tämän opinnäytetyön pääasiallinen tarkoitus on tehdä markkinakartoitus jakelumuuntajien etäluettavista öljynlämpötilamittareista ja selvittää kuinka keskijännitekojeiston varokeuormaerotinkentän etälaukaisu on toteutettavissa. Toinen kartoitus kohdistuu osittaispurkausmittalaitteisiin sekä PD-mittauspalveluihin. Lisäksi selvitetään, kuinka osittaispurkauksien seuranta voidaan kehittää toimeksiantajan tarpeisiin sopivalla tavalla. Työhön otettiin mukaan myös tekninen näkökulma, jossa käsitellään ja analysoidaan muuntamoautomaatio dataa. Tarkoituksena on mallintaa ja arvioida jakelumuuntajien käyttöikää mittausdatan pohjalta. Työstä rajattiin pois hankintamenettely, laitteiden hankintakustannukset ja kustannustehokkuuden arviointi sekä osittaispurkausten koemitaukset.

2 LÄHTÖTILANNE JA KARTOITUSTA KOSKEVAT LAITTEISTOT

Tämän luvun tavoitteena on selostaa mitä laitteistoja kartoitus koskee, mikä on niiden nykytilanne, mitkä ovat toimeksiantajan kehitystarpeet ja niiden perusteet. Kartoitusta koskevan verkon nykytilan määrittäminen on tärkeää, koska siitä saadaan vertailukohta kartoituksen tuloksille. Tässä työssä käsiteltävät asiakokonaisuudet liittyvät jakeluverkon ennakoivaan kunnossapitoon, joka fokusoituu keskijänniteverkkoon. Ennakoivan kunnossapidon osalta työssä perehdytään maakaapeleiden kunnossapitoon, johon liittyy PD-mittalaitteiden markkinakartoitus ja osittaispurkausmittaukset. Lisäksi perehdytään muuntamoiden ennakoivaan kunnossapitoon, johon liittyy lämpötilamittarin kartoitus sekä jakelumuuntajan ikääntyminen. Muuntajan ikääntymistä tarkastellaan teknisestä näkökulmasta, jossa esitellään ikääntymiseen vaikuttavia tekijöitä ja teknisiä suureita.

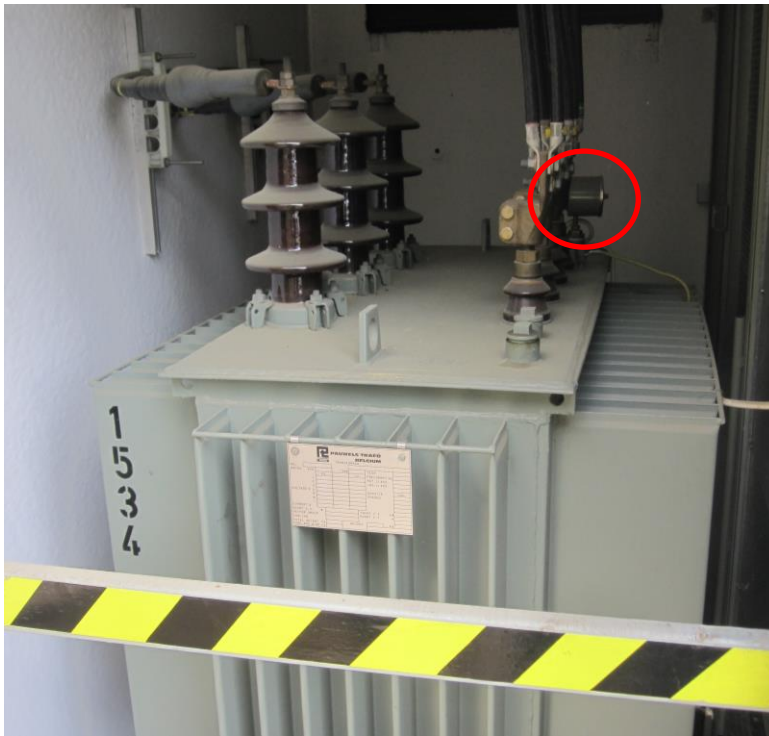
2.1 Lämpötilamittarin kartoitusta koskeva muuntamolaitteisto

Tampereen Sähköverkko Oy:llä on syntynyt tarve kehittää jakelumuuntamoiden keskijännitekojeiston varokekuormaerottimen laukaisuominaisuutta. Pyrkimyksenä olisi selvittää miten laukaisuominaisuus voidaan toteuttaa etälaukaisuna. Tämän tarkoituksena on helpottaa muuntajan suojaamista ja parantaa toimitusvarmuutta. Tampereen keskijänniteverkko on rakenteeltaan rengasverkkoa, jonka erottimia hallitaan pääsääntöisesti paikallisohjauksella. Poikkeuksena ovat jakelumuuntamoilla olevat varokekuormaerottimet (kuva 1). Varokekuormaerotin on osa lämpölaukaisupiiriä, minkä tarkoitus on erottaa muuntaja sähkönjakeluverkosta. Keskijänniteverkon rakenteesta johtuen yksittäisiä jakelumuuntamoita ei voida pääsääntöisesti erottaa verkosta kaukokäytöllä. Joissain tapauksissa muuntajan etälaukaisu pienentää häiriön laajuutta, koska laukaisua ei tarvitse toteuttaa koko johtolähdölle. Tämän takia erottimien etäohjausta ja etälaukaisua tarvitaan keskijänniteverkon muuntamoilla, jolloin vikoja voidaan rajata tehokkaammin sekä välttää turhat keskeytykset. Tätä työtä koskevat jakelumuuntamot kohdistuvat muuntamoautomaatiojärjestelmän sisältäviin keskijänniteverkon jakelumuuntamoihin.



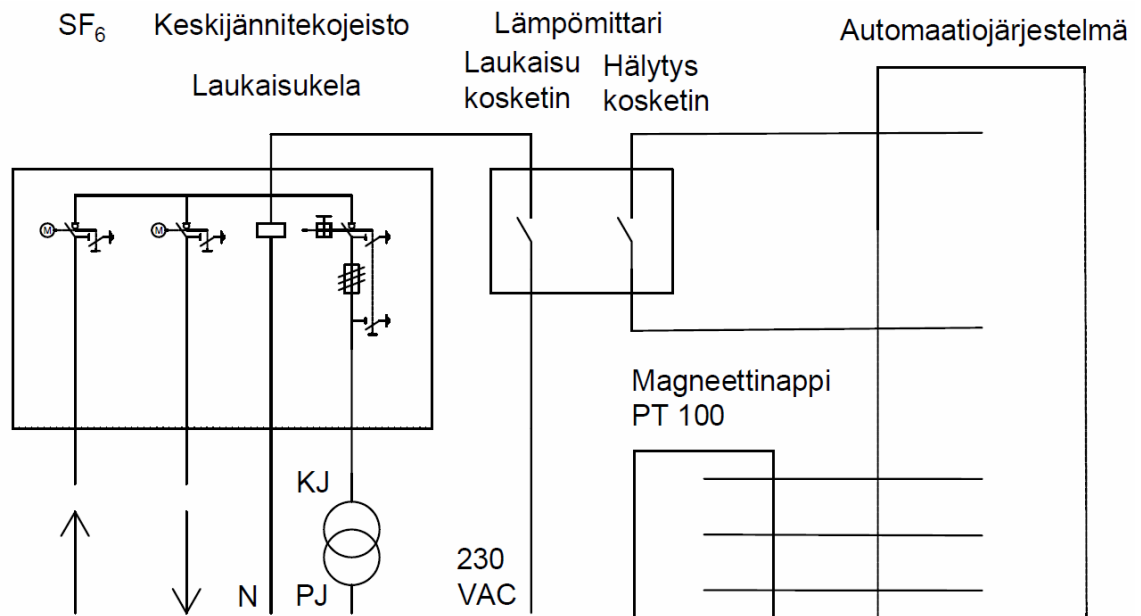
KUVA 1. Jakelumuuntamoiden SF6 keskijännitekojeiston erottimet, joista oikeanpuoleisin on varokekuormaerotin (Siemens tuotekatalogi 2017, 16)

Toimeksiantajan kehitystarpeet kohdistuvat varokekuormaerottimen etälaukaisuun. Tämän tarkoituksena on mahdollistaa hälytyksen kuittaus valvomosta, joka helpottaa turhien hälytysten hallinnassa. Toisaalta muuntajan erotus voidaan tehdä välittömästi, jos sille on tarvetta. Toinen kehitystarve kohdistuu öljynlämpötilamittariin ja sen markkinakartoitukseen. Perusteena lämpötilamittarin kartoitukselle on varmistaa kunnossapidolle turvallinen luokse pääsy lämpötilamittarille (SFS 6001 2015, 69) muuntamossa. Muuntamon ovista ja muuntajan asennosta riippuen lämpömittarin luettavuus on hankalaa, koska öljynlämpötilamittari sijaitsee fyysisesti muuntajankannella olevassa öljytaskussa (kuva 2). Mittarin sijaintiin liittyy haasteita myös työturvallisuuden näkökulmasta, koska muuntajakannella olevat pienjännitepuolen navat ovat jännitteisiä osia. Tavoitteena olisi löytää siis sellainen lämpötilamittari, joka olisi siirrettävissä muuntamotilassa muuntamon ovien viereen. Kartoitusta tehdessä huomioidaan mittalaitteen soveltuvuus Euroopan olosuhteisiin, joka edellyttää EN-, IEC-, DIN- ja SFS-standardien vaatimusten toteutumista. Seuraavaksi selostetaan kartoitusta koskevien jakelumuuntajien laukaisun toimintaperiaate.



KUVA 2. Jakelumuuntajan lämpötilamittarin sijainti muuntamon takaosassa (Virtanen, J. 2018, sähköpostin liite kuva muokattu)

Nykytilanteessa kartoitusta koskevat jakelumuuntajat ovat käytännössä etävalvonnassa, koska muuntajaa ohjaava varokeuormaerottimen laukaisu on toteutettu paikallisella lämpömittarin laukaisukoskettimella. Asetellun hälytysrajan ylittyessä lämpömittarin hälytyskosketin antaa hälytystiedon muuntamoautomaatiojärjestelmän (kuva 3) kautta valvomoon. Hälytyksen sattuessa lämpömittarin potentiaalivapaa laukaisukosketin antaa 230VAC laukaisukäskyn asetellun ajan kuluttua SF₆ keskijännitekojeiston laukaisukelalle, joka laukaisee varokeuormaerottimen eli irrottaa muuntajan verkosta. Laukaisu on aseteltu muutaman tunnin päähän hälytyksestä, jotta siihen ehditään reagoimaan. Lisäksi muuntajakannella olevasta erillisestä magneettinapista, mitataan PT-100 lämpötila-anturilla muuntajan öljyn pintalämpötilaa. Käytönvalvontajärjestelmä (MicroSCADA) kerää lämpötiladataa tunnin välein ja tallentaa mittaustiedon sen HIS600 historiatietokantaan (Autio, L. 2011, 14). Käytännössä jakelumuuntajien öljyn pinnan lämpötilan mittaus on toteutettu siis rinnakkaisella mittauksella.



KUVA 3. Jakelumuuntajan nykyinen lämpölaukaisupiiri (Järvensivu, J.P. 2018, sähköpostin liite kuva muokattu)

Tarkoituksena on verrata muuntamon nykytilaa kehitystarpeisiin, joita tarkastellaan kahdesta näkökulmasta (taulukko 1), joista ensimmäinen käsittää rinnakkaisen lämpötilanmittauksen säilyttämisen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lämpötilamittari on siirrettävissä muuntamossa, varokeuormaerotin voidaan laukaista etänä valvomosta ja magneettinappi mittaa lämpötilaa, jonka MicroSCADA kerää historiatietokantaan.

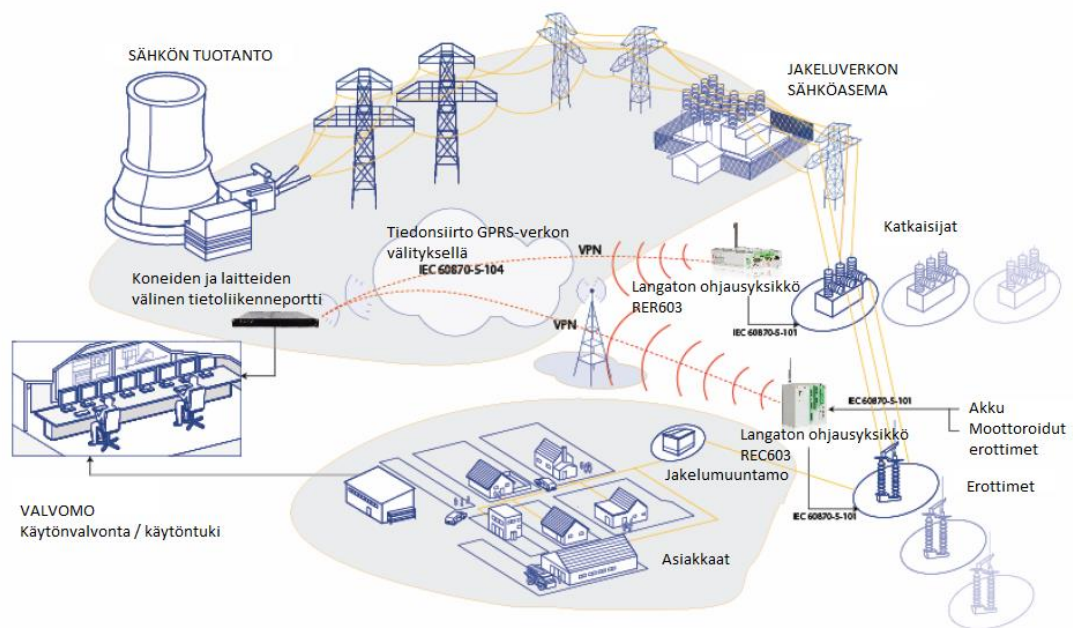
Toinen näkökulma tarkastelee mahdollisuutta, jossa paikallinen lämpötilanluenta eli lämpötilamittari jätetään kokonaan pois. Tällöin MicroSCADA tekee hälytyksen ja laukaisu voidaan tehdä valvomosta. Lisäksi MicroSCADA kerää magneettinapin PT-100 lämpötila anturin mittaaman lämpötilaa ja tallentaa sen historiatietokantaan. Nämä näkökulmat antavat hyvät lähtökohdat markkinakartoituksen tekemiselle ja helpottavat selvittäessä mittalaitteen soveltuvuutta käyttötarkoitukseen.

TAULUKKO 1. Kartoitusta koskevien muuntamoiden nykytila ja kehitystarpeet kahdesta näkökulmasta

Muuntamon nykyinen tila	Kehitystarpeet	
	Ensimmäinen näkökulma	Toinen näkökulma
<ul style="list-style-type: none"> • Asetellun hälytysrajan ylittyessä lämpömittari antaa hälytyskoskettimen kautta hälytyksen valvomoon • Asetellun ajan kuluttua hälytyksestä lämpötilamittarin laukaisukosketin antaa 230VAC laukaisukäskyn KJ-kojeiston laukaisukelalle, joka erottaa muuntajan verkosta • MircoSCADA kerää mittausdataa magneettinapin PT 100 anturin lämpötilasta • Täyttää EN-, IEC-, DIN- ja SFS-standardien vaatimukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Varokekuormaerottimen laukaisevaa laukaisukelaa voidaan ohjata etänä valvomosta. • Lämpötilamittari on siirrettävissä muuntamotilassa • MircoSCADA kerää mittausdataa magneettinapin PT 100 anturin lämpötilasta • Täyttää EN-, IEC-, DIN- ja SFS-standardien vaatimukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Lämpötilamittari poistetaan kokonaan • MircoSCADA kerää mittausdataa magneettinapin PT 100 anturin lämpötilasta • SCADA tekee hälytyksen ja varokekuormaerottimen laukaisu voidaan tehdä valvomosta • Täyttää EN-, IEC-, DIN- ja SFS-standardien vaatimukset

Lopuksi esitellään yleiskatsaus jakeluverkon automaatiojärjestelmän verkkotopologiasta (kuva 4), jonka tarkoituksena on havainnollistaa mittausdatan kulkua valvomoon. Uusissa muuntamoissa tiedonsiirto pyritään poikkeuksetta hoitamaan langattomasti, tämä on eräs huomioitava seikka kartoitusta tehdessä. Tulevaisuuden kannalta kartoitusta koskevat laitteistot olisivat hyvä olla toiminnaltaan ensisijaisesti digitaalisia, tämä seikka helpottaa tulevaisuudessa uusien laitteiden yhteensovittamisessa.

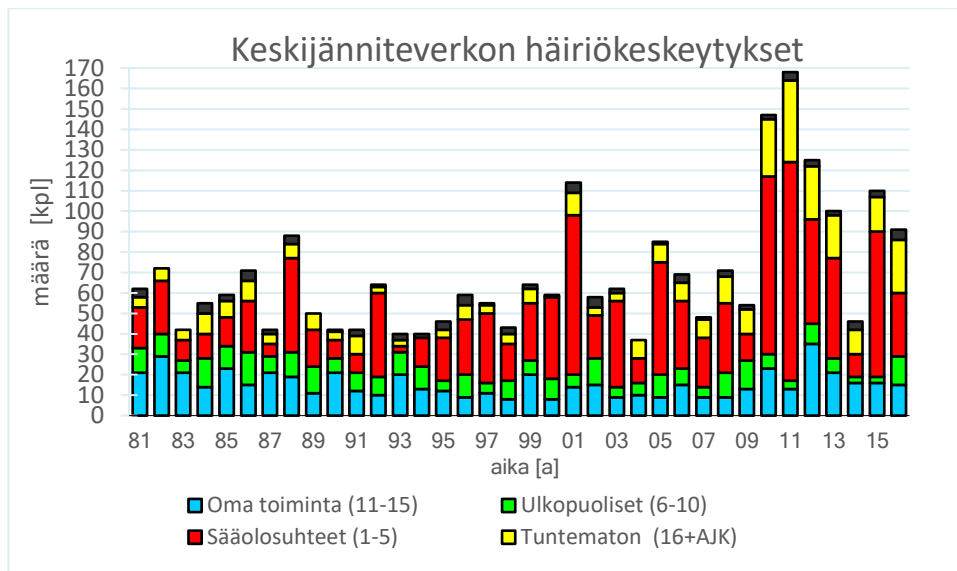
Nykyisen jakelumuuntamolaitteiston mittausdatan siirtäminen on toteutettu matkapuhelinverkossa toimivan pakettikytkentäisen tiedonsiirtopalvelun välityksellä. Tätä tiedonsiirtopalvelua kutsutaan GPRS-verkoksi, jonka välityksellä mittausdata voidaan siirtää langattomasti valvomoon. Verkon eri osilta tuleva tietoliikenne ohjataan keskitetysti tukiaseman kautta M2M (machine to machine) tietoliikenneporttiin, joka mahdollistaa kokonaisvaltaisen ja tehokkaan verkon valvonnan sekä ohjauksen.



KUVA 4. Yleiskatsaus jakeluverkon automaatiojärjestelmän verkkotopologiasta (ABB:n tuoteopas, 4 kuva muokattu)

2.2 Osittaispurkausmittauksia koskevan laitteiston määrittäminen

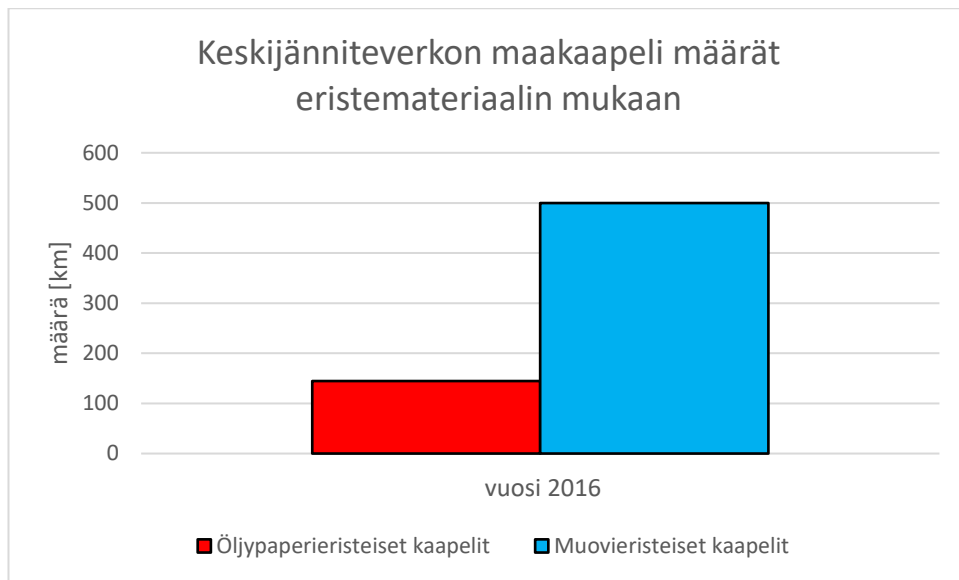
Verkkoyhtiöiltä odotetaan yhä parempaa sähkötoimitusvarmuutta (588/2013), jonka vuoksi jakeluverkon kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Turhat keskeytykset aiheuttavat verkkoyhtiöille kustannuksia, joita pyritään vähentämään ennakoivalla kunnonvalvonnalla. Osittaispurkausmittaukset ovat verkkoyhtiöiden keskuudessa yleistynyt ja keskeinen mittausmenetelmä ennakoivassa kunnonvalvonnassa. Jakeluverkonhaltija tilastoi oman verkkonsa häiriökeskeytyksiä (kuvio 1), jolloin voidaan selvittää ns. KAH arvo eli keskeytyksestä aiheutunut haitta. Energiaviranomaiset valvovat KAH-arvon perusteella verkkoyhtiöiden aiheuttamia kustannuksia asiakkailleen.



KUVIO 1. Tampereen Sähköverkon keskijänniteverkon häiriökeskeytykset eriteltynä vikatyypin perusteella (Sihvo, P. 2017)

Toisen kokonaisuuden työhön muodostaa osittaispurkausmittalaitteiden ja PD-mittauspalveluita tarjoavien toimijoiden markkinakartoitus. Toimeksiantajan tarpeet osittaispurkausmittausten osalta liittyvät keskijännitekaapeleiden kunnonvalvontaan sekä käytönaikeeseen osittaispurkausmittaukseen. Lisäksi osittaispurkausten seurantaan kiinnitetään huomiota, jotta kaapeleiden kuntoa voidaan seurata pitkällä aikajänteellä.

Tampereen Sähköverkon keskijännitekaapeliverkko on rakenteeltaan sekakaapeliverkkoa, jossa esiintyy öljypaperieristeisiä- ja muovieristeisiä keskijännitekaapeleita (kuvio 2). Keskijänniteverkon maakaapeleissa esiintyy eristevikoja, jotka voivat aiheuttaa keskeytyksiä. Tämän takia verkkoyhtiöillä on herännyt kiinnostus osittaispurkausmittauksia kohtaan. Osittaispurkauksia esiintyy tavallisesti kaapelijatkoissa ja kaapelipääteissä (Hyvönen 2003, 3; Nousiainen 2001, 32). Sekaverkossa esiintyy siirtymäjatkoja eli muovieristeistä kaapelia on jatkettu öljypaperieristeisellä kaapelilla ja päinvastoin. Siirtymäjatkosten takia luotettavaa mittaustulosta osittaispurkauksista ei saada välttämättä kaikilla keskijänniteverkon osilla, vaan mittaukset tulisi suorittaa johto-osuus kerrallaan luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi (Research report 2010, 285-286). Tämä on yksi syy sille minkä takia keskijänniteverkkoa uusittaessa öljypaperieristeiset kaapelit korvataan muovieristeisillä keskijännitekaapeleilla.

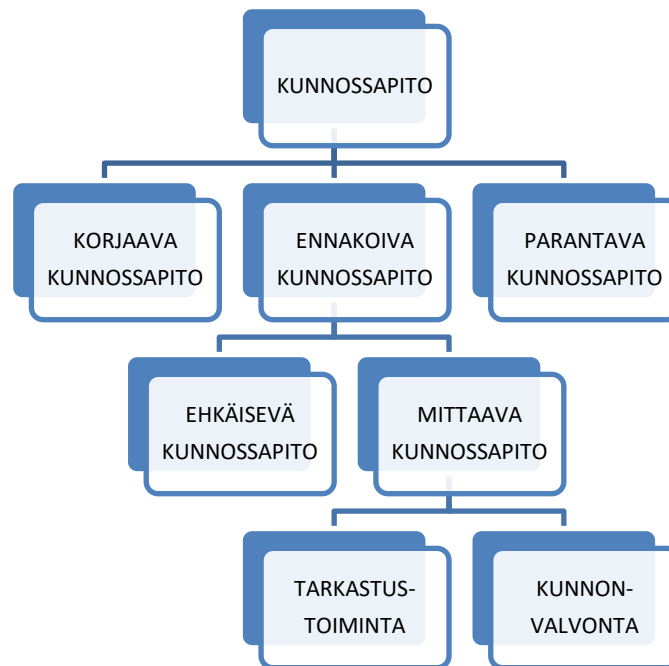


KUVIO 2. TSV:n öljypaperieristeisten- ja muovieristeisten keskijännitekaapeleiden jakauma (Sihvo, P 2017)

Toinen kehitystarve liittyy käytönaikaiseen osittaispurkausmittalaitteistoon, joka sijoitetaan sähköaseman keskijännitelähtöön. Tarkoituksena on mitata osittaispurkauksia jatkuva-aikaisesti keskijännitelähdön johto-osuudelta, jossa ei esiinny siirtymäjatkoksia. Purkausten aktiivisuuden perusteella voidaan arvioida erikseen tarvetta muille kunnonvalvonta toimenpiteille kyseisen lähdön osalta. Jatkuva-aikainen mittaus mahdollistaa kustannustehokkaamman sekä keskeytyksettömän kunnonvalvonnan.

2.3 Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausmittauksia sovelletaan moneen tarkoitukseen, esimerkiksi urakoitsijat varmistavat työnsä laadun käyttöönottovaiheessa ja toisaalta jakeluverkonhaltijat hyödyntävät mittauksia kunnonvalvonnassaan. Jakeluverkon ja teollisuuslaitosten kunnossapito on laaja kokonaisuus, joka koostuu pääasiallisesti ennakoivasta-, korjaavasta- ja parantavasta kunnossapidosta (Lakervi & Partanen 2008, 114; ABB:n TTT-käsikirja 2000. luku 23, 2). Tässä työssä on relevanttia käsitellä osittaispurkausmittauksia vain ennakoivan kunnossapidon (kuvio 3) näkökulmasta. Tarkemmin määriteltynä tämän työn kunnossapito toimenpiteet kohdistuvat pääsääntöisesti mittaavaan kunnossapitoon. Kunnonvalvontamittaukset kohdistuvat tarkastustoimintaan.



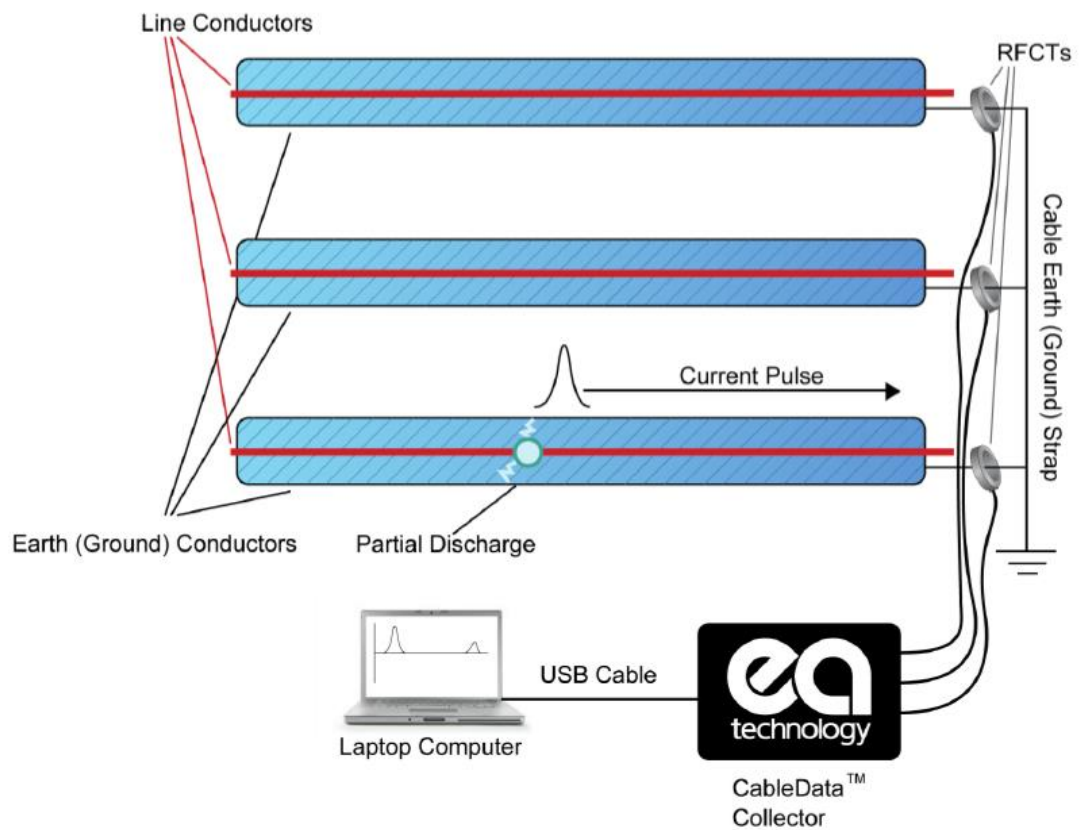
KUVIO 3. Kunnossapidon osa-alueet (ABB:n TTT-käsikirja 2000, luku 23, 2; Lakervi & Partanen 2008, 114)

Tehdessä PD-mittalaitteiden markkinakartoitusta on tärkeää ymmärtää mitä mittausmenetelmiä on olemassa, miten niitä sovelletaan ja mitä etuja milläkin mittausmenetelmällä saavutetaan. Tässä alaluvussa kerrotaan yleiset osittaispurkausmittausmenetelmät, jotka voidaan jakaa karkeasti käytönaikaisiin osittaispurkausmittauksiin (On-line) ja käyttökeskeytyksen vaativiin mittauksiin (Off-line). Lisäksi tuodaan esille eri mittausmenetelmien etuja, mutta toisaalta pohditaan niihin liittyviä haasteita. Lopuksi vertaillaan aikaisempia ja uudempia osittaispurkausmittausten tutkimustuloksia ja arvioidaan niiden pohjalta eri menetelmien soveltuvuutta toimeksiantajan käyttötarkoitukseen.

Toimeksiantajan keskeinen intressi mittalaitteistojen suhteen liittyy kustannustehokkuuteen. Tarkoituksena on pohtia yleisellä tasolla, voidaanko käyttöönotettavilla mittalaitteistoilla saavuttaa taloudellista hyötyä verrattuna purkausten aiheuttamiin keskeytyskustannuksiin? Lisäksi mittalaitteistolta edellytetään vikapaikan tarkkaa paikannusta. Toimeksiantajan näkökulmasta tehokkain ratkaisu olisi sähköaseman 20kV lähtöön sijoitettava mittalaitteisto, jolla voitaisiin valvoa lähdöllä esiintyviä purkauksia.

2.3.1 Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset

Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset eli On-line mittaukset voidaan suorittaa käytännössä jännitteeseen kaapeliin, jolloin kaapelia ei tarvitse saattaa jännitteettömäksi mittauksen aikana. Mittalaitteet sijoitetaan tyypillisesti sähköaseman 20kV lähtöön, jolloin voidaan havaita purkauksia kojeistossa tai asennetaan kaapelin vaiheiden ympärille suurtaajuusvirtamuuntajat (RFCT tai HFCT) (kuva 5). Käytönaikaiset mittaukset jakautuvat vielä määrääjain tehtäviin mittauksiin ja jatkuva-aikaiseen mittaukseen (taulukko 2). Jatkuva-aikaisten mittausten etuna on osittaispurkausten aktiivisuuden seuranta pidemmällä aikajänteellä, jolloin valvomoon saadaan reaaliaikaista tietoa verkon tilasta. Verkko-yhtiöiden tarve jatkuva-aikaiselle osittaispurkauksien seurannalle kohdistuu kriittisille verkon osille. Nämä mittaukset spesifioituvat käytännössä vain kaapelijärjestelmän ja keski-jännitekojeistojen kunnonvalvontaan.



KUVA 5. Tyypillinen On-line mittaus jokaisesta vaiheesta RFCT virtamuuntajilla (EA Technology tuote-esite, 14)

Määräajoin tehtävät mittaukset voidaan kohdistaa useisiin verkon osiin, esimerkiksi kaapelipäätteisiin, jatkoksiin ja jakeluverkon komponentteihin. Käytännössä osittaispurkauksia esiintyy kaapeleissa satunnaisesti, jolloin määräajoin tehtävät mittaukset eivät välttämättä anna realistisia tuloksia osittaispurkauksista. Jakeluverkonhaltian näkökulmasta määräajoin tehtävien mittausten tarve kohdistuu ikääntyneisiin verkon osiin sekä johto-osuuksille, joissa maasulkusuoja on reagoinut osittaispurkaukseen aiheuttamatta varsinaista maasulkua.

TAULUKKO 2. On-line mittausmenetelmien edut ja haitat (Keränen, J., Muranen, S., Pakonen, P & Verho, P. 2018, 120; Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K & Palva, V. 2015, 202-203)

Mittausmenetelmä	Edut	Haittapuolet
Jatkuva-aikainen mittaus	<ul style="list-style-type: none"> ✓ mahdollistaa osittaispurkausten tehokkaan seurannan pidemmällä aikajänteellä ✓ mahdollista purkauksen paikannuksen ✓ automatisoitu mittausmenetelmä 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ hankintakustannukset suuremmat verrattuna yksittäisiin laitteisiin ✗ tulosten analysointi vaatii asiantuntemusta ✗ RFCT/HFCT virtamuuntajien asennus voi aiheuttaa keskeytyksen
Määräajoin tehtävä mittaus	<ul style="list-style-type: none"> ✓ helppo ja nopea ✓ kustannustehokas ✓ tehokas mittausmenetelmä orastavien vikojen kartoituksessa ✓ soveltuu käyttöönotto-mittauksiin 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ osittaispurkauksia esiintyy satunnaisesti, tämän takia tulokset eivät välttämättä anna hyvää kokonaiskuvaa purkauksista ✗ ei sovellu hyvin purkausten paikannukseen
Akustinen mittaus	<ul style="list-style-type: none"> ✓ soveltuu useiden verkon osien mittaukseen ✓ soveltuu GIS järjestelmien osittaispurkauksien havainnointiin ✓ pienet laitekustannukset 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ kaasueristeisissä (GIS) laitteistoissa mittaukset ovat työläitä ✗ muuntajissa akustinen signaali vaimenee, jonka vuoksi osittaispurkauksen paikannus on haastavaa

On-line mittausmenetelmien yleisinä etuina (taulukko 3) verrattuna Off-line mittausmenetelmiin ovat keskeytymätön sähkönjakelu, kaapeliin ei kohdistu ylimääräistä rasitusta (testijännitettä) ja mahdollistaa reaaliaikaisen osittaispurkausten seurannan. Toisaalta mittausignaali vaimenee kaapelissa, jolloin On-line mittausmenetelmä ei sovellu pitkien etäisyyksien mittaamiseen ja toisena haasteena on vian tarkka paikantaminen. Lisäksi On-line mittausmenetelmä on altis ympäristön aiheuttamille häiriöille lukuun ottamatta akustista mittausmenetelmää.

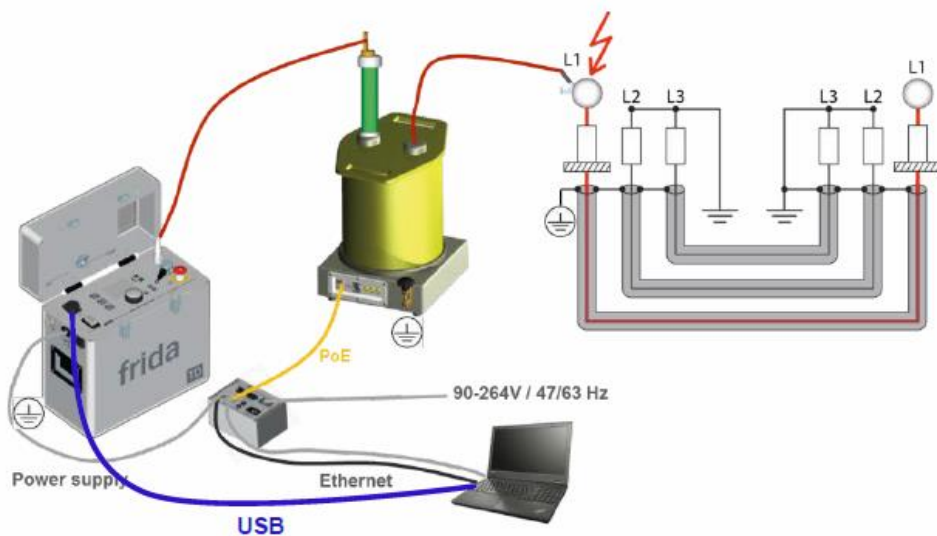
TAULUKKO 3. On-line mittauksen yleiset edut ja haitat

Edut	Haittapuolet
✓ mahdollistaa keskeytyksettömän sähkönjakelun	✘ signaalin vaimeneminen
✓ mahdollistaa tehokkaan purkausten seurannan	✘ jatkuva-aikaisen mittalaitteiston kustannukset
✓ kustannustehokas	✘ ei sovellu kaapelieristeiden kunnonarviointiin

2.3.2 Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset

Käyttökeskeytyksen vaativat osittaispurkausmittaukset eli Off-line mittaukset soveltuvat osittaispurkauksen paikannukseen, kunnonvalvontaan ja maakaapeleiden käyttöönotto-testaukseen. Käytännössä Off-line mittauksessa mitattava kaapeli kytketään irti verkosta. Lisäksi Off-line mittausmenetelmästä riippuen mittauspiiri (kuva 6) vaatii ulkoisen jännitelähteen, kytkentäkondensaattorin ja kuristimen. Näiden menetelmien etuina verrattuna On-line mittauksiin ovat osittaispurkaus kohdan tarkka paikannus ja pidempien johto-osuuksien mittaaminen luotettavasti. Lisäksi Off-line mittauksen etuna on parempi häiriösuojateknikka verrattuna On-line mittaukseen. Toisaalta mittauspiirin ulkoisen jännitelähteen ja kytkentäkondensaattorin fyysinen koko voivat rajoittaa mittauksia ahtaissa muuntamotiloissa.

Kuvassa 6 esitetty mittauspiiri on toteutettu VFL (Very low frequency) mittaustekniikalla, joka soveltuu osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaukseen. Lisäksi on olemassa toinenkin menetelmä, jota kutsutaan DAC (Damped Alternating Current) mittaustekniikaksi. Tämä mittaustekniikka soveltuu pääsääntöisesti osittaispurkausmittaukseen, mutta sillä voidaan tehdä myös häviökerroinmittaus. VFL mittaustekniikalla koejännite synnytetään pienitaajuisella (yleensä 0,1Hz) jännitelähteellä ja syötetään mittauspiiriin. Kytentärasiaan tuodaan käyttöjännite muuntamon pistorasiasta virtalähteelle ja tietokoneelle, jolla raportoidaan mittaustulokset (harmaa johto). USB-kaapelilla (sininen johto) voidaan toteuttaa mittauksen kauko-ohjaus. Koejännite syötetään kytkentäkondensaattoriin, joka on sarjassa mitattavan kaapelin kanssa (punainen johto). Mitattavassa kaapelissa esiintyvät osittaispurkaukset havaitaan kytkentäkondensaattorissa, josta niiden mittaustulokset siirretään (keltainen johto) kytkentärasian kautta tietokoneelle (musta johto). Osittaispurkaukset mitataan vaiheesta L1, johon kytkentäkondensaattori on kytketty. Lisäksi mitattavan kaapelin vaiheet L2 sekä L3 kytketään maahan.



KUVA 6. Off-line mittauspiiri osittaispurkausmittauksesta (Toivari, T. Eurolaite Oy, 6)

Off-line mittaukset jakautuvat useisiin mittausmenetelmiin (taulukko 4), joilla on omat etunsa ja haittansa käyttötarkoituksesta riippuen. Viime vuosien aikana on tullut uutta tutkimustietoa liittyen osittaispurkausmittauksiin, jotka ovat synnyttäneet laitetoimittajille tarpeen kehittää mittalaitteistojaan ja niiden mittaustekniikkaa. Näiden muutosten tarkoituksena on ollut parantaa häiriösuojausta, pienentää mittalaitteiden fyysistä kokoa ja parantaa mittausten tarkkuutta. Mittausmenetelmistä häviökerroin- ja osittaispurkausmittausmenetelmien välillä ei ole selvää korrelaatiota, jolloin näiden menetelmien eroa on syytä korostaa (Pakonen, P 2018, 12).

TAULUKKO 4. Off-line mittausten menetelmien edut ja haitat (Diagnostic Testing of Underground Cable Systems. 2010, 71 & 98; Keränen, J & kaikki. 2018, 34 & 120)

Mittausmenetelmä	Edut	Haittapuolet
$\tan \delta$ (häviökerroin)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ hyvä mittausherkyys ✓ havaitsee vesipuut eli vesijuosteet kaapelin eristeen ja johtimien eristeen välissä (muovikaapelit) ✓ kosteuden (öljypaperieristetyt kaapelit) ✓ soveltuu pitkien johtosuuksien mittaukseen 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ ei sovellu käyttöönottomittauksiin ✗ käytettäessä kosinikantiaaltoja pitää häviökerroin olla approksimoitu
PD (osittaispurkaus)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ soveltuu käyttöönottomittauksiin ✓ purkauksen paikannus 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ kustannukset ✗ mittaus vaatii kytkentäkondensaattorin
DAC (Damped Alternating Current)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ testilaitteiston pieni koko ✓ nopea mittausten menetelmä verrattuna VFL-mittaukseen ✓ soveltuu häviökerroin- ja osittaispurkausmittaukseen 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ tulosten analysointi vaatii asiantuntemusta ✗ testijännitteen taajuus poikkeaa käyttöjännitteen taajuudesta

Off-line mittausten yleisinä etuina On-line mittauksiin verrattuna (taulukko 5) voidaan pitää niiden soveltuvuutta vikojen paikannukseen, käyttöönottestaukseen ja häiriösuojatekniikkaan. Toisaalta Off-line mittaustekniikoita on useita käyttötarkoituksesta riippuen, joka johtaa todennäköisesti eri mittalaitteisiin investoimiseen ja sitä kautta hankintakustannuksiin. Toinen Off-line mittausten haittapuoli liittyy kustannustehokkuuteen, sillä Off-line mittaukset voidaan tehdä luotettavasti vain johto-osuus kerrallaan. Keski-jänniteverkon lähdöt sisältävät käytännössä useita johto-osuuksia, jolloin mittauksia joudutaan tekemään useita vian löytämiseksi. Tästä syystä Off-line mittaukset ovat hitaita suorittaa ja eivät ole tässä suhteessa kustannustehokkaita verrattuna On-line mittalaitteisiin.

TAULUKKO 5. Off-line mittausten yleiset edut ja haitat

Edut	Haittapuolet
✓ kaapelin kuntoluokituksen määrittäminen	✗ aiheuttaa jakelun keskeytyksen
✓ purkauksen paikannus	✗ ei ole kustannustehokas
✓ yleisesti luotettavimmat mittaustulokset verrattuna On-line mittauksiin	✗ voidaan mitata johto-osuus kerrallaan
	✗ mittalaitteiden fyysinen koko

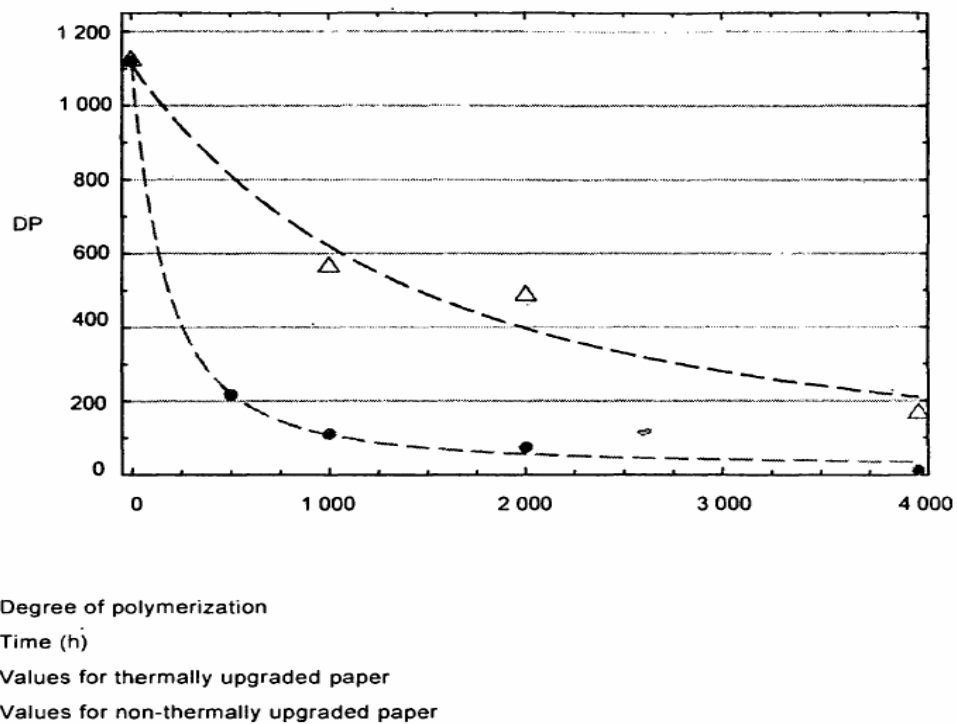
2.4 Jakelumuuntajan ikääntyminen

Jakelumuuntajan ikääntyminen liittyy oleellisesti ennakoivaan kunnossapitoon. Tämän alaluvun tarkoituksena on pohjustaa suurpiirteisesti jakelumuuntajan ikääntymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä, joita esitellään luonnontieteellisestä näkökulmasta. Toisaalta pohditaan myös käytännön ratkaisuja ikääntymisen seurannalle ja arvioinnille. Nykytilanteessa jakelumuuntamon automaatiojärjestelmä kerätään reaaliaikaista mittausdataa SCADA:n historiatietokantaan. Tästä huolimatta voidaan arvioida, kuinka mittausdatan käsittelyä voidaan kehittää jatkossa ikääntymisen seuranta ajatellen.

2.4.1 Muuntajan ikääntymiseen vaikuttavat tekijät

Muuntajan normaali käyttöikä määräytyy sen perusteella, kuinka kauan muuntaja kestää jatkuvalla nimelliskuormalla kuormitettuna ympäristön lämpötilan ollessa +20 °C. Todellisuudessa muuntajan kuormitus vaihtelee, jonka vuoksi sitä voidaan käyttää ajoittaisesti ylikuormalla. Tästä johtuen kuormitukselle ja käämin kuumimman pisteen lämpötilalle on asetettava reunaehdot. Käytännössä muuntajaa voidaan kuormittaa 50% ylikuormalla, ettei käämin kuumimman pisteen lämpötila ylitä +140 °C ja eristeiden keskimääräinen vanheneminen pysy normaalina. (Anjala, R & taustaryhmä 2008, 10-11).

Muuntajan jäljellä olevaa käyttöikää voidaan arvioida selvittämällä käämityksen eristepaperin ikääntyminen (Lehtinen, M & Nikkari, J. 2009, 8). Tätä ikääntymistä kuvataan DP-luvulla (Degree of polymerization) eli polymerisoitumisasteella, joka mittaa eristepaperin kemiallista koostumusta. Tutkimusten mukaan käämityksen lämpötilan nousu ja muuntajaöljy yhdessä aiheuttavat eristepaperin kemiallisen rakenteen hajoamisen eli hydrolyysin. Parannetuilla eristepaperimateriaaleilla voidaan vaikuttaa vetolujuuteen ja puhkaisuvoimaan (kuvio 4), jolla on suora vaikutus DP-lukuun ja sitä kautta muuntajan käyttöikään (IS 2026-7:2009, 8 & 13). Kokemuspohjaisesti jakeluverkon muuntajien tyypillinen perushuoltoikä vaihtelee 25-30 vuoden välillä. Keskimäärin 50% kuormituksella muuntajat kannattaa huoltaa noin 30-35 vuoden käytön jälkeen (Lehtinen, M & Nikkari, J. 2009, 9).

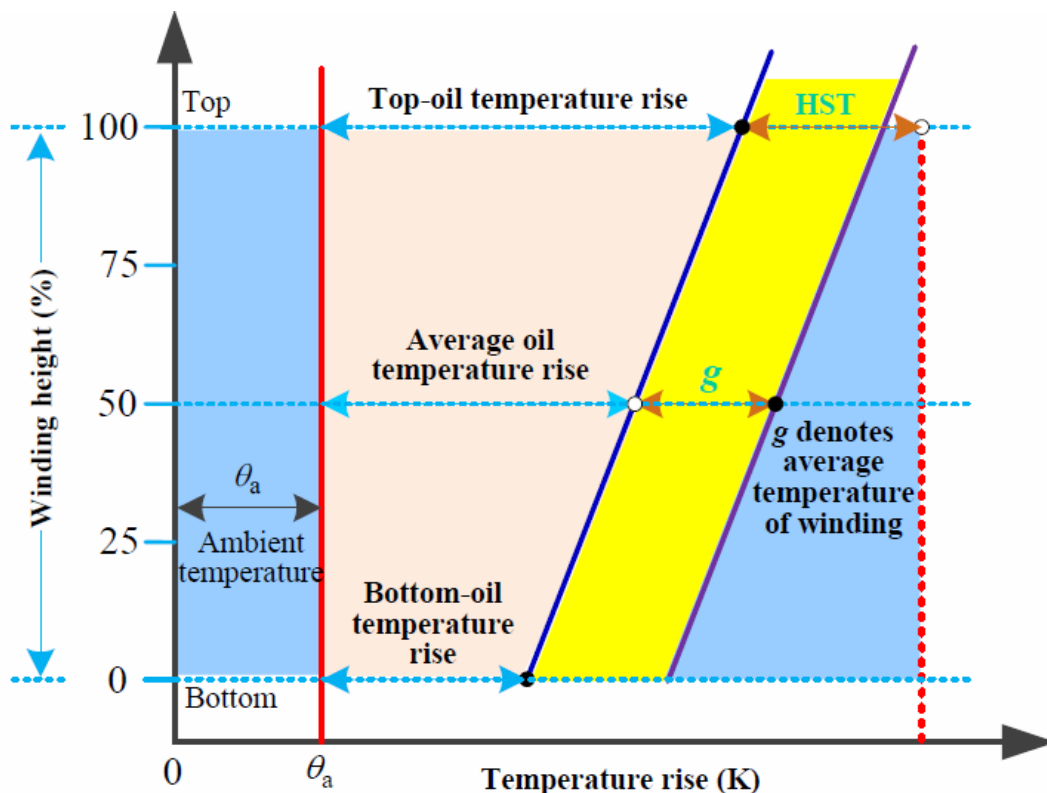


KUVIO 4. Mineraaliöljyn vaikutus eristemateriaalien DP-lukuun 150 celsiusasteen lämpötilassa (IS 2026-7:2009, 14)

Jakelumuuntajan keskeiset seurattavat suureet ikääntymisen kannalta ovat käämin kuumimman pisteen lämpötila (Hot Spot θ_h), ympäristön lämpötila (ambient temperature θ_a), muuntajaöljyn pintalämpötila (Top oil temperature, θ_o) sekä kuormitustiedot (load factor K). Eristepaperin lisäksi ikääntymiseen vaikuttaa oleellisesti muuntajan öljyn ominaisuudet, harmoniset yliaallot sekä muita tekijöitä. (Aro, M & kaikki 2015, 117-125; Lehtinen, M & Nikkari, J. 2009, 7-9; Digalovskic, M., Najdenkoskib, K & Pejovskia, D. 2017, 86).

Hot Spot lämpötilaa ei voida mitata suoraan käämityksestä perinteisillä vastusantureilla, sillä ne eivät kestä käämityksen lämpötilaa. Käämityksen lämpötilaa eli Hot Spot voidaan kuitenkin seurata välillisesti ”Thermal Image” menetelmän avulla (Comem käyttöohje 2015, 8). Toinen hieman edistyneempi menetelmä Hot Spot lämpötilan määrittämiseen perustuu optiseen mittaustekniikkaan, jossa kuidut mittaavat lämpötilaa suoraan käämityksestä. Tutkimusten mukaan muuntajan eristepaperin vanhenemisen ja Hot Spot lämpötilan välillä on havaittu vahva korrelaatio. Näiden tutkimusten pohjalta on kehitetty parametrit Hot Spot lämpötilan laskentaa varten. (Gorgan, B.; Notinger, P.V.; Wetzer, J.; Verhaart, H.F.A.; Wouters, P.A.A.F.; van Schijndel & A.; Tanasescu, G. 2012, 2)

Muuntajan lämpötilaa voidaan kuvata (kuvio 5) yksinkertaisesti käämityksen fyysisen korkeuden perusteella ja tarkastelupisteen etäisyydellä käämityksestä. Muuntajan lämpötila nousee lineaarisesti mitä ylemmäksi ja lähemmäksi käämitystä mennään (IS 2026 2009, 20). Muuntajan käämityksen kuumin piste sijaitsee käämin yläosassa ja tarkemmin sen sisäreunan puolella (valkoinen piste kuvion 8 oikeassa yläkulmassa). Muuntajan öljyn pinnan lämpötilaa mitataan käämityksen ulkoreunan vierestä eli muuntajan öljyn pinnan kuuminta kohtaa (musta piste kuvion 8 oikeassa yläreunassa).



KUVIO 5. Öljyeristeen jakelumuntajan lämpötilaominaisuuksien kuvaaja (Cheng, L., Wang, G., Yang, B., Yu, T & Zhou, L. 2018, 5)

2.4.2 Ikääntymisen luonnontieteellinen perustelu

Määrittäessä teoreettisesti jakelumuuntajan ikääntymistä (Loss of life, L) tarvitaan laskentaa varten muuntajan olosuhdetiedot eli input data, jotka ovat käytännössä ympäristön lämpötila ja muuntajan kuormitustiedot. Kuormakerroin saadaan muuntamon pienjännitepuolen kuormavirran ja muuntajan nimellisvirran osamäärästä, joka voidaan laskea yhtälön (1) mukaisesti.

$$K = \frac{I_L}{I_N}, \quad (1)$$

jossa I_L on kuormavirta ja I_N on muuntajan nimellisvirta $\left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U}\right)$

Lisäksi muuntajan ikääntymisen laskentaa varten tarvitaan parametrit (taulukko 6), jotka ovat määritelty muuntajan käyttötarkoituksen ja jäähdytystavan perusteella. Nämä parametrit ovat määritelty öljyeristeisen tehomuuntajan kuormitus standardissa (IS 2026-7:2009, 52), jotka ovat suositeltuja arvoja. Tätä standardia sovelletaan pääsääntöisesti tehomuuntajiin, jotka eivät koske tätä työtä. Tästä huolimatta standardissa on määritelty parametrit myös jakelumuuntajille, jotka ovat relevantteja tämän työn kannalta. Kartoitusta koskevien jakelumuuntajien jäähdytystapa on ONAN (Oil Natural Air Natural) eli jäähdytys tapahtuu luonnollisella öljyn- ja ilmakierrolla. (ABB:n TTT-käsikirja 2000, luku 11, 5)

TAULUKKO 6. Suositellut lämpötilaominaisuudet eksponenttiyhtälöille (IS 2026-7, 52)

		Distribution transformers	Power transformers			
		ONAN	ONAN	ONAF	OF	OD
Oil exponent	x	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0
Winding exponent	y	1,6	1,3	1,3	1,3	2,0
Loss ratio	R	5	6	6	6	6
Hot-spot factor	H	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3
Oil time constant	τ_o	180	210	150	90	90
Winding time constant	τ_w	4	10	7	7	7
Ambient temperature	θ_a	20	20	20	20	20
Hot-spot temperature	θ_h	98	98	98	98	98
Hot-spot to top-oil (in tank) gradient at rated current	$\Delta\theta_{hr}$	23	26	26	22	29
Average oil temperature rise ^{a)}	$\Delta\theta_{omr}$	44	43	43	46	46
Top-oil (in tank) temperature rise	$\Delta\theta_{or}$	55	52	52	56	49
Bottom oil temperature rise ^{a)}	$\Delta\theta_{br}$	33	34	34	36	43
k_{11}		1,0	0,5	0,5	1,0	1,0
k_{21}		1,0	2,0	2,0	1,3	1,0
k_{22}		2,0	2,0	2,0	1,0	1,0

^{a)} Average oil temperature rise and bottom oil temperature rise are given for information only.

Ulostulojen laskenta alkaa lähtötilanteen määrittämisellä, jossa lasketaan lähtöarvot öljyn pintalämpötilalle yhtälön (2) mukaisesti sekä kahdelle käämin kuumimmalle pisteelle yhtälöiden (3 ja 4) mukaisesti. Tutkittava järjestelmä ei ole välttämättä aina vakaa lähtötilanteessa, jolloin sen laskenta perustuu karkeaan arvioon. Tämä vaikuttaa hieman laskennan tuloksiin.

$$\theta_{o(0)} = \left[\frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \Delta\theta_{or} + \theta_a, \quad (2)$$

$$\Delta\theta_{h1(0)} = k_{21} K^y \Delta\theta_{hr}, \quad (3)$$

$$\Delta\theta_{h2(0)} = (k_{21} - 1) K^y \Delta\theta_{hr}, \quad (4)$$

jossa K on kuormituskerroin, R on häviökerroin, $\Delta\theta_{or}$ on öljyn pintalämpötilan lämpenemä, x on öljy eksponentti ja θ_a on ympäristön lämpötila, $\Delta\theta_{hr}$ on Hot Spot lämpötilan ja öljyn pintalämpötilan välinen lämpötila nimellisvirralla, k_{21} on lämpötilamallin vakio ja y on käämityksen eksponentti.

Seuraavassa laskentavaiheessa esitetään differentiaaliyhtälöt, joilla määritetään alkutilanteen muutos ajan suhteen. Nämä differentiaaliyhtälöt voidaan määrittää yhtälöiden (5, 6 ja 7) mukaisesti. Öljyn pintalämpötila integroidaan lähtötilanteesta tarkasteltavalta ajanjaksolta yhtälön (8) mukaisesti, tätä suuretta tarvitaan myöhemmin Hot Spot lämpötilan määrittämistä varten. Alaindeksissä suluissa olevalla luvulla yksi viitataan ensimmäiseen mittauspisteeseen.

$$D\theta_{o(1)} = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o} \left[\frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \Delta\theta_{or} - (\theta_o - \theta_a), \quad (5)$$

$$D\Delta\theta_{h1(1)} = \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} [k_{21}\Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h1(0)}], \quad (6)$$

$$D\Delta\theta_{h2(1)} = \frac{Dt}{\left(\frac{1}{k_{22}}\right)\tau_o} [(k_{21} - 1)\Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h2(0)}], \quad (7)$$

$$\theta_o = \int_{t_1}^{t_2} (\theta_{o(0)} + D\theta_{o(1)}) dt, \quad (8)$$

jossa k_{11} sekä k_{22} ovat lämpötilamallin vakiota, τ_o öljyn aikavakio, Dt aika-askel t_1 on tarkastelujakson alkuhetki, t_2 on tarkastelujakson lopetushetki ja τ_w on käämityksen aikavakio.

Seuraavassa vaiheessa määritetään Hot Spot lämpötilan nousu yhtälön (9) mukaisesti. Lopullinen Hot Spot lämpötila määräytyy integroimalla öljyn pintalämpötilan sekä Hot Spot lämpötilan nousun summa yhtälön (10) mukaisesti.

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2}, \quad (9)$$

$$\theta_h = \int_{t_1}^{t_2} (\theta_o + \Delta\theta_h) dt, \quad (10)$$

Viimeisessä laskentavaiheessa määritetään muuntajan ikääntyminen. Määritettäessä muuntajan eristepaperin suhteellista ikääntymistä tarvitaan Hot Spot lämpötila sekä tieto muuntajan eristepaperin ominaisuuksista. Termisesti tavanomaisen muuntajan eristepaperin suhteellinen ikääntymisnopeus voidaan laskea yhtälön (11) mukaisesti. Vastaavasti rakenteellisilta ominaisuuksiltaan termisesti kestävämmän eristepaperin suhteellinen ikääntymisnopeus voidaan laskea yhtälön (12) mukaisesti (IS 2026 2009, 15). Lopuksi saadaan määritettyä muuntajan ikääntyminen tarkasteltavalta ajanjaksolta integroimalla paperieristeen ja aika-askelen tulo yhtälön (13) mukaisesti.

$$V_1 = 2^{\frac{(\theta_h - 98)}{6}} \quad (11)$$

$$V_2 = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_h+273}\right)}, \quad (12)$$

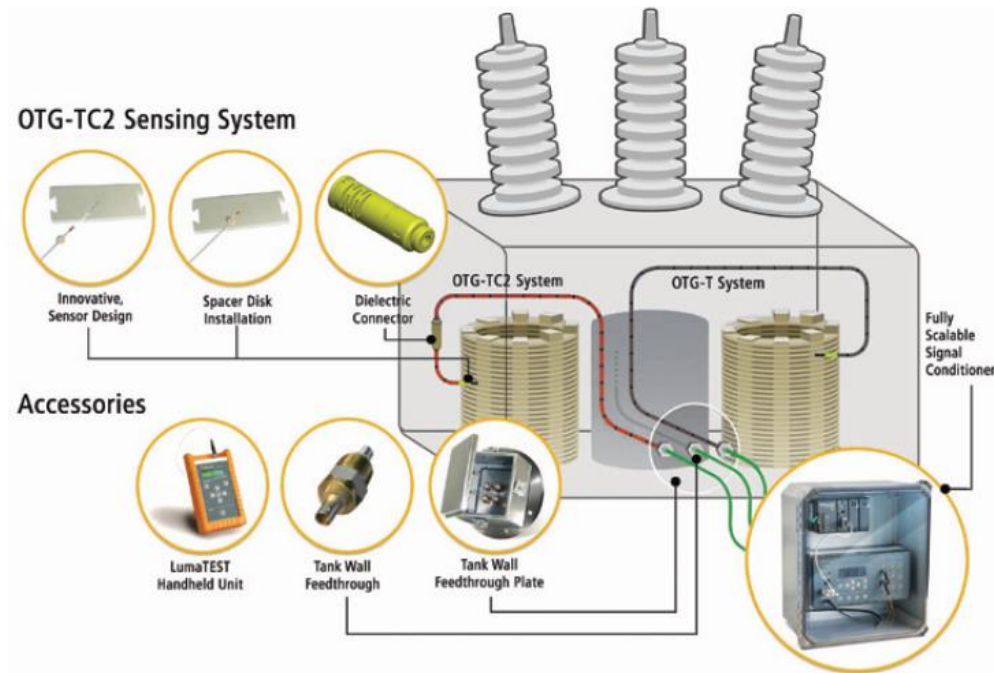
$$L = \int_{t_1}^{t_2} (V_2 Dt) dt, \quad (13)$$

2.4.3 Ratkaisuja ikääntymisen seurannalle

Haasteena jakelumuuntajien ikääntymisen seurannalle menneinä vuosina on ollut seurantalaitteistojen kustannukset suhteessa jakelumuuntajien aiheuttamien keskeytysten kustannuksiin (Nousiainen 2001, 13). Tähän on tullut muutoksia, sillä laitetoimittajat tarjoavat tehokkaita automaattioratkaisuja jakelumuuntamoihin entistä kilpailukykyisempään hintaan. Toisaalta Suomen olosuhteet jakelumuuntajan kuormittamisen kannalta ovat suhteellisesti paremmat verrattuna Etelä-Euroopan maihin. Tämä johtuu kylmästä talvesta, jolloin jäähdytysominaisuudet paranevat

Jakelumuuntajat ovat keskeisiä keskijänniteverkon osia, joiden kunnonvalvontaan ja ikääntymiseen verkkoyhtiöt haluavat kiinnittää huomiota. Tällä pyritään ennakoimaan tulevia muuntajien investointeja. Lisäksi markkinoille on tullut kustannustehokkaita ratkaisuja (kuva 7) jakelumuuntajien ikääntymisen seurantaan. Joillain laitetoimittajilla on erilaisia muuntamoautomaatiojärjestelmään lisättäviä ohjausyksiköitä, joihin on ohjelmoitu laskenta-algoritmit ikääntymisen seurantaan. Lisäksi ohjausyksiköt voivat sisältää muitakin ominaisuuksia liittyen etäohjaukseen, mittaukseen ja laitteiden suojaukseen.

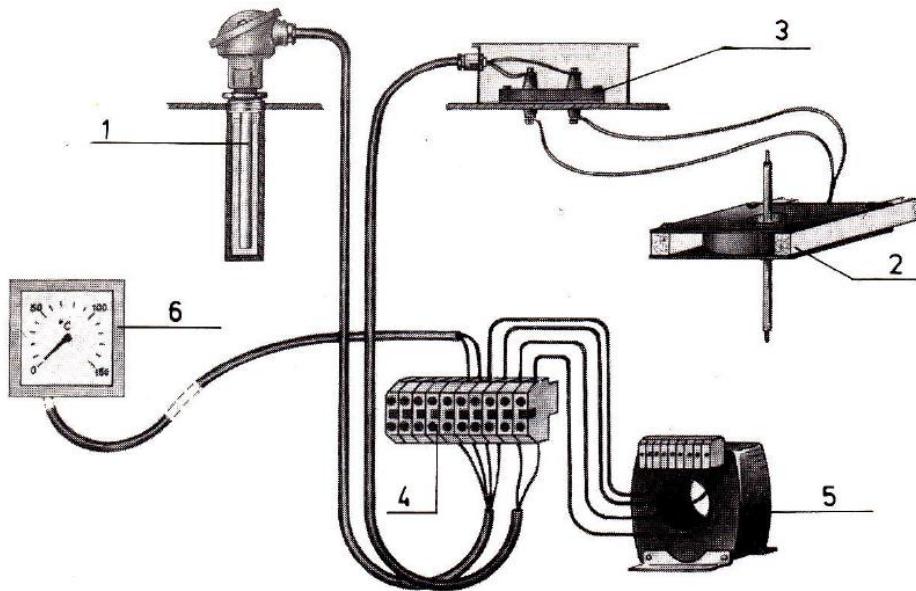
Kuvassa 4 on esitetty optinen mittauslaitteisto, joka soveltuu jakelumuuntajien Hot Spot lämpötilan mittaukseen. Muuntajan käämitykseen voidaan asentaa Nomexin toimittamat spacer disk[®] sensorit, jotka mittaavat suoraan käämityksen lämpötilaa (OTG-T-järjestelmä). Muuntajan valmistajan asentamat dielectric connector sensorit ovat toinen vaihtoehto Hot Spot lämpötilan mittaukselle varten (OTG-TC2-järjestelmä). Nämä sensorit asennetaan öljyn alle lähelle käämitystä. Molemmat sensorit ovat kuitumittaustekniikalla toteutettuja ratkaisuja. Muuntajan kylkeen asennetaan kytkentälevy, johon asennetaan läpivientiholkit kuituja varten. Läpivientiholkeista vietään johdotukset monitorointilaitteelle eli ohjausyksikölle, joka käsittelee mittausdatan ja lähettää sen valvomoon.



KUVA 7. Jakelumuuntajalle suunniteltu optinen mittauslaitteisto Hot Spot lämpötilan mittausta ja laskentaa varten (LumaSense Technologies. 2014, 3)

Jotkut jakelumuuntajien laitetoimittajat tarjoavat lisävarusteena optisen mittausjärjestelmän valmiiksi asennettuna, mutta ohjauslaitteet tulevat erikseen. Optinen mittausjärjestelmä mahdollistaa Hot Spot lämpötilan mittaamisen suoraan muuntajasta. Jakeluverkon haltijat harkitsevat onko jakelumuuntajien ikääntymisen arvioinnille ja laiteinvestoinneille tarvetta tulevaisuudessa, johtuen muuttuvasta toimintaympäristöstä. Ennakoitaessa jakelumuuntajien laiteinvestointeja, on tarpeellista selvittää ensin muuntajien ikääntyminen. Tämä on yksi syy sille, miksi muuntajien käyttöikää halutaan tutkia.

Lisäksi on olemassa toinen mittausmenetelmä, jonka avulla käämin lämpötilaa (kuva 8) voidaan mitata välillisesti. Tätä menetelmää kutsutaan ”Thermal image” mittausmenetelmäksi, jonka toimintaperiaate esitellään seuraavaksi. Thermal image mittausmenetelmä perustuu kuormitusvirran ja lämpötilan väliseen riippuvuuteen. Käytännössä mittaus toteutetaan mittaamalla käämityksen virtaa virtamuuntajalla (2), joka syötetään öljytaskuun asennettuun vastusanturiin. Asetteluvirtamuuntajalla (5) asetellaan vastusanturin ja öljyn lämpötilan välinen lämpötilaero vastaamaan käämityksen ja öljyn lämpötilaa, jolloin osoitinkojeesta (6) voidaan seurata käämityksen lämpötilaa. (Aura, L & Tonteri, A.J. 1986, 92)



KUVA 8. Käämin lämpötilan kuvaaminen "Thermal image" menetelmällä (Aura, L & Tonteri, A.J. 1986, 92)

3 ÖLJYN LÄMPÖTILAMITTARIN MARKKINAKARTOITUS

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä potentiaalinen öljynlämpötilamittari vaihtoehto kartoitusta koskeville jakelumuuntajille. Lisäksi esitellään vaihtoehtoinen näkökulma, jossa lämpömittaria ei tarvita. Tavoitteena oli löytää toimeksiantajan tarpeisiin sopiva ratkaisu näiden näkökulmien pohjalta. Tässä luvussa selostetaan markkinakartoituksen yleiset periaatteet ja lämpötilamittareiden markkinatilanne. Lopuksi esitellään kartoitukseen kohdistunut lämpötilamittari ja vaihtoehtoinen näkökulma. Esittelyssä kiinnitetään erityistä huomiota mittalaitteiden ominaisuuksiin ja toimintoihin. Lisäksi arvioidaan niiden hyötyjä suhteessa nykyiseen mittalaitteistoon.

3.1 Kartoituksen periaatteet ja markkinatilanteen selvittäminen

Markkinoilla ei ollut saatavilla useita käyttötarkoitukseen soveltuvia lämpötilamittareita. Yhtenä haasteena oli vaatimusten mukaisuuden toteutuminen. Yleinen ongelma liittyi mittalaitteiden olosuhdeominaisuuksiin, joiden alin käyttölämpötila oli liian suuri. Tämän takia valmistajat eivät voineet taata laitteen toimivuutta kylmissä olosuhteissa. Toinen haaste liittyi lämpötilamittarin siirrettävyyteen muuntamotilassa. Useissa lämpömittari ratkaisuissa mittalaitte oli integroitu fyysisesti PT-100 anturiin, jolloin mittalaitetta ei ollut mahdollista siirtää muuntajankannelta. Yhdeltä valmistajalta löytyi kuitenkin öljyn lämpötilamittari, joka on siirrettävissä muuntajakannelta. Tämä mittalaitte oli suunniteltu pääsääntöisesti päämuuntajille, mutta sitä voidaan käyttää myös jakelumuuntajien öljyn lämpötilan mittaamiseen.

Tässä työssä markkinakartoituksen tarkoituksena ei ollut käynnistää hankintamenettelyprosessia eli tarjouskilpailua laitetoimittajien kanssa. Kartoituksen pääasiallinen tarve kohdistui vain markkinoilla olevien vaihtoehtojen selvitykseen ja lämpötilamittareiden budjettihintojen tiedusteluun. Budjettihintojen avulla voidaan arvioida kustannustehokkuutta, mutta laitetoimittajat eivät antaneet lupaa julkaista budjettihintojaan ilman tarjouskilpailua kovasta kilpailusta johtuen. Opinnäytetyö on julkinen asiakirja, tämän takia syvälinen kustannustehokkuuden arviointi ja hankintakustannusten esittely rajattiin pois tästä työstä.

3.2 Näkökulmat jakelumuuntajan lämpötilan mittaukselle

Tässä alaluvussa esitellään kartoitukseen valittu öljyn lämpötilamittariratkaisu ja sen käyttöönnoton edellyttämät toimenpiteet. Tähän kartoitukseen otettiin myös vaihtoehtoinen näkökulma, jossa mittalaitteelle ei ollut tarvetta. Tarkoituksena on esitellä myös tämän ratkaisun edellyttämät toimenpiteet. Lisäksi esitellään kartoitukseen valitun mittalaitteen teknisiä ominaisuuksia ja toimintoja.

3.2.1 Muuntajan lämpötilan mittaus lämpötilamittarilla

Öljyn lämpötilamittarin valinta kohdistui ABB Comem Operating Unit toimittamaan ja valmistamaan eWTI/eOTI mittalaitteeseen (kuva 9). Tärkein peruste valinnalle oli mahdollisuus siirtää mittalaitetta muuntamotilassa. Toinen merkittävä valintaan vaikuttava seikka liittyi mittalaitteen ”Thermal image” ominaisuuteen. Tämän mittausmenetelmän avulla voidaan määrittää (välillisesti) käämin lämpötila (Comem käyttöohje, 8). Lisäksi mittalaitteessa on runsaasti muita ominaisuuksia, jotka on määritelty tilauslomakkeessa. Asiakas voi valita mittalaitteelle sopivat ominaisuudet tilausvaiheessa, jolloin turhat ominaisuudet voidaan jättää pois ja näin ollen alentaa hankintakustannuksia.



*KUVA 9. Comemin valmistama öljyn- ja käämityksen lämpötilamittari (ABB tuotelehti-
nen 2017, 1)*

Seuraavaksi tarkastellaan hieman tarkemmin mittalaitteen ominaisuuksia ja etuja (taulukko 7). Kartoitukseen valitun mittalaitteen keskeiset edut nykyiseen öljyn lämpötilamittariin nähden liittyvät mittalaitteen siirrettävyyteen sekä mahdollisuuteen mitata käämityksen lämpötilaa välillisesti. Tässä työssä pohditaan myöhemmin muuntajan ikääntymistä, jonka vuoksi olisi tärkeää saada mittausdataa myös käämityksen lämpötilasta öljyn pintalämpötilan lisäksi. Lisäksi mittalaitteeseen on saatavilla neljä mikrokytkintä, joilla voidaan ohjata muuntamon jäähdytyslaitteita ja hallita muuntajan suojauspiirejä.

Öljyn lämpötilamittareiden markkinat kohdistuivat pääsääntöisesti Aasiaan. Aasialaisten laitetoimittajien öljyn lämpötilamittarit eivät soveltuneet käytettäväksi Pohjois-Euroopan arktisissa olosuhteissa. Tähän liittyi mittalaitteiden alin käyttölämpötila, joka oli noin -10°C asteen luokkaa. Tällöin laitteet eivät toimisi Suomen olosuhteissa talviaikaan. Euroopasta löytyi yksi mittalaittevalmistaja, jonka mittalaitte oli siirrettävissä ja soveltui käyttölämpötilaltaan (-40°C ja $+80^{\circ}\text{C}$) Suomen olosuhteisiin.

TAULUKKO 7. Comemin eOTI/eWTI lämpötilamittarin ominaisuudet ja edut (ABB Comem Operating Unit katalogi 2015, 3; ABB:n tuotelehtinen 2017, 2)

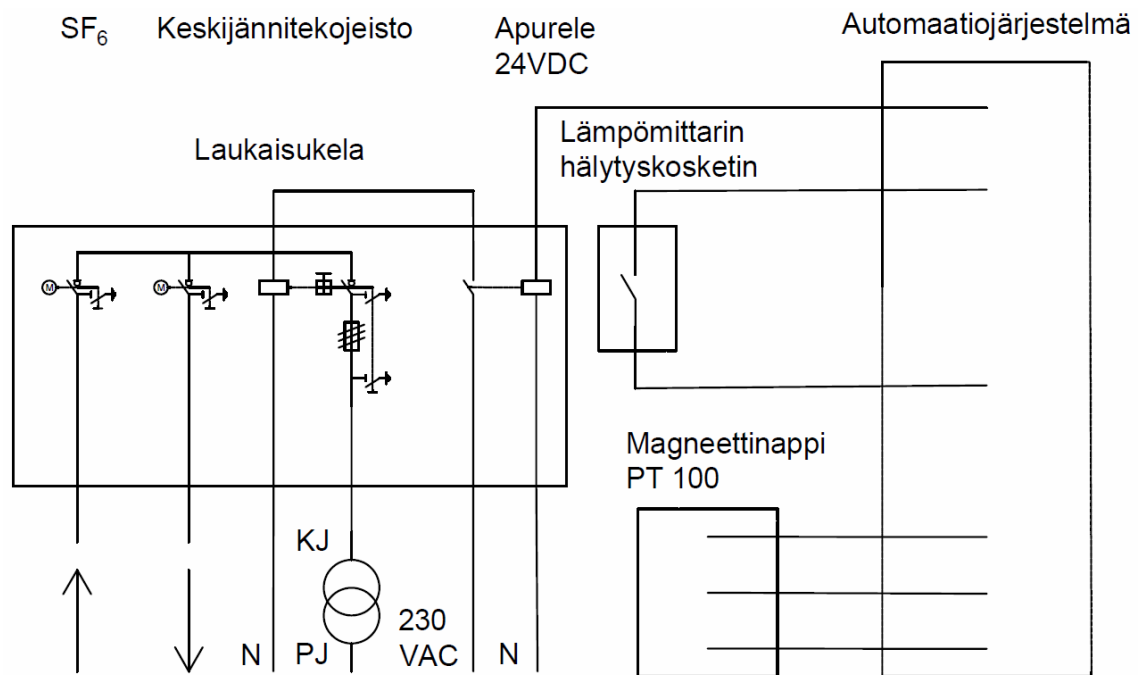
Ominaisuudet	Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Käämityksen ja öljyn lämpötilan mittaus samalla mittalaitteella • Käyttölämpötila -40°C ja $+80^{\circ}\text{C}$ asteen välillä • Kotelointiluokka IP65 • Käyttöjännite 24VDC • Käämityksen asettelualue -50°C ja $+200^{\circ}\text{C}$ asteen välillä • Öljyn lämpötilan asettelualue -50°C ja $+200^{\circ}\text{C}$ asteen välillä 	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka ja vakaa mittaus • Vankka muotoilu, ei tarvitse uudelleen kalibrointia ajan kuluessa • Mukautettava kiinnitysleikka • Helppo pääsy johdotusrasialle • Kompakti ratkaisu, jossa PT-100 upotettu erikseen muuntajataskuun • Jopa neljä mikrokytkintä, jotka soveltuvat jäähdytyslaitteiden ohjaukseen ja suojauspiirien hallintaan • Voidaan mitata käämityksen lämpötilaa

Tässä työssä muuntajan öljyn lämpötilan mittauspiiri koostui useista muuntamon laitteista, jotka olivat muuntamoautomaatiojärjestelmä, öljyn lämpötilamittari, SF₆ keskijännitekojeisto ja magneettinappi. Lisäksi nämä laitteet olivat eri laitetoimittajilta, jolloin piti selvittää kartoitukseen valitun mittalaitteen yhteensopivuus näiden laitteiden kanssa. Lopuksi selvitettiin, kuinka keskijännitekojeiston varokekuormaerottimen etälaukaisu voitiin toteuttaa uudella lämpötilamittarilla.

Uuden mittalaitteen käyttöönoton yhteydessä muuntajan lämpölaukaisupiiriin joudutaan tekemään muutoksia, jotta etälaukaisu voidaan toteuttaa. Keskijännitekojeiston valmistaja tarjoaa kahta ratkaisua varokekuormaerottimen ohjaukseen. Ensimmäinen vaihtoehto on moottoroitu ohjausmekanismi ja toinen vaihtoehto on laukaisukela. Moottoroidulla ohjausmekanismilla voidaan toteuttaa käytännössä etäohjaus eli ohjata varokekuormaerotinta auki ja kiinni etänä. Laukaisukelalla voidaan toteuttaa vain varokekuormaerottimen laukaisu eli auki ohjaus etänä. Toimeksiantajan intressi muuntajan erottamiselle kohdistuu vain etälaukaisuun, jolloin moottoroitua ohjausmekanismia ei tarvita tähän kartoitukseen.

Keskijännitekojeistossa sijaitsevan laukaisukelan käyttöjännite on nykytilanteessa 230VAC eli vaihtosähköllä toimiva. Mikäli laukaisu halutaan toteuttaa etänä, tulee laukaisukelaa ohjata käytännössä automaatiojärjestelmän kautta. Tässä tapauksessa laukaisukelan täytyy olla ohjattavissa tasajännitteellä. Tämän takia nykyinen laukaisukela täytyisi vaihtaa käyttöjännitteeltään 24VDC laukaisukelaan. Keskijännitekojeiston valmistaja tarjoaa laukaisukeloja, jotka ovat käyttöjännitteeltään tasasähkökäyttöisiä. Valmistaja ilmoittaa käyttöjännitteeltään 24VDC laukaisukelan laukaisutehoksi 360W (Siemens esitteet ja linkit 2009, 21). Tällöin automaatiojärjestelmän on kyettävä syöttämään hetkellisesti 15A virta, jotta laukaisukela voisi toteuttaa varokekuormaerottimen etälaukaisun.

Seuraavaksi selvitettiin, onko nykyisellä automaatiojärjestelmällä mahdollista toteuttaa varokekuormaerottimen etälaukaisu suoraan käyttöjännitteeltään 24VDC laukaisukelalla. Selvityksessä kävikin ilmi, ettei nykyisellä automaatiojärjestelmällä ole mahdollista toteuttamaan etälaukaisua, käyttöjännitteeltään 24VDC laukaisukelalla. Etälaukaisu voidaan kuitenkin toteuttaa nykyisellä laukaisukelalla asentamalla sen rinnalle apurele, jonka koskettimen kautta ohjataan 230VAC käyttöjännite laukaisukelalle (kuva 10).

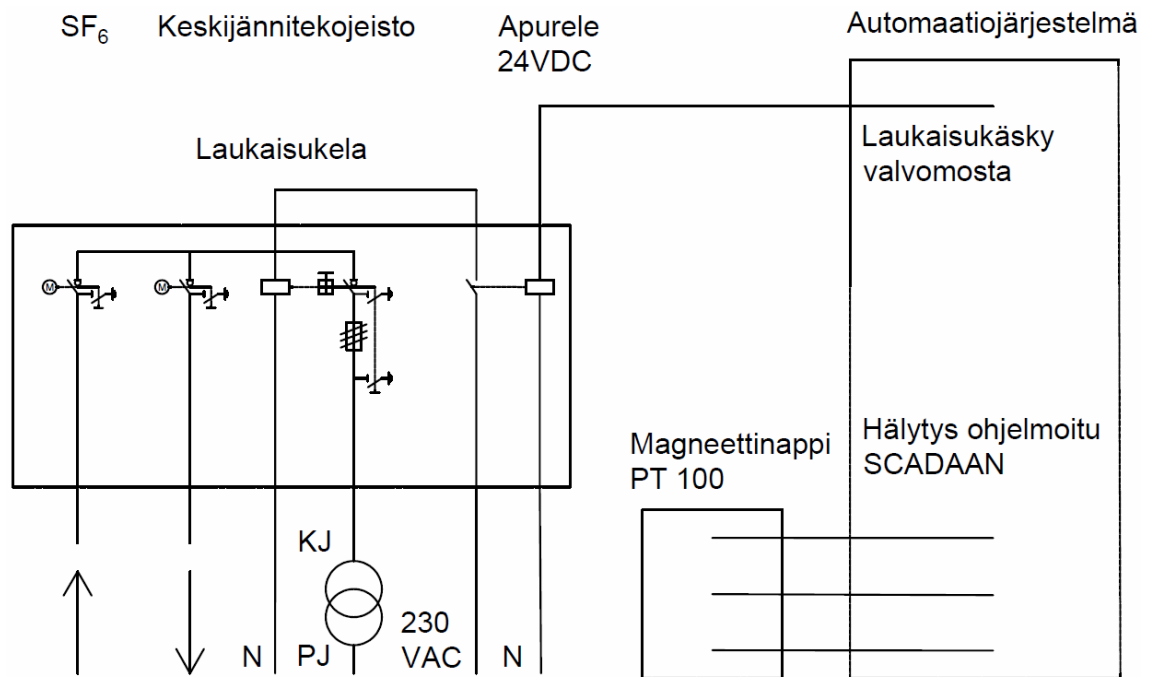


KUVA 10. Jakelumuuntajan lämpölaukaisupiiri etälaukaisulla (Järvensivu, J.P. 2018, sähköpostin liite kuva muokattu)

3.2.2 Muuntajan lämpötilan mittaus magneettinapilla

Jakelumuuntajan lämpötilamittarin markkinakartoitukseen otettiin täysin erilainen näkökulma, jossa kyseenalaistetaan lämpötilamittarin tarpeellisuus. Tarkoituksena olisi rakentaa lämpölaukaisupiiri siten, että lämpötilamittari poistetaan kokonaan muuntajakannelta. Käytännössä öljyn lämpötilan mittaa magneettinappi, joka korvaa lämpötilamittarin. Lisäksi MicroSCADA kerää magneettinapin mittaaman lämpötila datan ja arkistoi sen historiatietokantaan (Autio, L. 2011, 14). Hälytys ja laukaisu toteutetaan MicroSCADA:lla. Seuraavaksi esitellään toimenpiteet, joiden avulla edellä mainittu ratkaisu voidaan toteuttaa.

Lämpölaukaisupiiri ilman lämpötilamittaria (kuva 11) voidaan toteuttaa myös etälaukaisulla. MicroSCADA:aan asetetaan hälytysraja magneettinapin mittaamalle lämpötilalle, kun aseteltu hälytysraja ylittyy MicroSCADA antaa hälytyksen valvomoon. Varokeuormaerottimen laukaisu järjestetään samalla tavalla kuten kohdassa 3.2.1. Tämän näkökulman tavoitteena on poistaa luennan hankaluus muuntamotilassa sekä parantaa kustannustehokkuutta, koska lämpötilamittarin laiteinvestoinnille ei ole tarvetta.



KUVA 11. Jakelumuuntajan lämpölaukaisupiiri etälaukaisulla ilman lämpötilamittaria (Järvensivu, J.P. 2018, sähköpostin liite kuva muokattu)

Tämä näkökulma jättää kuitenkin useita kysymyksiä avoimeksi, kuten voidaanko luopua jakelumuuntajan teknisessä erittelyssä määritellystä suojalaitteesta. Toinen kysymys kuuluu, voidaanko jakelumuuntajan keskeisin suojalaite eli öljynlämpötilamittari jättää kokonaan pois käytöstä. Lisäksi lähtötilanteessa öljyn lämpötilan mittaus oli varmistettu rinnakkaisella lämpötilanmittauksella. Mikäli lämpötilamittari poistetaan käytöstä lämpötilan, valvonta on vain magneettinapin varassa.

4 PD-MITTALAITTEIDEN MARKKINAKARTOITUS JA SEURANTA

Osittaispurkausmittaukset ja palvelut ovat tärkeä osa jakeluverkon kunnonvalvontaa. Tässä luvussa perehdytään PD-mittalaitteiden ja mittauksia tarjoavien toimijoiden markkinakartoitukseen. Tarkoituksena on spesifioida toimeksiantajan käyttötarkoitus mittalaitteille ja palveluille sekä selostaa hieman laitetoimittajien markkinatilanteesta. Tässä luvussa esitellään eritellysti kolmen laitetoimittajan esittämät mittalaitteet. Lisäksi esitellään kolme toimijaa, jotka tarjoavat osittaispurkausmittauksia palveluna. Lopuksi selvitetään kuinka TSV voi kehittää osittaispurkausten seuranta.

4.1 PD-mittalaitteiden markkinatilanne ja käyttötarkoitus

Osittaispurkausmittalaitteita tarjoavat laitetoimittajat jakavat mittalaitteet käyttötarkoituksen mukaan pääsääntöisesti kolmeen ryhmään (taulukko 8). Ensimmäisen ryhmän laitteilla tunnistetaan purkaukset, näiden laitteiden toiminta perustuu ajoittaiseen On-line mittausmenetelmään. Tämä mittausmenetelmä on nopea, helppo ja kustannustehokas. Toinen ryhmä muodostuu Off-line mittalaitteista, jotka soveltuvat kunnonvalvontamittauksiin. Kolmas ryhmä muodostuu 20kV kojeistoihin asennettavasta laitteistosta, jonka toiminta perustuu ajoittaiseen- tai jatkuvaan On-line mittaukseen. Laitteiston keskusyksikkö kerää mittausdatan ja lähettää sen keskustietokantaan analysoitavaksi.

TAULUKKO 8. PD-mittalaitteiden luokitus ja selite käyttötarkoituksen mukaan

Käyttötarkoitus	Selite
Tunnistus	Kaapeleiden, muuntajien, pyörivien koneiden, päätteiden, jatkosten On-line mittaus osittaispurkausten havaitsemiseen
Vikakohdan havaitseminen ja kunto- luokitus / purkauksen paikannus	Kaapeleiden Off-line mittaus häviökerroinmittaus muovikaapeleiden vesipuut ja öljypaperieristeisen kaapein kosteus / Osittaispurkausmittaus kaapeleissa esiintyvät osittaispurkaukset
Osittaispurkausten seuranta/analysointi/raportointi/paikannus	20kV kojeistoon asennettava mittalaitteisto jatkuvaan tai ajoittaiseen On-line mittaukseen, joka havaitsee osittaispurkaukset/laitetoimittaja analysoi mittausdatan / laitetoimittaja raportoi asiakasta/ jotkut laitetoimittajat ovat kehittäneet laskenta-algoritmin purkausten paikannukseen

Toimeksiantajan intressinä on keskeytyksetön sähkönjakelu ja kustannustehokkuus, jolloin jatkuva-aikaiseen mittaukseen soveltuvat laitteet ovat keskeisessä roolissa valittaessa käyttötarkoitukseen sopivaa laitteistoa. Tämä koskee käytännössä jatkuvaan- ja ajoittaiseen On-line mittaukseen soveltuvia mittalaitteita. Lisäksi PD-mittausten tarve kohdistuu kunnonvalvontamittauksiin eli Off-line mittauksiin, jotka jakautuvat siis häviökerroinmittaukseen ja osittaispurkausmittaukseen sekä ajoittaiseen On-line osittaispurkausmittaukseen.

Tässä alaluvussa spesifioidaan toimeksiantajan tarpeet (taulukko 9) koskien mittalaitteita, palveluita ja investointitarpeita. Vaatimukset osittaispurkausmittalaitteilta liittyvät purkausten tunnistukseen, paikannukseen ja seurantaan. Muita tarpeita ovat kaapeleiden kunto-
luokitus, eristeen kunnonarviointi, osittaispurkausmittaukset ja mittaustulosten tehokas dokumentointi.

TAULUKKO 9. Erittely toimeksiantajan tarpeista koskien PD-mittalaitteita ja palveluita

Tarpeet	Palvelu/Investointi
Kunnonvalvontamittaukset <ul style="list-style-type: none"> • kaapelin eristeen kunto • kaapelin kuntoluokitus • osittaispurkausmittaukset • purkaukohdan paikannus 	Palvelu/Investointi
Purkausten jatkuva- tai ajoittainen seuranta <ul style="list-style-type: none"> • 20kV lähtöön asennettava laitteisto • tulosten analysointi • raportointi 	Palvelu
Mittaustulosten dokumentointi <ul style="list-style-type: none"> • raportoitu mittausdata on helposti siirrettävissä verkkotietojärjestelmään • mittalaitteiston tiedonhallintajärjestelmän ja verkkotietojärjestelmän yhdistäminen 	Edellyttää muita toimenpiteitä

Käyttöönottovaiheessa kaapeleille olisi hyvä tehdä kunnonvalvontamittaukset, jotta varmistetaan työn laadusta. Käyttöönottomittausten toinen tarkoitus on saada lähtötieto ”sormenjälki” kaapelieristeen kunnosta ja esiintyvistä osittaispurkauksista. Nämä mittaustulokset dokumentoidaan myöhempää seurantaa varten. Lisäksi kunnonvalvontamittauksiin liittyy myöhempää kunnonvalvontaa varten tehtävät osittaispurkausmittaukset ajoittaisella On-line mittausmenetelmällä. Mittaustulosten dokumentointi verkkotietojärjestelmään on tärkeää, koska silloin voidaan seurata yksittäisten johto-osuuksien purkausaktiivisuuden kehittymistä pitkällä aikavälillä.

4.2 PD-mittalaitteiden ominaisuuksien esittely

Tarkoituksena on esitellä neljä potentiaalista mittalaitteistoa, jotka soveltuvat käyttötarkoitukseen. Kartoitukseen otettiin kahden laitetoimittajan Off-line mittalaitteet sekä kahden laitetoimittajan On-line laitteistot. Valinnassa kiinnitettiin erityistä huomiota häiriösuojaustekniikkaan ja mittaustulosten luotettavuuteen. Laitetoimittajien mittalaitteiden ominaisuuksien välillä on suuriakin eroja, vaikka ne ovat tarkoitettu samaan käyttötarkoitukseen. Toisaalta tämä selittyy sillä, että osittaispurkauksia voidaan mitata useilla mittausten menetelmillä. Tämä antaa hyvät lähtökohdat eri vaihtoehtojen vertailulle. Tarkoituksena on esitellä laitteistojen tekniset ominaisuudet, erityispiirteet ja edut.

4.2.1 Megger

Valinta ensimmäisen Off-line mittalaitteiston osalta kohdistui Meggerin laitteistoon (kuva 12), jonka valmistaja on saksalainen Seba KMT. Laitteisto koostuu kolmesta osasta perusmoduulista, buustaus moduulista ja osittaispurkausmoduulista. Perusmoduulissa on ohjauspaneeli mittausten suorittamista varten sekä monipuoliset ominaisuudet eri mittaustekniikoille. Perusmoduulilla voidaan suorittaa häviökerroinmittaukset $\tan \delta$ sekä PD-mittaukset vian paikantamista varten lyhyille johtoetäisyyksille. Buusteri moduuli sijaitsee perusmoduulin alapuolella, jolla voidaan suorittaa PD-mittaukset myös pitkille johto-osuuksille. Osittaispurkausmoduuli eli kytkentäkondensaattori on tarkoitettu PD-mittauksia varten.



KUVA 12. Meggerin Off-line mittalaitteisto TDM 4540-P-TD-PD (Seba KMT tuote-esite 2014, 8)

Laitteistolla voidaan käyttää kahta mittaustekniikka, jotka ovat VLF ja DAC. VLF-tekniikka soveltuu PD-mittaukseen sekä $\tan \delta$ mittaukseen. DAC tekniikka soveltuu pääsääntöisesti PD-mittauksiin, mutta sillä voidaan suorittaa myös häviökerroinmittaus. Laitteistoon on integroitu tietokanta, johon mittausraportit tallentuvat. Mittausraportti tallentuu välittömästi mittauksen jälkeen, joka on muokattavissa asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Mittalaitteiston muutamia keskeisiä ominaisuuksia ovat jatkuva mittausjakso ilman keskeytystä, DC-testijännite 45kV saakka, piilevien vikojen tarkka paikannus DC-testijännitteellä 20kV saakka standardin IEC 60229 mukaan ja manuaalinen sekä automaattinen taajuuden säätäminen (Seba KMT tuote-esite 2014, 3). Lisäksi laitteiston ominaisuudet eriteltynä mittaustekniikan perusteella (taulukko 10), jotka esitettiin laitetoimittajan tuote-esiteessä.

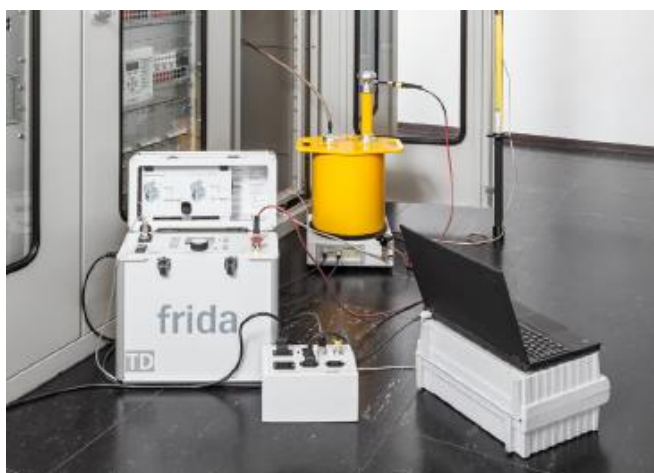
TAULUKKO 10. TDM 4540-P-TD-PD toiminnot ja ominaisuudet (Seba KMT tuote-esite 2014, 3)

Häviökerroin	PD-mittaukset
<ul style="list-style-type: none"> • Täysipainoinen valinnainen, sisäinen $\tan \delta$-askeltesti automaattisella tulosten tulkinnalla IEEE 400.2 mukaisesti • Jännitekestoisuusdiagnosi yhdellä mittauksella (VFL-testi ja $\tan \delta$-diagnosi) • Raportointi yhdellä painalluksella 	<ul style="list-style-type: none"> • Tehokas tietokanta: yksinkertaistettu haku, selaaminen ja mittausten hallinnointi sekä kaapelitiedot • Täysautomaattinen kalibrointi, jossa kalibrointi kaapelin pituuden mukaan tai signaalin etenemisnopeuden mukaan • Selkeä mittaustulosten näyttö ja vikapaikan näyttö, joka säästää aikaa mittausten jälkikäsitelyltä • Osittaispurkauksen vaiheentunnistus näyttö • Kestoisuusmittauksen monitorointi VLF siniaalto-, VLF CR- ja DAC-tilassa

4.2.2 Eurolaite Oy

Toinen Off-line mittalaitteiston valinta kohdistui Eurolaitteen toimittamaan Baurin Frida PD-TaD 60 mittalaitteistoon (kuva 13). Laitteisto käyttää VLF-tekniikkaa, joka soveltuu häviökerroin mittaukseen sekä PD-mittaukseen. Lisäksi laitteistolla voidaan yhdistää eri mittausmenetelmiä (Full MWT). Tätä mittausmenetelmää kutsutaan täydeksi kestoisuus-testaukseksi sisältäen VLF-tesitn, häviökerroin mittauksen ja PD-mittauksen. Täyden kestoisuusmittauksen ansiosta kaapelin eristeen kunnosta saadaan tarkempaa tietoa verrattuna pelkkään häviökerroinmittaukseen tai PD-mittaukseen.

Lisäksi mittaustekniikan erikoisominaisuus on ehtopohjainen testausaika. Tietyissä olosuhteissa mittausaika voidaan lyhentää, jolloin kustannustehokkuus paranee. Baurin kehittämä VLF truesinus[®] testijännitemuoto, mahdollistaa luotettavat mittaustulokset. Tämä jännitemuoto on muihin testijännitteisiin verrattuna kuormittamaton, symmetrinen ja jatkuva.



KUVA 13. Eurolaite Oy:n toimittama Baurin Frida PD-TaD 60 mittalaitteisto (Eurolaite Oy:n datalehti 2017, 1)

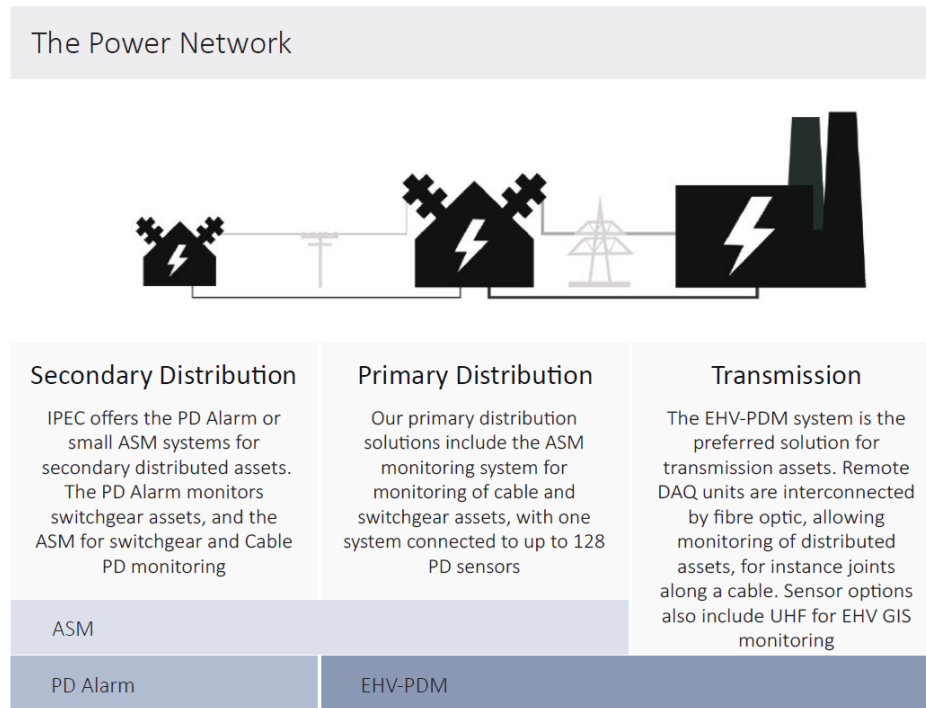
Mittalaitteen keskeiset ominaisuudet (taulukko 11) liittyvät ainutlaatuiseen mittaustekniikkaan, joka mahdollistaa luotettavat mittaustulokset samanaikaisella häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksella. Tämä nopeuttaa mittauksen suorittamista ja vaikuttaa näin kustannustehokkuuteen. Kompaktin rakenteensa ansiosta laitteisto soveltuu hyvin kenttäolosuhteisiin, lisäksi laitteiston rakenteella on melua vaimentava vaikutus.

TAULUKKO 11. Frida PD-TaD 60 mittalaitteen ominaisuudet ja täyden kestoisuustestin ominaisuudet (Eurolaite Oy:n datalehti, 1)

Ominaisuudet	Täysi kestoisuustesti
<ul style="list-style-type: none"> • Osittaispurkausmittaukset ja täysi mittausasetusten kalibrointi standardin IEC 60270 mukaan • Purkaustason havaitseminen, tarkastaminen ja purkauksen aiheuttama vaikutus jännitteeseen ja taajuuteen • Purkausten tarkka paikannus kaapelieristeessä, liitoksessa tai päätteessä • Melunvaimennus johtuen kompaktista rakenteesta, galvaaninen erotus PD-mittalaitteen ja tietokoneen väliltä ja keskitetty virtalähde 	<ul style="list-style-type: none"> • Mahdollisuus yhdistää häviökerroinmittaus ja PD-mittaus • 17,5kg painoinen mittayksikkö markkinoiden kevyin ja kompaktein ratkaisu • Kytkenäkondensaattori sisältää mitausimpedanssin ja PD-mittausyksikön samassa laitteessa • Vaiheenkorjaus purkausten luokitteluun (valinnainen ominaisuus)

4.2.3 IPEC

IPEC:n palvelukonsepti käsittää kolme laitteistoa (kuva 14), jotka ovat tarkoitettu siirtoverkkojen, sähköasemien ja jakelumuuntamoiden sisältämien laitteistojen osittaispurkausten seurantaan. Ensimmäinen jatkuvaan On-line mittaukseen soveltuva laitteistovalinta kohdistui IPEC:n ASM järjestelmään. Laitteisto soveltuu käytettäväksi sähköasemilla sekä jakelumuuntamoilla ilmaeristeisien keskijännitekojeistojen ja maakaapeleiden osittaispurkausten seurantaan. Jakelumuuntamoiden keskijännitekojeistojen osittaispurkausten seurantaan tarkoitettu PD Alarm laitteisto ja siirtoverkon laitteistoille soveltuva EHV-PDM (Extra High Voltage Partial Discharge Monitoring) laitteisto eivät kuulu tähän kartoitukseen.



KUVA 14. IPEC:n tarjoaa palvelukonseptina kolmea eri mittalaitteistoa osittaispurkauksen seurantaan (Abbas, A. 2018, 3)

IPEC tarjoaa ASM-laitteiston palveluna, joka käsittää asennuksen ja käyttöönoton, mitausdatan hallinnan, mittaustulosten analysoinnin ja raportoitujen mittaustulosten toimitamisen asiakkaalle (kuva 15). ASM-laitteisto toimitetaan leasing-periaatteella eli väliaikaiseen vuokratyöhön sopimuksen mukaisesti. Palveluntarjoaja hallinnoi järjestelmän mittausdataa, jonka tallentuu heidän omaan keskustietokantaansa analysoitavaksi. Laitetoimittajan analysoima mittausdata on mahdollista siirtää SCADA-järjestelmän kautta suoraan asiakkaan omaan tiedonhallintajärjestelmään.



KUVA 15. ASM-laitteiston mittausdatan topologia (Abbas, A. 2018, 7)

Seuraavaksi esitellään ASM-laitteiston sisältämät sensorit, lisälaitteet ja palvelut (taulukko 12). Serverikaappi ”räksi” on ASM-laitteiston keskus, joka sijaitsee fyysisesti sähköasemalla keräten sensoreiden mittausdatan. Ensimmäinen sensori on HFCT (High Frequency Current Transformer) virtamuuntaja, joka seuraa osittaispurkauksia kaapelin jokaisesta vaiheesta erikseen tai kaapelin maadoitus lenkistä. Virtamuuntaja havaitsee kaapelissa esiintyvän osittaispurkauksen varmuudella 4km johto-osuudelta, mutta ei voi paikantaa purkaukkohtaa (Abbas, A. 2018 Skype palaveri). Purkauksen suuruudesta ja johto-osuudesta riippuen virtamuuntaja voi havaita purkauksen, jopa 8km etäisyydeltä. Toinen sensori on CC-TEV (Capacitive Coupler Transient Earth Voltage), joka havaitsee PD-pulssit kojeistosta ja päätteistä. Kolmas sensori AA Ultrasonic on akustinen probe, joka havaitsee kojeistossa esiintyvät pintapurkaukset. Neljäs sensori mittaa ympäristönlämpötilan ja ilmankosteuden. ASM-laitteistoon on saatavilla lisäominaisuutena ”ASM alarm”, joka mahdollistaa muiden valvontajärjestelmien yhdistämisen ASM laitteistoon, kuten SCADA:n tai paikallisia hälytystoimintoja.

TAULUKKO 12. ASM-järjestelmän laitteet ja palvelut (IPEC tuote-esite 2015, 4 & 6)

Laitteet	Sensorit	Lisälaitteet ja palvelut
<ul style="list-style-type: none"> • Serverikaappi • Mittajohdot 	<ul style="list-style-type: none"> • HFCT virtamuuntaja • CC-TEV maadoitustransientti-jännite • AA Ultrasonic pintapurkaukset • Lämpötila- ja ilmankosteus 	<ul style="list-style-type: none"> • ASM alarm • Koulutus laitteiston käyttöön • Datan analysointi • Datan hallinta

IPEC:n jatkuvan On-line mittalaitteiston ominaisuudet ja edut (taulukko 13) antavat markkinaetua muihin markkinoilla toimiviin laitetoimittajiin nähden. ASM laitteiston suurimpana etuna on sen sisältämä asiakaskohtaisesti suojattu verkkosivustopohjainen iSM (The Integrated Substation Management) sovellus, johon voidaan yhdistää asiakkaan omia järjestelmiä joustavasti. Tämä ominaisuus mahdollistaa sen, ettei asiakkaan tarvitse siirtää manuaalisesti mittaustuloksia omaan verkkotietojärjestelmäänsä. Tämä ominaisuus helpottaa omaisuudenhallintaa reagoimaan ajoissa piileviin keskijänniteverkon viikoihin, jolloin resurssit voidaan kohdentaa ajoissa ja välttää ylimääräiset kustannukset. ASM-laitteiston mittaama purkausaktiivisuus tallentuu automaattisesti, säännöllisesti ja keskitetysti laitetoimittajan tietokantaan, josta se voidaan analysoida. Laitetoimittajan analysoimat raportit ovat helposti asiakkaan saatavilla verkkosivustopohjaisesta sovelluksesta.

TAULUKKO 13. ASM-järjestelmän erikoisominaisuudet ja edut (Abbas, A. 2018, 7; IPEC tuote-esite 2015, 5)

Ominaisuudet	Edut
<ul style="list-style-type: none"> • ASM-laitteisto käyttää verkkosivustopohjaista iSM sovellusta, johon voidaan yhdistää asiakkaan omia tiedonhallintajärjestelmiä • Sisältää IPEC:n kehittämän Decifer[®] laskenta-algoritmin purkausten havaitsemiseen • Laitteisto on konfiguroitavissa 128 kanavalle • Saatavilla lisäominaisuus, joka antaa hälytyksen tekstiviestillä puhelimeen, sähköpostiin tai valvomoon purkaustason ylittyessä 	<ul style="list-style-type: none"> • Helpottaa asiakkaan osittaispurkausten seuranta • Helpottaa omaisuudenhallintaa havaitsemaan piilevät viat ajoissa vähentäen turhia kustannuksia • Käyttäjäturvallinen ja suojattu verkkopohjainen datan hallinta ja analysointi • Laitetoimittaja tarjoaa laitteiston asennuksen, teknisen tuen ja koulutuksen asiakkaan henkilöstölle käyttöä varten • Järjestelmä tukee Smart Grid pohjaista teknologiaa, joka helpottaa ja tehostaa tiedon hallintaa

IPEC tarjoaa leasing periaatteella myös kannettavaa ASM-P laitteistoa, joka on tarkoitettu lyhytaikaiseen kokeilukäyttöön tai tilapäiseen kaapeleiden ja kojeistojen osittaispurkausten seurantaan. Tilapäisessä käytössä ASM-P laitteiston leasingsopimus on kolmesta kuukaudesta vuoteen. Laitteisto on helposti siirrettävissä (painaa 14kg), lisäksi se voidaan konfiguroida 32 kanavalle. Asennus on nopeaa, koska osittaispurkauksia havaitsevien sensorit toimivat langattomasti. IPEC hallinnoi laitteiston mittausdataa, analysoi mittaus tulokset ja toimittaa analysoidut mittausraportit asiakkaalle.

4.2.4 EA Technology

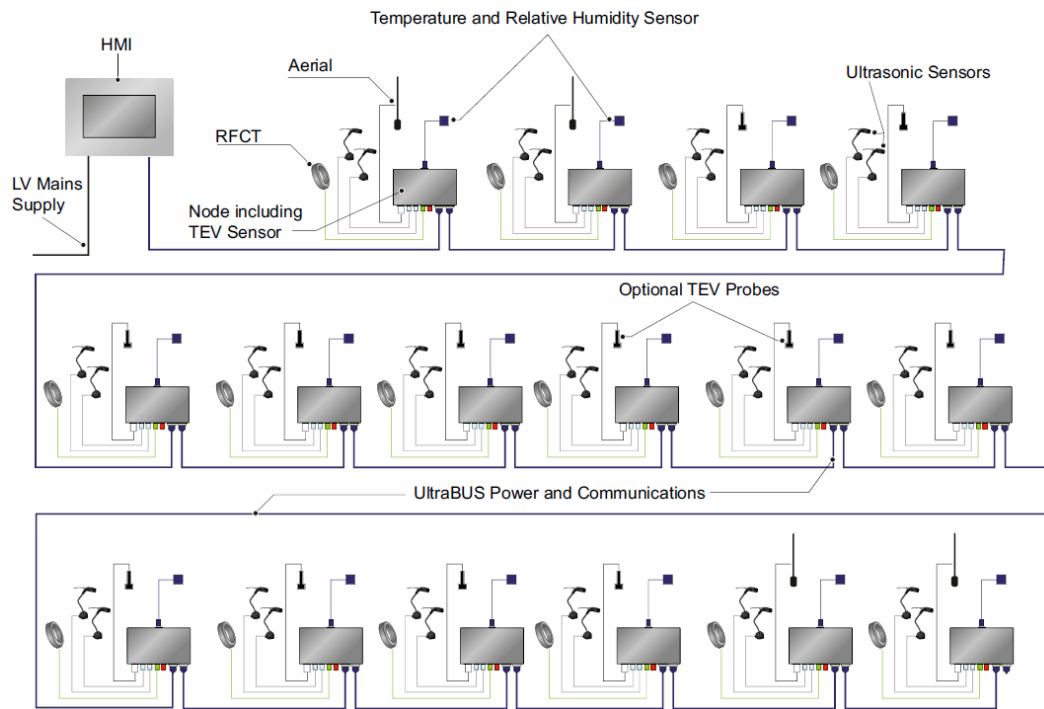
Toinen keskijännitekojeistojen ja kaapeleiden jatkuvaan On-line mittaukseen soveltuva laitteistovalinta kohdistui EA teknologyn Astute Monitoring Services palvelukonseptiin (kuva 16). Tämä palvelukonsepti käsittää UltraTEV Monitor[®] laitteiston, joka on tarkoitettu keskijännitekojeistojen osittaispurkausten seurantaan. Toinen palvelukonseptiin kuuluva tuote on Cable Data Monitor[®] laitteisto, joka on tarkoitettu kaapeleiden osittaispurkausten seurantaan.

EA Technology tarjoaa laitteisoja kahdella vaihtoehdolla. Ensimmäinen vaihtoehto on leasing-periaate, jolloin asiakas vuokraa laitteiston käyttöönsä 1, 3 tai 5 vuoden ajaksi sopimuksen mukaan. Tähän palvelusopimukseen sisältyy laitteistot, tulosten analysointi, raportointi ja takuu koko sopimuskaudelle. Toisena vaihtoehtona on laiteinvestointi, jolloin asiakas ostaa laitteiston. Tässä vaihtoehdossa palvelusopimuskaudet ovat 1, 3 tai 5 vuotta ja tulosten analysoinnista sekä raportoinnista laskutetaan kuukausittain. Laitteistolla on 12 kuukauden takuu, joka on laajennettavissa lisämaksua vastaan. Asiakas vastaa laitteiston asennuksesta (Johnson, D. 2018, 14)



KUVA 16. EA Technologyn tarjoama ASTUTE Monitoring Services palvelukonsepti (Johnson, D. 2018, 4)

UltraTEV Monitor[®] laitteisto (kuva 17) asennetaan sähköasemalle, joka soveltuu ilma-eristeisien ja kaasueristeisien keskijännitekojeistojen osittaispurkausten seurantaan (Johnson, D 2018 Skype palaveri ja haastattelu). Laitteisto koostuu keskusprosessorista (HMI eli Human-Machine-Interface), sensoreista, kojeistoihin asennettavista mittalaitteyksiköstä ja viestintäkaapeleista. Laitteiston asennus on helppoa EA Technologyn kehittämän UltraBUS[®] verkkoteknologian avulla, joka mahdollistaa viestinnän ja laitteiden käyttöjännitteen siirtämisen samalla kaapelilla. Laitteiston jokainen mittalaitteyksikkö sisältää viisi sensoria, jotka ovat mittalaitteyksikön sisäinen TEV sensori, ulkoinen TEV-sensori keskijännitekojeiston sisäisten osittaispurkausten seurantaan, ultraääni sensori pintapurkausten havaitsemiseen, lämpötila- ja ilmankosteusmittari sekä RFCT (Radio Frequency Current Transformer) virtamuuntaja kaapeleiden osittaispurkausten havaitsemiseen.



KUVA 17. UltraTEV Monitor[®] laitteisto ja 16 mittalaiteyksikköä sensoreilla varustettuna. (Johnson, D. 2018, 7)

UltraTEV Monitor[®] laitteiston tiedonhallintajärjestelmä on rakennettu Microsoft Windows[®] käyttöjärjestelmän ympärille. Laitteisto toimii verkkopohjaisesti ja sen tietojärjestelmään pääsee kirjautumaan vain nimetyt henkilöt. Tämä mahdollistaa tulosten seurannan ajasta ja paikasta riippumatta. Laitteiston keskusprosessori eli HMI sisältää tehokkaan prosessorin, joka analysoi ja tallentaa jokaisen mittalaiteyksikön tuottamaa mittaustietoa erikseen omaan tietokantaansa. Keskusprossessorin tallennuskapasiteetti riittää arkistomaan mittaustulokset kolmen vuoden ajalta (Johnson, D 2018 Skype palaveri ja haastattelu).

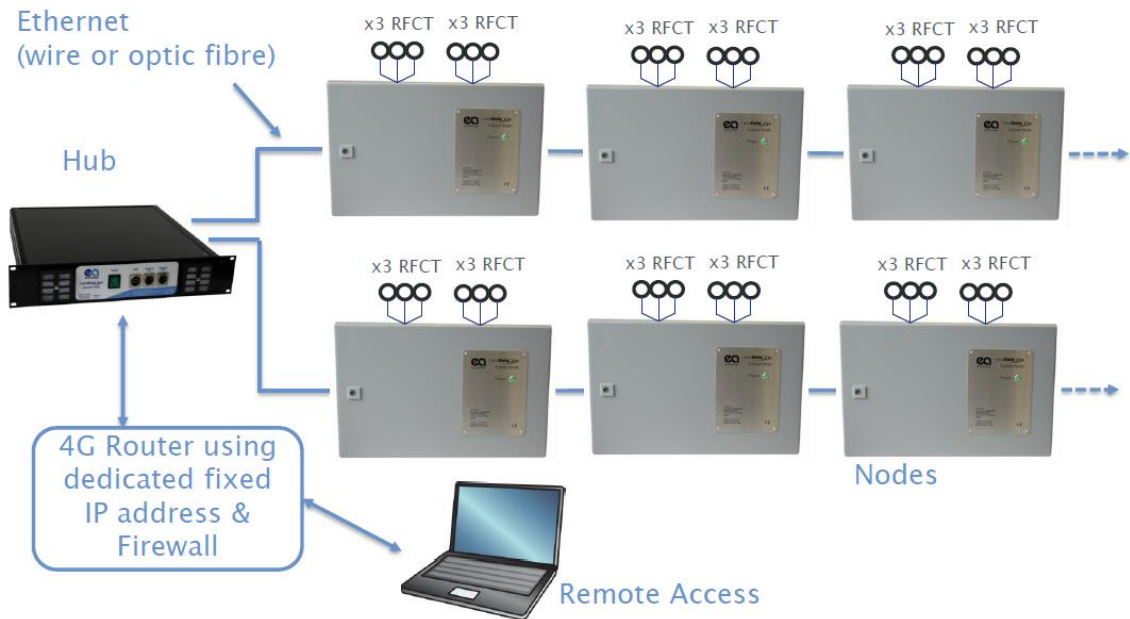
UltraTEV Monitor[®] laitteiston etuna (taulukko 14) on suuri mittauskapasiteetti, joka voi mitata PD-aktiivisuutta jopa 250 mittauspisteestä samanaikaisesti. Laitevalmistajan mukaan kojeistoissa esiintyvät purkaukset voidaan paikantaa, jopa 30cm tarkkuudella. Lisäksi laitteistoon sisältyy hälytysominaisuus, jonka avulla laitteisto antaa hälytyksen tekstiviestillä tai vaihtoehtoisesti sähköpostiin kriittisen purkaustason ylittyessä.

TAULUKKO 14. UltraTEV Monitor® laitteiston ominaisuudet ja edut

Ominaisuudet	Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Paikantaa purkauksia sisältävän kojeiston, jopa 30cm tarkkuudella • Mittaa PD-aktiivisuuden suuruutta ja vakavuutta, jopa 250 mittauspisteestä samanaikaisesti • Valvoo PD-aktiivisuuden ajanmukaisuutta ja ympäristö olosuhteita poistaen turhat hälytykset • Analysoi, raportoi ja tallentaa PD-aktiivisuudesta reaaliajassa jatkuva-aikaisesti • Lisäominaisuutena hälytys purkaustason ylittyessä tekstiviestillä puhelimeen, sähköpostiin tai valvomoon SCADA:n kautta 	<ul style="list-style-type: none"> • Soveltuu kaasueristeisiin kojeistoihin • Mahdollistaa n. 60 kojeiston samanaikaisen seurannan • Laitteisto on helppo ja nopea asentaa UltraBus® teknologian ansiosta • Helpottaa omaisuuden hallintaa kohdentamaan resursseja oikein • Parantaa toimitusvarmuutta ja pienentää yllättäviä kuluja

Palvelukonseptin toinen laitteisto on Cable Data Monitor® (kuva 18), joka spesifioituu kaapeleissa esiintyvien osittaispurkausten seurantaan. Laitteiston sisältämä keskitin ”hub” kerää mittalaitteyksiköiden tuottaman mittausdatan. Mittalaitteyksiköitä voidaan kytkeä keskittimeen maksimissaan 20 kappaletta. Lisäksi yhteen mittalaitteyksikköön voidaan kytkeä kuusi RFCT virtamuuntajaa, jolloin yhdellä mittalaitteyksiköllä voidaan mitata purkauksia käytännössä kahden kaapelin jokaisesta vaiheesta. Keskitin ja mittalaitteyksikön asennetaan sähköasemalle ”räkkiin” tai seinään.

Keskittimen tietoliikenne tapahtuu VPN verkossa itsenäisen 3G tai 4G yhteyden välityksellä, jolloin tietoturva riski on pieni. Mittaustiedot tallentuvat keskittimeen ja asiakkaan tietokantaan, josta laitetoimittajan on helppo analysoida mittaustulokset. Asiakas asentaa keskittimen ja mittalaitteyksiköt. Laitetoimittaja asentaa RFCT virtamuuntajat ja koestaa laitteiston, jolloin se on valmis käyttöönotttavaksi.



KUVA 18. Cable Data Monitoring[®] laitteisto (Johnson, D. 2018, 3)

Cable Data Monitor[®] laitteisto antaa yksityiskohtaisempaa tietoa kaapeleiden kunnosta verrattuna UltraTEV Monitor[®] laitteistoon. Pääominaisuudet (taulukko 15) mittauksessa ovat vaihekohtaisen mittaus, aaltomuodon kaappaus, joka mahdollistaa purkauksen paikannuksen arvioinnin ja aikasarjan avulla voidaan määrittää purkausajankohta. Pääpiirteissään muut ominaisuudet ovat samat molemmilla laitteistoilla.

TAULUKKO 15. Cable Data Monitor[®] laitteiston ominaisuudet ja edut

Ominaisuudet	Edut
<ul style="list-style-type: none"> Havaitsee kaapelissa esiintyvät purkaukset vaihe kohtaisesti Purkauksen arviointi Seuraa PD-aktiivisuutta, jopa 40 kaapelin jokaisesta vaiheesta samanaikaisesti Lisäominaisuutena hälytys purkaustason ylittyessä tekstiviestillä puhelimeen, sähköpostiin tai valvomoon SCADA:n kautta 	<ul style="list-style-type: none"> Kaapeliverkon kunnosta saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa Helpottaa omaisuuden hallintaa kohdentamaan resursseja oikein Parantaa toimitusvarmuutta ja pienentää ylläpitäviä kuluja

4.3 Osittaispurkausmittausten palvelut

Suomen markkinoilla ei ole vielä montakaan toimijaa, jotka tarjoavat keskijännitekaapeleiden kunnonvalvontamittauksia palveluna. Pääsääntöisesti markkinat kohdistuvat osittaispurkausmittalaitteiden myyntiin. Muutama yritys tarjoaa kuitenkin mittauspalveluita keskijännitekaapeleiden kunnonvalvontaan, tarkoituksena on esitellä eritellysti heidän palvelunsa. Mittauspalveluiden kartoituksessa kiinnitettiin huomiota mittausmenetelmien saatavuuteen, kustannustehokkuuteen ja purkausten seurannan kannalta mittautulosten dokumentointiin.

4.3.1 DEKRA

DEKRA tarjoaa osittaispurkausmittauksia kunnonvalvontamittauksiin sekä ajoittain tehtäviin On-line mittauksiin. Palvelukonseptiin kuuluu mittaukset ja raportointi molemmilla mittausmenetelmillä. Kunnonvalvontamittauksia tehdään kahdella mittaustekniikalla DAC- ja VLF mittaustekniikalla. DAC tekniikalla suoritetaan osittaispurkausmittaus, jolla selvitetään purkausten näennäisvaraustaso ja paikannetaan vikakohta. Lisäksi DAC tekniikalla on mahdollista suorittaa häviökerroinmittaus, jonka avulla määritetään kaapelieristeen yleiskunto. VLF tekniikalla voidaan tehdä sekä häviökerroinmittaus, että osittaispurkausmittaus. Off-line mittauksia voidaan tehdä päivässä arviolta 3-4 kappaletta riippuen olosuhteista. (Keränen, J. 2018. Sähköposti)

Ajoittain tehtävät On-line mittaukset tehdään PRY-CAM Portable mittalaitteella. Mittauksia voidaan tehdä keskijänniteverkossa tai suurjänniteverkossa. Laite soveltuu kaapeleiden, jatkosten, päätteiden, kojeistojen, muuntajien ja pyörivien koneiden osittaispurkausten seurantaan. Lisäksi mittaukset voidaan suorittaa kosketussuojattujen laitteistojen lisäksi kosketussuojaamattomiin jännitteisiin rakenteisiin. (Muranen, S. 2016, 4)

4.3.2 Kiwa Inspecta

Kiwa inspectan palvelukonsepti perustuu ajoittaiseen On-line mittaukseen ja tulosten raportointiin. Palvelu soveltuu lähinnä sähköverkko- ja teollisuusasiakkaiden tarpeisiin. Käytössä on PRY-CAM portable mittalaite, mittaukset kohdistuvat pääsääntöisesti sähköasemien kosketussuojattuihin- ja kosketussuojaamattomiin laitteistoihin. Lisäksi mittalaite soveltuu teollisuudessa käytettävien pyörivien koneiden ja laitteistojen osittaispurkausten havaitsemiseen. Kosketussuojattujen laitteistojen mittaaminen on nopeampaa verrattuna kosketussuojaamattomien rakenteiden mittaamiseen. Näihin mittauksiin tarvitaan vain yksi mittaaja, joka ehtii tehdä arviolta 30 mittausta päivässä. Kosketussuojaamattomien laitteistojen mittaaminen on hitaampaa ja siihen tarvitaan kaksi mittaajaa, näitä mittauksia ei ehditä tekemään päivässä yhtä montaa kuin kosketussuojattuihin laitteistoihin. (Koskinen, M. 2018 haastattelu)

4.3.3 Prysmian Group

Prysmian Groupin palvelukonsepti käsittää On-line-osittaispurkausmittausten lisäksi mitaustulosten analysoinnin, raportoinnin sekä asiantuntijapalvelun. Yksittäisten mittausten suorittamiseen on PRY-CAM Portable mittalaite, jolla mittaukset kohdistuvat pääsääntöisesti keski- ja suurjännitekaapelien sekä -kaapelivarusteiden osittaispurkausten mittaukseen. Mittausraportti sisältää jokaisen mittauspisteen kuntoarvion sekä mahdolliset huolto- ja korjaussuositukset. Yleisesti keskisuuren sähköaseman kaikki lähdöt voidaan mitata yhden päivän aikana. (Lahti, J. 2018 sähköposti)

4.4 Osittaispurkausten seurannan kehittäminen

Uusien järjestelmien ja laitteiden käyttöönotossa yhtenä haasteena on yhteensopivuus asiakkaan ja laitetoimittajan järjestelmän kanssa. Osittaispurkausten seuranta on tärkeää asiakkaalle, koska silloin laitteiden kuntoa voidaan arvioida pitkällä aikajänteellä. Tähän liittyy oleellisesti osittaispurkausmittausten dokumentointi. Toimeksiantajan intressinä olisi vaivaton mittausedatan siirtäminen mittalaitteesta suoraan verkkotietojärjestelmään kunnonvalvonnan seuranta varten.

Jatkuvan On-line mittauksen osalta muutamat laitetoimittajat mahdollistavat laitteistonsa tiedonhallinta infrastruktuurin sovittamisen asiakkaan tietojärjestelmiin. Tämä helpottaa merkittävästi asiakkaan mittaustulosten dokumentointia ja seuranta. Nämä laitteistot hyödyntävät kehittyneitä ja hienostunutta ns. Smart Grid teknologiaa, joka mahdollistaa eri järjestelmien yhdistämisen tehden jakeluverkosta yhdenmukaisemman ja tehokkaamman kokonaisuuden (IPEC tuote-esite 2015, 5). Tiedonhallintajärjestelmien yhdistäminen edellyttää käytännössä päivityksiä asiakkaan verkkotietojärjestelmään, jotta osittaispurkausmittalaitteiston tulokset olisivat siirrettävissä suoraan verkkotietojärjestelmään.

Käyttökeskeytyksen vaativien mittausten osalta mittaustulokset eivät ole suoraan liitettävissä verkkotietojärjestelmään. Käytännössä yhden Off-line mittauksen sisältämä data voi olla suuruudeltaan satoja megatavuja, jolloin siitä on mahdotonta sisällyttää kokonaisuudessaan verkkotietojärjestelmään. Tämän yksityiskohdan takia tulee arvioida ensin, mitä tietoja mittaustuloksesta tulisi sisällyttää verkkotietojärjestelmään ennen dokumentoinnin aloittamista. Käyttöönottomittaukset mahdollistavat kuntoluokituksen tekemiseen jo käyttöönottovaiheessa, jolloin kaapeleista saadaan sormenjälkitieto. Sormenjälkitieto antaa vertailukohdan kunnonvalvonnalle myöhempiä mittauksia varten (Aro & kaikki 2015, 200).

Tampereen teknillinen yliopisto suoritti tutkimushankkeen yhteistyössä ST-Poolin ja kahdentoista verkkoyhtiön kanssa, jossa arvioitiin keskijännitekaapeleiden kuntoa häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla (Keränen, J., Muranen, S., Pakonen, P & Verho, P. 2018, s. 12). Seuraavaksi esitellään tämän tutkimuksen mittaussuureet häviökerroinmittauksen ja Pry-Cam laitteella tehdyn osittaispurkausmittauksen (On-line mittaus) osalta. Tarkoituksena on havainnollistaa mitä tietoja mittauksesta otetaan talteen ja kuinka niitä voitaisiin soveltaa tässä alaluvussa esitetyn kaltaisesti osittaispurkausten seurannassa. Häviökerroinmittauksen taulukoitavat tiedot on esitetty kahdessa osassa. Tämä mittaus on tehty VLF (Very low Frequency) tekniikalla, joka on siis Off-line mittaus. Ensimmäisessä osassa (taulukko 16) on esitetty häviökerroinmittauksen perustiedot ja olosuhdetiedot.

TAULUKKO 16. Häviökerroinmittauksen perustiedot ja olosuhdetiedot (Keränen, J & kaikki 2018, 134)

Kaapeli ID	U_0 [kV]	Poikkipinta [mm ²]	Pituus [m]	Asennus-vuosi	Pvm	Klo	Lämpötila [°C]	Ilman suhteellinen kosteus [%]	Ilman-paine [hPa]
------------	------------	--------------------------------	------------	---------------	-----	-----	----------------	--------------------------------	-------------------

Häviökerroinmittauksen toisessa osassa (taulukko 17) esitetään häviökertoimet kolmella käyttöjänniteportaalla, Tangentti Deltan arvot, jännitetasolla U_0 tehtyjen häviökerroinmittausten keskihajonta, kaapelin kapasitanssi ja tunnusluku, joka kuvaa häviökertoimen muutoksen epälineaarisuutta jännitteen funktiona. Kolme viimeisintä saraketta kuvaavat jännitetasolla U_0 tehtyjen häviökerroinmittausten keskihajonnan maksimiarvoa, Tangentti Deltan maksimiarvoa ja normaalin porrastetun käyttöjännitteen maksimiarvoa. Kaikki suureet ilmoitetaan vaihekohtaisesti, paitsi kolmen viimeisen sarakkeen arvot. (Keränen, J & kaikki. 2018, 40)

TAULUKKO 17. Häviökerroinmittauksen häviökertoimet porrastetulla käyttöjännitteellä, Tangentti Delta, häviökerrointen keskihajonta, kaapelin kapasitanssi ja tunnusluku vaiheittain sekä maksimiarvot (Keränen, J & kaikki 2018, 134)

häviökerroin $0.5xU_0$ [10 ⁻³]			häviökerroin $1.0xU_0$ [10 ⁻³]			häviökerroin $1.5xU_0$ [10 ⁻³]			Delta TD [10 ⁻³]			Stdev [10 ⁻³]			C [nF]			TUTU [10 ⁻³]			Stdev [10 ⁻³]	Delta TD [10 ⁻³]	TD @ U_0 [10 ⁻³]
L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	max	max	max

Näistä arvoista oleelliset tiedot liittyvät olosuhdetietoihin ja maksimiarvoihin. Kaapeleiden perustiedot eivät ole oleellisia, koska ne löytyvät verkkotietojärjestelmästä lähtökohteisesti. Tästä huolimatta verkkotietojärjestelmään pitäisi lisätä häviökerroinmittauksen osalta kuusi eri mittaustulosta.

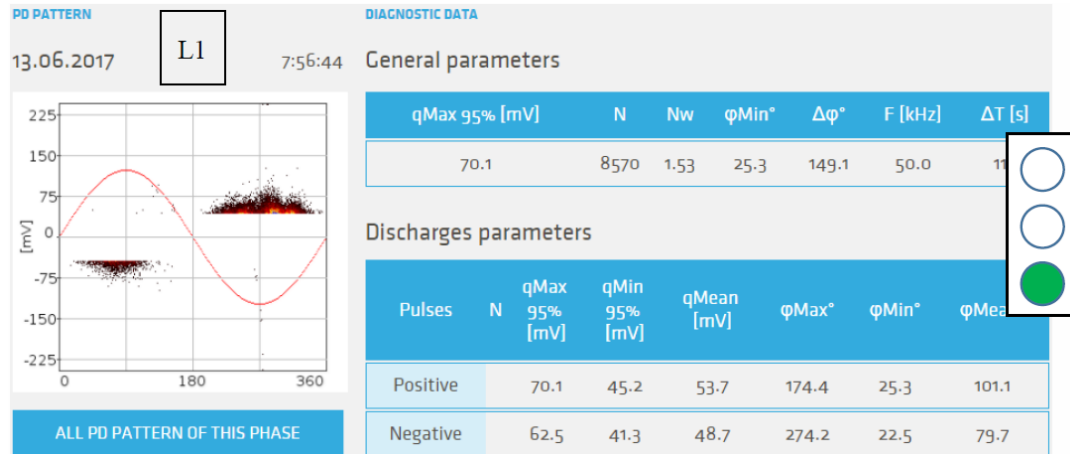
Osittaispurkausmittaus on suoritettu Pry-Cam mittalaitteella, joka soveltuu ajoittaiseen On-line mittaukseen. Mittauksesta esitetään yleiset parametrit ja purkauksen parametrit. Lisäksi mittauksesta esitetään PRPD-kuva (Phase Resolved Partial Discharge) ja osoitetaan liikennevalo menetelmällä johto-osuuden kuntoluokka. Liikennevalo menetelmällä osoitetaan mitatun johto-osuuden kuntoluokka (taulukko 18). Alla on esitetty selvitys mitä mikäkin liikennevalo tarkoittaa.

vihreä = ei edellytä toimenpiteitä

keltainen = tarkempi tutkimus ja/tai seuranta suositeltavaa

punainen = edellyttää toimenpiteitä

TAULUKKO 18. Pry-CAM mittalaitteen osittaispurkauksmittausten tulokset vaiheesta L1 liikennevalo menetelmällä (Keränen, J & kaikki 2018, 171)



Tästä mittauksesta esitellään mittausraportissa olevat tunnusluvut ja niiden selite (taulukko 19). Oleellinen mittautietoa koskee vain $qMean$ arvoa eli osittaispurkauksen suuruutta. Pry-Cam mittauksen mittautulokset ovat näin ollen helpommin liitettävissä verkotietojärjestelmään verrattuna häviökerroinmittaukseen. Pry-Cam mittauksen mittautulos purkauksen suuruudesta ilmoitetaan millivolteina. Mitattava johto-osuus joudutaan kalibroimaan asettamalla, mikäli purkauksen suuruus halutaan ilmoittaa pikocoulombeina (pC). Kalibrointi, joudutaan tekemään jännitteettömään kaapeliin, jolloin toimenpide edellyttää käytännössä käyttökatoa. (Keränen, J & kaikki. 2018, 109)

TAULUKKO 19. Pry-Cam mittauksen tunnusluvut ja selite (Keränen, J & kaikki. 2018, 170)

qMax 95%	Upper value in the amplitude range where the 95 percentile of the total measured charges falls.
N	Total number of acquired pulses.
Nw	Number of pulses per synchronization wave period (usually $[50\text{Hz}]^{-1}$, $[60\text{Hz}]^{-1}$).
ϕMin°	Minimum inception phase angle.
$\Delta\phi$°	Total phase interval.
qMin 95%	Lower limit of the amplitude range where the 95percentile of the total measured charges falls.
qMean	Mean value of the measured charges.
ϕMin	Mean inception phase angle.

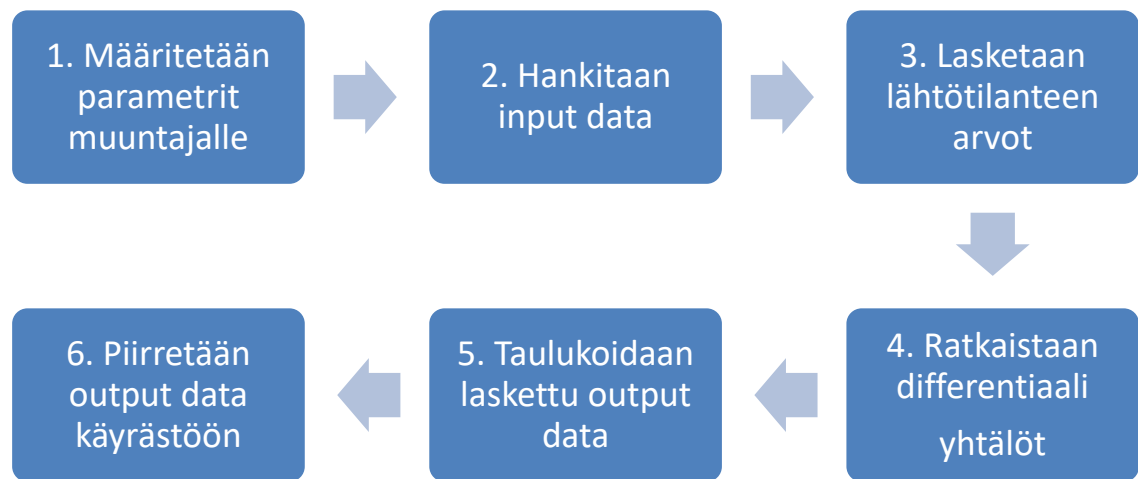
5 MUUNTAMOAUTOMAATIODATAN ANALYSOINTI

Tähän työhön otettiin lisäksi tekninen näkökulma jakelumuuntajien kunnonvalvontaan, jonka tarkoituksena on analysoida mittausdataa ja selvittää muuntajan ikääntyminen. Tavoitteena on selostaa, miten mittausdataa käsiteltiin, mitä laskentatyökalua sovellettiin ikääntymisen mallintamiseen ja lopuksi esitellään tulokset. Tämä on ajankohtainen aihe, joka tukee opinnäytetyön varsinaista aihetta ja täydentää koulutuksen asettamia tavoitteita.

5.1 Jakelumuuntamoiden mittausdatan käsittely

Toimeksiantaja toimitti kahden muuntajan pääkaaviot ja raportit SCADA:n keräämästä mittausdatasta, johon sisältyi mitattu muuntajan öljyn pintalämpötila θ_o sekä pienjännitepuolen kuormitusvirta I_L . Kuormavirran ja muuntajan nimellisvirran avulla voitiin määrittää kuormakerroin K yhtälön (1) mukaisesti. Hot Spot lämpötilan ja ikääntymisen laskentaa varten tarvitaan kuormakertoimen lisäksi vielä ympäristön lämpötila θ_a . Ympäristön lämpötila ladattiin ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta (Havaintojen lataus 2018) Tampellan havaintoasemalta. Laskentaa varten ei tarvita varsinaisesti muuntaja öljyn pintalämpötilaa, mutta sitä haluttiin verrata laskentatulokseen. Tämän vuoksi kolmanneksi input dataksi lisättiin vielä magneettinapin mittaama öljyn pintalämpötila θ_o .

Laskentaprosessi etenee vaiheittain kohdassa 2.4.2 esitetyllä tavalla. Tätä laskentaprosessia voidaan havainnollistaa (kuvio 6) yhdistämällä inputdata, esitetyt parametrit ja laskentausekkeet yhdeksi kokonaisuudeksi. Muuntajan ikääntymistä monitoroivat ohjausyksiköt noudattavat karkeasti samaa algoritmia. Mittalaitteet keräävät mittausdatan ohjausyksikköön, jossa se muunnetaan analogisesta mittaustiedosta digitaaliseksi. Seuraavaksi asetellaan parametrit, jonka jälkeen ohjausyksikkö käsittelee mittausdatan siihen ohjelmoidun laskenta-algoritmin mukaisesti. Lopuksi laskentatulokset voidaan tallentaa ja analysoida.



KUVIO 6. Laskentaprosessi jakelumuuntajan ikääntymisen määrittämiseksi. (IS 2026-7, 44)

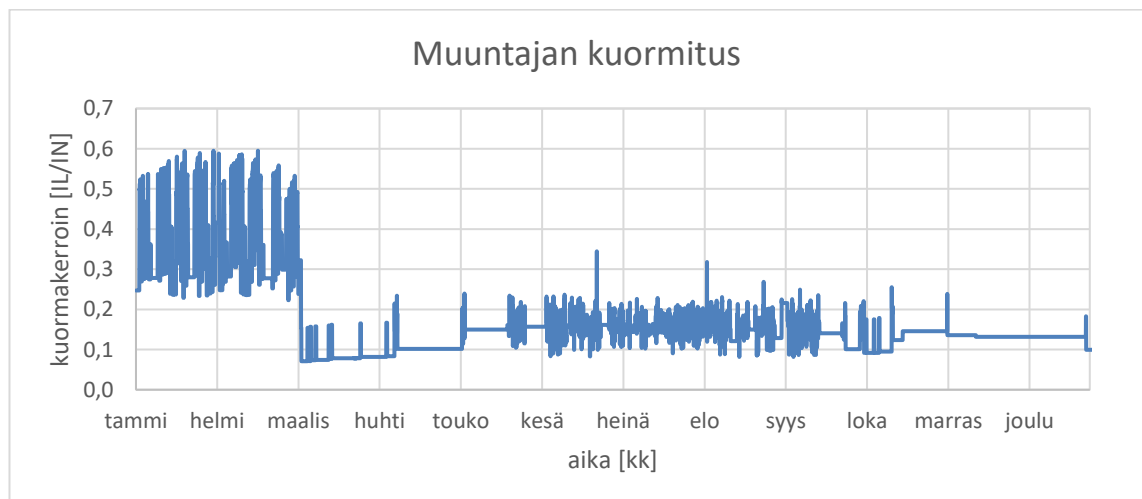
Mittausdataa käsiteltiin Excel taulukkolaskentaohjelmalla, jonka avulla laskettiin ulostulo data vaihe vaiheelta. Ulostulo datan laskettavat suureet olivat Top oil lämpötila θ_o yhtälön (6) mukaan, Hot Spot lämpötila θ_h yhtälön (10) mukaan sekä muuntajan ikääntyminen L yhtälön (13) mukaisesti. Nämä laskentalausekkeet esiteltiin kohdassa 2.4.2 ”ikäntymisen luonnontieteellinen perustelu”. Laskenta suoritettiin tunnin askelluksella vuoden ajalta. Parametrit otettiin kohdan 2.4.2 taulukosta 6 sarakkeesta ”distribution transformers”, jonka jälkeen laskettiin lähtötilanteen arvot öljyn pintalämpötilalle ja Hot Spot lämpötiloille yhtälöiden (2, 3 ja 4) mukaisesti. Seuraavassa vaiheessa määritettiin differentiaaliyhtälöt lähtötilanteen arvoille ja integroitiin lähtötilanteen arvot tarkastelta-valta ajanjaksolta yhtälöiden (5, 6 ja 7) mukaisesti. Lopuksi laskettiin kohdassa 2.4.2 esitetyllä tavalla muuntajan Hot Spot lämpötila ja ikääntyminen yhtälöiden (10 & 13) mukaan. Ikääntymisen yksikkö määräytyy askelluksen mukaan, jolloin ikääntyminen ilmoitetaan tunteina.

5.2 Analyysin pohjalta tehty arvio muuntajien käyttöiästä

Analysoitu mittausdata on otettu todellisesta kuormitusolanteeseen vuoden ajanjaksolta. Laskelmat suoritettiin kahdesta eri jakelumuuntajasta, joiden kuormitusaste oli erilainen. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka kuormitus vaikuttaa muuntajien ikääntymiseen. Ensimmäistä muuntajaa kuormitetaan noin 20 prosentin kuormalla ja toista muuntajaa kuormitetaan nimellisellä kuormalla. Laskennan tuloksissa esitettävät suureet ovat öljyn pintalämpötila, ympäristönlämpötila, kuormakerroin, ikääntyminen ja käämin kuumimman pisteen lämpötila. Lisäksi tehtiin vertailu mitatun- ja lasketun öljyn pintalämpötilan suhteen.

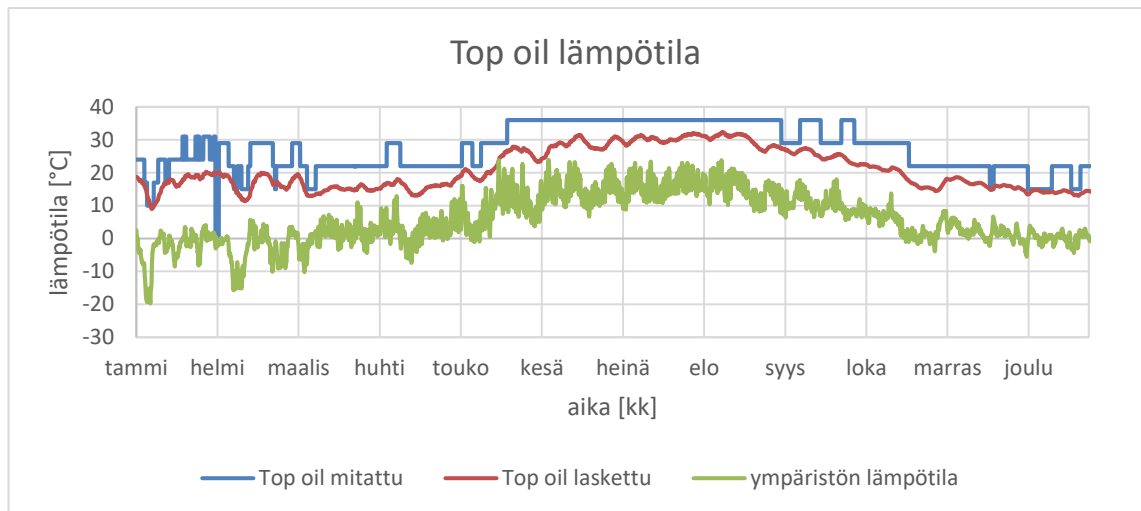
5.2.1 Muuntaja 1

Ensimmäisen tutkittavan jakelumuuntajan nimellisteho oli 1000kVA, jota kuormitetaan keskimäärin noin 20 prosentin kuormalla (kuvio 7). Tarkoituksena on esitellä analyysin tulokset eli laskettu output data. Output data käsittää siis Top oil lämpötilan, Hot Spot lämpötilan ja muuntajan ikääntymisen. Tuloksiin lisättiin ympäristön lämpötila, koska sillä on ratkaisevan tärkeä merkitys analysoitaessa tuloksia.



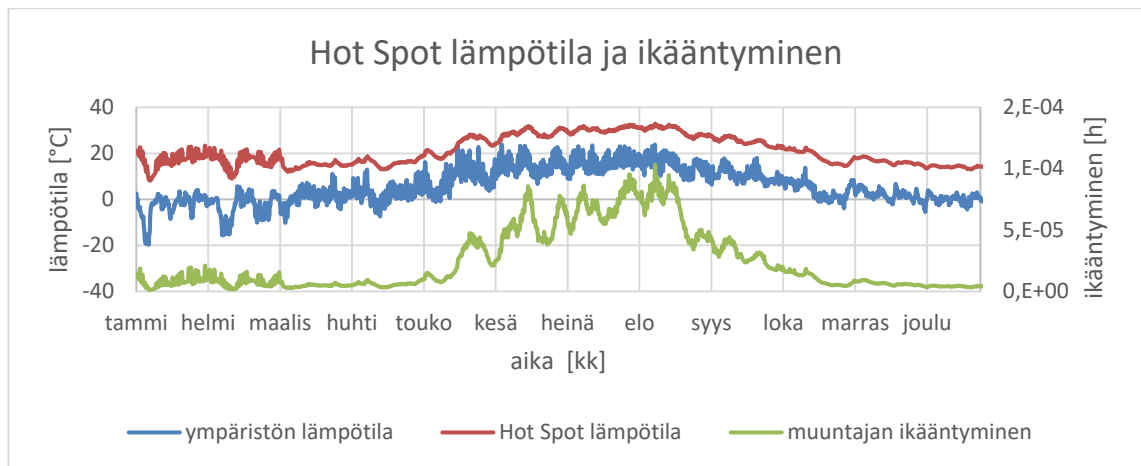
KUVIO 7. 1000kVA jakelumuuntajan kuormitus

Excel laski Top oil lämpötilan lähtöarvon yllättävän hyvin epävakasta lähtötilanteesta huolimatta. Laskentatuloksesta voidaan päätellä ympäristön lämpötilalla olevan suhteellisesti suurempi vaikutus Top oil lämpötilaan verrattuna kuormitukseen (kuvio 8). Tämä on havaittavissa selkeästi toukokuun ja lokakuun välisenä ajanjaksona. Lasketusta ja mitatusta Top oil lämpötilasta on havaittavissa voimakas lämpötilan lasku tammikuussa ja helmikuussa, johtuen äkillisestä ympäristön lämpötilan laskusta. Lisäksi lasketusta Top oil lämpötilasta saatiin vertailukelpoinen tulos verrattuna mitattuun Top oil lämpötilaan.



KUVIO 8. 100kVA jakelumuuntajan mitattu ja laskettu öljyn pintalämpötila vertailu suhteessa ympäristön lämpötilaan

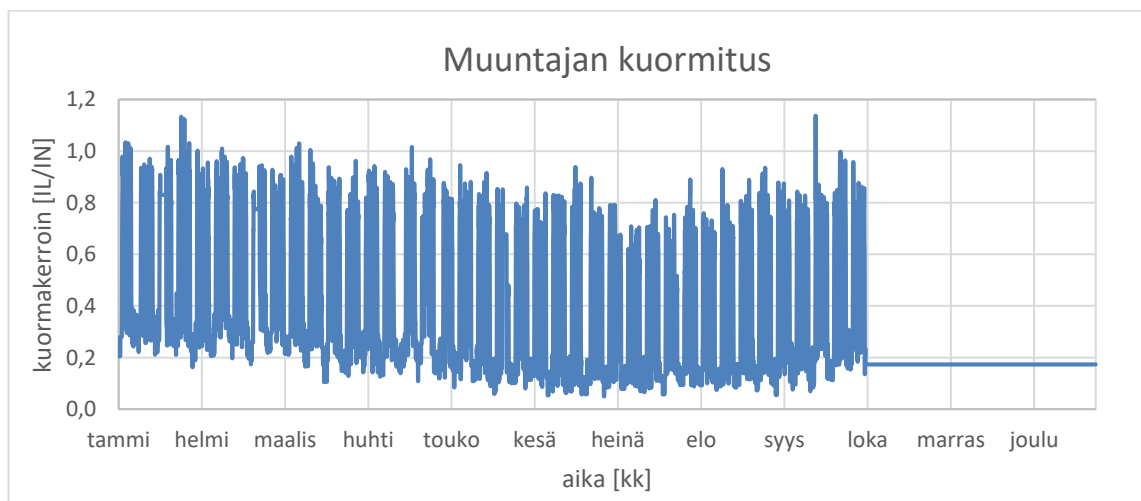
Viimeiset analysoitavat suureet olivat Hot Spot lämpötila sekä muuntajan ikääntyminen suhteessa ympäristön lämpötilaan. Hot Spot lämpötila ja ikääntyminen reagoivat selvästi kuormitukseen, joka on havaittavissa tammi- ja helmikuun välisenä ajanjaksona (kuvio 9). Lisäksi muuntajan ikääntyminen reagoi ympäristön lämpötilaan vielä voimakkaammin verrattuna Hot Spot lämpötilaan. Tästä voidaan päätellä olosuhteilla olevan selvä vaikutus käyttöikään, tämä tulos tukee kohdassa 2.4.1 esitettyä näkemystä.



KUVIO 9. 1000kVA jakelumuuntajan käämin kuumimman pisteen laskettu lämpötila suhteessa ympäristön lämpötilaan sekä muuntajan ikääntyminen

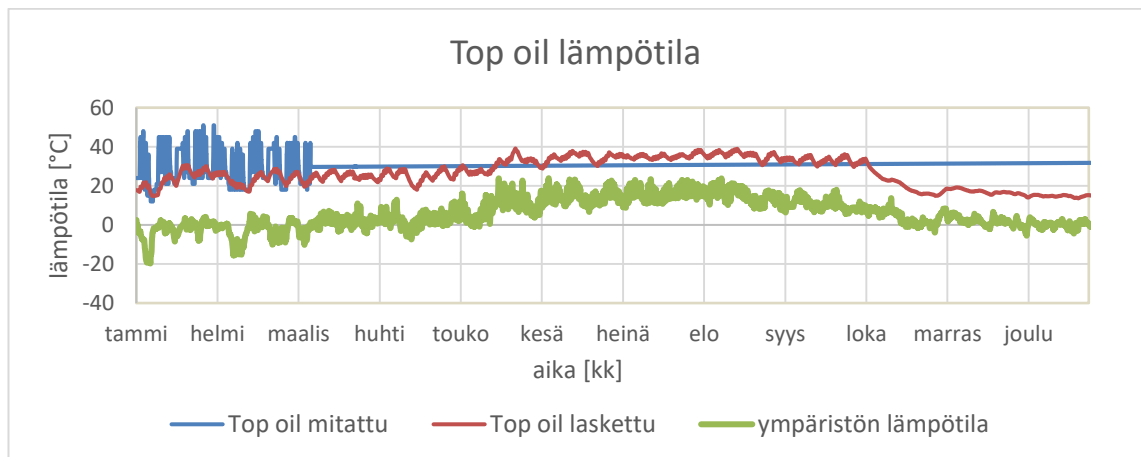
5.2.2 Muuntaja 2

Toisen tutkittavan jakelumuuntajan nimellisteho on 500kVA, jota kuormitetaan hetkellisesti lähes nimellisellä kuormalla (kuvio 10) ja osittain ylikuormalla. Vertailun vuoksi tämän muuntajan tulokset on esitetty samalla tavalla kuin edellisenkin muuntajan. Vertailuun otettiin tarkoituksella mukaan kuormitettu muuntaja, jotta voitaisiin tutkia muuntajien tulosten eroja keskenään. Toinen mielenkiintoinen yksityiskohta tämän muuntajan osalta kohdistuu kuormituksen luonteeseen ja vakiokuormaan vuoden lopussa.



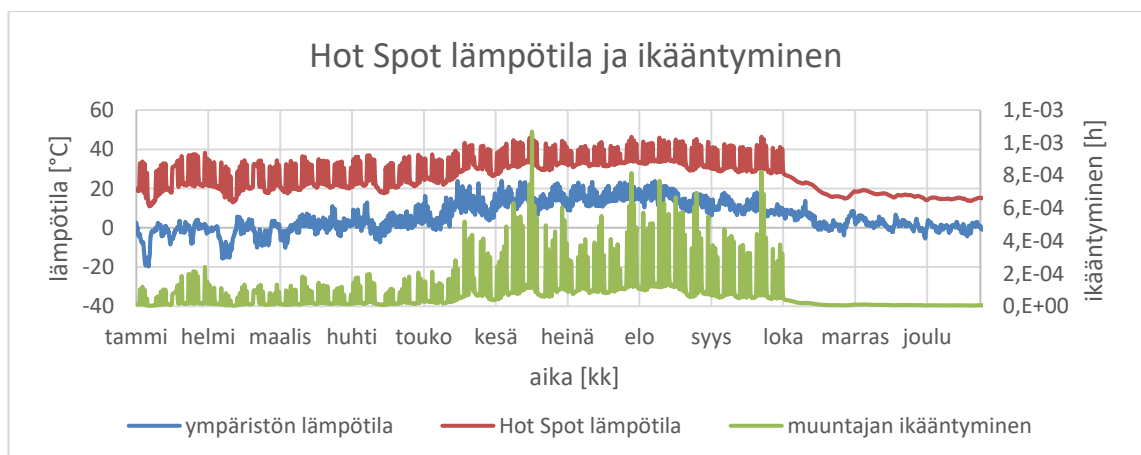
KUVIO 10. 500kVA jakelumuuntajan kuormitus

Muuntajan öljyn pintalämpötilan osalta laskentatulokset on vertailukelpoinen mitatun Top oil lämpötilan kanssa. Ainoa poikkeus verrattuna ensimmäiseen muuntajaan kohdistuu vuoden lopussa loka-joulukuun väliselle ajanjaksolle mitattuun Top oil lämpötilaan (kuvio 11). Tätä mittaustulosta on hankalaa perustella etenkin pienellä vakiokuormalla, koska kuormituksen luonteesta riippumatta Top oil lämpötilan pitäisi laskea ympäristön lämpötilan laskiessa. Magneettinapin Top oil lämpötilan mittaustulos ei ole luotettava.



KUVIO 11. 500kVA jakelumuuntajan mitattu ja laskettu öljyn pintalämpötila vertailu suhteessa ympäristön lämpötilaan

Lopuksi analysoidaan Hot Spot lämpötilaa ja muuntajan ikääntymistä ympäristön lämpötilan kanssa. Ensimmäinen havainto kohdistuu tutkittavien suureiden käyttäytymiseen, suhteessa kuormitukseen. Hot Spot lämpötila ja ikääntyminen reagoivat kuormituksen muutokseen ja ympäristön lämpötilaan samalla tavalla. Lisäksi kuormituksella on selvä vaikutus Hot Spot lämpötilaan, joka vaihtelee noin 20 celsiusastetta (kuvio 12).



KUVIO 12. 500kVA jakelumuuntajan käämin kuumimman pisteen laskettu lämpötila suhteessa ympäristön lämpötilaan sekä muuntajan ikääntyminen

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Sopiva ratkaisu öljyn lämpötilanmittaukselle kannattaa toteuttaa vaihtamalla nykyinen öljyn lämpötilamittari ABB Comem Operating Unitin eOTI lämpötilamittariin. Perustelu tälle ratkaisulle oli rinnakkaisen lämpötila mittauksen säilyttäminen ja lämpömittarin siirrettävyyden toteutuminen. Kustannustehokkuutta arvioitaessa absoluuttiset hankintakustannukset jäävät vähäisiksi, koska mittalaitteiden siirtäminen koskee vain osaa jakelumuuntajien lämpötilamittareista. Lisäksi asiakas voi tilausvaiheessa määrittää tarvittavat ominaisuudet mittalaitteelta, jolloin yksittäisen laitteen hankintakustannuksia voidaan alentaa. Etälaukaisu voidaan toteuttaa asentamalla apurele nykyisen laukaisukelan rinnalle. Lisäksi tämä ratkaisu oli kustannustehokkain mahdollisista vaihtoehdoista, joilla etälaukaisu voitiin toteuttaa.

Osittaispurkausmittauksiin liittyy useita haasteita, joiden vuoksi mittalaitteistojen valinta ei ole yksiselitteisesti ratkaistavissa. Keskeinen haaste verkonhaltijan näkökulmasta liittyy siihen, ettei osittaispurkauksia sisältävän johto-osuuden uusimisajankohtaa voida määrittää tarkasti. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei kaapeleiden investointitarvetta ei voida varmuudella ennakoida tarkasti. Toinen ongelma liittyy sekakaapeliverkkoon, jossa esiintyy siirtymäjatkoksia. Siirtymäjatkokset vaikuttavat jatkuvan On-line mittauksen luotettavuuteen.

Sopiva laitteistovalinta jatkuvan On-line mittauksen osalta kohdistui IPEC:n ASM-laitteistoon. Perusteluna valinnalle oli mahdollisuus yhdistää ASM-laitteiston tiedonhallintajärjestelmä asiakkaan verkkotietojärjestelmään. Tämä ominaisuus helpottaa purkausten seuranta ja tulosten dokumentointia huomattavasti. Toisaalta järjestelmien yhdistäminen edellyttää päivityksiä verkkotietojärjestelmään ennen kuin mittaustulokset ovat siirrettävissä suoraan verkkotietojärjestelmään. Yksi huono puoli laitteistossa on siinä, ettei se sovellu kaasueristeisien kojeistojen osittaispurkausten seurantaan. Toisaalta ensisijainen tavoite oli seurata kaapeleiden osittaispurkauksia.

Yleisesti voidaan todeta On-line mittausmenetelmän olevan kustannustehokkain ratkaisu purkausten seurantaan osana kunnonvalvontaa. Kustannustehokkuuden kannalta jakeluverkonhaltijan tulisi kohdentaa jatkuvaa On-line mittausta KAH-arvoltaan suurille keskijännitelähdöille. Lisäksi ilman kosteudella arvellaan olevan vaikutusta mittaustuloksiin, mikäli suhteellinen ilmankosteus on suurempi kuin 90%, tästä syystä olisi suositeltavaa käyttää olosuhdetietojen mittausta purkausten seurannassa. (Keränen, J & kaikki. 2018, 127)

Käyttöönottomittauksiin ja kunnonvalvontamittauksiin soveltuva Off-line laitteistovalinta kohdistui Eurolaite Oy:n toimittamaan Baurin Frida PD-TaD 60 mittalaitteistoon. Perustelu valinnalle liittyi laitteiston käytettävyyteen pienen kokonsa vuoksi. Lisäksi mitattavien kaapeleiden pituus TSV:n verkossa on käytännössä alle kilometrin, kun mittalaitte pystyi mittaamaan luotettavasti 2,5km johto-osuuden. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa lisäksi täysikestoisuus testi, joka mahdollistaa mittausten suorittamisen nopeammin verrattuna yksittäiseen mittaukseen. Täysikestoisuus testihän tarkoitti sitä, että häviökerroin, - VFL - ja osittaispurkausmittaus voidaan suorittaa yhdellä mittauksella.

Toisaalta Off-line mittaukset antavat tarkempaa tietoa kaapeleiden kunnosta, tästä syystä tulisi arvioida myös tämän mittausmenetelmän tarpeellisuutta. Off-line mittauksia voisi soveltaa esimerkiksi sellaisille johto-osuuksille, joissa tiedetään olevan purkausaktiivisuutta tai käyttöönottomittauksissa sormenjälkitiedon saamiseksi. Käyttöönottomittauksiin soveltuu myös Pry-Cam mittalaitte (On-line mittaus), joka on kustannustehokkaampi vaihtoehto nopeuden ja helppouden takia verrattuna Off-line mittaukseen. Tästä huolimatta Off-line mittalaitte havaitsee purkaukset yleisemmin, lisäksi Pry-Cam ilmoittaa purkauksen suuruuden eri yksikössä (ks. sivu 51). Tästä syystä näiden mittausmenetelmien tulokset eivät ole välttämättä vertailukelpoisia keskenään. Häviökerroinmittauksissa on suositeltavaa mitata olosuhdetiedot eli lämpötila ja suhteellinen ilman kosteus mitattavan johto-osuuden molemmista päistä (Keränen, J & kaikki. 2018, 127)

Mittauspalvelun osalta valinta kohdistui DEKRAAN. Perustelu valinnalle liittyi heidän palvelukonseptin laajuuteen. Käytännössä he voivat suorittaa mittaukset Off-line ja On-line mittalaitteistoilla kustannustehokkaasti. Näiden mittausten osalta tulosten dokumentointi pitää toistaiseksi suorittaa manuaalisesti. Esitys verkkotietojärjestelmään siirrettävistä tunnusluvuista häviökerroinmittauksen ja osittaispurkausmittauksen osalta esitettiin kohdassa 4.5.

Muuntajan ikääntymisen määrittäminen olosuhdetiedoilla ja kuormituksella perustuu vain arvioon, jonka avulla on saavutettu tutkimusten mukaan lupaavia tuloksia. Laskenta-algoritmillä lasketun Top oil lämpötilan ja mitatun Top oil lämpötilan välillä saavutettiin hyvä korrelaatio. Toisaalta laskennan Hot Spot lämpötilan ja ikääntymisen tuloksille oltaisiin saatu eksaktimpi vertailu, mikäli Hot Spot lämpötilasta olisi ollut saatavilla mitaustiedot. Tällöin voitaisiin saada parempi kokonaiskuva muuntajan ikääntymisestä sekä voitaisiin verrata kaikkia laskentatuloksia mittaustuloksiin. Laskentatulosten tarkkuudessa havaittiin hieman eroa, kun kuormakerroin määritettiin hetkellisen kuorman ja tehohuipun osamäärällä. Laskentatulosten korrelaatio mittaustuloksiin parani hieman verrattuna nimellisteholla määritettyyn kuormakertoimeen. Tämä selittyy osin sillä, että jakelumuuntajia ei käytännössä kuormiteta jatkuvalla nimelliskuormalla.

Saatujen tulosten valossa jakeluverkon muuntajille ei ole tarvetta hankkia valvontalaitteistoa ikääntymisen seurantaan. Tämä edellyttää olosuhteiden ja kuormituksen pysymistä vakaina (ks. kohta 2.4.1 sivu 21). Laskentatulosten perusteella ympäristön lämpötilalla on käytännössä suhteellisesti suurempi vaikutus muuntajan ikääntymiseen, verrattuna kuormitukseen. Ympäristön lämpötila vaikuttaa suoraan Top oil lämpötilaan ja kuormitus suoraan käämityksen lämpötilaan. Toisaalta ikääntymisen seuranta voidaan harvita sellaisille verkon osille, jotka ovat kriittisiä keskeytyksettömän sähkönjakelun vuoksi.

Jatkuvan On-line mittauksen osalta voi olla mahdollista yhdistää osittaispurkausmittalaitteiston tiedonhallintajärjestelmä asiakkaan omaan verkkotietojärjestelmään ja muihin tietojärjestelmiin. Tämä edellyttää olemassa olevan Trimble NIS verkkotietojärjestelmän päivittämistä. Tällä toimenpiteellä jakeluverkon haltija voi saavuttaa merkittävää taloudellista hyötyä, helpottaen omaisuudenhallintaa kohdentamaan resurssit tehokkaasti. Jatkossa olisi syytä selvittää yksityiskohdat järjestelmien yhdistämisestä yhdessä jakeluverkonhaltijan, laitteiston toimittajan ja Trimble NIS:n tuotekehitystiimin kanssa. Tässä voisi olla aihetta myös tieto- ja viestintäteknikan opinnäyte- tai diplomityölle.

LÄHTEET

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. 1. painos. Helsinki: Otatiето Oy

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Luettu 20.3.2018. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K & Palva, V. 2015. Suurjänniteteekniikka. Neljäs korjattu ja täydennetty painos. Helsinki: Otatiето / Gaudeamus Helsinki University Press

Pakonen, P. 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi. Energiäteollisuuden tutkimusseminaari 30.1.2018. Helsinki: Marina Congress Center

Wagenaars, P. 2010. Integration of Online Partial Discharge Monitoring and Defect Location in Medium-Voltage Cable Networks. Eindhovenin teknillinen yliopisto. Väitöskirja

Siemens tuotekatalogi. 2017. Switchgear Type 8DJH for Secondary Distribution Systems up to 24 kV, Gas-Insulated. PDF-tiedosto. Tulostettu 13.3.2018. <http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/en/mv/medium-voltage-switchgear/gis-secondary-distribution-systems/pages/8djh.aspx>

SFS 6001. 2015. Suurjännitesähköasennukset. 4. painos. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 7.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi.elib.tamk.fi/fi/index/hakutulos.html.stx>

Virtanen, J. 2018. Tampereen Sähköverkko Oy. Kuva jakelumuuntajan lämpötilamittarista muuntamossa. Sähköpostin liite. JPG-tiedosto. Tulostettu 20.4.2018.

Järvensivu, J.P. 2018. Tampereen Sähköverkko Oy. Jakelumuuntamon pääkaavio ja lämpölaukaisupiirin johdotuskaavio. Sähköpostin liite. PDF-tiedosto. Tulostettu 13.3.2018

Autio, L. 2011. Muuntamoautomaatio esimerkkejä ABB tuotteista ja toteutuksista. sähköpostin liite. PDF-tiedosto. Tulostettu 23.4.2018

ABB:n tuoteopas Wireless Controller REC601/603. PDF-tiedosto. Tulostettu 24.4.2018 <http://new.abb.com/products/ABBREC601A1AAAG1A>

Sihvo, P. 2017. Tampereen sähköverkko Oy:n sähkönjakelun keskeytystilastot. Sähköpostin liite. Excel-tiedosto. Tulostettu 23.3.2018.

Hyvönen, P. 2003. Keskijännitteisten maakaapelijärjestelmien osittaispurkausmittaukset käyttöpaikalla. Espoon teknillinen korkeakoulu. Suurjänniteteekniikan laboratorio. Lisensiaatintyö.

Nousiainen, K. 2001. TESLA raportti 44/2001. Osittaispurkausmittaukset ja kaapeleiden jatkuvatoimisessa kunnonvalvonnassa. Tampere University of technology

CDFI Participants appointed research group at National Electrical Energy Testing, Research & Applications Center. 2010. Diagnostic Testing of Underground Cable Systems. Research report. Georgia Institute of Technology. Electrical and Computer Engineering. Georgia: United States of America

Sihvo, P. 2017. Tampereen sähköverkko Oy:n sähkönjakelun johtoverkosto. Sähköpostin liite. Excel-tiedosto. Tulostettu 23.3.2018.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto Oy

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. TAMK:n Sähkövoimatekniikan laboratoriot 1,2 ja 3 opintojaksojen opetusmateriaali. PDF-tiedosto. Tulostettu. 5.1.2018.

EA Technology tuote-esite Cable Data Collector mittalaitteesta s.12. PDF-tiedosto. Tulostettu 1.3.2018. <https://www.eatechnology.com/products/partial-discharge-solutions/cabledata-collector/>

Keränen, J., Muranen, S., Pakonen, P & Verho, P. 2018. Keski-jännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Loppuraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopiston Sähköenergiatekniikan laboratorio.

Toivari, T. Eurolaite Oy. Esittely osittaispurkausmittauksista maakaapeliverkossa. sähköpostin liite. PDF-tiedosto. Tulostettu 2.3.2018.

Anjala, R & Taustaryhmä. 2008. SA 2:08 Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen. Energiateollisuuden julkaisema verkostosuositus. Helsinki: Adato Energia Oy. TAMK:n Sähköverkkojen suunnittelu opintojakson opetusmateriaali. PDF-tiedosto. Tulostettu. 5.1.2018.

Lehtinen, M & Nikkari, J. 2009. Uusi elämä muuntajalle. ABB Oy:n asiakaslehti Power & Automation. 5 (3), 7-9. PDF-tiedosto. Tulostettu 20.3. 2018
<http://www.abb.fi/cawp/fiabb254/2592fbbe08c27a39c12570ed003f36b1.aspx>

IS 2026-7. 2009. Power transformers, Part 7: Loading guide for oil immersed Power Transformers. New Delhi, India: Bureau of Indian Standards (BIS). Luettu 19.3.2018.
<https://archive.org/stream/gov.in.is.2026.7.2009/is.2026.7.2009#page/n0/mode/2up>

Digalovskic, M., Najdenkoskib, K & Pejovskia, D. 2017. Research article: Impact of different harmonic loads on distribution transformers. Special issue of the 4th Colloquium "Transformer Research and Asset Management" volume 202, 76-87. Luettu 20.3.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817342352>

Comem käyttöohje. 18.2.2015. Käämityksen- ja öljyn lämpötilan mittalaitteelle. PDF-tiedosto. Tulostettu 2.3.2018 <http://www.comem.com/docs/default-source/prodotti-pdf/accessori-uscita-digitale-e-analogica/thermometers/manuale-termometri.pdf?sfvrsn=5>

Gorgan, B., Notingher, P.V., Wetzer, J., Verhaart, H.F.A., Wouters, P.A.A.F., van Schijndel, A & Tanasescu, G. 2012. Calculation of the remaining lifetime of power transformers paper insulation. Research report. Eindhoven University of Technology. Electrical Energy System, Power Grid studies. Published in. 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 24-26 May, Barsova, Romania. PDF-tiedosto. Tulostettu 19.4.2018 <https://research.tue.nl/en/publications/calculation-of-the-remaining-lifetime-of-power-transformers-paper>

Cheng, L., Wang, G., Yang, B., Yu, T & Zhou, L. 2018. A Practical Case Study: Hot Spot Temperature and Grey Target Theory-Based Dynamic Modelling for Reliability Assessment of Transformer Oil-Paper Insulation Systems. An open Access Journal of Energy Research. Electrical Power and Energy System 11 (1), 5.

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Luku 11: Tehomuuntajat. PDF-tiedosto. TAMK:n Sähkövoimatekniikan laboratoriot 1,2 ja 3 opintojaksojen opetusmateriaali. PDF-tiedosto. Tulostettu. 5.1.2018.

Nousiainen, K. 2001. TESLA raportti 43/2001. Monitoring the hot-spot temperature and cumulative ageing of distribution transformers. Tampere University of technology

LumaSense Technologies Brochure. 2014. Fiber Optic Temperature Monitoring. PDF-tiedosto. Julkaistu 26.6.2014. Tulostettu 22.3.2018. <https://www.lumasenseinc.com/EN/solutions/global-energy/transmission-distribution/transformers/winding-hot-spot-temperature/winding-hot-spot-monitoring.html>

Aura, L & Tonteri, A.J. 1986. Sähkämiehen käsikirja 2. Porvoo: WSOY

ABB:n tuotelehti 12.6.2017. Comemin valmistamasta käämityksen- ja öljyn lämpötilan eOTI/eWTI mittalaitteesta. PDF-tiedosto. Tulostettu 2.3.2018. <http://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/measurement-and-safety-devices/temperature-indicator/oil-temperature-indicators/digital-and-analog-output>

Comem katalogi. 18.2.2015. WTI-OTI Thermometers. PDF-tiedosto. Tulostettu 2.3.2018 <http://www.comem.com/docs/default-source/prodottipdf/accessori-elettromeccanici/termometri-ed-immagini-termiche/termometri-catalogo.pdf?sfvrsn=4>

Siemens esitteet ja linkit. LV 1 T-mittatiedot. 2009. SENTRON Switching and Protection Devices – Molded Case Circuit Breakers. PDF-tiedosto. Tulostettu 29.4.2018 http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuuden_tuotteet_ja_ratkaisut/tuotesivut/pienjanitekkojeet/kytkenta_suojaus_ja_ohjaus/kompaktikatkaisijat_sentron.htm

Seba KMT tuote-esite 6.6.2014. TDM 4540-P-TD-PD mittalaitteistosta. PDF-tiedosto. Tulostettu 5.4.2018. <http://power.sebakmt.com/en/products/power-networks/cable-diagnosis/partial-discharge-diagnosis/tds-nt.html>

Eurolaite Oy:n datalehti 06.2017. Frida PD-TaD 60 mittalaitteistosta s. 1. PDF-tiedosto. Tulostettu 25.4.2018. <https://www.eurolaite.fi/tuotteet/tyokalut-ja-mittalaitteet/mittalaitteet/kaapeliverkon-testaus-ja-diagnosointi/>

Abbas, A. 2018. IPEC Brochure - PD Monitoring compressed. Sähköpostin liite. PDF-tiedosto Tulostettu. 4.4.2018

IPEC tuote-esite. 21.7.2015. ASM Permanent PD Monitoring System for Cables and Switchgear. PDF-tiedosto. Tulostettu 1.3.2018 <http://www.ipecc.co.uk/pd-products/asm-e-permanent-pd-monitor/>

Abbas, A. Myynti-insinööri. 2018. Osittaispurkauslaitteistojen esittely. Skype-palaveri ja haastattelu 27.4.2018. klo 16-17 suomen aikaa. Haastattelija Kettunen, M. Tampere.

Johnson, D. 2018. EA Technologyn esittely ASTUTE Monitoring Services palvelukonseptista. sähköpostin liite. PDF-tiedosto. Tulostettu 18.4.2018

Johnson, D. Vanhempi konsultti. 2018. Osittaispurkauslaitteistojen esittely. Skype-palaveri ja haastattelu 18.4.2018. klo 14-15 suomen aikaa. Haastattelija Kettunen, M. Tampere.

Keränen, J. keskijännitekaapeleiden kuntotarkastusten asiantuntija. 2018. Tiedustelu mittauspalveluista. Sähköpostiviesti. juha.keranen@dekra.fi. Luettu 26.2.2018

Muranen, S. 2016. PRY-CAM Uusinta teknologiaa osittaispurkausten diagnosointiin. sähköpostin liite. Tulostettu 6.3.2018

Koskinen, M. Osittaispurkausmittausten asiantuntija. 2018. Haastattelu 29.3.2018. Haastattelija Kettunen, M. Tampere.

Lahti, J. Tekninen myyntipäällikkö. 2018. Tiedustelu mittauspalveluista. Sähköpostiviesti. joonas.lahti@prysmiangroup.com. Luettu 17.4.2018

Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. Säähavainnot ilmanlämpötilasta tunnin havaintovälillä aikaväliltä 1.1-31.12.2017 Tampellan havaintoasemalta. Excel-tiedosto Tulostettu 20.3.2018 <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>