



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA ALHAINEN
JAKOKESKUSTEN SÄHKÖISTEN LIITOSTEN VIKAANTUMISME-
KANISMIT JA SÄHKÖPALOT
Diplomityö

Tarkastaja:
tutkimuspäällikkö Kari Lahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 3. joulukuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ALHAINEN, JUHA: Jakokeskusten sähköisten liitosten vikaantumismekanismit ja sähköpalot

Diplomityö, 106 sivua, 23 liitesivua

Helmikuu 2015

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: tutkimuspäällikkö Kari Lahti

Avainsanat: Jakokeskus, sähköpalo, sähköpalon ennaltaehkäisy

Sähköpalokuolemat ovat vähentyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana, mutta sähköpalojen aiheuttamat taloudelliset haitat ja vahingot yhteiskunnalle ovat samaan aikaan kasvaneet voimakkaasti Suomessa. Sähköpalojen välittömien seurauksien lisäksi palot aiheuttavat usein välillisesti tuotannon tai toiminnan keskeytymisen sekä haittaa palon lähellä sijainneiden tilojen käytössä. Sähköisten liitosten vikaantumiset verkon solmukohtissa ja erityisesti jakokeskuksissa aiheuttavat merkittävän osan sähkölaitteistoista johtuvista sähköpaloista ja -vaaroista. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää sähköisten liitosten vikaantumismekanismien perimmäisiä syitä, jolloin vikaantumista voitaisiin hallita huolto ja kunnossapitotoimenpiteillä paremmin ja näin ollen ennaltaehkäistä sähköpaloja.

Työ jakaantuu teoria- ja tutkimusosuuteen. Teoriaosuudessa käsitellään aikaisempia sähköpaloihin liittyviä tutkimuksia ja julkaisuja sekä perehdytään jakokeskusten, sähköisten liitosten ja komponenttien ominaisuuksiin sekä olemassa oleviin kunnonhallinnan menetelmiin ja sähköpalojen ennaltaehkäisyyn. Tutkimusosuus koostuu jakokeskusten vikaantumista käsittelevän kyselyn ja muun kirjallisen tutkimusmateriaalin analysoinnista sekä vikaantuneiden komponenttien analysoinnista ja vikatilanteiden mallintamisesta.

Tutkimuksen tulosten pohjalta on muodostettu malli palovaarallisten liitosten muodostumisesta ja siihen vaikuttavista muuttujista. Lisäksi on käsitelty eristeiden vikaantumista ja erityistapauksena ruuvi- ja pultiliitoksen löystymiseen vaikuttavia tekijöitä. Huolto ja kunnossapitotoimenpiteiden ja sähköpalojen ennaltaehkäisyn osalta on muodostettu malli palovaarallista vikaa ennakoivista merkeistä sekä pohdittu eri kunnossapitomenetelmien soveltuvuutta sähköpalojen ennaltaehkäisyyn. Tutkimuksen tuloksena on luotu myös toimenpideohjeistus eri sähköalan toimijoille jakokeskuksissa tapahtuvien sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi.

Tutkimus osoittaa, että tutkituilla mekanismeilla on vaikutusta sähkölaitteistojen vikaantumiseen ja sitä kautta sähköpalojen esiintymiseen. Tutkimuksen perusteella sähköisten liitosten vikaantuminen palovaaralliseksi ei myöskään ole useasti seurausta yhdestä tekijästä, vaan hankalasti hahmotettava kokonaisuus, jonka riskiä ei voida minimoida ilman säännöllistä ja kattavaa huoltoa ja kunnossapittoa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

ALHAINEN, JUHA: Failure mechanisms and fires caused by electrical installations in switchgear assemblies

Master of Science Thesis, 106 pages, 23 Appendix pages

February 2015

Major: Power systems and markets

Examiner: Adjunct professor Kari Lahti

Keywords: Switchgear, electrical fire, prevention of electrical fire

During the last decade, there has been a decrease in the number of human lives lost in fires originated from electrical installations. But at the same time, economical costs and damage to the society have been remarkably increased in Finland. In addition to the direct material consequences of the fires, indirect effects are interruptions in production or business and in the use of the nearest buildings or premises. Failures in electrical connections significantly contribute to electrical fires or risks in the network nodes and particularly in the switchgear assemblies. The objective of this study was to find the root causes of failure mechanisms in electrical connections and to suggest service and maintenance operation methods to better prevent electrical fires.

In the theoretical part of this study, earlier studies and publications related to electrical fires are reviewed. The focus is on switchboards, electrical connections and components as well as on the characteristics of the existing maintenance management methods and electrical fire prevention. In the empirical part of the study, survey material and faulty components are analysed and laboratory findings from failure situation modelling are presented.

As a result of this study, a model of failure development and a list of variables increasing the risk of failure in electrical joints are presented. Aspects of failure mechanisms in insulation materials and screw and bolt joints are included. The signs indicating future risks of failure are considered regarding service and maintenance operations improving fire prevention.

The study shows that the mechanisms presented here contribute to failures in electrical equipment and thus to the occurrence of electrical fires. The hazardous failure development infrequently results from one factor alone but is a combination of several factors and risks cannot be minimized without regular and comprehensive service and maintenance.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry:n toimeksiannosta helmikuun ja joulukuun välisenä aikana vuonna 2014. Tutkimus liittyy Sähkö- ja teleurakoitsijaliiton ja Turvallisuus- ja kemikaaliviraston sähköturvallisuutta edistävään yhteistyöhön ja on jatkoa Turvallisuus- ja kemikaaliviraston selvityksille sähköpalojen syttymissyistä. Tutkimuksen on omalta osaltaan mahdollistanut myös Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry.

Työn tarkastajana Tampereen teknillisen yliopiston puolesta toimi tutkimuspäällikkö Kari Lahti, ja työn ohjausta antoivat Sähkö- ja teleurakoitsijaliiton puolesta tekninen johtaja Esa Tiainen ja Turvallisuus- ja kemikaaliviraston puolesta ylitarkastaja Sakari Hatakka. Haluan kiittää heitä kaikkia työn kommentoinnista, avusta, asiantuntemuksesta ja panoksesta, jonka he pyyteettömästi ovat luovuttaneet tutkimuksen hyväksi.

Tapasin ja haastattelin tutkimuksen aikana lukuisia henkilöitä, joiden pitkä kokemus sähköalasta ja sähköpalojen tutkinnasta oli suurena apuna kokonaisuuden hahmottamisessa. Erityiskiitokset haluan esittää Onnettomuustutkintakeskuksen johtajalle, dosentti Veli-Pekka Nurmelle, jonka kanssa käyty keskustelu sähköpaloista ja sähköalan kehityksestä inspiroi minua tulevaisuudessakin työssäni kehittämään sähköturvallisuutta erityisesti sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi.

Haluan kiittää lisäksi kaikkia tutkimukseen aikaansa ja materiaalia luovuttaneita tahoja. On ollut hieno nähdä, miten eri toimijoiden oma avoin ja aktiivinen ote näkyy sähköpaloja ennaltaehkäisevässä työssä. Avoimesta ja tutkimuksen kannalta merkittävästä panoksesta haluan kiittää siten myös If Vahinkovakuutusyhtiö Oy:n vahingontorjuntapäällikköä Niko Sattoa. Tutkimuksessa välittyvät myös monien muiden sähköpalojen ja -laitteistojen kanssa pitkään toimineiden tahojen havainnot. Näistä tahoista aktiivisimpina haluan kiittää Pimatest Oy:n valtuutettua tarkastajaa Jorma Korkaloo ja RTL-Palvelut Oy:n valtuutettua tarkastajaa Reijo Lintulaa lukuisista neuvoista ja omien kokemuksien jakamisesta tutkimuksen hyväksi.

Kiitos myös perheelleni pitkämielisyydestä ja ymmärtävyydestä tutkimuksen vaatimaa ajankäyttöä ja matkustamista kohtaan. Poikani Oton sanoin: ”Mennään vaan, sitte hän mie nään maailmaa.”

Rovaniemellä 14.1.2015

Juha Alhainen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Tutkimuskysymykset	2
2.1	Työn lähtökohta	2
2.2	Tutkimuskysymykset ja -oletukset.....	3
2.3	Tutkimuksen rakenne	5
3	Sähköpalotutkimukset Suomessa	6
3.1	Aikaisemmat tutkimukset ja selvitykset sähköpaloista.....	6
3.2	Sähköisten liitosten vikaantuminen.....	7
3.2.1	Liitosmateriaalit	7
3.2.2	Liitostekniikan vaikutus vikaantumiseen.....	7
3.2.3	Vikaantuneessa liitoksessa havaittavat muutokset	8
3.2.4	Komponenttien ominaisuuksien vaikutus vikaantumiseen.....	8
3.2.5	Liitoksia ympäröivien eristerakenteiden vaikutus vikaantumiseen	9
3.2.6	Suojalaitteiden vaikutus vikaantumisen hallittavuuteen.....	9
3.2.7	Sähköpaloille tyypilliset ilmiöt.....	9
3.2.8	Ulkoisten olosuhteiden vaikutus sähköpaloihin	10
3.2.9	Huollon ja kunnossapidon vaikutus liitosten vikaantumiseen.....	11
3.2.10	Vikaantumisen elinkaari	11
3.2.11	Katsaus sähköalan kehitykseen sähköpalojen kannalta.....	12
4	Jakokeskusten, sähköisten liitosten ja komponenttien ominaisuudet	13
4.1	Jakokeskuksia koskevat määräykset	13
4.2	Yleisimmät komponentit.....	15
4.3	Liitostekniikat	16
4.3.1	Liitostekniikoiden keskeisimmät ongelmat	17
4.3.2	Korroosion ja muiden kemiallisten muutosten vaikutukset.....	19
4.4	Keskeisimmät liitosten vikaantumiseen vaikuttavat sähkötekniset suureet... 24	
4.4.1	Virran vaikutus	24
4.4.2	Jännitteen vaikutus.....	24
4.4.3	Kokonaisenergian kestävyys (I^2t -arvo).....	25
4.4.4	Staattinen sähkövaraus.....	25
4.4.5	Sähköverkon häiriöiden vaikutus.....	26
5	Sähkölaitteistojen kunnonhallinta ja sähköpalojen ennaltaehkäisy	28
5.1	Kunnossapidon lajit.....	28
5.1.1	Korjaava kunnossapito.....	29
5.1.2	Ennakoiva kunnossapito	29
5.2	Jakokeskusten kunnonvalvonta.....	31
5.2.1	Säännölliset aistinvaraiset tarkastukset.....	31
5.2.2	Lämpökuvaus.....	31
5.2.3	Virta- ja jänniteanalyysi (sähkönlaadun mittaukset)	33
5.2.4	Muut menetelmät	33
5.3	Jakokeskusten huolto ja kunnossapito	34
5.4	Automaattinen kunnonhallinta ja vianehkäisy	35
5.4.1	Maasulun valvonta.....	35
5.4.2	Lämpöantureilla toteutettu valvonta	35
5.4.3	Kipinöinnin ja valokaaren valvonta.....	35
5.4.4	Jännitevalvontalaite.....	36
5.4.5	AMR-valvonta	36
5.5	Palon rajaaminen palovaarallisen vian esiintyessä	37

6	Tehdyt tutkimukset ja saadut tulokset.....	39
6.1	Tutkimusmenetelmät.....	39
6.2	Kyselytutkimus	39
6.2.1	Aineiston taustatiedot	40
6.2.2	Liitosten tai komponenttien aiheuttamat sähköpaloriskit	41
6.2.3	Keskustyyppin vaikutus sähköpaloriskiin	42
6.3	Muita sähköpalovaaraan johtavia syitä	45
6.4	Valokuva-aineistoon perustuva analyysi.....	45
6.5	Lämpökuva-aineistoon perustuva analyysi	58
6.6	Vikaantumisen mallintaminen	65
6.6.1	Testilaitteisto ja käytetty mittauskalusto.....	65
6.6.2	Löysän liitoksen mallintaminen.....	67
6.6.3	Kipinävälillä simuloitu vikaantuminen.....	70
6.7	Vikaantuneiden komponenttien tutkimukset.....	74
6.7.1	Käytetyt mittalaitteet ja mittausmenetelmät	74
6.7.2	Eristystila- ja jatkuvuusmittaukset.....	75
6.7.3	Pyyhkäiselektronimikroskooppi- ja alkuaineanalyysi	76
6.8	Virhelähteet ja epävarmuustekijät.....	89
7	Tulokset ja niiden tarkastelu	91
7.1	Keskusrakenteiden vaikutus vikaantumiseen.....	91
7.2	Liitosten vikaantumismekanismit ja -tyypit.....	92
7.3	Ympäristöolosuhteiden ja korroosion vaikutus.....	95
7.4	Suojalaitteiden toiminta palovaarallisessa viassa.....	96
7.5	Mittausmenetelmien hyödyntäminen sähköpalojen ennaltaehkäisyssä	98
7.6	Jatkotutkimustarpeet	100
8	Johtopäätökset ja toimenpidesuosituksukset	102
	Lähteet.....	103
	Liite 1: Verkkokysely sähköisten liitosten vikaantumisesta	107
	Liite 2: Jakokeskusten perustietolomake	114
	Liite 3: Testilaitteiston rakennepiirustukset	115
	Liite 4: Testipiirin periaatteellinen kytkentäkaavio	116
	Liite 5: Vikaantuneiden komponenttien sähkötekniiset mittaukset	117
	Liite 6: Toimenpidesuositus: Sähkösuunnittelu	120
	Liite 7: Toimenpidesuositus: Keskusvalmistus.....	121
	Liite 8: Toimenpidesuositus: Komponenttivalmistus	122
	Liite 9: Toimenpidesuositus: Sähköurakointi	123
	Liite 10: Toimenpidesuositus: Huolto ja kunnossapito.....	124
	Liite 11: Toimenpidesuositus: Sähkölaitteistojen haltijat	125
	Liite 12: Toimenpidesuositus: Jakeluverkkoyhtiöt	126
	Liite 13: Toimenpidesuositus: Sähkölaitteistotarkastajat.....	127
	Liite 14: Toimenpidesuositus: Palotarkastajat	128
	Liite 15: Toimenpidesuositus: Sähköalan opetus.....	129

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AFDD	Arc fault detection device (valokaarivahti)
AMR	Automaattinen mittarinluenta (engl. Automatic meter reading)
Kiinteä sähköasennus	Kiinteästi asennettu sähkölaite tai -laitteisto, jota ei voi siirtää paikaltaan ilman laitteiston tai sen osan purkamista.
PRONTO	Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto
Puolikiinteä sähköasennus	Asennustapa, jossa sähkölaite tai kone liitetään kiinteästi sähköverkkoon taipuisalla johdolla siten, että se on siirrettävissä kaapelin sallimissa rajoissa.
Rakennuspalo	Syttymiskohdasta rakennuksen rakenteisiin tai irtaimistoon levinnyt palo.
Rakennuspalovaara	Rakennuksessa ollut tulipalo, joka ei ole levinnyt syttymiskohdastaan.
STEK	Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry
Sähkölaite	Sähkön tuottamiseen, siirtoon, jakeluun tai käyttöön tarkoitettu koje, kone, laite tai tarvike, jolta tai jonka osalta edellytetään tiettyjä sähköteknisiä ominaisuuksia
Sähkölaitteisto	Sähkölaitteista ja mahdollisesti muista laitteista, tarvikkeista ja rakenteista koostuvaa toiminnallinen kokonaisuus. Sähkölaitteistoja ovat siten esimerkiksi rakennusten sähköjärjestelmät, teollisuuden kiinteistöt, sähköntuotantolaitokset sekä katuvalaistus-, sähkönsiirto- ja -jakeluverkot.
Sähköpalo	Sähköenergiasta syttymisenergiansa saanut palo, joka syttyy paikallisesti mutta voi levitä myös muihin rakenteisiin.
SÄTY	Sähkötarkastusyhdistys Säty ry
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
FK	Finanssialan keskusliitto (entinen VAKES)

1 JOHDANTO

Sähköpaloista on tehty runsaasti selvityksiä ja tutkimuksia lähinnä Turvallisuus- ja kemikaaliviraston toimesta 2000-luvulla. Selvitysten tutkimusaineisto on perustunut pääsääntöisesti paloviranomaisten keräämään tietoon sähköpaloista ja -vaaroista. Koska pelastusviranomaisilta saatavan tilastollisen aineiston laadinnassa ei pääsääntöisesti ole ollut mukana sähköalan asiantuntijoita, on aineistojen tarkempi analysointi erityisesti sähkölaitteistopalojen osalta ollut mahdotonta.

Tämän tutkimuksen tarkoitus on verrata aikaisempia havaintoja sähkölaitteistopalojen osalta, mutta kerätä myös kokonaan uutta tutkimusaineistoa sähköpaloista sähköalan ammattilaisten näkökulmasta Suomessa. Tutkimus on rajattu koskemaan jakokeskuksissa esiintyviä sähköisiä liitoksia, niiden vikaantumismekanismeja ja jakokeskuksissa tapahtuvia sähköpaloja. Esimerkiksi vapaasti ilmassa olevat suurjänniteliitokset tai maakaapelijatkat on jätetty työn ulkopuolelle. Tutkimuksesta on rajattu pois myös ulkomainen aineisto.

Tutkimus koostuu jakokeskuksien sähköpaloja ja -vaaroja koskevan kyselytutkimuksen, uuden kirjallisen tutkimusaineiston, vikaantuneiden komponenttien ja vikatilanteiden laboratoriosimulointien analysoinnista ja niiden pohjalta laadituista toimenpidesuosituksista sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi jakokeskuksissa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten huono, epäluotettava tai resistiivinen liitos syntyy, kuinka usein ja millaisissa toimintaolosuhteissa niitä esiintyy ja millaisten havainnointi ja kunnossapitomenetelmien avulla liitosten vikaantuminen olisi ennakoitavissa

2 TUTKIMUSKYSYMYKSET

2.1 Työn lähtökohta

Sähkölaitteistopalojen määrä on lukumääräisesti vuositasolla pieni verrattuna esimerkiksi sähköliesistä ja kiukaista aiheutuviin paloihin. Liesistä ja kiukaista lähtevät palot johtuvat kuitenkin pääsääntöisesti muista syistä kuin teknisistä vioista (käyttäjän virheet yms.). Jos liesien ja kiukaiden virheellisestä käytöstä aiheutuneita paloja ei huomioida, niin muiden sähkölaitteistojen eri syistä johtuvasta teknisestä vikaantumisesta alkaneiden palojen määrä on merkittävä. Lisäksi kiinteiden sähkölaitteistojen aiheuttamien rakennuspalojen osuus on merkittävä, kun arvioidaan laitteistopalojen aiheuttamia taloudellisia menetyksiä.

Tätä tutkimusta edelsi ”Sähkölaitteistoista aiheutuneet tulipalot ja palovaarat Suomessa” –esiselvitys (Hatakka, Valkeinen & Huurinainen 2014), jonka lähdemateriaalina on suurimmaksi osaksi pelastusalan PRONTO-tietokanta. Koska suurin osa olemassa olevasta sähköpaloaineistosta on pelastusalan henkilöstön kirjaamaa, eivät vikojen syyt pureudu tarkasti palon aiheuttaneisiin sähkötekniisiin ilmiöihin, joiden ymmärtäminen on avainasemassa ennakoivissa sähköpaloja ja kehitettäessä uusia ennaltaehkäisy menetelmiä. Esiselvityksen pohjalta on laadittu kuva 1, jossa vikaantumistaajuus sähkölaitteistoittain on jaettu myös käyttäjän toiminnasta sekä sähkölaitteiston vikaantumisesta aiheutuneisiin palohälytystehtäviin. Sähkökeskusten osalta onkin keskeistä havaita, että kaikki seurantajaksolla aiheutuneet hälytykset ovat aiheutuneet sähkölaitteiston vikaantumisesta. Seurantajaksolla sähkökeskusten vikaantumiset (128 kpl) johtivat 31 % tapauksista (40 kpl) rakennuspaloon ja sähköjohtojen ja -kaapeleiden (96 kpl) vikaantumiset johtivat 66 % tapauksissa (63 kpl) rakennuspaloon. Vastaavasti kaikkien muiden sähkölaitteistojen aiheuttamista paloista rakennuspaloksi levisi vain 14 % tapauksista.

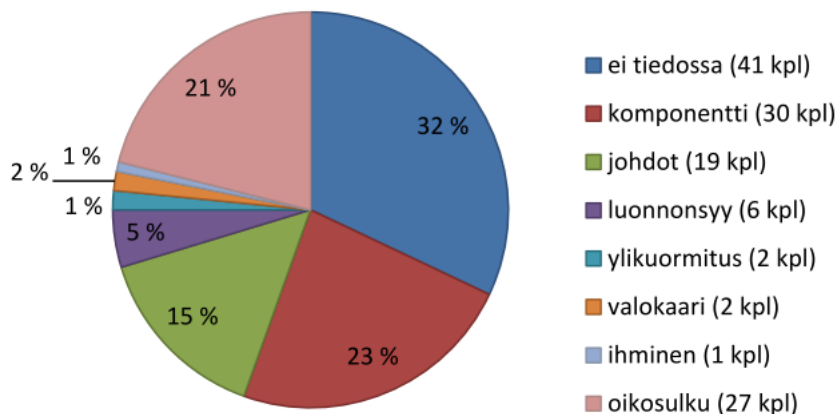


Kuva 1. Sähkölaitteistoista aiheutuneiden palojen jaottelu käyttäjän toiminnasta ja laitteiston vikaantumisesta aiheutuneisiin hälytystehtäviin (Hatakka, Valkeinen & Huurinainen 2014).

Kuvassa 2 on esitetty esiselvityksessä havaittujen vikaantumissyiden jakautuminen sähkökeskuksista alkaneisiin sähköpaloihin. Kuvaavaa on suuri ”ei tiedossa”-kirjausten määrä. Lisäksi syiksi merkityt oikosulku ja valokaari ovat enemmänkin seurauksia kuin syitä vikaantumiselle. Termit ”komponentti” ja ”johdot” eivät myöskään yksilöi varsi-

naista syytä paloon, vaikka rajaavatkin tarkemmin palon mahdollista lähtöpaikkaa. Termillä ”luonnonsyyt” tarkoitetaan tässä tapauksessa esimerkiksi ukkosesta aiheutuneita sähköpaloja.

Vikaantumissyyt: Sähkökeskus (128 kpl)



Kuva 2. Sähkökeskusten vikaantumissyyt jakson palohälytystehtävissä (Hatakka, Valkeinen & Huurinainen 2014).

Selvityksessä todetaankin jakokeskusten palovaarallisen vikaantumisen mekanismien jäävän epäselviksi nykyisen tiedon pohjalta. Selvityksessä esitetään myös olettaus, että keskusrakenteella, keskuskomponenteilla ja kojeilla sekä keskusta ympäröivillä olosuhteilla voi olla palon kehittymisen kannalta vaikutusta ja näiden seurauksena aiheutuvien vahinkojen ennaltaehkäisemiseksi tarvittaisiin aihepiiristä yksityiskohtaisempaa tietoa.

Näin ollen on perusteltua sekä yhteiskunnallisesta että taloudellisesta ja turvallisuuden edistämisen näkökulmasta tutkia tarkemmin sähköisten liitosten aiheuttamien vikaantumisten syntymekanismia, jotta niistä aiheutuvia sähköpaloja voitaisiin ennaltaehkäistä ja toisaalta rajata koskemaan vain kyseistä laitteistoa rakennuspalojen sijaan.

2.2 Tutkimuskysymykset ja -oletukset

Tämän tutkimuksen tutkimuskysymykset muodostuivat pääosin edellä mainitun Hatakan, Valkeisen ja Huurinaisen ”Sähkölaitteistoista aiheutuneet tulipalot ja palovaarat Suomessa” -esiselvityksen pohjalta.

Tärkeimpiä esiselvityksessä avoimeksi jääneiksi listattuja asioita olivat:

- Miten eri keskusrakenteet vikaantuvat ja miten jakokeskusten rakenteet vaikuttavat sähköpalojen kehittymiseen?
- Mitkä ovat liitosten luotettavuuden menettämiseen johtavia perimmäisiä syitä?
- Miten virtapiirien suojalaitteiden (ml. moottoripiirit) toiminta muuttuu palovaarallisen vian esiintyessä, ja kuinka virtapiirin tai kojeiden suojaus toimii palon kehittymiseen nähden?
- Miten erilaiset viat jakaantuvat oikosulku-, maasulku- ja valokaarivikoihin?
- Millaisia uusia mittaus- ja suojausmenetelmiä voitaisiin käyttää sähköpalojen ennaltaehkäisyyn?

- Miten olemassa olevia mittausmenetelmiä voitaisiin hyödyntää sähköpalojen ennaltaehkäisyssä osana erilaisten ja -laajuisten sähkölaitteistojen kunnossapitoa?
- Millaisia ovat menetelmien hyödynnettävyys, luotettavuus ja mahdolliset ongelmat laitteistojen elinkaaren kannalta?

Tutkimusta aloitettaessa olivat olemassa seuraavat alkuoletukset vikaantumiseen johtavien tekijöiden osalta:

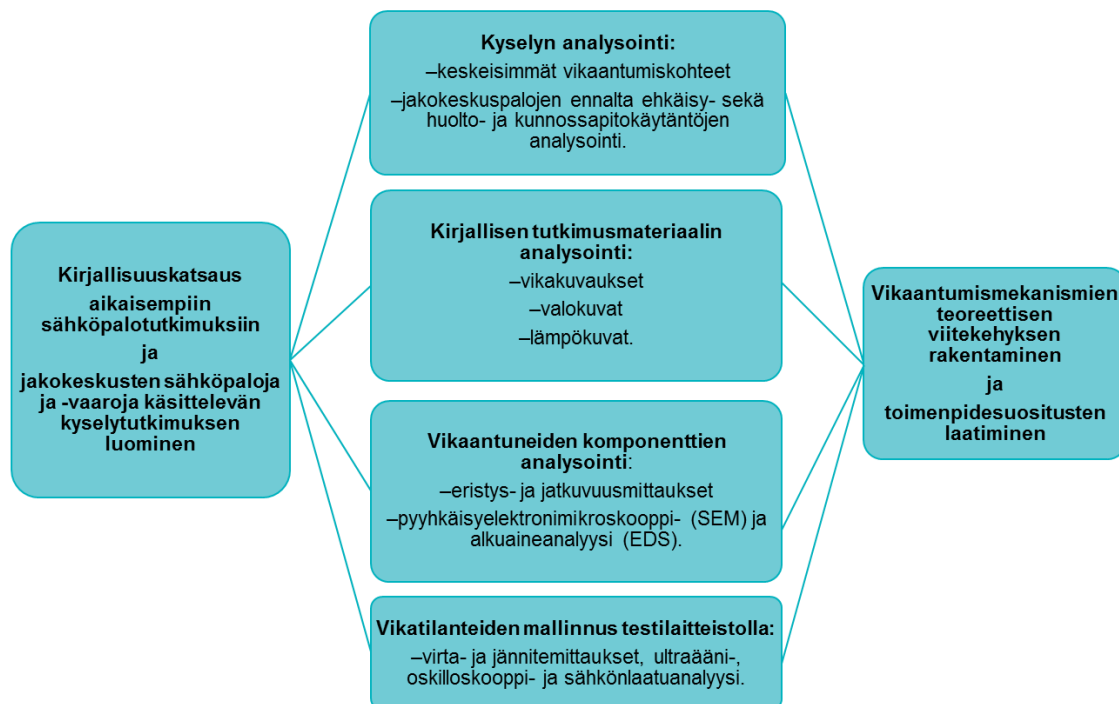
- luonnollinen ikääntyminen
- käyttöympäristön olosuhteet
- käyttäjälähtöiset syyt
- muiden laitteistojen aiheuttamat häiriöt.

Oletukset vikaantumisesta aiheutuvien seurausten riippuvuussuhteista:

- energialähteen vaikutus sähköpaloriskeihin
 - syttymisrajojen määräytyminen lämpötilan, kipinän tai valokaaren vaikutuksesta
 - I^2t -arvo määrittää voimakkaasti liitoksen eristerakenteen kestävyuden.
- syttyvän tai palavan materiaalin vaikutus sähköpaloriskeihin
 - sähkölaitteistojen sisäiset materiaalit (muovit, eristeet, metallit)
 - laitteistoon kuulumattomat materiaalit (pölyt, öljyt, muu palava materiaali)
- hapen ja muiden kaasujen merkitys sähköpaloriskeihin
 - ilmanvaihdon, palokatkojen ja muiden hapen esiintymiseen vaikuttavien mekanismien rooli sähköpaloa voimistavana tai jarruttavana tekijänä
- liitosten kemialliset ominaisuudet ja niiden muutokset
 - liitoksissa ilmenevien kemiallisten ominaisuuksien ja muutosten rooli sähköpaloa voimistavana tai jarruttavana tekijänä.

2.3 Tutkimuksen rakenne

Tutkimuksen rakennetta muotoiltiin työn alussa lähinnä tutkimuskysymysten osalta. Koska aikaisempaa julkista tutkimustietoa liitosten vikaantumisista ja vaikutuksesta sähköpaloihin ei ollut saatavilla, muodostui tutkimusaineiston hankinta oleelliseksi osaksi työtä. Jotta tutkimusaineistosta saataisiin mahdollisimman luotettava sekä toisaalta maantieteellisesti ja toimialakohtaisesti kattava, päätettiin tutkimusaineiston keruu toteuttaa sähköalan ammattilaisille suunnatulla kyselytutkimuksella (liite 1). Kyselytutkimuksella luotiin pohja, ja se toimi tarvekartoituksena muun työn suunnittelulle. Kyselytutkimuksen jälkeen laadittiin kaavio tutkimuksen rakenteessa (kuva 3).



Kuva 3. Tutkimuksen rakenne.

Tutkimuskaavion mukaisesti tutkimukseni jakaantui kyselytutkimuksen analysointiin, muun kirjallisen tutkimusmateriaalin analysointiin, vikaantuneiden komponenttien analysointiin sekä vikatilanteiden mallinnukseen testilaitteistoilla. Tutkimuksen lopputuloksena ja perimmäisenä tarkoituksena oli yhdistää tutkimuksen eri osa-alueiden havainnot ja rakentaa niiden perusteella teoreettinen viitekehys sähköisten liitosten vikaantumismekanismeista ja keinoista vikaantumisten ennaltaehkäisyyn.

3 SÄHKÖPALOTUTKIMUKSET SUOMESSA

Sähköpaloista on tehty runsaasti tutkimuksia Suomessa. Toisaalta tutkimukset ovat usein keskittyneet sähkölaitteisiin, jolloin sähkölaitteistojen tutkiminen on jäänyt vähemmälle. Seuraavassa kirjallisuuskatsauksessa on pyritty löytämään erillisten tutkimusten yhtenäisiä piirteitä sekä muita huomioita sähköisten liitosten vikaantumisesta.

3.1 Aikaisemmat tutkimukset ja selvitykset sähköpaloista

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) on tehnyt vuosien varrella runsaasti tutkimuksia ja selvityksiä liittyen sähköpaloriskien hallintaan. Alla on listattuna keskeisimmät tutkimukset, joista on tässä tutkimuksessa yritetty löytää yhteneviä piirteitä koskien sähköisten liitosten vikaantumista:

- Sähkölaitteistoista aiheutuneet tulipalot ja palovaarat Suomessa -esiselvitys (Hatakka, Valkeinen & Huurinainen 2014)
- Sähkö palon syttymissyynä (Lepistö & Valkeinen 2013)
- Löysät liitokset sähkökeskuksissa tulipalon aiheuttajina (Granqvist & Nenonen 2009)
- Sähkölaitteiden ja -tarvikkeiden turvallisuus Suomessa (Simonen 2009)
- Viljatilojen sähkö- ja paloturvallisuus (Granqvist, Nenonen & Nurmi 2007)
- Eläintilojen sähkö- ja paloturvallisuus (Granqvist, Nurmi & Nenonen 2006)
- Sähköpalot Suomessa (Nurmi, Nenonen & Sjöholm 2005)
- Sähköpalojen riskienhallinta (Nurmi 2001)
- Sähkölaitteiden palo-ominaisuudet ja sähkölaitteiden sammuttaminen (Nurmi, Säskilähti, Törmänen, Hietaniemi, Mangs, & Hakkarainen 2001)
- Sähkö palon syttymissyynä (Nurmi, Säskilähti, Westersträhle & Hämäläinen 1998).

Suomessa sähköisten liitosten vikaantumisen aikaansaamista sähköpaloista ei ole juuri julkaistu yksityiskohtaisempia tutkimuksia. Sen sijaan Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) on julkaissut muutamia palonsyöntutkimuksia käsitteleviä oppikirjoja, joissa käsitellään myös sähköisten syttymissyiden palonsyöntutkimusta ja sähkön ominaisuuksia palojen kannalta. Johan Mangs ja Olavi Keski-Rahkonen ovat kirjoittaneet kaikki kolme VTT:n julkaisua ”Palonsyöntutkimus”, osa 1 ja 2, sekä ”Toiminta palopaikalla”.

Paljon sähköturvallisuuden ja sähköpalojen ennaltaehkäisyn piirissä vaikuttanut tekniikan tohtori Veli-Pekka Nurmi on julkaissut myös perusteoksen ”Palontutkimuksen periaatteet” (2005), jossa käsitellään tarkemmin myös sähköisen vikaantumisen muodostumista sähköpaloksi.

Sähkötarkastusyhdistys Säty ry, Tukes ja Finanssialan Keskusliitto (FK) toteuttivat vuonna 2003 ”Sähköpalojen ennalta torjunta” -ohjelman (SÄHKÖPETO), jossa Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry:n rahoituksella luotiin koulutusmateriaali sähköpalotutkimusta ja sähköpalojen ennaltaehkäisemistä varten. Projektin aikana julkaistiin materiaalit ”Perustietoa sähköpaloista” (Korkalo, Kukkonen, Ojala, & Pekurinen 2003) ja ”Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta” (Korkalo, Hakala, Nurmi, Bergman, Kukkonen, Salmi, & Suomela 2003).

Lämpökuvausta on käytetty jo pitkään osana teollisuuden ja sähköverkkoyhtiöiden kunnossapitoa, mutta osana rakennusten sähkölaitteistojen kunnossapitoa ja vianhakua

lämpökuvaus on alkanut saada jalansijaa vasta viime vuosien aikana. Lämpökuvauksesta on olemassa Suomessa vain muutamia julkisia tutkimuksia. Viime vuosina aiheesta on julkaistu muun muassa opinnäytetyöt ”Sähkökomponenttien lämpökuvaus” (Aspelin 2011) ja ”Lämpökuvaus sähkökunnossapidossa” (Suomalainen 2011).

Entinen Sähkötarkastuslaitos, Sähkötarkastuskeskus, Fimko ja nykyinen SGS Fimko on tutkinut vuosien saatossa jakokeskuksissa sekä erilaisissa liittimissä ja pistokytkimissä ilmenneitä vikoja. Julkista lähdeaineistoa ei ole saatavilla, mutta havainnot-kohdassa on käsitelty Jakokeskusasiantuntija Raimo Ristimäen havaintoja SGS Fimkon edeltäjien selvityksissä.

3.2 Sähköisten liitosten vikaantuminen

3.2.1 Liitosmateriaalit

Liitosmateriaalin vaikutus vikaantumiseen oli huomioitu ainakin Sähkötarkastuskeskuksen (Ristimäki 2014) tutkimuksissa. Esimerkiksi terästä olevaan pistoliittimen (esim. AMP / ABIKO), johon Cu-johdin liitetään puristusliitoksella, liitos saattaa löystyä teräksen ja kuparin erisuuruisten lämpölaajenemisten vuoksi. Tällaisia liittimiä käytetään esim. sähkökiukaissa ja kuuman veden varaajissa.

Jos kupari lämpenee uudelleen jähmettymisen jälkeen tai jos kupari jää kuumaksi pitkäksi aikaa sulamisen ja jähmettymisen jälkeen, sen mikrorakenne muuttuu. Oksidirakenteet sulavat yhteen kohdissa, joissa aiempi kupari-kuparioksiduuliseos oli. Toinen muutos mikrorakenteessa tapahtuu kuparin lämmitessä yli 260 °C, jolloin kupari kiteytyy uudelleen. Mikrorakennetta analysoimalla voidaan päätellä kyseisen sähköpiirin osallisuutta paloon. (Mangs & Keski-Rahkonen 1997b) Toisaalta voidaan kysyä, aiheuttavatko yli 260 °C lämpötilat kuparirakenteessa sellaisia kemiallisia muutoksia, jotka voivat muuttaa kuparin sähkönjohtamisominaisuuksia niin, että liitosimpedanssin kasvu voisi lisätä merkittävästi sähköpaloriskiä liitoksessa.

Alumiinin kemiallisesti aktiivisen molekyyliarakenteen takia alumiinin pinnalle muodostuu hyvin helposti sähkönjohtavuutta heikentävä oksidikerros, jonka muodostumista ja vaikutusta pyritään ehkäisemään erilaisilla suoja-aineilla sekä puhdistamisella ennen liitoksen viimeistelyä. Lisäksi alumiinin ja kuparin erilaiset lämpölaajenemisominaisuudet tulee ottaa huomioon, jotta metallien väliset liitospinnat eivät heikkene normaalin lämpenemisen seurauksena. (Nurmi 2005)

3.2.2 Liitostekniikan vaikutus vikaantumiseen

Kaikki olemassa olevat liitokset muodostavat jossain määrin sähköteknisen epäjatkuvuuskohdan ja lisäävät piiriin kohdistuvaa resistanssia ja synnyttävät sitä kautta kuormitusvirran neliöön verrannollisia häviöitä. Liitosten likaantuminen, mekaaninen löystyminen sekä kosketuspintojen oksidoituminen voivat kasvattaa kuitenkin liitoksen resistanssin niin suureksi, että kuormitusvirta ylikuumentaa liitoksen (Nurmi 2005).

Sekä Sähkötarkastuskeskuksen tutkimuksessa (Ristimäki 2014) että Nenosen ja Granqvistin ”Löysät liitokset sähkökeskuksissa tulipalon aiheuttajina” - tutkimuksessa on löydetty seuraavia liittimien ominaisuuksista, jotka ovat johtaneet ylikuumenemiseen:

- Tietyissä liitinrakenteissa niihin asennetun johtimen ruuviliitos löystyy helposti, jos johdinta liikutetaan asennuksen jälkeen (esim. asennuspaikalla tehtävien muutosten tai korjaustöiden yhteydessä).
- Jos asennuskaapelin Al-johtimet on liitetty Cu-johtimille tarkoitettuihin liittimiin, liitoksen kosketuspaine saattaa pienentyä alumiinin virumisen vuoksi.

Johtimissa ilmenevät ohenemat ja kuopat eivät riitä yleensä vähentämään johtimen sähkönjohtokykyä niin paljon, että se aiheuttaisi palovaaran johtimen nimellisillä kuormitusvirroilla. Tämä johtuu kuparin hyvistä lämmönjohtavuusominaisuuksista, minkä vuoksi lämpö siirtyy johtimen vaurioitumattomiin osiin. (Beland 1982)

3.2.3 Vikaantuneessa liitoksessa havaittavat muutokset

Huonosta liitoksesta voi aiheutua ns. hehkuva liitos. Liitos syntyy, kun huono kontakti lämmittää liitosta pitkällä ajanjaksolla, jolloin liitoskohtaan syntyy oksidikerros. Tällöin liitoksen impedanssi kasvaa entisestään, jolloin syntyy hehkuva liitoskohta, joka voi aiheuttaa myös tulipalon. Oksidikerroksen muodostumiselle ei ole määritetty tarkkaa rajalämpötilaa, mutta ilmiön on todettu olevan sitä nopeampi, mitä suurempi lämpötila on. Ruuviliitoksissa esiintyvät muutokset ovat tyyppiesimerkki kyseisestä tapauksesta. Kuparin pinnalla oleva oksidikerros myös suojaa kuparia suurilta lämpötiloilta. Tätä ilmiötä on käytetty avuksi myös palonsyöntutkinnassa. Toinen mikrorakenteen muutos on uudelleen kiteytyminen, joka tapahtuu kuparin lämmitessä yli 260 °C:n lämpötilaan. Uudelleen kiteytymiseen tarvittava aika 260 °C:n lämpötilassa on noin tunti, mutta lämpötilassa 538 °C ja sitä korkeammilla lämpötiloilla uudelleen kiteytymiseen vaaditaan vain muutamia sekunteja. (Mangs & Keski-Rahkonen 1997b)

Hehkuvassa liitoksessa voidaan havaita seuraavia tunnusmerkkejä:

- Liitoksessa on paikallisen kuumentumisen jälkiä.
- Liitoksen pinnat ovat tummentuneet, kuoppautuneet tai syöpyneet.
- Liitos tai sen eriste on hiiltynyt syvältä pintojen kosketuskohdasta.
- Vierekkäisissä liitoksissa on kuumuuden aiheuttamia jälkiä, jotka voivat olla seurausta toisessa liitoksessa tapahtuneesta vikaantumisesta.

Tulipalon syttyminen hehkuvasta liitoksesta edellyttää, että piirin tulee olla kuormittuna ja liitoksen ympäristössä on oltava palavaa materiaalia, joka voi syttyä liitoksen lämmön vaikutuksesta. (Mangs & Keski-Rahkonen 1997c)

3.2.4 Komponenttien ominaisuuksien vaikutus vikaantumiseen

SGS Fimkon ja sen edeltäjien (Ristimäki 2014) tutkimuksissa sekä Veli-Pekka Nurmen ”Palontutkinnan perusteet” -teoksessa oli löydetty seuraavia mekaaniseen liikkeeseen perustuvien komponenttien ominaisuuksia, jotka ovat johtaneet yllämpenemiseen ja sitä kautta vikaantumiseen:

- Kytkinlaitteen kosketinpaine pienentyy vanhenemisen seurauksena.
- Kytkinlaitteessa ilmenee eristysvika, jota seuraa valokaari. Kytkin on auki-asennossa, mutta piiri ei katkea, jolloin valokaari on piirin osana (johtavana) auki olevan koskettimen rinnalla. Ylivirtasuojia ei toimi, jolloin valokaari aiheuttaa palovaaran.

Lisäksi Sähkötarkastuskeskuksen (Ristimäki 2014) aikaisissa tutkimuksissa on havaittu ongelmaksi 16 A pistorasioiden kuormittaminen lähelle nimellisvirtaa, joka on aiheuttanut pistotulpan vaurioitumisen ja sulamisen. Tähän on yleensä syynä pistotulppaan tulevan kaapelin johtimien katkenneet säikeet (melkein kaikki) välittömästi pistotulpan ulkopuolella.

3.2.5 Liitoksia ympäröivien eristerakenteiden vaikutus vikaantumiseen

Kaikki aineet johtavat sähköä, mutta hyvässä eristeaineessa sähkönjohtokyky on heikko ja sitä kautta eristysresistanssi korkea, jolloin eristeen läpi kulkeva vuotovirta on hyvin pientä. Jos materiaali ei ole kuitenkaan homogeeninen ja jokin kohta on heikompi eristävyyden kannalta, vuotovirta kasvaa kyseisessä kohdassa aiheuttaen mm. enemmän lämpöpölväiöitä. Ilmiö saattaa kehittyä hitaasti, mutta johtaa vuosien saatossa jopa läpilyöntiin, oikosulkuun ja valokaaren syttymiseen.

Vuotovirtoja on vaikea tunnistaa varsinaisen palon jälkeen, mutta eristystason heikkeneminen voi olla havaittavissa mittauksin myös jälkikäteen. Lisäksi vuotovirran reittiä on mahdollista tutkia myös mikroskoopilla. (Nurmi 2005) Mekaaninen vaurio eristeessä, syöpyminen, vanheneminen, kastuminen, vesivuodot tai sähkölaitteistoon tiivistynyt kosteus saattaa aiheuttaa myös suuri-impedanssisen oiko- tai maasulun, jonka virta on niin pieni, ettei sulakesuojaus reagoi vikaan. (Mangs & Keski-Rahkonen 1997a)

3.2.6 Suojalaitteiden vaikutus vikaantumisen hallittavuuteen

Normaalioloissa oikein suunniteltu ja selektiivinen suojaus estää kaapeleiden ja komponenttien ylikuumentumisen ja suojaa muuta laitteistoa oiko- ja maasulkuvikatilanteissa kytkemällä automaattisesti irti verkon vikaantuneen osan. Suojauksessa tehtyjen mitoitusvirheiden (yli- tai alimitoitus) seurauksena voi tilanne kuitenkin muuttua niin, että suojaus ei toimi ajoissa. Vikaantuminen saattaa tapahtua hallitsemattomasti ja aiheuttaa pahimmassa tapauksessa sähköpalon ja levitä sen seurauksen jopa rakennuspaloksi asti (Nurmi 2005).

Suojalaitteen toimiessa aiheutuu myös kipinöintiä. Se, miten kipinöinti pääsee vaikutukseen suojalaitteen ulkoisen ympäristön kanssa, riippuu suojalaitteen rakenteesta (esimerkiksi tulppasulake, johdonsuoja-automaatti tai tyhjiökatkaisija) (Nurmi 2005). Suojalaitteiden rakenne ja tyyppi onkin valittava aina kohdekohtaisesti turvallisen lopputuloksen aikaansaamiseksi.

3.2.7 Sähköpaloille tyypilliset ilmiöt

Sähköasennuksien palot aiheutuvat pääosin seuraavista vikaantumisista. Alla mainitut asiat eivät kuitenkaan ota kantaa vaurioitumisen aiheuttaneisiin primäärisiin syihin, vaan ovat pikemminkin sähköpaloja edeltävä vaihe tapahtumaketjussa. Näitä ovat

- liian suuren virran tai puutteellisen jäädytyksen aiheuttama johtojen liiallinen kuumentuminen
- eristeiden vaurioituminen
- veden tai kosteuden muodostamat tarkoituksettomat kulkureitit sähkölle
- kasvaneiden liitosresistanssien aiheuttama liiallinen kuumentuminen
- valokaari tai kipinä. (Nurmi 2005)

Sähkölaitteille tyypillisiä eristeitä ovat nykyään erilaiset muovit, joiden molekyyllirakenteiden hajotessa niistä vapautuu mm. hiiltä, vetyä ja jossain tapauksissa happea. Hiilen muodostuminen liittyy vahvasti sähköpaloihin, sillä hiili johtaa hyvin sähköä ja voi toimia siten sähkön kulkureittinä aiheuttaen pieniresistanssisen maa- tai oikosulun. Lisäksi muoviyhdisteiden hajotessa syntyy erilaisia hiilivetyjä, kuten asetyleeniä (C₂H₂) ja metaania (CH₄), jotka ovat helposti syttyviä kaasuja ja erittäin myrkyllisiä. (Nurmi 2005) Normaalissa huoneenlämmössä on mahdotonta saada aikaan valokaarta jännitteen huippuarvon ollessa alle 340 V, joka vastaa jännitteen tehollisarvona noin 240 V, elleivät jännitteiset

johtimet kosketa ensin toisiaan tai maapotentiaalia. Ilmiö perustuu kaasun, tässä tapauksessa ilman, eristävälle vaikutukselle. Tällöin läpilyöntijännitteen suuruuteen vaikuttavat sekä lämpötila että ilmanpaine. Tulipalotilanteessa sen sijaan eristemateriaalien sähköjohtavuudessa tapahtuu muutoksia, joissa eristemateriaalin sähköjohtavuus kasvaa jyrkästi ja voi näin ollen aiheuttaa valokaaren ilman johtimien galvaanista kytkeytymistä. (Keski-Rahkonen ym 1997a ja Nousiainen 2011)

Hiilivedyt leviävät nopeasti ja kiinnittyvät helposti metallien pintoihin aiheuttaen korrodoitumista myös muille samoissa tiloissa sijainneille sähkölaitteistolle, vaikka ne eivät olisi altistuneet varsinaiselle palotapahtumalle. Tämän vuoksi varsinkin suuremman palotapahtuman, jossa on ollut palokuormana muoveja ja/tai sähkölaitteiston tai johtojen osia, jälkeen tulisi aina tarkistaa myös savukaasujen vaikutusalueella olleet muut sähkölaitteistot altistumisen varalta. Varsinaista altistumista ei aina voi havaita visuaalisesti, vaan on turvauduttava esimerkiksi pH-mittauksiin.

Sähkölaitteistopaloihin johtavat viat kehittyvät pääosin melko hitaasti, mutta syttyyään sähkölaittepalot saavuttavat tyypillisesti 5–15 minuutissa satojen tai jopa tuhansien kilowattien palotehon. Koska sähkölaitteistot sisältävät usein paljon erilaisia muoveja, muodostuu sähkölaitteistopalosta usein runsaasti savua. (Nurmi 2005)

Valokaarioikosulussa sähkövirta kulkee johtimien ja/tai komponentin välillä ilman galvaanista kosketusta. Varauksen kulku tapahtuu siis johtumalla ionisoituneessa plasmassa. Pienjännitteellä sähkövirtaa rajoittaa valokaareissa syntyvä vastus, joka kasvaa valokaaren laajentuessa, jolloin sulake ei välttämättä reagoi ollenkaan, mutta valokaareissa voi vapautua silti hyvin suuri energia lyhyessä ajassa sytyttäen jopa ympärillä olevat metallirakenteet palamaan. (Mangs & Keski-Rahkonen 1997a ja Chase 1957)

Metallien muutoksista tehtävissä analyysseissa laajamittaisissa palotapahtumissa tulee ottaa huomioon, että alumiinin sulamislämpötila on 660 °C, kun se puhtaalla kuparilla on 1083 °C. Erilaiset sulamislämpötilat voivat aiheuttaa alumiinisten osien haihtumisen kokonaan, ympäröivän kuparin jäädessä vielä jäljelle. Lisäksi on syytä huomioida, että johdoista ja kaapeleista löytyvät sulamisjäljet voivat olla joko seuraus oikosulusta, mutta myös laitteiston ulkopuolisen palon aiheuttamia, eikä näitä kahta erilaista palotapahtumaa ole helppo erottaa jälkeenpäin toisistaan (Nurmi 2005). Materiaalit eivät myöskään ole aina puhtaita seoksia, vaan eri metallit voivat olla jo valmiiksi yhdisteitä tai sekoitettua palon johdosta, jolloin niiden sulamislämpötilaraja laskee huomattavasti riippuen seossuhteesta (Mangs & Keski-Rahkonen 1997a).

Vikaantumisen alkusyitä on mahdollista tutkia myös röntgenkuvauksella (Mangs & Keski-Rahkonen 1997a) tai augerelektronispektroskopiolla (Mangs & Keski-Rahkonen 1997b), mikä perustuu hapen pitoisuuteen kuparissa. Menetelmällä voidaan tehdä johtopäätöksiä siitä, onko tulipalo aiheutunut valokaaresta vai ovatko vauriot ja valokaari olleet seurausta tulipalosta.

3.2.8 Ulkoisten olosuhteiden vaikutus sähköpaloihin

Sähköpalon edellytykset ovat syttyvä ja palava materiaali, happi ja sytytysenergia. Palon syttymistä edesauttavia ja ylläpitäviä tekijöitä ovat helposti syttyvät pölyt, jauheet, höyryt ja palavat nesteet. Aineiden ja ilman seokset voivat syttyä joko korkeasta lämpötilasta, kipinästä tai valokaaresta.

Sähkö voi toimia syttymisenergiana myös nopeasti syttyvissä ja leviävissä paloissa, jolloin kyse on räjähdyksestä. Syttymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa räjähdysvaarallisten pölyjen hiukkaskoko, alin räjähdyskykyinen pölypitoisuus, maksimiräjähdyspaine ja syttymislämpötila sekä palavien kaasujen, höyryjen ja nesteiden koostumus, tiheys, leimahduspiste, itsesyttymislämpötila, vallitseva paine sekä syttymis- ja räjähdysrajat. (SFS-käsikirja 59 2012)

Sähkölaitteista johtuva paloriski on erityisen suuri tiloissa, joissa esiintyy edellisessä kappaleessa esitellyn kaltaisia palon syttymistä edistäviä olosuhteita. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi sahat, huonekaluteollisuus, eräät elintarviketeollisuuden osa-alueet, polttoaineen jakelu- ja käsittelytilat, maalaamot sekä räjähdysaineiden valmistus ja varastointi. Edellä mainittujen tilojen sähköistyksien rakentamiseen ja kunnossapitoon liittyy yleensä erityisiä määräyksiä ja luvanvaraisuutta. (Korkalo et al. 2003) On kuitenkin huomioitava, että vaikka kyseinen sähkötila ei olisi luokiteltu räjähdysvaaralliseksi, voi siellä esiintyä paikallisesti räjähdys- ja palokelpoisia seoksia, jotka voivat syttyä laitteiston vikaantuneessa. Esimerkiksi jakokeskusten sisään päässyt runsas pöly voi syttyä vikaantuneen ja kuumentuneen komponentin vuoksi. Jakokeskuksissa paloa ylläpitävää materiaalia on lisäksi jakokeskuksen komponenteissa, siihen liitetyissä kaapeleissa sekä usein keskuksen läheisyyteen varastoiduissa tarvikkeissa. (Korkalo et al. 2003)

3.2.9 Huollon ja kunnossapidon vaikutus liitosten vikaantumiseen

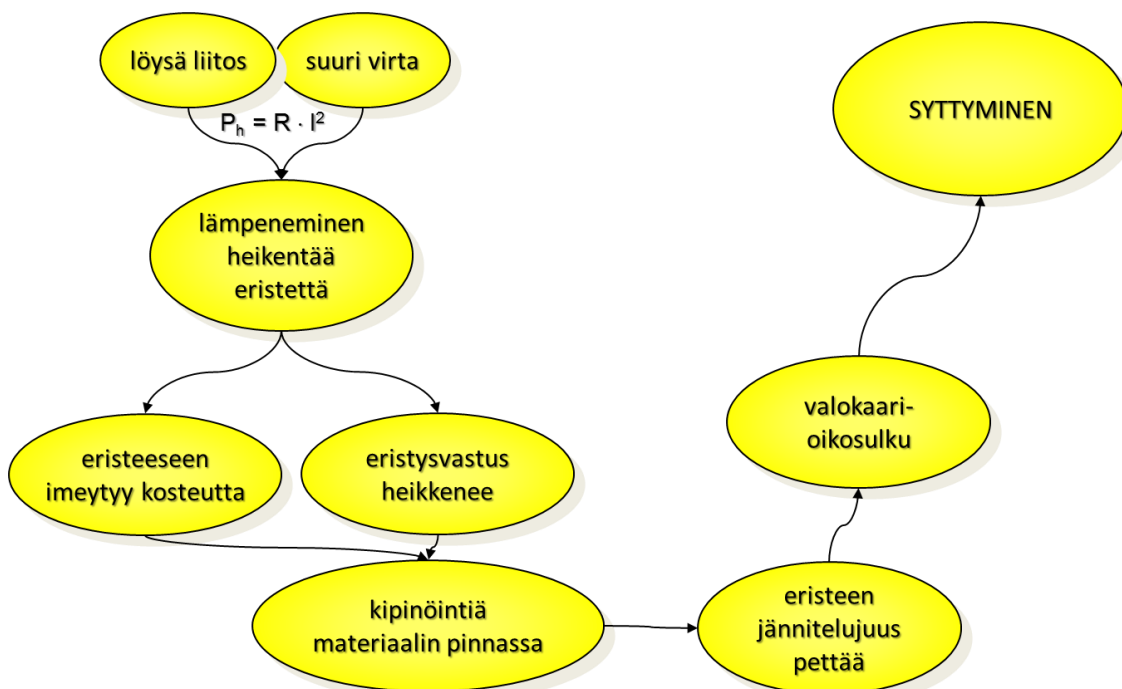
”Varsin usein sähkölaitteissa ja -laitteistoissa paloon johtaneiden teknisten vikojen taustalta on löydettävissä erityisesti puutteellista tai jopa kokonaan laiminlyötyä kunnossapittoa. Näyttääkin siltä, että sähköpaloon johtavat tekniset viat syntyvät juuri käytössä, eikä suunnittelu- tai valmistusvirheillä tunnu olevan merkittävää roolia sähköpalojen syttymisessä.” (Nurmi 2001) Koska sähköturvallisuutta koskevissa viranomaismääräyksissä on mahdotonta määrittää yksityiskohtaisia kunnossapitotoimenpiteitä ja vaatimuksia, tulisi sähkötoimialan ja vakuutusalan selvittää ja ohjeistaa siitä, milloin erilaiset sähköjärjestelmät on huollettava ja korvattava. (Hatakka, Valkeinen & Huurinainen 2014)

3.2.10 Vikaantumisen elinkaari

Sähkötarkastuskeskuksen tutkimuksissa yleisimmiksi sähköpalon aiheuttajiksi todettiin löysä tai löystynyt johdinliitos tai vikaantunut komponentti. Vika aiheuttaa yllämpenemisen, jota seuraa palovaara, johdineristysten sulaminen ja usein myös oiko- tai maasulku. Oikosulku ei ole itsenäinen ilmiö, vaan seuraus eristysten vikaantumisesta, jonka voi aiheuttaa mm.:

- yllämpenemisen seurauksena eristysten pehmeneminen / sulaminen
- eristysten mekaaniset vauriot
- eristyspinnoille tullut lika, kosteus tms., joka aiheuttaa pintavirran tai valokaaren erinapaisten osien välille
- yli- ja alijännitteet. (Ristimäki 2014)

Samaan lopputulokseen on päädytty myös Veli-Pekka Nurmen Palontutkinnan perusteet -oppikirjassa, jossa Nurmi on pyrkinyt myös hahmottamaan tapahtumaketjua liitoksen vikaantumisesta palon syttymiseen (kuva 4).



Kuva 4. Löysästä liitoksesta syttymiseen -tapahtumaketju (Nurmi 2005).

Ennen varsinaista syttymistä on kuitenkin nähtävissä lukuisia muita visuaalisia merkkejä liitoksen vikaantumisesta. Merkkejä ylikuumentumisesta ovat esimerkiksi johdinmetallien värimuutokset sekä sulaneet metallin jäänteet liitosten kosketuspisteissä. Edellä mainituissa tapauksissa sulanut metalli on pääasiassa valumamuodossa eikä pisaroina, niin kuin valokaaren aiheuttamissa vikaantumisissa. Valokaari taas on hyvin usein vasta seuraus sitä edeltäneestä johdin- tai komponenttirakenteen eristeen heikkenemisestä ja eristeiden syttymisestä palamaan. Eristerakenteen heikkeneminen on puolestaan usein vuosikausia kestävä prosessi, joka tosin kiihtyy voimakkaasti prosessin loppuvaiheessa. Valokaaren jäljet tunnistaa usein korkean lämmön seurauksena puuttuvasta (haihtuneesta) metallista sekä jäljelle jääneiden metalliosien karkeasta pinnasta, sulamisjäljistä ja ympärillä olevista metalliroiskeista. (Nurmi 2005)

3.2.11 Katsaus sähköalan kehitykseen sähköpalojen kannalta

Raimo Ristimäki nosti esiin seuraavia kehityssuuntia jakokeskuksissa ja arvioi niiden vaikuttavuutta sähköpalojen esiintymiseen:

- Nykyisten tuotestandardien mukaiset tuotteet ovat ulkomitoiltaan usein pienentyneet nimellisarvojen pysyessä samalla ennallaan. Erityisesti katkaisijoille ja kytkimille sallitaan korkeita lämpenemisarvoja. Tämä tarkoittaa sitä, että häviötehot ovat suurentuneet ja pakkaustiheyttä keskuksessa tms. voi lisätä.
- Lisäksi liittimien rakenne on keventynyt ja niille annetaan hyvinkin alhaisia kiristysmomenteja (koska liittimet ovat mekaanisesti heikkoja). (Ristimäki 2014)

4 JAKOKESKUSTEN, SÄHKÖISTEN LIITOSTEN JA KOMPONENTTIEN OMINAISUUDET

4.1 Jakokeskuksia koskevat määräykset

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry on julkaissut jakokeskusten suunnittelua ja rakentamista koskevat, vuonna 2014 uudistetut standardit (Sesko 2013):

- SFS-EN 61439-1: Yleisvaatimukset
- SFS-EN 61439-2: Teollisuuskojeistot
- SFS-EN 61439-3: Kiinteistökeskukset
- SFS-EN 61439-4: Työmaakeskukset
- SFS-EN 61439-5: Jakeluverkkokeskukset
- SFS-EN 61439-6: Jakelukiskot.

Uusittu standardisarja tuntee kolme eri tapaa, joilla jakokeskusten valmistaja voi osoittaa vaatimusten täyttämisen (Sesko 2013):

- todentaminen testaamalla
- todentaminen laskemalla/mittauksin
- todentaminen noudattamalla suunnittelusääntöjä.

Lisäksi pienjännitesähköasennusstandardi SFS 6000-7-729 sisältää määräyksiä ja suosituksia jakokeskuksia ja niiden asentamista, käyttöä ja huoltoa kohtaan. Alla on lisättyä keskusten ja liitosten vikaantumisen kannalta oleellisia vaatimuksista (ST 53.34 2006):

- Jakokeskus ei saa aiheuttaa viereisissä helposti syttyvissä aineissa yli +80 °C lämpötilaa eikä syttymisvaaraa edes vian aikana.
- Jakokeskus on voitava erottaa jännitteettömäksi. Erotuskytkin voi sijaita itse keskuksessa tai sen välittömässä läheisyydessä.
- Yli 1000 A nimellisvirtaisissa jakokeskuksissa tulee olla työmaadoitusmahdollisuus joko siirrettävällä työmaadoitusvälineellä tai kiinteällä työmaadoituskytkimellä tai -erottimella.
- Jakokeskuksen laitteet on asennettava siten, ettei niitä huollettaessa jouduta irrottamaan tai purkamaan muita laitteita tai johtoja kosketussuojausta lukuun ottamatta.
- Jakokeskukseen tulevilla ja lähtevillä johdoilla on oltava riittävä määrä sopivia liittimiä. SFS 6000 -sarjassa vaaditaan jokaiselle tulevalle ja lähtevälle nolla- ja suojajohtimelle oma erillinen liittimensä.
- Jakokeskuksen sisäisiä johtoja ei saa ketjuttaa kojeilla, jos keskuksella edellytetään tehtävän kojeiden vaihtoa tai johdotusmuutoksia jännitetynä.
- Kahden tai useamman johtimen kiinnittäminen samaan liittimeen on sallittua vain, jos liitin on suunniteltu tätä varten. Liittimen samaan johdintilaan liitettävien johtimien on yleensä oltava samaa johdinlajia (ynksi-, muutama- tai hienolankaisia).
- Peruseristeiset johtimet eivät saa nojata paljaita, eri potentiaalissa olevia jännitteisiä osia tai teräviä reunoja vasten. Johtimet on lisäksi tuettava riittävästi.

Pienjännitstandardissa on kirjattuna myös määräykset ja suositukset riittävän dokumentoinnin laatimiseksi. Turvallista vikaantumista ja käytettävyyttä edistäviä suosituksia dokumentoinnissa ovat mm. (ST 53.34 2006):

- Jakokeskuksen pääkaavion tulee sisältää kaikki pääpiirien laitteet ja tunnuksot sekä riittävä tieto ohjauspiirien tunnistamiseksi. Pääkaavioon tulee myös merkitä laitteet, joilta vaaditaan erotusominaisuuksia. Lisäksi valmistajalle on annettava oikosulkulujuutta ja suojalaitteiden toimintaa koskevat vaatimukset.
- Käyttökäytännöissä tulee määrittellä keskuksien sijoitetut laitteet asennus- ja käyttöohjeineen sekä suojalaitteiden toiminta-arvot. Virtapiirit on varustettava yksilöllisillä tunnuksilla. Piirikaavion lisäksi on annettava johdotustiedot joko piirustuksena tai taulukkona.
- Jakokeskuksen arvokilvessä tulee antaa valmistajan nimen ja tyyppimerkinnän lisäksi yleensä myös virtalaji, nimellisjännite, nimellisvirta, oikosulunkestävyys, koteloitiluokka ja suojaustapa sähköiskuilta.

Keskeisimmät jakokeskusten laitevalintoihin vaikuttavat tekijät ja rajoitukset ovat (ST 53.34 2006):

- **pintaväli**, joka on eristysaineen pintaa pitkin mitattu lyhin etäisyys kahden johtavan osan tai maapotentiaalilin välillä.
- ympäristön **likaantumisaste** (lukuarvo 1...4), joka perustuu johtavan tai kosteutta sitovan pölyn, ionisoidun kaasun tai suolan määrään sekä suhteelliseen kosteuteen ja sen esiintymistäajuuteen. Edellä mainituista asioista aiheutuva kosteuden imeytyminen tai tiivistyminen heikentää eristyksen sähkölujuutta ja pintavirtakestoisuutta.
- **ylijänniteluokka**, joka perustuu virtapiirissä (tai sähköjärjestelmässä, jolla on erilaisia nimellisjännitteitä) mahdollisesti esiintyviin transienttiylijännitteiden rajoittamiseen. Ylijänniteluokka riippuu ylijännitteisiin käytettävistä keinoista (taulukko 1).
- **oikosulkukestoisuus**. Oikosulkuvaatimukset määräytyvät liitettävän verkon mukaan. Jakokeskuksille, joilla oikosulkusuojat on syöttöyksikössä, tulee antaa oikosulkuvirran arvo syöttöyksikön liittimissä ja tiedot oikosulkuvirrasta oikosulkusuojan jälkeen. Tavallisesti ilmoitetaan nimelliskestovirta (I_{cw}) 1 sekunnin oikosulussa.
- **katkaisukyky**. Kojien ja laitteiden katkaisukyky tulee mitoittaa piirin ominaisuuksia vastaavaksi.

Taulukko 1. Ylijänniteluokat järjestelmän nimellisjännitteen mukaan (SFS 6000-4-44 2012).

Asennuksen nimellisjännite [V]		Laitteille vaadittu hetkellinen ylijännitteen kesto [kV]			
Kolmivaihejärjestelmä	Yksivaihejärjestelmä, jossa on keskipiste	Laitteet asennuksen syöttöpisteessä (ylijänniteluokka IV)	Pää- ja ryhmäjohtojen laitteet (YL III)	Kulutusköjeet (YL II)	Erityisesti suojatut laitteet (YL I)
-	120-400	4	2,5	1,5	0,8
230/400	-	6	4	2,5	1,5
400/690	-	6	6	4	2,5
1000	-	Järjestelmän suunnittelija valitsee arvot			

Taulukossa 2 on esitetty sallitut lämpenemäarvot jakokeskuksissa.

Taulukko 2. Jakokeskuksille sallitut lämpenemät (ST 53.62 2014).

Keskuksen osa	Lämpenemä [K]
Sisäänrakennetut komponentit <ul style="list-style-type: none"> tavanomaiset kytkin- ja ohjauslaitteet elektroniikkaosat (esim. tasasuuntaussilta) kojeen osat (esim. säädin, vakiojännitelähde) 	Kunkin komponentin sallittu lämpenemä on sallittu tuotestandardien mukaan tai komponentin valmistajan ohjeiden mukaan ottaen huomioon keskuksen sisätilan lämpötilan.
Ulkoisten eristettyjen johtimien liittimet	70
Käsi­käyttöiset ohjauslaitteet <ul style="list-style-type: none"> metalliset eristemateriaalista 	15 25
Kiskot ja johtimet <ul style="list-style-type: none"> Paljaiden kisko­jen ja johtimien suurinta sallittua lämpenemistä 105 K ei saa ylittää. (Myös kaikkien muiden kriteerien on täytettävä.) 	Lämpenemistä rajoittavat <ul style="list-style-type: none"> johtavan materiaalin mekaaninen lujuus mahdolliset vaikutukset lähellä olevaan laitteeseen johtimeen kosketuksessa olevan eristysaineen sallittu lämpötila johtimen lämpötilan vaikutus siihen liitettyyn laitteeseen kytkentäkoskettimien aine ja pintakäsittely.
Kosketeltavissa olevat ulkoiset kotelot ja kannet <ul style="list-style-type: none"> metallipintaiset eristeaineiset pinnat 	30 40
Erilliset pistokytkintyyppiset liitännät	Rajoitetaan arvoon, joka sallitaan sen laitteen komponenteille, joiden osa liitännä on.

ST-kortissa 53.34 on myös esitetty mitoittamisen kannalta monipuolisempi sekä käytännön asennettavuuden paremmin huomioiva keskuksen perustietolomake, joka on myös tämän julkaisun liitteenä 2.

Vaikka periaatteessa jakokeskusten valmistusta ja asennusta koskevat standardit takaavat riittävän turvallisen ja toimivan kokonaisuuden, niin toiminnan taso ja laitteistojen vaatimustenmukaisuus ei ole Suomessa vielä lähelläkään täydellistä. Parannettavaa jakokeskusten rakenteissa ja vikaantumisen hallinnassa on sekä sähkösuunnittelijoilla, komponentti- ja keskusvalmistajilla, urakoitsijoilla, sähkölaitteistojen haltijoilla että kunnossapidon toimijoilla. Näitä sähköpaloja ennaltaehkäiseviä keinoja on koottu tämän tutkimuksen liitteisiin 3–11.

4.2 Yleisimmät komponentit

Jakokeskuksissa käytettävät komponentit ovat lisääntyneet ja monipuolistuneet vuosien saatossa. Jakokeskuksiin asennettavat komponentit muodostuvat kuitenkin edelleen pääsääntöisesti sähkölaitteiden ohjaukseen ja suojaukseen liittyvistä komponenteista. Mekaanisten kytkimien, sulakkeiden ja kontaktorien lisäksi ovat yleistyneet erilaiset elektroniset suojarieleet ja puolijohdekytkimet.

Keskeisimpiä jakokeskuksiin asennettavia komponentteja ovat:

- virtapiirien kytkentään liittyvät komponentit
 - erilaiset kytkimet ja säätimet
 - kontaktorit

- releet
- puolijohdekytkimet ja -releet
- virtapiirien suojaamiseen liittyvät komponentit
 - sulakkeet ja sulakealustat
 - johdonsuoja-automaatit
 - vikavirtasuojat
 - moottorinsuojakytkimet
 - lämpöreleet
- virtapiirien jatkamiseen tarkoitetut komponentit
 - riviliittimet
 - vaihtoliittimet
 - koje- ja pistoliittimet
- jännitetasojen ja taajuuden muuntamiseen liittyvät komponentit
 - suojaerotusmuuntajat
 - teholähteet
 - invertterit
 - pehmokäynnistimet.

Vaikka komponenttien tehtävät eroavat hyvin paljon toisistaan, niille yhteistä ovat lukuisat sähkö- ja asennustekniset suureet ja vaatimukset, joita koko toimitusketjun tulisi noudattaa turvallisen ja toimivan lopputuloksen takaamiseksi. Keskeisimpiä asennettavuuteen ja sähkötekniisiin ominaisuuksiin liittyviä suureita komponenteilla ovat:

- **nimellisvirta** I_n , joka voidaan ilmoittaa sekä hetkellisenä että jatkuvana.
- **nimellisjännite** U_n , joka ilmoitetaan usein tehollisarvona.
- **nimellistaajuusalue** F_n , joka ilmoitetaan usein sallittuna taajuusalueena.
- **nimellisteho** P_n , jonka avulla ilmoitetaan yleensä suurin sallittu tehonkesto.
- **tehokerroin** $\cos\varphi$, joka ilmoittaa laitteen ominaisen tai vaihtoehtoisesti suurimman sallitun lois- ja pätoehon suhteen
- **lämpenemä** T_c , jonka komponentti nimellistoiminta-alueellaan aiheuttaa ympäristöön.
- **käyttölämpötila** T , joka on komponentille suurin sallittu jatkuva lämpötila.
- **kotelointiluokitus** **IPXX**, jonka avulla määritetään komponentille sallitut asennusolosuhteet.

4.3 Liitostekniikat

Jakokeskuksissa käytettävät liitostekniikat ovat pysyneet melko muuttumattomina jo usean kymmen vuoden ajan. Keskeisimpiä liitostekniikoita ovat:

- ruuviliitos
- pulttiliitos (suurivirtaiset liitokset)
- puristusliitos
- jousiliitos
- juotosliitos
- lattapistokeliitos (ns. Abiko)
- pistoliittimet
- huppuliittimet
- eristyksen läpäisevä liitos (joka on kielletty jakokeskusasennuksissa).

Sähkötieto ry:n ST-kortissa ST 51.09 ”Sähkötekniset liitokset alle 1000 V vaihtovirta-asennuksissa” on mainittu, että liitostapoja valittaessa on otettava huomioon erityisesti:

- johtimen materiaali ja eristys
- johtimen muodostavien lankojen määrä ja muoto
- johtimen poikkipinta
- yhteen kytkettävien johtimien lukumäärä
- liittimen ominaisuudet asennettavuuden kannalta, joista kertovat merkinät
 - ”r” eli asennus vain jäykille (rigid) johtimille
 - ”f” eli asennus vain hienolankaisille (flexible) johtimille
 - ”s” tai ”sol” eli asennus vain yksilankaisille (solid) johtimelle.
 - Ilman merkintää liitin soveltuu kaiken tyyppisten johtimien liittämiseen.

Kaapelin ja johtimien asennus- ja liitospisteisiin ei myöskään saa kohdistua mekaanista rasitusta. Vedonpoisto tulee toteuttaa niin, että kaapelit ja/tai johtimien eivät voi vahingoittua mekaanisesti. Lisäksi, jotta liitoksesta tulisi luotettava, kuuluu liitoksen tekkoon usein monta eri vaihetta. Ennen liitoksen tekemistä liitettävät johtimet on puhdistettava johtimissa mahdollisesti olevasta oksidikerroksesta. Jos käytetään puristusliitoksia, on tärkeää käyttää juuri kyseisille liittimille tarkoitettuja puristustyökaluja ja niissä oikeanlaisia leukoja.

Ruuviliitoksissa ruuvit pitää kiristää liitokselle sopivalla kiristysmomentilla, sillä liian löysä liitos saattaa aueta lisää tärinän vaikutuksesta ja olla epäluotettava, ja toisaalta liian kireä liitos voi aiheuttaa johdinten katkeamisen jo liittämisvaiheessa tai ongelmia voi ilmaantua myöhemmin lämpölaajentumisen seurauksena.

Yleisimmät liitostekniikat ovat edelleen ruuvi ja pulttiliitos sekä erilaiset jousitoimiset kytkentäliitokset, jossa sähköinen yhteys saadaan kahden johtavan metallirakenteen välille suuren jousikuormitteisen tai magneetilla tuotetun voiman avulla. Seuraavaksi on käyty tarkemmin läpi näiden kahden liitostyyppin ominaisuuksia ja ongelmia.

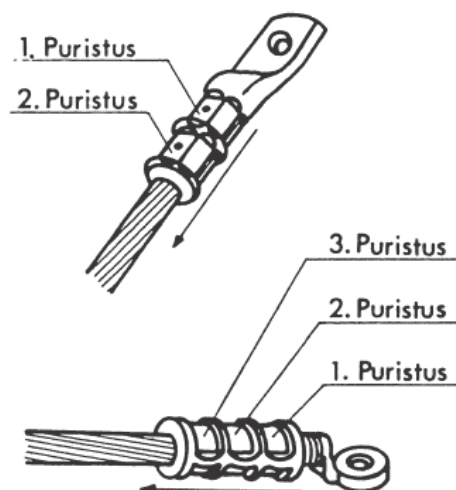
4.3.1 Liitostekniikoiden keskeisimmät ongelmat

Jousiliitokset soveltuvat erityisesti olosuhteisiin, joissa esiintyy tärinää tai iskuja. Jousiliitoksen rakenne pitää liitospaineen automaattisesti samana, jolloin impedanssi liitoksen yli ei pääse kasvamaan ja aiheuttamaan lämpenemistä. ATEX-tiloihin on olemassa myös omat jousiliitinsarjansa. Johtimet liitetään yleensä liittimiin edestä, jolloin asennustyö helpottuu. (ST 51.09 2013)

Liitoksen toistettavuus on haaste jousiliitoksissa, jos liitosta avataan ja suljetaan ja liitettyä johdinta irrotetaan ja kiinnitetään takaisin useita kertoja. Tällöin vaarana on jousen kuoleentuminen, jos avaustoimintaa ei suoriteta oikein.

Puristusliitosta käytetään jakokeskusten liitoksissa pääosin kaapelikengien liittämiseen. Puristusliitoksella oikein liitetyt kaapelikengät ovat luotettavia ja sopivat ruuvikierteisiä kaapelikengä paremmin ahtaisiin jakokeskustiloihin. (ST 51.09 2013)

Luotettavan ja pitkäkestoisen puristusliitoksen aikaansaamiseksi oleellista on oikean tyyppisen ja kokoisien kaapelikengän käyttö ja liitettävän johdinmateriaalin huomioiminen. Lisäksi puristustyökalun on oltava oikean kokoinen ja sopiva kyseiseen puristustyöhön, ja puristukset tulee myös tehdä kaapelikengän kärjestä kohti kaapelia kuvan 5 osoittamalla tavalla. Alumiinille suositellaan myös oksidoitumista ennalta ehkäisevän liitosrasvan käyttöä.



Kuva 5. Kaapelikengän oikea puristusjärjestys (ST 51.09).

Puristusliitoksen tyypillisimmät vikaantumiset johtuvat juuri väärin liitintyyppien käytöstä sekä liitettävän johdinmateriaalin huomiotta jättämisestä, jolloin liitos saattaa ajan myötä löystyä ja kerryttää oksidipintaa. Edellä mainitut asiat taas kasvattavat liitoksen impedanssia, minkä seurauksena liitos voi lämmetä liikaa ja johdin voi jopa irrota kokonaan liittimestä aiheuttaen merkittävän sähköpaloriskin.

Ruuvi- ja pulttiliitokset ovat yleisimmät kaikista käytetyistä liittämismuodoista. Niitä käytetään monissa erityyppisissä liittimissä, komponenteissa ja sähkölaitteissa. Hienolankaisten johtimien liittämiseen ruuviliitos on useimmiten ainoa luotettava liitostapa. Ruuviliitos on lisäksi oikein tehtynä luotettava ja ruuviliitoksen etu on helppo avattavuus ja uudelleensuljettavuus. (ST 51.09 2013)

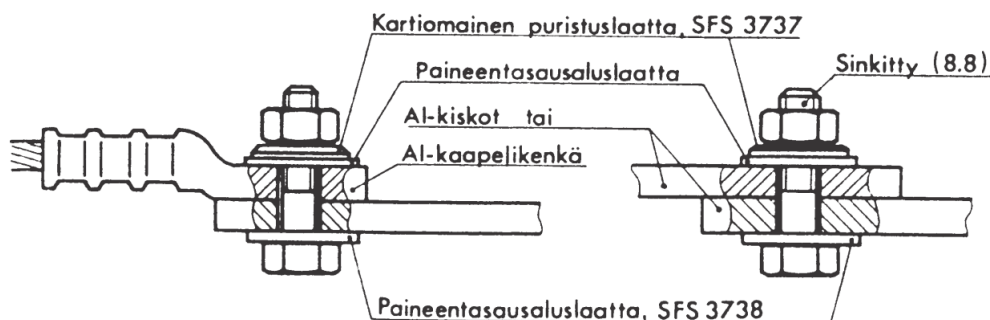
Ruuviliitostekniikka käytetään pääsääntöisesti pienipoikkipintaisissa ja -virtaisissa liitoksissa. Ruuviliitoksien kanssa korostuvat erityisesti seuraavat seikat:

- Yksilankaisten johtimien liittäminen on usein luotettavaa vain yksijohtimisena.
- Kun johdinta ja liitintä kuormitetaan, johdin lämpölaajenee ja vastaavasti jäähtymässään supistuu, mikä vaikuttaa liitoksen löystymiseen, jos liitos ei mukaudu lämpötilan muutokseen.

Pulttiliitostekniikkaa käytetään pääsääntöisesti suurivirtaisissa liitoksissa (>35 A), jolloin erityisesti seuraavat liitostyyppin ominaisuudet korostuvat:

- Alumiiniliitoksissa tulisi aina käyttää paineentasauslevyjä liitoksen kummallakin puolella sekä kartiopuristuslaattaa mutterin alla (kuva 6). Kartiomaisella puristuslaattalla varmistetaan Al-liitoksen joustavuus eri lämpötiloissa, kun liitos on esikiristetty oikeaan kiristysmomenttiin (taulukko 3), jolloin puristuslaatta pitää liitoksessa aina oikean puristuspaineen (Nenonen & Granqvist 2009).
- Al-liitosta tehdessä tulee alumiinin pinnalle muodostuva oksidikerros harjata aina ennen liitoksen tekoa pois ja käyttää liitoksen yhdistämiseen sähköjohtavuutta parantavaa ja oksidikerrosta ehkäisevää rasvaa tai voidetta.
- Valmistajien ja taulukoiden ohjeita kiristysmomenteista tulee noudattaa aina.
- Suuret lämpötilan vaihtelut lisäävät liitosten vikaantumistaajuutta, koska esimerkiksi alumiini laajenee lämpötilan noustessa huomattavasti enemmän kuin pulttiliitoksissa käytetty teräspultti.

- Alumiinin kylmäjuoksevuus eli viruminen tulisi ottaa huomioon. Viruminen alkaa, kun alumiini joutuu tarpeeksi suuren puristuksen alaiseksi. Silloin johdinaine työntyy siihen suuntaan, jossa puristus on pienin, eli alumiini viruu. Virumisen aiheuttamat ongelmat ovat lisääntyneet, koska nykyään käytetään usein hehkutettuja johtimia, joissa virumisongelmat ovat pahempia. (ST 51.09)



Kuva 6. Paineentasauslaattojen ja puristuslaatan käyttäminen (ST 51.09).

Taulukko 3. Ruuviliitosten ja pienten pulttiliitosten suositellut kiristysmomentit (ST 51.09).

Kiskon materiaali	E-AlMgSi (T6)				
Pultin koko	M6	M8	M10	M12	M16
Kiristysmomentti [Nm]	6-9	15-22	30-44	50-75	120-190

Pistoliittimiä käytetään erityisesti muunneltavissa asennusjärjestelmissä, joiden avulla voidaan rakentaa sähkönjakelujärjestelmä valmiista komponenteista ilman työkaluja (ST 51.09). Pistoliittimien rakenne on hyvin samankaltainen perinteisen pistorasian ja pistotulpan kanssa.

Pistoliittimet ovat parhaimmillaan vakaisissa ja kuivissa asennusolosuhteissa, joissa liitoksen väleihin ei pääse muodostumaan korrodoivia yhdisteitä. Vastaavasti pistoliittimille haitallisia ympäristöjä ovat tilat, joissa esiintyy runsasta kosteutta, suuria lämpötilan vaihteluita tai voimakkaasti syövyttäviä kaasuja (esimerkiksi maatilat ja jätevedenpuhdistamot).

Ulkoisen voiman aikaansaama paineliitos ei ole varsinaisesti oma liitosryhmänsä, vaan muodostuu erilaisista kytkentälaitteista, joissa liitos tapahtuu mekaanisesti joko jousen, hydrauliiikan tai esimerkiksi magneettikentän aikaansaaman puristusvoiman avulla. Tyypillisimpiä komponentteja ovat erilaiset kontaktorit, releet, kytkimet ja katkaisijat.

Paineliitoksen etuna on kytkentätilan muutos ilman tarvetta muuttaa itse asennuksia. Paineliitoksissa ongelmia aiheuttavat – samoin kuin pistoliittimilläkin – asennusolosuhteet, joissa liitoksen pinta voi vaurioitua korroosion vaikutuksesta. Lisäksi mekaanisen rakenteen vuoksi liitoksen paine saattaa heikentyä ajan myötä, jolloin molemmissa tapauksissa seurauksena ovat ylimenoimpedanssin kasvu ja siitä johtuva ylimääräinen liitoksen lämpeneminen, joka voi aiheuttaa vaurioita ohjattaville sähkölaitteille ja itse paineliitokselle.

4.3.2 Korroosion ja muiden kemiallisten muutosten vaikutukset

Metallit ja metalliseokset ovat yleensä monikiteisiä aineita, joissa kiteitä erottavat faasirajat. Nämä rajapinnat ovat myös kaikkein herkimpiä korroosiolle. Sähköisiin liitoksiin vaikuttaa korroosiomuodoista pääasiassa yleinen korroosio, johon sisältyvät galvaaninen

korroosio ja paikallinen korroosio. Paikallinen korroosio sisältää mm. piste-, rako-, raeraja-, jännitys-, eroosio- ja kavitaatiokorroosion sekä selektiivisen syöpymisen. Paikalliset korroosionmuodot ovat usein autokatalyyttisiä prosesseja, eli niissä ainakin yksi reaktiotuote edistää reaktiota. (Laurila 2009)

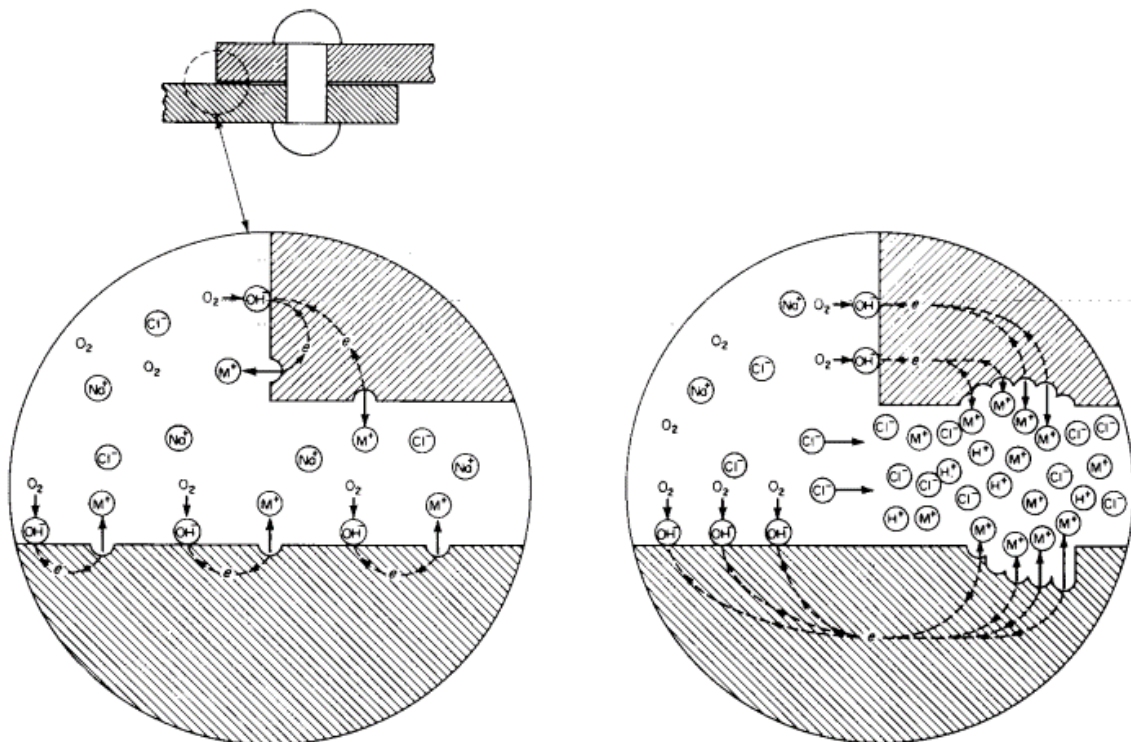
Ympäristö ja käytettyjen materiaalien ominaisuudet vaikuttavat korroosioon voimakkaasti. Seuraavien ympäristötekijöiden on todettu vaikuttavan korroosion muodostumiseen, etenemisnopeuteen ja etenemistäajuuteen sähköisissä liitoksissa:

- ympäristössä vapaana olevien alkuaineiden kemiallinen koostumus sisältäen epäpuhtaudet (alkuaineet voivat kulkeutua liitokseen myös ilman kosketusta)
- esiintyvien alkuaineiden ja yhdisteiden olomuoto (kiinteä, neste tai kaasu)
- lämpötila
- happioksidi-pitoisuus (O_2)
- happamuus (pH)
- liike (mekaaninen hankaus, liikkeen mukana tulevat hiukkaset).

Seuraavaksi on listattu käytettyjen materiaalien ominaisuuksia, jotka voivat vaikuttaa korroosiota edistävästi:

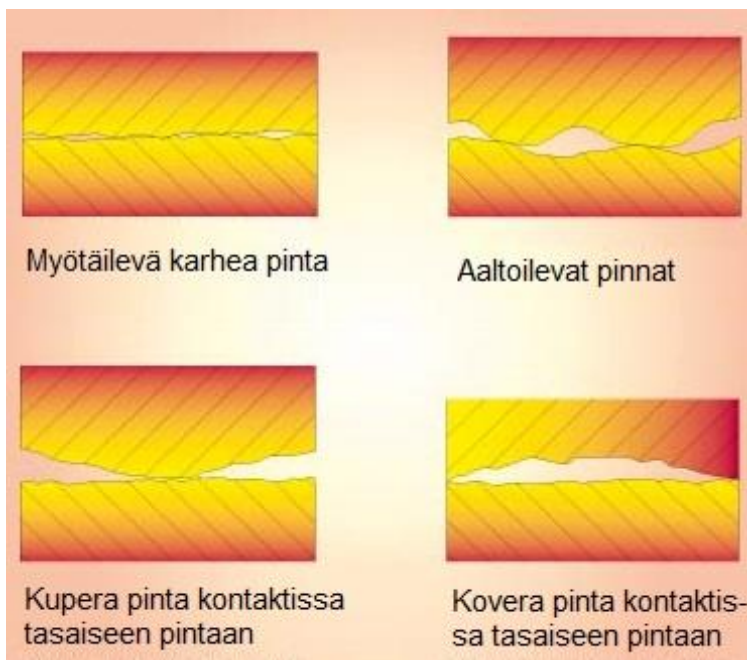
- materiaalin ja mahdollisen erillisen pinnoituksen kemiallinen koostumus
- puhtaan aineen tai seoksien muodostamat mikrorakenteiden rajapinnat
- pinnan kemiallinen aktiivisuus, jossa vähemmän aktiivinen pinta lisää väsymisenkestävyyttä
- pintojen väliset sisäiset ja ulkoiset jännitystilat, jotka vähentävät väsymisenkestävyyttä
- yhteys muihin materiaaleihin (galvaanisen sarjan korrodoiva vaikutus)
- ympäristön ja sähköisen liitoksen välisen yhteyden jatkuvuus eli kuinka jatkuvaa ja tiettyyn kohtaan kohdistuvaa ympäristön aiheuttama korrodoiva vaikutus on. (Laurila 2009)

Kuvassa 7 oleva rakokorroosio on yksi yleisimmistä sähköisissä liitoksissa vaikuttavista korroosionmuodoista olosuhteissa, joissa esiintyy syövyttäviä kaasuja tai nesteitä. Kuvan metalliliitos on upotettuna happipitoiseen veteen (pH=7). Aluksi kaikilla pinnoilla tapahtuu hapetusreaktio, jolloin varaustasapaino on voimassa. Toisessa kuvassa varaustasapaino liitoksen välisessä raossa on häiriintynyt, koska korroosiotuotteet (vesipitoiset oksidit) sulkevat raon hapelta. Rakoon syntyy ylimääräinen positiivinen varaus, jolloin kloori-ionit (Cl^-) pääsevät rakoon. Tästä syntyy metallisuoloja, jotka hydrolysoituvat raossa ja happamoittavat veden, joka puolestaan saa aikaan pelkistysreaktion, jolloin paikallinen metallin liukeneminen kiihtyy. Tämä puolestaan kiihdyttää raossa tapahtuvaa reaktiota ja hapettumista.



Kuva 7. Rakokorroosion mekanismi kloridiliuoksessa: a) alkutilanne b) korroosion kiihtyminen raossa happamuuden ja kloridi-ionipitoisuuden noustessa (Aromaa 1987).

Korroosiota lisäävät myös epätasaiset pinnat, jotka aiheuttavat epätasaista lämpenemää liitoksessa ja kiihdyttävät siten kemiallisten muutosten etenemistä ja oksidikerroksen muodostumista liitospintojen välille (kuva 8).

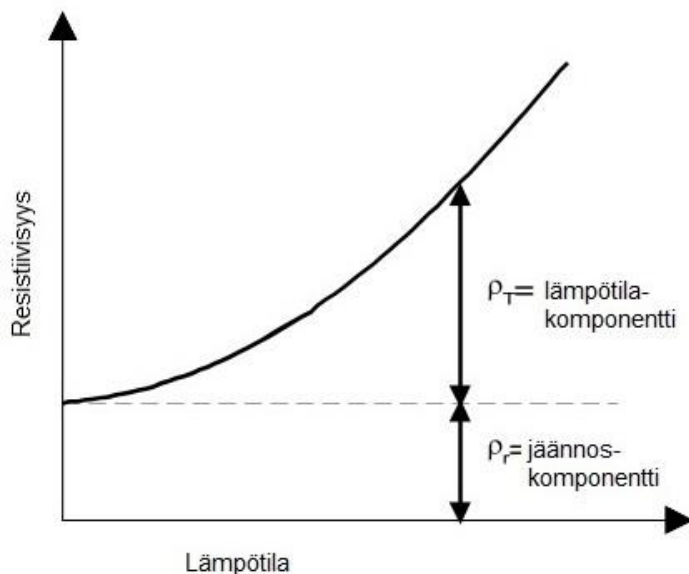


Kuva 8. Pintojen epätasaisuuden vaikutus aiheutuvaan kontaktivastukseen. (M. Yovanovich, J. Culham ja J. Teertstra 1997).

Metallien ominaisvastus riippuu lämpötila- (ρ_T) ja jäännöskomponentista (ρ_R):

$$\rho_{TOT} = \rho_T + \rho_R \quad (1)$$

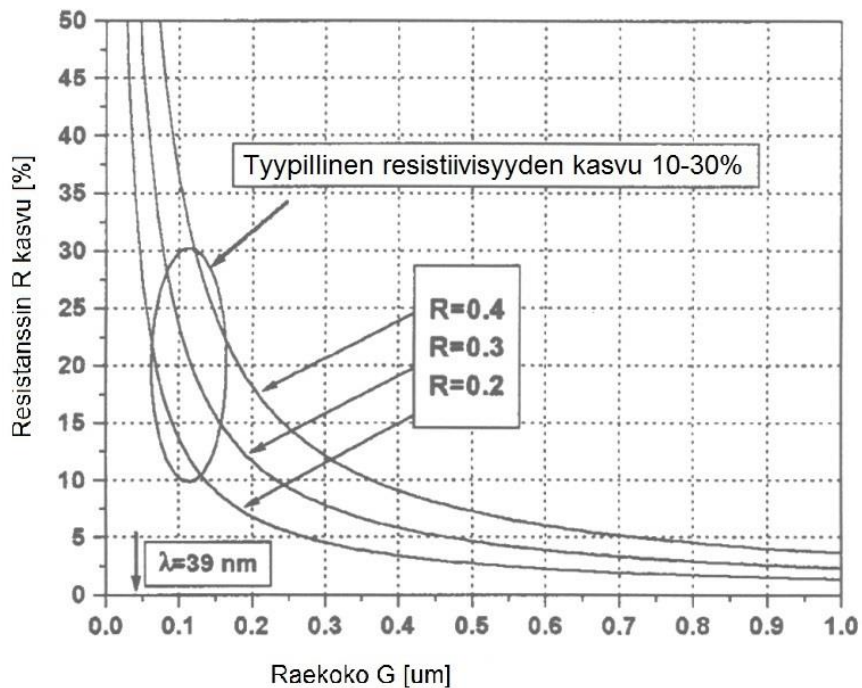
Metalleilla lämpötilan kohotessa ioniytimien värähtely lisääntyy ja elektronien liikenopeus pienenee, jolloin resistiivisyys kasvaa ja lämpötilakomponentin osuus kasvaa kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9. Metallin ominaisvastuksen muuttuminen lämpötilan funktiona (Laurila 2009).

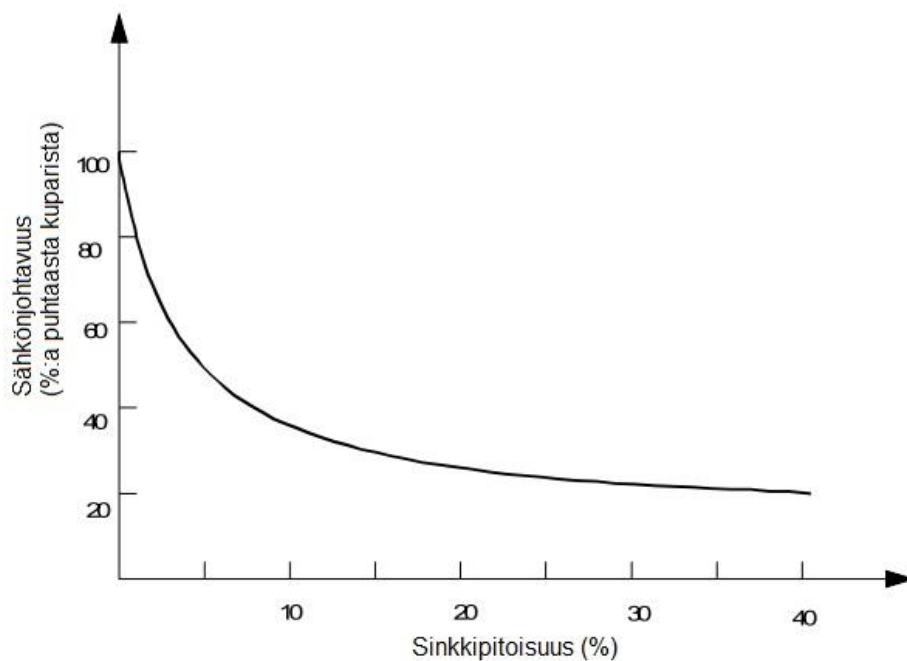
Jäännöskomponentti koostuu dislokaatioista, raerajoista ja epäpuhtausatomeista, jotka ovat rakenteellisia virheitä, joissa elektronit siroavat ja liitosten tapauksessa ylimentovastus kasvaa.

Kuvassa 10 on esitetty esimerkki raekoon vaikutuksesta resistanssiin. Toisin sanoen mitä pienempi ja yhtenäisempi raekoko on, sitä vähemmän siinä esiintyy resistanssia. Liitosmateriaaleissa raekoko riippuu pääasiassa valmistuksen muokkausasteesta, eli toisin sanoen mitä suurempi muokkausaste on, sitä pienempi on syntyvä raekoko. Raekoko voi muuttua myös valmistuksen jälkeen korkean lämpötilan vaikutuksesta. (Laurila 2009)



Kuva 10. Raekoon vaikutus sähkönjohtavuuteen (Laurila 2009).

Korroosion ja lämpötilan muutosten lisäksi metallien sähkönjohtavuuteen vaikuttaa oleellisesti käytettävä metalliseos. Esimerkiksi jo melko pieni sinkin lisäys kupariin heikentää sen sähkönjohtavuutta selvästi (kuva 11).



Kuva 11. Sinkin lisäyksen vaikutus kuparin sähkönjohtavuuteen (Laurila 2009).

4.4 Keskeisimmät liitosten vikaantumiseen vaikuttavat sähkötekniset suuret

4.4.1 Virran vaikutus

Kuormitusvirran kasvaessa virtapiirin osana olevien kaapeleiden ja kojeiden lämpötila nousee kuormitusvirran toiseen potenssiin verrannollisesti. Toisin sanoen kuormitusvirran kaksinkertaistuessa lämpötila nousee 2²-kertaiseksi. Jos virtatiessä esiintyy heterogeenisiä rajapintoja, joiden ylimenovastus on kohonnut, aiheutuu kohdassa vastaavasti tehohäviötä. Taulukossa 4 on kuvattu kuinka jo 100 mΩ ylimenovastus aiheuttaa merkittävän lämpenemisen erityisesti suuremmilla virroilla. (SÄTY 2003)

Taulukko 4. Virran vaikutus ylimenokohdan lämpenemiseen 100mΩ ylimenovastuksella (SÄTY 2003).

Virta [A]	Lämmittävä teho ylimenokohdassa [W]
10	10
16	25,6
25	62,5
100	1000

Kuormitusvirran nousua ja sen vaikutusta lämpenemään voidaan arvioida myös seuraavilla kaavoilla (ST 53.62 2014):

$$\Delta T_{\text{todellinen}} = T_{\text{mitattu}} - T_{\text{ympäristö}} \quad (2)$$

$$\Delta T_{50\% \text{ kuormalla}} = \Delta T_{\text{todellinen}} \cdot \left(\frac{I_{50\% \text{ kuormalla}}}{I_{\text{mitattu}}} \right)^2 \quad (3)$$

Nimelliskuormitusvirta, vaikka se olisi suurikin, ei luonnollisestikaan ole sähköjärjestelmälle vaarallinen, jos virtapiiri sekä sen komponentit ja liitokset ovat kunnossa ja kestävät virran lämpövaikutukset. Ylilämpeneminen sen sijaan voi johtua liitosresistanssissa aiheutuvasta tehohäviöstä, suuresta vuotovirrasta tai ylikuormituksen tai oikosulun aiheuttamasta virrasta. Yleisesti virran vaikutuksesta syntyy tehohäviöitä, joka ilmenee kyseisen osan tai liitoksen lämpenemisenä. Vuotovirtojen osalta jo jopa 100 mA vuotovirta voi aiheuttaa otollisissa oloissa vaarallisia lämpötiloja. Sen vuoksi erikseen määritellyissä palovaarallisissa käyttöympäristöissä tulee käyttää enintään 300 mA vikavirtasuojia, joiden toiminta-alue on käytännössä 150..300 mA. (SÄTY 2003)

Myös vaihtelevat kuormitukset lämmittävät ja jäädyttävät liitoksia ja voivat näin ollen aikaan saada liitosten löystymistä, jos liitos on toteutettu huonosti tai liitoksessa käytetty johdin tai liitostekniikka ei mukaudu riittävästi lämpötilojen vaihteluun.

4.4.2 Jännitteen vaikutus

Jännitteen muutokset voivat aiheuttaa laitteissa virhetoimintoja, mutta suurimman palovaarallisen riskin sähköjärjestelmissä jännitteen osalta aiheuttavat ylijännitteet. Ylijännitteet voivat kytkeytyä järjestelmästä toiseen galvaanisesti, induktiivisesti tai kapasitiivisesti. Galvaanisessa kytkeytymisessä ylijännite kytkeytyy häiriölähteestä kohteeseensa

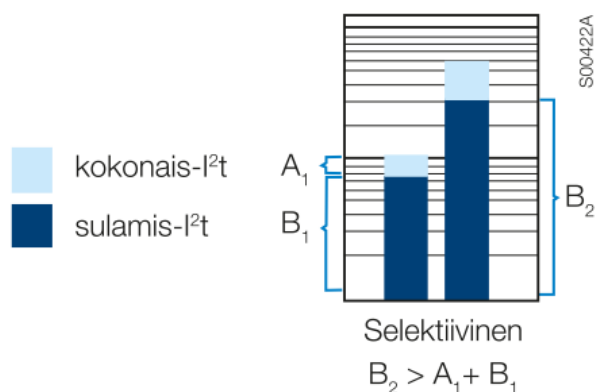
yhteisen impedanssin kautta, eli häiriölähde ja vikaantunut kohde ovat kiinteässä yhteydessä toisiinsa. Induktiivisessa kytkeytymisessä häiriölähde aiheuttaa magneettikentän, joka indusoi kohteeseensa jännitteen. Kapasitiivisessa kytkeytymisessä sen sijaan kytkeytyminen tapahtuu sähkökentän johdosta kahden eri pisteen, joilla on suuri potentiaaliero, välillä. (SÄTY 2003)

Ilmastollisista ilmiöistä johtuvat ylijännitteet voivat kytkeytyä kaikilla kolmella eri tavalla, mutta välittömän palovaaran voi sähkölaitteissa aiheuttaa suora salamanisku (galvaaninen kytkeytyminen) tai sähköjärjestelmän välittömään läheisyyteen iskenyt salama (induktiivinen tai kapasitiivinen kytkeytyminen). (SÄTY 2003)

4.4.3 Kokonaisenergian kestävyys (I^2t -arvo)

I^2t -arvo kuvaa komponentin tai laitteen kykyä kestää energiaa. Mitä lyhempi ylikuormituksen tai vian kesto-aika on, sitä suuremman virran komponentti voi kestää. Valitettavasti komponenttivalmistajat eivät kuitenkaan ilmoita läheskään aina suurinta sallittua I^2t -arvoa, jolloin komponentin suojaus tulee tehdä muiden kriteerien mukaan. Komponenttien ja laitteiden suojaus tulee mitoittaa niin, että ne kestävät esiintyvät kuormitus- ja vikavirrat tuhoutumatta.

Komponentti ja suoja on valittava yhdessä niin, että suojan I^2t -arvo on pienempi kuin suojattavan komponentin I^2t -arvo, jolloin suoja laukaisee vikaantuneen piirin verkosta ennen komponentin tuhoutumista. (SÄTY 2003) Kuvassa 12 on esitetty esimerkki kahden peräkkäisen sulakkeen valitsemisesta niin, että sulakesuojaus toimii varmasti selektiivisesti.



Kuva 12. Peräkkäisen sulakesuojauksen valinta selektiivisesti I^2t -arvo huomioiden (ABB 2011).

4.4.4 Staattinen sähkövaraus

Käytännössä kaikilla kappaleilla on jonkin verran kapasitanssia maapotentiaaliin nähden, jolloin ne voivat varautua sähköisesti. Staattinen sähkövaraus voi nousta helposti jopa useaan kymmeneen kilovolttiin ja aiheuttaa siten sähköpurkauksia. Jos purkausenergia on tarpeeksi suuri, voi sen seurauksena olla palavan tai räjähtävän aineen syttyminen. Staattinen sähköpurkaus voi myös rikkoa erityisesti elektroniikan komponentteja, minkä seurauksena laite saattaa vikaantua palovaarallisesti.

Staattisen sähköpurkauksen erityistapauksena, mutta melko yleisenä sellaisena, voidaan pitää ihmiseen syntyvää staattista sähkövarausta ja sen purkautumista ympäristöön. Ihmiseen varautuva jännite voi olla jopa 20...30 kV, jolloin purkautuminen voi aiheuttaa myös näkyvän valokaaren ja siten palovaaran, erityisesti palavien nesteiden ja kaasujen lähistöllä (SÄTY 2003).

4.4.5 Sähköverkon häiriöiden vaikutus

Standardi SFS-EN 50160 (2010) määrittelee jakeluverkosta jaettavan sähkön laadun ja toisaalta reunaehdot sähkönkäyttäjille siitä, kuinka paljon verkkoon saa tuottaa häiriöitä. Standardi määrittelee muun muassa rajat seuraaville ominaisuuksille ja suureille, jotka jakelujännitteen tulee täyttää:

- verkkotaajuus
- jakelujännitteen suuruus
- jännitetasojen vaihtelu
- nopeiden jännitemuutosten suuruus
- välkynnän häiritsevyys
- jännitekuopat
- lyhyet ja pitkät keskeytykset
- tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet
- transienttiylijännitteet
- jakelujännitteen epäsymmetria
- harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet
- verkon signaalijännitteet.

Edellä mainituista haitallisimpia ja sähköpalojen riskiä eniten lisääviä tekijöitä ovat yliaallot, transientit sekä hitaat ja nopeat jännitteiden muutokset. Jännitekuopat aiheuttavat myös toimintahäiriöitä laitteistoissa, mutta niiden seuraukset ovat vain harvoin palovaarallisia.

Koska **taajuus** on periaatteessa koko sähköjärjestelmässä yhteinen, globaali suure, sen vaihtelut ovat melko pieniä ja siten taajuuden muutokset ovat harvoin syynä sähkölaitteistojen palovaaralliseen vikaantumiseen. Taajuusmuuttajien lisääntyminen ei myöskään ole aiheuttanut tiettävästi palovaarallisten vikaantumisten lisääntymistä. Toisaalta uudempien taajuusmuuttajien ohjainyksiköt on usein varustettu myös erilaisilla suojalaitteilla, jotka tunnistavat myös syötettävän kohteen vikaantumisen, jolloin taajuusmuuttajan lähtö kytkeytyy automaattisesti pois päältä.

Verkossa voi esiintyä sekä harmonisia että epäharmonisia **yliaaltoja**. Harmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna. Yliaaltojännitteitä voidaan arvioida joko yksittäin niiden suhteellisella amplitudilla verraten yliaallon suuruutta perustaajuiseen jännitteeseen tai yhdessä esimerkiksi harmonisella kokonaissäröllä (THD). Molemmissa tapauksissa yksikkönä on %. Vastaavasti epäharmoniset yliaallot ovat yliaaltojännitteiden välissä, eli niiden taajuudet eivät ole perusaaltojen monikertoja. (Mäkinen 2010)

Yliaaltoja esiintyy epälineaaristen sähkölaitteiden käytön yhteydessä. Tällaisia laitteita ovat muun muassa yksivaiheiset kuormat, hakkuriteholähteet sekä purkauslamput. Yliaaltopitoisessa verkossa jännitteen ja virran käyrämuoto ei ole puhdasta siniaaltoa. Yliaalloista sähköpalojen esiintymisen kannalta haitallisimpia ovat kolmella jaolliset yliaallot, jotka eivät kumoa toisiaan edes symmetrisessä kolmivaiheisessa kuormituksessa, vaan summautuvat yhteen aiheuttaen rasituksia järjestelmän paluujohtimissa (N tai PEN). Pahimmillaan summautuvat yliaaltovirrat voivat olla jopa vaihevirtoja suurempia ja aiheuttaa suurta palo- ja vikaantumisriskiä erityisesti järjestelmissä, joissa N- tai PE-johdin on mitoitettu vaihejohtimia pienemmäksi. (SÄTY 2003) Yliaallot myös kuormittavat muuntajia ja aiheuttavat niissä ylimääräisiä pyörrevirtahäviöitä, joten yliaallot tulisi pyrkiä kompensoimaan aina niiden syntykohdassa ja viimeistään sähkölaitteiston liittymäkohdassa.

Yliaaltojen osalta kuitenkin kaikkein vahingollisimpia tilanteet laitteiston kannalta ovat resonanssitilanteet, joissa yliaaltotaajuus osuu verkon resonanssitaajuudelle, joka voi voimistaa yliaaltoja moninkertaisesti. Resonanssi voi syntyä jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille. (SÄTY 2003) Tämän vuoksi erityisesti kompensointiparistojen osalta on tärkeää tarkistaa aina yliaaltopitoisessa verkossa, ettei pariston mitoitus osu verkon resonanssitaajuudelle ja voimista järjestelmässä esiintyviä yliaaltoja ja aiheuta näin ollen vaaratilanteita.

Nopeat jännitemuutokset eli transientit ovat lyhytaikaisia värähteleviä tai ei-värähteleviä ylijännitteitä, jotka tavallisesti vaimenevat voimakkaasti ja joiden kesto on enintään muutamia millisekunteja (Mäkinen 2010). Transientti voi aiheuttaa laitteistossa läpilyönnin, jos jännitteen amplitudi riittää ylittämään eristyksen jännitteenkestoisuuden.

Hitaat jännitevaihtelut johtuvat usein kuormitusten ja verkon kytkentätilanteen muutoksista. Hidas jännitevaihtelu on suhteellisen pitkään kestävä yli- tai alijännitetilanne, joka voi johtua verkon kytkentätilan muutoksesta tai kuormituksen vaihtelusta tai esimerkiksi paikallisen kondensaattoripariston väärästä toiminnasta (ylikompensoinnista). Pitkäkestoinen ylijännite aiheuttaa kuormissa virran nousua ja siten suurempia tehonhäviöitä, jotka voivat ylikuormittaa järjestelmää. Pitkäkestoiset syöttävästä jakeluverkosta johtuvat ylijännitteet ovat kuitenkin melko harvinaisia ja siten vain harvoin syynä sähköpaloihin.

5 SÄHKÖLAITTEISTOJEN KUNNONHALLINTA JA SÄHKÖPALOJEN ENNALTAEHKÄISY

Sähköturvallisuuslaki velvoittaa, että kaikki sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, että

- niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa
- niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä
- niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös 517/1996 sähkölaitteistojen käyttöönnotosta ja käytöstä sen sijaan velvoittaa, että sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava, että sähkölaitteistossa havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti. Haltijan on myös huolehdittava siitä, että laitteiston kuntoa ja turvallisuutta tarkkaillaan ja että havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti. Sähkölaitteistot on jaettu luokkiin laitteiston laajuuden tai erityisominaisuuksiensa mukaan ja KTMP 517/1996 edellyttää, että luokkien 2 ja 3 sähkölaitteistoille on laadittava ennalta sähköturvallisuuden ylläpitävä kunnossapito-ohjelma. Muiden sähkölaitteistojen osalta ohjelma voidaan korvata laitteiden ja laitteistojen käyttö- ja huolto-ohjeilla.

Tukes-ohje S4-11:ssä annetaan myös käytännönläheisiä ohjeita sähkölaitteistoista ja käytönjohtajista. Ohjelmaan tulisi sisällyttää kunnossapitoon kuuluvina mm. seuraavat aihealueet niihin kuuluvine huolto-, kunnossapito- ja korjaustoineen:

- riittävä sähköturvallisuuden edellyttämä kunnon ja vikojen valvonta
- perussuojaus ja mekaaninen suojaus
- vikasuojaus (suojalaitteiden asetteluarvot)
- toimenpiteet palo- ja räjähdysvaaran ehkäisemiseksi
- ilmajohtojen turvaetäisyydet, vapaa johtoaukea ja kiipeämisen esto
- sähköpylväiden kunto ja lahoisuustarkastus
- sähkötilojen lukitukset, niihin pääsy ja varoituskilvet
- maadoitukset ja potentiaalintasaukset.

Edellä mainittujen lisäksi Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös 1193/1999 sähkölaitteistojen turvallisuudesta velvoittaa sähkölaitteiston haltijaa ryhtymään tarvittaviin toimenpiteisiin käyttöolosuhteiden muuttuessa, jotta voidaan varmistaa sähkölaitteistojen turvallisuus myös muuttuneissa olosuhteissa.

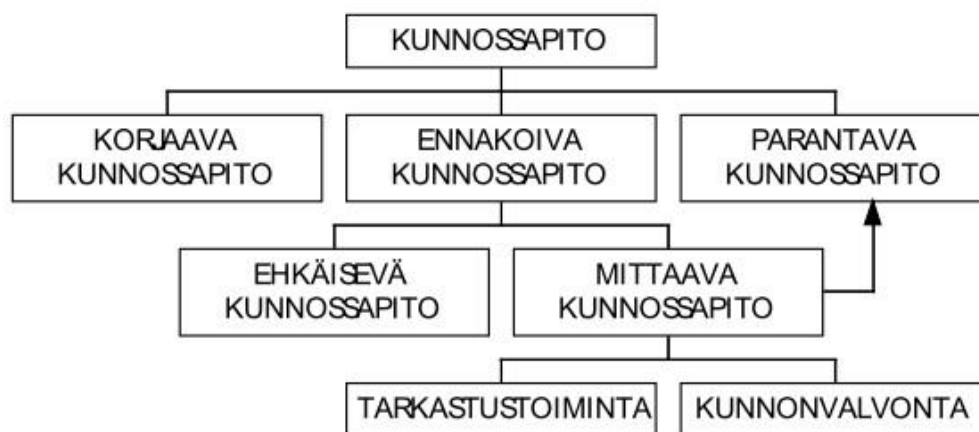
Perinteinen korjaava kunnossapito on edelleen yleisin ja käytetyin kunnossapidon muoto. Kuitenkin jo 1970-luvulla huomattiin, että kunnossapito ei ole ainoastaan korjaamista, vaan myös vikojen ja vikaantumisen hallintaa ja estämistä. Lisäksi laitteiden tehokas käyttäminen ja luotettavuus eivät riipu ainoastaan kunnossapitäjistä, vaan mitä suuremmin myös laitteistojen käyttäjistä. (Järviö & Lehtiö 2012)

5.1 Kunnossapidon lajit

Kunnossapidon eri lajeja voidaan jaotella monella eri tavalla, mutta perinteisen jaottelun mukaan kunnossapito jaetaan korjaavaan, ennakoivaan ja parantavaan kunnossapitoon. Kuvassa 13 on esitetty kunnossapidon jaottelu teknisen toteutustavan mukaan.

SFS-EN 13306 (2010) jaottelee sen sijaan kunnossapidon enemmänkin sen aikataulutuksen mukaan. Siinä ennakoivasta kunnossapidosta käytetään termiä ehkäisevä kunnossapito. Ehkäisevä kunnossapito jakautuukin kuntoon perustuvaan ja jaksotettuun kunnossapitoon. Korjaava kunnossapito sen sijaan jakautuu siirrettyyn ja välittömään kunnossapitoon.

Eräs näkökulma kunnossapitolajien jaottelulle ovat myös prosessiteollisuuden standardit, joissa PSK 6201 (2011) -standardissa kunnossapidon käsitteet ja määritelmät jaotellaan suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjauksiin.



Kuva 13. Kunnossapidon lajien jaottelu (ABB 2003).

5.1.1 Korjaava kunnossapito

Korjaava kunnossapito on yksinkertaisimmillaan sitä, että laite tai kone huolletaan vasta vaurion tai vian jo synnyttyä. Yleensä vaurioituminen aiheuttaa katkoksen sähkönjake luun tai prosessiin. Yllättävästä vikaantumisesta aiheutuvat haitat tai tuotannonmenetyskustannukset ovatkin yleensä huomattavasti suuremmat kuin itse korjauksen tai laitteen korvaamisen kustannukset. (ABB 2003 ja Järviö & Lehtiö 2012)

Korjaavalla kunnossapidolle tyypillisiä tehtäviä ovat:

- vian määrittäminen
- vian tunnistaminen
- vian paikallistaminen
- korjaus / väliaikainen korjaus / korvaaminen
- toimintakuntoon palauttaminen (Järviö & Lehtiö 2012).

5.1.2 Ennakoiva kunnossapito

Ennakoivan (ehkäisevän) kunnossapidon tarkoituksena on estää yllättävät vauriot ja vikaantumiset ja niistä johtuvat yllättävät käyttökatkokset. Ennakoivaan kunnossapitoon kuuluvat ehkäisevä kunnossapito eli säännöllinen huoltotoiminta sekä mittaava kunnossapito, jossa seurataan kohteen suorituskykyä.

Ennakoiva kunnossapitotoiminta lisää myös turvallisuutta. Viimeisen vuosikymmenen aikana ennakoivan kunnossapidon luonne on muuttunut yhä enemmän määräaikaishuolloista oikea-aikaisiin huoltoihin. Huoltojen ajankohta ja sisältö määritellään tällöin pääsääntöisesti kunnonvalvonnan mittausten ja erilaisten tarkastusten avulla. (ABB 2003) Ennakoivalle kunnossapidolle tyypillisiä tehtäviä ovat:

- tarkastaminen

- kuntoon perustuva kunnossapito
- määräysten mukaisuuden toteaminen
- testaaminen
- käynninvalvonta
- vikaantumistietojen analysointi (Järviö & Lehtiö 2012).

Ehkäisevää kunnossapitoa kutsutaan usein puhekielessä huolloksi. Vaikka kunnossapidon standardi SFS-EN 13306 (2010) ei tunne ollenkaan huollon määritelmää, huolto ymmärretään yleensä toimenpiteenä, jossa pidetään yllä kohteen käyttöominaisuuksia tai palautetaan heikentynyt toimintakyky. Näin ollen huollon ja ennakoivan kunnossapidon tehtävät ovat osittain päällekkäisiä. (Järviö & Lehtiö 2012)

Huollolle tyypillisiä tehtäviä ovat laitteen varsinaista toimintaa tukevista ominaisuuksista ja kunnosta huolehtiminen, esim.

- puhdistus
- voitelu
- kalibrointi
- kuluvien osien vaihtaminen
- toimintakyvyn palauttaminen (Järviö & Lehtiö 2012).

Mittaavan kunnossapidon osa-alueita ovat kunnonvalvonta, joka on jatkuvaa säännöllistä toimintaa, sekä muu erillisin mittauksin tehtävä tarkastustoiminta. Mittaavassa kunnossapidossa havaitut ongelmat johtavat usein myös parantaviin toimenpiteisiin, kun mittaamalla voidaan havaita esimerkiksi mitoitusvirheitä ja näin ollen korvata laitteistoa sopivammilla ratkaisuilla. (ABB 2003)

Kunnonvalvonta perustuu muutosten seuraamiseen mittaussuureissa, eli kyseessä on jatkuva toiminta, jonka suorittaa usein sähkölaitteiston haltijan nimeämä taho. Esimerkiksi teollisuudessa lämpötilan kasvu tai värinän lisääntyminen on yleensä merkinä koneen kunnan huononemisesta. Kunnonvalvonta sisältää näiden muutosten havaitsemisen, syyn tarkemman selvittämisen sekä arvion siitä, kuinka vakava vaurio on, minkä tavoitteena on ennustaa jäljellä olevan käyttöikä. (ABB 2003)

Sähkölalalla **tarkastustoiminta** on osittain säädeltyä. Tarkastustoiminnalla voidaan ymmärtää sekä sähkölaitteiston haltijan omavalvonta että ulkopuoliset, kolmannen osapuolen suorittamat tarkastukset. Tukes valvoo kolmansien osapuolien suorittamia tarkastuksia ja tarkastajatahon tulee olla toiminnassaan riippumaton ja puolueeton. Kaikille uusille luokan 1–3 sähkölaitteistolle on tehtävä kolmannen osapuolen **varmennustarkastus**. Tarkastuksen voi suorittaa valtuutettu tarkastuslaitos, valtuutettu tarkastaja tai työn suorittanut urakoitsija, jos yrityksellä on Turvallisuus- ja kemikaaliviraston myöntämä oman työn varmennusoikeus.

Lisäksi luokan 1–3 sähkölaitteistoille (pois lukien asuinrakennukset) on tehtävä viiden, kymmenen tai 15 vuoden välein **määräaikaistarkastus**, jonka tavoitteena on riittävässä laajuudessa pistokokein tai muulla soveltuvalla tavalla varmistua siitä, että

- sähkölaitteiston käyttö on turvallista ja laitteistolle on tehty huolto ja kunnossapito-ohjelman mukaiset toimenpiteet
- sähkölaitteiston käyttöön ja hoitoon tarvittavat välineet, piirustukset, kaaviot ja ohjeet ovat käytettävissä
- sähkölaitteiston laajennus- ja muutostöistä on asianmukaiset tarkastuspöytäkirjat. (KTMp 517 1996)

Sähkötalokien ennaltaehkäisy on oleellinen osa määräaikaistarkastusta. Määräaikaistarkastuksessa kiinnitetään huomiota syttymisvaaraa aiheuttaviin riskitekijöihin, niiden esiintymiseen ja syntymekanismeihin (ST 51.23 2012). Liitteessä 10 on esitetty lisää sähkötalokia ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä sähkölaitteistojen tarkastuksen osalta.

Parantavalla kunnossapidolla tarkoitetaan laitteiden suorituskykyä, käytettävyyttä, luotettavuutta ja turvallisuutta lisäävää toimintaa. Parantava kunnossapito voidaan näin ollen jakaa kolmeen pääryhmään:

- Ensimmäisessä ryhmässä kohde kunnostetaan käyttämällä uudempia osia tai komponentteja kuin alkuperäiset, mutta kohteen suorituskyky ei varsinaisesti muutu.
- Toisessa ryhmässä ovat sen sijaan kunnostukset, joiden avulla voidaan poistaa esimerkiksi suunnitteluvirheistä johtuvia ongelmia tai vaurioiden perussyitä ja siten vähentää korjaavan kunnossapidon tarvetta. Tällöin laitteen toiminta muuttuu luotettavammaksi, mutta suorituskyky ei niinkään muutu.
- Kolmannessa ryhmässä ovat laitteiden modernisoinnit ja uusinnat, joiden voidaan ajatella kuuluvan parantavan kunnossapidon piiriin, mikäli niiden toteuttamisen taustalla on kunnossapidollinen ongelma tai suoranaisesti laitteen käytettävyyttä ja luotettavuutta lisäävä muutostyö, jolla voidaan välttää uushankinta. (ABB 2003 ja Järviö & Lehtiö 2012)

5.2 Jakokeskusten kunnonvalvonta

Kunnonvalvonta perustuu yleensä siihen, että pyritään havaitsemaan alkavan vikaantumisen aiheuttama muutos mitattavassa suureessa. Myös jakokeskusten kunnonvalvonnassa olennaisin asia on siis normaalista poikkeavan tilanteen havaitseminen. Pelkästään se ei kuitenkaan riitä, vaan on yhtä tärkeää myös selvittää, mikä on vian ja siitä seuraavan riskin vakavuusaste, joka määrittää millaisiin korjauksiin on syytä varautua.

Kun poikkeama huomataan ajoissa, jää ennaltaehkäiseville toimenpiteille riittävästi aikaa ja tarvittavat päätökset voi tehdä luotettavammin. Tämä tietenkin edellyttää säännöllistä kunnonvalvontaa sekä aikaisempaa vertailukohtaa, jotta havaitut poikkeamat tulkitaan oikein, jolloin vääriä korjaustoimenpiteitä tehdään mahdollisimman harvoin. Seuraavaksi on esitetty sähkölaitteistojen kunnonvalvonnan kannalta jo käytössä olevia sekä vielä osittain tuntemattomampia kunnonvalvonnan menetelmiä.

5.2.1 Säännölliset aistinvaraiset tarkastukset

Jakokeskusten osalta aistinvaraiset tarkastukset sisältävät sähkötilojen ja jakokeskusten osalta kaikkien niiden ilmiöiden havainnoinnin, jotka voidaan tehdä aistinvaraisesti ilman mittauksia. Tällöin havainnointi voi olla jatkuvaa ja sitä voivat toteuttaa myös esimerkiksi kiinteistön hoitajat niissä tiloissa, joissa henkilön ei tarvitse olla sähköalan ammattihenkilö. Tarkastuksissa kiinnitetään huomiota seuraaviin asioihin:

- jakokeskustilojen ja hoitokäytävien esteettömyys
- jakokeskustilojen läheisyydessä olevan ylimääräisen palokuorman poisto
- sähkölaitteistosta tulevat epätavalliset äänet, hajut tai värinä
- rikkoutuneet kytkimet, painikkeet ym jakokeskusten kanteen asennetut kojeet
- palokatkojen ja läpivientien kunto ja tiiviys.

5.2.2 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus on yksi nopeimmin yleistyvistä kunnonvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon keinoista. Sähkölaitteistoja lämpökuvattaessa korostuu kuvaajan ja saadun kuvan

analysoijan ammattitaito ja sähkötekniisten ilmiöiden tuntemus. Lämpökuvauksella voidaan havaita normaalista poikkeavia lämpötila-arvoja, jotka eivät näy muuten päällepäin. Lämpökuvauksen yhteydessä on aina syytä mitata myös kyseisen kohteen kuormitusvirta. (Rousku 2014)

Yleisimmät lämpökuvauksen avulla tarkastettavia sähkölaitteistojen osia ovat:

- sähkönjakelu (3-vaiheinen)
- sulakerasiat
- kaapelit ja liitännät
- releet/kytkimet
- eristimet
- kondensaattorit
- suojakytkimet
- ohjaimet
- muuntajat
- moottorit
- akustot.

Lämpötilan kuumien pisteiden ja poikkeamien tavallisimpia syitä ovat:

- epäsymmetriset kuormat
- harmoniset yliaallot (erityisesti kolmella jaollisten yliaaltojen summautuminen nollajohtimeen)
- ylikuormitetut järjestelmät
- löysät tai syöpyneet liitännät kasvattavat piirin ylimenovastusta (tavallisesti yksi puoli komponenteista lämpenee)
- eristysvika (erityisesti suurjännitteellä)
- komponenttivika
- johdotusvirheet
- alimitoitettut komponentit (kuten sulakkeet) kuumenevat sulakkeen molemmilta puolilta (Fluke 2014).

Epänormaalien lämpötilojen tulkinnalle on olemassa Yhdysvaltain standardoimisliiton NETA:n (International Electrical Testing Association) laatima ohjeellinen vertailutaulukko, jonka avulla laitteiden lämpötiloja voidaan verrata toisiinsa tai ympäristön lämpötiloihin. Lämpötilojen vertailuarvot ja niiden toimenpide suositukset on esitetty taulukossa 5.

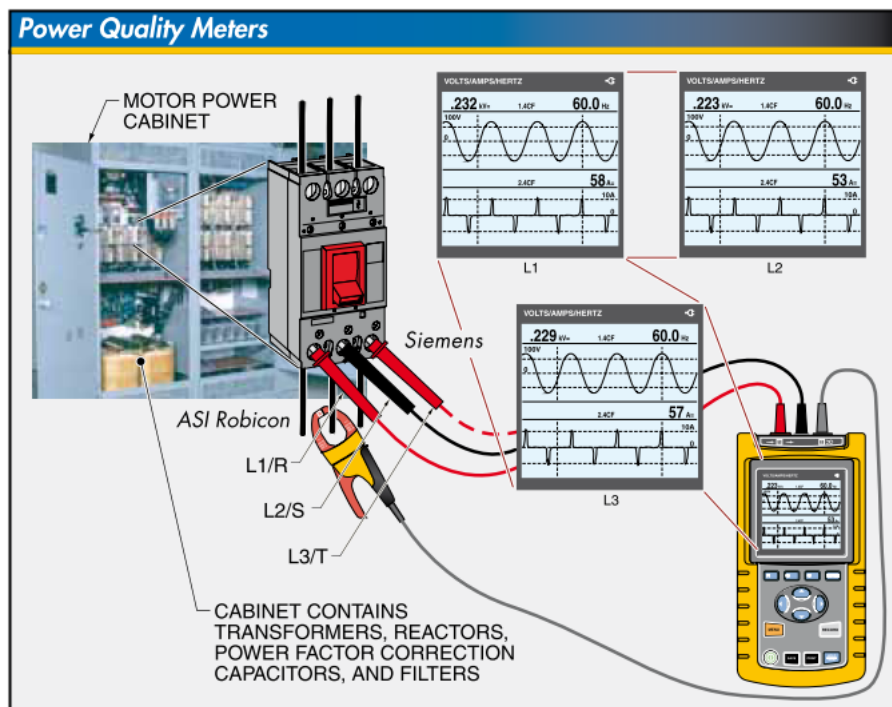
Taulukko 5. Lämpötilaerot ja NETA:n suosittamat toimenpiteet.

Lämpötilaero samanlaisten komponenttien välillä yhtä suuren kuormituksen alaisena	Lämpötilaero komponenttien ja ympäristön lämpötilan välillä	Suosittava toimenpide
1...3 °C	0...10 °C	Mahdollisesti ongelma, seuranta
4...15 °C	11...20 °C	Todennäköinen ongelma. Korjattava, kun tilanne sallii.
-	21...40 °C	Jatkuva seuranta korjaustoimenpiteisiin asti
> 16 °C	> 40 °C	Suurella todennäköisyydellä ongelma, korjattava välittömästi

5.2.3 Virta- ja jänniteanalyysi (sähkönlaadun mittaukset)

Sähkönlaadun mittaukset voidaan järjestää joko kiinteänä (jatkuvana), tilapäisenä tai häiriömittauksena. Kiinteässä mittauksessa voidaan käyttää hyväksi kiinteää mittaustaitteistoja, jossa mittaus suoritetaan esimerkiksi tietyn rakennuksen muuntamon lähdestä. Tuloksia on tällöin helppo verrata aikaisempiin mittaustuloksiin ja näin reagoida mahdollisimman nopeasti muuttuneisiin tilanteisiin sähkön laadussa. Nykyään myös muutamissa automaattisissa mittarinlentalaitteissa (engl. Automatic meter reading, AMR) on ominaisuuksia sähkönlaadun mittaukseen, jolloin mittalaitteesta saatua tietoa voidaan hyödyntää myös vikadiagnostiikassa ja sähköpalojen ennaltaehkäisyssä.

Tilapäisessä mittauksessa voidaan käyttää siirrettävää sähkön laadun mittaria tai analysaattoria, jolloin mittaus voidaan suorittaa käytännössä missä tahansa kohtaa verkkoa ottaen huomioon laitteiston vikasietoisuuden verkossa esiintyville häiriöjännitteille sekä käytettävän mittaustaitteiston suurimmat sallitut mittausaluet. Kuvassa 14 on esitetty erään mittaustaitteitevalmistajan kannettava sähkölaadun analysaattori.



Kuva 14. Esimerkki sähkön laadun mittauksesta estokelaparistosta (Fluke 2014).

Häiriömittaukset ovat tilapäismittauksia, joissa voidaan hyödyntää usean eri mittaustaitteiteen tietoja häiriölähteiden selvittämiseksi. Häiriötapauksessa on tärkeää analysoida hyvin tarkkaan häiriöön johtaneiden tapahtumien kulkua sekä erilaisten ilmiöiden syyseuraussuhteita. Häiriöiden havaitsemista helpottaa, jos käytettävällä sähkön laadun analysaattorilla on mahdollista saada mittaus jostain tietystä verkon ilmiöstä, jolloin analysaattori toimii ikään kuin häiriötallentimena.

5.2.4 Muut menetelmät

Myös perinteisellä yleismittarilla tai virtapihdillä toteutetuilla **jännite- ja virtamittauksilla** voidaan havaita vikaantumisen aiheuttamia muutoksia jännitteen tai virran tehollisarvoissa tai vaihtoehtoisesti katkeilevassa vikatilanteessa virran huippuarvon muutoksena (eli toisin sanoen vian kytkeytymisestä johtuvat transientit). Vikaantuminen voi näkyä

yhdellä vaiheella myös esimerkiksi jännitteenalenemana tai vaihtoehtoisesti kohonneena virtana.

Ultraäänimittausta on käytetty prosessiteollisuudessa muun muassa pinnan korkeuden ja etäisyyksien määrittämiseen jo pitkään, mutta sähkölaitteistojen kunnonvalvonnassa menetelmä on vasta yleistymässä. Ultraäänimittauksella voidaan havainnoida jakokeskusten liitosten vikaantumista, joka aiheuttaa kipinöintiä tai muuta resonoivaa ääntä, joka voidaan havainnoida ultraäänipeilillä. Suurjännitteellä ultraäänellä voidaan lisäksi havainnoida osittaispurkauksia, muuntajien sisäistä kipinöintiä ja mekaanista värähtelyä.

Ultraääntä kuunnellaan mitattaessa, mutta kehittyneemmissä laitteissa mittaustulokset voidaan myös tallentaa ja vertailla mitattua dataa mittalaitteen ohjelmiston ääninäytteisiin. (Malinen 2013)

Osittaispurkausmittaukset ovat käytössä tätä nykyä lähinnä vain suurjännitteellä (>1000V), koska osittaispurkauksia eristeissä ja niiden pinnoilla alkaa esiintyä vasta suuremmilla jännitteillä. Uudemmat online-mittauksena toteutettavat osittaispurkausmittaukset ovat kuitenkin yleistyneet jakeluverkkoyhtiöiden kunnonvalvonnan apuna, ja kojeistoissa osittaispurkausmittauksella voidaan havaita mm. eristimien, kaapelien päätteiden sekä virta- ja jännitemuuntajien eristeissä tapahtuvia osittaispurkauksia ja ennaltaehkäistä näin ollen niiden hallitsematonta vikaantumista.

5.3 Jakokeskusten huolto ja kunnossapito

Kaikilla sähkölaitteistoilla on huollon ja kunnossapidon osalta samankaltaista ja yhteneviä piirteitä, mutta jokaisen yksittäisen laitteiston erityispiirteet tulee toki ottaa huomioon. Jakokeskuksilla korostuu keskuksen rakenteen, käyttöympäristön ja vaatimusten huomioon ottaminen sekä turvallisten työmenetelmien käyttö kunnossapidossa. Jakokeskuksia on olemassa erilaisiin käyttötarkoituksiin, ja siten huolto ja kunnossapito tulee mitoittaa ja aikatauluttaa kohteen laajuuden ja tärkeyden mukaan. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty keskeisimpiä jakokeskusten huoltoon ja kunnossapitoon liittyviä toimenpiteitä.

Säännöllinen pölyn ja lian poisto jakokeskuksista ennaltaehkäisee sähköpaloja. Tilan tai alueen likaantumisaste (asteet 1...4) perustuu johtavan tai kosteutta sitovan pölyn, ionisoidun kaasun tai suolan määrään sekä suhteelliseen kosteuteen ja sen esiintymistajuuteen ja todennäköisyyteen. Edellä mainitut seikat aiheuttaa kosteuden imeytymisen tai tiivistymisen, joka heikentää eristyksen sähkölujuutta ja pintavirtakestoisuutta. Tulee kuitenkin huomata, että laitteiden ja komponenttien eristysaineisiin kohdistuva likaantumisaste voi olla erilainen kuin makroympäristöllä, jonne laitteet tai komponentit on sijoitettu. Suojaus voidaan siis toteuttaa myös koteloinnilla tai sisäisellä lämmittämällä imeytyvän tai tiivistyvän kosteuden ennaltaehkäisemiseksi. (ST 53.34 2006)

Liitosten jälkikiristys kuului aiemmin varsinkin teollisuudessa normaaleihin huoltorutiineihin. Muutenkin kaikkien jakokeskusten liitosten luokse tulisi päästä, jotta ne olisivat kiristettävissä. Vaihtosähkölle ominainen taajuuden mukaan aaltoileva kuormitusvirta ja siitä aiheutuva mekaaninen resonointi eri toimilaitteissa sekä vaihtelevat kuormitukset ovat omiaan löystyttämään erityisesti ruuvikiristeisiä liitoksia. Kyseistä ilmiötä vastaan käytännössä ainoa vaihtoehto vikaantumisen välttämiseksi on suorittaa jälkikiristyksiä riskiperusteisesti ennen kuin löystyneet liitokset aiheuttavat muita ongelmia.

Silmämääräisesti havaittujen poikkeamien mukaan on syytä tehdä **myös komponenttien vaihtoja ja korjausta**, niissä tapauksissa kun korjaaminen on mahdollista. Merkkejä vikaumisesta voivat olla laitteen tai komponentin virhetoiminnot, ylimääräinen tärinä tai ääni, outo haju, lauennut sulake tai johdonsuoja-automaatti tai kokonaan toimimaton laite.

5.4 Automaattinen kunnonhallinta ja vianehkäisy

Kunnonvalvontaa voidaan suorittaa myös automaattisesti, joko tiettyyn valvontatoimintaan suunniteltujen laitteiden avulla tai jopa koko prosessia tai toimintaa valvovien ohjelmistojen ja mittausten avulla. Seuraavissa kappaleissa on esitetty muutamia jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisyn kannalta keskeisiä keinoja.

5.4.1 Maasulun valvonta

Maasulun ja eritystason valvonta ovat käytännössä sama asia. Eristystason valvontalaite mittaa jatkuvasti maahan kohdistuvaa eristysvastusta ja antaa hälytyksen, jos kynnyсарvo ylittyy. Eri laitteistotyypeille on olemassa määräykset vian pois kytkemisestä ja valvontalaitteelle voidaankin usein asetella myös piirien laukaisuun vaadittavat kriteerit. Valvontalaite havaitsee eristystason muutokset myös maasta erotetussa järjestelmässä.

Maasulun valvontalaitteen erikoistapaus on vikavirtasuojaus, joka toimii automaattisesti laukaisten vian laitteelle määritellyn laukaisuajan mukaan.

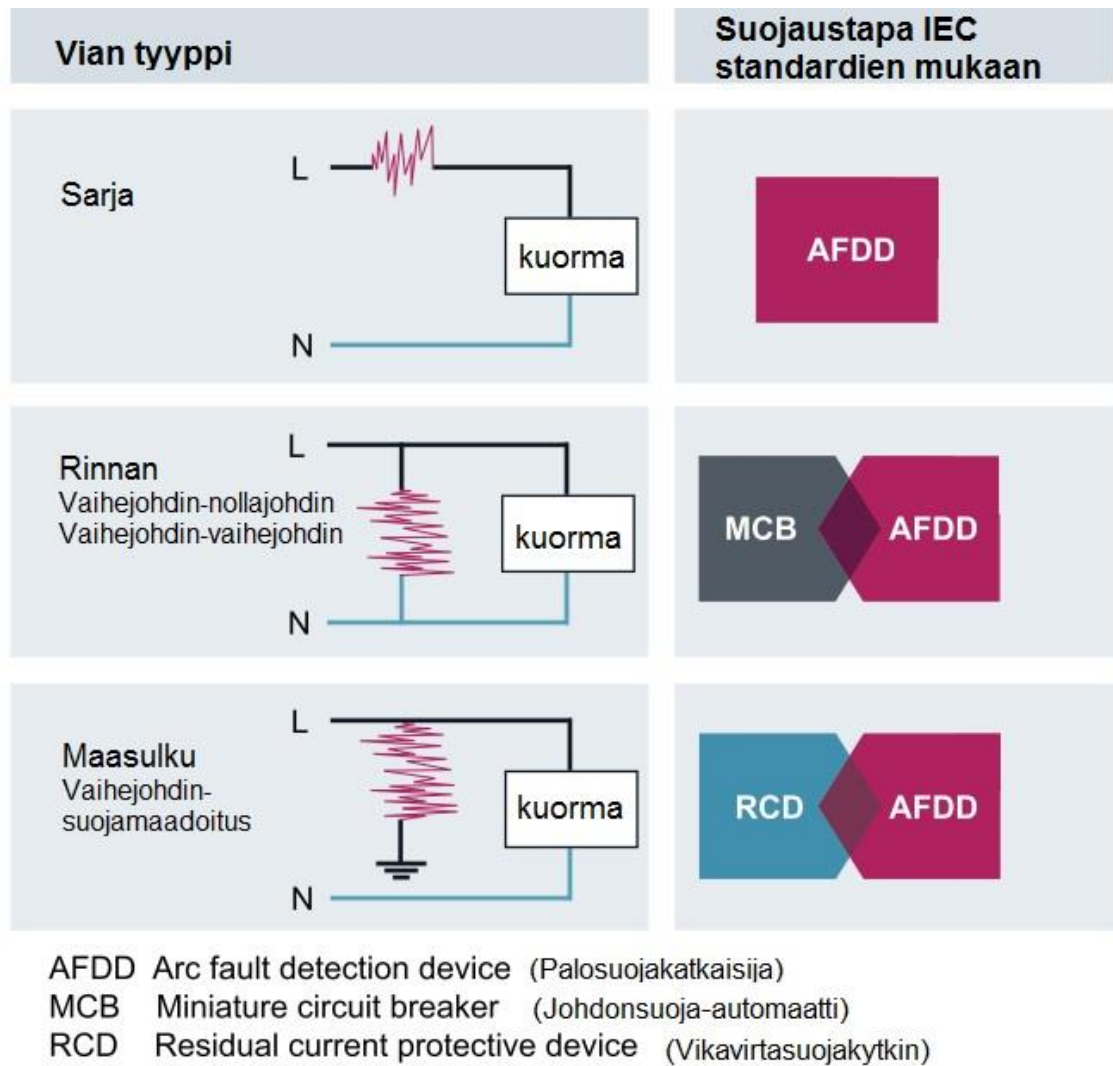
5.4.2 Lämpöantureilla toteutettu valvonta

Jakokeskuksia voidaan tarkkailla myös erillisten lämpöantureiden mukaan. Kiinteät keskuksiin sijoitetut lämpöanturit ovat yleisempiä valmistavassa teollisuudessa, kun jakokeskuksiin on asennettu runsaasti lämpöä tuottavia toimilaitteita, kuten puolijohdereleitä, taajuusmuuttajia tai muita kytkentälaitteita.

Lämpöantureilla toteutettu automaattinen valvonta on kyseessä myös termostaateilla varustetuissa keskuksissa, joissa lisäilmanvaihto (yleensä tuuletin) ohjataan päälle, kun lämpötila keskuksen sisällä ylittää termostaatille määritetyn raja-arvon. Lämpöanturit voivat antaa vikatilanteessa myös hälytyksen kiinteistön valvontajärjestelmään.

5.4.3 Kipinöinnin ja valokaaren valvonta

Kipinöinnin ja erilaisten sarja-, rinnan- ja maasulkujen havainnointiin on kehitetty valokaaren havainnointilaitte. (AFDD = Arc Fault Detecton Device). Siinä ohjelmoitava lisälaite tarkkailee kuormitusvirran käyrämuotoa ja kytkee piirin jännitteettömäksi valokaarivaarallisen vian esiintyessä piirissä. Kuvassa 15 on esitetty palosuojakatkaisijan käyttömahdollisuus erilaisten vikaantumistapojen yhteydessä.



Kuva 15. Valokaarisuojalaitteen suojausalue verrattuna perinteisiin suojalaitteisiin (Siemens 2014).

5.4.4 Jännitteenvälvontalaite

Jakokeskuksia voidaan suojata myös jännitteenvälvontalaitteiden avulla. Jännitteenvälvontalaite voi tarkkailla vaihejännitteitä ja estää esimerkiksi taajuusmuuttajan tai invertterin käytön ja mahdollisen rikkoutumisen, kun kaikki vaiheet eivät ole käytössä. Jännitteenvälvontalaite voi myös hälyttää, jos verkkojännitteen taso ei ole laitteistolle määritettyjen raja-arvojen sisällä.

Jännitteen valvonta voi perustua joko yli- tai alijännitevalvontaan tai molempiin. Ylijännitevalvonnassa suojalaitteella suojataan laitteistoja eristystasoon nähden liian suurien jännitteiden esiintymiseltä ja alijännitesuojauksen avulla estetään muuttuvaimpedanssisten kuormien ottamasta liian suurta virtaa alijännitetilanteessa.

5.4.5 AMR-valvonta

Osaan etäluettavista AMR-mittalaitteista on mahdollista ohjelmoida myös erilaisia vika-diagnostiikkaan liittyviä toimintoja. Verkko-yhtiöt voivat määrittellä itse, millaisia toimintoja he haluavat mittauksen lisäksi hyödyntää. Mahdollisia diagnosointiominaisuuksia

ovat muun muassa nollavian tunnistaminen, vaihejännitteen puuttuminen, loistehon kulutus sekä muut mittalaitteen havainnointikyvystä riippuvat havahtumiset.

5.5 Palon rajaaminen palovaarallisen vian esiintyessä

Palo tarvitsee syttyäkseen neljää asiaa: riittävästi happea ja lämpöä, palavaa materiaalia sekä energiaa ketjureaktion käynnistymiseen. Näistä yhdenkin elementin merkittävä vähentäminen edesauttaa palon sammumista huomattavasti. Jakokeskusten tapauksessa tulisi aina miettiä, miten laitteisto voidaan suunnitella, rakentaa ja huoltaa niin, että laitteisto vikaantuessaan ei levittäisi paloa muihin rakenteisiin vaan olisi rakenteellisesti itsestään sammuva.

Palo-osastoinneilla ja palokatkoilla rajataan mahdollinen palo mahdollisimman pienelle alueelle, ja samalla mahdollistetaan turvallinen poistuminen palon sattuessa. Palokatkojen toteutuksia laiminlyödään valitettavasti todella paljon, ja niiden valvonta olisi syytä ottaa osaksi koko rakentamisprosessia yhdessä sähköalan asiantuntijan, rakennustarkastajan ja paloviranomaisen kanssa. Läpiviennit ja niiden puutteellinen tiivistys ovatkin eräitä kiinteistöjen keskeisimmistä paloturvallisuuden riskeistä (SÄTY 2003).

Markkinoilla on olemassa käytännössä neljä erilaista palokatkojärjestelmää:

- palokatkomassat
- pinnoitetut palovillalevyt
- silikonivaahdot ja vaahdotetut tyynyt
- tiiviste-elementit.

Edellä mainittujen lisäksi on olemassa erilaisia palokittejä, joiden avulla voidaan tosin paikata yleensä vain pieniä, alle 50 mm halkaisijaltaan olevia aukkoja, sekä palopussit, jotka on sallittu vain väliaikaiseen käyttöön.

Laukaiseva valokaarisuojaus mittaa jakokeskuksen läpi kulkevaa kuormitusvirtaa sekä valon määrää halutuissa kennoissa. Jos valon määrä ja kuormitusvirta yhdessä ylittävät asetetut raja-arvot, laukaisee suojaustoiminto kyseisen kojeiston jännitteettömäksi joko kojeistossa sijaitsevan pääkatkaisijan tai kojeistoa syöttävän katkaisijan avulla. Laukaisevan valokaarisuojauksen toiminta-ajat ovat hyvin nopeita, sekä suojauksen havahtuminen että katkaisijan toiminta-aika ovat 20...50 ms.

Sähkötiloja tai kojeistoja voidaan varustaa myös erilaisilla **automaattisilla sammutuslaitteistoilla**. Suojaustavaksi voidaan valita joko koko tilan tai ainoastaan jonkin tietyn kohteen (keskuksen) suojaaminen. Riippuen toteutustekniikasta, paineistettu sammutusaine suihkutetaan vikaantuneeseen tilaan yleensä aerosolina tai vaahtona, jolloin sammuttava aine joko syrjäyttää tilasta hapen tai tukahduttaa muuten alkaneen tulipalon tai syntyneen valokaaren.

Palovaroittimet ja paloilmoitinlaitteistot ovat yleisimmät sähkötiloihin asennettavat suoraanaisesti palojen havainnointiin tarkoitetut järjestelmät. Molemmissa tapauksissa palohälytys on syytä johtaa myös tilan ulkopuolelle, jotta hälytykseen voidaan reagoida mahdollisimman nopeasti. Paloilmoitinjärjestelmissä on mahdollista saada myös niin sanottu ennakkohälytys, jossa hälytys johdetaan vain kiinteistöhuollolle mutta ei vielä hälytyskeskukseen. Ennakkohälytystoiminnon tavoitteena on ollut vähentää turhia hälytyksiä ja sitä kautta hälytyskeskusten kuormitusta.

Toistaiseksi palovaroittimet ja paloilmoitinlaitteistot on vain ani harvoin kytketty niin, että ne kytkisivät sähkönsyötön automaattisesti irti esimerkiksi vian ollessa sähkö-

pääkeskushuoneessa. Kyseinen kytkentätapa voisi kuitenkin ennaltaehkäistä laajamittaisiakin sähköpaloja, jos niiden primäärienergia saataisiin katkaistua palon syttymisvaiheessa.

6 TEHDYT TUTKIMUKSET JA SAADUT TULOKSET

Tutkimus pohjautui Tukes:n, VTT:n ja Sähköpeto-projektin aikaisempiin tutkimuksiin sähköpaloista. Edellä mainituissa tutkimuksissa ei ollut kuitenkaan syvennytty tarpeeksi tarkasti liitosten vikaantumiseen ja niistä aiheutuviin sähköpaloihin. Tämän vuoksi tutkimus päätettiin aloittaa kartoittavalla kyselyllä jakokeskusten sähköisissä liitoksissa esiintyvistä palovaarallisista vikaantumisista.

Kysely lähetettiin yli tuhannelle sähköalan ammattilaiselle Suomessa. Mukana oli koko maan kattavasti muun muassa sähkölaitteistojen käytönjohtajia, valtuutettuja sähkölaitteistotarkastajia ja tarkastuslaitoksia, sähköpalotutkijoita sekä sähkölaitteistojen lämpökuvaajia. Kyselyyn vastasi kaiken kaikkiaan 116 henkilöä. Kyselyn kysymykset on esitetty liitteessä 1.

Kyselyn avulla tutkimusresurssit saatiin kohdennettua lukumääräisesti ja vaikuttavuudeltaan keskeisimpiin liitosten vikaantumisiin. Lisäksi tutkimukseen osallistuneista vastaajista neljäkymmentä eri tahoja toimitti tutkimukseen suuren määrän aineistoa tarkempaa analysointia varten. Tutkimukseen toimitettiin kaiken kaikkiaan:

- 217 valokuvaa vikaantuneista kohteista
- 369 lämpökuvausta tyypillisimmistä vikaantumiskohteista
- 46 vika- tai testiraporttia
- 75 laite- tai komponenttivalmistajan asennus-, käyttö- tai huolto-ohjekirjaa
- 15 vikaantunutta tai kokonaan palanutta komponenttia.

6.1 Tutkimusmenetelmät

Kyselytutkimuksen perusteella tutkimusmenetelmiksi valittiin:

- kyselytutkimuksen analysointi
- valokuva-aineistoon perustuva analyysi
- lämpökuva-aineiston analyysi
- liitosten vikaantumismekanismien ja suojausten vaikutuksen mallintaminen
- vikaantuneiden liitoskomponenttien materiaalitekniset tutkimukset.

Jokaista viittä tutkimusmenetelmää analysointiin saadun aineiston pohjalta. Seuraavissa alaluvuissa on esitetty kyseisen tutkimusmenetelmän kohdalla aina ensin aineiston laajuus ja menetelmät sen analysointiin sekä lyhyt kooste keskeisimmistä havainnoista.

6.2 Kyselytutkimus

Kyselytutkimus lähetettiin 1030 sähköalan ammattilaiselle, jotka jakaantuivat seuraavasti: käytönjohtajat 899 kpl (87 %), sähkölaitteistotarkastajat ja tarkastuslaitokset 95 kpl (9 %), sähköpalotutkijat 32 kpl (3 %) sekä sähkölaitteistojen lämpökuvaukseen sertifioidut yritykset 4 kpl (<1 %). Jokaisen vastaajan oli mahdollista vastata vain kerran. Kyselytutkimukseen saatiin kaikkiaan 116 vastausta, joten vastausprosentti oli hieman yli 11.

Kysely käsitti yhteensä 25 kysymystä, jotka oli jaoteltu kolmeen eri aihealueeseen:

- Osa A: Perustiedot
- Osa B: Sähköinen liitos tai komponentti on aiheuttanut vikaantuessaan laitteen epätavallisen toimimisen ja lisännyt sähköpaloriskiä tai aiheuttanut sähköpalon tai sähköpalovaaran
- Osa C: Onko erilaisten jakokeskusten välillä havaittavissa jotain eroja, joissa toisen tyyppinen jakokeskus vikaantuu helpommin kuin muut ja on lisännyt sähköpaloriskiä tai aiheuttanut sähköpalon tai sähköpalovaaran

Kyselytutkimuksen kysymykset on esitetty tutkimuksen liitteessä 1, mutta tässä kapaleessa on esitetty tutkimuksen kannalta merkityksellisimmät tulokset ja niitä on analysoitu tulosten yhteydessä.

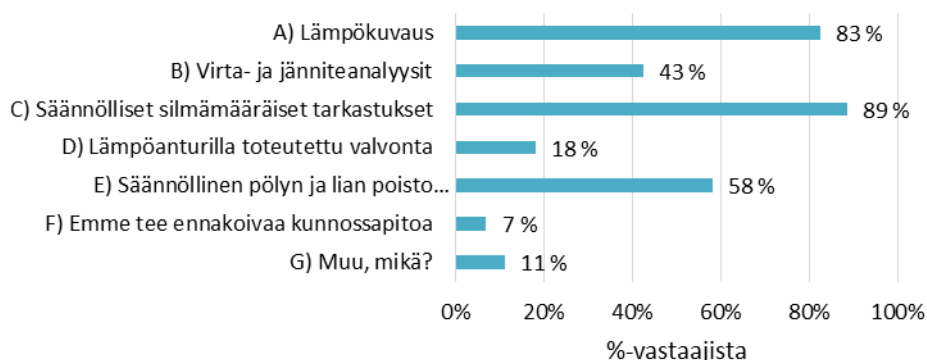
6.2.1 Aineiston taustatiedot

Kyselyyn vastanneista tahoista ensisijaiseksi toimenkuvakseen ilmoitti sähköpalotutkijan 4 kpl (~3 %), valtuutetun tarkastajan tai tarkastuslaitoksen 13 kpl (~9 %), toiminnanharjoittajan palveluksessa olevan käytönjohtajan 64 kpl (~45%), sivutoimisen käytönjohtajan 32 kpl (~23 %), sähkölaitteistojen lämpökuvaajan 11 kpl (~8 %) sekä muun tahon (mm. sähköurakoitsija, suunnittelija tms.) 18 kpl (~12 %). Koska 116 vastaajaa ilmoitti toimenkuvakseen kaiken kaikkiaan 142 ryhmiteltyä toimenkuvaa, on usealla vastaajalla montakin roolia asiantuntijatehtävänsä sisällä. Tämä ei sinällään vääristänyt tutkimusta, vaan pikemminkin antoi vastauksiin monia näkökulmia.

Käytönjohtajien vastaukset ja näkemykset (yhteensä ~68 %) korostuvat tutkimuksessa, mutta toisaalta heidän määränsä ja suhteensa muihin sähkölaitteistojen huollosta, kunnossapidosta ja tarkastuksista vastaaviin tahoihin on jopa suurempi. Näin ollen kyselyyn vastanneiden tahojen jakaumaa voidaan pitää melko kattavana ja eri ryhmittymien jakautumista myös määrällisesti varsin oikean suuntaisena. Kyselyn tuloksia tulkitessa tulee kuitenkin ottaa huomioon vastaajien motiivi vastata kysymyksiin. Myös kyselyyn vastanneiden ammattilaisten työkokemusta voidaan pitää varsin hyvänä, sillä 70 henkilöä ilmoitti sähköalan työkokemuksekseen yli 25 vuotta, 22 henkilöä 16-25 vuotta, 21 henkilöä 6-15 vuotta ja vain 4 henkilöä 1-4 vuotta.

Perustietokohdassa kysyttiin myös kyseisten tahojen yleisimmin käyttämiä toimenpiteitä heidän suorittaessaan tarkastus- tai huoltotoimintaa sähkölaitteistoille (kuva 16). 115 vastaajaa 116:sta vastasi kysymykseen. Kyselyssä korostuivat runsaasti silmämääräiset tarkastukset ja lämpökuvaus sekä hieman myös virta- ja jänniteanalyysit sekä säännöllinen pölyn ja lian poisto jakokeskuksista. Kyselyn tuloksista erityisesti ennaltaehkäisevän toiminnan laajuuden osalta ei voi vetää koko alaa koskevia arvioita esimerkiksi huollon ja kunnossapidon säännöllisyydestä, koska oletusarvoisesti tuloksissa korostuu vastaajien aktiivinen ote sähköturvallisuuden kehittäjinä, ja todellinen taso on todennäköisesti keskiarvoisesti matalampi.

3. Mitä seuraavista toimenpiteistä te tai yrityksenne käytätte, jos teette tarkastus- tai huoltotoimintaa?



Kuva 16. Ennaltaehkäisevän toiminnan jakautuminen.

6.2.2 Liitosten tai komponenttien aiheuttamat sähköpaloriskit

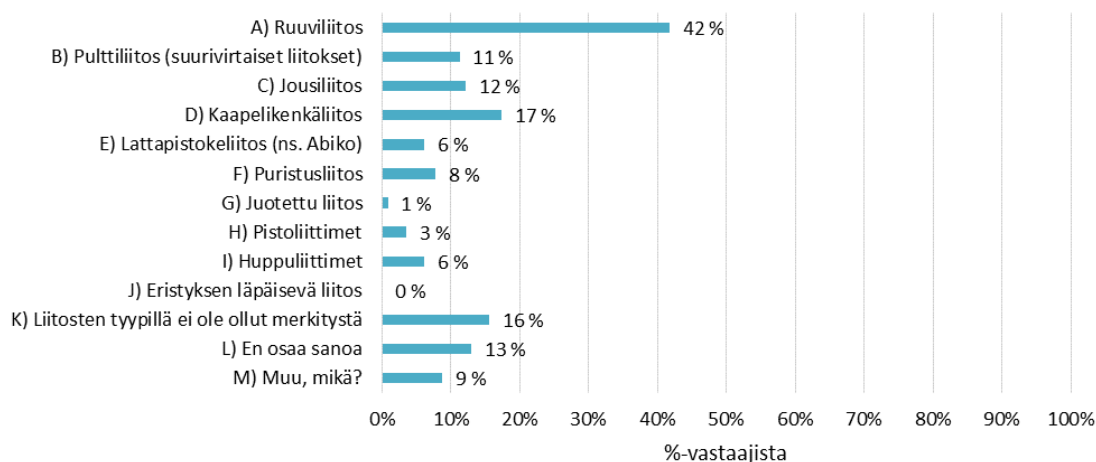
Kysyttäessä erilaisten **komponenttien vikaantumistaajuutta** korostui kyselytutkimuksessa kontaktorien ja riviliittimien vikaantumistodennäköisyys. Toisaalta komponenttien iällä ei juuri koettu olevan vaikutusta vikaantumiseen. Lisäksi kysyttäessä erilaisien liittostyyppien vikaantumistiheydestä korostui ruuviliitos yli puolet isommalla todennäköisyydellä kuin seuraavaksi eniten liitosongelmia aiheuttava pulttiliitos (kuva 17).

Liittimen, liitoksen tai johtimen materiaalilla ei sen sijaan koettu olevan juuri merkitystä vikaantumistodennäköisyyteen. Liitettävän johtimen tyyppi sen sijaan korostui niin, että yksilankaisella johtimella (esimerkiksi MMJ tai ML) oli suurempi todennäköisyys vikaantua verrattuna esimerkiksi kerrattuun monilankaiseen johtimeen (esimerkiksi MPL). Toisaalta myös suuri osa tutkimukseen vastanneista ei kokenut johdintyyppin vaikuttavan vikaantumisen todennäköisyyteen.

Tulppasulakkeilla toteutetun piirin **suojaustavan** vaikutus vikaantumiseen on hieman korkeampi verrattuna muihin suojaustapoihin, mutta toisaalta suurin osa vastaajista ei kokenut suojaustavalla olevan merkitystä vikaantumiseen tai ilmoitti, ettei osannut sanoa.

Tyypillisimmistä liitosten **vikaantumista edesauttavista asennusvirheistä** korostuivat liitoksen kiristäminen liian pieneen momenttiin sekä hieman myös väärin liitosmateriaalien käyttö.

6. Oletteko havainnut, että jokin tietty liitin/liitostyyppi vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut liittimet tai liitokset?



Kuva 17. Liitostyyppien vaikutus vikaantumiseen.

Kontaktorien ja riviliittimien korostunutta vikaantumistodennäköisyyttä suhteessa muihin komponentteihin selittää osin kyseisissä komponenteissa käytössä olevat ruuviliitokset, joiden vikaantumistodennäköisyys oli myös korostunut. Katkaisevien toimilaitteiden osalta tulee myös huomioida, että katkaisuvalokaaret ja mekaaninen liike kuluttavat komponenttia luonnostaankin. Toisaalta ruuviliitostekniikka on yleisin kaikista liitostekniikoista, mikä selittää osaltaan suurta vikaantumisten määrää. Varsinaista ruuviliitoksella toteutettujen liitosten vikaantumistaajuutta suhteessa muihin liitoksiin on mahdollonta määrittää tarkasti, mutta tutkimuksen kannalta ruuviliitoksissa tapahtuva vikaantuminen ja liitosten löystyminen otettiin yhdeksi tarkoin tutkittavaksi kohteeksi.

6.2.3 Keskustyyppin vaikutus sähköpalariskiin

Kyselyssä haluttiin selvittää myös jakokeskusten osuutta ja vaikutusta liitosten vikaantumiseen. **Keskuksen rakenteen** vaikutusta kysyttäessä korostui hieman avorakenteisen keskuksen vikaantumistodennäköisyys suhteessa muihin keskustyypppeihin, mutta toisaalta 1/3 vastaajista ei kokenut rakenteen vaikuttavan vikaantumiseen ja 1/3 vastaajista ei osannut sanoa, onko rakenteella merkitystä.

Kysyttäessä keskuksen **suojausrakenteen** vaikutusta (IP-luokitusta) IP2X-laitteiston vikaantuminen korostui hieman (14 % kaikista vastaajista), mutta toisaalta 43 % vastaajista ei kokenut suojausrakenteella olevan merkitystä vikaantumiseen ja 34 % ei osannut sanoa, onko rakenteella merkitystä. Yleisesti todettiin, että suojausrakenteella on merkitystä sähköpalojen syntyyn, jos luokitus on liian pieni kyseisen tilan vaatimuksiin nähden.

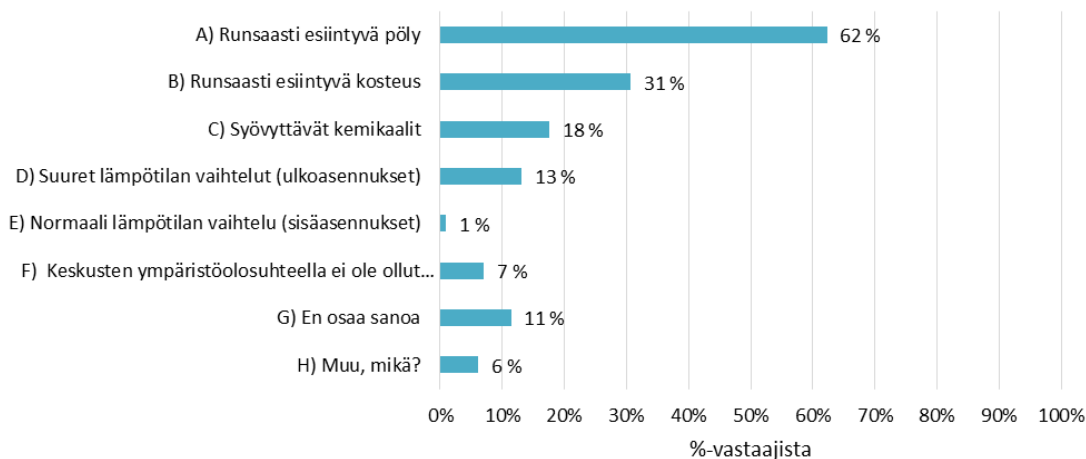
Jakokeskuksen **materiaalin** osalta muovi korostui hieman (15 % kaikista vastaajista), mutta toisaalta 41 % vastaajista ei kokenut jakokeskuksen materiaalilla olevan merkitystä vikaantumiseen ja 41 % ei osannut sanoa, onko materiaalilla merkitystä. Palokuorman kannalta toki muovi materiaalina syttyy helpommin ja pienemmässä lämpötilassa, jolloin se jatkaa paloa helpommin.

Jakokeskuksen **tiiviyden** osalta IP2X-rakenne (kuivien tilojen jakokeskukset) korostui 26 % osuudellaan, mutta toisaalta 32 % vastaajista ei kokenut jakokeskuksen tiiviy-

dellä olevan merkitystä vikaantumiseen ja 32 % ei osannut sanoa, onko tiiviydellä merkitystä. Ulkoasennuksiin soveltuvien keskusten (IP34 min) rakenteen koettiin kuitenkin vikaantuvan selvästi vähemmän (7 %) kuin kuivan tilan keskusten.

Ympäristöolosuhteista sähköpalovaaraa tai sähköpaloja lisävikiksi koettiin runsaasti esiintyvä pöly (62 %), runsaasti esiintyvä kosteus (31 %) ja syövyttävät kemikaalit (18 %). Kuvassa 18 on esitetty ympäristöolosuhteiden suhteellinen vaikutus kyselytutkimuksen perusteella.

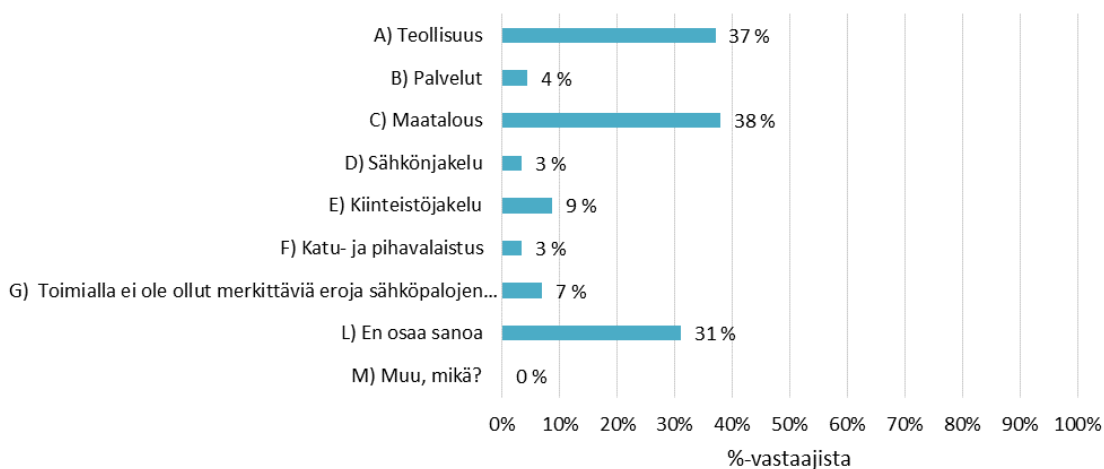
16. Oletteko havainnut, että jokin tietyn ympäristöolosuhteen aiheuttavan selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muut olosuhteet?



Kuva 18. Ympäristöolosuhteiden vaikutus.

Kysyttäessä **toimialan** vaikutusta sähköpalovaaran tai -palojen esiintymiseen yleisyyteen korostuivat teollisuus ja maatalous merkittävästi (kuva 19). Toisaalta 31 % vastaajista ei osannut sanoa, onko toimialalla merkitystä palovaaralliseen vikaantuvuuteen.

17. Oletteko havainnut, että jollain tietyllä toimialalla esiintyisi selvästi useammin jakokeskuksissa tapahtuvia sähköpalovaaroja tai -paloja kuin muilla toimialoilla?



Kuva 19. Toimialan vaikutus.

Jakokeskuksen nimellisvirta-alueen vaikutuksista sähköpalovaaraan tai sähköpaloihin kysyttäessä korostui pienivirtaisten (0...100 A) jakokeskusten nimellisvirta-alue 18 % osuudellaan, mutta toisaalta 39 % vastaajista ei kokenut jakokeskuksen nimellisvirta-alueella olevan merkitystä vikaantumiseen ja 31 % ei osannut sanoa, onko nimellisvirta-alueella merkitystä. Kyselytutkimuksen ulkopuolelta tosin voidaan todeta, että määrällisesti suurin osa jakokeskuksista on 0...100 A nimellisvirta-alueella, ja näin ollen tulos selittyy osin myös pienivirtaisten jakokeskusten suhteellisesti suurella määrällä. Toisaalta kyselytutkimuksen pohjalta voidaan olettaa, että jakokeskuksista alkunsa saavat sähköpalot eivät ole vain suurivirtaisten jakokeskusten ongelma, vaan sähköpalot voivat saada alkunsa kaikenkokoisista keskuksista.

Kysyttäessä vikaantuneen **piirin nimellisvirta-alueen** (prosentteina nimellisvirrasta) merkitystä sähköpalovaaraan tai -palojen esiintymiseen korostui nimellisvirta alueen ylimällä neljänneksellä kuormitettujen piirien (76...100 % nimellisvirrasta) merkitys 14 % osuudellaan. Toisaalta 29 % vastaajista ei kokenut piirin nimellisvirta-alueella olevan merkitystä vikaantumiseen ja 47 % ei osannut sanoa kantaansa kysymykseen.

Jakokeskusten pääkiskorakenteen osalta sähköpalovaaraan tai -palojen esiintymisen kannalta korostui kaapeloiduilla kiskostoilla rakennettujen keskusten osuus hieman 11 % osuudellaan verrattuna kiinteisiin kiskostoratkaisuihin. Toisaalta 40 % vastaajista ei kokenut kiskoston rakenteella olevan merkitystä vikaantumiseen ja 45 % ei osannut sanoa kantaansa kysymykseen.

Jakokeskusten iän vaikutukset sähköpalovaaraan tai -paloihin jakautuivat melko taiseisesti niin, että 26...40 vuoden (21 %) ja 41...60 vuoden (19 %) ikäisten jakokeskusten osuus korostui hieman. Toisaalta 25 % vastaajista ei kokenut jakokeskusten iällä olevan merkitystä vikaantumiseen ja 27 % ei osannut sanoa kantaansa kysymykseen. Osiltaan 26...60 vuoden ikäisten jakokeskusten korostunut vikaantumismäärä voi perustua myös sen ikäisten jakokeskusten suhteellisesti suurempaan määrään, koska Suomea sähköistettiin voimakkaasti 60- ja 70-luvuilla ja tällöin asennettiin runsaasti jakokeskuksia.

Kysyttäessä tarkemmin uusien, alle 10 vuotta vanhojen **jakokeskusten lämpiämisestä** suhteessa vanhempiin jakokeskuksiin hieman suurempi osa vastaajista koki uusien jakokeskusten lämpenevän enemmän kuin vanhempien (28 % vs. 18 %). Toisaalta 24 % vastaajista ei kokenut jakokeskusten iällä olevan merkitystä lämpenemiseen ja 32 % ei osannut sanoa kantaansa kysymykseen.

Kysyttäessä **omakohtaista kokemusta sähköpalovaaraan tai -paloön** johtaneista tekijöistä jakokeskuksissa korostuivat seuraavat tekijät:

- asennusvirheet
- löysät liitokset
- pöly ja kosteus
- laiminlyöty huolto ja kunnossapito
- huonot jäähtymisolosuhteet
- huonontuneet liitokset
- piirien ylikuormitus
- komponenttien ikääntyminen yli teknisen käyttöiän
- läpivientien puutteellisuus ja siitä johtuva ulkoisen paloa kiihdyttävän aineen, kaasun tai nesteen siirtyminen jakokeskuksen sisään.

Lisäksi kyselytutkimuksessa vastaajat yksilöivät runsaasti yksityiskohtaisia teknisiä ominaisuuksia, asennusvirheitä, piirteitä ja vikoja, jotka ovat joko johtaneet sähköpaloön tai aiheuttaneet merkittävän palovaaran. Näitä yksittäisiä ominaisuuksia on pyritty arvioimaan tutkimuksen yhteydessä seuraavissa alaluvuissa.

Kyselytutkimuksen yhteydessä 40 eri taho ilmoitti halukkuutensa toimittaa myös muuta tutkimusta tukevaa aineistoa. Seuraavissa alaluvuissa esiintyvät esimerkit on kerätty näiltä tahoilta ja tiedon antaneen tahon yhteystiedot on esitetty aina kyseisen tapauksen yhteydessä.

6.3 Muita sähköpalovaaraan johtavia syitä

Kirjalliset vikaraportit ja tutkimusaineisto on esitetty poikkeuksellisesti ilman lähdettä aineiston luovuttaneiden tahojen toivomuksesta. Seuraavat huomiot on koottu usean eri tahon toimittamista vikakuvauksista. Sähköpalovaaraan tai -paloihin johtavia keskeisiä syitä on havaittu muun muassa seuraavissa toimintatavoissa:

- Kojeistovalmistajien tulisi ottaa huomioon koteloidensa lämmön johtuminen paremmin. Kojeiden lämpöhäviöt tai ylimenovastukset esiintyvät teknisissä luetteiloissa, mutta niitä ei usein huomioida keskusvalmistuksessa.
- Kuormituksen korjauskertoimet ympäristölämpötilaan nähden jätettäneen usein huomioimatta, tai oletetaan kojeistossa valitsevaa oikeaa lämpötilaa huomattavasti matalampi lämpötila.
- Asennusvaiheessa (joko keskusvalmistajan tai urakoitsijan toimesta) käytetään usein liian suurta kiristysmomenttia, mikä saattaa rikkoa asennetun komponentin ja aiheuttaa huonon liitoksen.
- Elektroniset suojat (katkaisijoitten suojareleet, elektroniset lämpöreleet, älykkäät moottorisuojat) jäävät usein asettelematta, eli käyttöönottoa ei tehdä kunnolla.
- Asetukset saattavat myös olla väärät ylä- tai alapuolisiin suojiin nähden, jolloin selektiivisyys ja/tai riittävä suojaustaso ei välttämättä toteudu.
- Kompensointilaitteistojen huolto ja kunnossapito laiminlyödään hyvin usein kokonaan, jolloin kovassa kuormituksessa olevan laitteiston vanhenemisen aiheuttamaa vikaantumista ei huomata ja vika saattaa kehittyä palovaaralliseksi.
- Eristystasojen puutteellisuus keskusten sisällä lisää läpilyönti- ja sähköpaloriskiä.
- Muutosten ja lisäysten jälkeen ei huomata tarkistaa muuttuneita jäähdytysolosuhteita, jolloin keskukset ja kaapelit saattavat kuumeta liikaa.
- Jakokeskusten kotelointiluokitus heikkenee oleellisesti, kun asennuksen tai muutoksen yhteydessä osa läpivienneistä jää joko osittain tai kokonaan auki.
- Muutosten ja lisäysten jälkeen ei usein tarkisteta kokonaiskuormituksen muutosta.
- Epäsiisti ja ylimittaisilla kaapeleilla täytetty jakokeskus lisää sähköiskun vaaraa, ja ylimittaiset kaapelit ovat ylimääräistä palokuormaa ja edistävät paloa vikatilanteen sattuessa.
- Oksidikerroksen muodostuminen tai johtimen värin vaihtuminen on usein merkki liitokseen kohdistuneesta liiallisesta rasituksesta ja liiallisesta lämpenemisestä.
- Johdineristeen sulaminen kertoo hyvin suuren paikallisen lämmön esiintymisestä ja on ennakoiva signaali palovaarallisesta viasta.

6.4 Valokuva-aineistoon perustuva analyysi

Myös uusien keskusten asennusvirheet ja väärät asennuskäytännöt lisäävät merkittävästi laitteiston hallitsemattoman vikaantumisen riskiä. Saatujen havaintojen ja valokuvien perusteella sähköpaloriskiä lisää huomattavasti vierasaineiden esiintyminen sähkölaitteistojen sisällä ja niiden välittömässä läheisyydessä. Palavan materiaalin varastointi keskustiloihin vaikeuttaa myös palotilanteessa alueen pelastustöitä sekä saattaa nopeuttaa paloa

ja laajentaa paloaluetta. Vaikka palotarkastuksissa ohjeistetaan sähkölaitteistojen haltijoita poistamaan sähkökeskustiloista kaikki ylimääräinen palava materiaali, jää tämä toimenpide hyvin usein tekemättä. Seuraavaksi on esitetty kootusti tyypillisimpiä sähköpaloaaraa lisääviä vikaantumis- tai laiminlyöntihavaintoja.

Liitoksen vikaantuminen yleisesti

Niin kyselytutkimuksessa kuin tutkimuksen aineistoksi saaduissa valokuvissakin todettiin hyvin usein liitoksen vikaantumisen johtuvan löysästä liitoksesta. Liitoksen vikaantuminen ei kuitenkaan ole niin yksioikoista, vaan vikaantumiseen vaikuttavat hyvin voimakkaasti myös ulkoisien voimien vaikutus, liitosta ympäröivän kaasun koostumus, liitoksen tekovaiheessa rajapintoihin päässeet epäpuhtaudet sekä sähkövirran ja lämmön aiheuttamat kemialliset muutokset johdin- ja liitinmateriaaleissa. Löysä liitos voidaankin diagnosoida vain kokeilemalla liitoksen uudelleen kiristämistä ennen kuin liitokseen tehdään muita muutoksia. Hyvin usein kuitenkin pelkkä kiristys ei riitä, vaan lämmön vaikutuksesta vaurioituneet johtimet sekä liitoksen välittömässä läheisyydessä olevat komponentit tulisi korvata uusilla sekä esimerkiksi pulttiliitoksissa liitoksen pinnat tulisi puhdistaa ja kaapelikenkä sekä aluslaatat vaihtaa uuden, luotettavan liitoksen aikaansaamiseksi.

Kuvassa 20 kahden vaiheen kaapeloinnit ovat sulaneet löystyneen liitoksen takia. Huomattavaa on, että löysää liitosta ei voida aina todentaa pulttien ja ruuvien asennosta, vaan ainoastaan kokeilemalla, kiristyykö liitos.



Kuva 20. Löystyneen liitoksen seurauksena sulaneet johdineristeet (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Kuvassa 21 on esitetty löystyneen liitoksen vuoksi lämmenneen pääkytkimen värimuutokset johdinmateriaalissa sekä johtimen osittainen sulaminen. Suurimmat vauriot ja muutokset ovat kytkimen yläpuolisessa osassa vasemman reunan johtimissa, mutta vika on vaurioittanut myös viereisiä kaapeleita, joten lämpenemisen on täytynyt olla voimakasta.



Kuva 21. Huonon liitoksen aiheuttama oksidoituminen ja eristemateriaalin sulaminen johtimessa (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Ryhmätason nolla- ja suojajohtimissa tapahtuvat liitoksien vikaantumiset eivät usein ole suoranaisesti palovaarallisia varsinkaan kolmivaiheisissa ja symmetrisesti kuormiteuissa asennuksissa, joissa nollajohtimien läpi ei kulje juurikaan virtaa. Sen sijaan käyttäjien turvallisuuteen nolla- ja suojajohtimien liitosten vikaantumisella on suuri merkitys. Kuvan 22 tapauksessa 15-vuotias tyttö sai sähköiskun metallirunkoisesta sekoittimesta löystyneen nollajohtimen vuoksi, kun nollatun pistorasian maadoitusliitin tuli jännitteelliseksi. Tässä tapauksessa tosin oli kyse yksivaiheisesta kuormasta, jolloin koko piirin virta on kulkenut myös löystyneen nollaliittimen läpi ja aiheuttanut myös palovaaran ja johdineristeiden voimakkaan hiiltymisen.



Kuva 22. Nollajohtimen liitoksen löystymisen aiheuttama vikaantuminen (© Marko Mäkeläinen, QM-Installation Oy).

Teollisuuslaitoksissa liitosten luotettavuus korostuu voimakkaasti vaihtelevien kuormien ja suurien virtojen vuoksi. Edes hiiltymispisteeseen päässyt liitos ei välttämättä varoita etukäteen eikä esimerkiksi suojalaite reagoi ennen liitoksen lopullista vikaantumista oiko- tai maasulun kautta. On myös lukuisia tilanteita, joissa sähkönsyöttö on jatkunut normaalina, vaikka komponentti on vikaantunut palovaarallisesti. Tällöin piirissä vaikut-

tanut kokonaisvirta ei esimerkiksi suuren vikaimpedanssin vuoksi ole saavuttanut tarpeeksi suurta arvoa, jolla suojalaite olisi toiminut. Kuvassa 23 on esitetty esimerkki jo miltei hiiltyneestä liitoksesta, jossa myös vikaantuneen liitoksen johtimen eriste on sulanut noin kahdenkymmenen sentin etäisyydeltä kokonaan.



Kuva 23. Löystyneen liitoksen aiheuttaman lämmön nousun seuraukset (© Hannu Halminen, Bol-den Harjavalta Oy).

Korroosion vaikutus

Korroosio ilmenee usein näkyvimmin jakokeskusten ulkopuolisissa pinnoissa. Ulkoinen korroosio ei ole kuitenkaan sähköisille liitoksille sinänsä vaarallista, mutta se kertoo toki haastavista olosuhteista, jolloin laitteiston kuntoa tulisi valvoa tehostetusti. Lisäksi korroosio voi olla merkki sähkölaitteistoihin kohdistuvasta muusta ongelmasta. Esimerkiksi kuvassa 24 korroosion oli aiheuttanut jakokeskusten yläpuolella vuotanut vesiputki, joka olisi aiheuttanut todella suuren vikaantumisriskin veden päästessä jakokeskuksen jännitteisiin osiin.



Kuva 24. Yläpuolen putkistoista vuotaneen veden ruostuttama jakokeskus (© If Turva-akatemia).

Korroosio voimistuu runsaasti happamien ja emäksisten aineiden, nesteiden ja kaasujen vaikutuksesta. Kuvassa 25 on esitetty jakokeskuksen pääjakelukiskostoon valuneen kemiallisen nesteen vaikutuksista keskuksen rakenteisiin. Korroosio on ollut hyvin voimakasta ja aiheuttanut merkittävän vikaantumisriskin pienentyneiden ilmavälien vuoksi.



Kuva 25. *Happaman nesteen vaikutukset jakokeskuksen kiskostoon (© Hannu Halminen, Bolden Harjavalta Oy).*

Edes tiivis rakenne ei estä kokonaan syövyttävien kaasujen korrodoivaa vaikutusta liitoksiin. Kuvassa 26 on esitetty alle nimellisvirtansa pitkäkestoisesti käynnystä IP-67-kotelointiluokan pistoliitintä, joka on altistunut seitsemän vuoden ajan jätevedenpuhdistamon ammoniakkipitoisille kaasuille. Liitosten lämpeneminen oli sulattanut rakenteeseen reiän ja pistoliitintä avattaessa koko rakenne murtui aiheuttaen merkittävän sähköturvallisuus- ja käyttökatkovaaran.

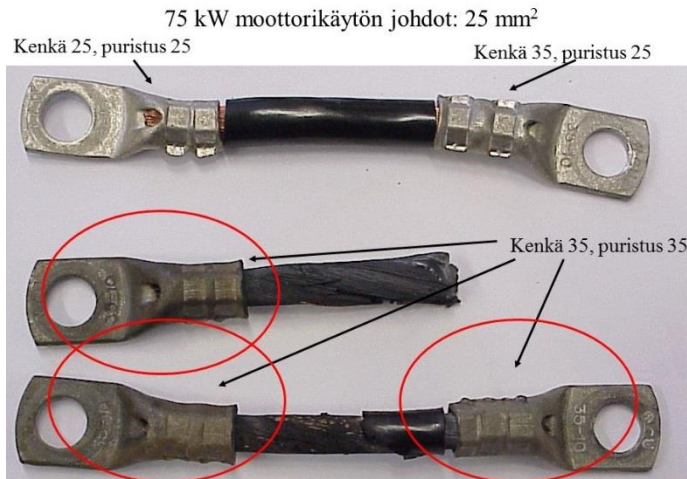


Kuva 26. *Pistoliitimen kunto ennen avausta ja irtikytkennän jälkeen (© Sampsa Salmela, Napa-piirin Vesi Oy).*

Virheellinen asennus

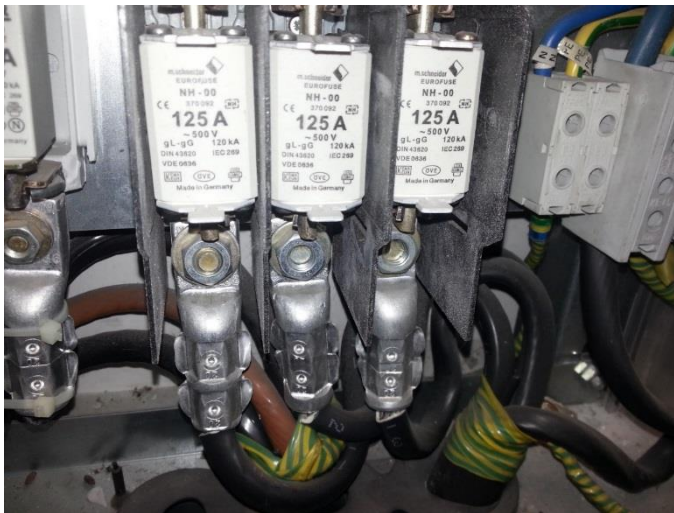
Kyselytutkimuksessa todettiin väärän tai virheellisen asennustekniikan ja asennuskäytännön olevan usein syy vikaantuneisiin liitoksiin. Seuraavissa kuvissa on esitetty muutamia tyypillisiä esimerkkejä yleisistä asennusvirheistä tai huonoista asennuskäytännöistä jakokeskusten valmistuksessa.

Kuvassa 27 on tyypiesimerkki runsaassa kuormituksessa olleiden pultiliitosten käyttäytymisestä virheellisen asennustavan seurauksena. Ylimpänä on oikean kokoisella liittimellä ja työkalulla puristetun liitosjohtimen muuttumaton rakenne. Kaksi alemmaa liitosjohdinta on sen sijaan tehty liian suurta kenkää ja puristustyökalua käyttäen, jolloin liitoksesta on muodostunut epäluotettava.



Kuva 27. Esimerkki väärän kokoisen työkalun käytön seurauksista puristettavilla kaapelikengillä (© Hannu Halminen, Bolden Harjavalta Oy).

Ollakseen luotettava pulttiliitos vaatii myös oikean kokoisten ja oikeista materiaaleista valmistettujen pulttien, mutterien, painetasausaluslevyjen sekä kartiomaisen aluslaatan käyttöä. Kuvan 28 esimerkissä liitoksen irtoaminen on ollut todellinen riski L2- ja L3-vaiheilla liian lyhyen pultin tai muuten väärällä tavalla tehdyn liitoksen vuoksi. Kuvasta voidaan huomata, kuinka pultin kierre on vain muutaman millin kiinni vastamutterissaan ja on näin ollen altis ulkoisen voiman, tärinän tai yliaaltojen aiheuttaman resonanssin vaikutuksille.



Kuva 28. Pulttiliitoksen vaillinainen viimeistely, pultti on liian lyhyt (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

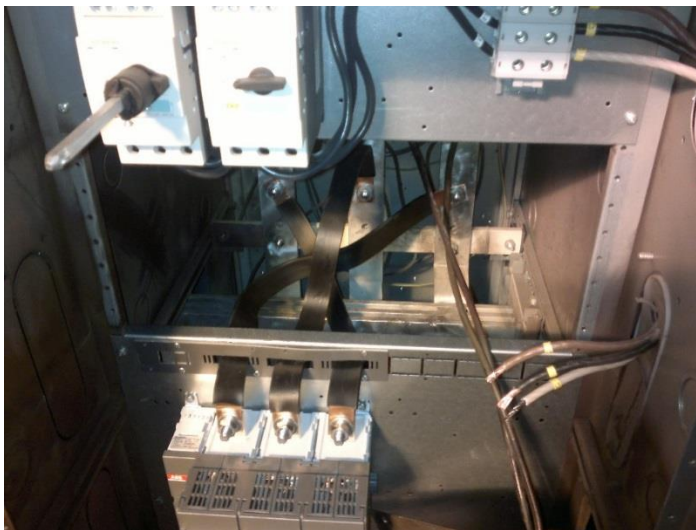
Virheet jakokeskusvalmistuksessa

Lukuisissa vikaraporteissa ilmeni eri jakokeskusvalmistajien huolimaton asennustyö erityisesti läpivientien, komponenttien sijoittelun ja komponenttien asennusohjeiden huomioiden huomioiden. Kuvassa 29 on esitetty keskusvalmistajan asennusvirheestä johtunut palovaarallinen vikaantuminen. Asennuksesta puuttui katkaisijavalmistajan edellyttämä (jos katkaisijan yläpuolisella alueella on jännitteisiä kiskoja, kaapeleita tms.) valokaarisuoja. Oikosulussa katkaisija purkaa valokaaren ylöspäin, ja valmistajan ohjeen mukaan silloin tarvitaan erillinen suoja-levy suojaamaan jakokeskuksen muita rakenteita.



Kuva 29. Puutteellisen asennuksen aiheuttama oikosulku katkaisijan valokaaresta (© Juha Anttonen, Botnia Mill Service Oy).

Kuvassa 30 on täysin uudessa jakokeskuksessa tapahtunut maasulku muutama päivä jännitteiseksi oton jälkeen. Syynä oli etukojetta syöttävien kiskojen huono eristys tai eristeen hankaantuminen teräviin läpivientireikiin. Jakokeskusten valmistuksessa tulisikin ottaa paremmin huomioon kuljetuksen ja asennuksen vaikutukset keskusrakenteeseen. Erityisesti läpiviennit ovat alttiita vikaantumiselle, ja niiden osalta tulisi miettiä jopa standardia suurempia ilmavälejä kiskostojen ja keskuksen rungon välillä vikaantumisen välttämiseksi.



Kuva 30. Puutteellisten läpivientien aiheuttama maasulku keskuksen runkoon (© Juha Anttonen, Botnia Mill Service Oy).

Jakokeskusstandardi edellyttää eri jännitetasojen peruseristettyjen johtimien erillään pitämistä. Hyviin asennustapoihin kuuluu myös eri tarkoitukseen olevien virtapiirien erottaminen oikosulkutilanteiden välttämiseksi. Kuvassa 31 on esitetty esimerkki pää- ja ohjausvirtapiirien risteilystä, joka saattaa aiheuttaa läpilyöntiriskiä, vaikka jännitetasot olisivatkin samat.



Kuva 31. Ohjausvirtapiirien väärä kaapelointireitti aiheuttaa pää- ja ohjausvirtapiirien välisen oikosulun riskin (© Juha Anttonen, Botnia Mill Service Oy).

Eri jännitetasojen tapauksessa jakokeskusstandardin vaatimus on selkeämpi, ja peruseristettyjen johtimien tai kiskojen kosketusta toisiinsa ei sallita kuvassa 32 esitetyllä tavalla. Oikealla olevan laitteiston ohjauslatta-kaapeli makaa suoraan jännitteisen kiskoston päällä aiheuttaen mahdollisen sähköturvallisuus- ja paloriskin.



Kuva 32. Ohjausvirtapiirien väärä kaapelointireitti aiheuttaa pää- ja ohjausvirtapiirien välisen oikosulun riskin (© Juha Anttonen, Botnia Mill Service Oy).

Puutteellisen suunnittelun, asennuksen ja käytön yhteisvaikutus

Vaikka asennus olisi suoritettu moitteettomasti, voi käyttäjän virhe vahingoittaa sähkölaitteistoa niin, etteivät edes suojalaitteet suojaa sähköpalolta. Kuvassa 33 kontaktorin kärjet ovat hitsautuneet kiinni liian suuren kuorman seurauksena. Kyseinen asennuksen lähellä oli toinen vastaava pistorasialiitäntäinen, hieman suurempitehoinen moottori, joka oli kytketty virheellisesti pienempitehoiseksi mitoitetun piirin pistorasiaan. Kyseisessä tilanteessa edes oikein aseteltu kontaktoriin liitetty lämpörele ei ole katkaissut virtapiiriä, koska lämpörele ei ole kyennyt katkaisemaan sen läpi kulkenutta suurempaa energiaa. Toisin sanoen kontaktorin koskettimien katkaisukykyyn I^2 -arvo on ollut riittämätön, ja

koskettimet ovat hitsautuneet kiinni aiheuttaen palovaaran. Kyseisessä tilanteessa onneksi voimakas savunmuodostus paljasti vian ennen kuin palo ehti levitä muihin rakenteisiin.

Lähtökohtaisesti kontaktorin mitoituksen oikeellisuus voidaan kyseenalaistaa, sillä käytettävän katkaisulaitteen tulisi aina kestää piirissä mahdollisesti esiintyvä oikosulkuvirta ottaen toki piirin oikosulkua rajoittavat suojalaitteet huomioon. Myöskään asennustapa ei ollut hyvä, koska asennettaessa kaksi eritehoista moottoria pistorasialiitäntäisinä ei voitu olla varmoja piirien vaihtumisesta tulevaisuudessa. Näin ollen vastaavissa tilanteissa suositeltavampi asennustapa olisi tehdä asennus kiinteänä, jolloin vain sähköalan ammattilainen saisi muuttaa tarvittaessa kytkentää.



Kuva 33. Vaurioitunut kontaktori (© Jorma Korkalo, Primatest Oy).

Koteloinnin pitävyyden vaikutukset

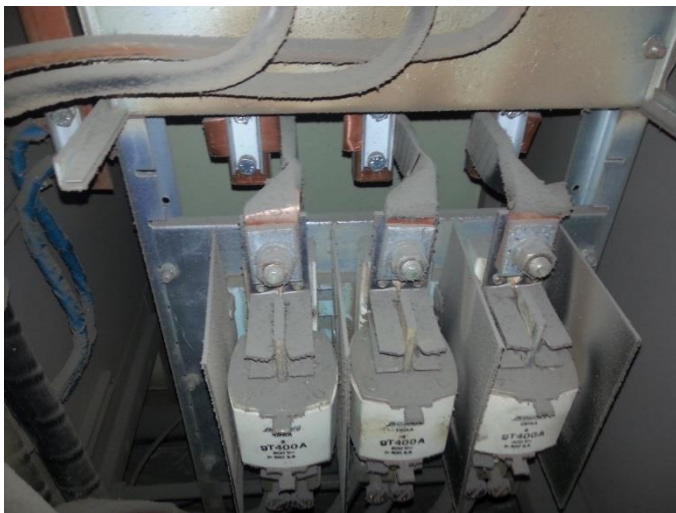
Jakokeskusten kotelointiluokka muodostuu keskuksen rakenteellisesta, mutta myös toiminnallisesta, koteloinnista. Lisäysten ja muutosten jälkeen syntyneet uudet läpiviennit sekä kaapelitunnelien sisääntuloaukot tulisi tiivistää asianmukaisesti, ja käytön yhteydessä tulisi huolehtia ovien ja kansien kiinni olemista ja tiivyydestä.

Pieneläinten pääsy jakokeskusten sisään voi aiheuttaa potentiaalista vaaraa erityisesti maataloilla, mutta myös muussa ympäristössä. Eläimet voivat joko tuhota keskuksen sisäisiä eristerakenteita tai aiheuttaa palovaaran osumalla jännitteisiin osiin. Kuvassa 34 hiiret ovat päässeet teollisuudessa olevan jakokeskuksen sisään ja kuolleet jakokeskuksen jännitteisiin osiin aiheuttaen palovaaran.



Kuva 34. Puutteellisten läpivientien vaikutus eläimien kulkeutumiseen jakokeskuksen jännitteisiin osiin (© If Turva-akatemia).

Jakokeskuksen tiiviys vaikuttaa myös ulkoisen lian ja pölyn kertymiseen keskuksen sisään. Pölyn palokuormaa lisäävä vaikutus on todellisuudessa melko pieni, mutta pölykerros estää komponenttien jäähtymistä ja aiheuttaa näin ylimääräistä lämpenemistä, joka lisää vikaantumisen riskiä. Lisäksi pölyn mukana voi tulla myös sähköä joko kokonaan tai osittain johtavia partikkeleita, joiden vaikutuksesta läpilyöntiriski voi kasvaa huomattavasti. Pölyn poiston tulisikin ainakin pölyisissä ympäristöissä sisältyä säännöllisesti sähkölaitteiston huolto-ohjelmaan ja olla osa ennakoivaa kunnossapitoa. Kuvassa 35 on esitetty kuva jännitteisille pinoille muodostuneesta runsaasta pölystä.



Kuva 35. Pölyä ja likaa on kertynyt runsaasti jännitteisille pinoille keskuksen sisälle (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Sähköpalon leviämisen riskiä lisäävä toimintaympäristö

Jos keskuksille ei jätetä riittävää hoitotilaa, ei niiden kunnossapidosta juuri huolehdita huonon luoksepäästävyuden takia. Myös keskuksen jäähdytysolosuhteet voivat huonontua ratkaisevalla tavalla eikä yllämpenemiseen viittaavia merkkejä havaita ajoissa. Tämä yhdistettynä vikaantuviin liitoksiin lisää paloturvallisuusriskiä merkittävästi. (Kukkonen 2014) Kuvassa 36 on esitetty esimerkki palovaarallisten kemikaalien säilytyksestä jakokeskuksen välittömässä läheisyydessä.



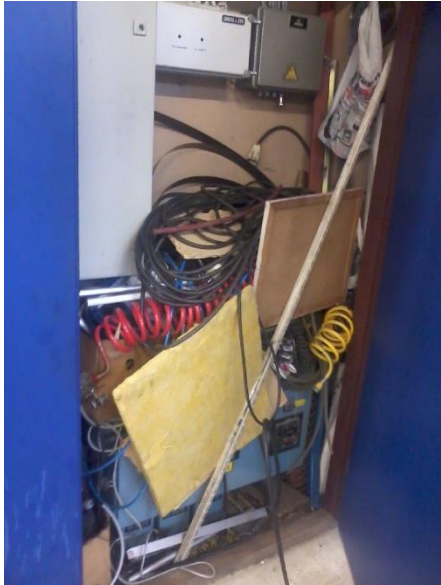
Kuva 36. Rungas palavieneiden varastointi jakokeskusten läheisyydessä (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Heikko luoksepäästävyys ja ylimääräisen palokuorman tuoma lisäriski yhdistettynä jakokeskuksen vikaantumiseen olisi kuvan 37 tapauksessa tuhoisa yhdistelmä. Paloviranomaiset kiinnittävät huomiota myös sähkökeskustilojen kuntoon ja erityisesti palokuorman määrään, mutta loppujen lopuksi vastuu tilojen kunnossapidosta ja mahdollisista seurauksista laitteiston vikaantuessa laiminlyönnin seurauksena on aina sähkölaitteiston haltijalla.



Kuva 37. Ylimääräinen tavara estää laitteistojen kunnossapidon ja lisää tilan palokuormaa huomattavasti (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Usein myös jakokeskusten sisällä säilytetään sinne kuulumatonta tavaraa. Ylimääräinen tavara huonontaa keskuksen komponenttien jäähtyvyyttä ja on todellinen riski muodostaessaan lisäpalokuormaa erityisesti muutenkin laiminlyödyn kunnossapidon vuoksi helposti vikaantuville kondensaattoriparistoille, kuten kuvassa 38 hyvin näkyy. Ylimääräinen PVC-muovi ja -sähkökaapelit muodostavat jakokeskusten sisällä lisäksi turvallisuusriskin sähköpalojen yhteydessä, koska ne muodostavat voimakkaasti savua ja häkää ja niistä vapautuvan kloorin yhdistyessä veteen syntyy helposti myös syövyttävää suolahappoa (HCl).



Kuva 38. Kondensaattoripariston keskuksen sisätila täynnä ylimääräistä palokuormaa (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Myös keskuksien kojeiden ja koteloiden päälle muodostunut runsas pöly ja lika lisäävät lämpenemää ja vaikeuttavat keskuksen jäähtymistä lisäten samalla paloriskiä, kuten kuvan 39 esimerkissä. Pöly ja lika voivat muodostaa muiden epäpuhtauksien kanssa joko kokonaan tai osittain johtavan virtatien erityisesti silloin, kun likakerros muodostuu esimerkiksi ilmankosteuden kasvamisen myötä, jolloin läpilyöntiriski sekä eristeiden yli että jännitteisten osien välillä kasvaa.



Kuva 39. Pölyä ja likaa on kertynyt runsaasti keskuksen ulkopinnoille (© Pertti Kukkonen, Oy Elspecta Ab).

Ulkoisten ilmiöiden aiheuttama vikaantuminen

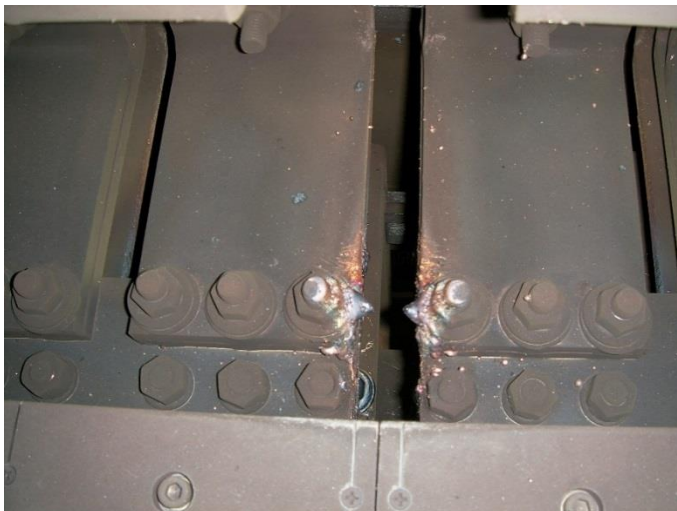
Myös ulkoiset häiriöt sähköverkossa saattavat aiheuttaa palovaaran. Esimerkiksi erityisesti ukkosen aiheuttama voimakas jännitteen nousu järjestelmässä voi rikkoa kuvan 40 esimerkin mukaisesti sähkölaitteiston ohjaus- ja päävirtapiirin laitteistoja ja aiheuttaa

myös laajemman palovaaran. Erityisen herkkiä ovat paljon elektroniikkaa sisältävät komponentit.



Kuva 40. Ukkosen aiheuttama ohjauskeskuksen vikaantuminen (© Ari Jurvanen, Keski- Suomen Pelastuslaitos).

Aina vikaantumisen alkusyytä ei voida todentaa. Varsinkin suurivirtaisissa oikosuluissa eivät vikaa edeltäneet jäljet usein näy. Sen sijaan vikaantumiskohdan oiko- tai maasulku jättää yleensä pysyvät jäljet. Jälkien muodostuminen riippuu voimakkaasti virran suuruudesta, vikapaikasta sekä viasta mahdollisesti seuranneesta palosta. Kuvassa 41 suurivirtaisen kiskostoliitoksen oikosulun vaikutus näkyy sulaneina pisaramaisina muutoksina oikosulkukohdassa sekä pieninä oikosulussa ympäriinsä singonneina metallipisaroina. Vikaantumisen alkusyytä ei ole kuitenkaan pystytty jäljittämään, joten myös ulkoisen ylijännitteen mahdollisuus on olemassa.



Kuva 41. Tyypilliset suurivirtaisessa oikosulussa syntyneet palamisjäljet (© Matti Suomalainen, ABB Oy).

6.5 Lämpökuva-aineistoon perustuva analyysi

Lämpökuvauksissa havaituissa puutteissa suurin osa havainnoista ei aiheuttanut vielä välitöntä palovaaraa, mutta lähes jokaisessa raportissa kehoitettiin vaihtamaan joko vikaantunut komponentti tai suorittamaan vikaantuneen liitoksen asennus uudelleen ja uusimaan myös liitoksissa käytetyt asennustarvikkeet lukuun ottamatta liitokseen liittyviä johtimia. Vain harvassa tapauksessa myös liitokseen liittyvät johtimet kehoitettiin korvaamaan uusilla, koska niihin oli vaikuttanut suurempi lämpötila kuin kyseiselle johdintyypille on sallittu. Vaikka kuvaustilanteessa lämpötila olisikin matalampi, johtimen eristemateriaalin ollessa vaurioitunut kannattaisi johdin korvata aina uudella. Lämpökuvatutkimusaineistoissa korostuivat seuraavien liitostyyppien ongelmat:

- suurivirtaiset pulttiliitokset ja kaapelikengät
- ruuvikiristeisien liitosten vikaantuminen
- kahvasulakkeiden ja sulakealustojen välisten liitosten vikaantuminen
- ikääntyneiden kontaktorien sisäisten liitospintojen vikaantuminen
- tulppasulakelähtöjen vikaantuneet liitokset
- ruuvikiristeisien riviliittimien vikaantuneet (löystyneet) liitokset
- liian tiiviisti asennettujen komponenttien ja/tai johdinten yhteisen lämpötilavaihtuksen kertautuminen.

Vikaantumiset olivat havaittavissa pääasiassa epäsymmetrisestä lämpenemisestä suhteessa piireissä meneviin vaihevirtoihin sekä komponenteissa ja johtimissa fyysisesti näkyvistä vikaantumisjäljistä. Tutkimuksen lähdemateriaalina olleissa lämpökuvauraportteissa ilmeni melko suurta vaihtelua kuvien analysoinnin ja toimenpidesuosituksen osalta, vaikka lämpökuvaus on melko mekaaninen toimenpide. Laadukkaissa raporteissa korostui kuvaajan perehtyneisyys ja ymmärrys sähkön ja komponenttien käyttäytymisestä, eikä niinkään lämpökuvaajan työkokemuksen pituus sähköalalta.

Lämpökuvauksessa tulee lisäksi aina muistaa laitteiston asetteluarvojen ja kuvattavan ympäristön vaikutus saatuihin tuloksiin. Saatuja lämpötiloja ei tule siten tulkita täysin eksakteina arvoina, vaan vertailukohtana.

Liitoksen lämpeneminen

Liian usein vikaantuneesta liitoksesta todetaan vain liitoksen olleen löystynyt ja vian aiheutuneen löystymisestä. Seuraavaksi on esitetty erilaisia tilanteita, joissa liitos on vikaantunut. Osassa tilanteista vikaantumisen on aiheuttanut liitoksen löystyminen ja osassa jokin muu tekijä. Saadussa aineistossa vain hyvin harvoin suoritettiin tarkempia selvityksiä vian alkusyyntä tulkittamiseksi. Näin ollen lämpökuvahavainnoista ei usein voitu tehdä tarkempia analyysejä vian alkusyyistä, vaan niissä kiinnitettiin huomiota ainoastaan viasta seuranneisiin ilmiöihin.

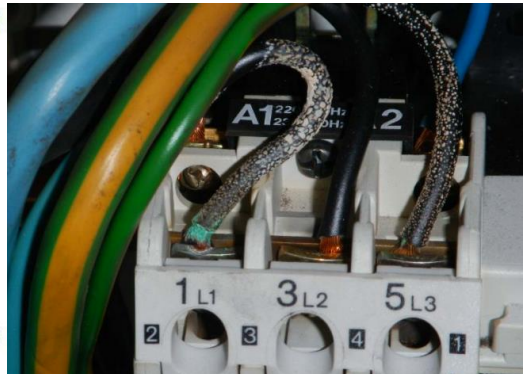
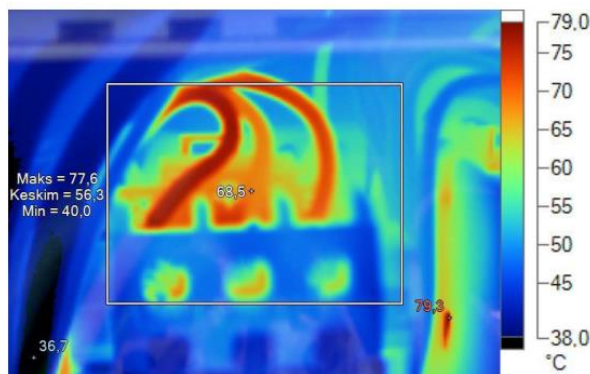
Kuvassa 42 on esitetty löystyneen riviliittimen vaikutus piirin lämpenemiseen. Kyseiselle johdineristeeseen suurin sallittu lämpötila (70 °C) ylittyy reilusti lämpötilan ollessa yli 95 °C.

Vikaantunut liitos voi aiheuttaa pienilläkin virroilla merkittäviä muutoksia johdin- ja komponenttieristeissä sekä myös johtavissa osissa. Lämpökuvauksessa vielä melko pieni lämpötila (77 °C) on kuvan 43 esimerkissä kuitenkin vaikuttanut jo voimakkaasti kontaktorin johdotuksiin ja liittokseen.

Kuvassa 44 vikaantuminen on tapahtunut kahvasulakkeen ja sen alustan välisessä liittoksesta, jossa liitos syntyy jousivoiman vaikutuksesta. Huomattavaa kuitenkin on, että myös erillään vikapaikasta olevan johtimen muovivaippa on sulanut pitkältä matkalta.



Kuva 42. Löystyneen riviliittinkytkenän vaikutus johtimen ja liittimen lämpötilan nousuun (© Hannu Halminen, Bolden Harjavalta Oy).



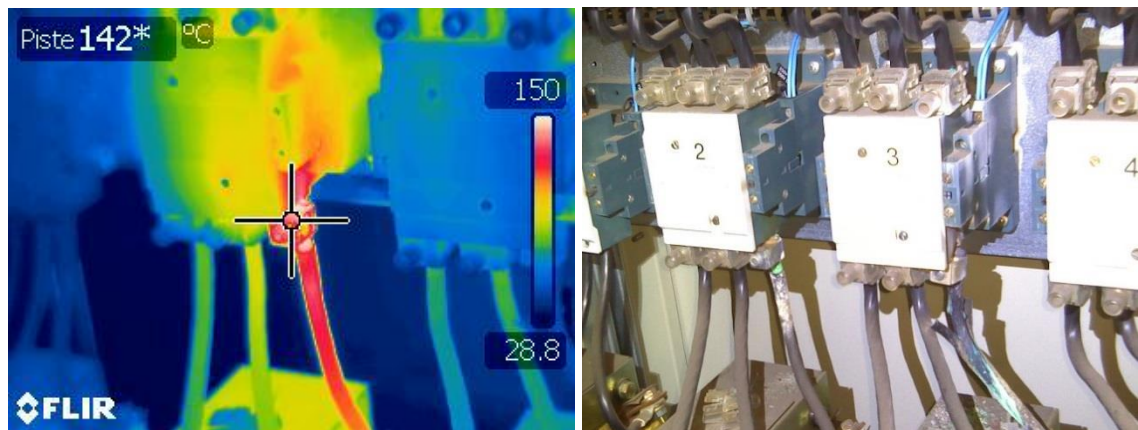
Kuva 43. Vikaantuneiden liittosten aiheuttamat muutokset johtimissa. (© Tuomo Ojala, Selektio Tmi).



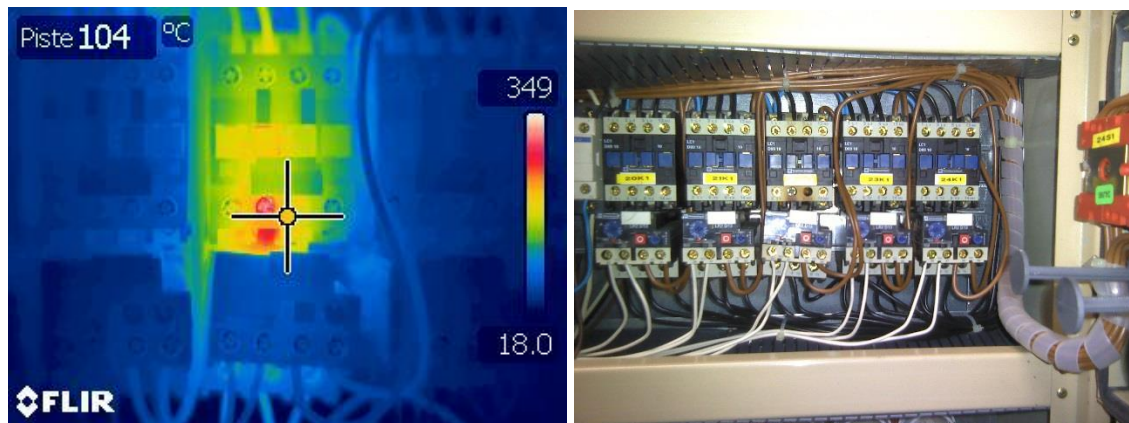
Kuva 44. Liitospintojen löystymisen aiheuttama lämmön nousu kahvasulakkeissa (© If Turvaakatemia).

Liitoksen vikaantuessa lämpö johtuu metallissa hyvin melko pitkiäkin matkoja. Kuvassa 45 on hyvin nähtävissä, kuinka liitoksen kuumimmassa kohdassa oleva noin 150 °C lämpötila johtuu syöttökaapelia pitkin alaspäin noin 100 °C lämpöisenä vaurioittaen johtimen eristeitä merkittävästi. Lisäksi lämpötila johtuu myös kontaktorin kärkien yli, jolloin voidaan olettaa myös toimilaitteen kärsineen nousseesta lämpötilasta.

Lämpötilan nousu riippuu voimakkaasti piirissä vaikuttavasta virrasta, mutta pieniläkin virroilla voi lämpötila nousta hyvin suureksi olosuhteiden ollessa lämmön nousulle suotuisat. Kuvassa 46 kontaktorin pistemäisesti lämpenevän ruuviliitoksen lämpötilaksi on mitattu jopa yli 300 °C virran ollessa todennäköisesti alle 10 A. Tällöin voidaan olettaa liitoksen vikaantumisasteen olevan korkea, ja tarkemmassa tarkastelussa voitaisiin todennäköisesti havaita myös kipinäointi liitoksen rajapintojen välissä.



Kuva 45. Kompensointilaitteiston kontaktorin liitoksen aiheuttama vikaantuminen (© If Turva-akatemia).



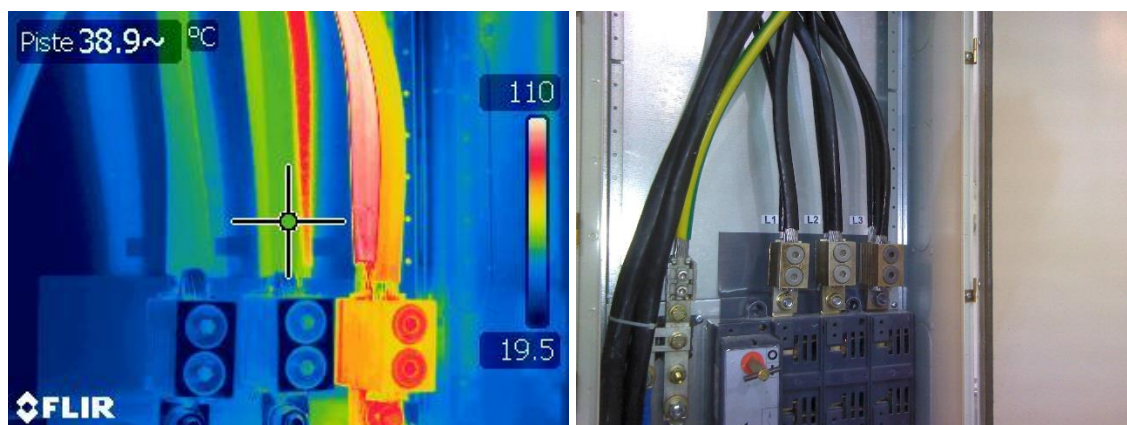
Kuva 46. Puutteellisen liitoksen aiheuttama lämpenemä kontaktorin ja lämpöreleen välissä (© If Turva-akatemia).

Liitoksen vikaantuminen ei aina johdu sen löystymisestä. Esimerkiksi korroosion tai oksidikerroksen aiheuttama ylimenovastus kontaktipintojen välillä saattaa aiheuttaa runsaan lämmön muodostumisen, joka johtuu piirissä johtimia pitkin myös useita kymmeniä senttejä eteenpäin. Syy-seuraussuhteen määrittäminen ei ole kuitenkaan helppoa, sillä esimerkiksi löystynyt liitos saattaa myös aiheuttaa lämmitessään oksidikerroksen muodostumisen liitoksen pinoille.

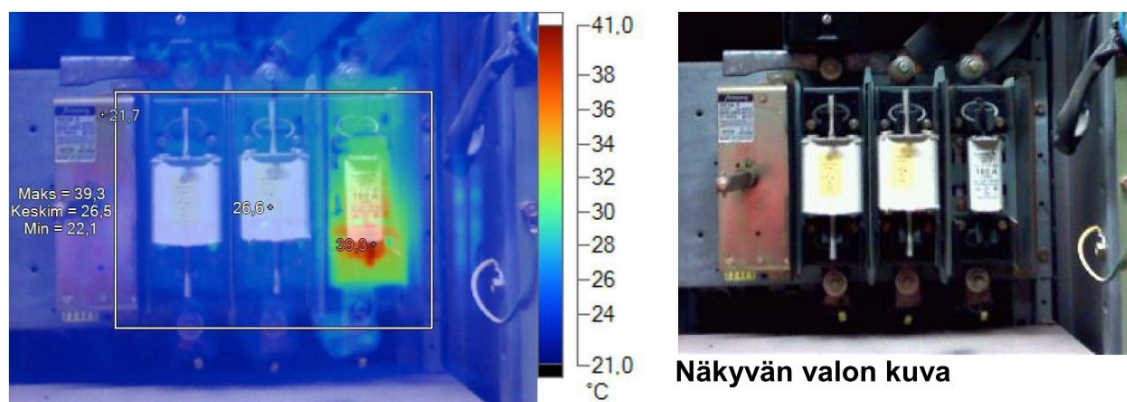
Kuvan 47 liitospulttien asennosta päätellen liitoksen vikaantumisen on voinut aiheuttaa liitoksen tekovaiheessa johtimen ja liittimen väliin jäänyt epäpuhtaus, jonka seurauksena liitos on lämmennyt voimakkaasti.

Myös väärin mitoitettu komponentti tai suojalaite voidaan havaita lämpökuvauksen avulla. Kuvassa 48 esitetty varsin yleinen, vaikkakin valitettava, ilmiö, jossa oikean kahvasulakekoon puuttuessa on sulake korvattu liian pienellä sulaketyypillä, jolloin sulakealustan ja sulakkeen rajapinta lämpenee heikon kosketuksen vuoksi.

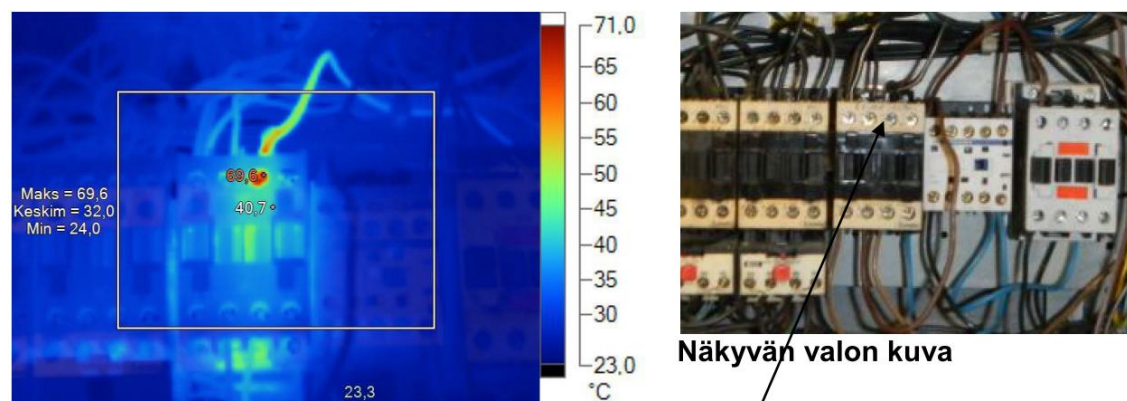
Varsinaisen löystyneen liitoksen voi havaita lämpökuvauksen avulla helposti, erityisesti ruuviliitosten tapauksessa, sen pistemäisen lämpenemän vuoksi. Kuvassa 49 on esitetty esimerkki pienivirtaisen löysän liitoksen näkymisestä lämpökuvauksessa.



Kuva 47. Liitoksen vikaantumisen aiheuttama lämpenemä liittimessä ja johtimessa (© If Turvaakatemia).



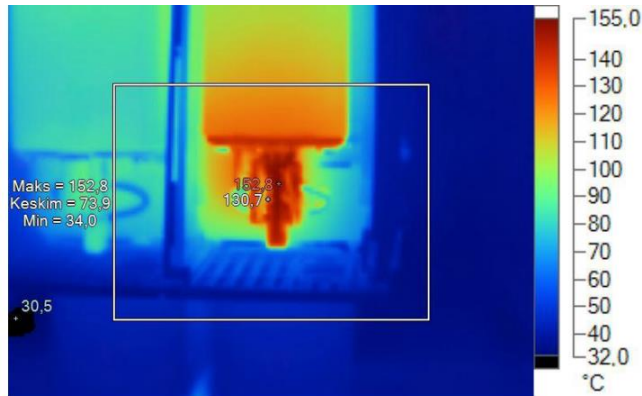
Kuva 48. Tyypiesimerkki väärin mitoitetusta kahvasulakkeesta.. (© Tuomo Ojala, Selektio Tmi).



Kuva 49. Tyypiesimerkki löystyneen liitoksen aiheuttamasta lämpenemästä johtimessa, IL3=5,7A. (© Tuomo Ojala, Selektio Tmi).

Varsinkin avoimet liitospinnat korrodoituvat helposti. Vaikka liitokseen kertyvät epäpuhtaudet ovat aluksi vain liitoksen pinnassa, ajan myötä ne pyrkivät syövyttämään myös liitosrajapintoja, jolloin rajapinnan lämpötilakin nousee pistemäisen impedanssin nousun myötä. Kuvassa 50 epäpuhtaudet ja korroosio ovat ehtineet sulakealustan ja sulakkeen välisessä liitospinnassa niin pitkälle, että liitos lämpenee jopa yli 150 °C.

Myös perinteisissä tulppasulakkeissa esiintyy liitoksissa ilmenevää vikaantumista. Kuvan 51 esimerkissä sulakekansi on jätetty liian löysälle, jolloin virtapiiri toimii ja on johtavana, mutta kosketuspinnan ollessa huono koko sulakekansi ja alusta sulakkeineen lämpenevät runsaasti.

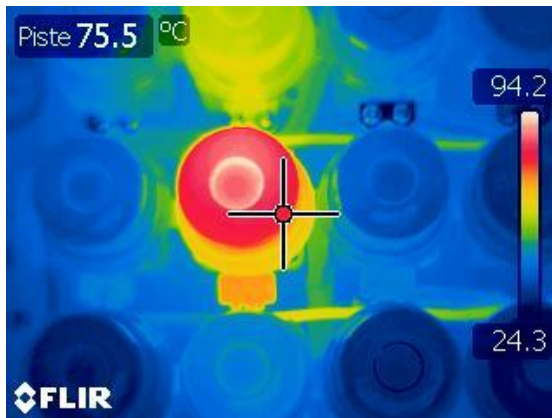


IR000359.IS2



Näkyvän valon kuva

Kuva 50. Tyypiesimerkki liitospinnan hapettumisesta/likaantumisesta johtuvasta lämpenemstä (© Tuomo Ojala, Selektio Tmi).

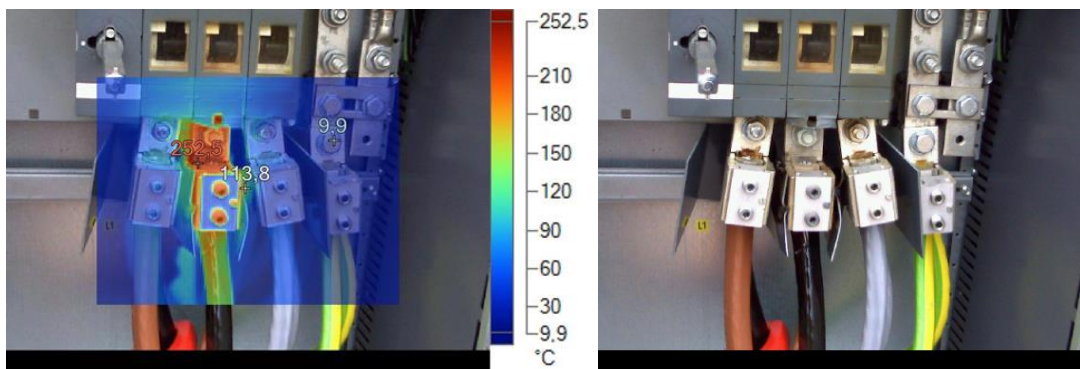


Kuva 51. Löysä liitos voi esiintyä myös huonosti kiristetyin sulakekannen ja vastinkappaleen välissä (© If Turva-akatemia).

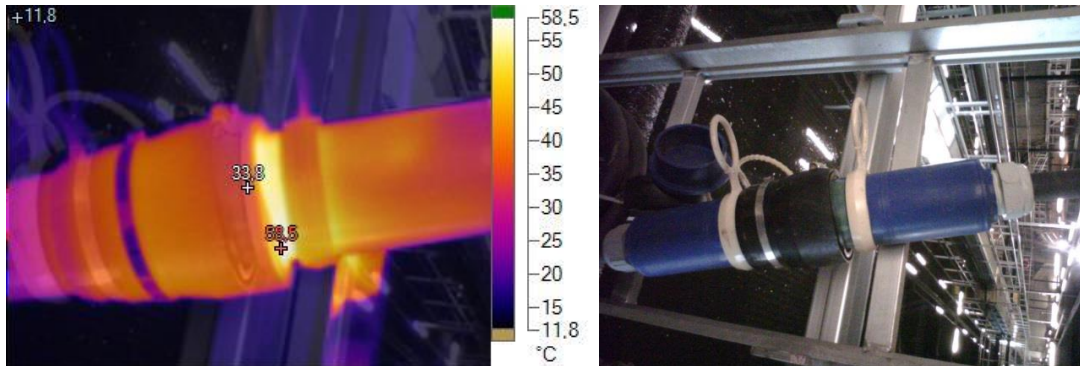
Harmonisten yliaaltojen merkitystä liitoksille ei kannata aliarvioida. Usein ongelmat ilmenevät nollajohtimeen summautuvista kolmannen yliaallon kerrannaisista. Kuvassa 52 kolmas yliaalto aiheutti kuitenkin myös muita ongelmia, sillä yliaallot yleensäkin saavat komponentit resonoimaan ja täten tavallaan itsestään ”avaamaan” kiristettyjä ruuveja, pultteja, kansion kiinnityssalpoja ym. Kyseisessä tapauksessa kolmannen yliaallon suuruus virran osalta oli noin 20 %. (Vikström 2014)

Aikaisemmin kuvamateriaalissa esitetyn korrodoituneen pistoliittimen kasvanut liitosimpedanssi havaittiin myös lämpökuvauksella, joka paljasti liitoskohdan lämpenevän kauttaaltaan liian paljon suhteessa käytettyyn virtaan. Kuvassa 53 on pistoliittimen lämpötila mitattuna ennen liittimen purkua.

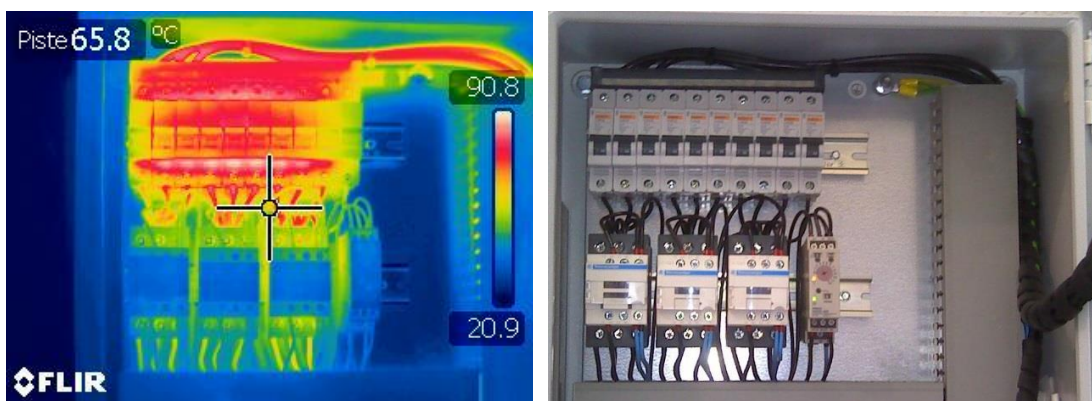
Kuvassa 54 laattalämmityskaapeleiden ryhmäkohtaiset sulakkeet (16 A) lämpenivät yhdessä yli 90 °C. Ryhmäkohtaisiksi virroiksi mitattiin 15–16 A, jolloin vierekkäin asennettujen komponenttien jäähtyvyys oli riittämätöntä.



Kuva 52. Pulttiliitoksen löystyminen yliaaltopitoisessa verkossa (© Ari Vikström, Saipu Oy).



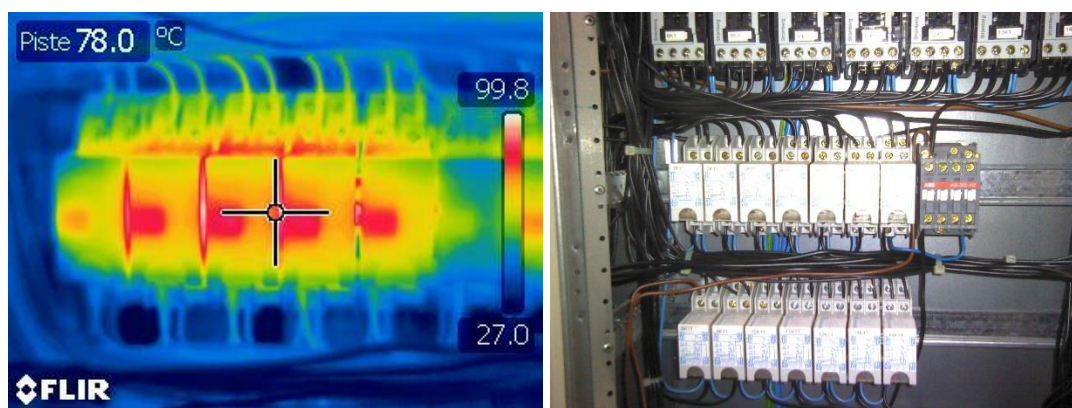
Kuva 53. Syövyttävien kaasujen vaikutus tiiviiseen liitosrakenteeseen (© Sampsa Salmela, Napa-piirin Vesi Oy).



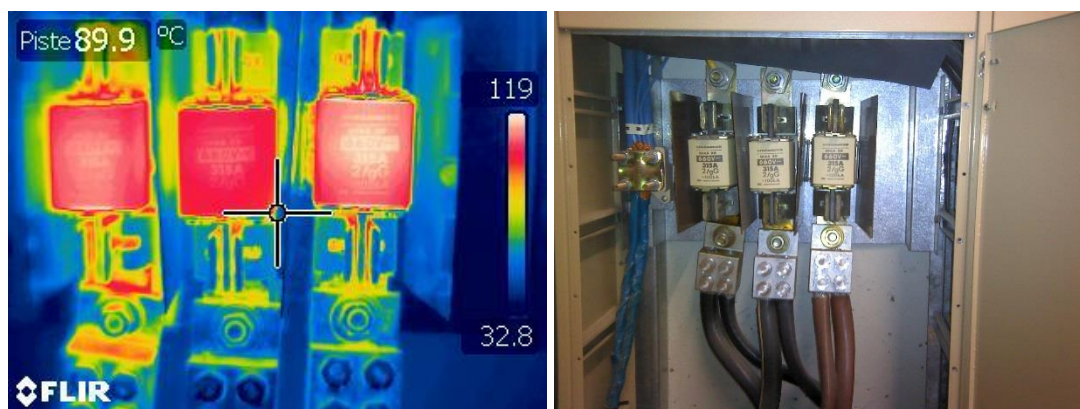
Kuva 54. Rinnakkaisten lämpökuormitusten vaikutus kokonaislämpenemään johdonsuoja-auto-maateilla (© If Turva-akatemia).

Releet ovat myös yleinen lämmön tuottaja jakokeskuksissa erityisesti niissä tilanteissa, joissa releet on kytketty vierekkäin ilman minkäänlaista ilmväliä. Kuvassa 55 esitettyjen releyksiköiden kelat lämpenevät melkein 100 °C.

Ylikuormitus on myös yksi syy liian suuren lämpötilan tuottamiseen. Kuvassa 56 jakokeskuksen pääsulakkeet olivat ylikuormitettuja. Jakokeskuksessa oli asennettuina 315 A pääsulakkeet, mutta kuormat olivat kuvaushetkellä jokaisella vaiheella noin 410 A eli ylikuormitus on ollut 30 % ilman, että sulakkeet olisivat toimineet ja rajoittaneet näin sulakkeiden ylikuormitusvirtaa. Kyseisten sulakkeiden toiminta on sinänsä aivan pienjännitevarokestandardin SFS-EN 60269-1 mukainen (taulukko 6), sillä se sallii esimerkiksi 315 A kahvavarokkeille jopa 25–60 % ylikuormituksen ennen kuin sulakkeen on katkaistava piiri. Sulakkeen ja sitä ympäröivien rakenteiden tulisi kestää tämä ylikuormitus kyseisellä sulakekoolla jopa kolme tuntia. Näin ollen herääkin kysymys, täyttääkö ikääntynyt ja mahdollisesti epäpuhdas sulake enää vaatimukset lämpenemän suhteen vai onko joko sulakekomponentin tai jakokeskuksien jäähtyvyyden mitoitus jo alkujaan liian pieni.



Kuva 55. Valaistusryhmien releistykseen lämpenemisen yhteisvaikutus (© If Turva-akatemia).

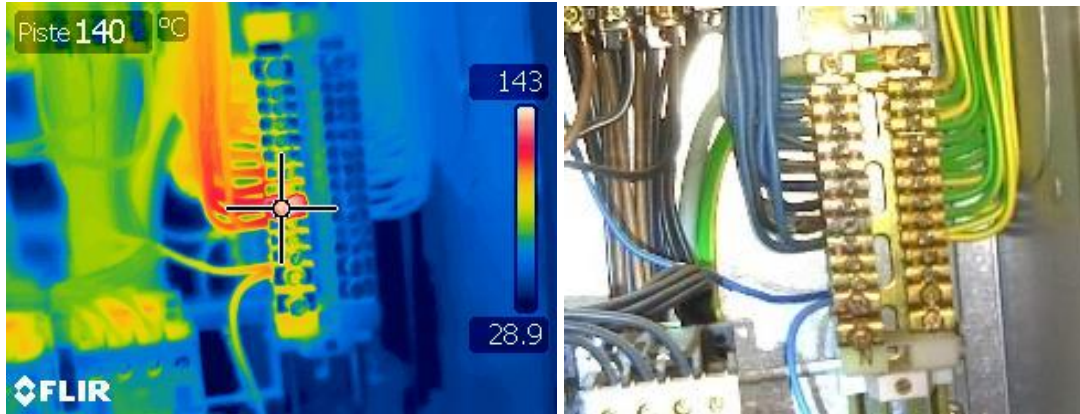


Kuva 56. Ylikuormituksen aiheuttama lämpenemä pääsulakkeissa (© If Turva-akatemia).

Taulukko 6. gG-sulakkeen toimintarajavirrat (SFS-EN 60269-1 2008, SFS 5490 2009* ja SFS 5855 2009*).

gG-sulakkeen toimintarajavirrat			
Mitoitusvirta I_n [A]	Kestorajavirta I_{nf} [A]	Sulamisrajavirta I_f [A]	Aika [h]
2 ja 4 A	$1,5 \times I_n^*$	$2,1 \times I_n^*$	1
6...10 A	$1,5 \times I_n^*$	$1,9 \times I_n^*$	
$13 \text{ A} < I_n \leq 63 \text{ A}$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	2
$63 \text{ A} < I_n \leq 160 \text{ A}$			3
$160 \text{ A} < I_n \leq 400 \text{ A}$			4
$400 \text{ A} < I_n$			

Myös nollajohtimet voivat kuumentua palovaarallisesti. Kuvassa 57 on valaistusryhmän N-johtimien löysän liitoksen ja mahdollisen ylikompensoinnin yhteisvaikutuksesta lämpötila kohonnut jopa yli 140 °C. Kyseisessä kohteessa ei teetetty sähkönlaadun analysointia, mutta lämpökuvan perusteella voidaan epäillä kasvihuonekäytössä olevien valaisimien ylikompensointia ja runsasta harmonisten yliaaltojen määrää, joka kuormittaa erityisesti nollajohtimia.



Kuva 57. Nollajohtimien lämpeneminen (© If Turva-akatemia).

6.6 Vikaantumisen mallintaminen

Tutkimuksen yhteydessä teetettiin testilaitteisto, jolla pystyttiin simuloimaan erilaisia vikaantumistilanteita ja suojaustapoja laboratorio-olosuhteissa. Testilaitteiston layout-kuva on esitetty liitteessä 3. Testilaitteistolla tutkittiin vikaantuneiden komponenttien ja liitosten käyttäytymistä ja laitteistossa esiintyvien ilmiöiden mittaamista eri menetelmin sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi.

6.6.1 Testilaitteisto ja käytetty mittauskalusto

Taulukossa 7 on esitetty tutkimuksessa käytetyn testilaitteiston suojalaitteet. Harmaalla värillä on tummennettu komponentit, jotka vaativat vähintään kahden suojalaitteen yhteistoimintaa joko mitoitus teknisen tai toiminnallisen syyn takia. *)-merkityt suojalaitteet ovat olleet käytössä, mutta niiden toimintaa ei ole simuloitu tutkimusmielessä, koska vikatilanteiden simuloinnissa keskityttiin ryhmäjohtotason liitosongelmien tunnistamiseen ja suojalaitteiden toimintojen havainnointiin. Toimintaperiaate-sarakkeen numerointi sen sijaan tarkoittaa fysikaalista suuretta, jonka mittaamiseen suojaus perustuu; 1 = virta [A], 2 = valovoimakkuus [lx], 3 = maasulkuvirta [A] ja 4 = suurtaajuiset virtahäiriöt [Hz].

Taulukko 7. Testilaitteiston suojalaitteet.

Positio	Suojalaite	Valmistaja	Malli	Tyyppi	Toimintaperiaate
0Q1 *)	Ilmakatkaisija	Schneider Electric Oy	Masterpact	NWH10H1 4P	1
	Suojarele	Schneider Electric Oy	Micrologic	2.0 E	1
A10 + G10 + K10.1-6 *)	Valokaari-suoja	UTU Oy	Falcon	MU	1+2
10F, 30F, 50F *)	Kytkinvaroke	Katko Oy	KVKE	3250	1

11...16F *)	Kahvavaroike	Jean Müller	00	00 160A 3-N S-S	1
31...39, 51...59	Tulppasulake	Ensto	KV KVC	63.731 421, 441, 451	1
61F..63F	Johdonsuoja- automaatti	Siemens Oy	SENTRON	5SY6 016-7	1
	Palosuojakat- kaisija	Siemens Oy	SENTRON	5SM6 011-1	4
64F	Johdonsuoja- automaatti	Hager	MCN	MCN 316E 6kA	1
65F + 65F4	Johdonsuoja- automaatti	Hager	MCN	MCN 316E 6kA	1
	Vikavirtasuojaja	Hager	CDA	CDA415K 30mA	3

Edellä mainittujen suojalaitteiden lisäksi laitteistoon asennettiin MX Electrix Oy:n AMR-sähkönlaadun analysaattori (EDFTL). Kyseinen mittalaitteisto pystyy analysoimaan normaalin lois- ja pätötehon mittaamisen lisäksi sähkönlaadun ominaisuuksia. AMR-laitteiston osalta tutkimuksessa keskityttiin lähinnä pohtimaan vaihtoehtoja, miten tulevaisuudessa etäluettavien mittalaitteistojen ominaisuuksia voitaisiin hyödyntää sähköpalojen ennaltaehkäisyssä. Kuvassa 58 on esitetty tutkimuksessa käytetty UTU Oy:n toimittama testilaitteisto.



Kuva 58. Testilaitteisto.

Laboratoriosimuloinneissa käytettiin liitteessä 4 esitettyä testipiiriä. Erityisesti pyrittiin tutkimaan, miten sarja-, rinnan- ja maaoskuloskuna esiintyvät viat muodostuvat, millä mittausten menetelmillä viat voitaisiin havaita ennen niiden muuttumista palovaarallisiksi ja toisaalta, miten vikatilanteita voitaisiin simuloida. Tutkimuksessa keskityttiin ryhmäjohdotason vikojen simulointiin ja analysointiin, koska jännitetasojen ollessa samat ei tutkimuksessa nähty lisäarvoa suurempivirtaisten liitosten simuloinneille. Taulukossa 8 on esitetty tutkimuksissa käytetyt mittalaitteet.

Taulukko 8. Käytetyt mittalaitteet.

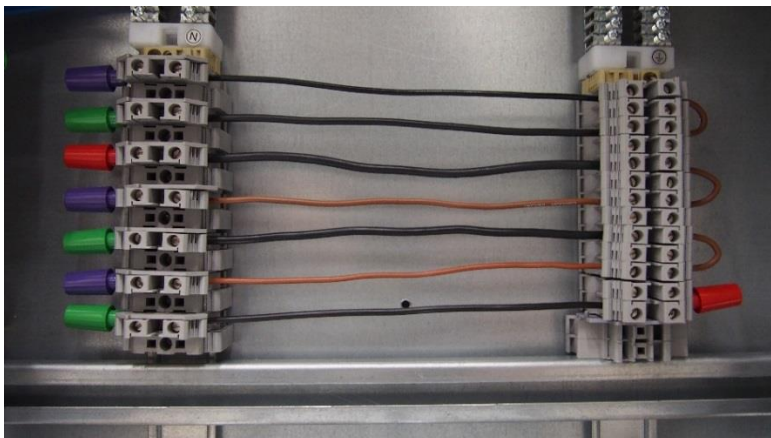
Mittalaite	Valmistaja	Malli	Tyyppi	Mittausalue	Tarkkuus	Erottelukyky	Näytteenottoaajuus
Virtapihti (tallentava)	Fluke Oy	CNX 3000	iFlex AC	0,5...2500 A (AC)	$\pm 3\%$ ± 5 numeroa	0,1 A	1 Hz
Lämpökamera	Fluke Oy	Ti100	Ti125	-20 ...+350 °C	$\pm 2\%$ °C tai $\pm 2\%$	160x120 pix	Jatkuva
Ultraääni-vastaanotin + peili	SDT	SDT	170 M	0...200 kHz	$\pm 0,5\text{dB}\mu\text{V}$	0,1dB μV	Jatkuva
		FU-PARA	25	-10dB μV ..120dB μV	$\pm 0,5\text{dB}\mu\text{V}$	0,1dB μV	Jatkuva
Sähkönlaadun analysaattori	Dranetz	Power-Xplorer	PX-5	1...600 V _{rms} , 0.1...50 A _{rms}	$\pm 0,1\%$ + mittapäiden tarkkuus	1 V 0,1 A	12,8 kHz
Oskilloskooppi	LeCroy	Wave-runner	LT264M	0...500 V _{pp} 0.1...30 A _{rms}	$\pm 2\%$ (mittapäät)	8 bit	1 GHz

Ensimmäisessä laboratorio-osuudessa tutkittiin johdintyyppin vaikutusta vikaantumiseen perinteisessä ruuvikiristeisessä riviliittimessä sekä havainnointiin liitoksen vikaantumisesta johtuvia ilmiöitä edellä kuvatuilla mittalaitteilla. Alkueletuksena altistamisen seurauksille ja siten tarkkailtaville suureille olivat:

- resistanssin/impedanssin kasvu ja lämpöhäviöiden lisääntyminen
- virran ja jännitteen hitaat ja nopeat (transientti) muutokset
- kipinäinnin ja transienttien aiheuttama värähtely ja äänet
- eristystilan huononeminen.

6.6.2 Löysän liitoksen mallintaminen

Löysää liitosta simuloitiin tutkimuksessa vikaannuttamalla (löystyttämällä) riviliitinliitoksia, joissa oli asennettuina kuvan 59 mukaisesti yksi-, moni- ja hienolankaisia johdintyyppejä. Piiriin kytkettiin resistiivinen vakiokuorma, joka otti kuormavirtaa 8,5 A ja kaikki johtimet kytkettiin sarjaan, jolloin jokaisen liitoksen läpi kulki yhtä suuri virta. Liitokset oli kiristetty yhtä kireälle ja niitä löystytettiin 45° kerrallaan. Kuvassa johtimista kolme ylintä ovat hienolankaisia (1,5, 2,5 ja 6 mm²). Kaksi seuraavaa ovat monilankaisia (2,5 ja 6 mm²) ja kaksi alinta johdinta ovat yksilankaisia (1,5 ja 2,5 mm²).



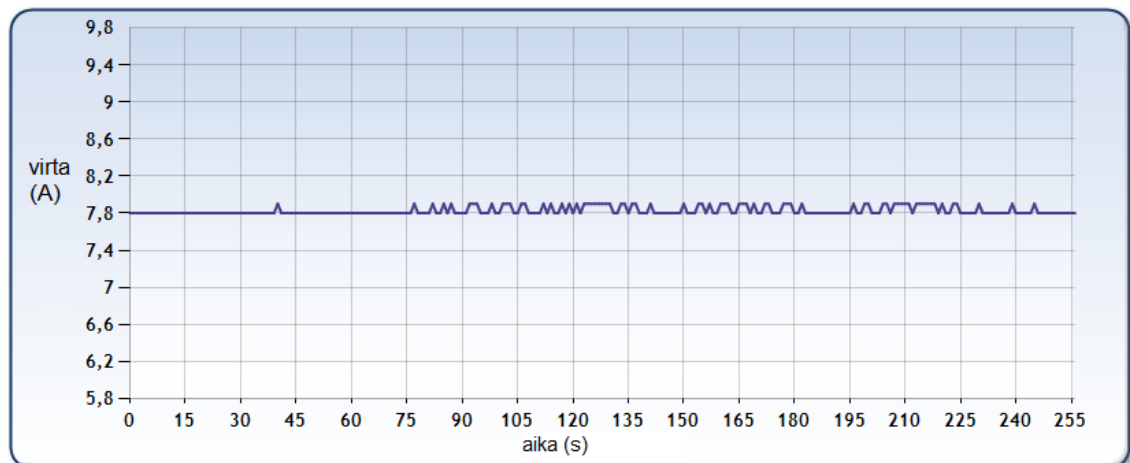
Kuva 59. Erilaisten johdintyyppien vaikutus liitoksen vikaantumiseen ruviliitoksen löystyessä.

Simuloinnissa tehtiin kolme toistokoetta ja jokaisella kerralla yksilankaisien johtimien liitokset lämpenivät ensimmäisenä ja $2,5 \text{ mm}^2$ yksilankaisen johtimen virtapiiri katkesi. Liitos lakkasi johtamasta kokonaan, kun $270 \dots 360^\circ$ ruuviliitoksesta oli avattuna. Testiä jatkettiin muiden liitosten osalta, jolloin liitokset lämpenivät, mutta virtapiirin toimintakyky säilyi moni- ja hienolankaisilla johtimilla, vaikka ruuviliitosta avattiin yli kolme kierrosta (1080°). Kolmea kierrosta suurempia arvoja ei tutkittu, koska liitoksen löystyessä mekaanisen tärinän ja ulkoisen voiman kohdistuminen johtimeen korostuu ja saattaa vääristää tarkemmin mitattavia tuloksia. Jokaisen löystyttämisen yhteydessä piirissä tapahtuneet muutokset havainnoitiin ja mitattiin edellisessä kappaleessa mainituilla mittalaitteilla. Mittauksista analysoitiin seuraavat suureet:

- virta
- lämpökuva
- ultraääninäyte
- sähkön laadun analyysi (aaltomuodot)
- AMR pohjainen sähkön laadun näyte
- oskilloskoopinäyte
- suojalaitteiden havahtuminen.

Virtamittaus

- Liitosten ollessa vain vähän löystyneitä ei perinteisessä virtamittauksessa voitu nähdä muutoksia piirissä kulkevassa virrassa. Kun liitos löystyttiin johtavuutensa ääriarjoille ja johdinta liikutettiin, aiheutti se mitattuun TrueRMS-virta-arvoon kuvan 60 mukaisia pieniä muutoksia virran tehollisarvossa.
- Kaikkien virran vaihteluiden ei kuitenkaan voida olettaa aiheutuneen kipinöinnin ja vikaantumisen vaikutuksesta, vaan myös mittalaitteen tarkkuus, erottelukyky, näytteenottotaajuus ja verkon jännitteen vaihtelut vaikuttavat mittaustuloksiin. Kuitenkin verrattuna normaalitilaan ilman vikaa virran vaihtelu lisääntyi selvästi.
- Virran vaihtelut saattoivat johtua myös myöhemmin esitetystä oskilloskoopilla havaitusta ilmiöstä, jossa osa jakson virrasta leikkautui pois.



Kuva 60. Sarjavalokaaren aiheuttamat muutokset TrueRMS-virtamittaukseen.

Lämpökuvaus

- Johtimista otettu lämpökuva antoi konkreettisen avun vikaantumisen tason määrittämiselle. Liitosten löystyttämisen välillä odotettiin aina 10 minuuttia, jotta uusi tilanne ehtisi stabiloitua ja muuttunut lämpötila vastaisi riittävän tarkasti uutta tilannetta.

- Lämpökuvauksessa havaittiin, että johtimen tyypistä huolimatta eniten lämpenivät poikkipinta-alaltaan pienempien johtimien liitokset.
- Mitä enemmän liitosta avattiin, sitä enemmän korostui johtimen tyyppin vaikutus. Yksilankaisien johtimien liitokset vikaantuivat ensimmäisenä, mutta eivät ehtineet lämmitä maksimissaan kuin 45°C:seen ennen kuin koko piiri lakkasi johtamasta.
- Jatkettaessa simulointia ilman yksilankaisia johtimia lämpenivät hienolankaiset johtimet hieman enemmän kuin monilankaiset johtimet, mutta molemmat johdintyyppit säilyttivät toimintakykynsä simuloinnin loppuun asti.
- Todennäköisesti hieno- ja monilankaiset johtimet mukautuvat löystyneeseen liitokseen ja muodostavat useita kosketuspintoja liitoksen sisällä, kun taas yksilankaisen johtimen löystyessä kosketuspinta muodostuu usein vain johtimen ylä- ja/tai alapuolelle, jolloin kosketuspinta-ala jää hyvin pieneksi ja pienikin mekaaninen liike saa aikaan liitoksen katkeamisen.

Ultraääninäyte

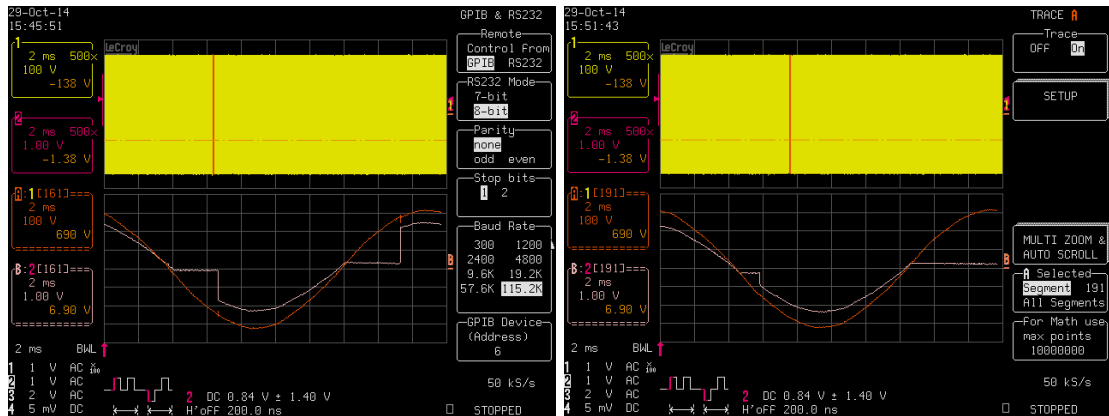
- Ääninäytteessä havaittiin poikkeamia vasta, kun liitos oli vikaantunut kipinöintitasolle, mikä aiheuttaa ultraääntä.

Sähkön laadun analyysi (aaltomuodot) sekä AMR-pohjainen sähkön laadun näyte

- Koska sekä perinteinen erillinen sähkön laadun analysaattori että AMR-pohjainen kiinteä sähkön laadun analysaattori mittasivat samoja ilmiöitä, käsitellään niiden havainnot samassa yhteydessä.
- Mittalaitteet eroavat toisistaan siten, että erillisellä Dranetzin sähkön laadun analysaattorilla saatiin huomattavasti tarkempia tuloksia sekä pystyttiin asettelemaan lukuisia erilaisia liipaisuarvoja, kun taas EDPQ AMR -laitteisto oli tarkoitettu sähkönlaadun standardin SFS-EN 50160 vaatimusten mukaisiin mittauksiin.
- Vikaantumisessa aiheutuvat ilmiöt osoittautuivat niin pieniksi varsinkin pienillä ryhmäjohtotason vioilla, että automaattisten liipaisukomentojen saaminen luotettaviksi osoittautui miltei mahdottomaksi tehtäväksi. Tämän vuoksi tutkimuksessa keskityttiin analysoimaan oskilloskoopilla saatavia tuloksia.

Oskilloskoopinäyte

- Tutkimuksessa havaittiin, että vikaantuneen liitoksen sähkönjohtavuudessa on suuriakin eroja peräkkäisten jaksojen välillä, jolloin vertaamalla peräkkäisten jaksojen eroja ja lähellä jännitteen nollakohtaa tapahtuvia epäjatkuvuuskohtia voitaisiin kehittää myös sähköpaloja ennakoivia mittaussuunnitelmia.
- Erityisesti tällaiselle luotettavasti tapahtuvalle mittaussuunnitelmälle olisi tarvetta jakokeskustason ennakoivaa huoltoa tehtäessä, jolloin voitaisiin helposti ja nopeasti arvioida kyseisen jakokeskusalueen liitosten turvallisuutta sähköpaloriskien kannalta.
- Kuvassa 61 on esitetty kaksi liitoksen vikaantumisesta aiheutunutta muutosta virran ja jännitteen aaltomuodoissa. Ensimmäisessä kuvassa piirin virta katkeaa lähellä jännitteen nollakohtaa symmetrisesti ja aiheuttaa jännitteen noustessa ja piirin kytkeytyessä uudelleen jännitteessä lyhyen transientin.
- Toisessa kuvassa katkos on lyhempi ja piiri kytkeytyy ensin pois ja nopeasti takaisin pienemmällä kynnysjännitteellä aiheuttaen näin ollen myös pienemmän transientin jännitteeseen. Jakson lopussa liitos kuitenkin vikaantuu kokonaan ja piirin virta lakkaa hetkellisesti kokonaan.



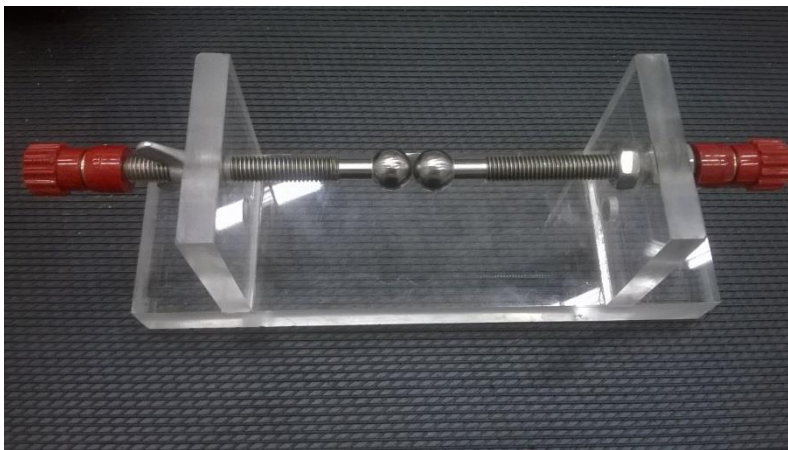
Kuva 61. Vikaantuneen ruuviliitoksen oskilloskooppinäytteet.

Suojalaitteiden havahtuminen

- Simuloitaessa riviliittimen löystymisestä aiheutuvaa vikaa perinteinen sulake, johdonsuoja-automaatti ja vikavirtasuojaus eivät reagoineet mitenkään sarjamuotoisena tapahtuvaan vikaantumiseen. Sen sijaan uusi AFDD-tekniikkaan perustuva Siemensin palosuojakatkaisija tunnisti tilanteen liitoksen vikaantuessa osittain johtavaksi ja avasi piirin suojalaitteen.

6.6.3 Kipinävälillä simuloitu vikaantuminen

Vikaantumista mallinnettiin myös kuorman kanssa sarjaan ja rinnan sekä maapotentialia vastaan kytketyllä kipinävälillä, jota voitiin säätää ja siten muuttaa syntyvän häiriön ja kipinöinnin määrää. Kuvassa 62 on esitetty tutkimuksessa käytetty säädettävä kipinäväli.



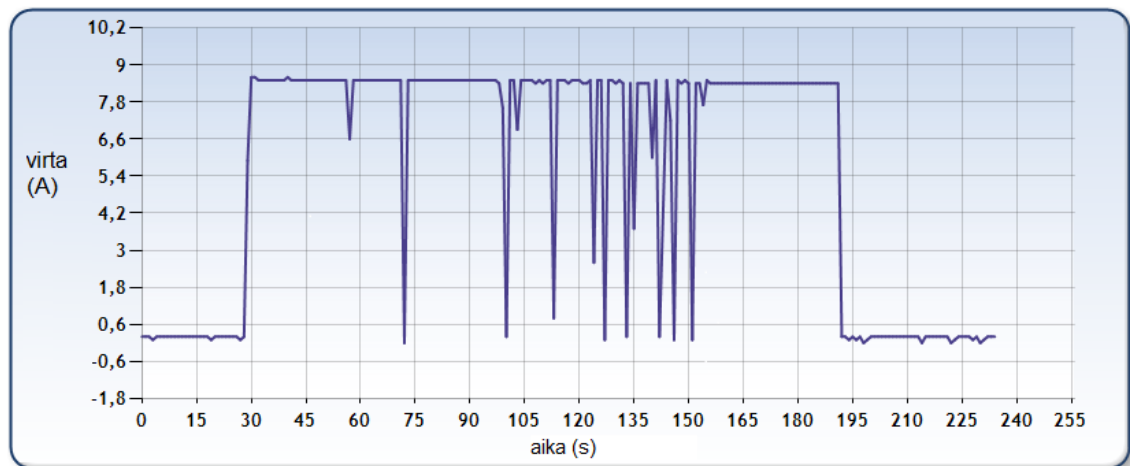
Kuva 62. Säädettävä kipinäväli vikatilanteiden simulointiin.

Liitteessä 4 on esitetty simuloinneissa käytetyt sarja-, rinnan- ja maasulkuvikaa simuloivat testipiirikytkennät. Jokaisesta simulaatiosta mitattiin samat mittaukset kuin edellisessä alaluvussa käsitellystä riviliitoksen vikaantumisesta. Seuraavissa kohdissa on käsitelty havainnot erikseen jokaisesta eri analyysistä ja eritelty huomiot sarja-, rinnan- ja maasulkuvian tapauksissa, jos eroavaisuuksia on ilmennyt. Sarjavikatilanteessa liitoksessa tapahtuvaa vikaantumista simuloitiin ilman lisäimpedansseja. Rinnan- ja maasulkuna tapahtuvan vian yhteydessä määritettiin kytkentään noin 550Ω lisävastus, jotta piirin suojalaitteet eivät laukeaisi välittömästi kytkennästä. Näin vikapiirin virta saatiin rajoitettua noin 0,5...0,6 A:iin, joka on silti palovaarallinen vuotovirta. Lisätty vastus simuloi vikaantumisen yhteydessä ilmenevää vikaimpedanssia ja toisaalta rajoitti virran niin,

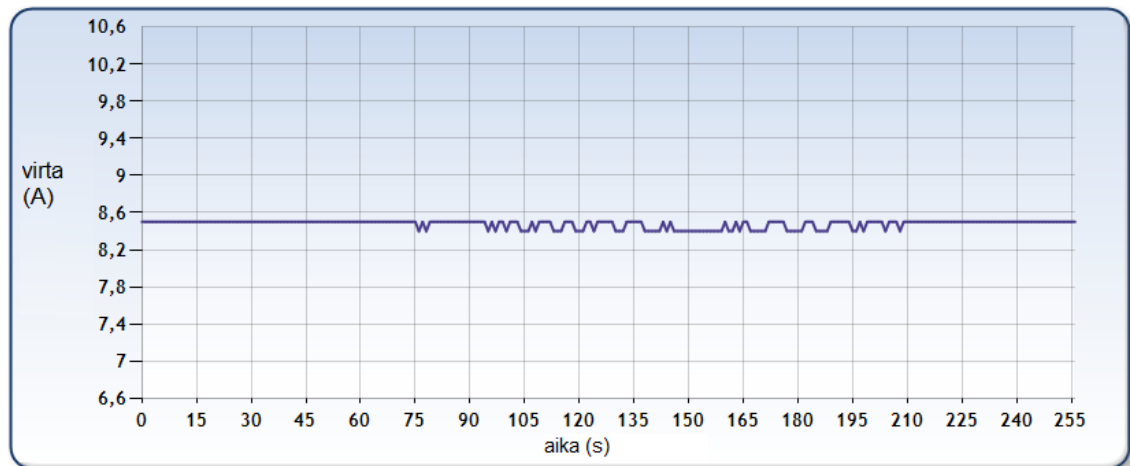
etteivät ylivirtasuojalaitteet reagoisi kokonaisvirran vaikutuksesta, koska monessa todellisessa sähköpalotilanteessakaan ylivirtasuojat eivät ole reagoineet.

Virtamittaus

- Vikaantumiskohta (sarja-, rinnan- tai maasulkuvika) vaikutti luonnollisesti piirissä esiintyvään kokonaisvirtaan. Kipinäväliä käytettäessä saatiin tallennettavassa virtamittauksessa näkyviin samankaltaisia tuloksia ja muutoksia kuin riviliittimen vikaa simuloitaessa. Kuvissa 63 ja 64 on esitetty simuloinnissa tyypillisen vikaantumisen tuloksia sarja-, rinnan- ja maasulkuvian yhteydessä
- Mittalaitteen tarkkuuden ja näytteenottovälin vaikutus tulee myös huomioida arvioitaessa mittauksen luotettavuutta.



Kuva 63. Sarjavian ilmeneminen liitoksen johtavuuden katkeillessa.



Kuva 64. Sarjavian ilmeneminen liitoksen pysyessä pääosin johtavana.

Sarjassa tapahtuvan vikaantumisen yhteydessä voi esiintyä siis kaksi toisistaan poikkeavaa ilmiötä. Ylemmässä kuvassa sarjavian seurauksena piirin virta katkeaa välillä kokonaan vikaantumisen johdosta. Tämän kaltainen vikaantuminen vaatii usein kuitenkin liitoksen osat hetkellisesti toisistaan erottavan ulkoisen voiman tai tärinän esiintymistä. Toinen tyypillinen vikaantumistapa oli käytännössä identtinen riviliittimen vian simuloinnin kanssa. Tässä tapauksessa piirin virran tehollisarvo vaihteli vain hieman kipinäin esiintyessä.

Rinnan tapahtuvan vian ja maasulun tapauksissa viat näkyivät koko piirin virtamittauksen näkökulmasta samanlaisina. Erona vioille oli vikavirran kulkureitti, joka kulki

rinnakkaisvian tapauksessa kuorman ohi impedanssin kautta kuorman tähtipisteeseen ja maasulkuvian tapauksessa piirin kuorman ohi maapotentiaaliin. Molemmissa tapauksissa piirissä tapahtuva vikaantuminen näkyi virran hetkellisenä nousuna piirin normaaliin kuormitusvirtaan nähden. Vikaantuminen näkyi ensin melko pieninä vaihteluina vikaantumisen alkaessa, ja vian jäätyä pysyväksi myös piirin kokonaiskuormitusvirta tasoittui uuteen arvoonsa kuvan 65 mukaisesti.



Kuva 65. Rinnakkaisvian ja maaoskosalun ilmenemismuoto virtamittauksessa..

Lämpökuvaus

- Kipinävälistä otettu lämpökuva antoi konkreettisen avun vikaantumisen tason määrittämiselle erityisesti sarjavian tapauksessa, jossa lämpötilan nousu oli todella suuri. Rinnan- ja maasulkuvian tapauksessa vikavirrat olivat niin pieniä, että kipinävälin lämpötila pysähtyi alle 100 °C. Sarjavian tapauksessa piirin annettiin vikaantua kolme tuntia ja piiri lämpökuvattiin aina 10 minuutin välein, jolloin lopullinen lämpenemä piirissä oli yli 270 °C kuormitusvirran ollessa vain 8,5 A.
- Lämpökuvauksen perusteella kipinäväli vastasi hyvin pistemäistä vikaantumislähdettä, mutta ei johtanut lämpöään vikaantumispisteestä piirin rakenteita pitkin pois päin niin kuin todellisessa tilanteessa. Syyinä lienee se, että kipinävälilaitteen rakenne itsessään sisälsi runsaasti hyvin lämpöä johtavaa terästä, joka johti lämmön ympäröivään ilmaan. Laitteessa ei myöskään ollut normaaleihin johtimiin verrattavaa eristettä, joka eristäisi lämmön sisäänsä.

Ultraääninäyte

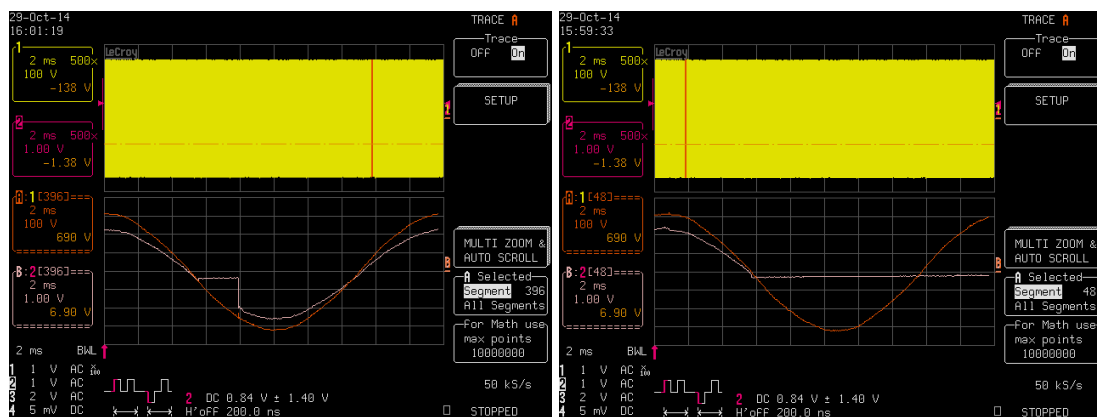
- Käytössä olleella ultraäänimittarilla havaittiin poikkeamaa ääninäytteessä vasta, kun liitos oli vikaantunut kipinäntitasolle.
- Tulokset olivat samankaltaisia riviliittimen vikaantumisen simuloinnin kanssa. Näin ollen ultraäänimittaus tuntuu sopivan paremmin kohteisiin, joissa mahdolliseen vikalähteeseen ei ole suoraa näkö- tai havainnointiyhteyttä ja mahdollisen kipinöinnin voidaan olettaa johtuvan vikalähteestä kyseisen laitteen runkoon aiheuttaen näin ultraäänipeilillä havaittavan ääni-ilmiön. Ultraäänellä on mahdollista silti havaita myös hyvin pientä kipinäntä.

Sähkön laadun analyysi (aaltomuodot) sekä AMR-pohjainen sähkön laadun näyte

- Simulointiympäristössä mallinnettujen vikojen ilmiöt osoittautuivat niin pieniksi, että automaattisten liipaisukomentojen saaminen luotettaviksi osoittautui miltei mahdottomaksi tehtäväksi. Tämän vuoksi tutkimuksessa keskityttiin analysoimaan oskilloskoopilla saatavia tuloksia.

Oskilloskooppinäyte

- Kuvassa 66 on esitetty kaksi liitoksen vikaantumisesta aiheutunutta muutosta virran ja jännitteen aaltomuodoissa. Ensimmäisessä kuvassa piirin virta katkeaa lähellä jännitteen nollakohtaa epäsymmetrisesti ja aiheuttaa jännitteen nousussa ja piirin kytkeytyessä uudelleen lyhyen transienttikuopan jännitteessä.
- Toisessa kuvassa jakson alussa liitos vikaantuu kokonaan ja piirin virta lakkaa kokonaan hetkellisesti.
- Kaiken kaikkiaan kipinävälillä simuloitaessa saatiin alla kuvattu puolijohtava tila vikaantuneessa liitoksessa simuloitua, mutta puolijohtava tila esiintyi huomattavasti harvemmin kuin riviliittimessä tapahtuvaa vikaantumista simuloitaessa.



Kuva 66. Kipinävälisimuloinnin oskilloskooppinäytteet.

Edellä esitetyn ilmiön pohjalta voidaan olettaa todellisen liitoksen vikaantumisen riviliittimellä tai muussa liitoksessa olevan huomattavasti moninaisempi ilmiö kuin kipinävälillä simuloitaessa. Kipinävälissä vikaa simuloidaan pallojen välissä yhdessä pienessä pisteessä, kun taas oikeassa liitoksessa kosketuspintoja ja näin ollen vikaantumisen lähteitä voi olla useita. Lisäksi materiaali saattaa vaikuttaa todelliseen tilanteeseen ja siihen, kuinka liitospintojen väliin muodostuu vikaantumisen seurauksen epäpuhtauksia ja muutoksia metallien kemiallisessa koostumuksessa. Simulointijaksot olivat myös melko lyhyitä ja todellisuudessa vika kehittyy ja puolijohtavuus liitoksessa syntyy vasta pitämällä aikavälillä.

Suojalaitteiden havahtuminen

- Simuloitaessa kipinävälillä aiheutettuja sarja-, rinnan- ja maasulkuvikoja perinteinen sulake, johdonsuoja-automaatti, vikavirtasuojaus eikä myöskään AFDD-laite reagoineet mitenkään sarjamuotoisena tai rinnan piirin kuorman kanssa tapahtuvaan vikaantumiseen.
- Maasulkutapauksessa vikaantumiseen havahtui ainoastaan vikavirtasuoja, jonka kuuluukin toimia maasulkutapauksissa.

- AFDD-tekniikkaan perustuva Siemensin palosuojakatkaisija ei ilmeisesti tunnistanut tarpeeksi useasti, että simuloitu vika olisi aiheuttanut riittävästi verkkojaksojen välillä liitoksessa aikaisemmin mainittuja puolijohtavia vikaantumisolmi-öitä, eikä näin ollen laukaissut piiriä.
- Kipinäväli osoittautui helposti säädettäväksi ja vikatilanteiden simulointia helpottavaksi apuvälineeksi, mutta se ei selvästi käyttäydy täysin normaalin liitoksen tavoin vikaantuessaan eikä näin ollen sovellu tarkempien johtopäätösten tekemiseen eikä simuloinnin ja oikeassa liitoksessa tapahtuvan vian vertailuun ainakaan kipinävälissä käytetyllä teräsmateriaalilla.
- Jos kipinävälissä käytettäisiin jotain puolijohtavaa ja siten paremmin vikaantumista tarkemmin simuloivaa materiaalia, voisi kipinäväli soveltua myös tarkempien analyysien avuksi.
- Taulukossa 9 on esitetty eri suojalaitteiden toiminta tyypillisimpien liitosten vikaantumisten yhteydessä.

Taulukko 9. Suojalaitteen toimintaedellytykset eri vikatilanteissa.

Vikaantumisen muoto	Suojalaite				
	Sulake	Johdon-suojaja-automatti	Vikavirta-suojaja	Palosuojakatkaisija	Valokaari-suojaja
Sarjavika ($I_f < I_n$ suojaja)	-	-	-	x	x *)
Rinnanvika ($I_f + I_n < I_n$ suojaja)	-	-	-	x	x *)
Maasulku ($I_f + I_n < I_n$ suojaja)	-	-	x	x	x *)

*) Toimii vain, jos sekä suojalaitteelle asetettu virta-arvo että viasta seuraava valon voimakkuus ylittyvät.

6.7 Vikaantuneiden komponenttien tutkimukset

Tutkimusta varten saatiin myös kymmenen vikaantunutta komponenttia. Kaikissa komponenteissa vikaantuminen oli ilmennyt liitoksessa, ja ne oli jouduttu vaihtamaan joko liiallisen lämpenemisen tai virhetoimintojen vuoksi. Osa liittimistä oli syttynyt jopa kokonaan tai osittain palamaan. Liitteessä 5 on kuvattu tarkemmin tutkitut komponentit ja saadut mittaustulokset.

6.7.1 Käytetyt mittalaitteet ja mittausmenetelmät

Liitoksissa ilmenneitä vikoja analysoitiin yleisesti sähköalalla käytössä olevin mittausmenetelmin. Mittauksiin käytettiin taulukossa 10 esitettyä Fluke 1653B -käyttöönottomittalaitetta. Komponenteille suoritettiin eristystila- ja jatkuvuusmittaukset. Erityisesti eristystilamittausta käytetään usein määrittäessä asennusten eristysten kuntoa. Jatkuvuusmittausta käytetään myös paljon mitattaessa erityisesti suojamaadoituksen jatkuvuutta, mutta ei juurikaan vikaantuneiden liitosten kunnan määrittämisessä.

Taulukko 10. Fluke 1653B -mittalaitteen eristystila- ja jatkuvuusmittausten ominaisuudet.

Mittalaite	Mitattava suure	Mittausjännite	Mittausvirta	Mittausalue	Tarkkuus	Erottelukyky
Fluke 1653B	Eristysresistanssi	500 VDC	1 mA @ 500 kΩ	10 kΩ...20 MΩ 20...200 MΩ 200...500 MΩ	±1,5 % ± 3nro ±1,5 % ± 3nro ±10 %	0,01 MΩ 0,1 MΩ 1 MΩ
	Jatkuvuus	4...24 VDC	2...210 mA	0...20 Ω 20...200 Ω 200...2000 Ω	±1,5 % ± 3nro	0,01 Ω 0,1 Ω 1 Ω

Eristystila- ja jatkuvuusmittausten lisäksi tutkimukseen toimitetuista vikaantuneista komponenteista valittiin neljä komponenttia, joissa tapahtuneita kemiallisia muutoksia päätettiin tutkia tarkemmin pyyhkäisyelektronimikroskoopi- (SEM) ja alkuaineanalyysimenetelmin (EDS). Näissä komponenteissa liitospintoihin oli muodostunut silmällä erotettavia rajapintoja, jotka olivat joko aiheuttaneet vikaantumisen tai olivat vikaantumisen seurauksia. Mittauksiin käytettiin taulukossa 11 esitettyjä mittalaitteita ja mittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston materiaalitekniikan laitoksella tekniikan tohtori Antti Hynnän valvonnassa.

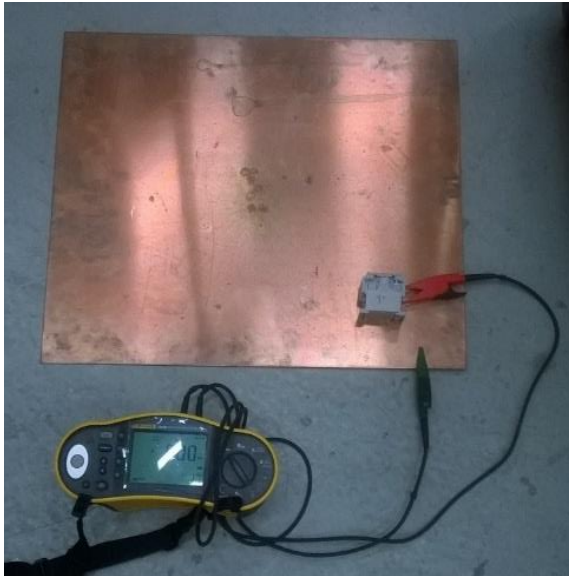
Taulukko 11. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin (SEM) ja alkuaineanalyysattorin (EDS) tekniset tiedot.

Mittalaite	Valmistaja	Malli	Saatavat mittaustulokset
Pyyhkäisyelektronimikroskoopi	Philips	XL-30	<ul style="list-style-type: none"> Tarkkuus 3.5 nm @ 30 kV
Energiadispersiivinen alkuaineanalyysattori	EDAX	DX 4	<ul style="list-style-type: none"> Tuloksena alkuainekartta Alkuaineanalyysit Z>5 ja pitoisuus suurempi kuin 0,1 a%

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin mittauseriaate perustuu elektronisuihkuun, joka herättää näytteen pinnan tai välittömästi pinnan läheisyydessä olevan materiaalin atomien elektroneihin viritystiloja. Tilojen palautuessa syntyy sekundaari- (SE) ja takaisinheijastuselektroneja (BSE) sekä röntgensäteilyä. Röntgensäteilyn spektriä analysoimalla saadaan tietoa tutkittavan materiaalin kemiallisesta koostumuksesta. Energiadispersiivisellä spektrianalyysattorilla (EDS) mitataan saatu röntgensäteily ja EDS erottelee eri alkuaineiden ja niiden välisten viritystilaenergioiden lähettämät röntgensäteilyenergiat toisistaan. Spektrikuvaajissa olevat energiat esiintyvät vaakaa-akselilla kiloelektronivoltteina (keV) ja pystyakselina on säteilyn määrä kullakin säteilyenergia-arvolla. Toisin sanoen, mitä enemmän kyseistä alkuainetta näytteessä esiintyy, sitä korkeammaksi nousevat kyseisen alkuaineen piikit (tyypillisesti alkuaineesta säteilee K kuorelta kaksi EDS-analyysipiikkiä ja L tai M kuorelta useampia). Tätä alkuainepitoisuuskuvaajaa nimitetään EDS-spektriiksi. (Laakso 2014)

6.7.2 Eristystila- ja jatkuvuusmittaukset

Kaikki vikaantuneet komponentit mitattiin ensin kuvan 67 mukaisella eristystilamittauksella, jossa komponenttia käännettiin sen kaikille sivuille ja eristystila mitattiin aina komponentin johtavien metalliosien ja komponentin sivua vasten olevan kuparilevyn väliltä.



Kuva 67. Eristysresistanssin mittaus vikaantuneen kontaktorin vaiheen ja sen kuoren välillä.

Liitteessä 5 on esitetty tarkemmat mittaustulokset vikaantuneiden komponenttien ja liitosten eristystason ja ylimenoimpedanssien mittauksesta. Huomionarvoista kuitenkin oli, että vain yhdessä, silminnähten palaneessa komponentissa todettiin eristystilamittauksen avulla olevan vikaa komponentin eristystasossa. Näin ollen voidaan todeta, että eristysresistanssimittaus ei ole luotettava tapa todentaa vikaantunutta liitosta kuin hyvin selvissä tapauksissa. Mittauksella voidaan havaita selvät muutokset eristystasossa, mutta se ei paljasta aina edes pahoin hiiltyneen eristerakenteen sähköpalariskiä.

Sen sijaan mitattaessa vikaantuneiden liitosten ylimenoimpedanssia havaittiin, että erityisesti kontakteilla vikaantunut liitos voi aiheuttaa suhteessa suuremman ylimenovastuksen nousun verrattuna ehjien liitosten vastaavaan arvoon. Ennaltaehkäisevänä mittausmenetelmänä ylimenoimpedanssin mittaus ei kuitenkaan ole kovin käytännöllinen, vaan mittaukset olisi parasta suorittaa online-mittauksena. Tällöin kyseeseen tulevat lähinnä testilaitteiston yhteydessä käytetyt mittausmenetelmät.

6.7.3 Pyyhkäisyelektronimikroskooppi- ja alkuaineanalyysi

Pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysissä tutkittiin neljä komponenttia. Jokaiselle näytteelle laadittiin kaksi peruskysymystä, joihin analyysin avulla toivottiin saatavan lisätietoa:

Näyte A:

- Mistä johtuvat sulakkeiden L1 ja L2 liitospintojen värierot?
- Mitä kemiallisia muutoksia ja/tai hiukkasia L1:n liitospintaan on muodostunut?

Näyte B:

- Mistä kuparijohdon värinmuutokset johtuvat, ja mitä kemiallisia yhdisteitä kuparijohdon pintaan on muodostunut?

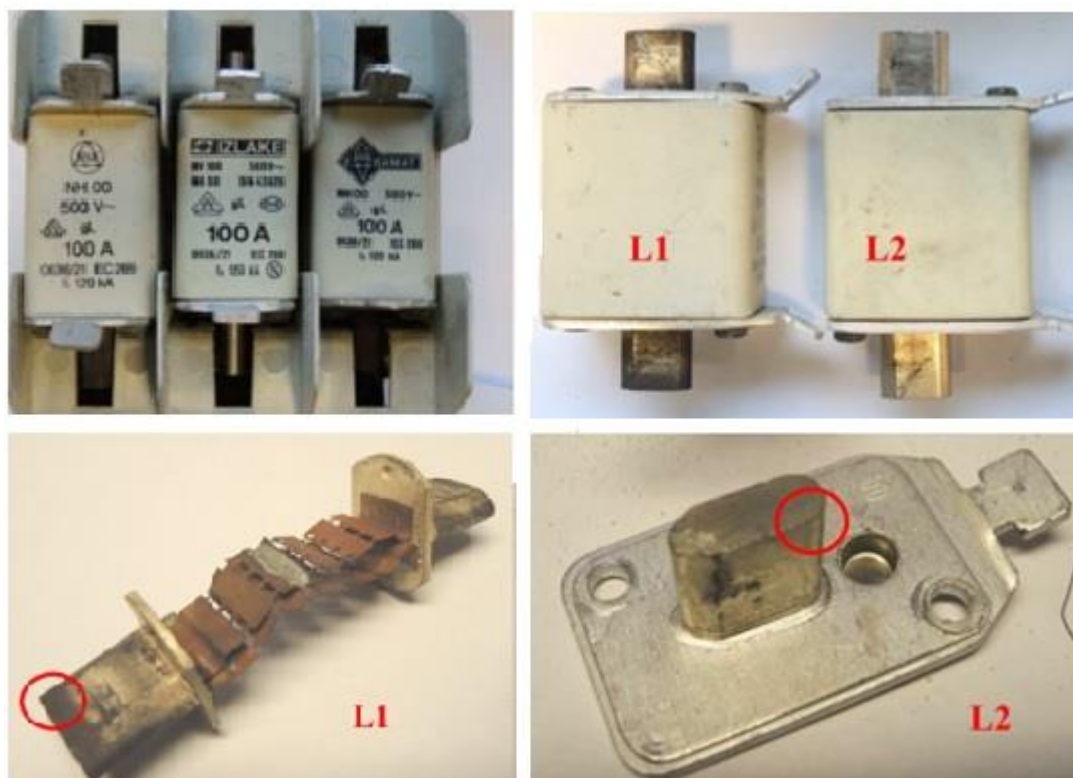
Näyte C:

- Mistä liitosten 2T1 ja 4T2 värinmuutos johtuu?
- Millaisia kemiallisia muutoksia liitospintojen välillä on havaittavissa?

Näyte D:

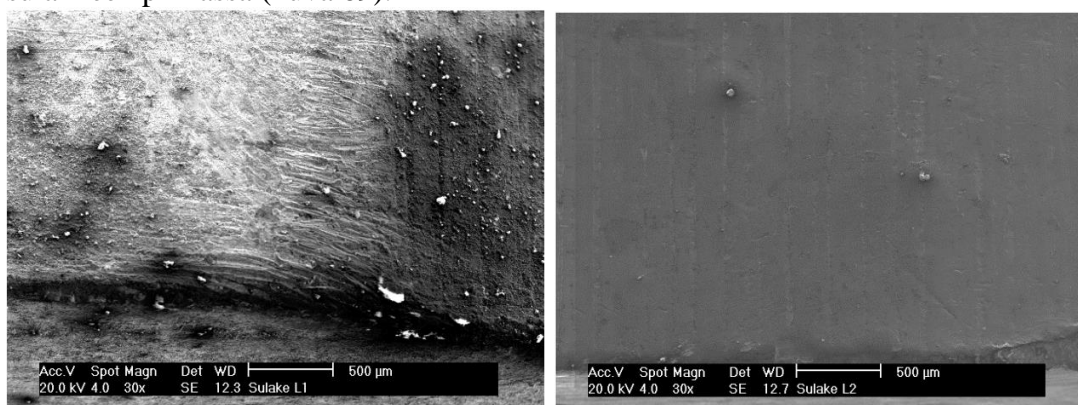
- Onko liitoksessa havaittavissa vikaantumisen syitä pitkittäissuuntaisessa halkileikkauksessa?
- Millaisia kemiallisia muutoksia on liitoksen rajapinnoissa?

Näytteen A (kuva 68) sulakkeet L1 ja L2 olivat eri materiaalia. L1 on messinkipohjainen seos ja L2 nikkelipohjainen seos. Näin ollen liittimien L1 ja L2 suora vertaaminen toisiinsa ei ollut mahdollista. Liittimen L1 pinta on mahdollisesti hopeoitu tai sitten pintaan on muodostunut hopeakloridia, jolloin hopea voi olla höyrystynyt jostakin läheisestä juotoksesta. L1:n pinnalla havaittiin epäpuhtautena hiiltä, happea, alumiinia, piitä, rikkiä ja kalsiumia. Osa näistä voi olla höyrystynyt myös jostakin kaukaisemmasta komponentista. Sulakkeiden L1 ja L2 varokealustan vastakappaleiden pinnat olivat molemmat hopeoituja kupariseoksia. Epäpuhtauksina L1:n vastinpinnalta löydettiin hiiltä, happea, rikkiä ja klooria. L2:sta edellisten lisäksi löytyi magnesiumia, alumiinia sekä piitä. Tarkastellut alueet on merkitty kuviin punaisilla ympyröillä.



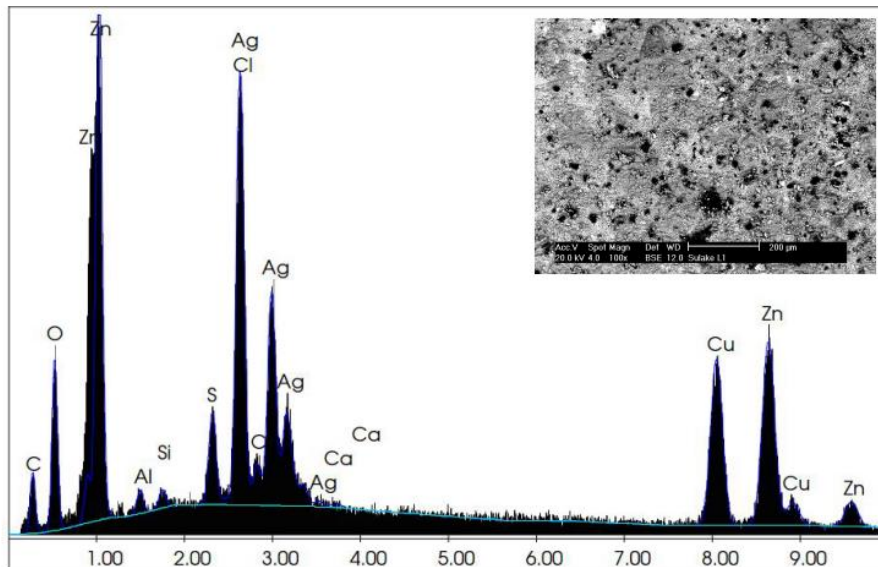
Kuva 68. Näyte A. Kytkinvaroke ja sulakkeiden L1 ja L2 liittospinnat.

Sulakealustan liittospintojen välillä ei ollut keskenään juurikaan eroa. Sen sijaan analysoitavien sulakkeiden liitoskohdan kosketuspintojen SEM-analyysissä L1-sulakkeen liittospinnassa esiintyi huomattavasti enemmän epäpuhtauksia ja epätasaisuutta kuin L2-sulakkeen pinnassa (kuva 69).

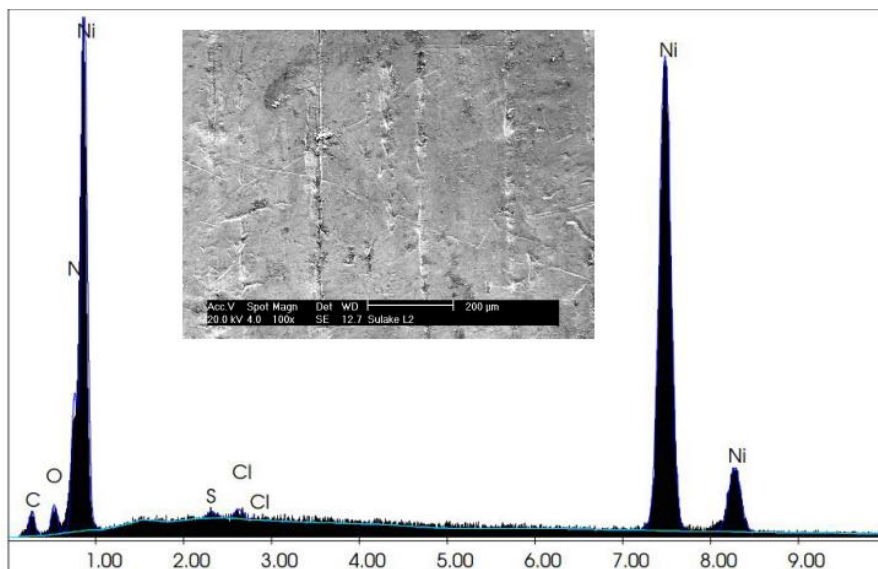


Kuva 69. SEM-suurennot sulakkeiden L1 (vasen) ja L2 (oikea) kontaktipinnoista.

Sulakkeiden SEM-analyysissä esiintyvät epäpuhtaudet näkyivät EDS-analyysissä L1- ja L2-sulakkeiden kuvien 70 ja 71 mukaisesti. Kysymyksiä herättää erityisesti se, että vain toisessa sulakkeessa esiintyy merkittävästi epäpuhtauksia, vaikka sulakkeet ovat olleet käytössä yhtä aikaa ja sijainneet samassa ympäristössä vierekkäin.

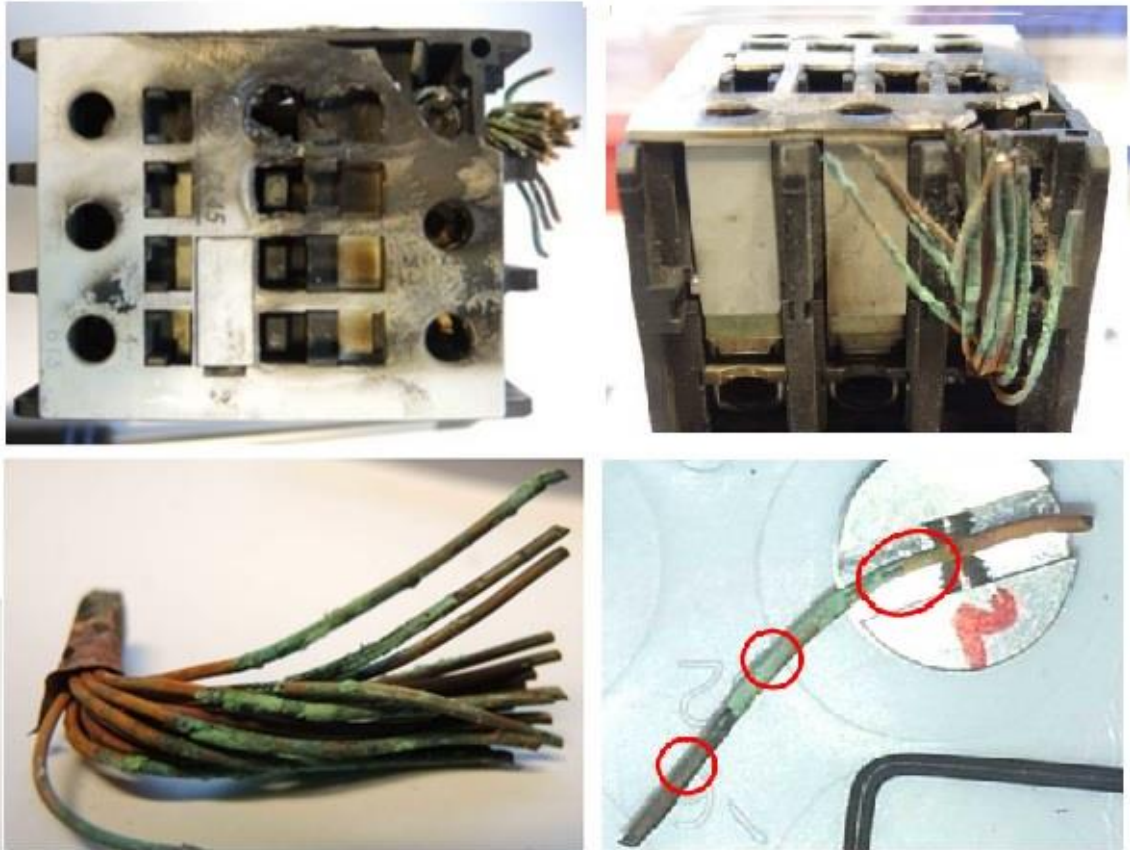


Kuva 70. EDS-yleisanalyysi sulakkeen L1 kontaktipinnasta.



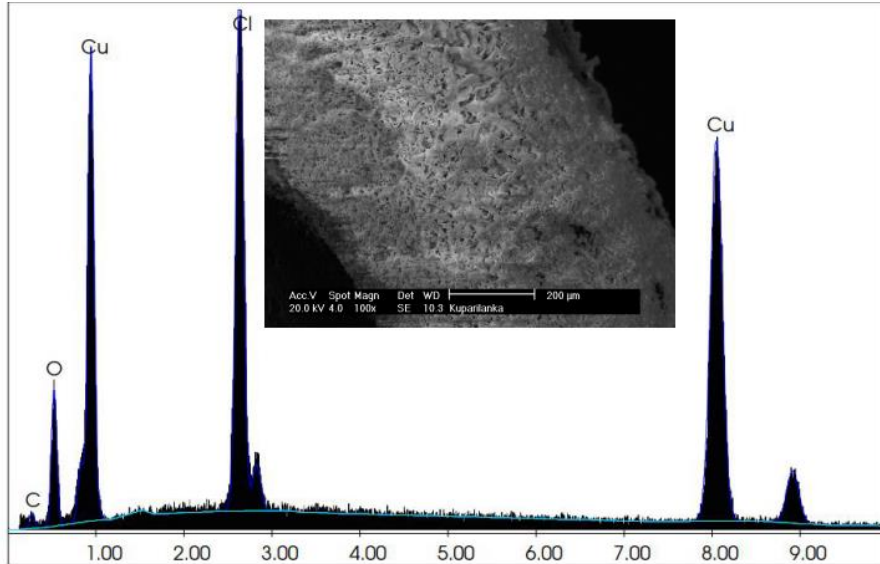
Kuva 71. EDS-yleisanalyysi sulakkeen L2 kontaktipinnasta.

Näytteessä B (kuva 72) kiinni olleen kuparijohtimen vihreässä kerroksessa havaittiin kuparia, klooria ja happea. Kyseessä on todennäköisesti kidevedellinen kuparikloridiyhdiste eli kuparikloridin dihydraatti tai kuparikarbonaatti. Muodostuakseen yhdisteet tarvitsevat reaktiolle otolliset olosuhteet, joissa kloori yhdistyy sopivassa kuumuudessa veden ja reagoi kuparin kanssa. On kuitenkin huomattava, että SEM- ja EDS-analyyysien avulla ei voida suoraan selvittää, onko kemiallinen reaktio syy vikaantumiseen vai onko reaktio tapahtunut vikaantumisen seurauksena.

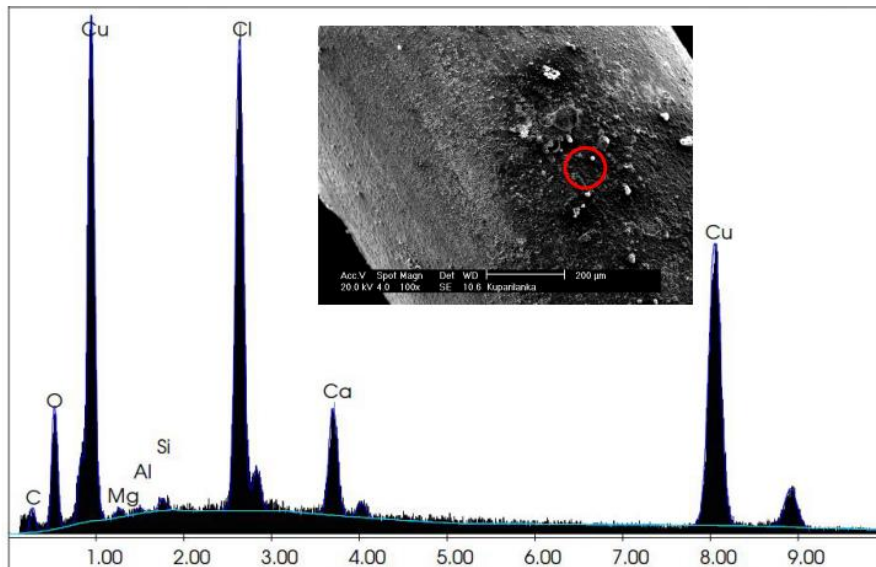


Kuva 72. Näyte B. Kontaktori ja kiinnihitsautunut kuparijohdin.

Kuparijohtimen SEM-analyysissä esiintyvät epäpuhtaudet näkyivät EDS-analyysissä johtimen eri pintakerrosten välillä kuvien 73 ja 74 mukaisesti. Sekä vihertävässä että mustassa pinnassa esiintyi hyvin runsaasti klooria (Cl), jonkin verran happea (O), joka oli todennäköisesti oksidimuodossa, ja hieman hiiltä. Mustassa alueessa esiintyi lisäksi jonkin verran kalsiumia (Ca).

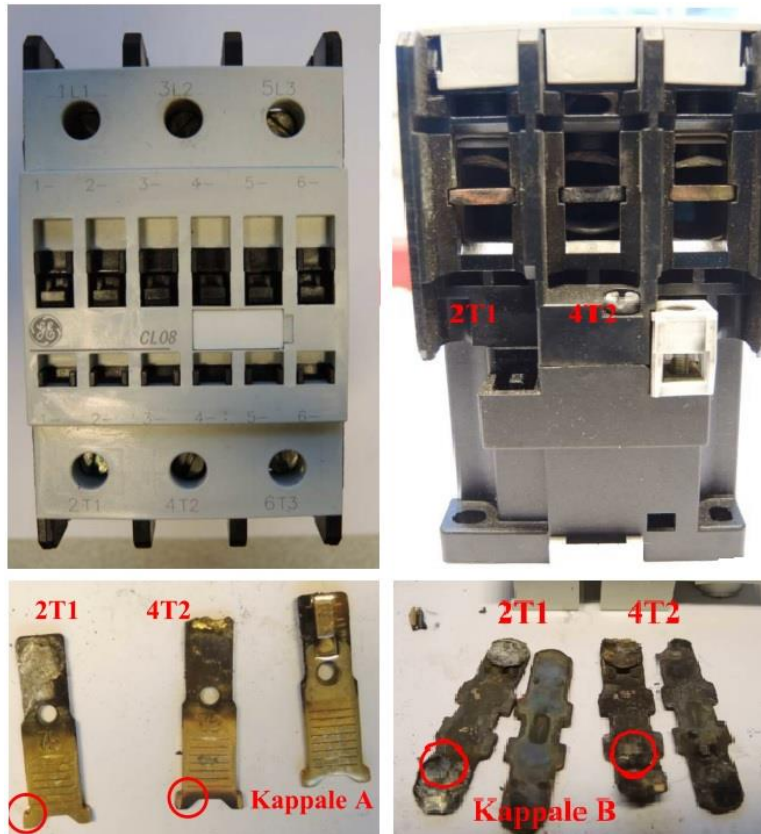


Kuva 73. EDS-analyysi kuparijohtimen vihertävästä kerroksesta.



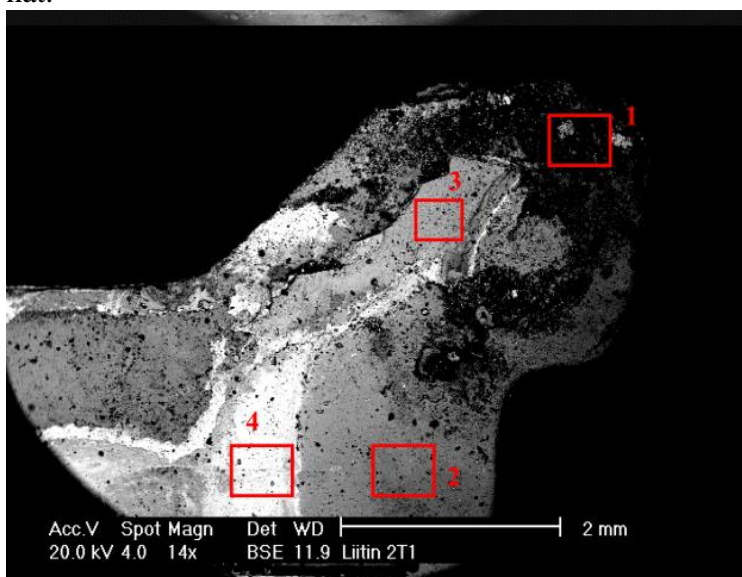
Kuva 74. EDS-analyysi kuparijohtimen mustasta pintakerroksesta.

Näytteessä C (kuva 75) liittimen 2T1 perusmateriaalina oli messinki. Pinnan epäpuh-
tauskerros sisälsi hiiltä, happea, alumiinia, piitä, klooria, hopeaa, tinaa ja kalsiumia. Ky-
seiset alkuaineet olivat mitä suurimmalla todennäköisyydellä kulkeutuneet liittimen pin-
nalle muualta. Liittimen sisäosan komponentit olivat myös osittain sulaneet, mikä voi se-
littää osaltaan ainakin kloorin muodostumisen liittimien pintaan.



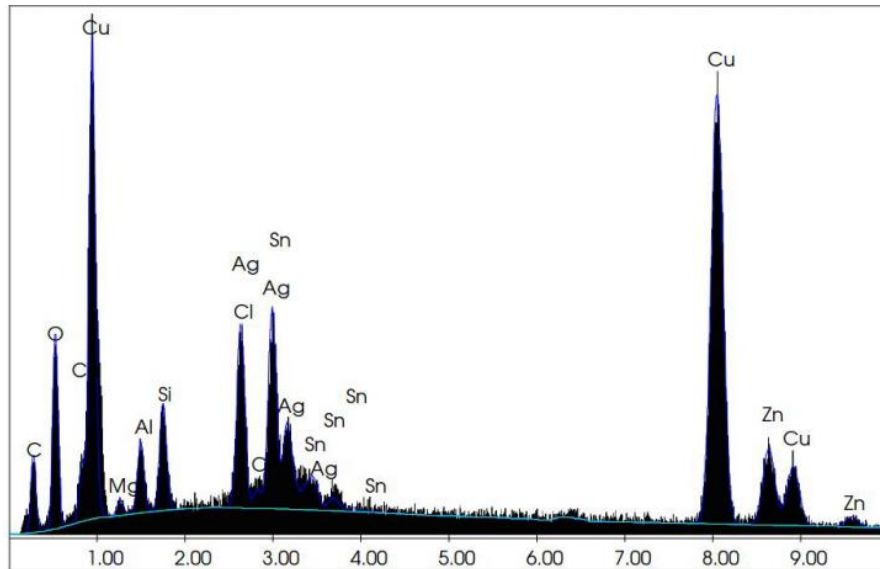
Kuva 75. Näyte C. Tarkennetut valokuvat tarkastelukohdista 2T1 ja 4T2 liittinpinnoista (A) sekä kärjistä (B).

Liitinpintojen SEM-analyysissä vertailunäytteet otettiin neljästä kohtaa kuvan 76 mu-
kaisesti. EDS-analyysiin alueiksi valittiin selvästi toisistaan SEM-näytteessä eroavat pin-
nat.

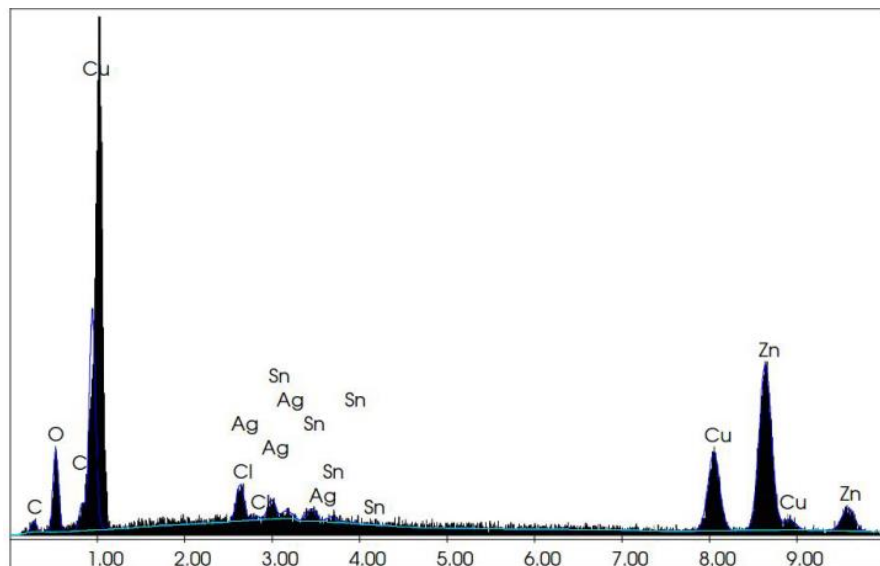


Kuva 76. SEM-kuva liittimen 4T2 pinnasta. EDS-tarkastelualueet on merkitty punaisella.

EDS-analyysissä alueen 1 pintakerroksessa (kuva 77) esiintyi selvästi enemmän epäpuhtauksia kuin kohdissa 2,3 ja 4, joiden kuvaajat olivat lähes yhtenevät, ja sen vuoksi tutkimuksessa on esitetty vain alueen 2 näyte (kuva 78). Molemmissa tapauksissa esiintyi kuitenkin epäpuhtauksina jonkin verran hiiltä, happea, alumiinia ja klooria. Sen lisäksi alueella 1 esiintyi hieman magnesiumia, alumiinia ja piitä sekä runsaasti klooria, tinaa ja sinkkiä. Alueella 2–4 esiintyi sen sijaan vain hieman klooria, tinaa ja sinkkiä.



Kuva 77. EDS-analyysi liittimen 4T2 tarkastelukohdasta 1.

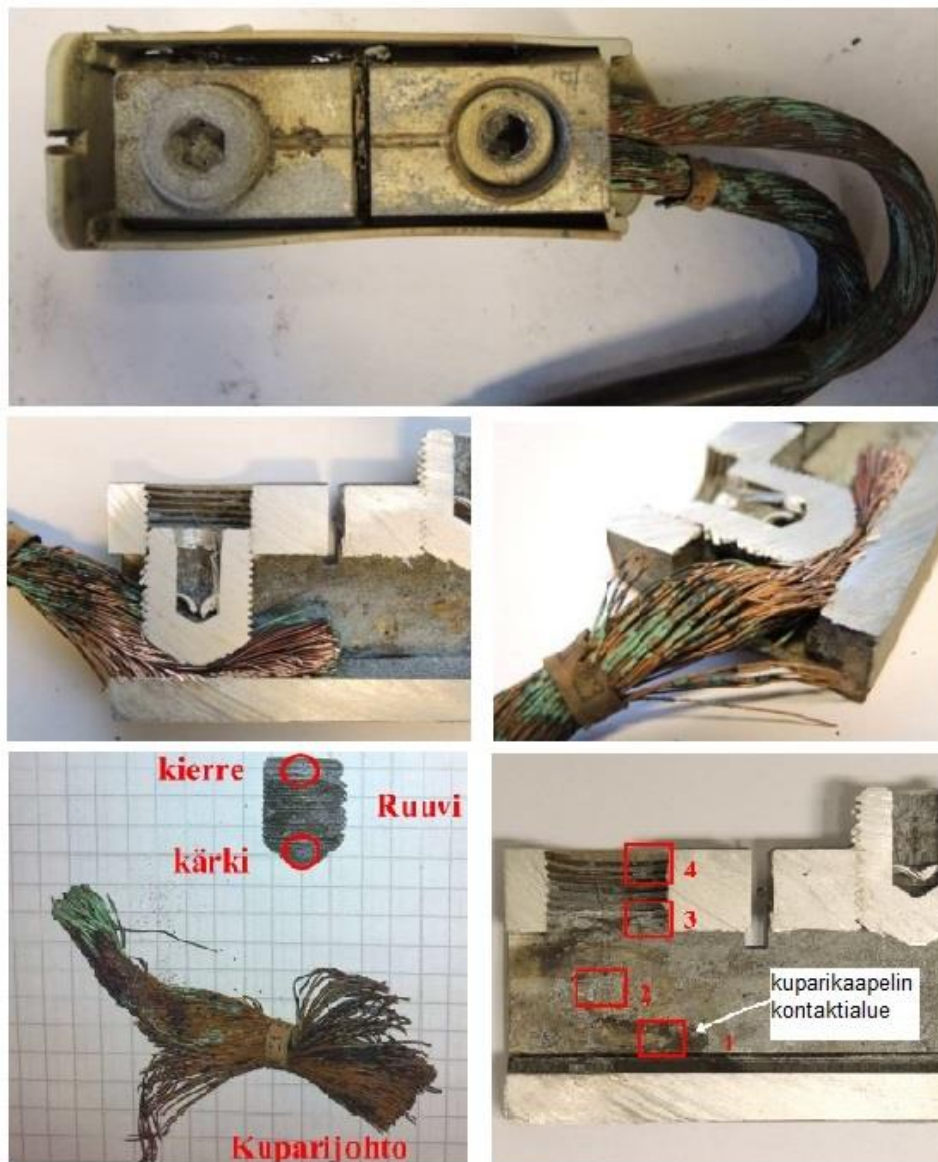


Kuva 78. EDS-analyysi liittimen 4T2 tarkastelukohdasta 2.

Näytteestä D tarkasteltiin erikseen liittimen runkorakennetta ja ruuvia, sekä kuparijohtoa kuvan 79 mukaisesti. Ruuvien perusmateriaali on alumiini, ja ruuvien pinnassa havaittiin pyöreähköjä partikkeleita. Analyysin mukaan partikkelit olivat todennäköisesti alumiinioksidia. On mahdollista, että alun perin partikkelit ovat olleet alumiinia, mutta ne ovat hapettuneet pinnoiltaan. Kyseessä voi olla myös jokin muu alumiinia sisältävä yhdiste, esimerkiksi alumiinihydroksidi. Ruuvien kierteen urasta löytyi sekä tinaa että kuparia.

Runkorakenteen perusmateriaali oli alumiini. Runkorakenteen sisäosan pintakerroksessa esiintyi alumiinin lisäksi hiiltä, happea, klooria, tinaa ja kuparia. Alueen 1 tarkastelussa esiintyi myös mahdollisesti booria. Kierreosan tarkastelussa havaittiin samantyyppistä alumiinin reaktiotuotetta kuin ruuvissakin.

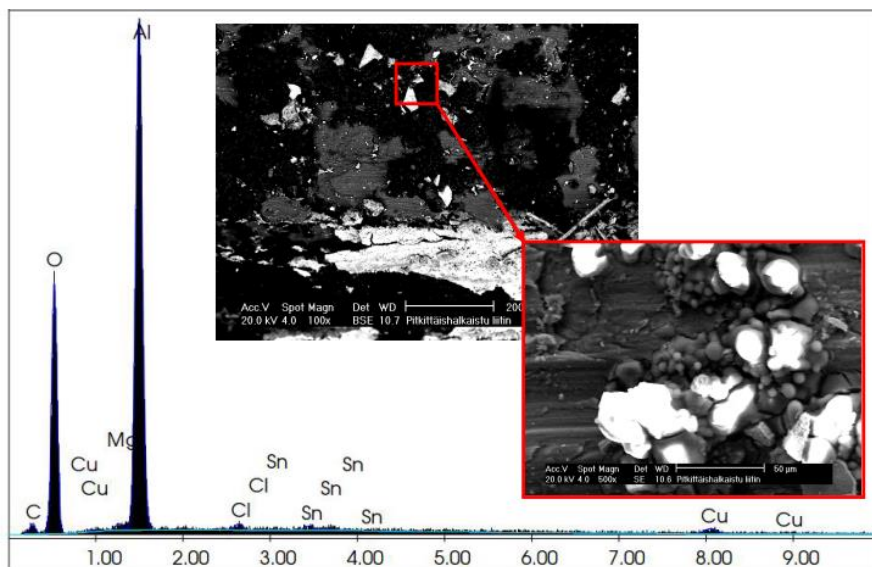
Kuparikaapelinäytteen perusmateriaali oli kupari. Kuparikaapelia tarkasteltiin sivusuunnasta sekä ruuvien kiristysuunnasta. Sivusuuntaisessa tarkastelussa havaittiin kuparin lisäksi alumiinia, tinaa, hiiltä, happea ja hieman klooria. Ruuvien kiristysuunnassa kuparikaapelin pinnassa esiintyi hiiltä, happea, klooria, kuparia ja hieman alumiinia.



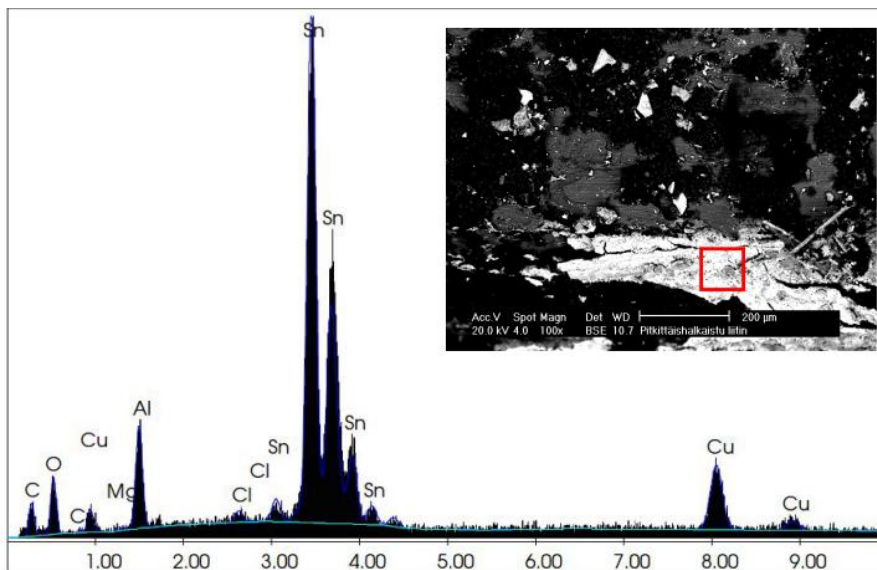
Kuva 79. Näyte D. Moottorikytkenässä käytössä ollut vikaantunut vaihtoliitin.

Kuvan 80 ruuviosan SEM- ja EDS-näytteissä korostuvat happioksidin muodostamat partikkelit. Alumiini reagoi nopeammin hapen kanssa ja oksidoituu helpommin kuin kupari, minkä takia alumiiniliitoksissa tulisi käyttää erillisiä suoja-aineita. Kyseisessä liitoksessa ei ole todennäköisesti kuitenkaan käytetty suoja-ainetta, koska monet markkinoilla olevat kaupalliset suoja-aineet ovat litiumpohjaisia eikä näytteissä löytynyt merkkejä litiumista. Kuvan 80 näytteessä epäpuhtauksista korostuu erityisesti happi, mutta näyte sisältää myös pieniä määriä hiiltä, kuparia, klooria ja sinkkiä.

Kuvan 81 näytteessä sen sijaan hapen osuus on huomattavasti vähäisempi, ja näytteessä sinkin osuus korostuu todella voimakkaasti ja paikallisesti. Lisäksi korostuivat hieinan suuremmat määrät hiiltä, alumiinia, kuparia ja klooria. Ilmeisesti alumiinioksidin suojaavan vaikutuksen puuttumisen takia muiden alkuaineiden esiintyvyys on suurempi kuvassa 81 kuin kuvassa 80.

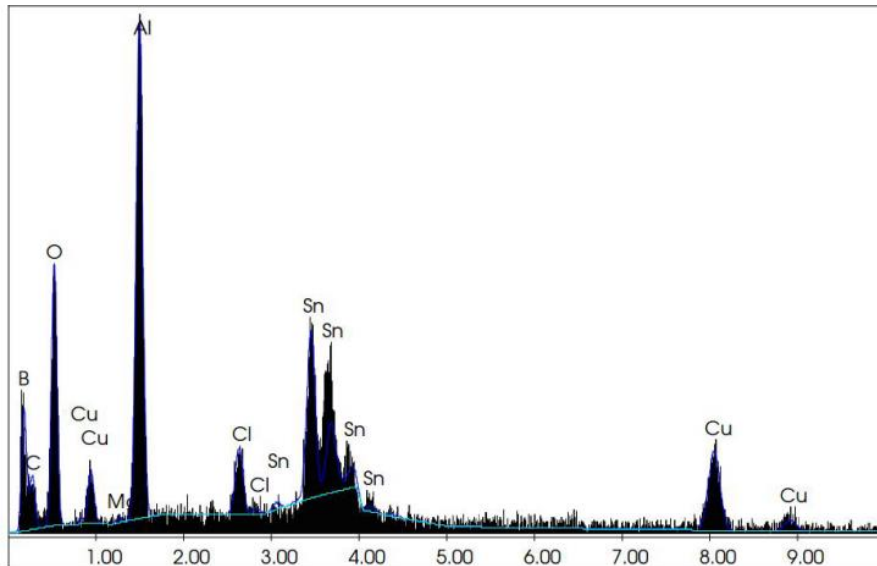


Kuva 80. SEM-näyte ja EDS-analyysi ruuviosan kierteen yläosasta.

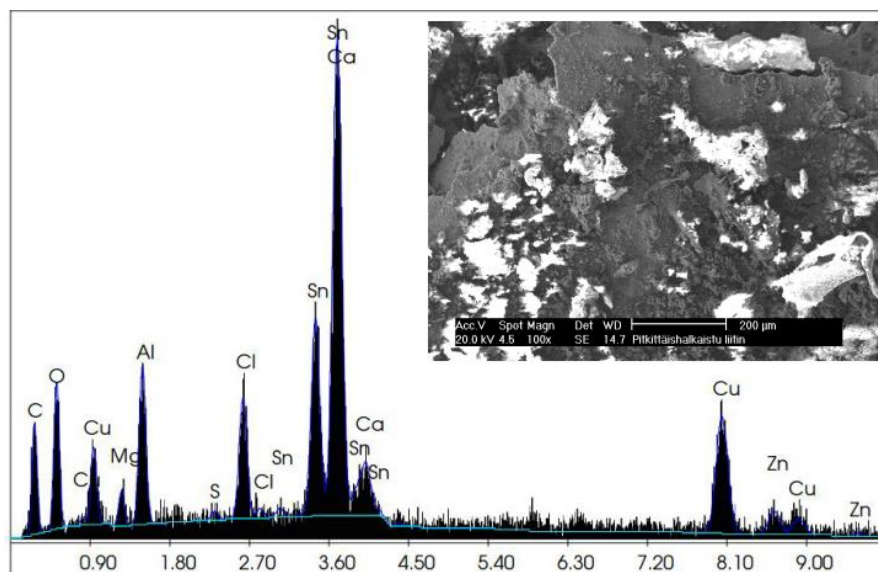


Kuva 81. SEM-näyte ja EDS-analyysi ruuviosan kierteen yläosan valkoisena näkyvästä kohdasta.

Näytteen D alumiiniliittimen runko-osaa analysoitiin neljästä kohdasta, joissa kohta 1 oli kuparikaapelin kontaktialue, kohta 2 oli rungon keskeltä ja kohdat 3 ja 4 olivat liittimen kierreosasta. Sekä kohdassa 1 että 2 ilmeni huomattava määrä eri alkuaineita epäpuhtauksina. Kuparikaapelin kosketuskohdassa (kuva 82) esiintyi happea, sinkkiä, kuparia ja booria sekä hieman hiiltä ja klooria. Alueella 2 ei esiintynyt booria, mutta sieltä löytyi huomattavasti sinkkiä ja kalsiumia sekä jonkin verran hiiltä, happea, kuparia ja klooria sekä pieniä määriä magnesiumia, tinaa ja rikkiä (kuva 83).

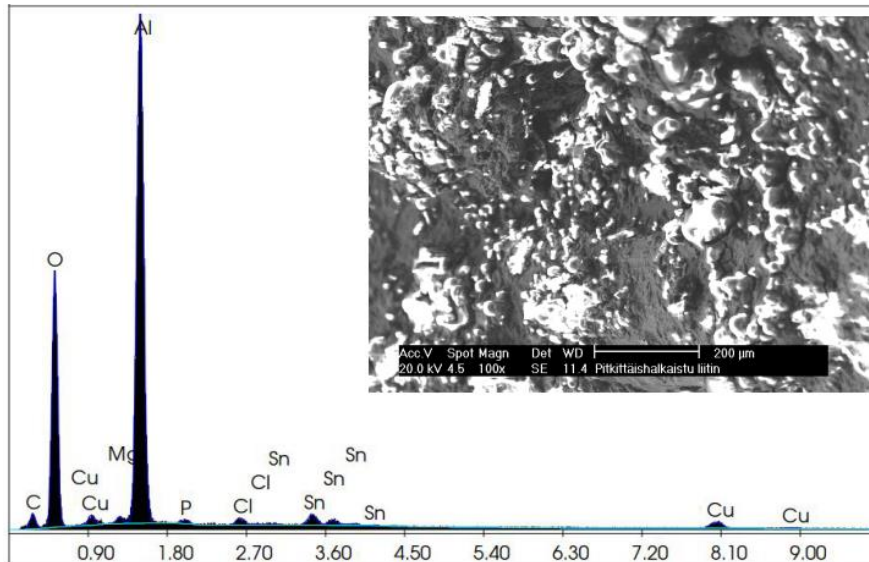


Kuva 82. EDS-analyysi runko-osan alueelta 1.

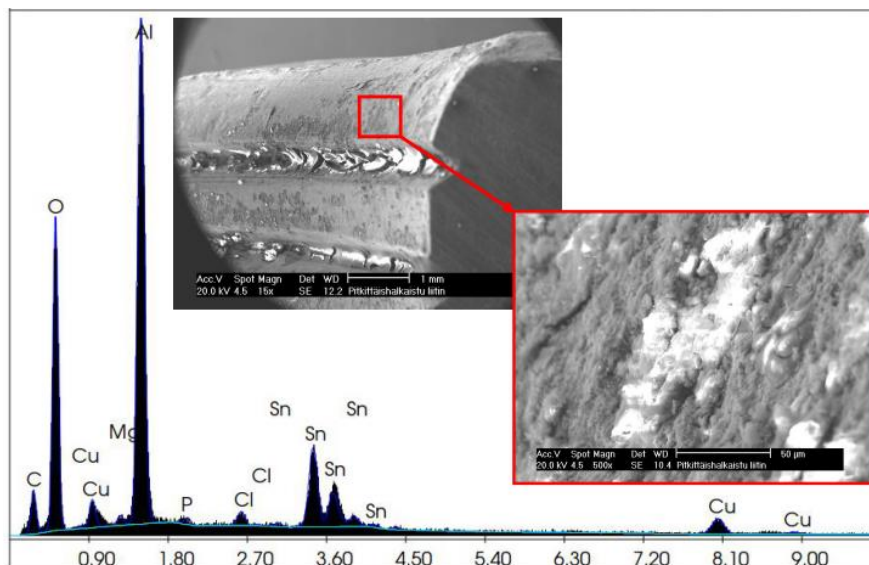


Kuva 83. EDS-analyysi runko-osan alueelta 2.

Alueilla 3 ja 4 epäpuhtauksia oli selvästi vähemmän, mutta toisaalta molemmilla alueilla esiintyi hyvin runsaasti happea. Molemmilla alueilla esiintyi lisäksi pieniä määriä hiiltä, kuparia, magnesiumia, klooria, fosforia ja sinkkiä. Kuitenkin alueella 3 (kuva 84) esiintyi hieman vähemmän sinkkiä kuin alueella 4 (kuva 85). Näissä tapauksissa näyttäisi siltä, että hapen oksidikerros on suojannut osittain pintoja muilta epäpuhtauksilta.

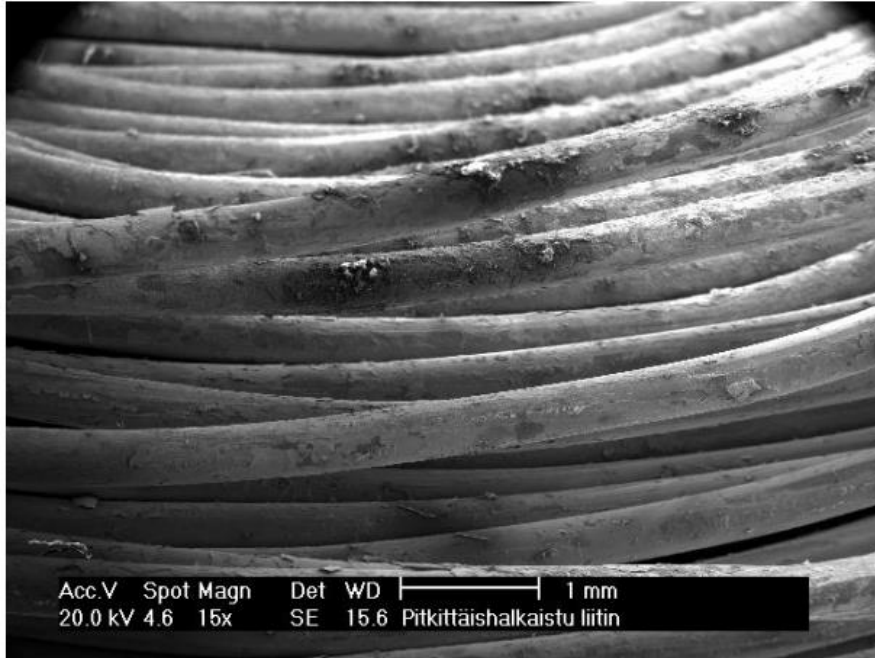


Kuva 84. EDS-analyysi runko-osan alueelta 3.

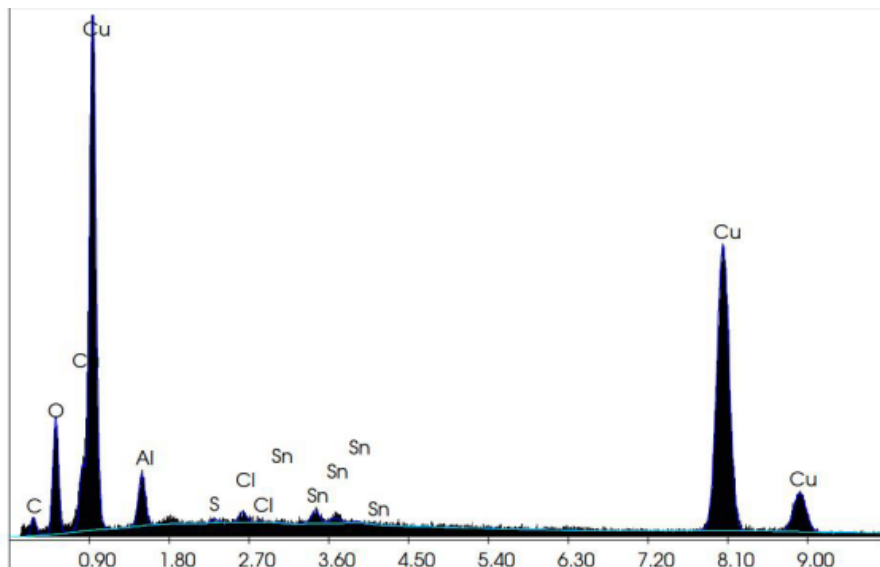


Kuva 85. SEM- ja EDS-analyysi runko-osan alueelta 4.

Analysoitaessa liitoksessa kiinnitettynä olevaa kuparijohtinta havaittiin kuparijohtimen pinnassa SEM-näytteessä kuvan 86 mukaiset epäpuhtaudet. Kohdassa, jossa alumiini ei ollut suoraan kosketuksissa kuparikaapeliin, esiintyi alumiinia EDS-analyysissa vain vähän (kuva 87). Lisäksi näytteessä esiintyi jonkin verran happea ja hieman hiiltä, rikkiä, klooria ja sinkkiä.



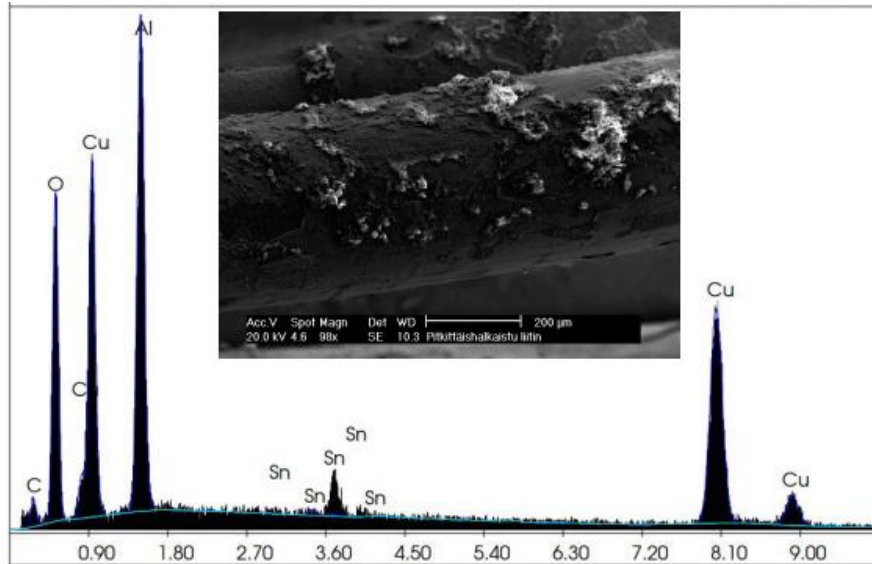
Kuva 86. Näytteen D kuparikaapelin SEM-näyte.



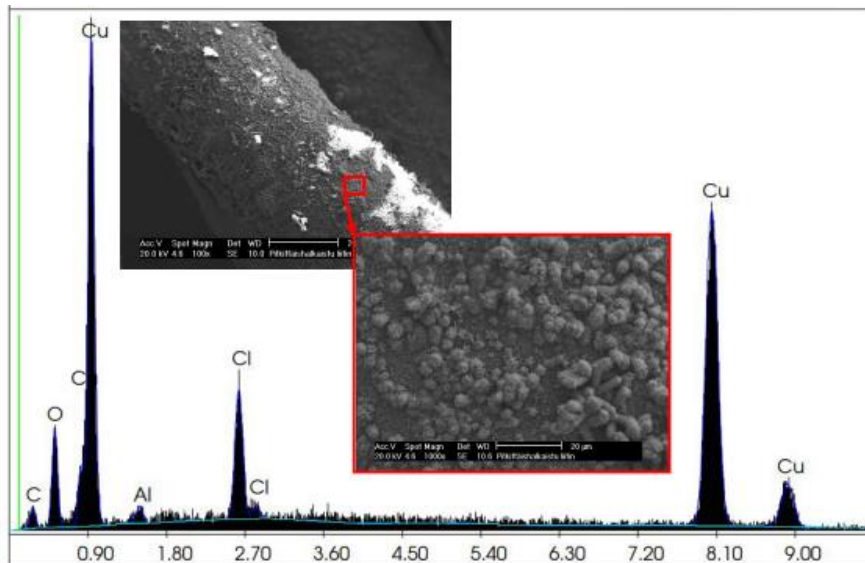
Kuva 87. Kontaktissa olleen kuparikaapelin EDS-analyysi sivuttaissuunnasta tarkasteltuna.

Epäpuhtaassa kuparijohtimen osassa, joka ei myöskään ollut suorassa kosketuksessa alumiiniin havaittiin SEM-näytteessä kuvan 88 mukaiset epäpuhtaudet. Pinnan epätasaisuus johtui pääosin siihen kiinnittyneestä alumiinista ja runsaasta hapesta (kuva 88). Lisäksi näytteessä esiintyi hieman hiiltä ja sinkkiä.

Alumiiniin kontaktissa olleessa kuparipinnassa esiintyi jonkin verran klooria ja happea sekä hieman hiiltä ja alumiinia (kuva 89).



Kuva 88. Kontaktissa olleen kuparikaapelin EDS-analyysi sivuttaissuunnasta tarkasteltuna.



Kuva 89. Kontaktissa olleen kuparikaapelin EDS-analyysi ruuvin kiristysuunnasta tarkasteltuna.

Kaikissa näytteissä havaittiin klooria, joka hyvin todennäköisesti on peräisin sähköjohtojen ja komponenttien PVC-eristeiden palamiskomponenteista (PVC = polyvinyylikloridi, joka sisältää klooria). Lisäksi useimmissa näytteissä havaittiin happea ja hiiltä. Happi esiintyy tyypillisesti oksidimuodossa ja liittyy korkean lämpötilan hapettumiseen. Hiili puolestaan on tyypillinen jäännös orgaanisten materiaalien palot tuotteista.

6.8 Virhelähteet ja epävarmuustekijät

Kyselytutkimus muodosti tutkimusympäristön lähtökohdan, ja sen tulosten perusteella määriteltiin tutkimuksen painopisteet. Näin ollen virhelähteiden kannalta kyselytutkimuksella oli iso rooli tutkimuksen painottumisessa oikein. Sen vuoksi kysely pyrittiin lähettämään mahdollisimman monelle sähköalan ammattilaiselle, jotta saadut vastaukset olisivat vertailukelpoisia ja painottuisivat todenmukaisesti sekä maantieteellisesti, ammattiryhmittäin että toimialakohtaisesti. Tämän vuoksi kyselytutkimus lähetettiin 1030:lle sähköalan ammattilaiselle, jotka jakaantuivat taulukon 12 mukaisesti. Taulukossa on esitetty ero lähetettyjen kyselyiden (1030 kpl) ja vastanneiden (116 kpl) ammattiryhmien välillä.

Kyselyyn vastanneita valtuutettujen tarkastajia ja laitoksia oli suhteessa sama määrä kuin mitä tarkastustoimintaa harjoittavia tahoja on todellisuudessaakin. Käytönjohtajista vastasi 15 prosenttiyksikköä vähemmän (vastanneita yhteensä 68 %), mutta tässä kohtaa tulee huomioida, että kyselyssä oli mahdollisuus valita useita ammattiryhmiä ja jopa 22 %:lla vastaajista oli kaksi tai useampia tehtäviä. Varsinkin sivutoimisten käytönjohtajien osalta toimintaan kuuluu yleensä myös esimerkiksi sähköurakointia tai -suunnittelua, joka selittää osin sen, että 13 % vastanneista ilmoitti tehtävikseen muut sähköalan tehtävät. Lämpökuvaajien osuus korostui tutkimuksessa kuudella prosenttiyksiköllä. Tätä selittää osin lämpökuvaamisen yleistyminen osaksi monia eri sähköalan työtehtäviä ja erityisesti osana kunnossapitoa.

Taulukko 12. Ammattiryhmien osuudet kyselytutkimuksen lähetetyistä kyselyistä ja niihin vastanneista.

Ammattiryhmä	Osuus tutkimuksessa		
	Osuus lähetetyistä	Osuus vastanneista	%-ero
Toiminnan harjoittajan palveluksessa olevat käytönjohtajat	87 % *)	45 %	-15 %
Sivutoimiset käytönjohtajat		23 %	
Muut	0 %	13 %	+13 %
Valtuutetut tarkastajat tai laitokset	9 %	9 %	0 %
Sähkölaitteistojen lämpökuvaajat	<1 %	7 %	+6 %
Sähköpalotutkijat	3 %	3 %	0 %

*) Käytönjohtajia ei erotella Tukesin rekisterissä sivutoimisiin ja päätoimisiin

Kaiken kaikkiaan kyselytutkimuksen kattavuus oli sekä maantieteellisesti että ammattiryhmien painotuksen mukaan hyvä. Täytyy ottaa kuitenkin huomioon, että kysyttäessä huolto ja kunnossapitotoimenpiteistä, joita yritys on tehnyt, korostuu vastaajien motivaatio, ja tällöin tulokset eivät ole valtakunnallisesti vertailukelpoisia, vaan antavat liian hyvän kuvan kunnossapitomme tasosta. Sen sijaan havaintoja sähköpaloista ja palovaarallista vikaantumisista, niiden seurauksista ja ympäristön havainnoinnista voidaan pitää melko luotettavana.

Tutkimukseen toimitetun materiaalin osalta pyrittiin tekemään ristiintarkistusta eri henkilöiden toimittamien materiaalien välillä ja vertaamaan mahdollisia eroavaisuuksia

valokuvien ja lämpökuvien välillä. Sekä valokuvien että lämpökuvien osalta tulisi olla kattavat tiedot laitteistosta, jotta kuvia voitaisiin arvioida jälkikäteen luotettavasti ja muodostaa tarkempia johtopäätöksiä vikatilanteiden synnystä. Kuvien yhteydessä tulisi mainita ainakin laitteiston tiedot ja kuormituksen määrä ja tyyppi, ympäröivät olosuhteet, toimiala, tiedot vikaa edeltävistä tapahtumista sekä tiedot siitä, miten vikaan reagoitiin. Tutkimukseen lähetetyistä lämpö- ja valokuvista osa sisälsi riittävät tiedot vikaantumisen syiden hahmottamiseksi, mutta osassa lähtötiedot olivat vaillinaisia, jolloin kyseiset materiaalit jätettiin käsittelemättä. Tällä tavoin pyrittiin vähentämään epävarmuustekijöitä materiaalin analysoinnissa. **Kirjalliset vikakuvaukset** täydensivät saatua materiaalia, mutta niidenkin vikakuvauksia pyrittiin analysoimaan kriittisesti ja verraten muihin vastaaviin tapauksiin.

Vikaantumisen mallintamiseksi tehdyt testit suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratoriossa. Testeissä pyrittiin minimoimaan verkosta tulevat häiriöt niin, etteivät ne vaikuttaisi mittaustuloksiin. Lisäksi pyrittiin käyttämään kalibroituja ja muutenkin huollettuja mittalaitetta. Mallintaminen ei sisältänyt varsinaisesti minkään suureen absoluuttisen arvon määrittämistä, vaan kokonaisten ilmiöiden hahmottamista eri mittaussuunnitelmin. Näin ollen mittalaitteiden tarkkuus tai ulkoisten häiriöiden vaikutus ei aiheuttanut epävarmuustekijöitä mittausten suorittamiseen ja niistä saatuihin tuloksiin. Kaikkia ilmiöitä ei pystytty havaitsemaan kaikilla mittalaitteistoilla, mutta mallinnuksen yksi tarkoitus olikin etsiä sopivia menetelmiä ja niiden yhdistelmiä vikaantumisen havainnointiin.

Vikaantuneiden komponenttien tutkimuksissa käytettiin SEM- ja EDS-analysointimenetelmiä. Analysointi suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitoksella tekniikan tohtori Antti Hynnän ja diplomi-insinööri Jarmo Laakson avustuksella. Sekä Hynnä että Laakso analysoivat myös omalta osaltaan saatuja tuloksia.

Mittauslaitteisto asettaa tällaisissa tarkoituksissa tutkimuksissa omat epävarmuustekijänsä. Huomioitavaa on esimerkiksi, että EDS-analysointilaitteilla saadaan selville ainoastaan alkuaineiden esiintyvyys eikä kemiallisia yhdisteitä. Tällöin vikaantumisen yhteydessä syntyneitä yhdisteitä ei voida todentaa täysin varmasti, vaan yhdisteiden esiintyminen joudutaan päättelemään esiintyvien alkuaineiden määrästä ja ominaisuuksista. Lisäksi EDS-analysointilaitteet eivät ole herkkiä keveille alkuaineille, kuten esimerkiksi hiilelle ja hapelle, eikä vetyä EDS-menetelmällä kyetä havaitsemaan lainkaan. EDS-analyysi ei ole määrällisessä suhteessa luotettava keveiden alkuaineiden kohdalla. Sen vuoksi esimerkiksi boorin (B), hiilen (C), typen (N) ja hapen (O) pitoisuuksia ei yleensä ilmoiteta numeerisissa tuloksissa, vaan havainnointiin käytetään kuvallista spektriä.

Huolimatta epävarmuustekijöistä vikaantuneiden liitosten materiaaliteknisistä tutkimuksista saatiin paljon lisätietoa ja ajatuksia lisätutkimusten tarpeellisuudesta. Koska mittaussuunnitelmissa on runsaasti epävarmuustekijöitä, ei tutkimuksessa ole pyritty tekemään suoria johtopäätöksiä vikaantumisten syistä perustuen alkuaineanalyysiin.

7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tutkimusta aloitettaessa alkuoletuksena oli, että liitosten vikaantuminen tapahtuu pääasiassa luonnollisen ikääntymisen, käyttöympäristön olosuhteiden, käyttäjien tai asennusvaiheessa tapahtuvan virheellisen toiminnan tai muiden laitteistojen tai sähköverkon aiheuttamien häiriöiden johdosta. Lisäksi tutkimuksen alussa oletettiin, että sähköpalojen esiintyvyyteen vaikuttavat voimakkaasti myös lämpötila-, jännite- ja mekaaniset rasitukset, jotka kohdistuvat vikaantunutta kohdetta ympäröiviin materiaaleihin. Jakokeskusten osalta oletettiin laitteistoihin kuulumattomien materiaalien, kuten pölyn, öljyjen ja muiden palavien materiaalien vaikuttavan oleellisesti palojen esiintyvyyteen. Hapen runsaan esiintyvyyden ja ilmanvaihdon oletettiin myös toimivan sähköpaloa edistävänä tekijöinä. Liitoksissa ilmenevien kemiallisten muutosten epäiltiin myös edesauttavan liitosten vikaantumista ja sähköpalojen syntyä. Liitosten vikaantuminen voi tapahtua monella eri tavalla, mutta lämpeneminen nopeuttaa pääsääntöisesti ketjureaktiota. Jo alkaneen vikaantumisen seuraukset voidaan määritellä karkeasti seuraavasti:

- Vikaantuminen muuttuu eli vika kehittyy niin, että hiiltymisen tai oksidoitumisen vuoksi osin puolijohtavaksi muuttuneen materiaalin ominaisuudet muuttuvat lyhyellä aikavälillä lämpötilan mukana ja vähän pidemmällä aikavälillä materiaali-muutosten seurauksena.
- Liitoksen mekaaninen rakenne heikkenee, minkä seurauksena liitoksen sähköiset ominaisuudet heikkenevät ja liitoksessa alkaa tapahtua lisääntyneen impedanssin vuoksi lämpenemistä.
- Riippuen liitosmateriaalista ja sen mekaanisesta rakenteesta alkaa liitoksessa ja sitä ympäröivässä eristerakenteesta tapahtua kemiallisia muutoksia.
- Kemialliset muutokset heikentävät usein liitoksen sähkötekniisiä ominaisuuksia ennestään ja vaurioittavat liitosta ympäröivää eristerakennetta.
- Jos liitoksessa tapahtuva tehohäviö on tarpeeksi suuri, joko liitoksessa kiinteästi yhdistyvät metallit tai niitä ympäröivät eristerakenteet syttyvät ja aiheuttavat sähköpalon. Pienemmillä tehoilla on mahdollista myös, että tehohäviö voi sytyttää liitoksen lähellä olevan vierasaineen (pöly, paperi, tms) tai esineen, vaikkei liitoksen kohdistuva tehohäviö olisikaan vielä vaarallinen liitokseen varsinaisesti liittyville materiaaleille ja eristerakenteille.

Seuraavaksi on tarkasteltu tutkimuksessa saatuja tuloksia ja verrattu niitä edellä mainittuihin alkuoletuksiin ja aikaisempiin sähköpaloja käsitteleviin tutkimuksiin. Tuloksia arvioitaessa on pyritty vastaamaan tutkimuksen alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tulosten oikeellisuutta on arvioitu perustuen aiemmin esitettyihin tutkimusmenetelmiin.

7.1 Keskusrakenteiden vaikutus vikaantumiseen

Yhtenä tutkimuksen tavoitteissa oli saada tietoa siitä, vikaantuvatko jotkut keskusrakenteet useammin kuin toiset, ja siitä, miten jakokeskusten rakenteet vaikuttavat sähköpalojen kehittymiseen. Sekä kyselytutkimuksessa että analysoitaessa vikaantuneiden ja palaneiden kohteiden valokuvia ja lämpökuvia korostui jakokeskuksen koteloinnin riittävyyden merkitys valitseviin olosuhteisiin nähden.

Kyselytutkimuksissa korostui pölyn ja kosteuden esiintymisen merkitys sähköpaloja edistävinä elementteinä. Kuitenkin kun asiaa tarkastellaan laajemmin saatujen tutkimusmateriaalien sekä SEM- ja EDS-näytteiden pohjalta, vieraiden epäpuhtauksien pääsy liitoksiin vaikuttaisi olevan laajempi ongelma kuin aikaisemmin on ymmärretty. Hyvälläkään asennuksen laadulla ei voida korvata jo valmiiksi riittämätöntä rakennetta. Sähkösuunnittelijan tulisi tuntea ja tietää ne vallitsevat olosuhteet, joihin laitteisto tai jakokeskus suunnitellaan. Tiivis rakenne, joka estää epäpuhtauksia pääsemästä jakokeskuksen sisään, mutta jonka komponenttien jäähtyvyydestä on huolehdittu tarpeeksi, näyttäisi olevan vähiten altis keskusrakenteista johtuville vikaantumisille.

Myös keskusvalmistajilla näyttäisi olevan mahdollisuus parantaa tuotteittensa laatua ja ennaltaehkäistä näin sähköpaloja. Esimerkiksi lähellä nimellisvirtaansa toimivat toisiinsa kiinni asennetut komponentit lämpiävät usein yli komponentille sallitun lämpenemän. Monissa tuotestandardeissa valmistaja veloitetaan testaamaan komponentit vain erikseen asennettuna avoimessa tilassa, jossa jäähtyvyys on aivan eri luokkaa kuin pienessä jakokeskuskennossa. Toisaalta keskusvalmistajien tulisi standardien mukaan suunnitella keskusrakenteet siten, että sallitut lämpötila-arvot eivät ylitä. Jo muutaman millimetrin komponenttiväleillä jäähtyvyys saadaan huomattavasti paremmaksi ja komponenttien lämpötilarasitus voi laskea jopa 10 °C. On myös tärkeää ymmärtää, että vaikka komponentin lämpötila ei olisi vielä kriittisellä ja palovaarallisella alueella, suhteessa suurempi lämpötilarasitus haurastuttaa eristerakenteita sekä nopeuttaa ja voimistaa paikallisia kemiallisia reaktioita ja lisää esimerkiksi korroosiota liitoksissa.

Jakokeskusten puutteellinen tiiviys oli myös hyvin usein seurausta muutostöistä tai suoranaisista asennusvirheistä. Tiivistämättömät kaapeliläpiviennit osoittautuivat suurimmaksi ongelmaksi epäpuhtauksien osalta. Lisäksi asennusvaiheessa yllättävän usein kondenssiveden poistoaukko jää aukaisematta, jolloin erityisesti lämpötilavaihteluiden aikana jakokeskusten sisälle muodostunut ilmankosteus ei pääse välttämättä tasoittumaan ympäröivän ilman kanssa. Oleellista vesihöyryn tiivistymiselle on veden suhteellinen määrä ympäröivässä kaasussa sekä höyryn lämpötila. Erityisesti ongelmia voi ilmetä tilanteissa, joissa lämpötila laskee nopeasti alle kastepisteen, jolloin osa höyrystä tiivistyy vedeksi keskuksen sisäpinnoille aiheuttaen korroosiota ja jopa palovaarallisen vikaantumisen.

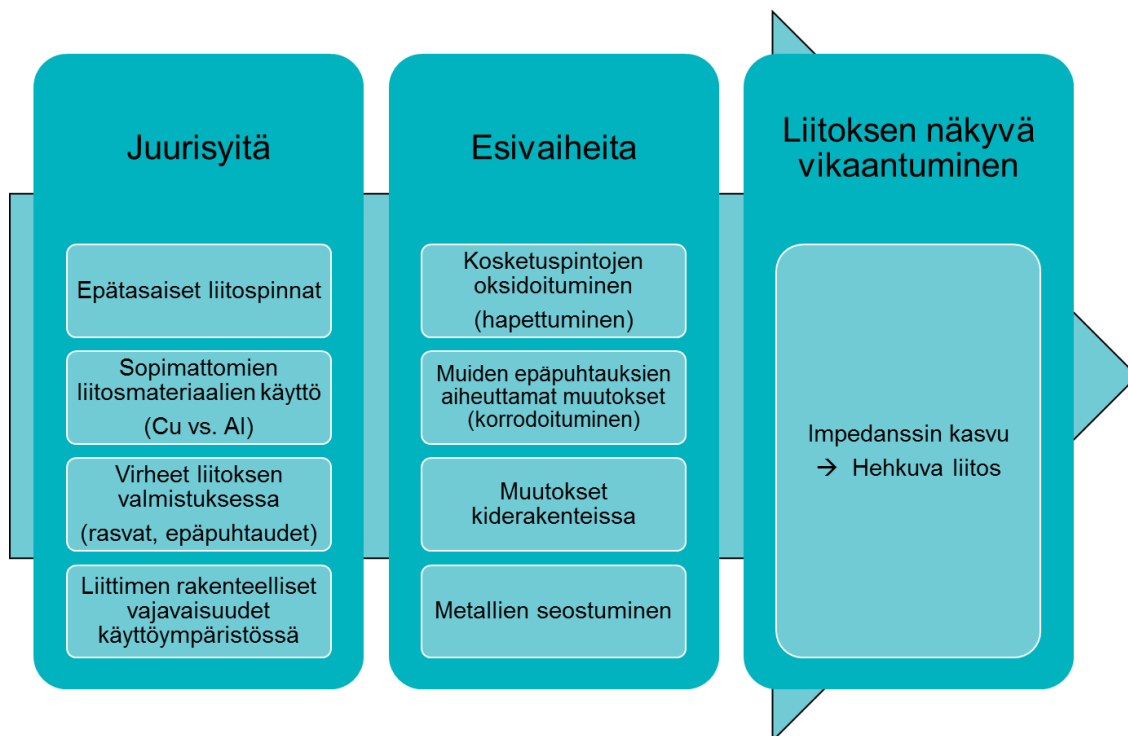
Ylimääräinen palokuorma on ongelmana monissa keskustiloissa. Jakokeskushuoneita pidetään varastoina, jolloin pääsy jakokeskuksille huolto- ja kunnossapitotoimenpiteitä varten saattaa estyä kokonaan. Lisäksi ylimääräinen palokuorma toimii paloa edistävänä ja levittävänä elementtinä sekä vaikeuttaa näin oleellisesti pelastustoimia. Keskusvalmistajien osalta käytetty materiaali pyritään ennemminkin minimoimaan, joten keskusvalmistajilla ei ole juuri roolia palokuorman lisäämisessä. Sen sijaan asennettaessa keskuksen tulevia ja lähteviä kaapeleita voidaan ylimittaisilla kaapeleilla lisätä jakokeskuksen palokuormaa oleellisesti. Esimerkiksi yleisesti kaapeleissa käytössä olevan PVC eristeen palokuorma on noin 20 MJ/kg.

7.2 Liitosten vikaantumismekanismit ja -tyypit

Löysä liitos mielletään hyvin usein vikaantumisen syyksi, jos sähköpalon on paikallistettu lähteneen liitoksen vikaantumisesta. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää, mitä muita syitä liitosten luotettavuuden menettämiseen on olemassa ja miten erilaiset viat jakaantuvat oikosulku-, maasulku- ja valokaarivikoihin.

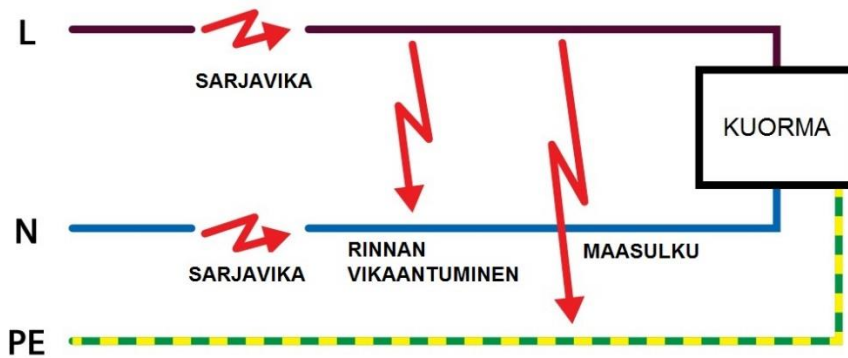
Tutkimuksen tuloksena muodostettiin kuvan 90 kaavio liitoksen palovaaralliseen vikaantumiseen johtavista juurisyistä ja niiden vaihtoehtoisista seurauksista. Sähköpalot johtuvat lähes poikkeuksetta paikallisen lämpötilan liiallisesta noususta. Tutkimuksessa

analysoidun materiaalin sekä SEM- ja EDS-menetelmin analysoitujen näytteiden perusteella liitosten **vikaantumismekanismeja on kuitenkin useita**. Kaikille vikaantumista-voille on kuitenkin yhteistä liitosimpedanssin kasvu ja siitä seuraava hehkuva liitos. Tutkimuksessa havaittiin yllättävän monien vikaantumisten olevankin seuraus erilaisista **kemiallisista reaktiosta**, jotka aiheuttavat muutoksia liitoksen rajapinnassa. Lisäksi liitosten rakenteellisten ominaisuuksien havaittiin olevan laajempi kokonaisuus, jossa monta tekijää saattaa vaikuttaa liitoksen löystymiseen. Löysä liitos ei ole kuitenkaan vikaantumisen syy, vaan seuraus rakenteellisesta ongelmasta, johon voitaisiin vaikuttaa sekä käyttämällä oikeita asennusmenetelmiä että toimivampia rakenteita komponenttivalmistajien osalta.



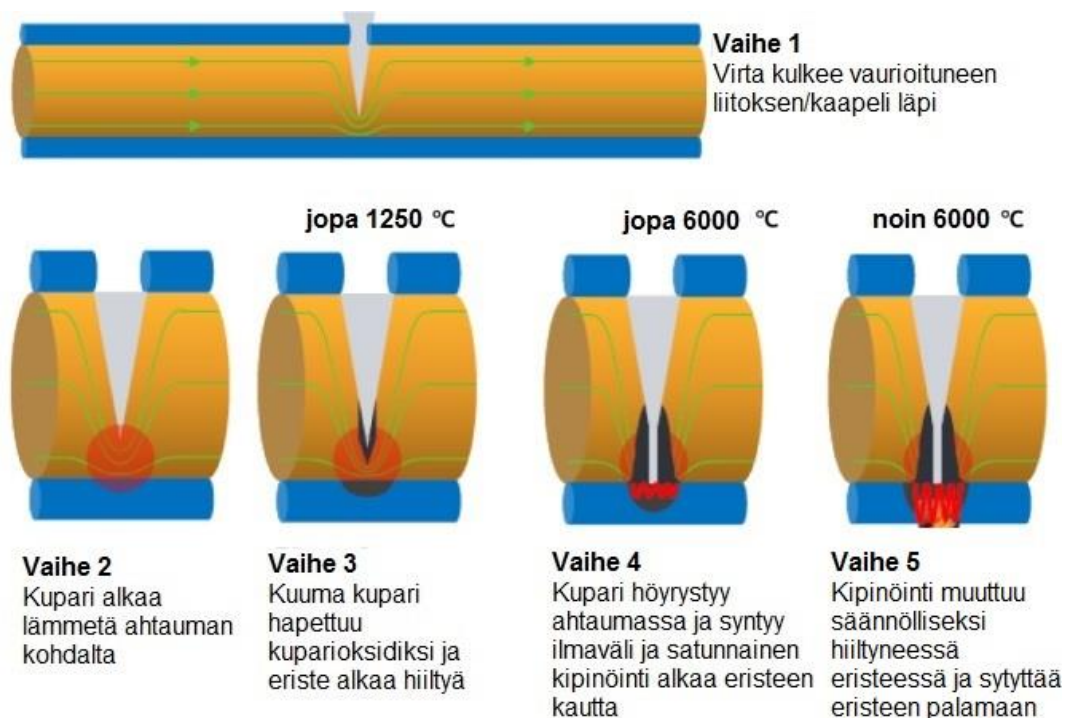
Kuva 90. Liitoksen palovaarallisen vikaantumisen eteneminen.

Hehkuva liitos on kuitenkin vain varsinaisen vikaantumisen esiaste. Liitos voi vikaantua palovaaralliseksi, jos sen lämpötila nousee niin korkeaksi, että se vaurioittaa eristerakennetta tai eristerakenteen pinnalle muodostuu joko kokonaan tai osittain johtava virtatie. Tämän jälkeen eristeaine voi joko syttyä suoraan palamaan korkean lämpötilan ja hiiltymisen seurauksena tai liitoksen vikaantuminen voi aiheuttaa eristeaineen läpi oiko- tai maasulun. Eristerakenteen hiiltymisen seurauksena voi rakenteeseen syntyä myös erilaisia puolijohtavia rajapintoja, jolloin piiri johtaa eristerakenteen yli aina, kun puolijohtavan rajapinnan kynnysjännite ylittyy ja aiheuttaa lyhytkestoista kipinöintiä, mitä suojalaitteet eivät välttämättä havaitse. Tällöin kyse on vikaantumisesta rinnan syötettävän kuorman kanssa tai maasulusta vaihejohtimen ja maapotentiaalin välillä. Liitos voi vikaantua myös niin, että vika ilmenee liitoksessa sarjamuotoisena. Tällöin liitoksen rajapintoihin voi muodostua vastaavia puolijohtavia rajapintoja, jotka aiheuttavat kipinöintiä piirin alkaessa johtaa vasta hieman jännitteen nollakohtien jälkeen. Eri vikaantumistyyppit on esitetty kuvassa 91.



Kuva 91. Erilaisten kipinöintiä aiheuttavien vikaantumisten tyypit (Siemens 2012).

Yleisesti pienjännitteellä pätee, että normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilassa läpilyönti voi ilmetä vasta yli 340 V jännite-erolla. Monesti kuuleekin väitteitä, että tämän vuoksi 230 V järjestelmässä ei voi esiintyä valokaarta ilman, että eri potentiaalissa olevat johtavat osat koskettaisivat ensin toisiaan. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin, että liitoksen altistuessa oksidoitumisen, kipinöinnin tai korroosion vaikutuksesta epäpuhtauksille voi liitokseen muodostua puolijohtavia rajapintoja, joiden kynnysjännite voi vaihdella myös alle 230 V. Tällöin kyse ei siis ole ilman kautta tapahtuvasta valokaaresta vaan kosketus tapahtuu osittain johtaneeksi muuttuneen virtakanavan kautta. Sama ilmiö on huomattu myös erään suojalaitevalmistajan tutkimuksissa ja ilmiötä havainnollistaa kuva 91. Merkittävää on myös erittäin suuri paikallinen lämpötila, joka voi vikakohdassa ylittää arviolta jopa 6000 °C.



Kuva 92. Sarjavalokaaren muodostuminen vaurioituneessa liitoksessa tai kaapelissa (Siemens 2012).

Jos hehkuva liitos on syntynyt **löystyneestä liitoksesta**, löystyminen johtuu yleensä liittimen rakenteellisista ominaisuuksista tai vääristä asennuskäytännöistä. Jotta liitos pysyy luotettavana, olisi sen mukauduttava liitosmateriaalien ja ympäristön lämmön vaihteluihin ja kestettävä mekaanista liikettä rakenteen huonontumatta. Tutkimuksessa tarkasteltiin erityisesti **ruuviliitoksen** ominaisuuksia, koska suurin osa olemassa olevien laitteistojen liitoksista on toteutettu kyseisellä tekniikalla. Asennusvirheiden seurauksena ruuviliitos voi muodostua epäluotettavaksi kolmella eri tavalla. Liitos voidaan kiristää liian löysälle, jolloin se saattaa löystyä erityisesti mekaanisen tärinän vaikutuksesta. Ruuviliitos voidaan kiristää myös liian kireälle niin, että liittimen rakenne murtuu, tai niin, että liitos ei murru mutta liittimen vastamomentti kuoleentuu. Tällöin liitin ei elä esimerkiksi lämpötilavaihteluiden mukana, vaan liitospaine vaihtelee, ja kun tämä yhdistyy mekaaniseen tärinään, saattaa liitos lähteä aukenemaan.

Pulttiliitoksissa pätee sama periaate kuin pienemmissä ruuviliitoksissakin. Liitoksen on mukauduttava ympäristön ja kuormituksen aiheuttamiin lämpötilan muutoksiin, jotta liitos pysyy luotettavana. Pulttiliitoksissa korostuu oikeiden osien, asennusmateriaalien ja -menetelmien käyttö. Vastamomenttina pulttiliitoksessa toimii kartiomainen puristuslaatta, jolloin liian löysään kiristetyssä liitoksessa aluslaatta ei pidä jännitystä tarpeeksi ja pultti saattaa aueta tärinässä. Liian kireälle kiristetyssä liitoksessa taas aluslaatan jännitys voi kuoleentua, jolloin aluslaatta ei jousta lämpötilojen vaihteluiden yhteydessä ja pultti saattaa aueta tärinän vaikutuksesta.

Yliaaltojen ja ylikompensoinnin vaikutusta sähköpalojen esiintyvyyteen tunnetaan Suomessa sähköalalla varsin huonosti. Yliaallot ja erityisesti kolmivaiheisessa järjestelmässä nollajohtimeen summautuvat kolmannen yliaallon kerrannaiset virrat voivat ylikuormittaa ja kuumentaa nolla- ja PEN-johtimia jopa niiden poikki sulamiseen asti. Vähemmän tunnettuja yliaaltojen aiheuttamia ilmiöitä ovat suurten yliaaltojen aiheuttamat mekaaniset resonanssi-ilmiöt, joissa rakenteiden värähtely voi avata jopa suurivirtaisia pultteja ja salpoja aiheuttaen todella suuren palovaaran liitosten löystyessä. Lisäksi erityisesti vanhojen asennusten muutostöissä ei oteta aina huomioon kuormassa tehtyjen muutosten vaikutusta jakokeskusten sähkönsyöttöön. Esimerkiksi poistettaessa vanhoista hallivalaisimista vikaantuneita kompensointikondensaattoreita saattavat suuren valaisinryhmän kuormitusvirta ja häiriöt nousta huomattavasti. Tämä näkyy jakokeskuksella lisääntyneenä loistehon määränä ja sitä kautta kasvaneena virtana, joka voi ylikuormittaa kaapeleita ja liitoksia aiheuttaen palovaarallisen tilanteen. Myös tilanteissa, joissa virheellisesti ylikompensoidaan jotain sähkölaitteiston osaa, ylikompensointi aiheuttaa paikallista jännitteen nousua ja virran nousua jänniteriippuvaisissa kuormissa.

7.3 Ympäristöolosuhteiden ja korroosion vaikutus

Jakokeskusten tiiviys liittyy hyvin voimakkaasti siihen, miten ympäristöolosuhteet vaikuttavat jakokeskusten liitosten vikaantumiseen. Tutkimuksessa analysoiduissa valokuvissa ja alkuaineanalyysissä korostui korroosion vaikutus liitosten vikaantumista edistäväksi tekijäksi. SEM- ja EDS-analyyysien pohjalta todettiin, että liitoksissa esiintynyt kloori oli siirtynyt liitospintoihin PVC-pohjaisien johtojen ja kaapeleiden eristeiden sulaessa. Kloorin siirtyminen eristeistä liitokseen johtui siis ylläampemisestä, avoimeksi sen sijaan jäi kuinka suuri ylläampeminen tarvitaan, jotta klooria siirtyisi liitokseen haitallinen määrä. PVC eli polyvinyylidikloridi sisältää klooria, joka eristeiden palokaasujen mukana leviää ympäristöönsä helposti. Suuremmissa mittakaavassa kloori reagoi palon jälkeensä helposti ilmankosteuden ja sammutusveden kanssa muodostaen suolahappoa (HCl), joka aiheuttaa merkittäviä korroosio-ongelmia. Pienessä mittakaavassa ei ole kuitenkaan

olemassa tietoa, voisiko jo johdineristeistä liitosten pintaan höyrystynyt kloori aiheuttaa paikallista suolahapon muodostumista yhdessä ilmankosteuden kanssa.

Tutkimuksissa havaittu hiili ja happi olivat näytteissä mitä todennäköisimmin yhdisteinä, happi todennäköisesti oksideina (O_2). Happi pystyy kiinnittymään metallipinnoille jo huoneenlämpötilassa. Hiili saattoi olla myös nokea, jolloin se olisi suhteellisen puhtaana hiilenä eikä osana jotain yhdistettä. Värjäytynyt kupari on merkki siitä, että kloori tai jokin muu aggressiivinen aine on reagoanut kuparin kanssa; tällöin kyseessä on merkittävä reaktio. Ilmiötä voidaan kuvata kemiallisena reaktiona, mutta yleisesti puhutaan myös korroosiosta. Näin vahvan ilmiön syy tulisi aina selvittää ja liitokset korvata uusilla, jotta liitoksen vikaantumisen aiheutuvaa paloriskiä voitaisiin pienentää.

Korroosion päätyyppejä ovat kemiallinen, sähkökemiallinen ja korkean lämpötilan korroosio. Kemiallista korroosiota voidaan vähentää sähköisissä liitoksissa joko alentamalla lämpötilaa, pinnoittamalla materiaaleja tai käyttämällä muuten kemiallisesti stabiileja materiaaleja. Pääsääntöisesti sähköiset liitokset suunnitellaan ja pyritään toteuttamaan niin, että liitokset eivät muodosta sähköistä paria, jossa materiaalien potentiaaliero toistensa välillä olisi liian suuri. Sähkökemiallista korroosiota voi kuitenkin syntyä siitä huolimatta, jos esimerkiksi potentiaaliero syntyy liitoksessa vaikuttavan ylimenovastuksen takia tai liitos on altistunut ionipitoisille elektrolyyteille, kuten esimerkiksi kloorionien kiihdyttäessä korroosioreaktiota. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuvan korroosion vaikutuksesta metallit muuttuvat lähinnä erilaisiksi yhdisteiksi.

Kaasumaisina esiintyvien ja voimakkaasti korrodoivien yhdisteiden vaikutusalueilla (jätevedenpuhdistamot, liuotintehtaat yms.) ei edes tiivis kotelointi estä korroosion vaikutusta. Tällöin tulisikin käyttää esimerkiksi erilaisia suoja-aineita tai vaihtoehtoisesti ylipaineistaa jakokeskusten kriittiset osat korroosion estämiseksi.

7.4 Suojalaitteiden toiminta palovaarallisessa viassa

Yhtenä tutkimuksen tavoitteista oli selvittää, miten erilaisten suojalaitteiden toiminta muuttuu palovaarallisen vian esiintyessä ja kuinka virtapiiriin tai kojeiden suojaus toimii palon kehittymiseen nähden. Tämän selvittämiseen käytettiin pääosin laboratorio-olosuhteissa tehtyjä testejä eri suojalaitteilla.

Rinnan tai maapotentialiaalia vastaan tapahtuvassa vikaantumisessa kipinöivä liitos vikaantuu usein siten, että kipinöinti on aluksi hyvin harvaa, jolloin perinteisten sulakkeiden ja johdonsuoja-automaattien laukaisumekanismi ei havahdu vikaenergian ollessa liian pieni sen lyhytkestoisuuden takia. Lisäksi vikaantuneen kohdan yli oleva jännite saattaa olla melko suuri johtuen vikaantuneen eristerakenteen impedanssista. Englanninkielisessä terminologiassa tästä ilmiöstä käytetään nimitystä valokaarijännite (arc voltage). Tällöin virta jää myös pieneksi eikä laukaisu välttämättä toimi edes suurilla verkon oikosulkuvirroilla. 30 tai 300 mA vikavirtasuojaus suojaa hyvin myös palovaarallisilta vioilta maasulkutilanteessa, mutta kuorman yli tapahtuvaa rinnan vikaantumista vikavirtasuojia ei havaitse.

Sarjamoitoisessa vikaantumisessa haasteena on, että piirissä kulkeva virta ei kasva, vaikka vikaimpedanssi olisi hyvinkin pieni. Näin ollen suojalaitteella ei ole mahdollisuuksia havaita vikaa, koska vian yhteydessä esiintyvät kytkentävirtapiikit eivät yleensä riitä laukaisemaan perinteisiä suojalaitteita. Vika voidaan toki havaita suurilla virroilla esimerkiksi paikallisilla valokaarivahdeilla kipinöinnin ollessa erittäin voimakasta juuri ennen suurempaa valokaarta, mutta suuri osa kipinöinnistä jää havaitsematta perinteisillä suojalaitteilla.

Perinteisten suojalaitteiden riittämättömyys kipinöintiä aiheuttavien vikojen suojaamisessa on saanut ainakin Siemensin kehittämään oman ratkaisunsa vikaantuneista liitoksista ja kaapeleista johtuvien sähköpalojen ennaltaehkäisyyn. Palosuojakatkaisijan toiminta perustuu korkeataajuuksien (22...24 MHz) häiriöiden analysointiin suojalaitteen mikrokontrollerilla. Monet laitteet, kuten porakoneet, tuottavat kipinöintiä ja siten häiriöitä jo normaalissa toiminnassaan. Tämän vuoksi palosuojakatkaisijan on osattava erottaa normaalin käytön ja verkon taustahäiriöt palovaarallisen vian aiheuttamista ilmiöistä. Palosuojakatkaisija vertaa korkeataajuuksien häiriöiden voimakkuutta, esiintymistaajuutta ja virtasignaalin muutosnopeutta ja laskee kumuloituvaa summaa mahdolliselle palovaaralliseksi vialle. Jos vika ei ilmene tarpeeksi useasti, palosuojakatkaisija nolaa vikarekisterin ja aloittaa vikaintegraattorin laskennan alusta. Palosuojakatkaisijan poiskytkentäaika on myös säädetty indikoitavan palovaarallisen virran mukaan taulukon 13 mukaisesti. Tällaiset pienet valokaarivirrat esiintyvät usein sarjavalokaaren yhteydessä. (Siemens 2012)

Taulukko 13. Pienien valokaarivirtojen poiskytkentäajat (Siemens 2013).

Kipinöivä testivirta [A]	2,5	5	10	16	32
Poiskytkennän maksimiaika [s]	1	0,5	0,25	0,15	0,12

Rinnakkaisen ja maapotentiaalia vasten tapahtuvan kipinöinnin tapauksessa palosuojakatkaisijalle ei ole säädetty poiskytkentäaikaa, vaan laite laskee 0,5 sekunnin aikana ilmenevien, kipinöinnistä syntyvien puoliaaltojen lukumäärän. Suojaus rinnakkaisia ja maapotentiaalia vasten tapahtuvia palovaarallisia vikoja vastaan on toteutettu näin, koska ilmiö on usein satunnainen ja epästabiili, ja suuria vikavirtoja vastaan suojauksessa auttaa myös piiriin kytketty johdonsuoja-automaatti. Taulukossa 14 on esitetty suurin sallittu lukumäärä palovaaralliseksi viaksi indikoituja puoliaaltoja eri vikavirtojen arvoilla.

Taulukko 14. Suurin sallittu indikoitujen puoliaaltojen määrä eri vikavirta-arvoilla (Siemens 2012).

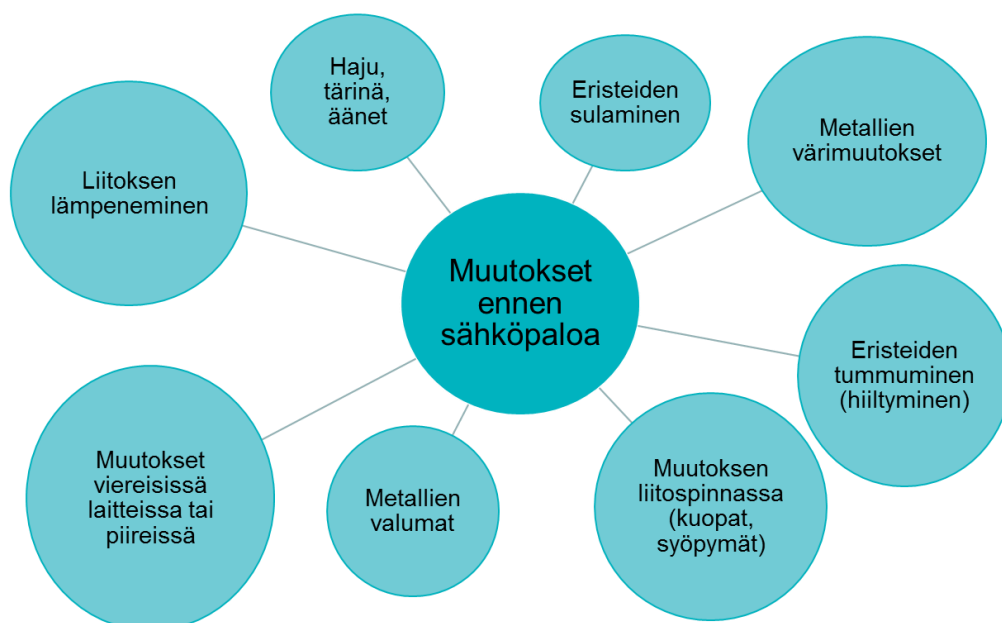
Kipinöivä testivirta [A]	75	100	150	200	300	500
Suurin sallittu määrä puoliaaltoja [kpl]	12	10	8			

Tutkimuksen perusteella palokatkaisija toimii edellä kuvatulla tavalla ainakin sarjamuotoisen vian tapauksessa. Tutkimuksessa ei tutkittu piirin rinnalla tapahtuvaa suurivirtaista vikaantumista testiolosuhteiden vaikean mallintamisen takia. Tämän vuoksi laitteen toiminnasta rinnan ja maapotentiaalia vasten ei voida tutkimuksen pohjalta antaa käyttösuosituksia, mutta toisaalta ei ole olemassa ennakkotietoa, etteikö suojalaite toimisi myös muissa sille kuvatuissa toimintaolosuhteissa. Tutkimuksen pohjalta vaikuttaisi siltä, että palosuojakatkaisijoista voisi olla hyötyä ryhmäjohtotasossa tapahtuvien palovaarallisten vikojen ennaltaehkäisyssä.

7.5 Mittausmenetelmien hyödyntäminen sähköpalojen ennaltaehkäisyssä

Tutkimuksen laboratorio-osuudessa pyrittiin myös kartoittamaan, millaisia uusia mittausmenetelmiä voitaisiin käyttää ja toisaalta mitä olemassa olevia mittausmenetelmiä voitaisiin hyödyntää sähköpalojen ennaltaehkäisyssä osana erilaisten ja -laajuisten sähkölaitteistojen kunnossapitoa. Lisäksi tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan, miten menetelmiä voitaisiin hyödyntää sekä mikä on niiden luotettavuus ja mitä ovat mahdolliset ongelmat tutkittavan laitteistojen elinkaaren kannalta.

Jotta ymmärrettäisiin, mitä tulisi mitata palovaarallisen vikaantumisen havainnoimiseksi, tulisi ymmärtää sähköpaloja ennakoivat ilmiöt. Kuvassa 93 on esitetty ilmiöitä, jotka saattavat edeltää palovaarallista vikaantumista. Sähkölaitteissa muutenkin on tyypillistä, että vikaa edeltää hyvin usein joko visuaalisesti, äänen tai hajun perusteella havaittava ilmiö. Todella moni sähköpalo olisikin estettävissä järjestelmällisellä ja säännöllisellä silmämääräisellä havainnoinnilla osana huoltoa ja kunnossapitoa.



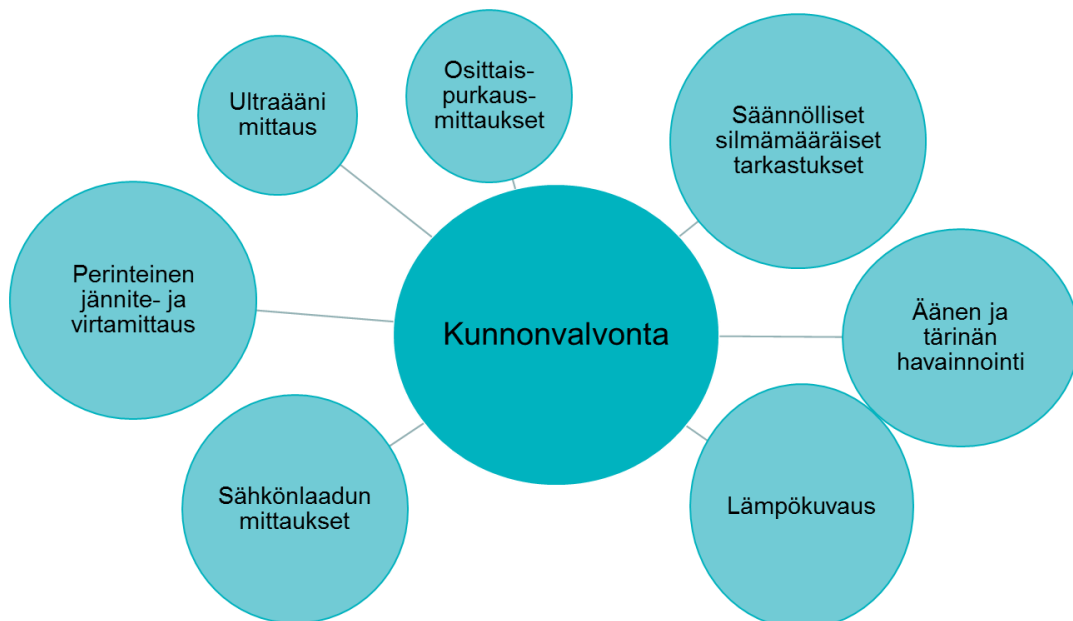
Kuva 93. Sähköpaloja edeltäviä ilmiöitä ja niiden havainnointi.

Osa kuvatuista muutoksista liitoksissa on sellaisia, että liitos tai sen läheiset eristerakenteet ovat jo ehtineet vaurioitua niin pahasti, että ainoa oikea tapa on korvata vioittuneet johtimet ja komponentit. Vaurioitunut eristerakenne on aina potentiaalinen vikaantumiskohta. Sen sijaan erityisesti liitoksen lämpenemiseen, ääniin ja värinään liittyvät ilmiöt ovat huomattavasti vaikeampi havaita aistinvaraisin menetelmin, ja niiden osalta on lähes pakko turvautua erilaisiin mittausmenetelmiin.

Tutkimuksessa kokeiltiin useaa eri mittausmenetelmää vikaantuvien liitosten havainnointiin. Kuvassa 94 on esitetty tällä hetkellä olemassa olevia mittausmenetelmiä ja muita kunnonvalvonnan keinoja osana sähköpalojen ennaltaehkäisyä. Osittaispurkausmittaus on käytössä kohtalaisen laajasti suurjännitteellä, mutta se ei sovellu sellaisenaan pienjännitteelle, koska pienjännitteellä osittaispurkaukset eivät ilmene samalla tavalla kuin suurjännitteellä. Ultraäänimittaus sen sijaan toimii myös pienjännitteellä, mutta sen havainnot korkeataajuiset äänet eivät johdu pienjännitekojeistoissa vikaantumispaikesta, jolloin yksittäisten vikaantuneiden liitosten löytäminen on hyvin vaikeaa. Ultraäänimittaus

sen sijaan sopii paremmin vaikeapääsyisiin kohteisiin kuten esimerkiksi loisteputkivalaisimien kuristimien kunnan tarkkailuun korkeissa tiloissa sekä suurjännitemuuntajien sisäisten oikosulkujen paikantamiseen metallirakenteissa hyvin johtuvan äänen vuoksi.

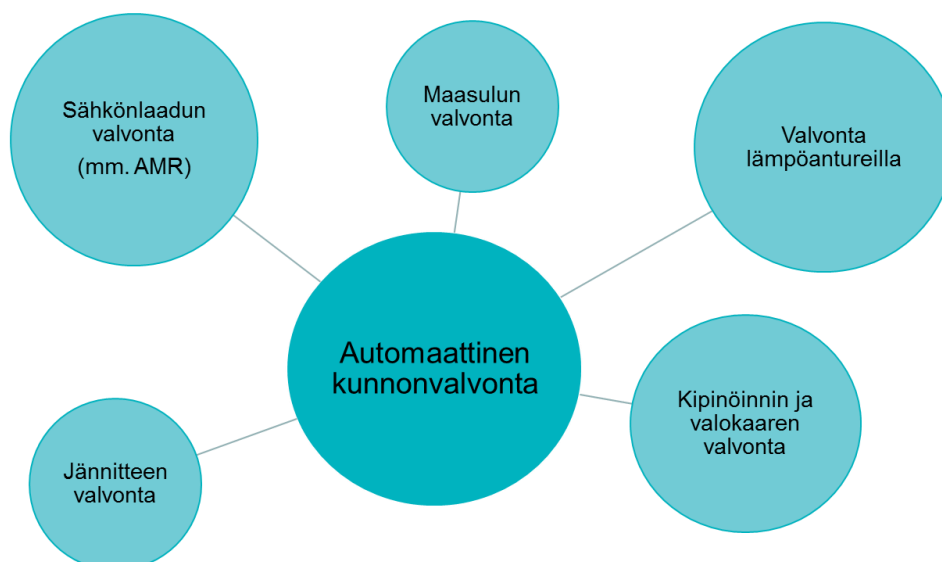
Perinteiset mittausmenetelmät unohdetaan kuitenkin liian usein. Myös tavallisella todelliseen tehollisarvoon perustuvalla virta- ja jännitemittauksella on mahdollista löytää vikaantuvia liitoksia. Saatuja tuloksia on vain osattava tulkita oikein. Esimerkiksi selvästi pienempi jännite yhdellä ryhmän vaiheista saattaa indikoida huonoa liitosta ryhmän syöttöpäässä. Vastaavasti käyttöönottomittauksien yhteydessä muista arvoista eroava oikosulkuvirran arvo voi yhtälailla indikoida huonoa liitosta jossain kohtaa piiriä. Kyseiset ilmiöt aiheuttavat usein myös laitteiden virhetoimintoja, joten vian haku ei saisi perustua koskaan pelkästään komponenttien korvaamiseen uusilla, vaan vikaantumisen syy olisi aina syytä selvittää ja tarvittaessa suorittaa esimerkiksi sähkön laadun mittauksia mahdollisen häiriön juurisyyn löytämiseksi.



Kuva 94. Jakokeskuksen sähköpalojen ennaltaehkäisy kunnonvalvonnan menetelmin.

Tutkimuksessa havaittiin, että edes lämpökuvaus ei poista sähköpalariskiä, jos kuvausta ei tehdä säännöllisesti laitteiston valmistumisesta saakka. Monessa kohteessa oli havaittavissa huonon liitoksen aiheuttama eristerakenteen heikkeneminen sekä liitokseen liittyvissä kaapeleissa että komponenteissa. Näissä kohteissa pelkkä liitoksen uudelleen kiristäminen ei riitä, vaan eristerakenteiltaan silminnähden vaurioituneet kaapeloinnit ja komponentit pitäisi aina korvata uusilla.

Riittävän sähkölaitteistojen huollon ja kunnossapidon kannalta olisikin tärkeää tarkkailla kaikkien jakokeskusten liitosten muutoksia säännöllisesti ja suorittaa ennakoivan kunnossapidon huoltotoimia ennen kuin liitoksissa ja niihin liittyvissä kaapeleissa ja komponenteissa ilmenee suuria kemiallisia muutoksia. Kemialliset muutokset ovat usein peruuttamattomia ja lähes aina sähköteknisiä ominaisuuksia vahingoittavia. On hyvin perusteltua, että lämpökamerakuvaus otettaisiin osaksi säännöllistä sähkölaitteistojen kunnonhallintaa laitteiston rakentamisesta alkaen. Lämpökuvauksen tukena voitaisiin käyttää myös erilaisia automaattisia kunnonvalvonnan keinoja (kuva 95).



Kuva 95. Automaattinen jakokeskusten kunnonvalvonta.

Kuvassa 95 esitetyt menetelmät ovat yleisesti melko hyvin tiedossa AMR-laitteiston ominaisuuksia lukuun ottamatta. Monissa AMR-laitteistoissa olisi mahdollista ohjelmallisesti suojata liittymää sekä turvallisuutta että palovaaraa aiheuttavilta vioilta. Ainakin osassa AMR-laitteistoissa on mahdollista saada automaattinen tieto sulakepaloista, nollavioista ja keskijänniteverkon johdinkatkeamista. Tämän lisäksi laitteistoihin voidaan ohjelmoida automaattinen erotus esimerkiksi epäsymmetriavioissa, jos mittariin on integroitu katkaisulaite. Nollavian indikoinnin avulla ainakin eräs jakeluverkkoyhtiö on löytänyt useita palovaarallisia vikaantumisia pientalojen liittymäkaapeleista. Koska keskeytyksetön ja turvallinen sähkönjakelu on myös jakeluverkkoyhtiöille hyvin tärkeää, kannattaisi AMR-laitteistoja hyödyntää useassa jakeluverkkoyhtiössä myös sähköpalojen ja vikojen havainnoinnissa.

7.6 Jatkotutkimustarpeet

Vaikka tutkimuksessa saatiin hyvin lisätietoa liitosten vikaantumismekanismeista, tutkimuksen tuloksia analysoitaessa heräsi kuitenkin ajatuksia monista jatkotutkimustarpeista. Erityisesti kemiallisten muutosten aiheuttama vikaantuminen ja sen seuraukset herättivät kysymyksiä jatkotutkimustarpeista:

- Millä mekanismilla hiiltynyt (puolijohtava) vikaimpedanssi muodostuu?
- Mitkä erilaiset epäpuhtaudet ja yhdisteet vaikuttavat liitoksen hiiltymiseen ja oksidoitumiseen?
- Kuinka suuri merkitys liitospintojen oksidoitumisella on palovaaralliseen vikaantumiseen?
- Voidaanko eri alkuaineiden esiintymisestä päätellä sähköpalotutkinnassa palon aiheutuneen vikaantuneesta liitoksesta?

Suojaus- ja mittausmenetelmiä Suomessa analysoitaessa uuden palonsuojakatkaisijan toimintaperiaate sekä AMR-laitteistojen parempi hyödyntäminen herättivät ajatuksia jatkotutkimuksia varten:

- Onko mahdollista kehittää pääjohtotason mittausmenetelmä, joka havaitsisi palovaarallisen kipinöinnin aiheuttamat suurtaajuiset häiriöt koko jakokeskuksen alueelta?

- Voidaanko palovaarallisessa vikaantumisessa ilmeneviä suurtaajuisia ilmiöitä hyödyntää esimerkiksi sähkönlaadun analysaattorien mittauksissa?
- Voisiko AMR-laitteiston tietoliikenneyhteyden avulla toteuttaa suurivirtaisissa oikosuluissa, jotka mittalaite rekisteröi, automaattista hälytystoimintoa pelastusviranomaisille?
- Kuinka AMR-laitteiston omia mittauksen analysointimenetelmiä voitaisiin ylipäätään hyödyntää lisää sähköpalojen rajaamiseksi?

Mielenkiintoista olisi myös analysoida sähköalan standardien ja määräysten muutosten vaikutusta sähköturvallisuuden tasoon ja sähköpalojen esiintyvyyteen. Varsinkin, jos tulevaisuus tuo muutoksia kohti järjestelmällisempää ja laajempaa sähkölaitteistojen huolenpitoa, olisi muutoksen seurauksia syytä tutkia niiden yhteiskunnallisten merkitysten takia.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPIDESUOSITUKSET

Tutkimuksen tulosten mukaan on olemassa monia teknisiä ratkaisuja, joiden avulla sähköpaloja voidaan ennaltaehkäistä, rajata ja niistä syntyviä vahinkoja pienentää tuntuvasti. On kuitenkin huomattava, että riski sähköpaloille on olemassa aina myös inhimillisen virheen, osaamattomuuden tai tietämättömyyden seurauksena. Sen vuoksi pienentääksemme jakokeskuksista alkunsa saavia sähköpaloja on meidän vaikutettava koko tuotantoketjuun komponenttivalmistajasta sähkölaitteiston haltijaan ja sähköalan työntekijöiden koulutukseen.

Tutkimuksen tuloksena on laadittu toimenpideohjeistukset sähköalan eri osa-alueille sähköisten liitosten vikaantumisesta johtuvien sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi ja vähentämiseksi. Ohjeistukset ovat suositusluontoisia ja siten sovellettavissa eri toimintaympäristöihin. Ohjeistukset on esitetty tutkimuksen liitteissä 6–15, ja ne käsittelevät jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisyä sähkösuunnittelijoiden, jakokeskusvalmistajien, komponenttivalmistajien, sähköurakoitsijoiden, huolto ja kunnossapitoyritysten, sähkölaitteistojen haltijoiden, jakeluverkkoyhtiöiden, paloviranomaisten, sähkölaitteistotarkastajien sekä sähköalan opetuksen kannalta.

Lisäksi parhainkaan tekninen ratkaisu tai osaaminen ei takaa sähkölaitteiston säilymistä toimintakykyisenä ja turvallisena ilman säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa. Sähköiset liitokset eivät lähtökohtaisesti ole epäluotettavia, mutta niiden runsaus sähkölaitteistoissa lisää potentiaalisten vikaantumiskohtien määrää tuntuvasti. Tämän vuoksi säännöllinen liitosten tarkkailu, lämpökuvaukset ja liitosten systemaattinen jälkikiristys olisivat parhaimpia keinoja estää liitoksista johtuvia sähköpaloja.

Tutkimuksen perusteella säännönmukaiselle kunnossapidolle olisi olemassa perusteltu tarve ja kansantaloudellinen merkitys – aiheuttavathan sähköpalot vuosittain arviolta jo yli 70 miljoonan euron korvausmenot. Ikääntyvä rakennuskantamme, jonka sähkölaitteistot alkavat olla erityisesti 50-luvulla rakennettujen laitteistojen osalta teknisen käyttöikänsä lopussa, asettaa jatkossa haasteita sähköturvallisuuden ylläpitämiselle. Sähkölaitteistojen kunnossapitoon liittyviä ohjeita on ollut Suomessa mukana mm. SFS 6000 pienjännitesähköasennusstandardissa jo useamman vuoden, mutta laitteistojen kunnossapito ei ole kehittynyt toivotusti. Tämä oikeuttaisi mielestäni tarkentamaan sähkölaitteiston haltijan vastuuta ja velvoitetta säännöllinen kunnossapidon järjestämisestä jopa sähköturvallisuuslakiin, jolloin kunnossapidon tärkeyttä ei voitaisi enää väheksyä.

LÄHTEET

ABB Ab. 2010. Guidelines for Contactor inspection and maintenance: A/AF-line and EH/EK series Contactors. Manual. Västerås, Sweden. ABB Ab, Cewe-Control. 16 p.

ABB Oy. 2003. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa. 626 s.

ABB Oy. 2011. Kahvasulakkeet, 2...1600A. Pienjännitekojeet. Tuote-esite. Vaasa. 52 s.

ABB Oy. 2012. MNS-pienjännitekojeisto: Turvallista sähkönjakelua. Tuote-esite. Vaasa. 20 s.

ABB Sace. 2006. Technical Application Papers: ABB circuit-breakers inside LV switchboards. Vol. 4. Technical guide. Bergamo, Italy. 56 p.

ABB Sace. 2010. Electrical installation handbook: Protection, control and electrical devices. Technical guide. Bergamo, Italy. 6th edition. 548 p.

Aromaa, Jari. 1987. Sähkökemiallisten mittausmenetelmien käyttö korroosionestotekniikassa. Raportti. Espoo. 6. painos. ISBN 951-754-288-7. 165 s.

Aspelin S. 2011. Sähkökomponenttien lämpökuvaus. Opinnäytetyö. Helsinki, Metropolia ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 49 s.

Beland B. 1982. Heating of damaged conductors. Fire Technology, vol. 18, num. 3, p. 229-236.

Chase W. G. & Moore H.K. 1959. A Brief Survey of Exploding Wire Research. Exploding Wires, vol. 1. New York. Plenum Press. p. 7-16.

Fluke Corporation. [WWW]. [viitattu 2.7.2014]. Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/sovellukset/lampokuvaus/lampokuvaus-sahkonjaku.html>.

Granqvist, P., Nurmi, V-P & Nenonen, A. 2006. Eläintilojen sähkö- ja paloturvallisuus. Tukes-julkaisu 2/2006. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 66 s.

Granqvist, P., Nenonen A. & Nurmi, V-P. 2007. Viljatilojen sähkö- ja paloturvallisuus. Tukes-julkaisu. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 76 s.

Hatakka, Valkeinen & Huurinainen. 2014. Sähkölaitteistoista aiheutuneet tulipalot ja palovaarat Suomessa -esiselvitys. Tukes-julkaisu 1/2014. Helsinki, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 62 s.

Järviö, Jorma & Lehtiö, Taina. 2012 Kunnossapito, tuotanto-omaisuuden hoitaminen 5. painos. ISBN 978-952-99458-8-7. 288 s.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen turvallisuudesta. 17.12.1993/1193.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 5.8.1996/517

Korkalo, J., Hakala, P., Nurmi, V-P, Bergman, V., Kukkonen, P., Salmi, T. & Suomela, T. 2003. Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta. 2. painos. 60 s.

Korkalo, J., Kukkonen, P., Ojala, V-M, & Pekurinen, S. 2003. Perustietoa sähköpaloista. 2. painos. 40 s.

Kukkonen, Pertti. 2014. Sähkölaitteistoasiantuntija, Oy Elspecta Ab. Vantaa. Sähköpostikeskustelu, 18.8.2014.

Laakso, Jarmo. 2014. SEM ja EDS-analyysien tulkinta. Ohje. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, materiaaliopin laitos. Julkaisematon materiaali. 4 s.

Laurila, Tomi. 2009. Materiaalitieteen perusteet. Luentomateriaali. Helsinki, Aalto yliopisto. 193 s.

Lepistö, J. & Valkeinen, H. 2013. Sähkö palon syttymissyynä. Tukes-tutkimusraportti 1/2013. Helsinki, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 39 s.

Lintula, Reijo. 2004. Sähköpetokoulutus: Sähköisten paloriskien tunnistaminen palotarkastuksissa. Julkaisematon materiaali. 21 s.

Malinen, Veijo. 2013. Ultraäänimittaukset >1000V laitteistoissa. Paikallis-Sähkö Oy. Julkaisematon materiaali. 5 s.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1997. Palonsyyn selvittäminen 1. Oppikirja, osa 1. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 951-38-5172-9. 288 s.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1997. Palonsyyn selvittäminen 2. Oppikirja, osa 2. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 951-38-5173-7. 120 s.

Mangs, J. & Keski-Rahkonen, O. 1997. Palonsyyn selvittäminen 3. Oppikirja, osa 3. Toiminta palopaikalla. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. ISBN 951-38-5174-5. 65 s.

Mäkinen, Antti. 2010. Sähköverkon häiriöt ja sähkön laatu. Luentomoniste. 54 s.

Nenonen, Antti & Granqvist, Pertti. 2009. Löysät liitokset sähkökeskuksissa tulipalon aiheuttajina. Helsinki, Turvatekniikan keskus. Julkaisematon materiaali. 14 s.

Nousiainen, Kirsi. Sähköpurkaukset ja sähkökentän vaikutus eristeeseen. 2012. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 7 s.

Nurmi, V-P. 2001. Sähköpalojen riskienhallinta. Väitöskirja. Tukes-julkaisu 3/2001. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 114 s.

Nurmi, V-P. 2005. Palotutkinnan perusteet. 1. painos. Porvoo, Suomen palopäällystöliitto. 86 s.

Nurmi, V-P. Johtaja, Onnettomuustutkintakeskus. Helsinki. Haastattelu 29.8.2014.

Nurmi, V-P, Nenonen, A. & Sjöholm, K. 2005. Sähköpalot Suomessa. Tukes-julkaisu 2/2005. Helsinki, Turvatekniikan keskus. ISBN 952-5095-86-X. 165 s.

Nurmi, V-P, Säaskilahti, V-M, Törmänen, M., Hietaniemi, J., Mangs, J. & Hakkarainen, T. 2001. Sähkölaitteiden palo-ominaisuudet ja sähkölaitteipalojen sammuttaminen. Tukes-julkaisu 1/2001. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 92 s.

Nurmi, V-P, Säaskilahti, V-M, Westersträhle, U. & Hämäläinen, M. 1998. Sähkö palon syttymissyynä. Tukes-tutkimusraportti. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 8/1998. 51 s.

Pelastuslaki 29.4.2011/379

Ristimäki, Raimo. 2014. Jakokeskusasennusten asiantuntija, SGS Fimko Ltd. Helsinki. Sähköpostikeskustelu, 19.3.2014.

Rousku, Henrik. 2014. Sähkölaitteiston lämpökuvaus voi säästää tulipalolta. Promaint kunnossapidon erikoislehti. 5/2014. 52-54 s.

SFS 5490. 2009. Pienjännitevarokkeet. Ammattihenkilöiden käyttöön tarkoitettujen varokkeiden lisävaatimukset (pääasiassa teollisuuskäytön varokkeet). Kahvavarokkeet. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 9 s.

SFS 5855. 2009. Pienjännitevarokkeet. Maallikoiden käyttöön tarkoitettujen varokkeiden lisävaatimukset (pääasiassa kotitalouksiin ja vastaaviin käyttöihin tarkoitettut varokkeet). D-tyypin varokkeet. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 10 s.

SFS 6000-6. 2012. Pienjännitesähköasennukset. Osa 6: Tarkastukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 24 s.

SFS 6000-7-729. 2012. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-729: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Jakokeskusten asentaminen. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 11 s.

SFS-EN 50160. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 25 s.

SFS-EN 60269-1. 2008. Pienjännitevarokkeet. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 32 s.

SFS-EN 61439-1. 2013. Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 254 s.

SFS-käsikirja 59. 2012, Räjähdyksvaarallisten tilojen luokittelu. Palavat nesteet ja kaasut. Helsinki Suomen standardisoimisliitto. 123 s.

Sesko. 26.09.2013. Jakokeskusstandardeja on uusittu. [WWW]. [viitattu 2.7.2014]. Saatavissa: http://www.sesko.fi/portal/fi/ajankohtaista/uudet_julkaisut?bid=765.

Siemens. 2012. Sentron 5SM6 AFD Unit. Technology Primer. 50 s.

Siemens. 2014. Residual Current Protective Devices / Arc Fault Detection Devices. Configuration Manual. 42 s.

Simonen, Seppo. 2009. Sähkölaitteiden ja -tarvikkeiden turvallisuus Suomessa. Tukes-julkaisu 4/2009. Helsinki, Turvatekniikan keskus. 55 s.

Sisäministeriön pelastusosasto. 2001. Palotarkastusohje. SM 2001-1824/Tu-33. Helsinki, Sisäministeriö. 7 s.

Suomalainen M. 2011. Lämpökuvaus sähkökunnossapidossa. Opinnäytetyö. Imatra. Saimaan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 37 s.

ST 51.09. 2013. Sähkötekniset liitokset alle 1000 V vaihtovirta-asennuksissa. ST-kortisto. Espoo, Sähkötieto ry. 9 s.

ST 51.23. 2012. Määräaikaistarkastuksen suorittaminen. ST-kortisto. Espoo, Sähkötieto ry. 13 s.

ST 53.34. 2006. Jakokeskusten suunnittelussa ja valmistuksessa huomioitavia asioita. ST-kortisto. Espoo, Sähkötieto ry. 14 s.

ST 53.62. 2014. Sähkölaitteistojen lämpökuvaus. ST-kortisto. Espoo, Sähkötieto ry. 21 s.

ST 96.0. 2003. Sähkölaitteiston hoito ja kunnossapito. ST-kortisto. Espoo, Sähkötieto ry. 4 s.

ST-käsikirja 34. 2009. Hyvä asennustapa sähkö- ja teletöissä. 2. painos. Espoo, Sähkötieto ry. ISBN 978-952-231-038-5. 155 s.

Sähköturvallisuuslaki 14.6.1996/410.

Yovanovich, M., Culham, J. and Teertstra, J. Calculating Interface Resistance, Electronics Cooling Online. 1997. 9 p.

Vehviläinen, Seppo. 2013. eQL-laatumittauslaitteet. Esite. MX Electrix Oy. 19 s.

Vikström, Ari. 2014. Sähkönlaadun asiantuntija, Saipu Oy. Turku. Sähköpostikeskustelu, 2.9.2014.

LIITE 1: VERKKOKYSELY SÄHKÖISTEN LIITOSTEN VIKAANTUMISESTA

Kyselylomakkeessa on 25 kysymystä. Kysely on laadittu Webropol-kyselyohjelmalla ja kysely on jaettu kolmeen osa-alueeseen:

- Vastaajan perustiedot ja kokemus sähköalalta.
- Kokemukset vikaantumisen aiheuttamista liitoksen tai komponentin epätavallisesta toiminnosta (esim. lämpeneminen, ts. lisääntynyt sähköpaloriski), sähköpalovaarasta (vikaantunut laitteiston osa saattanut palaa, mutta palo ei ole edennyt rakenteisiin) tai sähköpaloista, joissa palo on levinnyt myös muihin rakenteisiin ja aiheuttanut rakennuspalon.
- Jakokeskuksen sisäisten ja ulkoisten ominaisuuksien vaikutus sähköpalojen ja palovaarojen syntyyn.

SÄHKÖISTEN LIITOSTEN JA KOMPONENTTIEN VIKAANTUMINEN JAKOKESKUKSISSA SEKÄ NIISTÄ SEURANNEET SÄHKÖPALOVAARAT JA RAKENNUSPALOT

OSA A PERUSTIEDOT

1. Mihin seuraavista ryhmistä ensisijaisesti kuulutte?
 - a. sähköpalotutkijat (Sähköpeto-projekti)
 - b. valtuutetut sähkölaitteistotarkastajat tai -laitokset
 - c. toiminnanharjoittajan palveluksessa olevat käytönjohtajat
 - d. sivutoimiset käytönjohtajat
 - e. sähkölaitteistojen lämpökuvaajat
 - f. muu, mikä _____ ?
2. Kuinka pitkään olette toimineet sähkölaitteistojen parissa?
 - a. 1-5 vuotta
 - b. 6-15 vuotta
 - c. 16-25 vuotta
 - d. yli 25 vuotta
3. Mitä seuraavista toimenpiteistä te tai yrityksenne käytätte, jos teette tarkastus- tai huoltotoimintaa?
 - a. lämpökuvaus
 - b. virta- ja jänniteanalyysit (sähkönlaadun mittaukset)
 - c. säännölliset silmämääräiset tarkastukset
 - d. lämpöanturilla toteutettu valvonta
 - e. säännöllinen pölyn ja lian poisto jakokeskuksista
 - f. emme tee ennakoivaa kunnossapitoa
 - g. Muu, mikä _____ ?

OSA B SÄHKÖINEN LIITOS TAI KOMPONENTTI ON AIHEUTTANUT VIKAANTUESSAAN LAITTEEN EPÄTAVALLISEN TOIMIMISEN JA LISÄNNYT SÄHKÖPALORISKIÄ TAI AIHEUTTANUT SÄHKÖPALON TAI -PALOVAARAN.

4. Oletteko havainnut, että jokin tietty komponentti vikaantuisi helpommin jakokeskuksissa kuin muut komponenttityypit?
 - a. kontaktorit
 - b. moottorinsuojakytkimet
 - c. lämpöreleet
 - d. riviliittimet
 - e. kytkimet
 - f. sulakkeet
 - g. johdonsuoja-automaatit
 - h. releet
 - i. puolijohteet
 - j. muuntajat
 - k. valaistuksen kytkimet
 - l. valaistuksen säätimet
 - m. komponenttien tyypeillä ei ole ollut merkittäviä eroja
 - n. en osaa sanoa
 - o. muu, mikä _____ ?

5. Oletteko havainnut, että jokin tietyn ikäinen komponentti vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut komponentit?
 - a. 0-10 vuotta
 - b. 11-20 vuotta
 - c. 21-40 vuotta
 - d. yli 40 vuotta
 - e. komponenttien iällä ei ole ollut merkittäviä eroja
 - f. en osaa sanoa

6. Oletteko havainnut, että jokin tietty liitin/liitostyyppi vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut liittimet tai liitokset?
 - a. ruuviliitos
 - b. pulttiliitos (suurivirtaiset liitokset)
 - c. jousiliitos
 - d. kaapelikenkäliitos
 - e. lattapistokeliitos (ns Abiko)
 - f. puristusliitos
 - g. juotettu liitos
 - h. pistoliittimet
 - i. huppuliittimet
 - j. eristyksen läpäisevä liitos (sädöksien vastainen liitostyyppi)
 - k. liitosten tyypeillä ei ole ollut merkittäviä eroja
 - l. en osaa sanoa
 - m. muu, mikä _____ ?

7. Oletteko havainnut, että jokin tietty liittimen tai liitoksen materiaali vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut materiaalit?

- a. alumiini-alumiini (liitin-johdin)
 - b. kupari-kupari
 - c. kupari-alumiini
 - d. alumiini-kupari
 - e. teräs-kupari
 - f. teräs-alumiini
 - g. liitosten materiaaleilla ei ole ollut merkittäviä eroja
 - h. en osaa sanoa
 - i. muu, mikä _____ ?
8. Oletteko havainnut, että jokin tietty johtimen materiaali vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut materiaalit?
- a. kupari
 - b. alumiini
 - c. tinattu kupari
 - d. päällystetty alumiini
 - e. johtimen materiaalilla ei ole ollut merkittäviä eroja
 - f. en osaa sanoa
 - g. muu, mikä _____ ?
9. Oletteko havainnut, että jokin tietty liitettävän johtimen tyyppi vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut johdintyyppit?
- a. yksilankainen johdin (esim MMJ tai ML)
 - b. kerrattu muutamalankainen johdin (esim MKL)
 - c. kerrattu monilankainen johdin (esim MPL)
 - d. kerrattu hienolankainen johdin (esim MKEM)
 - e. johtimen tyypeillä ei ole ollut merkittäviä eroja
 - f. en osaa sanoa
 - g. muu, mikä _____ ?
10. Oletteko havainnut, että jokin tietty piirin suojaustapa olisi alttiimpi piirissä tapahtuville hallitsemattomille vikaantumisille, kuten sähköpaloille ja – palovaroille?
- a. ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutettuina tulppasulakkeilla (<63A)
 - b. ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutettuina kahvasulakkeilla (<63A)
 - c. ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutettuina johdonsuoja-automaateilla (<63A)
 - d. ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutettuina kahvasulakkeilla (>63A)
 - e. ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutettuina kompaktikatkaisijoilla (>63A)
 - f. nopea poiskytkentä toteutettuina vikavirtasuojauksella (<30mA)
 - g. lisäsuojauksella toteutettuina vikavirtasuojauksella (300 tai 500mA)
 - h. suojaustavalla ei ole ollut merkittäviä eroja
 - i. en osaa sanoa
 - j. muu, mikä _____ ?
11. Oletteko havainnut, että jokin tietty asennuksen liitoksissa tehty virhe vikaantuisi jakokeskuksissa selvästi useammin kuin muut virheelliset asennustavat?
- a. alumiinikaapelin oksidi on jäänyt harjaamatta pois
 - b. johdin tai kaapeli on jäänyt käsittelemättä liitosrasvalla

- c. alumiinikaapelin liittoksessa on käytetty liittämiseen sopimatonta cu tai muuta liittintä
- d. liittoksessa ei ole käytetty paineentasausaluslevyä
- e. liitos on kiristetty selvästi suurempaan momenttiin kuin olisi pitänyt
- f. liitos on kiristetty selvästi pienempään momenttiin kuin olisi pitänyt
- g. kyseisillä asennusvirheillä ei ole ollut merkittäviä eroja vikaantumisen kannalta
- h. en osaa sanoa
- i. muu, mikä _____ ?

OSA C ONKO HAVAITTAVISSA JOTAIN EROJA ERILAISTEN JAKOKESKUSTEN VÄLILLÄ, JOISSA TOISEN TYYPPINEN JAKOKESKUS VIKAANTUU HELPOMMIN KUIN MUUT JA ON LISÄNNYT SÄHKÖPALORISKIÄ TAI AIHEUTTANUT SÄHKÖPALON TAI -PALOVAARAN.

12. Oletteko havainnut, että jokin tietyn rakenteen omaava jakokeskus aiheuttaisi selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muut keskustyypit (jaottelu on tehty SFS-EN 61439 mukaan)?
- avorakenteinen keskus
 - etupuolelta suojattu keskus
 - koteloitu keskus
 - kennokeskus
 - monikenttäinen kennokeskus
 - ohjauspulpetti
 - ontelokeskus
 - monikotelokeskus
 - seinälle asennettu pinta-asennettu keskus
 - seinälle syvennykseen asennettu keskus
 - keskusrakenteella ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - en osaa sanoa
 - muu, mikä _____ ?
13. Oletteko havainnut, että jokin tietyn suojausrakenteen omaava jakokeskus aiheuttaisi selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muut keskustyypit
- IP00
 - IP2X
 - IP3X
 - IP4X
 - IP5X
 - IP6X
 - keskusten suojausrakenteella ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - en osaa sanoa
 - muu, mikä _____ ?
14. Oletteko havainnut, että jokin tietyistä materiaalista oleva jakokeskus aiheuttaisi selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muuta materiaalia olevat keskustyypit?
- kevytmetalli keskuksset
 - >2mm metallirakenteiset keskuksset
 - muovikeskuksset
 - keskusten materiaalilla ja lujuudella ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - en osaa sanoa
 - muu, mikä _____ ?
15. Oletteko havainnut, että jokin tiettyyn asennusolosuhteeseen tarkoitettu jakokeskus aiheuttaisi selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muut keskustyypit (ts. onko jakokeskuksen tiiviydellä merkitystä)?

- a. sisäasennukseen tarkoitettu keskus (min IP2X)
- b. ulkoasennukseen tarkoitettu keskus (min IP34)
- c. keskusten tiiviydellä ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
- d. en osaa sanoa
- e. muu, mikä _____ ?

16. Oletteko havainnut, että jokin tietyn ympäristöolosuhteen aiheuttavan selvästi useammin sähköpalovaaran tai -palon kuin muut olosuhteet?

- a. runsaasti esiintyvä pöly
- b. runsaasti esiintyvä kosteus
- c. syövyttävät kemikaalit
- d. suuret lämpötilan vaihtelut (ulkoasennus)
- e. normaali lämpötila (sisäasennus)
- f. keskusten ympäristöolosuhteella ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
- g. en osaa sanoa
- h. muu, mikä _____ ?

17. Oletteko havainnut, että jollain tietyllä toimialalla esiintyisi selvästi useammin jakokeskuksissa tapahtuvia sähköpalovaaroja tai -paloja kuin muilla toimialoilla?

- a. teollisuus
- b. palvelut
- c. maatalous
- d. sähkönjakelu
- e. kiinteistöjakelu
- f. katu- ja pihavalaistus
- g. toimialalla ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
- h. en osaa sanoa
- i. muu, mikä _____ ?

18. Oletteko havainnut, että jollain tietyllä jakokeskusten nimellisvirta-alueella esiintyisi selvästi useammin sähköpalovaaraa tai -paloja kuin muilla nimellisvirran arvoilla?

- a. 0...100A
- b. 101A...250A
- c. 251...630A
- d. 631...2000A
- e. 2001...4000A
- f. >4000A
- g. jakokeskuksen nimellisvirralla ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
- h. en osaa sanoa

19. Oletteko havainnut, että jollain tietyllä vikaantuneen piirin (ryhmän) nimellisvirta-alueella esiintyisi selvästi useammin sähköpalovaaraa tai -paloja kuin muilla nimellisvirran arvoilla?

- a. 0...40 %
- b. 41...75%


- c. 76...100%
 - d. 101...125%
 - e. >126%
 - f. piirien vikaantumisessa nimellisvirralla ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - g. en osaa sanoa
20. Oletteko havainnut, että jollain tietyllä jakokeskusten pääkiskostorakenteella esiintyisi selvästi useammin sähköpaloaavaaraa tai -paloja kuin muilla kiskostorakenteilla?
- a. kuparikiskostolla
 - b. alumiinikiskostolla
 - c. kaapeloidulla kiskostolla
 - d. kiskoston rakenteella ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - e. en osaa sanoa
21. Oletteko havainnut, että tietyn ikäiset jakokeskukset olisivat alttiimpia sähköpaloaaroille tai -paloille kuin muun ikäiset keskukset?
- a. 0...10 vuotta
 - b. 11...25 vuotta
 - c. 26...40 vuotta
 - d. 41...60 vuotta
 - e. >60 vuotta
 - f. jakokeskusten iällä ei ole ollut merkittäviä eroja sähköpalojen osalta
 - g. en osaa sanoa
22. Oletteko havainnut, että uudemmat (alle 10v) vanhat jakokeskusten lämpiäminen eroaisi vanhemmista (yli 10v) keskuksista?
- a. uudet keskukset lämpenevät vähemmän kuin vanhat keskukset
 - b. uudet keskukset lämpenevät enemmän kuin vanhat keskukset
 - c. jakokeskusten iällä ei ole ollut merkittäviä eroja keskusten lämpiämiseen
 - d. en osaa sanoa
23. Oletteko havainneet henkilökohtaisesti suoranaisia syitä tai osaatteko arvioida komponenttien tai liitosten ylikuumenemisvaurioihin ja/tai sähköpaloihin johtaneita tekijöitä?
- a. minulla ei ole henkilökohtaista kokemusta kyseisistä vaurioista enkä osaa arvioida niiden syitä
 - b. muu, mikä _____ ?
24. Mitä muita havaintoja olette tehnyt jakokeskuksissa olevien liitosten vikaantumisissa tms?
- a. minulla ei ole muita havaintoja vikaantumisista
 - b. muu, mikä _____ ?
25. Omaan muutakin lisätietoa tai tutkimusmateriaalia, josta voisi olla hyötyä sähköpalojen ennaltaehkäisevään tutkimukseen ja minuun voi olla yhteydessä asian johdosta.
- a. nimi, yritys, tehtävä, kunta, sähköposti, puhelin _____ ?


LIITE 5: VIKAANTUNEIDEN KOMPONENTTIEN SÄHKÖTEKNISET MITTAUKSET

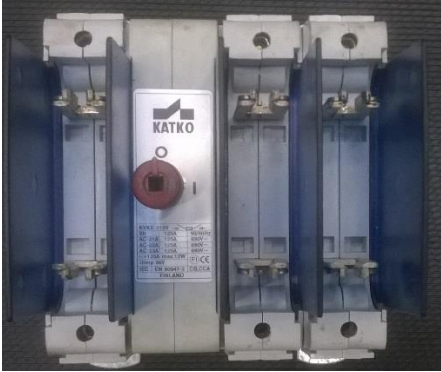
Kappaleen nro	1	Merkki/Malli:
Testikappale:	kontaktori	Allen-Bradley 100-K12*10 A
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
L1	0,02 Ω	
L2	0,08 Ω	
L3	0,02 Ω	
13-14	0,01 Ω	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	> 500 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	

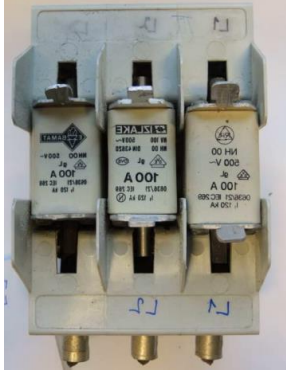
Kappaleen nro	10	Merkki/Malli:
Testikappale:	kontaktori	CL45A300M
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
L1	0,12 Ω	
L2	>2000 Ω	
L3	>2000 Ω	
13-14	-	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	<0,04 MΩ	
L2-PE	0,22 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	0,09 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	


Kappaleen nro	11	Merkki/Malli:
Testikappale:	kontaktori	CL08A300M
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
L1	2,50 Ω	
L2	0,11 Ω	
L3	0,11 Ω	
13-14	-	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	> 500 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	

Kappaleen nro	8	Merkki/Malli:
Testikappale:	liitin	ENSTO KE 62
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
L1	0,02 Ω	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	

Kappaleen nro	4	Merkki/Malli:
Testikappale:	lämpörele	Schneider Electric LRD06
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
L1	0,60 Ω	
L2	0,92 Ω	
L3	0,82 Ω	
96-97	-	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	54,1 Ω	
L2-L3	4,45 Ω	
L3-L1	60,6 Ω	

Kappaleen nro	5	Merkki/Malli:
Testikappale:	kytkinvaroke	Katko KVKE 3125
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
Vaihe	ylä- / alaliitokset	
L1	0,40 / 0,53 Ω	
L2	0,50 / 1,01 Ω	
L3	0,38 / 0,03 Ω	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	> 500 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	

Kappaleen nro	6	Merkki/Malli:
Testikappale:	varokealusta	
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
vaihe	koko liitoksen yli	
L1	0,00 Ω	
L2	0,00 Ω	
L3	0,00 Ω	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	> 500 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	

Kappaleen nro	7	Merkki/Malli:
Testikappale:	varokealusta	ei tiedossa
Ylimenovastus [200mA / 4...24VDC]		
vaihe	koko liitoksen yli	
L1	0,00 Ω	
L2	0,00 Ω	
L3	0,00 Ω	
Eristysresistanssi [500 VAC]		
L1-PE	> 500 MΩ	
L2-PE	> 500 MΩ	
L3-PE	> 500 MΩ	
L1-L2	> 500 MΩ	
L2-L3	> 500 MΩ	
L3-L1	> 500 MΩ	

LIITE 6: TOIMENPIDESUOSITUS: SÄHKÖSUUNNITTELU

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Sähkölaitteistojen ja jakokeskusten suunnittelussa tulisi ottaa huomioon seuraavat seikat:

- Sähkösuunnittelijan tulisi ottaa selville heti suunnittelua aloittaessaan kyseisen liittymäpisteen suurimman (I_{k3}) ja pienimmän (I_{k1}) oikosulkuvirran arvot sähkölaitteiston mitoittamista varten.
- Erityisesti suurimman oikosulkuvirran arvo vaikuttaa mitoittettavien keskusten oikosulkukestovaatimukseen (I_{cw}). Säädösten mukaan jakokeskusten oikosulkuvirta-arvoa ei tarvitse ilmoittaa, jos se on alle 10 kA, mutta tuolloinkin olisi hyvä ilmoittaa arvo esimerkiksi merkinnällä <10 kA.
- Jakokeskusten rakenne tulisi suunnitella valitsevien oikosulkuvirtaolosuhteiden mukaan ottaen huomioon laitteistoon asennettavien suojalaitteiden oikosulkuvirran katkaisukyky.
- Suunniteltaessa sähkölaitteistoa tulisi suunnittelijan mitoittaa jakokeskukset ja niiden ryhmät toimimaan vähintään 10 % alle nimellisteholla ja -virtalla.
- Suunnittelun yhteydessä olisi suositeltavaa käyttää ST 53.34 mukaista keskusten perustietolomaketta, joka ohjaa kestävän ja johdonmukaisen kokonaisratkaisun määrittämiseen tilaajan ja keskusvalmistajan välillä.

Sähkösuunnittelijan tulisi käyttää apunaan komponentti- ja laitevalmistajien mitoitus-taulukoita. Jakokeskuksen mitoittamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

- ryhmien koko ja kuormien tyyppi (valaistus, lämmitys, yms.)
- komponenttien jatkuva ja hetkellinen nimellisvirta
- komponenttien oikosulkukestoisuus, jossa myös etukojeen virtaa rajoittava vaikutus on huomioitava
- selektiivisyys eri suojalaitteiden välillä. Suojalaitteiden keskinäinen selektiivisyys ei toteudu aina valitsemalla yhtä nimellisarvoa suurempi suojalaite, vaan selektiivisyyttä tulisi tarkastella suojalaitteiden I^2t -arvojen kautta.

Jakokeskuksiin liitettävien kaapelointien osalta olisi mitoituksessa varmistuttava ainakin siitä, että:

- kaapeloinnit kestävät esiintyvät kuormitusvirrat kuumenematta liikaa
- kaapelointi on suunniteltu alustavasti sille oletettujen mekaanisten ja ilmastollisten rasitusten mukaisesti
- kaapeleissa aiheutuvat jännitteenalenemat pysyvät suositusten alapuolella.

Suosituksot kompensointijärjestelmien mitoittamiseksi:

- Kompensointijärjestelmille olisi suositeltavaa varata uudisrakennuksissa rakentamisaikavaiheessa ainoastaan riittävät kahvavarokelähdöt.
- Kompensoinnin tarkka mitoittaminen olisi järkevämpää tehdä laitteiston käyttöönoton jälkeen sähkönlaatumittausten perusteella.

Lähteet

ST 53.34 Jakokeskuksen suunnittelussa ja valmistuksessa huomioitavia asioita
SFS-EN 61439-1 Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset
ABB Oy. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirjan luku 7: Oikosulkusuojaus

LIITE 7: TOIMENPIDESUOSITUS: KESKUSVALMISTUS

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Jakokeskusten valmistuksessa tulisi ottaa huomioon seuraavat asiat:

- Jokaisen asennettavan komponentin asennusohjeet tulee ottaa huomioon. Ohjeissa määritellään usein komponentin suurin sallittu nimellisvirta ja käyttöaika sekä suurin sallittu jatkuva (24 h/vrk) kuormitusvirta. Lisäksi määritellään asennus- ja suojaetäisyydet muihin komponentteihin, komponentin lämpenemä nimellisteholla ja oikosulkuvirtakestoisuus.
- Koteloiden lämpöjohtuminen ja rakenteiden riittävä jäähtyvyys tulisi todentaa.
- Keskuksen sähköisiin liitoksiin kohdistuvat kuljetuksen ja rakentamisen aiheuttamat mekaaniset rasitukset tulee ottaa riittävän hyvin huomioon, jotta keskuksen rakenne ja erityisesti kiskostojen ja kaapeleiden läpivientien läpilyöntiominaisuudet eivät heikkene.
- Keskuksen rakenteen tulisi kestää myös vikatilanteessa tapahtuva ylikuumentuminen ja mahdollinen valokaari.
- Jakokeskuksen sisäinen osastointi lisää työturvallisuutta erityisesti jännitetöissä.

Keskuksen suojausten toiminta, toimivuus ja mekaaninen kestävyys tulisi täyttyä myös oikosulkutilanteissa, ja sen vuoksi esimerkiksi:

- Ohjaus ja päävirtapiirit tulisi sijoittaa erilleen toisistaan, vaikka ne toimisivat samalla jännitetasolla.
- Kaapeleiden ja kiskojen tuennan ja kiinnityksen tulisi kestää myös oikosulun aiheuttamat mekaaniset voimat.
- Katkaisijoiden ja suojalaitteiden ominaisuudet oikosulkutilanteessa tulisi ottaa huomioon. Esimerkiksi osa katkaisijoista purkaa katkaisussa syntyvän valokaaren yläpuolelleen, jolloin katkaisijan yläpuolelle ei saa asentaa muita komponentteja ja/tai kiskostoja.
- Komponenttien oikosulkukestoisuus tulee lisäksi valita lopullisen sähköverkon ominaisuuksien (I_{3k} usein määräävä tekijä) tai virtaa rajoittavien etukojeiden mukaan (esimerkiksi oikosulkukestoisuusluokat 6 kA, 10 kA, jne.).

Jakokeskusvalmistuksen yleisimmät asennus- ja mitoitusvirheet:

- Keskuksen sisäisten ja ulkoisten läpivientien liian pieni ilmaväli tai rakenteen vaurioituminen kuljetuksen ja/tai asennuksen yhteydessä voi aiheuttaa maasulun.
- Liian kireälle asennetut johtimet joutuvat mekaanisen rasituksen kohteeksi, ja johtimen vaipan eristystason heikkeneminen voi aiheuttaa oiko-/maasulun.
- Komponentin oma passiivinen jäähtytys ei toteudu, koska komponentti on asennettu vastoin asennusohjeita esimerkiksi vaakasuoraan.
- Keskuksen sisäinen johdotus tehdään asennettavan suojalaitteen mukaan sen sijaan, että piirissä huomioitaisiin suojalaitteen rakenteen suurin sallittu kuormitusvirta. Esimerkiksi asennettaessa gG16A-tulppasulaketta ei oteta huomioon suojalaitteen pitimen suurinta sallittua nimellisvirtaa (K2-sulakepohjalla 25 A).

Lähteet

ST 53.34 Jakokeskuksen suunnittelussa ja valmistuksessa huomioitavia asioita
SFS-EN 61439-1 Pienjännitekeskukset. Osa 1: Yleisvaatimukset
ABB MNS-pienjännitekojeisto: Turvallista sähkönjakelua

LIITE 8: TOIMENPIDESUOSITUS: KOMPONENTTIVALMISTUS

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Komponenttien ominaisuuksissa tulisi ottaa huomioon, että

- komponentin liitosrakenne ei aukea mekaanisen tärinän voimasta itsestään.
- kiristettäessä oikeaan momenttiin liitokseen muodostuu vastamomentti, joka joustaa lämpötilavaihteluiden mukana ja pitää puristuspaineen suhteellisen vakiona.
- ilmankierto komponentin ympäri ja/tai läpi on järjestetty komponenttia jäähdyttävästi.

Komponenttivalmistajien tulisi ilmaista ohjeissaan selkeämmin

- komponenttien sallitut asennussuunnat (pysty, vaaka), asennusetäisyydet sekä ilmankierron ja jäähdytyksen järjestelyt
- suurimmat sallitut kiristysmomentit ja suositellut työkalut liitosten kiristämiseen
- kuormitusten korjauskertoimet ympäristön lämpötilaan nähden
- suositukset enimmäismäärälle rinnakkaisasennuksessa, kun komponenttien kuormitus on nimellisvirta-alueellaan
- ohjeet komponenttien puhdistamisesta
- suositellut vaihto- ja huoltovälit sekä suurin sallittu käyttöaika tai käyttökerrat (esimerkiksi kontaktoreille).

Yleisimmät komponentin vikaantumiseen vaikuttavat ominaisuudet ovat:

- komponentin väärä asennustapa
- väärin työkalujen tai työmenetelmien käyttö
- komponentin liitoksen löystyminen
- komponenttiryhmän ylikuumentuminen
- ruuviliitännäisen komponentin liitoksen löystyminen, jos liitinrakenne ei muokaudu liitoksen ja liitetyn johtimen lämpötilamuutoksiin.

Lähteet

ABB Electrical installation handbook: Protection, control and electrical devices

ABB Guidelines for Contactor inspection and maintenance: A/AF-line and EH/EK series Contactors

ABB Technical Application Papers: ABB circuit-breakers inside LV switchboards

LIITE 9: TOIMENPIDESUOSITUS: SÄHKÖURAKOINTI

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Jakokeskusten sähköasennuksissa huomioon otettavia asioita:

- Sähkölaitteisto tulee tarkastaa aina ennen laitteiston käyttöönottoa SFS 6000 -standardin osan 6 sekä kohteen sähkötyöselostuksen vaatimusten mukaisesti.
- Jos liitoksia tehdään vanhoihin johtimiin, on johtimien eristeiden eheys varmistettava, ja puutteiden ilmetessä eristeissä johtimet on korvattava uusilla. Esimerkiksi nousujohtosaneerauksissa keskusten vaihdon yhteydessä tulee huolehtia vanhojen, käyttöön jäävien johtimien kytkennöistä asianmukaisesti. Mahdollisten jatkoksiin käytettyjen liittimien tulee olla 400 VAC-asennuksiin tarkoitettuja, eikä keskusten sisälle tule jättää irtoliittimiä.
- Käytettäviä asennustarvikkeita ei tulisi säilyttää kosteissa tiloissa ennen asennusten suorittamista.
- Liitos tulisi aina valmistella vasta juuri ennen asennusta, jotta vältettäisiin epäpuhtauksien siirtyminen liitokseen.
- Ennen jakokeskuksen asennusta tulisi tilan ja ympäristön sopivuus tarkistaa ja verrata jakokeskuksen koteloinnin soveltuvuutta kyseiseen tilaan.
- Erityisesti suurivirtaisten liitosten osalta tulisi tarkistaa, että kosteus ei pääse vaikuttamaan kaapeliin, liitos kestää termisesti ja dynaamisesti kaapelin sallitut kuormitus- ja oikosulkurasitukset ja että liitos kestää asennuspaikan ulkoiset kemialliset ja mekaaniset rasitukset.
- Liitokset tulee kiristää aina valmistajan ohjeiden mukaisesti oikeaan momenttiin ja useiden kiinnityskohtien tapauksessa liitos tulee myös kiristää oikeassa järjestyksessä.

Yleisimmät virheet jakokeskusten sähköasennuksissa:

- väärin asennusmenetelmien ja työkalujen tai yhteensopimattomien komponenttien käyttö
- liian pienen tai suuren kiristysmomentin käyttö
- suojalaitteiden asettelun tai suojauksen toiminnan todentamisen tekemättä jättäminen, jolloin ei voida olla varmoja suojauksen toiminnasta vikatilanteessa
- liitoksen, komponentin tai kaapelin vaurioituminen asennuksen yhteydessä, jolloin heikentynyt eristyskyky voi aiheuttaa vikaantumisen myös myöhemmin.

Lähteet

SFS 6000-6 Pienjännitesähköasennukset. Osa 6: Tarkastukset

ST 51.09 Sähkötekniset liitokset alle 1000 V vaihtovirta-asennuksissa

ST-käsikirja 34: Hyvä asennustapa sähkö- ja teletöissä

LIITE 10: TOIMENPIDESUOSITUS: HUOLTO JA KUNNOSSAPITO

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Sähkölaitteistojen ja jakokeskusten kunnossapidossa ja huollossa tulisi ottaa huomioon seuraavat asiat:

- Sähkölaitteistoihin ja jakokeskuksiin kohdistuvia huolto ja kunnossapitotöitä saa tehdä vain sähköalan ammattilainen pois lukien erikseen määritellyt vaarattomat huoltotyöt, kuten esimerkiksi sähkötilojen siivous sähköalan ammattilaisen opastaman henkilön toimesta.
- Sähkötilojen kulkuteiden on oltava esteettömiä eikä sähkötiloissa varastoida sinne kuulumatonta palokuormaa. Jos sähkötiloissa varastoidaan sinne kuuluvia tarvikkeita, ne eivät saa lisätä syttymisvaaraa eivätkä haitata laitteiston huoltoa ja kunnossapitoa.
- Jakokeskusten komponenteille on suositeltavaa tehdä säännöllinen aistinvarainen tarkastus ja erityisesti suurivirtaisen jakokeskusten ja ryhmien osalta myös kohdennettu lämpökuvauus.
- Keskuksen yleisen kunnan aistinvarainen tarkastus (esim. tiiviyn, puhtauden ja oikean käytön tarkkailu) tulisi suorittaa säännöllisesti.
- Jakokeskusten kuormitusten jakautumista ja muutoksia tulisi tarkkailla.
- Tasaisesta ja esteettömästä ilmankierrosta jakokeskuksissa ja tilojen sekä koteloiden ilmansuodattimien säännöllinen huollosta tai vaihdosta on huolehdittava.
- Jakokeskusten sisäosat ja pinnat tulisi puhdistaa pölystä ja muista epäpuhtauksista riittävän usein.
- Vaihtelevien kuormien, joissa kuormia ohjataan rele- ja kontaktorilähdöillä, osalta olisi suositeltavaa tarkistaa kaikkien ruuviliitosten kireys viiden vuoden välein.

Yleisimmät virheet jakokeskusten kunnossapidossa ja huollossa:

- Aistinvarainen tarkkailu laiminlyödään joko osittain tai kokonaan, jolloin komponenttien ja laitteistojen vikaantumista ei huomata ajoissa.
- Pölyn ja lian poisto jakokeskusten sisältä laiminlyödään.
- Komponenttien tai liitosten vikaantuessa niin, että eristeet sulavat kokonaan tai osittain, vaihdetaan vain vikaantunut komponentti tai liitos, kun kaikki vaurioituneet kaapelit, johtimet ja komponentit tulisi vaihtaa.

Lähteet

ST 96.01 Sähkölaitteiston hoito ja kunnossapito

LIITE 11: TOIMENPIDESUOSITUS: SÄHKÖLAITTEISTOJEN HALTIJAT

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Yleistä sähkölaitteiston haltijan vastuista:

- Sähkölaitteiston haltijan on käyttäessään ja hoitaessaan hallitsemaansa sähkölaitteistoa huolehdittava siitä, että suojaus sähköiskulta ja palovaaralta säilyy.
- Sähköturvallisuuslaki edellyttää, että sähkölaitteistoja on käytettävän niin, että niistä ei aiheudu vaaraa hengelle, terveydelle tai omaisuudelle, eikä niistä saa aiheutua kohtuutonta häiriötä. Niiden toiminta ei myöskään saa häiriintyä helposti.
- Kauppa- ja teollisuusministeriön sähkölaitteistojen käyttöönottoa ja käyttöä koskevan päätöksen mukaan sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava siitä, että havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti.
- Sähkölaitteistoluokkien 2 ja 3 sähkölaitteistojen suoja-, turva- ja vastaavien järjestelmien määrävälein tehtävää huoltoa vaativia osia varten on laadittava ennalta hoito- ja kunnossapito-ohjelma. Sähkölaitteistoluokan 1 laitteistoissa erillinen huolto ja kunnossapitosuunnitelma voidaan korvata laitteiden käyttö- ja huolto-ohjeilla.

Sähkölaitteistojen ja jakokeskusten haltijoiden on huolehdittava:

- sähkölaitteiston säännöllisestä huollosta ja kunnossapidosta
- viranomastarkastuksista ja niiden tilaamisesta, kuten: sähkölaitteiston määräaikaistarkastukset, palotarkastukset sekä hissien- ja nosto-ovien tarkastukset.

Sähkölaitteiston haltija vastaa laitteistonsa turvallisuudesta. On huolehdittava esimerkiksi, että:

- sähkötilojen ilmanvaihto on riittävä
- sähkötiloissa ei varastoida sinne kuulumatonta palokuormaa. Jos sähkötiloissa varastoidaan sinne kuuluvia tarvikkeita, ne eivät saa lisätä syttymisvaaraa eivätkä haitata laitteiston huoltoa ja kunnossapitoa.
- sähkötilojen palo-osioinnin tiiviyyden tulee olla kunnossa (palokatkot).
- sähkölaitteistojen asennustöitä kiinteistössä saa tehdä vain sähköalan ammattilaiset.
- monet sähkölaitteiston vikaantumisesta varoittavat ilmiöt, kuten vieraat hajut, äänet, värinä, tummentumat ja laitteistojen väärä toiminta voi olla havaittavissa myös maallikon toimesta, mutta varsinainen vian selvitys on aina jätettävä sähköalan ammattilaisen tehtäväksi.

Sähkölaitteiston haltijan ei ole pakko huolehtia itse kaikkien velvollisuuksien toteuttamisesta, vaan haltija voi valtuuttaa esimerkiksi ulkopuolisen kunnossapitoyrityksen huolehtimaan sähkölaitteiston huollosta ja kunnossapidosta.

Lähteet

Sähköturvallisuuslaki STL 410/96

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös 517/96: Sähkölaitteistojen käyttöönotto ja käyttö

ST 96.01 Sähkölaitteiston hoito ja kunnossapito

LIITE 12: TOIMENPIDESUOSITUS: JAKELUVERKKOYHTIÖT

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Jakeluverkkoyhtiöiden olisi suositeltavaa omassa toiminnassaan huolehtia, että:

- Liitettäessä sähkölaitteistoja verkkoon sähkölaitteiston urakoitsija on suorittanut käyttöönottotarkastuksen ennen kuin laitteisto liitetään sähköverkkoon.
- Kun sähkölaitteisto liitetään verkkoon, laitteiston liittymäkohdassa potentiaalitasaus on toteutettu säädösten ja määräysten mukaisesti sekä laitteistoon liittyvät metalliset osat on kytketty maadoituselektrodin kautta maapotentiaaliin.
- Käyttämättömien mittauskenttien johtimet on erotettu ja kosketussuojattu.
- Lähellä suurtehoisia muuntajia jakokeskuksen oikosulkuvirtakestoisuus ei alitu. Tämä tulisi varmistaa ennen laitteiston liittämistä verkkoon. Verkon oikosulkuvirtojen mitoituslaskelmia voisi verrata laitteiston arvokilven kanssa.
- Verkonhaltija ylläpitää rekisteriään sähkölaitteistojen määräaikais- ja varmenustarkastusten osalta.

AMR-laitteistojen hyödyntäminen sähkölaitteistojen turvallisuutta lisäävien ja paloriskiä pienentävien keinojen osalta:

- AMR-laitteistojen kautta saatava tieto verkossa olevista häiriötilanteista voitaisiin ottaa laajemmin käyttöön, jonka avulla voidaan päästä kiinni verkossa komponenteille häiriötä ja palovaaraa aiheuttaviin ilmiöihin.
- Nollavikaindikointi tulisi ottaa käyttöön kaikissa ilmajohtojen varsilla olevissa kiinteistöissä. Tällöin AMR-laitteistolla voitaisiin löytää jakeluverkon johtolähtöjen vikaantuneita liitoksia, jotka voisivat aiheuttaa sähköiskun vaaran, keskeytyksen tai palovaaran.
- Loistehon ylikompensointi ja yliaallot lisäävät merkittävästi sähköpaloriskiä, joten jakeluverkkoyhtiöiden olisi perusteltua puuttua tiukemmin laitteistonhaltijoiden jakeluverkkoon aiheuttamiin häiriöihin.

Lähteet

Vehviläinen, Seppo. MX Electrix Oy: eQL-laatumittauslaitteet

LIITE 13: TOIMENPIDESUOSITUS: SÄHKÖLAITTEISTOTARKASTAJAT

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Sähkölaitteistotarkastuksessa olisi suositeltavaa käyttää riskiperustaista otantaa laitteistoja tarkastettaessa. Henkilö- ja paloturvallisuutta ajatellen tulisi tarkastuksessa painottaa tiloja, joissa vikaantuminen voi aiheuttaa suurinta vahinkoa. Tällaisia sähkölaitteiston osia ovat muun muassa pää- ja jakokeskustilat, muuntamot sekä loistehon kompensointi- ja ilmanvaihtolaitteistot. Lisäksi palovaaran kannalta erittäin merkittäviä ovat myös palo- ja räjähdysvaaralliset tilat sekä muut erikoistilat, joissa vikaantuminen voi aiheuttaa merkittäviä vaaratilanteita.

Sähkölaitteistojen määräaika- ja varmennustarkastuksissa tulisi kiinnittää huomiota jakokeskusten osalta seuraaviin asioihin:

- Onko suojalaitteet ja niiden asettelu sekä komponentit, johdot ja kuormat valittu keskenään oikein ja onko asennusympäristön (esim. lämpö, jäähtyminen) erityisolosuhteet otettu huomioon?
- Laitteistosta tulisi varmistaa mittaamalla, että suojalaitteet kytkevät oikosulun pois enintään viidessä sekunnissa, ellei vikasuojaus edellytä nopeampaa toimintaa.
- Jokainen jakokeskuksen kenno olisi suositeltavaa tarkistaa silmämääräisesti virheellisten tai vikaantuneiden liitosten löytämiseksi.
- Esiintyykö laitteistossa epätavallista lämpenemistä ja mistä lämpeneminen johtuu?
- Onko laitteiston ikääntymisellä ja/tai virheellisellä käytöllä vaikutusta paloturvallisuuteen?

Edellisten lisäksi tarkastuksissa tulisi kiinnittää huomio ympäristön ja laitteiden asennustavan vaikutukseen palovaaran osalta, kuten millaiset ovat ympäristön

- jäähtymisolosuhteita huonontavat tekijät (pölyyntyminen, likaantuminen ja muut tekijät)
- sähkölämpölaiteiden kunto, asennus, käyttö ja soveltuvuus olosuhteisiin ja käyttötarkoitukseen sekä ylikuumenemissuojien mahdollinen toimimattomuus
- valaisimien ja niihin kuuluvien laitteiden asennus palovaaran kannalta, esim. halogeenivalaisimet ja niiden liitäntälaitteet
- palon ja palokaasujen leviämisen minimointiin käytettyjen ratkaisujen (palokatkot) toimimattomuus
- yllilämmön poistojärjestelmän toimimattomuus (puhaltimet, ilma-aukot, termostaatit)
- vastoin valmistajien ohjeita suoritettavat asennukset ja käyttö
- tarpeeton palokuorma, kuten sähkötiloihin ja kaapelihyllyille varastoidut syttyvät ja palavat tarvikkeet
- laitteiston tai sen komponenttien riittämätön oikosulkukestoisuus tai -suojaus.

Lähteet:

ST 51.23 Määräaikaistarkastuksen suorittaminen

LIITE 14: TOIMENPIDESUOSITUS: PALOTARKASTAJAT

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Yleistä palotarkastusten suorittamisesta sähkölaitteistojen kannalta:

- Pelastuslain muutoksen myötä palotarkastukset muuttuivat osittain riskiarviointiperusteisiksi, jolloin jo kyseisen kiinteistön riskejä arvioitaessa olisi erittäin tärkeää kiinnittää huomiota myös sähkölaitteistojen riskeihin.
- Valvontasuunnitelmassa on määritettävä suoritettavat palotarkastukset ja muut valvontatoimenpiteet sekä kuvattava, miten valvontasuunnitelman toteutumista arvioidaan. Riskialttiiden rakennusryhmien sähkölaitteistotilojen palotarkastusten tarkastusväliksi suositellaan tapauskohtaisesti 1–5 vuotta. Sähkölaitteistojen paloriskien kannalta riskialttiimpia kohteita ovat teollisuuden tuotantolaitokset, maatilat, varastohallit ja helposti syttyvää rakennusmateriaalia olevat kiinteistöt.
- Käytettäessä pienikiinteistöille mahdollista omavalvontamenettelyä suositellaan, että kiinteistön haltijaa kehoitetaan tarkkailemaan myös sähköjärjestelmien kuntoa ja korjauttamaan kaikki vaurioituneet sähkökomponentit ja laitteet sähköalan ammattilaisella.
- Omavalvontamenettelyä käytettäessä olisi suositeltavaa lisätä sähkölaitteita käsitteleviin kysymyksiin seuraava kohta: ”Sähkötiloissa ja jakokeskusten välittömässä läheisyydessä ei säilytetä ylimääräistä palokuormaa.”
- Asuinrakennuksissa käyttäjän virheellinen toiminta on edelleen suurin sähköpalojen aiheuttaja. Sen sijaan teollisuudessa, maataloudessa, toimisto- ja muissa rakennuksissa sähkölaitteiston vikaantuminen on suuremmassa roolissa.
- Riskialttiimpia sähkölaitteistojen osia ovat usein puutteellisen huollon ja kunnossapidon vuoksi muuntajat, kompensointilaitteistot ja jakokeskukset.

Palotarkastuksissa havaittavat puutteet sähkölaitteistojen paloturvallisuudessa:

- Jos kiinteistön sähkölaitteistolle vaadittu määräaikaistarkastus on tekemättä tai sen puutteet korjaamatta, suositellaan paloviranomaista antamaan haltijalle aina korjausmääräys ja asetettava toimenpiteelle kohtuullinen määräaika.
- Sähkölaitteistojen kunto ja ylläpito on erityisen tärkeää erityistiloissa, kuten palo- ja räjähdysvaarallisissa sekä ESD- ja lääkintätiloissa.
- Laitteiston kuntoa voi arvioida silmämääräisesti sen yleisen kunnon, eheyden, puhtauden tai laitteistoon kuulumattoman äänen tai hajun perusteella.
- Sähkötilojen osalta palo-osastojen tiiviys ja palo-ovien toimintakunto ovat usein hyvin puutteellisia.

Pelastustoimia helpottavien sähkölaitteistojen asennus - ja tarkastustodistukset, kunnossapitopäiväkirjat tai muut toimintakunnon toteamiseen liittyvät asiakirjat olisi suositeltava käydä läpi tarpeellisilta osin. Pelastustoimintaa helpottavia sähkölaitteistoja ovat mm. merkki- ja turvavalot, palovaroittimet sekä paloilmoin- ja savunpoistolaitteistot. Myös toimintakunto tulisi todeta tarvittaessa pistokokein.

Lähteet:

Pelastuslaki 29.4.2011/379

Sisäministeriön pelastusosasto: Palotarkastusohje SM 2001-1824/Tu-33

Lintula, Reijo. Sähköpetokoulutus: Sähköisten paloriskien tunnistaminen palotarkastuksissa

LIITE 15: TOIMENPIDESUOSITUS: SÄHKÖALAN OPETUS

Toimenpidesuositus jakokeskusten sähköpalojen ennaltaehkäisemiseksi

Sähköalan opetus ammattikouluissa:

- Oikeiden työmenetelmien ja työkalujen käytön tärkeyttä tulisi painottaa. Monet sähkölaitteistojen palovaaralliset vikaantumiset ovat seurausta vääristä ja virheellisistä asennustavoista, komponenteista ja työkalujen käytöstä.
- Keskenään erilaisten liitosmateriaalien (esimerkiksi alumiini ja kupari) käyttöä tulisi ohjeistaa ja harjoitella.
- Oikeaoppisia liitosten valmistusmenetelmiä tulisi ohjeistaa ja harjoitella. Tärkeimpiä harjoittelukohteita ovat oikeiden materiaalien ja työkalujen valinta.
- Liitoksien kiristämisessä tulisi painottaa valmistajan ohjeiden noudattamista ja liitosten kiristämistä oikeaan momenttiin ja useiden kiinnityskohtien tapauksessa myös oikean kiristysjärjestyksen hallitsemista.
- Liitostyypeistä eniten puutteita tällä hetkellä ilmenee puristusliitoksissa, pulttiliitoksissa sekä alumiinikaapeleiden ja -liitosten käsittelyssä ennen liitoksen tekoa.

Sähköalan opetus ammattikorkeakouluissa ja yliopistoissa:

- Opetuksessa suositellaan korostettavaksi esimiesasemassa olevien henkilöiden vastuuta johdettavien henkilöiden työturvallisuudessa ja sähkötöiden suorittamisessa.
- Sähkölaitteiston mitoituksen riittävyttä myös laitteistoon kohdistuvissa vikatilanteissa tulisi korostaa.
- Sähkölaitteistoon kohdistuvien vikatilanteiden laskentaa tulisi ohjeistaa ja harjoitella nykyistä enemmän.
- Keskeisimpien suojalaitteiden ja suojaustapojen tyypillisimpiä käyttötilanteita tulisi ohjeistaa ja harjoitella nykyistä enemmän.

Yleisimmät puutteet valmistuvilla sähköalan opiskelijoilla:

- Mitoitusperiaatteita ei tunneta tarpeeksi hyvin ja niitä ei osata soveltaa.
- Asennuskäytännöt ja työkalujen oikea käyttö on puutteellista.

Lähteet

ST-käsikirja 34: Hyvä asennustapa sähkö- ja teletöissä