

Lämpötilan vaikutus suojalaitteiden toimintaan



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Valkeakoski, Sähkö- ja automaatiotekniikka

Kevät, 2018

Jonne Karjala

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Valkeakoski

Tekijä	Jonne Karjala	Vuosi 2018
Työn nimi	Lämpötilan vaikutus suojalaitteiden toimintaan	
Työn ohjaaja/t	Raine Lehto	

TIIVISTELMÄ

Työ tehtiin Liikennevirastolle ja Winco Oy:lle, joka toimii Länsi- ja Etelä-Suomen alueilla rautateiden sähkörata- ja vahvavirtajärjestelmien kunnossapitäjänä. Tarkoituksena oli selvittää rautatievaihteiden lämmitysjärjestelmään kuuluvien erotusmuuntajakeskusten lämpenemisen vaikutusta lämmitysvastuspiirien suojalaitteisiin, jotka eivät kestä keskusten sisällä kuten on suunniteltu. Tavoitteena oli tutkia lämpötilojen nousua keskusten sisällä, selvittää miten se vaikuttaa sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden toimintaan ja mitä ongelmalle on mahdollista tehdä.

Tutkimus toteutettiin tarkkailemalla lämpötilojen nousua keskusten sisällä erotusmuuntajia kuormitettaessa. Lämpötilojen lisäksi keskuksiin suoritettiin tarvittavat mittaukset, joiden perusteella pohdittiin nykyisten suojalaitteiden soveltuvuutta asennusympäristöönsä. Mittaustulosten vertailu nykyisten suojalaitteiden kanssa tehtiin kaapeleiden suojauksessa huomioiduviin standardeihin, sekä suojalaitteiden valmistajien ohjeisiin perhe-tyen.

Toteutetulla tutkimuksella saatiin toivottua tietoa erotusmuuntajakeskuk- sissa esiintyvistä lämpötiloista, joiden todettiin vaikuttavan alentavasti johdonsuojakatkaisijoiden ja sulakkeiden toiminta- ja sulamisrajavirtoihin. Vaikutuksen aiheuttamaan ongelmaan pohdittiin mahdollisia ratkaisukei- noja ja edellytyksiä niiden toteuttamiseksi. Lämpötilat keskuksissa suoja- laitteiden sijoituspaikoissa nousivat osassa kohteista yli suojalaitteille il- moitettavien toimintaympäristön ylärajojen, joten tutkimuksessa kerätty- jen tietojen pohjalta pohdittiin mahdollisuuksia suojalaitteisiin vaikutta- vien lämpötilojen hallintaan.

Avainsanat suojaus, mitoitus, lämpötila, kuormitettavuus

Sivut 34

Electrical and Automation Engineering
Valkeakoski

Author	Jonne Karjala	Year 2018
Subject	Effect of temperature on circuit protection devices	
Supervisors	Raine Lehto	

ABSTRACT

This project was conducted for Finnish Transport Agency and Winco Oy, a company that operates as a maintainer for railway electrification and low voltage systems in the Western and Southern Finland. The study examined heating up of isolating transformers which are a part of the railway switch point heating system. The purpose of this project was to find out how the transformer cabinets' temperature affects the circuit protection devices that do not withstand as planned. The main objectives were to examine the rise of temperatures in the isolating transformer cabinets, to find out how this affects the operation of fuses and circuit breakers and to determine options for solving the problem.

The study was carried out by monitoring the rise of temperatures inside the transformer cabinets when transformers were loaded. In addition, the necessary measurements such as current and voltage were made to consider the suitability of the protection devices for their installation environment. A comparison of the measurement results with the existing protective devices was completed by considering the cable protection standards and the instructions of the manufacturers of protective devices.

The conducted study provided desirable information on the transformer cabinets' temperatures that were so high that they affected the current carrying capacity of fuses and circuit breakers. Solutions to the problem caused by the temperature increase and requirements for implementing these were considered. Temperatures in the isolating transformer cabinets were rising higher than what the manufacturers of protective devices generally recommended, which is why different possibilities on how to manage temperatures affecting the protecting devices were analyzed here.

Keywords protection, temperature, load capacity, dimensioning

Pages 34

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	VAIHTEENLÄMMITYSJÄRJESTELMÄ.....	2
2.1	Lämmösäätöjärjestelmät	2
2.2	Vaihteenlämmityksen erotusmuuntaja	4
2.3	Vaihteenlämmitysvastukset	6
3	LÄMMITYSVASTUSPIIRIEN YLIVIRTASUOJAUS.....	6
3.1	Kaapelin kuormitettavuus	7
3.2	Ylikuormitussuojaus	8
3.3	Oikosulkusuojaus.....	9
3.4	Johdonsuojakatkaisija	10
3.5	Sulake	12
4	EROTUSMUUNTAJAKESKUSTEN TUTKIMINEN	15
4.1	Kunnossapitoraporttien vikailmoitukset.....	15
4.2	Tutkittavat kesukset ja mittaukset	17
4.3	Lämpötilamittausten toteutus	18
4.4	Virta- ja jännitemittausten toteutus	20
5	TUTKIMUSTULOKSET	21
5.1	Virta- ja jännitemittausten tulokset.....	21
5.2	Lämpötilamittausten tulokset.....	21
5.3	Sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden mitoittaminen.....	24
5.3.1	Johtimien kuormitettavuus mitoittamisessa.....	24
5.3.2	Suojalaitteiden korjauskertoimet.....	27
5.4	Nykyisten suojalaitteiden soveltuvuus.....	28
5.5	Lämpötilan hallinta.....	30
6	YHTEENVETO	31
	LÄHTEET	33

1 JOHDANTO

Työn tilaaja hakee ratkaisua ongelmaan, jonka takia rautatievaihteiden lämmitysvastuspiirejä suojaavat johdonsuojakatkaisijat ja sulakkeet eivät kestä erotusmuuntajakeskusten sisään asennettuna suunnitellusti. Tavoitteena on selvittää erotusmuuntajakeskusten lämpenemisen vaikutusta suojalaitteiden toimintaan ja pohtia ratkaisumahdollisuuksia ongelmaan. Johdonsuojakatkaisijat ja sulakkeet on sijoitettu rautateiden vaihteiden läheisyyteen erotusmuuntajakeskusten sisälle, joiden kautta sähköenergiaa syötetään vaihteenlämmitysjärjestelmän lämmitysvastuksille. Oletus on, että muuntajakeskusten lämpeneminen on olennainen syy suojalaitteiden ennen aikaiseen toimimiseen.

Aiheeseen päädyttiin, koska ongelmat johdonsuojakatkaisijoiden ja sulakkeiden kanssa aiheuttavat häiriöitä vaihteiden sulana pitoon ja työllistävät tarpeettoman paljon sähköratojen kunnossapitäjiä. Työ tehdään liikennevirastolle ja Winco Oy:lle, joka toimii Etelä- ja Länsi-Suomen alueiden sähkörata- ja vahvavirtajärjestelmien kunnossapitäjänä. Toteutetun tutkimuksen tuloksena saadaan tietoa erotusmuuntajakeskusten sisällä vallitsevista lämpötiloista, sekä lämmitysvastuspiirien virroista. Mittaustulosten perusteella selvitetään lämpötilan mahdollisia vaikutuksia suojalaitteiden toimintaan ja perehdytään asennusolosuhteiden merkitykseen suojalaitteiden ja kaapeleiden mitoituksessa.

Työn raportti jakautuu siten, että luvuissa 2 ja 3 esitellään rautateiden vaihteenlämmitysjärjestelmän perusrakenne ja lämmitysvastuspiirin suojauksen periaatteet. Luvussa 4 esitellään tässä työssä tarkasteltavat erotusmuuntajakeskukset ja tutkimusmenetelmät. Viides luku pitää sisällään mittaustulokset, joiden perusteella selvitetään vaatimukset keskuksissa käytettäville johdonsuojille ja sulakkeille. Kun tiedossa on millaisia komponentteja keskuksista mitatuissa lämpötilaoloissa tulisi käyttää, tarkastellaan nykyisten komponenttien soveltuvuutta käyttötarkoitukseensa. Lopun yhteenvedossa tiivistetään työn olennaiset osat ja tutkimustuloksista seuranneet päätelmät.

Tutkimuksen myötä saatujen tietojen perusteella esitetään kehitysmahdollisuuksia, joilla suojalaitteet saataisiin toimimaan erotusmuuntajakeskusten sisään sijoitettuna kuten on suunniteltu. Vaihtoehtoja vertaillaan lämpötilan hallinnasta sopivimpien suojalaitteiden valintaan ja pohditaan mitä toimenpiteiden toteuttaminen edellyttäisi.

2 VAIHTEENLÄMMITYSJÄRJESTELMÄ

Vaihteenlämmityksen tarkoituksena sulattaa lumi ja jää rautatievaihteista pitäen ne toimintakykyisinä. Suomen rataverkossa vaihteenlämmitys on toteutettu sähköllä, jolloin sulatukseen käytetään lämmitysvastuksia. Lämmitysvastukset sijoitetaan rautatievaihteissa tukikiskoihin ja kieliin. Tarvittaessa käytetään myös vaihteiden tankokuoppia sulana pitäviä elementtejä. (Viitala T, Anttonen M, Pollari J, Ojanperä K, 2012, 41.)

Sähköistetyillä rataosuuksilla sähköenergia vaihteenlämmitykseen otetaan sähköradan ajojohtimesta. Vaihteenlämmitysmuuntaja asennetaan pylvääseen ja sillä pienennetään ajojohtimen 27,5 kV:n jännite lämmönsäätöjärjestelmästä riippuen 400 V:n tai 400 V-347 V-283 V-jännitteeksi. Muuntajan teho valitaan sulatusjärjestelmän tarpeen mukaan. Sähköistämättömillä rataosuuksilla sähköenergia otetaan paikallisista jakeluverkoista. (Lepistö A, Smolander R, Huhtamäki R, Laurila A, Männikkö J, Solasaari O, Granlund M, Rautoja P, 2006, 10-11.)

Vaihteenlämmitysmuuntajan toisiojännite viedään vaihteenlämmityskeskukseen, joka sijoitetaan koteloituna kaapelijakokaappiin muuntajapylvään välittömään läheisyyteen. Vaihteenlämmityskeskuksista syötetään energiaa erotusmuuntajille, joiden toisiopiireihin vaihteenlämmitysvastukset kytketään. (Lepistö A ym. 2006, 18.)

Liikenneviraston hallinnoimien ratojen vaihteenlämmitykseen liittyvien laitteiden tekniset määreet on esitetty ratahallintokeskuksen julkaisussa B17. Julkaisussa käsitellään vaihteenlämmitykseen liittyviä vaatimuksia ja laitteita niiden suunnittelun, hankintojen ja rakentamisen kannalta. Ohjeesta selviää myös muut määräykset ja standardit, kuten standardisarja SFS-6000, joita vaihteenlämmityksen sähkötekniisten laitteistojen kanssa tulee noudattaa. (Lepistö A ym. 2006, 5.)

2.1 Lämmönsäätöjärjestelmät

Lämmönsäätöjärjestelmillä ja niiden automatisoinnilla pyritään säästämään vaihteenlämmitykseen kuluva sähköenergia heikentämättä vaihteiden käytettävyyttä. Lämmitystä säädellään sulatustarpeen mukaan säätämällä vaihteenlämmitysvastuksille syötettävää virtaa. (Lepistö A ym. 2006, 32.) Suomen rataverkolla sijaitsevilla vaihteilla lämmönsäätöjärjestelmät ovat pääasiassa manuaalisia mikä tarkoittaa, että liikenteenohjaajat vastaavat niiden kauko-ohjauksesta. Käytössä on pääasiassa kolmea erilaista järjestelmää, joista erotusmuuntajakohtaiseen säätöön tai sääasemaan perustuvat järjestelmät ovat uudempia ja hieman älykkäämpiä kuin vanhat jännitevalintaan perustuvat. (Teerihalme H, 2011, 28.)

Erotusmuuntajakohtaiseen säätöön perustuvassa järjestelmässä erotusmuuntajan syöttöjännitteenä käytetään vaihteenlämmitysmuuntajan 400

V:n toisiojännitettä. Jännite tuodaan erotusmuuntajalle vaihteenlämmityskeskukseen kautta, mihin on sijoitettu ohjauksia varten kontaktori ja ohjausapureleet. Keskuksessa on myös valintakytkin, jolla lämmitystä voidaan ohjata päälle ja pois, sekä ulkotermostaatti estämässä vaihteenlämmityksen toiminnan säätöarvoa 5 °C suuremmissa lämpötiloissa. Tässä järjestelmässä lämmitystehon säätö on toteutettu erotusmuuntajakohtaisesti. Jokaisessa erotusmuuntajakeskuksessa oma säätimensä valvoo sekä lämmitysvirtaa, että kiskon lämpötilaa. Säädin ohjaa sähköä ennalta asetettujen kahden raja-arvon perusteella puolijohdereleiden kautta lämmitysvastuksille, kunnes haluttu lämpötila on saavutettu. Alempi raja-arvo on asetettu ohjeen mukaisesti 10 °C:n ja ylempi 40 °C:n lämpötilaan. Normaalissa käytössä tämä järjestelmä toimii itsenäisesti säädettyjen asetusarvojen mukaan, mutta lämmitystä voidaan tarvittaessa ohjata manuaalisesti ylempään lämpötilan asetusarvolle kellolla asetettavaksi ajaksi. (Lepistö A ym. 2006, 32-34.)

Jännitevalintaan perustuva lämmönsäätöjärjestelmä on esitellyistä järjestelmistä vanhin, eikä sitä suositella uusiin asennuksiin. Lämmönsäätely tapahtuu vaihteenlämmitysmuuntajan väliulosottoja hyödyntäen, valitsemalla vastusten syöttöjännite lämmitystarpeen mukaan. Vaihteenlämmitysmuuntajalta käyttöön saatavia 400-, 347- ja 283 V:n jännitteitä käytetään erotusmuuntajien syöttöjännitteinä, jolloin vastusten lämmitysteho voidaan säätää 1/1-, 3/4- ja 1/2-arvoihin. Syöttöjännitteen valinta tapahtuu vaihteenlämmityskeskuksessa kontaktoreilla, ohjausapureleilla ja valintakytkimillä. Jänniteporras voidaan valita käsin valintakytkimillä ja kytkimen automaatti -asennossa junansuorittaja valitsee lämmitystehon manuaalisesti painikkeilla. Automaatti-asennossa termostaatti rajoittaa lämmityksen päälle kytkeytymisen ulkolämpötilan ollessa säätöarvoa korkeampi. (Lepistö A ym. 2006, 33.)

Sääasemaan perustuvassa lämmönsäätöjärjestelmässä ohjaukseen käytetään sääasemaa, joka ohjaa lämmitystä päälle ja pois tarpeen mukaan vallitsevien sääolosuhteiden mukaan. Ulkolämpötilan lisäksi sääasemassa on optinen sadeanturi ja ilmankosteusanturi. Mitattujen arvojen perusteella sääasema pyrkii ohjaamaan lämmitystä pois päältä enemmän kuin pelkkä ulkotermostaatti ohjaisi, kun ulkolämpötila on alle 5 °C ja yli 0 °C. Sääasema asennetaan ohjaamaan vaihteenlämmityskeskusta automaattisesti siten, että lämmitystä on edelleen mahdollista ohjata päälle kauko-ohjauksella. Sääasema määrittelee lämmitystehon vallitsevien sääolosuhteiden mukaan, mutta vikatilassa kauko-ohjaajan on mahdollista pakko-ohjata rajoitetuksi ajaksi suurempi lämmitysteho päälle suoraan. Suurempi lämmitysteho kytkeytyy myös esimerkiksi sääaseman havaitessa riittävän voimakkaan lumisateen tai ohi ajavan junan aiheuttaman tuiskun. (Lepistö A ym. 2006, 33.)

2.2 Vaihteenlämmityksen erotusmuuntaja

Vaihteenlämmityskeskukseen liitetty erotusmuuntaja muuntaa vaihteenlämmitysmuuntajan toisiojännitteen sopivaksi lämmitysvastuksille. Tämän lisäksi se lisää käyttäjäturvallisuutta erottaessaan muuntajan toisipuolen galvaanisesti ensiöpuolesta, sekä maapotentiaalista ja suojaa radan turvalaitteisiin lukeutuvaa raidevirtapiiriä lämmitysvastusten vikatilanteissa. (Polylux.) Vaihdekohtaiset erotusmuuntajat sijoitetaan lämmitettävien vaihteiden läheisyyteen erotusmuuntajakeskusten sisään. Nykyään rakennettavat keskuksat ovat rakenteeltaan ovelisia jakokaappeja, mutta käytössä on edelleen myös vanhempia yläpuolelta avattavia keskuksia.

Muuntajat ovat sähköistetyillä rataosuuksilla pääsääntöisesti yksivaihemuuntajia, jotka soveltuvat käytettäväksi kaikissa käyttötilanteissa. Yksivaiheisissa muuntajissa on yksi ensiökäämi, joka on kytketty vaihteenlämmitysmuuntajan toisiojännitteeseen. Toisiokäämejä on kaksi, ja ne on rakennettu 230-, 240-, 250- ja 260 V:n väliulosotoilla. Jänniteportaan valinnalla kompensoidaan muuntajien ja kaapeleiden jännitteen alenema kuormitettuna siten, että lämmitysvastuksille saadaan oikea jännite. Sähköistämättömillä rataosuuksilla käytetään kolmivaihemuuntajia, kun lämmitysenergia otetaan kolmivaiheverkosta. Tällöin myös 230 V:n toisiokäämejä on kolme. (Lepistö A ym. 2006, 22-25.)

Lämmitysvastukset kytketään muuntajien toisiojännitepiireihin siten, että moilemmilla kiskoilla on omat kääminsä. Erotusmuuntajan teho määräytyy käytettävien lämmitysvastusten mukaan ja muuntajan valmistuksessa tulee noudattaa Ratahallintokeskuksen julkaisussa B17 esiteltyjä IEC-standardeja. Sähköistetyillä rataosuuksilla yksivaihemuuntajina käytetään teholtaan joko 9,2 kVA:n tai 16 kVA:n muuntajia. (Lepistö A ym. 2006, 22-25.)

Erotusmuuntajakeskuksen sisään asennettavia muita komponentteja ovat toisiojännitepiirejä suojaavat johdonsuojakatkaisijat tai osassa vanhemmista keskuksista käytössä olevat sulakkeet, sekä lämmönsäätöjärjestelmästä riippuen siihen liittyvät komponentit. Säädettävien muuntajien tehonsäätimet ja muut laitteet asennetaan muuntajakeskuksen sisälle erilliseen koteloon. Syötön kaikki johdinpiirit, lukuun ottamatta suojajohdinpiiriä, tulee olla katkaistavissa keskuksen pääkytkimellä. (Lepistö A ym. 2006, 25-26.)

Kuvassa 1 on esimerkki erotusmuuntajakohtaisella säädöllä toteutetun lämmitysjärjestelmän erotusmuuntajakeskuksesta. Kuvan järjestelmässä ohjaus on toteutettu ohjelmoitavilla logiikoilla, jotka pyrkivät puolijohdeleiden välityksellä säätämään vaihteiden lämpötiloja asetusravoihinsa. Erotusmuuntajakeskusten logiikkayksiköt kommunikoiivat vaihteenlämmityskeskukseen logiikkayksikön kanssa väylätekniikan avulla. Lämmitysvastusten lähtöjen johdonsuojakatkaisijat näkyvät kuvan keskuksessa erotusmuuntajan käämien alapuolella vasemmalla. Itse muuntaja on tässä tapauksessa teholtaan 16 kVA:n yksivaiheinen erotusmuuntaja, jonka

kahteen toisiokäämiin lämmitysvastukset on kytketty. Haluttu jänniteporras valitaan käyttäen kuvassa johdonsuojakatkaisijoiden oikealla puolella näkyviä liittimiä.



Kuva 1. Erotusmuuntajakeskus

Syöttökaapeleina erotusmuuntajakeskukselle käytetään yleensä AMCMK-tyyppin kaapeleita. Kaapelit ovat joko kolmi- tai nelijohtimisia ja johtimen poikkipinnaltaan 16 – 70 mm². Yksivaihemuuntajaa käytettäessä tulee huomioida, että kolmijohtimisen syöttökaapelin kahta johdinta käytetään L1-johtimena ja ne on voitava kytkeä yhteen keskuksessa. Kolmatta johdinta käytetään tällöin L2- tai N-johtimena. Syöttökaapelin ollessa nelijohtiminen kytketään johtimet pareittain yhteen. (Lepistö A ym. 2006, 26.)

2.3 Vaihteenlämmitysvastukset

Lumensulatukseen käytetään vaihteen tukikiskoihin, sekä kieliin asennettavia vastussauvoja, joista lämpö siirtyy osittain johtumalla ja osittain säteilemällä kieleen ja tukikiskoon. Tukikiskoihin asennettavat vastussauvat asennetaan kielisovelluksessa vaihteen kielen liikkuvan osan alueelle. Lämmityksen tehostamiseksi kieliin asennettavat vastukset asennetaan kielessä olevaan taitekohtaan tai vastuksille koneistettuihin uriin. Tukikiskon ulkopuolelle asennetaan polyuretaanista valmistetut lämpöeristeet vähentämään hukkalämmön haihtumista kiskosta. Kielilämmitystä käytettäessä käytetään myös tankokuoppiin asennettavia lämmityselementtejä. (Viitala T ym. 2012, 41.)

Vaihdetyypistä ja sulatustarpeesta riippuen vaihteenlämmitysvastusten lukumäärät, tyypit ja tehot vaihtelevat. Vastussauvojen pituudet vaihtelevat sijoituksen mukaan 3000- ja 6000 mm:n välillä ja yksittäisen sauvan teho välillä 700 – 2300 W. Tankokuoppiin sijoitettavat lämmityselementit ovat teholtaan noin 600 W. Yleisimmissä vaihdetyypeissä kokonaislämmitysteho vaihtelee kahdeksasta kilowatista yli 60 kilowattiin. (Lepistö A ym. 2006, 28-31.)

Kaapeloinnissa erotusmuuntajalta lämmitysvastuksille käytetään yleensä kaapelityyppiä MCMK 4x2,5+2,5S ja jännitteen aleneman ylittyessä MCMK 4x6+6S. Vastusten liitäntä tehdään puolikiinteässä kiskoliitäntäkotelossa ja liitäntäkaapelit ovat taipuisaa öljynkestävää 2x2,5 mm²:n H07RN-F-tyypin kumikaapelia. Vastuksille sallittu nimellistehon mukainen valmistustoleranssi on +5...-10 % ja nimellisresistanssin sallittu valmistustoleranssi +10...-5 %. Vastusten nimellisresistanssi vaihtelee sen mukaan, minkä nimellistehon mukainen vastus on kyseessä. (Lepistö A ym. 2006, 30.)

Valmiista asennuksesta mitattaessa tulee jännitteen olla vastusten kytkentärasialla vähintään 220 V käytettäessä 230 V vastuksia ja vähintään 210 V käytettäessä 220 V vastuksia. Myös vastusten nimellisresistanssin toleranssi täytyy huomioida jänniteportaan valinnassa, jotta vastuksilta saadaan käyttöön nimellisteho. Mikäli vastusten nimellisresistanssi on +10 %, vastuksille syötetään 5 % suurempi jännite ja resistanssin ollessa -5 % vastuksille syötetään 2,5 % alaisempi jännite. (Lepistö A ym. 2006, 48.)

3 LÄMMITYSVASTUSPIIRIEN YLIVIRTASUOJAUS

Ylivirralla tarkoitetaan sähkövirtaa, joka ylittää piirin mitoitusvirran ja saa johtimet tai laitteet lämpenemään yli sallitun arvonsa jatkuvassa käytössä. Suojaaminen on toteutettava siten, että ylivirran suuruus tai kestoaika saadaan rajoitettua turvalliseen arvoon. Johtimien mitoitusvirtana pidetään niiden kuormitettavuutta eli virtaa, jolla johdinta voidaan kuormittaa jatkuvasti ilman, että se lämpenee yli sallitun rajan. (SFS-6000-1, 2017, 9.)

Standardin SFS-6000 mukaan äärijohtimet tulee suojata ylikuormitukselta ja oikosululta yhdellä tai useammalla syötön automaattisesti poiskytkävällä suojalaitteella. Tästä voidaan poiketa vain, jos standardin määrittämät ehdot ylikuormitus- ja oikosulkusuojien poisjättämiseksi täyttyvät. Suojalaitteen on katkaistava äärijohtimessa esiintyvä ylivirta ennen kuin se vahingoittaa eristyksiä, jatkoksia, liittimiä tai ympäröiviä materiaaleja aiheuttaen vaaraa. (SFS-6000-4-43, 2017, 6.) Ylikuormitus- ja oikosulkuvirroilta suojaamiseen käytettävien suojalaitteiden täytyy olla jonkin standardissa SFS-6000-5-53 esitetyistä julkaisuista mukaisia. (SFS-6000-5-53, 2017, 20).

Erotusmuuntajien toisiopiireihin kytkettyjen lämmitysvastusten lähdoissä käytetään ylivirtasuojina johdonsuojakatkaisijoita, sekä vanhemmissa asennuksissa tulppasulakkeita. Lämmitysvastuslähtöihin tulee asentaa kaksinapaisia johdonsuojakatkaisijoita, jolloin molemmille erotusmuuntajalta vastuksille kytkettävälle vaiheelle on oma napansa. Laukaisukäyrältään katkaisijoiden tulee olla B tai vastaava. Katkaisijoiden lukumäärä erotusmuuntajakeskuksissa vaihtelee ja mitoitusvirrat määritetään kohdekohtaisesti. (Lepistö A ym. 2006, 26.)

3.1 Kaapelin kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuudella tarkoitetaan virtaa, jolla kaapelia voidaan jatkuvasti kuormittaa ilman, että se lämpenee yli sallitun rajan. Kuormitettavuus selvitetään johdinmateriaalin, poikkipintojen ja eristemateriaalien perusteella. Eri kaapeli- ja johdintyypeille on annettu turvallisia kuormitusvirtoja, joiden perusteella kaapelin valinta voidaan tehdä. Kuormitettavuuteen vaikuttavat lisäksi asennustapa ja olosuhteet, joiden vaikutus otetaan huomioon käyttämällä mitoittaessa tarvittavia korjauskertoimia. Yleisimmille kaapeli- ja johdinmateriaaleille löytyvät kuormitettavuustaulukot, sekä korjauskertoimet standardista SFS-6000-5-52. (Harsia P, 2010.) Standardin suosituksilla pyritään takaamaan johtimille ja eristeille tyydyttävä käyttöikä termisten rasitusten alaisina (SFS-6000-5-52, 2017, 31).

Asennettaessa kaapeli maassa olevaan putkeen, kuten erotusmuuntajilta vaihteenlämmitysvastuksille, on standardin mukainen asennustapa D1. Suomessa normaaliolosuhteina pidetään maan lämpöresistiivisyyttä 1,0 Km/W ja maan lämpötilaa 15 °C, mitkä huomioidaan kaapelin kuormitettavuutta laskiessa korjauskertoimilla. Asennettaessa useampi kaapeli vierekkäin kulkeviin putkiin korjataan kuormitettavuutta alaspäin omalla kertoimellaan. (SFS-6000-5-52, 38-53.) Kaapelin kuormitettavuus täytyy tarkistaa, mikäli ympäristöolosuhteet, maan lämpöresistiivisyys tai asennustavat poikkeavat suunnittelussa käytetyistä arvoista (SFS 6000-8-814, 2017, 6).

Rinnan kytkettyjen johtimien kuormitettavuus saadaan laskemalla johtimien kuormitettavuudet yhteen, jos virrat jakautuvat tasaisesti johtimien

kesken. Näin voidaan toimia, kun johtimet ovat saman tyyppiset ja suunnilleen saman pituiset, eivätkä ne sisällä haaroituspiirejä. Mikäli virrat poikkeavat toisistaan yli 10 %, täytyy jokaisen johtimen kuormitettavuus ja suojaus käsitellä erikseen. (SFS-6000-4-43, 2017, 10.)

3.2 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitusvirta on ylivirta, joka johtuu esimerkiksi kulutuskojeiden ylikuormituksesta, eikä vioista kuten maa- tai oikosulusta (SFS-6000-1, 2017, 18). Yleensä suojalaite tulee sijoittaa virtapiirissä sellaiseen kohtaan, jossa johtimen kuormitettavuus pienenee esimerkiksi johtimen poikkipinnan tai asennustavan muuttuessa. Ylikuormitussuoja voidaan sijoittaa johtimessa mihin tahansa kohtaan, mikäli kuormitettavuuden muutoskohdan ja suojalaitteen välillä ei ole pistorasioita eikä haaroituksia. Tällöin edellytyksenä on lisäksi oikosulkusuojauksen toteuttaminen standardin vaatimusten mukaisesti. (SFS-6000-4-43, 2017, 9.)

Ylikuormitussuojan pois jättämistä suositellaan sellaisista virtapiireistä, joiden odottamaton avautuminen voi aiheuttaa suuremman vaaran kuin ylikuormitus itse. Tällöin suojauksen sijaan tulee harkita ylikuormitushälytyksen käyttöä. Tällaisia kohteita ovat virtapiirit, jotka syöttävät esimerkiksi turvajärjestelmiä, palon sammutusjärjestelmiä tai nostomagneetteja. (SFS-6000-4-43, 2017, 10.)

Standardin SFS-6000-4-43 (2017, 8) mukaan ”Kaapelia ylikuormitukselta suojaavan suojalaitteen ominaisuuksien on täytettävä seuraavat kaksi ehtoa:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (1)$$

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z \quad (2)$$

missä:

I_B	on piirin suunniteltu virta
I_Z	on johtimen jatkuva kuormitettavuus
I_n	on suojalaitteen mitoitusvirta
I_2	on virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen suojalaitteelle määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa.”

Oletus on, että virtapiirejä suunnitellessa pyritään välttämään pitkäaikaisia pieniä ylikuormituksia, sillä ne eivät välttämättä saa suojalaitetta toimimaan sille määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa (SFS-6000-4-43, 2017, 8).

3.3 Oikosulkusuojaus

Oikosulku on johtavien osien välinen pieni-impedanssinen yhdistys, mikä pakottaa osien väliset potentiaaierot noltaan tai lähelle. Oikosulku voi muodostua esimerkiksi äärijohtimen ja maan välille, mutta myös kahden tai useamman äärijohtimen välille. (SFS-6000-1, 2017, 28.)

Oikosulkusuoja on katkaistava piirin oikosulkuvirta ennen kuin johtimien lämpötila saavuttaa suurimman sallitun rajan. Suojalaitteen katkaisukyvyyn täytyy olla vähintään suojalaitteen asennuspaikalla esiintyvän prospektiivisen oikosulkuvirran suuruinen, ellei suojalaitteen syöttöpuolella ole riittävän katkaisukyvyyn omaava toinen suojalaite. Tällöin molempien suojalaitteiden, sekä suojattavien johtimien täytyy kestä läpi kulkeva energia vahingoittumatta. (SFS-6000-4-43, 2017, 12.)

Suojaukseen käytettävien komponenttien valintaa varten täytyy selvittää suurimmat ja pienimmät mahdolliset asennuksessa esiintyvät oikosulkuvirrat. Suojalaitteen tulee pystyä katkaisemaan suurimmat mahdolliset oikosulkuvirrat ja pienimmät oikosulkuvirrat täytyy tietää, jotta pystytään varmistamaan suojauksen toiminta ja automaattinen poiskytkentä oikosulun esiintyessä missä tahansa piirin kohdassa. (Harsia P, 2008.) Mikäli myös oikosulkusuojaukseen käytettävä suojalaite täyttää ylikuormitussuojauksen vaatimukset ja katkaisukyky on riittävä, ei oikosulkusuojausten toteutumista yleensä tarvitse muulla tavalla varmistaa. Tämä tilanne on yleensä, mikäli kaapeleiden pituudet eivät ole suuria. Jos oikosulkusuojaus toteutetaan erillisellä suojalaitteella, tulee oikosulkusuojausten toteutumiselle asetettujen vaatimusten toteutuminen varmistaa. (Tiainen E 2017, 142.)

Johtimen suurimpaan sallittuun rajalämpötilaan lämpenemiseen kuluva aika voidaan kaavalla 3, mikäli oikosulun kesto on enintään 5 sekuntia. Oletus on, että johtimen lämpötila ennen oikosulkua on suurin sallittu käyttölämpötila. Pidemmässäkin oikosuluissa kaavan virhe on turvallisella puolella, mutta tulos ei ole tarkka johtimen alkaessa luovuttaa lämpöä ympäristöön.

$$t = (k \times S / I)^2 \quad (3)$$

jossa:

t	on sallittu kesto-aika sekunteina
S	on johtimen poikkipinta (mm ²)
I	on tehollinen oikosulkuvirta (A) tehollisarvona
k	on kerroin, jossa on huomioitu johdinmateriaalin resistiivisyys, lämpötilakerroin, lämmön varauskyky sekä alku- ja loppulämpötilat.

Kertoimen k arvot löytyvät yleisimmille johtimien eristysmateriaaleille standardin SFS-6000 osan 4-43 taulukosta 43.1, josta esimerkiksi alle 300 mm²:n PVC-eristeiselle kuparijohtimelle saadaan arvo 115. Oikosulun kestoajan alittaessa 0,1 sekuntia täytyy huomioida virran epäsymmetria ja varmistaa, että virtaa rajoittavien laitteiden arvo k^2S^2 on suurempi kuin valmistajan suojalaitteelle ilmoittama läpi kulkeva virta I^2t . (SFS-6000-4-43, 2017, 12.)

3.4 Johdonsuojakatkaisija

Ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus johdonsuojakatkaisijalla perustuu kahden erilaisen laukaisumekanismien toimintaan. Ylikuormitussuojana toimii hidastettu terminen laukaisu, joka laukaisee lämpötilan noustessa. Toimintanopeuteen vaikuttavat ylivirran suuruus ja sen kesto aika. (ABB 2013, 1.)

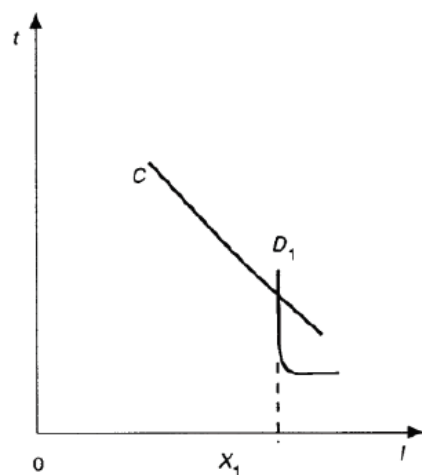
Oikosulkutilanteissa johdonsuojakatkaisijan magneettinen laukaisumekanismi toimii alle 0,1 sekunnissa. Johdonsuojakatkaisijoita löytyy mitoitusvirraltaan alle yhdestä ampeerista aina 125 ampeerin katkaisijoihin. Yleensä katkaisukyky on joko 6- tai 10 kA, mutta teollisuuden käyttöön on saatavilla jopa 50 kA:n katkaisukyvyllä olevia katkaisijoita. Johdonsuojakatkaisijan täytyy pystyä päästämään tarvittaessa lyhyet kuormitusvirtapiikit läpi, mutta samalla täytyy varmistaa suojalaitteen toiminta pitkäkestoisissa lievissä ylikuormitustilanteissa. Kuhunkin käyttötarkoitukseen valitaan sopiva suojalaite laukaisukäyrien perusteella huomioiden esimerkiksi moottorien kytkentävirrät, jotta suojalaite ei laukeaisi tarpeettomasti. (ABB 2013, 1.)

IEC/EN 60898-1-standardia noudattavat B-, C-, ja D-käyrälliset laitteet on suunniteltu johtimien suojaamiseen ylivirralla. Niiden terminen laukaisun toimintarajavirta on 1,45 kertaa suojalaitteen nimellisvirta, eli katkaisijan valinta ylikuormitussuojausta varten voidaan tehdä suoraan johtimen kuormitettavuuden perusteella SFS-6000 -standardin mukaisesti. Laukaisukäyrä B on suunniteltu lähinnä resistiiviselle kuormalle, kun taas C-käyrä lievästi induktiiviselle ja kapasitiiviselle kuormalle. D-käyrä taas on tarkoitettu voimakkaasti induktiivisille ja kapasitiivisille kuormille, joissa esiintyy esimerkiksi suuria käynnistysvirtapiikkejä. (ABB 2013, 1.) Terminen ja magneettilaukaisumekanismien toimintarajavirtoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Johdonsuojakatkaisijan toimintarajavirrat (*Ensto Building Technology 2012*)

Johdonsuojakatkaisijan toimintarajavirrat							
Tyyppi	Mitoitusvirta I_N	Terminen laukaisu		Aika	Magneettilaukaisu		Aika
		Pitovirta	I_2		Pitovirta	Toimintavirta	
B	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 I_N$		$>1 \text{ h}$	$3 I_N$		$>0,1 \text{ s}$
			$1,45 I_N$	$< 1\text{h}$		$5 I_N$	$<0,1 \text{ s}$
C	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 I_N$		$>1 \text{ h}$	$5 I_N$		$>0,1 \text{ s}$
			$1,45 I_N$	$< 1\text{h}$		$10 I_N$	$<0,1 \text{ s}$
D	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 I_N$		$>1 \text{ h}$	$10 I_N$		$>0,1 \text{ s}$
			$1,45 I_N$	$< 1\text{h}$		$20 I_N$	$<0,1 \text{ s}$

Käytettäessä johdonsuojakatkaisijaa oikosulkusuojana, täytyy ottaa huomioon pienin ja suurin vikavirta, koska katkaisijan toimintakäyrä leikkaa johtimen lämpörasituksen kestoja kuvaavaa käyrää kahdessa pisteessä. Vikavirtojen ylittäessä magneettisen pikalaukaisun raja-arvon, täytyy käyttää valmistajan antamaa läpi kulkevan energian arvoa. (SFS-6000-5-53, 2017, 23.) Mikäli johdonsuojakatkaisijan katkaisukyky ei riitä oikosulkuvirran katkaisemiseen, täytyy sen edessä käyttää lisäsuojana sulaketta tai kompaktikatkaisijaa (Tiainen E 2017, 142). Johdonsuojakatkaisijan toimintakäyrän ja suojaavan johtimen sallitun lämpörasituksen leikkauspisteet näkyvät kuvassa 2.



Merkinnät

- C virta/aika ominaiskäyrä, joka vastaa suojaavan johdotuksen sallittua lämpörasitusta
- D1 katkaisijan toimintakäyrä
- X1 pienin oikosulkuvirta, jossa katkaisija suojaa johdotusta

Kuva 2. Katkaisijan poiskytkentäajat (SFS-6000-5-53, 2017, 24)

Ympäristön lämpötila, sekä katkaisijoiden tehohäviöistä johtuva lämpeneminen vaikuttavat johdonsuojakatkaisijoiden toiminta-arvoihin. Johdonsuojakatkaisijoiden tehohäviöt ovat vastaavan kokosiin sulakkeisiin verrattuna suurempia ja ne lämpenevät sulakkeita enemmän. Lähelle nimellisvirtaansa kuormitettujen piirien katkaisijoita ei suositella asennettaviksi liian lähelle toisiaan. (Harsia P, 2008.) Laitevalmistajat antavat johdonsuojakatkaisijoille korjauskertoimia ja taulukoita, joilla vierekkäin asentamisen ja ympäristön lämpötilan vaikutusta katkaisijoiden toimintaan voidaan huomioida mitoitettaessa.

Taulukosta 2 selviää kuinka ympäristön lämpötila vaikuttaa ABB:n s200 ja s200M-sarjan johdonsuojakatkaisijoiden toimintaan. Kyseisen sarjan B-, C- ja D-laukaisukäyrien mukaisten johdonsuojakatkaisijoiden viitelämpötila on IEC/EN 60898-1-standardin mukaisesti 30 °C. (ABB.)

Taulukko 2. Ympäristön lämpötilan vaikutus S 200/S 200 M -sarjan johdonsuojakatkaisijoiden toimintavirtoihin (ABB)

Tripping characteristics	Rated current I_n A	Maximum operating current at ambient temperature T											
		-40 °C	-30 °C	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
B, C, D	0.5	0.67	0.65	0.62	0.60	0.58	0.55	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.37
	1.0	1.33	1.29	1.25	1.20	1.15	1.11	1.05	1.00	0.94	0.88	0.82	0.75
	1.6	2.13	2.07	2.00	1.92	1.85	1.77	1.69	1.60	1.51	1.41	1.31	1.19
	2.0	2.67	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21	2.11	2.00	1.89	1.76	1.63	1.49
	3.0	4.0	3.9	3.7	3.6	3.5	3.3	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
	4.0	5.3	5.2	5.0	4.8	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.5	3.3	3.0
	6.0	8.0	7.7	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.7	5.3	4.9	4.5
	8.0	10.7	10.3	10.0	9.6	9.2	8.8	8.4	8.0	7.5	7.1	6.5	6.0
	10.0	13.3	12.9	12.5	12.0	11.5	11.1	10.5	10.0	9.4	8.8	8.2	7.5
	13.0	17.3	16.8	16.2	15.6	15.0	14.4	13.7	13.0	12.3	11.5	10.6	9.7
	16.0	21.3	20.7	20.0	19.2	18.5	17.7	16.9	16.0	15.1	14.1	13.1	11.9
	20.0	26.7	25.8	24.9	24.0	23.1	22.1	21.1	20.0	18.9	17.6	16.3	14.9
	25.0	33.3	32.3	31.2	30.0	28.9	27.6	26.4	25.0	23.6	22.0	20.4	18.6
	32.0	42.7	41.3	39.9	38.5	37.0	35.4	33.7	32.0	30.2	28.2	26.1	23.9
	40.0	53.3	51.6	49.9	48.1	46.2	44.2	42.2	40.0	37.7	35.3	32.7	29.8
	50.0	66.7	64.5	62.4	60.1	57.7	55.3	52.7	50.0	47.1	44.1	40.8	37.3
63.0	84.0	81.3	78.6	75.7	72.7	69.6	66.4	63.0	59.4	55.6	51.4	47.0	

3.5 Sulake

Ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus sulakkeella perustuu sulakkeen sisällä olevan metallilangan tai -nauhan sulamiseen virran lämmittäessä sitä liikaa. Sulakkeen toiminta-aika riippuu ylivirran suuruudesta ja kestosta ja sen toimiessa sulake vaihdetaan uuteen. Sulakkeet ovat edullisia ja takaavat luotettavan erotuksen huolto- ja korjaustöiden ajaksi. (Harsia P, 2008.)

Erilaisista sulakerakenteista keskuksissa käytetään yleisimmin tulppa- ja kahvasulakkeita, joissa on kuumuudelta suojaava posliinikuori. Tulppasulakkeet on valmistettu siten, että mitoitusvirraltaan liian suuri sulake ei mahdu varokepesän pohjakoskettimeen. Pohjakoskettimen vaihto suurempaan vaatii johdotuksen kuormitettavuuden tarkastamisen. Kahvasulakkeiden käyttö on yleistä kuormitus- ja oikosulkuvirtojen ollessa suuria, koska ne omaavat hyvän oikosulkuvirtojen rajoituskyvyn ja

katkaisuominaisuudet. (Harsia P, 2008.) Kahvasulakkeilla suurin katkaisukyky on vähintään 50 kA, mutta usein myös suurempi. 500 V:n tulppasulakkeilla standardin mukainen katkaisukyky on 20 kA. (Tiainen E, 2017, 264.)

Sulakkeet luokitellaan niiden katkaisualueiden ja käyttöluokkien mukaan. Luokka ilmoitetaan kahden kirjaimen yhdistelmällä, joista ensimmäisellä ilmoitetaan katkaisualue ja toisella käyttöluokka. Ensimmäisen kirjaimen ollessa g, sulake toimii koko ylivirta-alueella ja soveltuu ylikuormitus- ja oikosulkusuojaksi. Kirjaimella a ilmaistaan sulakkeen toimivan vain tietyllä osaa ylivirta-alueesta, jolloin se on tarkoitettu oikosulkusuojaksi. Moottorien suojaukseen tarkoitettujen hitaampien sulakkeiden käyttöluokka ilmaistaan kirjaimella M ja esimerkiksi puolijohteiden suojaukseen käytettävän erikoisnopean sulakkeen käyttöluokka on R. Harvinaisempia käyttöluokkia on olemassa erityisiin käyttötarkoituksiin. Johtimien suojaukseen ylikuormitukselta ja oikosululta käytetään useimmiten gG-tyyppin yleissulakkeita. (Siemens, 2010.)

Ylikuormitussuojausta sulakkeella toteutettaessa ei voida valita sulakekokoja suoraan johtimen kuormitettavuuden perusteella, koska sulakkeen ylempi sulamisrajavirta on pienempi kuin 1,45 kertaa sulakkeen nimellisvirta. Sen sijaan mitoituksessa on käytettävä kaavaa 4.

$$k \times I_n \leq 1,45 \times I_z \quad (4)$$

jossa

I_n	on suojalaitteen nimellisvirta
I_z	on johtimen jatkuva kuormitettavuus
k	on sulakkeen ylemmän sulamisrajavirran ja sulakkeen nimellisvirran suhde.

D-tyyppin tulppasulakkeilla

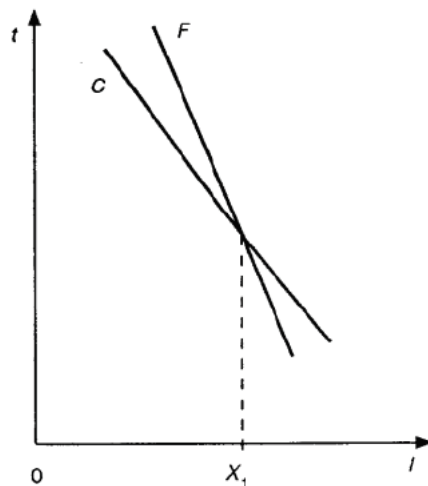
$k = 2,1$, kun $I_n \leq 4 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,69 I_z$
$k = 1,9$, kun $4 \text{ A} \leq I_n \leq 10 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,76 I_z$
$k = 1,75$, kun $10 \text{ A} \leq I_n \leq 25 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,82 I_z$
$k = 1,6$, kun $I_n \geq 25 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,90 I_z$

gG-tyyppin sulakkeilla

$k = 2,1$, kun $I_n \leq 4 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,69 I_z$
$k = 1,9$, kun $4 \text{ A} \leq I_n \leq 16 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,76 I_z$
$k = 1,6$, kun $I_n \geq 16 \text{ A}$	$\rightarrow I_n \leq 0,90 I_z$

Ylikuormitussuojauksen toteuttamiseksi sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta voidaan laskea edellä esitellyllä kaavalla, kun tiedossa on johtimen suurin sallittu jatkuva kuormitettavuus. (Tiainen E, 2017, 137.)

Sulakkeen kykyä suojata johdinta oikosulkuvirroilta voidaan tarkastella vertaamalla sulakkeen toiminta-alueen ylärajakäyrää johtimen sallittua lämpörasitusta kuvaavaan virta/aika -ominaiskäyrään. Kuvassa 3 nähdään käyrien leikkauspiste, joka kuvaa pienintä oikosulkuvirtaa millä sulake suo- jaa johdinta.

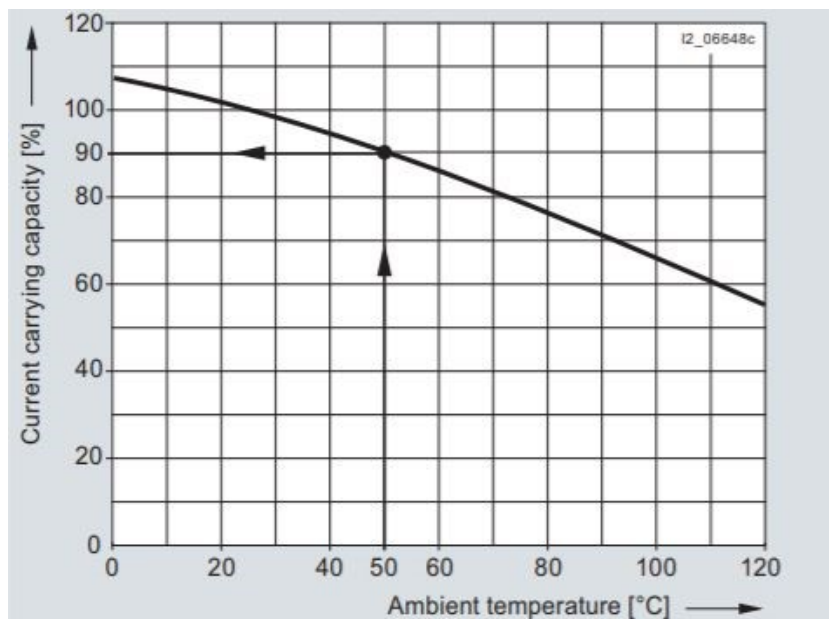


Merkinnät

- | | |
|----|--|
| C | Virta/aika ominaiskäyrä, joka vastaa suojattavan johdotuk-
sen sallittua lämpörasitusta |
| F | sulakkeen toiminta-alueen ylärajakäyrä, jonka ylittyessä su-
lake laukeaa varmasti |
| X1 | pienin oikosulkuvirta, jossa suojalaite suoja johdotusta |

Kuva 3. Sulakkeiden toiminta-ajat (SFS-6000-5-53, 2017, 23)

Esimerkiksi Siemensin valmistamien sulakkeiden virta/aika -toimintakäyrät perustuvat toimintaan $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$:n ympäristön lämpötilassa. Käytettäessä sulakkeita korkeammissa ympäristön lämpötiloissa pitäisi mitoittamisessa huomioida kuormituksen kestäkyvyn aleneminen, jotta ylikuormitustilanteissa sulake toimisi halutulla tavalla. Sulakkeen toimintaan oikosulkutilanteissa ympäristön lämpötila ei sen sijaan vaikuta. Esimerkiksi kuvan 4 mukaisesti 50 °C :n lämpötilassa sulakkeen kuormitettavuus laskee siten, että sulake pitäisi mitoittaa 90 % piirin nimellisvirrasta mukaan. (Siemens, 2010.)



Kuva 4. Ympäristön lämpötilan vaikutus sulakkeen toimintaan (Siemens, 2010)

4 EROTUSMUUNTAJAKESKUSTEN TUTKIMINEN

Tutkimuksen rajaamiseksi käytiin läpi edellisvuosien kunnossapitoraportteja ja etsittiin tarkastelun kohteeksi erotusmuuntajakeskuksia, joissa sulakkeisiin ja johdonsuojakatkaisijoihin liittyviä ongelmia oli ilmennyt. Tarkasteltaviksi valittiin sellaisia erotusmuuntajakeskuksia, joita tutkimalla saatiin tietoa useamman keskustyyppin sisällä vallitsevista lämpötilaolosuhteista.

Mittausten tavoitteena oli saada tietoa lämpötilan noususta keskusten sisällä muuntajaa kuormitettaessa, eli kun vaihteenlämmitys oli kytkettyä päälle. Tarkoituksena oli seurata keskusten sisälämpötilan kehitystä lämmityksen ollessa täydellä teholla, koska tällöin muuntajat oletettavasti lämpenevät eniten muuntajien kuormitushäviöistä johtuen. Myös ulkolämpötilaa tarkkailtiin mittausajankohtana sen vaikutuksen huomioimiseksi mittaustuloksissa. Muuntajien toisiopiireistä mitattiin lisäksi virrat ja jännitteet, mikä oli myös olennaista tutkittaessa suojalaitteiden toimintaa.

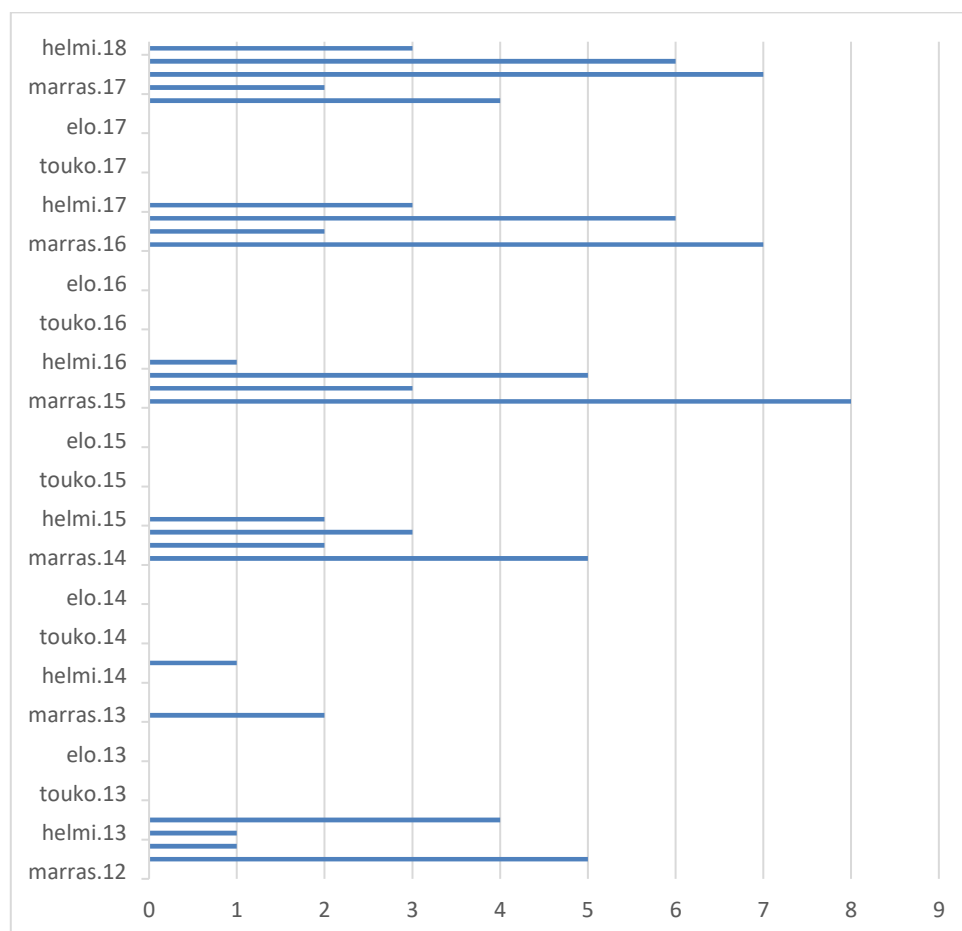
4.1 Kunnossapitoraporttien vikailmoitukset

Tutkittavien keskusten valintoja varten käytiin läpi kunnossapitäjän raportteja vuoden 2012 joulukuusta vuoden 2018 helmikuuhun asti ja niistä poimittiin viat, jotka johtuivat sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden toimimisesta tai hajoamisesta. Vikailmoitusten perusteella etsittiin sellaisia erotusmuuntajakeskuksia, joissa vikaantuminen oli tapahtunut

keskimääräistä useammin. Näiden useimmin vikaantuneiden keskusten joukosta valittiin mittausten kohteeksi neljä keskenään hieman erilaista keskusta, jotka poikkesivat toisistaan rakenteensa, muuntajan tehon ja suojalaitteiden osalta. Myös keskusten kohdalla käytettävissä lämmönsäätäjärjestelmissä oli eroja. Mittauksia varten pyrittiin valitsemaan erilaisia keskuksia, koska vikaantumiset eivät rajoittuneet mihinkään tiettyyn muuntaja- tai keskustyyppiin.

Kuukausittaisia raportteja käytiin läpi vuoden 2012 joulukuusta vuoden 2018 helmikuuhun asti, koska kyseiseltä ajanjaksolta vikaantumisista oli saatavilla riittävän tarkat tiedot. Raporttien perusteella voidaan todeta, että vaihteenlämmitysvikojen myötä vikamäärät kokonaisuudessaan ko- hoavat huomattavasti talvikuukausina, jolloin myös sulakkeista ja johdon- suojakatkaisijoista aiheutuvia vikoja on eniten.

Läpi käytyjen raporttien ajalla vaihteenlämmitykseen liittyvistä vikailmoit- tuksista yli 12 prosenttia oli erotusmuuntajakeskusten sulakkeiden ja joh- donsuojen toimimisesta tai rikkoontumisesta aiheutuvia. Todellisiin vikoi- hin nähden osuus on hieman suurempi, koska osassa tapauksista lämmi- tykset ovat toimineet normaalisti vikailmoituksista huolimatta. Vuodesta riippuen ongelmia erotusmuuntajakeskusten suojalaitteiden kanssa esiin- tyy eniten marraskuusta maaliskuuhun, kuten kuvassa 5.



Kuva 5. Erotusmuuntajakeskusten suojalaitteista aiheutuneet viat

4.2 Tutkittavat keskuksat ja mittaukset

Tutkittaviksi valikoituneista neljästä erotusmuuntajakeskuksesta kaksi oli rakenteeltaan vanhempia päältä avattavia ja kaksi nykyään yleisesti käytettävää jakokaappimallia. Molemmista keskustyypeistä valittiin kaksi kohdetta, jotka lähemmin tarkasteltuna poikkesivat myös hieman toisistaan. Keskusten lämmönsäätöjärjestelmät olivat kaappimallisissa keskuksissa erotusmuuntajakohtaisia, joista toinen oli toteutettu ohjelmoitavia logiikoita hyödyntäen ja toisessa oli käytössä yksinkertaisemmat erotusmuuntajakohtaiset KS-50-säätimet. Vanhempien päältä avattavien keskusten kohdalla lämmönsäätöjärjestelmä perustui jännitevalintaan.

Toisiopiirien suojalaitteina kyseisistä keskuksista kolmessa oli käytössä johdonsuojakatkaisijat ja toisessa rakenteeltaan vanhemman mallisessa keskuksessa tulppasulakkeet. Tulppasulakkeilla varustetussa keskuksessa oli myös käytetty lämmitysvastuksille 4x2,5+2,5 MCMK-tyypin kaapelia, kun muissa kolmessa neljässä kaapelit olivat tyyppiä 4x6+6 MCMK. Tarkastelun ja raportoinnin helpottamiseksi keskuksille annettiin tunnuksat EM1-EM4. Perustiedot tutkittavista keskuksista koottiin taulukkoon 3.

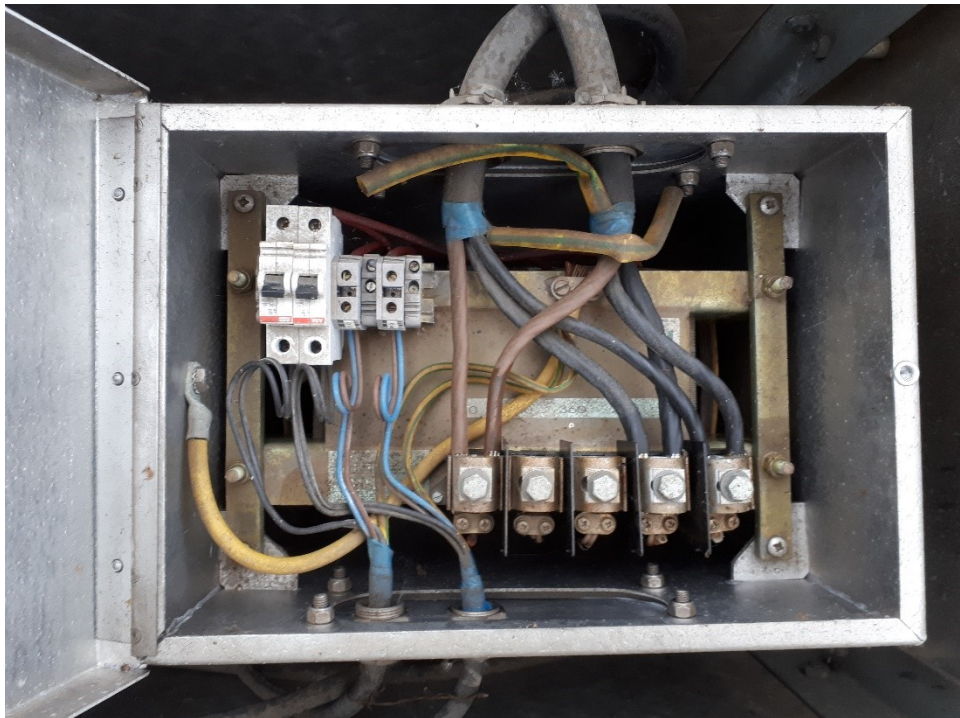
Taulukko 3. Tutkittavat EM-keskukset

Tunnus	Keskuksen rakenne	Nimellisteho	Kaapelityyppi	suojalaitetyyppi	Vastukset oikea	Vastukset vasen	Vastukset yhteensä
EM1	jakokaappi	16 kVA	MCMK 4x6+6	johdonsuojakatkaisija	8 kW	8 kW	16 kW
EM2	jakokaappi	16 kVA	MCMK 4x6+6	johdonsuojakatkaisija	8 kW	8 kW	16 kW
EM3	yläpuolelta avattava	9,2 kVA	MCMK 4x6+6	johdonsuojakatkaisija	4 kW	4 kW	8 kW
EM4	yläpuolelta avattava	9,2 kVA	MCMK 4x2,5+2,5	tulppasulake	4 kW	4 kW	8 kW

Kahden jakokaappimallisen keskuksen välillä oli eroavaisuuksia, vaikka molemmissa lämmönsäätö oli toteutettu erotusmuuntajakohtaisesti. EM1 keskus (Kuva 1) piti sisällään huomattavasti enemmän komponentteja logiikoilla toteutetun lämmönsäädön seurauksena. Vanhemmat yläpuolelta avattavat keskuksat erosivat myös hieman toisistaan kotelointinsa puolesta. Tarkasteltavista keskuksista EM3-keskuksen kannen väliin jäi suljettaessa ilmankiertoa varten pienet raot, kun EM4-keskuksen kansi oli huomattavasti tiiviimpi. Jälkimmäisessä jäähdytyksestä oli tehostettu koteloinnin reunoihin tehdyillä pienehköillä aukoilla. Kuvassa 6 vasemmalla puolella näkyvä kotelointi vastaa EM3-keskuksen rakennetta ja oikealla EM4-keskuksen rakennetta. Kuvassa 7 on kuvattu EM3-keskus avattuna.



Kuva 6. Kaksi erilaista koteloita



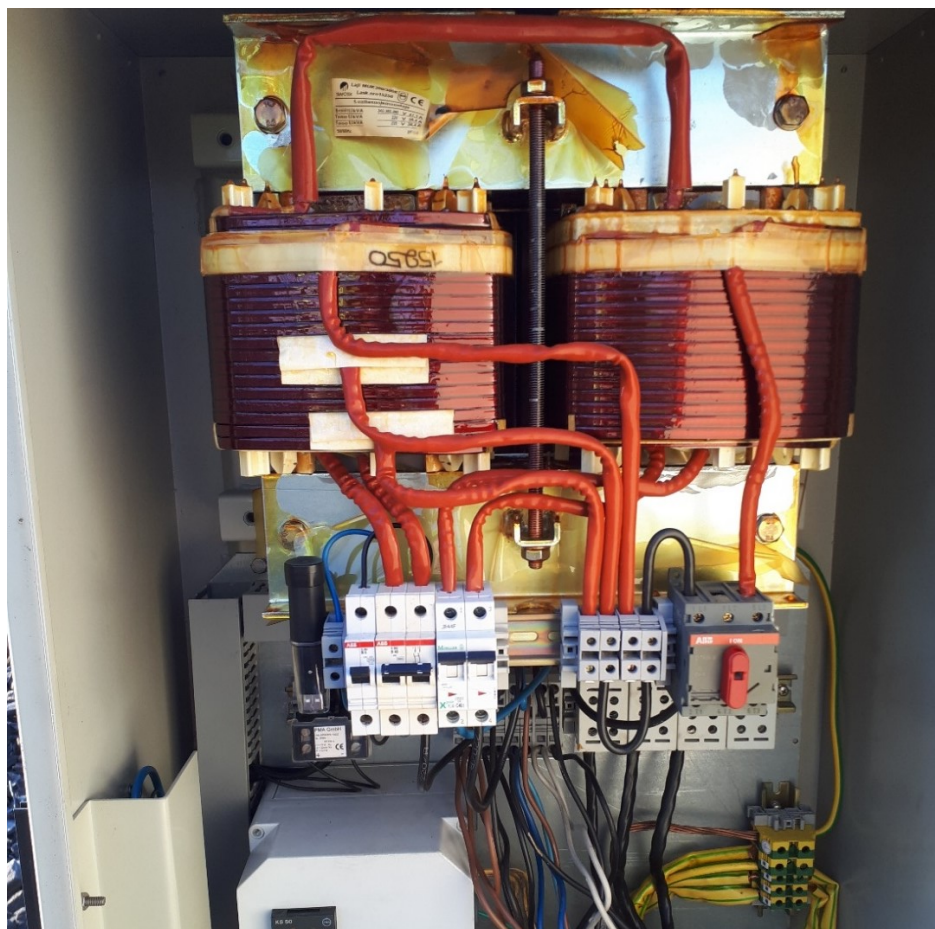
Kuva 7. EM-3 keskuksen sisältö

4.3 Lämpötilamittausten toteutus

Lämpötilan seuranta keskuksen sisällä toteutettiin Lascar el-usb-1 lämpötilalattalmentimella, joka oli mahdollista sijoittaa suljetun muuntajakeskuksen sisään haluttuun paikkaan. Näin olosuhteet keskuksen sisällä saatiin pysymään normaalin käyttötilanteen mukaisena, kun keskusta ei mittausten aikana ollut tarvetta aukoa, eikä erillisten antureiden johtimille tarvinnut pohtia asianmukaisia reittejä.

Työssä käytetyn tallentimen resoluutio oli 0,5 astetta celsiusta ja tarkkuus yksi aste, minkä tässä tapauksessa todettiin riittävän. Laitteeseen oli mahdollista asettaa haluttu lämpötilan tallennusväli väliltä 10 sekuntia ja 12 tuntia. Riittäväksi tallennusväliksi todettiin yksi minuutti, koska pienemmillä välillä merkittäviä muutoksia ei ehtisi tapahtua. Minuutin tallennusvälillä laitteen muisti olisi riittänyt tallentamaan lämpötilat yhdentoista päivän ajalta. Lämpötilatallentimen mittauslämpötila-alue oli $-35\text{ °C} \dots +80\text{ °C}$ ja oletus oli, että keskusten sisälämpötilat pysyvät näissä rajoissa.

Tavoitteena oli saada tietoa sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden asennusympäristön lämpötilasta, joten lämpötilatallentimen sijoittelu keskuksissa pyrittiin toteuttamaan siten, ettei suojalaitteiden itse tuottama lämpö vaikuttaisi suoraan lämpötila-anturiin. Asennusympäristön lämpötila haluttiin tietää, koska se on vaikuttava tekijä suojalaitteiden toiminnassa ja mitoittamisessa. Tutkittavan keskuksen lämpötilamittaukset aloitettiin sijoittamalla lämpötilatallennin keskuksen sisällä suojalaitteiden sijaintia vastaavaan paikkaan, minkä jälkeen keskus suljettiin kuin se olisi normaalissa käytössä. Kuvassa 8 lämpötilatallennin on sijoitettuna irti johdonsuojakatkaisijoista niiden vasemmalle puolelle.



Kuva 8. Lämpötilatallentimen sijoitus keskuksen EM2 sisällä

Lämpötilanseuranta aloitettiin kytkemällä vaihteenlämmitykset manuaalisesti täydelle teholle, minkä jälkeen keskuksat suljettiin. Ensimmäisellä tarkasteltavalla keskuksella seurattiin lämpötiloja kuusi tuntia, minkä jälkeen lämpötilatallennin poistettiin keskuksista ja lämpötilatiedot luettiin. Luetuista lämpötilatiedoista pääteltiin, oliko keskuksen lämpötila edelleen nousussa vai oliko maksimilämpötila kyseisissä olosuhteissa jo saavutettu. Tiedon perusteella seuraavien seurantajaksojen pituutta kaappimallisissa keskuksissa muutettiin neljään tuntiin, koska todettiin lämpötilan vakiintuneen tässä ajassa. Yläpuolelta avattavissa keskuksissa todettiin tarpeelliseksi jatkaa seurantaa viiden tunnin ajan. Lämmitysjärjestelmät palautettiin mittausten jälkeen mittauksia edeltävään tilaan ja suojalaitteiden tilanne tarkastettiin.

Lämpötilamittausten lisäksi erotusmuuntajakeskuksista tallennettiin lämpökamerakuvat lämpenemisen havainnollistamiseksi. Kuvien myötä saatiin tieto, missä kohdissa keskuksen sisällä on korkeimmat lämpötilat ja näin ollen huonoimmat vaihtoehdot suojalaitteiden sijoituspaikoiksi.

4.4 Virta- ja jännitemittausten toteutus

Tutkittavista erotusmuuntajakeskuksista mitattiin lämpötilojen lisäksi toisiopiirien virrat, sekä jännitteet. Virrat ja jännitteet mitattiin myös vaihteenlämmityksen ollessa kytkettynä täydelle teholle, koska tavoitteena oli selvittää suurimmat piireissä kulkevat virrat. Mittaukset suoritettiin jokaisen keskuksen lämpötilan seurannan päätteeksi.

Jännitteiden mittaukset tehtiin Fluke 279 FC yleismittarilla liittimiltä, joiden kautta lämmitysvastuksille lähtevät kaapelit olivat kytketty. Mittaus suoritettiin jokaiselta toisiokäämiltä erikseen mittaamalla jännite toisipuolen vaiheiden väliltä, joiden välille lämmitysvastukset on kytketty. Vaiheiden jännitteet maata vasten ovat alhaisemmat kuin vaiheiden välinen jännite.

Virrat mitattiin erikseen jokaisen toisiokäämin piiristä ja mittaukset toteutettiin jännitemittauksissakin käytetyn laitteen lenkkivirtapihdillä erotusmuuntajien toisipuolen vaihejohtimista. Mittaustulokset kirjattiin jokaisen erotusmuuntajan kohdalla myöhempää tarkastelua varten.

5 TUTKIMUSTULOKSET

Valittuihin erotusmuuntajakeskuksiin kohdistuneiden mittausten tulokset koottiin yhteen tulosten tulkintaa ja vertailua varten. Lämpötilamittauksilla saatujen tietojen perusteella saatiin selvitettyä millaisissa lämpötiloissa suojalaitteet ovat silloin kun vaihteenlämmitystä käytetään. Tiedot mahdollistivat nykyisten suojalaitteiden soveltuvuuden tarkastelun mitatut lämpötilat ja virrat huomioiden. Erotusmuuntajakeskusten sisällä valitsevien lämpötilojen, sekä piirien virtojen ollessa selvillä, voitiin niitä verrata valmistajien antamiin arvoihin nykyisille suojalaitteille.

5.1 Virta- ja jännitemittausten tulokset

Erotusmuuntajakeskusten virta- ja jännitetiedot mitattiin jokaiselta keskukselta lämpötilojen seurannan päätteeksi. Jännitetietojen perusteella nähtiin kuinka valitut jänniteportaat toteutuvat ja virtatietojen myötä saatiin tietää, millaisia virtoja suojalaitteiden tulisi pystyä jatkuvasti kestämään. Tutkittavien keskusten virta- ja jännitetiedot ovat koottuna taulukossa 4, jossa A- ja B -kirjaimet tarkoittavat erotusmuuntajien kahta toisiopiiriä.

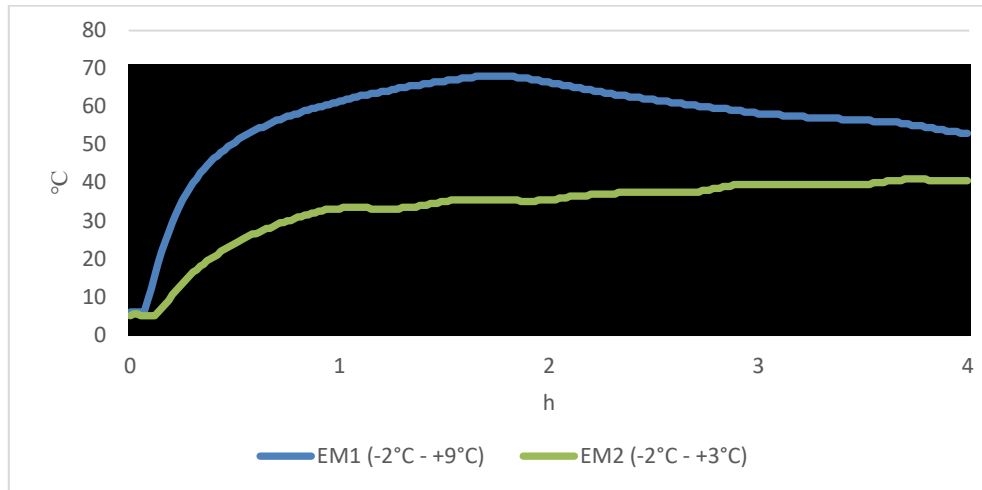
Taulukko 4. Jännite- ja virtatiedot

EM-tunnus	Virta A	Virta B	Jännite A	Jännite B
EM1	33,2 A	32,2 A	215,4 V	208,0 V
EM2	37,6 A	38,3 A	230,2 V	234,6 V
EM3	17,0 A	16,6 A	230,4 V	219,2 V
EM4	17,2 A	19,6 A	211,3 V	215,6 V

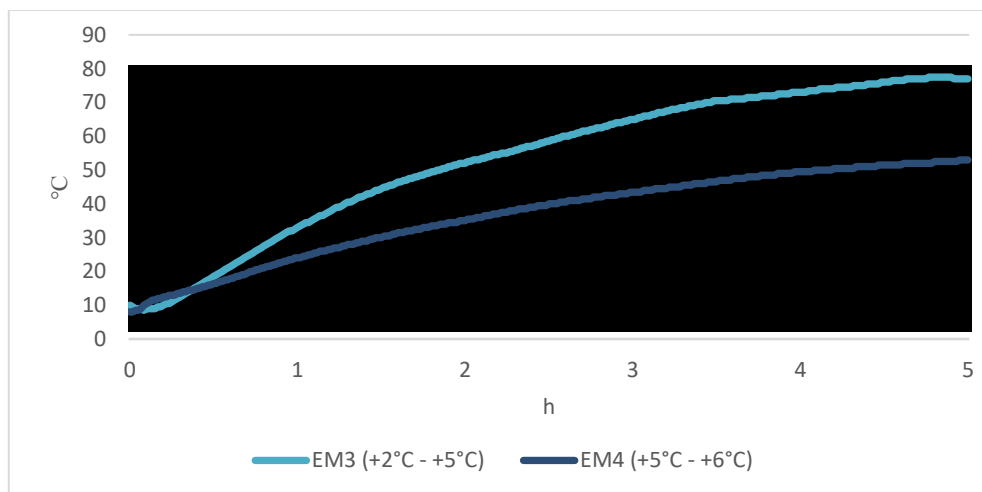
Tarkastelun kohteena olleiden neljän erotusmuuntajan toisiopiirien virtojen, sekä jännitteiden välillä oli eroja. Osassa keskuksista mitatut virrat liikkuivat lähellä suojalaitteiden nimellisvirtoja, kun toisten kohdalla lukemat olivat reilusti alhaisemmat. Toisiopiirien jännitteet vaihtelivat myös, eli käytössä oli eri jänniteportaita. Toteutuneet jännitteet eivät aina täsmänneet keskusten liittimiin merkittyjen arvojen kanssa.

5.2 Lämpötilamittausten tulokset

Tutkittavista keskuksista saatiin lämpötilatieto minuutin välein tarkastelujaksojen ajan. Lämpötilatietojen tallentamista jatkettiin, kunnes tallennin poistettiin keskusten sisältä. Erotusmuuntajakeskusten EM1- ja EM2-keskusten mittaustulokset neljän tunnin tarkastelujaksojen ajalta on esitetty kuvan 9 kuvaajassa. Vanhempien yläpuolelta aukeavien keskusten lämpötilatiedot viiden tunnin jaksojen ajalta on esitetty kuvan 10 kuvaajassa. EM-tunnusten perässä suluissa on ilmoitettu millä välillä ulkolämpötila oli tarkastelujakson aikana.



Kuva 9. Jakokaappimallisten keskusten lämpötilat



Kuva 10. Yläpuolelta avattavien keskusten lämpötilat

EM1-keskuksen kohdalla lämmitys kytkettiin erotusmuuntajan logiikalta ”tehotilaan” eli ylemmälle lämpötilan asetusarvolle, johon myös kauko-ohjaajan on mahdollista kytkeä lämmitys kahden tunnin ajaksi kerralla. Sisälämpötilan nousu jatkui kahden tunnin ajan nousten 68 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen lämmönsäätöjärjestelmä pudotti lämmityksen alemmalle lämpötilan asetusarvolle. Tehotilan kytkeydyttyä pois päältä myös keskuksen lämpötila laski seuraavan kahden tunnin aikana 53 °C:seen, eli lämmityksen ollessa alemmalla teholla keskusten lämpeneminen ei ole yhtä voimakasta. Mittausta ei enää toistettu pakottamalla täyttä lämmitystehoa päälle pidemmäksi aikaa, mutta lämpötilakäyrän perusteella lämpötilan nousu kahden tunnin kohdalla oli jo melko hidasta.

EM2-keskuksen lämmitys kytkettiin myös käsikäytöllä päälle ja kiskon lämpötilan asetusarvoksi asetettiin 40 °C, mitä käytetään liikenneviraston ohjeen mukaan ylempänä lämpötilan asetusarvona erotusmuuntajakohtaisen säädön järjestelmissä. Keskuksen sisälämpötilan nousu jatkui noin 3,5 tuntia 41 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen lämpötila vakiintui. Verrattuna

EM1-keskukseen lämpeneminen oli alusta lähtien maltillisempaa. Ulkolämpötila oli aloitusajankohtana sama kuin EM1-keskuksen kohdalla, mutta pysyi seurantajakson ajan hieman alhaisempana.

EM3-keskus oli rakenteeltaan vanhemman mallinen päältä aukeava, jossa lämmönsäätö perustui jännitevalintaan. Lämpötilantallennin sijoitettiin DIN-kiskon päälle samaan tasoon johdonsuojakatkaisijoiden kanssa ja lämmitys kytkettiin lämmityskeskuksesta 1/1-asentoon eli täydelle teholle. Viiden tunnin seurannan aikana lämpötila nousi tasaisesti 50 °C:seen, jolloin lämpeneminen tasaantui.

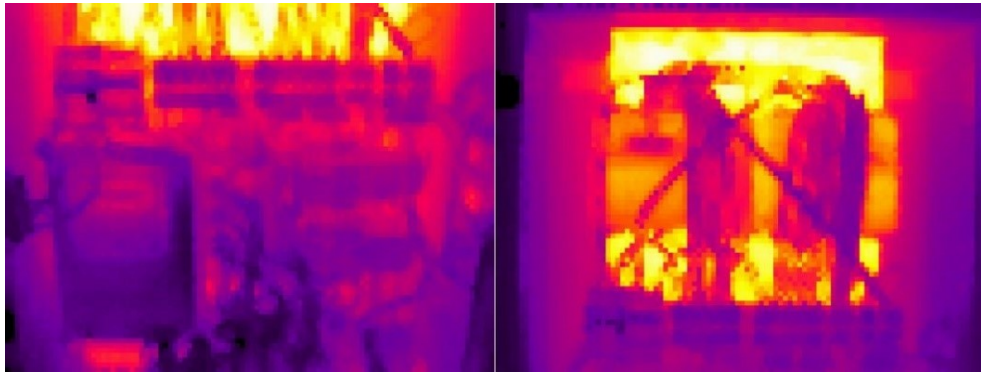
EM4-keskus oli toinen päältä avattavista keskuksista, jossa suojalaitteina oli tulppasulakkeet ja kotelorakenne hieman erilainen. Mittaukset suoritettiin samaan tapaan kuin edellisen kohdalla myös lämmönsäätöjärjestelmän ollessa samanlainen. Lämpötila nousi tutkittavista keskuksista selkeästi korkeimmaksi ylimmän mitatun lämpötilan ollessa 77,5 °C. Eroa EM3-keskukseen selittää todennäköisesti ainakin keskuksen rakenne, mikä oli huomattavasti tiiviimpi.

Lämpötilamittausten tuloksista voidaan yleisesti todeta, että kaikkien keskusten sisälämpötilat nousevat erotusmuuntajia kuormitettaessa korkeammiksi kuin valmistajien suojalaitteiden nimellisarvoille käyttämät viitelämpötilat. Uudemman mallisissa keskuksissa ensimmäisen tunnin jälkeen nopeampi lämpeneminen hieman tasoittui, kun vanhemmissa keskuksissa lämpeneminen jatkui pidempään tasaisemmin. Neljän erotusmuuntajakeskuksen välisiä eroja lämpenemisen suhteen selittävät erilaiset keskusten rakenteet, jäähdytysratkaisut ja ulkolämpötilan vaihtelu mittausten välillä. Keskuksista mitatut virrat ja jännitteet poikkesivat myös toisistaan eli muuntajien kuormitus ei ollut kaikissa yhtä suurta. Erot muuntajien kuormituksissa eivät kuitenkaan selitä eroja tutkittavien keskusten lämpenemisen välillä, koska esimerkiksi EM2-keskuksesta mitatut virrat ja jännitteet olivat suurimmat, mutta lämpeneminen vähäisintä.

Lämpökamerakuvilla saatiin havainnollistettua, kuinka paljon erotusmuuntajien käämit lämpenevät ja lämmittävät keskuksia. Etenkin uusimpien kaappimallisten keskusten kuvista nähtiin selkeästi, että korkeimmat lämpötilat ovat eniten lämpöä tuottavien erotusmuuntajien käämien lähetyvillä ja yläpuolella. Lämpimän ilman noustessa ylöspäin on keskuksen alaosassa alhaisemmat lämpötilat, kun siellä sijaitsevat komponentit tuottavat lämpöä huomattavasti erotusmuuntajaa vähemmän.

Kuvassa 11 on kaksi lämpökamerakuvaa vierekkäin EM1-keskuksen sisäpuolelta, joissa korkeat lämpötilat näkyvät punaisen ja keltaisen sävyinä matalampien lämpötilojen näkyessä tummempina violetin ja sinisen sävyinä. Vasemmanpuoleinen kuva on keskuksen alaosasta ja oikeanpuoleinen yläosasta. Lämpökameralla saatiin näkyviin kuvan keskipisteen lämpötila, minkä perusteella käämien lämpötila oli EM1-keskuksen

lämpötilamittausten jälkeen n. 120 °C ja kuvissa keltaisena näkyvän kiinnityslevyn yli 70 °C.



Kuva 11. Lämpökamerakuvat EM1-keskus








5.3 Sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden mitoittaminen

Tässä kappaleessa tarkastellaan johtimien kuormitettavuuden määrittämistä ja sopivien suojalaitteiden valintaa vaihteenlämmityksen erotusmuuntajakeskusten kohdalla. Sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden mitoittamiseksi vertaillaan sekä kaapelien, että suojalaitteiden asennusolosuhteiden vaikutusta niiden kuormitettavuuteen ja toimintaan.

5.3.1 Johtimien kuormitettavuus mitoittamisessa

Kaapelointi erotusmuuntajilta vaihteenlämmitysvastuksille on toteutettu joko MCMK 4x6+6 tai MCMK 4x2,5+2,5 kaapeleilla, joissa eristemateriaalina on PVC ja johdinmateriaalina kupari. Nykyään yleisemmin käytetään poikkipinnaltaan 6 mm²:n johtimilla varustettua kaapelia. Taulukosta 5 saadaan standardin SFS-6000-5-52 mukaisesti 6 mm²:n johtimille kuormitettavuudeksi 46 A ja 2,5 mm² johtimille 29 A, mikäli kaapelit asennetaan putkessa maahan. Tällöin kuormitettavuus valitaan sarakkeesta asennustavan D1 kohdalta.

Taulukko 5. Johtimien kuormitettavuus (SFS-6000-5-52, 2017, 38)

Johtimen nimellis- poikkipinta	Taulukon B.52.1 mukaiset asennustavat						
	A1	A2	B1	B2	C	D1	D2
mm ²							
1	2	3	4	5	6	7	8
Kupari							
1,5	14,5	14	17,5	16,5	19,5	22	22
2,5	19,5	18,5	24	23	27	29	28
4	26	25	32	30	36	37	38
6	34	32	41	38	46	46	48
10	46	43	57	52	63	60	64
16	61	57	76	69	85	78	83
25	80	75	101	90	112	99	110
35	99	92	125	111	138	119	132
50	119	110	151	133	168	140	156
70	151	139	192	168	213	173	192
95	182	167	232	201	258	204	230
120	210	192	269	232	299	231	261
150	240	219	300	258	344	261	293
185	273	248	341	294	392	292	331
240	321	291	400	344	461	336	382
300	367	334	458	394	530	379	427

Taulukosta 5 saatavat kuormitettavuusarvot on laskettu standardin mukaisissa normaalioloissa, joten tapauskohtaisen kuormitettavuuden laskemiseksi tulee huomioida tarvittavat korjauskertoimet. Normaaleissa olosuhteissa Suomessa pidettävällä maan lämpötilalla 15 °C saadaan korjauskertoimeksi 1,05. Maan lämpöresistiivisyyden arvolla 1,0 K m/W käytetään korjauskerronta 1,18. Mikäli putkitettuja kaapeleita on asennettu esimerkiksi neljä saman suuntaisesti kiinni toisissaan, kerrotaan kuormitettavuus kertoimella 0,75. (SFS-6000-5-52, 2017, 38-53.) Johtimien kuormitettavuus saadaan kertomalla taulukosta 5 johtimen poikkipinnan ja asennustavan kohdalta valittu arvo korjauskertoimilla.

Edellä mainittujen korjauskertoimien tulo on 0,93 jolloin asennustavalla D1 saadaan 6 mm² johtimille kuormitettavuudeksi 42,8 A ja 2,5 mm² johtimille 27,0 A. Laskelman mukaisille johtimille ylikuormitussuojaksi voidaan tällöin valita kuormitettavuutta pienemmän nimellisvirran johdonsuojakatkaisijat. Toteutettaessa suojaus gG-tyyppin tulppasulakkeilla käytetään kaavaa 4, jolloin

$$(1,45/1,6) \times 27 \text{ A} = 24,5 \text{ A} \text{ ja}$$

$$(1,45/1,6) \times 42,8 \text{ A} = 38,8 \text{ A}$$

Tällöin 2,5 mm² johtimille valittavan sulakkeen nimellisvirran täytyy olla pienempi kuin 24,5 A ja 6 mm² johtimille pienempi kuin 38,8 A.

Erotusmuuntajien toisiopuolen johtimet vaihteenlämmitysvastusten kytkentärasioille on kytketty rinnakkain. Johtimet syöttävät eri tehoisia lämmitysvastuksia, joten virrat eivät jakaudu tasaisesti johtimien välillä. Tästä

johtuen jokaisen johtimen kuormitettavuutta ja suojausta täytyy tarkastella erikseen. Esimerkiksi EM1-keskuksen tapauksessa suurin virta kulkee tukikiskojen rinnakkain kytkettyjen lämmitysvastuksien johtimissa. Erotusmuuntajalta mitatulla jännitteellä 215,4 V kyseisestä johtimesta mitattiin virta 17,7 A, jolloin sekä 2,5 mm²:n, että 6 mm²:n johdinpoikkipinnat ovat normaalioloissa kuormitettavuuden puolesta riittäviä. Kaapelointi ja vastusten tehot vaihtelevat riippuen vaihdetyypistä ja lämmityksen toteutustavasta.

Lämmitysvastusten H07RN-F-liitäntäkaapeleiden ollessa poikkipinnaltaan 2,5 mm² saadaan johtimien kuormitettavuudeksi ilmassa 36 A, koska eristemateriaali kyseisessä kaapelityypissä on EPR. Liitäntäkaapelit kulkevat liitäntäkoteloilta vastuksille rautatiekiskon vieressä. Ilmassa oleville kaapeleille annetuilla korjauskertoimilla kuormitettavuutta voidaan korjata ylöspäin lämpötilan ollessa alhaisempi kuin 30 °C. Esimerkiksi 10 °C:n lämpötilassa kuormitettavuudeksi saadaan 41,4 A. Lämmitysvastusten tapauksessa liitäntäkaapeleiden pituudet ovat kuitenkin niin pieniä, että käytännössä mitoittaminen voidaan tehdä kytkentärasialle tuotavan kaapeloinnin mukaan.

Valittaessa suojalaitteita kaapeleiden kuormitettavuuden perusteella, käytettävät korjauskertoimet ulkoisten olosuhteiden huomioimiseksi vaikuttavat lopputulokseen. Vaihteenlämmityksen erotusmuuntajakeskukset ja niiden toisiopiirien suojalaitteet ovat jännitteisiä silloin, kun vaihteenlämmitys on päällä. Liikenneviraston ohjeen mukaan vaihteenlämmityksen päälle kytkeytymistä rajoittava termostaatti asetetaan 5 °C:n lämpötilaan, jolloin lämmitys ei kytkedy päälle ulkolämpötilan ollessa tätä korkeampi. Ulkolämpötilan ollessa alle 5 °C voisi olettaa myös maan lämpötilan olevan alhaisempi, kuin kuormitettavuuksia laskettaessa käytettävä 15 °C. Esimerkiksi maan lämpötilassa 10 °C saadaan PVC-eristeisille johtimille korjauskertoimeksi 1,10. (SFS-6000-5-52, 2017, 51).

Suojalaitteita valittaessa täytyy varmistaa myös oikosulkusuojauksen toteutuminen. Pienimmän piirissä esiintyvän oikosulkuvirran täytyy olla riittävä, jotta suojalaite toimii vian sattuessa missä tahansa piirin kohdassa. Esimerkiksi laukaisukäyrän B johdonsuojakatkaisijalla 5 kertaa katkaisijan nimellisvirran suuruinen laskennallinen pienin oikosulkuvirta riittää oikosulkusuojauksen toteutumiseen. Lisäksi suojalaitteen katkaisukykyyn tulee riittää katkaisemaan suurimmat mahdolliset oikosulkuvirrat.

5.3.2 Suojalaitteiden korjauskertoimet

Normaaleissa olosuhteissa suojalaitteiden valitseminen voidaan tehdä valitsemalla suoraan nimellisvirraltaan sopiva suojalaite, mutta suojalaitteiden asennusympäristön lämpötilat vaikuttavat niiden toimintaan. Valmistajat käyttävät suojalaitteiden toiminta-arvoja ilmoittaessaan asennusympäristön viitelämpötilana yleensä 20- tai 30 °C, joten vaihteenlämmityksen erotusmuuntajakeskusten sisällä korkeammiksi nousevat lämpötilat tulisi huomioida suojalaitteita valittaessa. Tutkittavien keskusten SFS-EN 60898-1 standardin mukaisilla johdonsuojakatkaisijoilla tilana käytetään 30 °C. Siemensin tulppasulakkeilla viitelämpötila on 20 °C (Siemens, 2010).

Valmistajasta riippuen suojalaitteille annetaan ympäristön lämpötilan huomioimiseksi taulukoita tai korjauskertoimia, joilla saadaan korjattua suojalaitteille ilmoitettuja nimellisarvoja toimintaympäristön mukaan. Taulukossa 6 on jokaiselle tässä työssä tarkasteltavalle suojalaitteelle valmistajien korjauskertoimilla lasketut tai taulukoista saadut virta-arvot nimellisvirtaa korkeammissa lämpötiloissa.

Taulukko 6. Ympäristön lämpötilan vaikutus

Suojalaite	virta ympäristön lämpötilassa							
	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
ABB S202 B 40 A		37,7 A		35,3 A		32,7 A		29,8 A
Moeller PLS6 C 40 A	39 A	39 A	38 A	37 A	36 A	35 A	35 A	34 A
ABB S261 B 25 A		23,6 A		22 A		20,4 A		18,6 A
Tulppasulake Siemens gG 25 A		23,5 A		22,5 A		21,5 A		20,2 A

Johdonsuojakatkaisijoiden tuottaessa myös itse lämpöä sulakkeita enemmän, täytyy ympäristön lämpötilan lisäksi huomioida katkaisijoiden määrä asennettaessa useampi katkaisija kiinni toisiinsa. Koska lähelle nimellisvirtaansa kuormitettavien ryhmien katkaisijoita ei suositella asennettaviksi vierekkäin, olisi niiden välille hyvä jättää riittävästi tilaa ilmankierron varmistamiseksi tai asentaa väleihin tarkoituksenmukaiset välikappaleet, jotka ovat leveydeltään vähintään 9 mm. Tällöin useampaa katkaisijaa ei tarvitse huomioida korjauskertoimilla. Tässä työssä tarkasteltavien johdonsuojakatkaisijoiden korjauskertoimet vierekkäisille katkaisijoille on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Vierekkäin asennetut johdonsuojakatkaisijat

Suojalaite	Vierekkäin asennetut johdonsuojakatkaisijat							
	2	3	4	5	6	7	8	
ABB S202 B 40 A	0,9	0,9	0,8	0,8	0,75	0,75	0,75	
Moeller PLS6 C 40 A	0,89	0,84	0,81	0,79	0,78	0,78	0,77	
ABB S261 B 25 A	0,9	0,9	0,8	0,8	0,75	0,75	0,75	

Kahdessa erotusmuuntajakohtaisella säädöllä toteutetussa järjestelmässä oli käytössä ABB S202 ja Moeller PLS6 johdonsuojakatkaisijoita. Taulukoiden arvoja käyttäen voidaan laskea alennetut virta-arvot kahdelle vierekkäin asennetulle katkaisijalle asennusympäristön lämpötilassa. ABB:n nimellisvirraltaan 40 A:n katkaisijalle 50 °C:n lämpötilassa saadaan tulokseksi 31,77 A ja nimellisvirraltaan samalle Moeller PLS6 -katkaisijalle 32,93 A. Esimerkkeinä toimineet katkaisijat ovat laukaisukäyriltään eri, mutta B- ja C-laukaisukäyrien johdonsuojakatkaisijoille pätevät samat korjauskertoimet.

Pääasiassa tarkasteltavissa erotusmuuntajakeskuksissa johdonsuojakatkaisijoita oli asennettu kaksi kappaletta vierekkäin, mutta esimerkiksi EM2-keskuksessa oli viereen sijoitettu myös ohjauskaapelin katkaisija. Korjauskertoimilla ei kuitenkaan huomioida katkaisijoita, joiden suunniteltu kuormitus ei ole lähellä suojalaitteen nimellisvirtaa (*Hager, tekniset tiedot*). Tästä huolimatta katkaisijoiden välille olisi hyvä jättää tilaa ilmankierron mahdollistamiseksi, jolloin kuormitetun katkaisijan lämpö siirtyisi tehokkaammin ympäristöön.

Tulppasulakkeiden tehohäviöiden ollessa pienemmät kuin johdonsuojakatkaisijoiden, ei sulakkeiden vierekkäin asentamiseen ole korjauskertoimia. Sulakkeita ei myöskään rakenteensa puolesta pysty asentamaan yhtä tiiviisti kuin katkaisijoita. Vertailtaessa kahta vierekkäin asennettua nimellisvirraltaan 25 A:n sulaketta ja kahta 25 A:n ABB:n johdonsuojakatkaisijaa, saadaan 50 °C:n lämpötilassa sulakkeelle alennettu arvo 20,25 A ja katkaisijalle arvo 19,8 A.

5.4 Nykyisten suojalaitteiden soveltuvuus

Taulukkoon 8 koottiin tutkittavien erotusmuuntajien toisiopiireissä käytössä olleet suojalaitteet, sekä kyseisistä keskuksista mitatut korkeimmat lämpötilat ja virrat. Sarakkeessa ”suojalaitteen alennettu nimellisvirta” on esitetty kunkin suojalaitteen valmistajan ohjeen mukainen alennettu virta-arvo suluissa esitettyä lämpötilaa käyttäen. Lämpötilaksi valittiin valmistajien taulukoista mitattua korkeinta lämpötilaa edeltävä lämpötila, kun komponenttivalmistajien johdonsuojakatkaisijoille antamissa taulukoissa lämpötiloja on annettu 5- tai 10 °C:n välein. Taulukon 8 kahdessa oikean puoleisessa sarakkeessa on ilmoitettu vierekkäin asennettujen johdonsuojakatkaisijoiden määrä keskuksissa, sekä valmistajien antamat korjauskertoimet kyseisille kappalemäärille.

Taulukko 8. Suojalaitteiden nimellisvirran aleneminen

Tunnus	Suojalaitteet	Keskuksen korkein lämpötila	Alennettu nimellisvirta (ympäristön lämpötilassa)	Mitattu virta	Katkaisijoita rinnakkain	korjauskertoimen
EM1	A ABB S202 B 40 A	68 °C	32,7 A (60 °C)	33,2 A	2 kpl	0,9
	B Moeller PLS6 C 40 A					0,85
EM2	A ABB S262 B 40 A	41 °C	37,7 A (40 °C)	37,6 A	2 kpl	0,9
	B Moeller PLS6 C 40 A					0,85
EM3	A ABB S261 C 25 A	53 °C	22 A (50 °C)	17,0 A	2 kpl	0,9
	B ABB S261 C 25 A			16,6 A		0,9
EM4	A Tulppasulake 25 A	76 °C	20 A (75 °C)	17,2 A	-	-
	B Tulppasulake 25 A			19,6 A		-

Taulukkoon 8 koottuja tietoja tarkastellessa huomataan, että jokaisen keskuksen kohdalla suojalaitteiden virta-arvoja joudutaan korjaamaan alaspäin laitteiden nimellisvirroista. Lämpötilojen ja johdonsuojakatkaisijoiden vierekkäin asentamisesta johtuvien korjauskertoimien myötä saatuja alennettuja virta-arvoja voidaan verrata keskuksista mitattuihin virtoihin ja arvioida suojalaitteiden soveltuvuutta.

Käytettäessä vaihteenlämmityksiä täydellä teholla erotusmuuntajien toisiopiirien virrat nousevat tutkittavissa keskuksissa lähelle suojalaitteiden nimellisvirtoja ja korjauskertoimet huomioiden niiden yli. Tämä tarkoittaa sitä, että todennäköisesti pidemmällä kuormituksella johdonsuojakatkaisijoiden terminen laukaisu katkaisee piirin. Myös sulake palaa kuormituksen kestäessä riittävän kauan ja piirin virran ylittäessä korjauskertoimella lasketun arvon.

Jos tarkastellaan EM1-keskuksen ABB S202 johdonsuojakatkaisijaa ja valitaan sille ympäristön lämpötilaksi 60 °C, saadaan nimellisarvoltaan 40 A:n katkaisijalle alennetuksi arvoksi 32,7 A. Tämän jälkeen käytetään korjauskertoiminta 0,9, koska katkaisijoita on asennettu kaksi kappaletta kiinni toisiinsa. Alennetuksi virta-arvoksi saadaan 29,43 A, mikä on pienempi kuin piiristä mitattu virta. Taulukossa 1 esiteltiin johdonsuojakatkaisijoiden toimintarajavirtoja mistä nähdään, että katkaisijan pitäisi kestää tunnin ajan 1,13 kertaa nimellisvirtansa suuruista kuormitusta. Katkaisijan pitäisi siis kestää tunnin ajan 33,26 A:n kuormitusta katkaisematta. Piirin virran pysyessä mitatussa ja keskuksen lämpötilan yli 60 °C:n, katkaisijan terminen laukaisu todennäköisesti toimisi kuormituksen jatkuessa riittävän pitkään.

Jotta suojalaitteet toimisivat vasta tarpeen vaatiessa, kuten johtimien ylikuormitustilanteessa, pitäisi ympäristön lämpötilan olla suojalaitteiden sietämissä rajoissa tai piirin virran alaisempi. Jälkimmäinen onnistuisi esimerkiksi erotusmuuntajan jänniteporrasta muuttamalla, mikä tarkoittaisi lämmitysvastuksille liian pientä jännitettä ja lämmitystehon alenemista. Tämä ei olisi toivottavaa, eikä liikenneviraston ohjeiden mukaista. Yleisimpien johdonsuojakatkaisijoiden, kuten myös tutkittavissa keskuksissa

käytettyjen katkaisijoiden teknisissä tiedoissa on usein ilmoitettu käyttölämpötila-alueen ylärajaksi 55 °C, joten asennusympäristön lämpötila olisi hyvä saada pysymään tämän alapuolella. Tästä huolimatta korjauskertomia ympäristön lämpötilalle on ilmoitettu yleensä myös korkeammille lämpötiloille. Suojalaitteiden valintaa ei kuitenkaan voida tehdä pelkästään korkeimman asennusympäristössä esiintyvän lämpötilan perusteella, koska suojauksen täytyy olla riittävä myös mahdollisissa alhaisemmissa lämpötiloissa.

5.5 Lämpötilan hallinta

Tässä työssä tutkittavien erotusmuuntajakeskukset poikkesivat rakenteeltaan hieman toisistaan, mikä osaltaan vaikuttaa eroihin lämpenemisen ja jäähtymisen suhteen. Yläpuolelta avattavista keskuksista ensimmäisessä ilmanvaihdon mahdollistivat suljetun kannen reunoille jäävät pienet ilma- raot korvaavan ilman päästessä keskukseseen alakautta. EM4-keskuksesta löytyi pienehköt tuuletusaukot keskuksen reunoista, joskin kyseisessä mallissa kansi oli käytännössä umpinainen ja jäähtytys heikkoa. Kaappimallisissa keskuksissa ei varsinaisia ilmanvaihtokanavia ollut, mutta puolijohde- releiden kohdalle ulkoseiniin oli asennettu jäähtytys-elementit johtamaan lämpöä ulkoilmaan.

Kaappimallisissa keskuksissa suojalaitteina käytettävät johdonsuojakatkaisijat on sijoitettu erotusmuuntajan käämien alapuolelle DIN-kiskoon, joka on kiinnitetty samaan metalliseen runkoon erotusmuuntajan kanssa. Katkaisijat ovat joko toisissaan kiinni tai niiden väliin on asennettu apukosket- timet. Ensimmäinen keino hillitä johdonsuojakatkaisijoiden lämpenemistä on jättää jokaisen katkaisijan välille riittävästi tilaa, jolloin ne eivät kuormi- tettaessa lämmitä toisiaan. Kiinnityspaikka samassa metallisessa rungossa erotusmuuntajan kanssa on siitä ongelmallinen, että lämpökamerakuvan mukaan yli 70 °C:n lämpöisen rungon lämpö pääsee johtumaan suoraan katkaisijoihin. Johtumista voisi rajoittaa joko kiskon tai katkaisijoiden asen- taminen erotusmuuntajan kiinnityslevyyn heikommin lämpöä johtavan kiinnitystavan avulla. Tasaisemmat lämpötilaolosuhteet olisivat kauem- pana erotusmuuntajan käämeistä lähempänä keskuksen alareunaa lämpi- män ilman pyrkiessä keskuksesta ulos yläkautta.

Tässä työssä tarkasteltavina olleissa yläpuolelta avattavissa keskuksissa suojalaitteina on käytössä sekä tulppasulakkeita, että johdonsuojakatkai- sijoita. Myös tämän tyyppisissä keskuksissa katkaisijoita käytettäessä olisi hyvä erottaa kiinni toisiinsa asennetut katkaisijat toisistaan. Suojalaitteiden sijoittelu on kyseisissä keskuksissa hieman ongelmallinen, koska kat- kaisijat ja sulakkeet joudutaan asentamaan erotusmuuntajan yläpuolelle, jolloin muuntajan tuottama lämpö ylöspäin noustessaan lämmittää suoja- laitteita. Korkeimmat lämpötilat myös näissä tapauksissa ovat lähellä muuntajan käämejä, joten lämmön siirtymistä suojalaitteisiin hillitsisi jäl- leen niiden sijoittaminen lähemmäs kantta kauemmas erotusmuuntajasta.

Kiinnityspisteen nostamisesta ylemmäs olisi todennäköisesti hyötyä enemmän keskuksissa, joissa ilma pääsee kiertämään kannen reunojen välistä.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia rautatievaihteiden lämmitysjärjestelmän erotusmuuntajakeskusten lämpenemistä ja selvittää sen vaikutusta erotusmuuntajien toisiopiirien suojalaitteiden toimintaan. Toteutetuilla mittauksilla selvitettiin millaisia vaatimuksia sijoituspaikka keskusten sisällä suojalaitteille asettaa. Nykyisten suojalaitteiden soveltuvuutta tarkasteltiin kaapeleiden suojauksessa noudatettaviin standardeihin, sekä suojalaitteiden valmistajien ohjeisiin perehtyen.

Tutkimus toteutettiin valikoimalla edellisvuosien vikaraporttien perusteella tarkasteltaviksi sellaisia erotusmuuntajakeskuksia, joissa ongelmia oli eniten ilmennyt. Ongelmat eivät rajoittuneet mihinkään tiettyyn keskustyyppiin, joten tarkastelun kohteiksi valittiin neljä toisistaan poikkeavaa kohdetta. Lämpötilamittauksilla saatiin tietoa siitä, kuinka korkeiksi lämpötilat keskusten sisällä nousevat suojalaitteiden sijoituspaikoissa. Mittaukset pyrittiin toteuttamaan eri lämmönsäätöjärjestelmistä ja keskusten välisistä eroista huolimatta mahdollisimman yhtenäisellä tavalla. Lämpötilojen ollessa tiedossa pohdittiin käytössä olleiden suojalaitteiden soveltuvuutta käyttötarkoitukseensa huomioiden piireissä esiintyvät virrat ja keskusten lämpötilat.

Mittaustulosten perusteella todettiin lämpötilojen keskusten sisällä nousevan niin korkeiksi, että se vaikuttaa suojalaitteiden toimintaan. Erotusmuuntajien toisiopiireistä mitatut virrat nousevat varsinkin osassa tarkasteltavina olleista kohteista lähelle sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden nimellisvirtoja. Kun suojalaitteiden mitoituksessa valmistajien ohjeiden mukaisesti huomioidaan ympäristön lämpötila, voidaan todeta suojalaitteiden jatkuvien kuormitusvirtojen kestoisuuden laskevan lämpötilojen noustessa piireistä mitattujen virtojen alapuolelle. Kuormituksen kestäessä riittävän kauan tämä johtaa sulakkeiden palamiseen tai johdonsuojakatkaisijoiden termisen laukaisumekanismiin toimimiseen, vaikka piirien virrat eivät nousisi yli suunnitellun.

Kuormitusvirtojen ollessa lähellä sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden nimellisvirtoja, olisi suojalaitteiden lämpenemisen hillitsemisestä merkittävää hyötyä. Mahdollisia keinoja lämpenemisen hallintaan ovat esimerkiksi johdonsuojakatkaisijoiden väleihin jätettävät välit ilmankierron mahdollistamiseksi ja suojalaitteiden uudelleensijoittelu keskuksissa. Sijoituspaikan olisi hyvä olla sellainen, ettei erotusmuuntajan tuottama lämpö suoraan säteile tai johdu hyvin lämpöä johtavia rakenteita pitkin suojalaitteisiin. Kaappimallisissa keskuksissa tasaisimmat lämpötilaolosuhteet ovat keskuksen alaosassa mahdollisimman kaukana lämpenevästä

erotusmuuntajasta. Vanhoissa päältä avattavissa keskuksissa sijoittelu on haastavampaa, mutta parempi vaihtoehto olisi lähempänä kantta varsinkin keskuksissa, joissa ilma pääsee kiertämään kannen raoista.

Erotusmuuntajien jänniteportaiden valinta vaikuttaa myös toisiopiirien virtoihin. Jänniteportaiden muuttaminen lämmitysvastusten nimellisjännitettä alhaisemmaksi alentaisi kuitenkin myös vastusten lämmitystehoa, mikä ei ole toivottua eikä ohjeiden mukaista. Suojalaitteiden vaihtaminen nimellisvirraltaan suurempiin vaatisi kuormitettavuuksien sekä oikosulkuvirtojen tarkastamisen kohdekohtaisesti ja todennäköisesti muutoksia kaapelointeihin. Kuormitettavuuksien määrittämisessä käytettäviä korjauskertoimia varten voisi selvittää todelliset olosuhteet, kuten maan lämpötilan, joissa vaihteenlämmitystä käytetään. Suojalaitteiden valinnassa olisi hyvä kiinnittää huomiota myös eri laitteiden lämpötilavaihteluiden sietokykyyn, koska niidenkin välillä on valmistajien korjauskertoimien perusteella eroja.

Suojalaitteiden sijoituspaikka erotusmuuntajakeskusten sisällä on haastava, koska lämpötilat vaihtelevat laajalla alueella. Suojauksen täytyy toteutua kaikissa olosuhteissa ja lämpötilanvaihtelut vaikuttavat suojalaitteiden toimintaan lämpötilan poiketessa valmistajien viitelämpötiloista kumpaan suuntaan tahansa. Työssä tehtyjen lämpötilamittausten kaltainen seuranta voitaisiin toistaa eri kohdissa keskuksia, jotta pystyttäisiin arvioimaan suojalaitteiden sijoittelulla tasaisempiin lämpötilaolosuhteisiin saataavaa hyötyä. Tämän tutkimuksen perusteella ei täysin voida yleistää eroja eri keskustyyppien välillä, koska tietoa kerättiin vain yhdestä kunkin tyyppisestä kohteesta. Tarkempaa tietoa lämpenemisen syistä ja eroista eri tyyppisten keskusten ja lämmitysjärjestelmien välillä saataisiin tutkimalla useampaa samantyyppistä keskusta.

LÄHTEET

ABB 2013. *Comparison of tripping characteristics for miniature circuit-breakers*. Haettu 27.2.2018

<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CDC400002D0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. *Miniature Circuit Breaker S 200/S 200 M Datasheet*. Haettu 26.4.2018

<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CDC002157D0202&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Ensto 2008. Haettu 27.2.2018 osoitteesta

<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210598828380/1211200962452/1211200987813.html>

Ensto Building Technology 2012. *Johdonsuojakatkaisijan toimintarajavirrat*. Suomen Virtuaaliammattikorkeakoulu. Haettu 28.2.2018 osoitteesta

http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/etuotanto/0705016/5hZP4sEOP/Johdonsuojataulukko_vaaka0904.pdf

Harsia Pirkko. Virtuaali-AMK. 2010. *Kuormitettavuus*. Haettu 27.2.2018

<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojak-sot/030503/1132057231100/1132058013949/1132059169522/1132065677938.html>

Harsia Pirkko. Ensto 2008. *Johdonsuojakatkaisijat*. Haettu 27.2.2018 osoitteesta

<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594509783/1210594818536.html>

Harsia Pirkko. Ensto 2008. *Sulakkeet*. Haettu 27.2.2018 osoitteesta

<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594509783/1210594789763.html>

Hager. *Johdonsuojakatkaisijat, tekniset tiedot*. Haettu 23.4.2018 osoitteesta

<https://www.utu.eu/sites/default/files/attachments/johdonsuojakatkaisijat-tekniset-tiedot-11fi0211.pdf>

Lepistö A, Smolander R, Huhtamäki R, Laurila A, Männikkö J, Solasaari O, Granlund M, Rautoja P 2006, *B17 Vaihteenlämmityksen tekniset määreet*
Haettu 19.2.2018 osoitteesta

[https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_b17 vaihteenlammituksen tekniset maareet.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf4/rhk_b17_vaihteenlammituksen_tekniset_maareet.pdf)

Polylux. *Rail & Switch point transformers*. Haettu 22.4.2018 osoitteesta

<https://www.intertrafo.fi/assets/files/DataSheetPolylux/RailwaySwitch-PointHeatingLeaflet.pdf>

Sesko 2017. Sähköasennukset: Osa 1, *SFS 6000 pienjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Sesko 2017. Sähköasennukset: Osa 4, *SFS 6000 pienjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Sesko 2017. Sähköasennukset: Osa 5, *SFS 6000 pienjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Sesko 2017. Sähköasennukset: Osa 8, *SFS 6000 pienjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Siemens 2010. *Fuse Systems Configuration manual*. Haettu osoitteesta

http://www.siemens.fi/pool/products/industry/iadt_is/tuotteet/pienjanitekojeet/kytkenta_suojaus_ ja_ohjaus/sulakkeet/teknistae-sulakkeista-englanti.pdf

Teerihalme Henna 2011. *Radanpidon sähkönkulutus ja energiansäästöpotentiaali*. Haettu 19.2.2018 osoitteesta

https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121372/lr_2011_978-952-255-702-5.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tiainen E. 2017. *Käsikirja rakennusten sähköasennuksista* (24., uudistettu painos.). Espoo: Sähköinfo Oy.

Viitala T, Anttonen M, Pollari J, Ojanperä K 2012, *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4 Vaihteet*. Haettu 19.2.2018 osoitteesta

https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2012-22_rato_4_web.pdf