

Teppo Järvinen

# RYHMÄJOHDON VALOKAARISUOJAUS

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus

2023



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Teppo Järvinen
Työn nimi	Ryhmäjohton valokaarisuojaus
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
Vuosi	2023
Sivut	53 sivua, liitteitä 3 sivua
Työn ohjaajat	Juha Korpijärvi, Risto Kuitunen

## TIIVISTELMÄ

Kiinteistöjen tulipaloista merkittävä osa on sähkölaitteiden aiheuttamia. Sähköpalon aiheuttamat vahingot voivat olla suurempia kuin muiden palojen. Tavalliset ylivirtasuojat tai vikavirtasuojakytkimet voivat havaita osan paloriskiä aiheuttavista sähkövikoista, mutta sarjavalokaarta ei näillä laitteilla voida havaita lainkaan. Opinnäytetyössä kuvataan valokaarivikasuojiin teoria ja toiminta pääpiirteittäin ja toteutetaan laboratoriokäyttöön soveltuva laite, jolla valokaarivikoja voidaan tuottaa ja havaita. Opinnäytetyön ja laitteen avulla lukija tutustuu valokaariin ja niiltä suojautumiseen.

Valokaaren aiheuttama paloriski johtuu valokaaren suuresta lämpötilasta. Valokaari voidaan havaita analysoimalla virtapiirissä kulkevaa virtaa ja valokaaren palamisen aiheuttamaa suuritaajuista kohinaa. Sähköasennuksissa käytettäviin johtimiin voi syntyä asennuksen tai käytön yhteydessä vikoja, jotka johtavat johtimien lämpiämiseen ja ajan kanssa jopa valokaarivikaan. Yhdysvalloissa valokaarivikasuoja on ollut saatavilla kuluttajajärjestelmiin 90-luvun lopulta lähtien, ja ne ovat siellä pakollisia monissa kotitalouksien ja muiden rakennusten varsinkin makuutiloihin liittyvissä asennuksissa. Euroopassa valokaarivikasuoja useammin suositellaan kuin vaaditaan. Suomessa valokaarivikasuojiin käyttö on toistaiseksi ollut hyvin vähäistä.

Opinnäytetyössä rakennettuun laboratoriolaitteeseen toteutettiin sarjavalokaaria synnyttävä mekanismi. Laitteessa valokaari tuotetaan samantapaisella järjestelyllä kuin valokaaria koskevassa kansainvälisessä standardissa kuvatussa valokaarigeneraattorissa. Valokaari saadaan aikaan synnyttämällä virralliseen virtapiiriin pieni katkos vaihejohtimeen, jolloin piirissä olevan valokaarivikasuojan tulee havaita piirissä oleva vika. Laitteessa voidaan myös aiheuttaa vuotovirta nollajohtimen ja suojamaajohtimen väliin ja tutkia, miten tavallinen vikavirtasuojakytkin tai valokaarivikasuojaan integroitu vikavirtasuojaja havaitsee vuotovirran. Laitteeseen voidaan liittää erilaisia sähkölaitteita kuormiksi, jolloin voidaan havaita erilaisten kuormien vaikutus vikavirtojen havaitsemiseen.

Laboratoriolaitteen toteutus onnistui suunnitellulla tavalla. Laitteessa voidaan synnyttää hallitusti valokaaria, ja havainnoida miten valokaarivikasuoja havaitsee valokaaria ja katkaisee viallisen virtapiirin. Laitteessa olevat elektrodit ovat helposti vaihdettavissa, jolloin voidaan tutkia eri elektrodimateriaalien vaikutus valokaaren syntyyn ja sen havainnointiin.

**Asiasanat:** valokaari, ryhmäjohto, suojaus

Degree title	Bachelor of Engineering
Author	Teppo Järvinen
Thesis title	Final circuit AFDD protection
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2023
Pages	53 pages, 3 pages of appendices
Supervisors	Juha Korpijärvi, Risto Kuitunen

## ABSTRACT

A large proportion of property fires are caused by electrical equipment. Electrical fires may cause greater damage than other types of fires. Circuit breakers (MCBs) or residual current devices (RCDs) may detect some electrical faults that cause a fire risk, but a series arc fault cannot be detected with these devices at all. In this thesis, the theory and operation of arc fault detection devices (AFDDs) were described and a piece of equipment suitable for laboratory use was built, with which arc faults can be produced and detected. With this thesis and the device, the reader can become familiar with electric arcs and how they are detected.

An arc is a bright electrical discharge between two conductors. The fire risk from the arc is due to the high temperature of the arc. An arc can be detected by analyzing the current flowing in the circuit and the high-frequency noise caused by the arc. The wires used in electrical installations may suffer damage during installation or use that may lead to overheating and arc faults. Some devices cause arc-like disturbances even when operating normally, and AFDDs must be able to distinguish these normal situations from true arc faults to minimize unnecessary disconnections of circuits. In the US, arc flash circuit interrupters (AFCIs) have been available for consumer installations since the late 1990s and are mandatory in many installations in households and other buildings, especially those related to sleeping quarters. In Europe, AFDDs are more often recommended than mandated. In Finland, the use of AFDDs has so far been very limited.

Only serial arc generation was implemented in the laboratory device for the thesis. In the device, the arc is produced with the same arrangement as the arc-generator described in the international standard for electric arc protection. The device generates an arc by creating a small gap in the phase conductor in the circuit and the arc fault protector in the circuit should detect the fault. In a separate circuit a fault current can be made between neutral and protective earth conductors to see how a standard RCD detects the fault current. Different types of electrical devices can be connected to the equipment to see the effect of different loads on the detection of fault currents. The device was completed successfully and testing confirmed that it can be used to create and detect electric arcs.

**Keywords:** arc fault, AFDD, AFCI

# SISÄLLYS

SELITYSLUETTELO.....	5
1 JOHDANTO .....	6
2 TYÖN TAVOITE JA TARKOITUS.....	7
3 VALOKAARET JA NIIDEN TUNNISTAMINEN .....	7
3.1 Valokaarien teoriaa.....	8
3.2 Valokaarien syitä .....	13
3.3 Valokaarien luokittelu.....	15
4 VALOKAARIVIAN HAVAITSEMINEN.....	20
4.1 Valokaaren tunnistustapoja .....	20
4.2 Valokaaren havaitsemisen ongelmia .....	23
5 VALOKAARIVIKASUOJAT .....	24
5.1 Valokaari ja valokaarivikasuoja.....	24
5.2 Standardin vaatimukset .....	26
5.3 Käyttö Suomessa ja muualla .....	31
6 LABORATORIOLAITE .....	32
6.1 Testauslaitteen rakenne .....	32
6.2 Testauslaitteen komponentit.....	34
6.3 Testauslaitteen rakentaminen.....	38
7 POHDINTA .....	45
LÄHTEET.....	48

## LIITTEET

Liite 1. Valokaarivikasuojan asennusohje

Liite 2. Laboratoriolaitteen kytkentäkaavio

## SELITYSLUETTELO

<b>AFCI</b>	Arc Fault Circuit Interrupter, valokaarivikasuoja.
<b>AFDD</b>	Arc Fault Detection Device, valokaarivikasuoja.
<b>Elektronivyöry</b>	Prosessi, jossa sähkökentän kiihdyttämät elektronit ionisoivat väliaineen atomeja irrottaen niistä lisää elektroneja, jolloin syntyy ketjureaktio, jossa elektronien määrä lisääntyy edelleen.
<b>Fourier-muunnos</b>	Matemaattinen muunnos, jolla aaltofunktiosta saadaan selvitettyä sen sisältämät taajuudet ja niiden amplitudit.
<b>Ionisaatio</b>	Prosessi, jossa sähköisesti neutraalit atomit tai molekyylit saavat sähköisen varauksen joko vastaanottamalla tai luovuttamalla elektronin.
<b>Kenttäemissio</b>	Elektronien vapautuminen materiaalista sähkökentän vaikutuksesta.
<b>MCB</b>	Miniature Circuit Breaker, johdonsuojakatkaisin.
<b>Mitoitusvirta</b>	Sähkövirta, joka kulkee piirissä normaalitilanteessa.
<b>PVC</b>	Polyvinyl Chloride, PVC-muovi.
<b>RCD</b>	Residual Current Device, vikavirtasuojakytkin.
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator, vastaanotetun signaalin voimakkuuden ilmaisim.
<b>Terminen emissio</b>	Elektronien vapautuminen materiaalista, jota kuumennetaan.
<b>Virtajännitekarakteristika</b>	Komponentin virran ja jännitteen muutokset toisiinsa nähden, yleensä esitetty graafin muodossa.
<b>Wavelet-muunnos</b>	Matemaattinen muunnos, jolla signaali voidaan jakaa komponentteihin, joita voidaan tarkastella erikseen. Sopii Fourier-muunnosta paremmin signaaleille, joissa on epäjatkuvuuskohtia.

## 1 JOHDANTO

Yhdysvalloissa sähköpalo aiheuttaa yli kaksi kertaa enemmän omaisuusvahinkoa kuin muunlainen tulipalo. Erilaiset valokaariviat aiheuttavat yli kolmanneksen kaikista sähköpaloista. Yksi mahdollinen syy sähköpalojen vakavuuteen on se, että sähköpalot voivat alkaa piilossa, esimerkiksi seinärakenteiden sisällä. Tällöin niitä ei välttämättä havaita, ennen kuin ne ovat ehtineet levitä laajoiksi paloiksi. (USFA 2018, 1–2.) Vuonna 2017 tehdyn selvityksen mukaan Suomessa kiinteiden sähköasennusten vikaantumisista johtuvista tulipaloista noin kaksi kolmasosaa aiheutui sähköjohdoista tai niiden liitoksista (Hatakka & Huurinainen 2017, 41). Kahdestakymmenestäyhdeksästä Euroopan maasta kerätyn tiedon perusteella on arvioitu, että noin neljännes kaikista tulipaloista on lähtöisin sähkölaitteistoista (FEEDS 2020).

Kansainvälinen standardi IEC 62606 määrittelee valokaaren sähköpurkaukseksi kahden elektrodin välillä olevan eristeaineen läpi. Valokaareen liittyy yleensä elektrodien osittainen sulaminen. Valokaarivika määritellään vaarallisena ja ei-tarkoituksellisena valokaarena kahden johtimen välillä. Valokaarivikasuoja on laite, joka havaitsee valokaaria ja vähentää niiden vaikutusta erottamalla viallisen johdon sähkönsyötöstä havaittuaan valokaaren. (Farooq 2017, 8.) Valokaarivikasuoja voi vähentää sähköasennuksista tai -laitteista johtuvia tulipaloja ja siten suojata ihmisiä tai omaisuutta (SFS-käsikirja... 2017, 109). Mitoitusvirraltaan korkeintaan 300 mA vikavirtasuojakytkimiä voidaan käyttää palosuojaukseen (SFS-käsikirja... 2017, 307). Kaikissa tilanteissa vikavirtasuojakytkin ei kuitenkaan havaitse paloriskin aiheuttavia vikavirtoja, joten valokaarivikasuoja antaa lisäsuojaa paloriskiä vastaan (Czapp 2019a, 13, 16).

Tässä työssä tutustutaan yksivaiheisen vaihtovirtajärjestelmän ryhmäjohtojen valokaarivikasuojiin, Arc Fault Detection Device (AFDD) tai Arc Fault Circuit Interrupter (AFCI), tekniikkaan ja toimintaan sekä selvitetään, mitä Suomessa ja Euroopassa on määrätty tai suositeltu valokaarivikasuojiin käytöstä sähköasennuksissa. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamkin) Mikkelin kampuksen sähkötekniikan laboratorioon toteutetaan yksinkertainen testauslaitte, jolla voidaan havainnoida valokaarivikasuojan toimintaa ja tutustua sen ominaisuuksiin.

## 2 TYÖN TAVOITE JA TARKOITUS

Opinnäytetyön tarkoituksena on saada valokaarivikasuojien toiminta kuvattua pääpiirteittäin ja toteuttaa laboratorioon testauslaite, jolla vikasuojan toimintaa voidaan havainnollistaa. Laitteeseen toteutetaan ainoastaan sarjavalokaaren tuottamiseen soveltuva valokaarigeneraattori. Rinnakkaisvalokaaren synnyttämiseen tarvittava järjestely tekisi laitteesta huomattavasti monimutkaisemman ja lisäksi huonontaisi laitteen turvallisuutta, sillä rinnakkaisvalokaarella esiintyvät virrat voivat kohota huomattavan suuriksi. Laitteen turvallinen kotelointi suunnitellaan yhteistyössä tilaajan eli Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun edustajan kanssa. Tilaajan edustajana toimii tuntiopettaja Risto Kuitunen. Valokaarivikasuojien toimintaperiaatteet selvitetään kirjallisuudesta. Koska valokaarivikasuojiin liittyviä kansainvälisiä standardeja ei ole mahdollista saada suoraan käyttöön, joudutaan työssä turvautumaan niiden osalta sekundäärlähteisiin.

Testauslaitteen suunnitteluun ei ole tarkoitus soveltaa mitään erillistä prosessia, koska se tulee olemaan hyvin yksinkertainen ja on lisäksi prototyypimäinen yksittäiskappale. Työssä ei ole tarkoitus käsitellä tasavirtajärjestelmiin, lähinnä aurinkokennoasennuksiin ja sähköautojen akkujärjestelmiin soveltuvia valokaarivikasuojia eikä sähkökeskuksissa käytettäviä optisia valokaarisuojia.

Opinnäytetyön tavoitteena on, että valokaarivikasuojan toiminta ja merkitys tulee lukijalle tutuksi. Laboratorioon toteutettavan testauslaitteen avulla voidaan konkreettisesti todeta laitteen toiminta ja vaikutus turvallisuuteen. Laite soveltuu opetuskäyttöön Mikkelin kampuksen sähkölaboratoriossa, ja sen avulla opiskelijoille voidaan käytännössä havainnollistaa valokaarivikasuojalaitteen toiminta ja suorittaa joitain laitteeseen liittyviä mittauksia.

## 3 VALOKAARET JA NIIDEN TUNNISTAMINEN

Amerikkalainen standardi UL 1699 määrittelee valokaaren kirkkaaksi sähköpurkaukseksi eristävän aineen yli, mihin yleensä liittyy elektrodien osittainen sulaminen. Valokaarivika on kyseessä, kun virtapiirissä esiintyy ei-tarkoituksellinen valokaari. Monissa kotitalouden laitteissa, joissa on harjallisia moottoreita tai erilaisia releitä, kuten porakoneissa ja pölynimureissa, esiintyy valokaari-ilmiötä tai kipinäointiä normaaliin toimintaan liittyen. (Restrepo 2007, 1.)

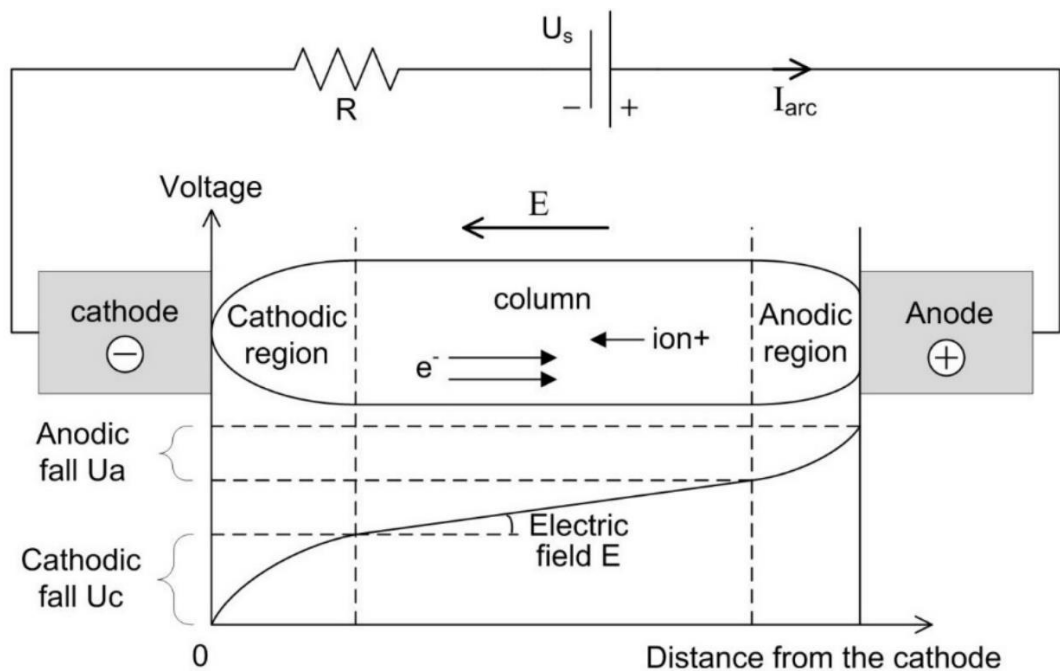
Valokaari ei tarvitse kovin voimakasta sähkökenttää kyetäkseen tuottamaan uusia varauksenkuljettajia ja ylläpitääkseen korkeaa johtavuutta. Valokaari on pysyvä, kunhan siihen tulee riittävästi sähköenergiaa eikä siihen kohdistu häiriötä, kuten elektrodien liiallista kulumista tai huomattavaa jäähtymistä. (Martel 2018, 47–48.) Valokaari voi syntyä kolmella tavalla: kipinästä, kontaktista tai hehkuvasta liitoksesta. Hehkuva liitos on tyypillisesti suurijännitteinen mutta pienivirtainen, kun taas valokaari on pienijännitteinen ja suurivirtainen. (Gammon & Matthews 1999, 1–2).

Valokaarivikasuojien toiminta yleisesti ottaen perustuu ryhmäjohdossa kulkevan sähköanalysointiin eri tavoilla. Valokaarivikasuoja vaatii toimiakseen signaalinkäsittelyä, jolla ryhmäjohdossa esiintyvät valokaaren aiheuttamat korkeataajuiset häiriösignaalit havaitaan. Rinnakkaisvalokaaret havaitaan kohtalaisen hyvin tavallisillakin suojalaitteilla, eli johdonsuojakatkaisijalla tai vikavirtasuojakytkimellä, mutta nämä eivät havaitse sarjavalokaarta yleensä lainkaan (Siemens AG 2016, 16). Erilaisia tapoja havaita valokaari ryhmäjohdossa on vähintäänkin useita kymmeniä, tässä työssä ei ole mahdollista listata niitä kovin kattavasti.

### **3.1 Valokaarien teoriaa**

Valokaaren plasman johtavuus on riippuvainen plasman varattujen hiukkasten tiheydestä ja liikkuvuudesta. Koska varattujen ionien massa on huomattavasti suurempi kuin elektronien, on niiden liikkuvuus huomattavasti pienempi ja ne vaikuttavat virtaan vain noin prosentin verran, joten ionien vaikutus voidaan jättää suurelta osin huomiotta. (Martel 2018, 50.) Korkeammissa lämpötiloissa elektroneilla on sekä suurempi kineettinen energia että suurempi todennäköisyys ionisoida kaasumolekyylejä, ja tällöin sekä elektronien että ionien määrät ja liikkuvuudet suurenevat. Alle 4000 K lämpötiloissa valokaaren johtavuus on hyvin huono, mutta kasvaa jyrkästi noin 10 000 K saakka. Plasman johtavuus kasvaa jonkin verran yli 20 000 K saakka, jossa kaasu on täysin ionisoitunutta. Elektrodeista kaasuuntunut kupari vaikuttaa plasman johtamiseen vain vähän. Yleisesti valokaaren lämpötila on vähintään 5000 K. (Martel 2018, 52.)

Valokaaren pysyvyys riippuu ennen kaikkea valokaaren jännitteestä ja virrasta. Jännite ja virta riippuvat elektrodivälisestä, eristemateriaalista ja elektrodien materiaalista (Martel 2018, 60). Valokaaren jännitteen käyttäytymistä voidaan selittää tehotasapainolla valokaareen tuodun sähkötehon ja valokaaresta poistuvan lämpötehon välillä. Valokaaren pituus vaihtelee jännitteen mukaan. (Zhang ym. 2019, 2281–2282.) Kuvassa 1 on esitetty valokaaren eri alueet.



Kuva 1. Stabiilin valokaaren alueet (Martel 2018, 60)

Elektroneja emittoituu katodista, ja ne kiihtyvät sähkökentän vaikutuksesta anodia kohti. Katodilla esiintyy korkeita virtatiheyksiä, noin 100–10 000 000 ampeeria neliösenttimetrillä, mikä lämmittää katodia huomattavasti. Jännitteen alenema katodilla, muutaman mikrometrin matkalla (kuvassa "cathodic region"), on yleensä noin 8–20 voltia. Sähkökentän kiihdyttämät elektrodit päätyvät anodille, jossa virtatiheys on vain noin prosentti katodin virtatiheydestä, alueella (kuvassa "anodic region"), joka on noin mikrometrin mittainen ja jolla jännitteenalenema on 2–6 voltin luokkaa. Valokaariplasman keskiosassa (kuvassa "column") vaikuttaa tasainen sähkökenttä, jonka voimakkuus on luokkaa 800–3000 V/m. Keskiosan lämpötila on noin kymmenkertainen elektrodien lähialueisiin verrattuna. Valokaaren jännite on kaaren eri alueiden jännitteenalenemien summa. (Martel 2018, 60–61.)

Virtapiirissä valokaaren voidaan ajatella olevan virrasta ja elektrodivälistä riippuva impedanssi. Virtapiirissä on oltava valokaaren kanssa sarjaresistanssi, jotta valokaari voi olla stabiili. Valokaari on ennen kaikkea terminen ilmiö, ja valokaaren resistanssi riippuu vahvasti lämpötilasta. Edellä kuvattu teoria soveltuu lähinnä staattiselle valokaarelle muuttumattomassa virtapiirissä. Vaihtovirtapiirissä esiintyvän sarjavalokaaren kohdalla on otettava käyttöön valokaaren dynaaminen malli. (Martel 2018, 63–64.) Valokaaren virtajännitekarakteristikaa käytetään usein kuvaamaan staattista valokaarta virtapiirissä. Esimerkki valokaaren virtajännitekarakteristikasta on esitetty kuvassa 2.

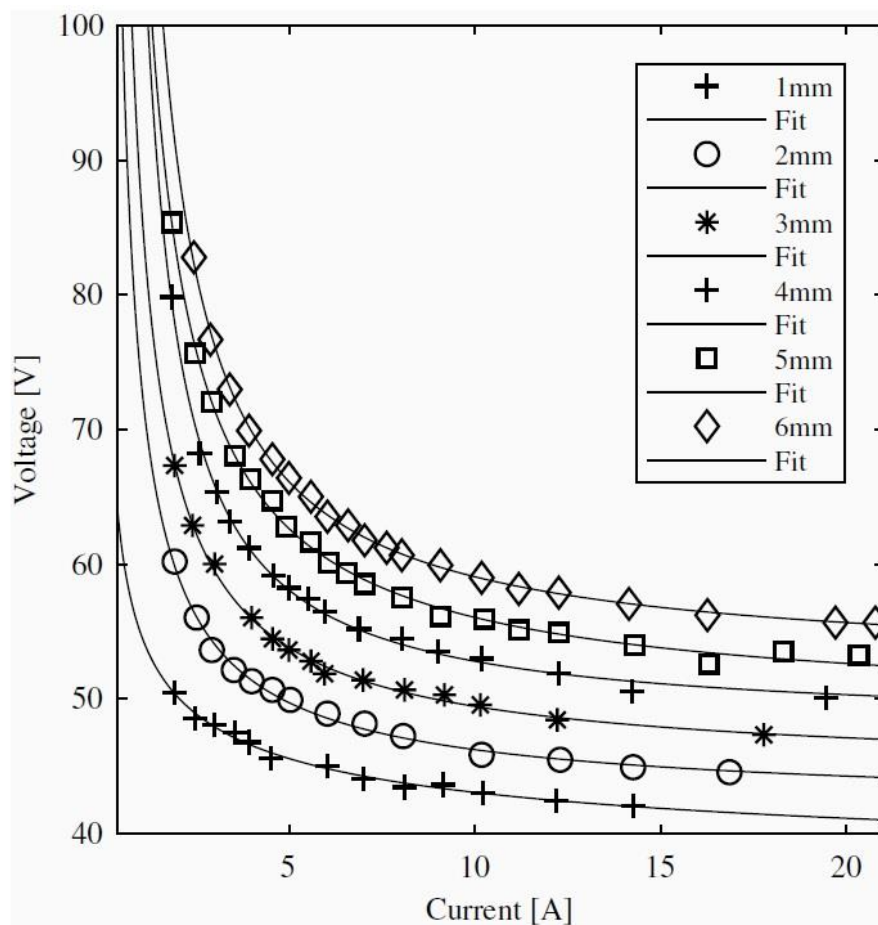


Fig. 11. Static characteristic of an arc with carbon electrodes. Fit curves are obtained using Andrea equation.

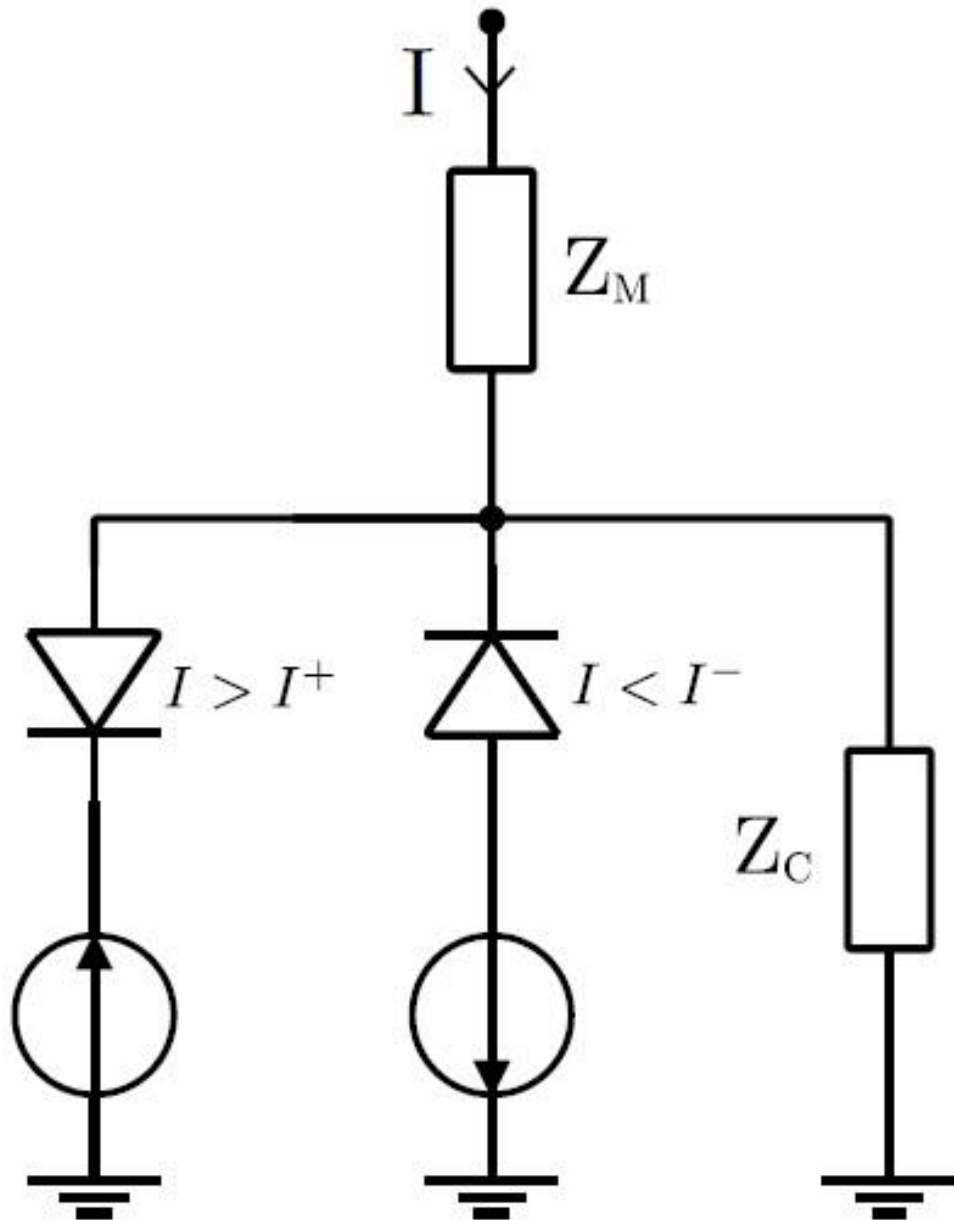
Kuva 2. Valokaaren virtajännitekarakteristika eri elektrodiväleillä (Andrea ym. 2019, 81)

Kuvassa on esitetty hiielelektrodeilla mitatut valokaaren virtajännitekarakteristikat eri elektrodiväleillä. Erilaisilla symboleilla on esitetty mittaustuloksia, ja yhtenäisillä viivoilla Andrean mallin (Andrea ym. 2015) perusteella lasketut sovituskäyrät. Tässä työssä edellä esitettyä kuvaa käytetään ainoastaan esimerkkinä virtajännitekarakteristikasta.

Staattiset valokaarimallit on yleensä muodostettu empiirisesti. Staattisia malleja on useita, kuten Nottinghamin ja Riederin mallit. (Andrea ym. 2019, 76.) Valokaaren sanotaan olevan staattinen, kun sen jännite ja virta eivät muutu ajan funktiona. Tämä vaatii, että valokaaren pituus, lämpötila, ympäristön paine ja muut vastaavat suureet pysyvät vakioina. (Andrea ym. 2019, 77.) Tunnetuimpia staattisen valokaaren malleja on Ayrtonin malli, jossa valokaaren jännite on verrannollinen valokaaren pituuteen. Dynaamisia malleja on useita, kuten Mayrin, Cassien, Matthewsian, Stokes&Oppenlanderin ja Lawrencen. (Yin & Ding 2016, 2–3.)

Valokaaren käyttäytymistä katkaisijoissa on tutkittu paljon, ja siihen on kehitetty useita matemaattisia malleja. Valokaaren dynamiikkaa voidaan kuvata tavallisilla differentiaaliyhtälöillä tai osittaisdifferentiaaleilla. Koska mallit ovat epälineaarisia, on niiden ratkaisu lähes mahdotonta, ellei tehdä jotain oletuksia. Myös numeeriset menetelmät ovat hankalia. (Genesisio ym. 1982, 245.) Mayrin mallissa valokaaren konduktanssin oletetaan olevan ajan funktiona muuttuva. Cassien mallissa on oletus, että valokaaren konduktanssin ja energian välillä on lineaarinen yhteys. (Genesisio ym. 1982, 245, 249–250.) Mayrin ja Cassien mallit eivät sovellu koko virta-alueelle, vaan virran nollakohdan lähellä Mayr soveltuu paremmin valokaaren jännitteen kuvaamiseen, kun taas korkeammilla virta-arvoilla Cassien malli on sopivampi (Darwish & Elkalashy 2005, 772, 777).

Metamalli on koostettu yhdistämällä kahdesta tai useammasta mallista. Malli voidaan esittää sähköteknisinä komponentteina ja mallintaa esimerkiksi MATLAB-ohjelmalla. (Andrea ym. 2010, 3.) Valokaarien matemaattiset mallit kehitetään usein hyvin spesifisiin tarkoituksiin, eikä niissä yleensä oteta huomioon virtapiirejä, joissa valokaari tapahtuu (Andrea ym. 2015). Valokaarivikasuojien algoritmien toteutuksessa ei yleisesti juurikaan käytetä valokaaren matemaattisia tai fysikaalisia malleja, vaan niissä pyritään vain tunnistamaan valokaaren aiheuttamia häiriöitä ryhmäjohtossa. Kuvassa 3 on esitetty kehitetyllä metamallilla saatu kytkentämalli.



Kuva 3. Metamallin kytkentämalli (Andrea ym. 2010, 3)

Kuvassa  $Z_M$  on Mayrin mallilla saatava valokaaren impedanssi ja  $Z_C$  on valokaareen liittyvän koronapurkauksen impedanssi. Diodisymboleilla kuvatut komponentit eivät ole tavallisia diodeja, vaan kynnysjännitteen sijaan komponenteilla on kynnysvirrat  $I^+$  ja  $I^-$ . Kuvassa olevat kaksi tasavirtalähdettä on muodostettu Ayrtonin mallin mukaan. Tämä J. Andrean, P. Schwitzerin ja E. Tisserandin kehittämä malli soveltuu sekä vaihtovirta- että tasavirtapiirien valokaarimallinnukseen. (Andrea ym. 2010, 3, 5.)

### 3.2 Valokaarien syitä

Sähköasennuksissa tai käytön aikana tapahtuvat virheet sekä ympäristön vaikutukset aiheuttavat sähkökaapeleihin vaurioita, jotka voivat johtaa valokaaren aiheuttavaan vikaan. Yleinen vaurion syy on kaapelin eristeen rikkoutuminen asennusvaiheessa liian pienen taivutussäteen aiheuttamana tai kiinnitystarvikkeen läpäisemänä. Kaapeli voi myös jäädä puristuksiin ikkunoiden tai ovien väliin. Liian pieni kiristysmomentti voi aiheuttaa valokaarivaaran liittimessä, ja normaalin käytön aikana kaapeliin voi tulla vaurioita lämpötilan, UV-säteilyn, kosteuden tai jyr sijävahingon aiheuttamana. (Siemens 2016, 12) Kolme pääsyytä valokaaren syttymiselle ovat eristeen hiiltyminen, ilman ionisaatio ja oikosulku. Ilman ionisaatio voi olla seurausta liekistä tai aikaisemmasta valokaaresta. (Babrauskas 2001, 40.) Suurin osa kytkentävalokaarista johtuu virrallisten johtimien kulumisesta ja vanhentumisesta. Valokaariviati alkavat pieninä ja satunnaisina ja ajan kanssa voivat kehittyä pysyviksi ja aiheuttaa tulipalon. (Restrepo ym. 2008, 4.)

Vaurioituneessa johtimessa johtimen pinnat pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden, mikä aiheuttaa paikallisia valokaaria, jotka johtavat johdinmetallin sulamiseen, jolloin muodostuu piikkimäisiä paikallisia kontakteja. Kontaktin pienen poikkipinnan takia ne kuumenevat voimakkaasti virran kulkiessa niiden läpi. Lämpimät johtimen osat kumentavat lähialueella olevaa johtimen eristemateriaalia, joka pikkuhiljaa hiiltyy. Hiiltyneet eristeen osat mahdollistavat valokaaren pysyvyyden ilman suoraa johdinkontaktiakin, koska virran nollakohdassa sammuva valokaari syttyy uudelleen virran nollakohdan jälkeen hiiltyneen osan kautta. Hiiltyneet osat voivat osittain kaasuuntua lämpötilan kasvaessa, mikä mahdollistaa pysyvän valokaaren syntymisen. Riittävän suurilla lämpötiloilla johtimen kupari sulaa ja oksidoituu, mikä edelleen lisää vikakohdan resistanssia ja sitä kautta johtaa vielä suurempiin lämpötiloihin. (Siemens 2016, 17–18.)

Löysissä liitoksissa liitoskohdan resistanssi on korkeampi, jolloin liitos lämpee sähkövirran vaikutuksesta. Lämpö voi johtaa kuparin hapettumiseen, ja tämän kuparioksidin resistanssin ollessa huomattavasti korkeampi kuin puhtaan kuparin liitoksen resistanssi nousee edelleen, mikä johtaa yhä suurempaan lämpenemiseen. Liitoksen lämmitessä riittävästi syntyy kuuma piste ja

liitos voi alkaa hehkua. (Nordseth 2022, 8.) Löysä liitos aiheuttaa paikallista lämpiämistä, joka lisää liitoksen hapettumista, joka edelleen lisää liitoksen resistanssia. Tällainen positiivinen takaisinkytkentä voi ajan kuluessa johtaa hehkuvaan liitokseen. (Babrauskas 2001, 44.) Sähköasennuksissa syntyy suurempi ongelma hehkuvista liitoksista kuin sarjavalokaarista. Löysien liitosten lämpötilat voivat helposti nousta korkeammiksi kuin sähköjohtojen eristeiden lämmönkestävyys. (Larsson 2012, v.) Hehkuvia liitoksia voi syntyä vain, kun johtimien pinnalla on oksidikerros. Oksidikerros voi syntyä katkaisuvalokaaren vaikutuksesta. Liitos saattaa hehkua jo 0,15 ampeerin virroilla, mutta yli kuuden ampeerin virroilla hehkuva kohta yleensä kuumenee niin paljon, että se katkeaa. Hehkuminen voi jatkua hyvin pitkään, ja vaikka se ei itsessään yleensä sytytä ympäröiviä materiaaleja, se saattaa kuitenkin hiillyttää eristeitä ja tätä kautta mahdollistaa sarjavalokaaren syntymisen. (Martel 2018, 41–42.)

Myös pelkkä johtimen lämpiäminen voi johtaa ajan kuluessa valokaareen. Maton alle sijoitettu jatkojohto, jota kuormitetaan pitkään ja jatkuvasti korkeilla virroilla, saavuttaa hitaasti yhä korkeampia lämpötiloja. Korkeat lämpötilat ajan kuluessa kuluttavat ja heikentävät johdon eristemateriaalia. Riittävän korkea lämpötila alkaa hajottaa johdon PVC-eristystä, joka lopulta pettää ja johtaa valokaaren syntymiseen. Huoneenlämpöinen PVC-eriste sammuu itsestään palotilanteessa, mutta jos PVC:n lämpötila on lähellä sulamispistettään, noin 180 celsiusasteen lämpötilassa, se ei sammu vaan palaa. Palavan PVC-muovin polymeerit alkavat hajota muodostaen kloorivetyä ja hiiltymistä. Myös PVC-muoviin tyypillisesti lisättävät palonestoaineet muodostavat hiiltä. Kloorivety voi syövyttää kaapelin johdinmateriaalia. Paljaat ja puhtaat kuparijohtimet eivät ylläpidä valokaarta yksinään, koska vaihejännite on selvästi pienempi kuin ilman Paschen-lämpötila. (Shea 2011, 23–27.) Hiiltynyt jälki vastaa puoli johdettua ja mahdollistaa vuotovirran tai valokaaren esiintymisen (Babrauskas 2001, 41).

Jatkuvasti palavan valokaaren syntyminen on todennäköisintä, kun ryhmäjohtojen virta on noin 3–10 ampeeria, tällöin vähintään 50 millisekuntia kestävä liekin esiintymistodennäköisyys on noin 80 prosenttia. Alle kolmen ampeerin virroilla pysyvänkin valokaaren tuottama energia on niin matala, että se ei riitä

sytyttämään kaapelin eristemateriaalia. Yli kymmenen ampeerin virroilla valokaaren synnyttämä lämpötila on niin korkea, että hiiltynyt materiaali kaasuntuu täysin eikä virran nollakohdassa sammuva valokaari pääse enää syttymään uudelleen, joten syntyvä liekki ei ole pitkäikäinen ja vähintään 50 millisekuntia kestävän liekin todennäköisyys on enää alle viisi prosenttia. Suuremmilla virroilla johtimen kupari saattaa myös sulaa riittävästi niin, että vahingoittunut kohta korjaantuu suurentuneen poikkipinnan seurauksena. Suurempivirtaisten valokaarien nopeasti syttyvä liekki voi tuki ehtiä aiheuttaa vahinkoa lyhyessäkin ajassa. (Siemens 2016, 24–26.)

### 3.3 Valokaarien luokittelu

Valokaaret voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan sen mukaan, mitä materiaalia elektrodien välisessä tilassa on ja miten valokaari syntyy. Katkaisupalokaari syntyy aina, kun kontaktissa olevat johdinpinnat liikkuvat toisiinsa nähden, esimerkiksi kun kytkimellä erotetaan virrallinen virtapiiri. Koska kytkinpinnat eivät ole mikrotasolla täysin tasaisia, syntyy kuumia pisteitä pintojen niihin kohtiin, jotka ovat viimeiseksi johtavassa yhteydessä. Näissä pisteissä virtatiheys on suuri, jolloin lämpötila kohoaa ja kytkinpinnan metalli voi paikallisesti sulaa. Oikosulkuvalokaari voi syntyä joko riittävän suuren sähkökentän vaikuttaessa jännitteellisten johtimien välillä olevan eristeaineen yli tai kun eristeaineessa on osittain johtava polku esimerkiksi hiiltymisen seurauksena. Eristeaineen yli vaikuttavan sähkökentän tarvittavaan voimakkuuteen vaikuttaa Paschenin laki, jonka mukaan läpilyöntijännitteen suuruus määrittyy vaikuttavan paineen, johtimien (elektrodien) etäisyyden ja eristeaineen permittiivisyyden perusteella. Osittain johtavan polun kautta tapahtuvaan valokaareen ei voida soveltaa Paschenin lakia, koska siinä läpilyönti ei tapahdu eristeaineen läpi vaan sen pinnalla. (Martel 2018, 27–30). Kuvassa 4 on esitetty katkaisupalokaari, jänniteläpilyöntivalokaari ja eristeaineen pinnan yli syntyvä valokaari.

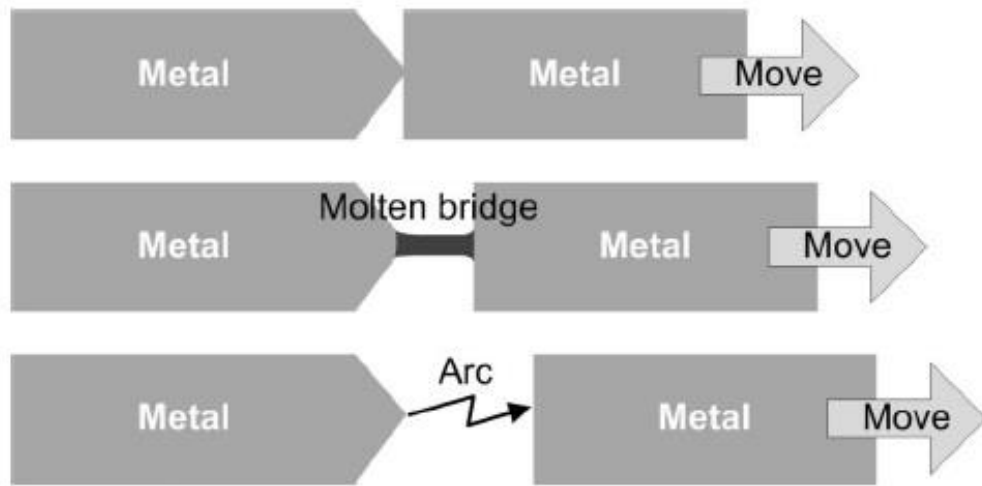


Figure 21: Contact arcing by a breaking process



Figure 18: Non-contact arcing due to voltage breakdown

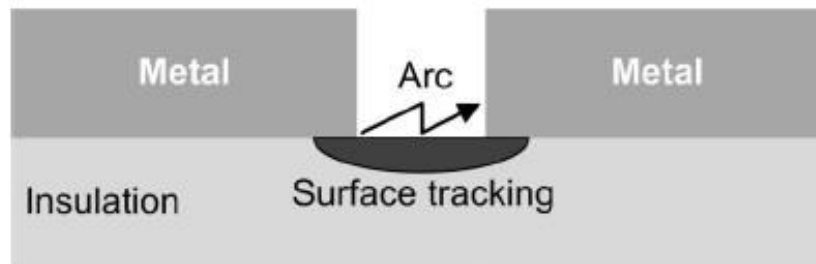


Figure 20: Non-contact arcing due to creepage on char

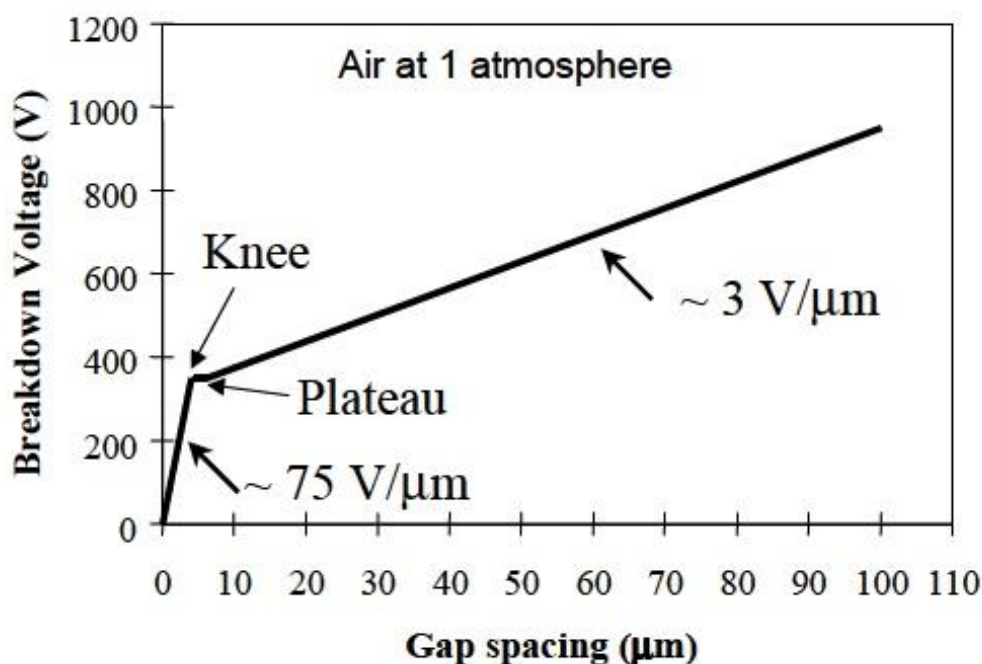
Kuva 4. Erilaisia valokaaren muodostumistapoja (mukaillen Martel 2018, 27–30)

Kuvassa ylimpänä (kuvassa "Figure 21") on kuvattu katkaisovalokaaren syntyminen, kun johtimen pinnat liikkuvat toisistaan erilleen. Viimeisenä yhteydessä olevaan pisteeseen syntyy paikallinen virtakeskittymä, joka aiheuttaa pinnan metallin sulamisen ja syntyy ohut silta, jonka kautta valokaari syttyy kun silta katkeaa. Keskellä (kuvassa "Figure 18") kuvataan läpilyöntivalokaari eristeaineen (ilman) yli kahden johdinpinnan välillä. Alimpana (kuvassa "Figure 20") valokaari syttyy eristeaineen pinnalle syntyneen hiiltyneen alueen kautta.

PVC-eristeen hiiltyessä kuparijohtimen pinnalle muodostuneet hiilijäämät kuumetessaan muodostavat termisen emission pisteitä, jotka tuottavat elektrodien väliin elektroneja, jotka pienentävät Townsendarin elektronivyöryyn vaadittavaa

sähkökentän voimakkuutta huomattavasti. Tämän lisäksi eristeen pinnalla oleva hiili tai kuparijohtimista höyrystynyt metalli toimivat ohuen sulakelangan tavoin höyrystymällä uudelleen virran nollakohtan jälkeen ja täten mahdollistamalla valokaaren syttymisen uudelleen. (Shea 2008, 219.) Suuremmalla vaihejännitteellä valokaaren uudelleen syttymisen todennäköisyys on korkeampi, jolloin keskimääräinen valokaaren virta on suurempi, mikä johtaa valokaaren keskimäärin suurempaan tehoon. Suurempi teho johtaa suurempaan vikakohtan lämpötilaan, joten suuremmalla vaihejännitteellä liekin ilmestyminen on nopeampaa kuin pienemmällä. (Shea 2008, 221.)

Jo viime vuosisadan alussa useissa tutkimuksissa (Earhart 1901; Kinsley 1905; Shaw 1905) on havaittu, että Paschenin laki ei päde hyvin pienillä elektrodiväleillä eli Paschen-käyrien x-akselin alkupäässä. Uudemmissa tutkimuksissa (Wallash & Levit 2003; Lee ym. 2001; Ono ym. 2000) on havaittu pienillä, alle seitsemän mikrometrin, elektrodiväleillä normaalipaineessa jopa alle sadan voltin läpilyöntijännitteitä. (Babrauskas 2013, 1490–1492.) Tavallisilla paineilla ja kohtalaisen isoilla elektrodiväleillä suurin läpilyöntiä aiheuttava mekanismi on Townsendarin elektronivyöry, mutta tyhjiössä tai hyvin pienillä elektrodiväleillä tämän vaikutus ei ole enää merkittävä vaan suurin vaikutus on elektronien kenttäemissiolla, joka on riippumaton vallitsevasta paineesta (Babrauskas 2013, 1496). Muokattu Paschen-käyrä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Muokattu Paschen-käyrä normaalipaineiselle ilmalle (Wallash & Levit 2003, 88)

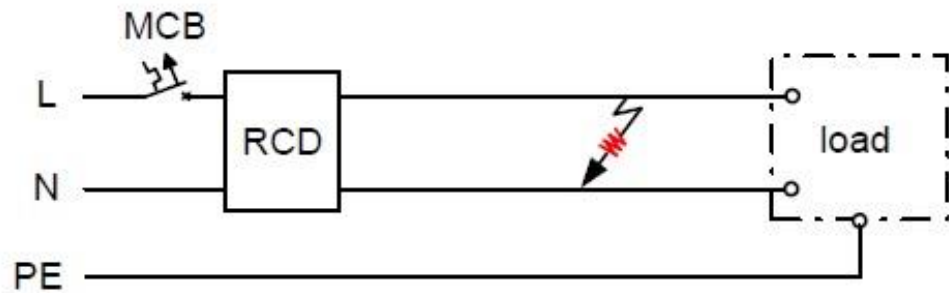
Kuvassa esitetyssä muokatussa Paschen-käyrässä havaitaan tavallisista Paschen-käyristä poiketen, että noin 360 voltin minimijännitteen sijaan käyrässä on lyhyehkö vakiojänniteosuus noin viiden mikrometrin elektrodivälillä ja sitä pienemmillä väleillä jyrkästi nouseva osuus.

Alle 4  $\mu\text{m}$  elektrodivälillä katodiektrodin pinnasta kohoava epätasaisuus-huippu voi aiheuttaa hyvin suuren paikallisen virtatiheyden ja kun saavutetaan sopiva raja-arvo, tämä pieni huippu räjähtää ja syntynyt metallihöyry aiheuttaa tiheän plasmapilven, mikä voi johtaa valokaareen, jos plasmapilvi saavuttaa anodin. Elektrodivälillä 4–6  $\mu\text{m}$  läpilyönti saattaa aiheutua elektronivyöryn kiihdyttämästä tyhjiöpurkauksesta. (Slade & Taylor 2002, 395.) Sähkökentän aiheuttamalle läpilyönnille on osoitettavissa kolme erityyppistä mekanismia: Townsendin purkausilmiö noin viiden mikrometrin ja sitä suuremmilla elektrodiväleillä, elektronien kenttäemissio noin 2–5000 nanometrillä elektrodivälillä ja elektronien tunnelointi-ilmiö alle kahden nanometrillä elektrodivälillä (Wallash & Levit 2003, 88–89). Vaurioituneessa ryhmäjohdossa voi siis syntyä läpilyönti myös huomattavasti Paschen-läpilyöntijännitettä pienemmillä jännitteillä, jos vauriokohdassa on hyvin pieni rako johtimen päiden välissä.

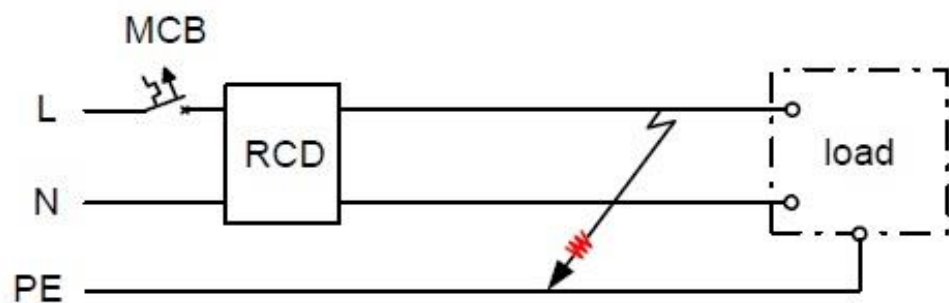
Ryhmäjohtojen valokaariviat voidaan vielä jakaa kahteen eri tyyppiin: sarjavalokaari ja rinnakkaisvalokaari. Sarjavalokaari syntyy virtapiiriin yhteen johtimeen ja rinnakkaisvalokaari virtapiiriin kahden eri johtimen väliin. Sarjavalokaaren virta riippuu virtapiirissä olevan kuorman impedanssista, kun taas rinnakkaisvalokaarella esiintyvä virta riippuu lähinnä siitä, miten paljon virtapiiriä syöttävä virtalähde kykenee tuottamaan virtaa. (Restrepo 2007, 3.) Sarjavalokaarella piirin virtaa rajoittavat impedanssit ovat valokaaren impedanssi ja kuorman impedanssi. Resisttiivisellä kuormalla valokaari ja kuorma muodostavat jännitteenjakopiirin, ja piirin virta pienenee verrattuna pelkän kuorman ottamaan virtaan. Aktiivisilla kuormilla, esimerkiksi virtalähteillä, valokaaren aiheuttama jännitteenalenema johtaa siihen, että kuorma ottaa enemmän virtaa voidakseen tuottaa saman tehon. Rinnakkaisvalokaarella piirin virtaa rajoittaa vain valokaaren impedanssi ja piirin johtimien impedanssit, joten virta voi muodostua hyvin suureksi, jopa sadoiksi ampeereiksi. Rinnakkaisvalokaaret

voivat olla hyvin lyhytikäisiä, koska suurten virtojen vuoksi johtimet sulavat nopeasti ja saattavat hitsautua yhteen. (Martel 2018, 6.) Kuvassa 6 on esitetty erityyppiset ryhmäjohdon valokaariviatiat.

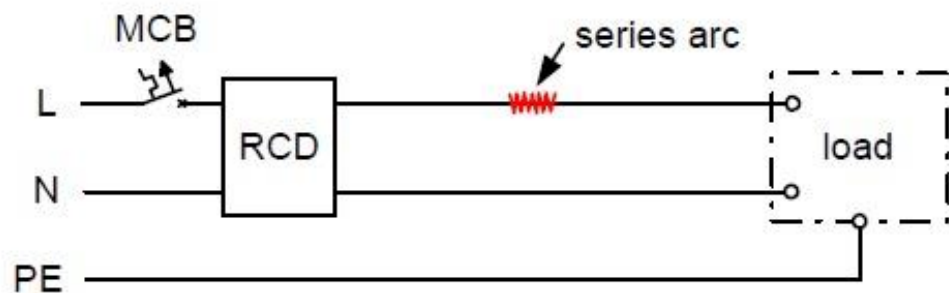
a)



b)



c)



Kuva 6. Ryhmäjohdon erityyppiset valokaariviatiat (Czapp 2019a, 14)

Kuvassa on esitetty johdonsuojakytkin Miniature Circuit Breaker (MCB) ja vikavirtasuojakytkin Residual Current Device (RCD), näissä kuvissa ei siis ole esitettyä valokaarivikasuojaajaa. Nämä tavalliset suojauskomponentit kuitenkin antavat joissain tilanteissa suojan rinnakkaisvalokaarilta, ei kuitenkaan sarja-

valokaarilta. Kuvan a-kohdassa kuvataan vaihe- ja nollajohtimen välille syntyvä valokaari, b-kohdassa vaihe- ja suojajohtimen välinen valokaari ja c-kohdassa sarjavalokaari vaihejohtimessa. Sekä a- että b- kohta ovat rinnakkaisvalokaaria. Varsinkin b-kohdan tilanteessa, jossa valokaari muodostuu vaiheen ja suojamaan välille, on vikavirtasuojakytkin yleensä nopeampi katkaistaan virtapiiriin kuin valokaarivikasuoja.

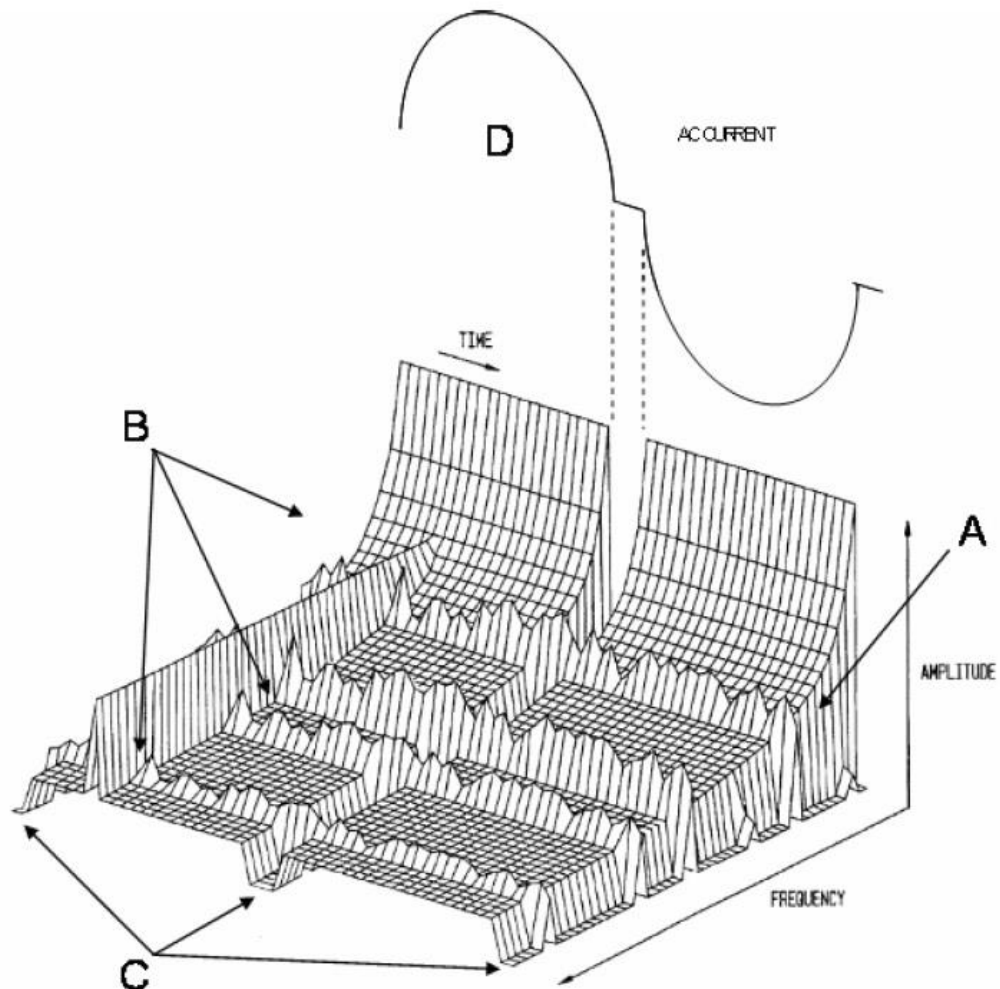
## **4 VALOKAARIVIAN HAVAITSEMINEN**

Valokaarivikasuojalaite tunnistaa valokaaresta johtuvia vikatilanteita, joita ylivirtasuojat tai vikavirtasuojat eivät kykene tunnistamaan. Valokaarivikasuojalaitteen yksi anturi mittaa verkkotaajuuista virtasignaalia ja toinen suuritaajuuista signaalia suojattavasta ryhmäjohtosta. Valokaaren tuottamien suuritaajuuisten signaalien mittaamisen lisäksi verkkovirtataajuuista signaalia seuraamalla voidaan havaita, seuraako suuritaajuinen signaali verkkovirran taajuutta, eli katkaako häiriösignaali verkkovirran nollakohdassa. Mikäli vikasuojalaitteelle määritellyt rajakriteerit täyttyvät, suojalaite laukeaa ja erottaa ryhmäjohtosyötöstä. Normaalityöinnassään valokaarivian tyyppistä signaalia tuottavat laitteet pyritään erottamaan todellisesta valokaariviasta analysoimalla suuritaajuuista signaalia ja estämään normaalikäyttöjen aiheuttamat laukaisut. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2018, 124–125.) Valokaaret tuottavat laajakaistaista kohinaa taajuusalueella kymmenistä kilohertseistä noin yhteen gigahertsiin. Tätä kohinaa syntyy vain valokaaren olemassaolon aikana, joten se lakkaa vaihevirran taajuuden nollakohdissa. Tätä vaihevirran taajuuden kanssa korreloivaa kohinatuottoa voidaan käyttää tunnistamaan nimenomaan valokaaren aiheuttamaa kohinaa. (Restrepo 2007, 117–118.)

### **4.1 Valokaaren tunnistustapoja**

Valokaarivian tunnistusalgoritmi voidaan jakaa kolmeen pääosaan: mittaus ja piirteiden selvitys, normaalin ja epänormaalin toiminnan erottelu sekä päätöksenteko (Vu ym. 2019, 23). Mittausdataa voidaan kerätä virtasignaalin nollakohtien läheisyydestä, laajakaistaistaisesta kohinasta tai virtasignaalin vaihtelun satunnaisuudesta. Mittausdatan piirteiden selvitykseen on käytetty useita eri tapoja, kuten Fourier-muunnokset, Wavelet-muunnokset, suodatus tai korrelaatio. Normaalin toiminnan erottamiseen epänormaalista voidaan käyttää va-

kioituja raja-arvoja tai tekoälyverkkoja. Päätöksenteko voidaan tehdä yksinkertaisilla yhteenlaskuilla tai käyttämällä sumean logiikan tekniikoita. Eri metodeilla on hankaluuksia eri kuormien kanssa, joten metodien yhdistäminen saattaa olla luotettavin tapa tunnistaa valokaariviat normaalikäytöistä. (Vu ym. 2019, 23–24). Kuva 7 esittää valokaarivian tuottamaa laajakaistaista spektriä.



Kuva 7. Valokaarivian tuottaman häiriösignaalin spektri (Restrepo 2007, 117)

Kuvassa on suurpiirteisesti kuvattuna laajakaistaisen häiriön spektri (A), josta havaitaan kohinan energian olevan suurinta pienillä taajuuksilla ja pienenevän taajuuden kasvaessa. B:llä merkityt kuvaajat esittävät ryhmäjohtossa mahdollisesti esiintyvää muuta kuin valokaareen liittyvää kohinaa, joka ei vaimene virran nollakohdissa. C:llä on merkitty valokaarikohinan vaimeneminen vaihevirran nollakohdissa, joissa valokaari sammuu. D kuvaa vaihevirran vaihtelua ryhmäjohtossa vaihejännitteen taajuudella. (Restrepo 2007, 117.)

Ryhmäjohdosta mitataan korkeataajuinen ja matalataajuinen signaali. Matalataajuisista signaalia käytetään peittosignaalin tuottamiseen ja korkeataajuisesta signaalista erotetaan laajakaistainen komponentti. Jos laajakaistainen komponentti on raja-arvon ylittävä, virhelaskuria kasvatetaan, ja jos se on raja-arvon alapuolella, niin virhelaskuria pienennetään. Kun virhelaskuri ylittää tietyn ennalta määritellyn raja-arvon, ryhmäjohto erotetaan syötöstä. (Restrepo ym. 2008, 7, 67). Kuvasta 7 nähdään hyvin, miten muu kaapelissa esiintyvä laajakaistainen kohina ei vaimene virran nollakohdissa, mikä mahdollistaa muun kohinan ja valokaaren aiheuttaman kohinan erottamisen toisistaan.

RSSI (Received Signal Strength Indication) -mittauksella suoritettava valokaaren havaitseminen perustuu johdon virran nollakohdan ja johdosta mitatun radiotaajuisen signaalin energian mittaamiseen ja suodattamiseen, jonka perusteella mikrokontrolleri antaa tarvittaessa suojalaitteelle käskyn erottaa johto syötöstä (Restrepo 2007, 120). Siemensin valokaarivikasuoja mittaa ryhmäjohton virtaa sekä megahertsialueella esiintyvää korkeataajuisesta RSSI-tehoa. Virta ja teho mitataan analogisesti ja lähetetään laitteessa olevalle mikrokontrollerille käsittelyä varten. Kun mikrokontrolleri havaitsee valokaaren, se lähettää laitteeseen kuuluvalla johdonsuojakatkaisijalle tai vikavirtasuojakytkimelle signaalin katkaista ryhmäjohton syöttö. Mikrokontrolleri laskee RSSI-signaalin muutosnopeutta vaihevirran nollakohtien ympäristössä. Jos muutosnopeus ylittää määritellyn raja-arvon riittävän tiheästi, mikrokontrolleri päättää, että kyseessä on valokaarivika. Tiedyt ryhmäjohtoon liitetyt laitteet voivat tuottaa saman tapaista signaalia kuin valokaari, mutta eivät saa aiheuttaa ryhmän erottamista. Rinnakkaisvalokaarien tunnistamiseksi laite laskee RSSI-signaalin muutosnopeuden lisäksi vaihevirran muutosnopeutta, ja tietyn kriteerin ylityessä riittävän usein, päättää kyseessä olevan rinnakkaisvalokaaren. (Siemens 2016, 31–34.)

Valokaarivika voi syntyä ryhmäjohtoon vaihe- ja nollajohtimen välille tai vaihe- ja suojajohtimen välille, jolloin kyseessä on rinnakkaisvalokaari. Mikäli tällaisen valokaaren impedanssi on riittävän pieni, vikavirta muodostuu suureksi, jolloin johtoa suojaava sulake, johdonsuojakytkin tai vikavirtasuojakytkin havaitsee vikavirran ja erottaa viallisen ryhmäjohton syötöstä. Jos rinnakkaisvalokaari tapahtuu pistorasiaan liitetyssä jatkojohdossa, on vikavirtakohdassa

virtapiirin impedanssi suurempi, ja voi käydä niin, että sulake tai johdonsuojakytkin ei laukea. Vaihejohtimessa tapahtuva valokaari on sarjavalokaari, josta ei aiheudu vikavirtaa nollajohtimeen tai suojajohtimeen, jolloin tavalliset johtoa suojaavat laitteet eivät havaitse vikaa eivätkä erota viallista johdinta. Sarjavalokaaren vikavirtaa rajoittaa kytketyn kuorman ottama teho, joten vikavirta saattaa jäädä hyvinkin pieneksi. Sarjavalokaari voidaan havaita vain valokaarivikasuojailla. (Siemens 2016, 14–15, 28.)

Viime vuosina on tutkittu paljon sarjavalokaarien havainnointia. Perinteisten algoritmien rinnalle on tullut neuroverkkoja ja tekoälyä hyödyntäviä valokaarien tunnistusmetodeja. Perinteisissä algoritmeissa ryhmäjohton sähköille tehdään taajuus- ja/tai aikatason analyysyjä käyttäen Fourier- tai Wavelet-muunnoksia, joiden avulla pyritään erottamaan normaali toiminta valokaarivikatilanteesta. Tekoälyä hyödyntävissä tutkimuksissa on kerätty suurehko määrä dataa ryhmäjohtoista, joihin on aiheutettu valokaarivika erilaisissa olosuhteissa. Syöttämällä tämä data neuroverkon analysoitavaksi saadaan ohjelma, joka tunnistaa valokaariviat luotettavammin kuin perinteiset menetelmät. (Jiang ym. 2022, 1–2.)

#### **4.2 Valokaaren havaitsemisen ongelmia**

Ruotsalaisessa diplomityössä vuodelta 2021 tutkittiin neljän eri valmistajan (Eaton, Siemens, Schneider ja Hager) valokaarivikasuoja ja havaittiin, että sekä valokaaren tunnistamisnopeudessa että havainnoinnissa ylipäänsä on huomattavia eroja. Jopa johtimen tyyppi, eli oliko kyseessä yksisäikeinen vai monisäikeinen kuparijohdin, vaikutti siihen, miten luotettavasti valokaarivikasuoja havaitsi valokaaren. Kapasitiiviset kuormat hankaloittivat valokaaren havaitsemista kaikilla laitteilla. Mikään tietty laite ei ollut kaikissa tilanteissa aina hyvä tai huono havaitsemaan valokaaria, vaan eri laitteilla oli eri tilanteissa erilainen luotettavuus. (Al Qabbani 2021, 17–18, 34.)

Puolalaisessa case-tutkimuksessa vuodelta 2022 tutkittiin valokaarivikasuojen toimintaa, kun kuormana oli hakkurivirtalähteitä, tässä tapauksessa akkulatureita. Yrityksessä oli tapahtunut useita tilanteita, joissa laturin virtajohto oli kipinäinnyt ja sytyttänyt tulipalon. Järjestelmään asennettiin valokaarivikasuoja, jotta ongelmat vähenisivät, mutta asennetut vikasuojat eivät toimineetkaan

odotetulla tavalla. Valokaarivikasuoja oli kolmelta valmistajalta: Schrack, Siemens ja Eaton. Kaikilla laitteilla oli havaittavissa huomattavaa hajontaa valokaarivian katkaisussa, ja kaikilla laitteilla katkaisuaika joskus ylitti standardin määräämän maksimikatkaisuajan. Kuorman tyyppillä havaittiin olevan huomattava vaikutus valokaaren havainnointiin ja nimenomaan niin, että kapasitiivinen kuorma esti vikasuojia havaitsemasta valokaaren syttymistä. (Budzisz & Czosnyka 2022, 1, 6–9.)

Kiinalaisessa tutkimuksessa vuodelta 2022 tutkittiin seitsemän eri valmistajan valokaarivikasuojalaitteita. Sarjavalokaaren katkaisussa vain kaksi laitetta täyttivät kiinalaisen standardin (GB31143-2014, joka perustuu kansainväliseen standardiin IEC62606-2013) vaatimukset. Testeissä, joissa käytettiin eri tapoja pyrkimyksenä hankaloittaa valokaaren havaitsemista, eri laitteet toimivat luotettavammin, mutta kuitenkin kolme laitetta seitsemästä eivät täyttäneet standardin vaatimuksia. (Ma ym. 2022.) Valmistajia tai laitteiden mallitietoja ei tutkimuksessa kerrottu tarkemmin.

## 5 VALOKAARIVIKASUOJAT

Valokaarivikasuojiin (Yhdysvalloissa AFCI, Euroopassa AFDD) tekniikkaa esiteltiin Yhdysvalloissa 90-luvun alussa, ja ensimmäiset tuotteet saapuivat markkinoille vuonna 1997. Kaksi vuotta myöhemmin valokaarivikasuojiin asennus makuutilojen pistorasia-asennuksille tuli pakolliseksi ja vuonna 2002 pakollisuus laajeni kaikkiin makuutilojen sähköasennuksiin. (Siemens Industry Inc. 2012, 4.) Kansainvälinen standardi IEC 62606 on esitelty vuonna 2013 (IEC Webstore 2022). Kansainvälinen valokaarivikasuoja koskeva standardi IEC 62606 (2013), joka perustuu yhdysvaltalaiseen standardiin UL 1699, määrittelee vaatimukset ja testit valokaarivikasuojiin (Martel 2018, 12–13). Suuremmalla vaihejännitteellä liekin syttymisen todennäköisyys on suurempi kuin pienemmällä, joten standardissa IEC 62606 määritellyt katkaisuaajat suojalaitteelle ovat lyhyempiä kuin esikuvastandardissa UL 1699 (Martel 2018, 164).

### 5.1 Valokaari ja valokaarivikasuoja

Valokaarivikojen havainnointia hankaloittavat erilaiset laitteet, jotka normaalistikin toimiessaan aiheuttavat kipinäntoimintaa tai korkeataajuisia häiriöitä, kuten him-

mentimet, kompressorit, pölynimurit ja porakoneet. Näiden signaalien erottaminen todellisesta valokaariviasta on olennaista, jotta vältytään tarpeettomilta ryhmäjohtojen erottamisilta. Myös sähköjohdoilla välitettävä tietoliikenne häiritsee valokaarivian tunnistamista. (Restrepo 2007, 118–120.) Ruotsalaisessa tutkimuksessa (2021) testattiin eri valmistajien valokaarivikasuoja ja havaittiin, että laitteet havaitsevat valokaaria eri tavoilla, eivätkä kaikki havaitse erityyppisiä valokaaria yhtä luotettavasti. Jos virtapiirissä on kapasitiivisiä kuormia, niin laitteiden kyky havaita valokaaria on huonompi. (Nordseth 2022, 24.) Eri tunnistustapojen ongelmia havaita valokaaria on hahmoteltu kuvassa 8.

REPRESENTATIVE METHODS AND CORRESPONDING ACCURACIES				
Method	Feature type		Lowest prediction accuracy	Problematic loads
	Direct feature	Transform		
Sparse representation and neural network [16]	250 sparse coefficient from every current half cycles	-	88%	Computer
Chirp Zeta Transform and current difference [12]	The mean value of the difference between two subsequent observation windows	CZT transform with low frequency	96.7%	Electrical drill
Fractal theory and SVM [2]	Box-Counting Dimension and Information dimension	-	98%	Micro oven and induction cooker
Autoregressive Bispectrum Analysis [17]	-	Two-dimensional Fourier transform of third-order cumulants	97%	Vacuum cleaner
High-frequency energy and current variation [3]	Current integral of one period	Short-time Fourier transform	96%	Electrical drill

Kuva 8. Eri metodien tunnistustarkkuuksia ja ongelmakuormia (mukaillen Vu ym. 2019, 24)

Kuvassa on lueteltu eri metodien käyttämiä valokaarivian piirteitä ja niiden käsitteelyyn käytettyjä muunnoksia. Voidaan havaita, että tunnistuksen luotettavuus vaihtelee ja eri metodeilla on ongelmia tunnistaa valokaarta eri kuormien ollessa virtapiirissä.

Valokaarivikasuojiin on sisällytetty myös diagnostiikka, joka tarkkailee suojan toimintaa säännöllisin väliajoin. Mikäli suojan toiminnassa havaitaan ongelmia, niin suoja erottaa ryhmäjohton syötöstä. Laitteen toiminta voidaan testata myös laitteeseen kuuluvalla testausnapilla. Lisäksi laitteissa on ylijännitesuoja. (Siemens 2016, 45–46.) Laitteesta on katkaisun tapahduttua nähtävissä katkaisun syy eli käyttäjä voi havaita, onko laite havainnut valokaaren, onko diagnostiikka todennut laitteen vialliseksi vai onko katkaisun syynä ylijännite (Siemens 2016, 46–50). Koska laitteet kertovat katkaisusyyntä tyypillisesti esimerkiksi välkyttämällä LED-valoa eri tavoin, voi maallikon olla hankala hahmottaa, mikä katkaisun syynä lopulta on (Nordseth 2022, 25).

## 5.2 Standardin vaatimukset

Standardin IEC 62606 määritelmän mukaan valokaarisikasuojan on havaittava sarjavalokaari 230 voltin vaihejännitteellä yli 2,5 ampeerin virroilla. Standardin määrittelemät katkaisuaikat valokaarivikasuojalle perustuvat siihen, että pyritään rajoittamaan valokaaren energia korkeintaan sataan jouleeseen. Yli 20 ampeerin kaarivirroilla pisin katkaisuaika on rajoitettu 0,12 sekuntiin. (Martel 2018, 14). Rinnakkaisvalokaarilla katkaisuaika määritellään virran puolijaksojen maksimimääränä, jonka puitteissa katkaisun on tapahduttava (Martel 2018, 15–16). Sarjavalokaaritesteihin kuuluu kolme eri testiä: havaitaanko sarjavalokaaren yhtäkkinen ilmestyminen virtapiiriin, havaitaanko valokaari, kun virtapiiriin liitetään laite, jossa on valokaarivika, sekä havaitaanko valokaari, kun valokaarivikasuoja kytketään päälle piirissä, jossa on valokaarivika. Rinnakkaisvalokaaritesteihin kuuluu niin ikään kolme testiä: havaitaanko rinnakkaisvalokaari, kun piirin virta on rajoitettu, havaitaanko valokaari, kun piirin johtimet murskataan, sekä havaitaanko valokaari vaihejohtimen ja maan välillä. (Martel 2018, 13, 15.)

Standardin vaatimissa testeissä käytetään eri tavoin käsiteltyjä johtimia. Johtimiin voidaan aiheuttaa hiiltymäjälki, jota kautta valokaari voi syntyä, tai johdin voidaan murskata terällä testin aikana. Toisissa testeissä käytetään laitteita, joiden oletetaan häiritsevän valokaarivikasuojien kykyä havaita valokaari, esimerkiksi aiheuttamalla häiriösignaalia tai kipinäintiä. Vaihejohtimen ja suoja-johtimen välisessä valokaariviassa standardinmukaisen vikavirtasuojan on

katkaistava virta nopeammin kuin valokaarivikasuojalle määritelty katkaisuaika, mutta suurivirtaiset rinnakkaisvalokaaret voivat kuitenkin olla hyvin satunnaisesti syttyviä ja sammuvia, eikä tavallinen vikavirtasuojia välttämättä havaitse niitä joka tilanteessa. (Martel 2018, 15–16.) Kuvassa 9 on esitetty standardin IEC 62606 mukaiset valokaarivikasuojan katkaisukäyrät.

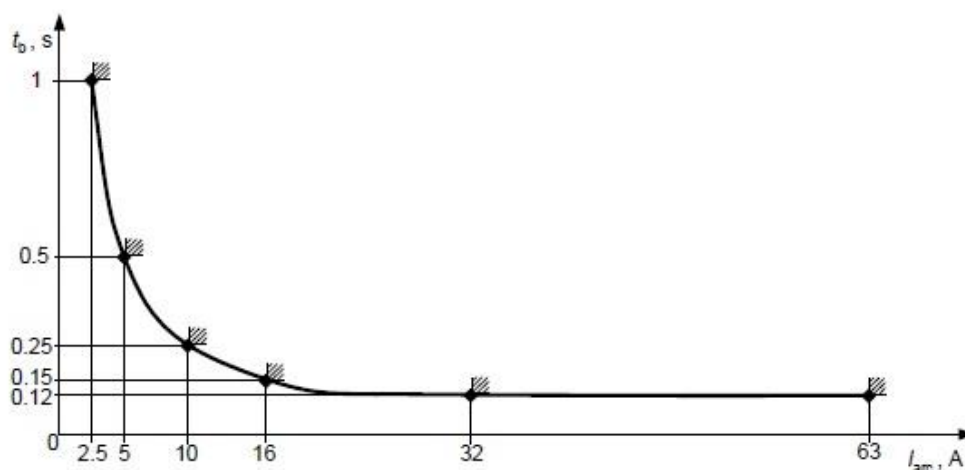


Fig.4. Required tripping characteristic of AFDDs for low arc current (up to 63 A) [25];  $t_b$  – maximum break time,  $I_{arc}$  – test arc current (rms values)

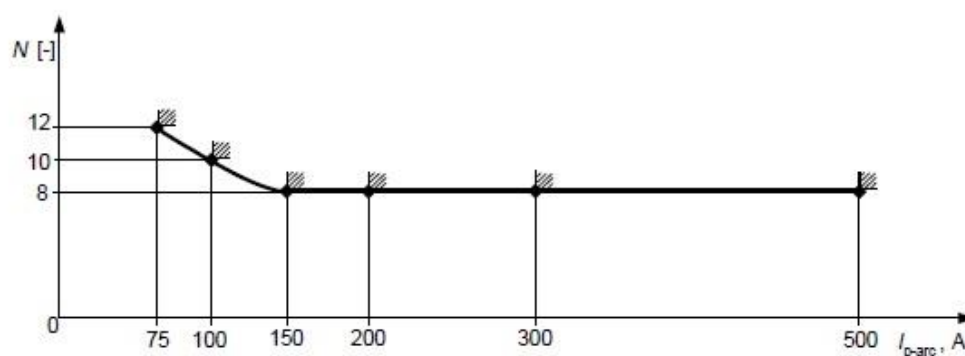


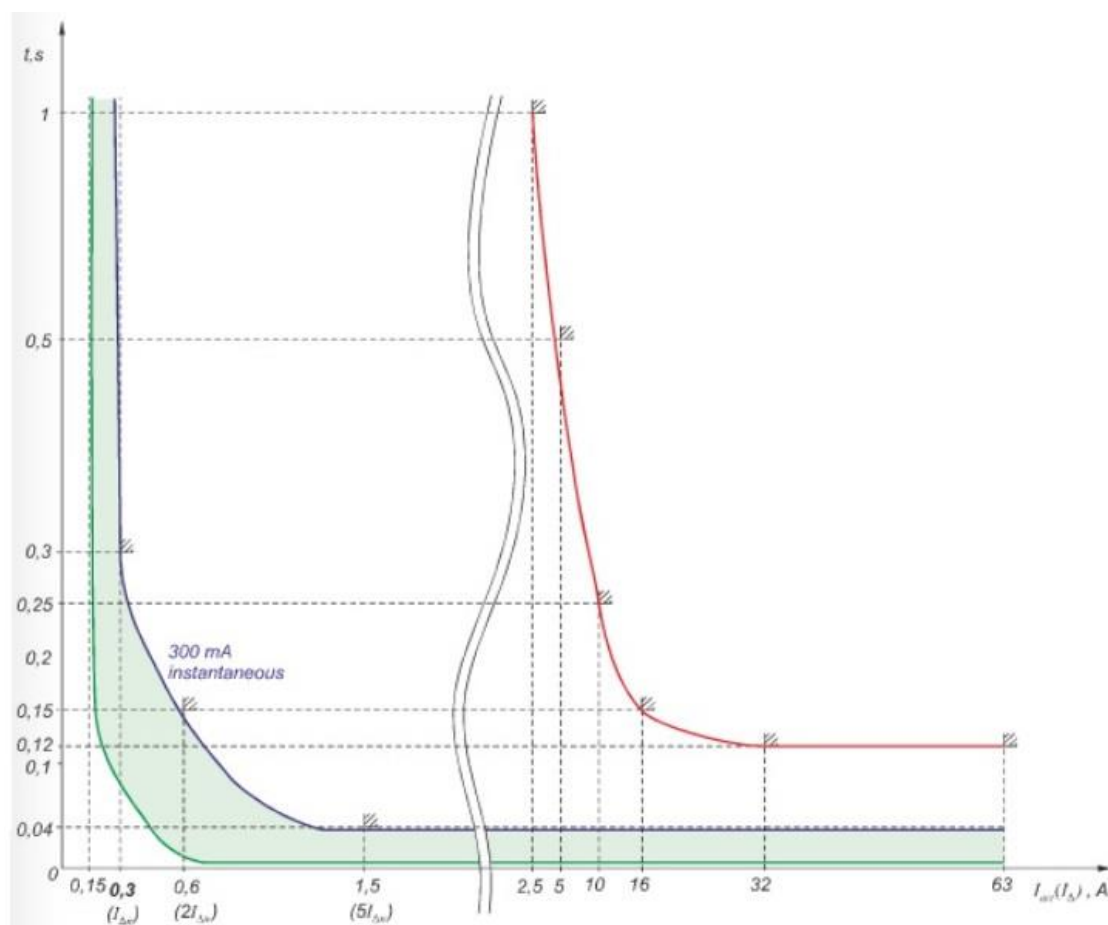
Fig.5. Required tripping characteristic of AFDDs for high arc current (above 63 A) [25];  $N$  – the number of half cycles at the rated frequency,  $I_{p-arc}$  – prospective arc current (rms values)

Kuva 9. Valokaarivikasuojan katkaisukäyrät (Czapp 2019a, 14)

Kuvassa 9 ylempi kuvio (Fig.4.) soveltuu sarjavalokaarelle, jonka vikavirtaa rajoittaa ryhmäjohtossa olevan kuorman ottama virta. Alempi kuvio (Fig.5.) soveltuu rinnakkaisvalokaarille, joiden vikavirtaa rajoittaa vain syötön kyky tuottaa virtaa eikä ryhmässä oleva kuorma. Automaattisen poiskytkennän vaatima

oikosulkuvirta tyypilliselle pistorasia-asennukselle Suomessa on 160 ampeeria (johdonsuojakatkaisija C16A), jolloin poiskytkennän on tapahduttava 0,4 sekunnissa (SFS-käsikirja... 2017, 93–94). Kuvan 9 alemmasta kuviosta voidaan nähdä, että 160 ampeerin virralla katkaisuaikavaatimus on kahdeksan puolijaksoa, joka 50 hertsin järjestelmässä vastaa 0,08 sekuntia, joten valokaarivikasuojan pitäisi katkaista syöttö huomattavasti nopeammin kuin johdonsuojakatkaisijan.

Joissain tilanteissa palosuojaukseen käytettävä vikavirtasuoja voi olla nopeampi erottamaan viallinen johto syötöstä. Verrattaessa valokaarivikasuojan ja palosuojaukseen käytettävän vikavirtasuojan toiminta-aikoja pienivirtaisilla rinnakkaisvalokaarilla voidaan havaita, että vikavirtasuoja toimii selvästi nopeammin. Tällainen tilanne on kyseessä, kun rinnakkaisvalokaari syttyy vaihejohtimen ja suojajohtimen välille. Kuvassa 10 on esitetty laitteiden toimintakäyrät samassa koordinaatistossa.



Kuva 10. Vikavirtasuojan ja valokaarivikasuojan toimintakäyrät (Czapp 2019b, 17)

Kuvasta havaitaan, että 300 mA mitoitusvirran vikavirtasuojia on toiminta-alueellaan (vihreä kuvio) kaikilta osin nopeampi kuin valokaarivikasuojia (punainen käyrä). Vikavirtasuojat kuitenkin testataan jatkuvalla virralla, eivätkä ne kaikissa tilanteissa havaitse valokaaria, joiden syttyminen ja sammuminen voi olla hyvin satunnaista (Martel 2018, 15).

Standardi IEC 62606 määrittelee valokaaritestaukseen käytettävän valokaarigeneraattorin elektrodit siten, että toinen elektrodi on kuparia ja toinen grafiittia. Tällä järjestelyllä saavutetaan erittäin pysyviä valokaaria, vaikkakin pienemmällä kaarijännitteellä kuin johtimissa syntyvissä valokaarissa. Testien toistettavuus on hyvä, mutta testijärjestely ei täysin vastaa todellista tilannetta, koska johtimissa ei yleisesti käytetä grafiittimateriaaleja. Syntyvän lyhyen valokaaren jännite on luokkaa 13–20 voltia, jolloin valokaaren teho on pienempi kuin kaapeleissa syntyvillä valokaarilla. Tällaisella koejärjestelyllä valokaarivikasuojan laukeamisajat saavat olla 2,5-kertaisia standardissa annettuihin minimikatkaisuaikoihin nähden. (Martel 2018, 155–156.) Laboratoriolaitteeseen toteutetaan standardin määritelmää soveltaen sarjavalokaarigeneraattori. Standardin mukaisen generaattorin periaatekuva on esitetty kuvassa 11.

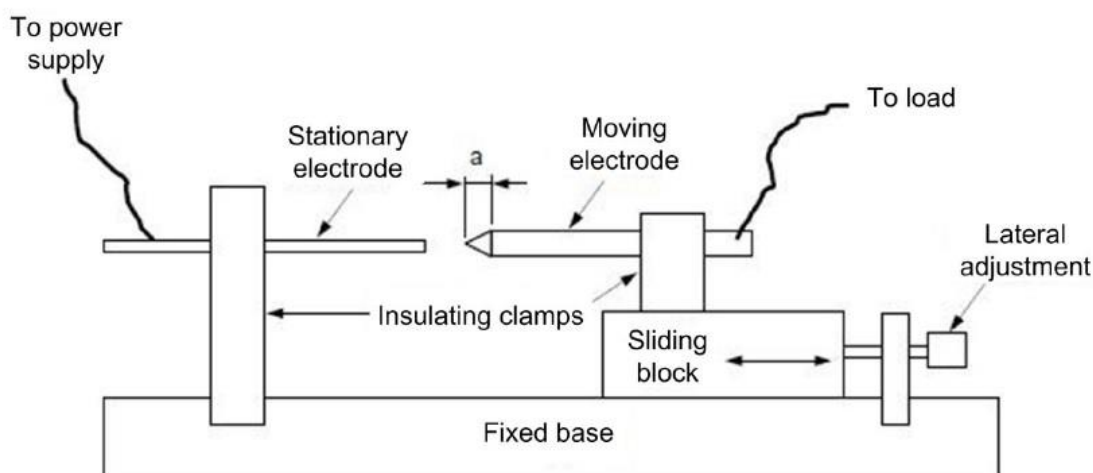


Figure 101: Arc generator according to IEC 62606 / §9.9.2.7 [IEC13]

Kuva 11. Sarjavalokaarigeneraattori (Martel 2018, 156)

Kuvassa vasemmalla on sähkönsyöttöön (kuvassa "Power supply") yhdistetty liikkumaton elektrodi (kuvassa "Stationary electrode") ja oikealla liikuteltavaan alustaan (kuvassa "Sliding block") kiinnitetty elektrodi (kuvassa "Moving

electrode”), joka yhdistetään kuormaan (kuvassa ”Load”). Käytettävissä olevasta materiaalista ei käy ilmi tarkemmin, onko liikuteltava elektrodi kuparia vai grafiittia, eikä myöskään käytetyn grafiittielektrodin tarkempaa kuvausta. Tavallisen lyijytäyttekynän täytelyijy on seostettua grafiittia, ja sellaisia on onnistuneesti käyttänyt erilaisissa elektrodisovelluksissa mm. David ym. (2017), Knápek ym. (2019) ja Navratil ym. (2016), joten tässäkin työssä valittiin grafiittielektrodiksi täytelyijy. Kuparielektrodiksi soveltuu sopivan mittaiseksi katkaistu MMJ-asennusjohdon yksittäinen kuparijohdin, josta on poistettu eristemateriaali koko matkalta. Elektrodin kiinnitys toteutetaan kuitenkin siten, että haluttaessa elektrodi voidaan vaihtaa, joten lopullisessa käytössä elektrodien valintaa ei ole sidottu mihinkään tiettyyn materiaaliin.

Väitöskirjassaan Martel (2018) esittää kritiikkiä ja parannusehdotuksia standardin valokaaritesteihin. Hänen mukaansa standardi ei huomioi sitä, että sarjavalokaari voi tapahtua myös nollajohdossa. Hän myös arvostelee standardissa käytettyjä hyvin suurilla virroilla tehtäviä rinnakkaisvalokaaritestejä, koska suurilla virroilla tavalliset johdonsuojakatkaisimet tai sulakkeet toimivat luotettavasti ja nopeammin kuin valokaarivikasuojat. Eri kuormilla tehtäviä testejä pitäisi myös laajentaa niin, että käytössä on yhtä aikaa useita kuormia, aivan niin kuin normaalisti kotitalouksissakin on pistorasioissa kytkettyinä. (Martel 2018, 151–152.) Mitatut ja mallinnetut valokaaren virrat eivät myöskään selitä katkaisuaikojen eroja 120 ja 230 voltin järjestelmien välillä, ja myös 400 voltin jännitteellä voitaisiin soveltaa saman pituisia katkaisuaikavaatimuksia kuin pienemmillä jännitteillä (Martel 2018, 169). Sarjavalokaarien tunnistusraja pitäisi laskea yhteen ampeeriin standardin vaatiman 2,5 ampeerin sijaan (Martel 2018, 172).

Standardi IEC 62606 ei huomioi hyvin lyhyiden ja nopeasti sammuvien valokaarien pienempää riskiä, vaan vaatii valokaarivikasuojia katkaisemaan myös tällaisia vaarattomampia valokaaria. Ottamalla mittauksissa huomioon tällaiset vaarattomammat valokaaret ja jättämällä ne huomiotta voitaisiin vähentää turhien katkaisujen määrää. Näiden vaatimuksien määrittely vaatisi kuitenkin tarkempia tutkimuksia, jotta ne voitaisiin sisällyttää standardeihin. (Vasile ym. 2019, 1–6.)

### 5.3 Käyttö Suomessa ja muualla

Vuonna 2018 Karelia-ammattikorkeakoulussa tehdyssä talotekniikan opinnäytetyössä pyrittiin selvittämään, miten valokaarivikasuojalaitteita on käytetty kiinteistöjen sähköasennuksissa Suomessa. Kyselytutkimuksena toteutetussa työssä asiaa kysyttiin 121:ltä kiinteistöjen sähköasennuksia suorittavalta taholta. Vastauksia saatiin vain seitsemän, eikä yksikään vastaaja ollut asentanut valokaarivikasuojia kiinteistöihin. (Laakkonen 2018, 15, 17–18.) Vuonna 2019 Rakennuslehti-verkkolehden artikkelissa todettiin, että vaikka valokaarivikasuojia on ollut saatavissa jo jokusen vuoden ajan, on niiden käyttö jäänyt vähäiseksi (Aatsalo 2019).

Suomen sähköasennusmääräykset eivät vaadi valokaarivikasuojien käyttöä, mutta niitä suositellaan käytettäväksi kiinteistöissä, joissa on nukkumutiloja, erityisen palonarkoja materiaaleja sisältävissä tai niistä rakennetuissa tiloissa, sekä tiloissa, joissa on korvaamattomia esineitä (SFS-käsikirja... 2017, 102). Norjassa on käytössä vastaava suositus kuin Suomessa (Nordseth 2022, 15). Saksan pienjänniteasennusmääräyksessä VDE 0100-420 (2016) oli pakollista käyttää valokaarivikasuojia tietyissä asennuksissa, mutta vuoden 2019 määräyksissä suojien asennus on vain suositeltua eikä enää pakollista (Fengel 2019). Uusimmassa, vuoden 2022 standardissa, valokaarivikasuojaa ei enää pidetä riittävänä suojaamaan valokaaren vaikutuksilta (DKE 2022, 10). Iso-Britannian sähköasennusmääräykseen BS 7671:2018 on tullut vuonna 2022 muutos, jossa aikaisemmin suositeltuja valokaarivikasuoja-asennuksia on muutettu pakollisiksi (BEAMA 2022). Sähkömaailma-lehden artikkelissa helmikuussa 2021 Sähköinfo Oy:n tekninen johtaja Esa Tiainen kertoo, että valokaarivikasuojan käyttö Euroopassa on ollut pakollista ainoastaan Saksassa tietyissä asennuksissa (Tiainen 2021). Euroopassa siis valokaarivikasuojien käyttö on ilmeisesti useammin suositeltua kuin määrättyä, vaikka poikkeuksia-kin on. Euroopassa käytetyt standardit liittyen suojausmenetelmiin lämmön vaikutukselta suojautumiseen ovat toisiaan vastaavia ja perustuvat kansainväliseen IEC-standardin osaan 60364-4-42: Protection for safety – Protection against thermal effects (SFS-käsikirja... 2017, 3).

Yhdysvalloissa valokaarivikasuojien käyttö on laajentunut entisestään, vuoden 2023 sähköasennusmääräyksissä (National Electrical Code 2023) vikasuojat

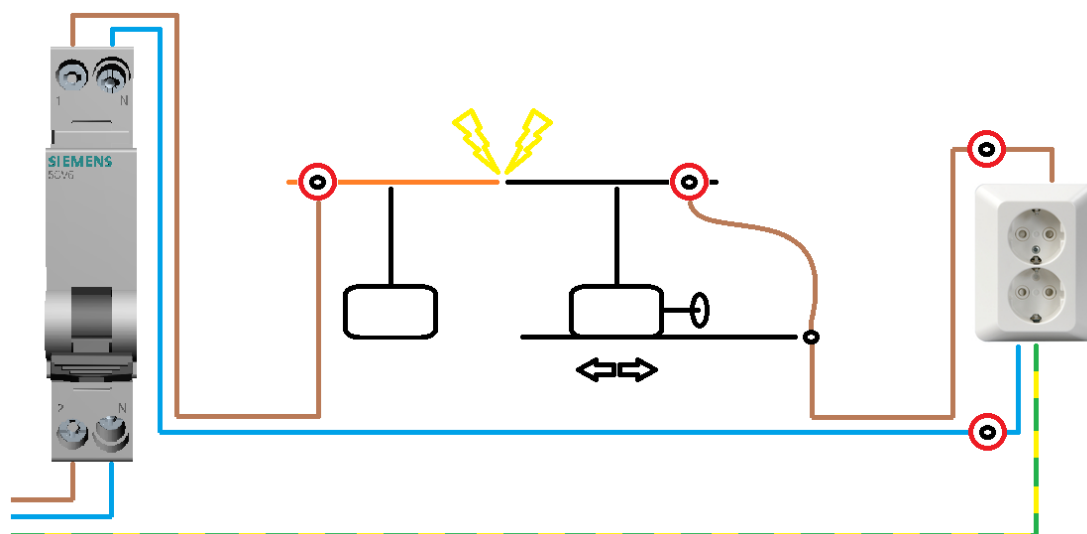
ovat pakollisia 20 ampeeriin saakka käytännössä kaikissa asuinrakennuksen huoneissa sekä opiskelija-asunnoissa, hotellihuoneissa, hoivakotien makuuhuoneissa sekä työpaikkoihin liittyvissä makuutiloissa. Vaatimus koskee myös olemassa olevien asennusten korjausta tai laajennusta. (NFPA 2022, 82–83.)

## 6 LABORATORIOLAITE

Laboratoriolaitteeseen toteutetaan sarjavalokaaren tuottamiseen soveltuva valokaarigeneraattori. Sarjavalokaaren virtaa rajoittaa virtapiirissä oleva kuorma, joten virtapiirissä kulkevan virran määrää voidaan kontrolloida valitsemalla liitettävät kuormat sopivasti. Rinnakkaisvalokaaren synnyttämiseen tarvittava järjestely tekisi laitteesta huomattavasti monimutkaisemman. Lisäksi rinnakkaisvalokaarella esiintyvät virrat voivat kohota huomattavan suuriksi, koska siinä virtaa rajoittavat ainoastaan valokaaren ja johtimien impedanssit (Martel 2018, 6).

### 6.1 Testauslaitteen rakenne

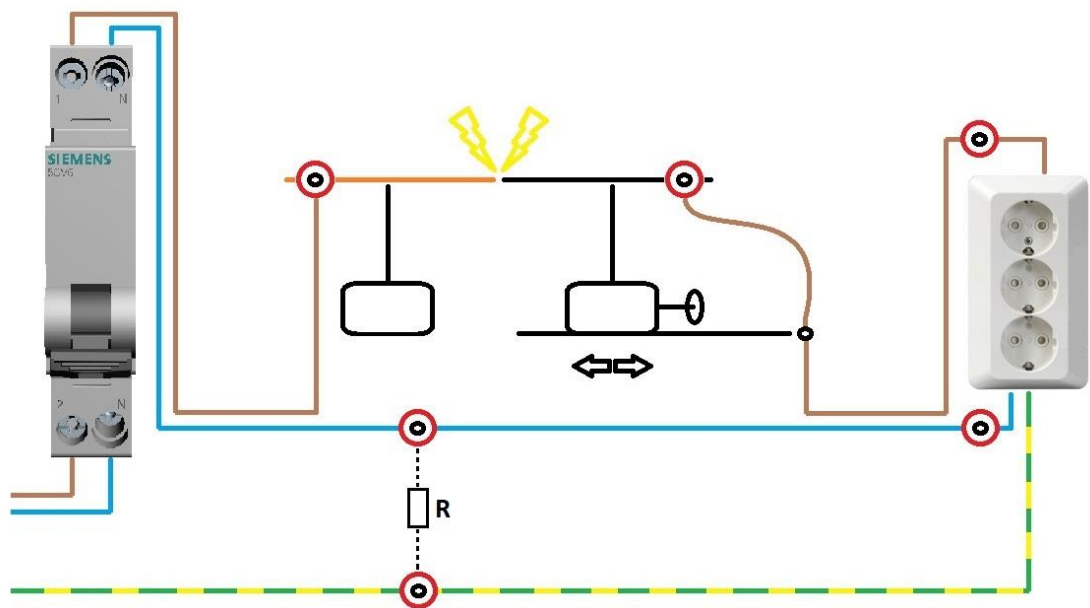
Testauslaite vastaa rakenteeltaan standardissa IEC 62606 kuvailtua valokaarivikageneraattoria. Paikallaan oleva elektrodi on kuparia ja siirrettävä elektrodi on lyijykynägrafiittia. Kuvassa 12 on esitetty laitteen ensimmäisen suunnitteluvaiheen periaatekuva.



Kuva 12. Testauslaitteen rakenne (mukaillen ABB 2022; Siemens 2022)

Kuvassa vasemmalla on Siemensin AFDD-moduuli 5SV6016-6GV10, joka sisältää sekä johdonsuojakytkimen että valokaarivikasuojan toiminnallisuudet. Keskellä vasemmalla on paikallaan pysyvä kuparielektrodi ja oikealla liikuteltava grafiittielektrodi. Testauksen alussa elektrodit ovat kiinni toisissaan ja virta liikkuu normaalisti. Kun grafiittielektrodia siirretään hitaasti kauemmaksi kuparielektrodista, syttyy elektrodien välille valokaari. Molemmissa elektrodeissa on liityntäpiste mittalaitteen mittapäille, samoin kuorman puolella L- ja N-johtimissa. Testattavat kuormat liitetään laitteeseen kuuluviin pistorasioihin. Elektrodeissa olevia mittalaiteliityntöjä tarvitaan, jotta voidaan yleismittarilla varmistaa, että testin alussa elektrodien välillä on normaali yhteys. Kuorman yli olevaa jännitteen ja virran aaltomuotoa voidaan tutkia oskilloskoopilla liittämällä se ko. liityntäpisteisiin. Periaatekuvien komponentit eivät vastaa lopulliseen toteutukseen valittavia komponentteja.

Ohjaavan opettajan Juha Korpjärven ja laboratoriovastaavan Risto Kuitusen kanssa pidettiin 18.11.2022 palaveri, jossa päätettiin muokata testauslaitteen rakennetta. Useampi pistorasia mahdollistaa erityyppisten laitteiden yhtäaikaista liittämistä. Valokaarivikasuojaan integroidun johdonsuojakatkaisijan mitoittamiseksi sovittiin 10A, jolla varmistetaan, että ylivirtatilanteessa laukeaa nimenomaan tämän laitteen johdonsuoja eikä syöttävän keskuksen johdonsuoja. Uusi periaatekuva on esitetty kuvassa 13.

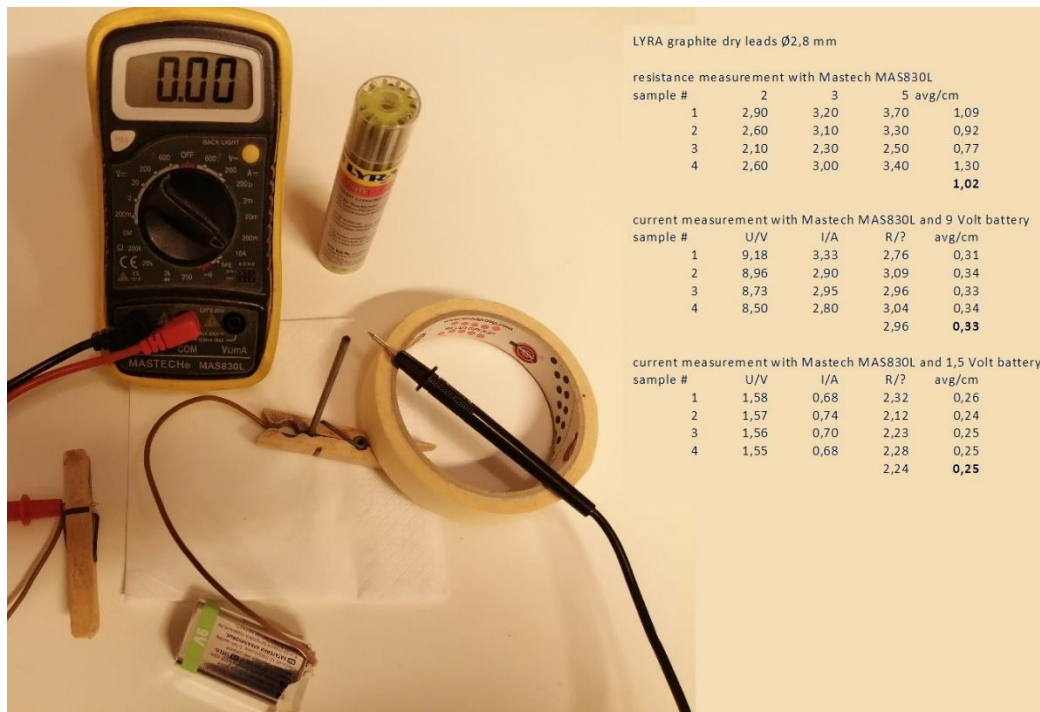


Kuva 13. Testauslaitteen muokattu rakenne (mukaillen ABB 2022; Siemens 2022)

Laitteeseen on lisätty kolmas pistorasia kytkettäville kuormille sekä liityntäpisteet nollajohtimeen ja suojajohtimeen. Nolla- ja suojajohtimen liittimiin on mahdollista liittää testauksessa suurehko resistanssi, jolla saadaan aikaan vuotovirta maahan. Valokaarivikasuojaan integroitu tai erillinen vikavirtasuojakytkin havaitsee vuotovirran ja erottaa piirin.

## 6.2 Testauslaitteen komponentit

Grafiittielektrodiksi valitaan tavallisesta rautakaupasta hyllytavarana löytyvä rakentajan merkintäkynän varalyijy edullisuuden ja helpon saatavuuden takia. Lyijy on Tokmannilta ostettu Lyra graphite dry -varalyijy, halkaisijaltaan 2,8 mm, valmistajan tuotenumero 4499102. Tuotteesta ei juurikaan löytynyt tarkempaa tietoa materiaalista, ainoastaan kovuustieto 2B (Lyra Germany s.a., 8). Lyijyn resistanssin mittaus osoittautui hyvin hankalaksi. Lyijyn pituus on noin 100 mm, ja poikkileikkauksen pinta-alaksi saadaan noin  $\pi \cdot (1,4 \text{ mm})^2 \approx 6,2 \text{ mm}^2$ . Kuvassa 14 on esitetty mittausjärjestely ja tulokset grafiittielektrodin resistanssin mittauksista.



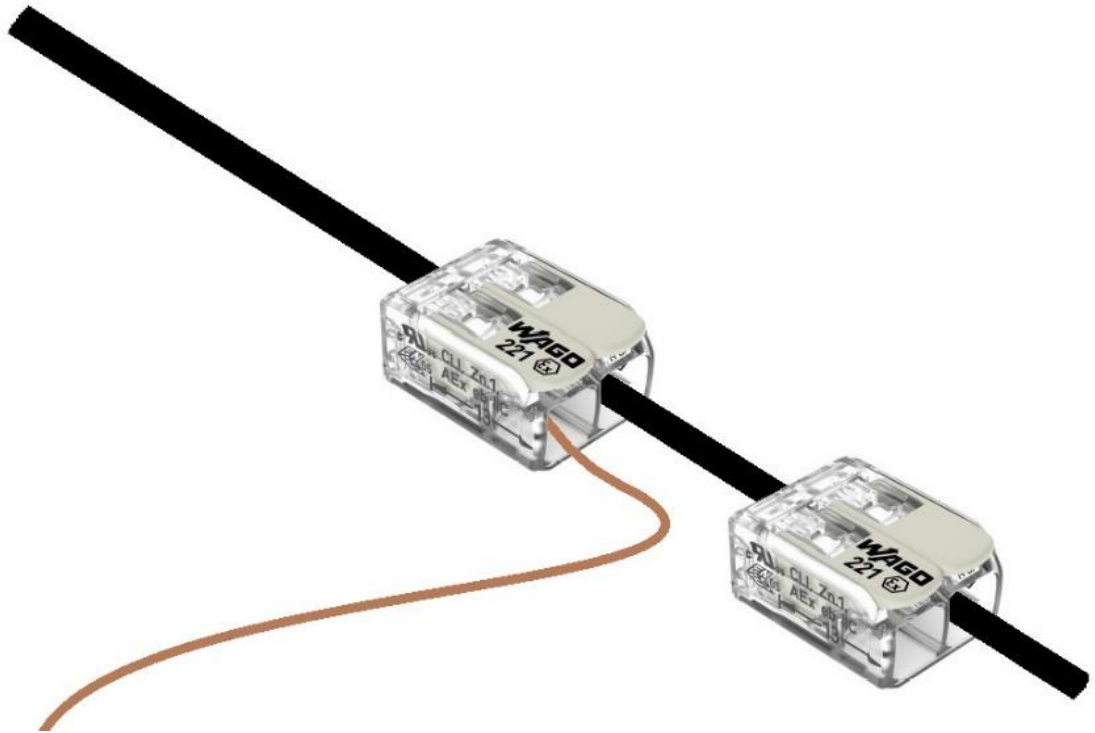
Kuva 14. Grafiittielektrodin resistanssimittaus ja tulokset

Kuvassa on hyvin kotikutoisen näköinen mittausjärjestely, ja kuvaan on liitetty järjestelyllä saadut mittaustulokset. Suoran resistanssimittauksen tulokset olivat hyvin epävarmoja, eivätkä niistä saadut tulokset ole muutenkaan linjassa

virtamittauksilla saatujen tulosten kanssa, jotka nekään eivät näytä olevan kovin samanlaisia keskenään. Varsinkin 9 voltin paristolla tehdyissä mittauksissa pariston lähtöjännite putosi nopeasti mittauksen aikana, mitä ei huomattu ennen kuin mittauksen loputtua, joten kahden keskimmäisen mittauksen jännitearvo on interpoloitu alku- ja loppujännitteiden avulla. Mittaukset suoritettiin lähinnä sen varmistamiseksi, että lyijyn sähkönjohtavuus on riittävä jotta sitä voidaan käyttää elektrodina. Mittaustuloksilla sinänsä ei ole muuta käyttöä tässä työssä.

Elektrodi lämpeni nopeasti huomattavan kuumaksi jo kolmen ampeerin virta-arvoilla, mikä aiheuttaa jonkin verran huolta elektrodin soveltuvuudesta verkkojännitteellä tehtäviin mittauksiin ja saattaa aiheuttaa tarpeen elektrodin jäädytykselle tai eri materiaalia olevan elektrodin käytölle. Mittauksessa myös havaittiin mitatun virta-arvon nousevan mittauksen aikana, mikä viittaa siihen, että grafiittielektrodin resistanssi pienenee sen lämmitessä eli elektrodin resistanssin lämpötilakerroin on negatiivinen. Tämä sopii kirjallisuudesta saatavaan grafiitin lämpötilariippuvuustietoon (Shao ym. 2008, 3). Karkeana arviona, mittaustulosten perusteella, noin viiden senttimetrin mittaisella grafiittielektrodilla on siis sähkövastusta  $1,45 \Omega$ , joka tarkoittaisi 10 ampeerin virralla  $P=UI=RI^2=1,45 \cdot 10^2=145$  watin lämmöntuottoa. Kotilaboratoriossa ei ole mahdollista selvittää, miten kuumaksi elektrodi lämpenee käytön aikana. Mikäli lämpötila nousee korkeammalle kuin elektrodien liittimet kestävät, on keksittävä jokin muu liitinratkaisu.

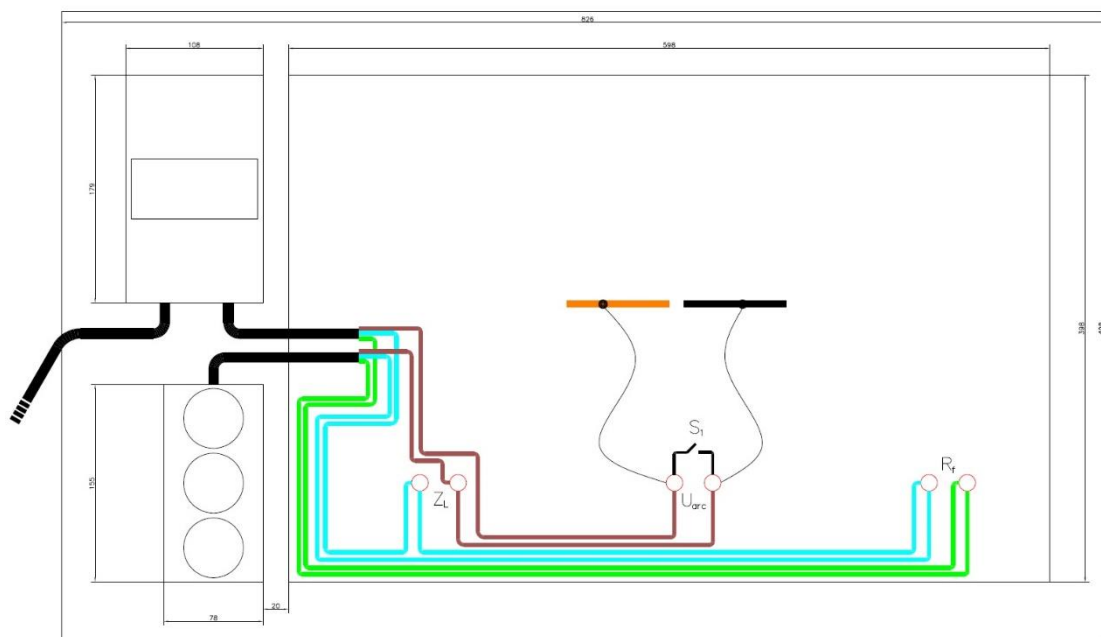
Elektrodien liitettä syöttöön toteutetaan pikaliittimillä, esimerkiksi Wago 221-682 tai vastaava. Liitin on suunniteltu räjähdysvaarallisiin tiloihin, siihen voi liittää  $6 \text{ mm}^2$  johtimia, se kestää virtaa 20 ampeeria ja jatkuvaa käyttöä  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  käyttölämpötilassa (Wago 2022, 2–3). Liittimiä tarvitaan kaksi kappaletta kummallekin elektrodille, jotta elektrodit voidaan asemoida suoriksi ja samansuuntaisiksi. Liittimiin on porattava ylimääräiset reiät, jotta elektrodi voidaan työntää niistä läpi. Kuvassa 15 on havainnekuva elektrodien liitännäjäjärjestelystä.



Kuva 15. Elektrodiin kiinnitys ja virran syöttö (mukaiillen Wago 2022, 1)

Kuvassa elektrodi (musta palkki) on työnnetty molempien liittimien läpi, ja etummaiseen liittimeen liitetään virran syöttö (ruskea johdin). Liittimien jousivoima pitää elektrodin paikoillaan niin, että se ei pääse työntymään taaksepäin. Elektrodin kuluessa sitä voidaan tarvittaessa työntää eteenpäin. Tarvittaessa elektrodi poistetaan työntämällä sitä eteenpäin, ja uusi elektrodi asetetaan sen tilalle.

Valokaarivikasuojaksi valitaan Eatonin AFDD-10/2/C/003-A, jossa on yhdistettynä C10A johdonsuojakytkin, 30 mA vikavirtasuoja ja valokaarivikasuoja. Komponentti on kolmen moduulipaikan levyinen, ja se asennetaan Hagerin 4 moduulia leveään moduulikoteloon Gamma GD104N. Valokaaren tuottamiseen tarvittavat elektrodit, tarvittavat mittauspisteet, niiden väliset johdotukset ja toisen elektrodin liikuttamiseen tarvittavat komponentit asennetaan Fiboxin isohkoon laitekoteloon PCQ 604027T, joka on valmistettu polykarbonaatista tai ABS-muovista. Laite liitetään sähkönsyöttöön kiinteällä laitekaapelilla, ja kuormat liitetään Opalin valmistamaan pistorasiamoduuliin, jossa on kolme pistokepaikkaa. Laitteen alustava layout-kuva on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Laboratoriolaitteen alustava layout-kuva

Kuvassa vasemmalla ylhäällä on moduulikotelo, johon valokaarivikasuoja sijoitetaan. Komponentti on koteloitu tavallisen johdonsuojakytkimen tapaan, jotta se voidaan asentaa jatkuvasti käytettäväksi. Syöttöjännite kytketään valokaarivikasuojan kautta oikealla olevaan laitekoteloon, jonka johdotukset on alustavasti piirretty kuvaan siten, että ruskea on vaihejohdin, sininen nollajohdin ja vihreä suojamaajohdin. Piirtoteknisistä syistä ja havainnollisuuden parantamiseksi mittausliittimet (punaiset ympyrät) piirrettiin tässä näin, mutta lopullisessa toteutuksessa ne sijoitetaan laitekotelon alareunaan eikä kanteen, kuten kuvassa. Komponenttien sijoittamista kanteen pyritään välttämään, koska se haittaisi laitteen säätöä ja huollettavuutta.

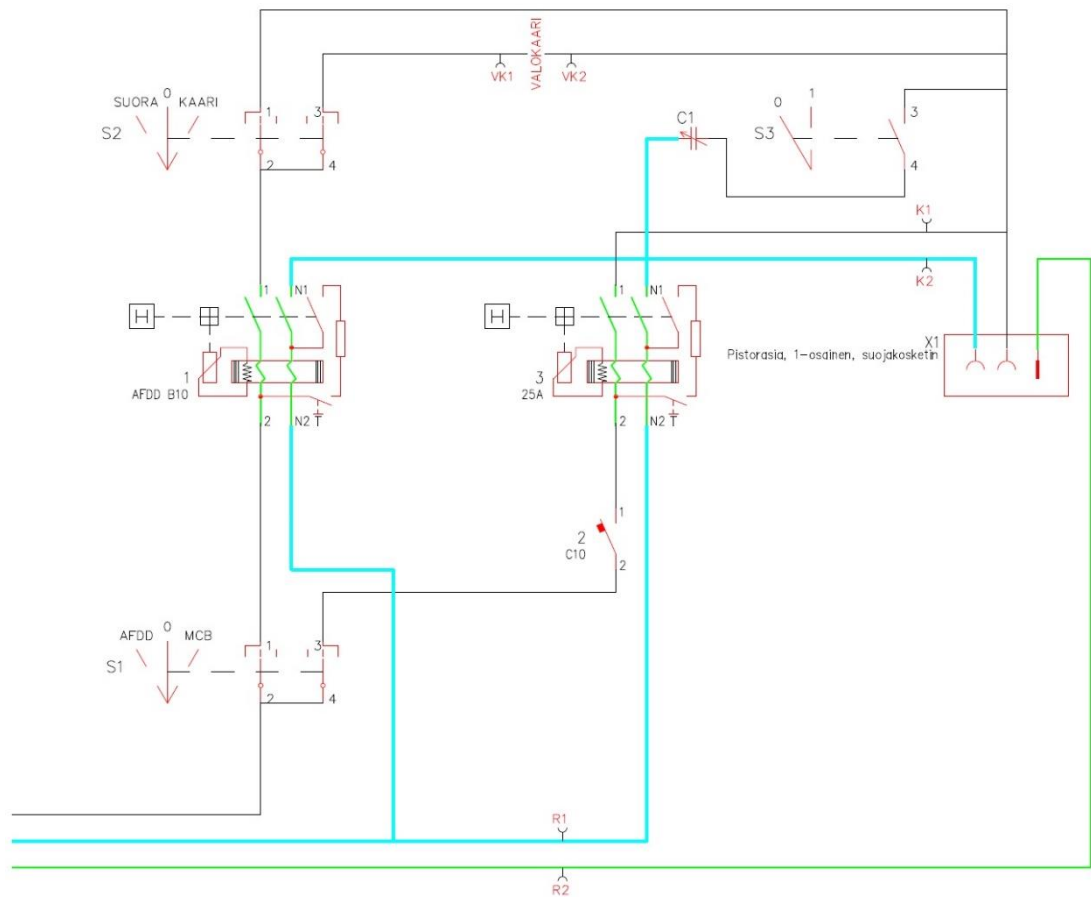
Mittausliittimiin  $Z_L$  voidaan liittää oskilloskooppi seuraamaan kuorman yli vaikuttavan jännitteen ja virran aaltomuotoja. Liittimiin  $U_{arc}$  liitetään resistanssin mittausta, jonka avulla voidaan elektrodiväli säätää johtavaksi mittauksen alussa. Elektrodit voidaan ohittaa kytkimen  $S_1$  avulla, jolloin syntyvällä suoralla liitännällä voidaan tutkia vikavirtojen havaitsemista. Liittimiin  $R_f$  voidaan liittää suurehko resistanssi, jolla saadaan aikaiseksi vikavirta ja voidaan todeta vikavirtasuojakytkimen toiminta. Kuvan vasemmassa alanurkassa on kuvattu pistorasiat, joihin liitetään mittauksissa käytettävät kuormat. Tässä kuvassa ei ole esitetty toisen elektrodin liikuttamiseen tarvittavaa mekanismia.

### 6.3 Testauslaitteen rakentaminen

Laitteen rakentamisessa tarvittavia komponentteja saatiin käyttöön 12.12.2022, ja rakentaminen aloitettiin välittömästi. Heti alkuvaiheessa tilaaja halusi merkittäviä muutoksia laitteeseen, joten tähän mennessä tehty suunnittelutyö meni suurelta osin uusiksi, ja suunnittelu oli siis tehtävä lennossa rakennustyön ohessa. On vaikea sanoa, olisiko tällainen iso muutos ollut vältettävissä järjestelmällisemmällä suunnitteluprosessilla vai olisiko siinä tapauksessa mennyt hukkaan vielä suurempi määrä suunnittelutyötä.

Suuri osa muuttuneista vaatimuksista johtui tarpeesta saada laite pienempään tilaan. Tämä saavutettiin jättämällä pohjalevy pois ja kiinnittämällä kaikki liittimet ja pistorasiat suoraan laitekotelon kanteen. Tilaaja myös halusi laitteeseen täysin uutena osana erillisen vikavirtasuojalinjan, jolloin laitteella voidaan tehdä mittauksia tavallisella vikavirtasuojalla valokaarivikasuojan sijasta. Lisäksi haluttiin laitteen sisään sijoitettavaksi kondensaattori, joka voidaan tarvittaessa kytkeä kuormaksi yksinään tai pistorasioihin liitettävien kuormien rinnalle.

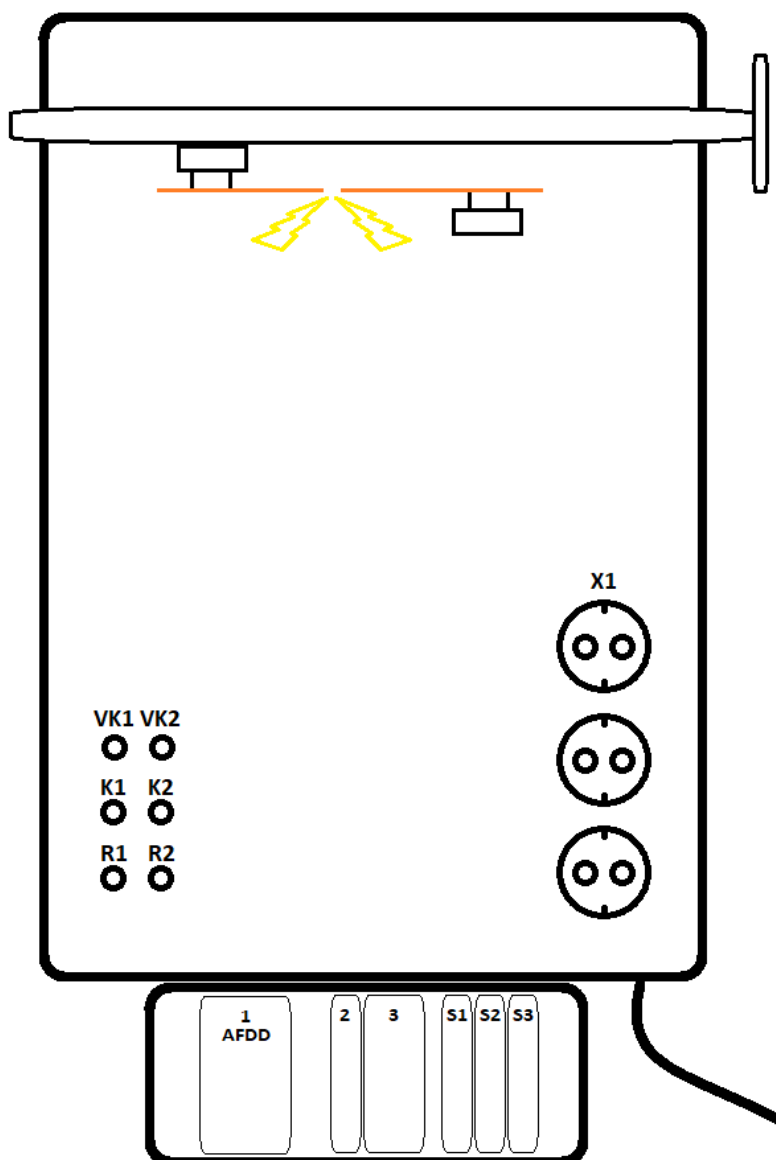
Ensimmäisenä rakennuspäivänä ei vielä edistytty kovin pitkälle. Moduulikotelo ja laitekotelo saatiin liitettyä toisiinsa. Jonkin verran perusjohdotuksia saatiin tehtyä, ja laitekotelon kanteen tarvittavat läpiviennit saatiin valmiiksi. Pistorasioiden asentaminen laitekotelon kanteen erillisen pistorasiamoduulin sijaan hidasti rakennustyötä huomattavasti, koska sen sijaan että pistorasiat olisivat olleet valmiina, piti nyt jokaiselle pistorasialle erikseen porata oma asennusaukko laitekotelon kanteen ja jokainen pistorasia kiinnittää erikseen ruuveilla. Muovisen kannen poraaminen osoittautui yllättävän hankalaksi, koska muovi oli hyvin kovaa. Poraaminen oli myös suoritettava äärimmäisen varovasti, jotta kansi ei vaurioituisi, ja toisaalta jotta asennusreiät eivät tulisi liian suuriksi pistorasioille. Laitteen kytkennästä haluttiin myös siisti CAD-ohjelmalla piirretty kytkentäkaavio, jonka ensimmäinen hahmotelma on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Laboratoriolaitteen kytentäkaavio

Kytimellä S1 valitaan, käytetäänkö valokaarivikasuojaa 1 vai johdonsuojakatkaisijaa 2 ja vikavirtasuojaa 3. Kytimellä S2 voidaan ohittaa valokaarivikasuojan jälkeiset elektrodit, jolloin voidaan kokeilla kuormissa esiintyvien valokaarivikojen havaitsemista ilman elektrodivälin käyttöä. Kytimellä S3 voidaan valita, onko kuormaksi kytkettynä sisäinen kondensaattori C1 vai ei. Kytentäku-  
van tiedoista poiketen pistorasioita on kolme kappaletta. Mittauspisteillä VK1 ja VK2 voidaan mitata elektrodien yli vaikuttava jännite ja virta, mittauspisteillä K1 ja K2 voidaan tarkkailla kuormien yli vaikuttavaa jännitettä ja virtaa, ja mittauspisteisiin R1 ja R2 voidaan tarvittaessa kytkeä suurehko vastus, jolla voidaan aiheuttaa piiriin vikavirta, joka voidaan havaita valokaarivikasuojoilla tai vikavirtasuojalla.

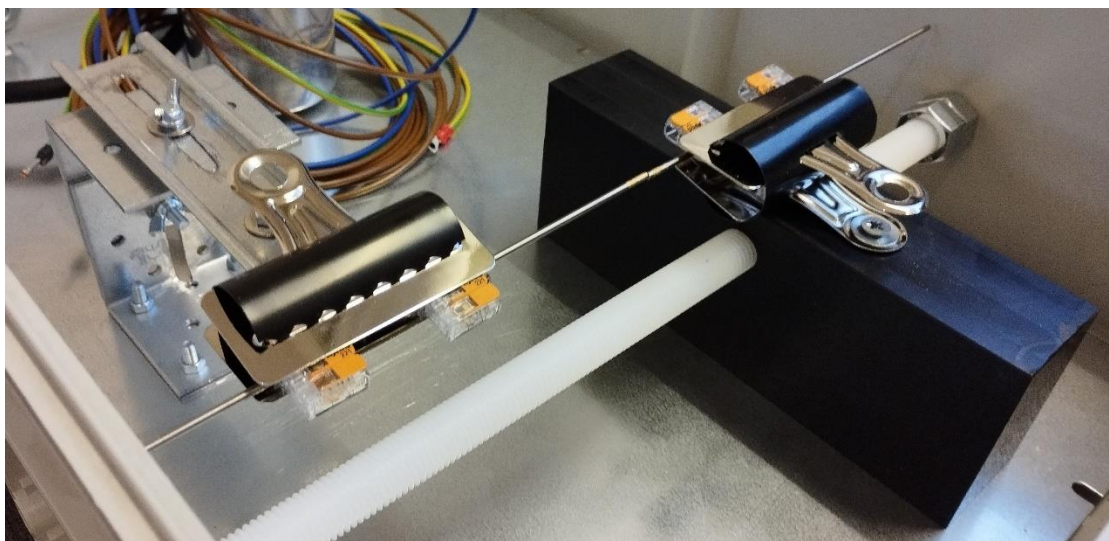
Laitteen kaikki käyttökytkimet sijoitetaan moduulikoteloon, joka sijaitsee varsinaisen laitekotelon alapuolella. Muuttuneen suunnitelman mukainen laitteen etunäkymä on kuvattuna kuvassa 18.



Kuva 18. Havainnekuva laboratoriolaitteesta

Kuvassa on yllmpänä elektrodit ja toisen elektrodin liikuttamismekanismi. Muovinen kierretanko ulottuu laitteen läpi, ja käsipyörää pyörittämällä toinen (päältä katsottuna vasemmanpuoleinen) elektrodi liikkuu sivusuunnassa toisen pysyessä paikoillaan. Laitteen kannessa vasemmalla alhaalla kolme paria mittausliittimiä, yllmpänä VK1 ja VK2, joilla voidaan mitata elektrodiväliä, alempana K1 ja K2, joilla mitataan kuorman yli vaikuttavaa jännitettä/virtaa, ja alimpana R1 ja R2, joihin voidaan liittää ulkoinen vastus vikavirran mittauksessa. Oikealla alhaalla kolme kappaletta pistorasioita X1. Kaikkein alimpana moduulikotelo, johon on sijoitettuna valokaarivikasuoja 1, johdonsuojakatkaisija 2, vikavirtasuojaja 3 sekä kolme kytkintä S1, S2 ja S3. Laitteen jännitesyöttö tapahtuu kiinteästi asennetulla laitejohdolla, joka on kuvattu pistorasioiden alapuolella.

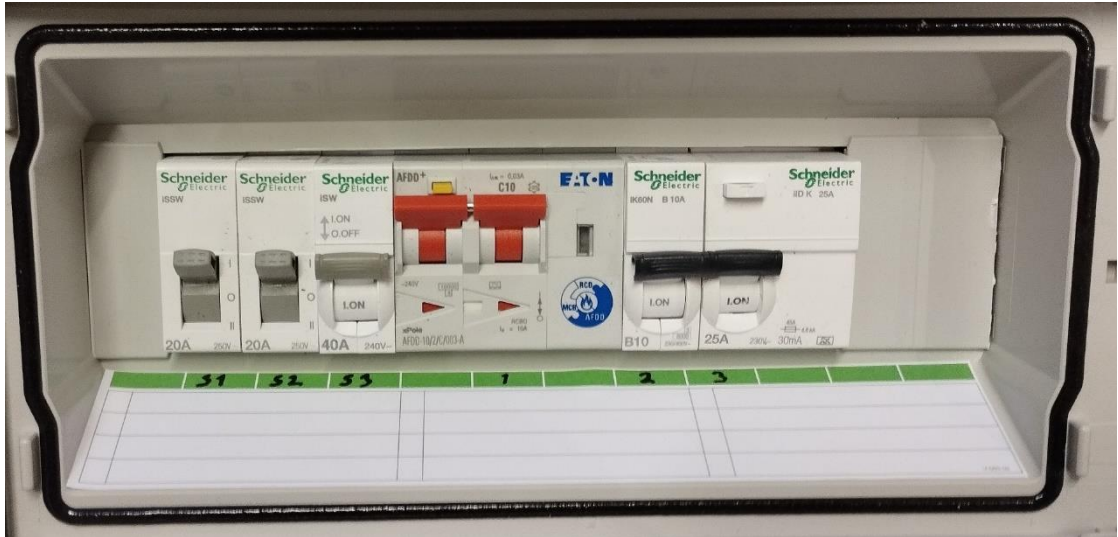
Toisena rakennuspäivänä 9.1.2023 saatiin kaikki kanteen tulevat komponentit asennettua ja liikuttelumekanismin alkuvalmistelut aloitettua. Ajan käydessä vähiin päätettiin laite ottaa mukaan ja jatkaa rakentamista kotona. Elektrodien liikuttelumekanismi saatiin valmiiksi kolmantena rakennuspäivänä 17.1.2023, jolloin laitteen voitiin katsoa valmistuneen aivan viimeisiä kytkentöjä ja testausta lukuun ottamatta. Elektrodin liikkeen välittämiseen käytettävä muovinen kierretanko ei ole täysin jäykkä, joten käytössä sen muoto hieman muuttuu eikä elektrodin liike ole aivan lineaarinen. Tämän ei oleteta vaikuttavan valo-kaaren synnyttämiseen, mutta lopullinen varmuus tästä selviää vasta kokeiluvaiheessa. Kuvassa 19 on esitetty elektrodien kiinnitys- ja liikuttelumekanismit.



Kuva 19. Elektrodien kiinnitys ja liikuttelu

Kuvan vasemmassa reunassa on kiinteän elektrodin asennusteline. Elektrodia voidaan siirtää pysty- ja vaakasuunnassa, jotta se voidaan asemoida tarkasti linjaan toisen elektrodin kanssa. Asemointivaraa on paljon enemmän kuin sitä käytännössä tarvitaan, lähinnä johtuen käytettävissä olevista työkaluista, joilla ei mitään kovin tarkkaa työjälkeä ollut mahdollista saavuttaa. Säättöjen tekeminen on hieman hankalaa, koska pidätinruuvien kiristämiseen tarvitaan molempia käsiä, mutta onnistuu kuitenkin kohtuullisella vaivalla. Kuvan oikeassa laidassa olevaa mustaa muovipalkkia, johon toinen elektrodi on kiinnitetty, voidaan siirtää kiertämällä asennuskotelon ulkopuolella olevaa käsipyörää. Myö- täpäivään kiertämällä elektrodi liikkuu lähemmäksi kiinteää elektrodia, ja vas- tapäivään kiertämällä elektrodit erkanevat toisistaan, jolloin kiertämisen lo- giikka on vastaava kuin millä tahansa ruuvilla. Molemmat elektrodit pysyvät

paikoillaan paperipuristimien leukojen välissä. Elektrodit on työnnetty kahden pikaliittimen läpi, kuten sivulla 35 kuvattiin. Myös käyttöpaneeli järjestettiin eri tavalla kuin havainnekuvassa. Lopullinen paneelin komponenttien sijoitusjärjestys on kuvattu kuvassa 20.



Kuva 20. Käyttökytkinpaneeli

Kuvassa ensimmäisenä vasemmalla käyttökytkin S1, jonka asento 1 valitsee käyttöön valokaarivikasuojan 1 ja asento 2 vikavirtasuojan 3. Seuraavana käyttökytkin S2, jonka asento 1 valitsee valokaarivikasuojan jälkeen suoran kytkennän pistorasioihin, jolloin valokaarielektrodit ohitetaan eikä niillä voida aiheuttaa virtapiiriin valokaarta. Asennolla 2 yhteys pistorasioihin kulkee valokaarielektrodien kautta, jolloin voidaan tutkia valokaaren havainnointia, kun elektrodeja liikutetaan. Käyttökytkimellä S3 voidaan valita, onko asennuskotelossa oleva kondensaattori virtapiirissä mukana vai ei, siten että kytkimen asennolla 0 kondensaattori ei ole virtapiirissä ja asennolla 1 se on. Seuraavana oikealla on kolmen moduulin levyinen Eatonin valmistama valokaarivikasuoja, jossa on yhdistettynä C10-tyyppinen johdonsuojakytkin, 30 mA vikavirtasuojakytkin sekä valokaarivikasuoja. Tästä seuraavana oikealle on tavallinen B10-tyyppinen johdonsuojakytkin, ja viimeisenä oikealla tavallinen vikavirtasuojakytkin.

Laite saatiin kokonaan valmiiksi Mikkeliissä Xamkin sähkölaboratorion protopajassa neljäntenä rakennuspäivänä 19.1.2023. KytKentöjen tarkistuksen ja muutaman virhekytkennän korjaamisen jälkeen voitiin suorittaa ensimmäinen testaus. Välittömästi kävi ilmi, että suunnitellut grafiittielektrodit eivät sovellu

valokaaren tuottamiseen lainkaan, sillä molemmat elektrodit syttyivät palamaan lähes välittömästi valokaaren syttymisen jälkeen. Syynä syttymiseen voi olla, että näissä valituissa grafiittitangoissa on liian paljon sidosaineita ja liian vähän grafiittia, oletettavasti puhdas tai lähes puhdas grafiitti ei käyttäytyisi kuvatulla tavalla. Muita grafiittielektrodeja ei ollut varattuna testaukseen, joten tämän selvittäminen jää mahdolliselle jatkokehittäjälle. Onneksi käytössä oli myös Kalle Pesoselta saadut zirkon-elektrodit, joilla testausta voitiin jatkaa. Täysin valmis laite on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Valmis laboratoriolaite

Kuvassa ylimpänä elektrodit ja niiden liikuttelumekanismi. Isomman laitekotelon vasemmassa alakulmassa ovat mittauspisteet kytkentäkaavion (kuva 17 sivulla 39) mukaisesti. Kotelon sisällä alaosan keskellä kondensaattori, joka voidaan tarvittaessa kytkeä kuormaksi. Oikeassa reunassa kolme pistorasiaa, joihin testattavat kuormat kytketään. Ison laitekotelon alapuolella on pienempi moduulikotelo, johon on sijoitettu käyttökytkimet ja suojakomponentit.

Testauksessa laite vaikutti toimivan suunnitellusti. Siirtomekanismin epätarkkuus ei estänyt valokaaren aikaansaamista, ja elektrodin liikuttamiseen tarvittava voima oli kohtuullinen. Kovin pitkäikäistä valokaarta oli kuitenkin hyvin vaikea saada aikaiseksi, pienikin muutos elektrodivälissä joko sammutti alkaen valokaaren nopeasti, jos rako muodostui liian suureksi, tai muodosti pysyvän kytkennän kun elektrodit koskettivat toisiaan. Valokaaren syttyminen ja palaminen riippuu voimakkaasti elektrodien materiaalista, joten on mahdollista, että toisilla materiaaleilla pysyvän valokaaren aikaansaaminen olisi helpompaa. Merkille pantavaa oli se, että valokaarivikasuoja oli hyvin haluton katkaisemaan virtapiiriä, vaikka elektrodien välillä oli silmin havaittava valokaari. Tämän kuitenkin todettiin olevan valokaarivikasuojan eikä laboratoriolaitteen aiheuttama ongelma. Ajan puutteen vuoksi laitteen toista virtapiiriä, eli tavallisen johdonsuojakatkaisimen ja vikavirtasuojan yhdistelmää ei testattu, ainoastaan kytkentöjen valmistuttua tarkistettiin, että johdotus on kytkentäkaavion mukainen. Ei ole syytä olettaa, etteikö tämä toinenkin virtapiiri toimisi suunnitellusti. Laitteelle tehtiin myös suojamaan jatkuvuusmittaukset ja eristysvastusmittaukset, mutta näistä ei kuitenkaan tehty mittauspöytäkirjaa koska kyseessä on laboratoriolaitte eikä kiinteistön sähköasennus. Viimeisen rakennuspäivän päätteeksi voitiin siis todeta, että laite toimii odotetulla tavalla ja sitä voidaan käyttää sarjavalokaaren synnyttämiseen ja valokaarivikasuojan toiminnan havainnointiin.

Kaiken kaikkiaan varsinaista rakennustyötä tehtiin noin neljän kokonaisen työpäivän verran. Mekanismien ja johdotusten suunnittelu tapahtui ilman mitään varsinaista prosessia. Suunnitteluun käytetyn ajatustyön tuntimäärää on mahdoton arvioida. Hankalimmin toteutettava osa laitteesta oli elektrodien liikuttelumekanismi, suurelta osin käytettävissä olevien työkalujen rajoitteiden takia. Mikäli käytössä olisi ollut vaikkapa tarkkuusjyrsin tai edes pöytäsiirkeli, olisi

ollut mahdollista tehdä liikuteltavan elektrodin muovijalustaan ura jollekin ohjaavalle kiskolle, jolla olisi voitu pakottaa jalusta liikkumaan suoraan eikä muovisen kierretangon joustoliike olisi aiheuttanut elektrodin liikkeen epätarkkuutta.

## 7 POHDINTA

Suomeksi ei juurikaan ollut saatavilla materiaalia valokaarivikasuojista, mikä osaltaan kertoo siitä, että suoja ei Suomessa juurikaan käytetä. Pari lehtiartikkelia oli käsitellyt komponenttia lyhyesti ja esitti arvioita komponentin yleistyimestä, mutta nämäkin olivat viime vuosikymmenen lopulta eikä uudempia ollut löydettävissä. Oletettavaa on, että valokaarivikasuojan käyttö ei yleisty, ennen kuin sen käyttö määrätään pakolliseksi asennusmääräyksissä. Tämän opinnäytetyön aloitusvuonna 2022 uudistunut standardikokoelma ei pakollistanut komponentin käyttöä, joten viisivuotissyklin puitteissa sen asennus voi tulla pakolliseksi aikaisintaan vuonna 2027. Laboratoriolaitteen testauksen perusteella nykyisten valokaarivikasuojien toiminnan luotettavuus ei näytä olevan sillä tasolla, mitä pakollisesti asennettavalta suojalaitteelta pitäisi voida odottaa.

Opinnäytetyön tekemisessä huomattavia hankaluuksia aiheutti se, että kaikkea lähdemateriaalia ei ollut mahdollista saada käyttöön. Standardien osalta oli pakko käyttää sekundäärilähteitä, mutta tämän ongelman lisäksi kävi ilmi, että moneen hyvään lähteeseen ei ole oikeuksia Xamkin kirjaston kautta lainkaan. Esimerkiksi IEEE:n materiaalin käyttöoikeuksia ei ole ollenkaan, ainoastaan yksittäisiä artikkeleita oli mahdollista kaukolainata. Tähän lainausprosessiin kului sitten aikaa useita päiviä, ja kolmessa kerrassa neljästä materiaali ei ollutkaan käyttökelpoista. Satunnaisissa tapauksissa artikkeli, joka olisi ollut maksullinen vaikkapa IEEE:n kautta, saattoi löytyä esimerkiksi artikkelin kirjoittajan itse jakamana jostain muualta. Eri tiedonhakupöytäkirjojen ja -alustojen yhdisteleminen osoittautui siis hyväksi toimintatavaksi.

Laboratoriolaitteen rakentamisessa suuri haaste oli saada kaikki tarvittavat komponentit kerralla selvitettyä. Tähän olisi varmaankin auttanut, jos olisi käytetty jotain selkeää suunnitteluprosessia, mutta siinäkin tapauksessa olisi pitä-

nyt olla käytettävissä joku tottuneempi rakentelija suunnittelun aikana. Lisähankaluuksia tuli siitä, että opinnäytetyön tekijä asui Savonlinnassa ja laboratoriotilat olivat Mikkelissä, joten ei ollut käytännössä mahdollista käydä pikaisesti kokeilemassa jonkun muuttuneen ratkaisun toimivuutta laitteen toteutuksessa. Kolmas huomattavaa hankaluutta aiheuttanut asia oli käytettävissä olevien työkalujen puutteet ja rajoitteet. Käytettävissä olevat työkalut olivatkin suunnittelussa rajoittava reunaehto, eli mahdollisten ratkaisujen valintaa ohjasi voimakkaasti se, voiko ratkaisun toteuttaa käytettävissä olevilla välineillä.

Tämän opinnäytetyön jatkokehityksenä voisi mahdollisesti tehdä laboratoriotehtäviä, joissa käytetään tässä opinnäytetyössä kehitettyä valokaarivikasuojan testauslaitetta. Oskilloskoopilla voidaan havaita, miten tietyt kuormat hankaloittavat valokaaren havainnointia, ja oskilloskoopin näytöltä voidaan lukea valokaarivikasuojan laukaisuaika. Myös eri valmistajien valokaarivikasuojen toimintaa voitaisiin vertailla vaihtamalla vikasuoja eri merkkiseen, tässä toki ongelmana valokaarivikasuojen korkeahko hankintahinta. Eri elektrodimateriaalien vaikutusta valokaaren syntymiseen ja sen havaitsemiseen on helppo testata. Kunhan valittu elektrodi vain sopii käytettyihin pikaliittimiin, niin laitteeseen ei tarvitse muita muutoksia tehdä.

Kun laboratoriolaitteen käytöstä kertyy kokemusta, kannattaa seurata, miten paljon elektrodeista irtoaa kuumaa materiaalia valokaaren aikana. Mikäli materiaalia irtoaa huomattavasti, se voi kuluttaa laitekotelon muovipintoja nopeastikin, vaikka varsinaista tulipalovaaraa ei olisikaan. Erillinen metallinen tai lasinen suojakotelointi elektrodien ympärillä voi osoittautua tarpeelliseksi laitekotelon kulumisen vähentämiseksi.

Valmiin laitteen testauksessa suurin yllätys oli, miten haluton vikasuoja oli katkaisemaan virtapiiriä, vaikka elektrodien välillä oli selvästi nähtävissä valokaari. Tämä havainto ei luonut kovin korkeaa luottamusta valokaarivikasuojan toimimiseen sähköpalojen estäjänä.

Valokaarivikasuojia on myös tasavirralla, ainakin aurinkopaneelijärjestelmiä ja sähköautojen tasavirtajärjestelmiä varten. Niissä lienee vaihtovirtasuojista poikkeava valokaaren tunnistusalgoritmi, koska tasavirralla ei esiinny kaaren

sammumista virran nollakohdissa. Näistä varmaankin syntyisi erillinen opin-  
näytetyö ja vaikkapa koululla olevaan aurinkopaneelikärryyn toteutettava suo-  
jaus- tai mittauslaite. Kuten johdannossa todettiin, tässä työssä ei näitä lait-  
teita käsitelty lainkaan.

## LÄHTEET

- Aatsalo, J. 2019. Sähköurakoitsijat varoittavat verkkokauppojen epämääräisistä asennustarvikkeista – valokaarivikasuoja yleistyy pian. *Rakennuslehti*. Verkkolehti. Julkaistu 27.11.2019. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2019/11/sahkourakoitsijat-varoittavat-verkkokauppojen-epamaaraisista-asennustarvikkeista-valokaarivikasuoja-yleistyy-pian/> [viitattu 14.11.2022].
- ABB. 2022. Maadoitettu 2-osainen pistorasia peitelevyllä, jousiliittimin, IP21. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.asennustuotteet.fi/catalog/18803/Maadoitettu%20-2-osainen%20pistorasia%20peitelevyll%C3%A4%20jousiliittimin%20IP21\\_FIN1.html](https://www.asennustuotteet.fi/catalog/18803/Maadoitettu%20-2-osainen%20pistorasia%20peitelevyll%C3%A4%20jousiliittimin%20IP21_FIN1.html) [viitattu 6.11.2022].
- Al Qabbani, G. 2021. Tests of Series Arcing and Arc Fault Detection Devices in Low Voltage Systems. KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS). Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-301621> [viitattu 11.11.2022].
- Andrea J., Besdel P., Zirn O. & Bournat M. 2015. The electric arc as a circuit component. Teoksessa *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* 3027–3034. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/IECON.2015.7392564> [viitattu 25.11.2022].
- Andrea, J., Schweitzer, P. & Carvou, E. 2019. Comparison of Equations of the VI Characteristics of an Electric Arc in Open Air. Teoksessa *2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 76–81. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/HOLM.2019.8923912> [viitattu 26.11.2022].
- Andrea, J., Schweitzer, P. & Tisserand, E. 2010. A New DC and AC Arc Fault Electrical Model. Teoksessa *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 1–6. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/HOLM.2010.5619541> [viitattu 26.11.2022].
- BEAMA. 2022. What's new for Arc Fault Detection Devices (AFDDs) in BS 7671:2018+A2:2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.beama.org.uk/resourceLibrary/afdd-fact-sheet-3---bs-7671-amd2.html> [viitattu 14.11.2022].
- Babrauskas, V. 2001. How do electrical wiring faults lead to structure ignitions. Teoksessa *Proc. Fire and Materials 2001 Conf.* 39–51. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doctorfire.com/pages/ElectricalFires.pdf> [viitattu 9.11.2022].
- Babrauskas, V. 2013. Arc breakdown in air over very small gap distances. Teoksessa *Conference: Interflam 2*. 1489–1498. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Vytenis-Babrauskas/publication/288833649\\_Arc\\_Breakdown\\_over\\_Very\\_Small\\_Gap\\_Distances/links/5685863708ae197583951ead/Arc-Breakdown-over-Very-Small-Gap-Distances.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vytenis-Babrauskas/publication/288833649_Arc_Breakdown_over_Very_Small_Gap_Distances/links/5685863708ae197583951ead/Arc-Breakdown-over-Very-Small-Gap-Distances.pdf) [viitattu 9.11.2022].

Budzisz, J. & Czosnyka, M. 2022. Arc fault detection devices efficiency in cooperation with switch-mode power supplies. Teoksessa *Electric Power Systems Research* 209 107943. Saatavissa:

<https://www.doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107943> [viitattu 11.11.2022].

Czapp, S. 2019a. Application of RCD and AFDD in low-voltage electrical installations for protection against fire. Teoksessa *Przegląd Elektrotechniczny* .12–16. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.doi.org/10.15199/48.2019.11.04> [viitattu 9.11.2022].

Czapp, S. 2019b. Time-current tripping curves of arc fault detection devices. Teoksessa *Automatyka Elektryka Zakłócenia* 10. 16–18. Saatavissa:

<https://epismo-aez.pl/artykul.php?id=1336> [viitattu 15.11.2022].

Darwish, H.A. & Elkalashy, N.I. 2005. Universal arc representation using EMTF. Teoksessa *IEEE Transactions on Power Delivery* 20 2. 772–779. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838462> [viitattu 25.11.2022].

David, I.G., Popa, D.-E. & Buleandra, M. 2017. Pencil Graphite Electrodes: A Versatile Tool in Electroanalysis. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 2017. Verkkolehti. Julkaistu 31.1.2017. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.doi.org/10.1155/2017/1905968> [viitattu 9.11.2022].

DKE. 2022. Erläuterungen anlässlich der Veröffentlichung von DIN VDE 0100-420 (VDE 0100-420):2022-06; Abschnitt 421.7 „Schutz gegen die Auswirkungen von Fehlerlichtbögen in Endstromkreisen“ PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.dke.de/resource/blob/1947598/75226f053a3f9eb48122492ac054b5b3/erlaeuterungen-als-pdf-download-data.pdf> [viitattu 15.10.2022].

FEEDS. 2020. European data on domestic fires from electrical source. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://drive.google.com/file/d/1jHIEExerMwhDYK-KrYe5ofT8XrtxGSFCUF/view> [viitattu 22.11.2022].

Fengel, M. 2019. Klarheit für den Einsatz von AFDDs. *Elektro Praktiker* 11/2019. Verkkolehti. Julkaistu 2019. Päivitetty 24.02.2022. Saatavissa:

<https://www.elektropraktiker.de/nachricht/klarheit-fuer-den-einsatz-von-afdds/> [viitattu 14.10.2022].

Farooq H.A. 2017. Series Arc Fault Detection in the Presence of Household Electrical Loads. Czech Technical University in Prague. Faculty of Electrical Engineering. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70495> [viitattu 13.11.2022].

Gammon, T. & Matthews, J. 1999. The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems. Teoksessa *1999 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (Cat. No.99CH36371)*. Saatavissa:

<https://www.doi.org/10.1109/ICPS.1999.787220> [viitattu 1.12.2022].

Genesio, R., Vicino, A. & Tartaglia, M. 1982. Qualitative analysis of mathematical arc models using Lyapunov theory. Teoksessa *International Journal of*

*Electrical Power & Energy Systems* 44. 245–252. Saatavissa: [https://www.doi.org/10.1016/0142-0615\(82\)90004-7](https://www.doi.org/10.1016/0142-0615(82)90004-7) [viitattu 25.11.2022].

Hatakka, S. & Huurinainen, V. 2017. Sähkölaitteistoista (sähköasennuksista) aiheutuneet tulipalot ja palovaarat Suomessa vuonna 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/11781251/S%C3%A4hk%C3%B6laitteistoista+aiheutuvat+tulipalot+ja+palovaarat+2017.pdf/99a199f4-fd7d-4d9a-50b4-d3dcd0d5e9d5/S%C3%A4hk%C3%B6laitteistoista+aiheutuvat+tulipalot+ja+palovaarat+2017.pdf> [viitattu 22.11.2022].

IEC Webstore. 2022. IEC 62606:2013. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62606%7Bed1.0%7Db.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62606%7Bed1.0%7Db.pdf) [viitattu 14.10.2022].

Jiang, R., Bao, G., Hong, Q. & Booth, C. 2022. Machine Learning Approach to Detect Arc Faults Based on Regular Coupling Features. Teoksessa *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 1–1. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/TII.2022.3153333> [viitattu 11.11.2022].

Knápek, A., Sobola, D., Burda, D., Daňhel, A., Mousa, M. & Kolařík, V. 2019. Polymer Graphite Pencil Lead as a Cheap Alternative for Classic Conductive SPM Probes. *Nanomaterials* 9(12) 1756. Verkkolehti. Julkaistu 10.12.2019. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.3390/nano9121756> [viitattu 9.11.2022].

Laakkonen, M. 2018. Valokaarivikasuojalaitteen käyttö kiinteistöjen sähköasennuksissa. Karelia-ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutus. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201805046540> [viitattu 9.11.2022].

Larsson, C.O. 2012. Seriefeilvern i elektriske installasjoner. Norges teknisk-naturvetenskaplige universitet. Institut for elkraftteknikk. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/257300> [viitattu 9.11.2022].

Lyra Germany. s.a. Informationen zu LYRA INK & DRY – Fila. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fila.it/up/sites/8/LYRA-DRY-PROFI-LYRA-DRY-PROFI-LED.pdf> [viitattu 8.11.2022].

Ma, N., Jia, C., Cao, J., Zhao, X., Chen, H., Qiu, F., Zhang, Y. & Du, Y. 2022. Detection Performance of Arc Fault Detection Devices According to the Chinese Standard GB31143. Teoksessa *2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)* 1–6. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/profile/Jinxin-Cao-3/publication/360660859\\_Detection\\_Performance\\_of\\_Arc\\_Fault\\_Detection\\_Devices\\_According\\_to\\_the\\_Chinese\\_Standard\\_GB31143/links/628531cbedb2b046abd155cd/Detection-Performance-of-Arc-Fault-Detection-Devices-According-to-the-Chinese-Standard-GB31143.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jinxin-Cao-3/publication/360660859_Detection_Performance_of_Arc_Fault_Detection_Devices_According_to_the_Chinese_Standard_GB31143/links/628531cbedb2b046abd155cd/Detection-Performance-of-Arc-Fault-Detection-Devices-According-to-the-Chinese-Standard-GB31143.pdf) [viitattu 14.11.2022].

Martel, J.-M. 2018. Series arc faults in low-voltage AC electrical installations. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.db-thueringen.de/receive/dbt\\_mods\\_00034130](https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00034130) [viitattu 9.11.2022].

Navratil, R., Kotzianova, A., Halouzka, V., Opletal, T., Triskova, I., Trnkova, L. & Hrbac, J. 2016. Polymer lead pencil graphite as electrode material: Voltammetric, XPS and Raman study. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 783. 152–160. Verkkolehti. Julkaistu 15.12.2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.11.030> [viitattu 9.11.2022].

NFPA. 2022. NFPA 70 National Electrical Code 2023 Edition. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/Codes-and-Standards> [viitattu 12.11.2022].

Nordseth, Ø. 2022. Status of the use of arc fault detection devices in Norway. Institutt for energiteknikk. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ife.brage.unit.no/ife-xmlui/handle/11250/2992145> [viitattu 9.11.2022].

Restrepo, C., Staley, P., Nayak, A., Mikani, V., Kinsel, H., Titus, S. & Endozo, J. 2008. Systems and Methods for Arc Fault Detection. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008054806> [viitattu 9.11.2022].

Restrepo, C.E. 2007. Arc Fault Detection and Discrimination Methods. Teoksessa *Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 115–122. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/HOLM.2007.4318203> [viitattu 9.11.2022].

Shao, Q., Liu, G., Teweldebrhan, D. & Balandin, A.A. 2008. High-temperature quenching of electrical resistance in graphene interconnects. *Applied Physics Letters* 92 20. 202108. Verkkolehti. Julkaistu 19.5.2008. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1063/1.2927371> [viitattu 9.11.2022].

Shea, J.J. 2008. Comparing 240 Vrms to 120 Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire. Teoksessa 2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 218–224. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/HOLM.2008.ECP.47> [viitattu 16.11.2022].

Shea, J.J. 2011. Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits. *Fire and Materials* 35 1. 19–42. Verkkolehti. Julkaistu 12.1.2011. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1002/fam.1033> [viitattu 9.11.2022].

Siemens. 2022. 5SV6016-6GV10 DataSheet. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/?mlfb=5SV6016-6GV10> [viitattu 6.11.2022]

Siemens A.G. 2016. SENTRON 5SM6 AFD units Technology Primer. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d8eedd48f65bce75615cabcc29ccfa5b19b85cfc/technikfibel-brandschutz-en.pdf> [viitattu 9.11.2022].

Siemens Industry, Inc. 2012. History of the AFCI. White Paper. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.siemens.com/download?BTLV\\_40703](https://www.siemens.com/download?BTLV_40703) [viitattu 14.10.2022].

Slade, P.G. & Taylor, E.D. 2002. Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced (0.2 /spl mu/m-40 /spl mu/m) electrical contacts. Teoksessa *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 25 3. 390–396. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/TCAPT.2002.804615> [viitattu 16.11.2022].

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2018. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 26. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Tiainen, E. 2021. SFS 6000:n uudistustyö käynnistyi. *Sähkömaailma*. Verkko-lehti. Julkaistu 23.2.2021. Saatavissa: <https://www.sahkomaailma.fi/sfs-6000n-uudistustyö-kaynnistyi/> [viitattu 14.11.2022].

USFA. 2018. Residential Building Electrical Fires (2014–2016) Volume 10. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.usfa.fema.gov/statistics/reports/> [viitattu 22.11.2022].

Vasile, C., D'Orchymont, V., Meunier-Carns, J., Rey, J.-F. & Raisig, I. H. 2019. Arcing Persistency Measurement for IEC62606 Arc-Fault Detection Device Certification. Teoksessa *2019 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCE Austin)*. 1–6. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/SPCE47297.2019.8950836> [viitattu 23.11.2022].

Vu, H.D., Calderon, E., Schweitzer, P., Weber, S. & Britsch, N. 2019. Multi criteria series arc fault detection based on supervised feature selection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 113. 23–34. Verkkolehti. Julkaistu 18.5.2019. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.012> [viitattu 9.11.2022].

Wallash, A.J. & Levit, L. 2003. Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps. Teoksessa *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II 4980*. 87–96. PDF-dokumentti. Saatavissa: 10.1117/12.478191 <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4980/0000/Electrical-breakdown-and-ESD-phenomena-for-devices-with-nanometer-to/10.1117/12.478191.full> [viitattu 9.11.2022].

Wago. 2022. Data sheet for COMPACT splicing connector 221-682. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wago.com/global/installation-terminal-blocks-and-connectors/compact-splicing-connector/p/221-682> [viitattu 10.11.2022].

Yin, Q. & Ding, R. 2016. Review of Arc Models in Distribution Networks. *MATEC Web of Conferences* 61. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1051/mateconf/20166102016> [viitattu 26.11.2022].

Zhang, Z., Nie, Y. & Lee, W.-J. 2019. Approach of Voltage Characteristics Modeling for Medium-Low-Voltage Arc Fault in Short Gaps. Teoksessa *IEEE*

*Transactions on Industry Applications* 55 3. 2281–2289. Saatavissa:  
<https://www.doi.org/10.1109/TIA.2018.2886751> [viitattu 25.11.2022].

**EATON**

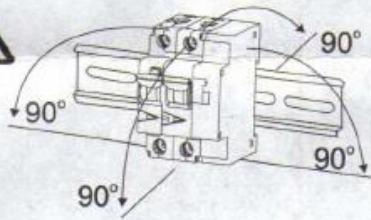
Powering Business Worldwide

Instruction Leaflet  
Montageanweisung  
Notice d'installation  
Instrucciones de montaje  
Istruzioni per il montaggio  
安装说明  
Инструкция по монтажу  
Montagehandleiding

Montagevejledning  
Οδηγίες εγκατάστασης  
Instruções de montagem  
Monteringsanvisning  
Asennusohje  
Návod k montáži  
Paigaldusjuhend  
Szerelési utasítás

Montāžas instrukcija  
Montavimo instrukcija  
Instrukcja montażu  
Navodila za montažo  
Návod na montáž  
Монтажни инструкции  
Instrucjiuni de montaj  
Upute za montažu

Kullanma Talimatı  
Инструкција за монтажу  
Instruksjonsblad  
Монтажна інструкція  
ثورة التعليمات

**AFDD+**

2 - 2,4Nm

1 - 25mm<sup>2</sup> Cu only2,5 - 25mm<sup>2</sup> Cu only

Twist!

