

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Tuomas Karri

VALOKAARISUOJAUSMENETELMIEN VERTAILU

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 11.02.2009

Työn valvoja

Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

Lauri Kumpulainen

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Vaasan Yliopiston Teknilliseen tiedekuntaan vaasalaisen suojareleitä valmistavan Vamp Oy:n ehdottamasta aiheesta.

Työni valvojana toimi professori Kimmo Kauhaniemi. Esitän kiitokset hänelle saamastani opastuksesta ja neuvoista työni aikana. Professori Erkki Antilalle kiitos työn asiantuntevasta tarkastuksesta. Erityinen kiitos työn mahdollistaneelle Vamp Oy:n tutkimuspäällikkö tekniikan lisensiaatti Lauri Kumpulaiselle ohjauksesta ja hyvästä yhteistyöstä. Lämpimät kiitokset myös Vamp Oy:n valokaarisuojauksen tuotepäällikkö Samuel Dahlille ja työtovereilleni arvokkaasta avusta työni eri vaiheissa.

Rakkaimmat kiitokset puolisololleni Tiinalle ja muille läheisille tuesta ja kannustuksesta opiskeluni aikana.

Vaasassa 10.02.2009

Tuomas Karri

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	6
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1. JOHDANTO	10
2. VALOKAARI KOJEISTOSSA	12
2.1. Valokaari-ilmiö	12
2.1.1. Valokaarityypit	12
2.1.2. Valokaaren syntyminen	13
2.2. Valokaaren ominaisuuksia	14
2.2.1. Resistanssi	14
2.2.2. Jännite ja virta	17
2.2.3. Sähkönjohtavuus	18
2.2.4. Muoto ja liikkuminen	19
2.3. Valokaaren haittavaikutukset	19
2.3.1. Lämpö	21
2.3.2. Energia	22
2.3.3. Paine	24
2.3.4. Säteily ja valo	26
2.3.5. Kaasut	27
2.3.6. Ääni	27
3. STANDARDIT	28

3.1. Standardisointiorganisaatiot	28
3.2. Valokaaristandardien historia	30
3.3. Käytössä olevat valokaaristandardit	31
3.3.1. NFPA 70E-2004	31
3.3.2. IEEE 1584	34
3.3.3. NEC artikla 110 kohta 110.16	38
3.3.4. NESC artikla 410.A.10	38
3.3.5. OSHA 1910	38
3.3.6. CSA-Z462	39
3.4. Kojelistojen valokaarikestoisuuden testaukseen liittyvät standardit	39
3.4.1. IEEE C37.20.7	40
3.4.2. CSA C22.2 nro.261	40
3.4.3. IEC 62271-200	40
4. VALOKAARISUOJAUSMENETELMÄT	41
4.1. Valokaaren kestävät kojeistot	42
4.2. Lukitussuojaus (ZSI)	46
4.3. Kiskon differentiaalisuojaus	50
4.4. Valoon perustuva suojaus	54
4.5. Paineeseen perustuva suojaus	58
4.6. Oikosulkulaite	58
4.7. Is-rajoitin	60
4.8. Virtaa rajoittavat sulakkeet	62
4.9. Virtaa rajoittavat kuristimet	65
5. SUOJAUSMENETELMIEN VERTAILU	67
5.1. Verkon rakenne	67
5.1.1. Verkon komponentit ja niiden tiedot	68

5.2. Laskelmat	71
5.2.1. Valokaarienergian määrittäminen	72
5.2.2. Laskujen suorittaminen ja tulosten määrittäminen	74
5.2.3. Laskentatulokset	76
5.2.4. Esimerkki sulakkeiden käytöstä	80
5.2.5. Yhteenvedo tuloksista	81
5.3. Excel-laskuri	85
5.3.1. Rakenne	85
5.3.2. Käyttö	88
5.3.3. Tuloksia Excel-laskurilla	89
6. YHTEENVETO	93
LÄHDELUETTELO	95

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Category	turvallisuusluokitus
C_f	järjestelmän jännitteestä riippuva kerroin
D	työskentelyetäisyys
D_B	turvaetäisyys
DB	turvaetäisyys
D_{ft}	etäisyys valokaaresta (ft)
D_m	etäisyys valokaaresta (m)
E	saapuva energia
E_B	energia turvaetäisyydellä
E_n	normalisoitu energia
E_{vap}	valokaaresta vapautuva energia
G	elektrodien välinen etäisyys
I_a	valokaarivirta
I_{bf}	prospektiivinen vikavirta
I_d	erovirta
$I_{k''}$	oikosulkuvirta
K	laitteiston kokoonpanosta riippuva kerroin
K_1	laitteiston kokoonpanosta riippuva kerroin
K_2	laitteiston kokoonpanosta riippuva kerroin
log	\log_{10}
P	paine
P_a	valokaaren teho
P_o	tyhjäkäyntihäviö
R_1	valokaaren resistanssi
R_2	valokaaren resistanssi
R_a	valokaaren resistanssi
S_o	suhteellinen tyhjäkäyntiteho

t	valokaaren palamisaika
U_a	valokaaren jännite
V	järjestelmän jännite
x	järjestelmän jännitteestä ja kokoonpanosta riippuva eksponenttitermi
Z_k	oikosulkuimpedanssi

ARS	Arc Resistant Switchgear
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CSA	Canadian Standards Association
EEMAC	Electrical Equipment Manufacturers Association of Canada
EFC	Electro-Federation Canada
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IR	Infrared
MCC	Motor Control Center
NFPA	National Fire Protection Association
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
RMS	Root Mean Square
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TUKES	Turvatekniikan keskus
TVL	Tapaturmavakuutuslaitosten liitto
UV	Ultraviolet
ZSI	Zone Selective Interlocking

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Tuomas Karri	
Diplomityön nimi:	Valokaarisuojausmenetelmien vertailu	
Valvojan nimi:	Professori Kimmo Kauhaniemi	
Ohjaajan nimi:	Tekn.lis. Lauri Kumpulainen	
Tarkastajan nimi:	Professori Erkki Antila	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Oppiaine:	Sähkötekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	1999	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2009	Sivumäärä: 101

TIIVISTELMÄ

Valokaari on sähköpurkaus, joka syntyy kahden elektrodin välille, kun elektrodien välinen eriste ei enää kestä vallitsevaa jännitetasoa. Yleisin syy oikosulkuvalokaarien syntymiselle on ihmisten tekemät käyttövirheet työskenneltäessä jännitteisien kojeistojen läheisyydessä.

Palaessaan valokaari aiheuttaa erilaisia haittavaikutuksia, joista suuri lämpötila ja sen aiheuttama paine tekevät vakavimpia tuhoja. Erilaiset haittavaikutukset ovat usein hengenvaarallisia ja niistä aiheutuvat materiaalityöt ja käyttökeskeytykset voivat aiheuttaa suuria kustannuksia.

Kasvanut tietoisuus valokaaren haitoista ja vaaroista on tuonut saataville erilaisia standardeja ja suojausratkaisuja. Standardit esittävät valokaaren vaarallisuuden määrittämiseksi tarvittavat energialaskut. Laskelmien avulla saatavalla energialla voidaan määrittää valokaaren turvaetäisyys ja valita tilanteeseen sopiva suojavarustus. Valokaaren aiheuttamia tuhoja voidaan pienentää erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla tai rajoittamalla palamisaikaa ja vikavirtaa.

Tässä työssä on tutkittu eri valokaarisuojausmenetelmien vaikutusta valokaaren energiaan ja turvaetäisyyteen. Työssä laskelmat ja tarkastelut on tehty käyttäen apuna Neplan-ohjelmalla mallinnettua verkkoa ja Excel-taulukkolaskentaohjelmalla toteutettua energialaskuria. Palamisaikojen osalta tulokset osoittavat oikosulkulaitteen olevan selvästi nopein suojausmenetelmä. Oikosulkulaitteella energia voidaan pienentää turvalliselle tasolle riippumatta vikavirran suuruudesta.

AVAINSANAT: Valokaari, suojaus, energia

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Tuomas Karri
Topic of the Thesis:	Comparing arc protection methods
Supervisor:	Professor Kimmo Kauhaniemi
Instructor:	Lic.Sc. (Tech.) Lauri Kumpulainen
Evaluator:	Professor Erkki Antila
Degree:	Master of Science in Technology
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	1999
Year of Completing the Thesis:	2009

Pages: 101

ABSTRACT

An arc flash is an electrical discharge that occurs between two electrodes when the insulation between them cannot sustain the prevailing voltage level. The most common cause of short circuit arcs is a human error while working in the vicinity of energized switchgear.

A burning arc has various side effects from which high temperature and pressure are the main reasons for the most serious damage. Side effects are often life-threatening and may also result in high costs due to material degradation and operational shutdowns.

Increased awareness of arc's drawbacks and risks has led to development of different kind of standards and protection solutions. The standards contain formulas to determine dangerousness of an arc flash by calculating the incident energy. The magnitude of the incident energy can be used to determine flash protection boundary and proper personal protective equipment. The damages caused by arcs can be reduced by structural solutions, limiting the burning time and limiting the short circuit current.

In this thesis it is studied how different kinds of arc protection methods affect the magnitude of incident energy and the flash protection boundary. Calculations and studies are made with an electric network modelled by the Neplan-program and also with an Excel-energy calculator. Arcing time results show that the short circuit device is clearly the fastest protection method. With short circuit device the energy can be reduced to a safe level regardless of the fault current magnitude.

KEYWORDS: Arc, protection, energy

1. JOHDANTO

Valokaari eli kahden elektrodin välinen sähköpurkaus on ilmiönä ollut tiedossa pitkään, mutta sen tarkka tunteminen on edelleen haastavaa. Valokaaren käyttäytymisen ennakoimista ja siihen liittyvien suureiden laskemista vaikeuttaa ilmiön nopeat ja epäsäännölliset muutokset valokaaren muodossa ja sähkövarausten konvektiossa.

Viime vuosina kasvanut tietoisuus valokaaren vaaroista ja haittavaikutuksista on vauhdittanut uusien ja entistä tehokkaampien suojausratkaisujen kehitystä. Uusien teknisten ratkaisujen lisäksi saatavilla on erilaisia valokaariin liittyviä standardeja. Standardit esittävät yhtälöt valokaaren energian laskemiseksi ja vaarallisuuden määrittämiseksi. Energialaskujen avulla voidaan laskea valokaaresta saapuvan energian määrä, jonka perusteella valitaan tilanteeseen sopiva suojavarustus.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia eri suojausmenetelmien vaikutus valokaaren energian suuruuteen ja sen määräämään turvaetäisyyteen. Energian suuruuden perusteella voidaan verrata eri suojausmenetelmiä keskenään ja arvioida niiden soveltuvuutta valokaarisuojaukseen. Eri menetelmien vertailussa otetaan energian lisäksi huomioon erilaiset käyttöä rajoittavat seikat. Energian suuruudet lasketaan käyttäen apuna Neplan-simulointiohjelmaa. Neplan on sveitsiläinen sähkön siirto-, jakelu- ja teollisuusverkkojen mallintamiseen tarkoitettu tietokoneohjelmisto. Neplan-ohjelmaan päädyttiin, koska se sisältää mahdollisuuden valokaaren energian laskemiseksi. Neplan-ohjelmasta oli myös helposti saatavilla työn laskelmiin riittävä demo-versio.

Luvussa 2 tarkastellaan valokaari-ilmiöön liittyviä ominaisuuksia ja käydään läpi valokaaren aiheuttamia haittavaikutuksia. Valokaaren ominaisuuksista kerrottaessa esitetään ilmiön fysikaalista taustaa ja joitain kaavoja valokaaren eri suureiden laskemiseksi. Luku 3 käsittelee valokaariin liittyviä standardeja. Pääpaino luvussa on energialaskujen määrittämiseen liittyvissä kohdissa. Luvussa 4 käydään läpi erilaisia valokaarisuojaukseen tarkoitettuja suojausratkaisuja. Siinä kuvataan eri ratkaisujen toiminta ja esitetään menetelmille ominaiset toimintanopeudet. Luvussa 5 käydään läpi laskelmissa käytetyn verkon mallintaminen ja verrataan edellisen kappaleen suojausmenetelmiä keskenään laske- malla jokaiselle menetelmälle IEEE-standardin mukaiset energialaskut. Luvun lopussa esitetään Excel-taulukkolaskentaohjelmalla toteutettu energia-laskuri ja annetaan ohjeita sen käyttöön. Laskurin tuloksia verrataan vielä simulointi- ohjelmalla saatuihin tuloksiin. Luvussa 6 on yhteenveto.

2. VALOKAARI KOJEISTOSSA

2.1. Valokaari-ilmio

Valokaarella tarkoitetaan ilmiötä, jossa virta kulkee kahden elektrodin välissä ionisoitunutta kaasua ja höyryä pitkin. Valokaari voi palaa stabiilina tai sammuttua itsestään, riippuen jännitteestä, ympäröivästä paineesta ja elektrodien välimatkasta.

2.1.1. Valokaarityypit

Valokaaret voidaan esiintymispaikan ja luonteen perusteella luokitella hyötyvalokaariin, häiriövalokaariin ja katkaisuvalokaariin. (Martikainen 1974.) Katkaisuvalokaaret ovat myös häiriövalokaaria, mutta ne esiintyvät valvotuissa olosuhteissa toimilaitteiden yhteydessä ja voidaan näin luokitella omaksi ryhmäkseen.

Valokaaria käytetään teollisuudessa hyväksi korkeita lämpötiloja vaativissa prosesseissa, kuten hitsauksessa ja sulatusuuneissa. Hyötyvalokaarille on ominaista niiden aikaansaaminen tarkoituksella ja hallittu palaminen valvotussa ympäristössä.

Haitallisia valokaaria esiintyy muun muassa teollisuudessa, kotitalouksissa ja luonnossa. Nämä häiriövalokaaret nimensä mukaisesti tuottavat häiriöitä ja erilaisia haittavaikutuksia palaessaan. Suurin osa häiriövalokaarista on vikatapauksien yhteydessä syntyviä oikosulkuvalokaaria. Oikosulkuvalokaaret voidaan pituuden perusteella jakaa karkeasti kahteen luokkaan, pitkiin (>10 cm) ja ly-

hyisiin (<10 cm). Luonnossa syntyvät salamet ja koronailmiöt ovat myös häiriövalokaaria ja niistä voikin koitua erittäin suuria tuhoja.

Kolmanneksi luokaksi voidaan erottaa katkaisuvalokaaret. Katkaisuvalokaaret tuottavat katkaisutilanteessa häiriöitä, mutta ne voidaan erottaa häiriövalokaarista katkaisutilanteessa tapahtuvan säännöllisen käyttäytymisen vuoksi. Katkaisutilanteessa syntyvä valokaari on ollut huolenaihe sähkön alkuajoista alkaen, koska virrallisen katkaisimen avaamisen yhteydessä syntyy aina valokaari. Tämän vuoksi katkaisuvalokaaria on tutkittu valokaarista selvästi eniten ja niiden käyttäytyminen tunnetaankin nykyään niin hyvin, ettei niistä juurikaan koidu haittoja tai ongelmia. Katkaisuvalokaarien tutkimista on helpottanut niiden säännöllisyys ja samankaltaisuus verrattuna esimerkiksi oikosulkuvalokaariin.

2.1.2. Valokaaren syntyminen

Valokaari syntyy tilanteessa, jossa kahden elektrodin välinen eriste ei enää kestä vallitsevaa jännitetasoa, vaan sähkö pääsee purkautumaan eristeaineen läpi. Oikosulkuvalokaari voi syttyä jostain tietystä syystä tai useamman syyn yhteisvaikutuksesta. Erinäisiä syitä läpilyönnille on olemassa monia ja seuraavassa listassa on eritelty näistä yleisimmät: (Martikainen 1974 & Neitzel 2007.)

- käyttövirheet
- eristysviat
- löysät liitokset
- vialliset laitteet/väärä toiminta
- maadoitusviat
- ylijännitteet
- lika

- korroosio
- eläimet.

Huollon, korjauksen tai koekäytön yhteydessä ihmisten tekemät käyttövirheet ovat erittäin yleisiä syitä kojeistoissa syntyneille valokaarille. Käyttövirheistä johtuvat viat ovat erityisen vaarallisia, koska työtä tekevä henkilö on usein vian läheisyydessä ja näin välittömästi alttiina valokaaren haittavaikutuksille. Käyttövirheen aiheuttaja on usein huolimattomuudesta johtuva väärään kennoon meneminen, väärän erottimen avaaminen tai jännitteisen tilan erheellinen toteaminen. Myös unohdus, kuten työmaadoituksen unohtaminen tai erilaiset laiminlyönnit voivat olla vian aiheuttaja.

Viallisen laitteen tai koneen virheellisen toiminnan voi aiheuttaa muun muassa materiaalien huono laatu tai koneen ja sen osien huolimattomat asennukset. Tarkastuksista ja erinäisistä vaatimuksista huolimatta laitteet voivat olla valmiiksi vahingoittuneita tai vahingoittua esimerkiksi kuljetuksen aikana.

2.2. Valokaaren ominaisuuksia

Valokaareen ja sen muodostumiseen vaikuttavat monet eri ominaisuudet ja tästä syystä sen käyttäytymistä on vaikea ennustaa ja arvioida tarkasti. Valokaari-ilmion ennustamista vaikeuttaa myös näiden ominaisuuksien suuri muutosnopeus ja luonteelle ominainen epäsäännöllinen kehittyminen.

2.2.1. Resistanssi

Valokaarella on aina jokin resistanssi. Karkeasti arvioituna valokaaren resistanssi vaihtelee välillä 0,0001–0,5 Ω , riippuen käytettävästä kojeistosta tai keskuksista. Yli 100 A:n virralla palavan valokaaren vastus on käytännössä pelkäs-

tään resistanssia ja vastuksen vaikutus induktiiviseen kokonaisimpedanssiin on vähäinen. Keskijännitekojeistoissa valokaari ei merkittävästi pienennä oikosulkuvirtaa, koska valokaaren resistanssi on pieni verrattuna muihin oikosulkupiirin impedansseihin. Kennokeskuksilla pienentävä vaikutus voi kuitenkin olla huomattava. (Martikainen 1974.)

Valokaaren resistanssin arvioiminen ja laskeminen oikosulkuvirtaa pienentävänä tekijänä on tullut tarpeelliseksi vasta uusien sovellusten vuoksi. Nykyään valokaaren resistanssin laskemista hyödynnetään muun muassa vian paikannuksessa. Valokaaren resistanssi tuo vikapaikan määrittämiseen virhettä, joka on otettava huomioon tarkan sijainnin saamiseksi. (Terzija & Kogling 2004). Valokaaren resistanssi voidaan helposti laskea tunnetun Warringtonin kaavan avulla (Areva 2005):

$$R_a = \frac{28710}{I_a^{1,4}} G, \quad (1)$$

jossa

I_a = valokaarivirta

G = elektrodien välinen etäisyys

R_a = valokaaren resistanssi.

Warringtonin kaavan on kuitenkin todettu antavan oikeita resistanssin arvoja vain rajoitetulla vikavirta-alueella vastatakseen nykypäivän tarvetta. Kaava antaa oikean tuloksen alle 1 kA vikavirroilla, kun taas nykypäivänä vikavirrat voivat helposti olla yli 50 kA suuruisia (Terzija ym. 2004).

Vladimir Terzija ja Hans-Jürgen Koglin esittävät vuonna 2004 julkaisemassaan artikkelissa uudet kaavat valokaaren resistanssin laskemiseksi. Uudet kaavat perustuvat laboratoriotesteissä mitattuihin arvoihin ja antavat oikean tuloksen laajemmalla vikavirta-alueella, kuin edellä mainittu Warringtonin kaava.

Jotta valokaaren resistanssi voidaan laskea uusilla kaavoilla, tarvitaan jännitegradientin arvo. Jännitegradientin suuruus riippuu tarkasteltavasta lähteestä ja tämän vuoksi resistanssin laskemiseksi on saatu kaksi toisistaan poikkeavaa kaavaa. Ensimmäisessä kaavassa resistanssi lasketaan gradientin arvon ollessa 1200 V/m–1500 V/m välisellä alueella. Usean eri lähteen tiedot yhdistämällä on saatu jännitegradientin keskimääräiseksi suuruudeksi kyseinen väli, kun virran suuruus on 100 A–20 kA. Yhtälö voidaan kirjoittaa muodossa:

$$R_1 = \begin{cases} 1080,4 \cdot \frac{G}{I_a}, E_a = 1200 \\ 1350,5 \cdot \frac{G}{I_a}, E_a = 1500 \end{cases} . \quad (2)$$

Kaavassa elektrodivälin ja virran suhde kerrotaan vakiolla, jonka suuruuteen vaikuttaa käytetty jännitegradientti. Pienemmällä 1200 V/m gradientin arvolla vakioksi saadaan 1080,4 ja suuremmalla 1500 V/m arvolla vakioksi saadaan 1350,5.

Toinen kaava valokaaren resistanssin laskemiseksi saadaan, kun jännitegradientille käytetään virran suuruudesta riippuvaa kaavaa $E_a=950+5000/I$:

$$R_2 = \left(\frac{855,3}{I_a} + \frac{4501,6}{I_a^2} \right) \cdot L . \quad (3)$$

Uudet kaavat (2) ja (3) ovat testien avulla todistettu yksinkertaista Warringtonin kaavaa tarkemmiksi. Varsinkin suurilla vikavirroilla Warringtonin kaava antaa resistanssille todellista arvoa pienemmän arvion.

2.2.2. Jännite ja virta

Valokaaripurkauksen johdosta elektrodien välinen jännite romahtaa ja virta asettuu arvoon, joka määräytyy valokaarta syöttävän piirin impedanssista (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003).

Valokaaren jännite on suoraan verrannollinen valokaaren pituuteen. Lähes vakiona pysyvän pituuden vuoksi lyhyillä valokaarilla (<10 cm) jännite vaihtelee vähän ja valokaaren pituutena voidaan pitää elektrodivälin etäisyyttä. Pitkillä valokaarilla (>10 cm) pituus on karkeasti 2–3-kertainen elektrodiväliin verrattuna (Martikainen 1974).

Valokaarien yhteydessä varsinkin standardien laskukaavoissa tulee esille usein termi prospektiivinen vikavirta (bolted fault current). Prospektiivisella vikavirralla tarkoitetaan valokaaren suurinta mahdollista vikavirtaa, eli tilannetta, jossa vian resistanssi on nolla ja kaikki virta pääsee kulkemaan esteettä.

Virran ja jännitteen arvoja voidaan laskea Ohmin lailla:

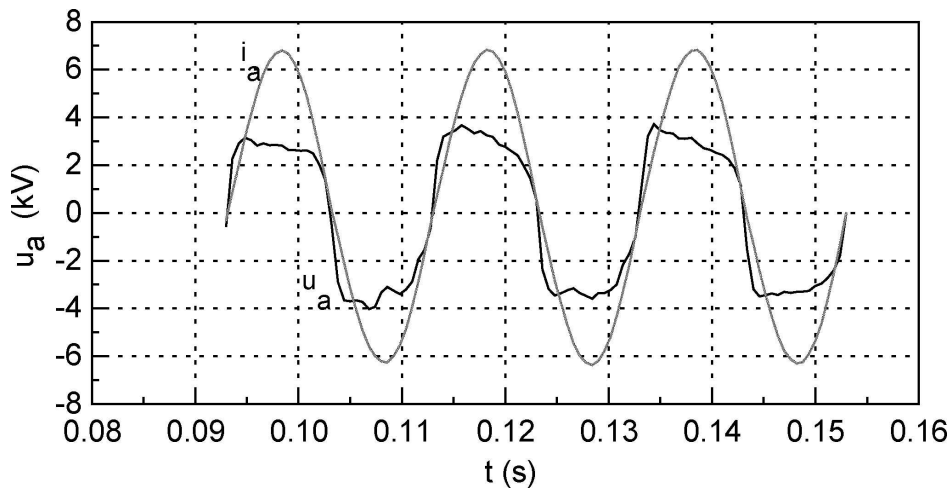
$$U_a = R_a \cdot I_a, \quad (4)$$

jossa

U_a = valokaaren jännite.

Oikosulun syttyessä valokaaren virta ja jännite ovat sinimuotoisia, mutta myöhemmin jännite muuttuu enemmän suorakaideaaltao muistuttavaksi. Seuraa-

vassa kuvassa on näkyvissä testitilanteissa mitatut virran ja jännitteen käyrämuodot noin 93–153 ms:a valokaaren syttymishetken jälkeen. Kuvassa käyrämuodot ovat samanvaiheisia, eli valokaaren vastus on käytännössä puhdasta resistanssia. (Terzija ym. 2004.)



Kuva 1. Testeissä mitatut virran I_a ja jännitteen U_a käyrämuodot (Terzija ym. 2004).

2.2.3. Sähkönjohtavuus

Valokaaren korkea lämpötila aiheuttaa valokaarella tapahtuvaa dissosioitumista eli kaasumolekyyliden hajoamista atomeiksi. Atomit voivat edelleen hajota positiivisiksi ioneiksi ja negatiivisiksi elektroneiksi ja muodostaa yhdessä neutraalien hiukkasten kanssa termistä plasmaa. Dissosioitumisasteen nouseminen kasvattaa ionisoitumisastetta, joka taas vaikuttaa suoraan varauksenkuljettajien määrään ja sähkönjohtavuuteen. Valokaari johtaa sähköä sitä paremmin, mitä suurempi on ionisoitumisasteen suuruus. Koska lämpötilan nousu kasvattaa ionisoitumisastetta, kasvattaa se näin myös sähkönjohtavuutta. Huoneen lämmössä dissosioitumisaste on pieni ja sen suureneminen on voimakkainta 10000–

20000 °C välissä. Paineen vaikutus sähkönjohtavuuteen on päinvastainen, eli paineen noustessa pienenee sähkönjohtavuus. (Martikainen 1974.)

2.2.4. Muoto ja liikkuminen

Valokaaren muoto ja pituus muuttuvat jatkuvasti. Valokaaren muotoon vaikuttaa termisen nostovoima. Termisen nostovoiman aiheuttama muutos valokaaren muodossa johtuu lämpötilaeroista. Lämpötilaltaan suurempi ydin pyrkii nousemaan viileämpiä reunoja voimakkaammin aiheuttaen näin kaarevan muodon. Nousevan ilman tilalle virtaava korvaava ilma, eli konvektiovoima aiheuttaa valokaareen myös nostavan voiman.

Valokaari voi liikkua ja sen paikka muuttua riippuen vaikuttavista voimista ja syttymispaikasta. Vaakasuorassa kiskostossa liikkuva valokaari liikkuu aina energian kulkusuuntaan kulkevan sähködynaamisen voiman suuntaan. Pystysuorassa kiskostossa kulkusuunta riippuu termisen nostovoiman, konvektiovoiman ja sähködynaamisen voiman suuruuksista ja suunnista suhteessa toisiinsa. Valokaari voi liikkua energian kulkusuuntaa vastaan, jos termisen nostovoiman ja konvektiovoiman yhteen laskettu suuruus ylittää vastakkaiseen suuntaan (alas) vaikuttavan sähködynaamisen voiman suuruuden. (Martikainen 1974.)

2.3. Valokaaren haittavaikutukset

Haitallisista valokaarista suurin osa syttyy kojeistoissa. Kojeston rakenteista riippuen valokaaret voivat syntyä eri tavalla ja eri osaan kojeistoa. Valokaari voi syttyä vaiheiden välille tai vaiheen/vaiheiden ja kojeiston rakenteiden välille.

Kaksi tahoa, Turvatekniikan keskus (TUKES) ja Tapaturmavakuutuslaitosten liitto (TVL) pitävät lukua Suomessa tapahtuneista valokaarionnettomuuksista. TUKES:n mukaan Suomessa sattui vuonna 2006 yhteensä 56 sähkötapaturmaa, joista 14 oli valokaarionnettomuuksia. Suurin osa näistä (9) sattui ammattia harjoittaneelle ammattilaiselle. Suuresta lämpötilasta ja paineesta johtuen palava valokaari aiheuttaa usein vakavia ruhjeita ja palovammoja. Valokaarionnettomuudesta seuraakin usein pitkäaikainen sairausloma.

Seuraavassa taulukossa on Suomessa sattuneet valokaarionnettomuudet vuodesta 1997 vuoteen 2006 asti. Taulukossa on molempien TUKES:in ja TVL:n tietoon tulleet valokaarionnettomuudet. Eri tahojen luvut eroavat hieman toisistaan, koska onnettomuuden vakavuus vaikuttaa tiedon kulkeutumiseen eri tahoille. TUKES:in tietoon tulleet onnettomuudet ovat pääasiassa vakavia onnettomuuksia ja TVL:n tietokannassa on raportoitu myös pienemmät onnettomuudet.

Taulukko 1. Valokaarionnettomuudet Suomessa (Heinsalmi & Mattila 2007).

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Tukes/ammattilaiset	10	17	9	14	5	12	5	13	7	9
Tukes/maallikot	2	3	7	4	2	0	1	2	5	5
Tukes/yhteensä	12	20	16	18	7	12	6	15	12	14
TVL							22	25	18	

Vastaavasti Yhdysvalloissa sattuu vuosittain 30 000 valokaaritapaturmaa, joista 2 000 on vakavia onnettomuuksia. Arvioiden mukaan Yhdysvalloissa valokaarionnettomuuksista johtuvia kuolemantapauksia sattuu keskimäärin yhdestä kahteen joka päivä. (Phillips & Frain 2007.) Toisaalta yhdysvalloissa sattuneista loukkaantumisista ja kuolemista on lähteestä riippuen eriäviä arvioita. NFPA 70E-2004 standardin mukaan vuonna 2003 yhdysvalloissa sattui 350 sähkötapa-

turmaa, joista noin 175 oli valokaaren aiheuttamia (National Fire Protection Association 2004).

Erään tilaston (ABB 2007) mukaan selvästi suurin osa, eli 75 % kojeistoissa syntyvistä valokaarionnettomuuksista saa alkunsa ihmisen tekemästä käyttövirheestä. Käyttövirheistä johtuvat onnettomuudet ovat erityisen vaarallisia, koska palavan valokaaren välittömässä läheisyydessä on usein ihminen/ihmisiä, joihin erilaiset haittavaikutukset voivat vaikuttaa. Valokaaren aiheuttamat erilaiset haittavaikutukset ovat usein hengenvaarallisia. Haittavaikutukset onkin otettava tarkasti huomioon muun muassa suunnittelussa ja työn aikana työkenneltäessä jännitteisien kojeistojen läheisyydessä. Henkilövahinkojen lisäksi valokaari voi aiheuttaa suuria rahallisia tappioita kalliiden kojeistojen ja osien tuhouduttua tai käyttökeskeytyksistä johtuvista kustannuksista.

2.3.1. Lämpö

Valokaaren aiheuttamista vahingoista suurin osa johtuu tilastojen mukaan lämpötilan aiheuttamista palovammoista (IEEE 2002). Valokaaren tuottama lämpö muuttaa höyryksi kaikki tunnetut aineet ja valokaaren ytimessä lämpötila voi saavuttaa jopa 20 000 °C suuruuden. Kuumimmillaan valokaaren lämpötila voi siis olla esimerkiksi nelinkertainen auringon pinnan (n. 5 000 °C) lämpötilaan ja noin 18,4-kertainen kuparin sulamispisteeseen (1 084,62 °C) verrattuna.

Lämpötilan aiheuttamat palovammat ovat suoraan verrannollisia valokaaren palamisaikaan ja lämpötilan suuruuteen. Seuraavassa taulukossa on joitain ihon lämpötilan ja altistumisajan aiheuttamia seurauksia.

Taulukko 2. Lämpötilan ja altistumisajan vaikutus ihoon (Lee 1982).

Ihon lämpötila	Kesto	Vaikutus
43 °C	6 h	Solujen hajoaminen alkaa
70 °C	1 s	Täydellinen solujen tuhoutuminen
80 °C	0,1 s	Parannettavissa oleva palovamma
96 °C	0,1 s	Ei parannettavissa oleva palovamma

Lämpösäteilyn lisäksi paineen vaikutuksesta sinkoutuvat sulaneet ja kuumat metallin palat voivat aiheuttaa vakavia palovammoja. Kuumentunut ilma ja kuumat sulaneet metallin palat voivat sytyttää vaatteita palamaan vaikka suora kontaktia valokaaren ei olisi. Valokaaren aiheuttamat palovammat voivat olla vakavia ja hengelle vaarallisia vielä usean metrin päässä itse palavasta valokaaresta (Martikainen 1974). Seuraavissa kuvissa on valokaaren aiheuttamia palovammoja.

**Kuva 2.** Valokaaren aiheuttamia palovammoja (Davis ym. 2003).

Oikeanpuoleisessa kuvassa pahimmat palovammat ovat aiheutuneet palaneista vaatteista, eikä itse valokaaren tuottamasta lämmöstä.

2.3.2. Energia

Valokaaren suurin mahdollinen teho on puolet kolmevaiheisen vian prospektiivisestä eli suurimmasta mahdollisesta näennäistehosta. Tämä maksimaalinen

tehon arvo esiintyy tilanteessa, jossa valokaaren virta on 70,7 % prospektiivisesta vikavirrasta (Davis, Pierre, Castor, Luo & Shrestha 2003). Teho voidaan laskea kaavalla:

$$P_a = U_a \cdot I_a . \quad (5)$$

Valokaaren teho vaikuttaa yhdessä palamisajan kanssa suoraan vapautuvan energian suuruuteen. Vapautuvan kokonaisenergian suuruus voidaan laskea kaavalla:

$$E_{\text{vap}} = P_a \cdot t_a . \quad (6)$$

Kokonaisenergian voidaan ajatella kuluvan moniin eri osa-alueisiin, kuten ilman lämmittämiseen, seinien ja rakenteiden lämmittämiseen, metallien sulattamiseen, eri materiaalien höyryttämiseen ja säteilyn sisältämään energiaan. Osa-alueiden tarkkoja suhteita on vaikea laskea ja arvioida tarkasti, mutta suurin osa (50-60 % riippuen elektrodimateriaalista) kokonaisenergiasta kuluu ilman lämmittämiseen (Aura & Tonteri 1993).

Syttyvän valokaaren läheisyydessä työskentelevän henkilön turvallisuuden kannalta on olennaista tietää iholle saapuvan energian määrä. Energian avulla voidaan muun muassa arvioida valokaaren vaarallisuutta ja tarvittavien suojavaarusteiden laatua ja määrää. Standardit (kappale 3) määrittävät iholle saapuvan energian laskemiseksi tarvittavat kaavat, joissa energian yksikkönä käytetään joko cal/cm² tai J/cm². Muunnos yksikköjen välillä voidaan laskea kertomien avulla:

$$1 \text{ cal/cm}^2 = 4,184 \text{ J/cm}^2 . \quad (7)$$

Energian suuruus ilmoittaa suoraan valokaaren voimakkuuden ja vaarallisuuden. Saapuvan energian määrä on ihmiselle turvallisella tasolla, kun se alittaa arvon $1,2 \text{ cal/cm}^2$. Tämä raja-arvo on energian suuruus, joka tuottaa toisen asteen palovamman ja on näin vielä parannettavissa. (IEEE 2002.)

2.3.3. Paine

Valokaaren lämpötila nostaa nopeasti ympäröivän ilman lämpötilaa, jonka vaikutuksesta ilma laajenee. Laajeneva ilma aiheuttaa kojeistoon nopean paineen nousun. Paineen nousuun toinen merkittävästi vaikuttava tekijä on kiskojen höyrystyminen. Ilman tilavuus laajenee lämmitessään noin 1 670-kertaiseksi ja esimerkiksi kuparista valmistettujen kiskojen tilavuus laajenee höyrystyessään noin 67 000-kertaiseksi. (Lee 1987.) Ainoastaan 15 cm^2 :n suuruinen kupari riittäisi siis synnyttämään 1 m^2 :n kaasua.

Kun suljetun kojeiston rakenteet eivät enää pysty kestäämään nousevan paineen tuottamaa rasitusta, purkautuu paine kojeiston heikoimmasta kohdasta. Paineen purkautumisesta aiheutuva paineaalto voi aiheuttaa lähellä olevalle henkilölle vakavia vammoja. Voimakas paineaalto voi aiheuttaa muun muassa fyysisiä vammoja ja muistin menetystä. Paineaallon lisäksi vaaraa voi aiheuttaa suuren purkausenergian vuoksi kojeistosta irronneet lentävät metallin palat.

Paineaallon voimakas työntövoima voi lennättää valokaaren lähellä olevan henkilön hyvinkin kauas kojeistosta. Eräs 480 V systeemissä 42 kA valokaarivirralla palanut valokaari aiheutti onnettomuuden, jossa työntekijä sinkoutui 7,6 metrin päähän valokaaresta. Esimerkiksi tikkailla työskentelevä henkilö voi myös saada vakavia vammoja tipahtaessaan korkealta paineen aiheuttaman työntövoiman vaikutuksesta. Valokaaren paineaalto voi myös erottaa työnteki-

jän valokaaresta ja joissain tapauksissa estää vakavat palovammat. (Davis ym. 2003.)

Valokaaren paineaallon tuottama voimakas työntövoima on otettava huomioon kojeistojen rakenteiden lisäksi myös rakennuksien rakenteita suunniteltaessa. Erään mittauksen mukaan jännitteeltään 10 kV systeemissä 100 kA valokaarivirralla palanut valokaari aiheutti metrin päässä sijaitsevaan mittausanturiin 19 000 Pa paineen. Tämä ylittää kymmenkertaisesti sen arvon, jota normaalisti rakennusten seinät suunnitellaan tuulen vuoksi kestäväksi. Perinteisen seinän kyseinen valokaari olisi helposti pystynyt tuhoamaan vielä 12 metrin päästä. (Lee 1987.)

Kojeistossa syntyvän paineen suuruuteen ja kasvunopeuteen vaikuttaa monia asioita, kuten kojeiston rakenne, käytetyt materiaalit ja palavan valokaaren ominaisuudet. Paineen suuruuden tarkka laskeminen onkin hankalaa erilaisten kokoonpanojen ja tilanteiden vuoksi. Seuraavalla kaavalla voidaan arvioida paineen suuruutta halutulla etäisyydellä valokaaresta (Lee 1987):

$$P = \frac{11,58 \cdot I_a}{D_{ft}^{0,9}}, \quad (8)$$

jossa

P = paine (lb/ft²)

I_a = valokaarivirta (kA)

D_{ft} = etäisyys valokaaresta (ft).

Jos tulos halutaan muuttaa SI-yksikön paineeksi (Pascal), voidaan käyttää muunnoskaavaa:

$$1 \text{ lb/ft}^2 = 47,88 \text{ N/m}^2 = 47,88 \text{ Pa} \quad (9)$$

Etäisyys voidaan syöttää kaavaan suoraan metreinä, kun yhtälö on saatettu muotoon:

$$P = \frac{554,45 \cdot I_a}{(D_m \cdot 3,28)^{0,9}} \quad (10)$$

jossa

P = paine (Pa)

D_m = etäisyys valokaaresta (m).

2.3.4. Säteily ja valo

Valokaari tuottaa palaessaan suuren määrän valoa. Valokaarionnettomuuden aiheuttama säteily aiheuttaa harvoin vakavia vammoja, mutta se on otettava huomioon turvallisuutta vaarantavana tekijänä. Kirkas näkyvä valo voi aiheuttaa väliaikaisen näön menetyksen tai shokkitilan. Pahimmillaan valo voi aiheuttaa näön lopullisen menettämisen. Lisäksi valokaari säteilee ihmissilmille näkymätöntä ultravioletti (UV)- ja infrapunasäteilyä (IR). Aallonpituudeltaan näkyvää valoa lyhyempi UV-säteily on erityisen vaarallista silmien verkkokalvoille ja voi suurina annoksina pahimmillaan vaikuttaa pysyvästi näkökykyyn. Muita väliaikaisia oireita ovat muun muassa kivut silmissä, sumentunut näkö ja pääkivut. Näkyvään valoon verrattuna aallonpituudeltaan suurempi IR-säteily, eli lämpösäteily voi aiheuttaa muutoksia ihoon ja silmien mykiöihin.

Ihmiselle vaarallisen säteilyn raja on noin 25 W/cm^2 (Martikainen 1975) ja se vastaa säteilyä, jonka vaikutuksesta iho lämpenee yhden sekunnin aikana $25 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $50 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Maapallolle saapuvan auringon säteilyn keskimääräinen säteilyteho on ilmakehän aiheuttaman suodatuksen jälkeen maan pinnalla $0,08 \text{ W/cm}^2$ (Aura ym. 1993). Tämä on noin 312 kertaa pienempi kuin ihmiselle vaarallisen säteilyvoimakkuuden taso.

2.3.5. Kaasut

Palamisprosessissa valokaari ja palavat materiaalit muodostavat yhdisteitä, jotka voivat olla vaarallisia hengitettynä. Palamistuotteiden lisäksi höyrystyneet aineet kuten erilaisista metalleista muodostuneet kaasut voivat olla hengenvaarallisia. Kojeistossa työskentelevien henkilöiden turvallisuuden vuoksi onkin tärkeää ohjata kaasut purkausluukuilla pois työskentelytilasta.

2.3.6. Ääni

Valokaaren aiheuttamasta paineen purkautumisesta syntyvät suuret äänet voivat aiheuttaa kuulovaurioita. Kuulovauriot ovat ikäviä, koska vahingoittunutta kuuloelintä ei voi hoitokeinoin parantaa entiselleen. Ihmisen kuuloelinten kipukynnys on noin $115\text{--}125 \text{ dB}$ ja yksittäisistä pulsseista pitäisi ehdottomasti välttää 140 dB suuruista äänenvoimakkuutta (Saari 2006). Valokaari voi aiheuttaa tuon 140 dB äänen voimakkuuden kahden metrin päässä, joten valokaaren syttymispaikkaa lähellä oleva henkilö voi saada vakavia kuulovaurioita ilman asianmukaista suojaruustusta (Davis ym. 2003). Valokaaren tuottama ääni voi olla esimerkiksi iletulitteen (130 dB) tai suihkukoneen (120 dB) aiheuttamaa ääntä selvästi voimakkaampi (Saari 2006).

3. STANDARDIT

Valokaarien turvallisuus ja niihin liittyvät riskit ovat suuria huolenaiheita niin kemian- ja öljyteollisuudessa kuin sähkönjakeluautomaatiossakin. Viimevuosina nopeasti lisääntynyt tarve turvallisuuden parantamiseksi on tuonut saataville suuren määrän erilaisia tuotteita ja ratkaisuja sekä näihin liittyviä standardeja. Ongelmana on kuitenkin se, että standardeja on saatavana kattavuudeltaan pieneltä alueelta, ja nekin ovat hajaantuneet eri tahojen julkaisemiksi. Standardit eivät siis kata kaikkia tilanteita ja suunnittelijan on valittava itse käytettävä standardi näiden paremmuuden ja kyseiseen tilanteeseen soveltuvuuden perusteella. (Swencki, Burns, Smith, Wetzel, Roybal & Mohla 2007.)

3.1. Standardisointiorganisaatiot

Valokaariin liittyviä standardeja julkaisevia organisaatiota ovat muun muassa seuraavat:

- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- NFPA (National Fire Protection Association)
- CSA (Canadian Standards Association)
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration)
- EEMAC (Electrical Equipment Manufacturers Association of Canada)
- IEC (International Electrotechnical Commission)
- CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)

Tärkeimmät valokaaren turvallisuuteen liittyvät standardit julkaisee edellä mainituista IEEE ja NFPA. IEEE on kansainvälinen maailman suurin tekniikan alan järjestö, joka tuottaa suuren määrän erilaisia julkaisuja. IEEE:n tutkimusalueet ovat laajentuneet niin paljon sähkötekniikan ulkopuolelle, että järjestön pitkää nimeä ei enää suositella käytettävän. NFPA on yhdysvaltalainen paloturvallisuusjärjestö joka tuottaa tulipaloihin liittyviä standardeja palojen ehkäisemiseksi ja turvallisuuden edistämiseksi palotilanteissa.

CSA on kanadalainen standardointijärjestö, jonka tarkoituksena on palvella niin yrityksiä, hallitusta kuin yksityisiä kuluttajiaakin. Toinen kanadalainen standardeja julkaiseva organisaatio on EEMAC, joka on yksi kuudesta Kanadan sähköliiton (Electro-Federation Canada, EFC) alaisesta neuvostosta.

OSHA on amerikkalainen työministeriön virasto, jonka tarkoituksena on ehkäistä työstä johtuvia loukkaantumisia, sairastumisia ja kuolemia.

IEEE:n lisäksi toinen kansainvälinen standardeja julkaiseva taho on sähköalan standardisointiorganisaatio IEC. IEC:n jäsenet koostuvat kansallisista järjestöistä ja sen tarkoituksena on tuottaa maailmanlaajuisesti yhteneväisiä standardeja sähkön, elektroniikan ja tekniikan aloille.

CENELEC on Belgian lakien alaisena Euroopassa toimiva sähköalan standardisointijärjestö. Järjestö perustettiin vuonna 1973 tarkoituksena luoda Euroopan markkina-alueelle yhteneväiset standardit maiden rajojen ulkopuolisen kaupankäynnin helpottamiseksi ja niistä syntyvien kustannusten pienentämiseksi.

Suomen Standardisointiliitto (SFS) mainitsee valokaaret sähköturvallisuutta käsittelevissä standardeissa, mutta ei ole julkaissut kojeistovalokaariin liittyvää erillistä standardia.

3.2. Valokaaristandardien historia

Liitteessä 1 on nähtävissä valokaaristandardien historiallinen kehitys valokaaren ensimmäisistä tutkimuksista vuoteen 2006 asti. 29 joulukuuta vuonna 1970 OSH-säädös hyväksyttiin Yhdysvaltojen lakiin presidentti Richard Nixonin alikirjoittamana. Säädös sisälsi vaatimukset työpaikan ja työntekijöiden varustamisesta onnettomuusuhkan varalle. Kehittäessään säädöksiä OSHA käytti apuna NEC:a. NEC ei sisältänyt tarkempia ohjeita työntekijöiden turvallisuudesta, joten uusien standardien tarpeellisuuden vuoksi perustettiin komitea sähköstandardien kehittämiseksi. Komitea julkaisi ensimmäisen painoksen NFPA 70E:sta (sähköturvallisuusvaatimukset työntekijälle) vuonna 1979. Seuraavat painokset 1980-luvulla lisäsivät alkuperäiseen painokseen turvallisuuden liittyviä seikkoja, työhön perehdyttämisestä ja huoltovaatimuksista. Vuonna 1995 valmistunut viides painos oli ensimmäinen painos, joka sisälsi standardit valokaaren turvallisuudesta. Standardit sisälsivät vaatimukset turvavarusteista ja määrittelivät turvaetäisyyden. 2000-luvulla valmistuneet kaksi painosta tarkentavat vuoden 1995 painoksen standardeja ja määrittelevät valokaarienergiälaskut. Tällä hetkellä viimeisin ja voimassaoleva painos NFPA 70E-2004 Standard for Electrical Safety in the Workplace (sähköturvallisuusstandardi työpaikalla) (NFPA 2004) sisältää esimerkkejä laskuista ja turvaetäisyyksistä. NEC alkoi vuonna 2002 vaatia työpaikoille merkintöjä valokaareen liittyvistä turvallisuusriskeistä ja uhista. Samana vuonna IEEE julkaisi standardin IEEE 1584-2002 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations (Opas valokaarilaskelmien toteuttamiseksi) (IEEE 2002). (Ammerman, Sen & Nelson 2007.)

3.3. Käytössä olevat valokaaristandardit

Varsinaisia valokaaristandardeja on saatavilla hyvin vähän ja ne käsittelevät pääasiassa valokaarien turvallisuuteen liittyviä seikkoja, kuten energialaskuja, työpaikan opastuksia ja ohjeistuksia työn tekemiseen. NFPA, IEEE, the NEC, NESC ja OSHA määrittävät standardit valokaaren vaarallisuuteen liittyvistä vaatimuksista. Organisaatioista IEEE ja NFPA ovat julkaisseet standardit valokaarienergian laskemiseksi. Tahojen julkaisemat ohjeet energian laskemiseksi eroavat selvästi toisistaan laskuperiaatteiden osalta. Euroopassa ei tämän työn kirjoittamishetkellä ole omaa standardia energian laskemiseksi.

3.3.1. NFPA 70E-2004

NFPA 70E standardi on Amerikassa hyväksytty ja käytössä oleva kansallinen standardi. Standardi määrittää sähköturvallisuuteen liittyviä seikkoja, kun työskennellään jännitteisillä kojeistoilla tai niiden lähellä. Tällä hetkellä käytössä on vuonna 2004 julkaistu seitsemäs painos. Seitsemännessä painoksessa energialaskut on siirretty erilliseksi liitteeksi (liite D). Standardi koostuu kolmestatoista liitteestä ja seuraavista neljästä kappaleesta (National Fire Protection Association 2004.):

Kappale 1: Turvallisuuspainotteinen työhön perehdytys

Kappale 2: Turvallisuuspainotteinen kunnossapitoon perehdytys

Kappale 3: Turvallisuusvaatimukset erityiskojeistoille

Kappale 4: Turvallisuusvaatimukset asennuksissa.

Ensimmäinen kappale on standardin eniten sovellettu kokonaisuus. Valokaaren kannalta tärkeitä asioita sisältävät kohdat ovat 100, 110, 120 ja 130. Kohta 100 sisältää standardin ymmärtämiseksi tarvittavien asioiden ja sanojen selitykset. Kohta 110 sisältää opastukseen liittyviä asioita, kuten miten harjoittaa työntekijöitä ja kenen vastuulla on harjoituksen järjestäminen. Kohta 120 määrittää kuumavaiheisen menetelmän turvallisten työskentelyolosuhteiden luomiseksi. Vaiheet ovat:

1. määritä kaikki mahdolliset energialähteet
2. kuorman poiskytkemisen jälkeen aukaise kaikki piirin erottimet
3. totea visuaalisesti erottimien asento kaikissa tapauksissa, joissa se on mahdollista
4. lisää huolto- ja korjaustyön lukituslaitteet osaksi turvasuunnitelmaa
5. testaa ja totea jännitteettömyys kohdassa, jossa on kosketuskontaktin mahdollisuus
6. maadoita vaihejohtimet, jos niissä on indusoituvan jännitteen mahdollisuus.

Jännitteisillä kojeistoilla työskentely on määritelty kohdassa 130. Tämä kohta sisältää valokaarien kannalta tärkeitä asioita ja vaatimuksia, kuten turvaetäisyydet ja tarvittavat suojarusteet. Standardin mukaan työskentelytilat tulee luoda turvalliseksi kohdan 120 mukaan kahta poikkeustapausta lukuun ottamatta. Työskentely jännitteisillä kojeistoilla on mahdollista, jos työntekijä voi osoittaa, että jännitteiden poistaminen lisää tai kasvattaa vaaran mahdollisuutta tai jännitteiden poistaminen ei ole mahdollista laitteiston ominaisuuksien vuoksi. (National Fire Protection Association 2004.)

Toinen kappale koskee huoltotoimenpiteitä, niiden valtuuksia ja harjoituksen vastuun jakautumista. Kappaleessa on myös vaatimuksia järjestelmän uudelleen analysoimiseksi, kun vikavirtojen suuruus on kasvanut esimerkiksi uusien laitteiden tai osien vuoksi. Kappaleessa kolme kerrotaan vaatimuksista, jos kojeistoissa on käytössä erikoisempia sovelluksia, kuten esimerkiksi akkuja ja laseria. (National Fire Protection Association 2004.)

NFPA 70E määrittää turvaetäisyyden ja energian laskemiseen tarvittavat kaavat maksimitohon avulla, joten tuloksena saadaan todellisuutta hieman suuremmat arvot. Turvaetäisyyden laskemiseksi käytetään kaavaa:

$$D_b = \sqrt{2,65 \cdot 1,732 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t}, \quad (11)$$

jossa

D_B = turvaetäisyys (in)

V = järjestelmän jännite (kV)

I_{bf} = prospektiivinen vikavirta (kA)

t = valokaaren palamisaika (s).

Energian suuruus voidaan laskea avonaisessa ja suljetussa tilassa palavalle valokaarelle. Molemmissa tapauksissa vikavirran alue on 16-50 kA ja suurin kojeiston jännite 0,6 kV. Avoimessa tilassa palavan valokaaren energia voidaan laskea kaavalla:

$$E = 5271D^{-1,9593}t(0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938), \quad (12)$$

jossa

E = saapuva energia (cal/cm²)

D = työskentelyetäisyys valokaaresta (in).

Suljetussa tilassa palavan valokaaren energia voidaan laskea kaavalla:

$$E = 1038,7D^{-1,4738}t(0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675). \quad (13)$$

NFPA 70E luokittelee valokaaren vaarallisuuden viiteen kategoriaan energian suuruuden perusteella seuraavan taulukon mukaisesti. Jokaiselle kategorialle on määritelty suositeltava suojavarustus.

Taulukko 3. Energiatasot ja niitä vastaavat suojavarusteet (National Fire Protection Association 2004).

Kategoria	Energiataso (cal/cm ²)	Tyypillinen suojavarustus
0	-	Käsitlemättömät puuvillavaatteet
1	5	Tulenkestävä takki ja housut
2	8	Tulenkestävä takki ja housut sekä puuvilla alusvaatteet
3	25	Tulenkestävä takki, housut ja suojapuku sekä puuvilla alusvaatteet
4	40	Tulenkestävä takki ja housut sekä monikerroksinen valokaaripuku

3.3.2. IEEE 1584

IEEE:n julkaisema standardi IEEE 1584 on ohje valokaaren tuottaman saapuvan energian laskemiseksi. Tällä hetkellä on käytössä standardista vuonna 2002 julkaistu painos IEEE 1584-2002. Standardia käytetään NFPA 70E:n liitteen D tapaan ennustamaan työntekijään kohdistuvan energian suuruutta ja valokaaren turvaetäisyyttä, kun vika syttyy työskenneltäessä jännitteisillä kojeistoilla. IEEE:n standardin laskukaavat energian laskemiseksi on määritelty kokemukseräisten testitulosten perusteella. Kokemukseräiset kaavat antavat NFPA:n

maksimitehon perusteella saatuja kaavoja todellisemman ja realistisemman arvon energian suuruudelle. IEEE 1584 standardin avulla lasketulle energialle voidaan halutessa käyttää NFPA:n taulukoimaa tyypillistä suojarustusta, joka on esitetty edellisessä kappaleessa (Taulukko 3).

IEEE 1584 standardi soveltuu rajoitetusti käytettäväksi seuraavan taulukon esittämissä tilanteissa.

Taulukko 4. IEEE 1584 standardin energialaskujen rajoitukset (IEEE 2002).

Jännite	0,208 kV-15 kV
Taajuus	50 Hz tai 60 Hz
Prospektiivinen vikavirta	0,7 kA-106 kA
Maadoitus	Kaikki tavat
Elektrodien etäisyys	13 mm-152 mm

Standardin sisältämät laskut koostuvat neljästä eri vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa saadaan selville systeemin valokaarivirta, jota käytetään hyväksi toisen vaiheen normalisoidun energian ja kolmannen vaiheen varsinaisen saapuvan energian suuruuksien laskemiseksi. Neljännessä vaiheessa lasketaan valokaaren turvaetäisyys. (IEEE 2002.)

Ensimmäisessä vaiheessa virta lasketaan jännitteestä riippuen eri kaavojen avulla. Pienjännitteellä (<1 kV) käytetään kaavaa:

$$I_a = 10^{\{K+0,6621\log(I_{bf})+0,0966V+0,000526G+0,5588V \cdot \log(I_{bf})-0,00304G \cdot \log(I_{bf})\}}, \quad (14)$$

jossa

I_a = valokaarivirta (kA)

$K = -0,153;$ avoin laitteisto
 $-0,097;$ suljettu laitteisto
 $\log = \log_{10}$
 $G =$ elektrodien välinen etäisyys.

Vastaavasti keskijännitteellä käytetään valokaarivirran laskemiseksi kaavaa:

$$I_a = 10^{\{0,00402+0,983\log(I_{bf})\}} \quad (15)$$

Toisessa vaiheessa lasketaan valokaaren normalisoitu energia. Normalisoitu energia perustuu 0,2 sekunnin palamisaikaan ja 610 mm etäisyyteen valokaaresta ja se voidaan laskea kaavalla:

$$E_n = 10^{\{K_1+K_2+1,081\log(I_a)+0,0011G\}} \quad (16)$$

jossa

$E_n =$ normalisoitu energia

$K_1 = -0,792;$ avoin laitteisto
 $-0,555;$ suljettu laitteisto
 $K_2 = 0;$ avoin laitteisto
 $-0,113;$ suljettu laitteisto.

Kolmas vaihe antaa arvion varsinaisen saapuvan energian suuruudelle. Energia voidaan laskea kaavalla:

$$E = 4,184C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610}{D} \right)^x \quad (17)$$

jossa

E = saapuva energia (J/cm^2)

$C_f = 1,0$; jännite > 1 kV

1,5; jännite < 1 kV

t = valokaaren palamisaika (s)

D = työskentelyetäisyys (mm)

x = etäisyystermin eksponentti, joka saadaan seuraavan taulukon avulla.

Taulukko 5. Eksponentin x riippuvuus jännitteestä ja kotelon rakenteesta (IEEE 2002).

Rakenteen tyyppi	0,208 kV – 1 kV	> 1 kV – 15 kV
Avoin	2	2
Kojeisto	1,473	0,973
MCC ja paneeli	1,641	-
Johdin	2	2

Neljäs ja viimeinen vaihe sisältää turvaetäisyyden laskemiseksi kaavan:

$$D_B = 610 \cdot \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{1}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}, \quad (18)$$

jossa

D_B = valokaaren turvaetäisyys (mm)

E_B = saapuvan energian suuruus turvaetäisyydellä (normaalisti $5 \text{ J}/\text{cm}^2 = 1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$).

3.3.3. NEC artikla 110 kohta 110.16

NEC (National Electric Code) on NFPA:n julkaisema säännöstö kojeistojen ja johdotuksien asennuksille. NEC:n vuoden 2005 painoksessa artiklan 110 sisältämä kohta 110.16 määrittää ohjeet mahdollisten valokaarien varoitusmerkinöille. Standardin mukaan varoitukset ja merkit täytyy asentaa mahdolliselle vaara-alueelle hyvin näkyvälle paikalle, josta työntekijä voi nähdä sen jo ennen työn aloittamista. NEC kattaa kojeistot, ohjauskeskukset, kojetaulut, moottorinkäynnistyskeskukset ja mittauskeskusten liitinkotelot, jotka voivat olla työn tai huollon yhteydessä jännitteisiä. NEC ei määritä valokaaren vaarallisuuden tasoa, suojaetäisyyksiä tai tarvittavia suojarusteita, mutta sisältää viittauksen NFPA 70E-2004 standardiin. (Zahalka & Hoagland 2007.)

3.3.4. NESC artikla 410.A.10

NESC (National Electric Safety Code) on IEEE:n julkaisema standardi suojatamista henkilöturvallisuuden varmistamiseksi asennuksien, käytön ja huollon aikana. NESC sisältää kohdan 410.A.10, joka määrittää suojautumisen valokaaren tuottamalta energialta. Työnantajan on vastattava energiamäärälaskelmien ja arvioiden olemassaolosta. Laskelmissa olevan energiamäärän ylittäessä arvon 2 cal/cm^2 , on käytettävä suojarusteita, jotka pudottavat iholle saapuvan energian määrän turvalliselle tasolle. Jos valokaaren turvallisuudesta on tehty analyysi, on sen NESC:n mukaan sisällettävä arviot energian suuruuksista. (Zahalka 2007.)

3.3.5. OSHA 1910

OSHA:n (Occupational Safety and Health Administration) standardi 1910 sisältää vaatimukset ja ohjeet valokaaren energialta suojautumiseksi. Standardi pe-

rustuu NESC:iin ja on monelta osin samankaltainen NFPA 70E:n kanssa. Standardi määrää muun muassa suojarustuksen laadun ja niiden käytön vaatimat tilanteet. (Zahalka 2007.)

3.3.6. CSA-Z462

Kanadassa ei ole tällä hetkellä omaa standardia sähköturvallisuudelle vaan käytössä on amerikkalainen NFPA 70E. Vuonna 2005 on kuitenkin laitettu CSA:n (Canadian Standard Association) toimesta alulle projekti oman standardin saamiseksi. Standardin ensimmäisen painoksen on suunniteltu olevan valmis vuoden 2008 loppupuolella ja sen nimi tulee olemaan CSA-Z462 Standardi työpaikan sähköturvallisuudelle. Standardi perustuu suoraan NFPA 70E-2004 standardiin ja sen sisältö pyritään pitämään vastaavana ainoastaan muokkaamalla se sopivaksi kanadalaiseen työympäristöön.

3.4. Kojeistojen valokaarikestoisuuden testaukseen liittyvät standardit

Keskeisiä valokaaren kestävien kojeistojen valokaarikestoisuuden testaukseen käytettäviä standardeja ovat IEEE C37.20.7, IEC 62271-200 ja EEMAC G14-1:n korvaava CSA C22.2 nro.261. Kaikki kolme IEEE, IEC ja EEMAC luokittelevat valokaaren kestävät kojeistot suojarakenteiden mukaan samantapaisesti kolmeen luokkaan A, B ja C (Kay 2006).

Luokka A) Valokaaren kestävät rakenteet ainoastaan kojeiston etupuolella.

Luokka B) Valokaaren kestävät rakenteet kojeiston edessä, takana ja sivuilla.

Luokka C) Valokaaren kestävät rakenteet edessä, takana, sivuilla ja tilojen välillä. (Poikkeuksena lähdön kiskotilassa syttyvä vika saa tunkeutua viereisen lähdön kiskotilaan).

3.4.1. IEEE C37.20.7

Pohjois-Amerikassa käytössä oleva standardi on IEEE:n C37.20.7. Standardi määrittää ohjeistuksen keskijännitekojeiston valokaarikestoisuuden testaukseen metallikoteloiduissa kojeistoissa.

3.4.2. CSA C22.2 nro.261

Pohjois-Amerikassa on käytetty myös vuonna 1987 valmistunutta EEMAC:n G14-1 standardia metallipäällysteisien keskijännitekojeistojen testaamiseksi. Standardia ei kuitenkaan enää tueta, vaan tilalle on suunnitteilla uusi standardi CSA:n toimesta. CSA C22.2 nro.261 nimisen standardin kehitys on vielä kesken ja valmistuessaan se tulee korvaamaan EEMAC:in standardin. Uusi standardi on tarkoitus yhtenäistää IEC 62271-200:n kanssa.

3.4.3. IEC 62271-200

Vuonna 2003 valmistui ensimmäinen painos IEC:n standardista 62271-200. 62271-200 sisältää standardit metallikoteloiduille kojeistoille nimellisjännitteeltään 1 kV–52 kV. Standardin liite A sisältää menetelmät kojeiston ja ohjauslaitteiden testaukselle sisäisen valokaaren aikana. Standardi korvasi aikaisemmin käytössä olleen vuonna 1990 julkaistun IEC 60296 standardin. IEC:n standardi on käytössä Euroopassa ja monissa muissa maissa Pohjois-Amerikan ulkopuolella.

4. VALOKAARISUOJAUSMENETELMÄT

Henkilöturvallisuus on aina ollut huolenaihe, mutta viime vuosien aikana kasvanut tietoisuus valokaaren haitoista ja vaikutuksista kojeistojen läheisyydessä on tuonut turvallisuuteen liittyviä standardeja ja erilaisia tuhovaikutuksia pienentäviä suojausratkaisuja. Valokaaren palamista ja tuhovaikutuksia voidaan ajatella rajoitettavan kahdella eri tavalla, mekaanisesti ja sähköisesti (Martikainen 1974).

Mekaaninen rajoittaminen tarkoittaa valokaaren palamispaikan läheisyydessä olevia rakenteellisia ja sijoitusteknisiä ratkaisuja, joilla voidaan vaikuttaa tuhoalueen laajuuteen. Vuosien saatossa kojeistojen rakenteet ovat muuttuneet suljettummiksi, pienemmiksi ja paremmin eristetyiksi. Tämä kojeistojen kehitys on aiheuttanut paineesta aiheutuvien ongelmien lisääntymisen. Turvallisuuden ja rakenteiden kestävyiden kannalta tarkasteltuna paineenpurkausluukut ovatkin nykyään tärkeässä asemassa. Paineenpurkausluukut estävät räjähdysten ja polttavien liekkien suuntautumisen työskentelytilaan sekä poistavat samalla vaarallisia aineita ja yhdisteitä työskentelevän ihmisen läheisyydestä. Henkilöihin kohdistuvien vahinkojen minimoimisessa tärkeässä osassa on myös asianmukainen suojarusteiden käyttö. Valokaaren syttymisen estämiseksi olevia rakenteellisia ratkaisuja ovat muun muassa kiskojen eristäminen ja määräajoin tehtävät kunnossapito-/huoltotoimenpiteet.

Sähköisellä rajoittamisella tarkoitetaan valokaaren oikosulkutehon ja palamisajan rajoittamista. Valokaaren palamisesta aiheutuva energia on suoraan verrannollinen valokaaren virtaan, jännitteeseen ja palamisaikaan. Oikosulkutehot ja oikosulkuvirrat ovat vuosien saatoissa kasvaneet niin suuriksi, että niiden rajoittaminen turvalliselle tasolle voi olla hankalaa ja ongelmallista. Nykyään on-

kin saatavilla useita erilaisia valokaaren palamisaikaa rajoittavia suojausratkaisuja. Suojausratkaisun tekniikasta ja sovelluskohteesta riippuen valokaaren palamisaika voidaan rajoittaa parhaimmillaan jopa alle 5 ms:iin.

4.1. Valokaaren kestävät kojeistot

Nykyään tavoitteena on työntekijän turvallisuuden jatkuva kehittäminen ja yritykset ovat alkaneet laajemmin kiinnittää huomiota valokaaren vahinkojen minimoimiseen. Kojestojen jatkuva kehittäminen turvallisemmiksi tarkoittaa henkilöiden valokaarille altistumisen minimoimista. Kaikkien valokaarien esittäminen voi joissain tapauksissa olla liian kallista ja jopa mahdotonta, joten vaihtoehtoinen ratkaisu voi olla valokaaren kestäväns kojeiston (Arc Resistant Switchgear, ARS) käyttö. Ensimmäiset valokaaren kestävät kojeistot suunniteltiin ja markkinoitiin Länsi-Saksassa 1970-luvulla.

Valokaaret tuottavat kojeistoon suurta mekaanista ja lämmöstä johtuvaa rasitusta. Normaaliin keskijännitekojeistoon verrattuna valokaaren kestäväns kojeisto sisältää monia rakenteellisia eroja, kuten suuremman purkausluukkujen määrän ja niiden sijoittamisen eri tavalla. Ovet ja kojeiston seinät on suunniteltava kestäväns suurempia paineenpurkauksia. Valokaaren kestäväns kojeistoissa on kiskotilat oltava eroteltuja toisistaan, jotta valokaari ei pääse leviämään toiseen kiskostoon. Myös kennot on oltava toisistaan erotettuja ja viereisten kennojen seinien välissä oltava 5 mm paksuinen tyhjä tila. Valokaari ei näin pääse syttyessään tuhoamaan viereisiä kennoja. Materiaalit on valittava suurista lämpötiloista ja paineista johtuen huolella. Esimerkiksi pidikkeet ja eristinmateriaalit on valittava niin, että niistä ei höyrystyessä vapaudu vaarallisia yhdisteitä. Rakenteista ja vaatimuksista johtuen valokaaren kestäväns kojeiston kustannuk-

set ovat noin 15-20 % normaalia kojeistoa suuremmat. (Kalkstein, Doughty, Paullin, Jackson & Ryner 1995.)

Kojeiston sisäisen valokaaren palamisprosessi voidaan ajatella koostuvan neljästä vaiheesta, puristus-, laajenemis-, siirto- ja termisestä vaiheesta.

Puristusvaihe alkaa valokaaren syttymisestä ja päättyy, kun kojeistossa vallitseva paine on saavuttanut huippuarvon. Kojeistossa paineen kasvu on suoraan verrannollinen vikavirran suuruuteen ja valokaaren palamisajan pituuteen ja kääntäen verrannollinen vikaantuneen tilan suuruuteen. Puristumisvaiheen kesto riippuu valokaaren tuottaman energian ja vikaantuneen tilan suuruudesta.

Laajenemisvaihe pitää sisällään paineenpurkausluukkujen toiminnasta johtuvan paineen vapautumisen ja pakkautuneen ilman kulkeutumisen pois purkausluukkujen ja hormien välityksellä.

Siirtovaiheessa loput jäljellä olevasta ilmasta siirtyy purkausluukkujen kautta pois.

Terminen vaihe kestää valokaaren sammumiseen asti. Tässä vaiheessa valokaaren energia kohdistuu ympäröiviin rakenteisiin kojeistossa. Suuri energian vapautumien höyrystää ympäröiviä materiaaleja, kuten kuparisia liitoksia ja katkaisijoita.

Yhdessä valokaaren kestävien kojeistojen kanssa voidaan käyttää valokaareelta suojaavaa varustusta. Suojavarustuksen käytöllä sekä kestävän ja normaalin kojeistoratkaisun välillä tehtävillä valinnoilla voidaan vaikuttaa kokonaisuuden

turvallisuuteen. Voidaan verrata toisiinsa kolmea eri keskijännitekojeiston käyttötapaa:

- a) ei valokaaren kestävää kojeistoa, eikä valokaarelta suojaavaa varustusta
- b) valokaarelta suojaava varustus, mutta ei valokaaren kestävää kojeistoa
- c) valokaaren kestävä kojeisto, mutta ei valokaarelta suojaavaa varustusta.

Vaihtoehtoja voidaan verrata toisiin vakavien onnettomuuksien osalta. Seuraavassa taulukossa on edellä mainittujen kolmen eri tavan valokaaritapaturmien aiheuttamien vakavien onnettomuuksien ja kuolemien esiintymistiheys. Arvot ovat erään öljyteollisuusyrityksen onnettomuustilastoista. Taulukossa on esitetty prosentteina vakavien onnettomuuksien ja kuolemien määrä kaikista onnettomuuksista, kaikissa kolmessa eri vaihtoehdossa. Vakavien onnettomuuksien esiintymistiheys on laskettu suurelle yritykselle, jossa on arvioitu olevan 500 kojeistoriviä ja jokaisessa kojeistorivissä viisi katkaisijaa. Lisäksi oletuksena on arvio, jonka mukaan jokaisella katkaisijalla valokaaren esiintymistiheys on yksi jokaista 20 000 käyttövuotta kohti. (Kalkstein ym. 1995.)

Taulukko 6. Vakavien onnettomuuksien esiintyminen eri kojeistoratkaisuilla.

Kojeistoratkaisu	Vakavien onnettomuuksien tai kuolemien määrä kaikista valokaarionnettomuuksista	Vakavien onnettomuuksien ja kuolemien esiintymistiheys (kpl/vuosi)
a	50 %	0,0625
b	10 %	0,0125
c	5 %	0,006

Edelleen voidaan laskea eri kojeistoratkaisuille erot esiintymistiheyksissä ja säästöt kokonaiskustannuksista. Siirryttäessä ratkaisusta a ratkaisuun b, saadaan eroksi 0,5 onnettomuutta vuotta kohti. Eroksi ratkaisujen b ja c välillä saa-

daan 0,00625 onnettomuutta vuotta kohti. Jos valokaarista koituvat kokonaiskustannukset yritykselle ovat 2–20 miljoonan dollarin välillä, voidaan laskea säästöt eri vaihtoehtojen välillä siirryttäessä. Säästöt siirryttäessä ratkaisusta toiseen ovat:

a–b: 100 000–1 000 000 \$/vuosi

b–c: 12 500–125 000 \$/vuosi.

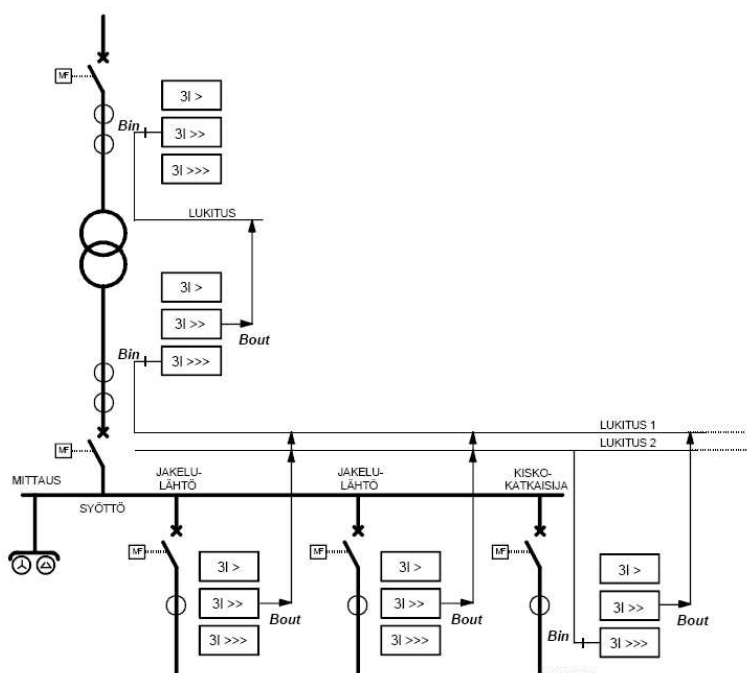
Valokaaren kestävä kojeisto on noin 15–20% normaalia kojeistoa kalliimpi, joten normaalin kojeiston maksaessa noin 25 000 \$/katkaisijayksikkö, maksaa valokaaren kestävä kojeisto näin 3 750–5 000 \$/katkaisijayksikkö enemmän. Valokaaren kestävä kojeisto ei näin välttämättä ole rahallisesti yritykselle kustannustehokas. Valokaaren kestävä kojeisto ei vaihtoehtona näytä välttämättä houkuttelevalta, etenkin kun henkilökohtainen suojarustus yleensä maksaa vähemmän kuin 500 \$ ja tarvittavien suojarusteiden määrä esimerkin kokoisessa yrityksessä voisi olla vain noin 1 000 kappaletta. (Kalkstein ym. 1995.)

Valokaaren kestävässä kojeistossa tapahtuu onnettomuuksia työvirheestä johdun samaan tapaan kuin normaalissakin kojeistossa. Valokaaren syttyessä työskentelytilaan ei kestävässä kojeiston rakenteista ole merkittävää hyötyä henkilöturvallisuuden kannalta. Jos valokaaren kestävässä kojeistossa ei ole käytössä erillistä valokaarisuojaa, vaan vian erottaa perinteinen ylivirtasuojaa, on valokaaren palamisaika pienimmillään noin 250/400 millisekuntia, riippuen käytetystä releestä. Edellä mainittu ylivirtasuojan toiminta-aika sisältää katkaisijan toiminta-ajan (50 ms), releen toiminta-ajan (50 ms) ja selektiivisyyden säilyttämiseksi tarvittavan porrastusajan (150/300 ms). Lyhempää 150 ms porrassaikaa voidaan käyttää numeerisilla ja pidempää 300 ms porrassaikaa analogisilla releillä.

4.2. Lukitussuojaus (ZSI)

Teollisuudessa kiskosuojaukset on suurimmaksi osaksi toteutettu ylivirtareilillä. Ylivirtasuojaus ei välttämättä takaa riittävän nopeaa suojaa kiskostolle, koska suojan on oltava koordinoitu kaikkien syöttösuunnassa alapuolella sijaitsevien suojalaitteiden kanssa. Jotta kiskon alapuolella sijaitsevat releet toimisivat selektiivisesti, on kiskostoa suojaavassa releessä asettelu ja aikaviive valittava tyypillisesti niin suureksi, että palava valokaari ehtii aiheuttaa suuria ja kalliita vaurioita kojeistolle.

Perinteinen lukitussuojaus mahdollistaa vian poistamisen ilman normaalin ylivirtasuojan vaatimaa porrasaikaa. Lukitussuojaus soveltuu erityisesti kiskon suojaksi ja se perustuu peräkkäisien suojien välisille lukituksille. Seuraavassa kuvassa on esitetty esimerkki lukituksen toiminnasta kiskosuojauksessa. Vika jollakin lähdoistä aiheuttaa vikaantuneen lähdon ja syötön suojien havahtumisen. Viallisen lähdon havahtunut suoja lukitsee syötön suojan ja laukaise katkaisijan asetellussa ajassa. Kiskovika aiheuttaa ainoastaan syötön suojan havahtumisen ja laukaisee vian normaalisti asetellussa ajassa. Lukitussuojauksen rinnalla on käytettävä aikaselektiivistä suojausta.



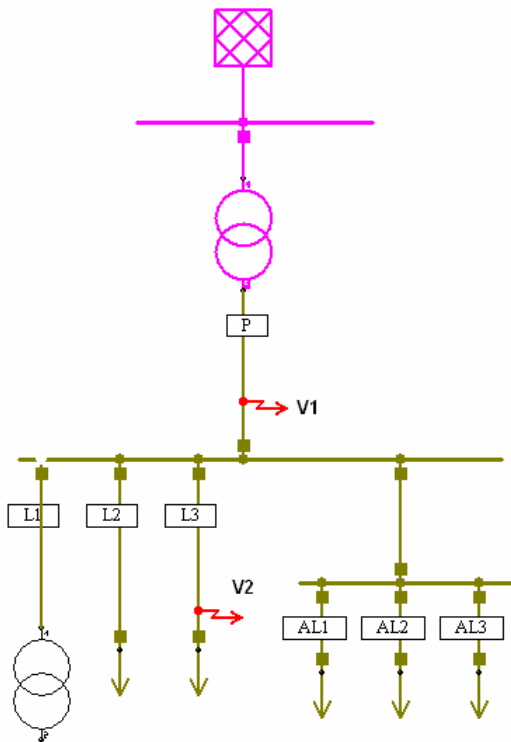
Kuva 3. Perinteinen lukitussuojaus kiskosuojauksessa (ABB 2000).

Zone Selective Interlocking (ZSI) on perinteistä lukitussuojausta kehittyneempi suojausmenetelmä, jonka tarkoitus on lyhentää kojeistoihin kohdistuvaa kuorimitusta pienentämällä vian poistamiseen tarvittavaa aikaa. ZSI-suojauksessa syötön rele on yhdistetty lähdön releisiin kiinteillä tietoliikenneyhteyksillä. Tietoliikenneyhteyden avulla rele voi kommunikoida syöttösuunnassa lähempänä verkkoa olevan releen kanssa. Koordinoidun lähtösuojausten tapaan ZSI-menetelmässä on tarkoituksena laukaista vain syötön suunnassa vikapaikan takana lähimpänä oleva katkaisija muiden katkaisijoiden pysyessä kiinni. Näin ZSI laukaisee katkaisijan ilman tarkoituksenmukaista viivettä huolimatta vian paikasta verkossa.

ZSI:n toiminta perustuu releiden lähettämien estoviestin käyttöön. Jokainen havaitunut rele lähettää estoviestin syöttösuunnassa edelliselle releelle ja jokaisella releellä on etukäteen asetettu viive, joka käynnistyy releen vastaanottaessa

estoviestin. Laite joka ei saa estoviestiä laukaisee katkaisijan ilman tarkoituksellista viivettä. Estoviestin aiheuttaman aikaviiveen vuoksi ZSI-suojaus pysyy aikaselektiivisenä, eikä tähän tarkoitettua erillistä rinnakkaista suojaa tarvita.

Seuraavassa kuvassa on yksinkertainen kahdella portaalla toteutettu lähtösuojaus. Kuvan kahden vikapaikan avulla voidaan tarkastella suojauksen toimintaa. Vian ollessa kohdassa V1 ainoastaan syötön rele P havahtuu. Lähdön releet eivät havahdu vikaan, joten ne eivät myöskään lähetä syötön releelle estoviestiä. Rele P laukaisee katkaisijan ilman viivettä. Vian ollessa kohdassa V2 havahtuvat molemmat releet P ja L3. L3 lähettää estoviestin P:lle käynnistäen tämän aikaviiveen. L3 ei saa estoviestiä ja laukaisee ilman viivettä. Vika poistuu näin selektiivisesti ilman tarkoituksellista viivettä ja P jää lähdölle varasuojaksi. Joissain verkon osissa on tarpeen käyttää itse estävää katkaisijaa (self restraint circuit breaker), jotta aikaviive pysyy päällä, vaikka rele ei saisikaan estoviestiä. Itse estävä toiminto voisi olla tarpeen esimerkiksi kuvassa lähdöllä L1 olevalla lähdöllä, jos kyseisellä lähdöllä olisi muuntaja, joka aiheuttaisi kytkentäsysteemsäyrtä. (Shneider Electric 2000.)



Kuva 4. Kahdella suojausportaalla toteutettu ZSI.

Edellisessä esimerkissä on käytössä kaksi releporrasta, mutta suojaus voidaan toteuttaa myös suuremmalla porrasmäärällä. Vaikka ZSI-menetelmä laukaisee vian ilman tarkoituksellista viivettä, vaaditaan kiskoreleeltä kuitenkin pieni viive, jotta lähdön releellä on aikaa toimia ja lähettää mahdollinen estoviesti. Normaalisti kahdella portaalla toteutetussa suojauksessa kiskoreleen viive on noin 10 ms (Sringer 2003). ZSI-suojauksessa syötön releen toiminta-aika on kaikki viiveet ja marginaalit mukaan lukien noin 100 ms. Katkaisijan toiminta-aika (50 ms) tähän lisättynä, saadaan kokonaistoiminta-ajaksi noin 150 ms. Esimerkiksi Siemensin ZSI-moduulin toiminta-ajaksi on ilmoitettu 80 ms (Siemens 2007).

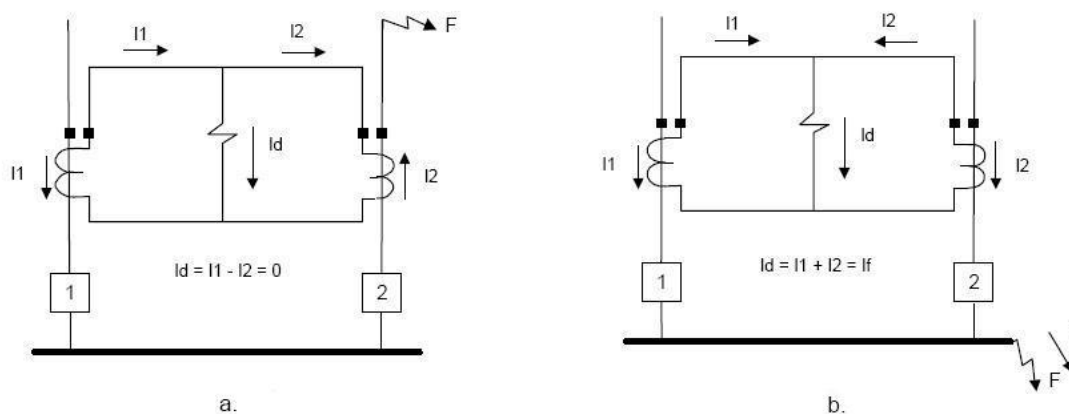
Normaalisti käänteisikäyvirtasuojauksessa asettelu on noin 150–175 % suurimmasta odotetusta vikavirrasta ja eri portaiden välinen aikaviive vähintään 0,3 s. Kiskoa suojaavalla syötön releellä laukaisua viivästetään näin 0,3 s ensimmäisen lähdön laukaisuajasta. Releen toiminta-aikaan lisätään vielä katkaisijan toiminta-aika. Esimerkiksi 16 kA vikavirralla, katkaisijan toiminta-ajan ollessa 0,050 s ja lähdön releen toiminta-ajan ollessa 0,06 s saadaan kiskovian poistamiseksi vaadittavaksi kokonaisajaksi 0,41 s. Maasulkuviassa voi vikavirta olla jopa 50 % oikosulkuvikaa pienempi ja aiheuttaa tyypillisellä käänteisikäyvirtasuojauksella tässä tilanteessa jopa 1,6 sekunnin toiminta-ajan. (Stringer 2003.) Lukitussuojaus nopeuttaa näin normaalia ylivirtarelesuojauksista varsinkin kiskosuojauksen kannalta katsottuna.

Eräs ongelma ZSI-suojauksessa voi olla vialliset laukaisut estoviestin vääränlaisen toiminnan vuoksi. Estoviestiyhteyksillä ei ole itsevalvontaominaisuutta, joten esimerkiksi syötön ja lähdön releillä olevan viestiyhteyden katkeamisesta ei saada mitään tietoa. Yhteyden katkeaminen selviääkin normaalisti vasta kun syötön rele laukaisee viiveettä vian, joka on lähdön releelle kuuluvalla suojausalueella (Coyle 2002).

4.3. Kiskon differentiaalisuojaus

Verkon eri osien, kuten muuntajien, johtojen ja kiskojen suojaus voidaan toteuttaa differentiaalisuojauksella. Kiskon differentiaalisuojauksessa suojattavasta kiskosta mitataan molemmilla puolilla kulkevia vaihevirtoja ja muodostetaan näistä erovirta. Erovirran amplitudin, vaihekulman tai näiden yhdistelmän ylitäessä releeseen asetellun arvon, seuraa laukaisu. Differentiaalisuojaus on absoluuttisesti selektiivinen menetelmä erottaen vain mitattavan alueen sisällä ta-

pahtuvat viat. Seuraavassa kuvassa on esitetty yksinkertainen kiskon differentiaalisuojauksen. Kuvasta näkyy vikapaikan vaikutus erovirran I_d suuruuteen. Vian ollessa suojausalueen ulkopuolella (a) on erovirran suuruus ideaalitapauksessa nolla. Vian ollessa suojausalueen sisäpuolella (b) on erovirta vikavirran suuruinen.

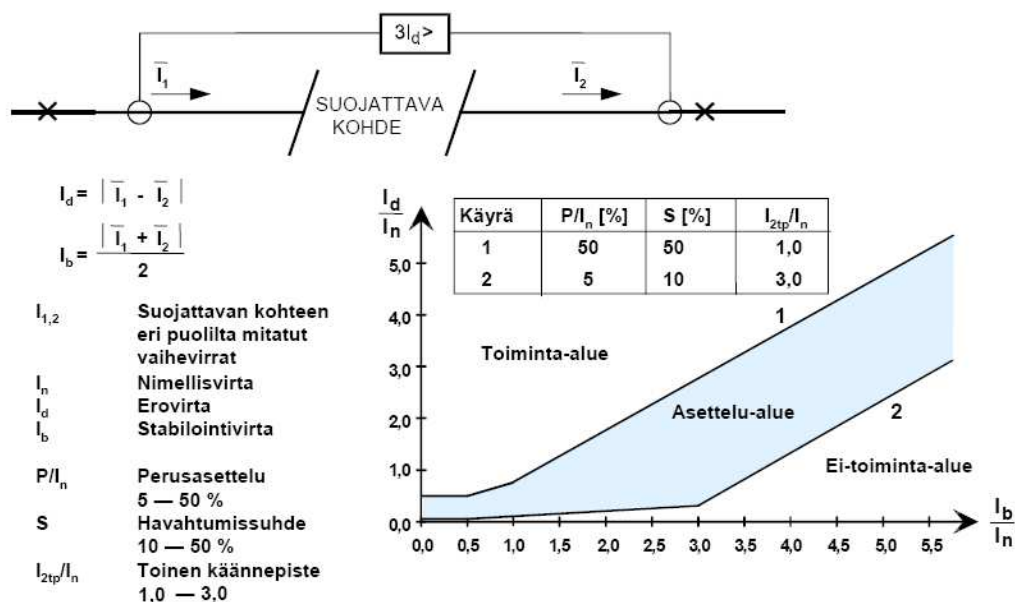


Kuva 5. Ulkoinen ja sisäinen vika differentiaalisuojauksessa (Andrichak & Cardenas 1995).

Differentiaalisuojauksen voidaan toteuttaa kahdella eri menetelmällä, pienimpedanssi ja suurimpedanssi. (ABB 2000.)

Pienimpedanssiperiaate mittaa virtoja kohteen molemmiin puolin ja muodostaa erovirran. Muun muassa virtamuuntajien mittausvirheen vuoksi erovirta ei kuitenkaan ole nolla, vaikka suojausalueella ei tapahtuisikaan vikaa. Erovirta on suoraan verrannollinen läpikulkevan virran suuruuteen ja tästä voi aiheutua ongelmia, jos läpikulkeva virta on suuri. Etenkin jos suurivirtainen vika on juuri suojattavan alueen ulkopuolella aiheuttaen virtaan DC-komponentin. DC-komponentti voi aiheuttaa virtamuuntajien eriaikaisen kyllästymisen, joka taas hetkellisesti kasvattaa erovirtaa ja voi saada aikaan virheellisen laukaisun. On-

gelma voidaan korjata vakavoimalla suojaus, jolloin laukaisuun vaadittava erovirta on sitä suurempi, mitä suurempi on läpi kulkeva virta. Pienimpedanssiperiaatteen toiminta on kuvattu seuraavassa kuvassa:

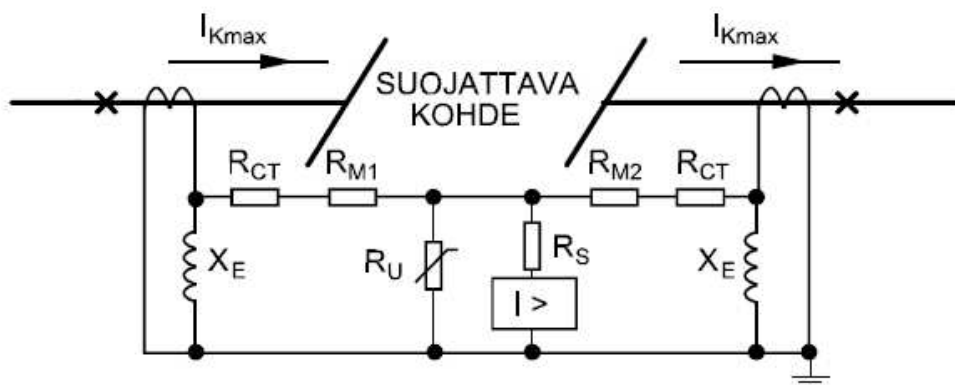


Kuva 6. Differentiaalisuojauksen pienimpedanssiperiaate (ABB 2000).

Pienimpedanssimenetelmää käytetään normaalisti tilanteissa, joissa virtamuuntajilla on eri muuntosuhteet, koska menetelmä ei vaadi virtamuuntajilta samankaltaisuutta.

Suurimpedanssiperiaatteessa vakavavointi tapahtuu erillisen stabilointivastuksen avulla. Vastuksen tarkoitus on estää suojausalueen ulkopuolisissa vioissa virtamuuntajien eriaikaisesta kyllästymisestä johtuvan erovirran aiheuttama virhelaukaisu. Seuraavassa kuvassa on differentiaalisuojauksen suurimpedanssijohdusmenetelmän yksivaiheinen sijaistykentä suojausalueen ulkopuolisissa vioissa. Kuvassa R_s on stabilointivastus ja tämän rinnalla on varistori R_u . Suojausalueen sisäpuolisissa vioissa relepiirin impedanssi on suuri, joten toisiojän-

nite voi ylittää releen tai johdon kestävyuden. Varistorin tarkoitus on rajoittaa tätä toisiojännitettä turvalliselle tasolle.



$$U_S = (R_{Mmax} + R_{CT}) * (I_{kmax} / n)$$

U_S = stabilointijännite

R_{Mmax} = mittausilmukan suurin kokonaisresistanssi l. $\max(R_{M1}, R_{M2})$

I_{kmax} = suurin läpimenevä vikavirta

n = virtamuuntajien muuntosuhde

R_{CT} = virtamuuntajan toisiokäämin resistanssi

Kuva 7. Differentiaalisuojauksen suurimpedanssiperiaate (ABB 2000).

Suurimpedanssimenetelmä on helppo toteuttaa ja asettaa. Menetelmä on luotettava ja käyttövarma sekä kustannukset ovat pienimpedanssimenetelmään verrattuna pienemmät. Menetelmässä virtapiirit ovat galvanisesti yhteydessä, joten rajoituksena virtamuuntajien on oltava muuntosuhteeltaan samanlaiset. Monimutkaisten kiskostojen suojaus ei myöskään ole mahdollista. Menetelmä sopii kiskojen oikosulkusuojaukseen ja maasulkusuojaukseen tehollisesti tai pienen impedanssin kautta maadoitetussa verkossa.

Valokaaren palamisaika kiskojen differentiaalisuojauksessa muodostuu releen ja katkaisijan toiminta-ajoista. Esimerkiksi Schweitzer Engineering Laboratories'in kiskodifferentiaalireleen SEL-487B toiminta-ajan ilmoitetaan olevan alle

yhden jakson (50 Hz:n verkossa alle 20 ms) (Schweitzer Engineering Laboratories 2008) ja General Electric:in releillä B30 ja B90 toiminta aika on tyypillisesti 12-18 ms (General Electric 2008).

4.4. Valoon perustuva suojaus

Valokaaren tuottama valomäärä voi olla tuhansia kertoja normaalia ympäröivää valoa suurempi. Tätä suurta valomäärää voidaan käyttää valokaarisuojauksessa valokaaren havaitsemiseen. Valoon perustuvassa suojauksessa käytetään optisia sensoreita valon intensiteetin nousun havaitsemiseksi. Valokaarisuojan keskusyksiköillä on normaalit virtamuuntajien sisääntulot, joiden avulla releessä käytetään valon havaitsemisen lisäksi hetkellistä ylivirtaelementtiä. Normaalisti suoja laukeaa molempien, ylivirran ja valon ylittäessä asettelu, mutta joidenkin erityistilanteiden vaatimien tarpeiden vuoksi suojaus voidaan asettaa laukaisemaan pelkästään valon perusteella.

Ensimmäinen erillinen valon havaitsemiseen perustuva valokaarisuoja esiteltiin jo vuonna 1962 (Camto), mutta menetelmän yleistymien alkoi myöhemmin 1990-luvun alussa. Ensimmäiset suojat perustuivat pisteantureihin. Rajoitettu määrä antureita sijoitettiin kojeistossa mahdollisiin valokaarien syttymiskohtiin. Pisteanturit on suunnattava huolella, koska anturit havaitsevat valon vain kuidun päässä sijaitsevan linssin avulla. Osalla markkinoilla olevista pisteantureista, kuten esimerkiksi Vamp:in antureilla, on mahdollisuus itsevalvontaan. Seuraavassa kuvassa on esimerkki pisteanturista.



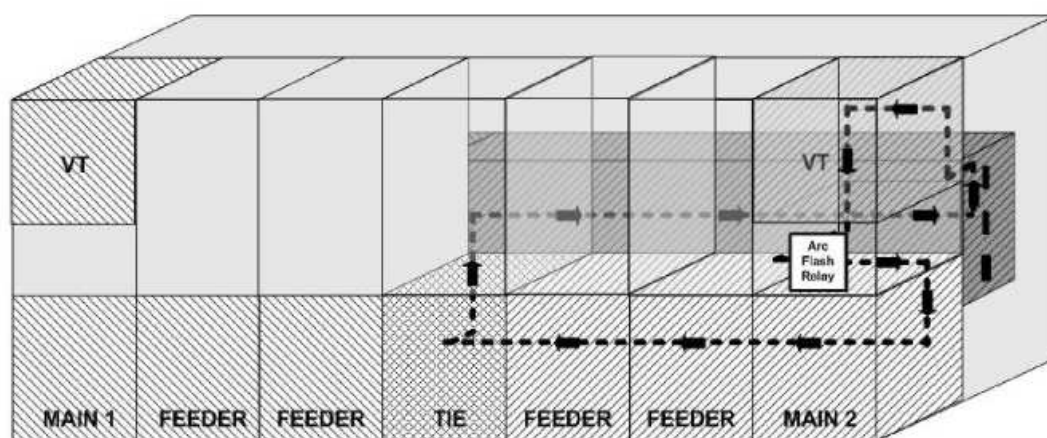
Kuva 8. Valokaaripisteanturi (Vamp 2007b).

2000-luvun alkupuolella esiteltiin uusia päällystämättömiä valokuituja, jotka absorboivat valoa koko matkaltaan. Uusilla kuituantureilla on pisteantureihin verrattuna useita etuja. Kuituantureilla saadaan kustannustehokkaampia ratkaisuja. Yhden kuidun pituus voi olla jopa 60 m ja sillä voidaan suojata esimerkiksi sama alue kuin kiskon differentiaalisuojalla. Kuituantureiden koko matkalta tapahtuva valon havaitseminen poistaa suuntausongelmat ja mahdolliset varjoalueiden tuomat havaitsemiseen liittyvät ongelmat. Kuituantureilla on mahdollisuus itsevalvontaan. Kuidun molemmat päät releeseen asennettuna sensori muodostaa silmukan, jota pitkin voidaan lähettää yksinkertaista viestiä. Rele voi näin puuttuvasta viestistä huomata anturilla olevan ongelman, kuten kuidun katkeamisen. Seuraavassa kuvassa eräs valokaarikuituanturi. (Wilson, Harju, Keisala & Ganesan 2007.)



Kuva 9. Valokaarikuituanturi (Vamp 2007b).

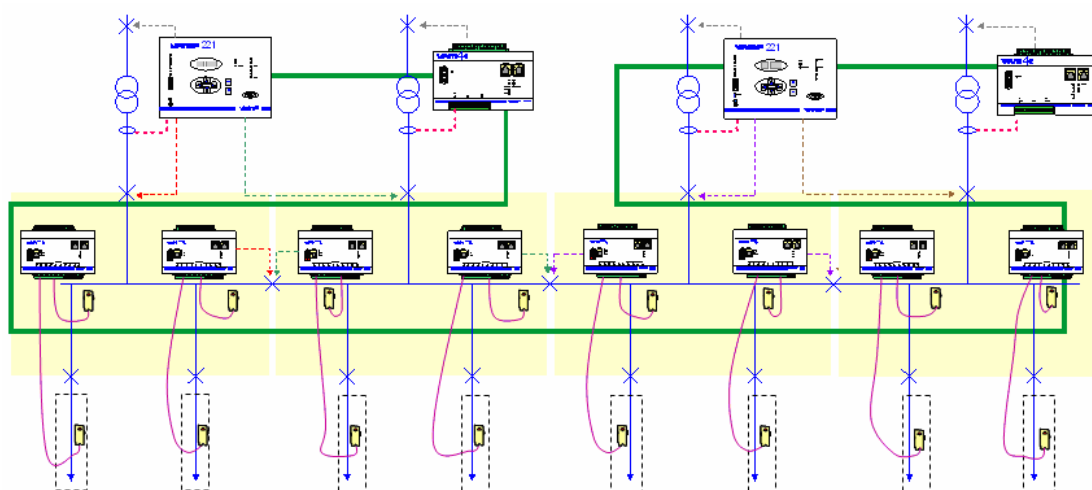
Seuraavassa kuvassa on yksi mahdollinen yksinkertainen kuituanturin reititys keskijännitekojeistossa, jossa on kaksi syöttävää tuloa ja näiden välissä kiskon poikittaiskatkaisija. Kuvassa näkyvä kojeiston toisen syötön kuidun reitti on käytössä vastaavalla tavalla myös vasemmalla puolella ensimmäisellä syötöllä. Kuitu kulkee releeltä kaikkien ennen poikittaiskatkaisijaa olevien katkaisijaosastojen läpi. Kuitu palaa kiskotilaa pitkin ja käy lopuksi ennen releeseen saapumista syötön jännitemuuntajatilassa. Ensimmäisellä syötöllä on samanlainen reititys ja suojausalueet limittyvät poikittaiskatkaisijan kohdalla. Valokaaren syttyminen oikean puolen kuidun reitillä aiheuttaisi nopean laukaisun kiskon poikittaiskatkaisijalla ja toisen syötön katkaisijalla. Vastaavasti toimisi ensimmäisellä syötöllä oleva katkaisija ja poikittaiskatkaisija vasemmalla puolella sytyvissä valokaarissa.



Kuva 10. Kuituanturin mahdollinen reititys kojeistossa (Wilson ym. 2007).

Jokainen kuitu vastaa yhtä suojausaluetta, joten jokaisen kuidun kohdalla on mietittävä mikä/mitkä katkaisijat toimivat kyseisen kuidun havaitsemisessa valokaarissa. Edellisessä esimerkissä kuitu ei suojaa kaapelitiloja, mutta kuitu voidaan helposti reitittää myös kaapelitilojen kautta. Tällaisessa tilanteessa valo-

kaari jossain kaapelitilassa aiheuttaisi kuitenkin koko kiskoston laukaisun irti verkosta syötön releen toimesta. Vian ollessa lähdön katkaisijan alapuolella kuuluisi syötön katkaisijan sijasta vain kyseisen lähdön katkaisijan toimia. Ongelma saadaan poistettua tekemällä jokaisesta lähdöstä oma suojausalue lisäämällä jokaiselle lähdölle lisäyksikkö ja tarvittavat valokaarikuituanturit kaapelitiloihin. Seuraavassa kuvassa on esimerkkipiirros neljän syötön ja kahdeksan keskijännitelähdön valokaarisuojauksesta. Suojauksessa jokaiselle lähdölle muodostuu oma suojausalue.



Kuva 11. Esimerkki valoon perustuvan valokaarisuojauslaitteiston kokoonpanosta (Vamp 2007a).

Valokaarisuojauksessa ei virtaa seuraavan elementin tarvitse käyttää varmuusaikaa virran mittaamisessa vaan rele laukaisee välittömästi virran ja valon ylittäessä asetteluun. Rele mittaa virran huippuarvoa RMS-mittauksessa syntyvän viiveen estämiseksi. Erillisellä valokaarisuojauksella saavutetaan normaalia relesuojauksesta huomattavasti nopeampi toiminta-aika. Perinteisellä lähtöreletekniikalla releen toiminta-aika saadaan alle 10 ms ja IGBT puolijohdetekniikalla

toteutetuilla lähtökoskettimilla saadaan jopa 1–3 ms toiminta-aika. Valokaaren palamis aika muodostuu lisäksi katkaisijan toiminta-ajasta (n. 50 ms). Kokonais-aika valoon perustuvassa valokaarisuojauksessa on siis pienimmillään noin 51 ms.

Erillinen valokaarisuoja voidaan lisätä jo olemassa olevaan kojeistoon ja suoja on itsenäinen, eli sitä ei tarvitse koordinoida muiden suojiensa kanssa. Nopean toiminta-ajan lisäksi erillisen valokaarisuojan hyviä puolia ovat muun muassa selektiivisyys ja kustannustehokkuus. Lisäkustannuksia ei tule vähäisten virtamuuntajien tarpeen vuoksi, koska virtamuuntajat ovat tarpeellisia ainoastaan syötön releillä.

4.5. Paineeseen perustuva suojaus

Paineeseen perustuvassa suojauksessa voidaan käyttää havahtumissensoreita lukuun ottamatta samaa laitekoonpanoa kuin valoon perustuvassa suojauksessa. Valoanturien sijasta käytetään paineantureita, jotka mittaavat paineen nousua. Paineanturit voivat havahtua paineen ylittäessä määrätyn painetason tai asetetun paineen nousunopeuden. Paineantureiden toiminta-aika on noin 10–20 ms (Kalkstein ym. 1995). Riippuen käytetystä releestä yhdessä katkaisijan toiminta-ajan (50 ms) kanssa saavutetaan kokonaistoiminta-aika noin 60–80 ms.

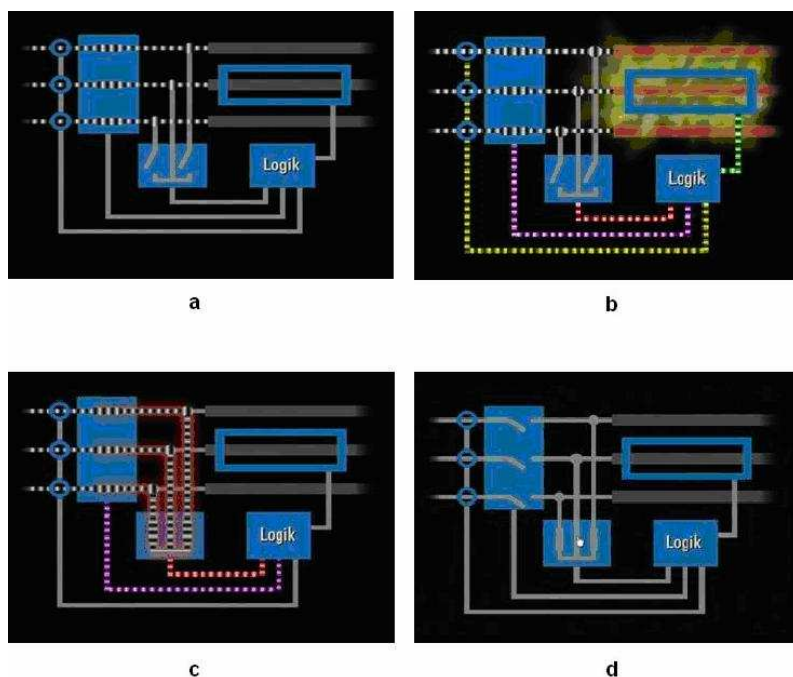
4.6. Oikosulkulaite

Normaalisti releitä sisältävät suojausratkaisut käyttävät vian erottamiseksi katkaisijoita. Toiminta-aika on normaaleilla katkaisijoilla nopeimmillaan noin 50 ms, joten yleensä suurimman osan suojauksen kokonaistoiminta-ajasta muo-

dostaa juuri katkaisijan toiminta-aika. Esimerkiksi valokaaren kestävät kojeistot voivat kyseisessä tilanteessa estää valokaaren pääsemästä kojeiston ulkopuolelle, mutta ne eivät estä kojeiston sisäisien osien tuhoutumista tai kaasujen vapautumista purkausluukkujen välityksellä ulkoilmaan. Aina ei ole edes mahdollista käyttää purkauskanavia tai kojeistot eivät täytä valokaarivaatimuksia, joten mahdollisten vaarojen ja tuhojen välttämiseksi on saavutettava alle 5 ms:n palamisaika (Garzon 2003).

Vaihtovirralla virrankatkaisuun tarvitaan nollakohdan ylitys, joten vian havaitseminen ja katkaiseminen alle 5 ms:ssa ei ole mahdollista. Valokaari voidaan kuitenkin sammuttaa alle 5 ms:ssa käyttämällä ohituskytkintä ja ohjaamalla virran kulkua sen katkaisemisen sijasta. Valokaari saadaan sammumaan aiheuttamalla räjähdepanoksen avulla pääkiskoon oikosulku erillisellä oikosulkulaitteella. Laitetta kutsutaan myös nimellä "arc eliminator" tai "arc terminator".

Seuraavassa kuvassa on esitetty oikosulkulaitteen toiminta. Suojaus koostuu oikosulkulaitteesta, logiikkayksiköstä ja havahtumiselimistä. Oikosulkulaitteen toimimisen aiheuttaa sekä virran että valon samanaikainen asetusarvojen ylitys. Virtatietoa käytetään pelkästä valotiedosta aiheutuvien mahdollisten tarpeettomien laukaisujen estämiseksi. Kohdassa b on esitetty vian syttymisen aiheuttama ylivirta- ja valoportaiden havahtuminen. Logiikkayksikkö antaa käskyn toimia ja oikosulkulaitteisto aiheuttaa kiskoon kolmevaiheisen oikosulun kohdan c mukaisesti. Oikosulusta johtuen virta saa vaihtoehtoisen reitin ja valokaari sammuu. Kohdassa d katkaisija on toiminut normaalisti erottaen kojeiston syötöstä.



Kuva 12. Oikosulkulaitteen toiminta (Vamp 2007a).

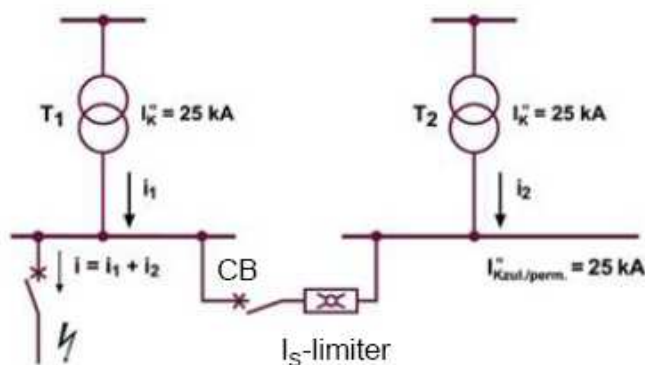
Oikosulkulaite mahdollistaa valokaaren erittäin nopean poistamisen, keskijännitesovelluksilla 4 ms:ssa ja pienjännitesovelluksilla jopa 2 ms:ssa valokaaren syttymisestä (Vamp 2007a). Oikosulkulaite voidaan asentaa metallipäällystettyihin tai metallilokeroituihin kojeistoihin. Ratkaisu voidaan asentaa uusien kojeistojen lisäksi helposti myös vanhoihin olemassa oleviin kojeistoihin. Laitteen asennus ei kuitenkaan onnistu kojeistoihin, joissa on suljetut katkaisinkammiot, kuten magneettipuhalluksella varustetuissa ilmakatkaisijoissa (Garzon 2003).

4.7. Is-rajoitin

Alati kasvava energian tarve vaatii sähköverkolta entistä tehokkaampia muuntajia, suurempia generaattoreita ja enemmän rinnakkaisia syöttöjä. Vian sattu-

essa tämä voi kuitenkin johtaa kojeiston asettamien sallittujen vikavirta-arvojen ylitykseen. Kojeiston vaihtaminen uuteen ei välttämättä ole teknisesti mahdollista, eikä useinkaan verkkoyhtiölle kustannustehokasta. Uuden kojeiston hankinnalta voidaan välttyä pienentämällä vikavirta sallitulle tasolle oikosulkuvirranrajoittimella (I_S -limiter).

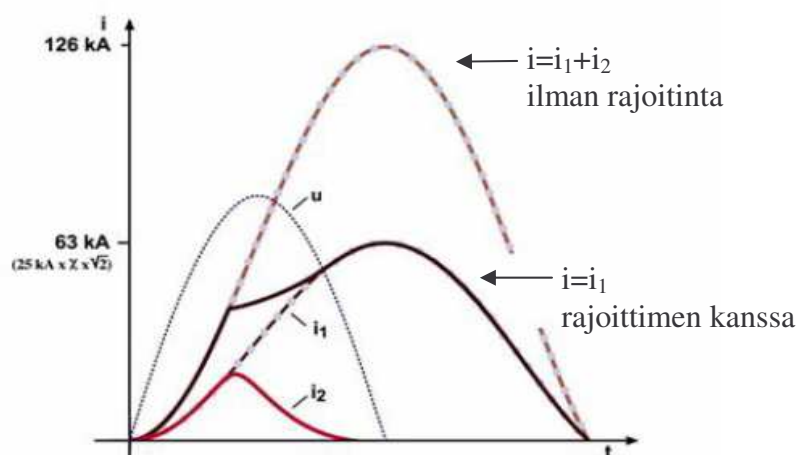
Oikosulkuvirranrajoittimen toiminta perustuu räjähdepanokseen, jonka vaikutuksesta virta ohjataan kulkemaan rinnakkaisen virtaa rajoittavan sulakkeen kautta. Virta jatkaa kulkua sulakkeen kautta 0,5 sekuntia, kunnes se tämän jälkeen katkaistaan jännitteen seuraavassa nollakohdassa. Rajoittimen avulla voidaan pienentää valokaaren aiheuttamia tuhoja jakamalla useammalla syötöllä varustettu verkko osiin kiskon poikittaiskatkaisijan kohdalta. Seuraavassa kuvassa on esimerkki kahdella syötöllä varustetusta verkosta, jossa kummankin muuntajan syöttämä vikavirta on 25 kA.



Kuva 13. Esimerkki rajoittimen käytöstä (ABB 2008).

Kuvan osoittamassa vian syttymispaikassa palava valokaari aiheuttaa rajoittimen toiminnan. Rajoitin toimii erittäin nopeasti (1 ms) ja estää vikavirran I_2 kulkua vikapaikalle. Virtaa rajoittava sulake pienentää vikavirtaa niin rajusti, että

I_2 ei vaikuta kasvattavasti vikapaikan virran huippuarvon suuruuteen. Tässä esimerkissä rajoitin vaikuttaa vikavirran suuruuteen seuraavalla tavalla:



Kuva 14. Rajoittimen vaikutus virran suuruuteen vikapaikassa (ABB 2008).

Ilman rajoitinta vikavirran huippuarvo saavuttaa 126 kA virran, kun taas rajoitinta käytettäessä se on 63 kA. Rajoittimen vaikutuksesta vikavirran suuruus pienenee siis puoleen.

Rajoittimen käyttö pienentää palavan valokaaren tehoa, mutta ei poista vikaa kokonaan. Vikavirrallaan 63 kA valokaari voi aiheuttaa suuria tuhoja, joten turvallisuuden lisäämiseksi voi olla tarpeellista käyttää erillistä valokaarelta suojaavaa ratkaisua.

4.8. Virtaa rajoittavat sulakkeet

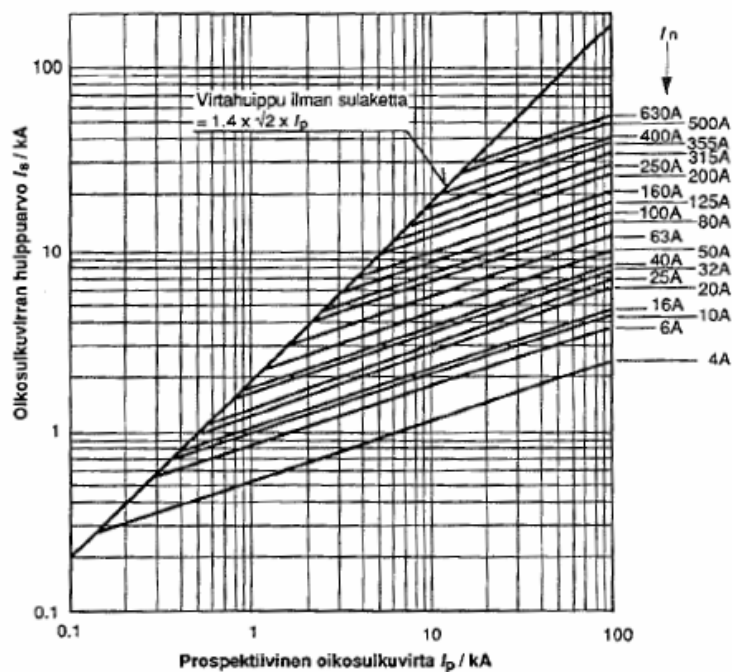
Varokesuojaus on oikosulkusuojana edullinen ja yksinkertainen toteuttaa. Pääasiassa varokkeita käytetään pienjännitteellä johtojen, sähkölaitteiden ja pienmuuntajien oikosulku- ja ylikuormitussuojina, mutta myös suuremmilla jännit-

teillä päämuuntajien ja moottorien suojaukseen (ABB 2000). Varoke koostuu varokepesästä ja sulakkeesta. Sulakkeen virrankatkaisukyky perustuu sulakkeen sisällä olevaan sulakelankaan, joka lämpenee ja katkeaa ylivirran vaikutuksesta. Kuumuudesta aiheutuva sulakelangan höyrystyminen sammuttaa sulakkeeseen syntyneen valokaaren. Sulakkeen katkaisukykyä voidaan lisätä käyttämällä sulakkeessa valokaaren sammutusta edistävää sammutusainetta.

Sulakkeessa palavan valokaaren sammutusperiaatteen mukaan voidaan sulakkeet jakaa virtaa rajoittaviin sulakkeisiin (current limiting fuse) ja virtaa rajoittamattomiin eli ns. nollakohtasulakkeisiin (non-current limiting fuse). Nollakohtasulakkeissa sulakelangasta muodostuneeseen kaasuun syntyvä valokaarisammuu vasta virran ensimmäisessä nollakohdassa. Virtaa rajoittavilla sulakkeilla taas väliaineiden ansiosta valokaarta ei pääse syntymään ja höyrypatsaan suuren resistanssin vuoksi virta pienenee ja lopulta sammuu. Nimellisvirraltaan 30–40 kertaisia ylivirtoja sulake katkaisee hyvin nopeasti ja rajoittaa näin virran huippuarvon huomattavasti ilman sulaketta käytettävän vastaavan vian vikavirtaa pienemmäksi. (Elovaara & Laiho 2005.)

Virtaa rajoittavaa sulaketta voidaan käyttää valokaarisuojana pienentämään valokaaren energiaa rajoittamalla valokaarivirtaa. Sulakkeen toimiessa sen ominaisella virtaa rajoittavalla alueella muodostuu äkillisesti suuri resistanssi, joka rajoittaa virran suuruutta ja sen sulakkeen läpi kulkemaa aikaa. Resistanssi aiheuttaa valokaarelle systeemin jännitettä suuremman jännitteen, joka pakottaa virran lopulta nolnaan. Toimiessaan virtaa rajoittavalla alueella katkaisee sulake virtapiirin alle puolen jakson (10 ms) aikana. Seuraavassa kuvassa olevan virranrajoitustaulukosta voidaan nähdä ABB:n OFAA kahvasulakkeiden virranrajoituskyky. Esimerkiksi prospektiivisen oikosulkuvirran ollessa 22 kV, on 315 A

sulakkeen suurin virtahuippu noin 21 kA. Ilman sulaketta vastaavan oikosulkuvirta aiheuttaisi noin 45 kA virtahuipun.



Kuva 15. OFAA kahvasulakkeiden virranrajoitusominaisuudet (ABB 2000).

Virtaa rajoittavan sulakkeen toimintanopeus pysyy nopeana vain virtaa rajoittavalla alueella, joten toimiakseen nopeasti on vikavirran ylitettävä virtaa rajoittavan alueen pienin arvo. Sulake toimii tällä virranrajoitusalueen kynnyсарvoa pienemmillä vikavirroilla virtaa rajoittamattoman sulakkeen tavoin. Virtaa rajoittavaa aluetta pienemmät vikavirrat voivat aiheuttaa sulakkeen toiminta-ajan huomattavan kasvun, joka taas vaikuttaa suoraan valokaaren palamisajan pituuteen ja vapautuvan energian määrään. Virtaa rajoittavan alueen kynnyсарvo on sulakkeilla sitä matalampi, mitä pienempi sulake on kyseessä. Sulakkeen kokoa kasvattaessa suurenee näin myös kynnyсарvo. Seuraavassa taulukossa

on esimerkki tyypillisen 600V L-luokan sulakkeen kynnysarvoista ja tarvittavista vikavirroista kynnysarvon ylittämiseksi.

Taulukko 7. Virtaa rajoittavan sulakkeen kynnysarvot (Parsons 2005).

Sulakkeen koko	Arvioitu virtaa rajoittavan alueen kynnysarvo (kA)	Tarvittava prospektiivinen vikavirta, jotta valokaarivirta ylittää kynnysarvon (kA)
601A	7	10.8
800A	10	16.4
1200A	16.5	29.5
1600A	21.6	40.5
2000A	26.8	52
3000A	42.2	88
4000A	60	N/A (> 106 kA)
5000A	75	N/A (> 106 kA)
6000A	96	N/A (> 106 kA)

Tarvittavan prospektiivisen vikavirran laskemiseksi on käytetty tilannetta, jossa systeemin jännite on 480 V, kiskojen välinen etäisyys 25 mm ja oletetaan valokaaren syttyvän suljettuun tilaan. Taulukosta nähdään, että esimerkiksi 2000 A sulakkeella kynnysarvon ylittämiseksi vaaditaan 52 kA prospektiivinen vikavirta. Prospektiivinen vikavirta jää joissain tapauksissa huomattavasti tätä arvoa pienemmäksi, eikä sulakkeen käyttö tällöin alenna valokaaresta vapautuvaa energiaa. IEEE:n julkaisemat laskukaavat soveltuvat tilanteisiin, joissa vikavirta on välillä 700 A–106 kA (IEEE 2002). 4000 A ja suuremmilla sulakkeilla kynnysvirran ylitykseen tarvittavaa prospektiivista vikavirtaa ei voida määrittää, koska ne ylittävät tuon 106 kA:n rajan. (Parsons 2005.)

4.9. Virtaa rajoittavat kuristimet

Vikavirran suuruutta voidaan rajoittaa myös virtaa rajoittavalla kuristimella eli sarjakuristimella. Sarjakuristin pienentää vikavirtoja kasvattamalla verkon oikosulkuimpedanssia. Kuristimen käyttö ei ole aina mahdollista, koska se voi

aiheuttaa puutteita koordinaatiossa muiden laitteiden kanssa. Normaalitilanteessa kuristin myös suurentaa jännitekuoppia ja lisää pätötehohäviöitä. Vikavirran rajoittaminen pienentää valokaaresta vapautuvaa energiaa, mutta sulakkeen tavoin pienentyneet vikavirrat voivat myös aiheuttaa käänteisaikeperiaatteilla toimivien suojalaitteiden toiminta-ajan kasvun. Joissain tapauksissa vapautuneen energian suuruus voi nousta jopa korkeammaksi, kuin nopeasti laukaistun suurivirtaisen vian tuottama energia.

5. SUOJAUSMENETELMIEN VERTAILU

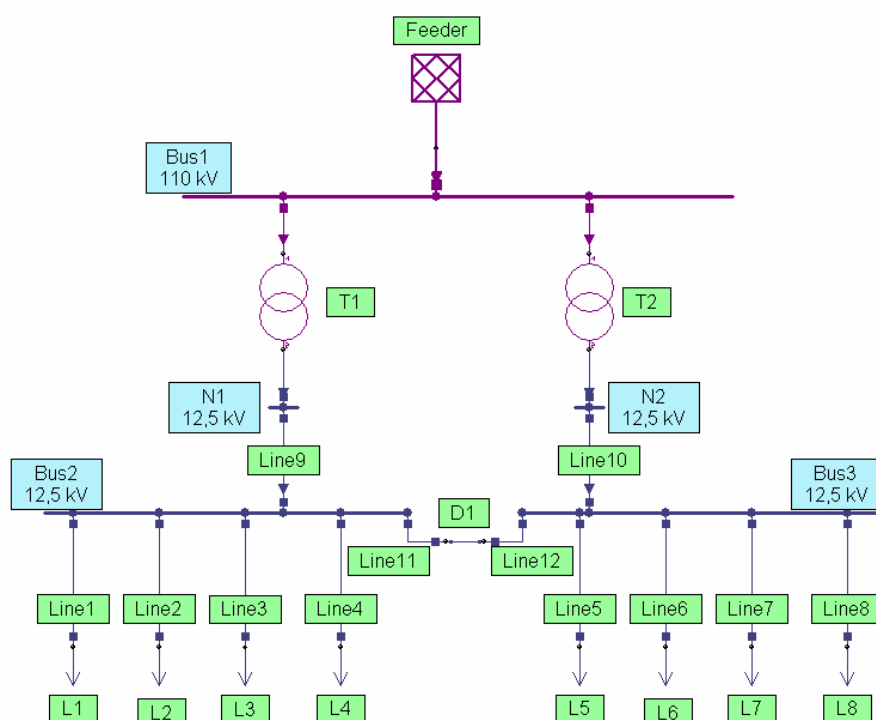
Valokaaren tuottaman energian laskemiseksi tarkoitettuja kaavoja on sovellettu joissain simulointiohjelmissa. Ohjelmien avulla voidaan mallintaa tietokoneella todellista tilannetta vastaava kokonaisuus ja tarkastella valokaarista aiheutuvi- en energioiden suuruuksia. Valokaarienergian laskeminen on mahdollista muun muassa Neplan, Easypower, ETAP ja SKM Power*tools-ohjelmilla.

Tässä kappaleessa käsitellään energiamäärien laskemista ja vertailua edellisessä kappaleessa esiteltyjen suojausratkaisujen osalta. Laskelmat on tehty käyttäen Neplan-ohjelmaa.

Kappaleen lopussa on esitelty MS excel-ohjelmalla toteutettu valokaarienergia- laskuri. IEEE standardin sisältämien kaavojen perusteella toteutetulla laskurilla voidaan määrittää valokaaren energia ja turvaetäisyys. Excel-laskuri tarvitsee energian määrittämiseksi vikavirran, joten sen suuruus on ensin laskettava tai arvioitava jollain muulla keinolla.

5.1. Verkon rakenne

Mallinnettavaksi testiverkoksi valittiin keskijänniteverkko, joka yhdistyy syöt- tävään verkkoon kahdella päämuuntajalla seuraavan kuvan mukaisesti. Jänni- teportaiksi valittiin päämuuntajan ensiöpuolelle 110 kV ja toisiopuolelle keski- jännitteeksi 12,5 kV. Keskijännitekisko voidaan tarpeen vaatiessa jakaa kahteen osaan kiskojen välissä sijaitsevalla kiskokatkaisijalla. Keskijännitelähtöjä on kummallakin puolella neljä. Jokainen lähtö sisältää 5 MW suuruisen pätöteho- kuorman.



Kuva 16. Keskijänniteverkko.

5.1.1. Verkon komponentit ja niiden tiedot

Mallinnetun verkon ei tässä tapauksessa tarvinnut vastata jotain todellista verkkoa, vaan vertailukelpoisten tulosten saamiseksi riittää, että kaikissa tilanteissa on käytössä sama malli. Verkon komponenttien tiedot on valittu kuitenkin oikeista komponenteista ja todellisuudessa mahdollisesti esiintyvää tilannetta mallintaen.

Syöttävän verkon (Feeder) tiedot on esitetty seuraavassa kuvassa. Oikosulkutehon suuruus on asetettu arvoon 4000 MVA. Vikana käytetään ainoastaan kolmivaiheista oikosulkua, joten nolaimpedansseilla ja nolaresistansseilla ei ole tulokseen vaikutusta. Näihin liittyvät arvot voidaan näin jättää ennalleen oh-

jelmassa olevan valmiin esimerkkimallin (Ex_Arcflash.nepprj) sisältämiksi arvoiksi.

The screenshot shows the 'Feeder' dialog box with the following data:

Parameter	Value
Name	Feeder
Type	
Sk'max .. MVA	4000
Sk'min .. MVA	4000
Ik'max .. kA	20,995
Ik'min .. kA	20,995
R(1)/X(1) max	0,14
R(1)/X(1) min	0,14
Z(0)/Z(1) max	999
Z(0)/Z(1) min	999
R(0)/X(0) max	0,14
R(0)/X(0) min	0,14
C...uF	0
Operational data	
LF-Type	SL
Slack portion .. %	0
P oper... MW	0,28001
U oper .. %	100
Q oper... Mvar	9,48818
Uw oper .. %	0
Remote controlled bus	
Operating Mode	
Generation cost	
a .. CurU/MW ² /h	0
b .. CurU/MW/h	0
c .. CurU/h	0
Mult. factor	1

Kuva 17. Syöttävän verkon tiedot.

Molemmiksi päämuuntajiksi valittiin samanlainen 40 MVA:n suuruinen tehomuuntaja. Muuntajan arvot saatiin ABB:n käsikirjan öljyeristeisien tehomuuntajien tiedoista. Seuraavassa kuvassa on muuntajaan T1 sijoitetut arvot. Tyhjäkäyntihäviöt 23,5 kW (P_o), suhteellinen oikosulkuimpedanssi 12 % (Z_k) ja suhteellinen tyhjäkäyntivirta (S_o) saadaan suoraan taulukon arvoista. Kuparihäviöt sijoitetaan ohjelmaan suhteellisenä arvona muuntajaan tehoon nähden, joten

arvo saadaan jakamalla kuormitushäviöt muuntajan kokonaistehon suuruudella. Kuparihäviöiden suuruudeksi saadaan näin 0,37 %.

Kuva 18. Muuntajan tiedot.

Verkon kaikki johto-osuudet määriteltiin AHXAMK-W 240 keskijännitemaakaapeliksi. Kaapeliin Line1 sijoitetut arvot on esitetty seuraavassa kuvassa. Arvot kaapelille saatiin johtovalmistajan kotisivuilta (Prysmian cables and systems). Nollasuunnan resistanssin, reaktanssin ja kapasitanssin arvoilla ei tässä työssä ole merkitystä, mutta johdon mahdollisen myöhemmän tarpeen vuoksi johto mallinnettiin kaikilta osin vastaamaan oikeaa kaapelia. Arvoja ei ole il-

moitettu valmistajan sivuilla vaan näiden suuruudet saatiin Simulointiympäristö Loppuraportti julkaisusta (Kauhaniemi, Ristolainen, Saari, Lågland, Salmi-
nen, Hokkanen & Brännbacka 2005). Line1–Line8 johtojen pituudeksi on asetettu 100 m ja Line8–Line12 johtojen pituudeksi 2 m.

The screenshot shows a 'Line' dialog box with the following parameters:

Parameter	Value	Parameter	Value
Name:	Line1	Units:	Ohm/km
Type:	AHXAMK-w 240	R(1) .. Ohm/km:	0,15
Length .. km:	0,1	R(0) .. Ohm/km:	0,954
X(1) .. Ohm/km:	0,11	X(0) .. Ohm/km:	0,44
C(1) .. uF/km:	0,30000	C(0) .. uF/km:	0,29400
B(1) .. uS/km:	94,248	B(0) .. uS/km:	92,363
G(1) .. uS/km:	0	Ir max .. A:	385
Temp. at end of SC. °:	250	Ir min .. A:	0
Number of lines:	1	Reduction factor:	1
Q .. mm ² :	0	Operating Temp. °:	40
<input checked="" type="checkbox"/> Cable	<input type="checkbox"/> Switchable	<input type="checkbox"/> Overhead	

Buttons at the bottom: Copy, Paste, Library, Export, OK, Cancel, Help, Color.

Kuva 19. Kaapelin tiedot.

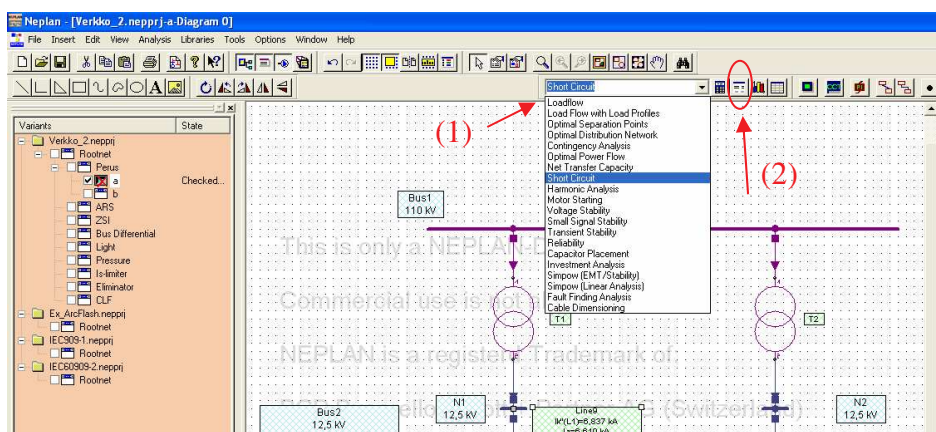
5.2. Laskelmat

Jokainen suojausmenetelmä alentaa valokaaresta vapautuvan energiaa eri määrän riippuen suojan toimintanopeudesta. Eri menetelmien käytöstä koituvat

energiat saadaan laskettua sijoittamalla jokaisen suojan ominainen kokonais-toiminta-aika ohjelmaan valokaaren palamisajan pituudeksi. Virtaa rajoittavien sulakkeiden käännteisaikalaukaisun vuoksi toiminta-aikaan vaikuttaa vikavirran suuruus. Tämän vuoksi sulakkeille ei voida suoraan asettaa valokaaren palamisaikaa, vaan malliin on lisättävä oikeat sulakkeet.

5.2.1. Valokaarienergian määrittäminen

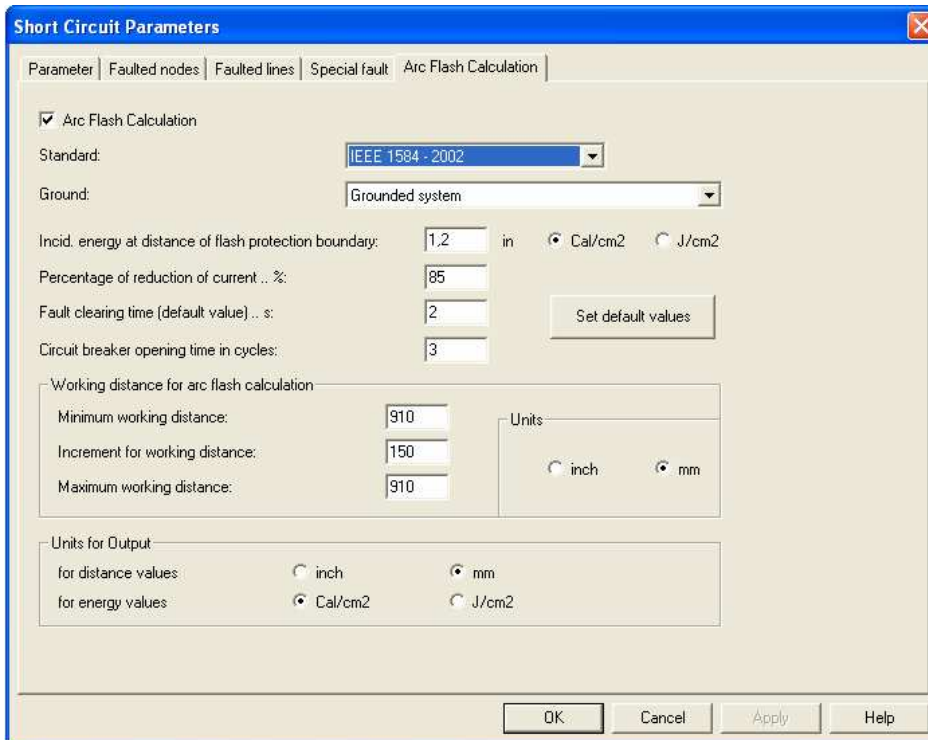
Valokaarienergian määrittäminen on mahdollista vain ohjelman ollessa oikosulkujen laskemiseen tarkoitettussa tilassa. Oikosulkulaskenta (Short Circuit) saadaan aktivoitua seuraavan kuvan osoittamasta valikosta (1).



Kuva 20. Vian määrittäminen.

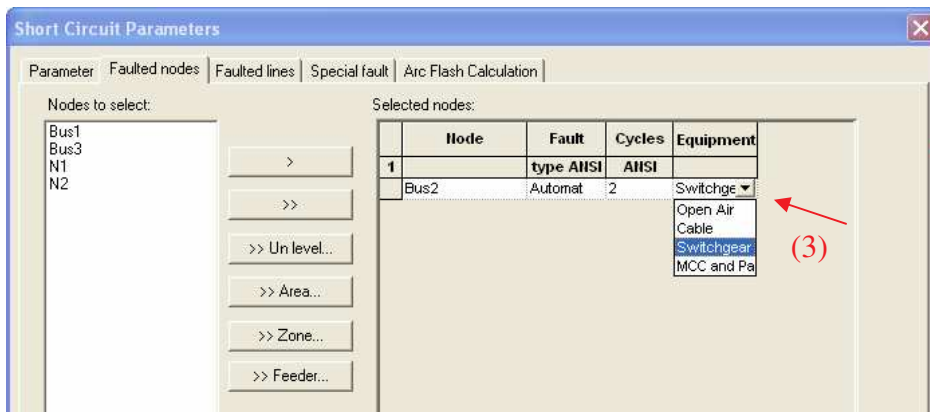
Edellisen kuvan osoittamasta *parameters* painikkeesta (2) avautuu seuraavan kuvan mukainen ikkuna. Avautuneesta ikkunasta voidaan määrittää vikaan liittyviä parametrejä. *Arc Flash Calculation* välilehden sivulta voidaan määrittää valokaareen liittyvät asiat, kuten käytettävä standardi, maadoitus, erilaiset valokaareen liittyvät etäisyydet ja valokaaren palamisaika. Valokaaren palamisaika on käytössä ainoastaan jos verkkoon ei ole määritelty vian keston määrääviä

suojalaitteita. Tässä työssä valokaarienergialaskuissa käytettiin IEEE standardia ja maadoitettua verkkoa. Etäisyyksien yksiköksi valittiin mm ja energian yksiköksi cal/cm².



Kuva 21. Valokaarienergian laskemiseksi tarvittavat määrittäykset.

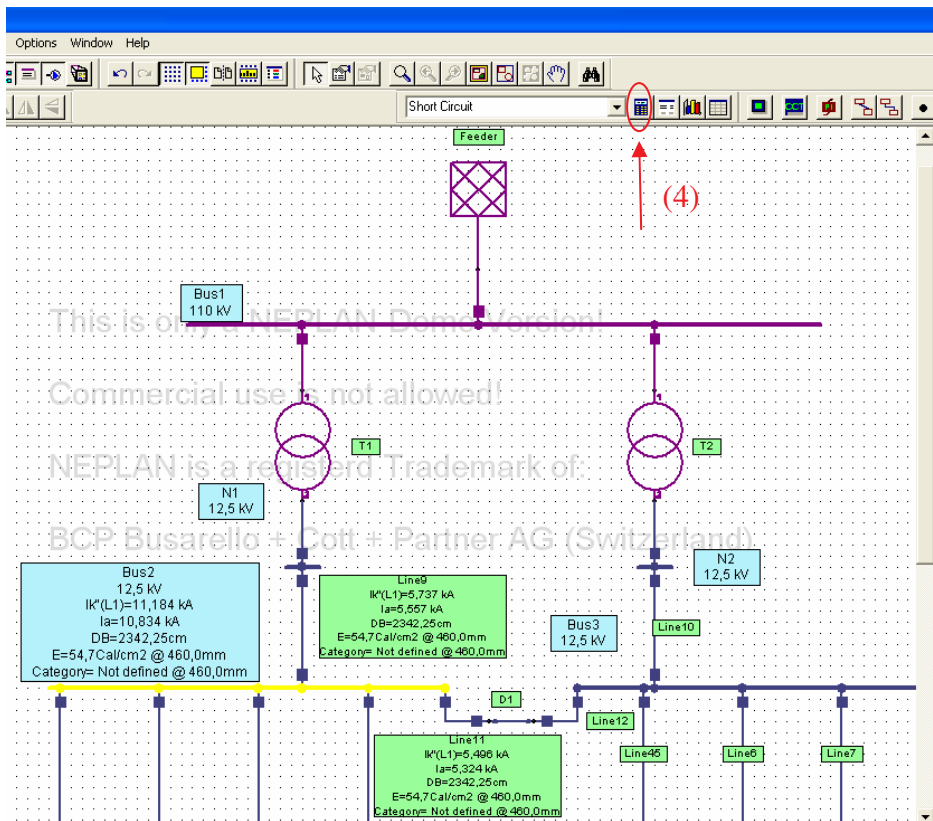
Vian paikkaan ja tyyppiin liittyvät määrittäykset voi tehdä *Faulted nodes* välilehdestä (kuva 22) avautuviin kenttiin. Halutut vikapaikat valitaan siirtämällä ne oikealla puolella olevaan *Selected nodes* laatikkoon. Jokaisen vian paikka voidaan valita vetovalikosta (3). Mahdolliset vian syttymispaikat ovat avoin tila, kaapeli, kojeisto ja moottorinohjauskeskus/paneeli.



Kuva 22. Vikapaikan ja vian tyypin valitseminen.

5.2.2. Laskujen suorittaminen ja tulosten määrittäminen

Itse laskut ohjelmalla suoritetaan seuraavassa kuvassa näkyvällä painikkeella (4). Oikein mallinnettu ja määritetty verkko tuottaa onnistuneen laskutoimituksen ja antaa tulokset valitulla tavalla. Tässä esimerkissä ohjelma on asetettu antamaan tulokset suoraan verkon yksiviivakaavioon. Tulokset ovat näkyvissä Vikaantuneen kiskon (Bus2) ja sen viereisten johto-osuuksien (Line9 ja Line11) osalta.



Kuva 23. Energian laskeminen.

Tuloslaatikoista nähtävät tulokset ovat:

I_k'' = oikosulkuvirta

I_a = valokaarivirta

DB = turvaetäisyys

E = energia

Category = energian suuruuden määräämä luokitus (NFPA).

Tässä työssä eri menetelmien tulokset esitetään kuvina ainoastaan oleellisimman eli vikaantuneen kiskon (Bus1) osalta.

5.2.3. Laskentatulokset

Joillakin menetelmillä on toiminta-ajoissa valmistajakohtaisia eroja tai suojan nopeus voi riippua käytetystä tekniikasta. Näillä menetelmillä tulokset saadaan suurimman ja pienimmän toiminta-ajan avulla.

Valokaaren kestävien kojeistojen käyttö ainoana valokaarisuojana ei välttämättä ole järkevää, koska työn aikana avonaiseen kojeistoon syttyvä vika palaa, kunnes kojeisto on tuhoutunut tai vikaa syöttävä virta katkeaa jostain muusta syystä. Kojearkistojen osalta käytetään tässä laskussa kahta tapausta. Ensimmäinen tapaus ilman muita suojia olettaen, että kojeisto on tuhoutunut täysin 2 s kuluttua ja toinen yhdistettynä perinteiseen ylivirtasuojaan. Ylivirtasuojan nopeuteen vaikuttaa käytettävän releen tekniikka (numeerinen/analoginen). Seuraavissa kuvissa on tulokset molemmista tapauksista.

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=25,711 kA
Ia=24,556 kA
DB=5784,93cm
E=68,2Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= Not defined @ 910,0mm

Kuva 24. Valokaaren kestävä kojeisto 2 s palamisajalla.

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=25,711 kA
Ia=24,556 kA
DB=682,57cm
E=8,5Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= 3 @ 910,0mm

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=25,711 kA
Ia=24,556 kA
DB=1106,45cm
E=13,6Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= 3 @ 910,0mm

Kuva 25. Valokaaren kestävä kojeisto yhdistettynä perinteiseen ylivirtasuojaan 0,25 s (numeerinen rele) ja 0,4 s (analoginen rele) palamisajoilla.

Pelkästään valokaaren kestäväen kojeiston käyttö ei alenna valokaaren luovut-
tamaa energiaa ja energian suuruus saavuttaa kahden sekunnin palamisajalla
68,2 cal/cm² arvon 910 mm etäisyydellä valokaaresta. Energian suuruus ylittää
NFPA:n määrittelemän luokituksen, joten suositeltavia suojavarusteita ei näin
suurelle energialle ole.

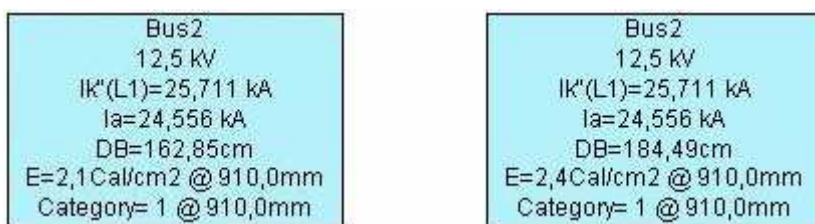
Ylivirtasuojia pienentää valokaaren palamisaikaa ja energiaa selvästi. Energian
suuruus jää kuitenkin edelleen vaaralliselle tasolle ja jännitteisien kojeistojen
läheisyydessä työskenneltäessä on käytettävä kategorian 3 suojavarustusta.

Seuraavasta kuvasta nähdään lukitussuojauksen vaikutus energian suuruuteen.
Lukituksen käyttäminen relesuojauksessa pienentää energian tasolle 5,1
cal/cm². Energian määrä vastaa suojavarustesuosituskategoriaa 2.

Bus2 12,5 kV IK'(L1)=25,711 kA Ia=24,556 kA DB=403,78cm E=5,1 Cal/cm ² @ 910,0mm Category= 2 @ 910,0mm

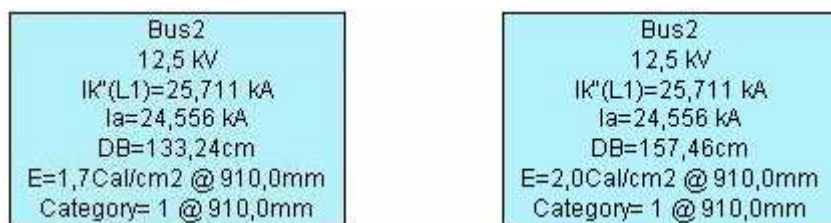
Kuva 26. Lukitussuojaus 0,15 s palamisajalla.

Edelleen pienempiin saapuvan energian määriin päästää differentiaalisuojauk-
sella (kuva 27). Energia jää suuruudelta 2,1–2,4 cal/cm² tasolle. Suositeltava suo-
javaruste kuuluu kategoriaan 1.



Kuva 27. Kiskon differentiaalisuojaus 0,062 s ja 0,07 s palamisajoilla.

Valoon ja paineeseen perustuvat suojaukset ovat hyvin samantyyppisiä ja eroavatkin toisistaan käytännössä vain valokaaren havaitsevan anturin osalta. Seuraavissa kuvissa on lasketut tulokset molemmille tavoille. Valoon perustuvan suojan nopeus perustuu valon nopeaan havaitsemiseen ja kokonaistoiminta-aika koostuu suurimmaksi osaksi katkaisijan toiminta-ajasta (50 ms). Saapuva energia nousee ainoastaan 1,7–2,0 cal/cm² suuruiseksi. Tämäkään ei kuitenkaan riitä laskemaan energian suuruutta turvallisen tason (1,2 cal/cm²) alapuolelle, vaan on käytettävä kategorian 1 suojavarustusta työskenneltäessä kojeiston läheisyydessä.



Kuva 28. Valoon perustuva suojaus 0,051 s ja 0,06 s palamisajoilla.

Paineeseen perustuvassa suojauksessa energia jää valoon perustuvaa suojaa hieman korkeammaksi 2,0–2,7 cal/cm² tasolle. Tähän on syynä paineanturien hitaampi toiminta.

Bus2 12,5 kV $I_k'(L1)=25,711 \text{ kA}$ $I_a=24,556 \text{ kA}$ $DB=157,46 \text{ cm}$ $E=2,0 \text{ Cal/cm}^2 @ 910,0 \text{ mm}$ Category= 1 @ 910,0mm	Bus2 12,5 kV $I_k'(L1)=25,711 \text{ kA}$ $I_a=24,556 \text{ kA}$ $DB=211,62 \text{ cm}$ $E=2,7 \text{ Cal/cm}^2 @ 910,0 \text{ mm}$ Category= 1 @ 910,0mm
--	--

Kuva 29. Paineeseen perustuva suojaus 0,06 s ja 0,08 s palamisajoilla.

Eri suojausratkaisuista selvästi pienimpään valokaaren palamisaikaan päästään käyttämällä oikosulkulaitteistoa. Oikosulkulaitteiston vaikutus valokaaren energiaan nähdään seuraavasta kuvasta. Kokonaisenergia jää nopean toiminnan vuoksi ainoastaan $0,1 \text{ cal/cm}^2$ suuruiseksi, joten työskentely kojeiston läheisyydessä on vian sattuessa turvallista.

Bus2 12,5 kV $I_k'(L1)=25,711 \text{ kA}$ $I_a=24,556 \text{ kA}$ $DB=9,74 \text{ cm}$ $E=0,1 \text{ Cal/cm}^2 @ 910,0 \text{ mm}$ Category= 0 @ 910,0mm
--

Kuva 30. Oikosulkulaitteisto 0,004 s palamisajalla.

Is-rajoitin pienentää vikavirran suuruutta, mutta vian katkaisemiseen tarvitaan erillinen lisäsuoja. Rajoittimen vaikutus on laskettu ilman erillistä suojaa kahden sekunnin palamisajalla ja käyttäen lisäksi perinteistä ylivirtasuojaa 0,25 s ja 0,4 s kokonaistoiminta-ajoilla. Rajoittimen käytön vaikutus energian suuruuteen on nähtävissä seuraavista kuvista.

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=14,045 kA
Ia=13,553 kA
DB=2989,06cm
E=35,9Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= 4 @ 910,0mm

Kuva 31. Is-rajoitin 2 s palamisajalla.

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=14,045 kA
Ia=13,553 kA
DB=352,68cm
E=4,5Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= 1 @ 910,0mm

Bus2
12,5 kV
IK'(L1)=14,045 kA
Ia=13,553 kA
DB=571,70cm
E=7,2Cal/cm2 @ 910,0mm
Category= 2 @ 910,0mm

Kuva 32. Is-rajoitin yhdistettynä perinteisellä ylivirtasuojalla 0,25 s ja 0,4 s palamisajoilla.

5.2.4. Esimerkki sulakkeiden käytöstä

Neplan-ohjelman demoversion komponenttikirjasto sisältää joitain valmiita virtaa rajoittamattomien sulakkeiden sulamiskäyriä. Sulakkeen vaikutusta valokaaren energiaan voidaan mallintaa valitsemalla kirjastosta sopivan kokoinen sulake ja liittämällä se aikaisemmin mallinnettuun verkkoon. Perinteisen sulakkeen toiminta ja vaikutus energian suuruuteen ei vastaa virtaa rajoittavaa sulaketta, mutta vikavirran suuruuden vaikutus energiaan voidaan osoittaa myös virtaa rajoittamattoman sulakkeen avulla.

Sulakkeeksi valittiin 630 A sulake ja se sijoitettiin vikaantuneen kiskon ja päämuuntajan välissä olevaan johto-osuuteen. Seuraavassa kuvassa näkyvät tulokset sulakkeen vaikutuksesta valokaaren energiaan. Kuvassa vasemmanpuoleisessa tapauksessa sulake toimii 12,970 kA vikavirralla 0,05 sekunnissa ja oikean

puoleisessa 3,08 kA vikavirralla 8,4 sekunnissa. Vikavirran suuruus pienennettiin jälkimmäisessä tapauksessa rajoittamalla syöttävän verkon oikosulkuteho arvoon 200 MVA.

Bus2 12,5 kV $IK'(L1)=25,837$ kA $I_a=24,675$ kA DB=162,88cm $E=2,1$ Cal/cm ² @ 910,0mm Category= 1 @ 910,0mm
--

Bus2 12,5 kV $IK'(L1)=6,588$ kA $I_a=6,440$ kA DB=6319,64cm $E=74,3$ Cal/cm ² @ 910,0mm Category= Not defined @ 910,0mm
--

Kuva 33. Sulakkeen (630 A) vaikutus valokaaren energiaan 12,970 kA ja 3,947 kA vikavirroilla.

Pienentyneen vikavirran vuoksi sulake toimii huomattavasti hitaammin ja aiheuttaa vaarallisen suuren (74,3 cal/cm²) energian vapautumisen.

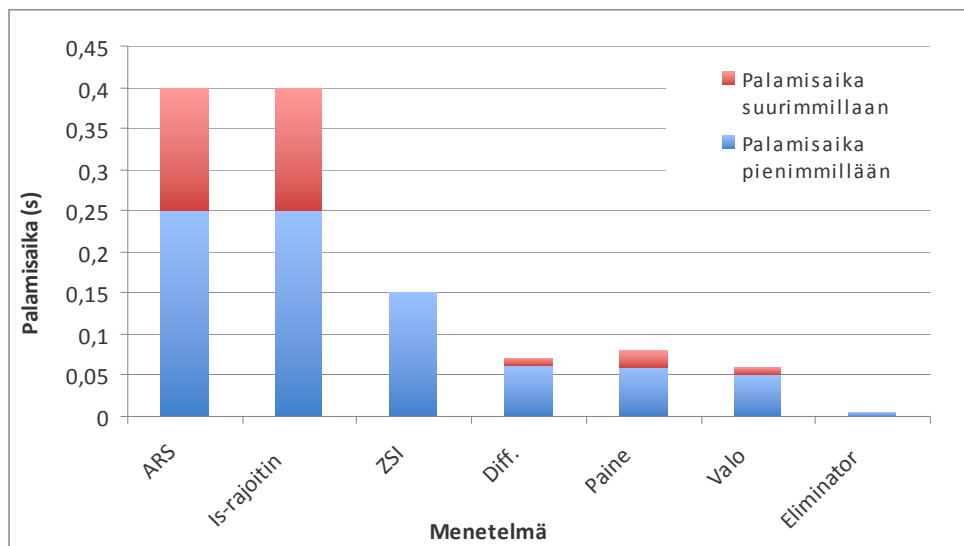
5.2.5. Yhteenveto tuloksista

Eri menetelmien vertailemiseksi on kappaleessa 5.2.3. saadut tulokset koottu seuraavaan taulukkoon. Taulukosta nähdään jokaisen suojausratkaisun ominainen toiminta-aika ja sen vaikutus energiaan ja turvaetäisyyteen. Menetelmät on järjestetty energian suuruuden mukaan laskevassa järjestyksessä.

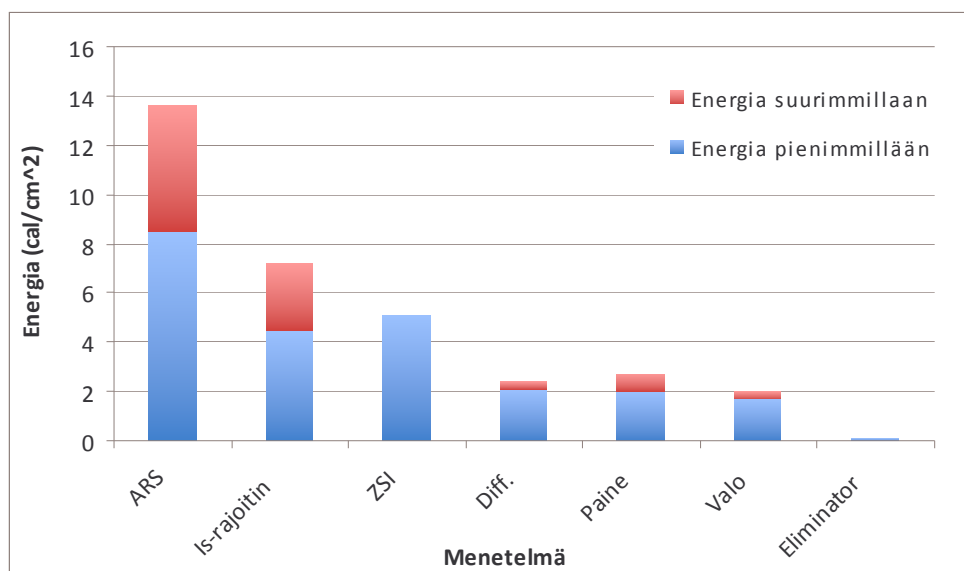
Taulukko 8. Eri suojausmenetelmien vaikutus energiaan ja turvaetäisyyteen.

Menetelmä	Palamisaika (s)	Energia (cal/cm ²)	Turvaetäisyys (m)
Valokaaren kestävät kojeistot	2 (0,25–0,4)	68,2 (8,5–13,6)	57,85 (6,83–11,06)
Is-rajoitin	2 (0,25–0,4)	35,9 (4,5–7,2)	30 (3,53–5,72)
Lukitus suojaus (ZSI)	0,15	5,1	4,04
Kiskon differentiaalisuojaus	0,062–0,07	2,1–2,4	1,62–1,85
Paineeseen perustuva suojaus	0,06–0,08	2,0–2,7	1,57–2,12
Valoon perustuva suojaus	0,051–0,06	1,7–2,0	1,33–1,57
Oikosulkulaite	0,004	0,1	0,1

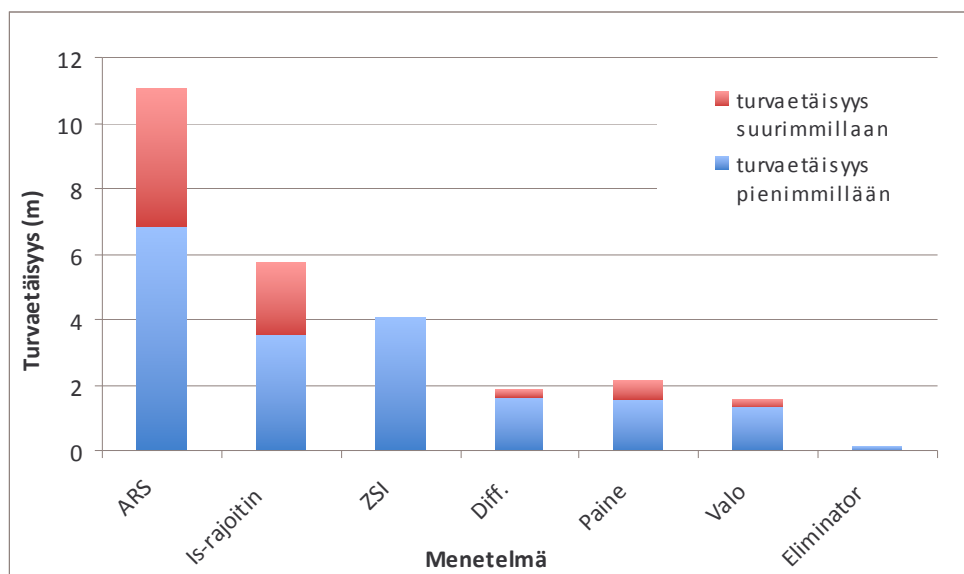
Seuraavissa kuvissa edellisen taulukon tulokset on esitetty graafisessa muodossa.



Kuva 34. Eri menetelmien palamisajat.



Kuva 35. Eri menetelmien vaikutus saapuvan energian suuruuteen.



Kuva 36. Eri menetelmien vaikutus turvaetäisyyteen.

Tuloksista nähdään, että ainoastaan oikosulkulaite on tarpeeksi nopea laskemaan energia turvalliselle tasolle (1,2 cal/cm²). Energian lisäksi on vertailussa kuitenkin huomioitava eri menetelmien asentamiseen liittyvät tekniset ominaisuudet ja rajoitteet, kuten selektiivisyys ja mahdollisuus jälkiasennukselle sekä itsevalvonnalle. Ominaisuudet eri menetelmille on koottu seuraavaan taulukoon.

Taulukko 9. Suojausmenetelmien ominaisuuksia.

Menetelmä	Selektiivinen	Jälkiasennus	Itsevalvonta
Valokaaren kestävät kojeistot			
Is-rajoitin		X	
Lukitussuojaus (ZSI)	X		
Kiskon differentiaalisuojaus	X	X	X
Paineeseen perustuva suojaus	X	X	X
Valoon perustuva suojaus	X	X	X
Oikosulkulaite	X	X	X
Virtaa rajoittava sulake	X	X	

Oikosulkulaite on menetelmistä selvästi tehokkain energian rajoittamiseksi. Oikosulkulaitteen käyttöön voi vaikuttaa sen aiheuttama kolmevaiheinen oikosulku. Joissakin tapauksissa oikosulku voi tuottaa verkon komponentteihin ylimääräistä rasiitusta, joka voi rajoittaa laitteen käyttöä.

Valoon ja paineeseen perustuvat suojaukset ovat myös tehokkaita valokaarisuojaukseen. Energia saadaan molemmilla menetelmillä rajoitettua suojarustekategoriaan 1. Menetelmien samankaltaisuuksien ja valoon perustuvan suojan nopeamman toiminnan vuoksi käytetään paineeseen perustuvaa suojaa huomattavasti vähemmän. Differentiaalisuojauksella saadaan myös nopean toiminnan vuoksi energia rajoitettua suojarusteluokkaan 1. Differentiaalisuojauksen edellyttämät lisävirtamuuntajat kasvattavat kuitenkin hankintakustannuksia.

Valokaaren kestävä kojeisto ja Is-rajoitin eivät sovellu yksinään valokaarisuojiksi, vaan ne vaativat erillisen valokaarisuojan energian rajoittamiseksi. Is-rajoitin muodostaa epäselektiivisyyskohdan oikosulkusuojauksessa (ABB 2000).

Sulakkeen käyttämistä valokaarisuojauksessa puoltaa sulakkeiden yksinkertainen toteutus ja nopea toiminta suurilla vikavirroilla. Nopeimmillaan sulake voi toimia alle puolen jakson (10 ms) aikana. Sijoittamalla Neplan-ohjelmassa valokaaren palamisajaksi 10 ms voidaan aikaisempien laskujen tavoin laskea sitä vastaavat energiat ja turvaetäisyydet. 10 ms palamisajalla valokaaren energia jää turvalliselle $0,3 \text{ cal/cm}^2$ tasolle.

Sulakkeilla vikavirran suuruus kuitenkin määrää suojan toimintanopeuden. Pienillä vikavirroilla sulake toimii hitaammin ja kokonaisenergia voi jäädä vaarallisen suureksi. Seuraavassa taulukossa on esitetty vikavirran suuruuden vaikutus energiaan ja turvaetäisyyteen.

Taulukko 10. Vikavirran vaikutus energiaan ja turvaetäisyyteen sulakesuojauksessa.

Sulakkeen läpi kulkeva Vikavirta (kA)	Palamisaika (s)	Energia (cal/cm ²)	Turvaetäisyys (m)
12,97	0,05	2,1	1,63
3,947	8,4	74,3	63,2

12,97 kA vikavirralla sulakkeen toiminta-aika on esimerkiksi 0,05 s ja energia jää 2,1 cal/cm² suuruiseksi. Vikavirran pienentäminen 3,947 kA:iin aiheuttaa sulakkeen toiminta-ajan kasvun 8,4 s:iin. Pidentynyt toiminta-aika kasvattaa energian vaaralliselle 74,3 cal/cm² tasolle. Sulakkeet rajoittavat tehokkaasti oikosulkuvirtaa pienillä nimellisvirroilla, mutta niiden käyttö rajoittuu yleensä pienjännitteelle (ABB 2000).

5.3. Excel-laskuri

Simulointi-ohjelmat ovat käteviä määrittäessä valokaaresta vapautuvan energian määrää, mutta hyvin yksinkertaisenkin tapauksen tutkiminen voi verkon mallintamisen vuoksi viedä tarpeettoman paljon aikaa. Koska yksinkertaisen laskurin saatavuus tämän työn aloitusvaiheessa rajoittui maksullisiin versioihin, toteutin MS Excel-ohjelmalla oman laskurin, joka perustuu IEEE 1584 standardin sisältämiin kaavoihin.

5.3.1. Rakenne

Laskuri koostuu kolmelle alisivulle toteutetusta laskurista. Ensimmäisellä sivulla on itse laskuri, jonne käyttäjä syöttää haluamat arvot. Seuraavassa kuvassa on esitetty itse laskuri. Laskurin käytöstä ja laskujen laskemisesta kerrotaan seuraavassa kappaleessa.

Arc Current

Configuration Open Box

Voltage level 0,208-1 kV 1-15 kV

Grounding Ungrounded and high resistance grounded systems
 Grounded systems

V= 0,4 (kV) System voltage
I_{bf}= 50 (kA) Bolted fault current for three phase faults (symmetrical RMS)
G= 20 (mm) Gap between conductors

Arcing current
I_a= 47,218

Incident Energy

Enclosure type Open air
 Switchgear
 MCC and Panels
 Cable

t= 0,5 (s) Arcing time
D= 910 (mm) Working distance

Incident Energy
E= 103,28728 J/cm²
24,686253 Cal/cm²

Db= 20380,88 mm
(Distance boundary)

Kuva 37. Excel ohjelmalla toteutettu valokaarienergialaskuri.

Seuraavassa kuvassa on laskurin toisella sivulla olevat aputaulukot laskemisen avuksi. Elektrodivälin ja työskentelyetäisyyden suuruuksiin vaikuttavat kojeiston kokoonpano ja työn kohteena olevan kojeiston osa. Laskurin käytön helpottamiseksi aputaulukkoissa on esitetty näiden etäisyyksien tyypillisiä arvoja. Sivulla on myös NFPA:n julkaisema taulukko valokaaren energialuokista.

Hazard/Risk category			Typical gaps	
Category	Energy level		Classes of equipment	Typical bus gaps, mm
0	<2 cal/cm ²		Open Air	10-40
1	<5 cal/cm ²		Low-voltage switchgear	32
2	<8 cal/cm ²		15kV switchgear	152
3	<25 cal/cm ²		5kV switchgear	104
4	<40 cal/cm ²		Low-voltage MCCs and panelboards	25
			Cable	13
			Typical working distances	
			Classes of equipment	Typical working distance, mm
			Low-voltage switchgear	610
			15kV / 5kV switchgear	910
			Low-voltage MCCs and panelboards	455
			Cable	455

Kuva 38. Toisen sivun aputaulukoita.

Seuraavassa kuvassa on esitetty kolmannen sivun laskutoimituksia. Sivun sisältää suurimman osan laskurin suorittamista laskuista, joita käyttäjän ei ole tarpeellista nähdä laskuria käyttäessä. Laskujen sijoittaminen erilliselle sivulle mahdollistaa laskurin ensimmäisen sivun esittämisen selkeämpänä ja käyttäjätavallisempänä.

Normalized energy:	
Arc current	K1= -0,792 Open
K= -0,097	-0,555 Box
Voltage	K2= 0
1: <1kV	-0,113
2: >1kV	
I _{as} = 22,560 kA	1 Ungrounded and high resistance grounded systems
I _a = 47,218 kA	2 Grounded
47,21799	
E _{inc} = 14,57841211 J/cm ²	Normalized incident Energy (0,2s and 610mm)
	3,494324118 Cal/cm ²
Energy	
Enclosure Type	0,208 to 1 kV >1 to 15 kV
Open air	2 2
Switchgear	1,473 0,974
MCC and Panels	1,641 -
Cable	2 2
0,208 to 1 kV	>1 to 15 kV
1,473	0,974
Protection bo	

Kuva 39. Kolmannen sivun apulaskuja.

5.3.2. Käyttö

Laskuri koostuu kahdesta erillisestä osasta, jotka on otsikoitu ja alleviivattu itse laskurissa (kuva 37, sivu 86). Ensimmäisessä osassa lasketaan valokaarivirran suuruus ja toisessa energian ja turvaetäisyyden suuruudet. Valokaarivirran saamiseksi voidaan käyttää vain laskurin alkuosaa. Energian ja turvaetäisyyden laskemiseksi tarvitaan kuitenkin valokaarivirta, joten tuloksen saamiseksi on ensin laskettava virran suuruus. Valinnat tehdään painonapeilla, jotka vaikuttavat ohjelman käyttämien kaavojen valitsemiseen. Ohjelma on asetettu valitsemaan oikeat kaavat nauhoitettavien makrojen avulla. Makrot myös muuttavat syötettävien kenttien pohjaväritystä niiden tarpeellisuuden mukaan. Laskujen kannalta oleelliset kentät muuttuvat keltaiseksi ja tarpeettomat kentät valkoiseksi/harmaaksi. Käyttäjän ei tarvitse syöttää tarpeettomiin kenttiin tietoa, koska ne eivät vaikuta tulokseen. Laskurin antamat tulokset ovat sinisellä värillä olevissa soluissa.

Laskurin käyttö aloitetaan valitsemalla laitteiston kokoonpano (Open/Box), jännitetason suuruus ja käytettävä maadoitustapa. Keskijännitetason (1-15 kV) valitseminen aiheuttaa jännitteen arvon sisältävän solun muuttumisen harmaaksi ja se voidaan tällöin jättää täyttämättä. Jännitteen (ei keskijännitteellä), prospektiivisen vikavirran ja elektrodivälin syöttämisen jälkeen valokaarivirran (I_a) suuruus saadaan suoraan sinisellä pohjalla olevaan soluun.

Energian suuruuden laskeminen aloitetaan valitsemalla valokaaren syttymispaikan tyyppi. Tässä valinta tehdään keltaisella värillä olevien vaihtoehtojen välillä. Energian suuruus saadaan syöttämällä valokaaren palamisajan ja työskentelyetäisyyden suuruudet. Laskuri ilmoittaa energian molemmilla käytössä olevilla yksiköillä. Samalla ohjelma antaa suoraan myös turvaetäisyyden

suuruuden. Turvaetäisyys on laskettu laskurilla suoraan standardin määrittelemällä turvarajalla 1,2 cal/cm².

5.3.3. Tuloksia Excel-laskurilla

Excel-laskurin toimivuus ja kappaleessa 5.2.3. tehdyt laskelmat voidaan todeta oikeiksi uusimalla aikaisemmin suoritettut laskelmat eri suojausmenetelmien vaikutuksesta valokaaren energiaan myös Excel-laskurilla. Laskuriin syötetyt Neplan-ohjelmalla mallinnettua verkkoa vastaavat arvot ja valinnat on esitetty seuraavassa taulukossa. Prospektiivinen vikavirta saadaan suoraan Neplan-ohjelman mallista. Vikavirran suuruus Is-rajoitinta käytettäessä on 14,045 kA johtuen verkon poikittaiskatkaisijan toiminnasta aiheutuvasta verkon pienentymisestä. Muita suojausmenetelmiä laskettaessa käytettiin 25,711 kA vikavirtaa.

Taulukko 11. Excel-laskurissa käytetyt arvot ja laitteistosta riippuvat valinnat.

Configuration	Box
Voltage level	1-15 kV
Grounding	Grounded systems
V	Ei vaikutusta tulokseen
I _{bf}	25,711 kA (I _s -rajoittimella 14,045kA)
G	152 mm
Enclosure type	Switchgear
t	-
D	910 mm

Seuraava taulukko sisältää tulokset palamisajan vaikutuksesta energiaan ja turvaetäisyyteen.

Taulukko 12. Eri suojausmenetelmien tuloksia Excel-laskurilla.

Menetelmä	Palamisaika (s)	Energia (cal/cm ²)	Turvaetäisyys (m)
Valokaaren kestävät kojeistot	2 (0,25–0,4)	68,0 (8,5–13,6)	57,72 (6,83–11,1)
Is-rajoitin	2 (0,25–0,4)	35,8 (4,5–7,2)	30 (3,53–5,72)
Lukitus suojaus	0,15	5,1	4,04
Kiskon differentiaalisuojaus	0,062–0,07	2,1–2,4	1,63–1,85
Paineeseen perustuva suojaus	0,06–0,08	2,0–2,7	1,58–2,12
Valoon perustuva suojaus	0,051–0,06	1,7–2,0	1,33–1,58
Oikosulkulaite	0,004	0,1	0,1

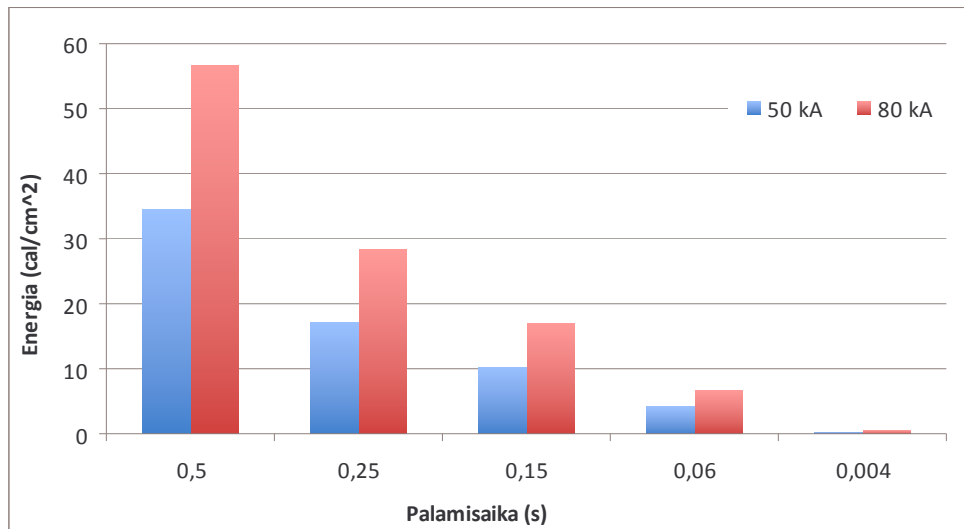
Taulukon tuloksia voidaan verrata simulointi-ohjelmalla tehtyihin laskelmiin (taulukko 8, sivu 81) ja todeta niiden olevan yhteneväiset. Pienet poikkeamat johtuvat ohjelman ja laskurin pyöristysvirheistä.

Excel-laskurilla voidaan nopeasti laskea eri parametrien vaikutus energiaan ja turvaetäisyyteen. Seuraavassa taulukossa on esitetty tulokset vaihtamalla vikavirtaa ja palamisaikaa laskurin muiden parametrien pysyessä ennallaan

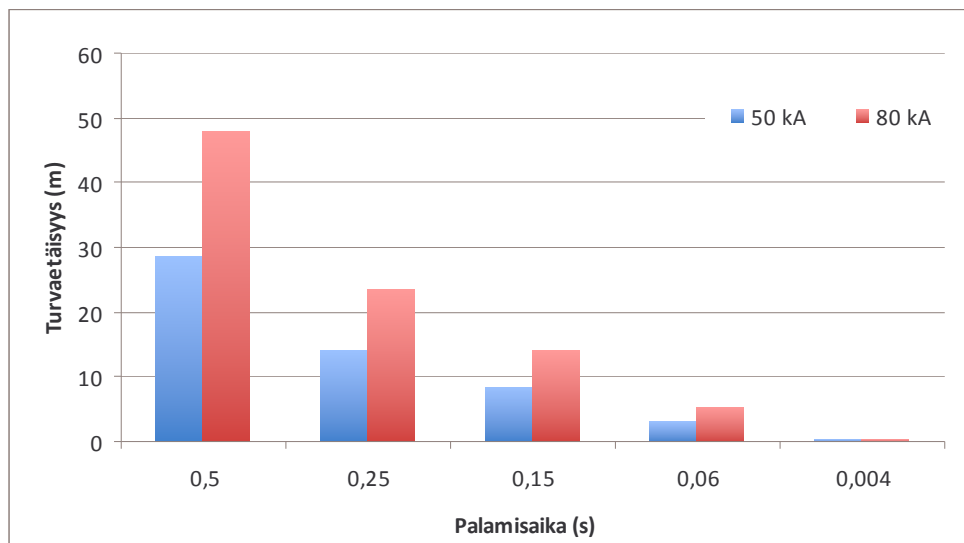
Taulukko 13. Esimerkkituloksia 50 kA ja 80 kA vikavirroilla.

Palamisaika (s)	50 kA		80 kA	
	Energia (cal/cm ²)	Turvaetäisyys (m)	Energia (cal/cm ²)	Turvaetäisyys (m)
0,5	34,5	28,7	56,8	48
0,25	17,2	14,1	28,4	23,5
0,15	10,3	8,3	17	14
0,06	4,1	3,2	6,8	5,4
0,004	0,3	0,2	0,5	0,34

Seuraavissa kuvissa edellisen taulukon tulokset on esitetty graafisessa muodossa.



Kuva 40. Palamisajan vaikutus energian suuruuteen 50 kA ja 80 kA vikavirroilla.



Kuva 41. Palamisajan vaikutus turvaetäisyyteen 50 kA ja 80 kA vikavirroilla.

Tuloksista nähdään vikavirran suuri vaikutus energian suuruuteen. Suurilla vikavirroilla tarvitaan erittäin nopeasti toimiva suojausmenetelmä energian pi-

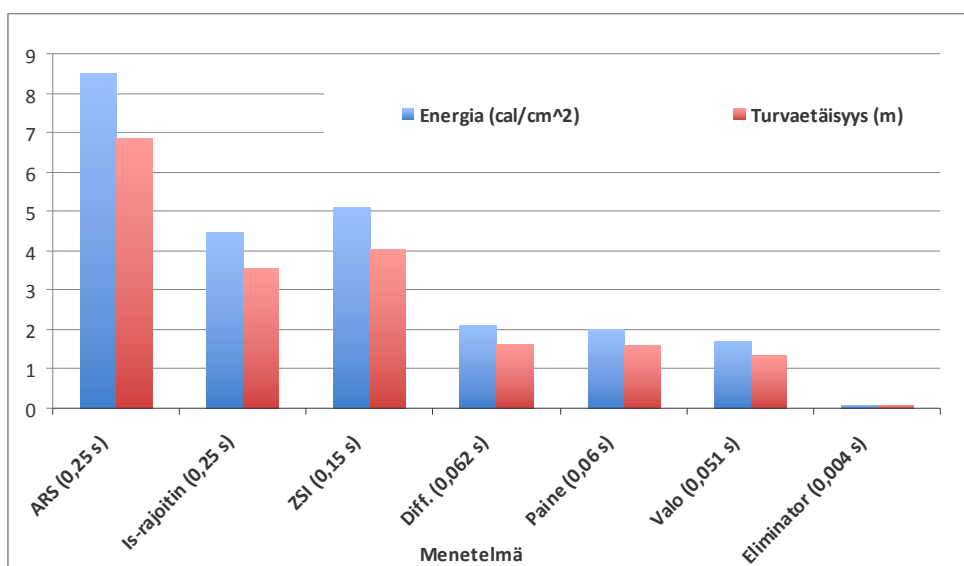
tämiseksi turvallisella tasolla. Kummallakaan vikavirralla 60 ms palamisaika ei riitä pudottamaan energiaa turvalliselle tasolle, vaan suojan toimintanopeuden tulisi olla vieläkin nopeampi. Suojausmenetelmistä ainoastaan oikosulkulaitteiston nopea 4 ms toiminta-aika on kyllin nopea energian rajoittamiseksi turvalliselle tasolle riippumatta vikavirran suuruudesta. Tässä tapauksessa 910 mm päässä valokaaresta energian saamiseksi turvalliselle tasolle täytyy palamisajan olla alle 17,3 ms (50 kA) ja 10,5 ms (80 kA).

6. YHTEENVETO

Kojeistoissa syttyivistä valokaarista suurin osa saa alkunsa ihmisten tekemistä käyttövirheistä. Käyttövirheen seurauksena syttynyt valokaari on erityisen vaarallinen lähellä olevaan työntekijään kohdistuvan paineen ja kuumuuden vuoksi. Valokaariviati aiheuttavat vuosittain useita loukkaantumisia ja kuolemantapauksia. Pelkästään Amerikassa valokaaren aiheuttamia kuolemantapauksia ilmenee keskimäärin yhdestä kahteen joka päivä.

Valokaaren vaikutusta voidaan mitata standardien sisältämien energialaskujen avulla. Laskut määrittelevät valokaaren luovuttaman valokaaren läheisyydessä olevan ihmisen iholle saapuvan energian suuruuden ja tätä energiaa vastaavan suositeltavan suojarustuksen laadun. Suojarustuksen lisäksi valokaarelta suojautumiseksi on olemassa erilaisia teknisiä ratkaisuja. Valokaaren haittavaikutukset ovat riippuvaisia jännitteestä, valokaaren palamisajasta ja vikavirran suuruudesta. Suurien tehojen ja vikavirtojen rajoittamiseen liittyvien ongelmien vuoksi saataville on tullut useita erilaisia palamisaikaa rajoittavia ratkaisuja. Joillakin suojaratkaisuilla saavutetaan jopa alle 5 ms kokonaistoiminta-aika. Pienen toiminta-ajan ansiosta energia jää turvalliselle tasolle eikä aiheuta suuria tuhoja.

Seuraavassa kuvassa on esitetty eri menetelmien vaikutuksia energian suuruuteen ja turvaetäisyyteen käyttäen laskuissa jokaisen ratkaisun osalta pienintä mahdollista palamisaikaa. Valokaaren kestäväällä kojeistolla ja Is-rajoittimella on lisäksi käytössä perinteinen ylivirtasuojaus. Valokaaren energia on ihmiselle turvallisella tasolla turvaetäisyyden ilmoittaman matkan päässä valokaaresta. Parannettavissa olevan palovamman aiheuttava energia määritellään olevan ihmiselle turvallinen. Tämä raja on 1,2 cal/cm².



Kuva 42. Suojausmenetelmien vaikutus energian suuruuteen ja turvaetäisyyteen.

Vertailtaessa menetelmiä on energian lisäksi kuitenkin huomioitava eri ratkaisujen ominaisuudet ja heikkoudet. Lopulliseen suojausratkaisuvalintaan vaikuttaa tietysti myös hankinnan kokonaishinta.

LÄHDELUETTELO

ABB (2000). *Teknisiä Tietoja ja Taulukoita* lyh.TTT. Yhdeksäs painos. Vaasa: Vaasa Oy.

ABB (2007). Electric arc-the unpredictable phenomenon. *Vector* july, 48-50 [online] [siteerattu 12.3.2008]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.eepublishers.co.za/view.php?sid=9763>>.

ABB (2008). *Is-Limiter*. Kalvosarja [online] [siteerattu 25.7.2008]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:[http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/dac756693ea8746dc125744f004a69b8/\\$File/IS-Begrenzer_E.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/dac756693ea8746dc125744f004a69b8/$File/IS-Begrenzer_E.pdf)>.

Ammerman, Ravel F., P. K. Sen & John P. Nelson (2007). *Arc Flash Hazard Incident Energy Calculations a Historical Perspective and Comparative Study of the Standards: IEEE 1584 and NFPA 70E*.

Andrichak, J. G. & Cardenas Jorge (1995). Bus Differential Protection. *Western Protective Realy Conference* Spokane, Washington 24.10.1995.

Areva (2005). *Network Protection & Automation guide*. Barcelona, Spain : Cayfosa. 497 s. ISBN 2-9518589-0-6.

Aro, Martti, Jarmo Elovaara, Matti Karttunen, Kirsi Nousiainen & Veikko Palva (2003). *Suurjännitetekniikka*. 2. Painos. Helsinki: Otatieto. 520 s. ISBN 951-672-320-9.

Aura, Lauri & Antti Tonteri (1993). *Sähkölaitostekniikka*. Porvoo, Helsinki, Juva. WSOY. ISBN 951-0-18558-2.

Camto. Internet sivut [online] [siteerattu 2.2.2009]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.camto.dk/Eng/index.htm>>.

Coyle, Timothy (2002). Performance testing low-voltage ground-fault protection. *IEEE Transactions on Industry Applications* 38:4 981-989. ISSN 0093-9994.

Crow, Daryld R. & Timothy M. Crinko (2006). NFPA 70E: an Overview of the 2004 Edition and Future Directions. *IEEE Industry Applications* 12:1 43-49. ISSN 1077-2618.

Data Bulletin (2000). Reducing Fault Stress with Zone-Selective Interlocking. *Schneider Electric* [online] [siteerattu 7.4.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:<http://ecatalog.squared.com/techlib/docdetail.cfm?oid=0900892680137203>>.

Davis, Chet, Conrad St. Pierre, David Castor, Robert Luo & Satish Shrestha (2003). *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards*. Esa Inc. 133 s [online] [siteerattu 13.6.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:<http://www.agsrhichome.bnl.gov/AGS/Accel/SND/Electrical%20Safety/Practical%20Solution%20Guide%20to%20Arc%20Flash%20Hazards.pdf>>

Elovaara, Jarmo, Yrjö Laiho (2005). *Sähkölaitostekniikan Perusteet*. 5. painos. Helsinki: Otatieto 487 s. ISBN 951-672-285-7.

Garzon, Ruben (2003). The Arc Terminator: An Alternative to Arc Proofing. *IEEE Industry Applications*.9:3 51-55. ISSN 1077-2618.

General Electric (2008). UR Family Universal Relay Family IEDs. *Brochure* [online] [siteerattu 15.8.2008]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.esac.com/Downloads/GE%20UR%20Family%20Brochure.pdf>>.

Heinsalmi, Kaisa & Mariana Mattila (2007). *Toimialan onnettomuudet 2006*. TU-KES-julkaisu 3/2007. Turvatekniikan keskus, Helsinki. ISBN 952-5649-03-2.

IEEE (2002). *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, IEEE std 1584-2002*. USA: IEEE Inc. 113 s. ISBN 0-7381-3352-3.

Kalkstein, Edward W., Richard L. Doughty, Alfred E. Paullin, James M. Jackson & Jerry L. Ryner (1995). Safety benefits of Arc-Resistant Metalclad Medium-Voltage Switchgear. *IEEE Industry Applications* 31:6 1402-1411. ISSN 0093-9994.

Kauhaniemi, Kimmo, Ilari Ristolainen, Pekka Saari, Henry Lågland, Heikki J. Salminen, Martti Hokkanen & Bertil Brännbacka (2005). *Simulointiympäristö Loppuraportti*. VTT Prosessit. Vaasan yliopisto.

Kay, John A. (2006). Testing and Certification of Medium Voltage Control Centers to Arc Resistant Standards. *Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006*. ISBN 1-4244-0281-6.

- Lee, Ralph H. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-18:3, 246-251. ISSN 0093-9994.
- Lee, Ralph H. (1987). Pressure developed by arcs. *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-23:4, 760-764. ISSN 0093-9994.
- Martikainen, Seppo (1974). *660 V:n kennokeskuksen valokaari ja oikosulkukestoisuuden tutkiminen*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- Mörsky, Jorma (1993). *Relesuojaustekniikka*. Toinen panos. Hämeenlinna: Otatieto. 459 s. ISBN 951-672-175-3.
- National Fire Protection Association (2004). *NFPA 70E 2004: Standard for Electrical Safety in the Workplace*.
- Neitzel, Dennis K. (2007). Electrical Hazard Analysis. *IEEE Industry Applications* 13:3 12-16. ISSN 1077-2618
- Norman, T. Stringer (2003). An Enhanced Method of Providing Sensitive Bus Fault Protection. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 39:3 600-604. ISSN 0093-9994.
- Parsons, Antony (2005). Optimizing Arc-Flash Protection Strategies. *Consulting-Specifying Engineer* 14.3.2005 [online] [siteerattu 20.11.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:<http://www.csemag.com/article/CA602446.html?nid=2462&rid=>>.

Phillips, Jim & Mike Frain (2007). Fear of flashover. *Power Engineer* 18:3, 34-37. ISSN 1479-8344.

Prysmian cables and systems. Internet sivut [online] [siteerattu 9.12.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:http://www.fi.prysmian.com/fi_FI/cs/index.html>.

Schweitzer Engineering Laboratories (2008). SEL-487B Bus Differential and Breaker Failure Relay Powerful Solution for Busbar Differential Protection. *Flyer* [online] [siteerattu 21.8.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:http://www.selinc.com/flyers/487B_Flyer.pdf>.

Siemens. Zone Selective Interlocking (ZSI) Application and Testing Guide Siemens WL UL489 and UL1066 Air Circuit Breakers (2007). *Paper* [online] [siteerattu 15.6.2008]. Saatavana World Wide Webistä:
<URL:<http://www2.sea.siemens.com/NR/rdonlyres/499BE368-DD8E-4208-B124-30503F20508B/0/WLZSIApplicationandTestingGuide.pdf>>.

Swencki, Steve J., David Burns, James Smith, Gary Wetzel, David Roybal & Daleep Mohla (2007). Electrical Safety and Arc-Flash Hazards: a comprehensive Overview of the Standards. *IEEE Industry Applications* 13:3 41-50. ISSN 1077-2618

Terzija, Vladimir V. & Hans-Jürgen Koglin (2004). On the Modelling of long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation. *IEEE Transactions on Power Delivery* 19:3, 1012-1017. ISSN 0885-8977.

Valdes, Marcelo, Paul Hamer, Tom Papallo, Narel Radoslaw & Bill Premerlani (2007). Zone based Protection for Low Voltage Systems; Zone Selective Interlocking, Bus Differential and the Single processor Concept. *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference Calgary, Alta 17-19.9.2007.*

Vamp (2007a). *Valokaarikoulutus*. Kalvosarja. Julkaisematon.

Vamp (2007b). *Vamp 221 Valokaarisuojausjärjestelmä: Käyttö ja konfigurointiohje Tekninen selostus* [online] [siteerattu 2.12.2008]. Saatavana World Wide Webistä: <URL:<http://www.vamp.fi/english>>.

Wilson, Roobert A., Rainer Harju, Juha Keisala, Sethuraman Ganesan (2007). Tripping with the Speed of Light: Arc Flash Protection. *60th annual conference for protective relay engineers* College Station, TX 27-29.3.2007. ISBN 1-4244-0995-0.

Zahalka, Gary & Hugh Hoagland (2007). *Arc Flash Hazard assessment requirements*. Rural Electric Power Conference, 2007 IEEE C5-C5-6. ISBN 1-4244-1003-7

LIITE 1. Valokaaristandardien historiallinen kehitys (Ammerman ym. 2007).

