



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joonas Lahti

Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

13.5.2019

Tekijä Otsikko	Joonas Lahti Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna
Sivumäärä Aika	84 sivua 13.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tuomo Heikkinen Diplomi-insinööri Risto Kivisaari
<p>Insinööriyön aiheena oli tutkia kaapelivarusteiden eli jatkosten ja päätteiden ominaisuuksia keskijännitejakeluverkon kannalta. Tavoitteena oli selvittää minkälaisia vaatimuksia suomalaisen jakeluverkon ympäristö- ja käyttöolosuhteet asettavat kaapelivarusteille ja miten varusteiden vaatimustenmukaisuutta voidaan arvioida jakeluverkon todellisten olosuhteiden kannalta. Lisäksi tavoitteena oli selvittää Prysmian Groupin varusteiden ominaisuuksia ääriolosuhteissa ja miten erilaiset asennusvirheet vaikuttavat jatkoksen toimintaan. Työ tehtiin Prysmian Group Finland Oy:n aloitteesta.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla suomalaisessa jakeluverkossa käytettäviin kaapeleihin ja varusteisiin sekä niiden ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin. Tutkimalla kansainvälisiä varustestandardia ja -tutkimuksia selvitettiin, mitä menetelmiä voidaan käyttää varusteiden vaatimustenmukaisuuden arviointiin ja miten niitä voidaan soveltaa suomalaiseen jakeluverkkoon asennettaville varusteille.</p> <p>Työn aikana tehtiin yli kaksi vuotta kestänyt pitkäaikaiskoe, joka sisälsi sekä kuormitus- että pakkasjaksoja. Pitkäaikaiskokeen jälkeen koekappaleiden kuntoa arvioitiin sähköisillä kokeilla ja todellista elinikää mallinnettiin matemaattisilla menetelmillä. Lisäksi työssä tutkittiin aiemmin julkaistuja tutkimuksia asennusvirheiden vaikutuksesta varusteiden toimintaan ja simuloitiin asennusvirheitä, joilla selvitettiin kuinka ne vaikuttavat osittaispurkausten esiintyvyyteen ja jännitekestoisuuteen Prysmian Groupin jatkoksessa.</p> <p>Työssä havaittiin, että kansainvälisten standardien mukaiset tyyppikokeet eivät välttämättä takaa varusteille riittävän pitkää käyttöikää suomalaisessa jakeluverkossa. Työssä esitellyt lisäkokeet osoittautuivat hyväksi keinoksi arvioida varusteiden vaatimustenmukaisuutta, kuten kosketussuojan termistä oikosulkukestoisuutta, jatkoksen vesitiiveyttä ja varusteiden toimintaa alhaisissa lämpötiloissa. Pitkäaikaiskokeen tulosten perusteella tutkittujen varusteiden eliniän voidaan odottaa vastaavan kaapelijärjestelmälle asetettua vaatimusta.</p> <p>Aiempien asennusvirhetutkimusten ja tässä työssä tehdyn asennusvirheiden simuloinnin perusteella havaittiin, että niillä on suuri vaikutus keskijännitejakeluverkon toimintaan. Työ antaa käytännönläheisiä ohjeita asennustyön asianmukaiseen tekemiseen, joita noudattamalla voidaan välttää valtaosa asennusvirheistä.</p>	
Avainsanat	keskijännitevaruste, kaapelivaruste, kaapelijatkos, kaapelipääte, kylmäkutiste, kylmäkutistejatkos, kylmäkutistepääte, pistokepääte, asennusvirhe, pitkäaikaiskoe

Author Title	Joonas Lahti Characteristics of Accessories from Medium Voltage Distribution Network Perspective
Number of Pages Date	84 pages 13 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer Risto Kivisaari, Cable Design Manager (M.Sc in Electrical Engineering)
<p>The purpose of this thesis work was to study the characteristics of cable accessories including joints, terminations and separable connectors from the perspective of medium voltage distribution network. The objective was to study the environmental and operational conditions in the Finnish medium voltage distribution network, and how these are considered when conformity assessment for accessories is taking place. Additionally, the aim was to test the performance of Prysmian Group's accessories in extreme conditions and how the installation-based defects affect the joints. The study was commissioned by Prysmian Group Finland Oy.</p> <p>First, the background research was made for commonly used cables and accessories in the Finnish medium voltage distribution network and their environmental and operational conditions. Different methods of conformity assessment used in international standards and studies were presented and how these could be utilized for accessories used in Finnish network was evaluated.</p> <p>The study included a long-term test which lasted over two years and comprised heating cycles and extremely low temperature cycles. After the long-term test, the condition of samples was tested electrically and real lifetime was evaluated mathematically. The effects of common installation errors on partial discharge activity and voltage withstand of joints were tested in laboratory.</p> <p>The result shows that type tests based on international standards does not necessarily ensure the sufficient lifetime for accessories in Finnish distribution network. The introduced additional tests proved to be an effective method of conformity assessment for accessories, especially for the thermal short-circuit withstand of metallic screen connection, joint water tightness and accessories performance in extremely low temperatures. The results of long-term test show that the accessories seem to fulfill the requirement of technical service life of cable systems in the Finnish distribution network.</p> <p>The conclusion from installation error studies and result from the tests is that the effect of installation errors for performance of accessories can be significant. This thesis describes practically how to avoid the vast majority of installation errors.</p>	
Keywords	Medium voltage accessories, cable accessories, joint, termination, separable connector, cold-shrink, heat-shrink, cold-apply, slip-on, long term test

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Keskijännitejakeluverkko	3
3	Keskijännitekaapelit	5
3.1	Kaapelirakenteet ja ominaisuudet	5
3.2	AHXAMK-W-kaapeli	9
4	Keskijännitekaapelivarusteet	11
4.1	Varusterakenteet ja ominaisuudet	11
4.1.1	Kylmäkutistevarusteet	12
4.1.2	Kylmäasennettavat varusteet	13
4.1.3	Lämpökutistevarusteet	14
4.1.4	Varusteiden kentänohjaustekniikat	15
4.1.5	Johdinliitokset	22
4.2	Sisä- ja ulkopäätteet	25
4.3	Pistokepäätteet	27
4.4	Jatkokset	34
5	Jakeluverkon vaatimuksia varusteille	35
5.1	Ympäristöolosuhteet	36
5.1.1	Lämpötilavaihtelut	36
5.1.2	Ilmankosteus ja epäpuhtaudet	37
5.1.3	Maaperän kosteus	39
5.2	Verkon normaalikäyttö	40
5.3	Verkon vikatilanteet	40
6	Varusteiden vaatimustenmukaisuuden arviointi	43
6.1	Standardien mukaiset tyyppikokeet	43
6.2	EDF-vesiällaskoe	45
6.3	Kosteuden vaikutus eri jatkosmateriaalien toimintaan	48
6.4	Kosketussuojaliitosten terminen oikosulkukestoisuus	49

6.4.1	Liitostapa	50
6.4.2	Kaapelin kosketussuojan terminen oikosulkukestoisuus	52
6.4.3	Maadoituspunoksen ja -sukan terminen oikosulkukestoisuus	52
6.4.4	Varusteen kosketussuojaliitoksen terminen oikosulkukestoisuus	53
7	Varusteiden pitkäaikaiskoe	54
7.1	Kokeen kuvaus	55
7.2	Kokeen kattavuuden arviointi	56
7.3	Koekappaleet ja -järjestely	57
7.4	Loppukokeet ja -tarkastukset	58
7.4.1	Häviökerroin $\tan \delta$	58
7.4.2	Eristysresistanssi	60
7.4.3	Jännitekestoisuus	61
7.5	Varusteiden eliniän mallintaminen	62
7.5.1	Arrhenius-malli	62
7.5.2	Inverse power law -malli	64
7.5.3	Arvio varusteiden eliniästä	65
8	Varusteiden asennusvirheet	66
8.1	Helen Sähköverkko Oy:n kokemuksia	67
8.2	Muut tutkimukset varusteiden asennusvirheistä	68
8.3	Asennusvirheiden synty ja niiden välttäminen	69
8.4	AHXAMK-W-kaapelin käsittely jatkosasennuksessa	71
8.5	Elaspeed-jatkoksen asennus	76
8.6	Asennusvirheiden simulointi	77
9	Yhteenveto	83
	Lähteet	85

Lyhenteet ja käsitteet

ajk	Aikajälleenkytkentä.
AC	Alternating Current. Vaihtojännite.
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization. Euroopan sähkötekni- sen alan standardointijärjestö
DC	Direct Current. Tasajännite.
D _{ca-s2,d2,a2}	CPR-paloluokitus.
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer. Eteenipropeenidieeniterpolymeerik- umi.
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen sähkötekni- sen alan standardointijärjestö.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Sähkö- ja elektroniikkain- sinöörien yhdistys.
PD	Partial Discharge. Osittaispurkaus.
PE	Polyethylene. Polyeteeni.
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni. Englanniksi XLPE.
pjk	Pikajälleenkytkentä.
PVC	Polyvinyl Chloride. Polyvinyylikloridi.
SESKO	Suomen sähkötekni- sen alan kansallinen standardointijärjestö.
SF6	Sulfur hexafluoride. Rikkiheksafluoridikaasu.

$\tan \delta$	Eristeen häviökerroin.
$\Delta \tan \delta$	Eristeen häviökertoimen kulmakertoimen arvo.
TUTU	Tip Up of the Tip Up. Eristeen häviökertoimen muutoksen epälineaarisuuden arvo.
U_0	Kaapelijärjestelmän johtimen ja maan potentiaalinen välinen nimellisjännite.
U	3-vaiheisen kaapelijärjestelmän johtimien välinen nimellisjännite eli pääjännite.
U_m	Kaapelijärjestelmän suurin sallittu käyttöjännite.
U_i	Inception voltage. Osittaispurkausten syttymisjännite.
U_e	Extinguishing voltage. Osittaispurkausten sammumisjännite.
VLF	Very Low Frequency. Erittäin matala taajuus.

1 Johdanto

Vuonna 2013 voimaan astunut uusi Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkkoyhtiöt parantamaan sähkönjakelun toimintavarmuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa merkittäviä lisäinvestointeja ilmajohtoverkon muuttamiseksi maakaapeliverkoksi. Kaapelointi on yleistynyt myös kaupunkien ja taajamien kasvun myötä. Maan alle asennetut kaapeliverkot ovat säävarmempia kuin ilmajohtoverkot, mutta niissä syntyvät viat saattavat aiheuttaa moninkertaisia korjauskustannuksia ilmajohtoverkkoon verrattuna.

Keskijännitejakeluverkon kaapelijärjestelmä sisältää kaapelin lisäksi kaapelivarusteet. Suomessa 1980-luvun loppupuolelta asti käytössä olleen AHXAMK-W-kaapelin on todettu soveltuvan erinomaisesti Suomen ympäristö- ja käyttöolosuhteisiin ja sen yli 40 vuoden tekninen elinikä vastaa hyvin jakeluverkon vaatimuksia. Kaapelivarusteiden soveltuvuutta Suomen jakeluverkkoon on tarkasteltu suhteellisen vähän. Kansainvälisen sähköteknisen alan standardointijärjestön IEC:n (International Electrotechnical Commission) ja Euroopan sähköteknisen alan standardointijärjestön CELELECin (European Committee for Electrotechnical Standardization) standardit esittävät varusteille perusvaatimustason, mutta ne eivät välttämättä takaa vaadittua pitoaikaa suomalaisen jakeluverkon ympäristö- ja käyttöolosuhteissa.

Kaapeli toimitetaan työmaalle koestettuna ja sen asennuksen aikana syntyneet viat voidaan yleensä havaita ennen käyttöönottoa tehtävillä mittauksilla. Kaapelivarusteet sen sijaan asennetaan usein hankalissa olosuhteissa ja vaihtelevalla ammattitaidolla. Varusteiden asentamisen aikana syntyneet virheet voivat olla vaikeasti havaittavissa ja ne saattavat johtaa läpilyöntiin vasta vuosien päästä aiheuttaen verkkoyhtiöille suuria kustannuksia.

Työssä tutkitaan Prysmian Group Finland Oy:n aloitteesta kaapelivarusteiden ominaisuuksia keskijännitejakeluverkon kannalta. Lähtökohtaisesti varusteiden pitää täyttää kaapelille asetetut vaatimukset jännitekestoisuudesta, kuormitettavuudesta, vikavirtakestoisuudesta ja teknisestä eliniästä. Suomen ympäristöolosuhteet asettavat myös erityisvaatimuksia varusteille. Lisäksi työssä tutkitaan asennusvirheiden vaikutuksia aiemmin tehtyjen tutkimusten pohjalta ja asennusvirheiden simuloinnilla.

Työn alussa tarkastellaan keskijänniteverkon käyttötarkoitusta ja rakennetta. Sen jälkeen tutustutaan kaapelien ja varusteiden rakenteisiin ja ominaisuuksiin.

Työn keskivaiheilla tutkitaan, minkälaisia vaatimuksia suomalainen keskijänniteverkko asettaa varusteille ympäristö- ja käyttöolosuhteiden osalta. Tutustumalla varusteiden tyyppikoevaatimuksiin ja kansallisiin sekä kansainvälisiin tutkimuksiin arvioidaan kuinka hyvin ne vastaavat jakeluverkon vaatimuksia.

Lopuksi esitellään varusteille suoritettu pitkäaikaiskoe ja tarkastellaan asennusvirheiden vaikutusta keskijännitejärjestelmien toimintavarmuuteen. Yli kaksi vuotta kestäneessä pitkäaikaiskokeessa simuloitiin vaativia ympäristö- ja käyttöolosuhteita. Koe tehtiin kiihdytettynä vanhennuskokeena normaalia korkeammalla jännitteellä ja kuormitusvirralla. Kokeen aiheuttamaa vanhenemista arvioidaan matemaattisesti laskemalla teoreettinen käyttöaika normaalissa käytössä.

Asennustyön laadun merkitys on suuri. Varusteiden asennusvirheet saattavat altistaa osittaispurkauksille, mikä alentaa niiden jännitekestoisuutta ja johtaa läpilyöntiin ennen pitkää. Työssä käydään käytännönläheisesti läpi, mitä laadukas varusteasennus edellyttää.

Prysmian Group

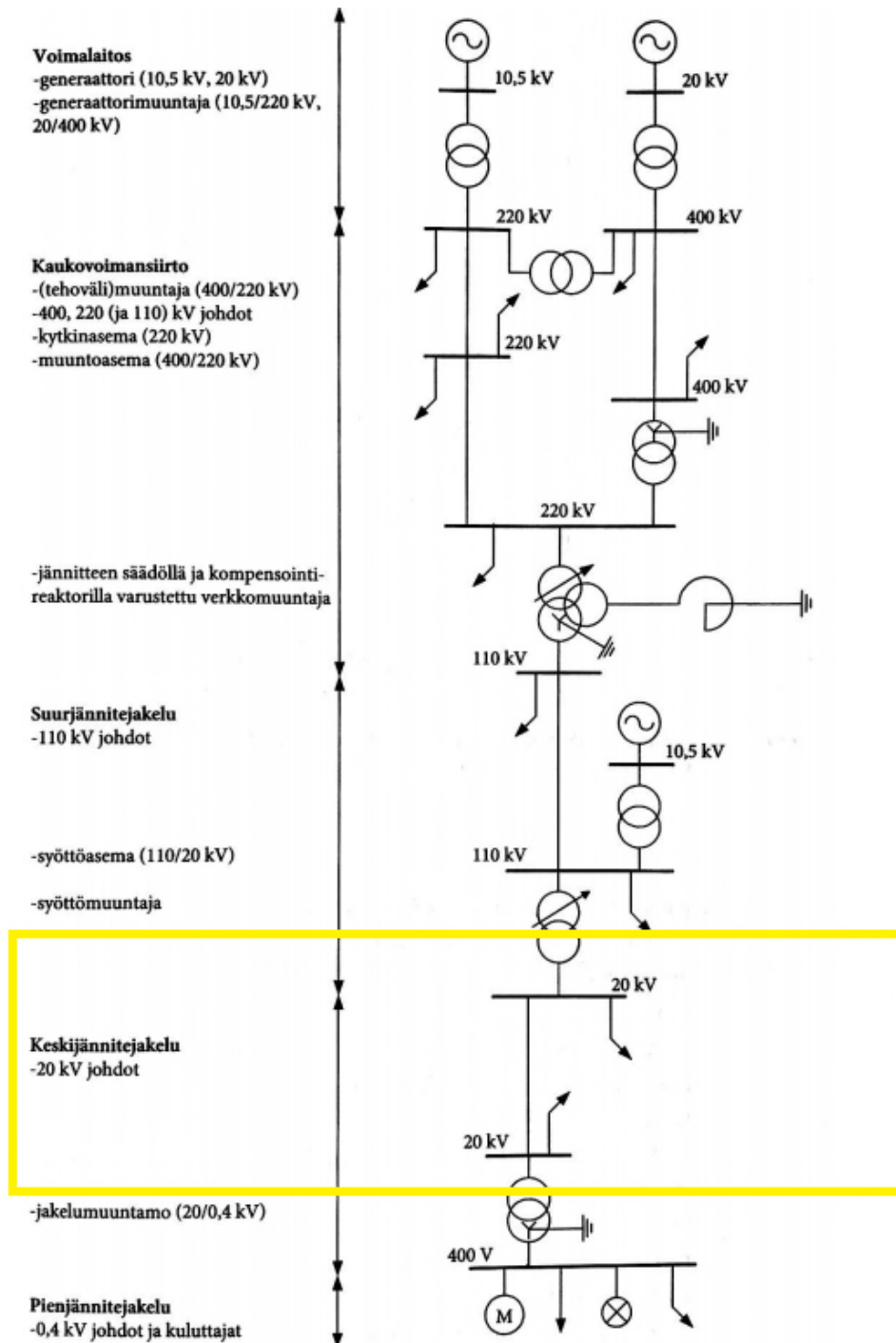
Prysmian Group Finland Oy aloitti vuonna 1912 Suomen Punomotehtaan nimellä, joka tunnettiin myöhemmin Nokia Kaapelina. Nykyään Prysmian Group Finland Oy valmistaa voima- ja asennuskaapeleita kotimaahan ja vientiin. Prysmian Group Finland Oy:ssä työskentelee noin 500 henkilöä Oulun ja Kirkkonummen tehtailla ja se on osa Prysmian Group- konsernia, joka on maailman suurin kaapelivalmistaja. Prysmian Group työllistää noin 30 000 henkilöä 50:ssä maassa. Kaiken kaikkiaan sillä on 112 tehdasta, ja tuotekehitystä tehdään 25:ssä tuotekehityskeskuksessa ympäri maailmaa. [1; 2.]

2 Keskijännitejakeluverkko

Suomen sähköverkko koostuu kantaverkosta, suurjännitteisestä jakeluverkosta sekä keski- ja pienjännitejakeluverkosta. Fingrid Oyj:n ylläpitämä kantaverkko on sähkönsiirron runkoverkko, joka koostuu 400, 220 ja 110 kV:n voimajohdoista. Koko Suomen kattavaan kantaverkkoon on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaat sekä alueelliset jakeluverkot. Suurjännitteinen jakeluverkko on liitetty kantaverkkoon ja sen tarkoituksena on siirtää sähköä 110 kV:n jännitteellä kulutuskeskittymien lähelle ja suoraan suurille tuotantolaitoksille. [3; 4.]

Suurjännitteellä siirretään suuria tehoja ja pitkiä etäisyyksiä kuluttajakeskittymiin, joista sähköä jaetaan pienempiin keskittymiin keskijännitteellä. Keskijännite käsittää 6–30 kV:n pääjännitteet, joilla sähköä voidaan siirtää jännitteestä riippuen jopa useita kymmeniä kilometrejä ja syöttää esimerkiksi keskisuuria tuotantolaitoksia.

Keskijännitejakeluverkon jännitetaso on Suomessa tyypillisesti 20 kV, mutta joissakin kaupungeissa on käytössä myös 10 kV:n jännitetaso [5, s.125]. Uusissa tuulipuistoissa käytetään yhä useammin 30 kV:n jännitettä. Kuva 1 havainnollistaa siirto- ja jakeluverkon periaatekaaviota, jossa keskijännitejakeluverkko on rajattu keltaisen suorakaiteen muotoisen kuvion sisäpuolelle.



Kuva 1. Siirto- ja jakeluverkon periaatekaavio [6, s. 55].

Keskijänniteverkko vaikuttaa olennaisesti jakeluverkon käyttövarmuuteen, koska yli 90 % sähkönkuluttajien kokemista keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista [5, s. 125]. Vuonna 2015 keskijänniteverkon pituus oli Suomessa noin

141 000 kilometriä, josta noin 17 % oli kaapeloitu. Vuoden 2019 alussa keskijänniteverkon kaapelointiaste oli noin 30 %, mutta sen odotetaan nousevan noin 51 %:iin vuoteen 2028 mennessä. Kaapelijärjestelmä sisältää kaapelien lisäksi kaapelivarusteet eli päätteet ja jatkokset. [3; 7, s. 43.]

3 Keskijännitekaapelit

Keskijännitekaapeli on johto, jossa tehdasvalmisteisen, ympäristöolosuhteita ja mekaanista rasitusta kestävä vaipan sisällä on yksi tai useampi, toisistaan eristettyjä sähköenergian siirtoon tarkoitettuja johtimia [8, s. 303]. Kaapelit ovat vaihtoehtoinen sähkönjakelu ja -siirtotapa ilmajohtoille alueilla, joissa ilmajohtoverkon tilantarve on este, kuten taajamissa. Lisäksi kaapelien vikataajuus on 10–50 % avojohtojen vikataajuudesta [5, s. 146]. Keskijännitekaapeleiden rakenteet vaihtelevat käyttö- ja ympäristöolosuhteiden mukaan. Erilaisten kaapelirakenteiden ja niiden ominaisuuksien ymmärtäminen on tärkeää kaapelivarusteasennuksia suunnitteleville ja suorittaville henkilöille.

3.1 Kaapelirakenteet ja ominaisuudet

Keskijännitekaapelien pääjännite on vähintään 6 kV. Kaapelien nimellisjännitteet merkitään muodossa $U_0/U/U_m$, missä U_0 tarkoittaa vaihejohtimen ja maapotentiaalin välistä nimellisjännitettä, U vaihejohtimien välistä pääjännitettä ja U_m kaapelien suurinta käyttöjännitettä [9, s. 1]. Yleisimmin Suomessa käytetyn 20 kV:n keskijänniteverkon nimellisjännitteet ovat 12/20/24 kV.

Johdin

Kaapelin sydämen eli johtimen tarkoitus on kuljettaa sähkövirtaa mahdollisimman pienellä vastuksella. Suomalaisissa keskijännitekaapeleissa käytetään alumiini- tai kuparilangoista kerrattuja ja pyöreäksi tiivistettyjä johtimia, joiden välissä on veden pitkittäistä etenemistä estävä pulveri tai nauhoitus. Johtimet tehdään pyöreiksi sähköpintakentänvoimakkuuden minimoimiseksi ja eristykselle vaarallisten osittaispurkausten eliminomiseksi. [8, s. 307–308.]

Johdinmateriaalina alumiini on kuparia halvempaa ja kevyempää, mutta paremman johdavuuden ansiosta kuparilla voidaan käyttää pienempää johdinkokoa samalle kuormitusvirralle. Suomessa jakeluverkkoon asennettavista keskijännitekaapeleista valtaosa on alumiinijohtimisia. Kaapeleiden yleiset johdinkoot ovat 50, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 500, 630 ja 800 mm². Johtimien koot ja tasavirtaresistanssit määrittää kansainvälinen standardi IEC 60228. [8, s. 307.]

Johdinsuoja

Johdinsuoja puristetaan johtimen ja eristyksen väliin. Se valmistetaan puolijohtavasta materiaalista ja sen tarkoitus on tasata johdinlankojen epätasaisuutta eristykseen päin ja siten pienentää eristyksessä syntyviä kentänvoimakkuushuippuja. Lisäksi johdinsuoja pienentää johtimesta eristykseen kohdistuvia lämpörasituksia esimerkiksi oiko- ja maasuluissa. [8, s. 308.]

Eristys

Eristys sijaitsee johdinsuojan ja hohtosuojan välissä. Eristys muodostaa kaapelille riittävän jännitekestoisuuden sekä johtaa johtimessa syntynyttä lämpöä kaapelista ulospäin. Kuormitettavuuden ja vikatapausten kannalta oikea johdinkoko on tärkeä, jotta kaapeli ei lämpene liikaa ja vanhene tarpeettomasti. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että 6–10 °C:n lämpötilan nousu yli johtimen suurimman sallitun käyttölämpötilan lyhentää eristyksen eliniän puoleen. [8, s. 308–309.]

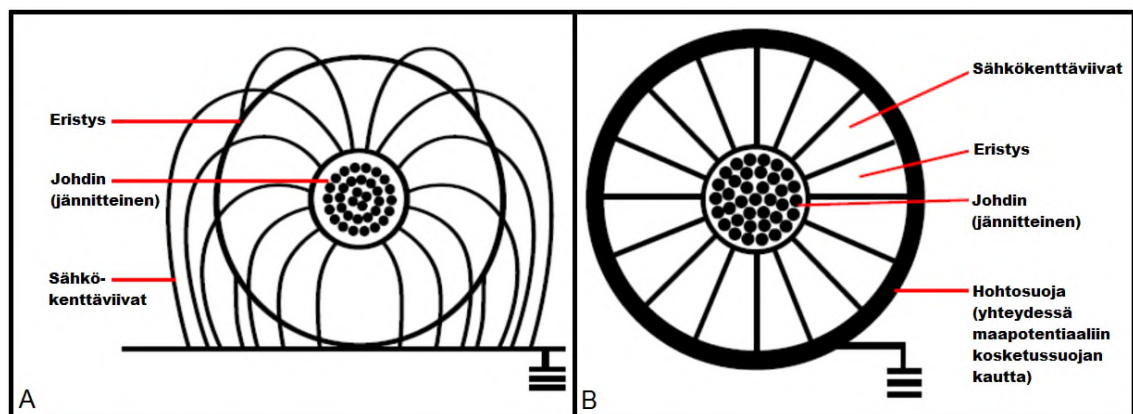
Suomalaisissa keskijänniteverkoissa on käytössä öljypaperi- ja muovieristeisiä kaapeleita. Nykyisinkin käytössä olevia öljypaperieristeisiä keskijännitekaapeleita asennettiin 1980-luvun loppupuolelle asti, jonka jälkeen muovieristeiset kaapelit ovat syrjäyttäneet ne. Pohjoismaiden tilaston mukaan muovieristeisten kaapeleiden vikaherkkyys on noin viidesosa öljypaperieristeisiin kaapeleihin verrattuna [10, s. 19].

Käyttövarmuuteensa ansiosta nykyään kaikki Suomessa asennettavat keskijännitekaapelit ovat muovieristeisiä. Muovieristys on ristisilloitettua polyeteeniä (PEX, englanniksi XLPE), jossa makromolekyyliketjut on sidottu toisiinsa kemiallisesti. Ristisilloitetun polyeteenin etu tavanomaiseen polyeteeniin (PE) verrattuna on korkeampi sulamispiste,

mikä sallii korkeammat käyttölämpötilat. PEX-eristeen kaapelin suurin sallittu johdinlämpötila on 90 °C:tta jatkuvassa käytössä ja 250 °C:tta enintään viiden sekunnin oikosulussa. Eristyksen nimellispaksuudet 6–30 kV:n kaapeleille on annettu kansainvälisessä standardissa IEC 60502-2 ja 10–30 kV:n kaapeleille kansallisessa standardissa SFS 5636. [9, s. 4.]

Hohtosuoja

Eristyksen ulkopinnassa oleva hohtosuoja rajaa yhdessä johdinsuojan kanssa johtimen aiheuttaman sähkökentän kahden puolijohtavan sylinteripinnan väliin [8, s. 309–310]. Hohtosuoja tasaa eristyksen ulkopintaa ja pienentää siten eristyksessä syntyviä kentänvoimakkuushuippuja. Kuvassa 2 A on esitetty eristetty kaapelin vaihe ilman hohtosuojaa ja kuvassa 2 B eristetty vaihe hohtosuojan kanssa.



Kuva 2. Kuvassa A on eristetty vaihejohdin ilman hohtosuojaa ja kuvassa B eristetty vaihejohdin hohtosuojan kanssa [muokattu lähteestä 11].

Kuvan 2 A tilanteessa johtimen aiheuttama säteittäinen sähkökenttä taipuu voimakkaana kohti lähintä maapotentiaalia synnyttäen kentänvoimakkuushuippuja, jotka rasittavat eristystä. Kuvassa 2 B johtimen eristyksessä aiheuttama säteittäinen sähkökenttä on pienempi ja tasaisempi. Metallisen kosketussuojan kautta maadoitettu hohtosuoja tasoittaa sähkökenttää, jolloin jänniterasitus eristyksessä on pienempi.

Homogeenisessä eristyksessä syntyvä sähkökentänvoimakkuus E etäisyydellä r voidaan laskea yhtälöllä (1).

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_u}{r_s}}, \quad (1)$$

U on johtimen jännite

r_u on eristyksen ulkosäde

r_s on johdinsuojan ulkosäde.

Yhtälöstä 1 voidaan havaita, että sähkökentänvoimakkuus on suurimmillaan johdinsuojan pinnalla ja se pienenee, kun etäisyys kasvaa johdinsuojasta. Mikäli johdinsuojan pinnalla vaikuttava sähkökentänvoimakkuus ylittää eristyksen kestoisuuden, tapahtuu läpilyönti. Lisäksi kaapelin nimellisjännitteen noustessa

- pienin mahdollinen johdinkoko kasvaa, jotta kentänvoimakkuus johdinsuojan pinnalla pysyy sallituissa rajoissa
- eristysvahvuutta on lisättävä, mikä heikentää johtimen jäähtymistä
- eristyspaksuuden pysyessä muuttumattomana jänniterasitus kasvaa, jolloin sen elinikä saattaa lyhentyä. [8, s. 310.]

Suomessa käytetyissä kaapeleissa johdinsuoja, eristys ja hohtosuoja valmistetaan samanaikaisesti kolmoispuristusprosessissa. Kolmoispuristettu eristys edellyttää oikeita työmenetelmiä ja -kaluja varusteiden asennuksessa. Varusteasennuksissa on myös otettava huomioon, että hohtosuojamateriaalien johtavuus saattaa pienentyä vieraiden aineiden, kuten öljyjen, rasvojen ja liuottimien vaikutuksesta. [8, s. 310.]

Kosketussuoja

Kosketussuoja toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana sekä nimensä mukaisesti mekaanisena ja sähköisenä kosketussuojana minimoiden sähkötapaturmien riskiä. Kosketussuoja on valmistettu metallista ja sen rakenteeseen vaikuttavat kaapelityyppi ja kaapelin käyttötarkoitus. [8, s. 310.]

Keskijännitekaapelin kosketussuojana käytetään useimmiten alumiinilaminaattia, kuparilankoja tai molempia. Limitetyn alumiinilaminaatin etuna on poikittainen vesitiiveys,

jonka vuoksi se on käytetyin kosketussuojarakenne. Kaapelin sisäosien päällä olevan yhtenäisen alumiinilaminaatin merkitys korostuu maa-asennuksissa, joissa maaperän kosteus etenee muovisen ulkovaipan läpi. Ilman alumiinilaminaattia kosteus etenisi edelleen kaapelin eristykseen ja heikentäisi eristyksen jännitekestoisuutta. [9, s. 5–6.]

Kuparilangallisen kosketussuojan etuna on helpompi kosketussuojaliitosten teko kaapelivarusteissa sekä parempi johtavuus esimerkiksi vikavirtojen kuljetuksessa. Pääosin kaikissa maan alle asennettavissa kaapeleissa on alumiinilaminaattikosketussuoja. Kaapelihyllyille sisä- ja ulkotiloihin voidaan asentaa kuparilangallisella kosketussuojalla varustettu kaapeli.

Ulkovaippa

Ulkovaippa suojaa kaapelin sisempiä kerroksia mekaanisilta rasituksilta asennuksen ja käytön aikana, ympäristöolosuhteiden rasituksilta ja esimerkiksi metallisen kosketussuojan korroosiolta. Ulkovaippa erottaa kaapelin kosketussuojan sähköisesti maapotentiaalista estäen kosketussuojan hallitsemattomat maadoitukset. [9, s. 6.]

Keskijännitekaapelien ulkovaipoissa käytetään säänkestävää PE- tai polyvinyylidikloridimuovia (PVC). PVC:llä on paremmat palonkesto-ominaisuudet, mutta sillä on suurempi lämpöresistiivisyys. Lisäksi PVC on alttiimpi mekaanisille vaurioille. PE kestää paremmin mekaanista rasitusta ja korkeampia lämpötiloja. Mekaanisen kestävyytensä ansiosta PE-vaippainen kaapeli soveltuu PVC:tä paremmin maa-asennuksiin ja voidaan asentaa myös auraamismenetelmällä. [9, s. 6.]

3.2 AHXAMK-W-kaapeli

AHXAMK-W-kaapeli on Suomen keskijänniteverkossa yleisimmin käytetty kaapeli, joka otettiin käyttöön vuonna 1987. AHXAMK-W:ssä kolme vaipattua kaapelivaihetta on kerattu kuparikeskusköyden ympärille. AHXAMK-W soveltuu pitkittäisen ja poikittaisen vetiiveytensä ansiosta asennettavaksi maahan sekä kiinteisiin hylly- ja kanava-asennuksiin sisällä ja ulkona. Kaapeli on asennettavissa myös veteen soveltuvin osin. [12, s. 98–99; 12.]

AHXAMK-W-kaapelin rakenteessa on sisältäpäin lueteltuna

- vesitiivis pyöreä tiivistetty alumiinijohdin
- puolijohtava johdinsuoja
- PEX-eristys
- puolijohtava hohtosuoja
- veden vaikutuksesta paisuva puolijohtava nauha
- alumiinilaminaatti, joka toimii kosketussuojana sekä poikittaisena kosteussulkuna
- säänkestävä musta PE-ulkovaippa
- pyöreä tiivistetty kuparinen keskusköysi. [12, s. 98.]

Kuvassa 3 on AHXAMK-W-kaapeli.



Kuva 3. Keskijännitekaapeli AHXAMK-W [12, s. 98].

AHXAMK-W-kaapelin johdinkoot ovat 50, 95, 120, 150, 185, 240 ja 300 mm². Kuparisen keskusköyden koko voi olla 35 tai 70 mm².

Perinteisestä AHXAMK-W-kaapelista on sovellettu erilaisia rakenteita käyttökohteen mukaan. AHXAMK-WP on muuten kuten AHXAMK-W, mutta siinä ei ole kuparista keskusköyttä. Se on siksi kevyempi ja edullisempi vaihtoehto esimerkiksi haja-asutusalueiden kaapelointiin. Riippukierrekaapeli AHXAMK-WM voidaan asentaa pylväisiin sinkityn ja muovilla eristetyn teräskannatinköyden avulla. Palosuojattu AHXAMK-WHF täyttää CPR-paloluokituksen D_{ca-s2,d2,a2}, joten se on asennettavissa erityiskohteisiin, kuten sairaaloihin, teollisuuteen ja tunneleihin. [12, s. 98–105; 13.]

Muita keskijänniteverkossa käytettäviä kaapelityyppejä ovat AHXCMK-HF, AHXCMK-PLUS, HXCMK-PLUS ja AHXAMKPJ-W. Kuparilankakosketussuojalla varustettuja

AHXCMK-HF-, AHXCMK-PLUS- ja HXCMK-PLUS-kaapeleita käytetään pääasiassa maan päälle tehtävissä kiinteissä hylly- ja kanava-asennuksissa esimerkiksi teollisuudessa ja sähköasemilla. AHXAMKPJ-W-vesistökaapelissa on mekaanisia rasituksia kestävä teräslanka-armeeraus, joten se soveltuu vesistöasennuksiin useiden kymmenien metrien syvyyteen. [12, s. 106–113.]

4 Keskijännitekaapelivarusteet

Kaapelivarusteet ovat olennainen osa keskijännitejärjestelmää. Jokaiseen kaapelijärjestelmään asennetaan päätteet yhteyden molempiin päihin ja pitkiin kaapeliyhteyksiin asennetaan myös jatkoksia. Jatkoksia tarvitaan myös kaapelijärjestelmän muutostöissä sekä vikojen aiheuttamissa korjaustöissä.

4.1 Varusterakenteet ja ominaisuudet

Keskijännitekaapelit kytketään ilmajohtoon, sähköasemalle, muuntajaan tai muuhun verkon osaan kaapelipäätteillä. Päätteiden avulla kytkentä voidaan tehdä niin, että koko järjestelmä täyttää kaapelille asetetut jännite-, kuormitettavuus- ja oikosulkukestoisuusvaatimukset. Päätteiden tehtävä on ohjata sähkökenttää hallitusti kohdassa, jossa kaapelin hohtosuoja ja kosketussuoja päättyvät. Pääte estää myös veden pääsyn kaapeliin ja kasvattaa etäisyyttä maadoitetun kosketussuojan ja jännitteisen johtimen välillä. Lisäksi päätteiden on kestävä samat mekaaniset rasitukset, jotka kohdistuvat kaapeliin esimerkiksi ympäristön lämpötilavaihtelun seurauksena [14, s. 2–4]. Päätteet voivat olla sisä-, ulko- ja pistokepäätteitä.

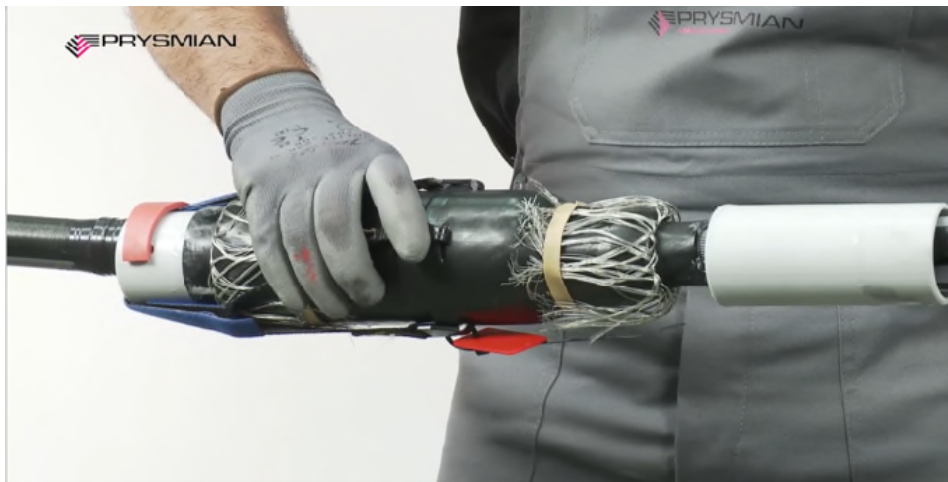
Jatkoksien tehtävä on yhdistää kaksi kaapelia toisiinsa niin, että jatkoksen jännitekestoisuus, kuormitettavuus ja oikosulkukestoisuus täyttävät kaapelille asetetut vaatimukset. Lisäksi jatkoksien on kestävä samat rasitukset kuin kaapelinkin.

Kaapelivarusteet voivat poiketa toisistaan materiaalien, asennustavan ja ominaisuuksien puolesta. Ne voivat olla kylmäkutistettavia, kylmäasennettavia tai lämpökutistettavia.

4.1.1 Kylmäkutisteväruusteet

Kylmäkutisteväruusteet (cold-shrink) kehitettiin 1990-luvun alkupuolella. Kylmäkutisteiden suurin ero aiemmin kehitettyihin lämpökutisteisiin on se, että niiden kutistamiseen kaapelin päälle ei tarvita kuumentamista nestekaasuliekillä. Tämän ansiosta kutistaminen ei riipu asentajan ammattitaidosta, jolloin asennuksen laatu on tasaisempi. Kylmäkutisteväruusteiden toiminta perustuu dynaamiseen eli jatkuvaan puristukseen kaapelia vasten, jolloin väruuste pysyy tiukasti kaapelissa kiinni, vaikka lämpötilanvaihtelut aiheuttaisivatkin kaapelin eristyksen halkaisijaan muutoksia. [15, s. 4; 16, s. 10–11.]

Kylmäkutisteväruusteet valmistetaan elastisista materiaaleista kuten silikonista tai eteeni-propeenidieeniterpolymeerista eli EPDM-kumista. Valmistuksen aikana ne laajennetaan mekaanisesti ohuen tukirakenteen kuten muoviputken tai -spiraalin päälle. Kutistaminen tapahtuu poistamalla tukiputki tai -spiraali. Tukiputkea käytettäessä värusteen ja putken väliin on valmistuksen aikana laitettu silikonirasvaa, joka mahdollistaa putken poistamisen. Kuvassa 4 on esitetty Prysmian Groupin Elaseed-tuoteperheen jatkoksen kutistaminen poistamalla sen laajennuksen tukirakenteena toimiva tukiputki. [15, s. 4.]



Kuva 4. Prysmian Groupin Elaseed-kylmäkutistejatkoksen kutistaminen [17].

Muovispiraalitukirakenteen ja värusteen väliin ei ole mahdollista integroida silikonirasvaa, joten se levitetään kaapeliin ennen jatkos- tai pääterunon asettamista kaapelin päälle. Kuvassa 5 on esitetty Prysmian Groupin Coldfit-tuoteperheen ulkopäätteen kutistaminen poistamalla sen laajennuksen tukirakenteena toimiva muovispiraali.



Kuva 5. Prysmian Groupin Coldfit-kylmäkutisteulkopäätteen kutistaminen [17].

Kylmäkutistevarusteen runkoon voidaan kentänohjauksen lisäksi integroida jatkoksen yli menevä metallinen kosketussuoja ja ulkovaippa tai päätteen vesitiiveysmassat ja uloin pinta eristinlaippoineen. Tämä mahdollistaa kaikkien kerrosten kutistamisen samanaikaisesti, kuten kuvissa 4 ja 5 on esitetty.

Kylmäkutistevarusteteknologia mahdollistaa suuren poikkipintakattavuuden, kun johdinliitoksissa käytetään momenttiruuviliittimiä. Tällöin samaa varustetta voidaan käyttää useammalle kaapelikoolle. Kylmäkutistevarusteiden tasalaatuisuutta ja toimintavarmuutta lisäävät tehtaalla valmistuksen yhteydessä tehtävät rutiini- ja näytekokeet. [15, s. 4–5.]

Kylmäkutistemateriaalit asettavat rajoituksia varastointiajalle, koska voimakkaasti laajennettujen materiaalien elastisuus heikkenee ajan mittaan. Useimmiten ne ovat asennettavissa vähintään kaksi vuotta materiaalien laajennuksen jälkeen. Kylmäkutistevarusteiden asennuksessa on myös varmistettava materiaalien toimivuus kylmissä olosuhteissa.

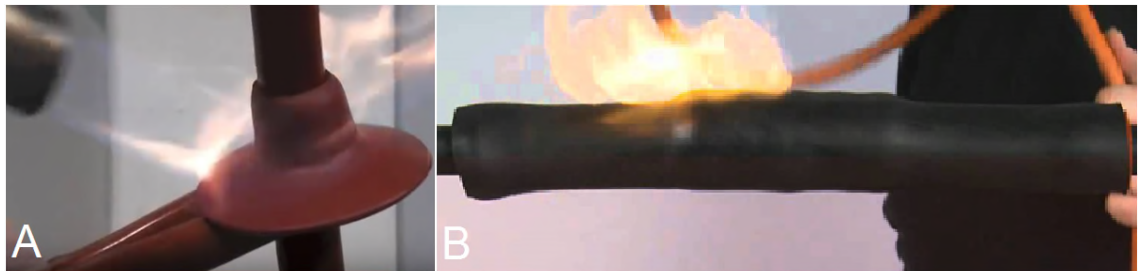
4.1.2 Kylmäasennettavat varusteet

Kylmäasennettavat varusteet (slip-on) kehitettiin ennen kylmäkutistevarusteita 1980-luvun alkupuolella, ja ne olivatkin ensimmäiset ilman kuumentamista asennettavat varusteet. Ne valmistetaan kylmäkutisteiden tavoin elastisista materiaaleista kuten silikonista tai EPDM-kumista. Kylmäasennettavat varusteet puristuvat dynaamisesti kaapelia vasten kylmäkutisteen tavoin. Myös niiden laadusta voidaan varmistua valmistuksen yhteydessä tehtävillä rutiini- ja näytekokeilla. [16, s. 8–9.]

Kylmäasennettavia varusteita ei laajenneta ollenkaan vaan ne työnnetään kaapelin päälle käyttäen apuna sähköisesti hyvin eristäviä liukasteita. Kylmäasennettavia varusteita käytetään erityisesti pistokepäätteissä, mutta myös sisä- ja ulkopäätteet voivat olla kylmäasennettavia. Kylmäasennusteknologia on yleisempää suurjännitteellä (60–500 kV), koska kaapelin eristyksen ja varusteen välille tarvittavan puristuksen hallitseminen tai saavuttaminen kylmä- ja lämpökutisteilla on haastavaa suurikokoisilla varusteilla.

4.1.3 Lämpökutistevarusteet

Ensimmäiset lämpökutistevarusteet (heat-shrink) olivat paperieristeisille keskijännitekaapeleille ja ne tulivat markkinoille 1970-luvulla. Aluksi lämpökutisteet olivat sisä- ja ulkopäätteitä, jatkokset tulivat myöhemmin. Nykyisin ne soveltuvat myös muovieristeiselle kaapelille. Lämpökutistevarusteen materiaalit laajennetaan tehtaalla lämmön avulla. Samoin kutistus kaapelin eristyksen päälle tapahtuu lämmön avulla esimerkiksi nestekaasuliekillä. Jäähdyttyään lämpökutistevarusteet eivät kuitenkaan kohdista dynaamista painetta kaapelia vasten ja siten ne eivät seuraa kaapelin eristyksen lämpölaajenemisia yhtä hyvin kuin elastiset kylmänä asennettavat varusteet. Tämä johtuu siitä, että nämä vaativat hyvin korkean lämpötilan muuttaakseen muotoaan. Kuvassa 6 on esitetty lämpökutistepäätteen ja -jatkoksen kutistaminen nestekaasuliekillä. [16, s. 8.]



Kuva 6. Kuvassa A lämpökutistepäätteen kutistaminen ja kuvassa B lämpökutistejatkoksen kutistaminen [17].

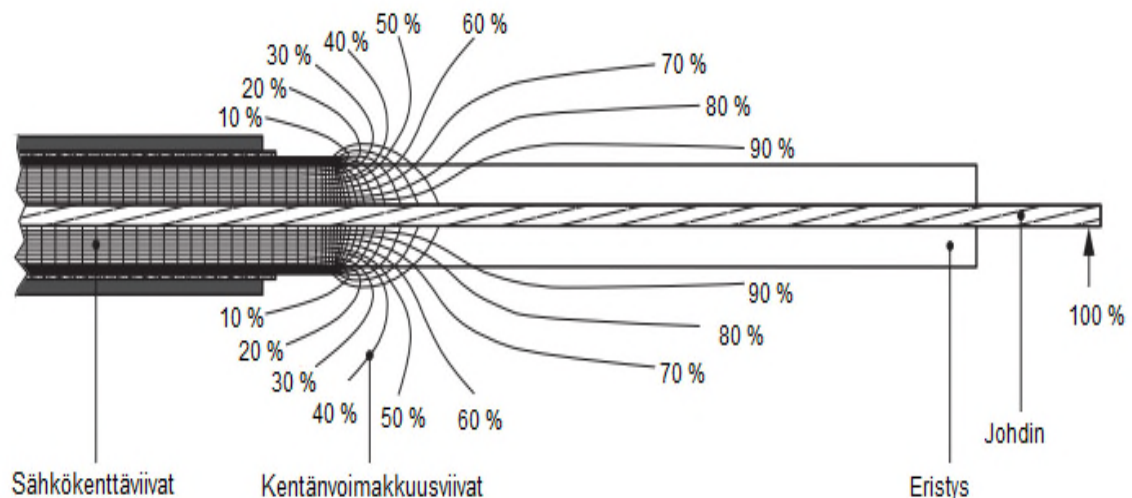
Kuvassa 6 esitetty lämpökutistepäätteen ja -jatkoksen kutistaminen tapahtuu nestekaasuliekin keltaisella osalla lämmittämällä.

4.1.4 Varusteiden kentänohjaustekniikat

Keskijännitekaapelien liitokset tarvitsevat hallitun sähkökentän ohjauksen ollakseen pitkäikäisiä. Puolijohtava hohtosuoja on poistettava määrätyltä matkalta kaapelin päästä, jotta maadoitetun kosketussuojan ja johtimen välille saadaan riittävä pintaryömintämatka jänniteylilyönnin välttämiseksi. Kaapelivarusteen avulla saavutetaan riittävän alhainen kentänvoimakkuus hohtosuojan päättymiskohdassa ja muutetaan kaapelieristeen yli vaikuttavan sähkökentän geometriaa poikittaisesta pitkittäiseksi niin, että varusteenkaan eristyksessä ei tapahdu läpilyöntiä. [8, s. 327; 18, s. 47.]

Jatkoksien ja pistokepäätteiden kentänohjaus poikkeaa sisä- ja ulkopäätteiden kentänohjauksesta siten, että niissä sähkökenttä jatkuu johdinliitoksen yli toiseen kaapeliin tai läpivientieristimeen. Johdinliitoksen alueella esiintyy sekä säteensuuntaisia että pitkittäisiä sähköisiä rasituksia. Nämä kasvavat käyttöjännitteen noustessa, jolloin myös jatkoksen pituus kasvaa, koska pitkittäisten sähköisten rasitusten sallitaan olevan yleensä vain noin 7 % säteen suuntaisesta rasituksesta. [8, s. 330.]

Kuvassa 7 on esitetty sähkökentän jakautuminen ilman kentänohjausta kaapelissa, josta kosketussuoja ja hohtosuoja on poistettu määrätulle etäisyydelle johtimesta.



Kuva 7. Sähkökentän jakautuminen ilman kentänohjausta. Kenttäviivoihin merkityt prosenttiluvut kuvaavat sähkökentän voimakkuuden osuutta järjestelmän maan ja johtimen välisestä nimellisjännitteestä [muokattu lähteestä 19, s. 8].

Kuvasta 7 voidaan havaita, että ilman kentänohjausta hohtosuojan päättymiskohtaan syntyy kentänvoimakkuushuippu, joka jo ennen varsinaista läpi- tai ylilyöntiä aiheuttaa koronapurkauksia. Kuvan 8 esittämässä tapauksessa sähkökentänvoimakkuus on ylittänyt ilman läpilyöntilujuuden, jolloin hohtosuojan päättymiskohtaan on syttynyt koronapurkauksia. Koronapurkaukset kuluttavat eristystä ja aiheuttavat läpilyönnin ennen pitkää.



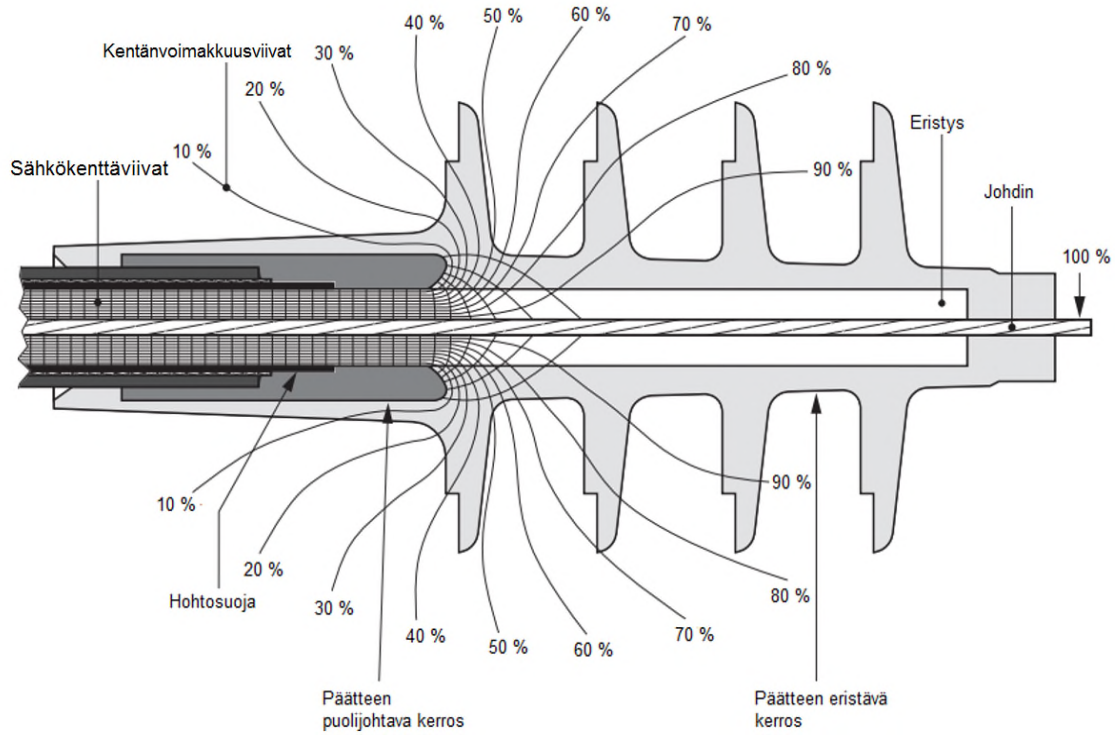
Kuva 8. Koronapurkauksia hohtosuojan päättymiskohdassa [muokattu lähteestä 20, s. 843].

Kaapelivarusteissa syntyviä kentänvoimakkuushuippuja voidaan pienentää erilaisilla kentänohjausmenetelmillä. Vanhin ja teknisesti yksinkertaisin kentänohjausmenetelmä on geometrinen kentänohjaus, jossa sähkökenttää ohjataan puolijohtavan elektrodin muodolla. Muut kentänohjausmenetelmät perustuvat erilaisten materiaalien sähköisiin ominaisuuksiin, kuten permittiivisyyteen ja resistiivisyyteen. [18, s. 47.]

Geometrinen kentänohjaus

Geometrinen kentänohjaus perustuu sähkökentän ohjaamiseen puolijohtavan kartiomaisen elektrodin avulla. Ennen kartiomaista muotoa puolijohtava pinta asettuu kaapelin hohtosuojan päälle ollen näin samassa potentiaalissa. Hohtosuojan päällä kentänohjauksen puolijohtava sisäpinta on vielä kaapeliin nähden samansuuntainen, mutta lähtee sitten kaareutumaan viistosti ulospäin johtimesta. [18, s. 47–48.]

Kuvassa 9 on esitetty sähkökentän jakautuminen kaapelipääteessä geometrisella kentänohjauksella.



Kuva 9. Sähkökentän jakautuminen geometrisella kentänohjauksella. Kenttäviivoihin merkityt prosenttiluvut kuvaavat sähkökentän voimakkuuden osuutta järjestelmän maan ja johtimen välisestä nimellisjännitteestä [muokattu lähteestä 19, s. 8].

Kuvasta 9 voidaan havaita, kuinka sähkökenttä jakautuu tasaisesti kaapelin ja varusteen eristykseen puolijohtavan elektrodin avulla, eikä synny kuvan 7 kaltaista kentänvoimakkuushuippua.

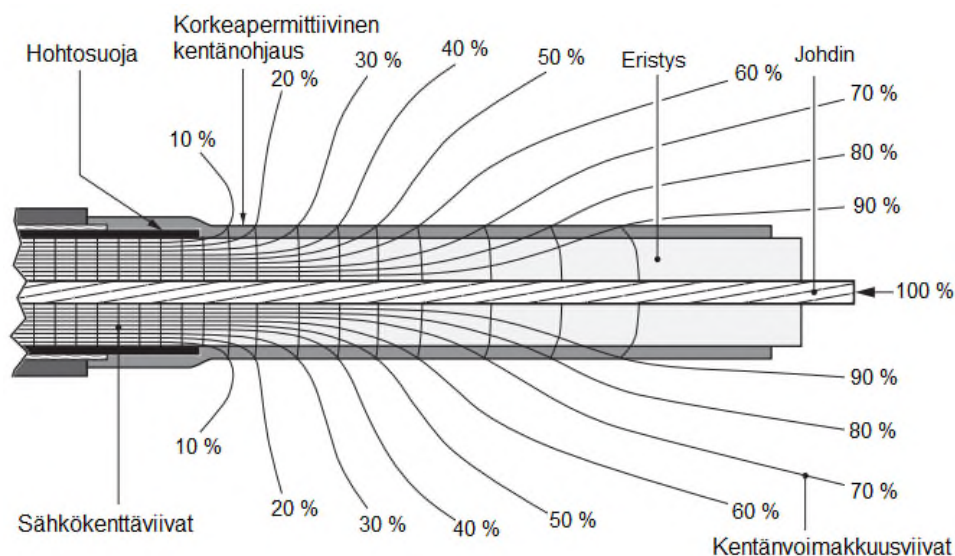
Geometrinen kentänohjaus voidaan toteuttaa eristävän ja puolijohtavan nauhan avulla, mutta nykyisissä varusteissa geometrinen kentänohjaus valetaan kiinteästi päätte- tai jatkosrunkoon tehtaalla ja asennetaan joko työntämällä tai kutistamalla kaapelin päälle. Geometrisessä kentänohjauksessa käytettävä eristyskerros on hohtosuojan katkaisukohdassa selvästi kaapelin eristystä paksumpi, mikä takaa hyvän jännitekestoisuuden, koska sähkökentänvoimakkuus heikkenee ulomman puolijohtavan ja johtimen välisen etäisyyden kasvaessa. [18, s. 48–50.]

Geometrisen kentänohjauksen huonona puolena voidaan pitää kentänohjauksen vaatimaa tarkkaa asettelua. Väärään kohtaan asetettu kentänohjaus saattaa aiheuttaa kentänvoimakkuushuipun hohtosuojan reunassa. Toisaalta geometrinen kentänohjaus ei synnytä ylimääräisiä lämpöhäviöitä, jotka voisivat nopeuttaa kaapelin eristysten vanhenemista. [18, s. 48–50; 19, s. 8.]

Permittiivisyyteen perustuva kentänohjaus

Permittiivisyyteen perustuva kentänohjaus (englanniksi refractive stress control) on toinen paljon käytetty kentänohjausmenetelmä. Tätä kentänohjausta voidaan soveltaa monella eri tavalla, mutta pääperiaate on se, että hohtosuojan päättymiskohtaan asetetaan eristävä kentänohjausletku, jolla on korkea permittiivisyys. Käytännössä letku voidaan asentaa kaapelin päälle erikseen tai se voi olla integroitu jatkos- tai pääterunkoon muiden kerrosten kanssa. Korkean permittiivisyyden ominaisuudet voidaan sisällyttää sili-koni- ja EPDM-kumiin. [18, s. 50.]

Kuvassa 10 on esitetty sähkökentän jakautuminen kaapelipääteessä permittiivisyyteen perustuvalla kentänohjauksella.



Kuva 10. Sähkökentän jakautuminen korkeaan permittiivisyyteen perustuvalla kentänohjauksella. Kenttäviivoihin merkityt prosenttiluvut kuvaavat sähkökentän voimakkuuden osuutta järjestelmän maan ja johtimen välisestä nimellisjännitteestä [muokattu lähteestä 19, s. 8].

Kuvasta 10 voidaan havaita, kuinka kentänvoimakkuus jakautuu tasaisemmin kaapelin eristykseen kuin ilman kentänohjausta kuvassa 7.

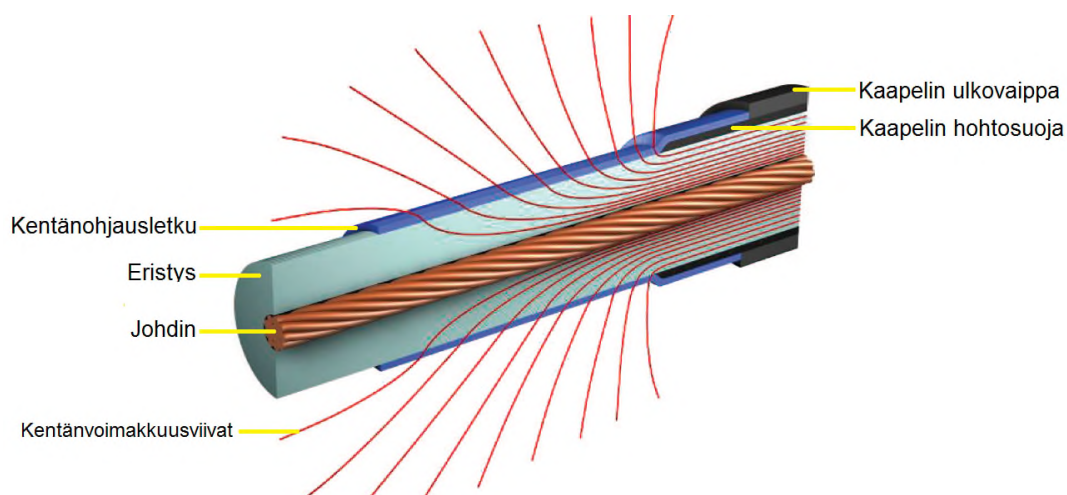
Korkeaan permittiivisyyteen perustuvan kentänohjauksen negatiivisena puolena ovat sen aiheuttamat dielektriset häviöt, jotka lämmittävät kaapelivarustetta ja kaapelia paikallisesti. Häviöt kasvavat jännitteen taajuuden kasvaessa, mutta häviöitä voidaan pienentää optimoimalla sekä materiaalin määrää että permittiivisyyttä. Korkean permittiivisyyden kentänohjausmenetelmä on hyvin yleinen keskijännitevarusteissa, koska kentänohjausletkut voidaan pitää ohuina, ne kattavat useita kaapelikokoja ja hyvien kentänohjausominaisuuksien ansiosta ne sallivat hieman huonomminkin tehdyn asennustyön. [18, s. 50; 21.]

Prysmian Groupin Coldfit-ulkopäätteissä ja Elascon-pistokepäätteissä sähkökenttää ohjataan permittiivisyyteen perustuvalla kentänohjauksella. Permittiivisyyteen perustuva kentänohjaus mahdollistaa myös muiden kentänohjausmenetelmien käytön samanaikaisesti [18, s. 50]. Esimerkiksi Elaspeed-jatkoksissa sähkökenttää ohjataan permittiivisyyteen perustuvan kentänohjauksen lisäksi myös geometrisella kentänohjausmenetelmällä.

Resistiiviskapasitiivinen kentänohjaus

Resistiiviskapasitiivisen kentänohjauksen (englanniksi impedance stress control) sähkökentän jakauma perustuu kaapelin eristyksen päälle asetetun resistiivisen kerroksen ja johtimen väliseen kapasitanssiin. Tietyin resistiivisyyden omaava kerros voidaan asentaa kaapelin hohtosuojan päättymiskohtaan vastaavalla tavalla kuin permittiivisyyteen perustuva kentänohjaus, joko omana erillisenä letkuna tai yhdessä muiden kerrosten kanssa jatkos- tai pääterunkoon integroituna. Resistiiviskapasitiivinen kentänohjaus soveltuu käytettäväksi kutistettavissa ja päälle työnnettävissä varusteissa. [22, s. 161; 18, s. 51.]

Kuvassa 11 on esitetty sähkökentän jakautuminen resistiiviskapasitiivisella kentänohjauksella.



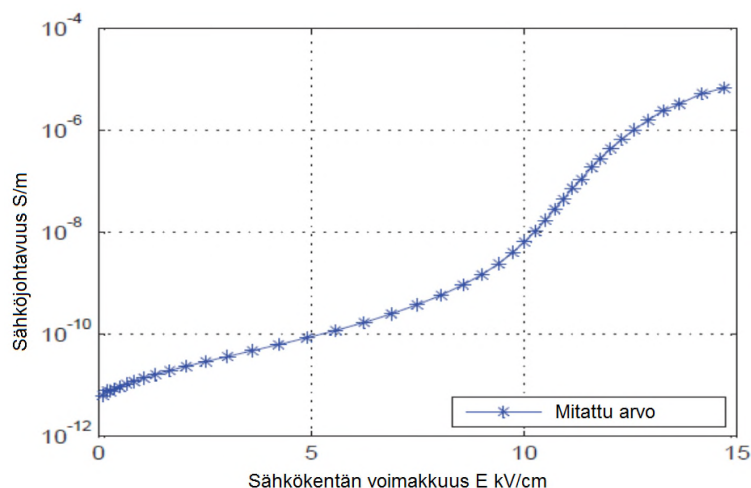
Kuva 11. Sähkökentän jakautuminen resistiiviskapasitiivisella kentänohjauksella [muokattu lähteestä 18, s. 51].

Resistiiviskapasitiivisen kentänohjauksen etuna on pieni materiaalitarve eli kentänohjausletkut ovat tavanomaisesti ohuita ja kentänohjaus on myös verrattain lyhyt. Koska resistiiviskapasitiivinen kentänohjauksen toiminta riippuu voimakkaasti jännitteen taajuudesta, niin ohjaus ei toimi samalla tavalla esimerkiksi vaihtojännitteellä ja salamasyökyjännitteellä. Resistiiviskapasitiivisen ohjauksen kentänjakauma saattaa tasajännitteellä poiketa oleellisesti vaihtojännitteen vastaavasta. Tämä voi vaikuttaa kaapelijärjestelmän käyttöönottomittauksen yhteydessä tehtävään jännitekokeeseen, joka tehdään yleensä tasajännitteellä. Liian korkea tasajännite saattaa vaurioittaa kaapelin eristystä ja varustetta, mikä voi johtaa läpilyöntiin vasta vuosien päästä. [18, s. 51–52; 22, s. 161.]

Epälineaarinen kentänohjaus

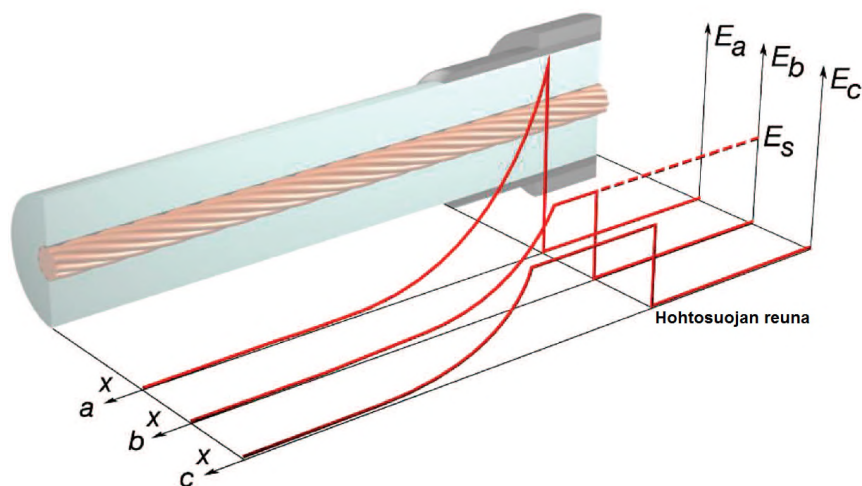
Epälineaarinen kentänohjaus (englanniksi nonlinear stress control) kuuluu uusimpiin kentänohjausmenetelmiin. Se perustuu materiaaleihin, joiden resistiivisyys muuttuu jännitteen muuttuessa. Epälineaarilla kentänohjauksella on tietty kynnysjännite kuten diodeilla ja varistoreilla. Sen resistiivisyys pysyy lineaarisena, mikäli järjestelmän jännite on pienempi kuin tämä kynnysjännite. Kun varusteeseen vaikuttava jännite nousee yli kynnysjännitteen, kentänohjaus aktivoituu ja sen resistiivisyys muuttuu. Tällöin vaikuttava sähkökentänvoimakkuus säilyy suhteellisen tasaisena jännitteen noustessa. Epälineaarinen kentänohjaus toimii erinomaisesti myös ulkoisten jännitepiikkien ja transienttijännitteiden aikana. [18, s. 52–54.]

Kuvassa 12 on kuvattu erään materiaalin resistiivisyyden muutos sähkökentän voimakkuuden funktiona. Kun sähkökentänvoimakkuus saavuttaa voimakkuuden 10 kV/cm, materiaalin resistiivisyys pienenee ja sähköjohtavuus kasvaa voimakkaasti.



Kuva 12. Erään sähköisiltä ominaisuuksiltaan epälineaarisen materiaalin sähköjohtavuuden muutos sähkökentän voimakkuuden funktiona [muokattu lähteestä 23, s. 19].

Kuvassa 13 on esitetty sähkökentän voimakkuus hohtosuojan rajassa epälinearisella kentänohjauksella erilaisissa tapauksissa.



Kuva 13. Sähkökentän voimakkuus hohtosuojan rajassa epälinearisella kentänohjauksella [muokattu lähteestä 18, s. 54]. Kuvaaaja a on ilman kentänohjausta, kuvaaaja b epälinearisella kentänohjauksella matalammalla jännitteellä ja kuvaaajassa c korkeammalla jännitteellä.

Kuvan 13 kuvaajassa a on vertailuarvona sähkökentän voimakkuus ja muoto hohtosuojan reunassa ilman kentänohjausta. Kuvaajissa b ja c sähkökentänvoimakkuus on rajoitettu epälineaarilla kentänohjauksella tasolle E_s . Kuvaajassa b nähdään hohtosuojan reunaan syntyvä sähkökentänvoimakkuus matalammalla jännitteellä. Kuvaajassa c jännite on korkeampi, jonka vuoksi sähkökentänvoimakkuuden huippu ulottuu kauemmaksi hohtosuojan reunasta, mutta on silti saman suuruinen kuin kuvaajassa b. Tämän vuoksi epälineaarisisa kentänohjauksissa korkeammilla jännitteillä käytetään pidempiä kentänohjausletkuja. [18, s. 53–54.]

Kaapelivarustevalmistajat voivat käyttää useita eri kentänohjausmenetelmiä varusteen asennusvaatimusten ja valmistuksen kustannustehokkuuden mukaan. Kaikilla kentänohjausmenetelmillä on omat etunsa ja rajoitteensa, mutta yksikään kaupallisesti markkinoilla oleva menetelmä ei sovellu kaikkiin varusteisiin ja olosuhteisiin. [18, s. 55.]

4.1.5 Johdinliitokset

Hyvä johdinliitos on tärkeä kaapelivarusteen toiminnan kannalta. Se vaatii oikeanlaisen ja oikein asennetun johdinliittimen. Johdinliitin toimii virran kulkutienä jatkoksissa kaapelista toiseen ja päätteissä kaapelista muuntajaan, kojeistoon tai ilmajohtoon. Johdinliittimien on kestävä esimerkiksi kuormitusvirran vaihteluita sekä mekaanisia rasituksia kaapelin johtimen tavoin. Johdinliitoksiin käytetään yleensä puristettavia ja momenttiruuviliittämiä.

Puristettava johdinliitin

Puristettava johdinliitin asennetaan useimmiten puristamalla kuusikulmaisilla puristusleuoilla. Pienelle johtimelle riittää käsikäyttöiset puristuspihdit, mutta isommille poikkipinoille käytetään hydraulisia puristinpäitä. Puristettavat liittimet valitaan yleensä johdinkoon, -rakenteen ja -materiaalin mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että erilaisia puristettavia liittimiä on paljon. Mikäli vahingossa käytetään vääränlaista liitintä, voi liitoksesta tulla huono.

Liittimen asennuksen laatuun ja varusteen toimivuuteen saattaa vaikuttaa myös

- vajaaksi jäänyt puristus väärin puristusleukojen tai puristimen vian takia
- liian syvä puristus käytettäessä väärää puristusleukoja
- liittimen väärästä päästä aloitettu puristus, jolloin kaapelin johdin venyy ja saattaa vaikuttaa varusteen pituusmitoitukseen
- johtimeen jätetyt epäpuhtaudet.

Puristettavista liittimistä on hyviä kokemuksia vuosikymmenien ajalta myös suurilla johdinpoikkipinnoilla. Lisäksi ne ovat edullisia verrattuna momenttiruuviliittimiin. Kuvassa 14 on esitetty tavanomaisia puristettavia liittimiä.



Kuva 14. Kolme puristettavaa liittintä erilaisille johtimille. Ylin on tarkoitettu kuparijohtimien liittämiseen, keskimmäinen soveltuu alumiini- ja kuparijohtimien liittämiseen ja alin käy alumiinijohtimien liittämiseen [24, s. 2].

Kuvassa 14 esitellyt puristettavat johdinliittimet voitaisiin korvata yhdellä momenttiruuviliittimellä.

Momenttiruuviliitin

Momenttiruuviliittimien asennus on yksinkertaisempaa kuin puristettavien liittimien, minkä vuoksi niillä saavutetaan tasainen asennuslaatu. Momenttiruuviliittimet asennetaan kiristämällä liittimen ruuveja niin kauan, että ruuvit saavuttavat riittävän momentin, jolloin ruuvi katkeaa suunnitellusta kohdasta. Momenttiruuvit voi kiristää hylsyavaimella. Useimmat liitinvalmistajat sallivat myös akkuporakoneen käytön.

Momenttiruuviliittimien etuna on niiden monipuolisuus. Yksi momenttiruuviliitin kattaa alumiini- ja kuparijohtimien kaikki erilaiset rakenteet, kuten sektorimaiset, pyöreät kerratut ja yksilankaiset johtimet usealla johdinkoolla. Tämä helpottaa oikean liittimen valintaa ja pienentää erilaisten liittimien varastointitarvetta.

Momenttiruuvien vastakkainen sisäpuoli on uritettu poikittaissuuntaisesti, minkä ansiosta johtimen ja liittimen liitoksen ylimenoresistanssi on hyvin pieni. Lisäksi momenttiruuvien puristusvoima on suuri. Tämän vuoksi ne mahdollistavat lyhyemmät varusterakenteet. Kuvassa 15 on esitetty tavanomaisia momenttiruuviliittämiä.



Kuva 15. Tavanomaisia momenttiruuviliittämiä [25, s. 23].

Taulukossa 1 on vertailtu puristettavien ja momenttiruuviliittimien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Puristettavien ja momenttiruuviliittimien vertailua [muokattu lähteestä 24, s. 1].

Puristettavat liittimet	Momenttiruuviliittimet
<p>Hyvät puolet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pieni halkaisija • tuotteen hinta • hyvät liitosominaisuudet, mikäli on valittu oikea liitin ja asennus on tehty oikein • hyviä kokemuksia vuosikymmenien ajalta. 	<p>Hyvät puolet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • laaja poikkipinta-, rakenne- ja materiaalikattavuus • erilaisten liittimien tarve pieni • helppo ja nopea asennus • tasalaatuinen asennus • ei tarvetta erikoistyökaluille • varusteiden lyhyempi rakenne.
<p>Huonot puolet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pieni poikkipinta-, rakenne- ja materiaalikattavuus • erilaisten liittimien tarve suuri • asennusvirheiden mahdollisuus suurempi • painavat erikoistyökalut • hitaampi asennus • varusteiden pidempi rakenne. 	<p>Huonot puolet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • suurempi halkaisija • tuotteen hinta • katkenneiden ruuvien jättämät terävät reunat • vähän kokemuksia isoilla poikkipinnoilla.

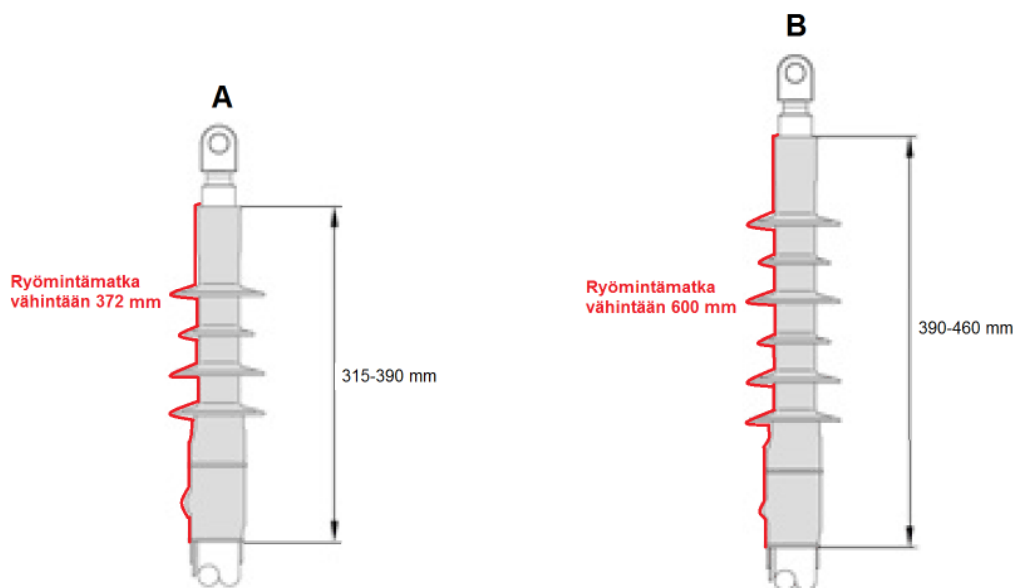
Taulukon 1 perusteella momenttiruuveilla tehdyt liitokset ovat helpompia tehdä ja siten myös tasalaatuisempia. Momenttiruuviliittimien kehityksen ja hintojen laskun myötä ne tulevat todennäköisesti syrjäyttämään puristettavat liittimet.

4.2 Sisä- ja ulkopäätteet

CENELECin standardi HD 629.1 jaottelee ilmaeristeisissä kojeistoissa ja liittynöissä käytettävät päätteet sisä- ja ulkopäätteisiin [26]. Sisäpäätteitä käytetään sisätiloissa kuten sähköasemilla tai kiinteistömuuntamoissa ja osittain avonaisissa ulkokojeistoissa, joissa muuntaja lämmittää ympäristöä. Sisä- ja ulkopäätteiden suurin ero on pintaryömintämatkassa ja vesitiiveydessä. Sisäpäätteiden pintaryömintämatka ei tarvitse olla yhtä pitkä kuin sateelle ja ilman epäpuhtauksille alttiissa ulkopäätteissä.

Kuivissa asennusolosuhteissa käytettävissä sisäpäätteissä ei tarvitse käyttää sateenvarjon lailla toimivia eristinlaippoja pintaryömintämatkan pidentämiseksi. Uusissa kylmäkuisteteknologiaan perustuvissa sisäpäätteissä käytetään kuitenkin pääterunkoon integ-

roituja eristinlaippoja, joilla päätteen pituutta voidaan lyhentää säilyttäen riittävä pintaryömintämatkan. Kuva 16 esittää Suomen olosuhteisiin soveltuvia 20 kV:n sisä- ja ulkopäätteitä. Kuvassa esitetään päätteiden tyypilliset pituudet sekä pintaryömintämatkat perustuen standardiin IEC 60815. Korkeammilla käyttöjännitteillä päätteiden ryömintämatkaa pidennetään.



Kuva 16. Pääte A on sisäpääte ja pääte B on ulkopääte [17].

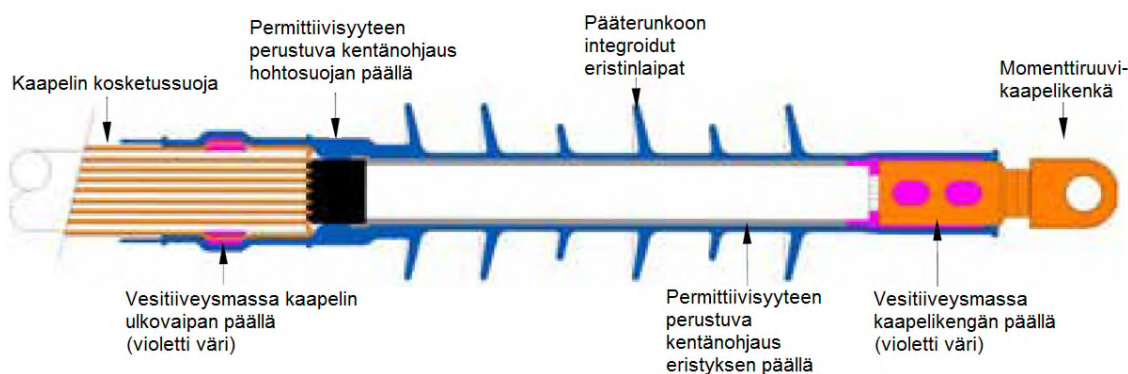
Säälle alttiisiin ja osittain avonaisiin kaapeliliityntöihin käytetään ulkopäätteitä. Ulkopäätteiden on kestävä UV-säteilyä, vettä, lunta ja ilman epäpuhtauksia. Tämän vuoksi ulkopäätteet ovat sisäpäätteitä pidempiä, mutta niissä käytetään myös eristinlaippoja johdinten ja kosketussuojan välisen pintaryömintämatkan pidentämiseksi. Laippojen lukumäärää ja halkaisijaa kasvattamalla voidaan lisätä ryömintämatkaa.

Sisä- ja ulkopäätteiden rakenne

Sisä- ja ulkopäätteissä kaapelin johdin- ja kosketussuojaliitos tehdään niin, että valmiin päätteen jännitekestoisuus, vesitiiveys tai muut ominaisuudet säilyvät. Kaapelin johtimeen asennetaan joko puristettava tai momenttiruuvikiinnitteinen kaapelikengä, jonka avulla pääte on helppo kiinnittää esimerkiksi kojeiston kiskoon. Ulkopäätteessä kaapelikengän on oltava vesitiivis.

Kaapelin hohtosuoja kuoritaan useiden kymmenien senttimetrien matkalta johtimen päästä mitattuna. Johdinsuoja ja eristys kuoritaan kaapelikengän upotussyvyyden vaatimalla matkalta. Pääteen kentänohjaus asetetaan kaapelin hohtosuojan ja eristyksen päälle. Kaapelin kosketussuojaan liitetään tinattu kuparipunos, joka on siihen galvaanisesti ja mekaanisesti hyvässä kontaktissa.

Pitkittäinen vesitiiveys toteutetaan kaapelikengän ja kaapelin ulkovaipan päälle asetettavalla tiivistysnauhalla. Pääteen uloimman kerroksen on asetuttava riittävän pitkälle kaapelikengän ja kaapelin ulkovaipan päälle, mikä varmistaa vesitiiveyden. Kuvassa 17 on esitetty valmiin Coldfit-ulkopääteen poikkileikkauskuva.

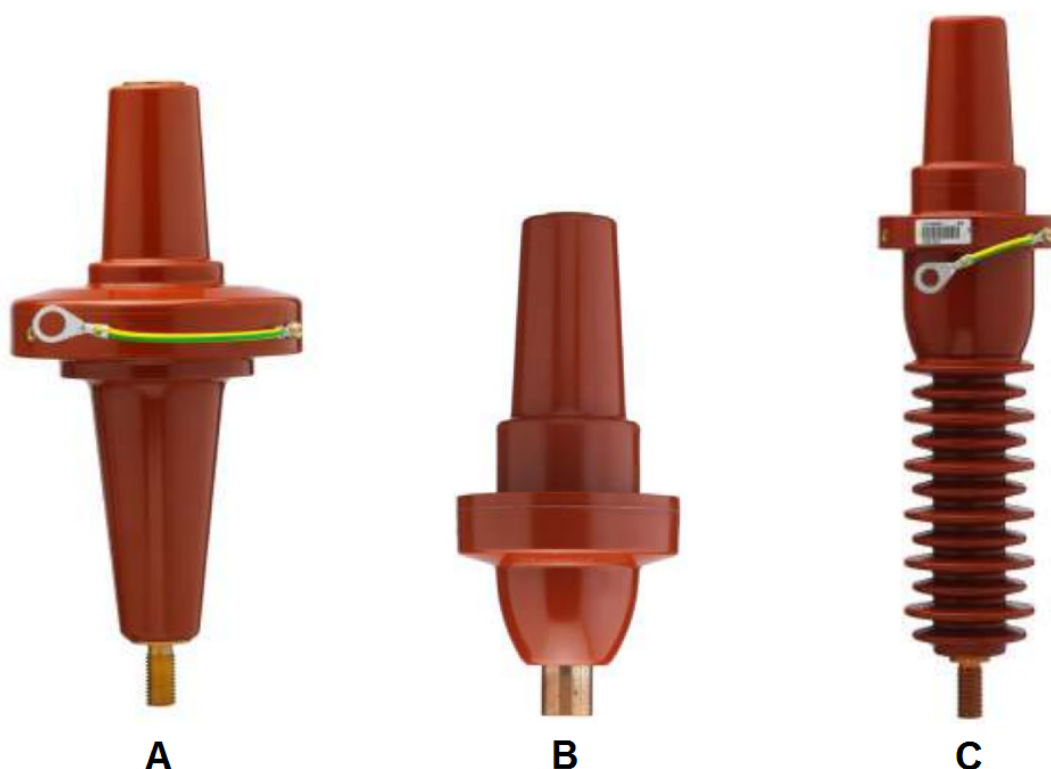


Kuva 17. Coldfit- kylmäkutisteulkopääteen poikkileikkauskuva [muokattu lähteestä 27].

4.3 Pistokepäätteet

Pistokepäätteitä käytetään kaapelien kytkentään SF6-, öljy- tai ilmaeristeisiin kojeisiin kuten muuntajiin, kojeistoihin ja laitteistoihin. CENELECin standardi HD 629.1 jaottelee pistokepäätteet kosketussuojattuihin pistokepäätteisiin (screened separable connector) ja eristettyihin pistokepäätteisiin (unscreened separable connector) [26]. Kosketussuojatuissa pistokepäätteissä on johtava tai puolijohtava pintakerros, joka on yhteydessä maapotentiaaliin. Tämän vuoksi niitä on turvallista koskettaa jännitteisenäkin. Eristetyissä pistokepäätteissä ei ole johtavaa pintakerrosta, jonka vuoksi ne on asennettava lukittuun kojeistotilaan.

Pistokepäätteiden läpivientieristimet voidaan jaotella kolmeen pääryhmään niitä ympäröivän eristeaineen mukaan. Ympäröivä eristys voi olla ilmaa, öljyä tai SF6-kaasua. Ilmaeristeisiä läpivientieristimiä käytetään esimerkiksi kuivissa muuntajissa, moottoreissa ja kytkinkojeistoissa. Öljyeristeisiä läpivientieristimiä käytetään muuntajissa, kondensaattoreissa, reaktoreissa ja sähkömoottoreissa. SF6-kaasun käyttö on yleistynyt kytkinkojeistoissa syrjäyttäen ilmaeristeisiä kojeistorakenteita. Kuvassa 18 on esitetty erilaisia läpivientieristimiä.



Kuva 18. Kuvassa A on läpivientieristin öljyeristeiseen, kuvassa B SF6-kaasueristeiseen ja kuvassa C ilmaeristeiseen kojeeseen [muokattu lähteestä 28].

Pistokepäätteet jaotellaan standardin HD 629.1 mukaan kuuteen eri nimellisvirtaluokkaan. Nämä kuusi nimellisvirtaluokkaa ovat 250, 400, 630, 800, 1250 ja 2500 A. Suomessa käytetyimmät nimellisvirtaluokat ovat 250 A ja 630 A. CENELECin standardit EN 50180 ja EN 50181 puolestaan määrittelevät läpivientieristimien mitat ja nimelliset sähköiset arvot. Taulukossa 2 on esitetty eri läpivientieristimien liitostavat, suurimmat sallitut käyttöjännitteet, nimellisvirrat ja suurimmat sallitut yhden sekunnin oikosulkuvirrat. [26; 28.]

Taulukko 2. Standardin mukaiset läpivientieristimet pistokepäätteille [28].

Läpivientieristin	Liitostapa	Jännite U_m (kV)	Nimellinen virta (A)	Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta (kA)
A1	Liukutappi	24	250	12,5
B1	Liukutappi	36	250	12,5
B2	Pultti M14	36	400	16,0
C1	Pultti M16	36	630	28,0
C2	Pultti M16	36	1250	75,0
D1	Pultti M16	24	800	50,0
D2	Pultti M16	24	1250	75,0

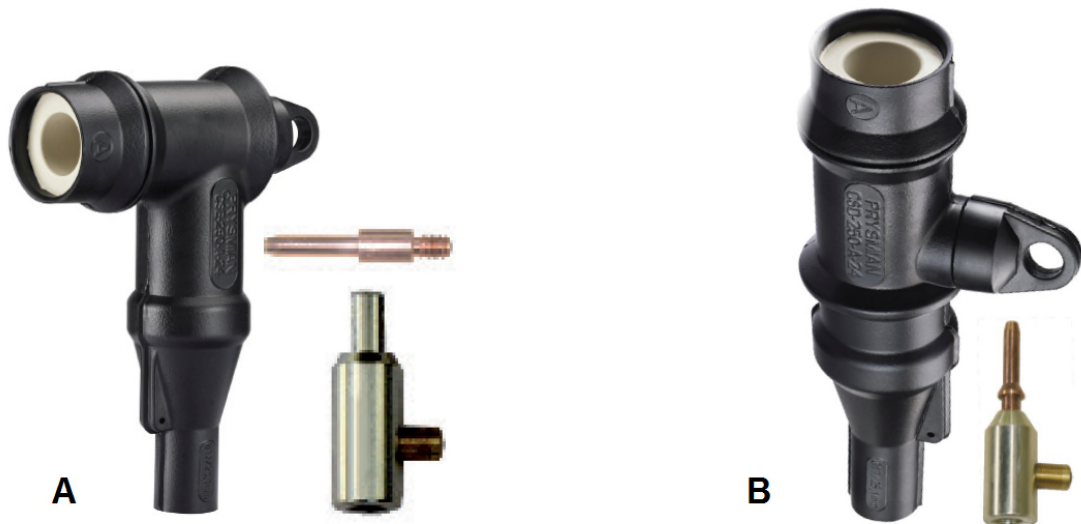
Läpivientieristimien koko ja liitostapa vaikuttavat suurimpaan sallittuun jännitteeseen ja kuormitus- sekä oikosulkuvirtaan. Pidempi eristinkartio lisää jännitekestoisuutta ja suurempi liitospultti puolestaan nostaa suurinta sallittua kuormitusvirtaa sekä oikosulkuvirtaa, minkä lisäksi liitosten mekaaninen kestoisuus paranee. Pistokepäätteet määräytyvät yleensä kaapelin raja-arvojen mukaisesti. Varustetoimittajan ja järjestelmäsuunnittelijan on varmistettava, että pistokepäätteet ja läpivientieristin vastaavat käytettävän kaapelin ominaisuuksia.

250 A:n pistokepäätteet

A-tyyppin läpivientieristimeen soveltuva 250 A:n pistokepäätettä käytetään yleensä enintään 95 mm²:n kaapeleille. Esimerkiksi AHXAMK-W 3x95Al+35Cu 20kV -kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta on 280 A, mikä ylittää A-tyyppin pistokepäätteen nimellisen kuormitusvirran. Kaapelin vaihejohtimelle suurin sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta on 8,9 kA, jonka A1-tyyppin läpivientieristin myös täyttää. Käytettäessä 250 A:n pistokepäätteitä AHXAMK-W 3x95Al+35Cu 20 kV -kaapeliin on siis varmistettava, että suurin mahdollinen kuormitusvirta ei ylitä läpivientieristimen suurinta sallittua arvoa. [12, s. 98–99.]

A-tyyppin pistokepäätteitä käytetään esimerkiksi HXCMK-PLUS 1x35/16 -kaapelille puistomuuntamoiden muuntajien ja erottimien välissä. Tämän suurin sallittu kuormitusvirta

on 220 A ja vaihejohtimelle suurin sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta on 5,0 kA. Tässä tapauksessa läpivientieristin täyttää kaapelille asetetut vaatimukset. Kuvassa 19 on esitetty kaksi erilaista A-tyyppin pistokepäätettä. [12, s. 110–111.]



Kuva 19. Prysmian Groupin 250 A:n pistokepäätteen. Kuvassa A on MSCE/EC-250-A -tyyppin kulmapistokepäätteen ja kuvassa B MSCS/EC-250-A -tyyppin suorapistokepäätteen [17].

630 A:n Pistokepäätteen

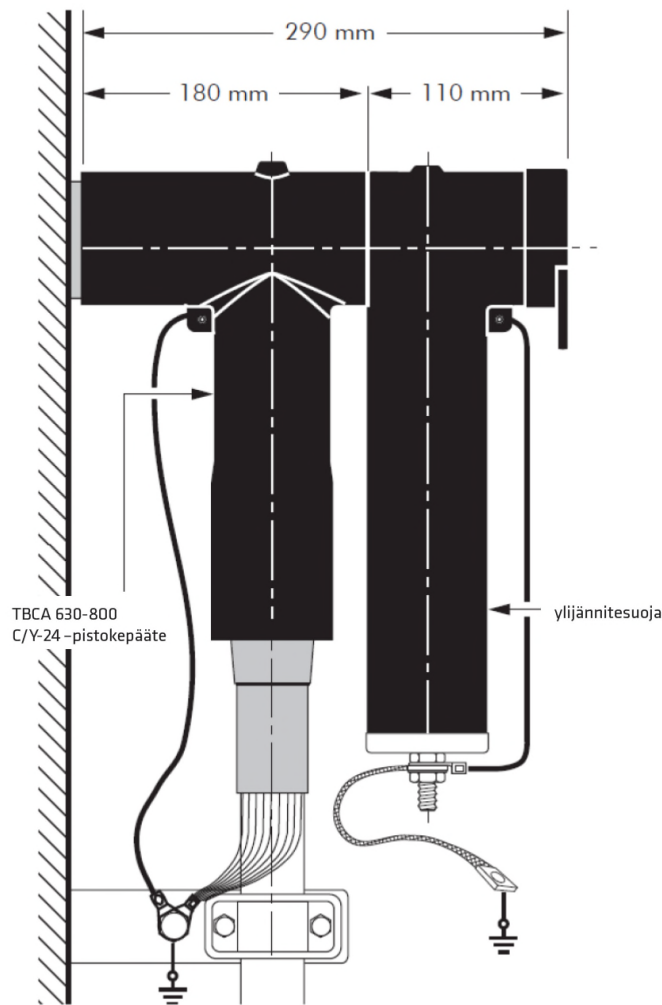
C-tyyppin läpivientieristimeen soveltuvat 630 A:n pistokepäätteen ovat Suomessa yleisimmin käytettyjä. Ne soveltuvat kaapelikokoon 300 mm² asti. Esimerkiksi AHXAMK-W 3x300Al+70Cu 20kV -kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta on 565 A ja vaihejohtimelle suurin sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta on 28,3 kA. Käytettäessä C1-tyyppin läpivientieristintä on varmistuttava, että järjestelmän suurin mahdollinen oikosulkuvirta ei ylitä läpivientieristimen raja-arvoa 28,0 kA. Kaapeleille, joiden johdinkoko on 400 mm² tai suurempi, pitäisi käyttää vähintään C2-tyyppin läpivientieristimiä ja niille soveltuvia pistokepäätteen. Kuvassa 20 on esitetty kaksi erilaista C-tyyppin pistokepäätteen. [12, s. 98–99.]



Kuva 20. Prysmian Groupin 630 A:n Elascon-pistokepäätteet. Kuvassa A on MSCEA/EC-630-C -tyypin kulmapistokepäätte ja kuvassa B on MSCT/EC -630-C -tyypin T-kulmapistokepäätte [17].

Pistokepäätteiden käyttö on yleistynyt viime vuosina SF6-kojeistojen suosion kasvaessa. Syynä siihen on SF6-kojeistojen pienempi tilantarve ilmaeristeisiin kojeistoihin verrattuna. Lisäksi kosketussuojattujen pistokepäätteiden käyttö on lisääntynyt paremman käyttövarmuuden vuoksi.

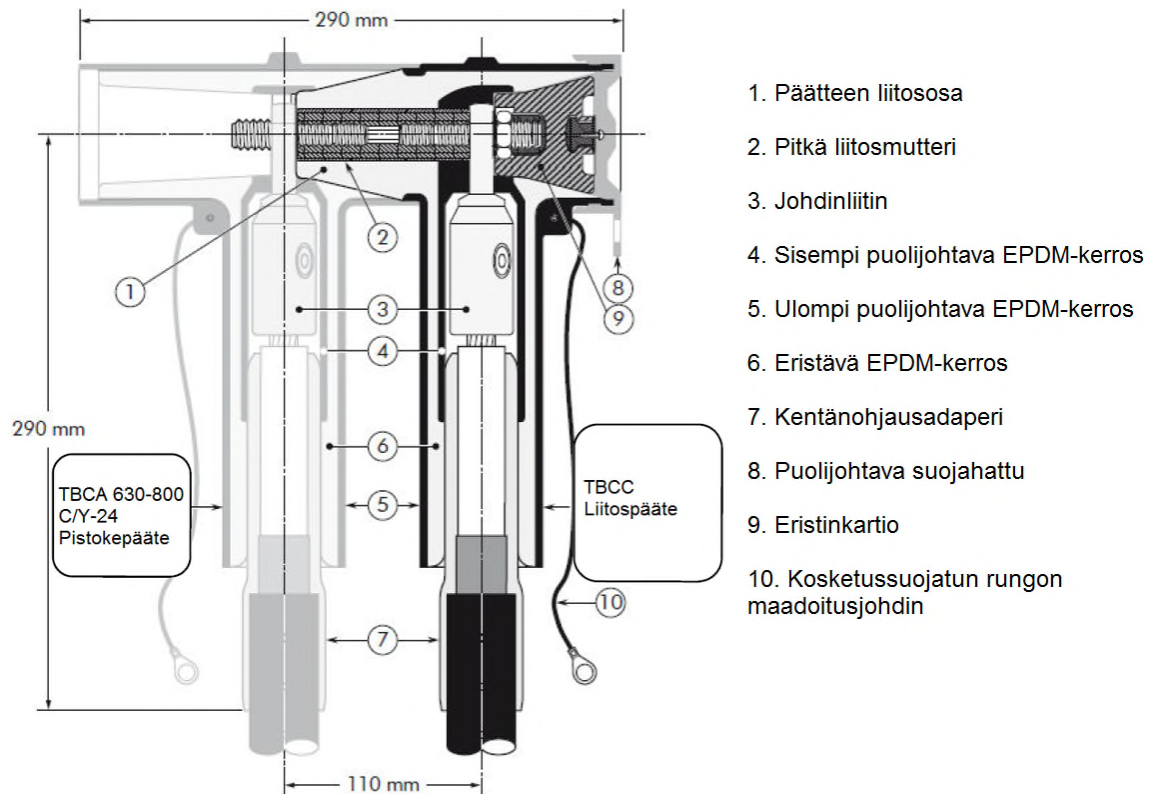
Ilmajohtoon yhdistetyissä kaapeliverkoissa käytetään ylijännitesuojia, jotka liitetään pistokepäätteisiin. Ylijännitesuojat sijoitetaan mahdollisimman lähelle ilmajohtoliityntää. Ilmajohtoverkon keskelle sijoittuvan kaapeliyhteyden molempiin päihin on suositeltavaa asentaa ylijännitesuojat. Ylijännitesuojat voidaan asentaa pistokepäätteiden rinnalle. Kuvassa 21 on Prysmian Groupin Elascon SA-pistokepäätteen ja ylijännitesuojan yhdistelmä.



Kuva 21. Prysmian Groupin Elascan SA-pistokepäätteen ja ylijännitesuojan yhdistelmä [muokattu lähteestä 29].

Ylijännitesuoja suojaa kaapelijärjestelmää, muuntajia, erottimia ja muita verkon komponentteja ilmastollisilta ylijännitteiltä. Suomessa käytettävien ylijännitesuojien nimellispurkausvirta on yleensä 10 kA. Nimellispurkausvirta tarkoittaa suurinta syöksyvirran arvoa, jolla suoja on suunniteltu toimivaksi. Alle 10 kA:n ylijännitesuojia käytetään vain pienjänniteverkoissa tai vähemmän tärkeissä keskijänniteverkoissa. [22, s. 350–360.]

Kahden tai useamman kaapelin rinnankytkennöissä käytetään liitospäätteitä. Liitospäätte asetuu pistokepäätteen tai toisen liitospäätteen takaosaan, joten sen liitososat poikkeavat normaalista pistokepäätteestä. Asennuksellisesti se kuitenkin vastaa pistokepäätettä. Kuvassa 22 on esitetty Elascan CC-pistokepäätteen ja liitospäätteen yhdistelmä.

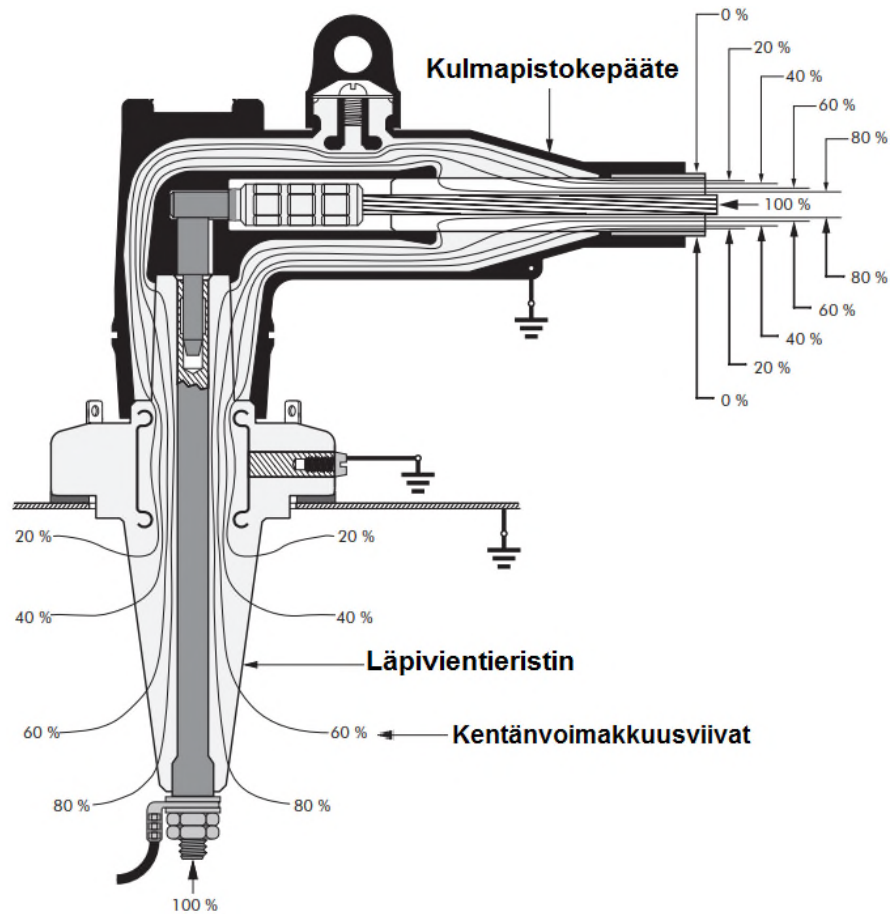


Kuva 22. Prysmian Groupin Elascan CC-pistokepääteen ja liitospääteen yhdistelmä [17].

Kyt kentätilan mitoituksessa on otettava huomioon ylijännitesuojien ja liitospääteiden tilantarve. Pistokepääteen takaosan, liitospääteiden, ylijännitesuojien ja muiden lisäosien liitososat eivät ole standardoituja, joten ne eivät välttämättä ole yhteensopivia eri varustetoimittajien tuotteiden kesken.

Pistokepääteiden rakenne

Pistokepääteiden asennusperiaate on hyvin samanlainen kuin sisä- ja ulkopääteissä, mutta rakenne on erilainen. Pistokepääteessä johtimen ja kosketussuojan liitokset tehdään vastaavalla tavalla kuin sisä- ja ulkopääteissä. Hohtosuojan päälle asetettava kentänohjaus toimii myös adapterina, jonka päälle asennetaan pistokepääterunko. Pistokepäätteet eroavat ilmaeristeisiin liitoksiin käytettävistä päätteistä siten, että niissä sähkökenttä kulkeutuu johdinliitoksen yli läpivientieristimeen. Kuva 23 esittää, kuinka sähkökenttä jakautuu tasaisesti kosketussuojatun pistokepääteen eristykseen sekä läpivientieristimeen.



Kuva 23. Kosketussuojatun pistokepäätteen ja läpivientieristimen sähkökenttä [muokattu lähteestä 19, s. 8].

4.4 Jatkokset

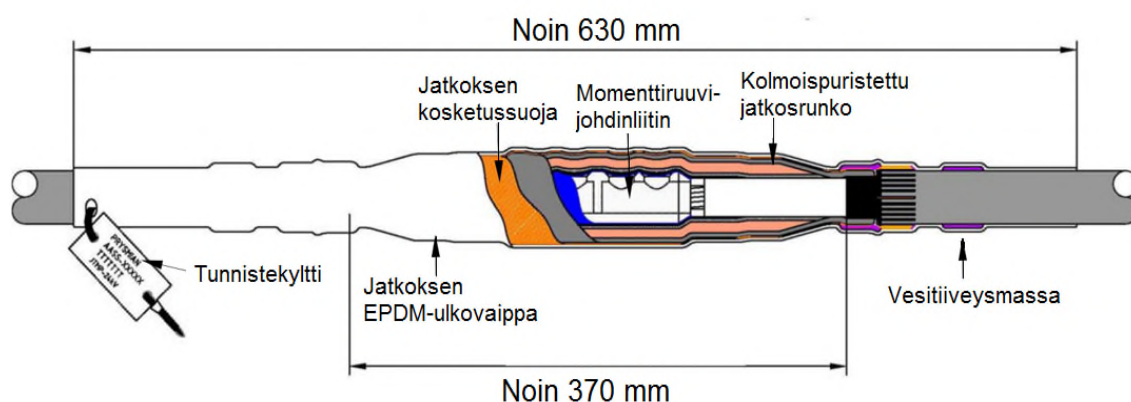
Useimmiten jatkosta käytetään kahden muovikaapelin yhdistämiseen, mutta vielä nykyäänkin jatkoksia tarvitaan myös öljypaperikaapelien yhdistämiseen ja sekajatkoksia öljypaperi- sekä muovikaapelin yhdistämiseen (transition joint). Kolmen kaapelin yhdistämiseen tarkoitettujen jatkoksien (branch joint) käyttö on harvinaista Suomessa.

Jatkoksien rakenne

Jatkoksessa kaikki rakennekerrokset jatketaan kaapelista toiseen. Johtimet yhdistetään joko puristettavilla tai momenttiruuvikiristeisillä jatkosholkeilla. Jatkoksen eristys asettuu

kaapelin eristyksen ja johdinjatkosholkin päälle asennetun sisemmän puolijohtavan kerroksen päälle. Jatkoksen ulompi puolijohtava kerros asettuu kaapelien hohtosuojien päälle. Kaapelien kosketussuojat yhdistetään toisiinsa jatkoksen omalla kosketussuojalla, joka on yleensä tinattu kuparisukka.

Jatkoksen ulkovaipan alle ja kaapelin ulkovaipan päälle asetetaan tiivistysnauha, joka varmistaa vesitiiveyden. Vesitiiveyttä parantaa myös se, että jatkoksen ulkovaippa ulottuu riittävän pitkälle kaapelin ulkovaipan päälle. Kuvassa 24 on esitetty valmiin Elaspeed-jatkoksen poikkileikkauskuva.



Kuva 24. Valmiin Elaspeed-jatkoksen poikkileikkauskuva [30].

Kuvassa esitetty 20 kV Elaspeed-jatkoksen poikkileikkauskuva, jossa on esitetty myös jatkosalueen tavanomainen pituus noin 370 mm ja valmiin jatkoksen pituus noin 630 mm.

5 Jakeluverkon vaatimuksia varusteille

Jakeluverkkoyhtiöt haluavat hankkia keskijännitemaakaapelijärjestelmän, joka kestää vähintään 40 vuotta. Käyttöaikanaan järjestelmän on kestävä vaativat ympäristöolosuhteet, kuormituksen vaihtelut sekä myös keskimäärin noin 1–5 verkossa esiintyvää vikatapausta. Nämä vikatapaukset voivat aiheuttaa esimerkiksi jännitteen nousua verkossa, poikkeuksellisen suuren virtakuormituksen tai suuria vikavirtoja. Varusteiden suunnittelussa ja asennuksessa on otettava huomioon Suomessa esiintyvät ääriolosuhteet. [31.]

5.1 Ympäristöolosuhteet

Ympäristöolosuhteet vaihtelevat Suomessa maantieteellisen sijainnin, vuodenajan ja vuorokauden ajan mukaan. Erityisesti vaihtelua esiintyy lämpötilan, ilman- ja maaperän kosteuden sekä ilman epäpuhtauksien suhteen.

5.1.1 Lämpötilavaihtelut

Maaperässä kaapelijärjestelmän ympäristön lämpötila vaihtelee suhteellisen vähän, enintään noin 25 °C. Talven kovilla pakkasilla vähintään puolen metrin syvyyteen maahan asennetun kaapelin ympäristön lämpötila on alimmillaan noin -5 °C, kun pitkään jatkuneilla kesähelteillä lämpötila voi nousta jopa 20 °C:seen. [31.]

Osittain avonaisissa ja lämmittämättömissä kojeistotiloissa kuten puistomuuntamoissa ja haarotuskaapeissa lämpötilavaihtelut voivat olla suuria. Puistomuuntamossa lämpötila voi vaihdella yöpakkasten ja päivällä lämmittävän auringon vaikutuksesta jopa 40–50 °C yhden vuorokauden aikana. Ympäristön lämpötilaan voi vaikuttaa samaan tilaan asennetun muuntajan kuormitus. Osittain avonaisissa kojeistorakenteissa kaapelipäätteet eivät kuitenkaan joudu alttiiksi niin suurille lämpötilavaihteluille kuin esimerkiksi pylväsasennuksissa. Osittain avonaisisten kojeistorakenteiden suurin haaste onkin kosteuden tiivistyminen päätteiden pinnalle lämpötilavaihteluiden vuoksi sekä päätteiden likaantuminen.

Ulkoilmaan, esimerkiksi kaapelihyllylle asennetun jatkoksen ja pylvääseen asennetun päätteiden ympäristön lämpötilavaihtelu voi olla erityisen suuri. Talviyönä ympäristön lämpötila voi olla -50 °C ja tyynenä aurinkoisena kesäpäivänä jopa yli +35 °C. Vuodenajasta riippuen ympäristön lämpötila voi siis vaihdella 85 °C ja varusteen pintalämpötilan vaihtelu voi olla jopa enemmän. Tyynenä ja aurinkoisena kesäpäivänä kaapelin ja varusteen pintalämpötila voi nousta jopa +50 °C:n lämpötilaan. Yhden vuorokaudenkin aikana kaapelin ja varusteen pintalämpötila voi vaihdella 50–60 °C. [31.]

Standardi HD 629.1 vaatii varusteille kuormituskokeet, joissa johtimen lämpötila nostetaan 5–10 °C:tta kaapelin suurinta sallittua jatkuvaa käytön lämpötilaa korkeammaksi.

AHXAMK-W-tyypin kaapelille tämä tarkoittaa 95–100 °C:n johdinlämpötilaa kuormituskokeen aikana. Kuormituskoevaatimus sisältää useita vähintään 8 tunnin kuormitusjaksoja. Hyväksytysti tehty kuormituskoe antaa varusteille edellytykset kestää suomalaisessa jakeluverkossa esiintyviä ympäristön lämpötilavaihteluita ja korkeita ympäristön lämpötiloja ainakin lyhyinä ajanjaksoina. [26; 32.]

Sen sijaan HD 629.1 ei esitä minkäänlaisia testausvaatimuksia alhaisissa lämpötiloissa kuten Suomessa talviolosuhteissa. Talviyönä, kun ympäristön lämpötila on alimmillaan, on myös kaapelia ja varustetta lämmittävä kuormitus alentuneen sähkönkulutuksen vuoksi alimmillaan. Kaapelin PEX-eristyksen halkaisija elää voimakkaasti lämpötilavaihteluiden mukaan. PEX-eristys laajenee lämpimässä ja kutistuu kylmässä. Mikäli esimerkiksi ulkopääte ei pysty seuraamaan kaapelin kutistuvaa eristystä riittävän hyvin, voi niiden rajapintaan syntyä ilmarako, jossa osittaispurkausten syntyminen on mahdollista. Osittaispurkaukset lisääntyvät aikaa myöten ja voivat syttyä myöhemmin korkeammisakin lämpötiloissa. Pitkäaikainen osittaispurkausrasitus johtaa kaapelieristyksen eroosioon ja lopulta läpilyöntiin. [31.]

5.1.2 Ilmankosteus ja epäpuhtaudet

Kosteus ja epäpuhtaudet pienentävät päätteen ja ilman välisen rajapinnan ylilyöntilujuutta. Tämä aiheutuu kosteuden tiivistymisestä pisaroiksi niiden rajapinnoilla. Pisarat muodostavat päätteen pinnalle kohtia, joissa kentänvoimakkuus on kohonnut paikallisesti. Ilmiötä voimistaa päätteen likaantuminen. [22, s.141.]

Ulos ja osittain avonaisiin kojeistorakenteisiin asennettavat kaapelivarusteet voivat joutua alttiiksi vedelle, ilman epäpuhtauksille ja UV-säteilylle. Kosteuden, suolasumun ja pienien epäpuhtauksien asettamat vaatimukset ovat huomioitu HD 629.1:n tyyppikoevaatimuksissa. Ulkopäätteiden on kestävä 1,25 U_0 :n jännite yhteensä 1300 tunnin suolasumukokeissa. Kosteaa suolasumu muodostaa johtavan kalvon kaapelipäätteen pintaan, joten koe vastaa hyvin veden ja ilman epäpuhtauksien yhteisvaikutusta. [26; 32.]

Jakeluverkossa ilmankosteuden ja epäpuhtauksien aiheuttamia haasteita kaapelipääteissä esiintyy eniten lämmittämättömissä ja osittain avonaisissa kojeistorakenteissa, kuten puistomuuntamoissa ja haaroituskaapeissa. Ne suojaavat päätteitä suoralta aurinгон UV-säteilyltä ja vesisateelta, mutta ilmankosteus ja epäpuhtaudet pääsevät tunkeutumaan osittain avonaisen rakenteen vuoksi päätteiden pinnalle. Puistomuuntamoissa käytetään usein sisäpäätteitä, vaikka olosuhteet ovatkin epäpuhtauksien kannalta haastavimmat kuin ulos asennettavissa päätteissä, joissa sade huuhtelee päätteiden pintaa aika ajoin. [33, s. 21.]

Puistomuuntamot ja haaroituskaapit ovat pohjasta avoimia ja osittain maahan upotettuja rakenteita, joihin kosteus voi nousta maaperästä tai se voi tiivistyä rakenteen ala- ja yläosan suuren lämpötilaeron seurauksena. Erityisesti näiden alaosaan kiinnitetyt päätteet joutuvat alttiiksi korkealle ilmankosteudelle ja ilman epäpuhtauksille, jotka aikaa myöten kiinnittyvät päätteen pintaan muodostaen vuotovirtoja aiheuttavan kalvon. Kuvassa 25 on esitetty likaantuneet päätteet osittain avonaisen puistomuuntamon kytkentäkennossa. [22, s. 142; 33, s. 21.]



Kuva 25. Likaantuneet kaapelipäätteet puistomuuntamon kytkentäkennossa [33, s. 21].

Vuonna 2015 julkaistussa diplomityössä on tutkittu noin 650 puistomuuntamon sisä- ja ulkopäätteitä. Siinä tarkistettiin noin viisi tuhatta päätettä, joista lähes 10 %:ssa havaittiin haitallisia pintapurkauksia. Päätteiden keskimääräisen käyttöajan ollessa reilusti alle 10 vuotta tulos on vieläkin huolestuttavampi. Päätteistä 94 % oli sisäpäätteitä. Tutkimus osoitti, että silikonipintaisilla kylmäkutistepäätteillä on paremmat edellytykset toimia vaativissa olosuhteissa verrattuna lämpökutisteisiin. Lisäksi tulokset osoittivat puistomuuntamoiden vaativat olosuhteet, minkä vuoksi näissä kohteissa kannattaa kiinnittää erityistä huomiota päätteiden pintaryömintämatkaan. Sisäpäätteiden käyttö puistomuuntajissa on ollut turhankin yleistä pienemmän kokonsa ja edullisemmän hintansa vuoksi. [33, s. 21–38.]

5.1.3 Maaperän kosteus

Jatkoksen rakenne ja materiaalit suunnitellaan kestäväksi märkiä olosuhteita maa-asennuksissa. Jatkoksien on oltava vesitiiviitä pitkittäis- ja poikittaissuunnassa järjestelmän käyttöänsä ajan. Pitkittäisellä vesitiiveydellä estetään veden eteneminen kaapelin vaihevaipan ja jatkoksen ulkovaipan välistä sisäkerrokseen. Pitkittäiseen vesitiiveyteen vaikuttaa oleellisesti veden paine.

Poikittaisella eli säteittäisellä vesitiiveydellä estetään veden eteneminen diffuusion avulla jatkoksen ulkokerrosten läpi sisäkerrokseen. Vesi etenee kaikissa muissa materiaaleissa paitsi metallissa ja lasissa. Ne eivät lukeudu huokosiin eli hygroskooppisiin materiaaleihin, joihin kosteus voisi sitoutua. Veden diffuusionopeus kasvaa lämpötilan noustessa, mutta veden paine ei juurikaan vaikuta siihen.

HD 629.1:n tyyppikoevaatimus edellyttää jatkosten kuormitus- ja jännitekokeita veteen upotettuna. Yhteensä 63 kappaletta kahdeksan tunnin kuormitusjaksoja yhden metrin syvyydessä vedessä ei vielä välttämättä takaa jatkoksien vesitiiveyttä 40 vuodeksi kaikissa asennusolosuhteissa. Myöskään kyseisen kokeen jälkeen ei tehdä erillisiä loppukokeita, joilla veden tunkeutuminen jatkokseen ja kaapelin eristykseen voitaisiin todentaa. Tähän voisi soveltua parhaiten esimerkiksi häviökerroinmittaukset. Luvuissa 6 ja 7 esitellään poikittaisen ja pitkittäisen vesitiiveyden lisäkokeita. [26; 32.]

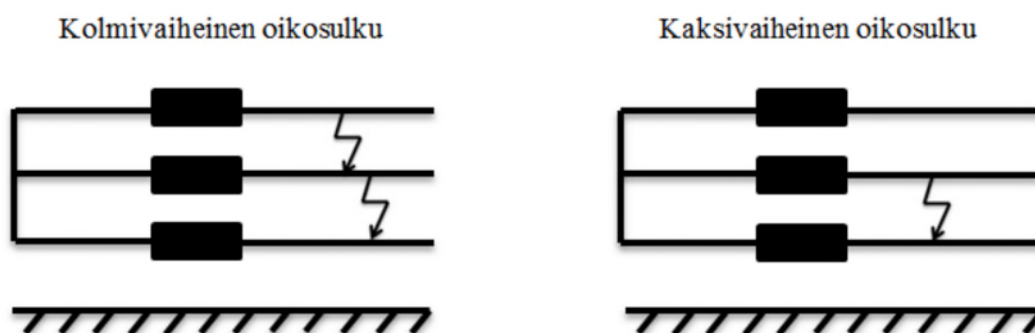
5.2 Verkon normaalikäyttö

Teollisuusasennuksissa keskijännitekaapelijärjestelmää saatetaan kuormittaa suurella kuormitusvirralla, joka tarkoittaa lähes jatkuvaa 80–90 °C johdinlämpötilaa. Jakeluverkossa tämä on hyvin harvinainen tilanne edes hetkellisesti. Keskijännitekaapelijärjestelmät ovatkin mitoitettu pääsääntöisesti noin 30–40 °C johdinlämpötilalle, mikä tarkoittaa suhteellisen pientä kuormitusta kaapelin ja varusteiden eristysten vanhenemisen kannalta. [31.]

5.3 Verkon vikatilanteet

Jakeluverkossa syntyvät viat voivat aiheutua useista syistä, kuten ilmastollisista syistä, materiaali- ja laitevioista, kytkentävirheistä tai ulkopuolisista mekaanisista vaurioista kuten kaivuutöistä. Verkossa syntyviä vikatilanteita ovat oikosulut ja maasulut. Oikosulut ovat vaihejohtimien välisiä vikoja ja maasulut vaihejohtimen ja maan tai siihen yhteydessä olevan osan välisiä vikoja. Oiko- ja maasulut ovat harvinaisia, mutta niihin täytyy varautua myös kaapelivarusteiden mitoituksessa. [6, s. 166.]

Useimmiten oikosulun aiheuttamassa vikakohdassa jännite on pieni, mutta virta on suuri. Vastukseton kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa suurimman mahdollisen vikavirran järjestelmään, joten se vaikuttaa oleellisesti verkon johtimien ja johdinliitosten mitoitukseen. Oikosulkuvirran suuruus voi olla 10–40-kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna. Kuvassa 26 on esitetty kolmivaiheinen ja kaksivaiheinen oikosulku. [6, s. 166–170.]



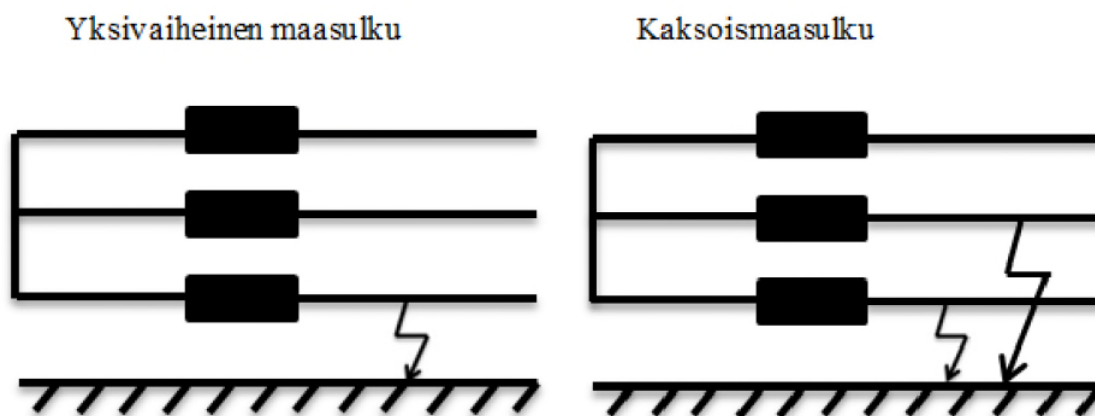
Kuva 26. Kolmi- ja kaksivaiheinen oikosulku [34, s.18].

Standardin HD 629.1 tyyppikoevaatimus edellyttää varusteille hyväksytysti suoritettuja termisiä ja dynaamisia oikosulkukokeita. Johtimen termisessä oikosulkukokeessa varusteen läpi syötetään kaksi oikosulkupulssia, joilla johdinlämpötila nostetaan suurimpaan sallittuun lämpötilaan. Dynaamisessa oikosulkukokeessa kaapelin johtimeen syötetään vähintään 63–80 kA:n virta kaapelivarusteen rakenteesta riippuen. Hyväksytysti suoritettut termiset ja dynaamiset oikosulkukokeet antavat varusteille edellytykset kestää johdinliitoksiin kohdistuvia vikavirtoja. [26; 32.]

Yksivaiheinen maasulku on yleisin verkon käyttötaajuisia ylijännitteitä aiheuttava tilanne, joka aiheuttaa jännitteen nousun kahdessa ehjässä vaiheessa. Ehjissä vaiheissa vaikuttavan ylijännitteen suuruus riippuu verkon tähtipisteen maadoitustavasta ja vikapaikasta. Maasta erotetussa verkossa ehjien vaiheiden johtimen ja maan väliset jännitteet (U_0) voivat nousta jopa pääjännitettä (U) suuremmaksi, mikä saattaa aiheuttaa ylimääräistä rasitusta kaapeleiden ja varusteiden eristyksissä. [22, s. 255.]

HD 629.1:n tyyppikoevaatimus edellyttää jännite- ja osittaispurkausmittausten tekemistä moninkertaisilla jännitteillä käyttöjännitteeseen verrattuna. Esimerkiksi kuormituskokeet jännitteellä $2,5 U_0$, viiden minuutin AC-jännitekoe $4,5 U_0$ ja osittaispurkausmittaus jännitteellä $2 U_0$ antavat varusteille edellytykset kestää yksivaiheisen maasulun aiheuttaman jännitteen nousun ainakin lyhytaikaisesti. [26.]

Mikäli samassa muuntopiirissä on kaksi eri maasulkua eri vaihejohtimissa, on kyse kaksoismaasulusta. Kaksoismaasulku voi syntyä yksivaiheisen maasulun seurauksena, kun jännitteen nousu ehjässä vaiheessa aiheuttaa eristykseen läpilyönnin. Maasulkupaikat voivat olla kaukanakin toisistaan. Sen aiheuttamat vikavirrat ovat yleensä suuria, jopa oikosulkuvirran suuruisia. Kaksoismaasulku on hankala jakeluverkon vika, sillä sen aiheuttamat vikavirrat kulkevat myös kaapelin kosketussuojassa, mikä rasittaa kaapelia ja varusteita termisesti. Kuvassa 27 on esitetty yksivaiheinen maasulku ja kaksoismaasulku. [5, s. 198; 8, s. 342.]



Kuva 27. Yksivaiheinen maasulku ja kaksoismaasulku [34, s. 20–21].

Kaapelin kosketussuojien lisäksi kaksoismaasulun aiheuttamat vikavirrat asettavat vaatimuksia kaapelivarusteiden kosketussuojaliitoksille. Standardin HD 629.1 tyyppikoevaatimuksen terminen oikosulkukoe vaatii kosketussuojaliitoksille ainoastaan kahta oikosulkupulssia. Standardi ei määrittele oikosulkuvirran suuruutta tai virtapulssin kestoa, vaan ne pitäisi sopia tapauskohtaisesti verkkoyhtiön kanssa. Kaapelin kosketussuojan rakenteella on myös suuri vaikutus siihen tehtävien liitoksien kestoisuuteen. Luvussa 6.4 esitellään AHXAMK-W-tyyppin kaapelille suoritettuja termisiä oikosulkukokeita. [26; 32.]

Toisinaan keskijänniteverkossa saattaa syntyä tilanteita, joissa kaapelijärjestelmä joutuu normaalia suurempaan virtakuormaan esimerkiksi jossakin verkon osassa syntyneen vian ja sitä seuranneen kytkentämuutoksen vuoksi. Suurempi virtakuorma voi nostaa yksittäisen kaapelijärjestelmän johdinlämpötilan jopa 60–80 °C:seen. Yli 65 °C:n lämpötila maahan asennetussa kaapelijärjestelmässä kuivattaa ympärillä olevaa maaperää, mikä kasvattaa maan lämpöresistiivisyyttä. Kuiva maaperä johtaa lämpöä huonommin pois kaapelista ja varusteista, jolloin johdinlämpötila saattaa nousta entisestään. [31.]

Johtimen jatkuva korkea lämpötila (60–90 °C) kiihdyttää kaapelin ja varusteiden vanhenemista. Tällaisia tilanteita syntyy verkossa kuitenkin yleensä harvoin kestäen korkeintaan muutaman vuorokauden ajan. Standardin HD 629.1 tyyppikoevaatimus edellyttää useiden jännitteisten kuormituskoejaksojen tekemistä 5–10 °C johtimen suurinta sallittua

lämpötilaa korkeammissa lämpötiloissa. Tyypikoevaatimus antaa varusteille hyvät edellytykset kestää hetkittäisiä korkeita johdinlämpötiloja. [26; 31; 32.]

6 Varusteiden vaatimustenmukaisuuden arviointi

Kaapelivarusteiden käyttövarmuutta voidaan arvioida monin eri tavoin. Kansainvälisten ja eurooppalaisten standardien mukaiset tyypikokeet määrittävät varusteille minimivaatimustason. Sen lisäksi kannattaa varmistua varusteiden vaatimustenmukaisuudesta erilaisissa ympäristö- ja käyttöolosuhteissa sekä soveltuvuudesta käytettävälle kaapelille. Tässä luvussa tarkastellaan standardin HD 629.1 tyypikoevaatimusten lisäksi, mitä muita menetelmiä voidaan käyttää varusteiden vaativampaan arviointiin ja miten ne soveltuvat Suomen käyttö- ja ympäristöolosuhteisiin.

6.1 Standardien mukaiset tyypikokeet

Suomessa verkkoyhtiöt vaativat varusteilta hyväksytysti tehdyn tyypikokeen standardin HD 629.1 mukaisesti, joka esittää yleiset tyypikoevaatimukset nimellisjännitteeltään 6-30 kV:n keskijännitevarusteille. HD 629.1:n vaatimukseen perustuen varsinaiset tyypikoejärjestelyt kuvataan standardissa EN 61442. [26.]

Taulukossa 3 esitellään tyypikoevaatimukset sisä-, ulko- ja pistokepäätteille sekä jatkoksille. Taulukkoon merkitty koejärjestys poikkeaa hieman standardin mukaisesta, sillä ne ovat esitetty kootusti.

Taulukko 3. Keskijännitevarusteiden tyyppikoevaatimukset. Taulukossa SP on sisäpääte, UP on ulkopääte, PP on pistokepääte ja J on jatkos [muokattu lähteistä 26; 32].

Koe	SP	UP	PP	J	Vaatus
1 AC-jännitekoe kuivassa ympäristössä	x	x	x	x	Jännite 4,5 U ₀ viiden minuutin ajan, ei läpilyöntiä eikä jänniteylilyöntiä
2 AC-jännitekoe kosteassa ympäristössä		x			Jännite 4,0 U ₀ yhden minuutin ajan, ei läpilyöntiä eikä jänniteylilyöntiä
3 Iskukoe (luokan 2 jatkos)				x	Eristysresistanssi vedessä: - johdin - kosketussuoja ≥ 10 ³ MΩ - kosketussuoja - vesi ≥ 50 MΩ
4 Osittaispurkausmittaus huonelämpötilassa	x	x	x	x	Suurin sallittu purkaustaso 10 pC jännitteellä 2 U ₀
5 Syöksyjännitekoe kuormitettuna	x	x	x	x	10 syöksyjännitepulssia positiivisella ja negatiivisella polariteeteilla, ei läpilyöntiä
6 Jännitteellinen kuormitus-koe	x**	x**	x*	x*	63*/126** kuormitusjaksoa jännitteellä 2,5 U ₀ , ei läpilyöntiä
7 Jännitteellinen kuormitus-koe veteen upotettuna		x*	x**	x**	10*/63** kuormitusjaksoa jännitteellä 2,5 U ₀ , ei läpilyöntiä
8 Osittaispurkausmittaus kuormitettuna	x	x	x	x	Suurin sallittu purkaustaso 10 pC jännitteellä 2 U ₀
9 Terminen oikosulkukoe kosketussuojalle	x	x	x	x	Kaksi oikosulkupulssia, ei liitosvaurioita
10 Terminen oikosulkukoe johtimelle	x	x	x	x	Kaksi oikosulkupulssia, ei liitosvaurioita
11 Dynaaminen oikosulkukoe	x	x	x	x	Yksi oikosulkupulssi, ei liitosvaurioita
12 Syöksyjännitekoe huonelämpötilassa	x	x	x	x	10 syöksyjännitepulssia positiivisella ja negatiivisella polariteeteilla, ei läpilyöntiä
13 AC-jännitekoe kuivassa ympäristössä	x	x	x	x	Jännite 4,5 U ₀ viiden minuutin ajan, ei läpilyöntiä eikä jänniteylilyöntiä
14 Osittaispurkausmittaus huonelämpötilassa	x	x	x	x	Suurin sallittu purkaustaso 10 pC jännitteellä 2 U ₀
15 Jännitekoe kosteassa ilmassa	x				Jännite 1,25 U ₀ 300 tunnin ajan, ei läpilyöntiä eikä jänniteylilyöntiä
16 Jännitekoe suolasumussa		x			Jännite 1,25 U ₀ 1000 tunnin ajan, ei läpilyöntiä eikä jänniteylilyöntiä
17 Visuaalinen tarkastus liitteen C mukaisesti	x	x	x	x	Havaintojen dokumentointi raporttiin

Pistokepäätteiden tyyppikoevaatimukseen kuuluu taulukon 3 lisäksi päätteen läpivientieristimen liitoksen mekaaninen rasituskoe, pistokepäätteiden puolijohtavan pinnan mitaukset sekä kapasitiivisen mittauspisteen toiminnan testaus. Standardissa HD 629.1

jatkokset jaotellaan kahteen luokkaan. Luokan 2 jatkokselle suoritetaan iskukoe, jonka jälkeen sille tehdään eristyksen ja ulkovaipan eristysvastusmittaus veteen upotettuna. Luokan 1 jatkokselle ei vaadita iskukokeen tekemistä. [26; 32.]

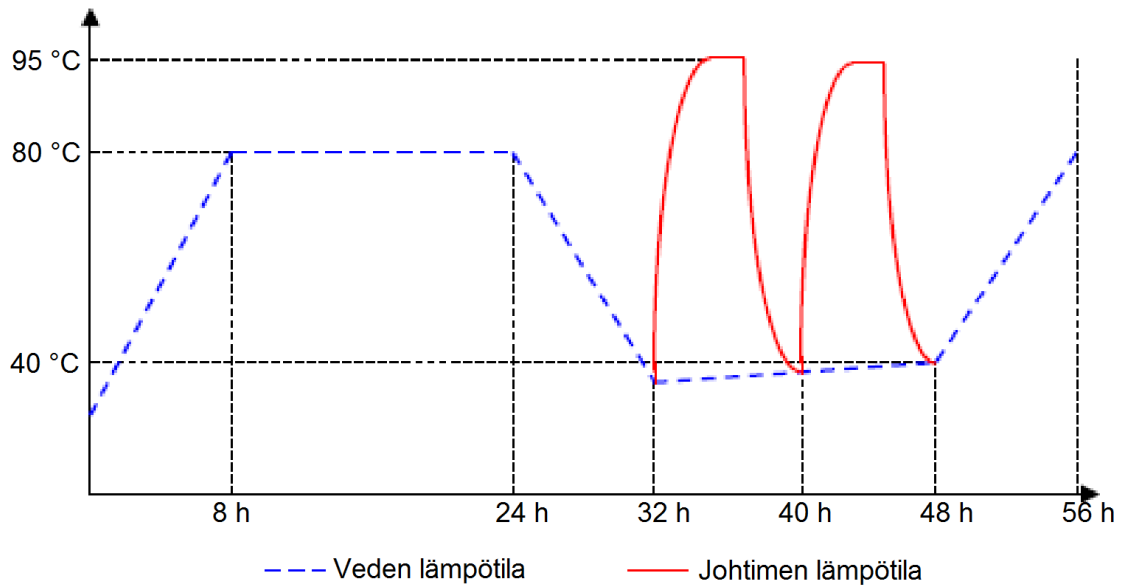
6.2 EDF-vesiallaskoe

Ranskan alle 50 kV sähköverkkoa hallinnoiva Enedis (entinen ERDF, eli Electricité Réseau de Distribution France) omistaa 243 000 kilometriä keskijännitekaapeliverkkoa, jossa on asennettuna yli miljoona kaapelivarustetta. Varusteista suurin osa, noin 750 000 kappaletta on jatkoksia. Nykyään Enedis asennuttaa 35 000 kylmäkutistejatkosta vuosittain.

Vuonna 2009 keskijänniteverkossa tapahtui 7700 vikaa, joista suurin osa todettiin aiheutuneen kosteuden pääsystä jatkoksien sisään. Ongelman poistamiseksi Enedis kehitti vesialtaassa tehtävän vanhennuskokeen (EDF specification HN 33-E-03), jolla varmistetaan kaikkien verkkoon asennettavien jatkoksien laadusta. [35, s. 1.]

Koetta varten asennetaan kuuteen kaapeliin samanlaiset jatkokset, joista kolmelle tehdään vanhennuskoe vesialtaassa. Vesialtaan veden lämpötila vaihtelee 40–80 °C simuloiden vaihtelevaa ympäristön lämpötilaa. Johtimen lämpötila puolestaan vaihtelee 40–95 °C simuloiden vaihtelevaa kuormitusta. Vesialtaan lämmitys-jäähdytysjakso kestää 48 tuntia ja jaksoja on yhteensä 45 kappaletta, eli kokeen kokonaiskesto on 90 vuorokautta. Jatkos asetetaan veteen 60 cm:n syvyyteen ja kokeen ajaksi kaapeliin kytketään 24 kV:n ($2 U_0$) jännite. [35, s. 1–2.]

Kuvassa 28 on esitetty veden ja kaapelin johtimen lämpötiloja kuormitusjaksojen aikana. Yksi kahdeksan tunnin johtimen kuormitusjakso, kuten kuvassa 32–40 h, vastaa standardin HD 629.1 määrittämän tyypikokeen yhtä kuormitusjaksoa [26; 32].

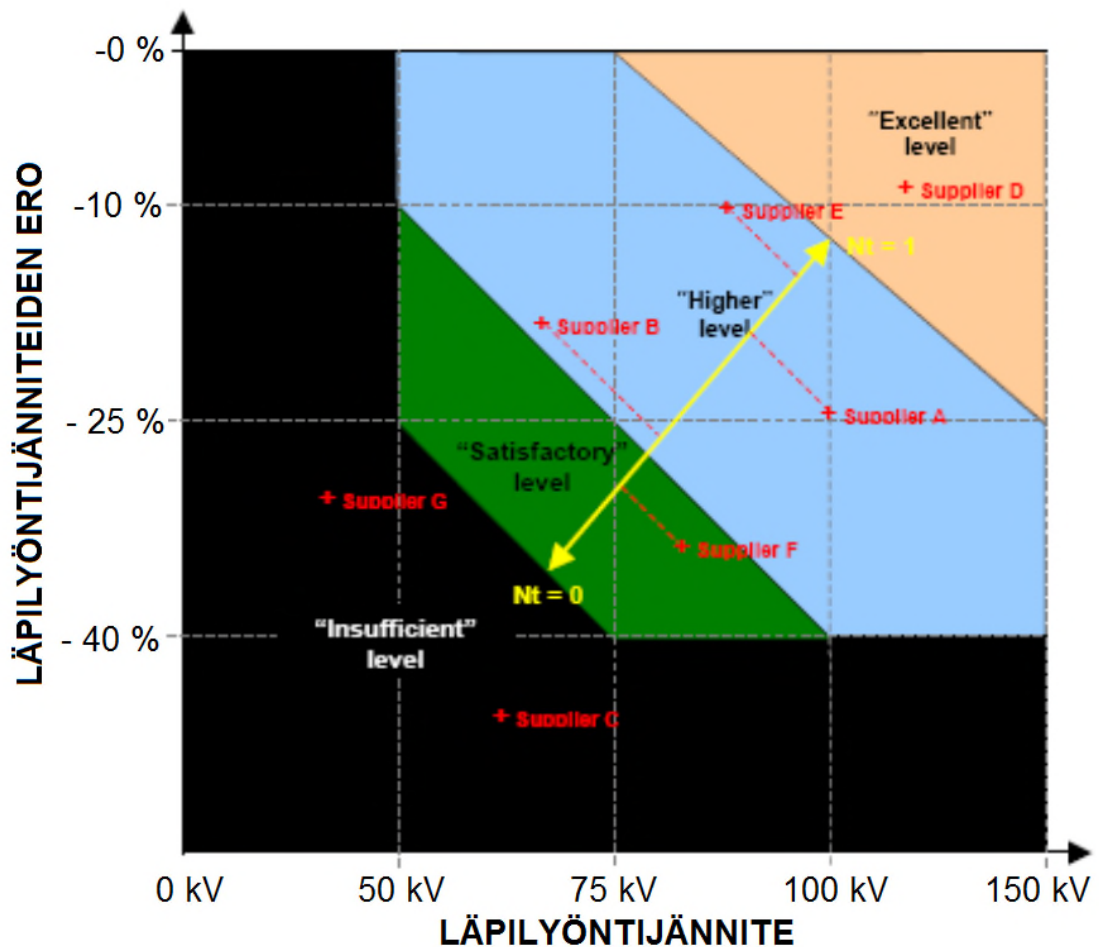


Kuva 28. Veden ja kaapelin johtimen lämpötilavaihtelut EDF-kokeen aikana [muokattu lähteestä 35, s. 2].

Vesiallasvanhennuksen jälkeen jatkoksille tehdään vaipaneheysmittaus sekä jännitekoee, jossa jännite nostetaan läpilyöntiin asti. Vesialtaassa vanhennettujen kolmen jatkoksen tuloksia verrataan kolmeen vanhentamattomaan jatkokseen. Jatkostyyppi hylätään, mikäli

- jatkoksessa syntyy läpilyönti vesiallasvanhennuksen aikana
- jatkos ei täytä eristysresistanssimittauksen vaatimusta
- vesi pääsee jatkoksen sisälle (silmämääräinen tarkastus)
- jatkoksen läpilyöntijännite on alle 50 kV eli noin $4,2 U_0$
- vanhennettujen ja vanhentamattomien jatkoksien läpilyöntijännitteen ero on yli 40 %. [35, s. 2.]

Vesiallaskokeen tuloksia analysoidaan kuvan 29 kuvaajan avulla, johon merkitään tulosten keskiarvot.



Kuva 29. EDF-kokeen tulosten luokittelu [muokattu lähteestä 35, s. 2].

Prosentuaalinen heikentymä lasketaan kolmen vanhentuneen ja vanhentamattoman jatkoksen keskiarvoisen läpilyöntijännitteen erotuksen avulla. Sijainti kuvaajassa määritetään vaak-akselin vesiallaskokeen jälkeisen läpilyöntijännitteen ja pystyakselin läpilyöntijännitteen prosentuaalisen heikentymän mukaan. Jokaiselle jatkostyypille määritetään kuvaajan avulla Nt-arvo, joka on väliltä 0–1. Nt-arvo toimii tarjouskilpailussa hinnan ohella toisena painotettavana tekijänä. [35, s. 2.]

Mustalle alueelle asettuvat jatkostyypit ovat hylättyjä. Vaalean oranssille alueelle asettuvat jatkostyypit ovat erinomaisia ja saavat Nt-arvoksi 1. Mustan ja vaalean oranssin alueiden väliin asettuvat jatkostyypit saavat Nt-arvoksi 0–1. [35, s. 2.]

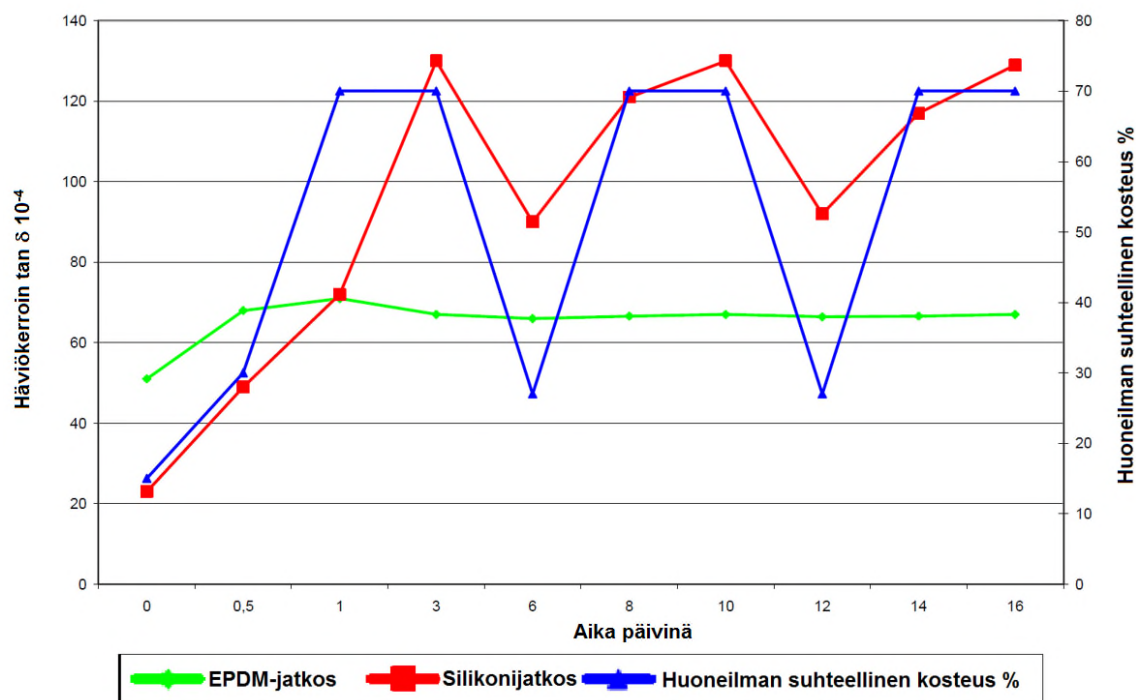
Enediksen vesiallaskoe on hyvä tapa arvioida verkkoon asennettavien jatkoksien vaatimustenmukaisuutta vesitiiveyden osalta. Asennusympäristön lämpötilanvaihtelut nopeuttavat veden etenemistä jatkoksen ulkokerrosten läpi. Lisäksi voimakkaat lämpötilanvaihtelut aiheuttavat kaapelissa lämpölaajenemista ja -kutistumista, joka saattaa vaikuttaa jatkoksien pitkittäiseen vesitiiveyteen. Kaikille kokeeseen osallistuville jatkoksille on tehty standardin HD 629.1 tyyppikoe hyväksytysti. Tästä huolimatta kaikki jatkokset eivät läpäise EDF-koetta hyväksytysti. Koe on siis selvästi haastavampi kuin tyyppikokeiden vaatimat kuormituskokeet.

Kokeessa käytettävä kaapeli on Ranskan kansallisen standardin NF C 33-226 mukainen. Kaapelin rakenne vastaa AHXAMK-WP-kaapelia, eli myös siinä on alumiinilaminaattikosketussuoja. Koetulokset ovat siis käyttökelpoiset myös Suomen jakeluverkkoon asennettaville jatkoksille. [35, s. 1.]

6.3 Kosteuden vaikutus eri jatkosmateriaalien toimintaan

Vuonna 2011 Jicablessa julkaistussa artikkelissa on tutkittu eri jatkosmateriaalien toimintaa kosteassa ympäristössä. Kokeessa EPDM- ja silikonikumieristeiset jatkosrungot asennettiin ilman jatkoksen ulkovaippaa AHXAMK-W-tyyppiä vastaavaan 1 x 150 mm² kaapeliin. Jatkokset sijoitettiin huoneeseen, jonka lämpötila nostettiin 70 °C:seen ja huoneen suhteellista ilmankosteutta muutettiin 30–70 %:n välillä. Jatkoksissa oli kokeen ajan 2 U₀:n eli 24 kV:n jännite. Koekappaleille tehtiin säännöllisesti häviökerroinmittauksia 24 kV:n vaihtojännitteellä. [15, s. 3–4.]

Kuva 30 esittää, kuinka erilaiset varustemateriaalit reagoivat ympäristön kosteusmuutoksiin.



Kuva 30. Suhteellisen ilmankosteuden vaikutus koekappaleiden häviökertoimeen $\tan \delta$ [muokattu lähteestä 15, s. 4].

Kokeesta kävi ilmi, että silikonijatkos päästää kosteutta kaapelin eristykseen hyvin nopeasti ja suuren määrän. Silikonijatkoksen häviökerroin kasvaa voimakkaasti ympäristön suhteellisen kosteuden kasvaessa. Tästä voidaan päätellä, että erityisesti silikonijatkoksien poikittaisena kosteussulkuna olisi syytä käyttää esimerkiksi alumiinilaminaattia estämään kosteuden eteneminen jatkosmateriaalien läpi. [15, s. 4.]

6.4 Kosketussuojaliitosten terminen oikosulkukestoisuus

AHXAMK-WP-kaapelin käyttö on lisääntynyt sen edullisemman hinnan vuoksi, mutta samalla verkkoyhtiöt ovat olleet kiinnostuneita alumiinilaminaattikosketussuojan kaksois- maasulkukestoisuudesta, johon liittyy oleellisesti varusteiden kosketussuojan liitos. Standardi HD 629.1:n vaatima kaksi oikosulkupulssia lienee riittävä teollisuusasennuksille, joiden elinikä tavoite on 20–30 vuotta. Sen sijaan jakeluverkossa tavoiteltu elinikä voi olla jopa 50–70 vuotta, jonka aikana kaapelijärjestelmään voidaan odottaa kohdistuvan enemmän vikatapauksia. [26; 32.]

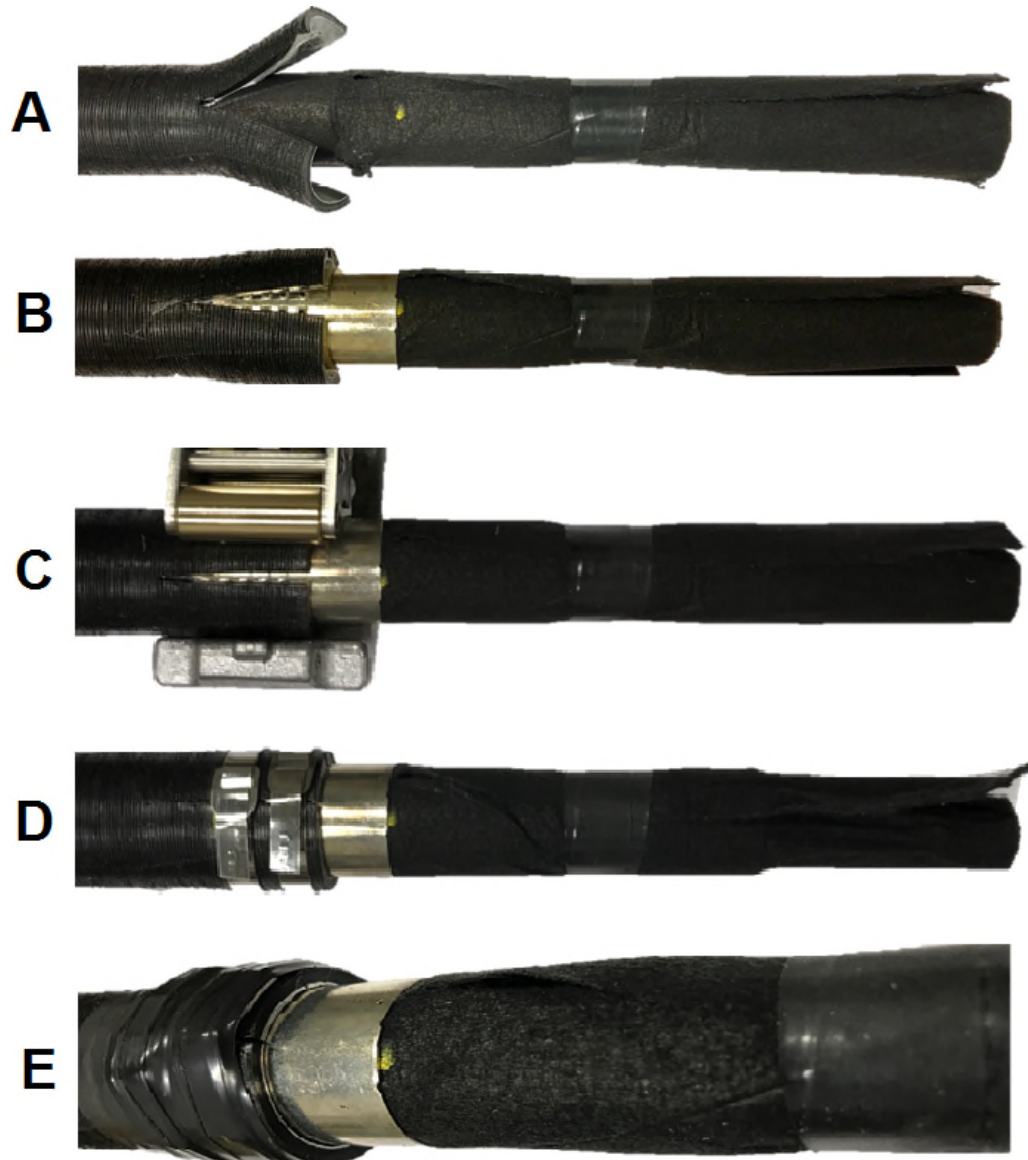
Suomalaisen jakeluverkkoyhtiön kaapeliverkossa kaksoismaasulku voidaan laukaista seuraavasti: vikavirta 0,25 s – virraton aika, pikajälleenkytkentä (pjk) 0,25 s – vikavirta 0,25 s – virraton aika, aikajälleenkytkentä (ajk) 60 s – vikavirta 0,25. Vikavirta vaikuttaa kaapelivarusteen maadoitusliitokseen siis kolme kertaa yhden kaksoismaasulun aikana. Termisesti tämä ei ole liitokselle yhtä vaativa kuin yhden sekunnin jatkuva vikapulssi, sillä liitos jäähtyy ajk:n aikana. Mutta vikapulssin kukin alkamisjakso saattaa aiheuttaa kipinöintiä ja mekaanisia voimavaikutuksia liitosalueella. [31.]

Verkkoyhtiöissä ollaan pääosin tietoisia, että varusteiden kosketussuojan liitokset voivat olla kaapelijärjestelmien heikoimpia kohtia. Usein verkkoyhtiöillä on tarve saada käyttöön AHXAMK-WP:n koko kaksoismaasulkukestoisuus. Tämän vuoksi maadoitusliitosten testauksessa oikosulkupulssien määrä tulisi olla vähintään 5–6 kpl. [31.]

6.4.1 Liitostapa

Kaapelivarusteiden kosketussuojaliitosten on täytettävä kaapelille asetetut vaatimukset termisestä oikosulkukestoisuudesta. Liitoksen pitää säilyä hyvänä myös mekaanisten rasitusten myötä. Hyvässä liitoksessa ylimenoresistanssi on pieni ja liitos on tiivis, jotta vikavirran aiheuttama lämpö johtuu pois. Esimerkiksi ilmakerros liitoksen ympärillä on huono lämmönjohde, jolloin liitos rikkoutuu helpommin vian aikana.

Varusteiden kosketussuojaliitos voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Kuvassa 31 on esitetty Prysmian Groupin varusteissa käytetty kosketussuojaliitoksen tekeminen AHXAMK-W, -WP, -WM tai -WHF-kaapeliin kontaktirenkaan avulla.



Kuva 31. Varusteiden kosketussuojaliitoksen teko kontaktirenkaalla.

Kuvan 31 kohdassa A kaapelin ulkovaippaan on ensin tehty kolme 40 mm pitkää halkiota. Kohdassa B vaipan alle on pujotettu tinattu kuparikontaktirengas siten, että sen karkea kontaktipinta asettuu kaapelin ulkovaipan alla olevaa alumiinilaminaattia vasten. Kohdassa C ulkovaipan suikaleet puristetaan kontaktirenkaan karheata pintaa vasten, jotta saavutetaan mahdollisimman hyvä galvaaninen kontakti sekä tiivis liitos. Kohdassa D vaipan suikaleet on kiristetty ja lukittu metallipannoilla kontaktirenkasta vasten. Lopuksi kohdassa E metallipantojen päälle kierretään teippi, joka estää pantojen aukeamisen asentamisen aikana.

6.4.2 Kaapelin kosketussuojan terminen oikosulkukestoisuus

AHXAMK-WP-kaapelin kosketussuojan terminen yhden sekunnin oikosulkukestoisuus ilmoitetaan kaapelin tuotetiedoissa kaapelistandardiin SFS 5636 perustuen. Aiemmin kuvailtiin vian laukaisua jakeluverkossa, jossa kaapelin kosketussuojaan kohdistuu 0,25 sekunnin virtapulsseja kolme kappaletta yhden kaksoismaasulun aikana. Koestaminen 0,25 sekunnin peräkkäisillä oikosulkupulsseilla on kuitenkin käytännössä hankalaa. Sen vuoksi varustekokeita varten kaapelien suurimmat sallitut yhden sekunnin oikosulkuvirrat muutettiin vastaamaan pulssiyhdistelmää vika 0,5 s – virraton aika, ajk 60 s – vika 0,5 s. AHXAMK-WP-kaapelin suurimmat sallitut oikosulkuvirrat on annettu taulukossa 4. [31.]

Taulukko 4. AHXAMK-WP-kaapelin suurimmat sallitut oikosulkuvirrat pulssiyhdistelmällä: vika 0,5 s – virraton aika, ajk 60 s – vika 0,5 s [31].

AHXAMK-WP 20 kV	Alumiinilaminaatin paksuus (mm)	Suurin sallittu sekunnin oikosulkuvirta
3x50 mm ²	0,2	3,8 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 3,8 kA / 0,5 s
3x95 mm ²	0,2	4,3 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 4,3 kA / 0,5 s
3x150 mm ²	0,2	5,0 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 5,0 kA / 0,5 s
3x185 mm ²	0,2	5,1 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 5,1 kA / 0,5 s
3x240 mm ²	0,3	7,4 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,4 kA / 0,5 s
3x300 mm ²	0,3	7,7 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,7 kA / 0,5 s

6.4.3 Maadoituspunoksen ja -sukan terminen oikosulkukestoisuus

Pääteissä kaapelin kosketussuojaan kiinnitetään tinattu kuparipunos, joka liitetään verkon maadoitusjärjestelmään. Prysmian Groupin pääteissä punos on liitetty kontaktirenkaaseen kiinni, joten sitä ei tarvitse erikseen yhdistää vakiovoimajousen tai vastaavan avulla, mutta jatkoksissa kuparisukka liitetään kontaktirenkaaseen vakiovoimajousen avulla.

Maadoitusliitoksen lisäksi myös kuparipunoksen ja -sukan on kestettävä sama oikosulkuvirta kuin kaapelinkin. Liian pieneksi mitoitettu punos tai sukka ylikuumenee, tinaus palaa pois ja kaapeliin tulee sulamisvaurioita.

Taulukossa 5 on esitetty päätteiden erikokoisten tinattujen kuparipunosten laskennalliset termiset oikosulkukestoisuudet. [31.]

Taulukko 5. Tinattujen kuparipunosten laskennallisia termisiä oikosulkukestoisuuksia [31].

Tinatun kuparipunoksen koko	Suurin sallittu oikosulkuvirta
25 mm ²	5,4 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 5,4 kA / 0,5 s
35 mm ²	7,7 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,7 kA / 0,5 s
50 mm ²	10,6 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 10,6 kA / 0,5 s

Taulukoiden 4 ja 5 arvoja vertailemalla voidaan havaita, että 25 mm²:n tinattu kuparipunos riittäisi päätteisiin AHXAMK-WP-kaapelin johdinkoolle 185 mm² asti. Muilla poikkipinnoilla on käytettävä vähintään 35 mm²:n kokoa. Prysmian Groupin kaikissa päätteissä käytetään 35 mm²:n tinattua kuparipunosta logistisista syistä johtuen. Elaseed-jatkoksissa käytettävän tinatun kuparisukan koko on 50 mm².

6.4.4 Varusteen kosketussuojaliitoksen terminen oikosulkukestoisuus

Kosketussuojaliitoksen termisestä oikosulkukestoisuudesta varmistuttiin tekemällä varusteille oikosulkukokeet suurimmilla sallituilla oikosulkuvirroilla pulssiyhdistelmällä vika 0,5 s – virraton aika, ajk 60 s – vika 0,5 s. Koekappaleissa käytettiin AHXAMK-WP-kaapelia, joiden keskellä oli Elaseed-jatkos ja päissä Coldfit-päätteet.

Ennen ensimmäistä oikosulkupulssia kaapelin johdin lämmitettiin kuormitusmuuntajan avulla 40 °C:seen, jolloin kosketussuojan lämpötila oli noin 36–38 °C. Kaapelien lamiinaattiin kytkettiin ensimmäinen oikosulkuvirtapulssi puolen sekunnin ajaksi, jonka jälkeen koekappale jäähdyi 60 sekunnin ajan (ajk) ennen toista puolen sekunnin oikosulkupulssia. Sama oikosulkupulssiyhdistelmä tehtiin yhteensä kuusi kertaa. Oikosulkukokeiden jälkeen koekappaleet avattiin ja varusteet ja kaapeli tutkittiin silmämääräisesti.

Oikosulkukokeiden perusteella varusteiden suurimmat sallitut oikosulkuvirrat on esitetty taulukossa 6 perustuen kaapelin kestoisuuteen, joka oli usein rajoittava tekijä.

Taulukko 6. Prysmian Groupin varusteiden kosketussuojaliitosten suurimmat sallitut oikosulkuvirrat tuotteittain ja tyypeittäin, kun vaihejohdin on lämpötilassa 40 °C [31].

Varuste	Johdin-koko (mm ²)	Punok-sen koko (mm ²)	Suurin sallittu oikosulkuvirta
Coldfit 1C-24-2C-T1	50-95	35	4,3 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 4,3 kA / 0,5 s
Coldfit 1C-24-2F-T1	120-240	35	7,4 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,4 kA / 0,5 s
Coldfit 1C-24-2G-T1	240-400	35	7,7 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,7 kA / 0,5 s
Elascon C-24-rB-T1	50-95	35	4,3 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 4,3 kA / 0,5 s
Elascon C-24-rC-T1	120-185	35	5,1 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 5,1 kA / 0,5 s
Elascon C-24-rE-T1	240-300	35	7,7 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,7 kA / 0,5 s
Elaspeed 1C-24-D-T1	50	50	3,8 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 3,8 kA / 0,5 s
Elaspeed 1C-24-E-T1	70-95	50	4,3 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 4,3 kA / 0,5 s
Elaspeed 1C-24-F-T1	120-240	50	7,4 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,4 kA / 0,5 s
Elaspeed 1C-24-IP-T1	240-400	50	7,7 kA / 0,5 s + ajk 60 s + 7,7 kA / 0,5 s

Kokeiden perusteella varusteiden terminen oikosulkukestoisuus on vähintään sama kuin kaapelilla. Elascon-pistokepäätteille ei tehty oikosulkukokeita erikseen, koska maadoitusliitos sekä -punos ovat samat kuin Coldfit-päätteillä.

7 Varusteiden pitkäaikaiskoe

Pitkäaikaiskokeet tehdään useimmiten kiihdytettynä nostamalla sekä koestusjännitettä että kaapelin lämpötilaa kokeen aikana kuten esimerkiksi EDF-vesiallaskokeessa luvussa 6.2. Nostamalla jännite ja lämpötila hyvin korkeaksi voisi koetta ainakin teoriassa kiihdyttää yhä lisää, mutta tällöin saatetaan tulla liian lähelle sekä kaapelin että varusteiden absoluuttista kestorajaa, jolloin kokeessa voisi ilmetä normaalista poikkeavia rasiusilmiöitä. Tämä muuttaisi kokeen luonnetta liikaa, epävarmuustekijät lisääntyisivät ja tulokset eivät enää olisi vertailukelpoisia normaaliasennuksiin nähden. Siksi pitkäaikaiskokeen koestusparametreja ei voi säätää liian rankoiksi vaan on tyydyttävä kohtuullisiin

rasitusarvoihin, kuten esimerkiksi 2–3 U_0 jännitteeseen ja 95–100 °C johtimen lämpötilaan, mikä johtaa hieman pidempiin, muutaman kuukauden tai jopa useamman vuoden koestusaikoihin. [31.]

7.1 Kokeen kuvaus

Prysmian Groupin kaapelivarusteille päätettiin tehdä kiihdytetty pitkäaikaiskoe niiden käytännön eliniän arvioimiseksi suomalaisissa olosuhteissa. Tavoitteena oli selvittää

- varusteiden materiaalien kyky sietää pitkäaikaisesti korkeita ja etenkin alhaisia lämpötiloja
- varusteiden kyky mukautua nopeisiin lämpötilan vaihteluihin niin, että niissä ei synny osittaispurkauksia varusteen ja kaapelin eristyksen rajapinnassa
- varusteiden mekaaninen kestoisuus lämpötilan vaihdellessa nopeasti
- jatkoksen vesitiiveys vähintään kahden metrin syvyisessä vedessä. [31.]

Koska varusteille ei ole olemassa standardoitua, pohjosiin olosuhteisiin soveltuvaa pitkäaikaiskoeetta, niin sellainen piti kehittää itse. Käytettävissä olevien resurssien puitteissa lopulliseksi koestusmenetelmäksi muodostui seuraava:

1. AC-jännitekoe 50 kV, kesto 15 minuuttia huoneenlämpötilassa ja osittaispurkausten mittausta 30 kV:n jännitteellä.
2. Jaksollinen kuormituskoe: johdin 95 °C kesto 6,5 tuntia ja jäähtyminen 1,5 tuntia, kuormitusjaksoja yhteensä 150 kappaletta, paitsi viimeisellä koestuskierroksella 500 kappaletta.
3. AC-jännitekoe 50 kV, kesto 15 minuuttia huoneenlämpötilassa ja osittaispurkausten mittausta 30 kV:n jännitteellä.
4. Pakkaskoe jännitteisenä: lämpötila -50 °C, jatkuva AC-jännite 36 kV (3 U_0), aika 172 tuntia, paitsi viimeisellä koestuskierroksella lämpötilasykliä muutettiin seuraavasti: -50 °C kesto 172 h, -10 °C kesto 24 tuntia, -50 °C kesto 24 tuntia ja +20 °C kesto 72 tuntia, jatkuva AC-jännite edelleen 36 kV (3 U_0). [31.]

Koestuskierroksen kohtia 1.–4. toistettiin 5–7 kertaa. [31.]

Kuormitusjaksot tehtiin jännitteettömänä, koska jännitekoe 3 U_0 olisi vaatinut säätömuuntajan käyttöä, mikä olisi saattanut pitkissä kokeissa tuhota muuntajan säätömeka-

nismin. Lisäksi varusteille oli jo suoritettu kattavasti jännitteellisiä kuormituskokeita, kuten standardin HD 629.1:n mukaiset jännitteelliset kuormituskokeet, Coldfit-päätteiden jaksolliset kuormituskokeet jännitteisenä 95–100 °C:n lämpötilassa 1008 tuntia jännitteellä 2,5 U₀ sekä jatkoksen 180 °C:n kuormituskoe 3000 tuntia ekvivalentilla jännitteellä 2,2 U₀. Jännitteiselle kuormituskokeelle ei ollut siis tarvetta, vaan jännitteinen pakkaskoe katsottiin riittäväksi. [31.]

7.2 Kokeen kattavuuden arviointi

Kaapelivarusteiden tekniseen elinikään vaikuttavia tekijöitä ovat

- a) varusteen sähköinen vanheneminen: varusteen rakenne, sähkötekniinen mitoitus ja sähkökentänvoimakkuus varusteen sisällä.
- b) varusteissa käytetyt materiaalit: sähkötekniiset ominaisuudet, puhtaus ja tasalaatuisuus.
- c) varusteen terminen ja kemiallinen vanheneminen: eristyksen lämpötila varusteen sisällä ja ulkopinnalla.
- d) lämpömekaaninen rasitus varusteen rakenteelle ja materiaaleille: kuormituksen ja ympäristön lämpötilan nopea vaihtelu.
- e) ympäristöolosuhteet: hyvin alhainen ja korkea ympäristön lämpötila, kosteus kaikissa muodoissaan, ilman epäpuhtaudet ja UV-säteily.
- f) asennusympäristön kemialliset yhdisteet: ilman ja maaperän saasteet, päätteitä rasittavat noki ja suolasumu ja jatkoksia esimerkiksi maaperän rautaionipitoinen vesi sekä savi- ja silikaattimaiden hapana maaperä.
- g) vesitiiveys: veden mahdollinen pääsy ulkopäätteen sisään sateella tai veden difuusio jatkoksen eristykseen. [31.]

Varusteiden elinikään vaikuttaa oleellisesti myös asennustyön laatuun liittyvät seikat, joita käsitellään luvussa 8:

- h) Varusteiden oikea asennustapa, asennustyön huolellisuus ja asentajien ammattitaito.

Pitkäaikaiskokeessa testattiin edellä esiteltyjä kohtia a), b), c) ja d) sekä kohtaa e) alhaisen ympäristön lämpötilan osalta ja kohtaa g) jatkoksen vesitiiveyden osalta. UV-säteilyn, kosteuden muuten kuin jatkoksien vesitiiveyden, ilman epäpuhtauksien ja asennusympäristön kemiallisten yhdisteiden vaikutusta ei pystytty testaamaan. Varusteiden UV-

kestoisuudesta on voitu varmistua aiemmin Prysmian-konsernin tekemien kokeiden perusteella. Lisäksi päätteiden toimintaa kosteissa olosuhteissa on testattu HD 629.1 standardin mukaisilla kosteus- ja suolasumukokeilla. [31.]

7.3 Koekappaleet ja -järjestely

Pitkäaikaiskokeiden koekappaleissa oli 4–5 metriä AHXAMK-W 1x240 20 kV ja AHXAMK-W 1x150 20 kV -kaapelia. Koekappaleiden päihin valittiin Coldfit-ulkopäätteet, sillä niiden todelliset ympäristöolosuhteet ovat haastavammat kuin esimerkiksi sisä- tai pistokepäätteillä. Koekappaleiden keskelle asennettiin Elspeed-jatkokset. [31.] Taulukossa 7 on esitelty pitkäaikaiskokeissa käytetyt kaapelit ja varusteet koekappaleittain.

Taulukko 7. Pitkäaikaiskokeen koekappaleet [31].

Koe-kappale	Kaapeli	Päätteet	Jatkos
1A	AHXAMK-W 1x240 20 kV	2 x Coldfit 1C-24-2F-T1	Koekappaleessa ei ollut jatkosta
1B	AHXAMK-W 1x240 20 kV	2 x Coldfit 1C-24-2F-T1	1 x Elspeed 1C-24-F-T1
2A	AHXAMK-W 1x150 20 kV	2 x Coldfit 1C-24-2F-T1	1 x Elspeed 1C-24-F-T1
2B	AHXAMK-W 1x150 20 kV	2 x Coldfit 1C-24-2F-T1	1 x Elspeed 1C-24-F-T1

Pitkäaikaiskoe aloitettiin koekappaleilla 1A ja 1B marraskuussa 2015. Koekappaleet 2A ja 2B lisättiin kokeeseen helmikuussa 2016. Koe päättyi joulukuussa 2017, jolloin koekappaleidelle 1A ja 1B oli kertynyt yhteensä 1200 kappaletta kahdeksan tunnin kuormitusjaksoja ja 1011 tuntia pakkasjaksoja. Vastaavasti koekappaleille 2A ja 2B oli kertynyt 1100 kappaletta kahdeksan tunnin kuormitusjaksoja ja 771 tuntia pakkasjaksoja.

Koekappaleen 1B Elspeed-jatkoksessa oli aluksi yhden metrin upotussyvyyttä vastaava paine hanavettä, mutta paine nostettiin kahta metriä vastaavaksi, kun noin yksi viidesosa kokeesta oli takana. Koekappaleen 2A jatkos oli upotettuna viiden metrin syvyyteen suolaveteen, jonka suolapitoisuus oli noin 0,7 % vastaten osapuilleen Itämeren vettä [36].



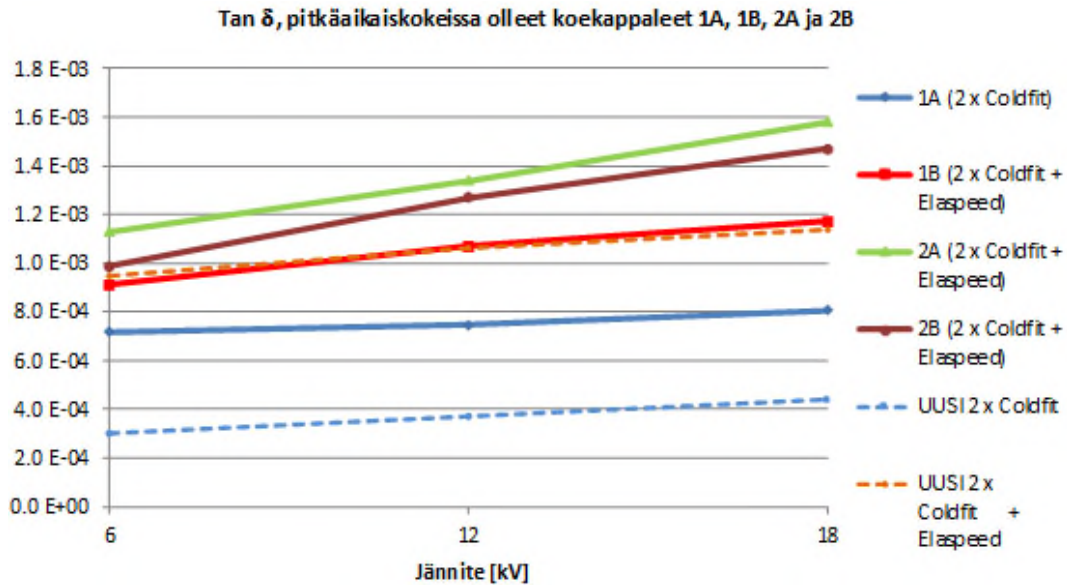
Kuva 32. Pitkäaikaiskokeen koekappaleet 1A ja 1B kuormituskokeessa joulukuussa 2015. Vesi-
tiivyeyskokeen asennus jatkoksessa näkyy kuvassa taka-alalla [31].

7.4 Loppukokeet ja -tarkastukset

7.4.1 Häviökerroin $\tan \delta$

Häviökerroin $\tan \delta$ kertoo kaapelin ja varusteiden eristyksen läpi tai päätteen ulkopintaa pitkin vuotavan resistiivisen virran suhteen eristyksen läpi kulkevaan kapasitiiviseen virtaan. Eristyksen vanhenemisen ja kosteuden myötä resistiivinen vuotovirta kasvaa. Häviökerroinmittaukset suoritettiin jännitteillä $0,5 U_0$, U_0 , ja $1,5 U_0$, jolla tarkasteltiin häviökertoimien muutosta jännitteen funktiona. Häviökertoimen $\tan \delta$ -arvon pysyessä loivasti jännitteen funktiona nousevana suorana eristys on vielä hyvässä kunnossa. Jyrkästi nouseva $\tan \delta$ -arvo kertoo eristyksen vanhentuneen voimakkaasti. Lisäksi kosteuden kasvattamat vesipuut saattavat aiheuttaa jyrkästi nousevan $\tan \delta$ -arvon. [31.]

Häviökerroin $\tan \delta$ mitattiin koekappaleista 1A, 1B, 2A ja 2B. Lisäksi mittaukset suoritettiin vertailun vuoksi kahdelle uudelle koekappaleelle. Mittaukset suoritettiin jännitteillä 6, 12 ja 18 kV. Mitatut arvot on esitetty kuvassa 33. [31.]



Kuva 33. Häviökertoimen (tan δ taajuudella 50 Hz) mittaustulokset pitkäaikaiskokeissa vanhenneville koekappaleille ja uusille vertailukappaleille. Mittaukset suoritettiin koko näytteelle sisältäen kaapelin ja varusteet [31].

Mittausten mukaan tan δ -arvot ovat kasvaneet uusiin näytteisiin verrattuna absoluuttisesti ja jännitteen funktiona, mikä kertoo koekappaleiden vanhenemisesta pitkäaikaiskokeen aikana. Vanhentuminen ei ole kuitenkaan voimakasta, koska tan δ -arvot ovat suuruusluokaltaan ainoastaan noin $0,7 \cdot 10^{-3}$ – $1,6 \cdot 10^{-3}$. Lisäksi käyrän kulmakerroin eli tan δ -arvon kasvu jännitteen funktiona on maltillinen. [31.]

VLF-taajuudella (0,1 Hz) suoritettavien häviökerroinmittausten tulosten arviointiin voidaan käyttää kahta tunnuslukua, jotka ovat $\Delta \tan \delta$ ja TUTU (Tip Up of the Tip Up). Tunnusluku $\Delta \tan \delta$ kuvaa häviökertoimen muutosta koestusjännitteen noustessa arvosta $0,5 U_0$ arvoon $1,5 U_0$ ja se voidaan laskea yhtälöllä 2. [37, s. 43.]

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta (1,5 U_0) - \tan \delta (0,5 U_0) \quad (2)$$

Sähkö- ja elektroniikkainsinöörien yhdistyksen IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardin IEEE Std400.2-2013 mukaan hyvässä kunnossa olevan kaapelijärjestelmän $\Delta \tan \delta$ -arvo on alle $5,0 \cdot 10^{-3}$ ja Tampereen teknillisen yliopiston kunnonarviointitutkimuksen esittämän ehdotuksen mukaan enintään $1,2 \cdot 10^{-3}$ [36, s. 80]. Normaalilla 50 Hz käyttötaajuudella tan δ -arvot ovat hieman pienemmät kuin 0,1 Hz VLF-

taajuudella, mutta häviökertoimen muutos jännitteen funktiona on käytännössä sama molemmilla taajuuksilla [38, s. 84].

TUTU kuvaa häviökertoimen muutoksen epälineaarisuutta jännitteen funktiona ja se voidaan laskea yhtälöllä 3 [37, s. 43].

$$TUTU = \tan \delta (1,5 U_0) - \tan \delta (1,0 U_0) - [\tan \delta (1,0 U_0) - \tan \delta (0,5 U_0)] \quad (3)$$

TUTU:n arvo 0 kuvaa häviökertoimen täysin lineaarista jänniteriippuvuutta. Suuri TUTU-arvo puolestaan tarkoittaa häviökertoimen voimakasta kasvua erityisesti normaalia käyttöjännitettä suuremmilla jännitteillä, mitä voidaan pitää merkinä kaapelijärjestelmän eristyksen vanhenemisesta. Tampereen teknillisen yliopiston kunnonarviointitutkimuksen ehdotuksen mukaan hyvässä kunnossa olevan kaapelijärjestelmän eristyksen TUTU on välillä -0,15–0,05. Taulukossa 8 on esitetty pitkäaikaiskokeissa olleiden ja uusien vertailukappaleiden häviökertoimeen $\tan \delta$ liittyviä tunnuslukuja. [37, s. 80.]

Taulukko 8. Pitkäaikaiskokekappaleiden sekä vertailukappaleiden häviökertoimen $\tan \delta$ tunnuslukuja. [31.]

Tunnusluku	Hyväkuntoinen kaapelijärjestelmä	Koekappale				Uudet vertailukappaleet	
		1A	1B	2A	2B	2 x Coldfit	2 x Coldfit + Elaseed
$\Delta \tan \delta (10^{-3})$	<1,2	0,09	0,26	0,45	0,48	0,14	0,19
TUTU (10^{-3})	-0,15 –0,05	0,03	-0,06	0,03	-0,08	0,00	-0,03

Taulukossa 8 esitettyjen tulosten perusteella pitkäaikaiskokeiden aiheuttamat muutokset tunnuslukuihin olivat pieniä ja ne ovat Tampereen teknillisen yliopiston kunnonarviointitutkimuksessa ehdotettujen raja-arvojen sisällä. Häviökerroinmittausten perusteella varusteilla olisi ollut vielä pitkä käyttöikä edessä.

7.4.2 Eristysresistanssi

Pitkäaikaiskokeen koekappaleista mitattiin eristyksen ja jatkosten ulkovaippojen eristysresistanssit. Koejännite oli 500 V DC ja mittausaika yksi minuutti. Taulukossa 9 on esitetty mittausten tulokset.

Taulukko 9. Pitkäaikaiskokeen koekappaleiden eristysresistanssit ja vaipaneheydet. Koestus tehtiin koko koekappaleelle eli kaapelille ja varusteille. [31.]

Koe-kappale	Eristysresistanssi GΩ	Jatkoksen vaipan eristysresistanssi GΩ
1A	>533	Koekappaleessa ei ollut jatkosta
1B	>533	>533
2A	>533	>533
2B	>533	>533

Eristysresistansseissa ei ollut havaittavissa minkäänlaisia muutoksia uusiin varusteisiin verrattuna. Myös tämä mittaus kertoo varusteiden olleen hyvässä kunnossa pitkäaikaiskokeen jälkeen.

7.4.3 Jännitekestoisuus

Pitkäaikaiskokeiden koekappaleille tehtiin vaihtojännitekoe läpilyöntiin asti aloittaen jännitteellä $6 U_0$ (72 kV). Jännitettä nostettiin viiden minuutin välein U_0 :n verran. Lisäksi jatkoksen ulkokerrokselle tehtiin vedessä sekä vaihtojännitekoe 10 kV viisi minuuttia että tasajännitekoe 10 kV yksi minuutti. Tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Pitkäaikaiskokeen koekappaleiden kestojännitteet. Koestus tehtiin koko koekappaleelle eli kaapelille ja varusteille. [31.]

Koe-kappale	Eristyksen AC-kestojännite kV	Jatkoksen vaipaneheysmittaus, kestojännite kV
1A	108*	Koekappaleessa ei ollut jatkosta
1B	108*	10 kV AC, DC
2A	108*	10 kV AC, DC
2B	108*	10 kV AC, DC

*Koekappaleiden päätteessä tapahtui ylilyönti.

Varusteiden eristyksen jännitekestoisuus oli edelleen erinomaisella tasolla. Elapsed-jatkosten läpilyöntijännite on uutenakin noin 108 kV, joten pitkäaikaiskokeen jälkeenkään niiden jännitekestoisuus ei ollut alentunut, vaikka niihin oli vaikuttanut 2–5 metrin vesipatsas 8800 ja 9600 tunnin ajan. Jatkoksen ulkokerroksen jännitekestoisuus oli myös

hyvä, mikä mahdollistaa kaapelijärjestelmien vaipaneheysmittauksen vielä vuosienkin päästä. [31.]

7.5 Varusteiden eliniän mallintaminen

Pitkäaikaiskokeet tehdään normaalikäyttöä korkeammassa lämpötilassa ja suuremmalla jännitteellä, mitkä nopeuttavat kaapelijärjestelmien vanhenemista. Tällaisen kiihdytetyn vanhennuskokeen aiheuttamaa vanhenemista voidaan arvioida matemaattisesti Arrhenius- ja Inverse power law -mallien avulla. [31.]

7.5.1 Arrhenius-malli

Arrhenius-mallin avulla voidaan arvioida muovi- ja kumimateriaalien elinikää, jonka mukaan kemiallisten reaktioiden nopeus $R(T)$ lämpötilan mukaan voidaan laskea yhtälöllä 4 [39].

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{E_a}{kT}}, \quad (4)$$

A on tuntematon vakio

E_a on aktivointienergia (eV)

k on Boltzmannin vakio ($8,6173303 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

T on kokeen lämpötila (K). [39.]

Vastaavasti materiaalin elinikä $L(V)$ on lämpötilaan verrannollinen ja se voidaan laskea yhtälöllä 5 [39].

$$L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}}, \quad (5)$$

V on lämpötila (K)

C ja B ovat mittauksilla määriteltäviä parametreja. [39.]

Lämpötilan vaikutusta materiaalien kemialliseen vanhenemiseen voidaan arvioida käytännössä siten, että korkeissa lämpötiloissa tehtyjen kokeiden perusteella lasketaan materiaalin elinikä normaalia käyttöä vastaavassa lämpötilassa. Pitkäaikaiskokeissa 95 °C:n kuormitusjakson pituus oli noin 6,5 tuntia, josta johdin on 95 °C:n lämpötilassa noin viisi tuntia. Kuormitusjaksoja oli yhdellä koestuskierroksella 150, jolloin kokonaisaika 95 °C:n lämpötilassa kullakin kierroksella oli yhteensä noin 750 tuntia. Taulukossa 11 on esitetty pitkäaikaiskokeen aikakertoimet ja vastaavat käyttöajat alemmalla johdinlämpötilalla. [31.]

Taulukko 11. Pitkäaikaiskokeiden aikakertoimet ja vastaavat käyttöajat alemmalla johdinlämpötilalla [31].

Johdinlämpötila °C	Aikakerroin	Ekvivalentti aika	
		tuntia	vuotta
95	1,00	750	0,1
90	1,89	1 418	0,2
80	7,13	5 345	0,6
70	29,0	21 779	2,5
65	60,5	45 352	5,2
60	129	96 544	11
50	626	469 315	54
40	3365	2 523 961	288

Taulukon 11 arvioista voidaan havaita, että 750 tunnin kuormitusaika johdinlämpötilalla 95 °C vastaa 5,2 vuoden käyttöä johdinlämpötilalla 65 °C ja 288 vuoden käyttöä johdinlämpötilalla 40 °C. Johdinlämpötilojen 40–65 °C välillä on siis noin 55-kertainen ero teoreettisessa käyttöiässä. Siksi johdinlämpötilalla on iso merkitys kaapelijärjestelmän käyttöikänsä. Pitkäaikaiskokeiden kuormitusajat 95 °C:n johdinlämpötilalla ja niitä vastaavat käyttöajat jakeluverkossa käytetyillä 65 °C:n ja 40 °C:n johdinlämpötiloilla on esitetty taulukossa 12. [31.]

Taulukko 12. Pitkäaikaiskoekappaleiden teoreettiset käyttöajat jakeluverkon johdinlämpötiloilla 65 °C ja 40 °C Arrhenius-malliin perustuen [31].

Koekappale	Kuormitus-jaksot 95°C:ssa (kpl)	Koestusaika 95°C:ssa (tuntia)	Jakeluverkko, johdin (°C)	Ekvivalentti aika (vuotta)
1A	1200	5750	65	39,7
			40	2209
1B	1200	5750	65	39,7
			40	2209
2A	1100	5500	65	38,0
			40	2113
2B	1100	5500	65	38,0
			40	2113

Taulukon 12 tuloksiin perustuen pitkäaikaiskoe vastasi teoreettisesti vähintään noin 40 vuoden normaalia jakeluverkkokäyttöä johdinlämpötilalla 65 °C ja satoja vuosia johdinlämpötilalla 40 °C [31].

7.5.2 Inverse power law -malli

Eristyksen jännitelujuus alenee ajan myötä eli eristys vanhenee sähkökentän vaikutuksesta. Mitä suurempi jännite, sitä nopeampaa on eristyksen vanheneminen. Kiihdytetyssä vanhennuskokeessa jännite voidaan nostaa moninkertaiseksi normaaliin käyttöjännitteeseen nähden. Kiihdytetyn kokeen ja normaalikäytön välistä suhdetta voidaan arvioida Inverse power law -mallin avulla yhtälöllä 6. [40.]

$$A_F = \left(\frac{E_a}{E_0}\right)^n \quad (6)$$

A_F on vanhennuksen kiihdytyskerroin

E_a sähkökentänvoimakkuus kiihdytetyssä kokeessa

E_0 sähkökentänvoimakkuus normaalikäytössä

n on eliniän odotuskerroin. [40.]

Standardin IEC 62067 mukainen kaapelijärjestelmien Prequalification test kestää 8760 tuntia jännitteellä $1,7 U_0$, mikä vastaa noin 40 vuoden käyttöä, kun $n=7$ [41, s. 959–962]. Taulukossa 13 on esitetty pitkäaikaiskoetta vastaavat teoreettiset käyttöajat jakeluverkon normaalilla 20 kV käyttöjännitteellä Inverse power law -malliin perustuen.

Taulukko 13. Pitkäaikaiskoetta vastaavat teoreettiset käyttöajat jakeluverkon normaalilla 20 kV käyttöjännitteellä inverse power law -malliin perustuen, kun $n=7$ [31].

Koekappale	Koestusaika ja jännite	Ekvivalentti aika (vuotta)
1A	$2 U_0 \cdot 121 \text{ h} + 2,5 U_0 \cdot 120 \text{ h} + 3 U_0 \cdot 798 \text{ h} + 4,2 U_0 \cdot 3,8 \text{ h}$	219
1B	$2 U_0 \cdot 121 \text{ h} + 2,5 U_0 \cdot 120 \text{ h} + 3 U_0 \cdot 798 \text{ h} + 4,2 U_0 \cdot 3,8 \text{ h}$	219
2A	$3 U_0 \cdot 799 \text{ h} + 4,2 U_0 \cdot 2,8 \text{ h}$	206
2B	$3 U_0 \cdot 799 \text{ h} + 4,2 U_0 \cdot 2,8 \text{ h}$	206

Taulukon 13 mukaan pitkäaikaiskoe vastasi Inverse power law -mallin mukaisten laske-
mien perusteella teoreettisesti moninkertaisesti varusteille asetettua elinikäodotusta.

7.5.3 Arvio varusteiden eliniästä

Pitkäaikaiskokeiden perusteella voidaan todeta, että varusteiden jännite-, lämpötila-, lämpömekaaninen ja mekaaninen kestoisuus ovat erinomaiset myös vanhennuksen jäl-
keen. Tekninen mitoitus, eli rakenne ja materiaalit ovat osoittautuivat toimiviksi kokeen
jälkeenkin. [31.]

Arrhenius-mallin mukaan tehdyt koestukset vastaavat teoriassa vähintään 40 vuoden
normaalia jakeluverkkokäyttöä johdinlämpötilalla $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ja satoja vuosia johdinlämpöti-
lalla $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Myös aiemmin tehtyjen kokeiden ($2,2 U_0$, $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 3000 tuntia) perusteella
varusteiden laskennallinen elinikä olisi reilusti yli 80 vuotta jakeluverkkokäytössä. [31.]

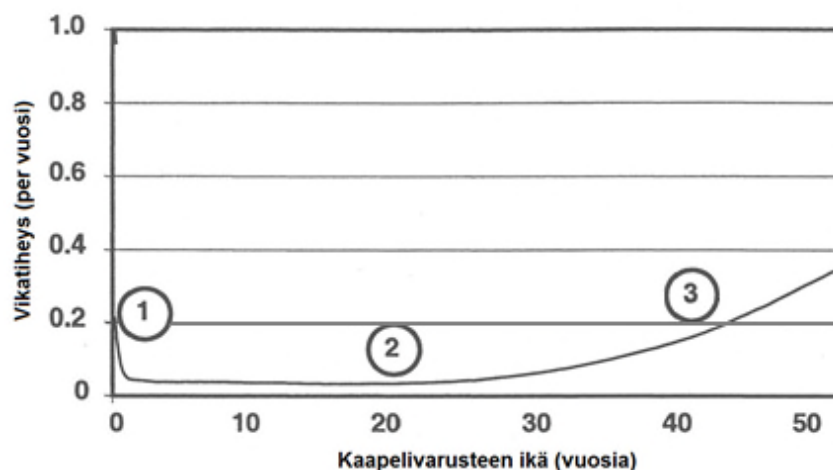
Inverse power law -mallin mukaiset jännitekokeet puolestaan vastaavat varovaisestikin laskien yli 80 vuoden käyttöä normaalilla 20 kV:n käyttöjännitteellä. Kaiken kaikkiaan Elaseed-jatkoksien ja Coldfit-päätteiden voidaan olettaa kestävän jakeluverkkokäytössä vähintään 40 vuotta eli saman kuin AHXAMK-W-kaapelikin. [31.]

8 Varusteiden asennusvirheet

Varusteasennuksen laadun merkitys kaapelijärjestelmien toimintavarmuutta tarkasteltaessa on suuri. Kaapelijärjestelmän komponentit eli kaapeli ja varusteet ovat rutiinikoes-tettu valmistavalla tehtaalla. Lisäksi varusteiden asentaminen on helpottunut uusien asennusteknologioiden myötä, joka pienentää asennuksessa syntyneiden virheiden mahdollisuutta. Tämä mahdollistaa kaapelijärjestelmille pienen vikataajuuden. Varusteiden asennuksessa voi kuitenkin syntyä virheitä, jotka saattavat johtaa verkon ennenaikaiseen vikaantumiseen. Osa asennusvirheistä kehittyy läpilyöntiin vasta vuosien päästä asennuksesta.

Kaapelivarusteet ovat usein muovieristeisen kaapelijärjestelmän heikoin kohta. Suurin syy siihen on vaativissa olosuhteissa tehdyt asennukset, asentajien puutteellinen ammattitaito tai huolellisuus sekä kiire. Varusteiden asentamisessa tehdyt virheet voivat aiheuttaa suuria kustannuksia verkkoyhtiöille monestakin syystä. Virhe voi paljastua vasta useiden vuosien jälkeen, jolloin varusteasennusten takuu on jo umpeutunut. Samaan aikaan järjestelmälle suunniteltu pitoaika on vasta alkuvaiheessa. Maakaapelissa syntyneen vian paikantaminen voi olla aikaa vievää. Toisinaan kaapelia joudutaan kaivamaan esiin pitkältä matkalta vian löytämiseksi.

Varusteiden vikatiheyttä voidaan muiden verkon komponenttien tavoin kuvata yleisesti niin sanotun kylpyammekäyrän avulla [10, s. 57]. Kuvan 34 kylpyammekäyrä esittää varusteiden ikääntymisen vaikutusta vikatiheyteen.



Kuva 34. Kaapelivarusteiden eliniän vaikutus vikatiheyteen [muokattu lähteestä 10, s. 58].

Kuvan 34 kylpyammekäyrästä nähdään, että ensimmäisessä vaiheessa eli noin kahden vuoden aikana kaapelijärjestelmän käyttöönotosta varusteiden vikatiheys on kohtalaisen suuri. Useimmiten tämä johtuu valmistus- tai asennusvirheistä. Toisessa vaiheessa varusteiden vikaantumistiheys on matala useiden vuosikymmenien ajan. Kolmannessa vaiheessa varusteiden elinikä alkaa saavuttaa niiden käyttöiän suositusarvon ja vikatiheys alkaa jälleen kasvaa johtuen niiden luonnollisesta vanhenemisesta. [10, s. 57–58.]

8.1 Helen Sähköverkko Oy:n kokemuksia

Vuonna 2014 valmistuneessa diplomityössä tutkittiin Helsingin alueen sähköverkkoyhtiön Helen Sähköverkko HSV Oy:n keskijänniteverkossa syntyneiden vikojen aiheuttajia. Diplomityön mukaan vuosina 2009–2013 keskijännitekaapeliverkon keskeytyksistä 26 aiheutui viasta kaapelijatkoksessa ja 16 viasta kaapelipääteessä. Suurin osa muovikaapelien jatkoksissa ja pääteissä syntyneistä vioista oli tapahtunut alle viisi vuotta asennuksen jälkeen. Tästä on voitu päätellä, että kyse on usein ollut varusteasennuksessa tehdystä asennusvirheestä. Viallisten varusteiden tyypeistä ei ole tarkkaa tietoa, mutta verkossa on käytetty lämpökutisteita vuodesta 1990 lähtien. [10, s. 59–60.]

Helen Sähköverkko Oy on mittauttanut noin 250 kilometriä eli 15 % keskijänniteverkostaan vuosien 2004–2014 aikana. Mittauksia on tehty varmennustarkastuksena sekä uu-

sille kaapeliasennuksille että kunnonvalvontana vanhoille yhteyksille. Vuonna 2012 suoritetuissa osittaispurkausmittauksissa havaittiin purkauksia yhteensä 39 jatkoksessa, joista 24 oli AHXAMK-W-kaapelissa. Jatkokset tutkittiin ja niissä havaittiin erilaisia asennusvirheitä, jotka on esitelty taulukossa 14. [10, s. 60–61.]

Taulukko 14. Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkossa tehdyissä osittaispurkausmittauksissa havaitut kaapelivarusteivat [10, s. 61].

Jatkot ja sekajatkot(PD-mittausten takia poistettut)	AHXAMK-W	Sekajatkot
Kokonaisuus (jatkot* vaiheet*tutkitut ominaisuudet)		
Jatkojen lukumäärä (kaikki vaiheet)	24 kpl	15 kpl
Lämmitys päältä	24 %	6 %
Lämmitys alta	22 %	7 %
Keltainen massa	0 %	0 %
Kaapelin käsittely	16 %	27 %
Päällivaippa	0 %	7 %
Puna- musta kutiste	24 %	13 %
Kentänohjaus	0 %	0 %
Kirkas letku	0 %	27 %
Liitin	0 %	0 %
Muu virhe	14 %	13 %

Taulukossa 14 esitellyistä asennusvirheiden kuvauksista voidaan päätellä, että kaikki tutkitut jatkokset ovat olleet lämpökutisteita. Listauksen mukaan lähes kolme neljästä asennusvirheestä on syntynyt lämpökutisteletkujen kutistamisessa. Lämmitys päältä ja alta tarkoittaa, että kutisteletkujen lämmitys on ollut epätasaista ja riittämätöntä. Lisäksi punamustan lämpökutisteletkun kutistamisessa on syntynyt asennusvirheitä. Huomattavasti pienempi osuus asennusvirheistä on syntynyt kaapelien käsittelyssä.

8.2 Muut tutkimukset varusteiden asennusvirheistä

Asennusvirheiden vaikutusta keskijännitepäätteiden käyttövarmuuteen on tutkittu vuonna 2018 julkaistussa, Tampereen Teknisessä Yliopistossa tehdyssä diplomityössä. Siinä tutkittiin asennusvirheitä, jotka olivat syntyneet hohtosuojan kuorinnassa, eristyksen hionnassa ja kentänohjausmassan asentamisessa. Tutkimus osoitti, että asennusohjeiden noudattamisen lisäksi asennustyön huolellisuus on tärkeässä roolissa

päätteen toimivuuden kannalta. Tutkimuksessa kaikki simulointikokeissa tehdyt asennusvirheet aiheuttivat päätteissä osittaispurkauksia ja osa jo normaalilla käyttöjännitteellä (U_0). [42, s. 1–73.]

Kentänohjausmassan väärä sijoittaminen tai poisjättäminen aiheuttivat suurimmat osittaispurkaukset, mutta ne olivatkin asennusvirheinä kaikkein räikeimpiä. Hohtosuojan kuorinnan syvät urat ja hohtosuojan jäämät eristyksen pinnalla aiheuttivat myös purkauksia jo normaalilla käyttöjännitteellä. Vaikeammin havaittava asennusvirhe oli hionnan jäljiltä eristyksen päälle kulkeutunut puolijohtava hohtosuojapöly, joka osoittautui myös haitallisia purkauksia aiheuttavaksi. [42, s. 1–73.]

Tutkimuksen kohteena olivat kylmäkutistepäätteet, jotka soveltuvat 10–95 mm²:n kaapeleille ja lämpökutistepäätteet, jotka soveltuvat 25–95 mm²:n kaapeleille. Tutkimuksissa käytettiin 95 mm²:stä kaapelia, joka oli suurin varusteille soveltuva koko. Näin varusteiden puristus kaapeliin oli suurin mahdollinen, jolloin asennusvirheiden vaikutus saattoi olla pienempi. Tulokset olisivat olla erilaiset pienempää kaapelia käytettäessä. [42, s. 1–73.]

Asennusvirheiden vaikutusta keskijännitejatkoksien toimintakuntoon on tutkittu myös vuonna 2016 Metropolia Ammattikorkeakoululle ja Ensto Finland Oy:n aloitteesta tehdyssä insinööriyössä. Työssä tutkittiin asennusvirheitä, jotka olivat syntyneet eristyksen kuorinnassa ja jatkosrungon asettelussa. Tutkimus osoitti, että asennusvirheiden vaikutus jatkosten toimivuuteen on ilmeinen. Tuloksissa havaittiin myös eroja kylmä- ja lämpökutistejatkoksien välillä samoilla asennusvirheillä. Samojen asennusvirheiden vaikutukset olivat suurempia lämpökutistejatkoksissa kuin kylmäkutistejatkoksissa. [43, s. 1–52.]

8.3 Asennusvirheiden synty ja niiden välttäminen

Asennusvirheiden syntyyn voi olla monia syitä, mutta usein ne johtuvat yksittäisen asentajan huolimattomuudesta, välinpitämättömyydestä tai puutteellisesta ammattitaidosta. Asennusta tekevällä henkilöllä on oltava riittävä osaaminen asennuksen laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Ammattitaitoa on seurattava yksilötasolla sekä arvioitava

mahdollisen koulutuksen tarve. Riittävän ammattitaitoinen henkilö ymmärtää, mitä laadukas asennus edellyttää ja suhtautuu työhönsä ammattitaidollaan. Asennuksen laadukas lopputulos edellyttää myös asianmukaisia työkaluja, laitteita ja apuvälineitä, riittävästi aikaa sekä asennukseen soveltuvaa ympäristöä.

Tyypillisimmät asennusvirheet voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen:

- kosteuden tai epäpuhtauksien pääsy varusteeseen tai kaapeliin
- kaapelin käsittelyvirheet
- varusteiden asennusvirheet.

Asennusympäristön on sovellettava varusteasennuksiin, jotta epäpuhtauksien ja kosteuden pääsy varusteeseen ja kaapeliin voidaan estää. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi suojateltan käyttöä ja asennuspaikan asennusalustan kosteuden vähentämistä. Suojateltta suojaa ilmakehän kosteudelta ja epäpuhtauksien kulkeutumiselta asennukseen esimerkiksi tuulen mukana. Suojatelttaa voi myös lämmittää ja helpottaa siten asentamista kylmissä olosuhteissa. Asennusalustan kosteutta voi vähentää lattian avulla ja esimerkiksi jatkoksien teko maan pinnalla on hyvä vaihtoehto vetisen montun sijaan. Maan pinnalla tehty jatkos kaivetaan maan alle jälkikäteen. Valmiita jatkoksia liikuttaessa täytyy olla erityisen varovainen, eikä jatkoksia saa taivuttaa edes hetkellisesti.

Kuvassa 35 on esitetty suojateltta ja valmis jatkos, joka on tehty maan pinnalla.



Kuva 35. Kuvassa A suojateltta jatkosasennuksen suojana ja kuvassa B maan pinnalla tehty jatkos.

Varustetoimittajan on järjestettävä koulutus, jossa opetetaan oikeat kaapelinkäsittely- ja varusteasennustekniikat. Usein varustevalmistajat suosittelevat asennuksissa käytettäviä työkaluja, laitteita sekä apuvälineitä, jotka helpottavat asennuksen tekoa ja mahdollistavat laadukkaan lopputuloksen. Luvuissa 8.5 ja 8.6 käsitellään näitä asioita tarkemmin.

Varusteasennusten laatu voidaan varmistaa ennen kaapelijärjestelmän käyttöönottoa tehtävillä käyttöönottomittauksilla. Näin saadaan myös vertailuarvot tulevia kunnonvalvontamittauksia varten. Pelkkä tieto käyttöönoton yhteydessä suoritettavasta osittaispurkausmittauksesta voi parantaa yksittäisen asentajan työn laatua. Taulukossa 15 on esitetty vaihtoehtoisia testausmenetelmiä uusille kaapelijärjestelmille kriittisyysluokan mukaisesti.

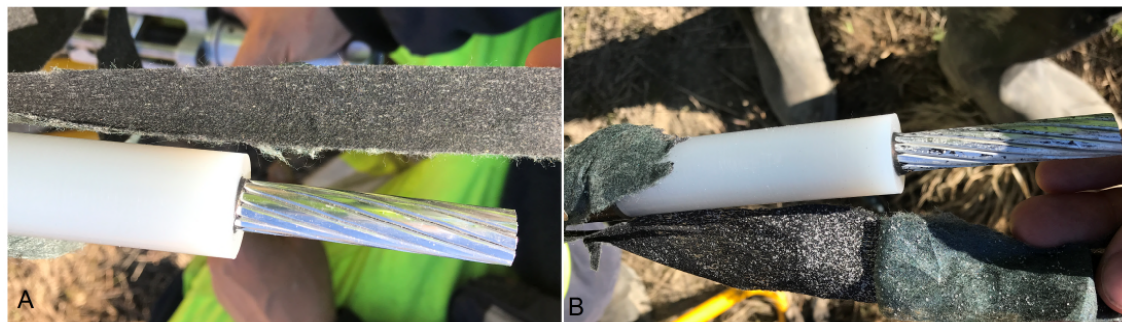
Taulukko 15. Helen Sähköverkko Oy:n käyttämät uusien kaapelijärjestelmien testausmenetelmät. Kuvassa p on pakollinen testi ja v on vaihtoehtoinen testi [10, s. 49].

Kaapelin kriittisyys	Testausmenetelmä				
	Eristysvastusmittaus	Vaipaneheysmittaus	Jännitekoe	Osittaispurkausmittaus	Hävikertoimen mittaus
Korkea	p	p	v (VLF) ¹⁾	p (VLF tai DAC)	v (VLF tai DAC)
Normaali	p	p	v ¹⁾	p (VLF, DAC tai on-line)	
Matala	p	p	p (50 Hz U ₀)	p (on-line)	

Taulukon 15 kuvailemissa käyttöönottomittauksissa jännitekoe ei ole pakollinen, mikäli tehdään osittaispurkausmittaus.

8.4 AHXAMK-W-kaapelin käsittely jatkosasennuksessa

Kaapeli on valmistettava ennen varusteen asentamista. Valmisteluun sisältyy kaapelin mitoitus, katkaisu, vaipan, hohtosuojan ja eristyksen kuorinta, eristyksen hionta sekä kosketussuojan liitoksen valmistelu. Kaapelia valmisteltaessa on varmistuttava, että jatkettava kaapeli on kuiva. Kaapeliin päässyt kosteus voidaan havaita johtimen värin muuttumisena ja alumiinilaminaatin alla olevan paisuvan nauhan aktivoitumisena eli turpoamisena. Mikäli kaapelissa havaitaan kosteutta, on siitä poistettava kostunut osuus. Kuvassa 36 on esimerkkinä, miltä näyttää kuiva ja kostunut kaapeli.



Kuva 36. Kuiva AHXAMK-W-tyyppin kaapeli ja kaapeli, jossa havaittu kosteutta.

Kuvassa 36 A on kuiva kaapeli, jossa johdin on kirkas ja paisuva nauha tasainen. Kuvassa 36 B on kostunut kaapeli, jonka johdin on hapettunut ja paisuva nauha on turvonnut.

Prysmian Group suosittelee kaapelien käsittelyyn työkaluja, jotka auttavat saavuttamaan tasalaatuisen lopputuloksen. Kuvassa 37 on esitetty työkalusalkku, joka sisältää työkalut kaapelin ulkovaipan, eristyksen ja hohtosuojan kuorintaan, vaipan halkaisuun sekä kosketussuojaliitoksen tekoon [44].



Kuva 37. Prysmian Groupin suosittelemat työkalut kaapeleiden käsittelyyn [muokattu lähteestä 44].

AHXAMK-W-kaapeliin tehtävää jatkosta varten kaapelit katkaistaan asennettavan jatkoksen keskikohdasta. Kaapelien katkaisuun suositellaan puukkosahaa, jotta kaapelien

päistä tulisi suorat. Vinoon katkaistu kaapelin pää saattaa aiheuttaa mittavirheitä esimerkiksi hohtosuojan kuorinnassa sekä suurentaa johdinliitosten ylimenovastusta.

Prysmian Groupin varusteilla kaapelin ulkovaippa kuoritaan yhdessä alumiinilaminaatin kanssa, jotta kosketussuojaliitos pystytään tekemään asennusohjeen mukaisesti. Kuvassa 38 on esitetty AHXAMK-W-kaapelin ulkovaipan ja alumiinilaminaatin kuorinta samanaikaisesti.

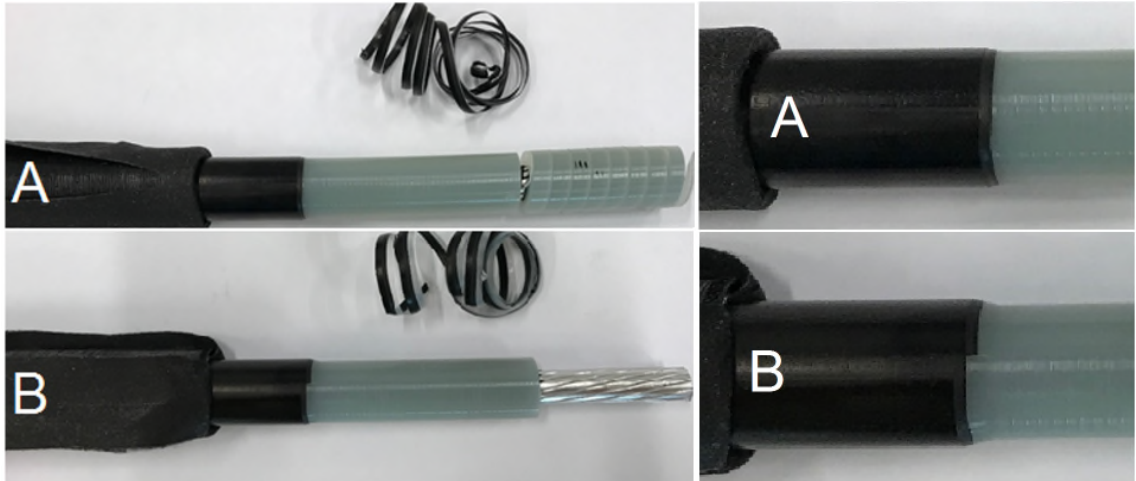


Kuva 38. Kaapelin ulkovaipan ja alumiinilaminaatin kuorinta samanaikaisesti.

Kuvassa 38 esitetty työkalu mahdollistaa oikein käytettynä ulkovaipan ja alumiinilaminaatin kuorinnan turvallisesti kaapelin muita kerroksia vaurioittamatta.

Hohtosuojan kuorinta

Hohtosuoja kuoritaan siihen tarkoitettulla työkalulla ja tukevalla pysäyttimellä ohjeen esittämälle etäisyydelle vaipan reunasta tai johtimen päästä. Kuvassa 39 on esitetty oikein ja väärin tehty kuorinta.



Kuva 39. Kaapelin A hohtosuojan kuorinta on tehty oikein ja kaapelin B kuorinta on tehty virheellisesti.

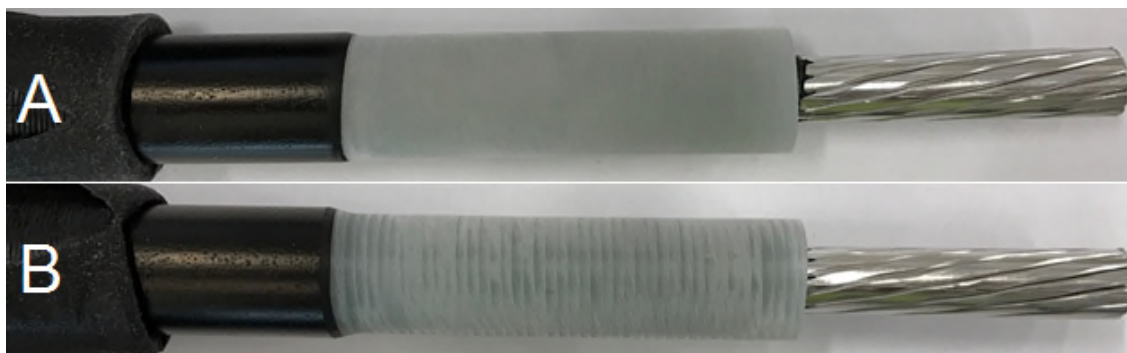
Kuvassa 39 kaapelin A hohtosuojan kuorinta on tehty asianmukaisesti. Kaapelin B hohtosuojan kuorinnassa on tehty varusteen toiminnan kannalta kriittisiä virheitä. Kaapelin B hohtosuojan päättymiskohdassa on pitkittäinen kuorintaterän pysäytysjälki ja hohtosuojan reuna ei ole suora. Kaapelin B eristystä on myös kuorittu tarpeettoman paljon, jolloin eristyksen halkaisija on tavoiteltua pienempi. Pienempi eristyksen halkaisija heikentää varusteen ja kaapelin eristyksen välistä puristusta, jolla saattaa olla vaikutusta varusteen toimintaan. Varusteille on aina määritetty pienin sallittu eristyksen halkaisija ja sitä pitää noudattaa.

Lisäksi kaapelin B eristyksen ja hohtosuojan halkaisijoiden ero on kasvanut tarpeettoman paljon, mikä kasvattaa hohtosuojan ja eristyksen välistä korkeuseroa. Suuri korkeusero hohtosuojan ja eristyksen rajapinnassa voi aiheuttaa ilmataskun varusteen ja kaapelin väliin. Laadukas ja hyvässä kunnossa oleva hohtosuojakuorimalaite tekee eristykseen paremman pinnan, jolloin eristyksen hionta on nopeampi tehdä.

Eristyksen hionta

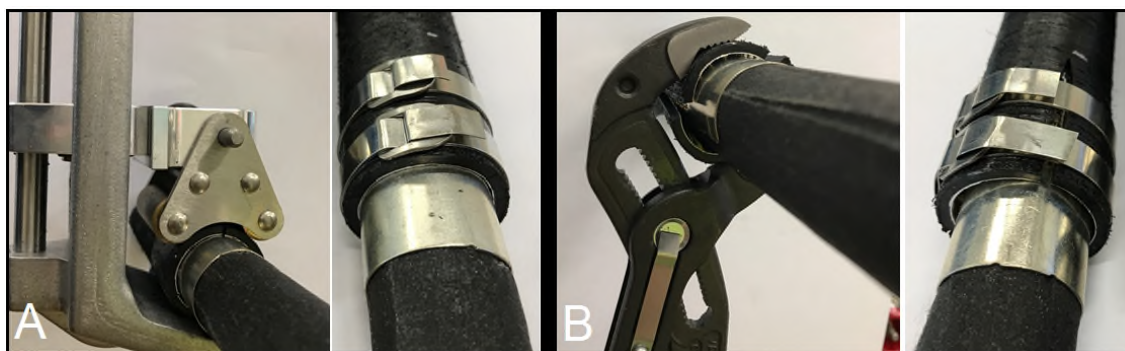
Keskijännitevarusteissa eristyksen hiontaan käytetään yleensä karkeuden 240 hiomanauhaa. Hionta on riittävä, kun eristyksen pinta on hiottu kauttaaltaan eikä siinä näy

poikkeamia. Hiomanauhan osuessa johtimeen tai hohtosuojaan se täytyy vaihtaa uuteen, jotta eristykseen ei kulkeudu johtavia partikkeleita. Kuvassa 40 on esitetty hyvin ja huonosti hiotut eristykset.



Kuva 40. Kaapelin A eristys on hiottu hyvin ja kaapelin B hionta ei ole riittävä.

Kosketussuojaliitoksessa on tärkeintä, että ulkovaippa ja alumiinilaminaatti on puristettu huolella kontaktirengasta vasten. Tällöin liitoksen ylimenovastus on mahdollisimman pieni ja liitos on tiivis, jolloin se johtaa vikatapauksissa lämpöä hyvin pois. Kuvassa 41 on esitetty asianmukaisesti ja huonosti puristetut kosketussuojaliitokset.



Kuva 41. Kuvassa A on asianmukaisesti tehty kosketussuojan liitos ja kuvassa B on huonosti puristettu liitos.

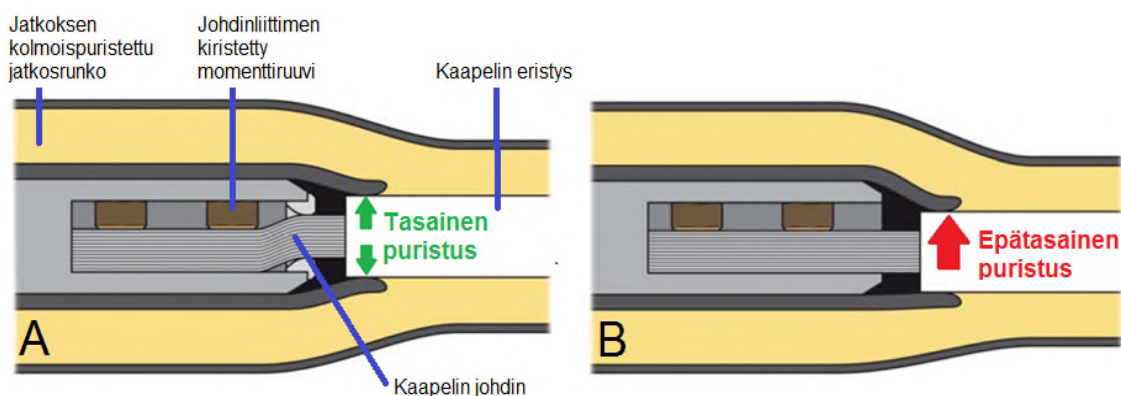
Kuvan 41 kuvassa A kosketussuojaliitos on puristettu asianmukaisesti riittävällä puristusvoimalla koko kontaktirengaan pinta-alalta. Kuvassa B liitoksen puristus ei ole riittävä ja sillä saattaa olla negatiivinen vaikutus liitoksen termiseen ja mekaaniseen kestoisuuteen.

8.5 Elaseed-jatkoksen asennus

Ennen jatkosasennuksen aloittamista on muistettava seuraavat perusasiat:

- Varusteen soveltuvuus käytettävälle kaapelille on varmistettava.
- Varusteiden toimituspakkausten eheys on tarkistettava, pakkausten on oltava ehjät ja niissä ei saa olla merkkejä kosteudesta eikä epäpuhtauksista.
- Kylmissä olosuhteissa on varmistuttava varusteen materiaalien toimivuudesta. Tarvittaessa ne on lämmitettävä ennen asennusta.
- Asennusohjeen noudattaminen on ehdottoman tärkeää hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Varustevalmistaja saattaa muuttaa mittoja ja materiaaleja.
- Kaapelien on oltava suorassa koko jatkoksen teon ajan.
- Kaapelien ulkovaipat on puhdistettava jatkosalueelta, jotta niistä ei kulkeudu epäpuhtauksia varusteisiin.

Elaseed-jatkoksen asennuksessa on tärkeää käyttää johtimen keskitysrenkaita ja noudattaa asennusohjeen määrittämiä mittoja ja toleransseja. Asennusohje määrittää kullekin johdinkoolle käytettävät keskitysrenkaat, jotka asetetaan johdinliittimen molempiin päihin. Kuvassa 42 on havainnollistettu, miten keskitysrengas vaikuttaa varusteen rakenteeseen.

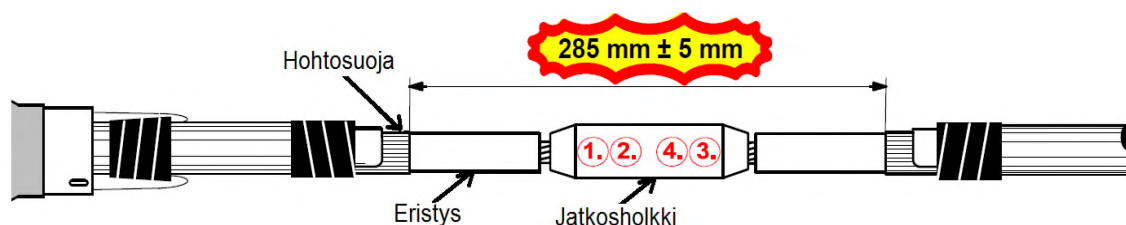


Kuva 42. Keskitysrenkaan merkitys johdinliitoksissa [muokattu lähteestä 24, s.4].

Kuvassa 42 A johdinliittimessä on käytetty keskitysrengasta, joka pitää johtimen liittimen keskellä momenttiruuvien kiristämisen jälkeenkin. Tällöin jatkosrunгон puristus on tasainen kaapelin eristystä vasten myös liittimen vieressä. Kuvassa 42 B keskitysrengasta ei ole asetettu ollenkaan, jolloin johdinliittimen momenttiruuvit painavat johtimen ja koko

kaapelin sen toiseen laitaan. Tällöin varusteen puristus kaapelin eristystä vasten ei ole tasainen ja rajapintaan saattaa syntyä varusteen toiminnan kannalta kriittisiä ilmarakoja.

Elaspeed-jatkoksissa kuorittujen hohtosuojien mitat tarkistetaan ohjeen antaman toleranssin avulla ennen johdinliittimien lopullista asennusta. Ennen tarkistusta johtimet asetetaan johdinliittimeen ja ne lukitaan paikalleen kevyesti ruuveja kiristämällä. Asennusohjeen antamaa toleranssia pitää noudattaa, jotta varuste toimii oikein. Kuvassa 43 on esitetty Elaspeed 1C-24-F-T1-Compact -jatkoksen hohtosuojien välinen mitta 285 mm ja sille toleranssi ± 5 mm, josta pitää varmistua ennen momenttiruuvien loppuun kiristämistä.



Kuva 43. Elaspeed 1C-24-F-T1-Compact-jatkoksen hohtosuojien välinen mitta toleransseineen [17].

Hohtosuojien väliä on säädettävä tarpeen mukaan, mikäli mitta ei ole asennusohjeen antamassa toleranssissa. Kuvassa 43 hohtosuojien välille sallitaan mitat välillä 280–290 mm. Hohtosuojien välinen oikea etäisyys varmistaa jatkosrungon kerrosten oikean asettelun kaapelin kerrokseen nähden. Kuvaan 43 on merkitty myös johdinliittimen momenttiruuvien oikea kiristysjärjestys. Ruuvien kiristäminen aloitetaan kaapelin puoleisesta päästä, jotta johdin venyisi mahdollisimman vähän ruuvien aiheuttaman puristuksen myötä. Johtimen venymä pidentää hohtosuojien reunojen välistä mitta.

8.6 Asennusvirheiden simulointi

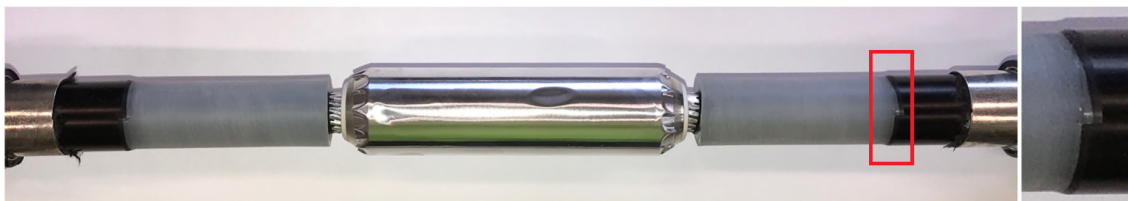
Tavanomaisten asennusvirheiden vaikutuksia Elaspeed-jatkoksen toimintaan päätettiin tutkia. Laboratoriokokeilla haluttiin selvittää, kuinka asennusvirheet vaikuttavat osittaispurkausten (PD) muodostumiseen ja jännitekestoisuuteen.

Kokeessa tutkittiin kahdeksan erilaisen asennusvirheen vaikutuksia. Kutakin asennusvirhettä tehtiin kaksi kappaletta, jotta voitiin varmistua tulosten oikeellisuudesta. Vertailun vuoksi sähköiset kokeet tehtiin myös asianmukaisesti asennetuille referenssijatkoksille. Koekappaleissa käytettiin AHXAMK-WP 1x150 mm² 20 kV -kaapelia ja Elaspeed 1C-24-F-T1-Compact -jatkoksia, jotka soveltuvat 120–240 mm²:n kaapeleille. Koekappaleiden päihin asennettiin Coldfit 1C-24-2F-T1 -ulkopäätteet sähköisiä kokeita varten. Taulukossa 16 on esitelty koekappaleet.

Taulukko 16. Koekappaleet ja niihin tehdyt asennusvirheet.

Koekappale	Asennusvirhe
A1, A2	Asianmukaisesti asennettu referenssijatkos.
B1, B2	Keskitysrenkaat jätetty pois johdinjatkosliittimen molemmilta puolilta.
C1, C2	Hohtosuojien välinen mitta ylittää 10 mm asennusohjeen salliman maksimiarvon.
D1, D2	Hohtosuojien välinen mitta ylittää 15 mm asennusohjeen salliman maksimiarvon.
E1, E2	Hohtosuojien välinen mitta alittaa 5 mm asennusohjeen salliman minimiarvon.
F1, F2	Hohtosuojien välinen mitta alittaa 10 mm asennusohjeen salliman minimiarvon.
G1, G2	Hohtosuojan ja eristyksen rajassa lovi.
H1, H2	Hohtosuojan mukana on kuorittu eristystä liian paljon, jolloin eristyksen ulkohalkaisija on enää 23,1 mm, kun se normaalisti olisi noin 25,0 mm. Jatkoksen pienin sallittu eristyksen halkaisija on 23,1 mm.
I1, I2	Liian pieni kaapeli (95 mm ²) käytetylle jatkostyypille (eristyksen halkaisija kuorittuna ja hiottuna noin 22,1 mm).

Kuvassa 44 on esitetty koekappaleiden G1 ja G2 hohtosuojan ja eristyksen rajaan tehdyt lovet.



Kuva 44. Koekappaleiden G1 ja G2 hohtosuojan ja eristyksen rajaan tehdyt lovet.

Kuvassa 44 esitetty hohtosuojan ja eristyksen rajassa oleva lovi tehtiin jatkoksen molempiin päihin. Kuvan kaltainen lovi saattaa syntyä hohtosuojan kuorinnassa, kun kuorimälaitettä ei pysäytetä oikein.

Koekappaleille tehtiin seuraavat sähköiset kokeet:

- vaihtojännitekoe 50 kV ($4,2 U_0$) 15 minuuttia
- osittaispurkausmittaus 30 kV ($2,5 U_0$) AC-jännitteellä
- vaihtojännitekoe nousevalla jännitteellä läpilyöntiin asti.

50 kV:n vaihtojännitekokeella haluttiin varmistaa, ettei koekappaleissa synny läpi- tai yli-lyöntiä osittaispurkausmittauksen aikana, joka voisi vaurioittaa mittauslaitteistoa. Osittaispurkausmittauksessa syttymisjännite (U_i) kirjattiin pöytäkirjaan, kun jännitettä nostettiin. Jännite nostettiin ensin 33 kV:iin kymmenen sekunnin ajaksi, jonka jälkeen se laskettiin 30 kV:iin ja pidettiin siinä viiden minuutin ajan. 30 kV:n jännitteellä mitatut osittaispurkaukset ($PD_{30 \text{ kV}}$) kirjattiin pöytäkirjaan. Viiden minuutin jälkeen jännitettä laskettiin hitaasti, jolloin osittaispurkausten sammumisjännite (U_e) kirjattiin pöytäkirjaan. Lopuksi koekappaleille suoritettiin vaihtojännitekoe nousevalla jännitteellä läpilyöntiin asti, jotta saatiin selville jatkoksen heikoin kohta. Jännitettä nostettiin 5 kV:lla viiden minuutin välein.

Taulukossa 17 on esitetty sähköisten kokeiden tulokset.

Taulukko 17. Asennusvirheiden simuloinnin tulokset.

Koe- kappale	Osittaispurkausmittaukset			Vaihtojännitekoe läpilyöntiin asti, viimeinen kestojännite (kV)
	U_i	$PD_{30\text{ kV}}$	U_e	
A1	-	-	-	105**
A2	-	-	-	105**
B1	19 kV (5 pC*)	500 pC	17 kV	85
B2	26 kV (7 pC*)	10 pC	23 kV	95
C1	-	-	-	110**
C2	-	-	-	105**
D1	-	-	-	100**
D2	-	-	-	100**
E1	-	-	-	100**
E2	-	-	-	100**
F1	-	-	-	100**
F2	-	-	-	100**
G1	-	-	-	90**
G2	-	-	-	100**
H1	25 kV (4 pC*)	5 pC	23 kV	85
H2	-	-	-	100
I1	22 kV (100 pC*)	400 pC	19 kV	85
I2	-	-	-	100

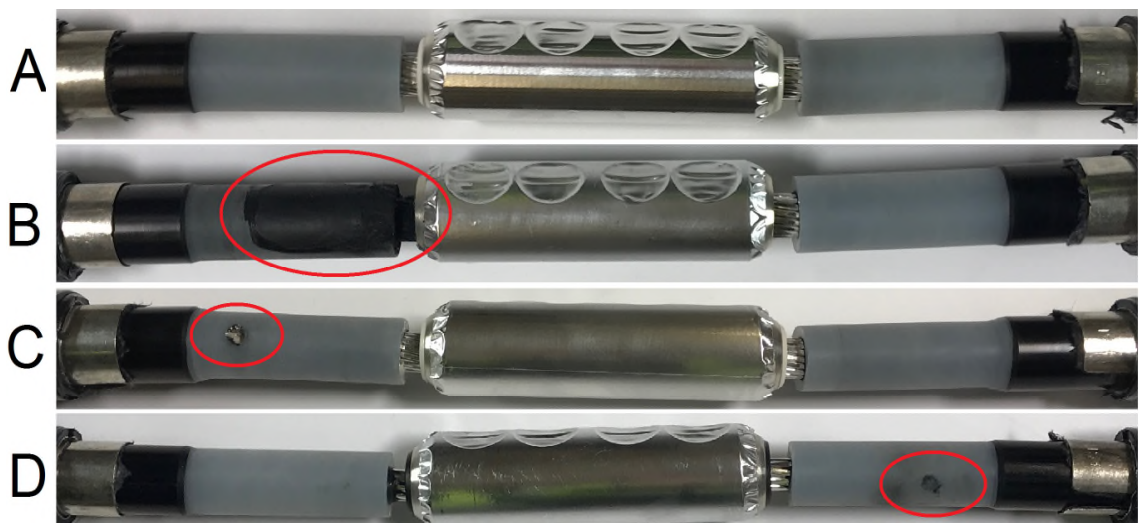
* Osittaispurkaukset syttymisjännitteellä
** Koe päättyi päätteen ylilyöntiin.

Taulukon 17 tulosten mukaan ainoastaan koekappaleissa B1, B2, H1 ja I1 syttyi osittaispurkauksia. B-koekappaleiden kaltaisella asennusvirheellä, jossa ei käytetty keskitysrenkaita johdinjatkosliittimen asennuksessa, on selkeä negatiivinen vaikutus jatkoksen toimintaan. Koekappaleen B1 osittaispurkaukset syttyivät alle $2 U_0$ jännitteellä, joten se ei olisi todennäköisesti läpäissyt tyypikoevaatimusta, jossa sallitaan enintään 10 pC purkaukset $2 U_0$ jännitteellä. Koekappale B2 olisi osittaispurkauksista huolimatta täyttänyt tyypikoevaatimuksen, mutta pitkäaikaisessa kokeessa purkaukset olisivat todennäköisesti lisääntyneet ja tilanne huonontunut.

Myös koekappaleessa H1 syttyi osittaispurkauksia, joka viittaa siihen, että liian suuri halkaisijaero eristyksen ja hohtosuojan reunassa saattaa heikentää jatkosrungon puristusta eristystä vasten ja siten myös jännitekestoisuutta. Koekappaleen H1 jatkos olisi kuitenkin läpäissyt tyypikoevaatimuksen osittaispurkausmittausten osalta. Tulos kuitenkin osoitti

sen, että hohtosuojan kuorimisessa on oltava huolellinen ja eristystä ei saa kuoria liikaa hohtosuojan mukana. Koekappaleissa I1 syttyneet osittaispurkaukset viittaavat siihen, että eristyksen liian pieni halkaisija heikentää jatkosrungon ja kaapelin eristyksen välistä puristusta ja siten jännitekestoisuutta. Koekappale ei olisi täyttänyt tyyppikoevaatimusta osittaispurkausmittauksessa. Varusteille annettuja kaapelin eristyksen minimihalkaisijoita on siis noudatettava.

Koekappaleiden avauksessa kävi ilmi, että vain koekappaleissa B1, B2, H1, H2, I1 ja I2 oli syntynyt läpilyönti jatkoksessa. Muissa koekappaleissa jännitekoe nousevalla jännitteellä oli päättynyt ylilyöntiin Coldfit-päätteessä. Tämän perusteella nämä kolme asennusvirhettä heikentävät jatkoksen jännitekestoisuutta merkittävästi. Muiden koekappaleiden asennusvirheet eivät olleet yhtä kriittisiä. Tulosten perusteella jatkoksen mitoituksessa on varmuusmarginaalia, joka sallii pienet mittojen alitukset tai ylitykset, mutta siitä huolimatta varusteiden asentaminen on tehtävä aina asennusohjeen ja hyvien asennustapojen mukaisesti. Kuvassa 45 on esitetty avatut koekappaleet A1, B1, H1 ja I1, joista nähdään läpilyöntien sijainti jatkoksessa.



Kuva 45. Ehjä referenssijatkos ja läpilyöneet jatkokset. Kuvassa A on koekappale A1, Kuvassa B on B1, kuvassa C on H1 ja kuvassa D on I1.

Kuvassa 45 A on avattu A1 referenssijatkos kokeen jälkeen. Referenssijatkoksessa ei näkynyt merkkejä osittaispurkauksista. Kuvassa 45 B on koekappale B1, johon ei asennettu keskitysrenkaita johdinliittimen kummallekaan puolelle. Kuvasta on nähtävissä,

että kaapeli ei ole keskitetty johdinliittimeen nähden. Koekappaleen eristyksessä on läpilyönti johdinjatkosliittimen vieressä. Läpilyönti on syntynyt jatkosrungon ja kaapelin eristyksen välisen riittämättömän puristuksen seurauksena.

Kuvassa 45 C on koekappale H1, jossa eristys oli kuorittu liian ohueksi. Tämä voidaan havaita kuvasta eristyksen ja hohtosuojan rajan pidempänä kartiona. Koekappaleen eristyksessä on läpilyönti noin 20 mm hohtosuojan reunasta. Läpilyönti on saattanut syntyä jatkosrungon ja kaapelin eristyksen välisen riittämättömän puristuksen seurauksena kohdassa, jossa eristyskartio alkaa nousta. Kuvassa 45 D on koekappale I1, jossa käytettiin liian pientä kaapelia. Koekappaleen eristyksessä on läpilyönti noin 30 mm hohtosuojan reunan etualalla. Läpilyönti on syntynyt todennäköisesti jatkosrungon ja kaapelin eristyksen välisen riittämättömän puristuksen seurauksena.

Kokeen tulosten perusteella kaikkien koekappaleiden jännitekestoisuus oli kuitenkin hyvä ja ne olisivatkin läpäisseet CENELECin standardin HD 629.1 mukaisen tyyppikokeen jännitekokeen osalta. Tyyppikoevaatimus edellyttää viiden minuutin koetta $4,5 U_0$ (54 kV) jännitteellä, kun alin kokeessa läpilyönyt koekappale kesti noin $7,1 U_0$ (85 kV) jännitteen. Lisäksi kaikki muut näytteet, paitsi B1 ja I1 olisivat täyttäneet standardin tyyppikoevaatimuksen osittaispurkausmittauksissa. Vaatimus sallii maksimissaan 10 pC osittaispurkaukset $2 U_0$ (24 kV) jännitteellä. [26.]

Kaikki jatkokset olisivat todennäköisesti kestäneet normaalilla käyttöjännitteellä useita vuosia ennen läpilyöntiä. Simulointikokeen jännitekoe oli lyhytaikainen, joten pidemmällä koestusajalla asennusvirheet olisivat saattaneet aiheuttaa osittaispurkauksia jo alemmalla jännitteellä. Esimerkiksi yksivaiheisen maasulun aiheuttama yli pääjännitteen suuruinen jännite voi synnyttää osittaispurkauksia, jotka suurentuvat ajan myötä. Myös transienttiylijännitteet voivat synnyttää hetkellisiä osittaispurkauksia, minkä toistuessaa yhä uudelleen purkausten syttymisjännite pienenee. Kylmät ja pitkät pakkasjaksot saattavat myös nopeuttaa osittaispurkausten syntyä jakeluverkossa. Korkeammalla jännitteellä syttyneet osittaispurkaukset voivat säilyä myös jännitteen laskiessa, sillä osittaispurkausten sammumisjännite on syttymisjännitettä pienempi. Koetulosten perusteella haitallisimmat asennusvirheet olisi voitu havaita vähintään $2 U_0$ jännitteellä tehtävillä osittaispurkausmittauksilla.

9 Yhteenveto

Keskijännitejaketuverkon toimintavarmuus on merkittävä koko sähköjakelulle. Lisääntyneen kaapeloinnin seurauksena kaapelivarusteiden vaatimustenmukaisuus korostuu erityisesti vaativien ympäristöolosuhteiden ja vaativissa olosuhteissa tehtävien asennusten takia. Vääränlaisten tai väärin asennettujen kaapelivarusteiden aiheuttamat sähkökatkokset voivat aiheuttaa suuria kustannuksia verkkoyhtiöille. Yleensä jakeluverkkoon asennettavilta varusteilta edellytetään hyväksytysti suoritettua tyyppikoetta IEC:n ja CENELECin standardien mukaisesti. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että hyväksytysti suoritettu tyyppikoe ei vielä välttämättä takaa varusteille tavoiteltua pitoaikaa.

Suuret ympäristön lämpötilan ja kuormitusvirran vaihtelut saattavat rasittaa varustetta mekaanisesti ja heikentää niiden ominaisuuksia. Erittäin alhaiset lämpötilat voivat synnyttää kaapelin eristyksen ja varusteen väliin ilmataskun, jossa syntyy osittaispurkauksia. Vikojen aiheuttamat suuret oikosulkuvirrat ja jännitteet voivat aiheuttaa liitos- ja eristysvaurioita. Märässä maassa sijaitsevassa jatkoksessa saattaa syntyä vesipuita kaapelin eristykseen, jotka aiheuttavat läpilyönnin vasta vuosien päästä. Erityisen hankala tilanne on silloin, kun useita rasiustekijöitä vaikuttaa samanaikaisesti kaapelivarusteseen. Työssä tutkitut lisäkokeet soveltuvat hyvin varusteiden vaatimustenmukaisuuden arviointiin, koska ne ottavat suomalaisen jakeluverkon ympäristö- ja käyttöolosuhteet paremmin huomioon kuin kansainväliset standardit.

Varusteille tehty pitkäaikaiskoe oli vaativa ja simuloi suomalaisessa jakeluverkossa esiintyviä olosuhteita suuren lämpötilavaihtelun, hyvin alhaisen ympäristön lämpötilan ja jatkoksen veteen upotuksen osalta. Pitkäaikaiskokeiden jälkeen tehtyjen sähköisten kokeiden tulokset olivat erinomaiset, vaikka kiihdytetyssä vanhennuskokeessa käytetty jännite ja kuormitusvirta vanhensivat varusteita vastaten vähintään 40 vuoden normaalia käyttöä suomalaisessa jakeluverkossa.

Varusteiden asennuksen laadulla on suuri vaikutus koko sähköjakelujärjestelmän käyttövarmuuteen. Lisääntyneen kaapeloinnin myötä varusteasennuksia tekevien asentajien lukumäärä on kasvanut, mutta toisaalta töiden suorittamiseen on entistä vähemmän aikaa käytettävänä. Ne asettavat isoja haasteita, sillä viime kädessä vastuu asennuksen

laadusta on asennuksen tekijällä. Varustetoimittajan on järjestettävä koulutus, jossa opetetaan oikeat kaapelinkäsittely- ja varusteasennustekniikat. Myös henkilön, joka koordinoi asennustyötä, on tiedettävä mitä laadukkaaseen lopputulokseen pääsy edellyttää.

Tässä työssä tutkitut jatkokset kestivät simuloituja asennusvirheitä suhteellisen hyvin. Jännitekestoisuus oli asennusvirheistä huolimatta reilusti yli standardien tyyppikoevaatimusten ja vain kahdessa koekappaleessa syttyi osittaispurkauksia alle $2 U_0$ jännitteellä. Pahimmatkin asennusvirheet olisivat vikaantuneet todennäköisesti aikaisintaan vasta vuosien päästä normaalilla käyttöjännitteellä, sillä alimmat osittaispurkausten syttymisjännitteet olivat lähes $1,6 U_0$ (19 kV).

Siitä huolimatta näiden tulosten ja muidenkin asennusvirhetutkimusten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että jo pienetkin asennusvirheet voivat alentaa osittaispurkausten syttymisjännitettä ja siten jännitekestoisuutta. Pahimmat asennusvirheet voivat synnyttää osittaispurkauksia jo käyttöjännitteellä. Lisäksi esimerkiksi yksivaiheinen maasulku saattaa nostaa verkon jännitettä, jolloin pienemmätkin asennusvirheet voivat jo synnyttää osittaispurkauksia. Pitkään jatkuneen tai toistuvan yksivaiheisen maasulun aikana osittaispurkaukset saattavat kehittyä niin, että ne säilyvät myös verkon normaalilla käyttöjännitteellä. Lisäksi esimerkiksi ympäristön lämpötila- ja kuormitusvaihtelut saattavat rasittaa asennusvirheen sisältävää varustetta lisää madaltaen osittaispurkausten syttymisjännitettä ja lopulta myös jännitekestoisuutta.

Asennusvirheiden simuloinnin koetulosten perusteella kaikista haitallisimmat asennusvirheet olisi voitu havaita vähintään $2 U_0$ jännitteellä tehtävillä osittaispurkausmittauksilla. Ennen läpilyöntiä havaitut osittaispurkaukset voivat tuoda merkittäviä kustannussäästöjä jakeluverkkoyhtiölle, kun vika voidaan korjata hallitun käyttökeskeytyksen aikana.

Lähteet

- 1 Historia. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <<https://fi.prysmiangroup.com/about-us/history>>. Päivitetty 2.8.2018. Luettu 3.1.2019.
- 2 Kaikilla mantereilla. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <<https://fi.prysmiangroup.com/about-us/global-presence>>. Päivitetty 2.8.2018. Luettu 3.1.2019.
- 3 Sähköverkkojen rakenne. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot>. Luettu 20.1.2019.
- 4 Suomen sähköjärjestelmä. Verkkoaineisto. Fingrid OYJ. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma>>. Luettu 20.1.2019.
- 5 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Kolmas painos. Otatieto. Gaudeamus Helsinki University Press.
- 6 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot 1, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Toinen painos. Otatieto. Gaudeamus Oy.
- 7 Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus. 2018. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12862527/Vaikuttavuusraportti_2018_.pdf/5af13df5-0112-13cd-8421-e457ab562449/Vaikuttavuusraportti_2018_.pdf.pdf>. 12.3.2019. Luettu 21.3.2019.
- 8 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu ja laitteet. Toinen painos. Otatieto. Gaudeamus Oy.
- 9 Suomi, Mika. 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60-400 kV suurjännitekaapelien kuormitettavuuteen. Insinööriyö. Helsinki.
- 10 Vepsäläinen, Jukka. 2014. Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijänniteverkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa. Diplomityö. Espoo.
- 11 What Is Electrical Stress? 2016. Verkkoaineisto. Thorne & Derrick. <<https://www.cablejoints.co.uk/blog/article/electrical-stress>>. Päivitetty 16.2.2016. Luettu 3.1.2019.
- 12 Esitteet, Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf>. Luettu 5.1.2019.

- 13 Esitteet, Pikkalan WISKI® on jo kolmekymppinen –ja virtaa riittää. 2017. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Prysmian_Wiski30v_A5_lowres.pdf>. Luettu 5.1.2019.
- 14 Mechanical forces and movements in underground cables and cable accessories. 2019. Verkkoaineisto. Europacable. <<https://www.europacable.eu/wp-content/uploads/2019/03/Mechanical-forces-and-movement-in-cable-accessories.pdf>>. Luettu 3.3.2019.
- 15 Tognali, Stéphane & Lencot, Gérard. 2011. 15-year experience of cold-shrinkable medium voltage joints. Jicable paper. Versailles, France.
- 16 Cable accessories in underground medium voltage distribution networks. 2016. Verkkoaineisto. Europacable. <<https://www.europacable.eu/energy/medium-voltage-accessories>>. Luettu 17.1.2019.
- 17 Keskiännitevarusteet. 2019. Prysmian Group. Arkisto.
- 18 Eigner, Alexander & Semino, Sepehr. 2013. 50 Years of Electrical-Stress Control in Cable Accessories. IEEE Electrical Insulation Magazine vol.29, no.5.
- 19 Accessories for medium voltage power cables technical information. 2018. Verkkoaineisto. Euromold. <http://www.nexans-power-accessories.com/fileadmin/GPH_CZ/Pricelists/VN_Technicke_informace_2018.pdf>. Luettu 7.2.2019.
- 20 Strobl, Robert & Haverkamp, Wolfgang & Malin, Gerold & Fitzgerald, Frank. 2001. Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories. Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE/PES.
- 21 Material and Design Requirements for MV Cable Accessories. 2019. Verkkoaineisto. INMR. <<http://www.inmr.com/material-design-requirements-for-mv-cable-accessories>>. Luettu 21.3.2019.
- 22 Aro, Matti & Elovaara, Jarmo & Karttunen, Matti & Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko. 2015. Suurjännitetekniikka. Otatieto. Gaudeamus Helsinki University Press.
- 23 Siti Nur Aishah Binti Mahd Rawe. 2014. Investigation on non-linear grading material as stress control on medium voltage cable termination. Master thesis. Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- 24 Quaqqia, Dario & Tognali, Stéphane & Lencot, Gérard. 2015. Mechanical Connectors used inside M.V. Accessories: a system approach. Jicable paper. Versailles, France.

- 25 Best practice for the installation of medium voltage cable accessories. 2016. Verkkoaineisto. Europacable. <https://www.bcauk.org/application/files/1615/0581/9348/MV_Cable_Accessories_Installation_Best_Practice.pdf>. Luettu 21.1.2019.
- 26 HD 629.1 S2:2006. Test requirements on accessories for use on power cables of rated voltage from 3,6/6(7,2) kV up to 20,8/36(42) kV Part 1: Cables with extruded insulation. 2006.CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization.
- 27 COLDFIT® keskijännitekylmäkutisteulkopääte 12/20 (24) kV. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/Prysmian%20Coldfit%20datalehti_120118.pdf>. Luettu 13.1.2019.
- 28 Medium voltage bushings. 2017. Verkkoaineisto. Nexans. <https://www.nexans.be/eservice/Belgium-en/fileLibrary/Download_540176943/Belgium/files/CM%20BU9000-ENG-BUSHINGS_4.pdf>. Luettu 4.3.2019.
- 29 ELASCON SA kosketussuojattu kylmäkutistekulmapistokepääte 630 A, 12/20 (24) kV ja ylijännitesuoja 10 kA. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/Prysmian%20Elascon%20SA%20datalehti_120118.pdf>. Luettu 13.1.2019.
- 30 ELASPEED® keskijännitekylmäkutistejatkos 12/20 (24) kV. 2018. Verkkoaineisto. Prysmian Group. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/Prysmian%20Elaspeed%20datalehti_120118.pdf>. Luettu 13.1.2019.
- 31 Kivisaari, Risto. 2018. ELASPEED-jatkosten ja COLDFIT- sekä ELASCON-päätteiden tekninen arviointi, osa 2: koestukset Pikkalassa ja varusteiden elinikä. Prysmian Group Finland Oy:n sisäinen muistio. Arkisto.
- 32 IEC 61442:2005. Test methods for accessories for power cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). 2005. IEC - International Electrotechnical Commission.
- 33 Väkeväinen, Kenneth. 2015. Surface Discharge Phenomena in Medium Voltage Terminations. Diplomityö. Espoo.
- 34 Ojala, Jonna. 2017. Vikadiagnostiikan kehittäminen muuntamoilla oleviin mittauksiin perustuvalla testijärjestelmällä. Diplomityö. Vaasa.

- 35 Jarry, Bertrand & Tourcher, Christophe & Tambrun, Roger. 2010. "Best-Offer" purchasing of medium voltage joints based on robustness test. CIRED Workshop – Lyon 7-8 June 2010, Paper0091.
- 36 Itämeren piirteet. 2019. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/Catalunya/vedet/14-it%C3%A4meri>>. Luettu 6.3.2019
- 37 Pakonen, Pertti & Keränen, Juha & Muranen, Sami. 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla, loppuraportti. Tutkimushanke. Tampereen teknillinen yliopisto (TTY).
- 38 Hernandez-Mejia, Jean Carlos. 2016. Chapter 6, Dissipation Factor ($\tan \delta$). Georgia Tech, NEETRAC, National Electric Energy Testing, Research and Applications Center. Georgia.
- 39 Arrhenius Relationship. 2019. Verkkoaineisto. Reliawiki. <http://reliawiki.com/index.php/Arrhenius_Relationship>. Luettu 3.3.2019.
- 40 Inverse Power Law Relationship. 2019. Verkkoaineisto. Reliawiki. <http://reliawiki.com/index.php/Inverse_Power_Law_Relationship>. Luettu 5.3.2019.
- 41 G. Mazzanti. 2016. What Have We Still to Learn about the Inverse Power Model? IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, University of Bologna.
- 42 Eilo, Aleksi. 2018. Asennusvirheinen vaikutus keskijännitekaapelipäätteiden toimintakuntoon. Diplomityö. Tampere.
- 43 Kuusisto, Olli. 2016. The Effects of Installation-Based Defects in Medium Voltage Cable Joints. Insinöörityö. Helsinki.
- 44 Työkalulaukku, sähkönumero. 2019. Verkkoaineisto. Sähkönumerot.fi <<https://www.sahkonumerot.fi/6404501>>. Luettu 3.3.2019