

KEVYT KAAPELIJÄRJESTELMÄ HAJA-ASUTUSALUEIDEN TARPEISIIN

KAPELI-projektin loppuraportti

KAPELI-raportti nro 26

Matti Lehtonen, Eero Saarijärvi ja Kari Nurminen

Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan laitos

30.7.2010



ALKUSANAT

Tämä raportti muodostaa loppuraportin ”Kevyen kaapeliverkkojärjestelmän kehittäminen”-projektista, lyhytnimeltään KAPELI. Raportti on yhteenveto keskeisistä hankkeen aikana esille tulleista seikoista – yksityiskohdat on jätetty aihekohtaisen raportin varaan. Näistä yksityiskohtaisista raporteista on luettelo tämän raportin liitteenä.

KAPELI-hankkeen tavoitteena oli kehittää kevyt ja monikäyttöinen keskijännitekaapelijärjestelmä komponentteineen, varusteineen, asennustekniikkoineen ja suunnittelumenetelmineen toteutettuna joko riippukaapelina tai auraamalla maahan asennettuna tai näiden yhdistelmänä. Järjestelmän olennaisia osia ovat johtorakenteiden lisäksi jakelumuuntamot ja keskijännitejakokaapit liitântekniikkoineen ja mahdollisine suojalaitteineen. Projekti toteutettiin ajalla 1.8.2007-31.7.2010.

Hankkeen koordinoimisesta vastasi Oy Merinova Ab. Muut hankkeen osapuolet olivat Destia, Eltel Networks Oy, Ensto Sekko Oy, Finnkumu Oy, Järvi-Suomen Energia Oy, E.ON Kainuun Sähköverkko Oy, Keravan Energia Oy, Prysmian Cables and Systems Oy, Reka Kaapeli Oy, VAMP Oy sekä Tekes.

Hankkeen tutkimusosuudesta vastasi Aalto-yliopiston Teknillinen korkeakoulu.

Lämpimät kiitokset kaikille tutkimushankkeeseen osallistuneille hyvin sujuneesta ja miellyttävästä yhteistyöstä !.

Espoossa 30.7.2010

Matti Lehtonen, Eero Saarijärvi ja Kari Nurminen

SISÄLLYS

JOHDANTO	s. 4
TAVOITTEET	s. 5
KAPELI-KONSEPTI	s. 6
HAJA-ALUEIDEN KAAPELOINTI RUOTSISSA	s. 10
KEVYTKAAPELIJÄRJESTELMÄN TEKNISET KYSYMYKSET	s. 13
Kaapeliyhteyden kuormitettavuus	s. 13
Maasulkuvirtojen kasvu ja maadoitukset	s. 16
Kaapeliyhteyden kapasitiiviset varausvirrat	s. 18
Kapasitiiviset virrat ja jännitteensäätö	s. 21
Kaapelien vaikutus maasulkuvirran sammumiseen	s. 24
Kaapeliverkkojen ylijännitesuojaus	s. 25
KAPELOINNIN TALOUDELLISUUTEEN VAIKUTTAVISTA SEIKOISTA	s. 28
LUOTETTAVUUSKYSYMYKSET	s. 33
Luotettavuuden optimointi	s. 37
ILMAKAAPELI	s. 39
KAPELIVERKON KUNNONVALVONTA	s. 45
OPTIMOITU KAAPELIRATKAISU HAJA-ALUEIDEN TARPEISIIN	s. 47
LÄHTEET	s. 50

LIITE: KAPELI-PROJEKTIN RAPORTIT

JOHDANTO

Suomessa toimivat sähköyhtiöt ovat aktiivisesti etsimässä uusia ratkaisuja, joilla korvataan nykyiset vanhenemassa olevat sähköjako- ja jakeluverkot. Pyrkimyksenä on löytää taloudellisia, mutta nykyistä käyttövarmempia ja vähemmän häiriöalttiita verkkokonsepteja.

Nykyisin valtaosa verkoista on toteutettu avojohtorakenteena. Ratkaisu on selkeä ja yksinkertainen, mutta avojohdot ovat alttiita ukkosen, eläinten, lumikuorman kaatamien puiden sekä kovan tuulen aiheuttamille häiriöille. Lisäksi voimakkaat myrskyt aiheuttavat vaikeasti hallittavia suurhäiriöitä.

Koska hyvin suuri osa keskijännitejohdoista on rakennettu 1960- ja -70-luvuilla, johdot alkavat pylvästyksen osalta olla saneerauksen tarpeessa. Läheisessä tulevaisuudessa suuri osa keskijännitejohdoista uudistetaan, missä yhteydessä on mahdollisuus kehittää verkon luotettavuutta.

Luotettavampi sähköverkko voitaisiin toteuttaa nykyisillä maakaapelitekniikoilla, mutta kaapeliverkkojen rakentaminen perinteisillä rakenteilla ja menetelmillä on kallista, haaroittaminen hankalaa ja vikojen paikantaminen ja korjaaminen aikaa vievää. Pienjänniteverkkoja on opittu asentamaan auraustekniikoilla, mikä alentaa kustannuksia olennaisesti, mutta keskijännitteen osalta rajoituksena on se, että maaperän kivet ja asennuksen aikana tulleet mekaaniset vauriot aiheuttavat helposti eristyksen läpilyönnin.

Suuri osa Suomen maaperästä on kallioista, jolloin maakaapelin käyttö on hyvin vaikeaa. Ongelmaa voitaisiin helpottaa käyttämällä hankalissa paikoissa ilmakaapeleita, mutta ilmakaapelit ovat tähän mennessä olleet raskaita ja hankalasti integroitavissa muuhun verkostoon.

Uudelle keskijänniteverkkoratkaisulle, joka helpottaisi nykyisten verkkojen ongelmia, on olemassa selvä tarve, johon tämä tutkimus pyrkii vastaamaan. Tavoitteena on keskijännitejakeluverkko, joka on:

- taloudellinen
- joustava kuormien muutoksille
- vähemmän häiriöaltis
- myrskysietoinen
- nopea ja helppo korjata
- turvallinen
- vaatii vähän kunnossapitoa

Uusi verkkokonsepti edellyttää sekä järjestelmätason ratkaisujen että verkostokomponenttien kehittämistä. Komponenttien ja järjestelmien kehitystyö on kallista, ja Suomen markkinat ovat pienet. Samankaltaisia tarpeita on kuitenkin myös muissa maissa.

TAVOITTEET

KAPELI-hankkeen tavoitteena oli kehittää kevyt ja monikäyttöinen keskijännitekaapelijärjestelmä komponentteineen, varusteineen, asennustekniikkoineen ja suunnittelumenetelmineen toteutettuna joko riippukaapelina tai auraamalla maahan asennettuna tai näiden yhdistelmänä. Järjestelmän olennaisia osia ovat johtorakenteiden lisäksi jakelumuuntamot ja keskijännitejakokaapit liitântätekniikkoineen ja mahdollisine suojalaitteineen.

Järjestelmän taloudellisuus voidaan saavuttaa optimoimalla kaapelin rakenne sekä käyttämällä keskijänniteverkon haarajohdoilla nykyistä pienempiä poikkipintoja. Esimerkiksi jo 25 mm² Al-poikkipinnalla voidaan 20 kV:n verkossa siirtää noin 3 MW tehoa, mikä nykyisissä avojohtoverkoissa riittää 30-100 km² suuruisen alueen syöttämiseen. Kevyen ilmakaapelin etuna on myös kapea johtokatu sekä suurempi joustavuus eri järjestelmien pylväiden yhteiskäytössä (KJ, PJ, UV, televerkot). Lisäksi nykyisiä KJ-avojohtoverkon pylväitä voitaisiin uusiokäyttää lyhennettyinä leikkaamalla lahonnut alaosa pois. Kun maaperä mahdollistaa auraustekniikoiden käytön, voidaan taloudellisin lopputulos saavuttaa maa-asennuksella. Ongelmana on kuitenkin se, että useimmilla maantieteellisillä alueilla maaperän laatu vaihtelee, ja auraaminen ei ole mahdollista kuin paikoitellen. Tämä vaatii kaapelijärjestelmää, jossa siirtyminen maa-asennuksesta ilma-asennukseen ja päinvastoin on mahdollisimman joustavaa.

Joustavuus kuormien muutoksille saavutetaan kehittämällä ilmakaapeliratkaisu sellaiseksi, että se on helppo purkaa ja siirtää käytettäväksi toisessa paikassa. Samaa tarkoitusta palvelee helppokäyttöisten liitosten ja jatkosten kehittäminen.

Pienet vikataajuudet saavutetaan järjestelmän oikein suunnitellulla rakenteella ja suojauksella. Avojohtoihin verrattuna voidaan myös ilmakaapelin tapauksessa ukkosen, eläinten ja lumikuorman taivuttaman puun aiheuttamat häiriöt poistaa lähes tyystin. Maa-asennuksessa avainasemassa on kaapelin mekaaninen suojaaminen vaikeissa asennusoloissa sekä asennuksen laadunvalvonta. Vaikeissa asennusoloissa on harkittava ilmakaapelin käyttöä, jolloin siirtymisen maa-asennuksesta ilma-asennukseen on oltava mahdollisimman joustavaa.

Vikataajuuksia on mahdollista pienentää myös muuntamoiden rakennetta kehittämällä, sekä panostamalla kunnonhallinnan sovelluksiin. Pääpaino tarkastelussa asetetaan puistomuuntamoiden kehittämiselle ja mittaavan kunnonhallinnan sovellusten kehittämiselle.

Myrskysietoisuutta voidaan parantaa valitsemalla ilmakaapelin rakenne siten, että kannatusköysi ottaa vastaan kaatuvan puun vaikutuksen, ja mekaaninen sulake päästää kaapelin putoamaan maahan, ennen kuin se vaurioituu. Tällöin verkon korjaaminen myrskyn jälkeen on helppoa ja nopeaa. Lisäksi, koska täydellinen kaapelirakenne (vertaa PAS) ei aiheuta maassa ollessaankaan vaaraa yleisölle, voidaan verkon käyttöä helpommin jatkaa myrskytilanteessakin.

Vikojen vaikutusten vähentäminen voidaan saavuttaa kehittämällä järjestelmän suojaustekniikkaa ja integroimalla vianpaikantaminen ja -erottaminen kiinteäksi osaksi kaapelijärjestelmää. Samaa

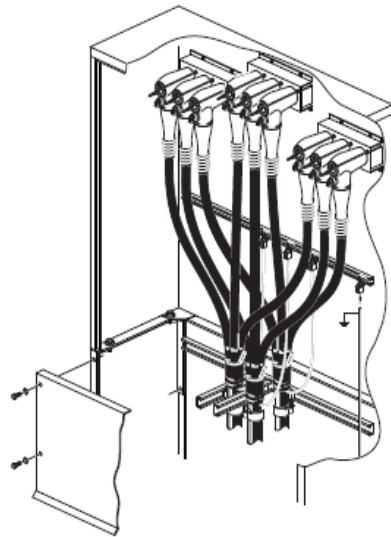
tarkoitusta palvelevat viankorjausta nopeuttavat helppokäyttöiset liitokset, haaroitukset ja jatkokset. Uudet ratkaisut jakelumuuntamoissa sekä kehitettävät keskijännitejakokaapit parantavat olennaisesti kytkentämahdollisuuksia verkossa.

Lisäksi tutkimuksessa kehitettiin suunnittelumenetelmät ja elinkaarikustannusten optimointimallit tulevaisuuden keskijännitejakeluverkoille. Visiossa tulevaisuuden verkosta runkojohdot on toteutettu rakenteellisesti käyttövarmoilla tekniikoilla, joita varmistetaan kehittyneellä verkostoautomaatiolla. Kevyet haarajohdot on toteutettu kevyellä kaapelijärjestelmällä, joko riippukaapelina tai maaperän salliessa auraamalla. Koska sähköverkkojen pitoajat ovat hyvin pitkiä, tyypillisesti 40 vuotta, tulee verkoissa olemaan sekä avojohtoja, eristettyjä avojohtoja, maakaapeleita sekä ilmakaapeleita samassa järjestelmässä. Tämä asettaa omat haasteensa verkkojen suunnittelulle ja kaapelijärjestelmien optimaaliselle käytölle.

KAPELI-KONSEPTI

Kevytkapelijärjestelmän periaatteelliset ratkaisut on esitetty kuvassa 1. Keskeiset osat ovat liityntä runkojohtoon, keskijännitekaapelijakokaappi sekä jakelumuuntamo. Järjestelmää kehitettäessä on lähdetty siitä, että sitä käytettäisiin pääasiassa vähän kuormitetuissa haarajohdoissa ja runkoyhteydet, jotka palvelevat sähköasemien välisinä reserviyhteyksinä rakennettaisiin isommilla poikkipinnoilla.

Runkojohtoliitynnän osalta keskeinen komponentti on varokekuormanerotin. Sen tarkoituksena on mahdollistaa kaapelille pienten poikkipintojen käyttö myös liityttäessä oikosulkuteholtaan vahvaan runkojohtoon. Oikosulkuvikojen tapauksessa varokekuormanerotin myös toteuttaa itsetoimivan ja nopean irtikytkennän. Mikäli sulake on mitoitettu siten että se palaa riittävän nopeasti, ei haarassa oleva oikosulkuvika aiheuta kytkentätoimenpiteitä runkojohdolla. Yhdellä varokekuormanerottimella voidaan suojata koko haarajohto muuntamoiheen, jolloin kyseiset kytkimet voidaan jättää muuntamoilta pois. Poikkeuksen tekee tilanne, jossa sulakkeen nopea palaminen ja johdon kuormitettavuuden hyödyntäminen on ristiriidassa. Tällöin saatetaan joutua turvautumaan välisulakkeiden käyttöön. Jotta varokekuormanerotimesta saadaan täysi hyöty irti, on haarajohto rakennettava kokonaisuudessaan eristetyllä rakenteella. S.o. erottimen takana ei saa olla avojohto-osuuksia, jotka vaatisivat jälleenkytkentöjen käyttöä. Mikäli tähän ei päästä, on harkittava varokekuormanerotin sijaan pylväskatkaisijan käyttöä, tai sitten on mitoitettava kaapelin poikkipinta siten että se kestää syöttöverkon suojausajojen määräämät oikosulkurasitukset.



Kuva 2a. Keskijännitteisten kaapelijakokaappien ratkaisuja.

Kevytkaapelikonseptin toinen keskeinen komponentti on kaapelijakokaappi. Laitevalmistajat ovat jo vastanneet tarpeisiin, sillä ainakin ABB ja SLO pystyy tarjoamaan kuvan 2 mukaisia keskijännitteisiä kaapelijakokaappeja. Kaapelijakokaappien soveltamisen on täytettävä seuraavat reunaehdot:

- Jakokaapissa on oltava liityntämahdollisuus tilapäiskaapelille, joka kytketään normaalisti käytetyn kaapelin rinnalle sen mahdollisen viankorjauksen ajaksi. Kosketussuojauksen vaatimusten täyttämiseksi on kaapin rungossa oltava valmiiksi tehtynä ”kissanluukku” tilapäiskaapelin sisään vientiä varten.
- Kaapelit on voitava helposti irrottaa vianpaikannuksen yhteydessä kaapelitutkan kiinnittämistä ajatellen, sekä kunnonvalvontamittauksia varten.

Kokemusten mukaan PEX-eristeiset kaapelit ovat hyvin käyttövarmoja ja luotettavia. Kaapeliyhteyden heikko kohta on jatkoksissa ja päätteissä. Jos kaapeli vaurioituu, on korjaus tavallisesti tehtävä kahdella jatkoksella, koska ylimääräistä kaapelipituutta ei ole. Kaapelijakokaappien käyttö kannattaisi suunnitella sellaiseksi, että maaperässä tehtävien jatkosten lukumäärä muodostuisi pieneksi.

Kolmas keskeinen rakennusosa on jakelumuuntamo. Yksinkertaisimmillaan muuntamo koostuu jakelumuuntajasta ja pienjännitekeskuksesta. Muuntamolle on kuitenkin varauduttava liittämään seuraavat varusteet:

- Maasulkuvirran hajautettu kompensointikela. Kaapelipituuden kasvaessa suureksi, on maasulkuvirran kompensointi tehtävä osittain hajautetusti. Kela on voitava liittää keskijänniteverkon vaiheisiin. Toisaalta muutama valmistaja tarjoaa myös integroituja muuntajia, joissa maasulun kompensointikela on rakennettu muuntajan kanssa yhdeksi

kokonaisuudeksi. Kompensointikeloja tarvitaan todennäköisimmin korkeintaan yksi per johtohara ja kela voi sijaita periaatteessa millä muuntamolla tahansa.

- Ylijännitesuojat. Jos muuntamo on kaapelihaaran lopussa, on sille tavallisesti syytä asentaa ylijännitesuojat, jotka täydentävät johtohaaran alussa toteutettua suojausta. Tämä siksi että vaikka johdon alkupää suojaus toimiikin, pääsee kaapelille ylijänniteaalto joka vastaa suojaustasoa. Saapuessaan kaapelin loppupäähän aalto heijastuu ja kaksinkertaistuu.
- Hyvin laajojen kaapeliverkkojen tapauksessa muuntamoille saattaa olla tarpeen sijoittaa myös kapasitiivisen loistehon kompensointikuristimia pienentämään kaapelin kapasitiivisen virran siirrosta aiheutuvia häviöitä.

Edellä esitettyjen laitteistojen lisäksi kuuluvat konseptiin menetelmät kaapelin vikapaikantamiseksi sekä kunnonhallinnaksi sekä suositukset maaperän luokittelemiseksi asennustapojen ja kustannusten arvioimiseksi sekä reittisuunnittelun tarpeisiin.



Kuva 2b. Finnkumun maaseutumuuntamo.

HAJA-ALUEIDEN KAAPELOINTI RUOTSISSA

Projektin yhteydessä osallistuttiin R4:n tutustumismatkalle Ruotsiin, jossa kohteet olivat Vattenfall ja Björklinge Energi [1].

Vattenfall-Ruotsi

Paljaita avojohtoja ei enää rakenneta ollenkaan. Tavoitteena olisi korvata olemassa olevat 7-vuoden aikana. Keinoja, jolla sähkönjakelu pyritään suojaamaan ovat:

- Eristetty ilmajohto
- Ilmakaapeli
- Leveät johtokadut
- Maakaapelit

Vattenfall käyttää suunnitteluohjelmaa, joka vertailee eri vaihtoehtojen elinkaarikustannuksia kullekin projektille. Seikkoja, jotka vaikuttavat tehtäessä päätöksiä eri vaihtoehtojen välillä ovat:

- Asiakkaiden lkm
- Käyttö (Energia)
- Ilmastolliset seikat ja metsäisyys, metsän laatu

Eri johtorakenteiden suosituimmuusjärjestys on seuraava:

1. Maakaapeli
2. Riippukaapeli (Hängkabel)
3. Belagad Lina (BLL)

Tyypillinen ratkaisu on sellainen, jossa pelloille ja muihin helposti kaivettaviin kohtiin asennetaan maakaapeli ja esimerkiksi kivikkoiset metsäosuudet hoidetaan riippukaapelilla tai eristetyllä avojohdolla (BLL-johto). Yleensä kaapelit joudutaan sijoittamaan tien ulkopuolelle. Maakaapeloinnissa suositeltavin työmenetelmä on ketjukaivu. Mikäli kaapeli aurataan, tehdään ensin esiauraus. Kaikki uudet rakenteet pyritään tekemään jännitetyökelpoisiksi. Ilmakaapeleiden tapauksessa on kokeiltu myös murtolenkkejä.

Ilmajohtojen tapauksessa on kokeiltu teräspylväitä. Niiden etuna on paitsi se että vältetään kreosootin haitat, pylväiden tasainen laatu, vähäisempi huollontarve ja pitkä ikä (100 v.). Johdon ylijännitesuojaus on hoidettu joka toiselle orrelle asennetuilla kipinäväleillä.



Kuva 3. Vattenfallin teräspylväinen BLL-johto Ruotsissa.

Björklinge Energi

Björklinge Energissä pääkohde oli kaapelin asentaminen ketjukaivurilla. BE ostaa konepalvelut, mutta omat asentajat tekevät työt. Jakeluverkon pirissä ei juuri ole teollisuutta, vaan pieniä talouksia. Jakelu on enimmäkseen 10 kV. Maakaapelin etuna on pienempi haitta maanomistajalle. Aurauksen haittana on epävarmuus kivistä ja muista, joita ei nähdä. Tämän takia ketjukaivu on yleisin menetelmä. Auraamisesta ei pidetä. Kaapelin asennuksen yhteydessä asennetaan myös erillinen kuparijohdin, joka parantaa suojausta esimerkiksi ukkosta vastaan. Se, että sijoitetaanko tielle vai tien ulkopuolelle, riippuu maanomistajista. Tielle sijoitettaessa joudutaan maksamaan korvauksia.

Maasulkuvirtojen kompensointi on vielä hieman arvoitus. Todennäköisesti tullaan käyttämään sekä hajautettua, että keskitettyä kompensointia. Keskitetty kompensointi täytyy tulevaisuudessa olla automaattisesti säädetty (nykyään Ruotsissa kompensointi on tavallisesti kiinteä). Erityinen ongelma ovat maakaapelin päässä oleva avojohto-osuudet, jotka aiheuttavat maasulkuräpsyjä koko lähdölle.

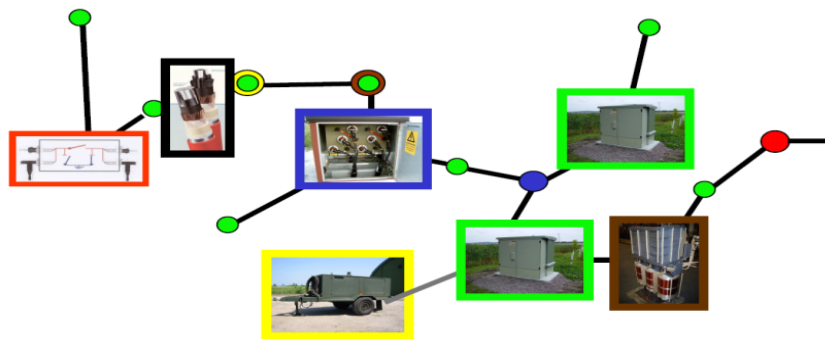
Börklingessä käytiin tutustumassa ketjukaivulla suoritettavaan maakaapelin asennukseen. Työmaana oli pelto, joka oli savimaata. Työ eteni niin kauan hyvin, kunnes vastaan tulivat ensimmäiset noin pään kokoiset kivet, jotka jo hidastivat työtä huomattavasti. Ketjukaivua käytettäessä tulisi varmistua maaperän laadusta esimerkiksi tutkaamalla, jotta isot kivet tai lähellä pintaa oleva peruskallio ei aiheuttaisi yllätyksiä.



Kuva 4. Kaapelin asennuskaivannon tekoa ketjukaivurilla.

Staffanstorp Energin järjestelmäratkaisu [2,3]:

Staffanstorp energia on kehittänyt maakaapelien käyttöön perustuvan kokonaiskonseptin, joka on esitetty kuvassa 5. Konseptin keskeiset osat ovat muuntamo, joka koostuu pienestä eristetyistä keskijänniterotinkojeistosta, pienjännitelähdöistä ja muuntajasta sekä haaroitusmoduli. Tarvittaessa maasulkuvirran kompensointia, käytetään muuntajaa jossa kompensointikela on integroituna. Satelliittihaarojen energiansyöttö vikatilanteiden aikana hoidetaan varavoimakoneen avulla.



Kuva 5. Staffanstorp Energin konsepti maaseutukaapeliverkoksi (Verkkovisio-projekti).

Konseptissa käytetään aurattavaa maakaapelia ja vaihtoehtoisesti riippukaapelia kuumasinkityillä teräspylväillä. Nykyinen haaroitusmoduuli on öljytäytteinen, pistokeliitännällä 250 A tai ruuviliitännällä 630 A. Avausvälikä varustettu typpitäytteinen erotus/haaroitusmoduuli on kehitteillä.

KEVYTKAAPELIJÄRJESTELMÄN TEKNISET KYSYMYKSET

Seuraavassa käsitellään keveisiin kaapelien poikkipintoihin ja niillä toteutettuihin laajoihin kaapeliverkkoihin tai pitkiin kaapeliyhteyksiin liittyviä teknisiä kysymyksiä. Esitys on yhteenveto tärkeimmistä teknisistä seikoista. Tarkempi analyysi on esitetty vastaavissa Kapeli-hankkeen osaraporteissa.

- Kuormitettavuuteen vaikuttavat seikat (Kapeli-raportti nro 4)
- Maasulkuvirtojen kasvu ja maadoitukset (Kapeli-raportti nro 7)
- Kaapelin kapasitiivisten varausvirtojen vaikutus (Kapeli-raportti nro 8 ja nro 13)
- Kaapelin vaikutus maasulkuvirtojen sammumiseen (Kapeli-raportti nro 17)
- Kaapeliverkkojen ylijännitesuojaus (Kapeli-raportti nro 22 ja nro 24)

Kaapeliyhteyden kuormitettavuus [4]

Kaapeliyhteyden kuormitettavuus määräytyy periaatteessa kolmesta eri osatekijästä: Terminen kuormitettavuus, jännitteen alenema ja sulakkeen riittävän nopea toiminta. Lyhyillä etäisyyksillä, kahdesta kolmeen kilometriin, kuormitettavuuden määrää kaapeli terminen kestoisuus. Terminen kuormitettavuus tyyppiolosuhteissa (maaperän terminen resistiivisyys 1,0 tai 1,5 Km/W tai ilma-asennus) on esitetty taulukossa 1a ja 1b. Taulukoissa on esitetty kaapelin alumiinikaapelin poikkipinnat alaspäin aina 10 mm² saakka. Käytännössä pienin poikkipinta, jota kannattaa alumiinista valmistaa on kuitenkin 25 mm². Pienemmillä poikkipinnoilla ongelmaksi tulee johtimen mekaaninen kestoisuus sekä pienen ulkosäteen aiheuttama sähkökentän kasvu johtimen pinnalla, mikä vaatii eristepaksuuden suurentamista. Jo 25 mm² kaapeli pystyy maa-asennuksessa syöttämään 3-4 MVA:n tehon ja ilma-asennuksessa jopa 5 MVA. Terminen kuormitettavuus tuskin tulee rajoitteeksi haja-alueiden haarajohtojen tapauksessa.

Muutamaa kilometriä pidemmällä yhteyksillä rajoittavaksi tekijäksi tulee jännitteen alenema. Kuvien 6a ja 6b kaareva osa vastaa tätä tekijää. Kuvat on laskettu 5% jännitteen alenemalla, olettaen täysin resistiivinen kuorma. Sähkölämmityksen ollessa tehohuipulle määräävä tekijä, on kyseinen oletus hyväksyttävä. Pienemmillä tehokertoimille kuin 1, antavat kuvat 6a ja 6b konservatiivisen arvion. 25 mm² kaapelilla voidaan siirtää jännitteen aleneman puolesta 2 MVA noin 7 km päähän.

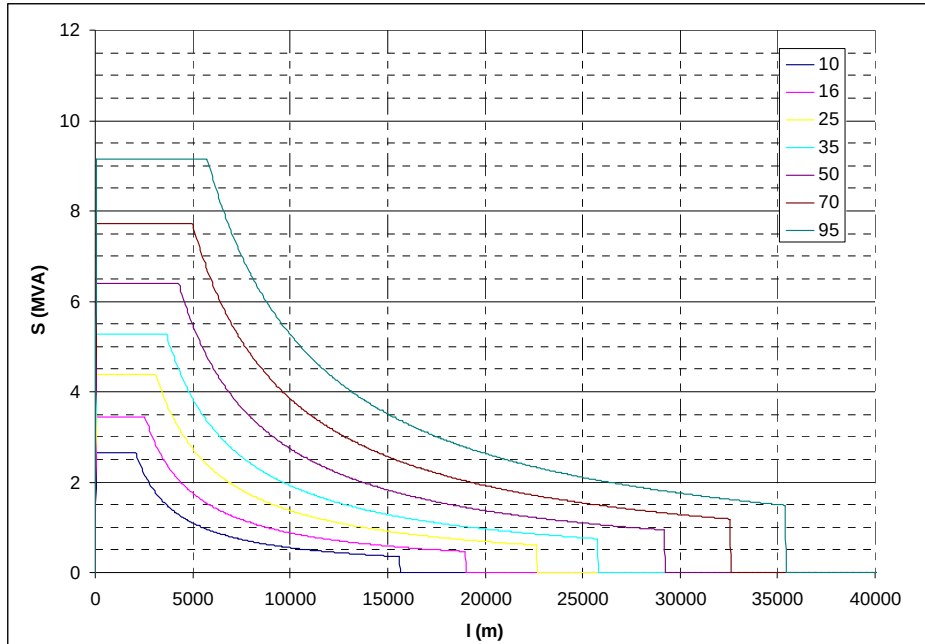
Maksimisiirtoetäisyyden määrää suojauksen toiminta. Alla olevissa kuvissa on lähdetty siitä, että suojaus on toteutettu sulakkein ja riittävä virta sulakkeen toiminnan varmistamiseksi olisi 2,5-kertainen nimellisvirta. Suojauksen puolesta ovat 20-30 km siirtoetäisyydet mahdollisia. Sulakesuojauksen tarve riippuu verkon oikosulkutehosta kaapelihaaran liittymäpisteessä. 25 mm² Al-kaapelin 1 sekunnin oikosulkukestoisuus on noin 2,3 kA. Sulaketta ei siis välttämättä tarvita kuin aivan lähellä sähköasemaa.

Taulukko 1a. Yhteenveto teknisistä rajoituksista, maa-asennus.

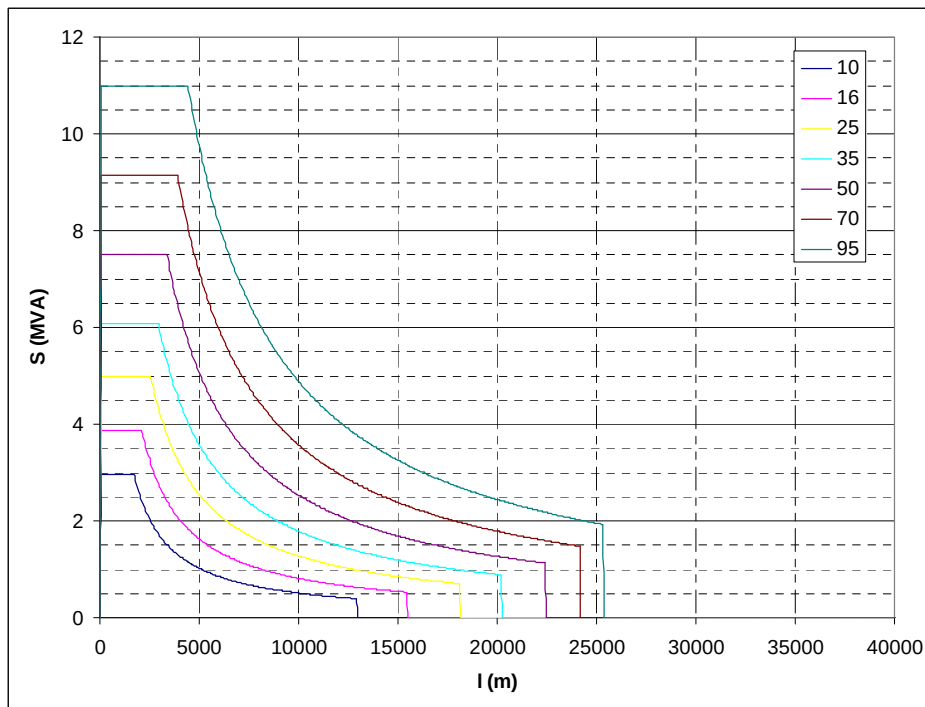
	Terminen kuormitettavuus				Sulakkeen riittävän nopea palaminen		1 s oikosulku-kestoisuus
	$\rho=1,0$		$\rho=1,5$		$2,5 \cdot I_{\max}$	$5,0 \cdot I_{\max}$	
A_c mm^2	I A	S MVA	I A	S MVA	I m	I m	I kA
10	77	2,65	55	1,92	15626	7299	0,94
16	99	3,43	70	2,44	18990	8621	1,50
25	126	4,38	88	3,06	22684	9878	2,35
35	152	5,26	105	3,63	25765	10698	3,29
50	185	6,41	126	4,36	29236	11237	4,70
70	223	7,72	149	5,18	32568	11095	6,60
95	264	9,14	175	6,06	35435	9915	8,90

Taulukko 1b. Yhteenveto teknisistä rajoituksista, ilma-asennus.

	Terminen kuormitettavuus		Sulakkeen riittävän nopea palaminen	
			$2,5 \cdot I_{\max}$	$5,0 \cdot I_{\max}$
A_c mm^2	I A	S MVA	I m	I m
10	85	2,96	12917	5969
16	112	3,87	15467	6895
25	144	5,00	18139	7647
35	176	6,08	20239	7970
50	216	7,50	22411	7815
70	264	9,15	24199	6751
95	317	10,99	25311	4265



Kuva 6a. Teho etäisyyden funktiona, 20 kV. $\rho = 1,0 \text{ Km/W}$, jännitteenalenema 5 %, maa-asennus, max 65 °C, sulakkeen nopean palamisen ehtona 2,5-kertainen terminen maksimivirta.



Kuva 6b. Teho etäisyyden funktiona, 20 kV. $\rho = 1,0 \text{ Km/W}$, jännitteenalenema 5 %, ilma-asennus, max 90 °C, sulakkeen nopean palamisen ehtona 2,5-kertainen terminen maksimivirta.

Maasulkuvirtojen kasvu ja maadoitukset

Kaapeloinnin vaikutuksesta maaseutuverkkojen maasulkuvirrat kasvavat, mutta toisaalta kaapelien maadoitetut vaipat ja kaapelikaivantoon mahdollisesti asennettavat maadoitusköydet mahdollistavat maadoitusten ketjuttamisen, jolloin maadoitusresistanssit pienenevät olennaisesti. Maasulkuvirran lisäys on esimerkiksi 25 mm² kaapelilla 1,9 A/km ja 50 mm² kaapelilla 2 A/km, kun taas 20 kV avojohtoverkoissa maasulkuvirtaa kehittyy noin 0,07 A/km.

Maasulkuvirran kulkiessa maadoitusresistanssissa syntyy maadoitusjännite, joka voi aiheuttaa ihmisille ja eläimille vaarallisen kosketusjännitteen. Kosketusjännitteen suurimmat sallitut arvot riippuvat jännitteen vaikutusajasta. Tähän voidaan vaikuttaa muun muassa suojauksen asetteluilla. Voimassa olevan standardin [5] mukaan esimerkiksi jatkuvan kosketusjännitteen maksimiarvo on 75 V ja suojauksen toimiessa alle 0,4 sekunnissa 290 V.

Suurin sallittu kosketusjännite määrää suurimman sallitun seuraavasti maadoitusjännitteen:

$$U_m \leq k \cdot U_{TP} \quad (1)$$

Missä U_m on maadoitusjännite, U_{TP} on kosketusjännite ja k on kerroin, joka normaalitilanteessa haja-asutusalueella saa arvon 2. Näin ollen, mikäli verkon osaa halutaan käyttää maasulun aikana, on maadoitusjännitteelle voimassa ehto:

$$U_m(\infty) \leq k \cdot U_{TP} = 2 \cdot 75V = 150V \quad (2)$$

ja 0,4 sekunnissa laukaisevan suojauksen tapauksessa:

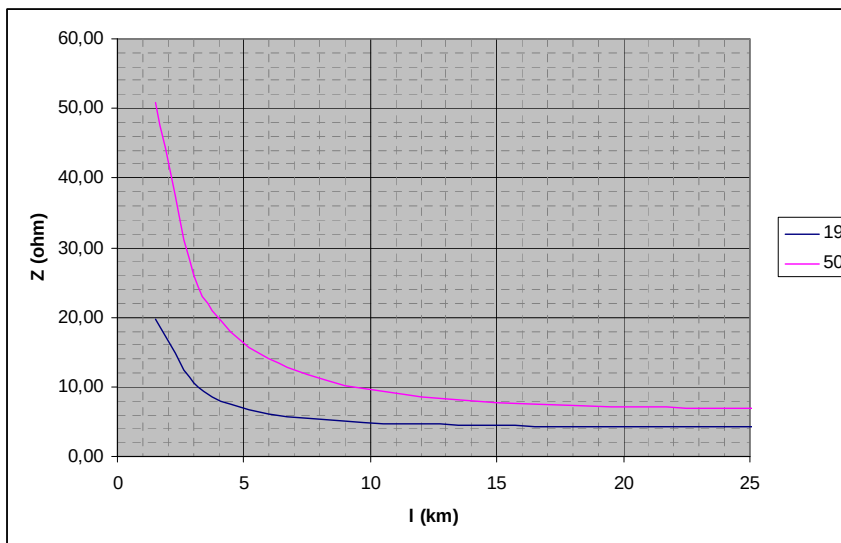
$$U_m(0,4s) \leq k \cdot U_{TP} = 2 \cdot 290V = 580V. \quad (3)$$

Kun maasulkuvirta kulkee maadoitetun osan kautta, voidaan syntyvän maadoitusjännitteen suuruus laskea yhtälöllä

$$U_m = R_m I_e, \quad (4)$$

Tarkastellaan seuraavaksi maadoitusresistanssia R_m sellaiselle maadoitusketjulle, jossa jakelumuuntamot on yhdistetty toisiinsa kosketussuojana toimivan johtimen välityksellä. Muuntamot on maadoitettu tyypillisten maadoitusresistanssien kautta, jotka hyvissä maadoitusoloissa ovat 19 Ω ja hankalissa 50 Ω (Kainuun tapaus). Oletetaan, että tyypillinen muuntamoväli on noin 1,5 km ja kosketussuojan / maadoitusjohtimen resistanssi on 0,524 Ω /km (35 mm² Cu). Näin ollen muuntamoiden välinen

resistanssi on $0,786 \Omega$. Vastaava maadoitusimpedanssi muuntamoketjun pituuden funktiona on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Maadoitusketjun impedanssi johtopituuden funktiona. Ketjun muodostavat jakelumuntamoiden maadoitukset, jotka ovat yhdistetty toisiinsa kaapelin kosketussuojalla ($35 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$). Muuntamoiden väliseksi etäisyydeksi on oletettu 1,5 km.

Taulukko 2. Suurimman sallitun maadoitusjännitteen (150 V ja 580 V) sallimat suurimmat johtopituudet eri poikkipintaisille kaapeleille eri maadoitusolosuhteissa. Verkkoa ei ole kompensoitu tähtipisteestä.

A_c mm^2	$U_m(t = \infty) = 150V$		$U_m(t = 0,4S) = 580V$	
	$I (R_m=19\Omega)$ km	$I (R_m=50\Omega)$ km	$I (R_m=19\Omega)$ km	$I (R_m=50\Omega)$ km
10	19,50	6,00	76,50	49,50
16	19,50	6,00	75,00	48,00
25	18,00	4,50	72,00	46,50
35	18,00	3,00	70,50	45,00
50	16,50	-	67,50	43,50
70	16,50	-	63,00	40,50
95	15,00	-	60,00	37,50
120	13,50	-	55,50	36,00
150	12,00	-	52,50	33,00
185	12,00	-	48,00	30,00
240	9,00	-	43,50	27,00
300	7,50	-	39,00	24,00

Nyt voidaan laskea pisin kokonaismatka edellä olevan yhtälön mukaan, kun pelkän muuntamon maadoitusresistanssin sijaan maasulkuvirran kulkutienä oletetaan olevan edellä laskettu vaihtelevan mittainen maadoitusketju. Tulokset on esitetty Taulukossa 2.

Tulosten perusteella voidaan havaita, että kaapelin vaihejohtimien rinnalle asennettava maadoitusjohdin parantaa olennaisesti maadoitusta. Maadoitusjohdin muodostaa pylväismaadoitusten kanssa maadoitusketjun, jonka seurauksena maadoitusresistanssi alenee.

Sekaverkoissa ongelmaksi muodostuvat avojohtojen yksittäismaadoitukset, minkä takia kaapelin aiheuttama maasulkuvirran lisäys on kompensoitava. Ratkaisuna voisi toimia myös galvaaninen erotus kaapelin ja avojohdon rajalla. Jos verkko rakennettaisiin koko galvaanisesti yhteen kytketyn osan osalta kaapeloituna, voitaisiin kosketusjännitteiden kannalta laukaisevan suojauksen tapauksessa rakentaa jopa 50 – 70 km verkkoa ilman maasulun kompensointia.

Uutta kaapeliverkkoa rakennettaessa päästään hyviin maadoituksiin helposti ketjuttamalla maadoitukset. Ongelmana on kuitenkin sekaverkon ilmajohto-osa, joka lopulta määrää suojauksen laukaisuajan, ja jonka maadoitusten parantamista kustannustehokkaampi vaihtoehto on kompensoinnin lisääminen, kun kaapelointi lisääntyy. Kun verkko koostuu pelkästään kaapeleista saadaan maadoitusten ketjuttamisella maadoitusimpedanssit helposti niin pieniksi että verkkoa voitaisiin jopa käyttää maasulussa

Kaapeliyhteyden kapasitiivisten varausvirtojen vaikutus kuormitettavuuteen ja häviöihin

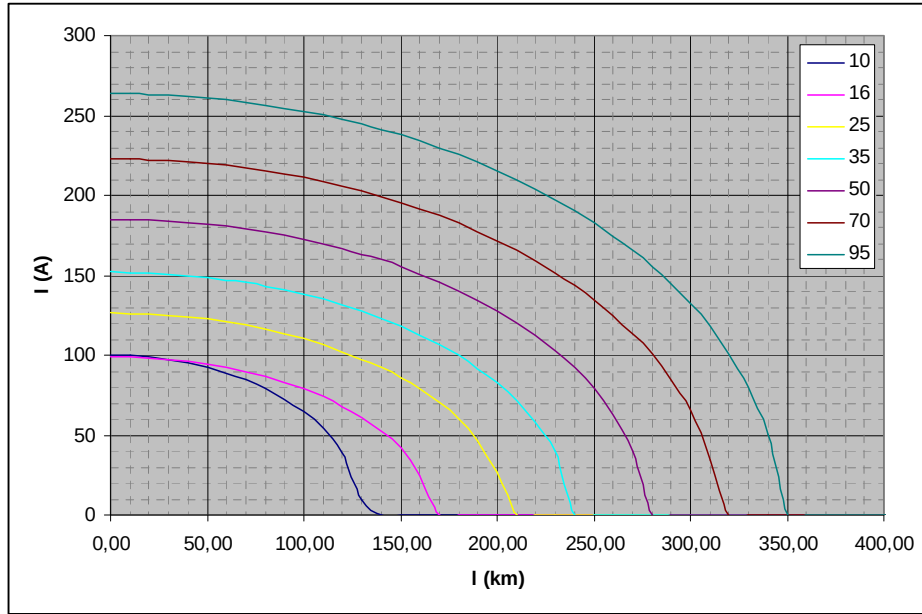
Laajoissa kaapeliverkoissa ongelmaksi saattaa muodostua vaihtovirtakaapelin kapasitanssien varausvirta, joka aiheuttaa ylimääräisiä häviöitä ja heikentää kaapelin tehollista kuormitettavuutta. Kaapelin häviöt vaihetta kohti voidaan laskea seuraavasti:

$$P_h = RI^2 = R(I_p^2 + I_q^2), \quad (5)$$

Missä I_p on pätövirta ja I_q on loisvirta, joka on johtopituuden funktio. Yhtälöstä nähdään että pätö- ja loisvirran aiheuttamat häviöt ovat toisistaan riippumattomat, ja loisvirran kompensointi voidaan näin ollen optimoida pätötehokuormituksesta riippumattomana. Varausvirran vaikutus kuormitettavuuteen sen sijaan riippuu kokonaisvirrasta. Loisvirran vaikutus kaapelille sallittuun pätövirtaan saadaan:

$$\begin{aligned} I^2 &= I_p^2 + I_q(l)^2 \\ \Rightarrow I_p^2 &= I^2 - I_q(l)^2 \\ \Rightarrow I_p &= \sqrt{I^2 - I_q(l)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Varausvirran vaikutus eri poikkipintaisten kaapelien kuormitettavuuteen kaapelin pituuden funktiona on esitetty kuvassa 5. Varausvirralla on käytännössä vaikutusta vain hyvin pitkillä kaapelilyhteyksillä.



Kuva 8. Varausvirran vaikutus kaapelin kuormitettavuuteen pituuden funktiona.

Suurempi merkitys on varausvirran aiheuttamilla lisähäviöillä. Tarkastellaan seuraavaksi hyötyjä, joita saadaan jos kapasitiivinen varausvirta kompensoidaan kuristimella. Jos kompensointikuristin sijoitetaan johdon keskelle, syntyvä häviöteho on

$$P_{h-1/2} = 2 \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot r \left(\frac{l}{2} \right) \cdot \left(\frac{I}{2} \right)^2 \right] = \frac{1}{12} \cdot r l \cdot I^2 = \frac{1}{4} P_h. \quad (7)$$

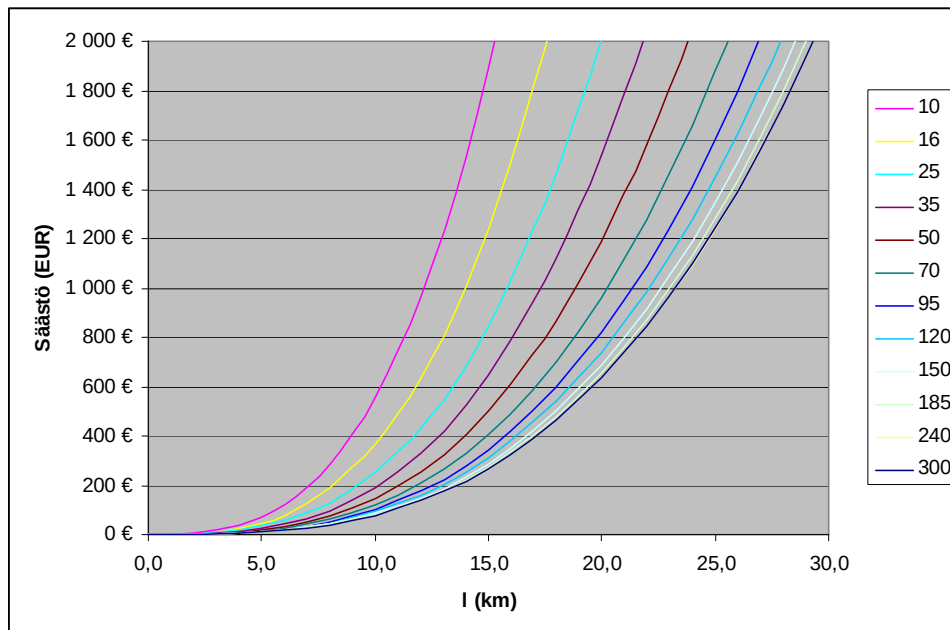
Kuristin säästää siis 75% kaapelissa tapahtuvista varausvirran aiheuttamista häviöistä. Optimimitoitus on kuitenkin sijoittaa 2/3 tehoinen kuristin 2/3-etäisyydelle kaapelin syöttösuunnasta. Tällöin syntyvä häviöteho on

$$P_{h-2/3} = 3 \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot r \left(\frac{l}{3} \right) \cdot \left(\frac{I}{3} \right)^2 \right] = \frac{1}{27} \cdot r l \cdot I^2 = \frac{1}{9} P_h. \quad (8)$$

Ja kuristin säästää 8/9, tai 89% varausvirran aiheuttamista häviöistä. Kompensointikuristimella saavutettava säästö laskettuna nykyarvona on esitetty taulukossa 3 ja kuvassa 9 (20 a, 5%, häviöiden hinta 5 snt/kWh). Kaapelin pituuden ollessa luokka kymmeniä kilometrejä on syytä harkita häviöiden kompensointia.

Taulukko 3. 2/3-matkan päähän johdon alusta sijoitetun kompensointikuristimen tuottama säästö koko investoinnin laskenta-ajalta johtopituuden l funktiona laskettuna eri johdinpoikkipinnoille.

l (km)	10	16	25	35	50	70
0,0	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
2,0	4 €	3 €	2 €	2 €	1 €	1 €
4,0	36 €	23 €	16 €	12 €	10 €	8 €
6,0	121 €	79 €	54 €	41 €	32 €	26 €
8,0	287 €	188 €	128 €	98 €	76 €	61 €
10,0	560 €	367 €	251 €	192 €	148 €	120 €
12,0	967 €	634 €	433 €	332 €	257 €	207 €
14,0	1 536 €	1 006 €	688 €	527 €	407 €	329 €
16,0	2 292 €	1 502 €	1 027 €	787 €	608 €	492 €
18,0	3 264 €	2 139 €	1 463 €	1 120 €	866 €	700 €
20,0	4 477 €	2 934 €	2 007 €	1 537 €	1 188 €	960 €
22,0	5 959 €	3 905 €	2 671 €	2 046 €	1 581 €	1 278 €
24,0	7 737 €	5 070 €	3 468 €	2 656 €	2 052 €	1 659 €
26,0	9 836 €	6 446 €	4 409 €	3 377 €	2 609 €	2 109 €
28,0	12 285 €	8 051 €	5 506 €	4 217 €	3 259 €	2 634 €
30,0	15 111 €	9 903 €	6 773 €	5 187 €	4 008 €	3 240 €



Kuva 9. 2/3-matkan päähän johdon alusta sijoitetun kompensointikuristimen tuottama säästö koko investoinnin laskenta-ajalta johtopituuden l funktiona laskettuna eri johdinpoikkipinnoille.

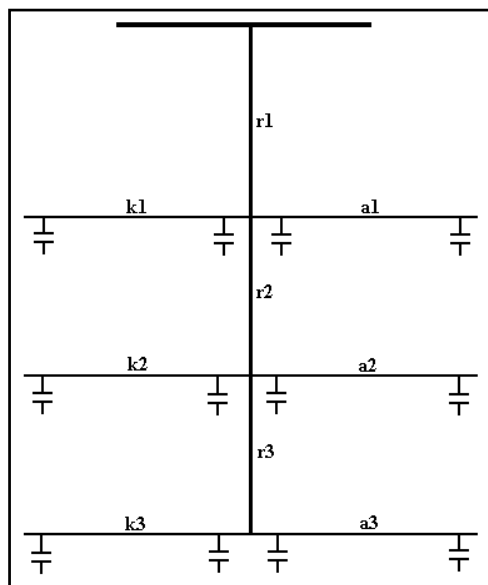
Kaapelin oman loistehon siirto rajoittaa kaapelin siirtokykyä merkittävästi vasta yli 100 km johdoilla. Kun kaapelin pituus alkaa olla 10-20 km on syytä harkita loistehon kompensointia häviöiden pienentämiseksi. Optimimitoitus kompensointiaste on 2/3 kaapelin loistehosta, sijoitettuna 2/3 päähän haaran alusta.

Kaapelinyhteyden kapasitiivisten varausvirtojen vaikutus jännitteensäätöön

Yksi laajamittaisen kaapeloinnin aiheuttama huolenaihe on kaapelin kapasitanssien jännitettä nostava vaikutus ja sen merkitys verkon jännitteensäädön kannalta.

Tarkastellaan aluksi verkkoa, jossa runkojohto on avojohtoa ja runkoon liittyvät haarat puolet avojohtoa ja puolet kaapelia. Kaapeliosuudet ovat AHXAMK-W 25 mm² -kaapelia. Avojohto-osuudet ovat Sparrow-tyyppisiä. Pääjännite on 20 kV.

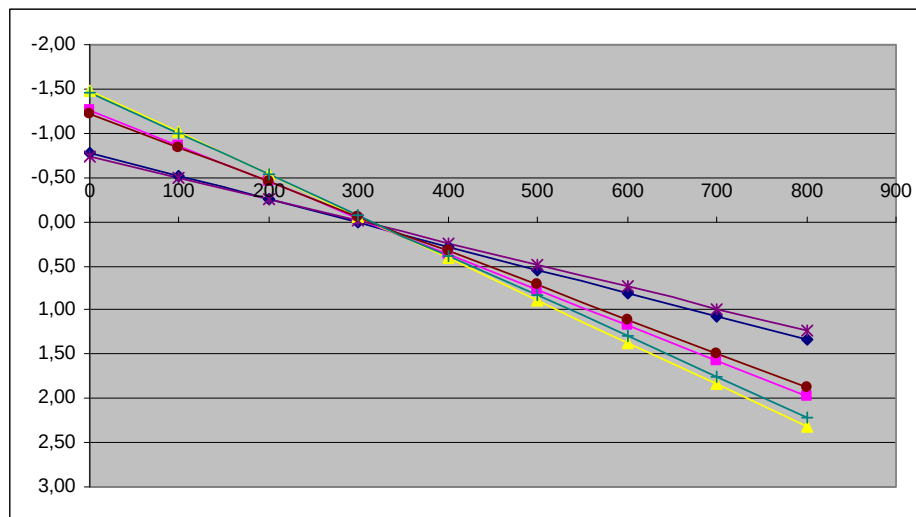
Tarkasteltavan verkon runkojohto on 30 km pitkä ja siihen liittyy yhteensä kuusi 10 km pituista haarajohtoa tasaisin välimatkoin (10 km välein). Verkon kokonaispituus on siis 90 km. Jännitteet haarajohtojen lopussa lasketaan eri kuormitusasteille.



Kuva 10. Tarkasteltava verkko. Puolet haaroista on kaapelia ja puolet avojohtoa. r = runko, a = avojohtohaara ja k = kaapelihaara. Kunkin johto-osan pituus on 10 km.

Taulukko 4. Kunkin johto-osan päässä oleva summautunut jännitteenalenema [%].

	P								
	[kVA]								
	0	100	200	300	400	500	600	700	800
	ΔU								
	[%]								
k1	-0,77	-0,51	-0,25	0,02	0,28	0,54	0,80	1,07	1,33
k2	-1,25	-0,85	-0,44	-0,04	0,36	0,77	1,17	1,57	1,98
k3	-1,48	-1,01	-0,53	-0,06	0,42	0,89	1,37	1,84	2,31
a1	-0,74	-0,50	-0,25	0,00	0,24	0,49	0,74	0,98	1,23
a2	-1,23	-0,84	-0,45	-0,06	0,33	0,72	1,10	1,49	1,88
a3	-1,45	-1,00	-0,54	-0,08	0,38	0,84	1,30	1,76	2,22

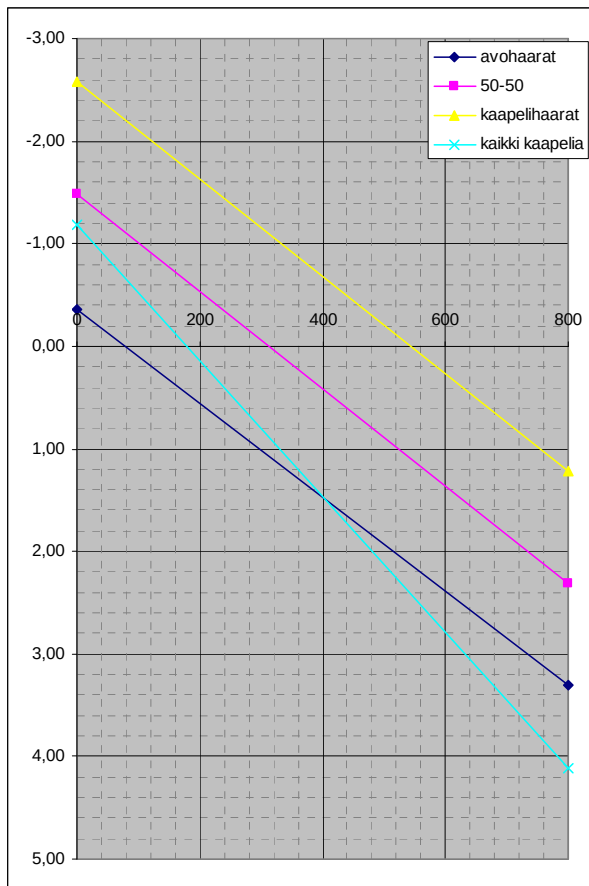


Kuva 11. Kuvan 10 sekaverkon haarojen jännitteen alenemat kuormituksen funktiona [%].

Tarkastellaan seuraavaksi kolme muuta tapausta, jotka ovat:

1. täysin avojohdosta rakennetut haarat,
2. täysin kaapelista rakennetut haarat sekä
3. tapaus, jossa sekä runko, että haarat ovat kaapelia.

Tulokset on esitetty kuvassa 12.

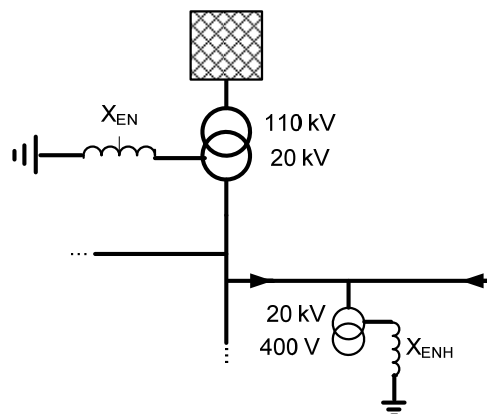


Kuva 12. Pienin ($P = 0 \text{ kW}$) ja suurin ($P = 800 \text{ kW}$) jännitteenalanema [%] haarojen päissä eri kuormitustilanteissa erityyppisille verkoille.

Kaapelien kapasitanssien tuottama loisteho kompensoi jännitteen alenemaa ja nostaa jännitettä pienen kuorman aikana. Loistehon tuotto on kuitenkin likimain vakio, minkä vuoksi se vaikuttaa kaikissa kuormitustilanteissa samalla tavalla, ja voidaan ottaa huomioon käämikytkimen asettelulla. Kaapelien tuottama loisteho ei siis ole jakeluverkon jännitteen säädön kannalta ongelma, kunhan se on otettu huomioon sähköaseman jännitteensäädön asettelussa. Sekaverkoissa jännitteensäätövara tuntuu olevan likimain yhtä suuri kuin ajojohtoverkoissa. Sen sijaan, jos verkko on rakennettu kokonaan kaapelista, tulee jännitteensäätövarassa eroja. Esimerkitapauksen ”kaikki kaapelia” – vaihtoehdossa verrattain suuri jännitteen alenema johtuu 25 mm^2 kaapelin isosta resistanssista.

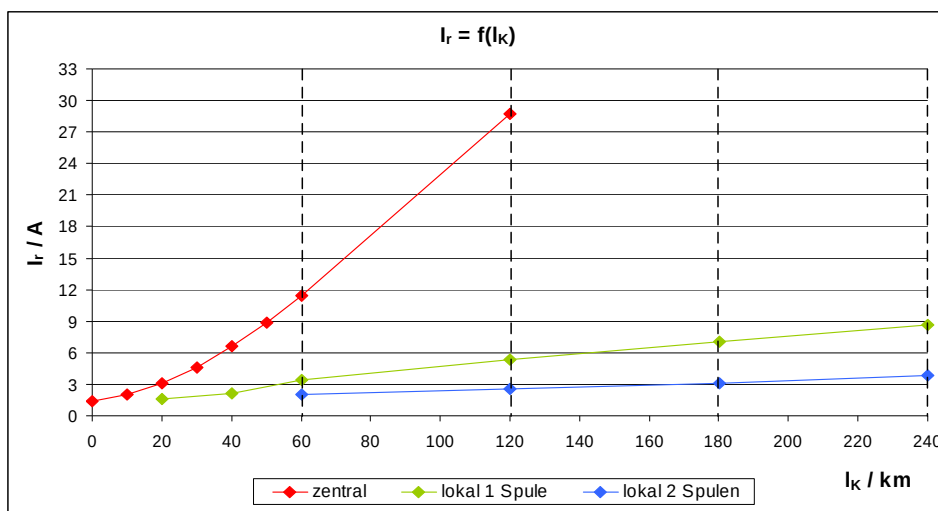
Kaapelien vaikutus maasulkuvirran sammumiseen

Niin Kapeli-järjestelmässä, kuin vastaavissa ruotsalaisissa verkkokaavailuissakin [6] on lähdetty siitä, että haja-alueiden jakeluverkkojen kaapelipituuden kasvaessa ei keskitetty kompensointi enää ole riittävää, vaan osa maasulkuvirrasta on kompensoitava hajautetulla ratkaisulla kaapelihaarojen yhteydessä.



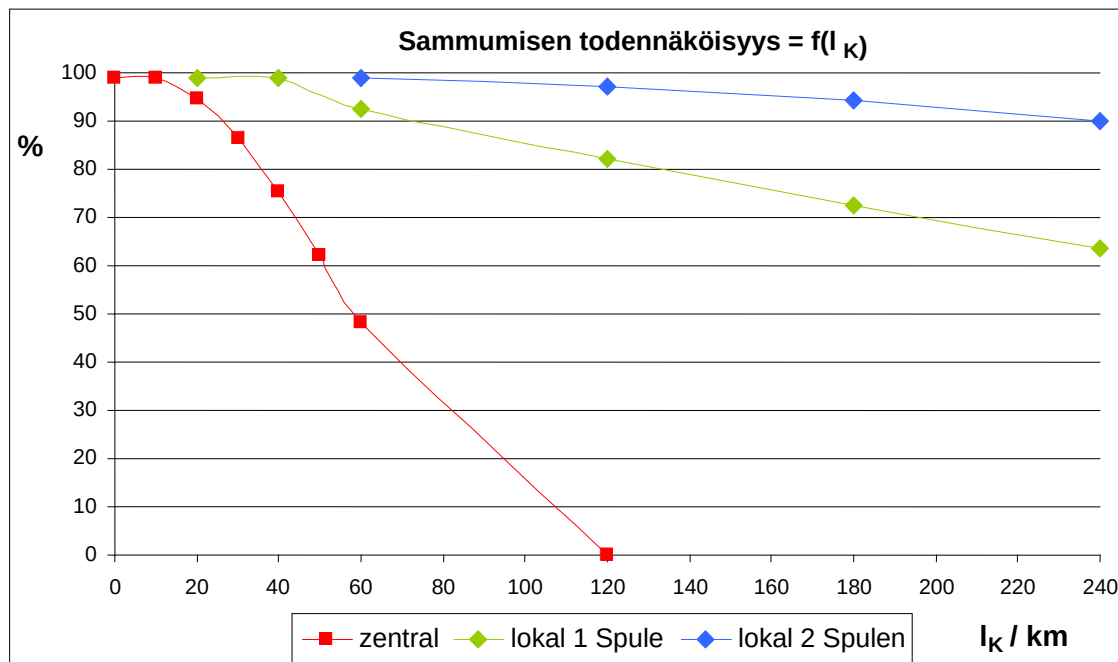
Kuva 13. Sekaverkon maasulkuvirran kompensointiratkaisu, jossa kaapelien vaikutus kompensoidaan hajautetuilla kuristimilla ja avojohtoverkon osuus keskitetyllä, automaattisesti säädetyllä kelalla.

Kaapelipituuden kasvaessa alkaa kaapelin pitkittäisimpedanssi vaikuttaa kompensoinnin onnistumiseen, mikä johtaa tietyn kaapelipituuden ylittyessä voimakkaaseen jäännösvirran kasvuun. Asiaa tutkittiin Kapeli-projektin yhteydessä tehdyin simuloinein (Kapeli-raportti nro 17), joiden keskeinen tulos on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Maasulun jäännösvirran suuruus kaapelien johtopituuden funktiona eri tapauksissa. Punainen: pelkästään keskitetty kompensointi. Vihreä: Yksi hajautettu kela. Sininen: 2 hajautettua kela.

Jos kompensointi perustuu ainoastaan keskitettyyn laitteistoon, alkaa jäännösvirta kasvaa merkittävästi kaapelipituuden kasvaessa kymmenien kilometrien luokkaan. Käytännön kannalta ratkaisevaa on kuitenkin miten suurentunut jäännösvirta vaikuttaa maasulun sammumiseen. Tätä asiaa tutkittiin analysoimalla E.ON Kainuun Sähköverkko Oy:n mittausdatasta sammumisen riippuvuus jäännösvirran suuruudesta. Yhdistämällä k.o. tiedot kuvaan 14, päädytään kuvassa 15 esitettyyn tulokseen.

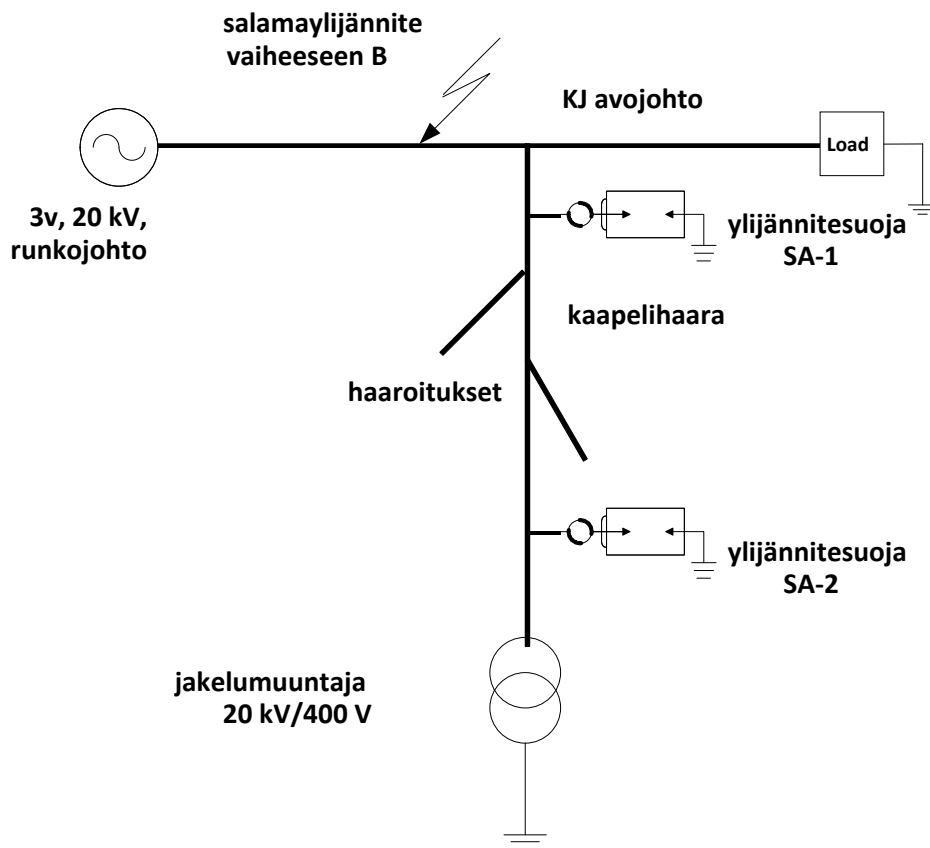


Kuva 15. Kaapelipituuden vaikutus maasulkuvian sammumistodennäköisyyteen Kainuun olosuhteissa eri kompensointitapauksissa. Punainen: pelkästään keskitetty kompensointi. Vihreä: Yksi hajautettu kela. Sininen: 2 hajautettua kela.

Tehtyjen tarkastelujen mukaan keskitetty kompensointi ei enää toimi kunnolla verkon kaapelipituuden kasvaessa. Esim. 40 km kaapelia pudottaa maasulun sammumistodennäköisyyden 75%:n ja 60 km vastaavasti puoleen. Ongelman ratkaiseminen vaatii hajautettua kompensointia joka sijoitetaan kaapeliosuuksien yhteyteen. Tämä johtaa n.s. "Haasen pönttöjen" paluuseen. Haasen pönttö on yksinkertainen hajautettu kompensointikela joka on tehty jakelumuuntajaa modifioimalla. Toinen vaihtoehto on käyttää keskeisissä paikoissa jakelumuuntajia, joissa maasulun kompensointi on integroitu muuntajan yhteyteen.

Kaapeliverkkojen ylijännitesuojaus

Kaapelin liittyessä avojohtoon se suojataan tavallisesti ilmastollisilta ylijännitteiltä asentamalla ylijännitesuojat kaapelipäätteiden rinnalle. Kaapelihaaran kannalta tutkittiin simulointien avulla, onko tällainen suojaus riittävä. Simuloitu verkko on esitetty kuvassa 16.

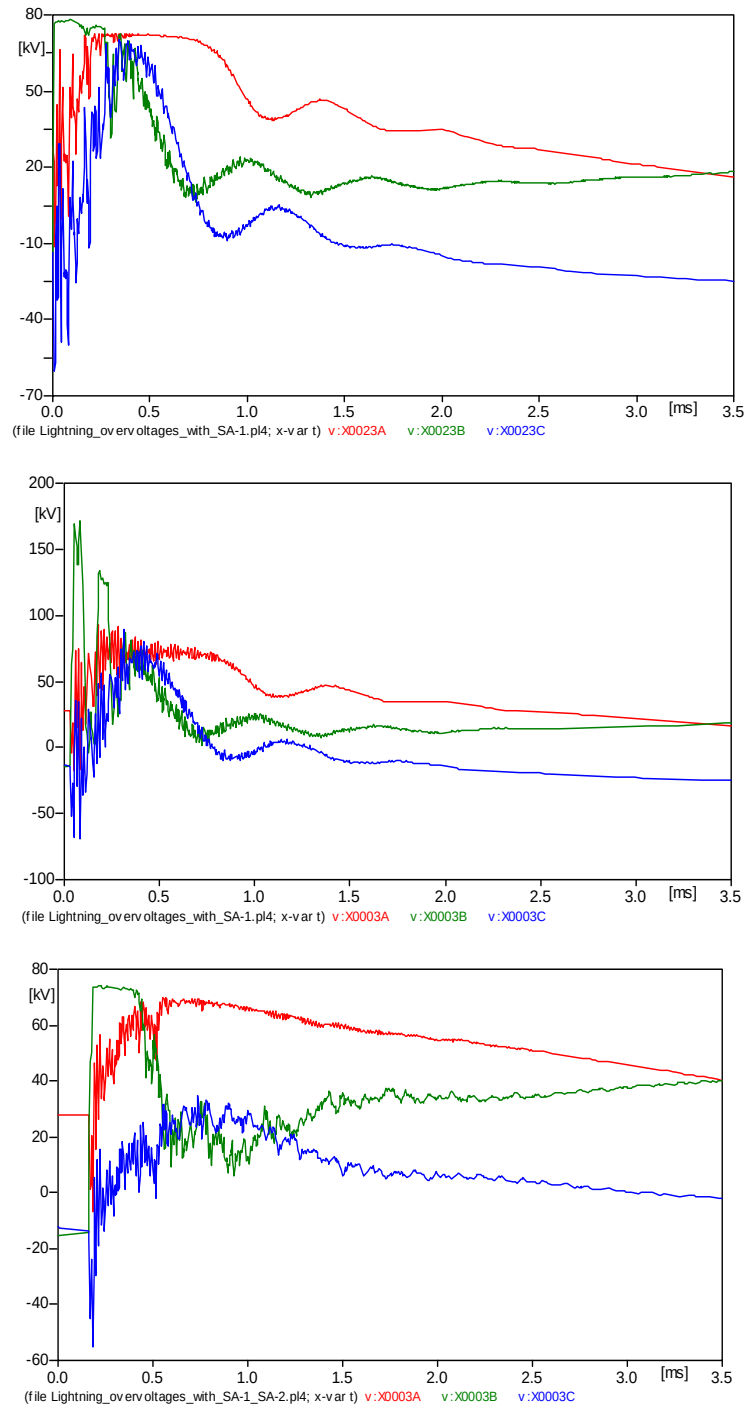


Kuva16. Ylijännitesimuloinneissa käytetty esimerkkiverkko.

Simulointien keskeiset tulokset on esitetty kuvassa 17. Kuva vastaa tapausta, jossa kaapelihaaran pituus on 6 km. Ylijännitesuoja rajoittaa kaapelille menevän ylijännitepulssin tässä tapauksessa noin 80 kV:n. Pulssi ei kuitenkaan juuri ehdi vaimentua ennen saapumistaan johdon päähän, jossa se heijastuu takaisin ja sen amplitudi kaksinkertaistuu. Heijastuminen johtaa pahimmassa tapauksessa siihen että ylijännite johdon päässä vastaa kaksinkertaista ylijännitesuojan suojaustasoa.

Ongelma voidaan helposti torjua asentamalla johdon loppupäähän toinen ylijännitesuoja (SA-2 Kuvassa 16). Näin joudutaan tavallisesti toimimaan, koska kaapeli vaimentaa ylijännitettä varsin hitaasti – kaapelipituuden on oltava yli 30 km ennen kuin toinen ylijännitesuoja SA-2 voidaan jättää pois.

Toinen mahdollinen ylijännitteen syntymekanismi on sulakkeen palaminen muualla kuin virran nollakohdassa. Myös tätä asiaa tutkittiin simuloinnein (Kaapeli-raportti nro 24). Jos kaapelihaara varustetaan ylijännitesuojin sen molemmissa päissä, myös sulakkeen palamisen mahdollisesti aiheuttamat ylijännitteet saadaan rajoitettua vaarattomalle tasolle.



Kuva 17. Esimerkkiverkolle simuloitua salamaylijännitteitä. Ylin kuva: Vaihejännitteet johdon alussa. Keskikuva: Vaihejännitteet johdon lopussa, kun ei ylijännitesuojaa SA-2. Alla: Vaihejännitteet johdon lopussa kun ylijännitesuoja SA-2. Kaapelin pituus 6 km.

KAPELOINNIN TALOUDELLISUUTEEN VAIKUTTAVISTA SEIKOISTA

Verkostosuunnittelussa laajemmin tavoitteena on ”*teknisesti kelvollinen taloudellinen ratkaisu.*” Toisin sanoen minimoidaan kokonaiskustannusta.

$$\min \{I + H + K + L\} , \text{ jossa} \quad (9)$$

I = investointikustannukset

H = häviökustannukset

K = käyttökustannukset

L = keskeytyshaitat.

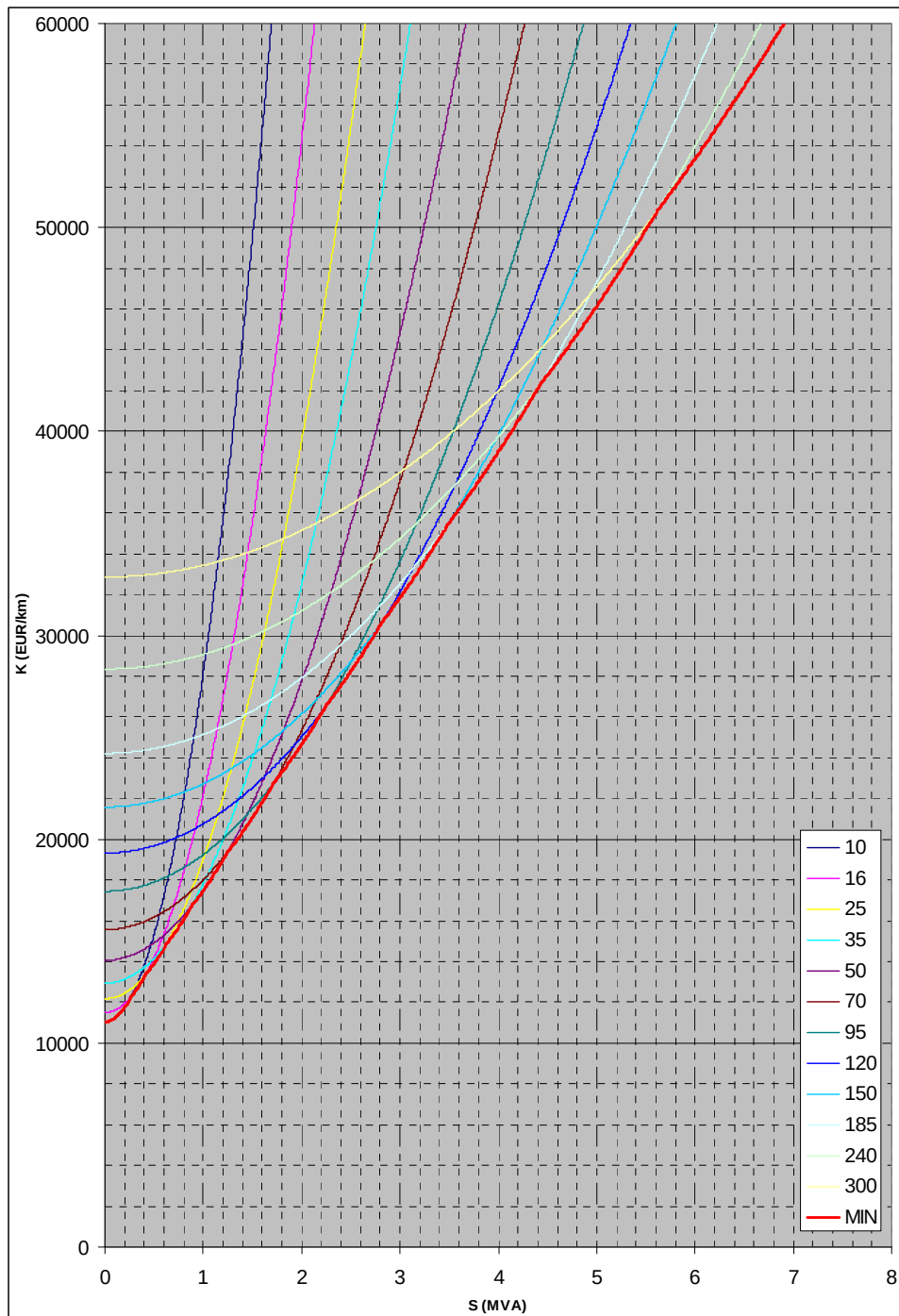
Suunnittelussa reunaehtoina toimivat kuormitettavuus, jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus ja sulakesuojausta käytettäessä sulakkeen riittävän nopea toiminta. Reunaehtojen puitteissa tulee ottaa huomioon normaalit käyttötilanteet sekä vika- ja muut varasyöttötilanteet.

Seuraavaksi tarkastellaan yksinkertaistetusti johtimen poikkipinnan valintaan vaikuttavia tekijöitä. Tarkastelun piiriin otetaan investointi- ja häviökustannukset. Tavoitteena on tutkia kaapelin poikkipinnan vaikutusta mitoituksen taloudellisuuteen, sekä sitä mikä taloudellisen mitoituksen marginaali teknisiin rajoituksiin.

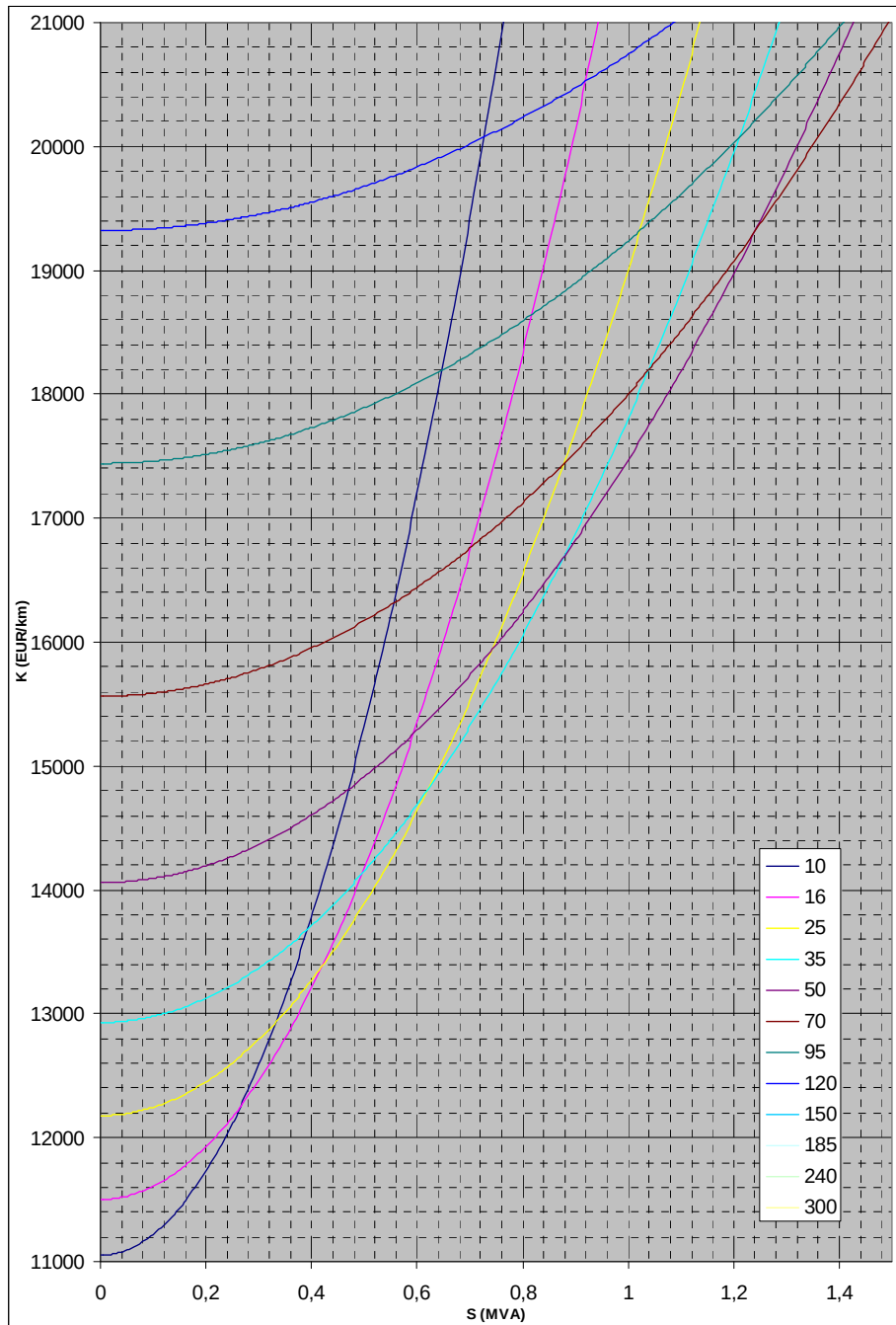
Tarkastellaan kaapeli-investointia, johon liittyy kertaluontoinen hankintameno ja vuosittain samansuuruisina toistuvat juoksevasti syntyvät menot. Tässä yhteydessä, koska tavoitteena on vain vertailla eri poikkipintoja, tarkastelussa huomioidaan hankintamenona vain kaapelin hinta. Muiden kertaluontoisten menojen (asennustyöt, maankäyttö ja niin edelleen) oletetaan olevan riittävällä tarkkuudella riippumattomia johtimen poikkipinnasta ja niin ollen yhtä suuria kaikille tarkasteltaville tapauksille. Juoksevista vuosittaisista menoista, niin ikään edellä mainituin huomioon, tarkastelun piiriin valitaan vain kussakin kaapelissa syntyvien ohmisten häviöiden aiheuttama kulu.

Tarkastellaan kaapeli-investointia nykyarvomenetelmän keinoin. Käytetään laskennassa korkokantaa 5 % ja määritetään investoinnin kestoajaksi 20 vuotta, häviöiden hintana käytetään 5 snt/kWh. Tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa ja taulukossa 5. Tulosten mukaan pienimmätkin poikkipinnat (10-16 mm² Al) riittäisivät varsin monen keskijänniteverkon haaran tapauksessa. Taloudellinen kuorma on tyypillisesti vain noin 1/10 termisestä maksimikuormasta. Jos kaapeliverkko mitoitetaan taloudellisimman poikkipinnan mukaan, on sillä tavallisesti erittäin suuri marginaali teknisiin reunaehtoihin.

Kaapelien käytön taloudellisuuteen vaikuttaa ratkaisevasti asennuskustannukset, jotka taas riippuvat maaperän laadusta. Asennustapoja ja –kustannuksia, sekä keveiden kaapeliverkkojen kokonaistaloudellisuutta on arvioitu tarkemmin Eero Saarijärven Kapeli-järjestelmän taloudellisuutta käsittelevässä raportissa (Kapeli-raportti nro 25).



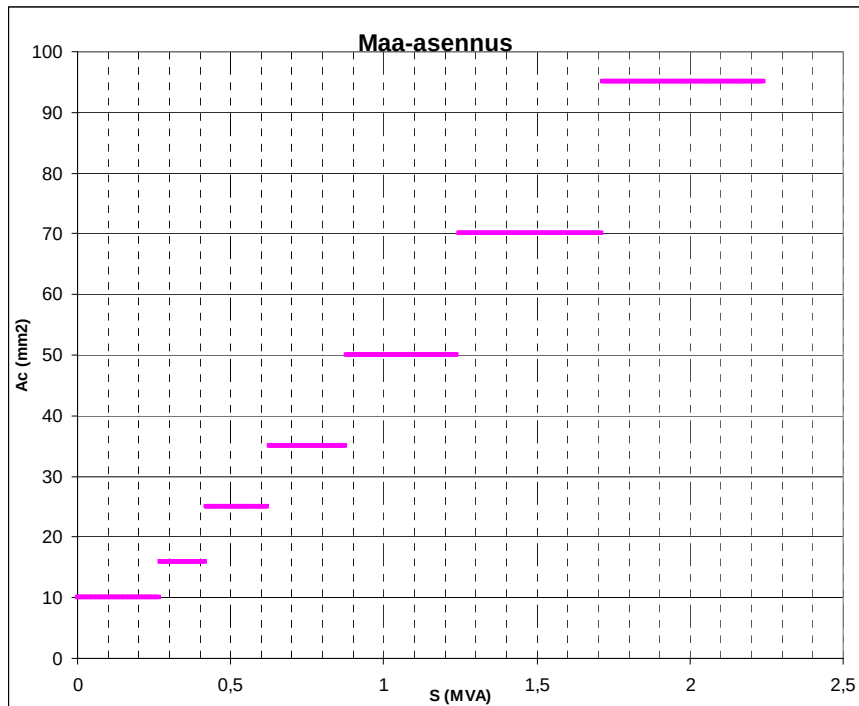
Kuva 18. Kaapeli-investoinnin kokonaiskustannusten nykyarvo eri poikkipinnoilla. Taloudellisin vaihtoehto korostettu punaisella värillä (Parero-käyrä) $r = r(65^{\circ}\text{C})$.



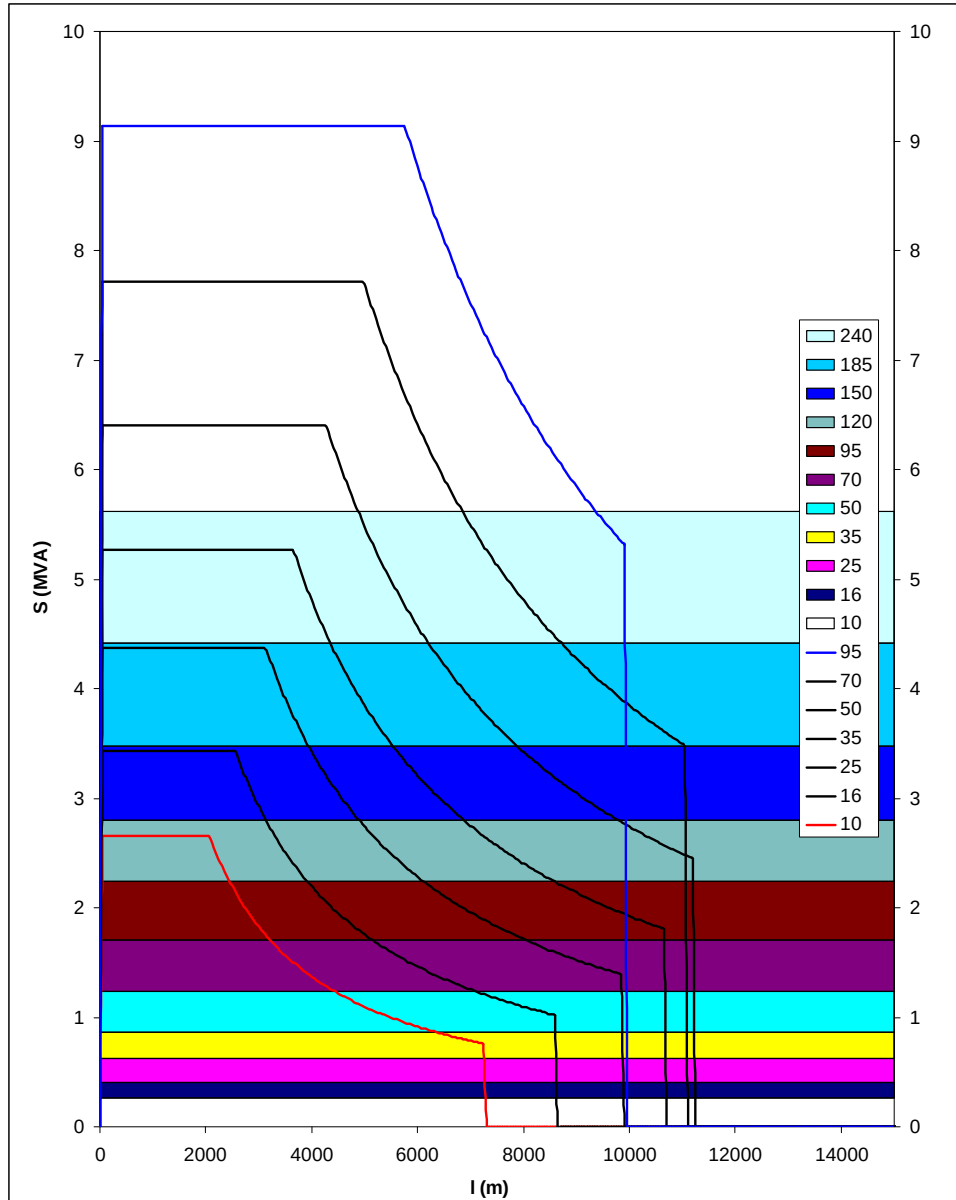
Kuva 19. Kaapeli-investoinnin kokonaiskustannusten nykyarvo. $r = r(65^{\circ}\text{C})$. Pienet poikkipinnat 10 – 70 mm².

Taulukko 5. Taloudellisimmat alueet eri poikkipinnoille.

A _c mm ²	S MVA		I A	
	Alaraja	Yläraja	Alaraja	Yläraja
10	0	0,27	0	7,65
16	0,27	0,42	7,65	11,98
25	0,42	0,62	11,98	17,90
35	0,62	0,88	17,90	25,26
50	0,88	1,24	25,26	35,80
70	1,24	1,71	35,80	49,36
95	1,71	2,24	49,36	64,66
120	2,24	2,81	64,66	81,26
150	2,81	3,49	81,26	100,89
185	3,49	4,42	100,89	127,59
240	4,42	5,63	127,59	162,52
300	5,63	-	162,52	-



Kuva 20. Edullisimmat poikkipinnat eri tehoille, pienet poikkipinnat 10 – 95 mm².



Kuva 21. Tekniset reunaehdot ja kaapelien taloudellisimmat tehoalueet yhdistettynä samaan kuvaajaan. Viivagraafeilla on ilmaistu suurin teknisesti mahdollinen siirrettävä teho etäisyyden funktiona. Taustaväreillä on ilmaistu tämän raportin mukaiset taloudellisin perustein valittavat toiminta-alueet kullekin johdinpoikkipinnalle. $\rho=1,0 \text{ Km/W}$, jännitteen alenema 5 %, maa-asennus, max 65 °C, sulakkeen nopean palamisen ehtona 5-kertainen terminen maksimivirta. Pienillä etäisyyksillä rajoittavana tekijänä toimii aluksi terminen kuormitettavuus ja tämän jälkeen jännitteen alenema (kuvaajan kaareva osa). Pisimmän mahdollisen johtopituuden määrää sulakkeen toiminta.

LUOTETTAVUUSKYSYMYKSET

Arvioitaessa kaapeloinnin avulla saatavaa hyötyä verkon luotettavuuden kehittämisessä avaintietona on eri johtoratkaisujen vikataajuus erilaisissa ympäristöolosuhteissa. Huomioon on otettava sekä lyhyet (pjk, ajk) että pitkät häiriökeskeytykset. Pysyvien vikojen aiheuttamat häiriökeskeytykset eri johtotyypeille on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Pysyvien vikojen aiheuttamat keskeytysmäärät kpl/100 km erityyppisissä verkoissa

VIKA	Avojohto	PAS-johto	Ilmakaapeli	Maakaapeli
Luonnonilmiöt yhteensä	3,39	0,24	0,07	0,10
Tekniset syyt yhteensä	0,54	0,04	0,11	0,33
Muut syyt yhteensä	0,84	0,04	0,02	0,38
Oman verkon vikakeskeytykset yht.	4,71	0,29	0,12	0,70

Taulukon luvut ovat suoraan lähteestä [9]. Huomio kiinnittyy erikoisesti PAS-johdon ja ilmakaapelin pieniin häiriökeskeytysten taajuuksiin. Jälleenkytkennöille ja vikakeskeytyksille eri verkkoympäristöissä esitetään tilastoissa taulukon 7 mukaiset arvot. Taulukossa verkot on luokiteltu uuden tavan mukaisesti maaseutuverkkoihin (kaapelointiaste alle 30%), taajamaverkkoihin ja city-verkkoihin (kaapelointi aste vähintään 75%). Jälleenkytkennät tapahtuvat pääasiassa avojohtoverkoissa ja jossain määrin myös PAS-johdoilla rakennetuissa verkoissa.

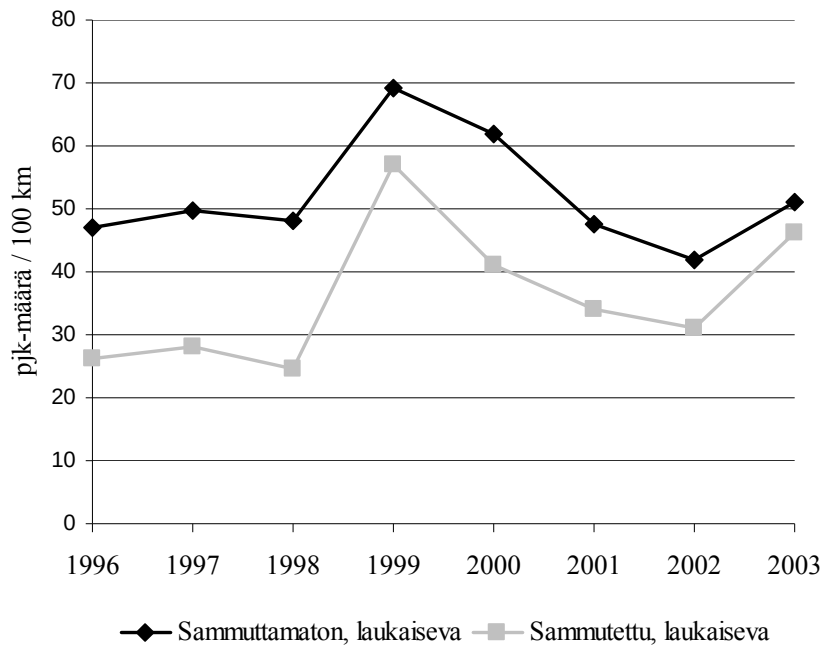
Taulukko 7. Vikakeskeytykset, AJK- ja PJK-määrät kpl/100 km eri verkkoympäristöissä

Keskeytyslaji	Maaseutuverkot	Taajamaverkot	City-verkot
Jakeluverkon vikakeskeytykset	6,90	6,31	3,82
AJK:t	7,66	4,53	0,56
PJK:t	22,96	14,57	1,08

Taulukko 8. Jälleenkytkennät eri tavoin maadoitetuissa verkoissa kpl/100 km

Jälleenkytkentälaji	Maasta erotettu	Sammutettu verkko	Osittain sammutettu
AJK	6,31	5,37	6,36
PJK	21,90	14,79	31,24

Jälleenkytkentämääriä eri tavoin maadoitetuissa verkoissa on puolestaan havainnollistettu taulukossa 8. Verrattuna maasta erotettuun verkkoon, on sammutetussa verkossa noin kolmanneksen vähemmän pjk:ta, sekä 15% vähemmän ajk:ta. Jälleenkytkentöjen aiheuttajista ei keskeytystilasto anna tarkempaa tietoa.



Kuva 22. Vuosittaiset pjk-määrien valtakunnalliset keskiarvot kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkoissa vuosina 1996 - 2003. (Luvut on koottu Senerin vikatilastoista 1996 - 2003). [9]

Tilastointitapa on muuttunut vuonna 2004. Ajatellen avojohtojen pjk-taajuuksia antanee vanha tilastointitapa luotettavamman arvion (Kuva 22). PJK-tiheys avojohtoverkoissa vaihtelee laajasti eri verkkoyhtiöiden alueilla, ollen tyypillisesti välillä 20-54 per 100 km,a. AJK:n osalta vastaava vaihtelualue on 5-30 per 100 km,a.

Pysyvien vikojen aiheuttajille eri tyyppisillä johdoilla antaa keskeytystilasto taulukon 9 tarkemmat arvot. Tilastollinen pohja on ilmakaapelien ja PAS-johtojen osalta kapea, sillä niitä on mukana vain 520 ja 7754 (PAS) km. Avojohtoja on 110838 km, josta puolet on metsässä. Maakaapelia puolestaan on 13113 km. Tilaston käyttöä KAPELI-projektin tarpeisiin hankaloittaa se että nykyiset maakaapelit ovat pääosin taajama- tai cityalueilla, jolloin niiden vikataajuuksista ei voi tehdä suoria johtopäätöksiä maaseutukaapeloinnin tulevia vikataajuuksia ajatellen.

Taulukko 9. Keskeytysmäärät kpl/100 km aiheuttajittain erityyppisissä verkoissa

VIKA	Avojohto	PAS-johto	Ilmakaapeli	Maakaapeli
Luonnonilmiöt yhteensä	3,39	0,24	0,07	0,10
- tuuli ja myrsky	2,38	0,19	0,07	0,01
- lumi ja jää	0,53	0,05	0,05	0,00
- ukkonen	0,29	0,03	0,08	0,05
- muu sää	0,20	0,01	0,01	0,20
- eläimet	0,18	0,07	0,00	0,03
Tekniset syyt yhteensä	0,54	0,04	0,11	0,33
- rakennevika	0,39	0,03	0,12	0,24
- verkonhaltijan toiminta	0,19	0,03	0,02	0,15
Muut syyt yhteensä	0,84	0,04	0,02	0,38
- ulkopuolinen	0,30	0,02	0,01	0,29
- tuntematon	0,51	0,02	0,04	0,13
Oman verkon vikakeskeytykset yht.	4,71	0,29	0,12	0,70

Tilastotiedot eivät anna suoraan tukea eri johtotyyppien vikataajuuksien arvioimiseksi erilaisissa ympäristöissä. Tämän takia Kapeli-hankkeessa pyrittiin arvioimaan nämä tiedot yhdistelemällä eri lähteistä saatavia tietoja tilastojen antamiin lukuihin. Käytetyt menetelmät ja lähtötiedot on tarkemmin kuvattu raportissa Kapeli-21. Yhteenvedona tuloksista voidaan esittää Taulukko 10 pysyville vioille ja Taulukko 11 jälleenkytkennöille. Siirtymällä täysin eristettyihin johtorakenteisiin, saadaan pysyvien vikojen taajuudet pienennettyä noin kymmenesosaansa ja jälleenkytkennät saadaan poistettua kokonaan. Ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua kaapelien pitkä korjausaika, joka saattaa syödä osan saavutetusta luotettavuushyödystä.

Taulukko 10. Eri tyyppisten johtojen arvioituja tyypillisiä keskeytyksen aiheuttavien pysyvien vikojen määriä haja-asutusalueiden olosuhteissa kpl/100 km,a.

JOHTOTYYPPI	METSÄSSÄ	TIENVARRESSA	AVOMAALLA
Avojohto	7,7	3,6	4,1
PAS-johto	0,68	0,33	0,42
Ilmakaapeli	0,5	0,23	0,86
Maakaapeli	0,79	0,78	0,82

Taulukko 11. Eri tyyppisten johtojen arvioituja tyypillisiä pjk/ajk-määriä haja-asutusalueiden olosuhteissa, keskimäärin kpl/100 km,a. Ylijännitesuojauksen ja eläinsuojauksen vaikutus on otettu huomioon.

JOHTOTYYPPI	Maasta erotettu verkko		Sammutettu verkko	
	Pjk	Ajk	Pjk	Ajk
Avojohto	40	22	29	16
PAS-johto	7	1,4	6,2	1,4
Ilmakaapeli	-	-	-	-
Maakaapeli	-	-	-	-

Luotettavuuden optimointi

Seuraavassa esitetään laskentaperiaatteet optimoitaessa verkostoautomaation laajuutta haja-alueen kaapelijärjestelmien tapauksessa. Tarkastelu rajoittuu haarajohtoon ja sen kaapelointiin. Käytetyt symbolit ovat seuraavat:

OC_i = KAH kustannukset johto-osan i takia (€/yr)
 λ_i = pysyvien vikojen vikataajuus johto-osassa i (1/yr)
 oce = KAH-kustannusparametri energialle €/kWh
 ocp = KAH-kustannusparametri teholle €/kW
 Tsw = kytkentäaika runkojohdolla, sisältää vian paikannuksen hrs
 $Tswb$ = lisäkytkentäaika haarajohdolla, sisältää vian paikannuksen hrs
 $Tswb,m$ = lisäkytkentäaika manuaalisessa tapauksessa
 $Tswb,a$ = lisäkytkentäaika automaattisessa tapauksessa
 Tr = korjausaika hrs
 Tk = varavoimakoneen tai tilapäiskaapelin kytkentäaika hrs
 P_j = johdon j kokonaiskeskiteho kW
 P_i = johto-osan i läpi virtaava keskiteho kW
 P_k = haaran k läpi virtaava keskiteho kW
 Ce = ohjattavan haaraerottimen vuosikustannus
 Cp = johto-osan vikailmaisun vuosikustannus

Tarkastellaan aluksi haarajohdon alussa olevan automaattisen erottimen kannattavuutta. Kaapelirakenteisen haaran johto-osan i vaikutus verkon katkoskustannuksiin on seuraava:

$$OC_i = \lambda_i (oce P_j Tsw + ocp P_j) + \lambda_i (oce P_k Tswb + oce P_i Tr) \quad (10)$$

Missä ensimmäinen sulkulauseke käsittää koko johdolle tulevat katkoskustannukset kunnes viallinen haara on löydetty ja erotettu. Jälkimmäinen sulkulauseke taas vastaa vian etsinnän aikana koko haaralle tulevaa katkoslisäaika, sekä vian taakse jäävää asiakasjoukkoa, jolle tulee vielä lisäksi korjausajan tai tilapäisen syötön kytkentäajan mittainen katkos.

Oletetaan, että automaattisen erottimen ja siihen liittyvän vian ilmaisun ansiosta viallinen haara tunnistetaan ja erotetaan käytännössä viiveettä, mutta että kaikille asiakkaille tulee kuitenkin lyhyt katkos. Tällöin vähennys katkoskustannuksissa on seuraava:

$$\Delta OC = \sum \lambda_i oce Tsw P_j \quad (11)$$

missä summalauseke kirjoitetaan kaikkien johtohaaran k johto-osien i yli. Mikäli vian erottaminen saadaan haaran osalta niin nopeaksi, ettei muu osa verkkoa koe katkoa lainkaan, tulee lauseke muotoon:

$$\Delta OC = \sum \lambda_i (oce Tsw P_j + ocp (P_j - P_k)) \quad (12)$$

ja edelleen, haaraerotin on kannattava, jos sen vuosikustannus on pienempi kuin edellä laskettu katkoskustannusten vähennys, s.o $Ce < \Delta OC$. Yhtälön (12) oikean puoleinen termi kattaa tehosta riippuvat kiinteät katkoskustannukset. Käytännössä saattaa käydä niin, että maasulkuviat saadaan

erotettua muusta verkosta ilman häiriötä muulle verkolle, mutta oikosulkuvioista tulee vähintään jännitekuoppa. Jos vioista puolet on maasulkuja, voidaan tällöin käyttää yhtälöiden (11) ja (12) keskiarvoa.

Tarkastellaan seuraavaksi vikailmaisimien kannattavuutta. Ilman ilmaisimia viallinen johto-osa joudutaan paikantamaan manuaalisesti, jolloin aikaa kuluu helposti useita tunteja. Merkitään tätä aikaa $T_{swb,m}$. Käytettäessä vikailmaisimia voidaan vika paikantaa ajassa $T_{swb,a}$. Jos ilmaisimet ovat kaukolueuttavia, on tämä aika luokkaa minuutteja. Yksittäisestä vikailmaisimesta saavutettava hyöty johto-osan i tapauksessa saadaan laskettua seuraavasti:

$$\Delta OC_i = \lambda_i \cdot c_{pe} \cdot P_k (T_{swb,m} - T_{swb,a}) \quad (13)$$

ja ilmainen on kannattava, jos sen vuosikustannukselle pätee $C_p < \Delta OC_i$.

Tarkastellaan lopuksi vielä yhtälön (10) viimeistä termiä. Tämä on katkoskustannus joka johtuu vian korjaamisesta tai väliaikaisen syötön / varavoimakoneen kytkentäajasta. Jos merkitään kaapelin korjausaikaa T_r ja tilapäisen syötön kytkentäaikaa T_k , saadaan johto-osaa i vastaavaksi katkoskustannussäästökseksi joka saavutetaan tilapäissyötön avulla:

$$\Delta OC_i = \lambda_i \cdot c_{pe} \cdot P_i (T_r - T_k) \quad (14)$$

Taloudellisuustarkastelua varten on arvioitava, kuinka monta varavoimakonetta tai tilapäistä korjauskaapelia verkossa tarvitaan ja verrattava näiden vuosikustannusta kaikille kaapelijohto-osille yhtälöllä (14) laskettuun kustannussäästöön.

Yhtälöiden perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset haarajohdon merkityksestä katkoskustannusten muodostumiselle:

- Haarajohdolla on sitä suurempi merkitys mitä suurempi on sen vikataajuus ja mitä raskaammin kuormitettuun johtolähtöön se liittyy.
- Haaran vikataajuuden ja johtolähdön kokonaiskuorman katkoskustannuksen tulo määrittää valtaosan haaran katkoskustannuksista ja edelleen hyödyt joita saadaan automaattisesta vian erottamisesta tai johtohaaran kaapelioimisesta.
- Koska kaapelioiminen vähentää vikataajuuden noin kymmenesosaan, korostuu yhtälön (10) oikeanpuoleisen termin merkitys. Vikojen nopea paikantaminen ja syötön palauttaminen viallisen kaapelilyhteyden taakse saa korostuneen merkityksen.
- Varasyöttöyhteyden rakentaminen haja-alueen haarajohdolle on kallista ja lisää myös pituuteensa verrannollisesti vikataajuutta. Edullisempi ratkaisu on käyttää vian taakse jääneen kuorman syöttämiseen varavoimakonetta tai tilapäiskaapelia. Kaapeliverkoissa viat eivät tule ryppäinä kuten avojohtojen tapauksessa vaan tasaisemmin väliajoin. Näin ollen korjauskaapeli tai varavoimakone voidaan jakaa verrattain monen kaapelihaaran kesken.

ILMAKAAPELI

Eräs keskeinen tutkimuksen aikana esille tullut kysymys on ilmakaapelin rooli. Suomessa on tähän mennessä vierastettu keskijännitteisten ilmakaapelien käyttöä – keskeytystilaston mukaan niitä on asennettu vain 520 km mikä vastaa 0,4% keskijänniteverkkojen kokonaispituudesta. Kuitenkin ilmakaapelin vikataajuus on jopa pienempi kuin maakaapelin, etenkin metsässä ja tien varressa. Lisäksi erittäin vaikeissa maasto-olosuhteissa kaapelin asentaminen maahan tulee niin kalliiksi, että joko ilmakaapelin tai PAS-johdon käyttäminen vaikuttaa jossain määrin väistämättömältä.

Ilmakaapelin käytettävyyteen vaikuttaa kaksi tekijää joihin seuraavassa paneudutaan tarkemmin:

- Myrskyt, jotka kaataessaan puita voivat aiheuttaa laajamittaista vahinkoa ilmajohdoille
- Salamät, jotka iskiessään ilmajohtoon tai sen lähelle voivat aiheuttaa eristeen vaurioitumisen

Ilmakaapelin myrskykestoisuuden kehittäminen murtolenkin avulla (Kapeli-raportti nro 10)

Ilmakaapelijohdon kannalta olisi edullista, jos se voitaisiin varustaa murtolenkeillä, jotka kestävät johdon normaalit rasitukset mutta päästävät kaapelin putoamaan maahan vahingoittumattomana isojen puiden kaatuessa johdon päälle. Näin pylvää jäsivät vahingoittumattomiksi, ja johdon korjaaminen olisi myrskyn jäljiltä nopeaa. Sähkönsyöttö asiakkaille voisi edelleen jatkua kaapelin kosketussuojaisen rakenteen ansiosta. Seuraavassa tarkastellaan tällaisen murtolenkin käyttöä tarkemmin.

Suomessa esiintyy normaalisti kovimpia tuulia syksyllä ja talvella. Navakat ja kovat tuulet voivat sisältää rajuja puuskia, jotka kykenevät kaatamaan puita sekä lennättämään oksia avolinjojen johtimien päälle ja siten aiheuttamaan sähkönjakelun keskeytyksiä. Myös kesällä ukkospilvestä puhaltavat voimakkaat syöksyvirtaukset voivat aiheuttaa merkittävää vahinkoa. Heikoimmat puut alkavat kaatua tuulen nopeudella 17 m/s ja suuria tuhoja alkaa syntyä, kun tuulen nopeus nousee 20-23 metriin sekunnissa. Usein vian aiheuttaa yksittäinen johdon päälle kaatunut puu. Useiden puiden kaatuessa linjalle eivät johtimet ja pylvää jaksakaan kantatella niitä, vaan linjaa tuhoutuu pidemmältä matkalta. Jakeluverkosta noin puolet sijaitsee metsissä.

Tässä tarkastelussa johtimena käytetään neljää 20kV PEX eristeistä 3-johdinryhmää poikkipinnoiltaan 25, 35, 50 ja 70 mm². Johtimet on kierretty kannatusköyden ympärille. Valitaan köydeksi IEC 61089 mukainen tyyppi 3.6-S1A-7, joka koostuu seitsemästä 2.12mm teräslangasta. Kokonaispoikkipinta on 24.7mm, jolloin nimellinen murtolujuus on 33.1kN. Tällöin kannatusköyden lujuus ylittää laskelmissa käytetyn 15 kN murtolenkin murtolujuuden varmuuskertoimella 2.2.

Johdon kokonaiskuorma koostuu sen omapainosta, mahdollisesta jääkuormasta ja samanaikaisesta tuulikuormasta, joka on tuulipinta-alan (= jään paksuuden) funktio. Tuulikuormaksi oletettiin seuraavassa esitettävissä laskentatuloksissa yleisesti käytettävä 250 N/m. Tämä vastaa keskimäärin tuulen nopeutta 18 m/s ilman tiheydellä 1.226 kg/m ja johdon ilmanvastuskertoimella 1.2. Tuulikuorma laskettiin sekä ilman jääkuormaa, että jääkuormalla alla mainituilla jäänpaksuuksilla.

Jään (tykkylumen) aiheuttama kuorma laskettiin 5mm, 10mm, 25mm ja 50mm kerroksilla. Jään tiheydeksi otettiin 0.9 kg/dm joka on erittäin varovainen arvio, kun esim. mastojen haruksille huurrejäässä käytetään yleisesti arvoa 0.4 kg/dm.

Pylväiden välimatkalla voidaan vaikuttaa ripustuksen kuormitukseen. Käytettäessä murtolenkkejä (esim. Ensto SO13.150, murtolujuus 15 kN) voidaan pylväsväli valita siten, että halutulla (liian suurella) jääkerroksen vahvuudella tai esim. kaatuvan puun vaikutuksesta kannatuspylvään murtolenkki murtuu ja aiheuttaa ”domino-efektin” murtaen seuraavienkin ripustusten murtolenkit, kunnes johto on maassa eikä vaikuta enää sitä seuraaviin ripustuksiin.

Pylväsvälit tulee valita siten, että johdon omapainon ja tuulikuorman sekä mahdollisen vähäisen jään tai tykkylumen muodostuksen lisäksi pienempien puiden ”nojaamiset” johtoihin eivät vielä johda murtolenkkien murtumiseen. Alla olevassa taulukossa (taulukko 12) on yhteenvedona kaikille kaapelityypeille lasketut kriittiset pylväsvälimatkat eri jääkerrospaksuuksilla. Tuulikuormana on käytetty kaikissa tapauksissa 250 N/m.

Taulukko 12: Kriittiset pylväsvälit (m) 15kN murtolenkillä jääkuorman ja ilmakaapelin omapainon funktiona.

Poikkipinta/Jääkerros	0 mm	5 mm	10 mm	25 mm	50 mm
25 mm ² Al	576	468	379	213	100
35 mm ² Al	529	435	356	204	98
50 mm ² Al	477	397	329	194	94
70 mm ² Al	427	360	302	183	91

Jos johdon asennusalueella esiintyy paljon jäänmuodostusta on esim. 50 mm jääkuormalla pylväsväliä pienennettävä 70 mm² johdolla 91 metriin, 50 mm² johdolla 94 metriin, 35 mm² johdolla 98 metriin edellä esimerkkinä mainitun 100m pylväsvälin asemesta, mutta 25 mm² johdolla voidaan pysytellä 100 m pylväsvälissä. Kyseisillä pylväsväleillä oltaisiin vielä kriittisellä alueella, sillä ripustukset kestävät vielä yllä mainitun kuorman mutta siinä ei vielä ole huomioitu mahdollisen kaatuvan tai nojaavan puun aiheuttamaa lisäkuormaa, joka saattaisi aiheuttaa murtolenkin välittömän murtumisen.

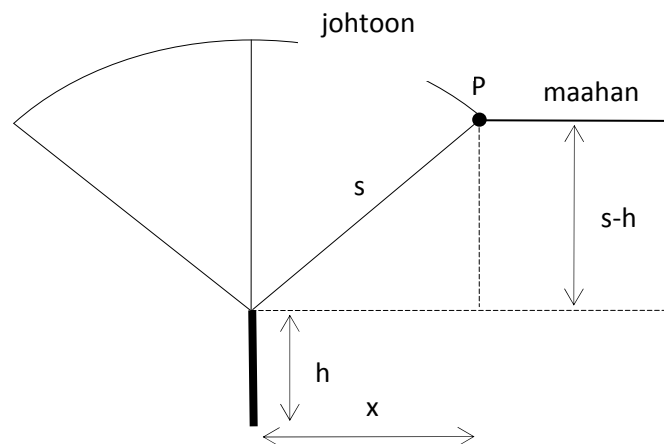
Murtolenkin mitoittaminen siten että se kestää johdon normaalit rasitukset, mutta päästää kaapelin putoamaan myrskyn kaataman suuren puun tapauksessa vahingoittumattomana maahan näyttää siis todennäköiseltä. Murtolenkin käytöstä olisi hyvä kerätä kokemuksia käytännön koeasennuksin. Lisäksi avoimeksi kysymykseksi jää maahan pudonneen johdon havaitseminen. Jätetäänkö se säätilan havainnoinnin ja johdon partioinnin varaan, vai olisiko kehitettävissä menetelmiä maahan pudonneen johdon tai petteäneen murtolenkin ilmaisuun.

Ilmakaapeli ja salamaylijännitteet (Kapeli-raportti nro 11)

Seuraavassa tarkastellaan ilmakaapelin salamahäiriöitä suoran salamaniskun kannalta. Salaman ajatellaan iskevän joko suoraan kaapelirakenteeseen tai johdon pylvääseen. Suoran iskun todennäköisyyteen vaikuttavat ympäristöolosuhteet, pylväiden korkeus sekä mahdollinen ukkossuojaus. Ympäristö jaetaan metsään, tien varteen sekä avomaahan. Kullekin ympäristölle tehdään teoreettinen tarkastelu suoran iskun todennäköisyydestä. Iskun vaarallisuuteen vaikuttaa muun muassa ilmakaapeliverkon rakenne sekä pylväiden maadoitus.

Avomaa

Kuvassa 23 on esitetty salaman osuminen pylvääseen avomaan tapauksessa. Pylvästä kuvaa paksumpi viiva, jonka korkeus on h . Pylväs luo ympärilleen kaaren, jolta se kerää salamoita puoleensa. Tämän kaaren etäisyys on salaman viimeisen hyppäyksen pituus (s). Pisteessä P etäisyys pylvääseen ja maahan on yhtä suuri.



Kuva 23. Salaman osuminen pylvääseen avomaan tapauksessa.

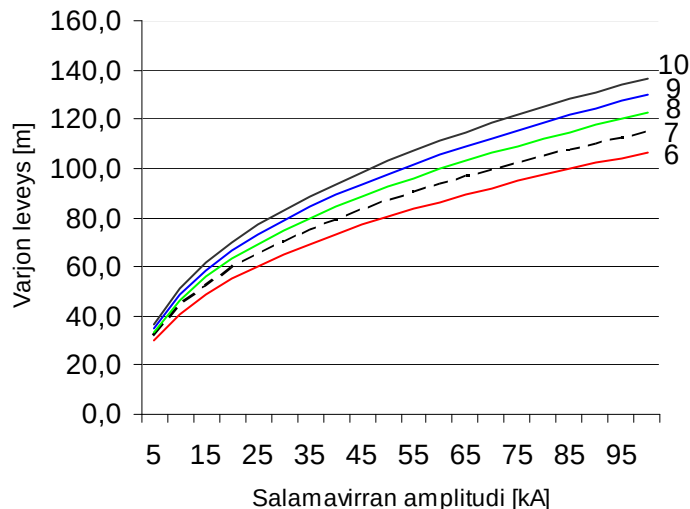
Horizontaalinen leveys (x) varjolle saadaan laskettua trigonometrian avulla (kaava 6). Kun halutaan tietää koko pylvään muodostaman varjon leveys, kerrotaan kaavan 6 tulos kahdella symmetrisyyteen perustuen.

$$x = \sqrt{s^2 - (s - h)^2} \quad (15)$$

s = salaman iskuetäisyys [m]

h = pylvään korkeus [m]

Iskuetäisyys s kasvaa salamavirran mukana. Edellisestä seuraa, että mitä suurempi salamavirta, sitä suuremmalta alueelta pylväs kerää avomaalla salamoita puoleensa. Vastaavasti mitä matalampaa pylvästä käytetään, sitä pienemmäksi suorien iskujen määrä jää. Kuvassa 24 on esitetty avojohdon muodostaman sähköisen varjon leveys eri pylvään korkeuksilla ja salamavirran arvoilla. Avojohtoilla käytetään yleensä 10 m korkuisia pylväitä. Avojohtoilla korkeus selittyy paljaista johtimista ja niistä johtuvista turvallisuusasioista. Tässä työssä ilmakaapelipylvään korkeudeksi on arvioitu 6 – 10 m.



Kuva 24. Avojohtodon muodostaman sähköisen varjon leveys eri pylvään korkeuksilla ja salamavirroilla

Tienvarsi

Tien varrella tarkoitetaan tässä työssä ympäristöä, jossa ilmakaapelin toisella puolella sijaitsee metsä ja toisella puolella on puuton alue. Puuttomalla alueella tarkoitetaan tilannetta, jossa puun kaatuminen ilmakaapelin päälle on mahdotonta. Erikseen on tarkasteltava esimerkiksi kapeaa metsätietä, jonka vierellä on korkeita puita. Tämänkaltaisessa tilanteessa on järkevämpää käyttää ympäröivänä ympäristönä metsää.

Avomaan tapauksessa havaittiin, että pylväs kerää salamoita puoleensa sitä enemmän, mitä korkeampi pylväs on. Samalla havaittiin myös, että mitä suurempi salamavirta ja näin ollen iskuetäisyys on, sitä suuremmalta alueelta salamoita hakeutuu pylvääseen. Tien varressa tilanne on toinen, sillä ainoastaan pienivirtaisen salamat, joiden iskukohta määräytyy lähellä maatasoa, voivat osua pylvääseen. Suurivirtaiset salamat hakeutuvat joko puuhun tai maahan. Edellinen väite toteutuu vain, kun vieressä oleva puu on korkeampi kuin ilmakaapelijärjestelmän pylväs.

Myös metsän (tai puun) ja pylvään välisellä etäisyydellä on vaikutusta siihen voiko salama osua suoraan pylvääseen. Ilmakaapelijärjestelmän tapauksessa ei voida suoranaisesti puhua johtokadusta. Senerin verkostosuosituksessa "RJ 21-92 Ilmajohtojen johtoalueet" riippujohtojen (20 ja 0,4 kV) on määritelty seuraavaa:

”Tien tai kadun varressa tai pelloilla ei riippujohdon johtoaluetta ole määritelty. Kuljetuksissa vähimmäisetäisyys on 0,5 m, samoin työskentelyetäisyys koneella, jonka ulottuma ei riipu käyttäjästä.”

Taulukossa 13 on esitetty skenaario, jossa pylvään etäisyys puuhun on 1,5 m ja pylvään korkeus 6 m. Taulukossa harmaalla on väritetty yhdistelmät, joilla suora salamanisku on mahdollinen.

Taulukko 13. Etäisyys, jolta tien varressa oleva ilmakaapeli kerää salaman puoleensa.
Etäisyys puuhun 1,5 m ja pylvään korkeus 6 m.

Salamavirta [kA]	Iskuetäisyys [m]	Puun korkeus [m]				
		6	7	8	9	10
5	21.74	15.75	3.70	-1.62	-3.64	-4.51
10	37.86	21.20	0.21	-9.07	-12.63	-14.19
15	52.36	25.09	-3.95	-16.79	-21.72	-23.90
20	65.91	28.23	-8.33	-24.49	-30.71	-33.46
25	78.80	30.91	-12.80	-32.12	-39.55	-42.84
30	91.17	33.28	-17.29	-39.65	-48.25	-52.06
35	103.13	35.41	-21.79	-47.09	-56.82	-61.13
40	114.76	37.37	-26.29	-54.43	-65.26	-70.06
45	126.10	39.18	-30.76	-61.69	-73.59	-78.87
50	137.19	40.88	-35.22	-68.87	-81.82	-87.56
55	148.06	42.47	-39.66	-75.97	-89.95	-96.15
60	158.73	43.98	-44.07	-83.00	-97.99	-104.63
65	169.23	45.41	-48.46	-89.97	-105.95	-113.03
70	179.57	46.78	-52.82	-96.87	-113.82	-121.34
75	189.76	48.09	-57.17	-103.71	-121.63	-129.57
80	199.81	49.35	-61.49	-110.50	-129.36	-137.73
85	209.74	50.56	-65.78	-117.23	-137.03	-145.82
90	219.56	51.73	-70.06	-123.91	-144.64	-153.84
95	229.26	52.86	-74.31	-130.55	-152.19	-161.80
100	238.86	53.95	-78.55	-137.14	-159.69	-169.70

Pylvään korkeudella ei itse asiassa ole ratkaisevasti väliä, kunhan viereisen puun korkeus on suurempi. Jos viereinen puu on muutaman metrin korkeampi, suojaa se pylvästä teoriassa hyvin. Tien varressa vain pienivirtaiset salamat (< 5 kA) voivat osua suoraan kaapelijärjestelmään. Sen sijaan puun ja pylvään välisellä etäisyydellä on merkitystä puun antamaan suojaukseen. Kuitenkin puun ollessa muutaman metrin korkeampi, antaa se kohtuullisen suojan leveämmilläkin johtokaduilla. Tilannetta, jossa puu jää alle pylvään pituuden, voidaan tarkastella avomaan mallin mukaisesti. Tällöin metsän puolella pylvään korkeutena käytetään pylvään ja puun välistä erotusta. Toisaalta tämänkaltainen tarkastelu ei välttämättä ole oleellista, koska 5 m puu ei luultavasti paljoa vaikuta salaman kulkureittiin.

Metsä

Senerin verkostosuositus ”RJ 21-92 Ilmajohtojen johtoalueet” määrittelee johtokadun riippujohtojen (20 ja 0,4 kV) tapauksessa seuraavasti:

”Metsässä ei riippujohdoille tarvita varsinaista johtokatua, koska tarvittava aukko on niin kapea, ettei se vähennä metsän tuottoa. Johdon ympäriltä poistetaan oksat ja tarvittaessa myös yksittäisiä puita siten, että oksat tai rungot eivät voi vahingoittaa johtoa. Käytännössä tämä tarkoittaa oksien ja runkojen poistamista sivuilta 0,5 – 1,5 m päähän johdosta siten, että ne eivät tuulella heiluessaan vahingoita johtoa. Erityisesti on otettava huomioon johdon päällä olevien oksien taipuminen lumikuorman takia. Johdon alle kasvavat aluspuut on raivattava, kun niiden latvat ulottuvat 1,0 – 0,3 m päähän johdosta. Jos johto sijaitsee tuulisella paikalla lähellä puita, otetaan lisäksi johtimen 0,5 – 1,0 m heiluminen huomioon...”

Tien varren tapauksessa osoitettiin teoreettisesti, että suora salamanisku on harvinainen, mikäli viereinen puu on korkeampi kuin pylvä. Oletettavaa on, että metsässä ilmakaapeli on vielä enemmän turvassa. Jos ilmakaapelin vierellä on kahden metrin turva-alue, on hyvin epätodennäköistä, että salama iskee juuri siihen. Kun ympäröivien puiden korkeus on korkeampi kuin ilmakaapelijärjestelmän pylvä, ei salama pääse tunkeutumaan siihen puiden välistä.

Pohdintoja

Edellä tehdyissä tarkasteluissa oletettiin ympäristö täysin homogeeniseksi. Esimerkiksi avomaalla maa oletettiin täysin tasaiseksi ja tien varressa puiden korkeus vakioksi. Teoriassa näyttäisi kuitenkin siltä, että etenkin metsässä ja tien varrella ilmakaapeli on hyvin suojassa suorilta salamaniskuilta. Sen sijaan avomaalla riski salaman osumiselle suoraan ilmakaapeliin on suuri. Korkeilla ja avoimilla alueilla onkin syytä pohtia ilmakaapelin asentamista ja sen suojaamista. Jos kaapelia ei voida asentaa maahan, olisi syytä käyttää ukkosjohtimia.

Tien varren ja metsän tapauksessa tehtiin oletus, että viereinen puu antaa hyvän suojan, mikäli salama siihen osuu. Käytännössä voi kuitenkin käydä niin, että salama hyppää puusta pylvääseen, varsinkin jos näiden etäisyys on hyvin pieni. Salaman käyttäytyminen kyseisessä tilanteessa vaatii lisäselvitystä. Hyvin kiinnostavaa olisi tietää energian määrä, joka tilanteessa pylvääseen siirtyisi.

Ympäristötarkastelussa oletettiin, että ilmakaapelijärjestelmä ei vedä puoleensa salamoita sen paremmin kuin maa tai puu. Tilanteeseen vaikuttaa hyvin merkittävästi käytettyjen pylväiden materiaali ja maadoitus. Salama näkee perinteisesti jakeluverkoissa käytetyt maadoittamattomat puupylväät potentiaaaliltaan maatasoa vastaavana. Puolestaan hyvin maadoitetut metallipylväät antavat salamalle paremman reitin maahan. Se kuinka hyvin maadoitetussa pylvässä kulkeva salamavirta vaikuttaa ilmakaapelin kuntoon, vaatii lisäselvitystä.

Salaman osuessa ilmakaapelijärjestelmään on ratkaisevaa järjestelmän vaurioitumisen kannalta osumakohta sekä pylväiden maadoitus. Mikäli salama osuu suoraan ilmakaapeliin, saattaa sen eriste

vaurioitua salamaimpulssista. Sen sijaan hyvin maadoitettuun pylvääseen osuminen saattaa jättää ilmakaapelin vaurioitta. Mikäli salama pystyy osumaan järjestelmään, on se pyrittävä ohjaamaan hyvin maadoittuihin pylväisiin. Mitä kapeampi jänneväli, sitä todennäköisemmin salama ohjautuu pylväisiin. Taloudellisesti ei ole kuitenkaan järkevää rakentaa järjestelmää liian lyhyillä jänneväleillä. Ilmakaapeli voitaisiin asentaa hieman pylvään kärkeä alemmalle, jolloin kärki toimii ukkosjohtimena. Raportissa (Kapeli-11) tehdyn teoreettisen tarkastelun perusteella jo puolen metrin vaihtelu kiinnityskorkeudessa vaikuttaa selvästi ilmakaapeliin suojaamiseen suoralta iskulta.

Ilmakaapelijärjestelmän käyttäytyminen suoran iskun tapauksessa vaatii vielä lisätutkimuksia, simulointeja ja testejä suurjännitelaboratoriossa. Syytä on myös pohtia, kuinka ympäristömuutoksiin varaudutaan. Esimerkiksi metsään sijoitettu ilmakaapeli ei ole ikuisesti turvassa salamoilta. Alueilla, joilla on hyvät maadoitusominaisuudet, on mahdollista jo alunperin käyttää ukkosjohtimia.

KAAPELIVERKON KUNNONVALVONTA

Eräs suurimpia huolenaiheita maakaapeleihin liittyen on niiden kestävyys vaativissa olosuhteissa. Koska asennusmenetelmien suhteen on kovia kustannuspaineita, on esimerkiksi auraaminen kiinnostava menetelmä edullisuutensa vuoksi. Toisaalta juuri tässä menetelmässä ei kovinkaan tarkkaan voida valvoa kaapelin asettumista maan alle. Tällöin saattaa kaapelia vasten jäädä nojaamaan esimerkiksi terävsärmäisiä kiviä, jotka vaikkapa roudan vaikutuksesta saattavat ajan myötä aiheuttaa vaurion kaapelin vaippa- tai eristekerrokseen. Tällöin on hyvin tärkeää, että on olemassa menetelmät ja valmis prosessi, jolla esimerkiksi asennusvirheistä johtuvat viat saadaan paljastettua ennen takuuajan umpeutumista.

Kapeli-projektin puitteissa päädyttiin esittämään keskijännitekaapelille ja sen asennukselle Taulukon 14 mukaista kunnonvalvontaohjelmaa.

Taulukko 14. KJ-kaapelien kunnonvalvontaohjelma

Tarkastus \ Menetelmä	PD-mittaus	Vaipan koestus	Dielektrinen vaste
Käyttöönotto	X	X	
2-v tarkastus	X	X	
10-välein	X		X

Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausmittauksia eli PD-mittauksia (*Partial Discharge*) voidaan tehdä joko online- tai offline-tekniikalla. Online-mittauksessa keskeytystä ei tarvita. Mittaus perustuu akustiseen mittaukseen tai Rogowskin kelan käyttöön. Offline-mittauksissa käytetään erilaisia ulkoisia jännitelähteitä. Kummallakin menetelmällä saadaan vikapaikka määritettyä tarkasti, mutta online-menetelmän heikkoutena on se, että siinä mittausta rajoittavana tekijänä on käyttöjännite. Offline-mittauksella saadaan parempi yleiskuva koko kaapelin kunnosta.

Eräs menetelmä offline-tilassa suoritettavaa osittaispurkausmittausta varten on vaimenevan vaihtojännitteen menetelmä (*DAC eli Damped AC*). Siinä kaapeli ladataan tasajännitelähteellä, joka kytketään latauksen päätyttyä irti ja resonanssiipiiri suljetaan omalla kytkimellään. Resonanssiipiirin muodostaa ulkoinen kuristin ja kaapelin oma kapasitanssi. Menetelmä mahdollistaa paitsi osittaispurkausten havaitsemisen, myös niiden lähteen paikantamisen käytännössä muutaman metrin tarkkuudella.

Dielektrisen vasteen mittaukset

Dielektrisen vasteen mittauksella ei saada tarkkoja vikapaikkoja selville, mutta sillä voidaan selvittää kaapelin yleiskunto. Menetelmä perustuu vaihtojännitteen eristeaineessa synnyttämiin häviöihin. Dielektrisen vasteen mittauksessa kaapelia varataan tasajännitteellä. Virtaa kutsutaan polarisaatiovirraksi. Tietyn ajan jälkeen jännite katkaistaan ja kaapelin varaus alkaa purkautua. Edelleen määrätyn ajan kuluttua kaapelin eristys oikosuljetaan ja syntyy käänteispolarisaatiovirta. Näiden virtojen aikavakioiden perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä eristeen tilasta.

Vaipan koestus

Vaippa on kaapelissa uloin rakennekerros. Tästä johtuen on luonnollista olettaa, että juuri vaippaan kohdistuu asennuksen yhteydessä suurimmat mekaaniset rasitukset. Näin ollen on syytä olla käytössä menetelmät, joilla voidaan varmistaa vaipan eheys asennuksen jälkeen ja myös myöhemmässä vaiheessa esimerkiksi routavaurioiden indikoimiseksi.

Vaipan kuntoa voidaan arvioida mittaamalla kosketussuojan vuotovirtaa. Erityinen huomio mittausjärjestelyihin tulee kiinnittää olosuhteissa, joissa maaperän johtavuus on huono. Mittauksessa voidaan käyttää sekä tasa- että vaihtojännitettä. Lähteen toinen napa kytketään kosketussuojaan ja toinen napa vaipan puolijohtavaan kerrokseen. Toinen mahdollinen tapa kytkennälle on kytkeä navat kaapelin kosketussuojan ja maan välille. Vuotovirta ei saisi ylittää muutamaa mikroampeeria.

OPTIMOITU KAAPELIRATKAISU HAJA-ALUEIDEN TARPEISIIN

Olennaisena osana Kapeli-projektissa oli myös järjestelmää varten optimoidun 20 kV keskijännitekaapeliratkaisun muodostaminen haja-alueiden tarpeisiin. Kaapelin tulisi olla asennettavissa maahan, riippukaapeliksi tai veteen. Lisäksi sen tulisi olla mekaanisesti riittävän luja aauraamalla tehtävää maa-asennusta ajatellen.

Kaapelirakenteen lähtökohdaksi päätettiin ottaa käyttökokemusten perusteella erittäin luotettavaksi osoittautunut kotimainen SFS 5636 standardirakenne AHXAMK-W 20 kV, kehittämällä rakennetta edelleen sen ominaisuuksien sovittamiseksi lähemmäksi haja-alueiden kapasiteetti- ja asennustekniikkatarvetta. Ominaisuudet pyrittiin optimoimaan siihen käyttöön ja mitoitusarpeeseen, johon Kapeli-konseptissa määritellyt keveät kaapelijärjestelmät on tarkoitettu.

Keskeinen ajatus on yhdenmukaistaa kaapelin vesitiivis PEX-eristetty polyeteenivaippainen johdinrakenne siten, että samalla 1-vaiheisella puolivalmisteella voidaan muodostaa optimaalisella tavalla sekä kustannusten, että saatavuuden kannalta kaikki seuraavat tuotteet:

- Sellaisenaan yhteen kerrattu kolmejohtiminen voimakaapeli
 - o Maa-asennus hyvissä maadoitusolosuhteissa
 - o Vesistöasennukset
- Kupariköyden ympärille kerrattu kolmejohtiminen voimakaapeli
 - o Eri suuruisilla kupariköyden poikkipinnoilla, minimi 16 mm²
 - o Tarkoitettu maa-asennukseen huonoissa maadoitusolosuhteissa
- Galvanoidun tai päällystetyn teräsköyden ympärille kerrattu kolmejohtiminen voimakaapeli
 - o Eri suuruisilla teräsköyden poikkipinnoilla, minimi 24,7 mm²
 - o Tarkoitettu riippukaapeliasennukseen 15 kN murtolenkin kanssa
- Yksivaiheiset yksiköt vaiheet erillisinä asennettavaksi
 - o Maa-asennuksessa esimerkiksi ketjukaivurilla tehtävään kaivantoon
 - o Vesistöasennuksessa
 - o Mahdollistaa pitkät toimitus- ja asennuspituudet ilman jatkoksia

Soveltuvuutta ja taloudellisuutta haetaan kaapelille kolmella eri tavalla: Optimoimalla eristyspaksuutta nykyteknologian mahdollisuuksien mukaan, vahvalla PE-ulkovaipalla sekä sopivalla poikkipintojen valikoimalla.

20 kV PEX-kaapelin eristyspaksuuden optimoinnin tarkastelu katsottiin mahdolliseksi sekä kaapelin valmistustekniikan että eristysmateriaalien kehityksen myötä. Näitä tekijöitä on jo hyödynnetty suurjännitekaapelien osalta. Esimerkiksi nykyään valmistettavien 110 kV PEX-kaapelien eristyspaksuus on 13-18 mm [18], kun se 20 kV kaapeleissa on 5,5 mm. Kaapelin jänniterasituksen kannalta kriittinen piste on johdinsuojan ja eristeen rajapinnassa, jossa mainittujen 110 kV kaapelien sähkökentän voimakkuus on 5,3-7,5 kV/mm, kaapelin johtimen poikkipinnasta ja eristyspaksuudesta riippuen. Jos esimerkiksi 50 mm² keskijännitekaapelin (20 kV) eristystä ohennetaan nykyisestä standardin edellyttämästä paksuudesta arvoon 4,2 mm kasvaa suurin sähkökentän voimakkuus arvosta 3,9 kV/mm arvoon 4,7 kV/mm (U_m=24 kV) Tämän lisäksi sähkökentän voimakkuus eristeen ulkopinnalla, millä on vaikutusta kaapelin ja sen varusteen kentänohjauksen rajapinnassa, kasvaa arvosta 1,7 kV/mm arvoon 2,4 kV/mm. Muutosten vaikutus on kuitenkin otettava huomioon sovitettaessa Kapeli-järjestelmän kaapelille varusteita. Kasvanut sähkökentänvoimakkuus yhdessä optimoidun eristepaksuuden kanssa edellyttää sovitettujen varusteiden lisäksi perinteistä huolellisempaa työn tarkkuutta ja laatua varusteasennuksissa.

Kaapelin eristyksen optimointi keventää kaapelin rakennetta taulukon 15 mukaisesti. Itse eristysmateriaalin vähenemisen lisäksi pienenee myös kaikkien eristyksen ulkopuolella olevien osien materiaalienekki pienentyneen eristyksen ulkohalkaisijan vaikutuksesta.

Taulukko 15. Kapeli- keskijännitekaapelirakenteen materiaalisäästö (%) kun johdineristystä optimoidaan nimellisarvosta 5,5 mm arvoon 4,2 mm.

Rakenneos / poikkipinta	25 mm ²	50 mm ²
Johdin	0	0
Johdinsuoja	0	0
Eristys	34	32
Hohtosuoja	15	13
Vesitiivistys	15	13
Kosketussuoja	14	13
Ulkovaippa	12	11

Kaapelin ulkovaippa mitoitetaan siten, että se kestää aurauksen aiheuttamat rasiutukset. Vaippa tehdään mustasta säänkestävästä polyeteenistä nimellispaksuudeltaan 2,5 mm.

Poikkipintojen osalta on päädytty kahteen vaihtoehtoon: 25 mm² Al ja 50 mm² Al. Pienempien poikkipintojen valmistaminen ei ole kustannustehokasta, ja toisaalta 35 mm² kaapelin taloudellinen käyttöalue on hyvin pieni ja kustannusero valittuihin poikkipintoihin on marginaalinen. Poikkipinnaltaan 25 mm² kaapelin taloudellinen kuormitusalue ylittää noin 750 kVA asti ja 50 mm² kaapelin noin 1250 kVA saakka.

Kapeli-kaapelirakenteen testaus

Kaapelijärjestelmälle tehdään tyyppi hyväksyntää vastaavat laboratoriotestaukset niin kaapelin, varusteiden kuin järjestelmänkin yhteensovittamisen osalta. Varusteille tehtävät testit tehdään sekä hyvän asennustavan mukaisesti kuorittua hohtosuojaa ja hiontaviimeistelyä pintaa käyttäen, että huolimattoman asennustavan mukaisesti syvemältä hohtosuojaa kuorimalla ja ilman hiontaviimeistelyä, tarkoituksena nähdä syvemmän kuorinnan ja suoran työkalujäljen vaikutus lujuustasoon.

Kaapelijärjestelmän testaus tehdään neljälle 50 mm² testipituudelle, joissa kaikissa on ulkopääte, jatkos ja kaapelisisäpääte. Testiohjelma on seuraava:

- a) Kaapelin taivutuskoe ja varusteiden asennukset IEC 60840:2004
- b) Osittaispurkausmittaus IEC 60840:2004
- c) Tasajännitekoe kV (6 x U₀) aika 15 minuuttia SFS-EN 61442 kohta 5
- d) Vaihtojännitekoe 54 kV (4,5 x U₀) aika 5 minuuttia SFS-EN 61442 kohta 4
- e) Osittaispurkausmittaus 24 kV (2 x U₀) huonelämpötilassa, tarkkuus ≤ 5 pC SFS-EN 61442 kohta 7
- f) Kaapelin häviökulman (tanδ) mittaus (voidaan tehdä erillisille kappaleille) IEC 60502-2:2005
- g) Syöksyjännitekoe 125 kV 95 – 100 °C johdinlämpötilassa SFS-EN 61442 kohta 6
- h) Lämmitysjakso 95 – 100 °C ja 30 kV (2,5 x U₀) yhteensä 126 x 8 h SFS-EN 61442 kohta 9
- i) Osittaispurkausmittaus 24 kV (2 x U₀), tarkkuus ≤ 5 pC SFS-EN 61442 kohta 7
 - 95 - 100 °C johdinlämpötilassa ja
 - huonelämpötilassa
- j) Syöksyjännitekoe 125 kV huonelämpötilassa
- k) Vaihtojännitekoe 30 kV (2,5 x U₀) aika 15 minuuttia SFS-EN 61442 kohta 4
- l) Vaihtojännitekoe 48 kV (4 x U₀) aika 4 tuntia IEC 60502-2

Tarkoituksena on että kaapelijärjestelmän koeasennukset olisivat otettavissa käyttöön e.m. testiohjelman perusteella.

LÄHTEET

1. Kapeli-raportti nro 1: Tutustumismatka Ruotsiin yhdessä R4:n kanssa 29.-31.5.2007.
2. Kansainvälinen kehitys. Verkkovisio Workshop 13.3.2006.
3. Ove Göransson, Ny förenklad distributionsteknik sänker totalkostnaderna. Esitetty seminaarissa "Framtidens robusta och kostnadseffektiva elnät" KTH/Tukholmassa 17.1.2006.
4. Anders, George J., *Rating of electric power cables*. IEEE Press, 1997. IEEE ISBN 07803-1177-9.
5. Cenelec TC112: "Installations over 1 kV". Earthing Systems.
6. Guldbbrand, A.; Samuelsson, O.: Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems, Sweden.
7. R. Rudolph und A. Mayer: Überspannungsschutz von Mittelspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 76 (1985) 4, S. 204-208.
8. Omidiora Michael Adebayo, "Lightning Overvoltage Studies in Medium Voltage Distribution Lines", *Master thesis work at Helsinki University of Technology (TKK), Espoo, Finland*, January, 2008.
9. Vijayaraghavan, Mark Brown, and Malcolm Barnes, "Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection"; 2004.
10. Keskeytystilasto 2007, Energiateollisuus r.y.
11. Sener r.y. Pikajälleenkytkentöjen aiheuttamat ongelmat ja niiden vähentäminen. Suositus hyväksyttävistä pj-k-määristä. 2001.
12. Riku Kananen, Kannattavuusselvitys eri vaihtoehtoista vähentää lyhyitä katkoksia Kainuun Energian sähköverkkotoiminnassa. Diplomityö, TKK 2007.
13. Heine, Pirjo, Turunen, Jukka, Lehtonen, Matti and Oikarinen, Arvo, Measured Faults during Lightning Storms, 2005 IEEE PowerTech'2005, St. Petersburg, Russia, June, 27-30, 2005, Paper 72, 5 p.
14. Markus Parviainen, Keskijännitteisessä avojohtoverkossa tapahtuneiden vikojen riippuvuus ympäristöolosuhteista. Diplomityö, TKK 2008.
15. CIGRE WG33.01: *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*. CIGRE Brochure 63, 1991.
16. Keränen, Juha. 2008. Keskijännitekaapeleiden diagnostiset menetelmät. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
17. Hyvönen, Petri. 2003. Keskijännitteisten maakaapelijärjestelmien osittaispurkausmittaukset käyttöpaikalla. Liseniaattityö. Teknillinen korkeakoulu.
18. Suurjännitekaapelin eristyksen mitoitus, Tuomo Pitkäranta, Diplomityö, TKK, 2006.

LIITE : KAPELI-PROJEKTIN RAPORTIT

KAPELI-01: Tutustumismatka verkonrakennukseen Ruotsiin yhdessä R4:n kanssa 29.-31.5.2007.

KAPELI-02: Maakaapelin asennusmenetelmät.

KAPELI-03: Maaperä maakaapelin asennuksen kannalta.

KAPELI-04: Tekniset reunaehdot 20- ja 6-kilovoltin voimakaapeleille: Pienet poikkipinnat 10 – 95 mm².

KAPELI-05: Taloudellisuustarkastelua 20-kilovoltin voimakaapelille.

KAPELI-06: Taloudellisuustarkastelua 6-kilovoltin maakaapelilla toteutetulle johtohaaralle.

KAPELI-07: Maasulun aiheuttama kosketusjännite KJ-kaapelihaarajohdossa.

KAPELI-08: Loistehon kompensointitarve kevyen kuorman KJ-kaapelihohtohaaralla.

KAPELI-09: KAH-KUSTANNUSTEN LASKENTA ERI VERKKOVAIHTOEHDOSISSA.

KAPELI-10: Mekaaninen sulake.

KAPELI-11: Selvitys ilmakaapeliin aiheutuneista salamahäiriöistä.

KAPELI-12: Optimaalinen automaattiotaso haja-alueen kaapeliverkossa.

KAPELI-13: Jännitteenoususkenaario.

KAPELI-14: Tarkat johtoparametrit.

KAPELI-15: Sätettävien KJ-kaapelilähtöjen suojaaminen "Kuormanerotin Sulake"-yhdistelmällä sekä sulakkeen mitoituksessa huomioitavia seikkoja.

KAPELI-16: Ilmakaapeli vai ilmajohto?

KAPELI-17: Simulationstechnische Untersuchung des Wechsels von einer zentralen Kompensation zu einer dezentralen Kompensation des kapazitiven Erdschlussstromes unter Berücksichtigung der Besonderheiten Zentralfinnlands.

KAPELI-17b: "Simulointiselvitys keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin vaihtamisesta hajautettuun kompensointiin Keski-Suomen olosuhteet huomioiden".

KAPELI-18: Kaapelin eristeen poikkipinnan muutoslaskelmat.

KAPELI-19a: A Selectivity Technique for Earth Fault Protection in MV Networks. Part I: Unearthed Networks.

KAPELI-19b: A Selectivity Technique for Earth Fault Protection in MV Networks.Part II: Compensated Networks.

KAPELI-20: Keskijännitekaapeleiden kunnonvalvonta.

KAPELI-21: Eri johtoratkaisujen arvioituja vikataajuuksia eri ympäristöolosuhteissa.

KAPELI-22: KJ-kaapelihaarojen ylijännitesuojaus.

KAPELI-23: Uusi maasulkuilmaisualgoritmi.

KAPELI-24: KytKentäylijännitteet sulakkeen palaessa.

KAPELI-25: Feasibility of light weight cable branches.

KAPELI-26: Projektin loppuraportti.