

Lukudu Evanis Satimon Manese
SUURJÄNNITEJOHDOT

Opinnäytetyö
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Marraskuu 2014

TIIVISTELMÄ

Yksikkö Ylivieska	Aika Marraskuu 2014	Tekijä Lukudu Evanis Satimon Manese
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka		
Työn nimi: Suurjännitejohdot		
Työn valvoja: Jari Halme		Sivut: 49
<p>Tämä opinnäytetyö on tehty Centria ammattikorkeakoululle. Tarkoituksena oli tutkia suurjännitejohtoja ja niiden varusteita sekä suurjännitejohtojen rakentamismääräyksiä.</p> <p>Työ rajattiin ohjaajani kanssa niin, että työssä tultaisiin käsittelemään suurjännitejohdot ja niiden varusteet. Käsiteltiin suurjänniteajohtojen rakenne, pylväät, eristimet ja johdon rakentaminen. Kuvattiin myös suurjännitemaakaapelin rakenne, sen asennus, kaapelin mekaaninen suojaus ja asennuksen erityispiirteitä. Suurjännitejohdot käsitellään 110 kV, 220 kV ja 400 kV johdot. Työssä ei tarkistella keskijännitejohtoja.</p>		

Asiasanat

Avojohto, suurjännitejohto, suurjännitekaapeli

ABSTRACT

Unit Ylivieska	Data November 2014	Author Lukudu Evanis Satimon Manese
Department: Electrical Engineering		
Title: Overheads lines and cables		
Supervisor : Jari Halme		Page: 49
<p>This thesis has been made to Centria University of Applied Sciences. The aim was to study the high-voltage cables and their accessories, as well as high-voltage wires and building regulations.</p> <p>The thesis was limited by me and my mentor, so that I would be deal with only a high-voltage wires and their accessories. I describe high-voltage overhead wires construction, poles, insulators and building management. I also describe a high-voltage underground cables structure, the installation, mechanical protection of the cable and the installation of special features. High-voltage wires I dealt with 110 kV, 220 kV and 400 kV wires. On this thesis I was more focusing about high-voltage cables not medium-voltage wires.</p>		
Keywords High-voltage cable, overhead line		

SISÄLLYS

1 JOHDONTO	1
2 SUURJÄNNITE AVOJOHDON JA NIIDEN VARUSTEET	2
2.1 Pylväät	2
2.2 Pylväät varusteet	4
2.2.1 Ukkosjohdin	4
2.2.2 Teräsorsi	5
2.2.3 Haraus	5
2.2.4 Perustus	6
2.2.5 Maadoitusjohdin	7
2.3 Eristimet	8
2.3.1 Lasieristimet	9
2.3.2 Riippueristin	10
2.4 Virtajohdin	12
2.4.1 Avojohtin	12
2.4.2 Nippujohdin	13
2.4.3 Välisiteet	14
2.4.4 johdon vuorottelu	14
3 SUURJÄNNITE AVOJOHDON RAKENTAMINEN	16
3.1 Avojohtin mekaaninen lujuus	16
3.2 Varmennettu johto	20
4. SUURJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN VARUSTEET	21
4.1 Suurjännitekaapelit	21
4.2 Suurjännite maakaapelin rakenne	21
2.2.1 Johdin	22
2.2.2 Johdinsuoja ja johdinsuojanauha	24
2.2.3 Eristys	24
2.2.4 Hohtosuoja	25
2.2.5 Kosketussuoja	26
2.2.6 Ulkovaippa ja armeeraus	27

5 SUURJÄNNITEKAAPELIEN ASENNUS	28
5.1 Kaapelien mekaaninen suojaus	28
5.1.1 Betonielementit	29
5.1.2 Betonikansi	30
5.1.3 Anturamuotti	31
5.1.4 Suojaamaton	33
5.2 Asennetut erityispiirteitä	34
5.2.1 kuormitettavuus	34
5.2.2. Kolmio- ja tasoasennus	36
5.2.3 Kosketussuojan kytkentä	37
5.2.4 Kaapeleiden lämpötilanvalvonta	40
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	45
LÄHTEET	47

LYHENTEET JA TERMIT

kV	kilovoltti
PVC	polivinyylikloridi
SVL	vaippajännitteen rajoitin,
CTM	kaapelin lämpövalvonta,
DTM	hajautettu lämpötilanvalvonta,
U_o	johtimen ja maan potentiaalin välinen nimellisjännite (V)
U_m	sähköverkon suurin käyttöjännite (V)
U	pääjännite (johtimien välinen jännite) (V)
HSV	Helen Sähköverkko Oy

1 JOHDANTO

Suurjännitejohtoja ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV johdot. Niiden tehtävä on siirtää tarvittava sähköteho osaan maata mahdollisimman taloudellisesti, teknisesti hyväksyttävästi, turvallisesti ja ympäristöä mahdollisimman vähän häiriten.

Suurjännitejohtoja ovat kaikki yli 1 kV johdot. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan tarkastella keskijännitejohtoja. Suurjännitejohdot voidaan jakaa kahteen Ryhmään, ilmajohtoihin ja maakaapeleihin. Ilmajohdot voidaan jakaa avojohtoihin ja ilmakaapeleihin.

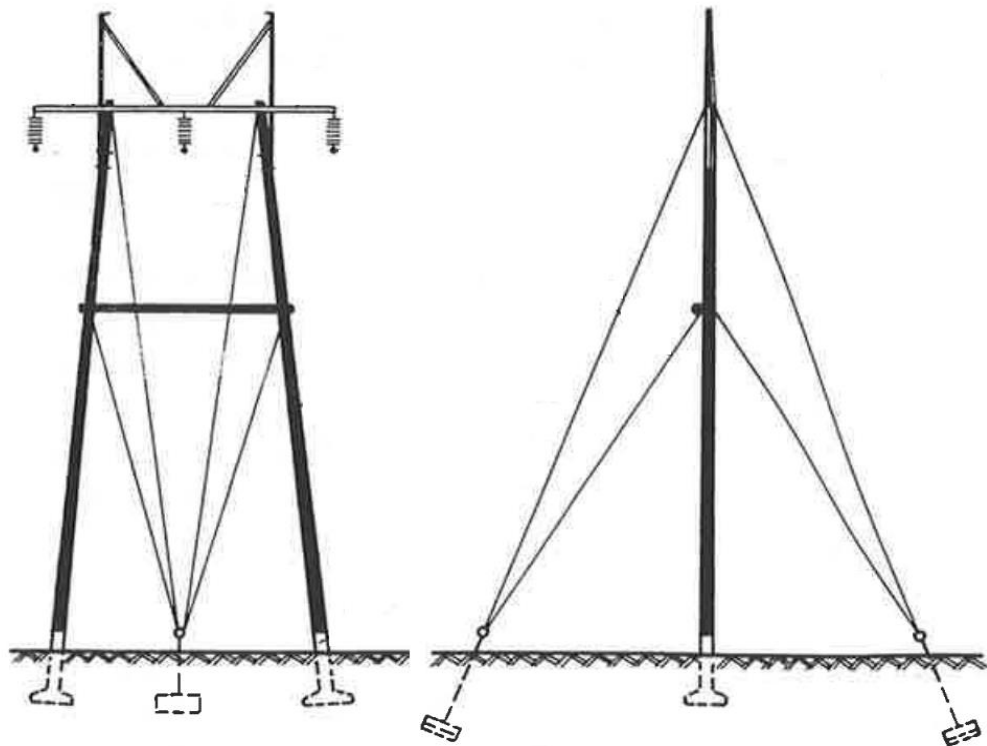
Suurjänniteilmajohdot ovat pääosin avojohtoja. Suurjänniteavojohdon etuina ovat edullisemmat rakennuskustannukset. Haittapuolina ovat suuri tilantarve ja huono sopivuus maisemaan. Johdinmateriaalina on yleensä teräsvahvisteinen alumiini. Suurilla siirtojännitteillä käytetään koronahäviöiden estämiseksi ns. nippujohtimia. 110 kV jännitetasosta alkaen vaihejohtimien yläpuolella käytetään ukkosjohtimia. Niiden tehtävänä on suojata vaihejohtimia salamaniskuilta.

Suurjännitekaapelit sijoitetaan kaapelikanaviin tai lasketaan suoraan maahan tai veteen. Suurjännitekaapeli on johto, jossa mekaanista vahingoittumista, kosteutta ja korroosiota estävän vaipan sisällä on johdin eristyksineen ja suojauksineen. Johdinmateriaaleina käytetään yleensä alumiinia. Suurjännitekaapeleita käytetään sähköenergian siirtoon tilanteissa, joissa avojohtoja ei voida käyttää.

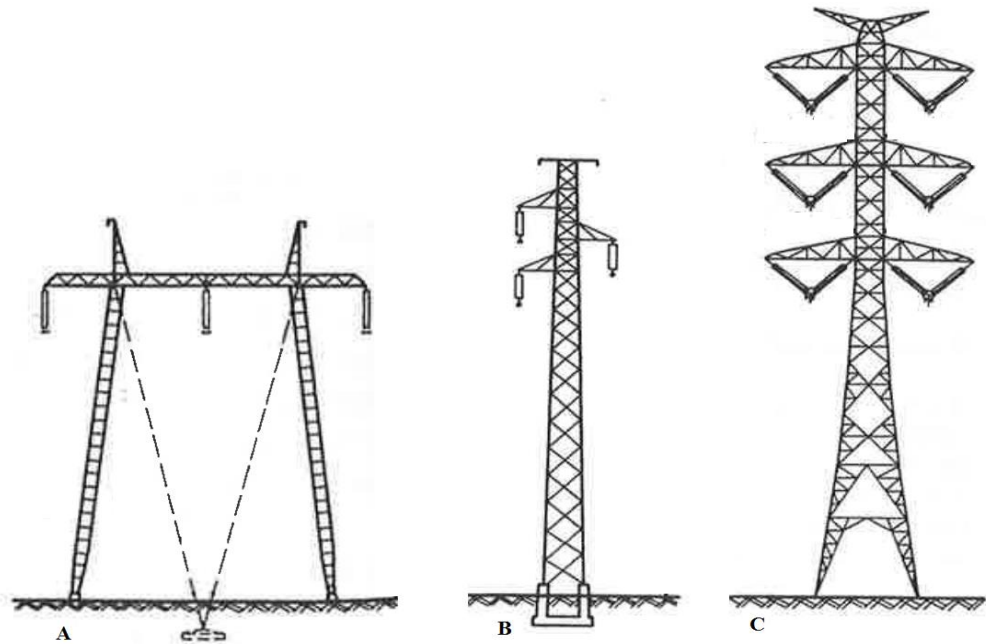
2 SUURJÄNNITEAVOJOHDOT

2.1 Pylväät

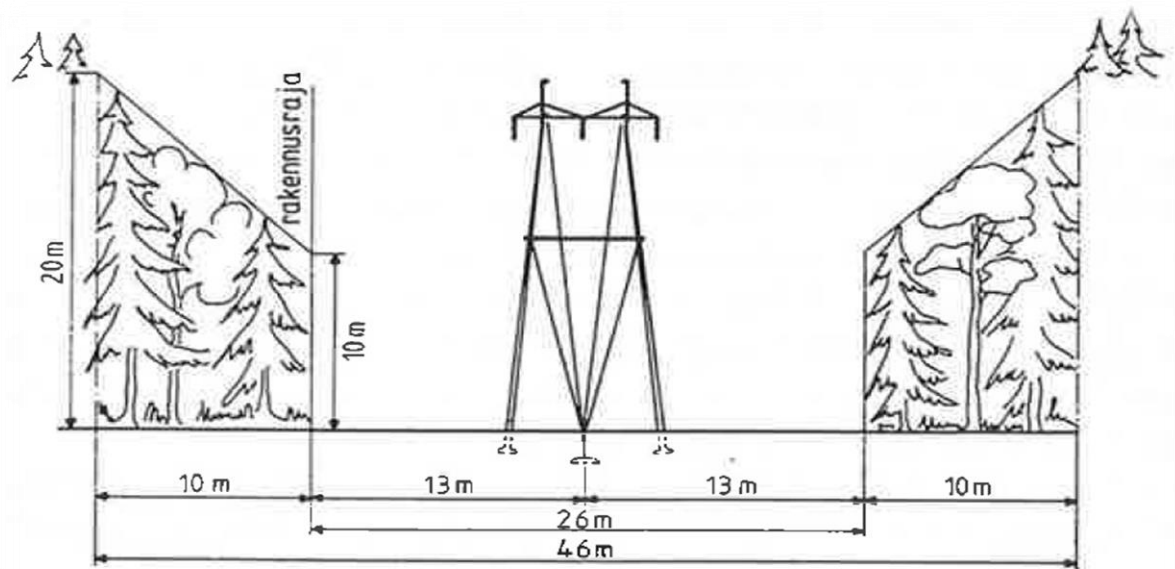
Pylväät on valmistettu puusta, teräksestä tai alumiiniseoksesta. Puuta käytetään yleisesti 110 kV jännitteeseen asti. Puun etuina ovat halpa hinta ja sen hyvä eristyskyky ilmastollisia ylijännitteitä vastaan jakeluverkoissa. Puupylväät suojataan lahoamiselta kyllästämällä. Teräs- ja seosalumiinipylväitä käytetään suurimmilla jännitteillä ja tilanteissa, joissa puupylvään korkeus tai lujuus ei ole riittävä. Puupylväiden orsimateriaalina käytetään yleisimmin seosalumiinia tai teräs. 110 kV jännitteestä alkaen Suomessa käytetään yleisimmin harustettuja porttipylväitä.



KUVIO 1. 110 kV harustettu puupylväs. (Elovaara ja Laiho, 2007)



KUVIO 2. Erilaisia metallipylväsrakenteita. a) 400 kV porttipylväs, b) vapaasti seisova 110 kV pylväs I-ketjuin, c) 400 kV vapaasti seisova pylväs V-ketjuin (Elovaara ja Laiho, 2007)



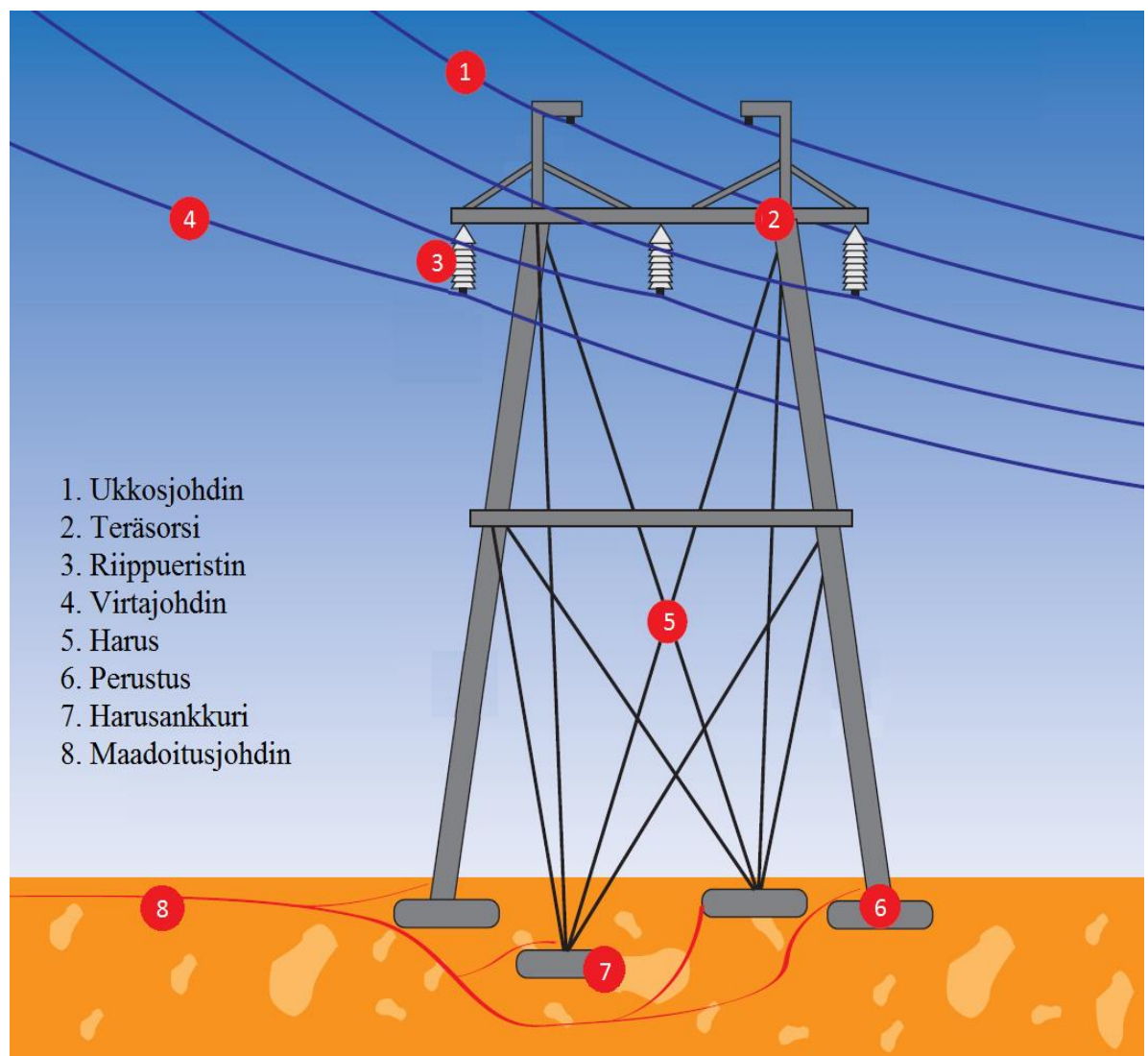
KUVIO 3. Harustetun puisen portaalipylvään (110 kV) johtoalue, joka koostuu 26 leveästä johtoalueesta ja reunanvyöhykkeistä (2 x 10 m) (Elovaara ja Laiho, 2007)

Johdon johtoaukean leveys on.

- 110 kV johdolla 26...30m
- 220 kV johdolla 32 - 38 m
- 400 kV johdolla 36 - 42 m

2.2 Pylväät varusteet

110 kV avojohdot Suomessa ovat pääosin harustettuja porttipylväitä:



KUVIO 4. Harustettu kaksijalkainen puupylväs. 110 kV

2.2.1 Ukkosjohdin

Suomessa 110 kV jännitetasosta alkaen avojohtimien yläpuolella asennetaan lähes aina ukkosjohtimet. Avojohtoja koskevan standardin SFS-EN 50341-1 mukaan ukkosjohtimella tarkoitetaan maahan joillakin tai kaikilla pylväillä yhdistettyä johdinta, joka on tavallisesti sijoitettu vaihejohtimien yläpuolelle antamaan tietynasteisen suojan salamaniskuja vastaan. (SFS- käsikirja 603)

Ukkosjohtimien tehtävänä on suojata vaihejohtimia suorilta salamaniskuilta ja kuljettaa osaa maasulkuvirrasta, jolloin maan kautta palaava virta ja sen aiheuttamat vaarajännitteet pienenevät. Niiden tehtävänä on myös kytkeä vikapylväs tai -asema rinnan toisten pylväiden tai läheisen aseman kanssa, jolloin maasulkuvirran kohtaama impedanssi ja maadoitusjännite pienenevät. (Tiainen 2007)

Ukkosjohtimet myös pienentävät salamavirran kohtaamaa aaltoimpedanssia, jolloin salaman iskiessä pylvääseen takaiskujen ja monivaiheisten vikojen määrä pienenee. Lisäksi ukkojohtimet edesauttavat relesuojauksen toimintaa pienentämällä maasulkuvirran kohtaamaa impedanssia.

Ukkosjohtimien ja suppeiden pylväiden ketjun muodostama impedanssi Z_k pylvään kohdalta saadaan laskettua yhtälöllä:

$$Z_k = \frac{1}{2} \sqrt{R_E \cdot Z \cdot l_s}, \quad (1)$$

Missä

On R_E on pylväiden maadoitusresistanssi, l_s on jänteen pituus ja Z ukkosjohdinnipun impedanssi pituutta kohden maan ollessa paluupiirinä. Yhtälö (1) on likimääräinen ja siinä oletetaan että johto on hyvin pitkä tarkastellulta pylväältä kumpaankin suuntaan, jokaisen pylvään maadoitusresistanssi on yhä suuri ja jännepituudet ovat samat. (Elovaara ja Laiho 2007)

2.2.2 Teräsorsi

Harustetun kaksijalkaisen puupylvään orsi on terästä. Pylväillä voi myös olla tukiorsia jalkojen keskivaiheilla, jolloin vaakaside on terästä. Avojohtimet on kiinnitetty orsiin eristimien avulla. Orsi on kiinnitetty pylvään latvaan. Tavallisin orsirakenne on taso-orisi.

2.2.3 Harus

Harusta tarvitaan tukemaan pylväitä taipumiselta ja jopa kaatumiselta. Harusten avulla saadaan aikaiseksi vastavoima pylvästä kallistaville tai taivuttaville voimille. Harustus muodostuu teräsköydestä ja sen kiinnittämiseen ja ankkurointiin liittyvistä tarvikkeista. Harusköysiä on eri vahvuisia. Harusköysien kiinnittämiseen ja ankkurointiin on monenlaisia tarvikkeita. Köysi kiinnitetään pylvääseen standardoiden harusraudan, haruskiinnikkeen tai harussinkilän avulla. Taulukossa 1 on eristetty haruksiaan käytettävien teräsköysien ominaisuudet.

Haruksen ankkuroinnissa maan alle tarvitaan haruslaatta, johon on kiinnitetty varsinainen silmus. Silmukka voidaan kiinnittää myös esimerkiksi kallioon. Harusvaijeri kiinnitetään toisesta päästään silmukkaan. Yleisesti käytössä olevan laatan maksimikuorma vastaa kahden harusvaijerin maksimivetokuormaa. Laattaan voidaan siis kiinnittää korkeintaan kaksi harusta. Ehtojen ylittyessä pitää haruslaattoja laittaa niin monta kuin vaaditaan, mutta eri kohtiin. Harusvaijereiden määrä voi kuitenkin kasvaa, koska harusvoima kasvaa haruskaltevuuden kasvaessa.

TAULUKKO 1. Teräsköysien rakenteet, mitat ja ominaisuudet. (standardi SFS 5701)

Köyden nimitys	Poikkipinta mm ²	Langat		Koko köyden nimellisarvoja		
		lukumäärä	halkaisija mm	halkaisija mm	murtokuorma kN	massa kg/km
St 25	24,7	7	2,12	6,36	32,1	194
St 33	32,7	7	2,44	7,32	42,6	247
St 40	39,5	7	2,68	8,04	51,3	310
St 52	52,2	7	3,08	9,24	67,8	410
St 67	67,1	19	2,12	10,6	87,2	530
St 107	107	19	2,68	13,4	139	850
St 142	142	19	3,08	15,4	184	1120
St 185	185	19	3,52	17,6	240	1470

2.2.4 Perustus

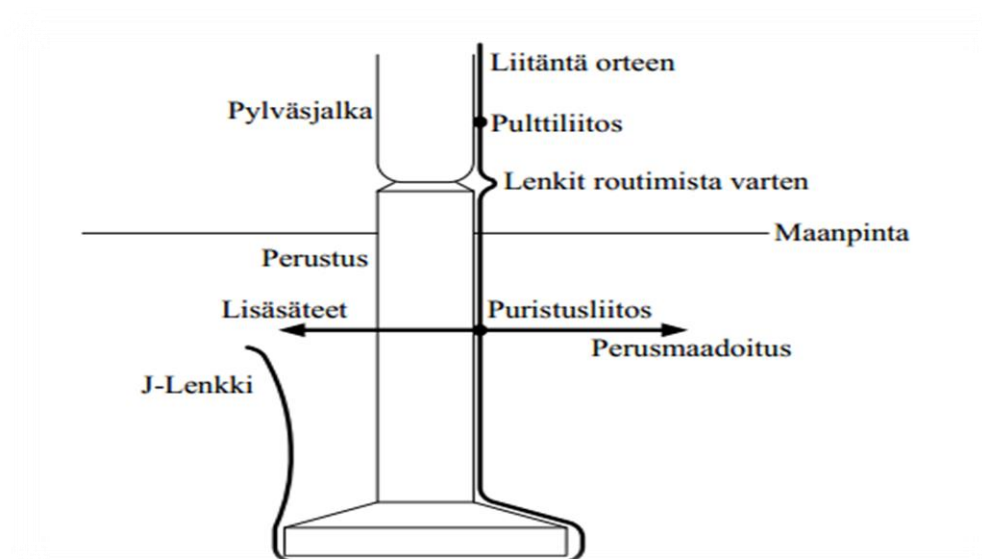
Perustusten tehtävänä on siirtää pylväsrakenteeseen kohdistuvat voimat maahan. 110 kV johdoilla käytetään jo yleisesti erillistä perustusrakennetta. Erillinen perustus tehdään tavallisimmin teräsbetonista. (Elovaara ja Laiho 2007)

2.2.5 Maadoitusjohdin

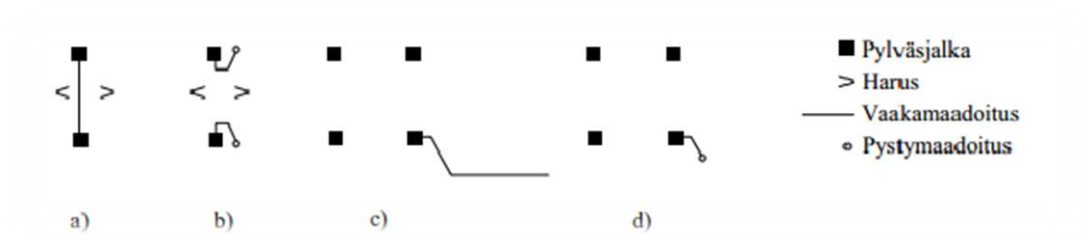
110 kV pylväät maadoitetaan lähes aina Suomessa. Pylväismaadoitusten tehtävänä on:

- pienentää pylvään potentiaalia siten, että pylväaseen tai ukkosjohtimeen osunut salamanisku ei aiheuta takaiskua ja näin vähentää ukkoshäiriöiden määrää
- mahdollistaa ukkosjohtimettomalla johdolla maasulkusuojauksen toiminta ja parantaa sen toimintaherkkyyttä ukkojohtimellisella johdolla sekä
- pienentää vaarajännitteitä pylvään ympäristössä.

Pylväsmaadoitus koostuu pylvään perusmaadoituksesta ja mahdollisista lisämaadoituksista. Perusmaadoitus tehdään vähimmäistoimenpiteenä lähes kaikille pylväille, lisämaadoituksia tehdään tarpeen mukaan. Perusmaadoitukseen kuuluvat porttipylväillä perustukset, niiden alle sijoitettavat J-lenkit, harukset sekä harusankkurit ja pylvään jalat yhdistävä kupariköysi. Perusmaadoitukset voidaan korvata tekemällä kummallekin jalalle oma pystymaadoitus. Vapaasti seisovilla pylväillä perusmaadoitus koostuu yhdestä säteittäismaadoituksesta tai pystymaadoituksesta. Perusmaadoituksen maadoitusresistanssia kutsutaan luonnolliseksi maadoitusresistanssiksi. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen esimerkki porttipylvään perustukseen liitettävistä maadoituksista ja kuvassa 6 esimerkkejä erilaisten pylväiden perusmaadoituksista. (Elovaara Laiho, 2007)



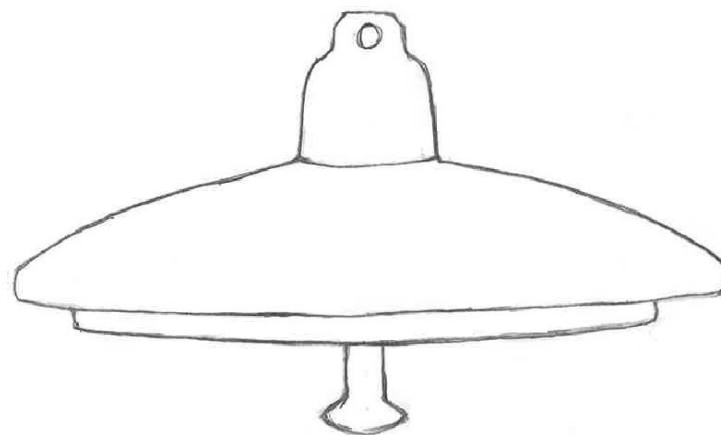
KUVIO 5. Perustukseen liitettävät maadoitukset



KUVIO 6. Pylväiden perusmaadoituksia: a) porttipylväs vaakamaadoituksella, b) porttipylväs pystymaadoituksella, c) vapaasti seisova pylväs vaakamaadoituksella ja d) vapaasti seisova pylväs pystymaadoituksella (Aro ym. 1996)

2.3 Eristimet

Avojohtin kiinnitetään aina pylvääseen eristimen avulla. Eristin kiinnitetään orteen. Eristimien valmistusmateriaaleina on perinteisesti käytetty posliinia tai lasia. Eristimiä tarvitaan kaasumaisen eristeen yhteydessä tukemaan jännitteisiä osia niin, että niiden etäisyydet maadoitettuihin osiin ja muihin jännitteellisiin osiin säilyvät riittävinä. Suurjänniteajojohtojen eristimet ovat riippueristimiä.



KUVIO 7. Suurjänniteavojohdon lautaseristin

2.3.1 Lasieristimet

Yleisimmin käytetyt eristinmateriaalit ovat lasi ja keraamiset aineet. Lasia käytetään varsinkin lautaseristinyksiköiden valmistuksessa. Lasin ja keraamisten aineiden ongelmana on niiden alhainen vetolujuus verrattuna puristuslujuuteen. Rakenteet suunnitellaankin niin, että vetorasitus saadaan muotoilun avulla muutettua puristusrasitukseksi. (Aro ym. 1997)

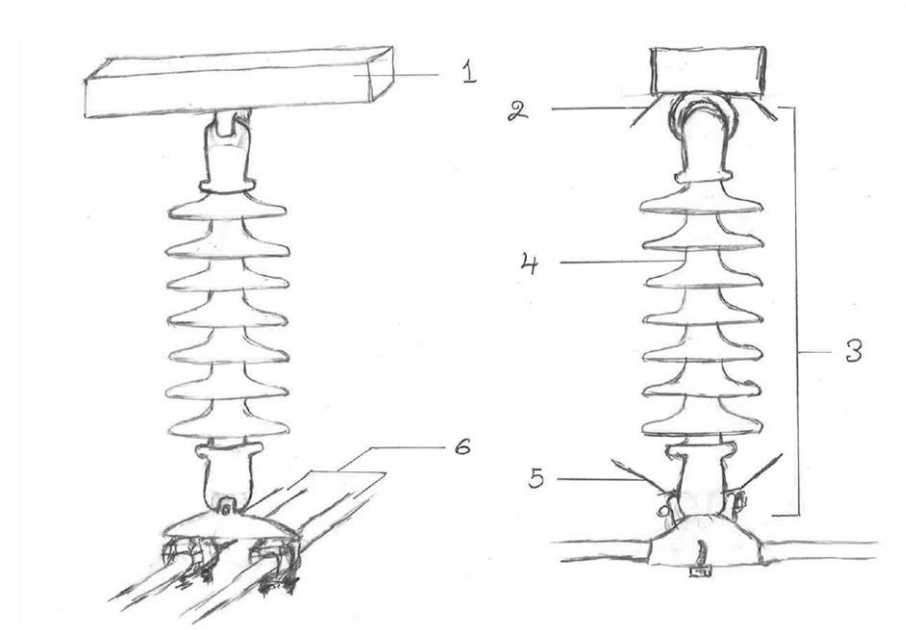
Nykyisten lasieristinten pääasiallinen valmistusaine on karkaistu lasi. Karkaisulla saavutetaan suurempi mekaaninen lujuus, jolloin voidaan tehdä ohuempia rakenteita. Lasieristimen pinnassa vaikuttava puristus muuttuu karkaisun ansiosta sisäosissa jännitykseksi.

Huolimatta karkaisusta jää eristimen pinnalle kuitenkin mikroskooppisen pieniä halkeamia, jotka voivat riittävästi laajennuttuaan edetä lasin läpi. Lasilla ei nimittäin ole pitkälle järjestäytynyttä kiderakennetta. Tämä lasieristimen pirstoutuminen voi aiheutua käytössä tai käsiteltäessä, mekaanisesta iskusta tai likaantuneen eristimen pintavirran aiheuttamasta eroosiosta. Pirstoutuminen on yleisempää tasavirralla kuin vaihtovirralla.

Eristinkomponentit kiinnitetään muuhun rakenteeseen usein metallisten osien välityksellä. Johtuen lasin ja metallin samantapaisista lämpölaajenemisominaisuuksista, lämpötilan vaihtelu ei aiheuta lasieristimille samanlaisia ongelmia kuin esimerkiksi posliinista valmistetuille eristimille.

2.3.2 Riippueristin

Suomessa suurjännitejohdoilla käytettävät eristimet ovat yleensä rakenteeltaan riippueristimiä. Yleisimmin käytetty riippueristin on kappa- eli lautaseristin. Suurjännitejohdoilla käytetään yleensä useasta lautaseristimestä koottua eristinketjua.



KUVIO 8. Riippueristinrakenne: 1) orsi 2) yläsuojasarvi 3) eristinketju 4) lautaeristimet 5) alasuojasarvi 6) nippujohdin

Suojasarvien tehtävä on ohjata salamaniskun yhteydessä ylilyönti riittävän etäälle eristinketjusta. Alasuojasarven tehtävänä on myös tasata jänniterasitusta eristinketjun eristimien välillä.

Likaisiin oloihin valmistetaan ns. sumueristimiä, joilla on pidempi pintamatka kuin tavallisilla lautaeristimillä. Sauvaeristimet ovat massiivia riippueristimiä, mutta niiden käyttö on harvinaista Suomessa. Massiivisten riippueristimien etuna on niiden läpilyöntikestoisuus, haittana kalliin hinnan lisäksi se, että eristimen rikkoutuminen johtaa koko ketjun katkeamisen. (Elovaara ja Laiho 2007)

Käytettävät eristinketjut koostuvat lasisista eristinyksiköistä (lautaset), suojasarvista sekä muista eristinvarusteista. Eristinketjun pituus on riippuvainen jännitetasosta, käytettävästä eristinyksikön tyypistä sekä eristimen toimintatavasta.

Avojohtojen eristeenä toimii ilma. Tämän lisäksi avojohtojen eristeenä käytetään yksittäisistä eristinlautasista muodostettavaa eristinketjua. Eristinketjun lautaset voivat olla materiaaliltaan joko posliinia tai lasia. Nykyään käytetään yksinomaan lasisia eristinlautasia mm. niiden rikkoutumisen helpomman havaittavuuden vuoksi. Eristimien avulla jännitteiset johtimet saadaan erotettua maahan yhteydessä olevista pylvään rakenneosista. Eristinketjujen pituus riippuu käytettävästä jännitetasosta, mitä suurempi jännitetaso, sitä pidempi ketju ja sitä useampi eristinlautanen.

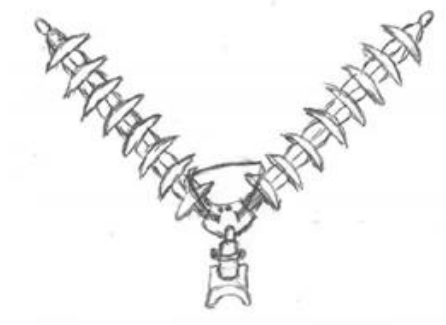
110...400 kV johton jännitteen voi tunnistaa eristinketjun pituudesta ja eristinlautasten lukumäärästä.

TAULUKKO 2. Suurjänniteavojohtojen eristimet (Fingrid 2014)

Johdon jännite	Eristinketjun pituus	Eristinlautasten lukumäärä
110 kV	noin 1 metri	6 – 8
220 kV	noin 2 metri	10 – 12
400 kV	noin 4 metri	18 – 24

Suoran eristinketjun (I-ketju) ohella käytetään V-ketjua. Se tarjoaa useita etuja. V-ketju on turvallisempi johdinputoamaa ajatellen. Johdon tarvitseman johtokadun leveys on pienempi. Pylväsrakenne on kapeampi, koska ketjuheilahdusta ei tarvitse ottaa huomioon. Kaltevassa asennossa olevat eristimet ovat tietyssä määrin itsepuhdistuvia. (Aro ym. 1996)

Eristinketjujen pituus ja samalla myös pintamatka voidaan V-ketjussa valita paljon vapaammin, sillä lyhin ylilyöntitie V-ketjun yli voi olla noin 40 % suurempi kuin I-ketjulla, kun johtimen ja orren välinen etäisyys on molemmissa sama. (Aro ym. 1996)

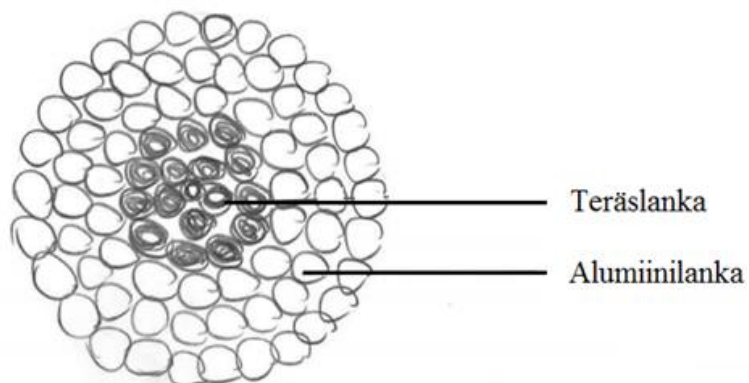


KUVIO 9. V-eristinketju

2.4 Virtajohdin

2.4.1 Avojohtin

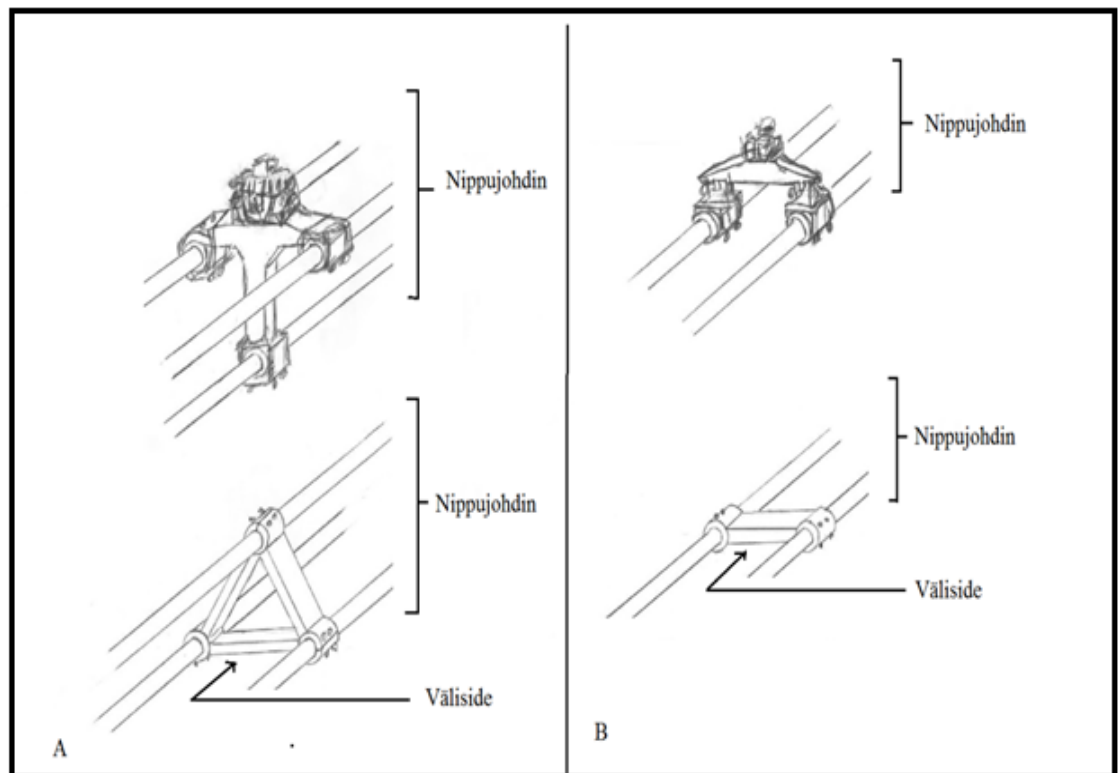
Teräsvahvisteisessa avojohtimessa sähkövirtaa johtavat alumiinilangat on kerrattu vetorasituksen kohteeksi johtuvien teräslankojen ympärille.



KUVIO 10 Teräsvahvisteinen alumiinijohdin

2.4.2 Nippujohdin

Suurjänniteavojohdolla käytetään koronahäviöiden rajoittamiseksi nippujohtimia. Nippujohdin muodostuu kahdesta tai useammasta samaan vaiheeseen kuuluvasta osajohtimesta, jotka kytketään mekaanisesti toisiinsa erityisillä sidoksilla, välisiteillä. Nippujohtimen käytöllä myös johdon reaktanssi pienenee, mikä parantaa johdon siirtokykyä.



KUVIO 11. Nippujohdin A) kolme osajohdinta B) kaksi osajohdinta

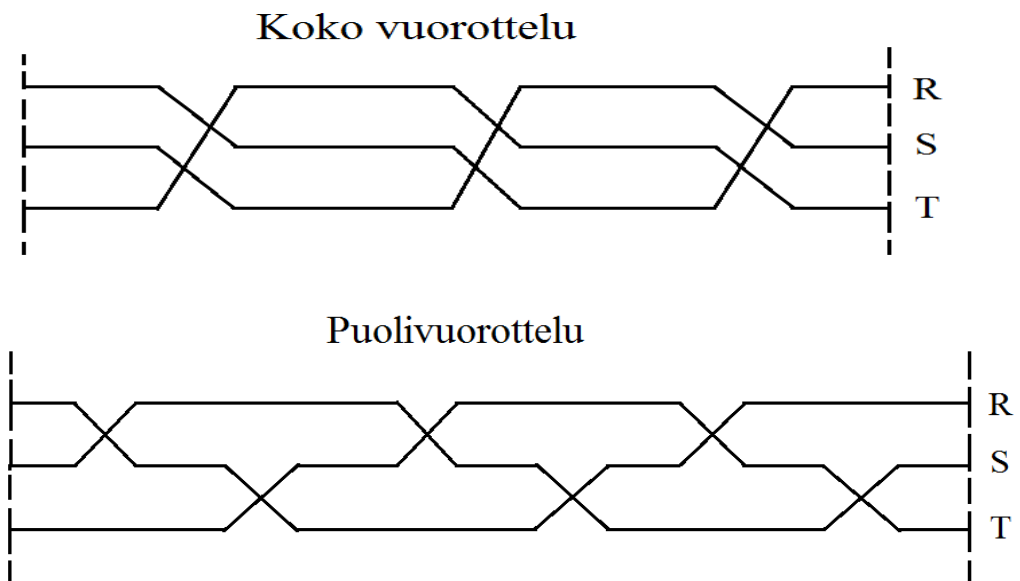
2.4.3 Välisiteet

Välisiteiden tarkoituksena on pitää etäisyys osajohtimien välillä vakiona. Välisiteitä käytetään yleensä 50 metrin välein, mikä johtaa 20 välisiteeseen kilometriä kohden.

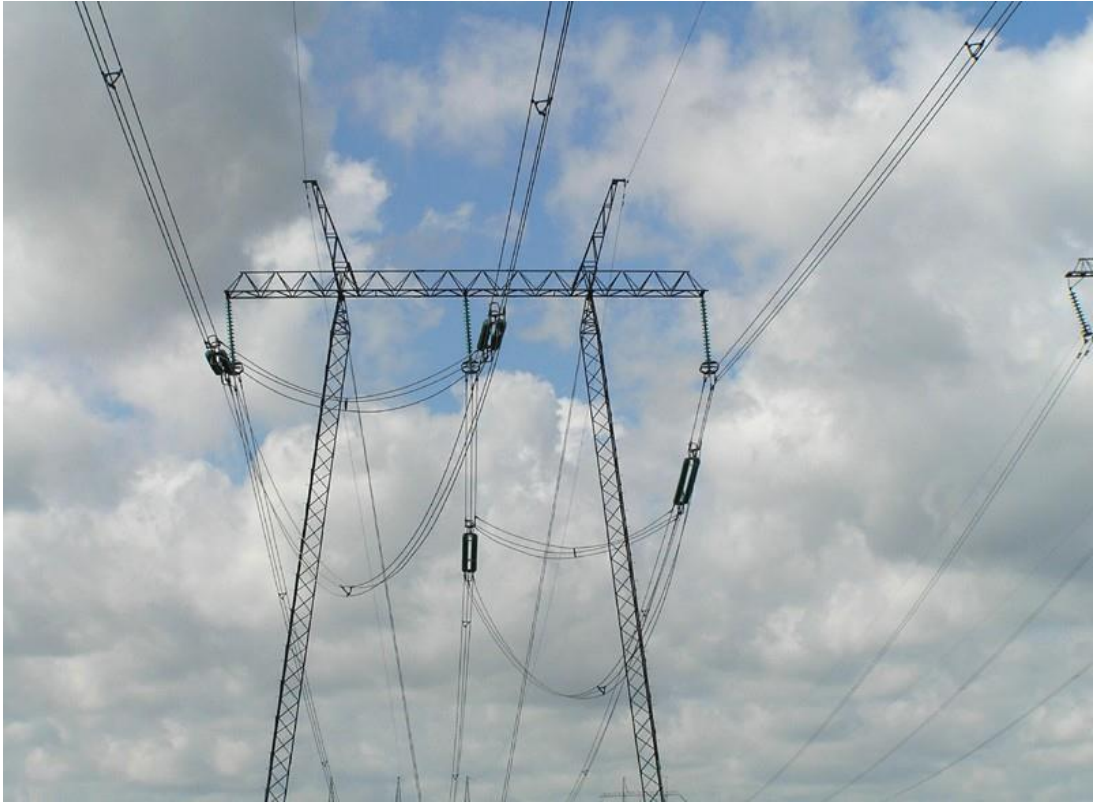
2.4.4 Johdon vuorottelu

Mikäli vaihejohtimia ei ole sijoitettu kolmiomaisesti yhtä etäälle toisistaan, on ääri- ja keskivaiheiden reaktanssi erilainen kuin keskivaiheen. Vastaavasti esim. porttijohdolla ääri- ja keskivaiheiden kapasitanssit poikkeavat toisistaan. Kapasitanssiero vain korostuu, jos vaihejohtimet sijaitsevat pystysuunnassa eri tasoissa. Epäsymmetrian seurauksena kulkee osin maassa, osin ukkosjohtimissa epäsymmetriavirta, joka aiheuttaa mm. puhelinhäiriöitä. (Elovaara ja Laiho, 2007)

Symmetrian saavuttamiseksi johdolle järjestetään vuorottelut. Nyrkkisääntönä esim. 110 kV johdoille on, että kaikille 10...15 km pituuden ylittävälle johdolle on järjestettävä täysivuorottelu, ts. kukin vaihe on keskellä yhtä pitkän matkan. Lyhyemmillä johdoilla vaihejärjestys järjestetään niin, että muista alueen johdoista aiheutuva epäsymmetria pienenee. Keskijännitevaihejohdoilla vuorottelua ei juuri käytetä, sillä ko. johdoissa resistanssia on paljon merkittävämpi reaktanssiin nähden kuin suuremmilla jännitteillä. Lisäksi kolmioasennus on usein muutenkin käytössä, jolloin reaktanssiepäsymmetriaa ei tule.



KUVIO 12. Eräitä vuorottelun toteuttamismahdollisuuksia. (Elovaara ja Laiho, 2007)



KUVA 13. Suurjänniteavojohdon vuorottelupylväs (Toivonen 2007)

3 SUURJÄNNITEAVOJOHDON RAKENTAMINEN

3.1 Avojohtojen mekaaninen lujuus

Lähtökohtana johtimien mekaaniselle mitoitukselle on johtimille sallittu suurin vetorasitus. Se on 65.. 80 % murtojännityksestä, jos köysi on yksinkertainen. Kaksinkertaiselle köydelle (terasalumiiniköysi) suurin sallittu vetorasitus on 55 % murtojännityksestä. Ilmajohtojen mitoitus tapahtuu normaalien lujuusopin sääntöjen mukaan. Mitoitusperusteena ovat ns. sää- ja kuormatilat. Minkään näiden aikana ei johtimien suurin sallittu vetorasitus saa ylittyä.

Mitoitussäätilat ovat ilmajohtomääräyksien mukaan:

- nollasää lämpötila $t = 0\text{ °C}$
- asennussää lämpötila $t = -20\text{ °C}$
- helle, virrattoman johtimen tai osan lämpötila $t = + 40\text{ °C}$ ja virtajohtimen lämpötila $t = +50\text{ °C}$ tai $+70\text{ °C}$
- pakkanen, lämpötila $t = - 40\text{ °C}$

Kuormatiloja ovat vastaavasti:

- tuulikuorma: johtimet jäättömät, lämpötila -20 °C , johtimiin kohdistuva tuulenpaine 250 N/m^2
- jääkuorma: tyven, lämpötila 0 °C , johtimeen vaikuttaa sen halkaisijasta ja johdon rakenteesta riippuva pystysuora, jään tai lumen aiheuttama voima $12,5...25\text{ N/m}^2$ (yli 200 m korkeudessa enemmän).

Kahden pylvään väliin ripustettu johdin ei koskaan ole suora, vaan siinä on riippumaa. Matemaattisesti tätä riippuman muodostamaa kaarta voidaan mallintaa riittävän tarkasti paraabelilla. (Elovaara ja Laiho, 2007)



KUVIO 14. Työmaakuva pylvään asennuksesta

Riippuman suuruus riippuu pylväsvälin pituudesta, johtimien kiristyksestä, ja lämpötilasta. Suuren riippuman käyttö pitää köysivoimat pieninä, mikä taas pienentää köysien katkeamisvaaraa. Helteellä riippuma voi kuitenkin kasvaa niin suureksi, että johtimet voivat heiluessaan osua toisiinsa. Tämä taas pakottaa suuriin vaiheväleihin. Suuren riippuman käyttö pakottaa toisaalta pitkien pylväiden käyttöön, mikä nostaa johdon rakentamiskustannuksia. Jos käytetään pientä riippumaa, tulevat johdinvälit ja pylväspituudet pieniksi. Tällöin on vaarana sallittujen köysivoimien ylittyminen pakkasella tai jääkuormalla.

Taloudellisesti on edullista käyttää niin pientä riippumaa, että johdon lujuusvaatimukset tulevat juuri ja juuri täytetyiksi. Johdonrakennustöitä varten on eri johtolajeille laskettu ns. riippumataulukkoja, joista saadaan johdolle sopiva riippuma ja köysivoima, kun pylväsväli ja asennushetken lämpötila tunnetaan. (Elovaara ja Laiho, 2007)

Jänteen pituutena kiristysvälillä käytetään ns. ekvivalenttista jännettä, joka saadaan kaavalla:

$$s_e = \sqrt{\frac{s_1^3}{s_1} + \frac{s_2^3}{s_2} + \dots + \frac{s_n^3}{s_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n s_i^3}{\sum_{i=1}^n s_i}} \quad (2)$$

missä s_e = ekvivalenttijänteen pituus ja $s_1 \dots s_n$ = kiristysvälin kunkin jänteen pituus.

Kahden pylvään väliä ei voida tehdä miten pitkäksi tahansa. Suurimman teoreettisen jännevälin eli rajajänteen määräävät nollasään jännitys ja jääkuorma. Pylväiden mitoituksessa on pylvään nurjahdus yleensä määräävä mitoitusperuste. Pylväiden mitoitukseen kaksi perusmenetelmää ovat:

- sallittujen jännitysten menetelmä
- kriittisten kuormitusten menetelmä.

SLY:n verkostosuorituksissa on johtostandardisivuilla annettu valmiiksi ne kutakin pylväspituutta vastaavat pylväsluokat, jotka täyttävät em. mitoitusvaatimukset.

On huomattava, että varmennetun johdon lujuuslaskuissa on otettava huomioon se köysivoima, joka aiheutuu siitä, että johdin katkeaa viereisessä jännitteessä. (Elovaara ja Laiho, 2007)

3.2 Varmennettu johto

Avojohdot voidaan rakentaa joko tavallisiksi tai varmennetuiksi johdoiksi. Myös tavallisen johdon johto-osa voidaan rakentaa varmennetuksi. Varmennaminen suoritetaan ensisijaisesti turvallisuussyistä, mikä merkitsee sitä, että varmennetun johdon ja sen pylväiden, perustusten sekä eristimien tulee kestää ankarammat mekaaniset ja sähköiset rasitukset kuin tavallisen johdon tapauksessa. Varmennetun johdon on kestävä mm. tavallista ankarammat jääkuormat, eikä yhden johtimen katkeaminen saa aiheuttaa tällaisessa johdossa tai sen pylväässä sallittujen jännitysten ylittymistä. (Aro 1996)

Jos ilmajohdon johtimien putoamisesta tai pylväiden kaatumisesta aiheutuu tavallista suurempi vaara, on johto rakennettava varmennettuna. Varmennetun johdon mekaaniset ja sähköiset lujuusvaatimukset ovat suuremmat kuin tavallisella johdolla. Johto on rakennettava varmennetuksi, jos suurjänniteavojohdon vaakasuora etäisyys on alle 5 metriä + jännitelisä a :

- rakennuksesta tai varastosta (lukuun ottamatta toisarvoista varastoa)
- rautatiekiskosta tai yleisen tien reunasta.
- toisesta suurjännitejohdosta, jos kyseessä on ≥ 110 kV avojohto
- pienjännite-, heikkovirta- tai mekaanisesta ilmajohdosta.

Yhteispylväsrakennetta käytettäessä ylempänä oleva johto on rakennettava varmennettuna. (Aro 1996)

TAULUKKO 3. Jännitelisä a eri jännitteillä. U_m on verkon suurin sallittu käyttöjännite, U_N on verkon nimellijännite, a on jännitelisää.

U_m/kV	123	245	420
U_N/kV	110	220	400
a/m	0,9 ¹⁾	1,5 ¹⁾	2,9 ¹⁾ ... 3,4

1) myös eräät muut arvot ovat mahdollisia

4 SUURJÄNNITEKAAPELIT JA NIIDEN VARUSTEET

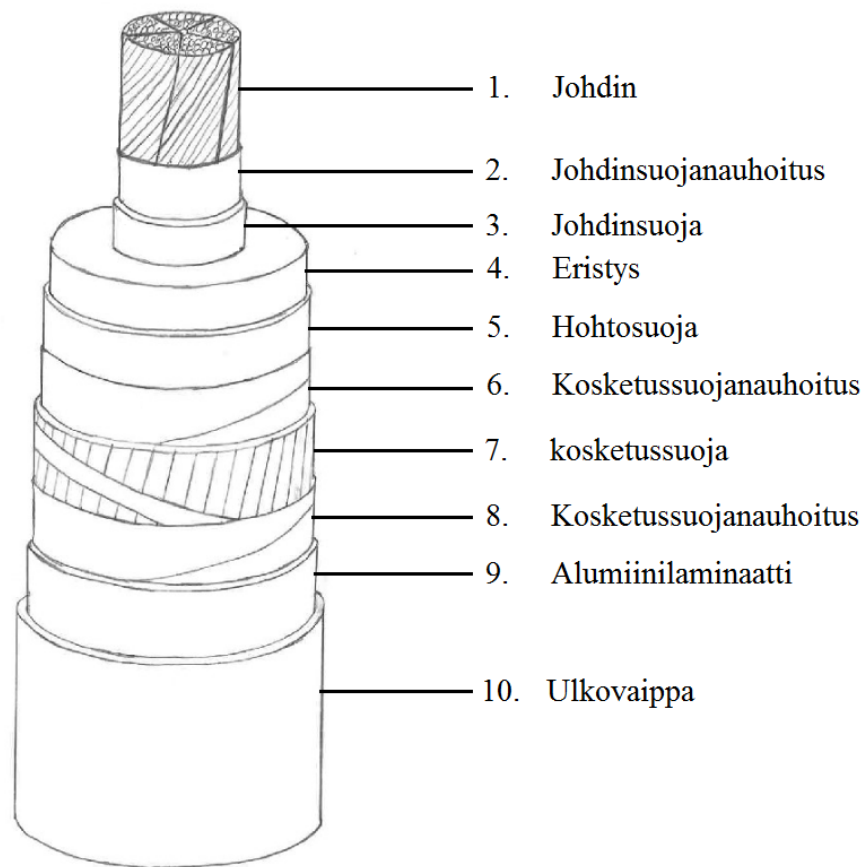
4.1 Suurjännitekaapelit

Suurjännitekaapelilla tarkoitetaan yhden tai useamman eristetyn johtimen muodostamaa johdin ryhmää suojauksineen. Kaapelin nimellisjännite ilmoitetaan muodossa $U_o / U_m / U$, jossa U_o tarkoittaa johtimen ja maapotentiaalin välistä nimellisjännitettä, U pääjännitettä eli johtimien välistä jännitettä ja U_m sähköverkon suurinta käyttöjännitettä. Suurimmilla jännitteillä kaapelit ovat hohtosuojattuja alumiinikaapeleita. Kaapeliyhteys koostuu kolmesta yksijohdinkaapelista. (Elovaara ja Laiho 2007).

4.2 Suurjännite maakaapelin rakenne

Kaikkien suurjännitekaapelin rakenteeseen ja mitoitukseen vaikuttavat mm. tehonsiirtotarve, käytetty jännitetaso, siirrossa syntyvät tehohäviöt, ympäristö- ja asennusolosuhteet sekä sähköverkon vikavirtojen suuruus. Eri maissa käytössä olevat standardit ja käytännöt määrittelevät myös omat vaatimuksensa kaapelin rakenteelle ja mitoitukselle. Suurjännitekaapeli koostuu useasta rakenneosasta. Johtimen ja eristyksen lisäksi kaapeli sisältää myös johdin- ja hohtosuojan, kosketussuojan sekä ulkovaipan. (Anders 1997)

Suuren sähkötehon siirtäminen vaatii joko suurta virtaa tai suurta jännitettä. Suuri virranvoimakkuus vaatii suurta johdin poikkipintaa, ja suuri jännite puolestaan riittävän paksua ja hyvälaatuista eristystä. Johdinpoikkipinta ei saisi kuitenkaan olla liian suuri, sillä se lisää kaapelin painoa ja ulkohalkaisijaa, jotka puolestaan hankaloittavat kaapelin valmistusta, kuljetusta ja asentamista. (Alatalo 1975)



KUVA 15. Suurjännitekaapelin rakenne

4.2.1 Johdin

kaapeleissa johdinmateriaalina käytetään joko kuparia tai alumiinia. Kuparin sähkönjohtavuus on alumiinia parempi, minkä vuoksi sillä saavutetaan pienempi resistanssi ja johtimen koko. Kuparilla on myös parempi korroosion kesto kuin alumiinilla. Kupari on kuitenkin alumiinia painavampaa ja noin 50 % kalliimpaa, minkä vuoksi alumiinin käyttö johdinmateriaalina on yleistynyt. Niinpä suurjännitekaapelit ovat nykyisin alumiinikaapeleita. Suurjännitekaapeleilla johtimen koko on tyypillisesti $150 \dots 2500 \text{ mm}^2$ kuormitettavuusvaatimusten mukaan. (Anders 1997)

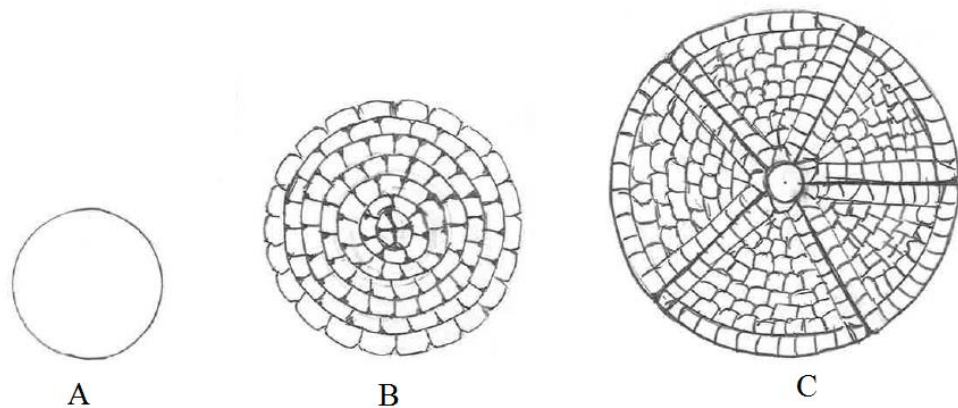
TAULUKKO 4. Kuparin ja alumiinin sähköisiä ominaisuuksia (Laasonen)

Ominaisuus	Kupari	Alumiini
Sähköjohtavuus [$1/(\Omega\text{m})$]	$59,526 \times 10^6$	$37,7 \times 10^6$
Lämpötilakerroin [$1/\text{K}$]	$3,9 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}
Tiheys [kg/dm^3]	8,96	2.7

Johdin voi olla tehty yhdestä tai useammasta langasta. Yksilankaista johdinta nimitetään solidijohtimeksi. Pienen solidijohtimen valmistaminen on yksinkertaista, mutta suurilla poikkipinnoilla sen valmistus hankaloituu ja siitä tulee turhan jäykkä asennuksen kannalta. Pieniä (n. $25 \dots 300 \text{ mm}^2$) solidijohtimia käytetään mm. vesistökaapeleissa johtimen vesitiiviyyden vuoksi.

Tilankäytön parantamiseksi langoista kerratut johtimet voidaan tiivistää valssaamalla. Tästä syystä johtimen koolla ei tarkoiteta sen geometrista, vaan sähköistä poikkipinta-alaa, joka määritetään sallitun resistanssin avulla.

Suurjännitekaapelin johtimet yleensä valmistetaan valssaamalla. Suuret johdinpoikkipinnat voidaan valmistaa sektorin muotoisista lohkoista, jotka ovat toisistaan eristettyjä. Tällä ns. Milliken-tekniikalla vaihtovirrasta aiheutuva virranahto pienenee johtimessa ja virta jakautuu johtimen poikkipinnalle tasaisemmin pienentäen vaihtovirtaresistanssia ja parantaen kaapelin kuormitettavuutta. Milliken-johtimia valmistetaan yleensä $1\,000 \text{ mm}^2$ ja sitä suuremmille kupari poikkipinnoille (kuva 13). (Anders 1997, Aro 1996)



KUVIO 16. Johdinrakenteet: A) Yksilankainen solidijohdin B) Useammasta langasta kerrattu ja valssaamalla tiivistetty johdin C) Sektorirakenteinen Milliken-johdin.

4.2.2 Johdinsuoja ja johdinsuojanauha

Johdinsuoja on puolijohtavasta muovista puristettu kerros johtimen ja eristyksen välissä. Sen tarkoitus on tasoittaa johtimen ulkopinta ja pienentää johtimen aiheuttamia kentänvoimakkuushuippuja eristyksen rajapinnalla. Suurilla johdinpoikkipinnoilla voidaan johdinsuojan alla käyttää puolijohtavaa nauhakerrosta, jonka tarkoituksena on estää johdinsuojamuovin tunkeutuminen johtimen pintalankojen väliin. (Alatalo 1975)

4.2.3 Eristys

Eristyksen tarkoitus on eristää johdin sähköisesti maapotentiaalista ja toisista johtimista. Ilmajohdoasennuksissa johtimen ympärillä oleva ilma toimii eristyksenä, joten ilmajohdon rakenne on yksinkertaisempi kuin kaapeleilla. Suurjännitekaapeleiden eristysmateriaaleina käytetään yleensä ristikuitoitettua polyeteeniä (PEX). (Alatalo 1975, Prysmian 2014)

Eristyksen paksuus määrittyy kaapelin käyttöjännitteen perusteella. Eristysmateriaalin tulisi olla puhdasta ja eristuspintojen mahdollisimman tasaiset, jotta kaapelin käyttöaika olisi riittävän pitkä. Eristyksen nimellispaksuudet on annettu 6 - 30 kV nimellisjännitteisille kaapeleille standardissa IEC 60502-2, mutta suuremmille jännitteille kansainvälisissä standardeissa ei määritellä eristyspaksuuksia. Yli 30 kV kaapeleille eristyspaksuuden määrittää kansallinen standardi, asiakas tai kaapelivalmistaja. (Prysmian)

Eristysmateriaali vaikuttaa myös kaapelin kuormitettavuuteen. Termisesti ajateltuna hyvällä eristysmateriaalilla tulisi olla hyvä lämmönkestoisuus, matala lämpöresistiivisyys ja pienet dielektriset häviöt. PEX on hyvä eristysmateriaali, sillä se kestää 90 °C jatkuvaa käyttölämpötilaa ja sen lämpöresistiivisyys on vain 3,5 Km/W. (Anders 1997)

4.2.4 Hohtosuoja

Suurjännitekaapeleissa eristyksen päällä on puolijohtavasta muovista puristettu hohtosuoja, jonka tarkoituksena on tasata eristyskerroksen ulkopinta. Hohtosuojalla ja johdinsuojalla pidetään eristeeseen syntyvä sähkökenttä kahden sylinteripinnan välissä. (Aro 1996)

Eristyksen sisällä vaikuttava radiaalinen kentänvoimakkuus:

$$E_r = \frac{U_o}{r \ln \frac{r_u}{r_s}} \quad (3)$$

missä

U_o = johtimen ja maapotentiaalin välinen jännite

r = etäisyys johtimen keskiakselilta

r_u = eristeen ulkopinnan säde

r_s = eristeen sisäpinnan säde.

Yhtälöstä 1 nähdään, että kentänvoimakkuus on suurimmillaan eristyksen sisäpinnalla. Suurjännitteellä on huomioitava, että kaapelin nimellisjännitteen kasvaessa myös kentänvoimakkuus eristyksessä nousee. Nimellisjännitteen kasvun myötä eristyksen paksuutta tai johtimen poikkipintaa on lisättävä, jotta kentänvoimakkuuden arvot pysyvät kaapelistandardeissa vaadittujen tyyppikokeiden sallimien rajojen sisäpuolella. (Aro 1996)

4.2.5 Kosketussuoja

Kaapelin kosketussuojan tehtävänä on maadoittaa käytönaikaiset varaus- ja vikavirrat. Se on turvallisuussyistä maadoitettava vähintään kaapelireitin yhdestä kohdasta. Kosketussuojana on suositeltavaa käyttää epämagneettista ja korroosion kestävästä materiaalia. Kosketussuojana voi toimia esimerkiksi kaapelin metallinen vaippa, metalliset langat ja nauhat tai näiden yhdistelmä. (Anders 1997)

Kosketussuojan poikkipinta määräytyy 1-vaiheisen oikosulkuvirran mukaan. Suurjänniteverkossa on usein käyttömaadoitettu tähtipiste, jolloin verkossa syntyvä 1-vaiheinen oikosulkuvirta voi olla lähes 3-vaiheisen oikosulkuvirran suuruinen. Kosketussuoja tuleekin mitoittaa niin, että se vikatilanteessa pystyy maadoittamaan oikosulun hallitusti. Tarvittaessa kaapelin kosketussuojan poikkipintaa voidaan kasvattaa esimerkiksi lisäämällä metallilankojen lukumäärää tai paksuntamalla metallivaippaa. (Anders 1997)

Metallilankoina käytetään yleensä kuparia tai muuta hyvin johtavaa materiaalia.

Metallivaippa voidaan valmistaa alumiinista tai lyijystä, joka puristetaan yhtenäiseksi kerrokseksi kaapelin ympärille. Vaihtoehtoisesti yhtenäisenä metallikerroksena voidaan käyttää myös kupari- tai alumiinilaminaattia. Laminaatin pinnalle on kiinnitetty ohut muovikalvo, jonka avulla se saadaan valmistusvaiheessa

kiinnittymään tiukasti ulkovaippaan. Näin laminaatti kestää paremmin asennuksen aikaista taivutusta ja vetoa.

Sekä metallivaippa että -laminaatti muodostavat kaapelille vesitiiviin kerroksen. Keski- ja suurjännitekaapelille poikittainen vesitiiviys on tärkeä ominaisuus, sillä kaapelin eristykseen pääsevä kosteus heikentää eristyksen jännitekestoisuutta. Pelkän muovivaipan läpi vesi etenee diffuusion avulla. (Anders 1997)

4.2.6 Ulkovaippa ja armeeraus

Kaapelin ulkovaippa suojaa kaapelia mekaanisilta rasituksilta asennuksen ja käytön aikana. Ulkovaippa suojaa myös metallilaminaattia tai -vaippaa korroosiolta sekä erottaa sen sähköisesti maapotentiaalista estäen kosketussuojan hallitsemattomat maadoitukset.

Suurjännitekaapelin ulkovaippa valmistetaan useimmiten säänkestävästä polyeteenimuovista (PE) tai polivinyylidikloridimuovista (PVC). PE kestää paremmin mekaanista rasitusta ja korkeampia lämpötiloja. PVC:llä puolestaan on paremmat palonkesto-ominaisuudet, mutta suurempi lämpöresistiivisyys. Klooriyhdisteiden palaessa syntyy myrkkyjä. (Alatalo 1975)

Kaapelin mekaanista lujuutta voidaan parantaa armeerauksella, joka on valmistettu mekaanisesti lujasta materiaalista, kuten sinkityistä teräspyörölangoista. Armeerausta käytetään esim. vesistökaapeleissa. (Alatalo 1975)

5 SUURJÄNNITEKAAPELIEN ASENNUS



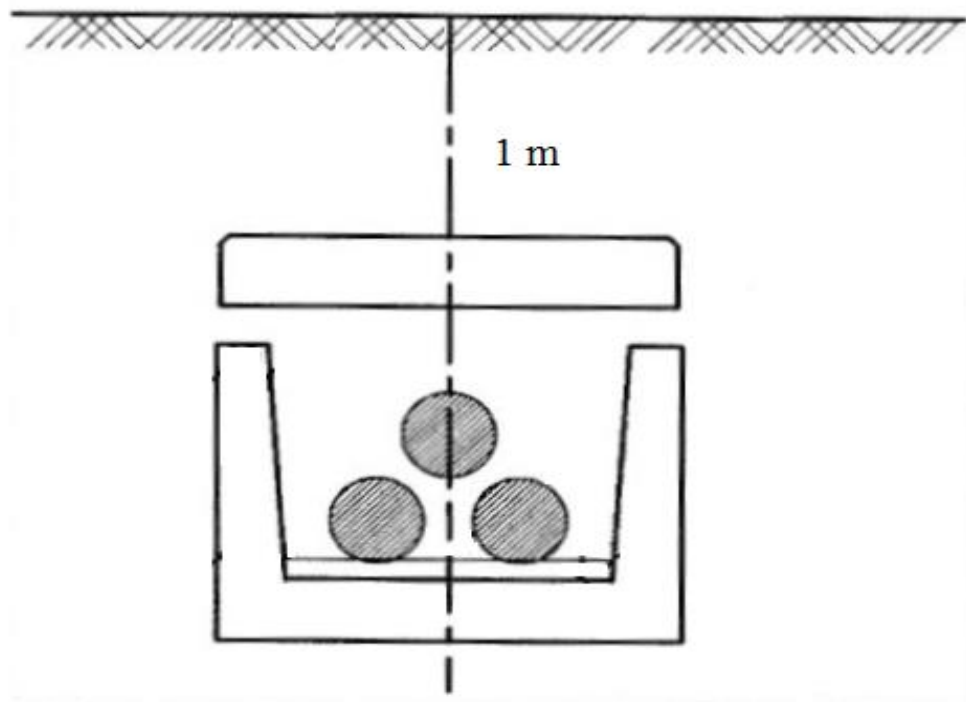
KUVA 17. Työmaakuva 110 kV maakaapelin asennuksesta. (Salmela)

5.1 Kaapelien mekaaninen suojaus

Suurjännitekaapeleita asennetaan maahan ja kaapelihyllylle. Maahan asennettavat kaapelit suojataan mekaanisesti. Mekaaninen suojaus voi vaihtua kesken kaapelireitin toiseksi esimerkiksi, risteysalueella tai tultaessa maastosta tieosuudelle riippuen siitä, kuinka suuri on kaapelin vaurioitumisriski kyseisellä osuudella. Mekaanisen suojaustavan määrittämisen lähtökohtana voi siis tilanteesta riippuen olla myös verkon käyttövarmuus tai tulevat maanrakennustyöt.

5.1.1 Betonielementit

Tässä suojaustavassa ovat käytössä valmiit betonielementit, joiden päälle asennetaan betonikannet. Tämä suojausmenetelmä on kaikkein varmin tapa, sillä kaapelit ovat suojattuna kovalla rakenteella jokaisesta suunnasta. Kaapelien suojaamisella betonielementeillä on tarkoitus parantaa verkon käyttövarmuutta. Betonielementin massa on noin 530 kg.



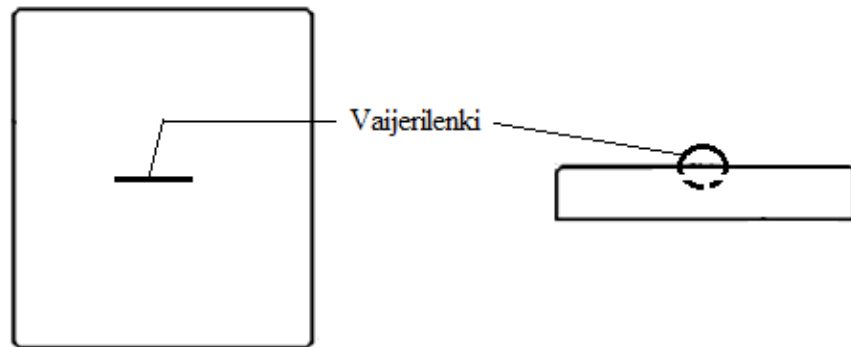
KUVIO 18. Elementti ja kansi



KUVA 19. Elementtejä varastoituna. lähdettä (Suomi 2014) mukaillen

5.1.2 Betonikansi

Kaapeleita ei aina tarvitse laittaa massiiviseen betonielementtiin, vaan sille riittää suojaukseksi pelkkä betonista tehty kansirakenne. Kaapelit asennetaan tällöin maahan suojaputkissa ja peitetään hiekalla, jonka päälle kansi asetetaan. Tällöin on suositeltavaa käyttää suurempaa suojaputken kokoa ja A-luokan suojaputken vahvuutta, koska kaapeli on suojattu vain yläpuolelta tulevilta iskuilta. Yhden betonielementtikannen massa on noin 78 kg, ja kansi pitää sisällään raudoituksen.

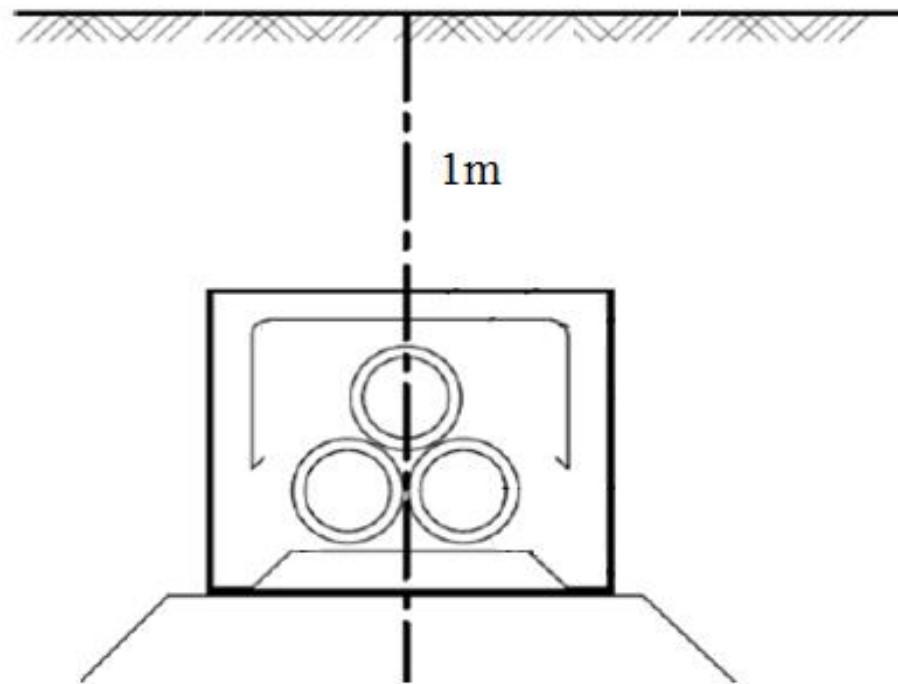


KUVIO 20. Kansielementti (Parviainen 2009)

5.1.3 Anturamuotti

Betonielementit voi korvata myös anturamuoteilla, koska anturamuotit on helpompi asentaa ja niiden siirtely on hidasta betonielementtien siirtelyä nopeampaa. Lisäksi niiden välivarastointi työmaalla vie vähemmän tilaa. Anturamuotit ovat myös kustannustehokkaita ja takaavat silti vastaavanlaisen suojan kuin betonielementit. (Parviainen 2009)

Anturamuotin käytöstä ei kuitenkaan ole vielä riittävästi kokemusta ja sen käyttöön liittyy riskejä, eikä sitä siten erityisemmin suositella käytettäväksi pääasiallisena suojana. Muottiin asennetaan kolmioon kolme putkea, ja muotti valetaan betonilla. Anturamuotit asennetaan samaan syvyyteen kuin betonielementit, ja soramurskeen alle laitetaan koko kaivannon pituudelta suodatinkangasta. Ulkoreunaan tulee olla merkitty näkyvästi suurjännitekaapeli.



KUVIO 21. Anturamuotti (Parviainen 2009)

Anturamuotti on oletuksena 500x400x5000 mm, jossa on raudoitukset reunoilla ja pohjalla. (Parviainen 2009)



KUVIO 22. Työmaakuva anturamuotin asennuksesta. Lähde: (Suomi 2014) mukaillen

5.1.4 Suojaamaton

Alueilla, joissa maanrakennustyöt eivät ole suuri uhka kaapeleille, voidaan mekaaninen suojaus jättää kokonaan pois. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi taajamissa harvaan asutuilla alueilla, joissa uudisrakentaminen on vähäistä.

Kaapelit asennetaan putkissa kaapelikaivantoon ja peitetään hiekalla tai soralla. Kaapelin ainoa suoja on polyeteenistä valmistettu suojaputki, jonka koko kannattaa valita tällaisessa tapauksessa harkinnan mukaan tarpeeksi isoksi. Mekaanisen suojauksen jäädessä pois ei tule lainkaan mekaanisen suojausratkaisun materiaali- ja asennuskustannuksia, ja kaapelireitin kokonaishinta on tällöin edullisempi.

Suojaputkien halkaisijalla voidaan vaikuttaa kaapelin vioittumisriskiin. Mitä suurempi suojaputken halkaisija on, sitä enemmän se voi painua sisäänpäin, ja näin kaapelin vioittumisriski pienenee. Suojaputket on valmistettu polyeteenistä, joka on kestävä alhaisissakin lämpötiloissa, kevytrakenteista ja joustavaa käsitellä. Lisäksi polyeteeni on kuormitettavuuden kannalta parempi vaihtoehto kuin polivinyylidikloridi.

Suojaputket on jaoteltu rengasjäykkyyden ja iskulujuuden perusteella kahteen lujuusluokkaan. A-luokan putket ovat raskaan käytön suojaputkia ja B-luokan putket taas keskiraskaan käytön suojaputkia. Niiden käyttö riippuu tilanteista, esimerkiksi B-luokan putkia ei käytetä raskaan liikenteen alueilla. Suojaputken värinä käytetään keltaista, mutta vanhemmissa asennuksissa on käytetty mustaa väriä. (Uponor 2013)

5.2 Asennuksen erityispiirteitä

5.2.1 Kuormitettavuus

Maa-asennuksissa maaperän lämpötila ja lämpöresistiivisyys sekä asennussyvyys vaikuttavat kaapeleiden kuormitettavuuteen. Kaapelireitit voivat olla useita kilometrejä pitkiä, jolloin asennusolosuhteet reitillä voivat vaihdella huomattavasti. Kaapelin kuormitettavuus on aina mitoitettava asennusreitien vaativimman kohdan mukaan.

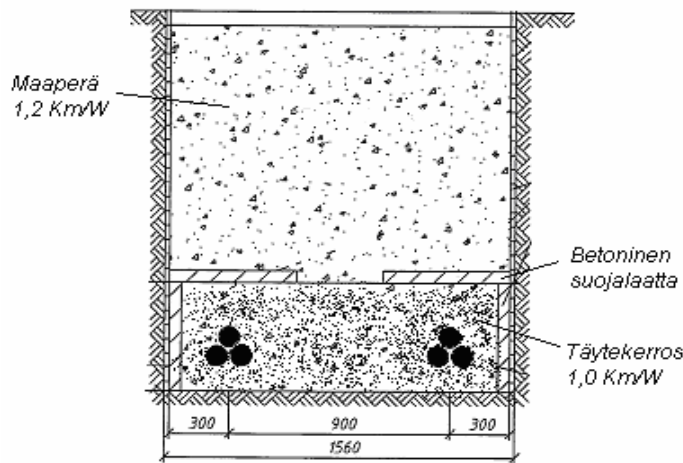
Maaperän kuivuminen voi hankaloittaa kaapeli-asennuksen täsmällistä mitoittamista, sillä kuivan maaperän lämpöresistiivisyys on suurempi kuin kostean. Kaapeli voi lämpenemisellään aiheuttaa ympäröivän maaperän kuivumista. Lämpöresistiivisyyden kasvaessa kaapelin lämmön siirtyminen ympäristöön heikkenee, ja kaapeli voi ylikuormittua. (Alatalo 1975)

Kun kaapelin vierusmateriaalilla on huono lämmönjohtavuus, voidaan kaapelin kuormitettavuutta parantaa ympäröimällä kaapeli paremmin lämpöä johtavalla materiaalilla. Vierusmateriaalin tarkoitus on täyttää kaapelin ympärille jäävä tila sekä lisätä kaapelin kuormitettavuutta johtamalla lämpöhäviöt pois kaapelista mahdollisimman hyvin. Asennuksessa käytettävät yleisimmät vierusmateriaalit/täyteaineet ovat hiekka, betoni ja weak-mix. Weakmix on sekoitus sementtiä, hiekkaa ja vettä, joiden suhteita muuttamalla voidaan muodostaa haluttua massaa.

Mitä suurempi on vierusmateriaalin lämmönjohtavuus, sitä paremmin se johtaa kaapelista virran aiheuttaman lämmön pois. Usein puhutaan myös lämpöresistiivisyydestä, joka on lämmönjohtavuuden käänteisluku. Mitä pienempi on materiaalin lämpöresistiivisyys, sitä paremmin lämpö siirtyy pois kaapelista.

PEX-eristeiset kaapelit kestävät jatkuvaa 90 °C käyttölämpötilaa. Maa-asennuksissa kaapelin kuormitettavuus lasketaan kuitenkin usein kaapelin rakenteellista lämpötilankestoaa pienemmällä johdinlämpötilalla. Tällä tavalla voidaan ottaa huomioon kaapelia ympäröivän maan mahdollinen kuivuminen. (Prysmian)

Kun tavoitellaan parasta mahdollista kuormitettavuutta, voidaan kaapelit ympäröidä erityisellä termisesti stabiililla ja hyvin lämpöä johtavalla täytemateriaalilla. Täytemateriaalilla voi olla jopa puolet pienempi lämpöresistiivisyys kuin maaperällä, eikä sen lämpöresistiivisyys kasva kuivanakaan oleellisesti. Tämän tyyppisissä tapauksissa voidaan kaapelia kuormittaa sen rakenteellisen lämmönkeston mukaisesti.



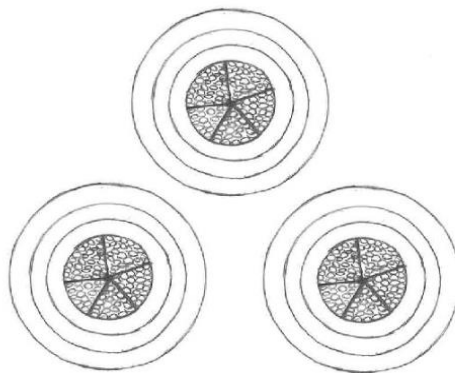
KUVIO 23. Kaksi kolmioon asennettua kaapeliyhteyttä, kaapeleiden ympärille on laitettupienen lämpöresistiivisyyden omaava täytekerros. Kaapeleiden mekaaniseksi suojaksi ovat asennettu betoniset laatat. (Prysmian)

Kaapelin johtimessa ja kosketussuojassa kulkeva virta aiheuttaa tehohäviöitä, jotka lämmittävät kaapelia. Mitä suuremmalla virralla kaapelia kuormitetaan, sitä enemmän syntyy tehohäviöitä ja lämpöä. Kaapeli saavuttaa jatkuvaa kuormitusvirtaa vastaavan käyttölämpötilan, kun kaapelista ympäristöön poistuva lämpöteho on yhtä suuri kuin siinä häviöiden vaikutuksesta syntyvä lämpöteho. Jatkuva käyttölämpötila ei kuitenkaan saa ylittää kaapelin rakenteellista lämmönkestoä, joka määräytyy yleensä eristyksen lämpökestoisuuden mukaan. (Alatalo 1975)

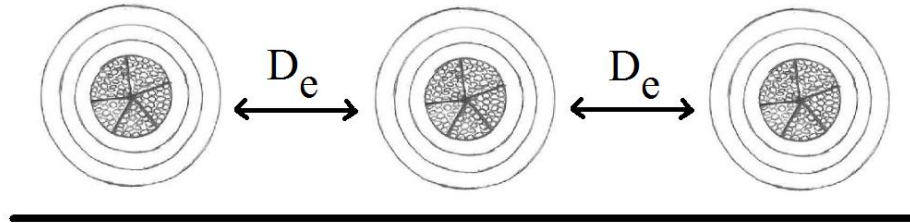
5.2.2. Kolmio- ja tasoasennus

Suurjännitekaapelit asennetaan maahan yleensä kolmio- tai tasomuodostelmaan noin metrin syvyyteen maanpinnasta. Vaiheiden välistä etäisyyttä kasvattamalla voidaan pienentää kaapeleiden lämpövaikutusta toisiinsa, mutta useimmiten on kuitenkin taloudellisempaa asentaa ne lähekkäin tai jopa kiinni toisiinsa. (Anders 1997)

Symmetrisessä kolmioasennuksessa vaiheiden magneettikentät kompensoituvat keskenään paremmin kuin tasoasennuksessa. Näin kosketussuojiin indusoituu myös pienempi jännite ja kiertävä virta, joka on yhtä suuri jokaisessa kosketussuojassa. Suljetulla kosketussuojapiirillä kolmioasennus onkin kuormitettavuuden kannalta usein tasoasennusta parempi vaihtoehto. (Alatalo 1975)



KUVIO 24. Kaapelien kolmioasennus

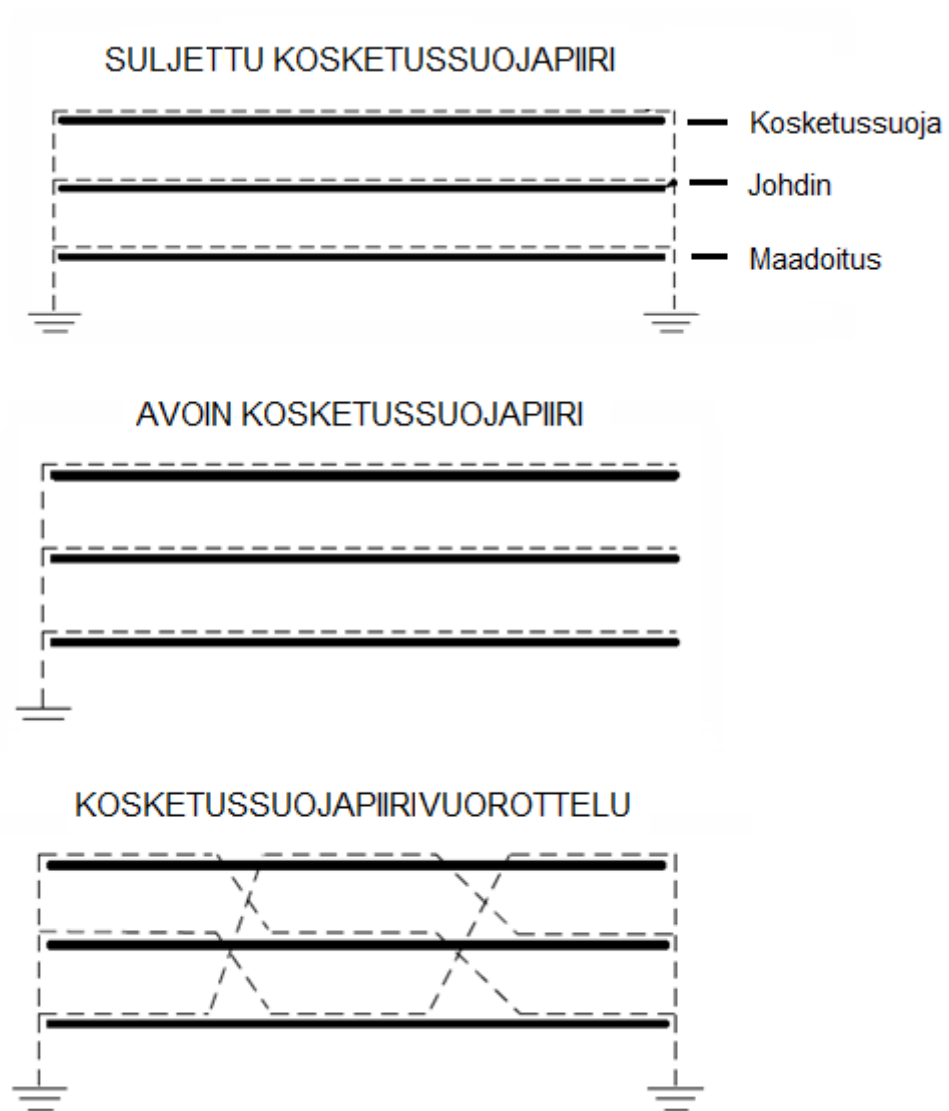


KUVIO 25. Kaapelien tasoasennus.

5.2.3 Kosketussuojan kytkentä

Yksijohdinkaapeleilla kosketussuojan kytkentätapa vaikuttaa oleellisesti kuormitettavuuteen. Kosketussuojan maadoittaminen toteutetaan yleensä jollakin seuraavista menetelmistä: suljettu kosketussuojapiiri, avoin kosketussuojapiiri ja kosketussuojien vuorottelu.

Johtimessa kulkeva virta aiheuttaa ympäristöön magneettikentän, jonka voimakkuus määräytyy virran suuruuden ja johtimien välisten etäisyyksien perusteella. Tämä magneettikenttä indusoi kosketussuojiin jännitteen. Kyseinen jännite on verrannollinen kuormitusvirtaan ja sen taajuuteen sekä johdin- ja kosketussuojapiirien välisiin keskinäisinduktansseihin. (Voipio 1970)



KUVIO 26. Esimerkkejä kosketussuojan kytkentätavoista

Suljetussa kosketussuojapiirikytkenässä kaapeleiden kosketussuojat on kytketty yhteen ja yleensä myös maadoitettu kaapelien molemmista päistä. Piirin ollessa suljettuna induktiojännitteet kuitenkin synnyttävät kosketussuojoihin kiertävän virran, joka aiheuttaa tehohäviöitä. Nämä tehohäviöt lämmittävät kaapelia ja pienentävät sen

kuormitettavuutta. Kosketussuojassa tapahtuvia häviöitä voidaan pienentää asentamalla kaapelit kolmiomuodostelmaan. (Voipio 1970)

Avoimessa kosketussuojapiirikytkennässä kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu vain yhdestä kohdasta. Tässä tapauksessa kaapelin kosketussuojissa ei kulje virtaa, joten tehohäviöt pienenevät ja kuormitettavuus kasvaa. Avoin kosketussuojapiirikytkentä ei sovellu pitkille kaapelipituuksille, sillä kosketussuojaan indusoituva jännite kasvaa kaapelin pituuden ja johtimessa kulkevan virran mukaan. Pitkillä kaapeliyhteyksillä indusoitunut jännite voi olla niin suuri, että se saattaa aiheuttaa läpilyönnin kaapelin ulkovaipassa. Usein avointa kosketussuojapiirikytkentää voidaan käyttää alle 600 m kaapelipituuksilla ilman, että indusoituneet jännitteet nousevat oikosulunkaan aikana kohtuuttoman suuriksi. (Alatalo 1975)

Kaapelin kosketussuojaan indusoituva jännite avoimella kosketussuojapiirikytkennällä voidaan laskea kolmio- ja tasoasennuksessa yhtälöillä 4 ja 5:

Kolmioasennus:

$$E = j\omega I 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (4)$$

Tasoasennus:

$$E = j\omega I 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{s}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4s}{d} \right) \quad (5)$$

missä

E = kosketussuojaan indusoitunut jännite (V/m)

$\omega = 2\pi f$ kulmataajuus (rad/s)

f = vaihtojännitteen taajuus (Hz)

I = johtimessa kulkeva virta (A)

s = johtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm)

d = keskimääräinen kosketussuojan tai metallivaipan halkaisija (mm).

(Alatalo 1975)

Kosketussuojien vuorottelukytkenässä kaapeleiden kosketussuojat on kytketty kolmella osuudella keskenään ristiin niin, että eri vaiheiden kosketussuojissa ei pääse syntymään merkittäviä induktiojännitteitä, sillä ne kompensoituvat keskenään kytkentäpisteissä. Täydellinen induktiojännitteiden kompensoituminen saavutetaan vain, jos kytkentäpisteiden väliset etäisyydet ovat samat. Talloin kosketussuojissa ei myöskään kulje virtaa, mikä vastaa kuormitettavuudeltaan avoimen kosketussuojapiirikytkenän tilannetta.

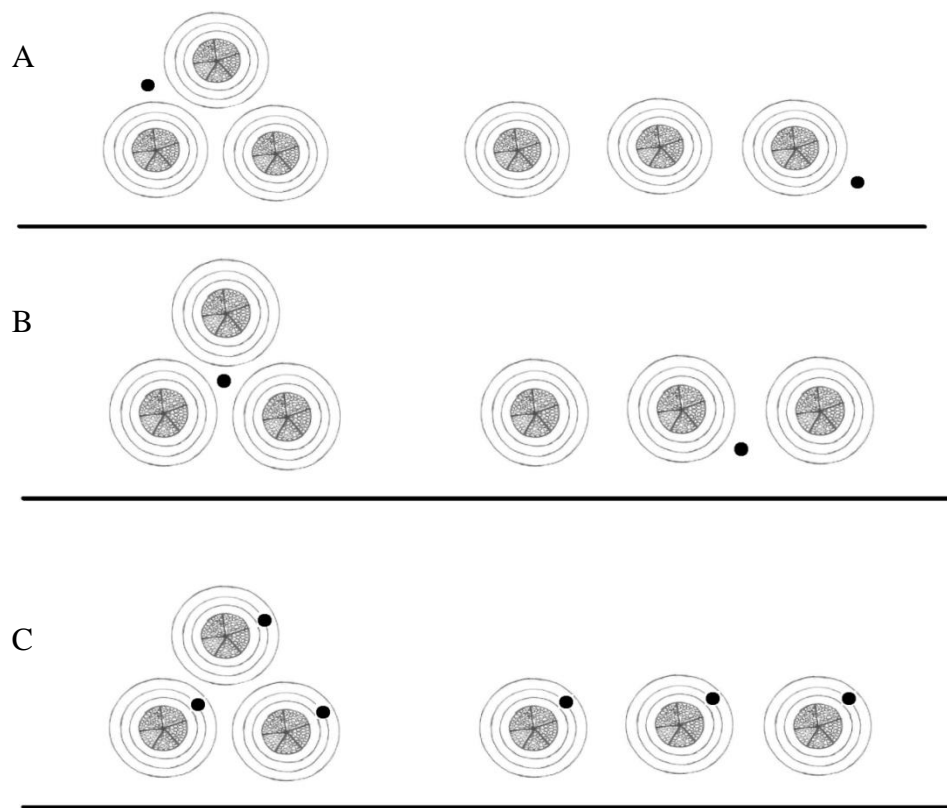
Vuorottelukytkeä käytetään yleensä pitkillä kaapeliyhteyksillä ja suurilla kuormitusvirroilla, sillä se mahdollistaa suurien tehojen siirron pienemmillä tehohäviöillä. Kytkentätavan kääntöpuolena on sen kallis toteuttaminen. (Anders 1997)

5.2.4 Kaapeleiden lämpötilanvalvonta

Osa kaapeleissa tapahtuvista vioista johtuu siitä, että kaapelin lämpötila ylittää sille määritellyn maksimirajan. Tämä voi johtua kaapelin kuormituksen yllättävästä lisääntymisestä tai kaapelin ulkopuolisista tekijöistä. Ulkopuolisia tekijöitä ovat esimerkiksi läpiviennit, jolloin kaapeli voi olla kosketuksissa materiaaliin, jolla on huono lämmönjohtavuus. Tällöin kaapelin kuormitettavuudesta syntyvä lämpö ei pääse johtumaan pois kaapelista odotetulla tavalla kyseisessä pisteessä.

Kaapeleiden siirtokyvyn turvallinen optimointi edellyttää kaapeleiden lämpötilatiedon tuntemista reaaliajassa. Jatkuva lämpötilanvalvontaa voidaan soveltaa myös maanalaisiin kaapeleihin, ja siitä saadun informaation avulla voidaan saada ennakoivin toimenpitein lämpenemisestä johtuva vikataajuus pieneneään tai kokonaan poistumaan. DTM-mittausjärjestelmä koostuu kolmesta osasta: optisesta kuidusta, prosessiyksiköstä ja siihen liitettävästä tietokoneesta.

Kuitua käyttämällä saadaan varmuutta lämpötilanmittaukseen ja se on itsessään immuuni sähkömagneettisille häiriöille. Kuidun hyviä puolia on myös se, että siinä ei ole liikkuvia osia ja se on helppo ottaa käyttöön. Optinen kuitu voidaan asentaa joko kaapeliryhmien ulkopuolelle tai sisäpuolelle (kuva 23). Kuitu suositellaan asennettavaksi kaapelin sisään, jolloin mittaustuloksiin ei tule vääristyksiä ja virheitä ympäristöolosuhteista.



KUVIO 27. Erilaiset optisen kuidun asennukset: a) kuitu kaapeliryhmän ulkopuolella b) kuitu kaapeliryhmän sisäpuolella c) kuitu sisällytettynä kaapeleihin valmistusvaiheena asennusvaiheessa.

Kuitu tarvitsee ympärilleen pienen putken, johon se sijoitetaan. Yhteen putkeen voidaan laittaa 2...4 kuitua ja putkia voidaan laittaa kaapeliin 1...4. Kaapelissa putki asennetaan esimerkiksi kosketussuojakerrokseen tai kaapelin lyijyvaipan päälle.

Kuitu suositellaan asennettavaksi kosketussuojakerrokseen, sillä toisessa tapauksessa kaapelin rakennetta joudutaan muokkaamaan valmistuksen aikana kuidun takia, mikä saattaa heikentää kaapelin ominaisuuksia. Alumiini- ja kuparilaminaattisen johtimen kosketussuojassa johtimista 1-4 korvataan kuidun tarvitsemilla metalliputkilla. Koska kuidun voi nähdä lyijyvaipan päälle sijoitettuna johtimen pinnalla kohoumana, on se herkempi myös ulkopuolisille painaumille.



KUVA 28. Maakaapelin kosketussuojakerrokseen sisältyy optinen kuitu.
(Apsensing 2014)

Kuitu voi olla yksi- tai monimuotokuitu. Yksimuotokuidussa signaali etenee suora - viivaisesti kuituytimessä, ja sillä on parempi signaalin siirtokyky kuin monimuotokuidulla. Monimuotokuidun signaali vääristyy vastaanottopäässä, sillä signaali vaimenee ja vaihtelee etäisyyden kasvaessa yksimuotokuitua enemmän. Siksi yksimuotokuitu soveltuu paremmin pitkille. Kaapeliyhteyksille yksimuotokuidulla on heikko takaisin siroutuva signaali, mikä vähentää heijastuvaa tehoa. Mittaukset on tällöin vaikeampi toteuttaa, ja mittausajat ovat pidempiä kuin monimuotokuidulla, jolla on tämän takia parempi resoluutio ja tarkkuus. (Rosevear 2004)

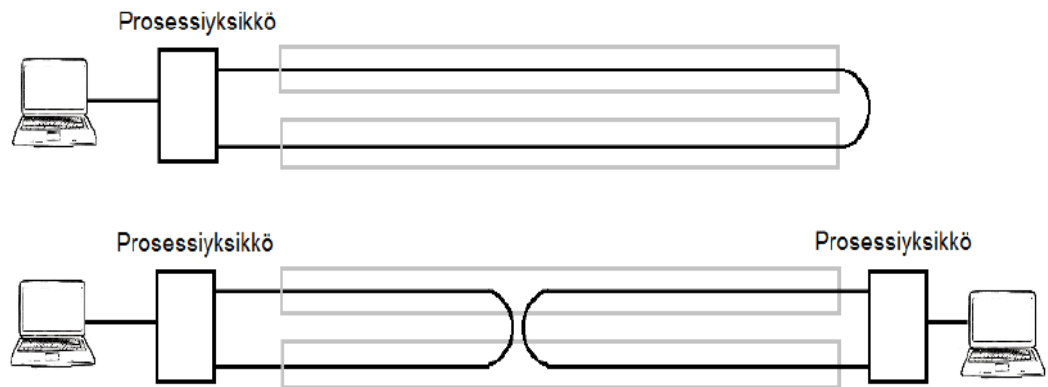
Hajautetun lämpötilamittauksen kuidun maksimipituutta rajoittavat matkan aiheuttamat häviöt (vaimennus) ja tehon riittävyys. Rajoitusten ylittyessä lämpötilaa ei voida mitata tietyllä resoluutiolla sille määrättyssä ajassa. (Rosevear 2004)

DTM-järjestelmien pääkomponentti on prosessiyksikkö (DTS), joka vastaanottaa ja lähettää signaalin. Yksikkö on itsessään tiedonkeruujärjestelmä. Yksikkö keskustelee kontrollerin eli käytännössä tietokoneen kanssa, jota järjestelmän käyttäjä käyttää.

Prosessiyksikkö on spesifioitavissa käyttäjän haluamaksi, ja tieto on saatavissa halutussa muodossa. Näytteenottotiheys voidaan määritellä esimerkiksi 5 metristä 25 senttimetriin. Näytteenottotiheys riippuu käyttäjän tarvitseman informaation tarkkuudesta. Jotta suuremmilta vaimennuksilta vältytään, on suositeltavaa liittää valokuidut prosessiyksikköön suorilla liittimillä ilman välikappaletta.

Valokuitu voidaan asentaa sekä lyhyille että pitkille kaapeliyhteyksille. Mitä pidempi matka on kyseessä, sitä tarkemmin lämpötilanmittausjärjestelmä pitää suunnitella. Pitkien matkojen haittapuolena on se, että signaali voi vaimentua voimakkaasti etäisyyden kasvaessa. Tällöin loppupään signaalitieto voi näkyä lämpötilan loivempina nousuina, eikä pieniä muutoksia näe niin tarkasti kuin kuidun alkupäässä. Signaali vaimenee jokaisen liitoksen ja jatkon kohdalla, ja pitkillä matkoilla (esimerkiksi 5 km) liitoksia voi tulla useita. Tämä vaatii jokaisen liitoksen huolellista tekemistä ja tarkastamista. Jos loppupään vaimenemista tapahtuu, voi tarvittaessa käyttää järjestelmää, joka summaa molemmista päistä lähtevät signaalitiedot yhteen. Kaapeliyhteyksillä pienillä lämpötilanvaihteluilla ei ole niin paljon merkitystä, joten esimerkiksi 5 asteen tarkkuus on sopiva. Tällöin ei haittaa, jos lämpötilanmittaus ei reagoi jokaiseen pieneen lämpötilan nousuun hetkessä.

Kuvassa 25 on esitetty kuidun mahdollisia asennusvaihtoehtoja. Ylemmässä kuvassa silmukka on vedetty kaapelireitin koko pituudelta ensin ensimmäisessä vaiheessa ja takaisin tullessa toisessa vaiheessa. Alemmas kuvassa on tehty kaksi eri silmukkaa kummastakin kaapelin päästä. Tällöin tarvitaan kaksi erillistä prosessiyksikköä. Kuituja voi olla useampi samalla reitillä eri käyttötarkoituksiin.



KUVA 29. Kaksi esimerkkiä valokuidun asentamisesta kaapelireitille

Signaalitiedon oikeellisuuden varmistamiseksi voidaan yksi kuitu varata referenssiksi, joka kulkee muista erillään. Valokuidun tiedon luotettavuuden lisäämiseksi se kannattaa ennen käyttöä ja käytön aikana kalibroida. Koska kuitu kiertää loivasti kaapelia vaipan alla, on sen pituus hieman suurempi kuin itse kaapelin. Asennusvaiheessa ennen kaapelikaivannon täyttöä voidaan kaapelin pintaa lämmittää eri kohdissa kaapelia ja lukita lämpötiedon paikka kaapelireitille. Pitkillä matkoilla kaapeli voidaan myös käyttää niin sanotussa lämpöuunissa, jossa kaapelin päät kalibroidaan samaan lähtötasoon.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin 110... 400 kV johtoja ja niiden varusteita. Työssä on käsitelty suurjännitejohtojen rakennetta, asennusympäristön, asennustapoja, suojausta ja lämpötilanvalvontaa. Suurjänniteavojointojen tärkeitä osia ovat pylvää ja eristimet. Puupylväällä on hyvä eristyskyky ilmastollisia ylijänniteitä vastaan. Ne suojataan lahoamiselta kyllästämällä. Teräs- ja seosalumiinipylväitä käytetään suurimmilla jännitteillä mutta ne ovat kalliita. Suomessa 110 kV jännitteestä alkaen käytetään yleisimmin harustettuja porttipylväitä. Avojohtot tuetaan pylvääseen eristimien avulla. Eristimiä tarvitaan kaasumaisen eristeen yhteydessä, jotta etäisyydet jännitteisiä osiin säilyvät riittävinä.

Suurjänniteavojohdon rakentamisessa johtimien sallittu vetorasitus ei saa ylittyä. Normaalien lujuusopin sääntöjen mukaan mitoitusperusteena ovat ns. sää- ja kuormatilat. Avojohtot rakennetaan joko tavallisiksi tai varmennetuiksi johdoiksi. Varmennaminen suoritetaan ensisijaisesti turvallisuussyistä, mikä merkitsee sitä, että varmennetun johdon ja sen pylväiden, perustusten sekä eristimien tulee kestää ankarammat mekaaniset ja sähköiset rasitukset kuin tavallisen johdon tapauksessa.

Tässä työssä tutkittiin myös suurjännitekaapeleita. Kaapelin mekaanisen suojauksen merkitys on suuri, kun moni eri taho työskentelee samassa paikassa ja prioriteettina on hyvä toimintavarmuus. Jos kaapelia ei suojata mitenkään mekaanisesti, voi esiintyä vikoja. Yhden vian korjaus maksaa verkkoyhtiölle paljon, puhutaan vähintään tuhansia euroista. Tästä syystä erityisesti tärkeillä 110... 400 kV kaapeleilla on hyvä käyttää jonkinlaista mekaanista suojausta.

Kaapeleiden kuormitettavuus käyttäytyy eri tavoin taso- ja kolmioasennuksessa, Kuormitettavuuden kannalta kolmioasennuksen todettiin olevan tasoasennusta parempi vaihtoehto. Maakaapeli on kiinnostava kaapeli. Reaaliaikainen lämpötilanmittaus mahdollistaa esimerkiksi kaapelireitin kuormitettavuuden kannalta

ongelmakohtien löytämisen. Kaapeleiden hajautettu lämpötilanvalvonta on yleistynyt kaapeleiden lämpötilanmittausjärjestelmänä.

LÄHTEET

110 kV maakaapelin asennus, Kuva: Sami Salmela. haettu osoitteesta:

<http://www.jenergia-lehti.fi/index2.php?id=18&articleId=608&type=8>

ABB. XLPE Cable System Users Guide, rev.1. 2014 Maakaapelin

kosketussuojakerrokseen sisältyy optinen kuitu kuvia. Haettu 5.4.2014 osoitteesta:

<http://www.apsensing.com/applications/power-cable/>

Alatalo Pentti. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Oy Nokia Ab kaapelitehdas Espoo, 1975.

Anders George J. Rating of electric power cables. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York. 1997.

Aro Martti ym. Suurjännitetekniikka. Otatito Oy, 1996.

Elovaara Jarmo, Laiho Yrjö. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otatito Oy. Helsinki, 2007.

Energiakaapelit 2009 -esite. Oy Prysmian Cables and Systems Ab: 1/2014.

Fingrid Oyj. Johtoviat Fingridin verkossa. Sisäinen raportti. Helsinki, 2011.

Hengenvaara. Voimajohdot 110 - 400 kilovoltin avojohdot 2014

haettu osoitteesta: <http://www.hengenvaara.fi/voimajohdot/>

High Voltage Cables -esite. Oy Prysmian Cables and Systems Ab: 2014

Lakervi Erikki ym. Sähköjakelutekniikka. Otatito Oy Helsinki. 1996.

Laasonen Minna, Saarinen Katariina, Jarmo Sederlund, Sulamaa Pekka, Jyrki Uusitalo, Maarit Uusitalo, Pasi Yli-Saunamäki. 2011. Kantaverkon käsikirja.

Parviainen, M. 2009. Työohje. 110 kV kaapelireitti anturamuoteilla toteutettuna. Helsinki.

Prysmian Oy, Cables and Systems Ab. Kuormitettavuuslaskelmissa käytettyjä kuvia. Haettu 3.2.2014

Prysmian Oy Cables, Bonding and earthing. Energy Cables Design Manual: E\903\4, 24 March 1994.

Prysmian Cables and Systems Oy, Ab. Kuormitettavuuslaskelmissa käytettyjä ja kuvia

SFS-EN 50341-1. Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 1:Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki, Suomen standardoimisliitto, 2002.

Suomi, M. 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60 - 400 kV suurjännitekaapelien kuormitettavuuteen. Insinööritoimisto. Metropolia.

Suomen standardoimisliitto, Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot. SFS-käsikirja 601.3 1997

Suomen standardoimisliitto . Ilmajohdotstandardit. SFS-Käsikirja 603. 2010

Suomi, I. 2013 110 KV kaapeleiden asennusratkaisut katurakenteissa Insinööritoimisto. Jyväskylä.

Tero T. Toivonen 18.07.2007, Suurjänniteavojohdon vuorottelupylväs kuvio.

Haettu: 3.4.2014 osoitteesta <http://calm.iki.fi/tolpat/kuva/2706>

Tiainen Esa, Maadoituskirja. Helsinki: Painokurki Oy E. 2007

Rosevear, R. 2004. Optimization of Power Transmission Capability of Underground Cable Systems using Thermal Monitoring. Sciencedirect.com. 2009. Haettu

11.4.2014 osoitteesta

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135409005326>

Uponor, 2013. Uponor-Kaapelisuoja järjestelmä Tripla. Luettu 4.2.2014 osoitteesta

www.uponor.fi

Voipio Erkki, Sähkö- ja magneettikentät. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta.

Otaniemi: 1970.