Maakaapeliverkko ja cross-bonding

Tampereen aikuiskoulutuskeskus
11.04.2025
Joonas Lahti

Joonas Lahti

Koulutus
- ✓ Sähkövoimatekniikan insinööri (Metropolia AMK ja Texas Tech University)
- ✓ Sähköasentaja

Ura
- ✓ Develo Energia Oy 5/2023 – Nykyinen (Liiketoimintajohtaja ja osakas)
- ✓ Despro Engineering Oy 6/2022 – 5/2023 (Myyntijohtaja)
- ✓ Eurolaite Oy 5/2019 – 6/2022 (Myyntipäällikkö)
- ✓ Prysmian Group Oy 2/2011– 5/2019 (Asentaja, Supervisor, tekninen myyntipäällikkö)
- ✓ Novasähkö Oy 6/2008– 2/2011 (Asentaja)

Muuta
- ✓ IEC Young Professional 2017
- ✓ Cenelec TC20 ja Sesko SK20 standardointityöryhmien jäsen 2017 – 2019
- ✓ Ralos Oy 3/2019 – 8/2020 (omistaja ja hallituksen jäsen)
- ✓ SIL Sähköinsinöörit opiskelijaosaston PJ 2016 ja hallituksen varapuheenjohtaja 2019 – 2021

Palvelut

Develo® ENERGIA

- Tuulivoima- ja sähkövarastoinfran-pääurakointi
- Teollisen mittakaavan aurinkovoimaloiden toteutus ”avaimet käteen” - periaatteella
- Älykkäät aurinkovoimalat, sähkövarastot ja sähköauton latausjärjestelmät yrityksille.

Develo® KIINTEISTÖT

- Laadukkaiden asuinkerrostalojen omistaja ja rakennuttaja
- Hankeportfolion koko noin 1400 asuntoa. Valmistuneet asunnot n. 1000 kpl.

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Sisältö

1. **Lyhenteet ja termit**
2. Lait, asetukset, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Lyhenteet ja termit

U	3-vaiheisen kaapelijärjestelmän johtimien välinen nimellisjännite eli pääjännite.
U_0	Kaapelijärjestelmänjohtimen ja maan potentiaalin välinen nimellisjännite.
U_m	Kaapelijärjestelmänsuurin sallittu käyttöjännite.
kV	Kilovoltti. 1000 V.
A	Sähkövirran yksikkö ampeeri.
PJ	Pienjännite.
KJ	Keskijännite (tuulipuistoissa 20 ja 33 kV).
SJ	Suurjännite (tuulipuistoissa 110 ja 400 kV).
XLPE	Cross-linked polyethylene. Ristisilloitettu polyeteeni (PEX).
WTG	Wind Turbine Generator. Yksittäinen tuulivoimala tai –turbiini.
SLD	Single Line Diagram. Yksijohdinkaavio. Pääkaavio.
PD	Partial Discharge. Osittaispurkaus.
TD	Tan Delta. Häviökerroin.
SMF	Single Mode Fiber. Yksimuotokuitu.
MMF	Multi Mode Fiber. Monimuotokuitu.
CB	Cross-Bonding. Kosketussuojien vuorottelu.
SPB	Single Point Bonding. Avoin kosketussuojapiiri.
SB	Solid Bonding. Suljettu kosketussuojapiiri.
SVL	Sheath Voltage Limiter. Vaippaylijännitesuoja.

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. **Lait, standardit ja suositukset**
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Lait, asetukset, standardit ja suositukset

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa...

- ✓ Lait ja asetukset:
  - ✓ Sähköturvallisuuslaki 1135/2016
  - ✓ Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 205/2009

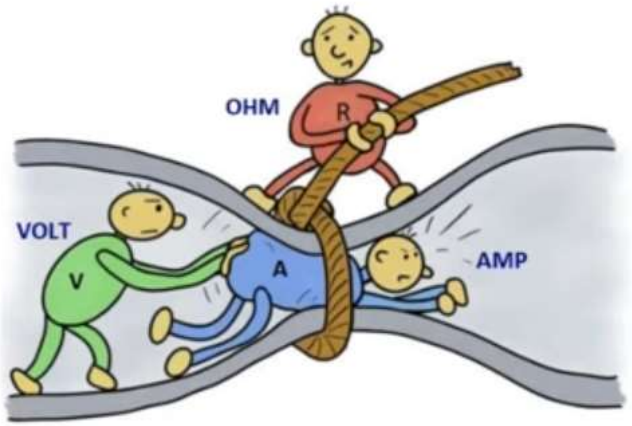
- ✓ Standardit, mm.:
  - ✓ SFS6002 Sähkötyöturvallisuus
  - ✓ SFS6001 Suurjännitesähköasennukset
  - ✓ (SFS6000 Pienjännitesähköasennukset)
  - ✓ SFS5636 PEX-eristeiset 10, 20 ja 30 kV Al- ja Cu-voimakaapelit. Rakenne ja testaus.
  - ✓ SFS5702 PEX-eristeiset 64/110 kV voimakaapelit ja niiden varusteet. Rakenne ja testaus.
  - ✓ IEC60840 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um= 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) - Test methods and requirements
  - ✓ IEC60029 Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function

- ✓ Suositukset, mm.:
  - ✓ RK1.16 Maakaapeliverkon rakentamisen vaatimukset 0,4 kV - 45 kV
  - ✓ RJ 22.22 Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. **Tuulipuiston maakaapeliverkko**
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Sähkötekniikkaa tiivistetysti



Miksi meillä on käytössä eri jännitetasoja?

Kaikki perustuu Ohm:n lakiin.

- $P=U \cdot I \Rightarrow U=R \cdot I \Rightarrow P_{häviöt}=I^2 \cdot R$

- Voimalaitos tuottaa 100 MW tehon, joka siirretään kaapelia pitkin. Kaapelin sisäinen vastus on 3Ω. Kuinka suuret ovat häviöt 17,5kV, 30kV sekä 380kV:n jakelujännitteellä?

17,5 kV	30 kV	380 kV
$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{17{,}5kV}=5714A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{30kV}=3333A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{380kV}=263A$
$P_{häviöt}=(5714A)^2\cdot3\Omega=97MW$	$P_{häviöt}=(3333A)^2\cdot3\Omega=33MW$	$P_{häviöt}=(263A)^2\cdot3\Omega=0{,}21MW$

LÄHDE: TE Connectivity, Jalo Nieminen

© 2024 TE Connectivity

Sähkötekniikkaa tiivistetysti

REKA CABLES

MADE IN FINLAND

ISO 45001, ISO 14001 and ISO 9001 certified company REACH and RoHS compliant products

2024-03-28 00:07:12

Technical information	3x95	3x120	3x150	3x185	3x240	3x300
Product code	**1181888**	**1181889**	**1181890**	**1181891**	**1181892**	**1181893**
Nominal diameter of a sheathed phase conductor mm	35	37	38	40	43	45
Nominal cross-sectional area of conductor mm²	95	120	150	185	240	300
Nominal diameter of conductor mm	11,1	12,6	13,9	15,6	17,8	19,8
Nominal thickness of conductor screen mm	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Nominal thickness of insulation mm	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Nominal diameter over the insulation without insulation screen mm	26,7	28,2	29,5	31,2	33,6	35,4
Nominal thickness of insulation screen mm	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Nominal thickness of PE-laminated aluminium foil mm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nominal thickness of oversheath mm	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3
Nominal cable diameter mm	75,790	79,120	82,240	86,000	91,590	95,780
Nominal cable weight kg/km	3331,791	3731,914	4107,544	4624,510	5390,908	6166,375
Metall weight Al kg/m	0,735	0,953	1,149	1,461	1,901	2,428
Maximum forces during installation when pulling by						
Max. pulling force by pulling-eye kN	8,6	10,8	13,5	16,7	20,0	20,0
Max. pulling force by pulling-stocking kN	4,3	5,4	6,8	8,3	8,5	8,5
Minimum bending radii						
During handling and installation, phase conductor cm	53	56	57	60	65	68
During handling and installation, cable cm	91	95	99	103	110	115
In final installation, phase conductor cm	37	39	40	42	45	47
In final installation, cable cm	64	66	69	72	77	80
Minimum bending radii						
During handling and installation, phase conductor m	0,53	0,56	0,57	0,60	0,65	0,68
During handling and installation, cable m	0,91	0,95	0,99	1,03	1,10	1,15
In final installation, phase conductor m	0,37	0,39	0,40	0,42	0,45	0,47
In final installation, cable m	0,64	0,67	0,69	0,72	0,77	0,81
DC resistance						
Max. DC resistance of conductor at 20 °C Ω/km	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Nominal DC resistance of PE-laminated aluminium foil 20 °C Ω/km	1,02	0,97	0,93	0,89	0,81	0,78

3 ohm/ 0,100 ohm/ km
= **30 km**

nen vastus on 3Ω.

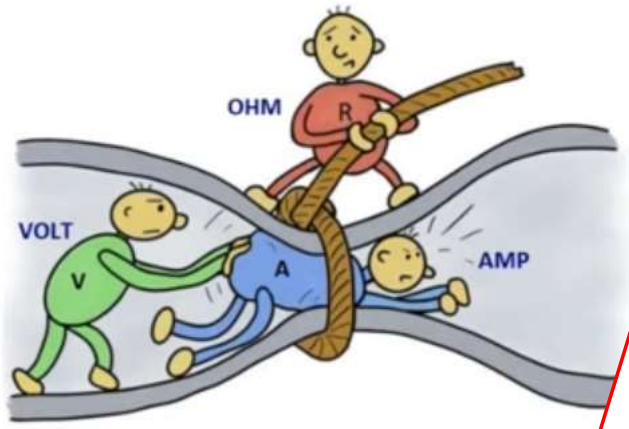
63A

0,21MW

LÄHDE: TE Connectivity, Jalo Nieminen

© 2024 TE Connectivity

Sähkötekniikkaa tiivistetysti



Miksi meillä on käytössä eri jännitetasoja?

Kaikki perustuu Ohm:n lakiin.

- $P=U \cdot I \Rightarrow U=R \cdot I \Rightarrow P_{häviöt}=I^2 \cdot R$

- Voimalaitos tuottaa 100 MW tehon, joka siirretään kaapelia pitkin. Kaapelin si
  Kuinka suuret ovat häviöt 17,5kV, 30kV sekä 380kV:n jakelujännitteellä?

17,5 kV	30 kV	380 kV
$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{17{,}5kV}=5714A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{30kV}=3333A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100\cdot10^6W}{380kV}=263A$
$P_{häviöt}=(5714A)^2\cdot3\Omega=97MW$	$P_{häviöt}=(3333A)^2\cdot3\Omega=33MW$	$P_{häviöt}=(263A)^2\cdot3\Omega=0{,}21MW$

Sähkön myyntihinta ~50 €/MWh

100 MW * 12 h = 1200 MWh
1200 MWh * 50 €/MWh = 60 000 €

97 MW * 12 h = 1164 MWh
1164 MWh * 50 €/MWh = 58 200 €

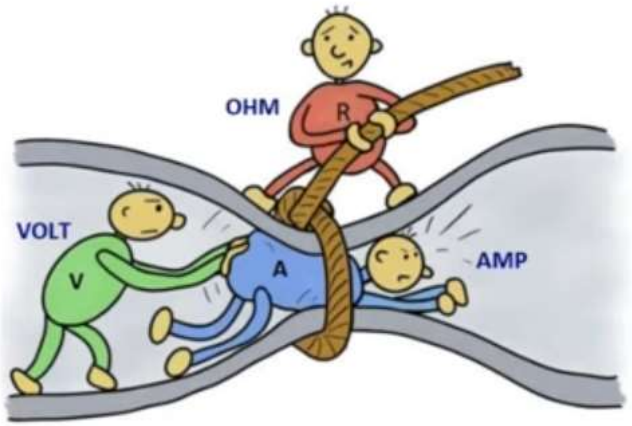
33 MW * 12 h = 396 MWh
396 MWh * 50 €/MWh = 19 800 €

0,21 MW * 12 h = 2,52 MWh
2,52 MWh * 50 €/MWh = **126 €**

LÄHDE: TE Connectivity, Jalo Nieminen

© 2024 TE Connectivity

Sähkötekniikkaa tiivistetysti



Miksi meillä on käytössä eri jännitetasoja?

Kaikki perustuu Ohm:n lakiin.

- $P=U \cdot I \Rightarrow U=R \cdot I \Rightarrow P_{häviöt}=I^2 \cdot R$

- Voimalaitos tuottaa 100 MW tehon, joka siirretään kaapelia pitkin. Kaapelin sisäinen vastus on 3Ω. Kuinka suuret ovat häviöt 17,5kV, 30kV sekä 380kV:n jakelujännitteellä?

17,5 kV	30 kV	380 kV
$I=\frac{P}{U}=\frac{100 \cdot 10^6 W}{17{,}5kV}=5714A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100 \cdot 10^6 W}{30kV}=3333A$	$I=\frac{P}{U}=\frac{100 \cdot 10^6 W}{380kV}=263A$
$P_{häviöt}=(5714A)^2 \cdot 3\Omega=97MW$	$P_{häviöt}=(3333A)^2 \cdot 3\Omega=33MW$	$P_{häviöt}=(263A)^2 \cdot 3\Omega=0{,}21MW$

LÄHDE: TE Connectivity, Jalo Nieminen

© 2024 TE Connectivity

REKA CABLES

MADE IN FINLAND

ISO 45001, ISO 14001 and ISO 9001 certified
company REACH and RoHS compliant products

2024-03-28 00:07:00

Technical information	1x95	1x150	1x240	1x300	1x400	1x500	1x630	1x800	1x1000
Electrical values									
Calculated operation capacitance µF/km	0,16	0,18	0,22	0,24	0,26	0,29	0,32	0,36	0,41
Calculated charging current with main voltage A/km	0,9	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,4
Calculated earth fault current with main voltage A/km	2,8	3,3	4,0	4,2	4,6	5,2	5,8	6,4	7,3
Current ratings									
Cables in air (25 °C)									
Flat, conductor 90 °C, open screen A	320	425	570	650	790	920	1040	1220	1390
Flat, conductor 90 °C, closed screen A	310	395	515	580	680	755	840	950	1060
Trefoil, conductor 90 °C, open screen A	285	380	505	580	695	800	915	1045	1170
Trefoil, conductor 90 °C, closed screen A	280	370	490	565	680	775	880	1010	1130
Cables in the ground (15 °C and 1,0 K.m/W), Installation depth 0,7 m									
Flat, conductor 65 °C, open screen A	255	330	435	485	570	645	720	805	900
Flat, conductor 65 °C, closed screen A	250	315	395	440	500	550	610	650	700
Flat, conductor 90 °C, open screen A	300	390	510	570	670	760	850	950	1067
Flat, conductor 90 °C, closed screen A	295	370	465	515	590	650	715	841	922
Trefoil, conductor 65 °C, open screen A	240	305	395	445	525	590	665	725	800
Trefoil, conductor 65 °C, closed screen A	235	300	385	435	510	570	635	695	760
Trefoil, conductor 90 °C, open screen A	280	360	465	525	615	695	780	863	968
Trefoil, conductor 90 °C, closed screen A	275	355	455	510	600	670	745	845	940
Maximum thermal short circuit current during 1 s									
Phase (initial 90 °C, final 250 °C) kA	8,9	14,1	22,6	28,3	37,8	47,2	59,5	75,6	94,5
Metal screen (initial 35 °C, final 250 °C) kA	4,8	5,2	6,0	6,2	6,4	7,1	7,6	8,3	9,3
Metal screen (initial 60 °C, final 250 °C) kA	4,4	4,8	5,5	5,7	5,9	6,6	7,0	7,7	8,6
Metal screen (initial 85 °C, final 250 °C) kA	4,0	4,4	5,0	5,2	5,4	6,0	6,4	7,0	7,8

LÄHDE: TE Connectivity, Jalo Nieminen

© 2024 TE Connectivity

Tuulipuiston maakaapeliverkko

Sähkökaapelit

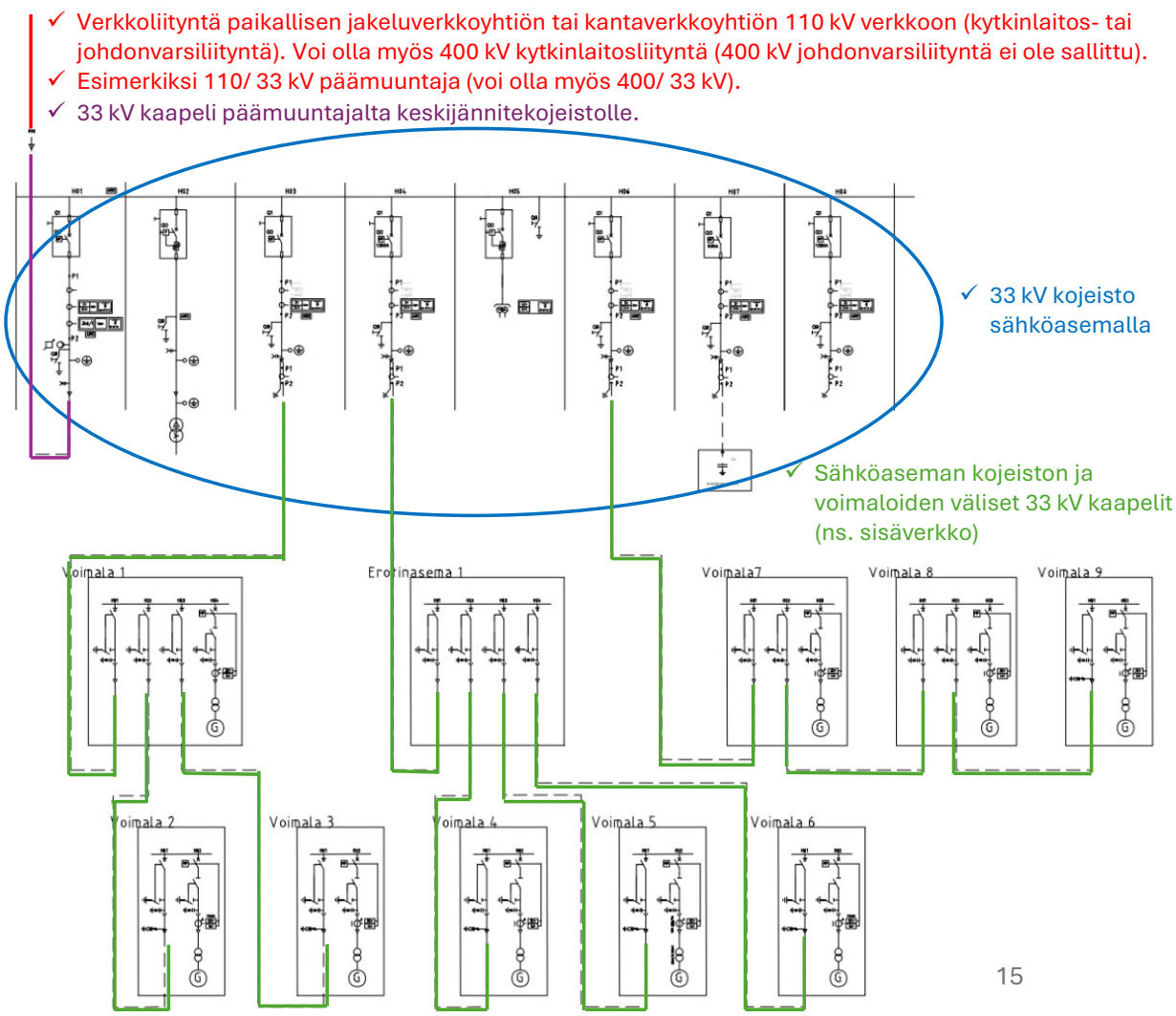
- ✓ Tuulipuiston tuottaman sähkön siirtoon käytetään suurjännitteisiä (110 tai 400 kV) ja keskijännitteisiä (20 tai 33 kV) sähkökaapeleita.
- ✓ Sisäverkon jännitteen nostamista 33 → 66 kV on harkittu, mutta niitä ei ole vielä rakennettu Suomeen.

Kuitukaapelit

- ✓ Tuulivoimaloiden tietoliikenneverkko rakentuu kuitukaapeleista. Kuitukaapelit kulkevat voimaloiden ja sähköaseman välillä.

Maadoituskaapelit

- ✓ Maadoitusverkko rakentuusähkökaapelien kosketussuojista, maadoituskaapeleista, -sauvoista ja muista mahdollista johtavista rakenteista.



Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ **Keskijännitekaapeliverkko**
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Keskijännitekaapeliverkko

- ✓ Keskijännitekaapeliverkko yhdistää sähköaseman, mahdolliset erotinasemat tai jakokaapit sekä tuulivoimalat toisiinsa.
- ✓ Keskijännitekaapeliverkko tai –järjestelmä rakentuu kaapelista, kaapelijatkoksista ja päätteistä, sekä mahdollisista muista oheismateriaaleista, kuten kaapelikiinnikkeistä, suojausmateriaaleista, cross-bonding link-bokseista vaippaylijännitesuojineen, jne.
- ✓ Useimmiten hyvin merkittävä osa sähkönjakelujärjestelmää tuulipuistoissa.
- ✓ Tyypillisesti suurin osa tuulipuiston sähköverkon vikaantumisista tapahtuu keskijännitteisessä kaapeliverkossa (kaapelipäätteet ja jatkokset).
- ✓ Jännite useimmiten nykyään 33 kV, mutta joissain tapauksissa vielä 20 kV. 66 kV jännitetasoa on harkittu.
- ✓ Useimmiten Suomalaisissa tuulipuistoissa käytetään AHXAMK-W(P) –tyypin kaapelia, joka yleisin keskijännitemaakaapeli Suomessa. Sen tavanomaiset johdinkoot ovat: 95, 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630, 800 ja 1000 mm^2.

Keskijännitekaapeliverkko

AHXAMK-W(P)-kaapelin rakenteessa on sisältäpäin lueteltuna

1. vesitiivis pyöreä tiivistetty alumiinijohdin
2. puolijohtava johdinsuoja
3. PEX-eristys
4. puolijohtava hohtosuoja
5. veden vaikutuksesta paisuva puolijohtava nauha
6. alumiinilaminaatti, joka toimii kosketussuojana sekä poikittaisena kosteussulkuna
7. säänkestävä musta PE-ulkovaippa
8. pyöreä tiivistetty kuparinen keskusköysi (vain AHXAMK-W).

KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelirakenteesta yleisesti:

Johdin

- ✓ kuljettaa sähkövirtaa mahdollisimman pienellä vastuksella
- ✓ Suomalaisissa keskijännitekaapeleissa käytetään alumiini- tai kuparilangoista kerrattuja ja pyöreäksi tiivistettyjä johtimia, joiden välissä on veden pitkittäistä etenemistä estävä pulveri tai nauhoitus
- ✓ Johtimet tehdään pyöreiksi sähköpintakentänvoimakkuuden minimoimiseksi ja eristykselle vaarallisten osittaispurkausten eliminoimiseksi
- ✓ johdinmateriaalina alumiini on kuparia halvempaa ja kevyempää, mutta paremman johtavuuden ansiosta kuparilla voidaan käyttää pienempää johdinkokoa samalle kuormitusvirralle
- ✓ Suomessa asennettavista keskijännitekaapeleista valtaosa on alumiinijohtimisia

KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelirakenteesta yleisesti:

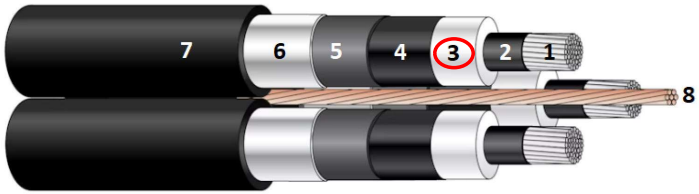
Johdinsuoja

- ✓ johdinsuoja puristetaan johtimen ja eristyksen väliin
- ✓ se valmistetaan puolijohtavasta materiaalista ja sen tarkoitus on tasata johdinlankojen epätasaisuutta eristykseen päin ja siten pienentää eristyksessä syntyviä kentänvoimakkuushuippuja
- ✓ lisäksi johdinsuoja pienentää johtimesta eristykseen kohdistuvia lämpörasituksia esimerkiksi oiko- ja maasuluissa.

KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko



KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

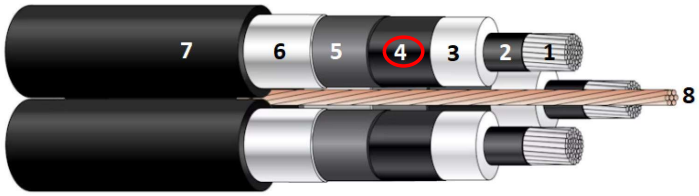
Kaapelirakenteesta yleisesti:

Eristys

- ✓ Eristys sijaitsee johdinsuojan ja hohtosuojan välissä.
- ✓ Eristys muodostaa kaapelille riittävän jännitekestoisuuden sekä johtaa johtimessa syntynyttä lämpöä kaapelista ulospäin.
- ✓ Kuormitettavuuden ja vikatapausten kannalta oikea johdinkoko on tärkeä, jotta kaapeli ei lämpene liikaa ja vanhene tarpeettomasti.
- ✓ Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että 6–10 °C:n lämpötilan nousu yli johtimen suurimman sallitun käyttölämpötilan lyhentää eristyksen eliniän puoleen.
- ✓ Suomalaisissa keskijänniteverkoissa on käytössä öljypaperi- ja muovieristeisiä kaapeleita.
- ✓ Nykyisinkin käytössä olevia öljypaperieristeisiä keskijännitekaapeleita asennettiin 1980-luvun loppupuolelle asti, jonka jälkeen muovieristeiset kaapelit ovat syrjäyttäneet ne.
- ✓ Pohjoismaiden tilaston mukaan muovieristeisten kaapeleiden vikaherkkyys on noin viidesosa öljypaperieristeisiin kaapeleihin verrattuna.
- ✓ Käyttövarmuuteensa ansiosta nykyään kaikki Suomessa asennettavat keskijännitekaapelit ovat muovieristeisiä.
- ✓ Muovieristys on ristisilloitettua polyeteeniä (PEX, englanniksi XLPE), jossa makromolekyyliketjut on sidottu toisiinsa kemiallisesti.
- ✓ PEX-eristeisen kaapelin suurin sallittu johdinlämpötila on 90 °C:tta jatkuvassa käytössä ja 250 °C:tta enintään viiden sekunnin oikosulussa.
- ✓ Eristyksen nimellispaksuudet 6–30 kV:n kaapeleille on annettu kansainvälisessä standardissa IEC 60502-2 ja 10–30 kV:n kaapeleille kansallisessa standardissa SFS 5636.

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

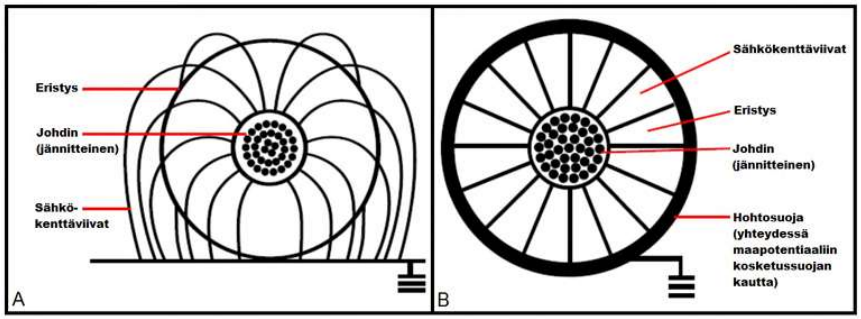


KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

Kaapelirakenteesta yleisesti:

Hohtosuoja:

- ✓ Eristyksen ulkopinnassa oleva hohtosuoja rajaa yhdessä johdinsuojan kanssa johtimen aiheuttaman sähkökentän kahden puolijohtavan sylinteripinnan väliin.
- ✓ Hohtosuoja tasaa eristyksen ulkopintaa ja pienentää siten eristyksessä syntyviä kentänvoimakkuushuippuja.
- ✓ Suomessa käytetyissä kaapeleissa johdinsuoja, eristys ja hohtosuoja valmistetaan samanaikaisesti kolmoispuristusprosessissa.
- ✓ Kolmoispuristettu eristys edellyttää oikeita työmenetelmiä ja -kaluja varusteiden asennuksessa.
- ✓ Varusteasennuksissa on myös otettava huomioon, että hohtosuojamateriaalien johtavuus saattaa pienentyä vieraiden aineiden, kuten öljyjen, rasvojen ja liuottimien vaikutuksesta.

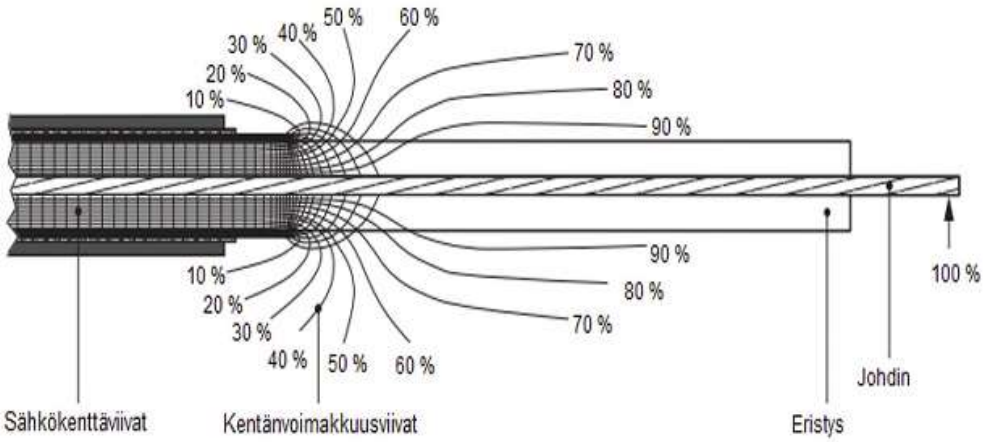


KUVA: Kuvassa A on vaihejohdin ilman hohtosuojaa ja kuvassa B eristetty vaihejohdin hohtosuojan kanssa.

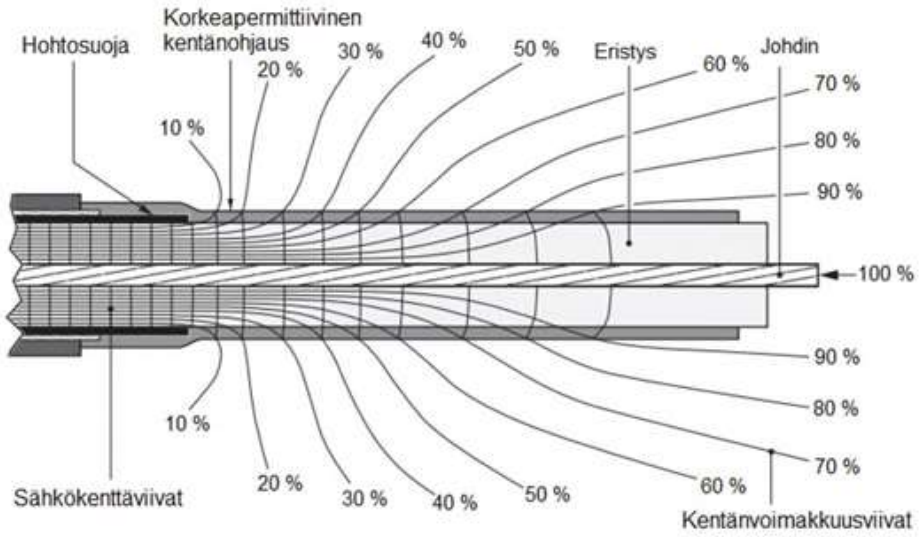
Kuvan 2 A tilanteessa johtimen aiheuttama säteittäinen sähkökenttä taipuu voimakkaana kohti lähintä maapotentiaalia synnyttäen kentänvoimakkuushuippuja, jotka rasittavat eristystä. Kuvassa 2 B johtimen eristyksessä aiheuttama säteittäinen sähkökenttä on pienempi ja tasaisempi. Metallisen kosketussuojan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

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

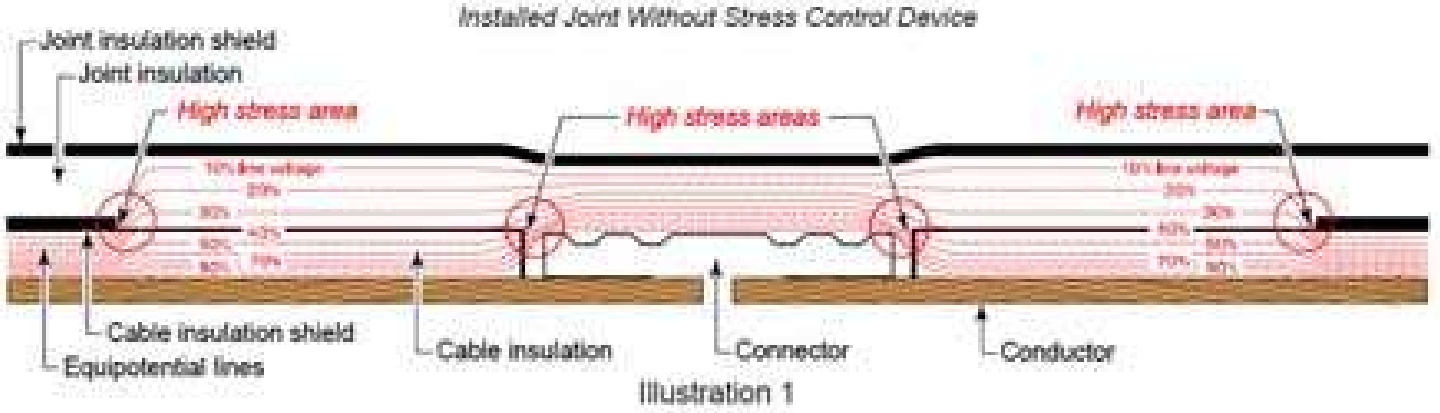


KUVA 1: Sähkökentän jakautuminen ilman kentänohjausta. Kenttäviivoihin merkityt prosenttiluvut kuvaavat sähkökentän voimakkuuden osuutta järjestelmän maan ja johtimen välisestä nimellisjännitteestä.

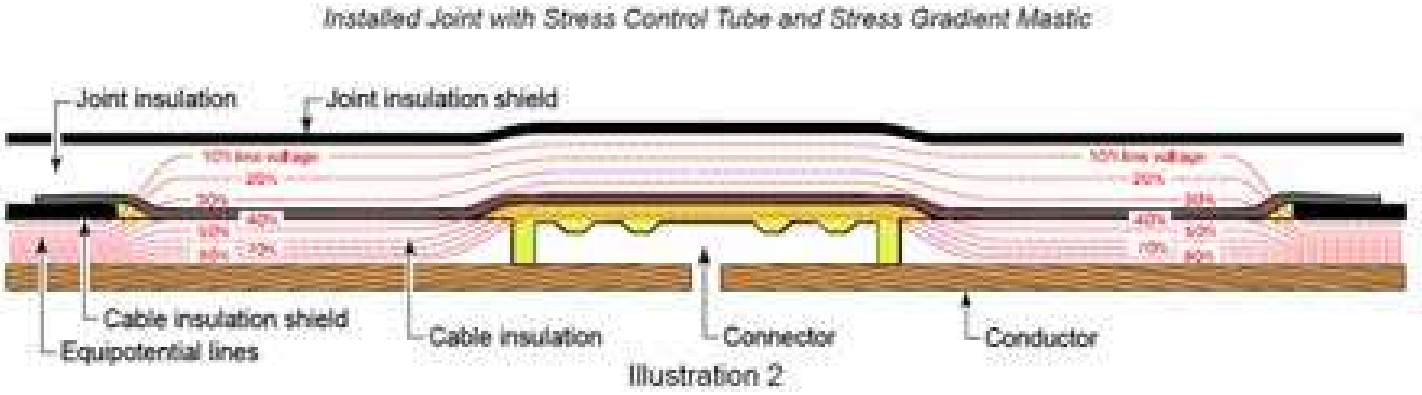


KUVA 2: Sähkökentän jakautuminen korkeaan permittiivisyyteen perustuvalla kentänohjauksella. Kenttäviivoihin merkityt prosenttiluvut kuvaavat sähkökentän voimakkuuden osuutta järjestelmän maan ja johtimen välisestä nimellisjännitteestä.

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.



KUVA 1: KJ-kaapelijatkos ilman kentänohjausmassaaja ja –letkua.



KUVA 2: KJ-kaapelijatkos kentänohjausmassoilla ja –letkulla.

LÄHDE: https://www.powerandcables.com/what-is-electrical-stress/

Keskijännitekaapeliverkko

KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

Kaapelirakenteesta yleisesti:

Kosketussuoja:

- ✓ Kosketussuoja toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana sekä nimensä mukaisesti mekaanisena ja sähköisenä kosketussuojana minimoiden sähkötapaturmien riskiä.
- ✓ Kosketussuoja on valmistettu metallista ja sen rakenteeseen vaikuttavat kaapelityyppi ja kaapelin käyttötarkoitus.
- ✓ Keskijännitekaapelin kosketussuojana käytetään useimmiten alumiinilaminaattia, kuparilankoja tai molempia. Limitetyn alumiinilaminaatin etuna on poikittainen vesitiiveys, jonka vuoksi se on käytetyin kosketussuojarakenne.
- ✓ Kaapelin sisäosien päällä olevan yhtenäisen alumiinilaminaatin merkitys korostuu maa-asennuksissa, joissa maaperän kosteus etenee muovisen ulkovaipan läpi. Ilman alumiinilaminaattia kosteus etenisi edelleen kaapelin eristykseen ja heikentäisi eristyksen jännitekestoisuutta.
- ✓ Kuparilangallisen kosketussuojan etuna on helpompi kosketussuojaliitosten teko kaapelivarusteissa sekä parempi johtavuus esimerkiksi vikavirtojen kuljetuksessa.
- ✓ Pääosin kaikissa maan alle asennettavissa kaapeleissa on alumiinilaminaattikosketussuoja. Kaapelihyllyille sisä- ja ulkotiloihin voidaan asentaa kuparilangallisella kosketussuojalla varustettu kaapeli.

KUVA: AHXAMK-W tyypin KJ-kaapeli

KUVA: AHCHBMK-W tyypin SJ-kaapeli

KUVA: AHXLMK-W tyypin SJ-kaapeli

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

KUVA: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

Kaapelirakenteesta yleisesti:

Ulkovaippa:

- ✓ Ulkovaippa suojaa kaapelin sisempiä kerroksia mekaanisilta rasituksilta asennuksen ja käytön aikana, ympäristöolosuhteiden rasituksilta ja esimerkiksi metallisen kosketussuojan korroosiolta.
- ✓ Ulkovaippa erottaa kaapelin kosketussuojan sähköisesti maapotentiaalista estäen kosketussuojan hallitsemattomat maadoitukset.
- ✓ Keskijännitekaapelien ulkovaipoissa käytetään säänkestävää PE- tai polyvinyylikloridimuovia (PVC).
- ✓ PVC:llä on paremmat palonkesto-ominaisuudet, mutta sillä on suurempi lämpöresistiivisyys. Lisäksi PVC on alttiimpi mekaanisille vaurioille. PE kestää paremmin mekaanista rasitusta ja korkeampia lämpötiloja. Mekaanisen kestävyytensä ansiosta PE-vaippainen kaapeli soveltuu PVC:tä paremmin maa-asennuksiin ja voidaan asentaa myös auraamismenetelmällä.

LÄHDE: J. Lahti, Kaapelivarusteiden ominaisuudet keskijännitejakeluverkon kannalta tarkasteltuna.

Keskijännitekaapeliverkko

AHXAMK-W vs. AHXAMK-WP

+ Lisää reittejä vikavirralle
+ Maadoitusvaikutus
+ Tasaa potentiaalieroja
+ Pienentää vikapaikan maadoitusjännitettä
+ Parantaa suojauksen toimivuutta
- Hinta noin +10 % verrattuna Plain-tyyppiseen kaapeliin.

→ Saattomaadoituselektrodi ehdoton vaatimus
→ Suositellaan lisäksi keskusköydellistä AHXAMK-W -kaapelia

KUVA 1: AHXAMK-W –tyypin KJ-kaapeli

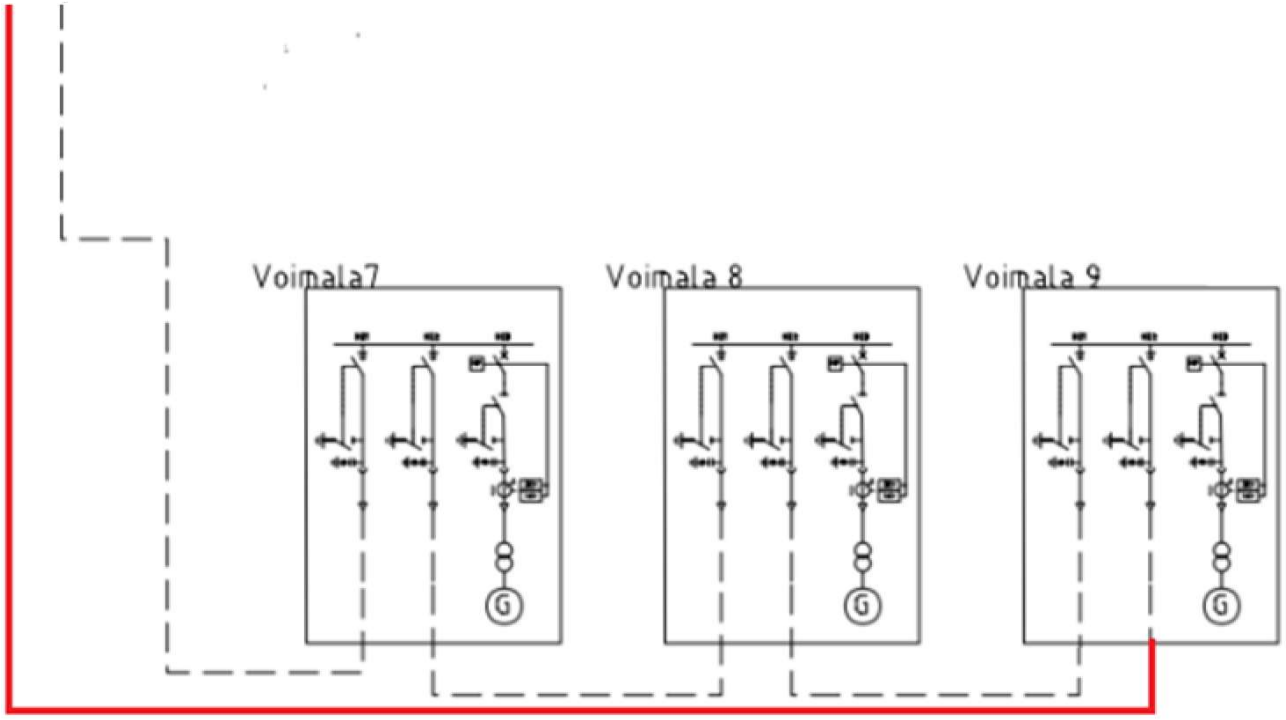
KUVA 2: AHXAMK-WP –tyypin KJ-kaapeli

LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Verkkotopologiat

- ✓ Tähti
- ✓ Säteittäinen
- ✓ Rengas



	Rakentamiskustannus (%)	Häviöt (%)
Tähti	97	101
Säteittäinen	100	100
Rengas	210	54

LÄHDE: Develo Energia Oy ja S. Lumbreras, A. Ramos, Offshore wind farm electrical design: a review

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapeleiden mitoitus

- ✓Korjauskerroin
  - ✓Vierekkäiset kaapelit (table 4)
  - ✓Asennussyvyys (table 5)
  - ✓Maaperän lämpöresistiivisyys (table 6)
  - ✓Maaperän lämpötila (table 7)
  - ✓Kaapelit putkessa (table 8)

Table 4 Correction factors for groups of cables laid directly in ground

Mutual spacing between cables or groups of cables	Number of multicore cables or groups of single-core cables beside each other						
mm	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Table 5 Correction factors for different installation depths in ground

Depth of laying, m	0,50 - 0,70	0,71 - 0,90	0,91 - 1,10	1,11 - 1,30	1,31 - 1,50
6-30 kV cables	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

Table 6 Correction factors for different thermal resistivity of soil

Thermal resistivity of soil K.m/W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
Correction factor	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63

Examples of thermal resistivities of soil:

- dry sand (moisture content 0 %) 3,0 K.m/W
- dry gravel and clay 1,5 K.m/W
- semi-dry and moist gravel 1,0 K.m/W
- moist clay and sand 0,7 K.m/W (moisture content 25 %)

Table 7 Correction factors for different ground temperatures

Conductor temperature	Ground temperature °C										
°C	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

Table 8 Correction factors for cables in unfilled plastic tubes in ground

Mutual spacing between tubes	Number of tubes beside each other							
mm	1	2	3	4	5	6	8	10
0 (touching)	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50
70		0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55
250		0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

LÄHDE: SFS 5636

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapeleiden mitoitus

Mikä kaapeli valitaan, kun 4 x 6 MW voimalaa? → min. 630 mm^2 33 kV kaapeli (26 > 24)

		20 kV		33 kV	
Johdinkoko (mm^2)	Kuormitettavuus: kaapelit maassa (15 °C ja 1,0 K.m/W), asennussyvyys 0,7 m, johdin +65 °C (A)	Tehosiirtokyky (MW)	Tehosiirtokyky, kun korjauskerroin 0,8* (MW)	Tehosiirtokyky (MW)	Tehosiirtokyky, kun korjauskerroin 0,8* (MW)
3x95	235	7	6	12	10
3x150	300	9	7	15	12
3x185	330	10	8	17	14
3x240	385	12	10	20	16
3x300	435	14	11	22	18
3x1x400	510	16	13	26	21
3x1x500	570	18	14	29	23
3x1x630	635	20	16	33	26
3x1x800	695	22	17	36	29
3x1x1000	760	24	19	39	31

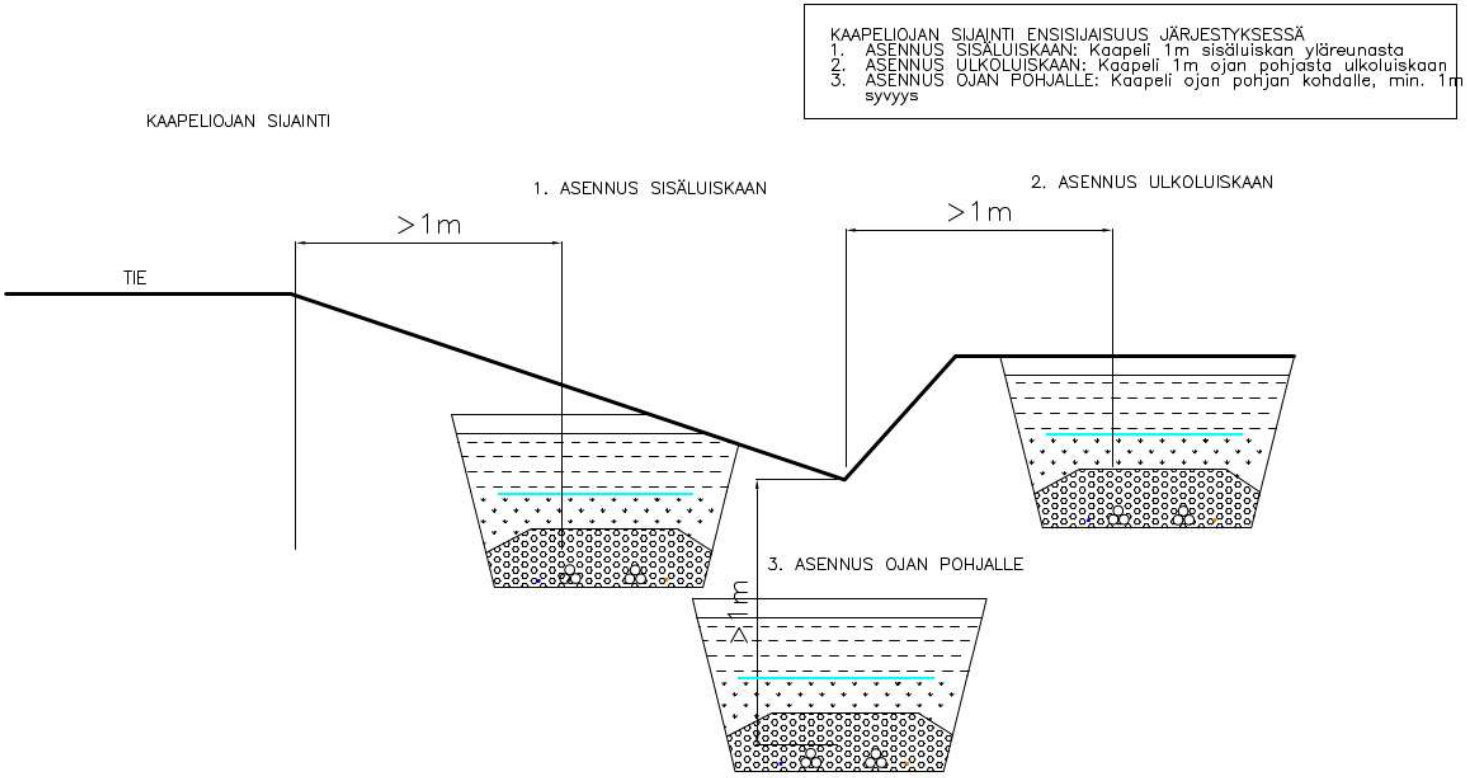
*0,8 korjauskerroin, kun yksi kaapeli putkessa

LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelien suojaus ja kaapeliojan poikkileikkaukset

- ✓ Esimerkkejä kaapeliojien poikkileikkauksista tiehen nähden.
- ✓ Huom. Esimerkiksi ELY-tien varteen ei saa asentaa kaapelia tien sisäluiskaan.

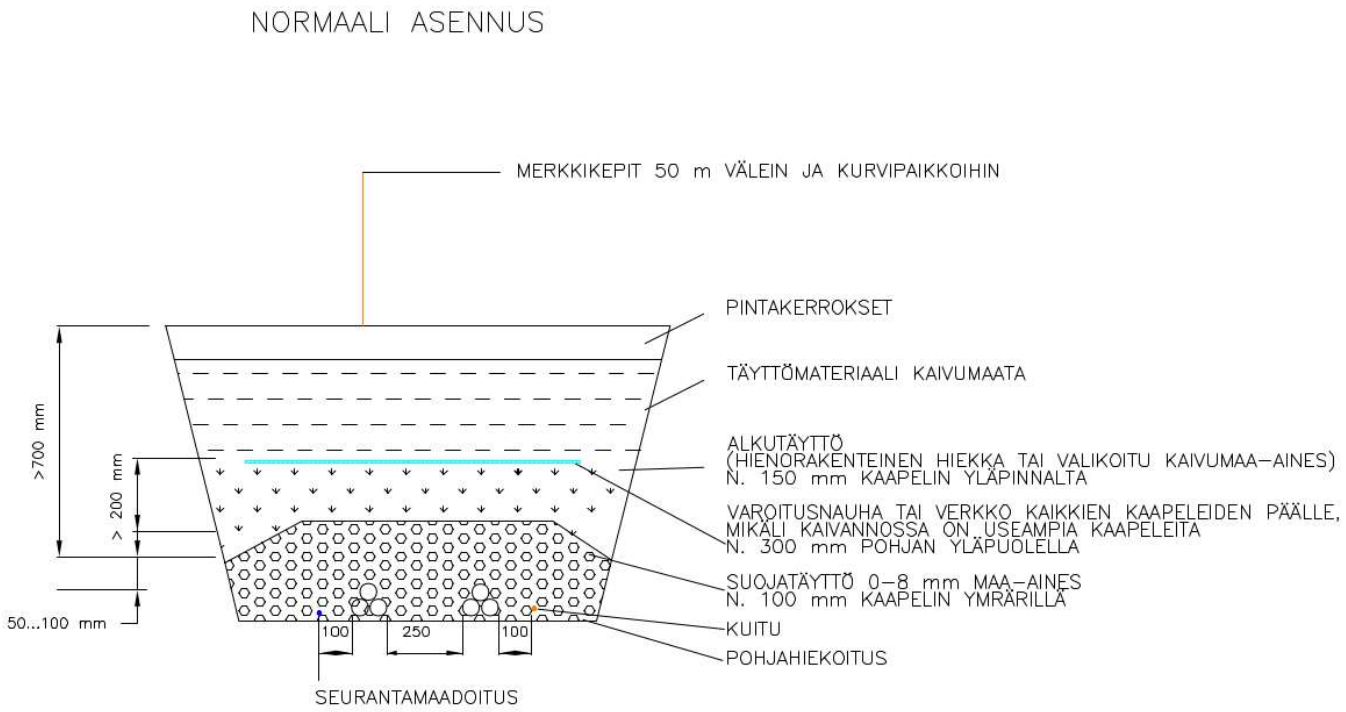


LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelien suojaus ja kaapeliojan poikkileikkaukset

- ✓ Esimerkki ns. normaalista KJ-kaapeliojan poikkileikkauksesta. Ojassa myös saattokupari ja kuitukaapeli.

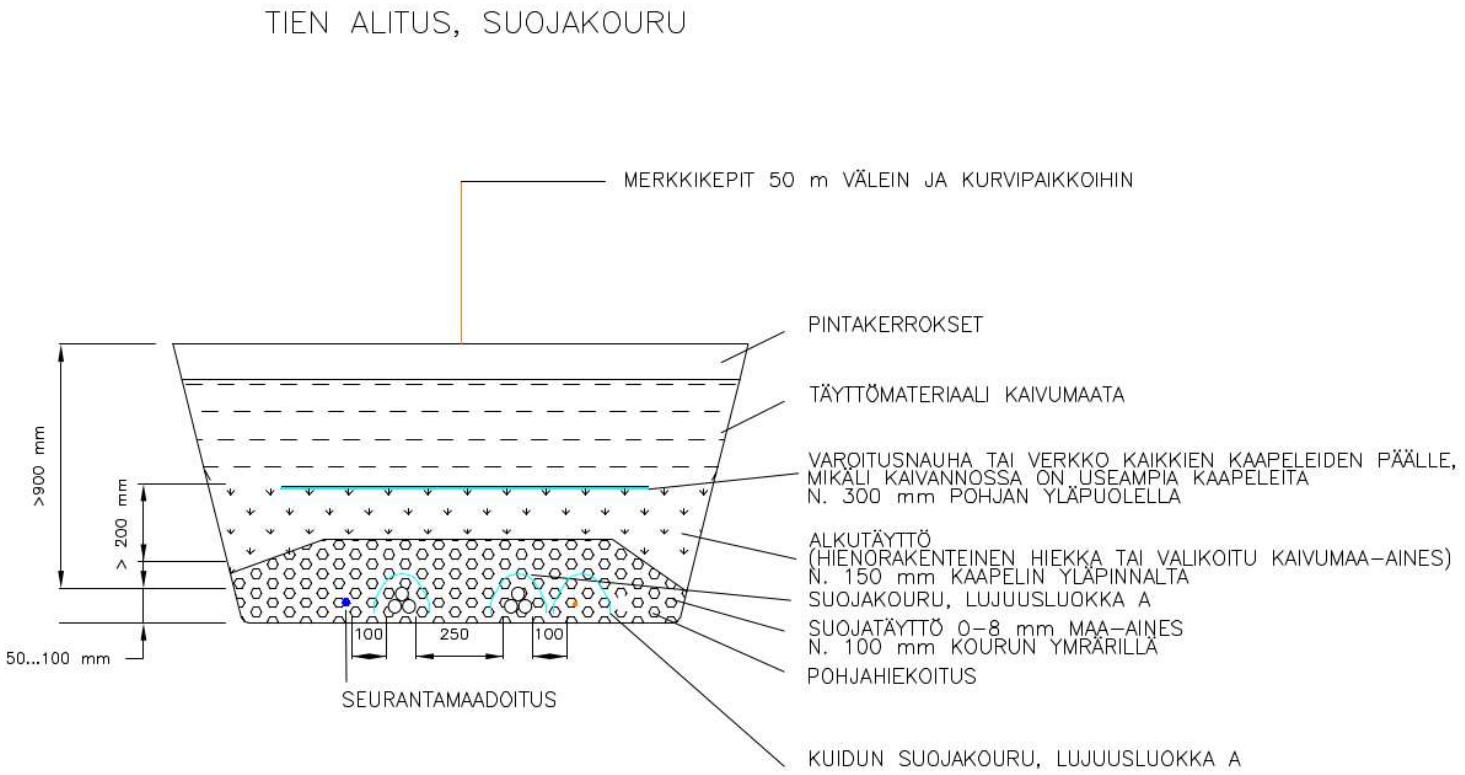


LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelien suojaus ja kaapeliojan poikkileikkaukset

- ✓ Esimerkki tien alituksen KJ-kaapeliojan poikkileikkauksesta. Ojassa myös saattokupari ja kuitukaapeli.

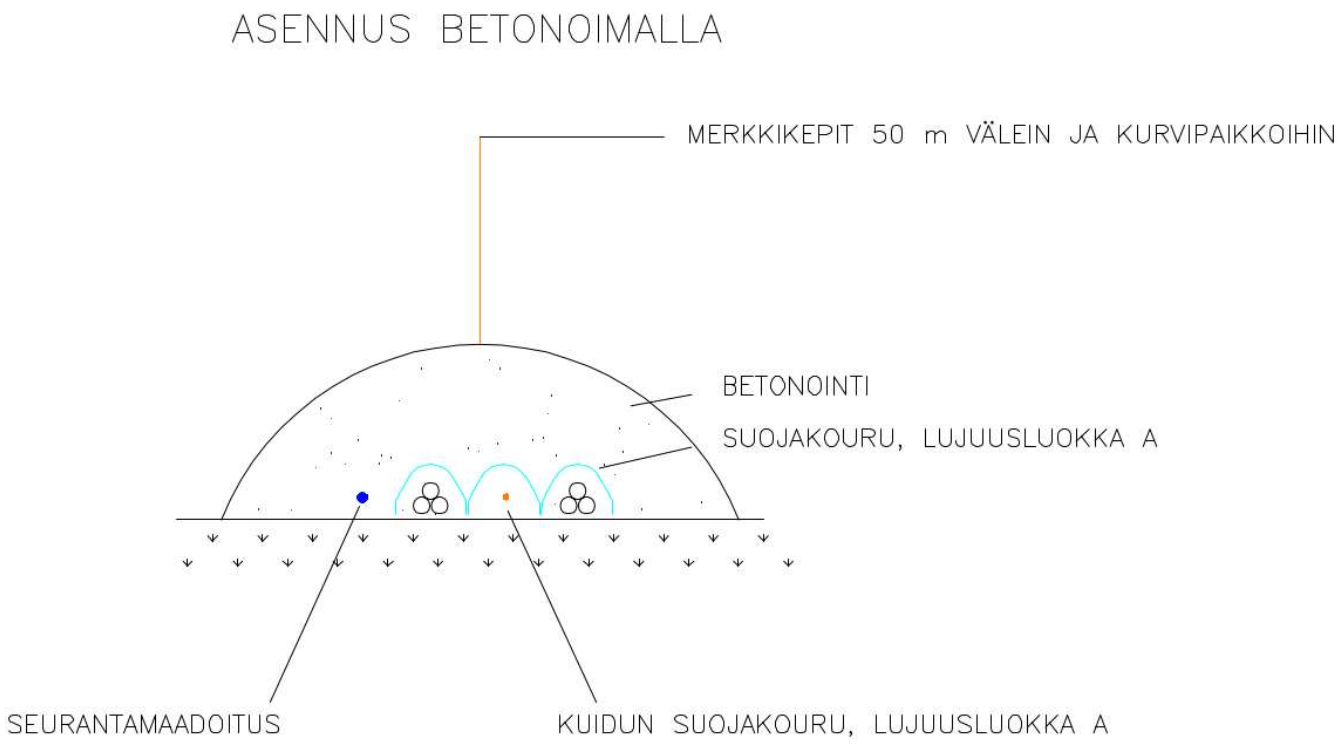


LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelien suojaus ja kaapeliojan poikkileikkaukset

- ✓ Esimerkki KJ-kaapelisuojauksesta betonoimalla. Betonissa kulkee mukana myös saattokupari ja kuitukaapeli.



LÄHDE: Develo Energia Oy

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelien suojaus ja kaapeliojan poikkileikkaukset

- ✓ Rakennuttaja ja maanomistaja saattaa esittää omat vaatimuksensa asennussyvyyksistä ja suojauksista.

Taulukko 1. Suojausvaatimukset **pienjännitemaakaapeleille**, jotka ovat ilman metallista kosketussuojaa ja kaikille **keskijännitekaapeleille.**

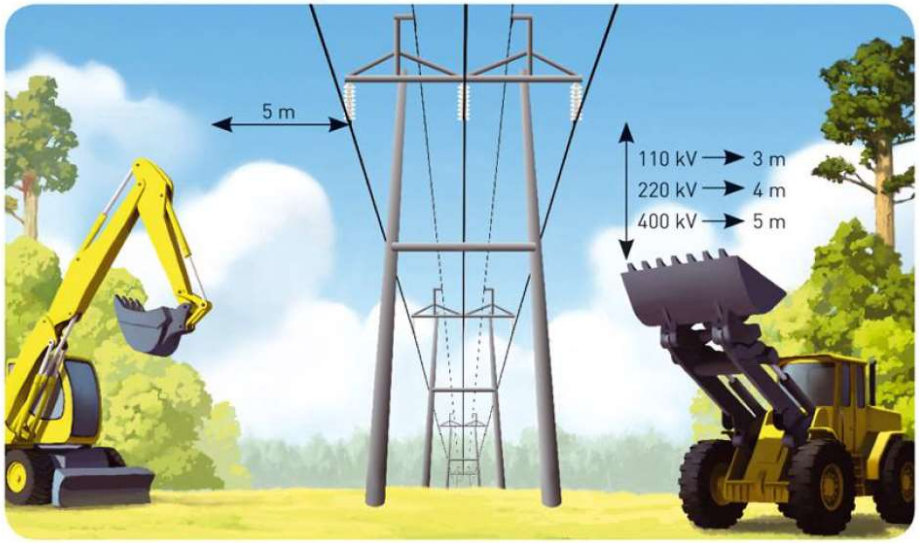
Kaapelin tai suojaputken **asennussyvyys h** asennusalustan yläpinnasta	Standardin SFS-EN 61386-24 mukaisen iskunkestävyyden ja puristuskestävyyden mukaan	Standardin SFS-EN 50520 mukaisen iskunkestävyyden mukaan	Standardoimattomien suojaputkien rengasjäykkyys
$h \geq 0{,}7$ m	varoitusnauha	varoitusnauha	C-luokka
$0{,}5$ m $< h < 0{,}7$ m	L 450	suojalevy, -kouru tai -nauha	C-luokka
$0{,}3$ m $\leq h \leq 0{,}5$ m piha ja puistoalueilla	N 750	suojalevy, -kouru tai -nauha	A-luokka
$0{,}3$ m $\leq h \leq 0{,}5$ m muilla alueilla	N 450	suojalevy, -kouru tai -nauha	B-luokka
pinta-asennus 0 m $\leq h < 0{,}3$ m ei normaalisti liikennöitävät alueet	Pinta-asennuksissa esim. kalliolla tulee suojauksen kestää ympäristön rasitusta ja mahdollista satunnaista liikennöintiä. Suojauksena voi olla esim. 16 kN/m² rengasjäykkyyden omaava kaapelinsuojaputki ja riittävä betonointi tai vastaavan suojan antava muu suojaus esim. > 60 kN/m2 rengasjäykkyyden omaava muoviputki.		

LÄHDE: Verkostosuositus RK1:16

Keskijännitekaapeliverkko

Kaapelit SJ-johtojen läheisyydessä

- ✓ Ennen SJ-johdon läheisyyteen tehtävää kaapelointia on pyydettävä risteämälausunto johdon omistajalta, esimerkiksi Fingridiltä.
- ✓ Yleensä vähintään maadoituskaapelit on eristettävä vaarajännitealueella, joka ulottuu esimerkiksi vähintään 20 m päähän ilmajohdon maadoituksista ja haruksista. Käytännössä tämä tarkoittaa, että maadoituskaapelit on asennettava putkeen ≤33 m päässä voimajohdon keskilinjasta (13 + 20 = 33 m).
- ✓ Myös KJ-kaapelit suositellaan asennettavaksi putkeen SJ-johtojen vaarajännitealueella.



Jännitetaso kV	Eristinketjun pituus	Eristinlautasten lukumäärä
110	noin 1 metri	6-8
220	noin 2 metriä	10-12
400	noin 4 metriä	18-24

LÄHDE: Develo Energia Oy ja Fingrid Oyj

Tauko 15 min
Jatketaan 14.25

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ **Suurjännitekaapeliverkko**
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Suurjännitekaapeliverkko

- ✓ Tyypillisesti 110 kV, mutta tulevaisuudessa mahdollisesti myös 400 kV.
- ✓ Tuulipuiston sisäisten sähköasemien yhteen liittämiseen ja verkkoliityntään.
- ✓ Suhteellisen harvinainen tuulipuistoissa.
- ✓ Hinnoittelu verrattuna ilmajohtoon noin 4-5 kertainen (sis. 110 ja 400 kV).
- ✓ Parempi hyväksyttävyys kuin ilmajohdolla.
- ✓ Suurjännitekaapeliverkon rakentaminen vaatii erikoisosaamista ja –kalustoa.

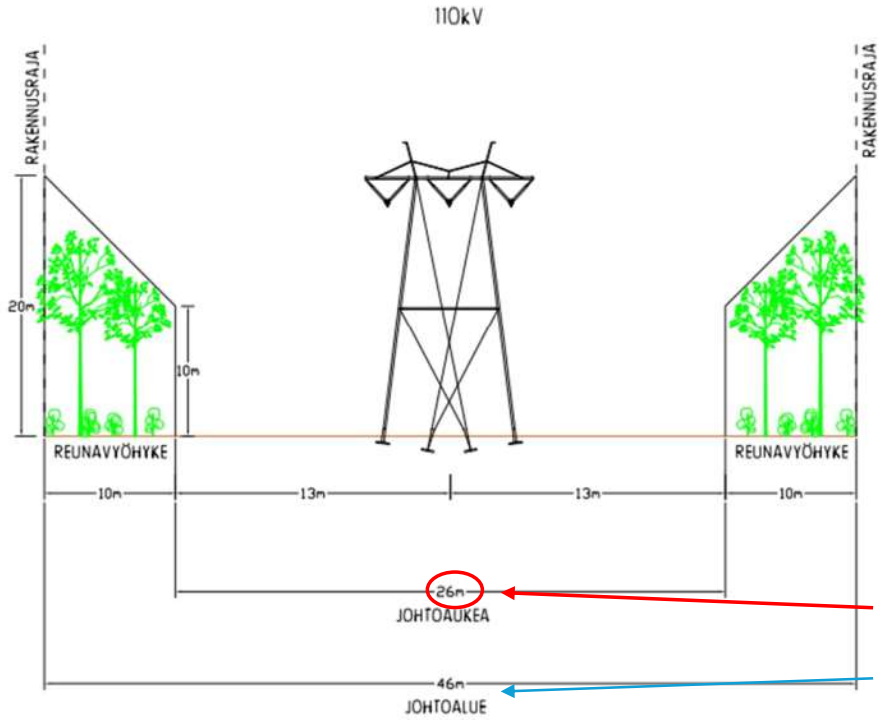
KUVA: AHXCHBMK-W-tyypin 110 kV kaapeli

KUVA: 110 kV kaapelipäätteet

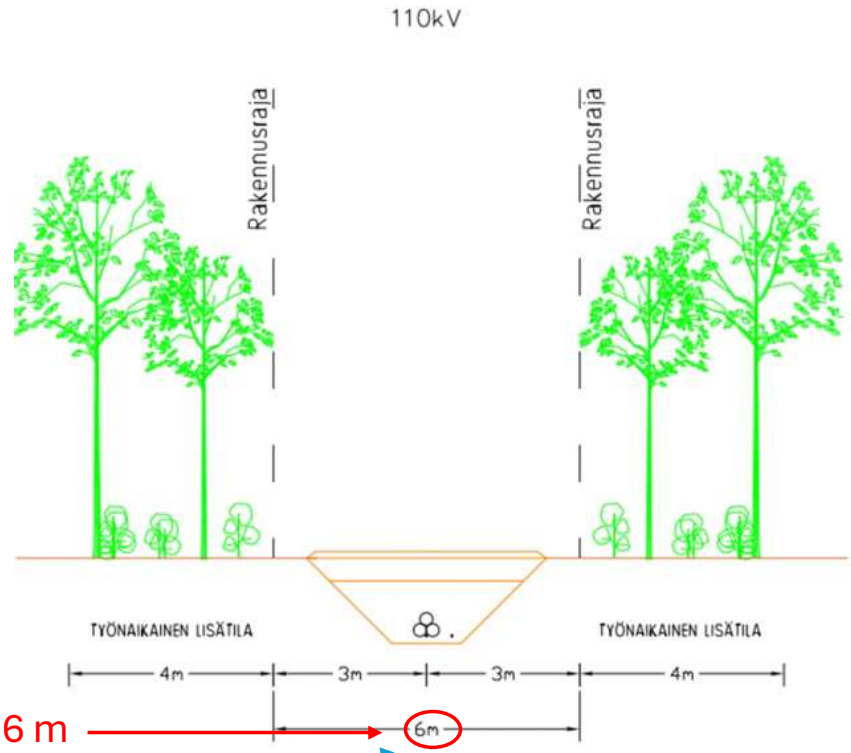
LÄHDE: Develo Energia Oy ja Reka Kaapeli Oy

Suurjännitekaapeliverkko

Hyväksyttävyys verrattuna ilmajohtoon



KUVA: 110 kV ilmajohdon johtoalue



26 m vs. 6 m

46 m vs. 6 m

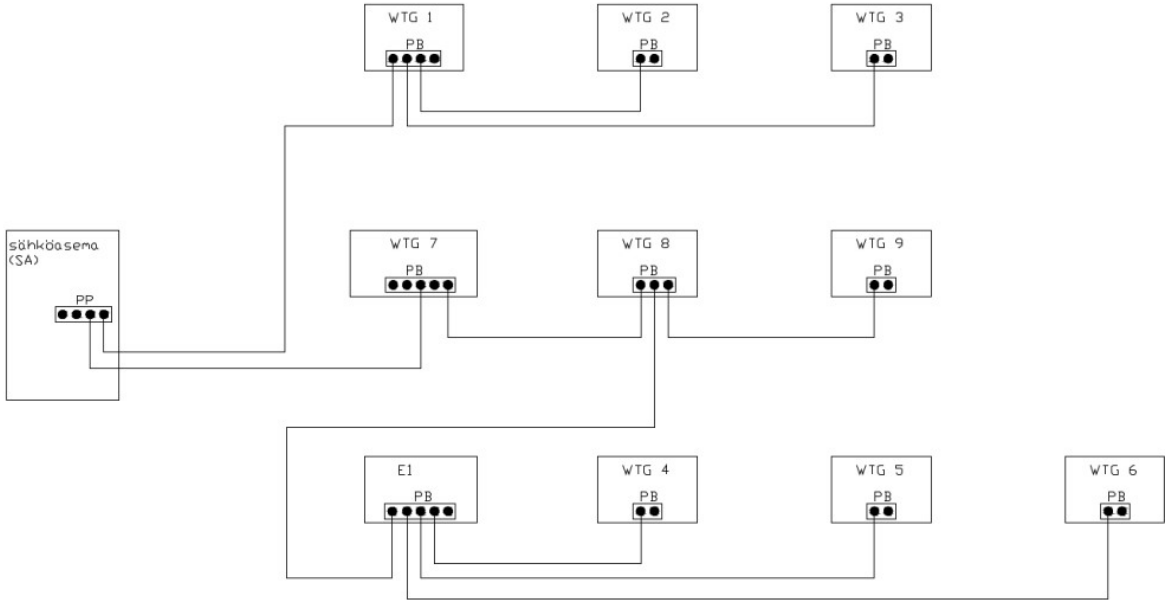
KUVA: 110 kV kaapelin johtoalue

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ **Kuitukaapeliverkko**
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Kuitukaapeliverkko

- ✓ Voimalatoimittaja määrittelee kuitujen tarpeen, esimerkiksi max. 6 voimalaa per rengas
- ✓ Pitkillä välimatkoilla >10-20 km voi joutua asentamaan vahvistimen.

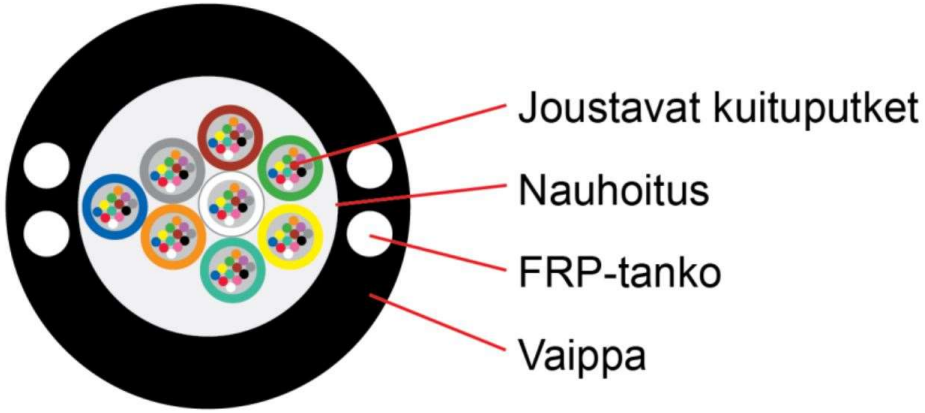


KUVA: Kuitukaavio

LÄHDE: Develo Energia Oy

Kuitukaapeliverkko

- ✓ Tyypillinen kaapelityyppi esimerkiksi FZ4RMU Flex yksimuotokuitu (metalliton).
- ✓ Tyyppilinen parilukumäärä 1x12 tai 2x12 kpl (kuvassa 8x12 = 96 kuitua).

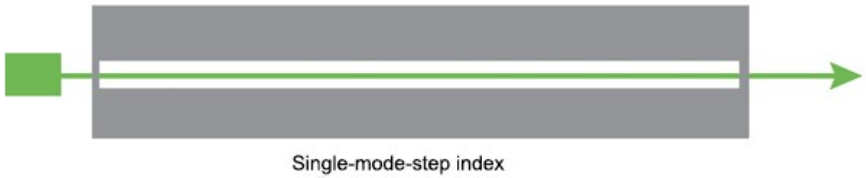


LÄHDE: Nestor Oy

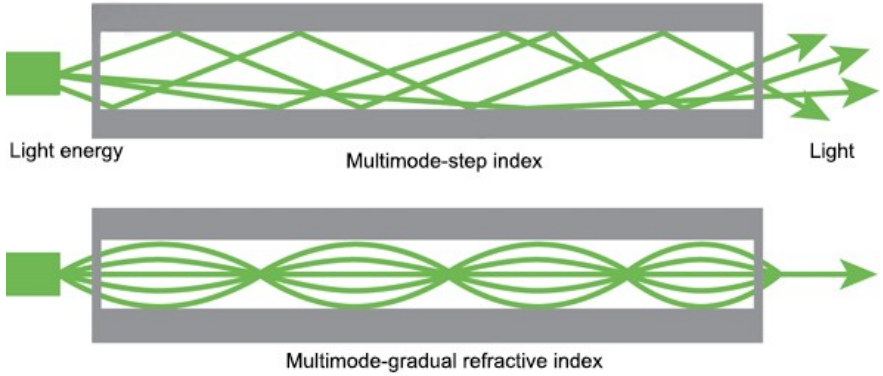
Kuitukaapeliverkko

Yksimuoto (SMF) vs. monimuoto (MMF)

- ✓ Yksimuotokuitu soveltuu pidempiin tiedonsiirtoyhteyksiin yleensä >10-20 km, kun monimuoto on tarkoitettu lyhyempiin yhteyksiin yleensä <2 km. Siksi monimuotoa käytetään tiedonsiirtoon rakennuksissa ja esimerkiksi kampuksilla.
- ✓ Yksimuotokuitu on optinen kuitu, joka lähettää suoraan optisia signaaleja lateraalisessa tilassa.
- ✓ Monimuotokuidulla on kahta taitekerrointyyppiä: asteittainen indeksi ja askelindeksi.



KUVA: Yksimuotokuidun signaali



KUVA: Monimuotokuitujen signaali

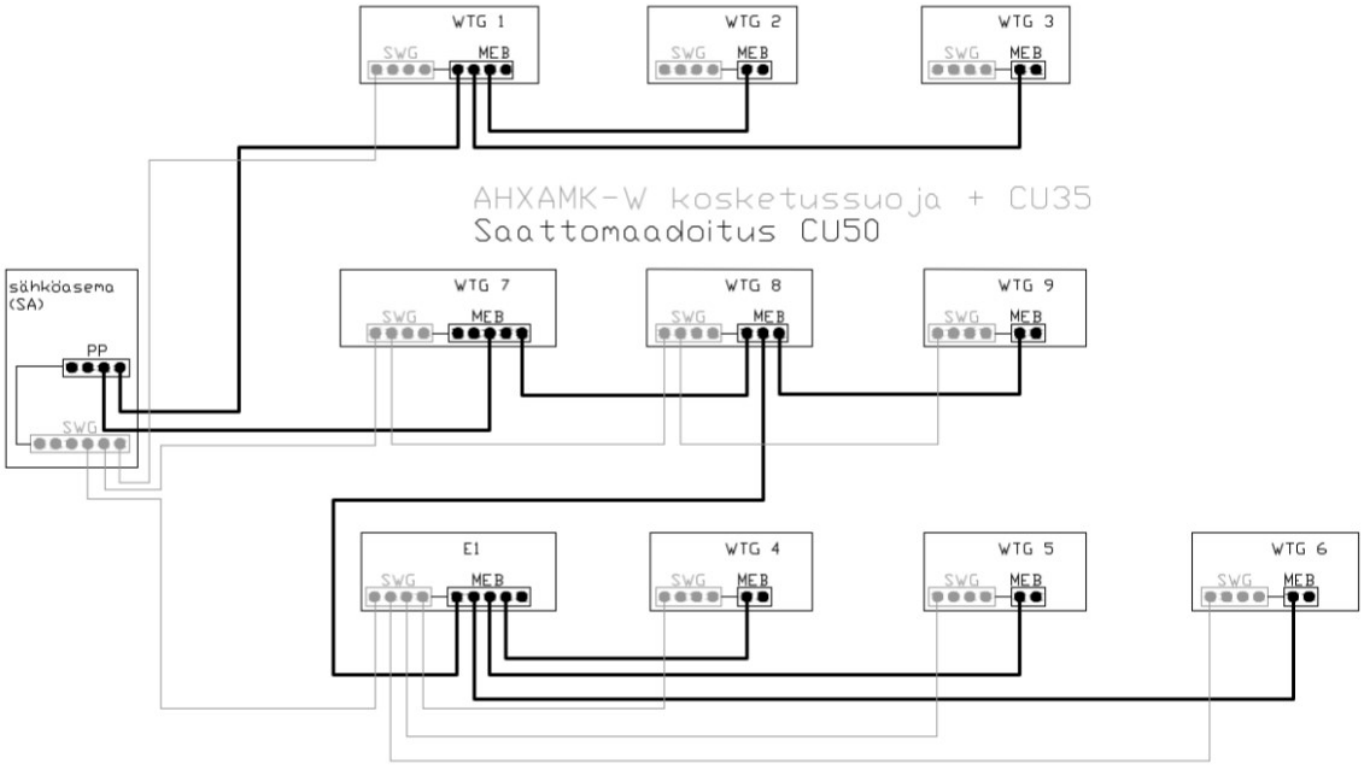
LÄHDE: https://www.hdv-fiber.com/fi/news/what-is-the-difference-between-single-mode-and-multimode-fiber/

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ **Maadoitusjärjestelmä**
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. Cross-bonding

Maadoitusjärjestelmä

- ✓ KJ-kaapelin kosketussuoja ja mahdollinen keskuskupari ovat oleellinen osa maadoitusjärjestelmää saattomaadoituksen lisäksi.
- ✓ Tuulipuiston maadoituskaavion lisäksi sähköasemalla, voimaloilla ja esimerkiksi erotinasemilla omat maadoitussuunnitelmansa.
- ✓ Maadoitusjärjestelmän toiminta varmennetaan vaarajänniteselvityksellä.



KUVA: Maadoituskaavio

LÄHDE: Develo Energia Oy

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ **Kaapeliverkkojen laadunvarmennus**
4. Cross-bonding

Kaapeliverkkojen laadunvarmistus

- ✓ Asennuksien aistinvarainen tarkastus
- ✓ Kaapelikaivannon valokuvadokumentaatio
- ✓ Vaihejärjestyksien tarkastaminen
- ✓ Vaipaneheyden mittaus
- ✓ Osittaispurkausmittaus
- ✓ Häviökerroinmittaus
- ✓ 24h käyttöjännitetesti / VLF-jännitetesti
- ✓ Kuitukaapeleiden OTDR-mittaus
- ✓ Maadoituksien jatkuvuuden mittaus (saattomaadoitus, kosketussuoja)
- ✓ Kaapelireittien kartoitus esimerkiksi ETRS TM35FIN N2000 – koordinaatistossa.
- ✓ Kaapelireittien pohjalta dokumentoidaan yleisesti x-, y- ja z-koordinaatit Traficomin M71 ohjeen mukaisesti (mittaustarkkuus 0,2 m).

LÄHDE: Develo Energia Oy ja kuva: https://ideat.sonepar.fi/infratiera-rakentaa-suomeen-uusiutuvan-energian-verkostoa/

Sisältö

1. Lyhenteet ja termit
2. Lait, standardit ja suositukset
3. Tuulipuiston maakaapeliverkko
   - ✓ Keskijännitekaapeliverkko
   - ✓ Suurjännitekaapeliverkko
   - ✓ Kuitukaapeliverkko
   - ✓ Maadoitusjärjestelmä
   - ✓ Kaapeliverkkojen laadunvarmennus
4. **Cross-bonding**

Kosketussuojien vuorottelulla pienemmät energiahäviöt ja parempi toimintavarmuus

TEKSTI JOONAS LAHTI, EUROLAITE OY KUVAT JOONAS LAHTI

Suomen tuulipuistojen sisäverkon rakenne vaihtelee tuulipuiston paikan ja tuulivoimaloiden lukumäärän mukaan. Tulevaisuudessa sekä kaapeleiden määrä että yksittäisten kaapeliyhteyksien pituudet kasvavat turbiinien määrän kasvaessa. Yhä useammin sähköaseman ja puiston välimatkat ovat myös entistä pidempiä. Lisäksi tuulivoimaloiden tehot ovat kasvussa. Sisäverkoissa esiintyy siten enenevissä määrin ilmiöitä, joihin ei olla totuttu suomalaisissa keskijänniteverkoissa. Yksi tällainen ilmiö on kaapelin kosketussuojassa kiertävä virta, minkä tiedetään jo aiheuttaneen vikaantumisia ja merkittäviä tuotonmenetyksiä suomalaisissa tuulipuistoissa. Kiertäviä virtoja voidaan hallita olemassa olevilla ratkaisuilla, kuten kosketussuojien vuorottelulla eli cross-bondingilla.

TUULIPUISTOJEN sisäverkot suunnitellaan ja rakennetaan kestämään tuulipuiston elinkaari, eli 25–30 vuotta. Kaapeleiden mitoitus tehdään maksimikuorman ja -tehon mukaan, mikä tarkoittaa kaapeleille lähes 100 prosentin kuormitusta optimituulella. Tämä poikkeaa merkittävästi esimerkiksi kaapeloidusta keskijännitejakeluverkosta, jonka elinkaari on jopa tuplasti pidempi. Jakeluverkkojen asennushetkellä otetaan myös huomioon mahdolliset laajennustarpeet. Tämä johtaa jakeluverkon tarkoituksenmukaiseen ylimitoittamiseen. Jakeluverkoissa kaapeleiden kuormitusaste onkin yleensä vain noin 10–30 prosenttia, ja korkeintaan muutaman kerran elinkaaren aikana kuormitus nousee hetkellisesti 100 prosenttiin esimerkiksi verkon jossakin osassa syntyneen vian vuoksi aiheutuneen hätäkäytön vuoksi. Lisäksi keskijännitejakeluverkko on pääasiassa rengasmainen, jolloin verkkoa voidaan käyttää useimmiten normaalisti rajaamalla yksittäinen vikakohta irti muusta verkosta. Tuulipuistojen sisäverkko on lähes poikkeuksetta säteittäinen, jolloin yksittäinen vika johtaa koko tuulipuiston tuoton menetyksiin.

TUULITURBIINIEN muodostama sähkövirta kulkee kaapelin sydämessä eli johtimessa. Kaapelin eristyksen ulkopinnan metallinen kosketussuoja toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana sekä nimensä mukaisesti sähköisenä ja mekaanisena suojana estäen esimerkiksi ihmisen joutumisen virtapiirin osaksi. Suljetussa kosketussuojapiirissä kaapelin kosketussuojat yhdistetään suoraan maadoitukseen kahdesta kohdasta, yleisesti kaapeliyhteyden molemmista päistä. Tämä muodostaa ehjän virtapiirin maan ja kaapelin kosketussuojan välille, jolloin kosketussuojaan muodostuu kiertävä virta.

KIERTÄVÄN virran suuruus riippuu erityisesti kaapelin pituudesta, johtimen virrasta sekä jännitteestä. Jakeluverkkojen keskijännitekaapeliverkot ovat lähes poikkeuksetta toteutettu suljetulla kosketussuojapiirillä. Matalasta kuormitusasteesta ja suhteellisen lyhyistä kaapeliyhteyksistä johtuen tämä ei ole aiheuttanut tietävästi juurikaan vikaantumisia eikä häviöiden osuus ole noussut merkittäväksi kosketussuojissa kiertävien virtojen vuoksi. Toisin kuin tuulipuistojen sisäverkoissa, joissa kaapeliyhteydet voivat olla pituudeltaan kymmenkertaisia ja kuormitus on suhteessa moninkertainen. Jakeluverkon asennustapoja soveltaen tuulipuistojenkin kaapeliverkkojen kosketussuojapiirit on toteutettu useimmiten suljettuina.

Ongelmien noidankehät

MIKÄ on kiertävän virran vaikutus kaapelijärjestelmän toimintaan ja miksi se voi aiheuttaa vikoja? Suomen keskijännitekaapeliverkoissa standardien mukainen kaapelien suurin sallittu kuormitus jatkuvassa käytössä maa-asennuksessa määritetään 65 celsiusasteen johdinlämpötilan avulla. Johtimen ylittäessä 65 asteen lämpötilan kaapeli saattaa alkaa kuivattaa sitä ympäröivää maaperää, mikä kasvattaa maaperän lämpöresistiivisyyttä eli heikentää lämmönjohtumista kaapelista maaperään. Vaikka kaapelien kuormitus on valtaosan ajasta alle pienempää kuin laskennassa käytetty 100 prosentin maksimikuormitus,

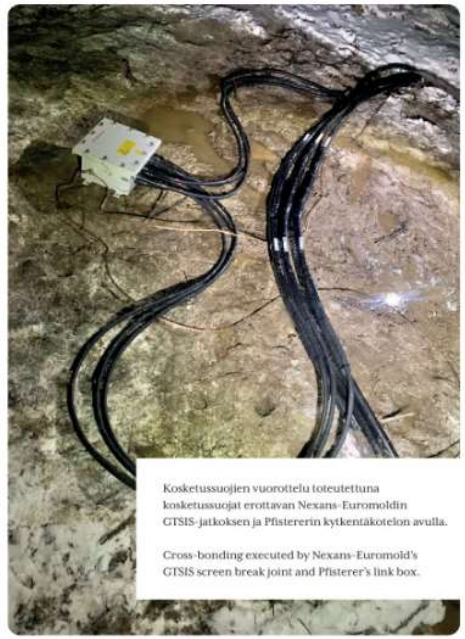
voi tilanne kääntyä täysin päälaelleen kosketussuojassa kiertävien virtojen vuoksi.

KOSKETUSSUOJASSA kiertävät virrat aiheuttavat energiansiirron häviöitä ja lämmittävät kaapelin kosketussuojaa. Kosketussuojan lämpeneminen heikentää johtimen kuormitusvirran aiheuttaman lämmön siirtymistä kaapelista sitä ympäröivään maaperään ja vierivä lumipallo on valmis: kaapelin lämpötila ylittää 65 asteen kriittisen rajan, kaapeli alkaa kuivattaa ympäröivää maaperää, lämpö siirtyy entistä huonommin kaapelista poispäin ja tästä syystä johdinlämpötila nousee entisestään. Lopulta kaapelijärjestelmän heikoin kohta pettää ja syntyy vika.

Ratkaisut olemassa, takaisinmaksuajat lyhyet

ENERGIAHÄVIÖITÄ ja vikoja aiheuttavia kiertäviä virtoja voidaan pienentää olemassa olevilla ratkaisuilla. Ongelmana on, että ilmiöt ovat suomalaisissa keskijännitekaapeliverkoissa uusia, ja toisaalta sen enempää suomalaiset kuin kansainvälisetkään standardit eivät anna ratkaisuiden toteuttamiseen yksiselitteistä ohjeistusta. Menetelmät perustuvatkin usein kansainvälisiin tutkimuksiin ja kokemuksiin. Suurin haaste on tilanteen tunnistamisessa: milloin näitä ratkaisuita tarvitaan kosketussuojissa kiertävän virran pienentämiseksi ja mikä käytännön ratkaisu on kussakin yksittäistapauksessa paras. Olisi syytä asettaa yhtenäisiä raja-arvoja tarkasteltaville suureille, mutta siitä huolimatta ainoa tapa varmistua kaapelijärjestelmän toiminnasta on tarkastella jokaista kaapeliyhteyttä erikseen. Esimerkiksi hiljattain julkaistussa Mikko Rautasalon diplomityössä todetaan, että perinteisillä yksinkertaisilla laskukaavoilla määritetyt kiertävät virrat saattavat olla pienempiä kuin todellisuudessa kaapelin kosketussuojassa kiertävät virrat ovat. Siksi oikeat suunnittelumenetelmät ovat ensiarvoisen tärkeitä ja näiden tarkastelussa on suositeltavaa suorittaa asianmukainen simulointi perinteisten laskelmien lisäksi.

INFRA Builders Oy:n Iko Laaksonen sanoo, että erityisesti kriittisissä kaapeliyhteyksissä, kuten tuulipuiston ja sähköaseman välisissä paksummissa kaapeleissa, kiertävän virtoihin kiinnitetään erityistä huomiota. Laskelmia tehdään kuitenkin nykyisin myös muille kaapeliyhteyksille, hän lisää. Yleisohjeena voidaan pitää, että mitä suurempi johdinkoko ja pidempi kaapeliyhteys, sitä suurempia kiertävät virrat kaapelin kosketussuojassa ovat. Toisaalta suuria virtoja on havaittu tuulivoimaloiden välisissä, alle kahden kilometrin pituisissa kaapeliyhteyksissä.



Kosketussuojien vuorottelu toteutettuna kosketussuojat erottavan Nexans-Euromoldin GTSIS-jatkoksen ja Pfistererin kytkentäkotelon avulla.

Cross-bonding executed by Nexans-Euromold's GTSIS screen break joint and Pfisterer's link box.

KIERTÄVIEN virtojen rajoittamiseksi voidaan käyttää kahta menetelmää: avointa kosketussuojapiiriä ja kosketussuojien vuorottelua. Avoimessa kosketussuojapiirissä kaapeliyhteyden kosketussuoja kytketään suoraan maadoitukseen vain linjan toisessa päässä ja toinen pää kytketään maadoitukseen vaippaylijännitesuojien kautta. Siten kaapelin kosketussuojan ja maan välille ei synny ehjää virtapiiriä ja kosketussuojissa ei pääse kiertämään virtaa. Vaippaylijännitesuojat estävät avoimen pään jännitteen nousun vaaralliselle tasolle esimerkiksi ilmastollisien ja kytkentäylijännitteiden vuoksi. Avoimen kosketussuojapiirin huono puoli on avoimen pään lineaarisesti matkan funktiona kasvava jännite, jonka takia sitä ei suositella käytettäväksi pitkissä yhteyksissä.

KOSKETUSSUOJIEN vuorottelu eli cross-bonding soveltuu pidempien kaapeliyhteyksien kiertävien virtojen pienentämiseen. Siinä kaapelivaiheiden kosketussuojia vuorotellaan, jolloin eri vaiheiden indusoituneet jännitteet ja kiertävät virrat kumoavat toisensa. Sen avulla voidaan teoriassa nollata kosketussuojassa kiertävät virrat. Huomioiden kosketussuojien vuorottelun osapituuksien poikkeamat, virtoja pystytään pienentämään kuitenkin käytännössä enintään noin 90 prosenttia. Suomalaisissa tuulipuistoissa on päästy vastaaviin lukemiin asennetuissa järjestelmissä, joissa aiemmin kiertävien virtojen tiedetään aiheuttaneen vikaantumisia.

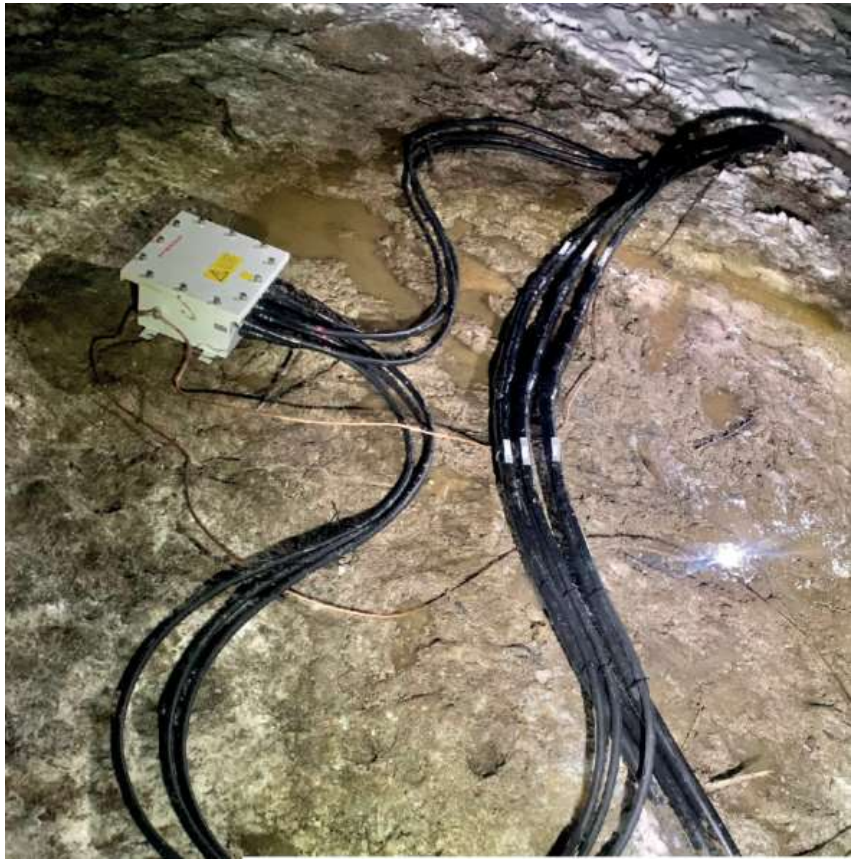
MOLEMPIEN menetelmien toteutus edellyttää asianmukaista suunnittelua ja erityistä tarkkaavaisuutta materiaalien valinnassa sekä asennuksessa. Oikein toteutettuna molemmilla menetelmillä voidaan parantaa kaapeleiden kuormitettavuutta merkittävästi. Esimerkiksi kuormitettavuuden suhteen rajoilla olevan kaapelin johdinkokoa voidaan pienentää kosketussuojien vuorottelulla ja saada näin merkittäviä kustannussäästöjä jo investointivaiheessa. Lisäksi tästä on apua, kun kaapelit ovat suuria ja siten rajoilla kojeiston kennoihin mahtumisen suhteen. Pelkästään pienempien häviöiden ansiosta kosketussuojien vuorottelujärjestelmien takaisinmaksuaika voi olla alle kaksi vuotta. Järjestelmä maksaa itsensä nopeasti myös takaisin, kun vältetään yksikin tuotonmenetyksiin johtanut vika. Paras lopputulos saadaan, kun kiertävät virrat otetaan huomioon jo aikaisessa vaiheessa tuulipuiston suunnittelua. Mikäli kiertävät virrat aiheuttavat harmia jo käytössä olevan tuulipuiston kaapelijärjestelmässä, voidaan kosketussuojien vuorottelujärjestelmä toteuttaa myös jälkikäteen. •

LÄHDE: https://www.e-julkaisu.fi/sty/tuulivoima/1-2021/mobile.html#pid=20

Cross-bonding

- ✓ Uusia ilmiöitä Suomalaisten tuulipuistojen KJ-sisäverkoissa pitkien kaapeliyhteyksien, suurien kuormitusvirtojen ja korkeampien kuormitusasteiden vuoksi → vikaantumisia, jotka aiheuttivat kalliita tuotonmenetyksiä.
- ✓ Vuonna 2019 kahdessa tuulipuistossa merkittäviä vikoja KJ-sisäverkossa. Viat korjautuivat cross-bondingin asentamisella. Toisessa projektissa kosketussuojan kiertävät virrat tippuivat noin 70 A:sta → 4 A:iin.
- ✓ Perinteisien jakeluverkkojen KJ-kaapeliverkoissa ei oltu törmätty näihin, koska jakeluverkoissa myös paremmat toleranssit. Tämän vuoksi suunnittelijat eivät osannut suunnitella myöskään tuulipuistoihin näitä.
- ✓ Lääke tähän: Cross-bonding, eli kosketussuojien vuorottelu tarkoittaa kaapelin kosketussuojien kytkemistä ristiin tietyn välimatkoin, jotta vaippaan indusoituneet jännitteet ja virrat kumoavat toisensa eri kaapelivaihdein vaihesiirtokulman (120°) avulla.

→ 2020 konsepti oli ehdolla vuoden tuulivoimateoksi.



Cross-bonding

Kolmejohtimiset kaapelit

Kolmiossa olevilla vaiheilla yhteinen kosketussuoja – vaiheista indusoituvien virtojen summa on nolla.

→ Suljettu kosketussuojapiiri

Yksijohtimiset kaapelit

Vaihejohdin indusoi jännitteen kosketussuojaan, jonka seurauksena kosketussuojan virta kasvaa matkan funktiona.

→ Kosketussuojan maadoitustapa päätettävä mallintamalla.

Se voi olla:

- SB
- SBP
- Cross-bonding
- Em. yhdistelmä

LÄHDE: Develo Energia Oy

Suljettu kosketussuojapiiri (Solid Bonding)

- ✓ Yleisin kosketussuojan maadoitustapa.
- ✓ Kaapelilinjan kosketussuoja on kytketty suoraan maadoitukseen kaapelijärjestelmän molemmista päistä päätteillä.
- ✓ Käytetään yleisesti pisimmillään muutamien kilometrien kaapeliyhteyksissä.

Plussat

+ Helppo asentaa ja suunnitella.

+ Pienet materiaalikustannukset (normaalit varusteet ja niiden asennus, ei vaippaylijännitesuojia eikä link boxeja).

+ Varmistaa suojalaitteiden toiminna.

Miinukset

- Pahimmillaan merkittäviä kiertäviä virtoja kosketussuojassa, jotka riippuvat erityisesti johtimen virrasta ja kaapelilinjan pituudesta.

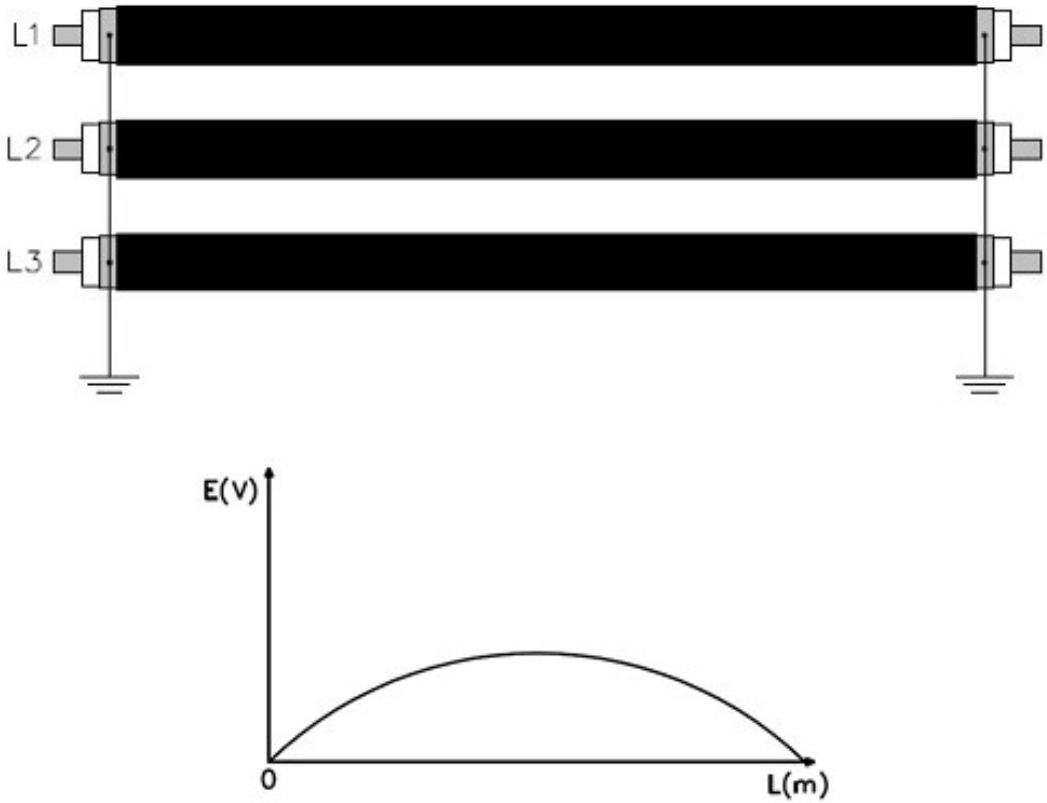
- Kosketussuojassa kiertävä virta lämmittää sitä aiheuttaen häviöitä ja pienentäen johtimen kuormitettavuutta.

- Kuormitettavuuden aleneminen johtaa suurempiin johdinpoikkipinta-aloihin.

- Vain verrattain lyhyisiin kaapeliyhteyksiin.

LÄHDE: Develo Energia Oy

Suljettu kosketussuojapiiri



KUVA: Suljetun kosketussuojapiirin kytkentäkaavio ja jännitejakauma pituuden funktiona.

Avoin kosketussuojapiiri (Single Point Bonding)

- ✓ Yleinen kosketussuojan maadoitustapa lyhyissä KJ- ja SJ-kaapeliyhteyksissä.
- ✓ Kaapelilinjan kosketussuoja on kytketty suoraan maadoitukseen kaapelijärjestelmän toisessa päässä ja toinen pää on irti maadoituksesta (tyypillisesti SVL:ien kautta).
- ✓ Käytetään yleisesti lyhyissä, pisimmillään muutamien satojen metrien kaapeliyhteyksissä, kuten esimerkiksi tuulipuistojen sähköasemalla päämuuntajan ja KJ-kojeiston välisiin kaapeliyhteyksiin.

Plussat

+ Suhteellisen helppo asentaa ja suunnitella.

+ Suhteellisen pienet materiaalikustannukset alussa (SVL:t ja link boksit linja toiseen päähän + maadoitusjohdin (ECC)).

+ Kosketussuojassa ei esiinny kiertäviä virtoja, eikä se näin lämmitä ja pienennä johtimen kuormitettavuutta.

Miinukset

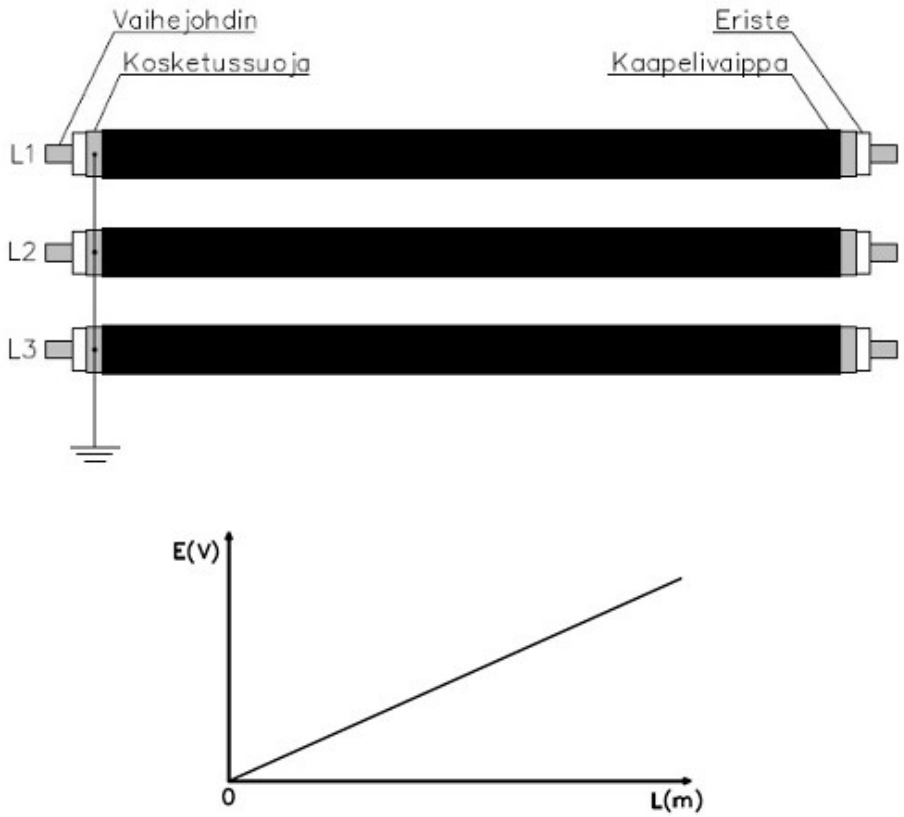
- Jännite kaapelin kosketussuojassa saattaa olla korkea linjan avoimessa päässä riippuen linjapituudesta ja johtimen virrasta.

- Suojalaitteiden toiminta saattaa heikentyä tietyssä osassa kaapelilinjaa tapahtuvissa vioissa (ECC).

- Lyhyisiin kaapeliyhteyksiin (yleisesti enintään 500 m).

LÄHDE: Develo Energia Oy

Avoin kosketussuojapiiri



KUVA: Avoimen kosketussuojapiirin kytkentäkaavio ja jännitejakauma pituuden funktiona.

Kosketussuojien vuorottelu (Cross-bonding)

- ✓ Kaapelijärjestelmän kosketussuoja on kytketty maadoitukseen linjan molemmista päistä, mutta kosketussuojat vuorottelevat vaiheesta toiseen suunnitellulla tavalla.
- ✓ Vähintään kahden kelapituuden pituisiin yhteyksiin (puolikas cross-bonding).

Plussat

+ Kosketussuojaan indusoitunut jännite pienempi.

+ Kosketussuojassa kiertävät virrat lähes nolla.

+ Lisää kuormitettavuutta.

+ Mahdollistaa pienempien johdinpoikkipinta-alojen käytön.

+ Soveltuu pitkiin kaapeliyhteyksiin. Erityisen pitkiin (yli 10 km) käytetään yleisesti useampaa kosketussuojien vuorottelu-järjestelmää.

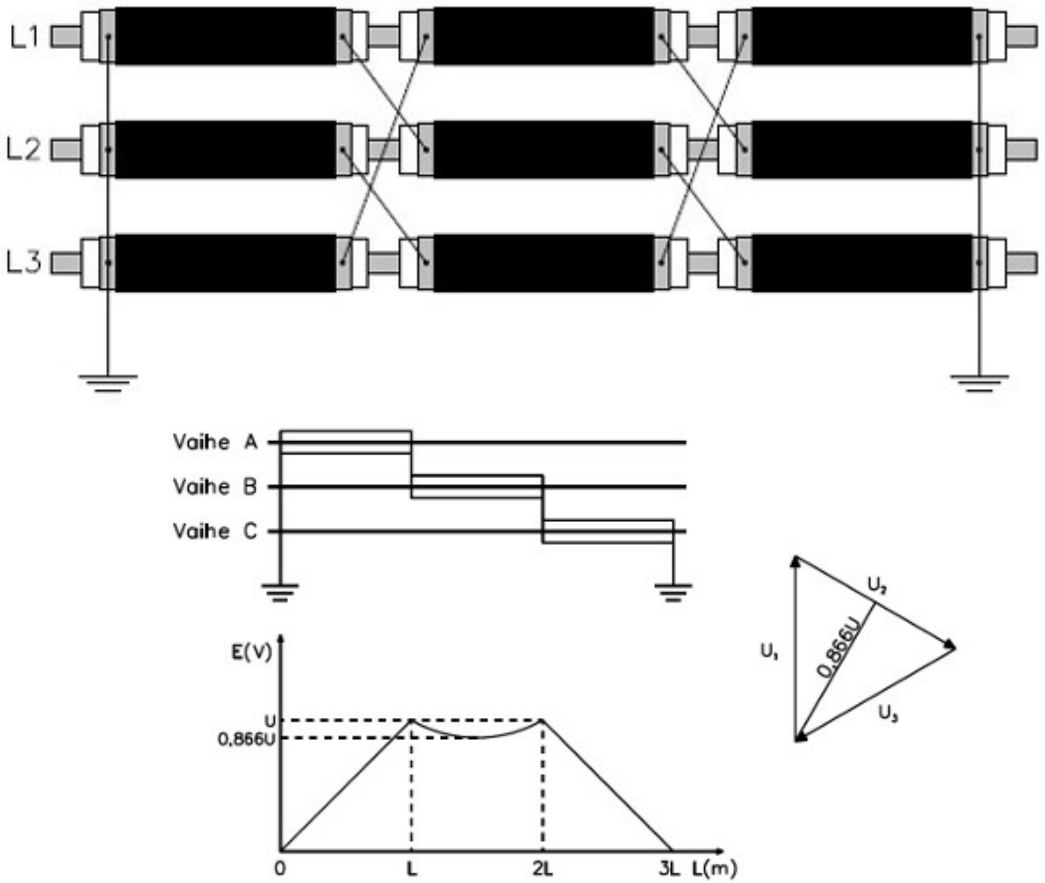
Miinukset

- Teknisesti kompleksinen.

- Mahdollisesti kalliimmat alkuinvestoinnit (vrt. elinkaarikustannus).

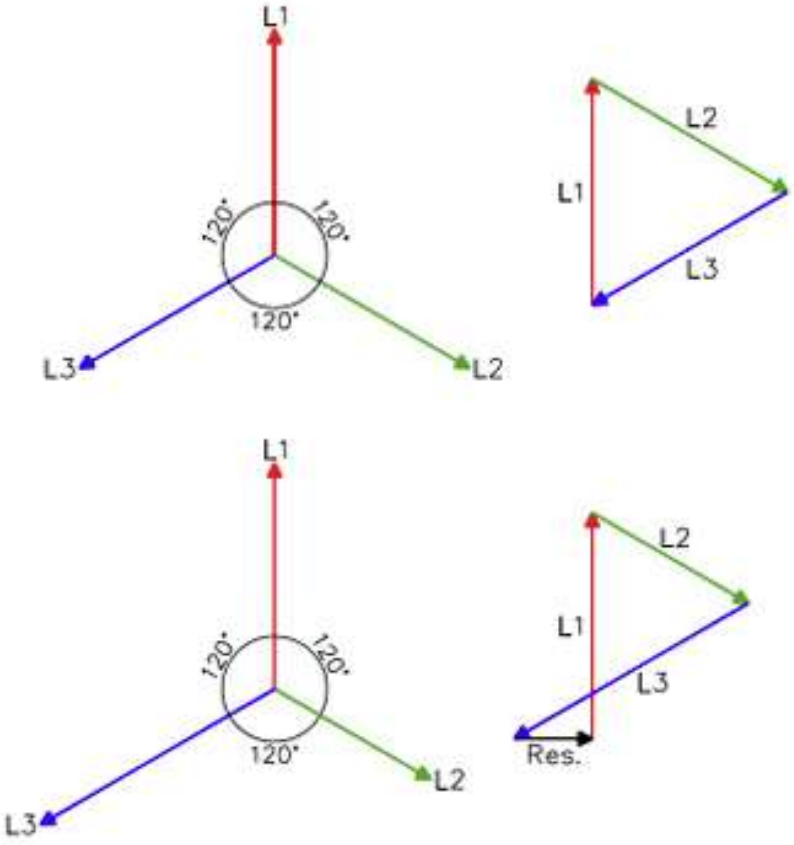
LÄHDE: Develo Energia Oy

Cross-bonding



KUVA: Cross-bondingin kytkentäkaavio, yhden kosketussuojan kytkentäkaavio ja siihen indusoituva jännite.

Cross-bonding

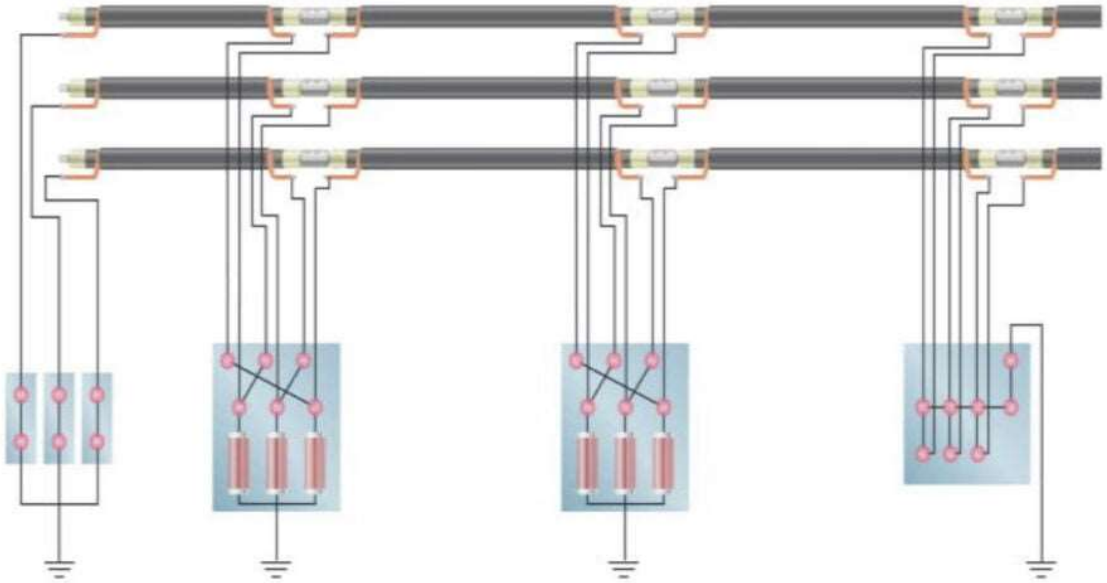


KUVA: Symmetrisesti ja epäsymmetrisesti indusoituneiden jännitteiden vektorit.

- ✓ Kosketussuojien vuorottelu, eli cross-bonding saa aikaan sen, että kosketussuojien virrat pääosin kumoavat toisensa, koska ne ovat vaihevirtoja vastaavassa vaihesiirrossa toisiinsa nähden.
- ✓ Käytännössä kosketussuojien virran suuruuteen vaikuttavat pääasiassa kaapelin kuormavirta (> 500 A), kaapelin poikkipinta-ala (> 500 mm2) ja kaapelin pituus (> 5000 m).
- ✓ Kosketussuojien vuorottelun tarpeen raja-arvona on käytetty 40 A virtaa ja 65 V jännitettä. Raja-arvot eivät ole kuitenkaan standardoituja.

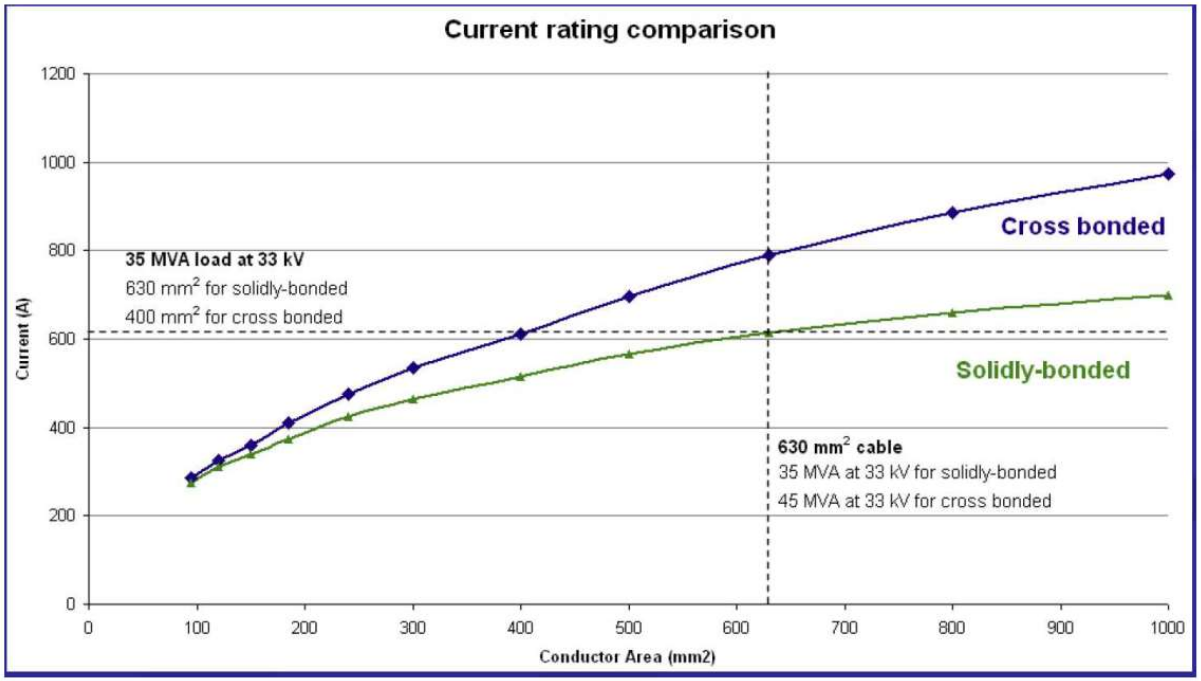
Cross-bonding

- ✓ Kaapelijärjestelmä jaetaan cross-bondingilla tavanomaisesti kolmeen osaan, mutta se voidaan jakaa myös useampaan.
- ✓ Kosketussuojien vuorottelu on suositeltavaa toteuttaa link bokseissa, joissa on SVL:t. Se voidaan tehdä myös suoraan yhdistämällä eri vaiheiden kosketussuojat toisiinsa kaapelilla, mutta se ei ole suositeltavaa.
- ✓ Kosketussuojat yhdistävä maadoituskaapeli on oltava mekaanisesti kestävä, pitkittäin vesitiivis ja jännitekestoltaan ≤10 kVDC, jotta se mahdollistaa kaapelijärjestelmän vaipaneheyden mittaamisen IEC 60229 standardin mukaisesti.



Cross-bonding

- ✓ Cross-bondingilla jopa lähes 30 % korkeampi kuormitettavuus KJ-kaapeleille.
- ✓ Pelkästään pienempien häviöiden vuoksi cross-bondingin takaisinmaksuaika on jopa alle kaksi vuotta.



LÄHDE: Develo Energia Oy

Kiitos! Kysymyksiä?

Joonas Lahti
Develo Energia Oy
Joonas.lahti@develo.fi
+358504126169