

Arttu Heinonen

**KAAPELEIDEN KOSKETUSSUOJIE  
ASENNUSTAVAT TUULIPUISTON  
KESKIJÄNNITEVERKON  
SUUNNITTELUSSA**

Diplomityö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Arttu Heinonen: Kaapeleiden kosketussuojien asennustavat tuulipuiston keskijänniteverkon suunnittelussa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2021

---

Tuulivoimalla tuotettu energia on viime vuosikymmeninä kasvanut nopeaa tahtia, johtuen valtioiden käyttämistä energiantuotantostrategioista ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Yksittäisten tuulipuistojen tuottamat energiatasot ovat kasvaneet niissä olevien voimaloiden lukumäärän kasvaessa, sekä voimaloiden teknisen kehityksen myötä. Tuotantotehon kasvaessa tuulipuiston keskijänniteverkossa kulkee suurempia virtoja, jotka vaikuttavat kosketussuojissa esiintyviin jännitteisiin ja virtoihin. Kosketussuojissa esiintyvien virtojen ja jännitteiden on todettu aiheuttavan kaapeleiden vikaantumisia varsinkin kaapelijatkoksilla.

Tämän diplomityön tarkoituksena on havainnollistaa kosketussuojiiin kohdistuvia sähköisiä ilmiöitä, määrittellä kosketussuojan jännitteiden ja virtojen laskentaperiaatteita ja käydä läpi eri kosketussuojien asennustapoja, joilla kyseisiin ilmiöihin voidaan vaikuttaa. Työssä käydään läpi tuulipuiston kaapeliverkon suunnittelussa tarkasteltavia asioita, jotka vaikuttavat kaapelin kosketussuojaan indusoituihin virtoihin ja jännitteisiin. Myös asennustapojen vaikutusta tarkastellaan kaapeliverkon kuormitettavuuteen ja niissä tapahtuviin tehohäviöihin. Diplomityössä tehdään lopuksi DIgSILENT Powerfactory simulointiohjelmalla kuvitteellinen tuulipuisto, jossa kosketussuojiiin indusoituneita virtoja ja jännitteitä mallinnetaan. Simulointituloksia verrataan työn teoriaosuudessa esitettyjen laskentametodien tuloksiin, joiden pätevyydestä ja tarkkuudesta tehtiin johtopäätökset.

Työn tuloksena eri kosketussuojien asennustapojen etuja ja haittoja saatiin havainnollistettua käytettyjen laskentamenetelmien ja simulaatioiden kautta. Kosketussuojassa esiintyville virroille ja jännitteille on määritetty suositeltavat rajoitukset, joita noudattamalla kaapeleissa ja jatkoksissa tapahtuvia vikoja voidaan ehkäistä. Kosketussuojien seisovien jännitteiden rajoituksiksi on useat maat suositellut noin 60 – 90 V. Kosketussuojissa kiertävillä virroilla on todettu olevan negatiivisia vaikutuksia kaapelijatkoksien komponenteissa, kun virran arvo lähestyy 50 A. Minimoimalla kosketussuojassa kulkevaa virtaa, voidaan kaapelin vikaantumisen todennäköisyyttä pienentää sekä kaapelissa tapahtuvia tehohäviöitä alentaa.

Avainsanat: Keskijännitekaapeli, kosketussuoja, indusoitunut jännite, indusoitunut virta, maadoitus, asennustapa, avoin kytkentä, suljettu kytkentä, kosketussuojien vaihevuorottelu, DIgSILENT Powerfactory

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Arttu Heinonen: Medium voltage cable sheath bonding methods in wind farm designing process  
Master's thesis  
Tampere University  
Electrical Engineering  
May 2021

---

The energy produced by wind power has increased rapidly in the recent decades as a result to the strategies used by different countries to fight the climate change. The power output of individual wind farms has increased due to the higher number of wind turbines and the technical advancements of the turbines. With the increased power production, the currents flowing in the wind farm medium voltage cables are higher which affect the voltages and currents that are present in the cable sheath. Highly loaded cables induce unwanted voltages and currents to the cable sheath that have been identified to be the cause of faults in the medium voltage cables, especially in the cable joints.

The purpose of this thesis is to review the electromagnetic phenomenon affecting the cable sheath, determine calculation methods for the sheath voltages and currents and go through the different cable sheath bonding methods that can be used to affect the induced sheath voltages and currents. The effect of the bonding methods for the cable ampacity and losses is also examined. At the end of the thesis a simulation model is generated using DIgSILENT Powerfactory simulation software which is used to calculate the sheath voltages and currents in a visionary wind farm. The simulation results are then compared with the results of the calculation methods presented in the theory chapters. A conclusion is then made of the validity and accuracy of the calculation methods.

This thesis presents the advantages and disadvantages of each bonding method that are illustrated in the calculation and simulation results. Limitations for the cable sheath voltages and currents are set which if followed can reduce the probability of the cable and joint faults. The recommendation of the maximum allowed standing sheath voltage in the cable sheath varies between countries and in many countries the value of the voltage is about 60 – 90 V. The cable sheath current has deemed to have negative effects on the cable joint components when the sheath current approaches 50 A. By minimizing the sheath current, the probability of a fault and the total power losses in the cable can be decreased.

**Keywords:** Medium voltage cable, cable sheath, cable screen, induced voltage, induced current, sheath grounding, bonding method, single-point bonding, solid bonding, crossbonding, DIgSILENT Powerfactory

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty NorthWind Consulting Oy:ssä ja työ valmistui Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikössä vuonna 2021. Työn aihe oli erittäin mielenkiintoinen sen ollessa varsin keskeisessä roolissa uusien tuulipuistohankkeiden suunnittelussa.

Haluan kiittää NorthWind Consulting Oy:n Ville Lambergia aiheen ehdottamisesta, työn mahdollistamisesta ja avunannosta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää tarkastajina toimineita professori Sami Repoa ja tekniikan tohtori Ari Nikanderia työni erinomaisesta ohjaamisesta poikkeusolosuhteista huolimatta.

Tampereella, 23.5.2021

Arttu Heinonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Taustatietoja .....	1
1.2 Ongelman määritelmä.....	2
1.3 Työn tavoite .....	4
2. KESKIJÄNNITEKAAPELIEN OMINAISUUDET .....	5
2.1 Kaapelin rakenne .....	5
2.1.1 Johdin .....	5
2.1.2 Eriste .....	6
2.1.3 Puolijohdekerrokset .....	6
2.1.4 Kosketussuoja .....	7
2.1.5 Ulkovaippa .....	8
2.2 Kaapelin sähköiset ominaisuudet .....	8
2.2.1 Kapasitiivinen varausvirta .....	8
2.2.2 Kosketussuojaan indusoituva sähkömotorinen voima .....	10
3. KOSKETUSSUOJIEN KYTKENTÄ- JA MAADOITUSTAVAT .....	14
3.1 Kosketussuojapiirin avoin kytkentä.....	14
3.2 Kosketussuojapiirin suljettu kytkentä.....	17
3.2.1 Lisämaadoitus keskellä kaapeliväliä.....	19
3.3 Kosketussuojien vaihevuorottelu .....	21
3.3.1 Vaihevuorottelu johtimien transponoinnilla .....	27
3.3.2 Vaihevuorottelun toteutus kytkentäkotelolla .....	28
4. KAAPELIVERKON SUUNNITTELU .....	30
4.1 Kaapeliverkon topologia .....	30
4.1.1 Kaapelien ojittaminen.....	30
4.1.2 Kaapelijatkokset ja -päätteet .....	32
4.2 Maadoitusresistanssi.....	33
4.3 Kaapeleiden kuormitettavuus .....	34

4.4	Kaapelin tehohäviöt.....	36
	4.4.1 Kosketussuojan virran häviökertoimen laskenta.....	38
4.5	Kaapeliverkon vikatila .....	39
	4.5.1 Kolmivaiheinen oikosulku.....	39
	4.5.2 Yksivaiheinen maasulku.....	40
4.6	Ylijännitesuojat.....	40
	4.6.1 Ylijännitesuojan mitoittaminen.....	41
5.	KAAPELIVERKON SIMULOINTI.....	43
	5.1 Mallinnuksen parametrit.....	43
	5.2 Tuulipuiston normaalikuormitustilanteen simulointi.....	44
	5.3 Tuulipuiston vikatilanteiden simulointi .....	47
	5.4 Tulosten analysointi .....	47
6.	YHTEENVETO.....	53
	LÄHTEET .....	56

# KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: AHXAMK-W yksijohdinkaapelin rakenne [9, muokattu]</i> .....	5
<i>Kuva 2: Kaapelin kapasitiivisen varausvirran kulku kuormittamattomassa tilanteessa eri resistansseilla [17, s.3, muokattu]</i> .....	10
<i>Kuva 3: Johtimen muodostama muuttuva magneettikenttä [18, s.32, muokattu]</i> .....	11
<i>Kuva 4: Kaapeleiden kolmio- ja tasoasennus [17, s.3]</i> .....	12
<i>Kuva 5: Kosketussuojien yksipistekytkeä kaapelipääteellä ja niiden jännitejakauma pituuden funktiona [23, s.2, muokattu] [18, s.42, muokattu]</i> .....	15
<i>Kuva 6: Kosketussuojien maadoitus molemmilla kaapelipääteellä ja niiden jännitejakauma pituuden funktiona [23, s.2, muokattu] [18, s.38, muokattu]</i> .....	17
<i>Kuva 7: Kosketussuojaan indusoitunut virta molemmista päädyistä maadoitetussa asennuksessa [18, s.33, muokattu]</i> .....	18
<i>Kuva 8: Useasta pisteestä maadoitettu kosketussuoja [18, s.37, muokattu]</i> .....	19
<i>Kuva 9: Kahdesta ja kolmesta pisteestä maadoitettujen kosketussuojien simuloitut kapasitiiviset varausvirrat</i> .....	20
<i>Kuva 10: Kahdesta ja kolmesta pisteestä maadoitettujen kosketussuojien simuloitut kokonaisvirrat</i> .....	20
<i>Kuva 11: Yhden kosketussuojan kytkentäkaavio ja siihen indusoituva jännite [18, s.47, muokattu]</i> .....	22
<i>Kuva 12: Kosketussuojien vaihevuorottelun kytkentäkaavio [23, s.2, muokattu]</i> .....	22
<i>Kuva 13: Symmetrisesti ja epäsymmetrisesti indusoituneiden jännitteiden vektorit [7, s.3, muokattu]</i> .....	23
<i>Kuva 14: Vaihevuorottelun kosketussuojan laskentapisteen esitys [15, s.646, muokattu]</i> .....	24
<i>Kuva 15: Kosketussuojien vaihevuorottelu johtimien transponoinnilla [18, s.49, muokattu]</i> .....	27
<i>Kuva 16: Vaihevuorottelussa käytetyn kytkentäkotelon kaavio [26, s.273, muokattu]</i> .....	28
<i>Kuva 17: Kolmen AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeliryhmän kolmio- ja tasoasennus ojassa</i> .....	30
<i>Kuva 18: Kaapeleiden transponointi [18, s.37, muokattu]</i> .....	31
<i>Kuva 19: Kuparisen maadoitusjohtimen sijainnin vuorottelu [23, s.9, muokattu]</i> .....	32
<i>Kuva 20: Kosketussuojien kytkentä maadoitusverkkoon kaapelipääteillä</i> .....	34
<i>Kuva 21: Kosketussuojan pyörrevirtojen hahmotus [18, s.33, muokattu]</i> .....	37
<i>Kuva 22: DIgSILENT Powerfactory simulointimalli kuvitteellisesta tuulipuistosta</i> .....	43

<i>Kuva 23: Kaapeleiden ojitusten poikkileikkaus simulointiohjelmassa .....</i>	<i>44</i>
<i>Kuva 24: Avoimen kosketussuojapiirin toteutus simulointiohjelmassa.....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 25: Suljetun kosketussuojapiirin toteutus simulointiohjelmassa.....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 26: Kosketussuojien vaihevuorottelun toteutus simulointiohjelmassa.....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 27: Kosketussuojien ja johtimien välisten yksivaiheisten maasulkutilanteiden simulointi.....</i>	<i>47</i>



# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl, alternating current, vaihtovirta
DC	engl, direct current, tasavirta
XLPE	engl, cross-linked polyethylene, ristosilloitettu polyeteeni
WTG	engl, wind turbine generator, tuulivoimala
$A_s$	<i>kaapelin kosketussuojan poikkipinta-ala</i>
$C$	<i>kaapelin kapasitanssi</i>
$d_j$	<i>kaapelin johtimen halkaisija</i>
$d_s$	<i>kaapelin kosketussuojan sisempi halkaisija</i>
$d_{s,g}$	<i>kaapelin kosketussuojan keskiarvoinen halkaisija</i>
$\bar{E}_a$	<i>vaiheen A kosketussuojaan indusoituva jännitegradientti</i>
$\bar{E}_b$	<i>vaiheen B kosketussuojaan indusoituva jännitegradientti</i>
$\bar{E}_c$	<i>vaiheen C kosketussuojaan indusoituva jännitegradientti</i>
$F_c$	<i>epäsymmetrisessä vaihevuorottelussa käytettävä kerroin kosketussuojan virtojen häviökertoimille</i>
$f$	<i>verkon taajuus</i>
$\bar{I}_A$	<i>vaiheen A johtimen virta</i>
$\bar{I}_B$	<i>vaiheen B johtimen virta</i>
$\bar{I}_C$	<i>vaiheen C johtimen virta</i>
$\bar{I}_N$	<i>kaapelin johtimen nimellinen virta</i>
$I_{max}$	<i>kaapelin johtimen suurin sallittu kuormitusvirta</i>
$\bar{I}_{s,a}$	<i>vaiheen A kosketussuojan virta</i>
$\bar{I}_{s,a,kap}$	<i>vaiheen A kapasitiivinen varausvirta</i>
$\bar{I}_{s,b}$	<i>vaiheen B kosketussuojan virta</i>
$\bar{I}_{s,b,kap}$	<i>vaiheen B kapasitiivinen varausvirta</i>
$\bar{I}_{s,c}$	<i>vaiheen C kosketussuojan virta</i>
$\bar{I}_{s,c,kap}$	<i>vaiheen C kapasitiivinen varausvirta</i>
$\bar{I}_{s,ind}$	<i>kosketussuojaan indusoituva virta</i>
$\bar{I}_{s,n}$	<i>kosketussuojien nollavirta</i>
$j$	<i>imaginääriyksikkö</i>
$L$	<i>kaapelin itseinduktanssi</i>
$l$	<i>kaapelin pituus</i>
$M$	<i>kaapeleiden välinen keskinäisinduktanssi</i>
$n$	<i>johtimien lukumäärä</i>
$P_{jh}$	<i>kaapelin johtimessa tapahtuvat tehohäviöt pituusyksikköä kohden</i>
$p$	<i>kahden pisimmän kaapelisektion pituuden kerroin verrattuna lyhyimpään sektioon</i>
$q$	<i>kahden pisimmän kaapelisektion pituuden kerroin verrattuna lyhyimpään sektioon</i>
$R_g$	<i>maadoitusresistanssi</i>
$R_{j,AC}$	<i>kaapelin johtimen vaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohden</i>
$R_s$	<i>kaapelin kosketussuojan resistanssi pituusyksikköä kohden</i>
$R_{s,DC}$	<i>kaapelin kosketussuojan tasavirtaresistanssi pituusyksikköä kohden</i>
$S$	<i>kaapelien keskipisteiden välinen etäisyys</i>
$T_1$	<i>johtimen ja kosketussuojan välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden</i>
$T_2$	<i>kosketussuojan ja armeerauksen välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden</i>
$T_3$	<i>ulkovaipan terminen resistanssi pituusyksikköä kohden</i>

$T_4$	kaapelin pinnan ja ympäröivän maa-aineksen välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden
$\bar{U}$	kaapelin johtimen vaihejännite
$\bar{U}_A$	vaiheen A johtimen vaihejännite
$\bar{U}_B$	vaiheen B johtimen vaihejännite
$\bar{U}_C$	vaiheen C johtimen vaihejännite
$\bar{U}_a$	vaiheen A kosketussuojan jännite
$\bar{U}_b$	vaiheen B kosketussuojan jännite
$\bar{U}_c$	vaiheen C kosketussuojan jännite
$\bar{U}_A$	vaiheen A johtimen pääjännite
$\bar{U}_B$	vaiheen B johtimen pääjännite
$\bar{U}_C$	vaiheen C johtimen pääjännite
$W_d$	kaapelin dielektriset häviöt pituusyksikköä kohden
$X_m$	kosketussuojan ja muiden kaapeleiden johtimien välinen keskinäisinduktanssi
$X_s$	kaapelin kosketussuojan reaktanssi pituusyksikköä kohden
$\alpha_s$	kaapelin kosketussuojan materiaalin lämpötilakerroin
$\Delta\theta$	johtimen ja ympäröivän maan lämpötilaero
$\delta$	eristeen materiaalin dielektrinen vakio
$\epsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ )
$\epsilon_r$	kaapelin eristeen permittiivisyys
$\theta_k$	kaapelin kuormituslämpötila celsiusasteina
$\lambda_1$	kosketussuojan häviöiden suhde kaapelin kokonaishäviöihin
$\lambda'_1$	kosketussuojan indusoituneiden virtojen häviökerroin
$\lambda''_1$	kosketussuojan pyörrevirtojen häviökerroin
$\lambda'_{1k}$	tasoasennuksessa keskimmäisen kaapelin kosketussuojan virran häviökerroin
$\lambda'_{11}$	tasoasennuksessa reunimmaisena kaapelin kosketussuojan virran häviökerroin
$\lambda'_{12}$	tasoasennuksessa reunimmaisena kaapelin kosketussuojan virran häviökerroin
$\lambda_2$	armeerauksen häviöiden suhde kaapelin kokonaishäviöihin
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti ( $1,256 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$ )
$\rho_s$	kaapelin kosketussuojan materiaalin resistiivisyys
$\omega$	verkon kulmataajuus ( $2\pi f$ )

# 1. JOHDANTO

Tässä luvussa havainnollistetaan tuulipuistojen kehitystä viime vuosikymmeninä ja minikälaisia ongelmia kehityksestä on syntynyt. Luvussa käydään läpi myös diplomityön aiheen ongelmien määritelmät sekä työn tavoitteet.

## 1.1 Taustatietoja

Tuulivoima energiantuotantona on kasvanut nopeaa tahtia maailmanlaajuisesti viime vuosikymmenenä. Uusiutuvien energianlähteiden kapasiteetin kasvattamisen motivaationa toimii ilmastomuutoksen torjuminen. Vuonna 2009 tuulivoiman maailmanlaajuinen asennettu kapasiteetti oli 159 000 MW ja vuonna 2019 se oli noussut 651 000 MW:iin. Tähän on vaikuttanut Euroopan komission etenemissuunnitelma vuodesta 2011 vuoteen 2020, missä Euroopan unionin jäsenmaat ovat sitoutuneet vähentämään kasvihuonekaasujen päästöjä 20 %:lla vuoden 1990 tasosta, lisäämään uusiutuvan energiantuotannon osuutta kokonaistuotannosta 20 %:iin sekä parantamaan energian hyötysuhdetta 20 %:lla. [1] Suomi on myös sitoutunut lisäämään uusiutuvan energianlähteiden tuotantoon siten että niiden osuus vuoteen 2030 mennessä on noin 50 % loppukulutuksesta. Tavoitteena on myös vähentää kasvihuonepäästöjä 80 – 95% vuoteen 2050 mennessä tuottamalla energia vähäpäästöisillä energianlähteillä. [2]

Suomessa tuulivoimatuotannon kannustimina on käytetty eri tukimekanismeja. Vuoden 2008 loppuun asti, Suomen valtio myönsi tuulivoimahankkeille investointitukea, joka oli 24 – 40 % hankkeen investointikustannuksista. Investointitukien loppuessa Suomessa käynnistettiin eri sähköntuotantomuodoille tarkoitettu tuotantotuen suunnittelu, joka otettiin käyttöön vuonna 2011 syöttötariffijärjestelmänä. Syöttötariffijärjestelmässä eli takuuhintajärjestelmässä tuulivoimaloille maksetaan tukea, joka määräytyy tariffin tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksesta. Tämä tarkoittaa, että energian tuottaja saa aina tuulivoimalalla tuotetusta energiastaan tariffin määräämän kiinteän hinnan. Tariffien tuki oli määritelty siten, että se kattaisi noin 40 % maalle rakennettavien tuulivoimaloiden investointikustannuksista. Tukien ansiosta tuulivoimaloiden rakentaminen on ollut todella kannattavaa ja Suomeen rakennettiin useita uusia tuulipuistoja. [2]

Vuosina 2011 – 2015 tuulivoiman syöttötariffina käytettiin 150,3 €/MWh, jonka jälkeen tariffi laskettiin 83,5 €/MWh vuoteen 2017 asti [2, 3]. Tuulivoiman osalta syöttötariffijärjestelmä otettiin pois käytöstä 2017 vuoden loppupuolella, jonka jälkeen uusille tuulivoimaloille ei enää myönnetä syöttötariffin määrittämiä tukia. Tuulivoimaa on rakennettu Suomessa vuodesta 2019 eteenpäin pääasiassa markkinaehtoisesti ilman valtion takauksia taloudellisia tukia. Koska syöttötariffijärjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille myönnettiin tukea 12 vuoden ajaksi, maksetaan voimaloille tukia enintään vuoteen 2030 asti. Tuulivoiman osalta syöttötariffijärjestelmän kokonaiskapasiteetiksi vuosina 2011 – 2017 muodostui 2347 MVA. [2]

Tuulivoiman kannattavuuden kasvaessa uusia tuulivoimaloita on rakennettu huomattavasti suuremmalla kapasiteetilla verrattuna vanhempiin. Tuulipuistojen kapasiteetti on kasvanut voimaloiden lukumäärien kasvaessa sekä voimaloiden teknisen kehityksen myötä. Voimaloista on tullut korkeampia, niiden pyyhkäisyypinta-ala on kasvanut ja niiden tehontuotanto moninkertaistunut viime vuosikymmenien aikana. Asennetun tuulivoimakapasiteetin keskiteho on ollut 173 kW vuonna 1991 ja kasvanut 4.3 MW:iin vuoteen 2019 mennessä. [4] Kehitys tuulivoimaloiden tekniikassa ja tuulipuistojen kapasiteettien kasvu on tuonut uusia haasteita tuulipuiston keskijänniteverkkoon sen kuormitustason kasvun myötä.

## 1.2 Ongelman määritelmä

Tuulipuistojen sijainnilla on suuri merkitys puiston tuulen nopeuksille ja täten koko puiston energiantuotantoon. Tuulen kannalta optimaalisimmat voimaloiden sijainnit eivät välttämättä ole lähellä sähköasemaa ja jakeluverkon liityntäpistettä, jolloin ratkaisuna saatetaan käyttää todella pitkiä keskijännitekaapeleita. Tuulivoimaloiden teknisen kehityksen myötä, tehontuotanto on kasvanut huomattavasti, minkä takia tuulipuiston keskijänniteverkon kaapeleissa kulkee suurempia virtoja. Pitkissä ja raskaasti kuormitetuissa kaapeleissa on todettu tapahtuvan kaapelijatkosten ja -päätteiden vikaantumista suuremmalla todennäköisyydellä. Syy ongelmaan on kaapelin johtimessa kulkevan virran indusoima sähkömotorinen voima kaapelin metalliseen kosketussuojaan. Usein kaapelin kosketussuoja maadoitetaan molemmista päistä jännitteen madaltamiseksi, mutta tällöin sähkömotorinen voima indusoi kosketussuojaan maadoitusten kautta kiertävän virran. Kosketussuojassa kulkevan virran on todettu aiheuttavan vikoja kaapeleiden jatkoskohdissa, jotka ovat alttiita kosketussuojassa kulkevan virran aiheuttamalle lämpenemiselle. [5, s.2]

Kosketussuojassa kulkeva virta lämmittää kaapelin jatkoskohtia, joissa lämpeneminen saattaa aiheuttaa liitosten ja eristeiden heikkenemistä. Koska indusoitunut virta on suoraan verrannollinen kaapelin kuormitusvirtaan, on ongelma merkittävämpi tuulipuistoissa, joissa kaapeleilla kulkeva teho on suuri. Kosketussuojassa kulkeva kokonaisvirta koostuu kosketussuojaan indusoituvasta virrasta ja kaapelin kapasitiivisesta varausvirrasta. Varausvirtaan vaikuttaa kaapelin tyyppi, verkon jännitetaso ja kaapelin pituus, mutta kaapelin kuormitustasolla ei ole siihen suurta vaikutusta. Pitkillä kaapeleilla, jotka ovat raskaasti kuormitettu varausvirtojen ja indusoituneiden virtojen summa saattaa muodostaa huomattavan suuria kokonaisvirtoja kosketussuojaan. [6, s.3]

Kosketussuojassa kulkeva virta on ylimääräinen rasite kaapelille, sen lämmittäessä kaapelia, jolloin kosketussuojassa tapahtuu tehohäviöitä ja kaapelin kuormitettavuus alenee. Kaapelijatkoksissa ja -päätteissä olevat kosketussuojapiiriin liitokset lämpenevät usein eniten niissä olevien kytkentäresistanssien vuoksi. Koska tuulivoima on epätasainen energiantuotantomuoto johtuen tuulenoikeuksien vaihtelevuudesta, muodostuu kaapeleihin kuormitusyklejä. Kosketussuojassa kulkevien virtojen ollessa lähes suoraan verrannollisia kaapelin kuormitusvirtaan, aiheutuu kosketussuojapiiriin termisiä syklejä. Termiset sykliä aiheuttavat kaapelijatkoksien ja -päätteiden liittimien ennenaikaista ikääntymistä, millä saattaa olla nostattava vaikutus niiden kytkentäresistansseihin. [7, s.2] Jotta jatkokset eivät lämpenisi liikaa, tulisi kosketussuojapiiriin kytkentäresistanssien olla mahdollisimman alhaiset. Kun jatkokset ja päätteet lämpenevät liikaa, saattaa niistä aiheutua liitos ja eristeongelmia, jolloin kaapeli vikaantuu ja tehon tuotanto verkkoon keskeytyy. Kaapelijatkoksien asennuksessa tulee olla myös huolellinen, sillä pienetkin virheet tai epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa eristeen sähkökentänvoimakkuuden kasvamista, joka voi aiheuttaa jatkoksessa osittaispurkauksia ja lopulta eristeen pettämisen. [8, s.13]

Aikaisemmin Suomeen rakennetuissa tuulipuistoissa käytettiin keskijänniteverkon jännitteenä 20 kV, joka on nostettu uudemmissa puistoissa 30 kV:iin voimaloiden pätötehon kasvun vuoksi. Suuremmalla verkon jännitteellä kaapelilla voidaan kuljettaa sama teho käyttämällä alhaisempaa virtaa, jolloin kaapeleiden tehohäviöt pienenevät ja mikä puolestaan vähentää kosketussuojiiin indusoituneita sähkömotorisia voimia. Kosketussuojissa saattaa kuormittamattomassakin tilanteessa kulkea suuria varausvirtoja, jos kaapelin kapasitanssi on suuri ja kaapeliväli on pitkä.

### 1.3 Työn tavoite

Tämän diplomityön tavoitteena on havainnollistaa tuulipuistoissa käytettyjen keskijännitekaapeleiden kosketussuojissa esiintyviä sähköisiä ilmiöitä, käydä läpi eri kosketussuojien asennustapojen etuja ja haittoja sekä ohjeistaa kosketussuojan asennustavan valintaa eri tilanteissa kaapeleiden vikaantumisen välttämiseksi. Työssä käytettyjä metodeita voidaan hyödyntää joko kaapeliverkon suunnitteluvaiheessa, tai kaapeliverkon jälkikorjausten yhteydessä.

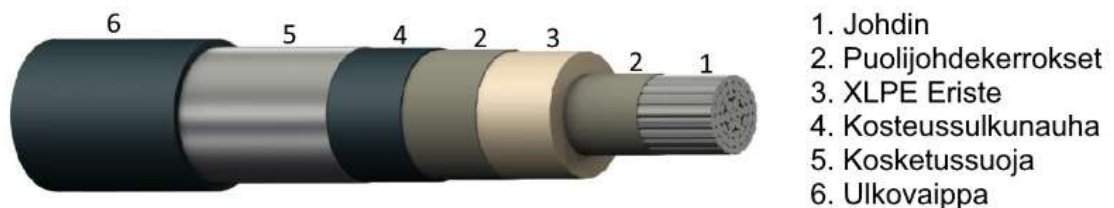
Työssä määritellään laskentamenetelmät kosketussuojassa esiintyville virroille ja jännitteille käyttäen eri kosketussuojien asennustapoja. Laskentojen tuloksia verrataan DlgSILENT Powerfactory simulointiohjelmalla tehdystä tuulipuistosta saatuihin arvoihin, jolloin voidaan varmistaa laskentojen pätevyys ja niiden tarkkuus. Kosketussuojan jännitteille ja virroille pyritään määrittämään raja-arvot, joilla kaapeleiden vikaantumisen todennäköisyys voidaan todeta alhaiseksi. Käyttämällä näitä raja-arvoja, voidaan optimaalinen asennustapa määrittellä kosketussuojille tapauskohtaisesti.

## 2. KESKIJÄNNITEKAAPELIEN OMINAISUUDET

Suomen tuulipuistojen 20 kV ja 30 kV keskijänniteverkoissa käytetyt kaapelit ovat usein tyypiltään alumiinisia yksijohdinkaapeleita, joissa on XLPE (ristisilloitettu polyeteeni) eriste kuten AHXAMK-W tai AHXAMK-WP kaapeleita. Tässä luvussa käydään läpi kyseisten kaapelityyppien rakenteita ja sekä niissä esiintyviä sähköisiä ilmiöitä kuormitus-tilanteiden aikana.

### 2.1 Kaapelin rakenne

Yksijohdinkaapeleina AHXAMK-W ja AHXAMK-WP kaapelit tarvitsevat kolme erillistä kaapelia, jotta niitä voidaan käyttää kolmivaiheisessa järjestelmässä. Kyseisillä kaapelityypeillä poikkipinta-alaltaan pienempien kaapeleiden kolme eri vaihekaapelia ovat kierretty kolmioon ja poikkipinta-alaltaan suuremmilla kaapeleilla ne toimitetaan erillään. Tämän vuoksi suuremman poikkipinta-alan kaapeleilla vaiheiden asennusmuoto on valittavissa kaapeleiden ollessa vapaasti liikuteltavissa. Edellä mainittujen kaapelityyppien ero on se, että AHXAMK-W kolmioon niputettujen kaapelien keskellä käytetään kuparista keskusköyttä, kun taas AHXAMK-WP kaapeleissa sitä ei ole. Kuva 1 toimii havainnollistavana kuvana 33 kV AHXAMK-W yksijohdinkaapelin rakenteesta, jonka komponenttien tarkoitukset on esitetty seuraavissa alaluvuissa.



**Kuva 1: AHXAMK-W yksijohdinkaapelin rakenne [9, muokattu]**

Eri keskijännitekaapeleiden rakenne ja materiaalit saattavat poiketa toisistaan, mutta lähes kaikissa yksijohdinkaapeleissa käytetään pääpiirteittäin samoja komponentteja.

#### 2.1.1 Johdin

Kaapelin ytimessä sijaitsevan johtimen tarkoitus on toimia virran reittinä tuotannon ja kulutuksen välillä. Johtimen materiaalina pyritään käyttämään mahdollisimman alhaisen resistiivisyyden omaavaa metallia, kuten alumiinia tai kuparia, johtimessa tapahtuvien

häviöiden minimoimiseksi. Tyypillisesti alumiinia käytetään keskijännitekaapeleiden johtimen materiaalina ja kuparia ohuemmissa maadoitusjohtimissa. Johtimessa kulkevan virran suuruus määrittää sille tarvittavan poikkipinta-alan, jolla kaapeli kestää kuormituksen ilman termisiä vahinkoja. Kaapelin johdin voi koostua yhdestä kiinteästä johtimesta (umpijohdin) tai useasta ohuemmasta johtimesta (kerratun johdin), jotka yhdessä muodostavat halutun pinta-alan Kuvan 1 mukaisesti. Umpijohdinkaapeli on huomattavasti jäykempi kuin vastaavankokoinen kaapeli kerratulla johtimella ja täten sen käsittely ja asentaminen on haastavampaa. Kerratun johtimen toinen etu on sen ominaisuus vähentää johtimessa tapahtuvaa virranahtoilmiötä, jossa vaihtovirran ominaisuuksien vuoksi virta ahtautuu johtimen pintaosiin. Ilmiö aiheuttaa kaapelin kuormitettavuuden alenemista ja sen vuoksi kerratulla johtimella on suurempi kuormitettavuus kuin vastaavankokoisella umpijohtimella. [10, s.47]

### 2.1.2 Eriste

Kaapelin johtimen ulkopuolella on eristekerros, jonka tarkoituksena on eristää kaapelin jännitteinen johdin maapotentiaalista ja muista johtimista. Keskijännitekaapeleissa käytetään useimmiten eristeenä ristosilloitettua polyeteeniä. Materiaalin ominaisuuksilla on vaikutus kaapelissa esiintyviin dielektrisiin häviöihin sekä kaapelin kapasitanssiin. Eristeen paksuus määräytyy verkon käyttöjännitteen mukaan, koska suuremmalla jännitteellä eristeen läpilyöntikestoisuuden tarvitsee olla korkeampi. Koska kaapelissa oleva eriste on kahden johtavan materiaalin välissä, muodostaa se sylinterin muotoisen kondensaattorin, josta aiheutuu kaapelissa esiintyvät varausvirrat. [11, s.1]

### 2.1.3 Puolijohdekerrokset

Puolijohdekerroksia käytetään kaapelin johtimen ja eristeen ulkopinnoilla, joiden tarkoituksena on tasoittaa johtimen, eristeen ja kosketussuojan rajapinnat. Kun rajapinnat ovat tasaisia, kaapelissa esiintyvien ilmakehien todennäköisyys minimoituu ja eristeen yli olevasta sähkökentästä tulee yhtenäinen eli sähkökentänvoimakkuus eristeessä heikkenee tasaisesti edetessään kohti kaapelin ulkopintaa. Kaapelissa esiintyvien ilmakehien minimoiminen on tärkeää, koska eristeessä oleva sähkökentänvoimakkuus voi olla tarpeeksi suuri ionisoidakseen ilman ja aiheuttamaan täten osittaispurkauksia. Kaapelin sisäiset osittaispurkaukset voivat pitkällä aikavälillä aiheuttaa eristeen pettämisen ja täten kaapelin vikaantumisen. [12] s.5 AHXAMK-W kaapeleissa käytetään myös uloimman puolijohdekerroksen päällä puolijohtavaa kosteussulkunauhaa, joka takaa vesitiiveyden kaapelin pituussuunnassa. [9]



## 2.1.4 Kosketussuoja

Kaapelin kosketussuoja on ohut metallikerros uloimman puolijohdekerroksen päällä, jota käytetään yleisesti 5 kV ja suurempien jännitetason kaapeleissa [13, s.44]. Materiaaliltaan kosketussuoja on tyypillisesti alumiinia tai kuparia ja se toimii alhaisen resistanssin väylänä eristeen yli kulkeville varausvirroille sekä vikatilanteissa esiintyville vikavirroille [14, s.1]. Kosketussuojan resistanssi ja reaktanssi vaikuttavat suojassa ilmeneviin jännitteisiin ja virtoihin kaapelin ollessa kuormitettu. Jotta kosketussuojassa esiintyviä virtoja ja jännitteitä pystytään arvioimaan, tarvitsee kosketussuojalle ominaiset parametrit määrittellä. Kaapelin kosketussuojan tasavirtaresistanssi ja reaktanssi voidaan määrittellä kolmio- tai transponoimattomille tasoasennetuille kaapeleille seuraavilla kaavoilla,

$$R_{s,DC} = \frac{\rho_s}{A_s} [1 + \alpha_s(\theta_k - 20)] \quad (2-1)$$

$$X_s = 2\omega \ln\left(\frac{2S}{d_{s,g}}\right) \cdot 10^{-7} \quad (2-2)$$

joissa  $R_{s,DC}$  on kosketussuojan tasavirtaresistanssi pituusyksikköä kohden,  $\rho_s$  on kosketussuojan materiaalin resistiivisyys,  $A_s$  on kosketussuojan poikkipinta-ala,  $\alpha_s$  on kosketussuojan materiaalin lämpötilakerroin,  $\theta_k$  on tilannekohtainen kuormituslämpötila celsiusasteina,  $X_s$  on kosketussuojan reaktanssi pituusyksikköä kohden,  $\omega$  on kulmataajuus,  $S$  on kaapeleiden keskipisteiden välinen etäisyys ja  $d_{s,g}$  on kosketussuojan keskiarvoinen halkaisija [15, s.646].

Jännitteisten kaapeleiden sähkökentät vaikuttavat ympäröiviin kaapeleihin ja voivat aiheuttaa häiriötä lähellä olevissa tiedonsiirtokaapeleissa. Johtimien muodostaman sähkökentän kulkeutuminen kaapelin ulkopuolelle voidaan estää sulkemalla kaapeleiden kosketussuojapiirit eli maadoittamalla ne esimerkiksi kaapelin molemmista päistä. Kun kosketussuojapiiri on suljettu, estetään myös ulkoisten sähkökenttien vaikutus kaapelin johtimiin. Tiiviillä metallisella kosketussuojalla saavutetaan kaapelin säteittäinen vesitiiveys, joka ehkäisee sisempien komponenttien altistumista kosteudelle ja muille ympäristöllisille haitoille. Kosketussuojalla on pyrkimys myös toimia nimensä mukaan suojana ihmiselle joutumasta osaksi virtapiiriä esimerkiksi tilanteessa, jossa kaivinkoneen kauha rikkoo kaapelin eristekerrokset, minkä takia kosketussuojan maadoitus on välttämätöntä. [16, s.353] [7, s.1]

## 2.1.5 Ulkovaippa

Ulkovaippa on kaapelin uloin eristekerros, joka on tyypillisesti materiaaliltaan polyeteeniä. Sen tarkoituksena on tukea sisempiä komponentteja sekä toimia suojana ympäristöllisiltä haitoilta. Aikaisemmin kaapeleissa ei käytetty ulointa vaippaa, mikä altisti metallisen kosketussuojan elektrolyysille ja korroosiolle. Nykyisissä kaapeleissa ulkovaipan käyttö eristää kosketussuojan maapotentiaalista, mutta tämä mahdollistaa kosketussuojan jännitteen nousun kaapelivälillä. Jos kaapelien kosketussuojien asennustapana käytetään kosketussuojien vaihevuorottelua, on erityisen tärkeää, että kaapelin ulkovaippa on eheä koko kaapelimatkalta. Jos kosketussuoja pääsee rikkoutuneen ulkovaipan kautta kosketuksiin maapotentiaalin tai muiden vaiheiden kosketussuojien kanssa, heikentää se vaihevuorottelun tehokkuutta, koska tällöin kosketussuojien virtojen kulkureitit muuttuvat. [12, s.28] Jotta kaapeli pysyisi eheänä, täytyy vaipan kestää kosketussuojassa esiintyvät jännitteet normaalin kuormitustilan, transienttien ja vikatilanteiden aikana. Jos kosketussuojassa esiintyvät jännitteet ylittävät kaapelivaipan jännitekestoisuuden, tulee kosketussuojien asennus- ja maadoitustapaa muuttaa, tai lisätä kosketussuojiiin ylijännitesuojia jännitteiden purkamiseksi. [12, s.28]

## 2.2 Kaapelin sähköiset ominaisuudet

Kaapelin johtimen ollessa jännitteinen ja kuormitettu, ilmenee kaapelissa erilaisia sähköisiä ilmiöitä, joiden vaikutus nähdään kaapelin eri komponenteissa sekä ympäröivissä järjestelmissä. Jännitteisestä johtimesta kulkeva kapasitiivinen varausvirta ja kuormitetun johtimen muodostama magneettikenttä aiheuttavat kosketussuojiiin jännitteitä ja virtoja. Näiden ilmiöiden on todettu vikaannuttavan kaapeleita varsinkin kaapelijatkoksilla ja kaapelipäätteillä ja siksi ne tulisi ottaa huomioon kaapeliverkkoa suunniteltaessa. [12, s.1]

### 2.2.1 Kapasitiivinen varausvirta

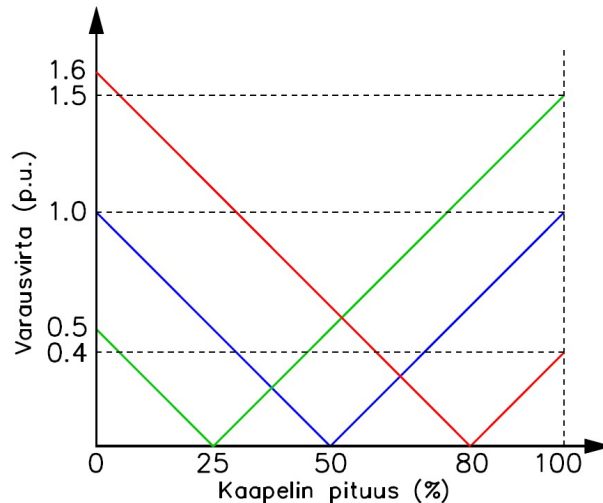
Maakaapeleiden rakenteelliset ominaisuudet mahdollistavat kapasitiivisen virran kulun johtimen ja kosketussuojan välillä. Kaapelin vaihejohdin ja kosketussuoja muodostavat kaksi pitkää sylinterimäistä johdinta, joiden välissä on eriste. Jännite-ero johtimen ja maadoitetun kosketussuojan välillä muodostaa eristeen yli sähkökentän ja täten kaapeli voidaan ajatella kondensaattorina. Maakaapeleilla kapasitanssi voi olla jopa 20 kertaa suurempi kuin saman jännitetason avojohdolla, jonka takia varausvirrat voivat olla kaapeliverkoissa mittavia [11, s.4]. Yksijohdinkaapelin kapasitanssi voidaan laskea kaavalla (2-3),

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{d_s}{d_j}\right)} \quad (2-3)$$

jossa  $C$  on kaapelin kapasitanssi pituusyksikköä kohden,  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys,  $\epsilon_r$  on eristeen permittiivisyys,  $d_s$  on kaapelin kosketussuojan sisempi halkaisija ja  $d_j$  on kaapelin johtimen halkaisija [17, s.4]. Kaapelin kapasitanssi pituusyksikköä kohden on jokaiselle kaapelityypille ominainen, sillä siihen vaikuttaa kaapelityypin rakenteelliset ominaisuudet. Kaapelin johtimista metallisiin kosketussuojoihin kulkevaa varausvirta voidaan approksimoida kaapelireitin eri vaihekaapeleille kaavalla (2-4),

$$\begin{cases} \bar{I}_{s,a,kap} = j\omega C \bar{U}_A l \\ \bar{I}_{s,b,kap} = j\omega C \bar{U}_B l \\ \bar{I}_{s,c,kap} = j\omega C \bar{U}_C l \end{cases} \quad (2-4)$$

jossa  $\bar{I}_{s,a,kap}$  on vaiheen A kapasitiivinen varausvirta,  $\bar{I}_{s,b,kap}$  on vaiheen B kapasitiivinen varausvirta,  $\bar{I}_{s,c,kap}$  on vaiheen C kapasitiivinen varausvirta,  $\omega$  on kulmataajuus,  $C$  on kaapelin kapasitanssi pituusyksikköä kohden,  $\bar{U}_A$  on vaiheen A vaihejännite,  $\bar{U}_B$  on vaiheen B vaihejännite,  $\bar{U}_C$  on vaiheen C vaihejännite ja  $l$  on kaapelien pituus [6]. s.2 Normaalisissa kuormitustilanteissa kaapelin muodostama kapasitiivinen virta kulkee kosketussuojan kautta kohti verkon maadoituksia. Kaava ei kuitenkaan ota huomioon kosketussuojoihin kohdistuvia rinnakkaisten kaapelien kapasitansseja. Vaikka kaavalla (2-4) voidaan määrittellä johtimesta kosketussuojaan kulkeva kapasitiivinen varausvirta, se ei suoraan määritä kosketussuojassa kulkevan varausvirran suuruutta, koska varausvirran kulku riippuu kosketussuojien asennustavasta. [6, s.2]. Kosketussuojan ollessa maadoitettu vain toisesta päästä, kulkee koko varausvirta samaan suuntaan, jolloin kosketussuojassa kulkevan varausvirran suurin arvo on maadoituspisteellä. Molemmista päistä maadoitetussa kosketussuojassa varausvirta jakautuu kaapelin keskiosassa ja kulkee molempia maadoituksia päin, kun oletetaan että kosketussuojan resistanssit ovat molempiin suuntiin yhtä suuret. Epätasapainoisilla resistansseilla, kuten huonoilla kaapeli-jatkosliitoksilla varausvirta painottuu vähemmän resistiiviseen suuntaan, mitä on havainnollistettu kuvassa 2. Epätasapainoisilla kosketussuojan resistansseilla voi kosketussuojassa esiintyvä kokonaisvirta olla suurempi. [17, s.3]



**Kuva 2: Kaapelin kapasitiivisen varausvirran kulku kuormittamattomassa tilanteessa eri resistansseilla [17, s.3, muokattu]**

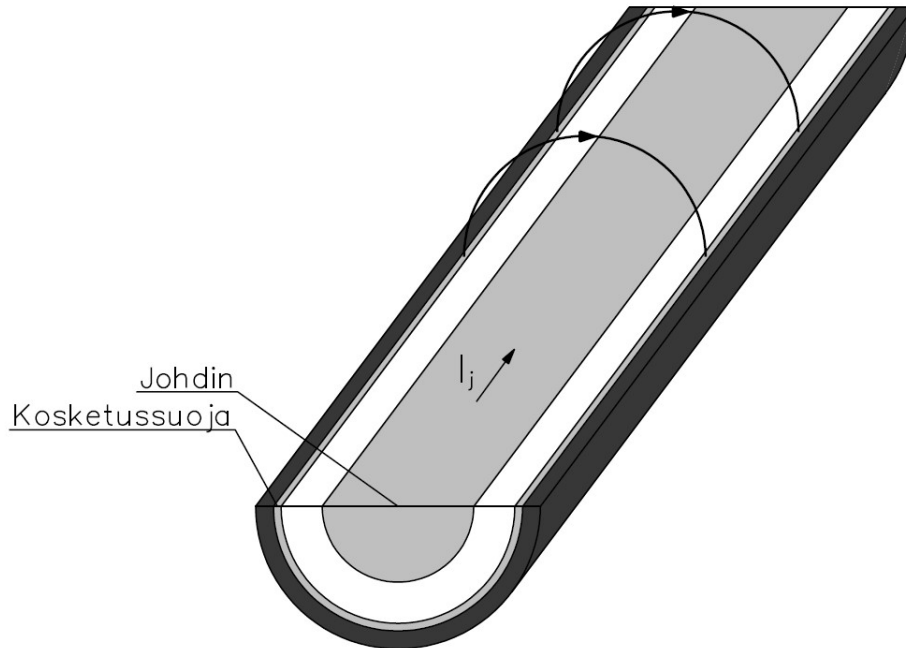
Kuvassa 2 sininen viiva kuvastaa kosketussuojaa, jossa kosketussuojan resistanssi on koko kaapelipituudeltaan tasainen, vihreä ja punainen vastaavasti kuvastavat suuren resistanssin liitoksia kaapelin 25% ja 80% etäisyyksillä. Koska kaapelin kapasitanssi ja täten kosketussuojaan muodostuva varausvirta kasvaa kaapelin pituuden kasvaessa, on kosketussuojassa esiintyvät varausvirrat merkittäviä vasta pitkillä kaapeliväleillä. Kaapelissa esiintyviin varausvirtoihin ei myöskään merkittävästi vaikuta kaapelin kuormitus ja täten tyhjäkävyyssä verkossakin kaapelien kosketussuojissa esiintyy varausvirtoja. [6, s.3]

Kaapelin kosketussuojapiirin ollessa suljettu, kosketussuojaan indusoitunut virta summautuu kapasitiivisen virran kanssa, mikä yleisesti aiheuttaa virran epätasapainoisuutta kaapelivälillä. Kosketussuojassa esiintyvä kokonaisvirta muodostuu varausvirran ja indusoituneen virran vektorisummasta, joiden vektorikomponenttien vaihekulma voidaan olettaa olevan järjestelmän tehokulma. [6, s.3] Koska kapasitiivinen virta kulkee kosketussuojassa molempiin suuntiin, on sillä vahvistava ja heikentävä vaikutus indusoituneelle virralle kaapelin eri osissa. Tämän takia kosketussuojan virrat ovat tyypillisesti suurempia kaapelin syöttöpäässä kuin kuormituspäässä, minkä takia syöttöpäässä kaapelijatkosten vikaantumisen riski on suurempi. [6, s.3]

## 2.2.2 Kosketussuojaan indusoituva sähkömotorinen voima

Kaapelin johtimessa kulkeva vaihtovirta muodostaa kaapelin ympärille magneettikentän, joka muuttuu virran taajuuden mukaisesti. Jos kaapelissa on metallinen kosketussuoja, kokee se muuttuvan magneettikentän, joka indusoi kosketussuojaan sähkömotorisen

voiman Faradayn lakien mukaisesti. [12, s.5] Kuvassa 3 on havainnollistettu johtimen virran muodostamaa magneettikenttää.



**Kuva 3: Johtimen muodostama muuttuva magneettikenttä [18, s.32, muokattu]**

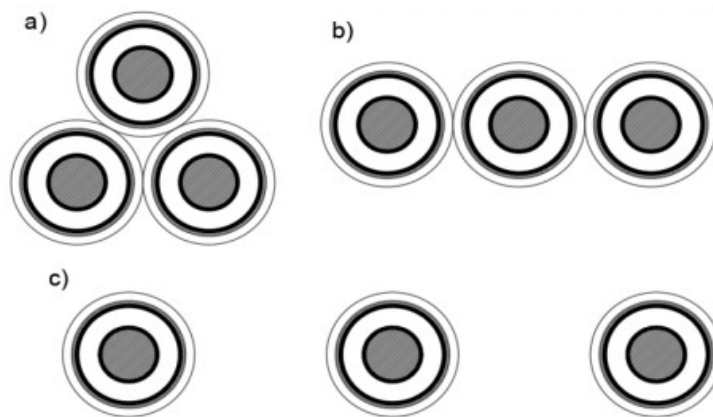
Indusoituneen sähkömotorisen voiman suuruuteen vaikuttaa magneettikentän voimakkuus sekä kosketussuojan ja magneettikentän lähteen välinen induktanssi. Kaapelin johdinta ja kosketussuojaa voidaan siis näennäisesti ajatella muuntajan ensiönä ja toisiona [19, s.7]. Tasaisesti kuormitetussa järjestelmässä kaapeleiden johtimissa kulkevien virtojen vaihesiirto on  $120^\circ$ , joka pätee myös johtimien muodostamiin magneettikenttiin. Jokaisen kaapelin kosketussuoja on kytköksissä itseinduktanssin kautta saman vaiheen johtimen, sekä keskinäisinduktanssin kautta kahden muun vaiheen johtimien kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että kukin kosketussuoja kokee usean eri vaiheen muuttuvia magneettikenttiä, joiden indusoimat sähkömotoriset voimat summautuvat kosketussuojassa. [17, s.3] Kaapelin johtimen ja kosketussuojan välinen itseinduktanssiin vaikuttaa vain kaapelin rakenne ja se voidaan määrittellä kaavalla (2-5),

$$L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = 2 \ln \left( \frac{2}{d_{s,g}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2-5)$$

jossa  $L_{Aa}$ , on vaiheen A itseinduktanssi,  $L_{Bb}$  on vaiheen B itseinduktanssi,  $L_{Cc}$  on vaiheen C itseinduktanssi ja  $d_{s,g}$  on kosketussuojan keskiarvoinen halkaisija. Kaapelin kosketussuojan ja eri vaiheiden johtimien väliset keskinäisinduktanssit voidaan määrittellä kaavalla (2-6),

$$\begin{cases} M_{Ab} = M_{Ba} = 2\ln\left(\frac{1}{S_{AB}}\right) \cdot 10^{-7} \\ M_{Ac} = M_{Ca} = 2\ln\left(\frac{1}{S_{AC}}\right) \cdot 10^{-7} \\ M_{Bc} = M_{Cb} = 2\ln\left(\frac{1}{S_{BC}}\right) \cdot 10^{-7} \end{cases} \quad (2-6)$$

jossa  $M_{Ab}$  ja  $M_{Ba}$  on vaiheiden A ja B väliset keskinäisinduktanssit,  $M_{Ac}$  ja  $M_{Ca}$  on vaiheiden A ja C väliset keskinäisinduktanssit,  $M_{Bc}$  ja  $M_{Cb}$  on vaiheiden B ja C väliset keskinäisinduktanssit,  $S_{AB}$  on vaiheiden A ja B keskipisteiden välinen etäisyys,  $S_{AC}$  on vaiheiden A ja C keskipisteiden välinen etäisyys ja  $S_{BC}$  on vaiheiden B ja C keskipisteiden välinen etäisyys. [15, s.646] Kaavojen (2-5) ja (2-6) mukaisesti, kosketussuojan itseinduktanssi johtimeen on suurempi kuin keskinäisinduktanssit muiden kaapeleiden välillä, mikä tarkoittaa, että kosketussuojaan kohdistuu magnitudiltaan suurin sähkömotorinen voima saman kaapelin johtimesta. Täten kokonaisvoimien täydellinen kumoutuminen ei ole käytännössä mahdollista. Jotta kosketussuojaan indusoituva kokonaisvoima saataisiin minimoitua, tulisi kaapelin kosketussuojan ja johtimen välisen itseinduktanssin sekä kosketussuojan ja eri vaihejohtimien välisien keskinäisinduktanssien olla mahdollisimman lähellä toisiaan. Koska keskinäisinduktanssiin vaikuttaa magneettikentän lähteen ja toisioin etäisyys, voidaan kaapeleiden asennusmuodolla vaikuttaa indusoituneisiin sähkömotorisiin voimiin. [17, s.3] Kaapeleiden asennuksessa käytetään yleisimmin kolmio- ja tasoasennusta, jotka on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4: Kaapeleiden kolmio- ja tasoasennus [17, s.3]**

Kolmioasennuksessa kaapelit asennetaan kiinni toisiinsa, jolloin asennusmuoto on symmetrinen kaapelietäisyyksien ollessa yhtä suuret. Täten kolmioasennuksessa kaava (2-6) voidaan sieventää muotoon,

$$M_{Ab} = M_{Ba} = M_{Ac} = M_{Ca} = M_{Bc} = M_{Cb} = 2 \ln \left( \frac{1}{S} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2-7)$$

jossa  $S$  on kaapelien keskipisteiden välinen etäisyys. [15, s.646] Kolmioasennuksessa kosketussuojiiin indusoituvat sähkömotoriset voimat ovat pienimmillään, koska kosketussuojien ja eri johtimien väliset induktanssit ovat lähes yhtä suuret. Symmetrisen asennusmuodon vuoksi kuhunkin kosketussuojaan indusoituu magnitudiltaan yhtä suuri sähkömotorinen voima tasaisesti kuormitetussa järjestelmässä. [20, s.1]

Tasoasennuksessa keskimmäisen kaapelin kosketussuoja on symmetrisessä tilassa kahden muun kaapelin ollessa yhtä etäällä. Uloimmat kaapelit ovat epäsymmetrisessä tilassa johtuen erisuuruista kaapelietäisyyksistä, ja tästä syystä uloimmissa kaapeleissa indusoitunut sähkömotorinen voima on suurempi jopa tasaisesti kuormitetussa tilanteessa. Tasoasennuksessa kaapelit saatetaan asentaa käyttämällä kaapelivälejä kuvan 4 c) mukaisella tavalla, jolloin keskinäisinduktanssit kosketussuojien ja kahden muun kaapelin vaihejohtimien välillä pienenevät. Tämä aiheuttaa kosketussuojaan indusoituneen sähkömotorisen voiman suurenemisen, koska kosketussuojan ja kaapelin johtimen itseinduktanssi on huomattavasti suurempi verrattuna keskinäisinduktansseihin muiden vaiheiden kanssa, jolloin voimien kumoutuminen heikkenee. [20, s.1]

Sähkömotorinen voima indusoi kosketussuojan päiden välille potentiaalieron, joka muodostaa kosketussuojaan joko seisovan jännitteen tai virran riippuen kosketussuojan maadoitus- ja asennustavoista. Yksipistemaadoituksessa kosketussuojapiiri on avoin ja virta ei pääse kiertämään, joten sähkömotorinen voima näkyy kosketussuojassa jännitteinä, joka kasvaa kaapelin pituuden kasvaessa. Kun kosketussuojapiiri suljetaan esimerkiksi maadoittamalla kosketussuoja molemmista päistä, on kosketussuojapiiri suljettu ja virta pystyy kiertämään kosketussuojassa maadoitusten ja muiden vaiheiden kosketussuojien kautta vaihesiirron vaikutuksesta. Tämyntyyppisessä asennuksessa kosketussuojaan indusoituva virta on riippumaton kaapelin pituudesta, koska kaapelipituuden kasvaessa päiden välille indusoituva jännite kasvaa samassa suhteessa kuin kosketussuojan impedanssi. [21, s.3]

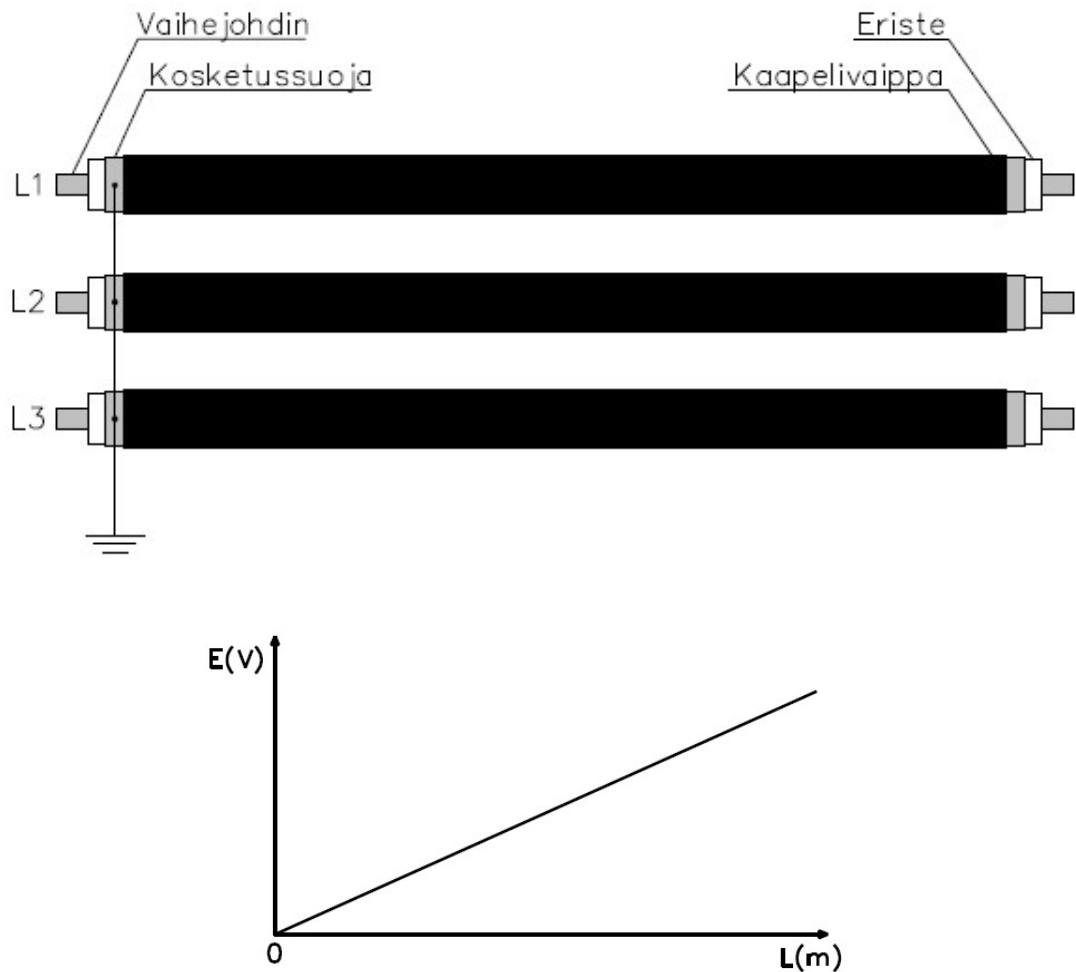
### **3. KOSKETUSSUOJIENTEN KYTKENTÄ- JA MAADOITUSTAVAT**

Keskijännitekaapelien metallisten kosketussuojien maadoittaminen on välttämätöntä sähköturvallisen järjestelmän takaamiseksi [22, s.91]. Kosketussuojien maadoituksessa voidaan käyttää eri menetelmiä, joista jokaisella on omat etunsa ja haittansa. Tässä luvussa listataan eri kosketussuojien maadoitustapoja, tarkastellaan niiden vaikutusta kosketussuojissa esiintyvälle jännitteille ja virroille sekä määritetään virtojen ja jännitteiden laskemiseen käytettyjä kaavoja.

#### **3.1 Kosketussuojapiirin avoin kytkentä**

Kosketussuojapiirin avoimessa kytkennässä kaapelireitin eri vaiheiden kosketussuojat ovat maadoitettu siten, että kosketussuojien muodostamat virtapiirit jäävät avoimiksi. Kyseistä asennustapaa kutsutaan yksipistekytkennäksi ja se voidaan toteuttaa maadoittamalla kosketussuojat jommallakummalla kaapelipäätteellä tai vaihtoehtoisesti keskeltä kaapeliväliä. Avoimen piirin asennustapaa voidaan käyttää sähköasemalta tuulipuistoon lähtevillä syöttökaapeleilla, jos tuulipuiston ja sähköaseman maadoitukset halutaan eristää toisistaan. [12, s.10] Kaapelipäätteellä maadoitetun kosketussuojan kytkentäperiaate, jossa kosketussuojapiirit ovat maadoittamattomassa päässä avoimia ja tämän järjestelmän jännitejakauma on esitetty kuvassa 5.





**Kuva 5: Kosketussuojien yksipistekytKentä kaapelipäätteellä ja niiden jännitejakauma pituuden funktiona [23, s.2, muokattu] [18, s.42, muokattu]**

Kun kosketussuojapiirit ovat avoimia, niihin kohdistuva sähkömotorinen voima indusoi kosketussuojiin jännitteen. Indusoitunut jännite kasvaa maadoitetusta päästä maadoittamattomaan päähän kaapelin etäisyyden funktiona kuvan 5 mukaisesti. Maadoittamattoman pään jännitteiden suuruuksiin vaikuttaa kaapelivälin pituus sekä kosketussuojan kokeman sähkömotorisen voiman voimakkuus. [23, s.2] Kaapelin pituus tulisi rajoittaa, jos kosketussuojalle käytetään yksipistekytKentää, jotta maadoittamattoman pään jännite ei nousisi liian suureksi. Kapasitiivisen varausvirran kulkusuunta vaikuttaa myös kosketussuojaan indusoituu jännitteeseen, mikä tarkoittaa, että kosketussuojaan indusoituneet jännitteet saattavat erota toisistaan riippuen kummasta päästä kaapelia kosketussuoja maadoitetaan. Sallittua kosketussuojassa esiintyvää jännitettä ei ole määritelty standardeissa ja sallitun jännitteen arvon ohjeistukset vaihtelevat maittain. Tyypillisesti suurin sallittu pituus yksipistekytKetylle kaapelille on noin 2 km jännitetasosta riippumatta. [12, s.8] Jotta kosketussuojassa esiintyvät jännitepiikit eivät aiheuttaisi vahinkoa kaapelin

eristekerroksille, tulee maadoittamattomaan pään ja maapotentiaalin välille asentaa yli-jännitesuojat [12, s.9]. Maadoittamattoman pään jännite normaalikuormituksessa sekä vikatilanteissa tulee laskea, jotta voidaan varmistaa kaapelin komponenttien jännitekestoisuus. Kosketussuojiin induoituvien jännitteiden arvioimiseen voidaan käyttää kaavaa (3-1),

$$\begin{cases} \bar{E}_a = j\omega\bar{I}_A(2 \cdot 10^{-7}) \left[ -\frac{1}{2} \ln\left(\frac{2S_{AB}^2}{d_{s,g}S_{AC}}\right) + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln\left(\frac{2S_{AC}}{d_{s,g}}\right) \right] \\ \bar{E}_b = j\omega\bar{I}_B(2 \cdot 10^{-7}) \left[ \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4S_{AB}S_{BC}}{d_{s,g}^2}\right) + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln\left(\frac{S_{BC}}{S_{AB}}\right) \right] \\ \bar{E}_c = j\omega\bar{I}_C(2 \cdot 10^{-7}) \left[ -\frac{1}{2} \ln\left(\frac{2S_{BC}^2}{d_{s,g}S_{AC}}\right) - j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln\left(\frac{2S_{AC}}{d_{s,g}}\right) \right] \end{cases} \quad (3-1)$$

jossa  $\bar{E}_a$ ,  $\bar{E}_b$  ja  $\bar{E}_c$  ovat vaiheiden A, B ja C kosketussuojiin induoituvat jännitegradientit,  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$  ja  $\bar{I}_C$  ovat vaihejohtimissa A, B ja C kulkevat virrat,  $\omega$  on kulmataajuus,  $j$  on imaginääriyksikkö,  $d_{s,g}$  on kosketussuojan keskiarvoinen halkaisija ja  $S_{AB}$ ,  $S_{AC}$  ja  $S_{BC}$  ovat vaihekaapeleiden A, B ja C keskipisteiden etäisyydet toisistaan. [24, s.5] Kaava ottaa yksittäisen kaapeliryhmän vaihejohtimien induoimat jännitteet, mutta se ei ota huomioon mahdollisten rinnakkaisten kaapeliryhmien vaikutusta [12, s.42]. Tästä syystä induoituneiden jännitteiden tulokset saattavat erota todellisista jännitteistä, kun kaapeliryhmän rinnalla kulkee useita muita kaapeliryhmiä. Kaapeleiden kosketussuojien maadoittamattomat päät tulee varustaa yli-jännitesuojilla, jotta kaapelin eristekerrokset eivät vahingoitu korkeista jännitepiikeistä [12, s.9]. Kosketussuojien maadoittamattomissa päissä on pysyvä jännite tuotannon aikana ja niiden koskettaminen tulee estää SFS 6001 Standardin mukaisesti, mikäli suurimman sallitun kosketusjännitteen arvo ylittyy [22, s.63].

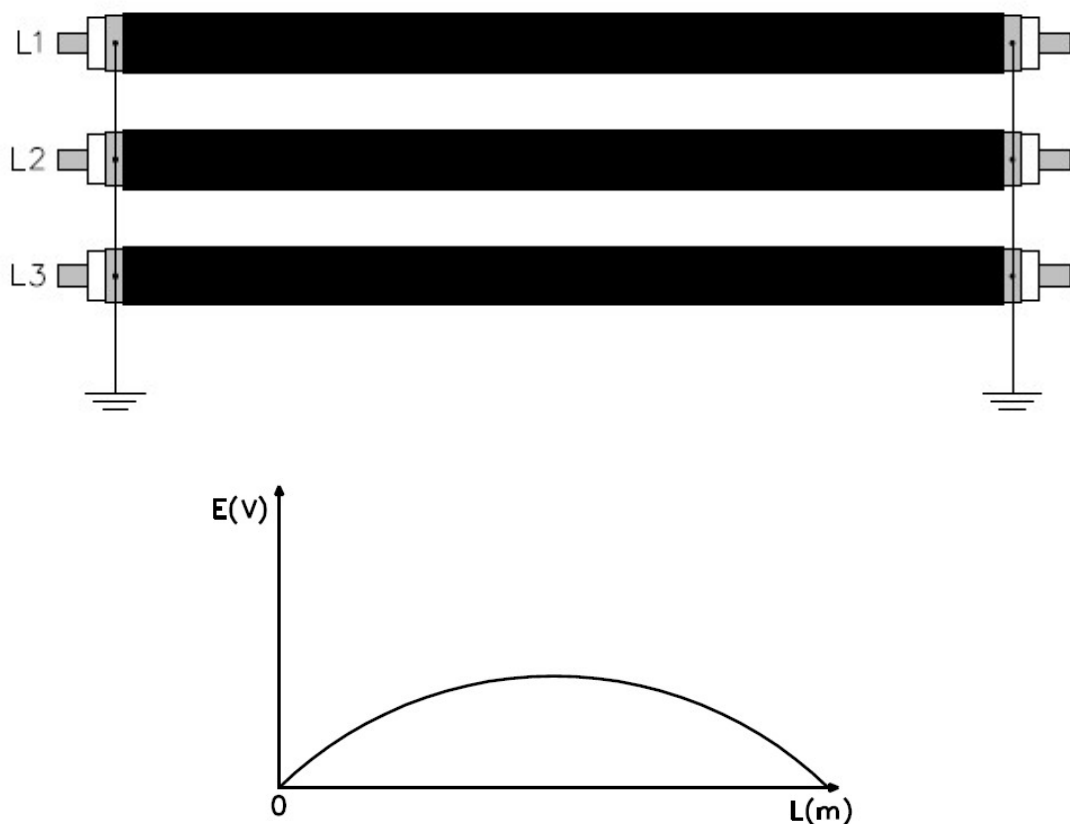
Yksipistekytkenässä kosketussuojiin ei indusoidu virtoja, koska kosketussuojien muodostamat virtapiirit eivät ole suljettuja. Tämän takia kaapelin kuormitettavuus ei heikkene ja kosketussuojista aiheutuvat tehohäviöt ovat alhaiset. Kosketussuojassa kulkee kuitenkin kapasitiivista varausvirtaa, joka virtaa kohti maadoituspistettä. Varausvirta kumuloituu kosketussuojassa ja täten kaapeleiden ollessa pitkiä voivat varausvirrat olla magnitudiltaan korkeita maadoituspisteen läheisyydessä. [14, s.1]

Yksipistekytkenä voidaan myös toteuttaa maadoittamalla kosketussuojat keskeltä kaapeliväliä. Tällaisessa asennustavassa kaapelipäätteille induoituvat jännitteet ovat alhaisemmat verrattuna asennukseen, jossa maadoitus on kaapelipäätteellä johtuen lyhyemmästä etäisyydestä kosketussuojien päiden ja maadoituspisteen välillä. Kyseisessä

asennustavassa myös kapasitiivinen varausvirta on magnitudiltaan pienempi sen jakautuessa kaapelivälillä. [14, s.1] Asennustapa vaatii kuitenkin erillisen kaapelijatkoksen, jolla maadoitus toteutetaan ja käytännöllisistä syistä maadoitukseen vaaditaan kaapelin rinnalla kulkeva potentiaalintasausjohdin, johon kosketussuojat kytketään maadoitusresistanssin minimoimiseksi.

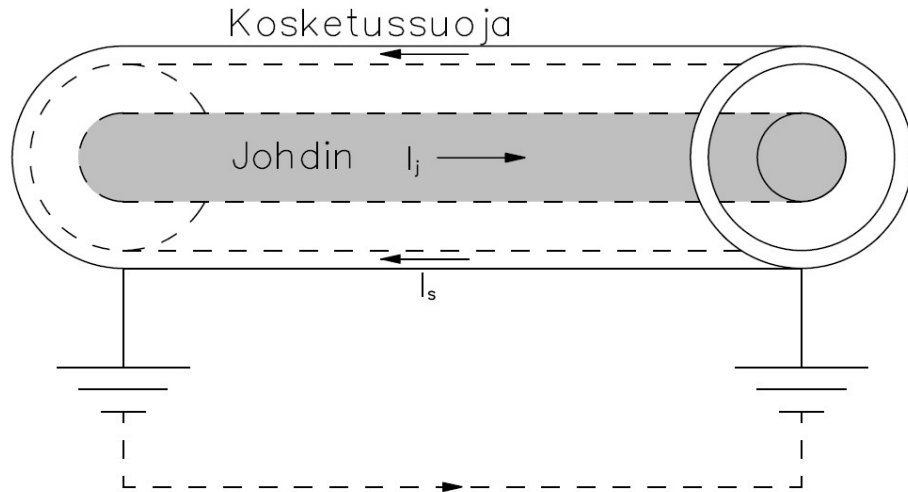
### 3.2 Kosketussuojapiirin suljettu kytkentä

Keskijännitekaapeleiden kosketussuojilla käytetään useasti kytkentätapana suljettua kytkentää johtuen asennuksen yksinkertaisuudesta ja sen takaamista alhaisista jännitteistä koko kosketussuojalle [7, s.1]. Suljetussa kytkennässä kaapelivälin kunkin vaiheen kosketussuoja maadoitetaan useasta kohdasta, mikä sulkee kosketussuojapiirit. Tämä asennustapa toteutetaan usein kytkemällä eri vaiheiden kosketussuojat tuulipuiston maadoitusverkkoon molemmilla kaapelipäätteillä, jolloin kosketussuojavirtapiirit sulkeutuvat maadoitusten sekä muiden vaiheiden kosketussuojien kautta. [23, s.3] Kaapelin molemmista päistä maadoitettujen kosketussuojien kytkentäperiaate ja jännitejakauma on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6: Kosketussuojien maadoitus molemmilla kaapelipäätteellä ja niiden jännitejakauma pituuden funktiona [23, s.2, muokattu] [18, s.38, muokattu]**

Kosketussuojapiirien ollessa suljettuja, kosketussuojan kokema sähkömotorinen voima indusoi kosketussuojan päiden välille jännitteen, joka aiheuttaa suojiin virtoja, jotka ovat Lenzin lain mukaan vastakkaisuuntaisia johtimissa kulkeviin virtoihin verrattuna. Indusoituneen virran suuruus on riippumaton kaapelivälin pituudesta, sillä kaapelin pituuden kasvaessa kosketussuojaan indusoitunut jännite kasvaa samassa suhteessa kuin kosketussuojan impedanssi. [21, s.3] Kosketussuojaan indusoituneen virran muodostumista on havainnollistettu kuvassa 7.



**Kuva 7: Kosketussuojaan indusoitunut virta molemmista päädyistä maadoitettussa asennuksessa [18, s.33, muokattu]**

Koska molemmista päistä maadoitetussa kosketussuojassa ei esiinny suuria jännitteitä, ei järjestelmä vaadi minkäänlaisia lisälaitteistoja, kuten ylijännitesuojia. Tämä alentaa asennus- ja huoltokustannuksia, mitkä ovat osasy kyseisen asennustavan yleisyyteen keksijännitekaapeleilla. [25] Kosketussuojapiirin indusoituvat virrat ovat kuitenkin ongelmallisia johtuen niiden aiheuttamista lämpöhäviöistä. Koska kosketussuojassa kulkee huomattavasti suurempi virta kuin muissa asennustavoissa, tapahtuu kaapelissa enemmän tehohäviöitä ja kaapelin kuormitettavuus alenee. [7, s.1] Kosketussuojassa tapahtuvien häviöiden arvioimiseen voidaan käyttää luvussa 4.4 esitettyjä menetelmiä. Molemmista päistä maadoitetun kosketussuojien indusoituneita virtoja voidaan laskea kaavalla (3-2),

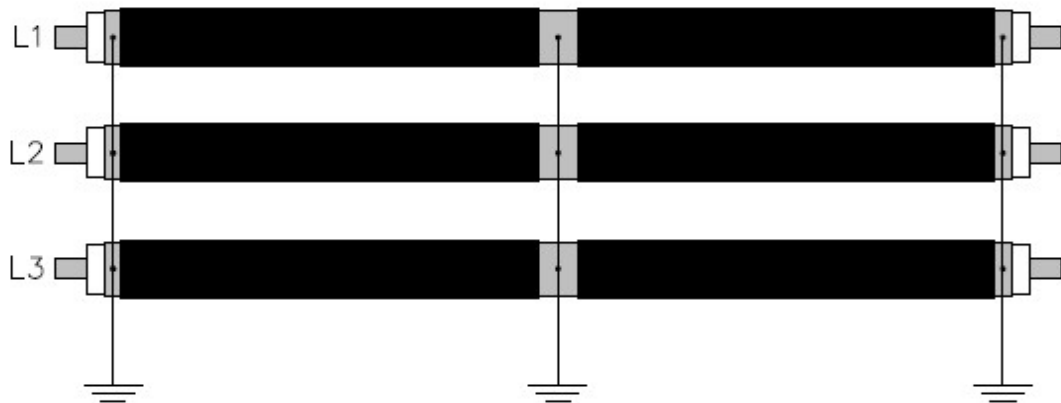
$$\bar{I}_{s,ind} = \frac{\bar{I}_N \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d_{s,g}}\right)}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \quad (3-2)$$

jossa  $\bar{I}_{s,ind}$  on kosketussuojaan indusoituva virta,  $\bar{I}_N$  on kaapelin johtimessa kulkeva nimellinen virta,  $\omega$  on kulmataajuus,  $\mu_0$  on  $S$  on kaapelien keskipisteiden välinen etäisyys,

$d_{s,g}$  on kaapelin kosketussuojan keskiarvoinen halkaisija,  $R_s$  on kaapelin kosketussuojan resistanssi ja  $X_s$  on kaapelin kosketussuojan reaktanssi [7, s.1]. Kosketussuojassa kulkeva kokonaisvirta saadaan, kun indusoitunut virta summataan kaapelin kapasitiivisen varausvirran kanssa. Kokonaisvirta kosketussuojassa voi saavuttaa jopa 70 A virran pitkillä kaapeleilla johtimen kuormitusvirran ollessa noin 400 A, mistä on todettu olevan haittaa kosketussuojapiiriin liitoksille. Koska tuulipuistoissa kuormitustaso vaihtelee johdun epäsäännöllisestä tuotannosta, aiheutuu kosketussuojapiiriin termisiä syklejä, joilla on haurastuttava vaikutus kaapelin komponenteille. Varsinkin kaapelijatkoksissa käytetyt kosketussuojan kiinnikkeet ovat alttiita virran aiheuttamalle toiminnan heikkenemiselle. Kosketussuojiin indusoituneet virrat ja niiden termiset syklit ovat osasyitä kaapelijatkoksien ja kaapelipäätteiden liitoksien ennenaikaisille vikaantumisille, minkä vuoksi liian suuria virtoja tulisi välttää käyttämällä eri kosketussuojien asennustapoja. [7, s.2]

### 3.2.1 Lisämaadoitus keskellä kaapeliväliä

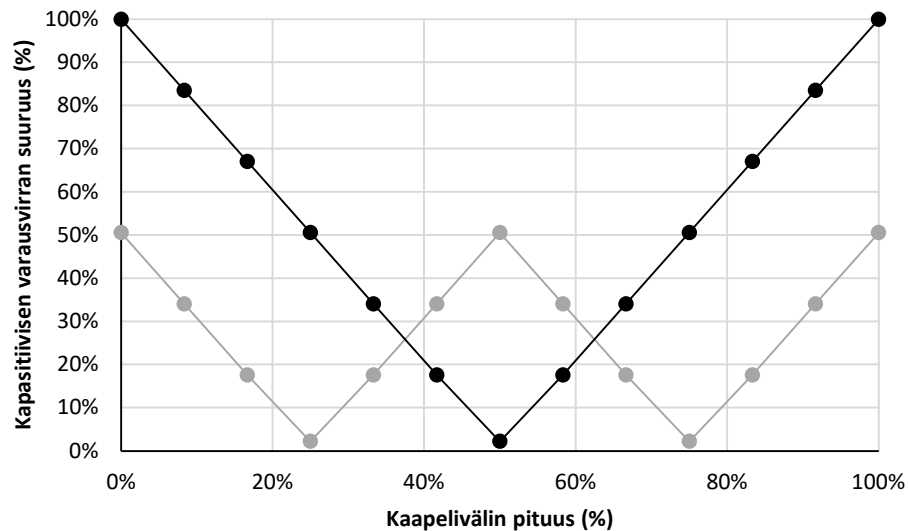
Kaapelin kosketussuoja voidaan kytkeä tuulipuiston maadoitusverkkoon kaapelipäätteiden lisäksi myös keskeltä kaapeliväliä. Kyseisen maadoitustavan toteutus on esitetty kuvassa 8.



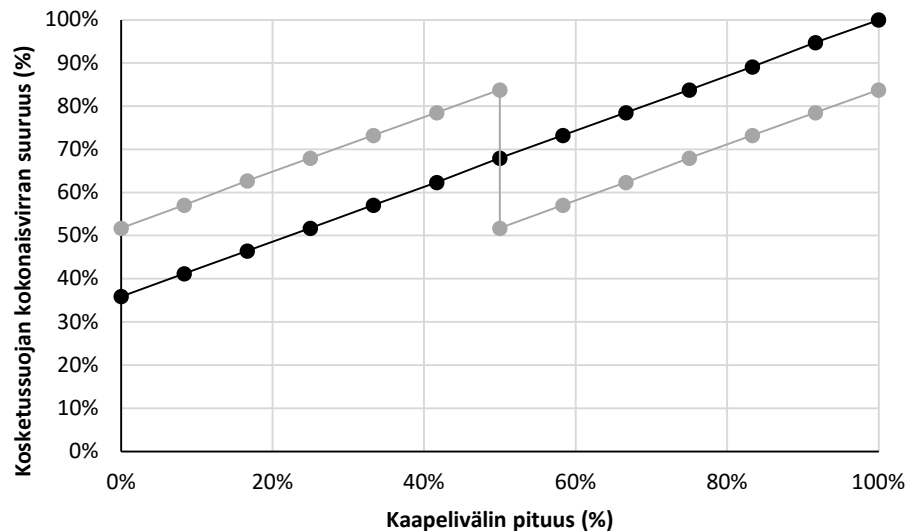
**Kuva 8: Useasta pisteestä maadoitettu kosketussuoja [18, s.37, muokattu]**

Toteutuksella voidaan pienentää kosketussuojassa esiintyvät jännitteet lähelle nollapotentiaalia koko kaapelivälillä tehokkaamman maadoituksen ansiosta. Kosketussuojassa esiintyvien virtojen kulku muuttuu uuden maadoituspisteen myötä. Kapasitiiviset varausvirrat pääsevät kiertämään keskellä olevan maadoituksen kautta, mikä pienentää varausvirtojen kumuloitunutta magnitudia kaapelipäätteillä. Sähkömotorisen voiman indusoimaan virtaan lisämaadoitusten lukumäärällä ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta.

tusta. DlgSILENT Powerfactorylla on simuloitu AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeli nimellisellä kuormitusvirralla käyttäen kahdesta ja kolmesta pisteestä maadoitettuja kosketussuojia, joiden tulokset on esitetty kuvissa 9 ja 10. Kuvassa 9 kaapeli on jännitteinen, mutta ei kuormitettu, jolloin kosketussuojassa kulkee vain varausvirtoja ja kuvassa 10 kaapeli on simuloitu nimellisellä kuormitusvirralla, jolloin kosketussuojassa varausvirrat ja indusoituneet virrat summautuvat.



**Kuva 9: Kahdesta ja kolmesta pisteestä maadoitettujen kosketussuojien simuloitut kapasitiiviset varausvirrat**



**Kuva 10: Kahdesta ja kolmesta pisteestä maadoitettujen kosketussuojien simuloitut kokonaisvirrat**

Kuvissa 9 ja 10 kahdesta pisteestä maadoitetun kosketussuojan tulokset ovat merkattu

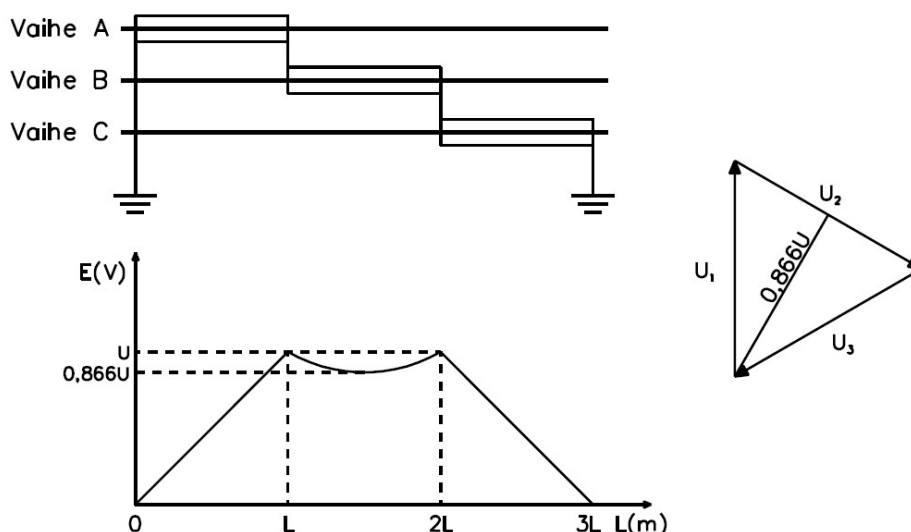
kuvaajaan mustalla ja kolmesta pisteestä maadoitetun kosketussuojan tulokset ovat kuvaajissa harmaalla. Kolmesta pisteestä maadoitetulla kosketussuojalla lisämaadoitus on toteutettu 50% etäisyydellä koko kaapelin pituudesta. Kaapelin 0% etäisyys kuvastaa kaapelin kuormituspäätä ja 100% kuvastaa kaapelin tehoa syöttävää päätä.

Kapasitiivisen varausvirran suunta ei ole yhtenäinen koko kaapelivälillä ja lisämaadoitusten takia kaapelivälille syntyy uusia sektioita, joissa virran suunta muuttuu. Kahdesta pisteestä maadoitetun kosketussuojan varausvirta kulkee välillä 0% - 50% kohti kuormituspäätä ja välillä 50% - 100% kohti syöttöpäätä. Kolmesta pisteestä maadoitetun kosketussuojan varausvirta taasen kulkee kohti kuormituspäätä etäisyyksillä 0% - 25% ja 50% - 75% sekä kohti syöttöpäätä etäisyyksillä 25% - 50% ja 75% - 100%. Varausvirroilla on heikentävä tai vahvistava vaikutus indusoituneeseen virtaan riippuen niiden suunnasta, mikä voidaan myös havainnoida kuvasta 10 [6, s.3]. Kuvassa 10 kokonaisvirtojen suunta on sama koko kaapelivälillä molemmissa kytkentätavoissa.

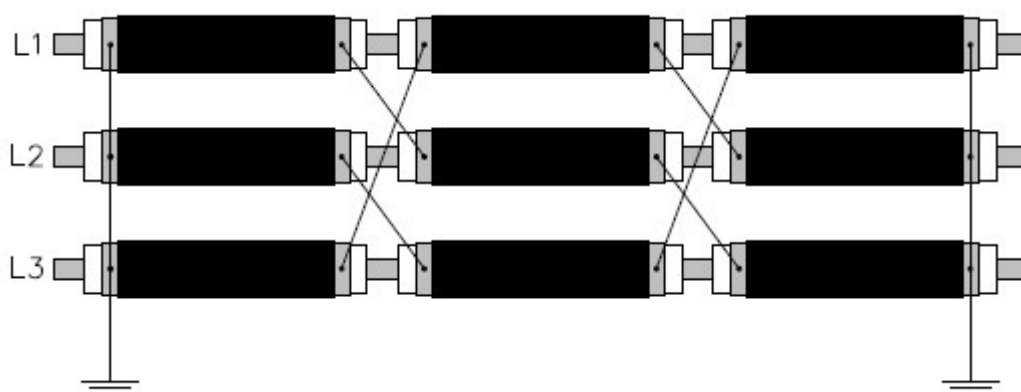
Lisämaadoitukset kaapelivälillä pienentävät kosketussuojassa esiintyvän virran huippuarvoa, mutta samalla kasvattavat virran alinta arvoa. Simulointituloksien mukaan virran huippuarvo tippui 16% käyttämällä lisämaadoitusta keskellä kaapeliväliä. Tulos on tapauskohtainen sillä siihen vaikuttaa kaapeleiden asennusmuoto sekä kapasitiivisten varausvirtojen ja indusoituneiden virtojen suuruuksien suhde. Useampi kosketussuojan lisämaadoitus takaa lähes jännitteettömän kosketussuojan, jossa virran suuruus kaapelivälillä on tasaisempi.

### 3.3 Kosketussuojien vaihevuorottelu

Kosketussuojan vaihevuorottelussa kaapelin kosketussuojat ovat maadoitettu kaapelivälin molemmista päistä, mutta tämän lisäksi kaapeliväli jaetaan sektioihin, jotka erotetaan toisistaan vaihevuorottelukoteloilla. [7, s.2] Yksinkertaisessa vaihevuorottelussa sektioita on kolme ja vaihevuorottelukoteloita kaksi, mutta sektioita ja koteloita voidaan lisätä, jos vaihevuorottelu halutaan toteuttaa useammin samalle kaapelivälille [12, s.16]. Eri vaiheiden kosketussuojat risteytetään koteloilla siten, että kukin kosketussuoja kulkee vuorollaan eri vaihekaapelissa. Tällöin kosketussuojien eri sektioihin indusoituvien sähkömotoristen voimien vaihe-ero on tasaisesti kuormitetussa tilanteessa  $120^\circ$ . Tämä aiheuttaa sähkömotoristen voimien indusoimien jännitteiden kumoutumisen kosketussuojissa jännitteiden vektorisumman ollessa kaapelivälillä 0, kun oletetaan että kaapelisektioiden pituudet ovat yhtä suuret. [7, s.2] Kuvissa 11 ja 12 on havainnollistettu kosketussuojien kytkentäkaavioita sekä kosketussuojiin indusoituneita jännitteitä kaapelivälillä.



**Kuva 11: Yhden kosketussuojan kytkentäkaavio ja siihen indusoitua jännite [18, s.47, muokattu]**



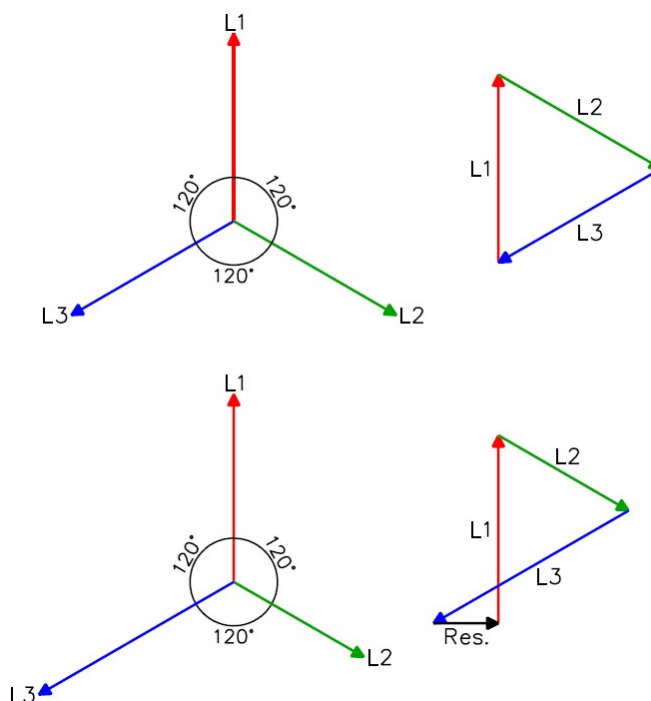
**Kuva 12: Kosketussuojien vaihevuorottelun kytkentäkaavio [23, s.2, muokattu]**

Symmetrisesti asennetuissa vaihevuorotelluissa kosketussuojissa suurimmat jännitteet esiintyvät kytkentäkotelolla kuvan 11 mukaisesti. Kotelolla esiintyviin seisovien jännitteiden suuruuteen vaikuttaa kaapelivälin pituus sekä kosketussuojan kokeman sähkömotorisen voiman voimakkuus. [12, s.26] Vaihevuorotelluilla kosketussuojilla jännitteet kasvavat tyypillisesti korkeammiksi verrattuna molemmista päistä maadoitettuihin kosketussuojiiin. [12, s.5]. Transienttitilanteissa kosketussuojiiin indusoitua sähkömotorinen voima saattaa aiheuttaa huomattavan korkean jännitepiikin kytkentäkotelolla, minkä takia kytkentäkotelolla kosketussuojien ja maapotentiaalin tulee asentaa ylijännitesuojat. [12, s.26]

Vaihevuorotellussa kosketussuojaan indusoituneiden jännitteiden vektoreiden tulisi olla mahdollisimman symmetriset, jotta jännitevektorit kumoaisivat toisensa tehokkaasti.



Epäsymmetristen jännitevektoreiden summasta jää resultoiva jännitevektori, jolla on nostava vaikutus kosketussuojassa esiintyville jännitteille ja virroille. [7, s.3] Symmetrisiä ja epäsymmetrisiä jännitevektoreita on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13: Symmetrisesti ja epäsymmetrisesti indusoituneiden jännitteiden vektorit [7, s.3, muokattu]**

Indusoituneiden jännitteiden symmetrisyyteen vaikuttaa kaapeleiden asennusmuoto, kaapelisektioiden pituudet sekä erilaiset ulkopuoliset vaikutukset, kuten rinnakkaisten kaapeleiden indusoimat jännitteet. Kaapeleiden kolmioasennuksessa symmetriset jännitevektorit ovat mahdollisia, mutta tasoasennuksessa vektoreihin muodostuu aina epäsymmetrisyyttä. Optimaalisessa järjestelmässä kaapelit olisi asennettu kolmioon, kaapeliryhmän ojassa ei olisi rinnakkaisia kaapeleita ja kaapelisektioiden pituudet olisivat yhtä suuret. [12, s.15]

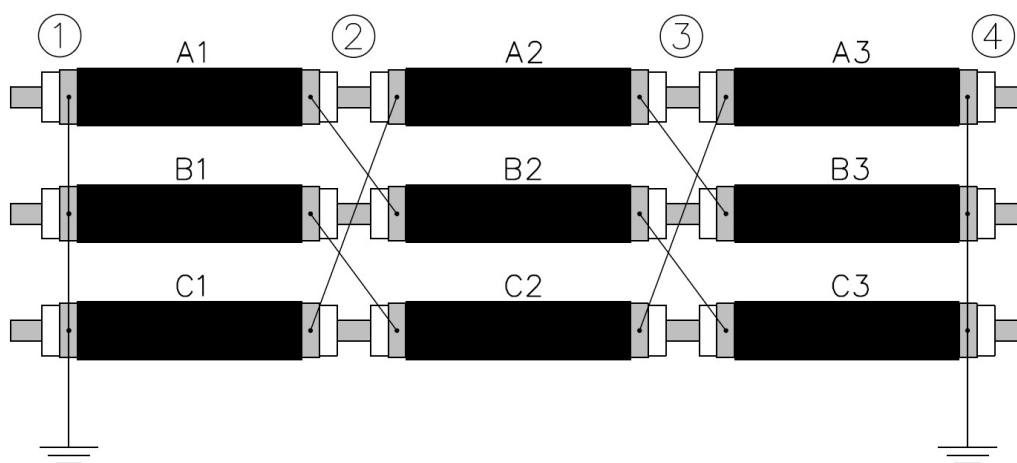
Vaihevuorottelulla voidaan saavuttaa minimaalinen virta kosketussuojissa koko kaapelivälille. Kosketussuojaan indusoituneilla ja kapasitiivisilla virroilla on vaihevuorottelun myötä  $120^\circ$  vaihe-ero kaapelin eri sektioissa, mikä mahdollistaa virtojen tehokkaan kumoutumisen. Käytännön toteutukset ovat osoittaneet, että 50 A virta molemmista päistä maadoitetun kosketussuojan tapauksessa pienentyi 5 A:iin käyttämällä vaihevuorottelua. [7, s.3] Tulos tarkoittaa virran alenemista 90%:lla vaihevuorottelun ansiosta, mikä on myös lähellä alaluvussa 5.4 taulukossa 1 esitettyjä tuulipuiston simulointituloksia.

Vaihevuorottelun etuihin kuuluu alhaisemmat jännitteet kuin avoimessa kytkennässä ja

alhaisemmat virrat kuin suljetussa kytkennässä. Näiden vuoksi pitkiä kaapeliosuuksia voidaan rakentaa käyttämällä yksinkertaista tai moninkertaisia vaihevuorotteluita ilman suurempia riskejä komponenttien vioittumisista. Koska kosketussuojat ovat maadoitettu molemmilta kaapelipääteiltä, toimii ne maadoitusten yhdistäjänä eikä potentiaalintasausjohdinta välttämättä tarvita. [14, s.2] Minimaalinen virta vaihevuorotellussa kosketussuojassa alentaa myös kosketussuojan virran aiheuttamia häviöitä sekä nostattaa kaapelin kuormitettavuuskykyä. Alhaisemmat lämpötilat ja lämpötilojen muutokset kosketussuojassa ehkäisevät kosketussuojapiirin komponentteja termiseltä ikäänntymiseltä, mikä pienentää termisten vahinkojen todennäköisyyttä kaapelin kosketussuojapiirissä. [7, s.5]

Vaihevuorottelun heikkous on kuitenkin sen tekninen monimutkaisuus. Toteutukseen tarvittavat lisäkomponentit ja niiden asennukset tuovat lisäkustannuksia sekä niiden suunnittelussa vaaditaan lisätyötä. Kaapelin vaipan jatkuvuuden katkeaminen vaihevuorottelun myötä saattaa aiheuttaa ongelmia osittaispurkausmittausten toteutuksessa. [14, s.2] Vaihevuorottelu on tehokasta vain kolmioasennetuilla kaapeleilla sen symmetrisyyden vuoksi. Tasoasennuksissa epäsymmetrisyys heikentää vaihevuorottelun toimintaa, mikä aiheuttaa kosketussuojaan suuremmat jännitteet ja virrat. [12, s.15].

Kaapelin vaihevuoroteltuun kosketussuojaan indusoituneet jännitteet ja virrat sekä kapasitiivinen virta voidaan approksimoida käyttäen kaavoja (3-4)..(3-10). Kuvassa 14 havainnollistetaan kaavoissa käytettyjä alaindeksejä.



**Kuva 14: Vaihevuorottelun kosketussuojan laskentapisteiden esitys [15, s.646, muokattu]**

Kosketussuojan virtapiirin kokonaiskytkentäresistanssi voidaan määritellä seuraavasti,

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (3-3)$$

jossa  $R_{tot}$  on kokonaiskytkentäresistanssi,  $R_1$  on maadoituspisteen 1 kytkentäresistanssi,  $R_2$  on kytkentäkotelon 1 kytkentäresistanssi,  $R_3$  on kytkentäkotelon 2 kytkentäresistanssi ja  $R_4$  on maadoituspisteen 2 kytkentäresistanssi. [15, s.646] Maadoituspisteiden ja kytkentäkoteloiden resistanssit kuvaavat kosketussuojien liitosten laatua maadoitukseen ja kytkentäkoteloihin. Hyvälaatuisilla liitoksilla kytkentäresistanssit voidaan jättää huomioimatta. Kuvan 14 mukaisesti erään kosketussuojan kulkureitti kaapelivälillä on A1B2C3. Kyseiseen kosketussuojaan indusoituneita jännitteitä voidaan laskea seuraavalla kaavalla,

$$\begin{cases} \bar{U}_{s,A1} = -j\omega(L_{11}\bar{I}_A + M_{21}\bar{I}_B + M_{31}\bar{I}_C)l_{A1} \\ \bar{U}_{s,B2} = -j\omega(M_{12}\bar{I}_A + L_{22}\bar{I}_B + M_{32}\bar{I}_C)l_{B2} \\ \bar{U}_{s,C3} = -j\omega(M_{13}\bar{I}_A + M_{23}\bar{I}_B + L_{33}\bar{I}_C)l_{C3} \end{cases} \quad (3-4)$$

jossa  $\bar{U}_{s,A1}$ ,  $\bar{U}_{s,B2}$  ja  $\bar{U}_{s,C3}$  ovat eri kaapeliosien indusoima jännite,  $\omega$  on kulmataajuus,  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$  ja  $\bar{I}_C$  on kaapelin vaihejohtimissa kulkevat virrat ja  $l_{A1}$ ,  $l_{B2}$  ja  $l_{C3}$  on kaapeliosuuksien pituudet. Kaapelireitin A1B2C3 kosketussuojaan indusoituva virta voidaan laskea kaavalla (3-5),

$$\bar{I}_{s1,ind} = \frac{(\bar{U}_{s,A1} + \bar{U}_{s,B2} + \bar{U}_{s,C3})}{(R_s + jX_s)l + R_{tot} + R_e} \quad (3-5)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,ind}$  on kosketussuojaan indusoituva virta ja  $R_e$  on maadoitusjohtimen resistanssi kaapelivälillä.

Kosketussuojan kapasitiivista virtaa laskiessa tulee tietää kaapelin kapasitanssi, joka voidaan laskea kaavalla (2-3). Kosketussuojan kapasitiivinen virta voidaan määrittää eri pisteissä ja valitut pisteet 1,2,3 ja 4 ovat esitetty kuvassa 14. Kosketussuojassa A1B2C3 kulkeva kapasitiivinen virta voidaan laskea osien A1, B2 ja C3 virtakontributioiksi. [15] Ensimmäisen maadoituspisteen eli pisteen 1 kapasitiivinen virta kosketussuojapiirissä A1B2C3 voidaan laskea kaavalla (3-6),

$$\begin{aligned} \bar{I}_{s1,1,kap} = & \int_0^{l_{A1}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_2 + R_3 + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_A dx \\ & + \int_{l_{A1}}^{l_{A1}+l_{B2}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_3 + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_B dx \\ & + \int_{l_{A1}+l_{B2}}^{l_{A1}+l_{B2}+l_{B3}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_C dx \end{aligned} \quad (3-6)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,1,kap}$  on kosketussuojapiirin A1B2C3 pisteen 1 kapasitiivinen virta. Ensimmäisellä kytkinkopilla eli pisteessä 2 kulkeva kapasitiivinen virta kosketussuojapiirissä A1B2C3 voidaan laskea kaavalla (3-7),

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s1,2,kap} = & - \int_0^{l_{A1}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_A dx \\ & + \int_{l_{A1}}^{l_{A1}+l_{B2}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_3 + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_B dx \\ & + \int_{l_{A1}+l_{B2}}^{l_{A1}+l_{B2}+l_{B3}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_C dx\end{aligned}\quad (3-7)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,2,kap}$  on kosketussuojapiirin A1B2C3 pisteen 2 kapasitiivinen virta. Toisella kytkinkopilla eli pisteessä 3 kulkeva kapasitiivinen virta kosketussuojapiirissä A1B2C3 voidaan laskea kaavalla (3-8),

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s1,3,kap} = & - \int_0^{l_{A1}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_A dx \\ & - \int_{l_{A1}}^{l_{A1}+l_{B2}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1 + R_2}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_B dx \\ & + \int_{l_{A1}+l_{B2}}^{l_{A1}+l_{B2}+l_{B3}} \frac{(l-x)(R_s + jX_s) + R_4}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_C dx\end{aligned}\quad (3-8)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,3,kap}$  on kosketussuojapiirin A1B2C3 pisteen 3 kapasitiivinen virta. Toisella maadoituspisteellä eli pisteessä 4 kulkeva kapasitiivinen virta kosketussuojapiirissä A1B2C3 voidaan laskea kaavalla (3-9),

$$\begin{aligned}\bar{I}_{s1,4,kap} = & - \int_0^{l_{A1}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_A dx \\ & - \int_{l_{A1}}^{l_{A1}+l_{B2}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1 + R_2}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_B dx \\ & - \int_{l_{A1}+l_{B2}}^{l_{A1}+l_{B2}+l_{B3}} \frac{x(R_s + jX_s) + R_1 + R_2 + R_3}{l(R_s + jX_s) + R_{tot}} j\omega C \bar{U}_C dx\end{aligned}\quad (3-9)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,4,kap}$  on kosketussuojapiirin A1B2C3 pisteen 4 kapasitiivinen virta. Kosketussuojassa kulkeva todellinen virta on induktiivisen ja kapasitiivisen virran summa. Täten

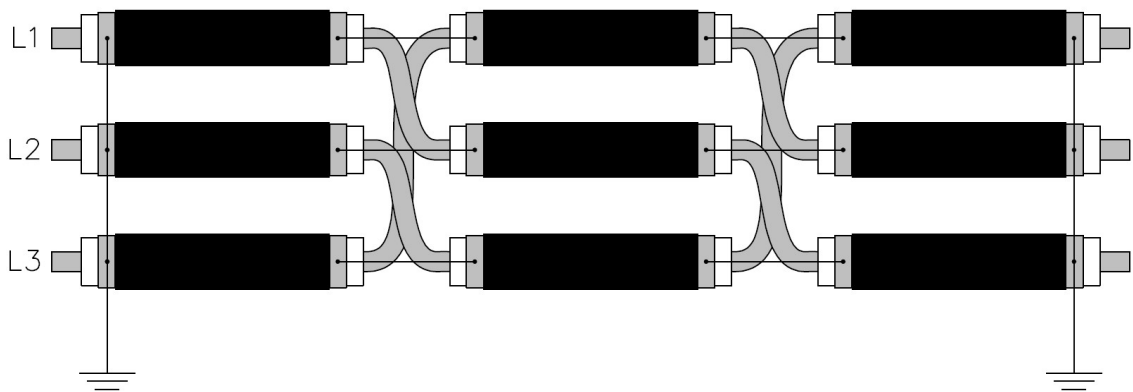
eri tarkastelupisteiden virta voidaan laskea kaavalla (3-10),

$$\begin{cases} \bar{I}_{s1,1} = \bar{I}_{s1,ind} + \bar{I}_{s1,1,kap} \\ \bar{I}_{s1,2} = \bar{I}_{s1,ind} + \bar{I}_{s1,2,kap} \\ \bar{I}_{s1,3} = \bar{I}_{s1,ind} + \bar{I}_{s1,3,kap} \\ \bar{I}_{s1,4} = \bar{I}_{s1,ind} + \bar{I}_{s1,4,kap} \end{cases} \quad (3-10)$$

jossa  $\bar{I}_{s1,1}$ ,  $\bar{I}_{s1,2}$ ,  $\bar{I}_{s1,3}$  ja  $\bar{I}_{s1,4}$  ovat kaapelin kosketussuojapiirissä A1B2C3 kulkevat virrat pisteissä 1, 2, 3 ja 4. [15, s.646]

### 3.3.1 Vaihevuorottelu johtimien transponoinnilla

Kaapelin kosketussuojien vaihevuorottelun lisäksi voidaan kaapelit itsessään transponoida kaapelivälillä. Kyseisessä asennustavassa vaihekaapeleiden paikkoja vuorotellaan siten, että jokainen kaapeli kulkee vuorollaan eri kohdassa. Tällöin kukin kosketussuoja kulkee koko kaapelireitin ajan samassa kohdassa kaapeliojassa, mutta eri vaihekaapelissa kaapelisektioittain. Johtimien paikkoja vuorotellaan kaapelisektioiden välissä, jossa myös kosketussuojien vaihevuorottelu tapahtuu. Johtimien transponoinnilla voidaan vaikuttaa epäsymmetrisesti asennettavien kaapeleiden kosketussuojassa esiintyviin jännitteisiin ja virtoihin. [12, s.16] Kytkentäkaavio kosketussuojien vaihevuorottelusta johtimien transponoinnilla on esitetty kuvassa 15.



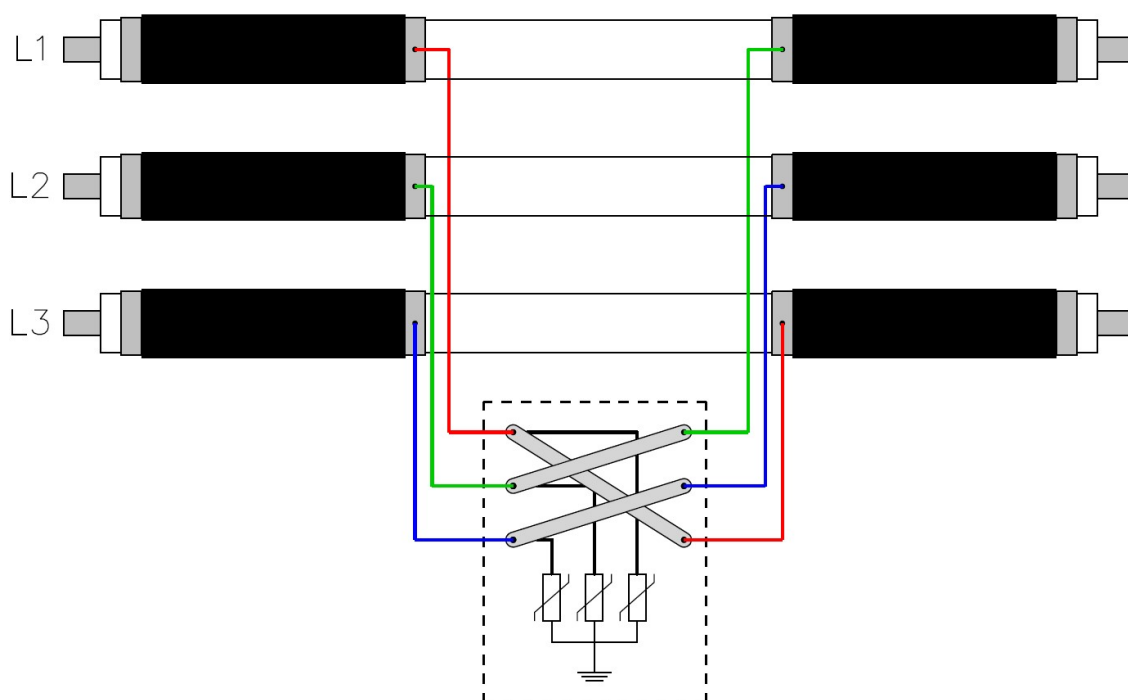
**Kuva 15: Kosketussuojien vaihevuorottelu johtimien transponoinnilla [18, s.49, muokattu]**

Transponoimattomalla vaihevuorottelulla kosketussuojan jännitteet ja virrat eivät kumoudu tehokkaasti, jos kaapeleiden asennusmuotona on käytetty epäsymmetristä asetelmaa, johtuen sektioiden kokemista erisuurista sähkömotorisista voimista. Transponoiduilla kaapeleilla kosketussuojiiin vaikuttava kaapeleiden asennusmuodon epäsymmetrisyys voidaan eliminoida, kun oletetaan että kaapelisektiot ovat identtiset. Tämä tarkoittaa, että kaapelimuodolla ei ole vaikutusta vaihevuorottelun toimintaan, kun johtimet

transponoidaan. [12, s.15] Johtimien transponoinnin toisena etuna on johtimien impedanssien tasapainottaminen, jolloin kaapeleiden kuormitukset ovat symmetrisempiä [12, s.43].

### 3.3.2 Vaihevuorottelun toteutus kytkentäkotelolla

Kaapeleiden vaihevuorottelu voidaan toteuttaa maan alla tai maan pinnalla. Maan alla toteutus vaatii erilliset kaapelijatkokset, jotka ovat tarkoitettu kosketussuojien vaihevuorotteluun sekä maan alle haudattavan kytkentäkotelon. Maan pinnalla oleva vaihevuorottelu voidaan toteuttaa esimerkiksi kytkinasemalla, jossa kosketussuojien vaihevuorottelu toteutetaan kaapelipäätteillä. Kuvassa 16 on esitetty kytkentäkotelon kaavio, jossa sektioiden välinen vaihevuorottelu toteutetaan.



**Kuva 16: Vaihevuorottelussa käytetyn kytkentäkotelon kaavio [26, s.273, muokattu]**

Kytkentäkotelon sisältää kolme vaihevuorottelukiskoa sekä ylijännitesuojat kullekin vaiheelle. Kosketussuojat tuodaan kaapeleiden jatkoksista ja kytketään kotelon vaihevuorottelukiskoihin käyttämällä yhdistyskaapeleita. Yhdistyskaapelit tuodaan koteloon läpivienneillä, joiden tulisi olla vesitiiviitä, jotta kotelon sisällä olevat komponentit voidaan suojata kosteudelta. Koska kotelon sisällä on olevat komponentit saattavat olla jännitteisiä, tulee kotelon olla sähköturvallisuusmääräysten mukainen. [12, s.27]

Yhdistyskaapeleiden tulisi olla mahdollisimman lyhyitä, sillä ylijännitesuojien tehokkuus

riippuu yhdistyskaapeleiden pituuksista pidemmän yhdistyskaapelin muodostaessa suuremman jännitehäviön ylijännitesuojan ja kosketussuojan välille. Liian pitkät yhdistyskaapelit saattavat aiheuttaa eristeen läpilyöntejä kaapelijatkoksilla tai kaapelipäätteillä jännitteen ylittäessä suojaustason. Täten yhdistyskaapeleiden maksimipituus tulisi rajoittaa 15 metriin. [12, s.27]

Yhdistyskaapelin valinnassa tulee huomioida kosketussuojapiirissä esiintyvät jännitteet ja virrat. Yhdistyskaapelityypeiksi suositellaan koaksiaalikaapelia, jonka eristekestoisuus on minimissään 600 V. Valinnassa tulee myös ottaa huomioon, että yhdistyskaapeleiden tulee kestää kosketussuojassa kulkevat virrat normaalissa kuormitustilanteessa vikatilanteissa ilman termistä vahingoittumista. [12, s.28]

## 4. KAAPELIVERKON SUUNNITTELU

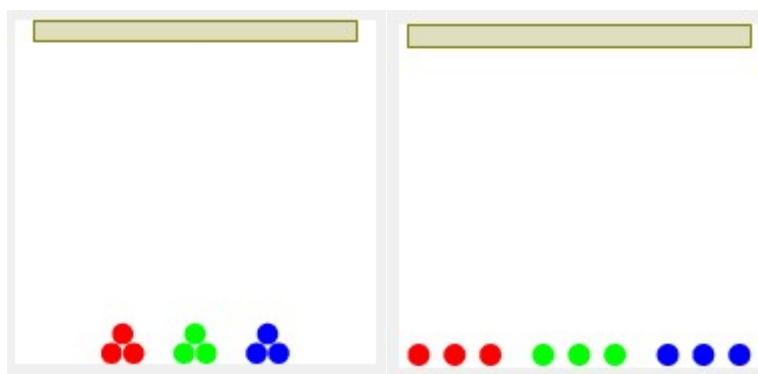
Tässä luvussa käydään läpi tuulipuiston kaapeliverkon suunnitteluprosessia ja millä tavalla kaapelin kosketussuojissa esiintyvät virrat ja jännitteet vaikuttavat siihen. Luvussa havainnollistetaan myös kosketussuojien asennustapojen vaikutusta kaapeliverkon ominaisuuksiin.

### 4.1 Kaapeliverkon topologia

Tuulipuiston kaapeliverkon topologiaan vaikuttaa tuulipuiston voimaloiden lukumäärä, voimaloiden sijainnit sekä sähköaseman sijainti. Kaapeliverkko optimoidaan laskennallisesti siten, että valitut komponentit ovat mahdollisimman kustannustehokkaita.

#### 4.1.1 Kaapelien ojittaminen

Sähköasemalta lähtevät syöttökaapelit ovat keskijänniteverkon raskaimmin kuormitetut kaapelit, jonka takia niissä tyypillisesti esiintyy eniten ongelmia kosketussuojassa esiintyvien jännitteiden ja virtojen kanssa. Nämä kaapelit tulisi mitoittaa ja asentaa siten, että ne kestävät voimaloiden tuottamat kuormitukset sekä niiden kosketussuojien jännitteet ja virrat ovat hyväksyttävällä tasolla. Sähköaseman ollessa pitkien etäisyyksien päässä voimaloista, puiston syöttökaapelit saattavat kulkea pitkän matkan rinnakkain samassa ojassa. Näissä tilanteissa on riskinä, että kosketussuojissa esiintyvät jännitteet ja virrat aiheuttavat vikoja kaapelin komponenteissa ja täten kaapelin ojituksen ja kosketussuojien asennuksen suunnitteluun pitää kiinnittää huomiota. Kuvassa 17 on esitetty kaapeliryhmien asennusta ojaan käyttäen kolmio- ja tasoasennusta.



**Kuva 17: Kolmen AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeliryhmän kolmio- ja tasoasennus ojassa**

Kuvassa 17 kukin väri kuvastaa yhden kaapeliryhmän kolmea vaihejohdinta. Tyypillisesti



kaapeleiden vaiheet lajitellaan ojaan kuvan 17 osoittamalla tavalla, jotta kaapeliryhmien vaiheet ovat selkeässä järjestyksessä. Myös kosketussuojiin indusoituvat sähkömotoriset voimat minimoituvat, kun viereisten kaapelien johtimissa kulkee erivaiheinen virta. Tasoasennuksessa kaapelin kuormitettavuus on suurempi, mutta kosketussuojiin indusoituvat sähkömotoriset voimat ovat myös suuremmat. Kolmioasennuksessa edullista on kosketussuojien kokemien sähkömotoristen voimien tehokkaampi kumoutuminen, sekä kaapeliojan leveyden kapeneminen.

Kosketussuojan potentiaalın nousun ja virtojen ehkäisemiseksi kaapeleiden asennustapa on suositeltavaa käyttää kolmioasennusta. Tasoasennuksessa kosketussuojan jännitteiden ja virtojen suuruutta voidaan kuitenkin pyrkiä minimoimaan käyttämällä kaapeleiden transponointia. Transponoinnissa kaapeliryhmän kaapeleiden asentoa vuorotellaan ojassa siten, että vaiheet ovat vuorollaan asennettu eri järjestykseen ojassa. Ideallisessa transponoinnissa kaapelit kulkevat yhtä pitkän matkan kussakin järjestyksessä. Kaapeliryhmän vaiheiden transponointia on havainnollistettu kuvassa 18.

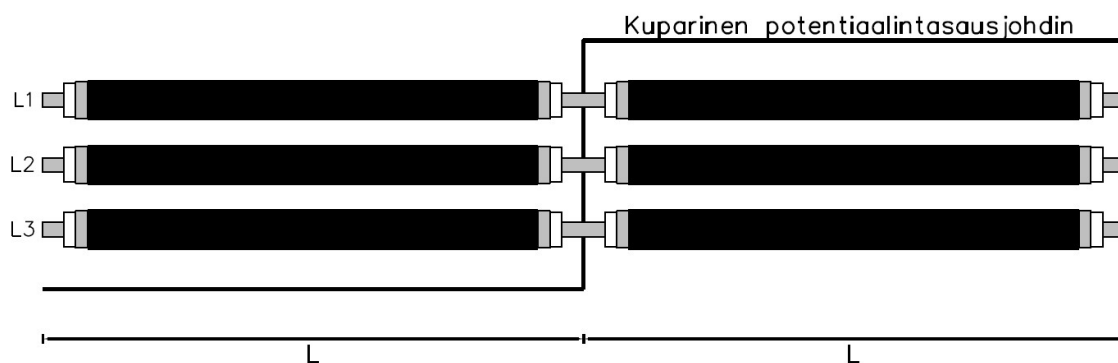


**Kuva 18: Kaapeleiden transponointi [18, s.37, muokattu]**

Transponoiduissa kaapeleissa jokainen vaihe kulkee vuorollaan eri kohdassa. Täten kokonaisuudessaan jokaisen vaiheen kosketussuoja kokee symmetrisemmät magneettikentät verrattuna transponoimattomaan asennukseen. Tällä on pienentävä vaikutus kunkin kosketussuojan kokemaan sähkömotoriseen voimaan. Transponointi voi kuitenkin olla haasteellista, kun käytössä on paksuja kaapeleita, johtuen niiden jäykkyydestä. Kaapeleiden transponointi voidaan toteuttaa helpoiten jatkoskohdissa, mutta tämä menetelmä ei takaa, että kaapelin eri sektioiden pituudet olisivat yhtä suuret. Transponointi voidaan kuitenkin toteuttaa useaan kertaan yhdellä kaapelivälillä, jos se nähdään hyödylliseksi. [12, s.43]

Tuulipuiston kaapeliverkossa käytetään tyypillisesti kuparista potentiaalintasaussjohdinta,

jolla yhdistetään puiston maadoitukset toisiinsa, mikä pienentää tuulipuiston maadoitusimpedanssia. Maadoitusjohtimet kulkevat kaapeliojissa kaapeliryhmien rinnalla, jonka takia kaapeliryhmien muodostamat magneettikentät indusoivat maadoitusjohtimiin sähkömotorisen voiman, jonka ilmenee maadoitusjohtimessa kulkevana virtana. Koska kosketussuojat ovat kytkettynä kaapelipäätteillä samaan maadoitusterminaaliin kuin maadoitusjohdin, vaikuttaa maadoitusjohtimen virta terminaalilla esiintyvään jännitteeseen. Maadoitusjohtimen sijaintia ojassa voidaan vaihdella kaapelivälillä siihen indusoituvien virtojen pienentämiseksi. [23, s.9] [12, s.12]



**Kuva 19: Kuparisen maadoitusjohtimen sijainnin vuorottelu [23, s.9, muokattu]**

Potentiaalintasausjohtimen vuorottelusta on hyötyä vain tilanteissa, joissa kaapeleita ei ole transponoitu. Tällöin vuorottelu tasapainottaa eri vaiheisten sähkömotoristen voimien indusoitumista maadoitusjohtimeen. Transponoiduilla kaapeleilla maadoitusjohtimeen kohdistuvien sähkömotoristen voimien kumoutuminen on jo tehokkaimmillaan, eikä täten sijainnin vuorottelua suositella. [12, s.12]

#### 4.1.2 Kaapelijatkokset ja -päätteet

Tuulipuistoissa kaapelivälien etäisyydet ovat usein pitempiä kuin kaapelin toimittajalta tulevat kaapelikelat, minkä takia kaapeleita täytyy yhdistää toisiinsa käyttäen kaapelijatkoksia. Keski-jännitekaapeleissa käytetään tyypillisesti kahta erilaista jatkostyyppiä: suorja jatkoksia, jossa kosketussuojapiiri jatkoksen yli on yhtenäinen sekä jaksotusjatkoksia, jossa kosketussuojapiiri katkeaa jatkoksessa. Suorat jatkokset ovat yleisin tapa yhdistää kaapelit toisiinsa ja jaksotusjatkoksia käytetään vain vaihevuorotteluasennuksissa. [12, s.20]

Jatkoksilla pyritään liittämään kahden kaapelin johtimet ja kosketussuojat toisiinsa käyttämällä mahdollisimman pientä resistanssia. Koska kaapelijatkokset ja -päätteet ovat epäjatkuvuuskohta kaapelivälillä, voidaan ne nähdä kaapelin heikoimpina kohtina, jotka ovat altteimpia vikaantumisille. [5, s.1] Tästä syystä jatkoksien asennus täytyy tehdä

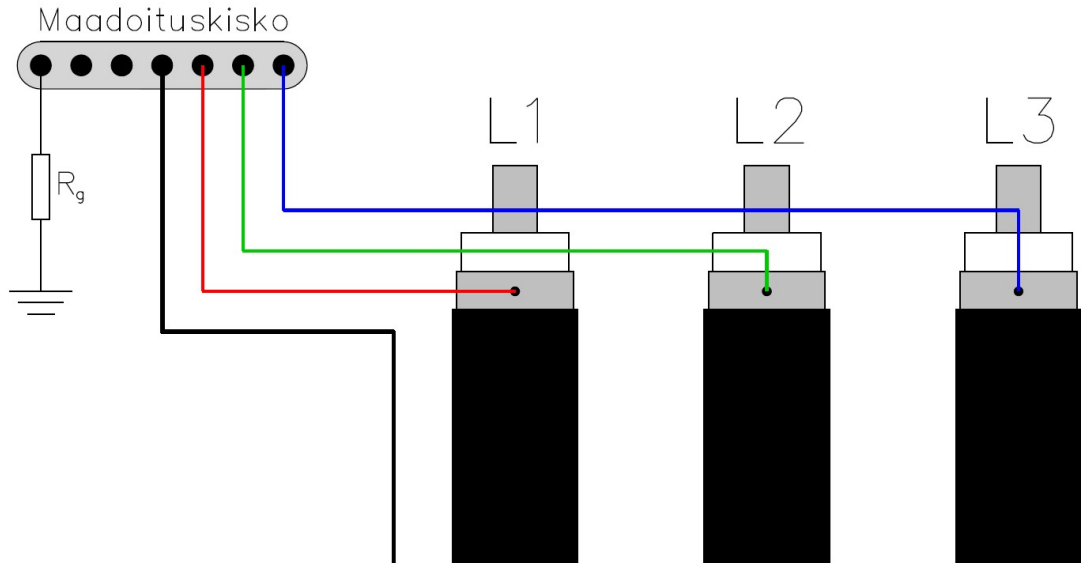
huolellisesti, jotta kaapeliin ei jää epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa sähkökentänvoimakkuuksien nousua kaapelin sisällä ja täten ne tuottavat ylimääräistä rasitusta kaapelin komponenteille. [8, s.13] Johtimien ja kosketussuojien liitosresistanssien tulisi olla myös mahdollisimman alhaiset, sillä johtimessa ja kosketussuojassa kulkevat virrat lämmittävät jatkosta niissä kulkevien virtojen ja liitosresistanssien mukaisesti. Huonosti asennetulla jatkoksella liitosresistanssi on suuri, jolloin jatkoksen lämpötila saattaa nousta suunnitellun toimintalämpötilan yläpuolelle. [5, s.1]

IEC 60502-2 standardi suosittelee kaapelin ja sen eri komponenttien sähköistä testausta asennuksen jälkeen. Kaapelivaipalle suoritetaan usein vähintään DC (tasavirta)-jännitetestaus. Testauksen jännitetasoon vaikuttaa kaapeleiden eristetasot ja se tehdään tyypillisesti 5 kV jännitteellä 1 – 15 minuutin ajan. Kaapeliverkon suorien jatkosten ja mahdollisten jaksotusjatkosten tulee kestää kyseiset jännitetestaukset luotettavasti. Jos kosketussuojapiirissä käytetään ylijännitesuojia, suositellaan niille kaapeliosuuksille tekemään jännitteen impulssitestauksia. IEC standardeista ei kuitenkaan löydy standardisoitua menetelmää keskijännitekaapeleiden jännitteen impulssitestaukselle. [7, s.5]

Kaapelivälin alku- ja loppuosassa käytetään kaapelipäätteitä, joilla vaihejohtimet liitetään keskijännitekojeistoihin. Kaapelipäätteellä toteutetaan myös kosketussuojien kytkentä tuulipuiston maadoitusverkkoon. Päätteiden tulee kestää kaikki samat verkon aiheuttamat rasitukset kuin muunkin kaapeliosuuden.

## 4.2 Maadoitusresistanssi

Tuulipuistoissa käytetään yhtenäistä maadoitusverkkoa, jonka maadoitusresistanssi määräytyy puiston maadoitusolosuhteista sekä mitatusta paikasta. Maadoitusresistanssi pyritään pitämään alhaisena, jotta johtavien osien kosketusjännitteet eivät nousisi liian suuriksi ja henkilöturvallisuus olisi taattu. Kosketussuojien ollessa kytkettynä maadoitusverkkoon, on maadoitusresistanssilla vaikutus kosketussuojassa esiintyvien jännitteiden suuruuteen. Kosketussuojien maadoitus voidaan toteuttaa kaapelipäätteillä, jossa kosketussuojat ovat kytketty keskijännitekojeiston maadoituskiskoon. Maadoituskisko on yhteydessä koko puiston maadoitusverkkoon, jonka maadoitusresistanssin mukaan kiskon seisova jännite määräytyy. Maadoitettujen kosketussuojien kytkentäkaavio päätteillä on esitetty kuvassa 20.



**Kuva 20: Kosketussuojien kytkentä maadoitusverkkoon kaapelipääteillä**

Maadoituskiskon jännite  $\bar{U}_T$  määräytyy maadoitusresistanssin  $R_g$  kautta kulkevasta nollavirrasta  $\bar{I}_n$ . Nollavirta on kaapelien kosketussuojissa kulkevien vaihevirtojen summa ja voidaan laskea kaavalla (4-1),

$$\bar{I}_{s,n} = \bar{I}_{s,a} + \bar{I}_{s,b} + \bar{I}_{s,c} \quad (4-1)$$

jossa  $\bar{I}_{s,n}$  on nollavirta,  $\bar{I}_{s,a}$  on vaiheen A kosketussuojassa kulkeva virta,  $\bar{I}_{s,b}$  on vaiheen B kosketussuojassa kulkeva virta ja  $\bar{I}_{s,c}$  on vaiheen C kosketussuojassa kulkeva virta. Kun eri kosketussuojien vaihevirratt ovat symmetrisiä, kumoavat ne toisensa maadoituskiskolla eikä nollavirtaa ja täten jännitettä muodostu. Todellisuudessa kuitenkin kaapelipääteelle kulkeutuvat kosketussuojien virrat eivät ole täysin symmetrisiä edes kolmioasennuksessa johtuen ympäristöllisistä vaikutuksista. Lisäksi maadoitusjohtimessa kulkeva virta aiheuttaa maadoituskiskolla muodostuneeseen nollavirtaan lisää epäsymmetrisyyttä ja täten nollavirta on aina olemassa. Tästä syystä maadoituskiskon jännite poikkeaa nollapotentialista. [18, s.38]

### 4.3 Kaapeleiden kuormitettavuus

Tuulipuiston keskijänniteverkossa käytettävät kaapelit mitoitetaan maksimikuormituksen sekä induktiivisen ja kapasitiivisen loistehotuotannon mukaan. Kaapeleiden mitoituksessa otetaan ensisijaisesti huomioon kaapeleiden hinta, kuormitettavuus ja kaapeleissa tapahtuvat tehohäviöt. Vertailemalla näitä parametreja eri kaapeleilla, voidaan keskijänniteverkkoon valita kustannustehokkaimmat kaapelit.

Kaapelien kuormitettavuus kuvastaa kaapelin johtimessa kulkevaa suurinta virrankestokykyä ilman että kaapelissa tapahtuu termisiä vahinkoja. Kuormitettavuuden määrää kaapelin suurin käyttölämpötila sekä kuormituksen korjauskerroin, johon vaikuttaa kaapelin ympäristölliset olosuhteet. SFS-5636 standardissa määritetään XLPE-eristeisille kaapeleille asennusten ja ympäristöllisten vaikutusten korjauskertoimet johtimien kuormituslämpötilan ollessa 65°C [27, s.48]. Kaapelivalmistajat yleisesti ilmoittavat kaapelin kuormitettavuuden johtimen lämpötilan ollessa 65°C, kosketussuojapiirien ollessa suljettuina sekä korjauskertoimella 1,00. Yksijohdinkaapeleiden tapauksessa kuormitettavuus ilmoitetaan usein kolmioasennuksessa, jolla on alhaisempi kuormitettavuus kuin tasoasennuksella. [9] Kaapeleiden valinta ja asennus on toteutettava siten, että niiden suurinta sallittua lämpötilaa ei ylitetä normaaleissa kuormitustilanteissa tai oikosulkutilanteissa [1, s.43].

Suljettu kosketussuojapiiri mahdollistaa indusoituneiden virtojen kulkemisen kaapelin kosketussuojissa, jotka aiheuttavat lämpöhäviöitä. Koska kaapelin kuormitettavuus riippuu kaapelin lämpötilasta, on kosketussuojapiirin suljetulla kytkennällä alentava vaikutus kuormitettavuuteen. Tästä syystä kaapelin kuormitettavuutta voidaan parantaa pienentämällä kosketussuojissa kulkevia virtoja. [19, s.7]

IEC-60287 Standardin mukaan kaapelin kuormitettavuus ilman ympäröivän maan kuivumista voidaan laskea kaavalla (4-2),

$$I_{max} = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0,5 \cdot T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R_{j,AC} T_1 + n R_{j,AC} (1 + \lambda_1) T_2 + n R_{j,AC} (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (4-2)$$

jossa  $I_{max}$  on johtimen suurin sallittu kuormitusvirta,  $\Delta\theta$  on johtimen ja ympäröivän maan lämpötilaero,  $W_d$  on eristeen dielektriset häviöt pituusyksikköä kohden,  $R_{j,AC}$  on johtimen vaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohden,  $T_1$  on johtimen ja kosketussuojan välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden,  $T_2$  on kosketussuojan ja armeerauksen välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden,  $T_3$  on ulkovaipan terminen resistanssi pituusyksikköä kohden,  $T_4$  kaapelin pinnan ja ympäröivän maa-aineksen välinen terminen resistanssi pituusyksikköä kohden,  $n$  on kaapelissa olevien johtimien lukumäärä,  $\lambda_1$  kaapelin kosketussuojan häviöiden suhde kaapelin kokonaishäviöihin ja  $\lambda_2$  on kaapelin armeerauksen häviöiden suhde kaapelin kokonaishäviöihin [29, s.23].

Kaapelin kosketussuojien häviöiden suhde kaapelin kokonaishäviöihin  $\lambda_1$  koostuu kosketussuojassa esiintyvistä pyörrevirtahäviöistä  $\lambda_1''$  ja indusoituneiden virtojen häviöistä  $\lambda_1'$  kaavan (4-5) mukaisesti. Kun kosketussuojaa indusoituvat virrat minimoidaan, pienenee niiden häviökerroin  $\lambda_1'$  ja täten myös kosketussuojien kokonaishäviöt  $\lambda_1$ . Kosketussuojan

kokonaishäviöiden pienentyessä kaapelin kokonaishäviöt pienenevät ja täten kaapelin kuormitettavuus kasvaa.

#### 4.4 Kaapelin tehohäviöt

Kaapelissa tapahtuvat häviöt voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: vaihejohtimessa tapahtuviin häviöihin, eristeen muodostamiin häviöihin ja metallisessa kosketussuojassa tapahtuviin häviöihin. Kuormitetussa tilanteessa kaapelin kosketussuojaan muodostuu mahdollisten maadoitusten välillä kulkevia virtoja, sekä kosketussuojan sisäisiä pyörrevirtoja, mitkä aiheuttavat resistiivisiä lämpöhäviöitä. [28, s.16]

Vaihejohtimen materiaali ja poikkileikkausala vaikuttavat sen resistanssiin ja täten tehohäviöihin. Johtimen poikkipinta-alan kasvattaminen tai materiaalin johtavuuden parantaminen pienentävät sen resistanssia, mikä pienentää johtimessa tapahtuvia tehohäviöitä. Yksittäisen kaapelin johtimen tehohäviöt voidaan laskea kaavalla (4-3),

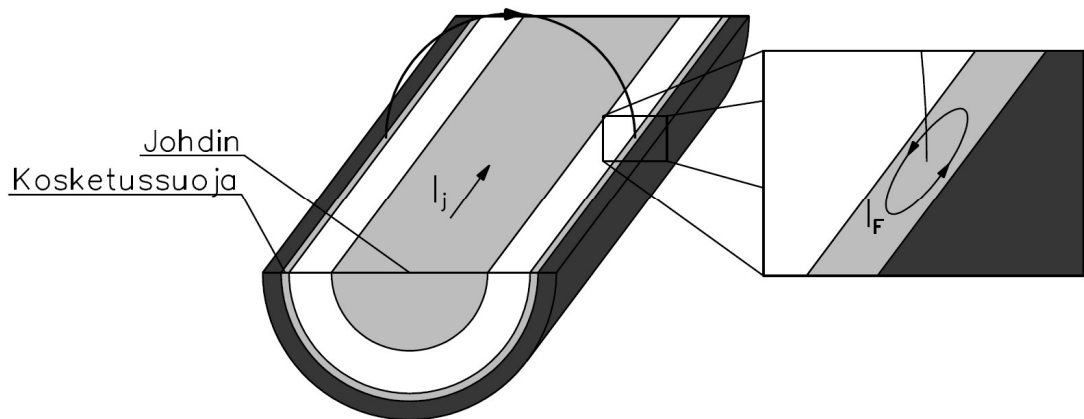
$$P_{jh} = R_{j,AC} I_N^2 \quad (4-3)$$

jossa  $P_{jh}$ , on johtimessa tapahtuvat häviöt pituusyksikköä kohden,  $R_{j,AC}$  on johtimen vaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohden ja  $I_N$  on vaihejohtimessa kulkeva nimellinen virta. Suurin osa johtimessa tapahtuvista häviöistä aiheutuu vaihejohtimessa tapahtuvista lämpöhäviöistä. Johtimen ympärillä olevassa eristemateriaalissa muodostuu dielektrisiä häviöitä, johtuen sen yli olevasta muuttuvasta magneettikentästä. Sähkökentän muutokset aiheuttavat eristeessä molekyylien polarisoitumista, jotka muodostavat lämpöhäviöitä. Kaapelin dielektriset häviöt voidaan laskea kaavalla (4-4),

$$W_d = \omega C \bar{U}^2 \tan \delta \quad (4-4)$$

jossa  $W_d$  on kaapelin dielektriset häviöt pituusyksikköä kohden,  $\omega$  on kulmataajuus,  $C$  on kaapelin kapasitanssi pituusyksikköä kohden,  $\bar{U}$  on vaihejännite ja  $\delta$  on eristeen materiaalin dielektrinen vakio. Dielektriset häviöt riippuvat kaapelin jännitetasosta, joten niiden merkittävyys kasvaa suuremmilla jännitteillä. IEC standardin mukaan ne pitää huomioida XLPE-eristeisillä kaapeleilla, joiden käyttöjännite on suurempi kuin 63,5 kV. [29, s.33]

Kaapelin johtimessa kulkevan virran muodostama magneettikenttä aiheuttaa kaapelin kosketussuojaan pyörrevirtoja potentiaalieron muodostuessa kosketussuojan sisäpinnan ja ulkopinnan välille. [21, s.2] Pyörrevirtojen muodostumista ja kulkua kosketussuojassa on havainnollistettu kuvassa 21.



**Kuva 21: Kosketussuojan pyörrevirtojen hahmotus [18, s.33, muokattu]**

Kaapelin muodostaman magneettikentän vuon tiheys on suurempi kosketussuojan sisäpinnassa kuin ulkopinnassa, jonka vuoksi sisäpintaan indusoituu suurempi jännite kuin ulkopintaan. Täten potentiaaliero muodostaa pyörrevirrat, jotka virtaavat kosketussuojassa kuvan 21 mukaisesti koko kaapelivälillä. Pyörrevirtojen tehohäviöihin vaikuttaa kosketussuojan materiaali ja vaihejohtimessa kulkevan virran suuruus. Molemmista päistä maadoitetussa kosketussuojassa kulkee pyörrevirtojen lisäksi indusoitunut ja kapasitiivinen varausvirta, jotka ovat usein huomattavasti suurempia kuin pyörrevirrat. Tästä syystä pyörrevirrat voidaan usein jättää huomioimatta tehohäviölaskelmissa molemmista päistä maadoitetuilla kosketussuojilla niiden osuuden ollessa minimaalinen kosketussuojan kokonaishäviöistä. [21, s.2]

Kosketussuojassa tapahtuvien häviöiden määrittämisessä voidaan käyttää häviökertoimia, jotka kuvaavat kosketussuojan häviöiden ja johtimessa tapahtuvien häviöiden suhdetta. Kosketussuojan kokonaishäviökerroin voidaan määrittää kaavalla (4-5),

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (4-5)$$

jossa  $\lambda_1$  kosketussuojan kokonaishäviökerroin,  $\lambda'_1$  on kosketussuojassa kiertävien virtojen häviökerroin ja  $\lambda''_1$  on kosketussuojan pyörrevirtojen häviökerroin. [29, s.33] Koska pyörrevirtojen häviöt voidaan jättää huomioimatta, voidaan kosketussuojan kokonaishäviöiden olettaa muodostuvan vain siinä kiertävien virtojen aiheuttamina häviöinä. Häviökertoimet ovat asennustavalle, sekä kaapeli- ja verkkotyypille ominaisia arvoja. Tästä syystä häviökertoimien laskenta on toteutettu erikseen kolmio- ja tasoasennukselle aluluvussa 4.4.1.

#### 4.4.1 Kosketussuojan virran häviökertoimen laskenta

Kolmioon asennettujen molemmista päistä maadoitetun kosketussuojan virtojen häviökerroin voidaan laskea kaavalla (4-6),

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R_{j,AC}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_s}\right)^2} \quad (4-6)$$

Jossa  $\lambda'_1$  on kosketussuojassa kiertävien virtojen häviökerroin,  $R_s$  on kosketussuojan resistanssi pituusyksikköä kohden,  $R_{j,AC}$  on kaapelin johtimen vaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohden ja  $X_s$  on kaapelin kosketussuojan reaktanssi kolmioasennuksessa pituusyksikköä kohden [29, s.35]. Tasoasennettujen transponoimattomien kaapeleiden kosketussuojien virtojen häviökertoimet voidaan laskea reunakaapeleille kaavalla (4-10) ja keskimmaiselle kaapelille käyttämällä kaavaa (4-11). Häviökertoimien laskemisessa tarvittavat parametrit voidaan määrittellä kaavoilla (4-7)..(4-9).

$$X_m = 2\omega \ln(2) \cdot 10^{-7} \quad (4-7)$$

$$A = X_s + X_m \quad (4-8)$$

$$B = X_s - \frac{X_m}{3} \quad (4-9)$$

$$\lambda'_{11} = \lambda'_{12} = \frac{R_s}{R_{j,AC}} \cdot \left[ \frac{0,75A^2}{R_s^2 + A^2} + \frac{0,25B^2}{R_s^2 + B^2} + \frac{2R_sABX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + A^2)(R_s^2 + B^2)} \right] \quad (4-10)$$

$$\lambda'_{1k} = \frac{R_s}{R_{j,AC}} \cdot \frac{B^2}{R_s^2 + B^2} \quad (4-11)$$

joissa  $R_s$  on kosketussuojan resistanssi pituusyksikköä kohden,  $R_{j,AC}$  on kaapelin johtimen vaihtovirtaresistanssi pituusyksikköä kohden,  $X_m$  on keskinäisinduktanssi kaapelin kosketussuojan ja muiden kaapeleiden johtimien välillä pituusyksikköä kohden,  $\omega$  on verkon kulmataajuus,  $A$  ja  $B$  ovat kaavoissa (4-10) ja (4-11) käytettyjä kertoimia  $\lambda'_{11}$  ja  $\lambda'_{12}$  ovat asennuksessa reunimmaisten kaapeleiden kosketussuojien virtojen häviökertoimet ja  $\lambda'_{1k}$  on asennuksessa keskimmaisen kaapelin kosketussuojan virran häviökerroin. [29, s.37]

Jos kosketussuoja on vaihevuoroteltu ja kaapelivälin eri sektiot ovat eri pituisia, indusoituu kosketussuojaan suurempi virta. Tämä voidaan ottaa huomioon laskemalla virran häviökertoimelle korjauskerroin kaavalla (4-12),

$$F_c = \left[ \frac{p + q - 2}{p + q + 1} \right]^2 \quad (4-12)$$



jossa  $F_c$  on korjauskerroin kosketussuojassa kulkevan virran häviökertoimelle ja  $p$  ja  $q$  ovat kahden pisimmän sektorin pituuden kertoimet verrattuna lyhyimpään sektioon. [29, s.45]

## 4.5 Kaapeliverkon vikatila

Kaapeliverkon vikatilassa yksi tai useampi vaihejohdin pääsevät kosketuksiin toistensa tai maapotentiaalin kanssa. Vikatilojen kestoon vaikuttaa vian tyyppi ja verkkoon asetettujen suojausten toimintanopeudet. Vikojen aikana johtimissa kulkee tavallista suuremmat virrat, joiden vaikutuksesta kosketussuojaan ja eristeisiin kohdistuvat rasitukset kasvavat. Yleisimmät viat tuulipuistojen keskijänniteverkoissa ovat maasulkuviat, mutta järjestelmä on suunniteltava kestäväksi myös kolmivaiheiset oikosulut, joissa vaihejohtimien virrat ovat suurimmillaan.

Järjestelmän vian aikana tapahtuu alussa oleva transienttinen ylijännite, jota seuraa kosketussuojaan indusoitunut verkon taajuinen ylijännite johtimissa kulkevasta vikavirrasta. Tyypillisesti verkon taajuiset ylijännitteet eivät ole riittävän suuria aiheuttamaan kaapelin ulkovaipan eristeen pettämisen, mutta ne ovat tärkeä mitoituskriteeri kosketussuojassa oleville ylijännitesuojille. [12, s.44] Suurjännitekaapeleilla on yleisesti oletettua, että vikatilanteissa kosketussuojii indusoituneet jännitteet eivät saisi ylittää 5 kV, jotta ulkovaipan jännitekestoisuus ei ylitä [30, s.63] [23, s.3]. AHXAMK-W keskijännitekaapeleiden valmistaja ei ole määritellyt ulkovaipan eristeen jännitekestoisuutta, minkä vuoksi kyseisten kaapelityyppien kosketussuojii sallittavien indusoiduvien jännitteiden arvoa ei voida määrittää. Poikkipinta-alaltaan eri kokoisten AHXAMK-W kaapeleiden ulkovaipan pakkaus myös vaihtelee, minkä vuoksi ulkovaipan jännitekestoisuus ei välttämättä ole sama kaapelityyppien välillä. [9]

### 4.5.1 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheisessa oikosulussa kolmen erivaiheisen johtimen potentiaalit pääsevät kosketuksiin, jolloin johtimissa kulkevat virrat kasvavat moninkertaisiksi. Vian aikana johtimien vikavirrat indusoivat kosketussuojii joko suuren virran tai jännitteen riippuen kosketussuojien asennustavasta. Asennustavoissa, joissa sähkömotorinen voima muodostaa kosketussuojaan jännitteen, kuten yksipistekytkenässä voidaan kolmivaiheisessa oikosulussa indusoitunutta jännitettä arvioida pituusyksikköä kohden kaavalla (3-1), kun vaihevirtojen  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$  ja  $\bar{I}_C$  arvojen tilalla käytetään johtimissa kulkevia vikavirtoja. Sähkömotorisen voiman näkyessä kosketussuojassa virtana, kuten molemmista päistä maadoitetussa kosketussuojassa voidaan kolmivaiheisen oikosulun aikaista indusoitunutta

virtaa arvioida kaavalla (3-2), jossa johtimen virran  $\bar{I}_n$  arvona käytetään johtimessa kulkevan vikavirran arvoa. [12, s.45]

### 4.5.2 Yksivaiheinen maasulku

Yksivaiheisessa maasulussa yksi vaihejohtimista pääsee kosketuksiin maaperän tai maadoitetun osan kanssa joko suoraan tai vikaresistanssin kautta. Tuulipuistoissa käytetyt keskijänniteverkot ovat lähes aina maasta erotettuja, minkä takia maasulkuvirta kulkee vikapaikasta takaisin vaihejohtimiin kaapeleiden kapasitanssien kautta. Kosketussuojan jännitteiden ja virtojen laskeminen maasulkutilanteissa on vaativaa, jonka takia niiden laskemiseen suositellaan simulaatiota. Maasulkutilanteissa kosketussuojassa esiintyvät jännitteet ovat yleisesti kuitenkin alhaisemmat, kuin mitä kolmivaiheisessa oikosulkutilanteessa, jonka takia maasulkutilanteet voidaan jättää huomioimatta komponenttien mitoituksissa. [12, s.45]

## 4.6 Ylijännitesuojat

Verkon transienttitilanteiden aikana kaapeleiden kosketussuojissa voi esiintyä normaalia suurempia jännitteitä. Transienttijännitteet ovat verkossa esiintyviä lyhytkestoisia jännitepiikkejä, joita yleisimmin aiheuttavat salamaniskut ja eri kytkentätilanteet. Ylijännitesuojan tarkoitus on turvata suojattu piiri transienttijännitteiden aiheuttamilta vahingoilta asentamalla se jännitteisen komponentin ja maapotentiaalin välille. Jännitteet transienttitilanteissa ovat usein tarpeeksi suuria aiheuttamaan ongelmia eristyksissä, ja täten ylijännitesuojauksella pystytään vähentämään verkossa tapahtuvia vikoja. [12, s.24]

Tavallisimmin ylijännitesuojana käytetään metallioksidivaristoria, jonka toimintaperiaate perustuu sen epälineaariseen resistanssiin, joka tarkoittaa resistanssin riippuvuutta sen yli olevasta jännitteestä. Alhaisilla jännitteillä suojan resistanssi on suuri, jolloin se toimii kuten avoin piiri ja virta ei kulje sen läpi. Kun suojalle mitoitettu jännitetaso ylittyy, sen resistanssi pienenee nopeasti ja se purkaa transientin energian maapotentiaaliin. [31, s.19] Metallioksidivaristoreilla on kuitenkin rajallinen kyky purkaa transienttien energiaa purkauksessa syntyvän lämpenemisen takia. Ylijännitesuojia ei ole täten suunniteltu johdamaan pidempikestoisia vikavirtoja lävitseen aiheuttamatta vahinkoa itse suojaan. [12, s.24] Ylijännitesuojia suositellaan asennettavaksi suljettuun tilaan, jotta jännitteiset kosketussuojat eivät olisi ihmisen kosketeltavissa ja koska suojan termisen tuhoutumisen riski on olemassa. [12, s.29]

Kosketussuojiiin asennetaan ylijännitesuojia paikoissa, joissa kosketussuojaan muodos-

tuvan jännitteen voidaan olettaa vahingoittavan kaapelin eristekerroksia. Tyypillisesti ylijännitesuojia käytetään avoimen piirin kosketussuojissa sekä vaihevuorotelluissa kosketussuojissa, johtuen kyseisten asennustapojen ominaisuuksista muodostaa korkeampia jännitteitä kosketussuojiiin. Molemmista päästä maadoitetussa kosketussuojassa jännitteet harvoin nousevat niin suuriksi, että ylijännitesuojaa tarvittaisiin. [25]

Vaihevuorotellussa kosketussuojat yhdistetään kytkinkoteloon yhdistyskaapeleilla, jotka täytyy mitoittaa siten, että ne kestävät kaapeliverkossa esiintyvät vikavirrat. Yhdistyskaapeleiden pituus suositellaan minimoitavaksi, jotta yhdistyskaapeleiden resistanssien aiheuttama jännitteen muutos kosketussuojan ja ylijännitesuojan välillä ei kasva liian suureksi ja kytkinkopeille mitoitettujen ylijännitesuojien suojaustaso pysyy halutulla tasolla. [12, s.29]

#### 4.6.1 Ylijännitesuojan mitoittaminen

Ylijännitesuojan sähköisten ominaisuuksien mitoitus pitää tehdä huolellisesti, jotta vältytään kaapelin eristeiden vahingoittumisilta ja ylijännitesuojien hajoamisilta. Ylijännitesuojan mitoittamisessa kaapelin ulkoisen vaipan jännitekestoisuus on määrittävä tekijä, sillä korkeat kosketussuojan jännitteet aiheuttavat sen ennen aikaista ikääntymistä ja vahingoittumista. Kaapelin kosketussuojassa käytettävän ylijännitesuojan mitoittamisessa voidaan käyttää seuraavia ohjeistuksia:

- i. Lasketaan ylijännitesuojan yli oleva jatkuva jännite kaapeleiden normaalikuormituksilla. Ylijännitesuoja ei saa purkaa normaalikuormitustilanteessa kosketussuojaan indusoituneita jatkuvia jännitteitä maadoituksiin.
- ii. Lasketaan ylijännitesuojan yli olevat jännitteet kaapeliverkon vikatilanteissa. Kosketussuojissa esiintyvät jännitteet vikatilanteiden aikana eivät saa ylittää ylijännitesuojan jännitetasoa, eli suoja ei saa johtaa vikavirtaa lävitseen vikojen aikana.
- iii. Valitaan ylijännitesuoja, jolla on riittävä energianpurkauskyky transienttijännitteiden purkamiseksi.

Ylijännitesuojan tarkoituksena on siis purkaa verkossa esiintyvien transienttilanteiden aiheuttamia lyhytaikaisia jännitepiikkejä kosketussuojasta maadoituksiin. Ylijännitesuojan suojaustason tulisi olla mahdollisimman alhainen, koska ulkoisen vaipan jännitekestoisuus saattaa heiketä sen ikääntyessä. Jos kosketussuoja on yksipistemaadoitettu, tulee sen maadoituskytkennät tehdä huolellisesti, koska muuten kosketussuojaan indusoituneet jännitteet kasvavat merkittävästi. Tällöin suojan termisen hajoamisen riski on

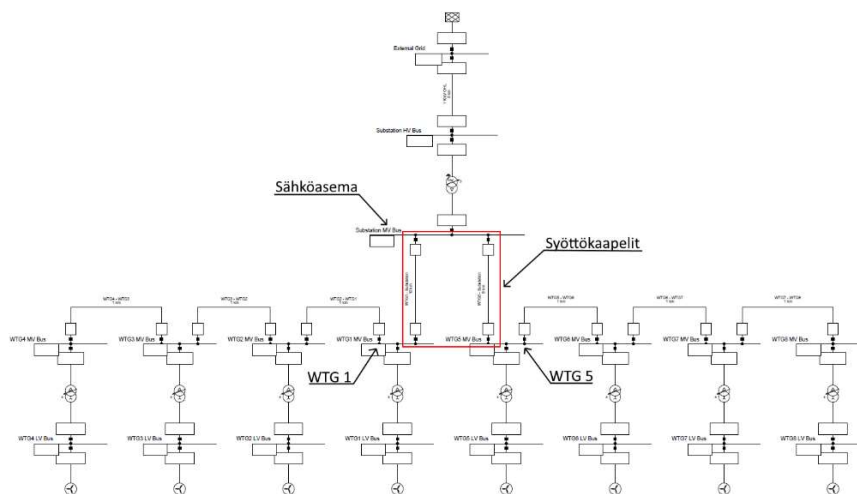
suuri, koska ylijännitesuoja saattaa normaalikuormitustilanteessakin johtaa virtaa lävitseen. [32] [33] Ylijännitesuojan valinnassa tulee ottaa myös huomioon suojan jäännösjännite, jonka tulisi olla pienempi kuin kosketussuojassa sallittava jännite [33].

## 5. KAAPELIVERKON SIMULOINTI

Kaapeliverkossa esiintyvien suureiden tarkempaan laskentaan voidaan käyttää simulointiohjelmia. Käyttäen DlgSILENT Powerfactory 2021 Service Pack 2 simulointiohjelmaa tuulipuiston kaapeleiden kosketussuojien jännitteet ja virrat voidaan laskea normaaliuormituksessa sekä eri vikatilanteissa. Myös kosketussuojissa kiertävien virtojen vaikutusta kaapelin kokonaistehohäviöihin voidaan tarkastella. Simuloinneista saatuja tuloksia voidaan verrata laskennallisesti saatuihin tuloksiin ja tehdä johtopäätös laskentatapojen tarkkuudesta. Simulaatiomallinnus on toteutettu kuvitteellisella tuulipuistolla, jossa on kahdeksan 5,7 MW tuulivoimalaa, jotka yhdistyvät tuulipuiston sähköasemalle kahdella syöttökaapeliryhmällä. Simulaatioissa lasketaan molempien syöttökaapelien kosketussuojien virrat ja jännitteet eri asennustavoilla.

### 5.1 Mallinnuksen parametrit

Simulointimallissa on käytetty verkon taajuutena 50 Hz ja mallissa käytetyt jännitetasot ovat 720 V tuulivoimaloilla, 33 kV keskijänniteverkossa ja 118 kV siirtoverkossa. Sähköasemalta lähtevät syöttökaapelit voimaloille WTG 1 ja WTG 5 ovat AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeleita, joiden rinnalla kulkee myös 50 mm<sup>2</sup> kuparinen maadoitusjohdin. Koska syöttökaapelit ovat tuulipuiston pisimmät kaapelit ja niissä kulkee suurin virta, on niiden kosketussuojien jännitteet ja virrat valittu tarkastelun kohteeksi. Kuvassa 22 on esitetty simuloinnissa käytetty tuulipuiston malli, johon on merkattu tarkasteltavat syöttökaapelit.



**Kuva 22: DlgSILENT Powerfactory simulointimalli kuvitteellisesta tuulipuistosta**

Syöttökaapeleiden pituudet ovat 9 km (Sähköasema – WTG 5) ja 10 km (Sähköasema – WTG 1). Tuulipuiston topologia on toteutettu siten, että syöttökaapelit kulkevat rinnakkain 9 km matkan WTG 5 voimalalle asti. Tällä matkalla kaapeleilla on käytetty kolmioasennusta ja kaapeliryhmien etäisyys toisistaan on 25 cm. Kuparinen maadoitusjohdin on sijoitettu ojassa AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeleiden väliin. Kaapelit ovat asennettu 0,7 m syvyyteen ja virran korjauskertoimena on käytetty arvoa 0,68. Kuvassa 23 on esitetty kaapeleiden ojitusten poikkileikkauskuva.



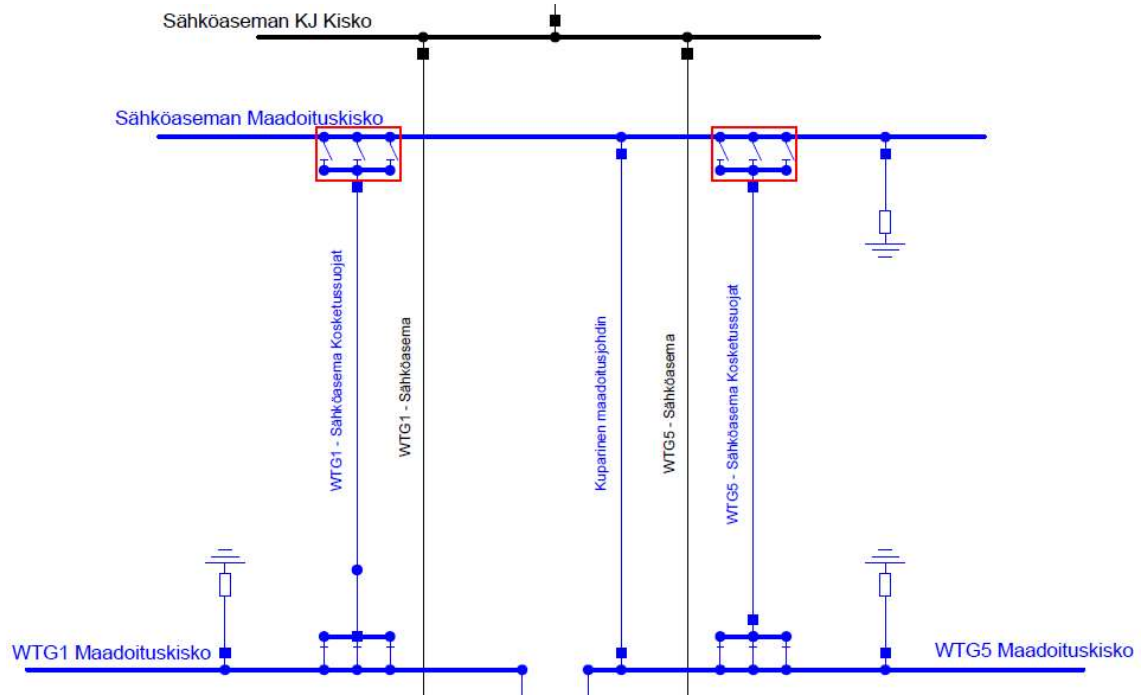
**Kuva 23: Kaapeleiden ojitusten poikkileikkaus simulointiohjelmassa**

Tuulipuiston paikallisiksi maadoitusresistansseiksi on valittu 5 Ω sähköasemalla sekä 20 Ω kaikilla tuulivoimaloilla. Simuloinnissa on oletettu, että kaikki tuulipuistossa esiintyvät kytkentäresistanssit ovat 0 Ω.

## 5.2 Tuulipuiston normaalikuormitustilanteen simulointi

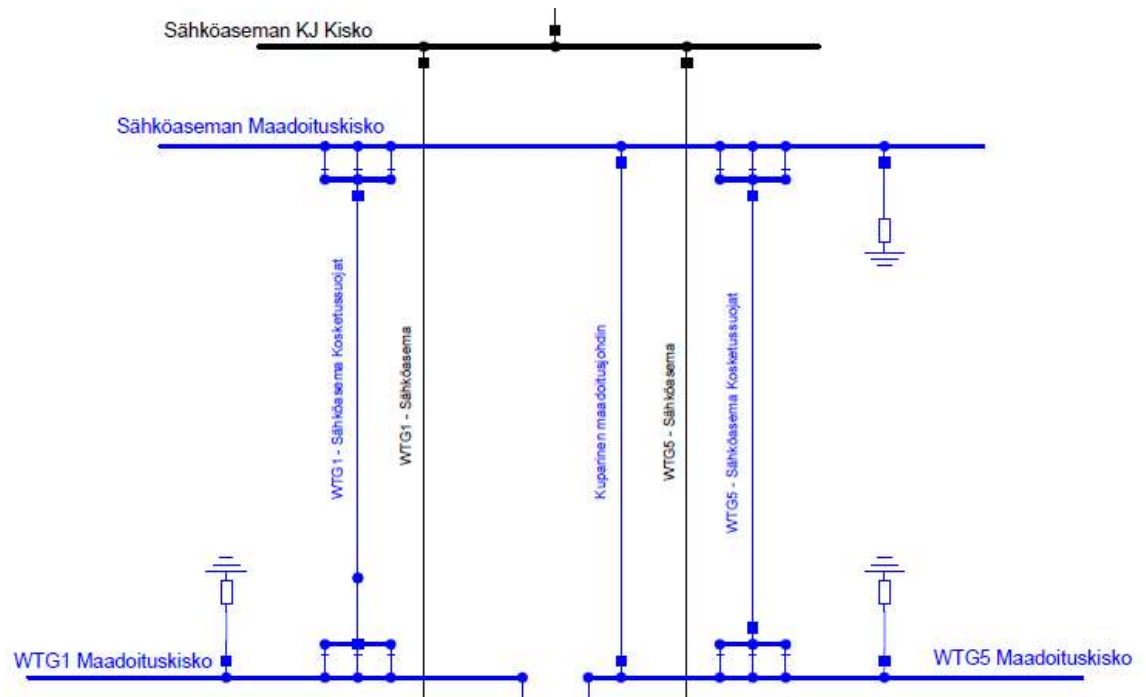
Tuulipuiston kosketussuojissa esiintyvien virtojen ja jännitteiden suuruus riippuu kaapelien johtimissa kulkevista virroista. Täten kosketussuojan virrat ja jännitteet ovat huipussaan, kun tuulipuistossa tuotetaan suurinta pätötehoa, sekä tuotetaan tai kulutetaan loistehoa. Simulointitarkastelut tehdään tilanteessa, jossa tuulipuisto tuottaa liittymispisteeseen tehokertoimen 0,95, joka vaaditaan voimalaitokselta Fingridin Voimalaitosten järjestelmätekniikan vaatimusten mukaan [34, s.76]. Molemmat syöttökaapelit ovat neljän 5,7 MW tuulivoimalan kuormittamia, jolloin johtimissa kulkee 405 A virta. Simulaatioissa käytetään mustaa väriä 33 kV jännitetasosta ja sinistä väriä maadoitetuista komponenteista.

Avoimen kosketussuojapiirin mallinnuksessa molempien syöttökaapeleiden kosketussuojat erotetaan maasta ja toisistaan sähköasemalla. Kuvassa 24 on esitetty toteutus-tapa, jolla kosketussuojat ovat erotettu sähköaseman maadoituksista simulointiohjelmassa.



**Kuva 24: Avoimen kosketussuojapiirin toteutus simulointiohjelmassa**

Suljetun kosketussuojapiirin kytkennässä kosketussuojat ovat maadoitettu sähköasemalla sekä WTG 1:llä ja WTG 5:llä. Suljetun kosketussuojapiirin kytkennän toteutus on esitetty kuvassa 25.



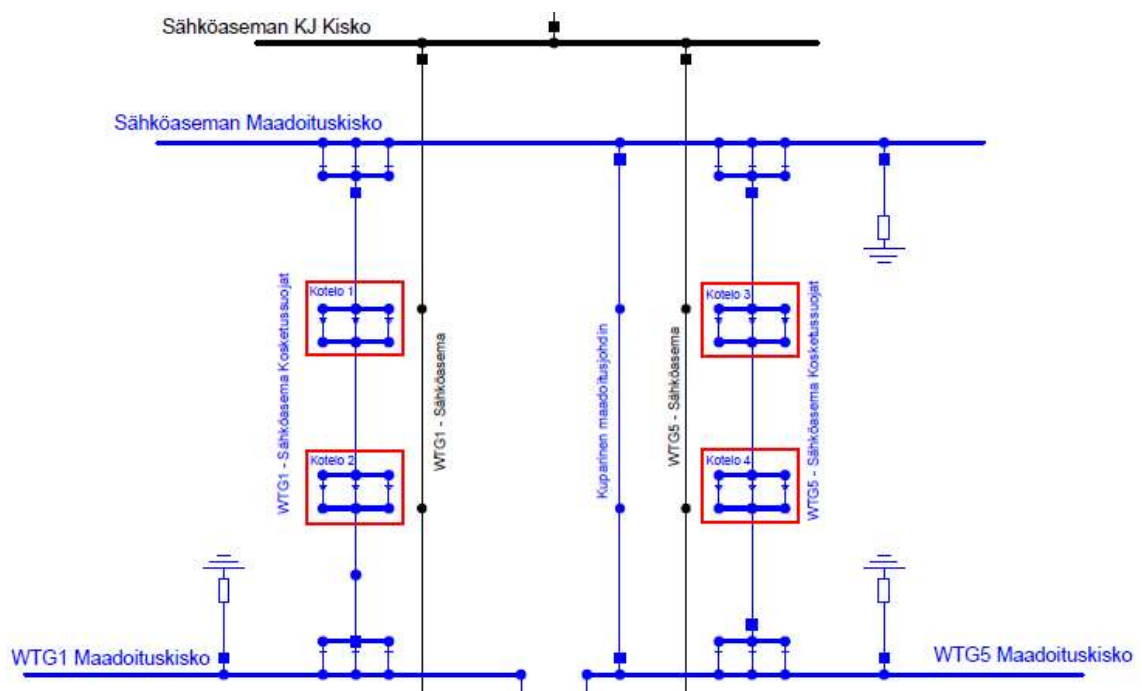
**Kuva 25: Suljetun kosketussuojapiirin toteutus simulointiohjelmassa**

Kosketussuojien vaihevuorottelun simuloinnissa molempien kaapeliryhmien kosketus-

suojat on vaihevuoroteltu. Kyt Kentäkotelot on aseteltu kaapelivälille siten, että kaapelien sek tiot ovat pituuksiltaan:

- i. Sähköasema – WTG 1
  - Sekti o 1: 3 km
  - Sekti o 2: 3 km
  - Sekti o 3: 4 km
- ii. Sähköasema – WTG 5
  - Sekti o 1: 3 km
  - Sekti o 2: 3 km
  - Sekti o 3: 3 km

Vaihevuorottelukotelot ovat siis 3 km ja 6 km etäisyydellä sähköasemasta. Kaapelisek tiot ovat siis symmetriset Sähköasema – WTG 5 välillä ja hieman epäsymmetriset Sähköasema – WTG 1 välillä sek tion 3 ollessa 1 km pitempi. Vaihevuorottelun toteutus simulo intiohjelmassa on esitetty kuvassa 26.



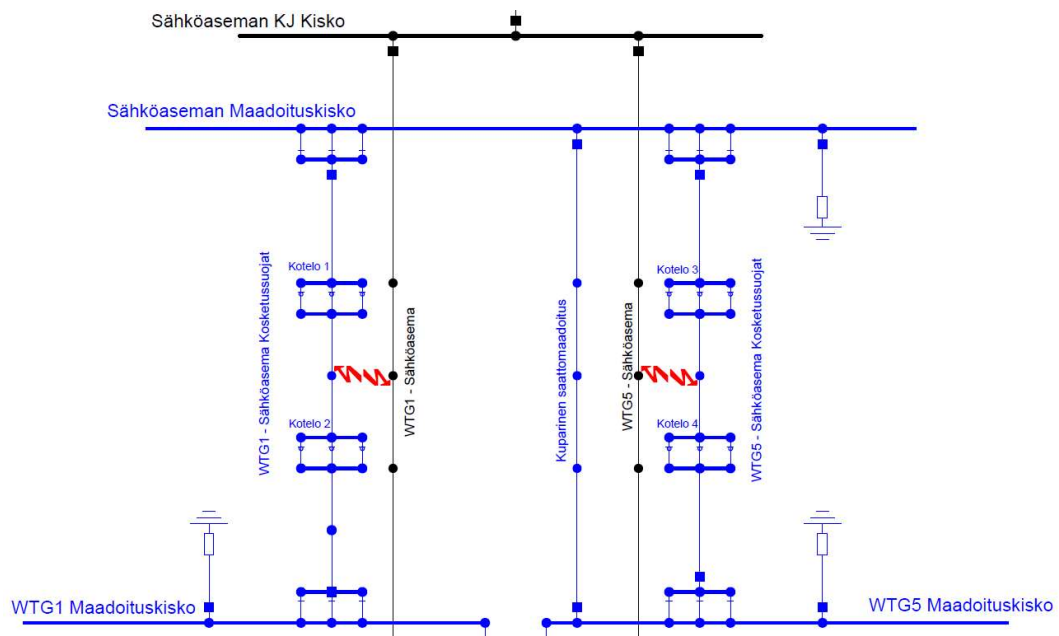
**Kuva 26: Kosketussuojien vaihevuorottelun toteutus simulointiohjelmassa**

Vaihevuorottelun simulaatioissa kytkentätilanteet on toteutettu siten, että vain toinen kosketussuojapiiri on vaihevuoroteltu kerrallaan, jotta yksittäisen kaapelivälin vaihevuorottelun vaikutusta voidaan tarkastella.



### 5.3 Tuulipuiston vikatilanteiden simulointi

Tuulipuiston vikatilanteet on simuloitu käyttäen kolmivaiheista oikosulkua ja yksivaiheista maasulkua eri pisteissä. Vikatilanteet on simuloitu neljässä eri pisteessä, joissa vikojen voidaan olettaa indusoivan syöttökaapeliin suurimmat jännitteet ja virrat. Kolmivaiheisille oikosuluille valitut vikapisteeet ovat WTG 1 ja WTG 5 keskijännitekojeistot ja yksivaiheisille maasulkutilanteille on valittu syöttökaapeliin keskipisteet. Kolmivaiheiset oikosulut toteutetaan vikaresistanssilla  $0 \Omega$  ja yksivaiheinen maasulku toteutetaan vaiheen A johtimen ja kosketussuojan kosketuksella käyttäen vikaresistanssina  $0 \Omega$ . Kuvassa 27 on havainnollistettu maasulkutilanteiden toteutus simulointiohjelmassa.



**Kuva 27: Kosketussuojien ja johtimien välisten yksivaiheisten maasulkutilanteiden simulointi**

Kolmivaiheisten oikosulkujen simuloinnissa WTG 1 keskijännitekojeistolla oleva kolmivaiheinen vika aiheuttaa 6,1 kA virran Sähköasema – WTG 1 kaapeliin johtimiin. Kolmivaiheisen vian ollessa WTG 5 keskijännitekojeistolla muodostuu Sähköasema – WTG 5 johtimiin 6,3 kA virta. Oikosulkuvirrat koostuvat voimaloiden sekä ulkoisen verkon muodostamista vikavirroista. Simuloidun tuulipuiston keskijänniteverkko on maasta erotettu ja kaapeleiden kapasitanssien määrittämä maasulkuvirta on 137 A.

### 5.4 Tulosten analysointi

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty simuloidut ja laskennalliset arvot kosketussuojien jännit-

teille ja virroille normaalissa kuormitustilanteessa sekä vikatilanteissa käyttäen eri asennustapoja. Laskennat on tehty simulointimallissa käytetyille Sähköasema – WTG 1 ja Sähköasema – WTG 5 kaapeleille käyttäen aikaisemmin annettuja parametreja. Laskennassa on kuitenkin oletettu tuulipuiston maadoitukset ideaaleiksi eli maadoitusresistansseja ei ole otettu huomioon.

**Taulukko 1: Simulointi- ja laskentatulokset normaalikuormituksessa eri kosketussuojien asennustavoilla**

Kaapelireitti	Kosketussuojien asennustapa	Simuloidut huippuarvot		Laskennalliset huippuarvot	
		Jännite (V)	Virta (A)	Jännite (V)	Virta (A)
Sähköasema - WTG1, AHXAMK-W 3x(1x630), 10 km	Avoin kytkentä	169,6	20,1	203,2	20,1
	Suljettu kytkentä	24,9	45,4	-	43,2
	Vaihevuorottelu	81,6	9,7	81,3	6,6
Sähköasema - WTG5, AHXAMK-W 3x(1x630), 9 km	Avoin kytkentä	150,5	18,1	182,9	18,1
	Suljettu kytkentä	16,4	45,0	-	42,2
	Vaihevuorottelu	67,5	5,8	61,0	4,9

**Taulukko 2: Simulointi- ja laskentatulokset vikatilanteissa eri kosketussuojien asennustavoilla**

Kaapelireitti	Vian tyyppi ja vikapaikka	Kosketussuojien asennustapa	Simuloidut huippuarvot		Laskennalliset huippuarvot	
			Jännite (V)	Virta (A)	Jännite (V)	Virta (A)
Sähköasema - WTG1, AHXAMK-W 3x(1x630), 10 km	3-vaiheinen oikosulku WTG 1 keskijännitekojeistolla	Avoin kytkentä	3307.9	5.2	3099.4	-
		Suljettu kytkentä	230.7	514.6	-	505.6
		Vaihevuorottelu	1258.8	68.2	1239.8	-
	1-vaiheinen maasulku keskellä WTG 1 - Sähköasema kaapelia	Avoin kytkentä	440.3	140.1	-	-
		Suljettu kytkentä	243.8	91.8	-	-
		Vaihevuorottelu	257.9	80.4	-	-
Sähköasema - WTG5, AHXAMK-W 3x(1x630), 9 km	3-vaiheinen oikosulku WTG 5 keskijännitekojeistolla	Avoin kytkentä	3123.7	4.6	2881.0	-
		Suljettu kytkentä	225.5	561.9	-	522.2
		Vaihevuorottelu	1089.2	49.7	960.3	-
	1-vaiheinen maasulku keskellä WTG 5 - Sähköasema kaapelia	Avoin kytkentä	356.1	139.4	-	-
		Suljettu kytkentä	206.2	94.6	-	-
		Vaihevuorottelu	215.2	76.7	-	-

Taulukoihin 1 ja 2 koottujen jännitteiden ja virtojen arvot on määritelty kosketussuojan pisteissä, joissa kunkin suureen suurin arvo saavutetaan tietyllä kosketussuojan asennustavalla. Esimerkiksi avoimen kosketussuojapiirin kytkennässä suurin kosketussuojassa esiintyvä jännite on kaapelin maadoittamattomassa päässä, kun taas vaihevuorottelussa suurimmat jännitteet esiintyvät tyypillisesti vaihevuorottelun kytkentäkoteloidella. Kaikkiin tilanteisiin ei ole mielekästä käyttää laskennallista menetelmää, johtuen laskennan monimutkaisuudesta, kuten esimerkiksi maasulkutilanteet, jotka vaativat simulointia kosketussuojien jännitteiden ja virtojen käytännölliseen määrittämiseen.

Taulukoiden 1 ja 2 laskennallisissa tuloksissa on käytetty luvuissa 2 ja 3 määriteltyjä kaavoja. Taulukon 1 tulosten perusteella työssä esitetyillä kaavoilla voidaan laskea kosketussuojan jännitteitä ja virtoja melko suurella tarkkuudella, kun verkko on normaalitilassa. Suurimmat erot syntyivät avoimen kytkentätavan jännitteen laskemisessa, jossa kosketussuojan jännitteet olivat molemmissa tapauksissa noin 20% suuremmat maadoittamattomassa päässä, kun käytettiin laskennallista metodia verrattuna simuloituihin tuloksiin. Ero tulosten välillä aiheutuu todennäköisesti siitä, että laskennallisessa menetelmässä kapasitiivisen varausvirran vaikutusta ei huomioida. Myös Sähköasema – WTG 1 välin vaihevuorottelussa virtojen laskennallinen arvo eroaa prosentuaalisesti paljon simuloitusta arvosta, mutta molemmissa tapauksissa virrat ovat niin pieniä, että muuttaman ampeerinkin ero tuloksissa aiheuttaa suuren prosentuaalisen muutoksen.

Kuten aikaisemmissa luvuissa on esitetty, kosketussuojan jännitteet ja virrat eroavat huomattavasti eri asennustavoilla. Suurimmat jännitteet esiintyvät avoimesti kytketyssä kosketussuojassa, johtuen heikommasta maadoituksesta. Suurimmat avoimen piirin virrat ovat kosketussuojien maadoituspisteellä, johon kaapelin kapasitiivinen varausvirta kumuloituu. Kaapelin ollessa suhteellisen pitkä, on kumuloitunut varausvirta huomattavan suuri. Suljetussa kosketussuojapiirin kytkennässä kosketussuojan jännitteet ovat todella alhaiset koko kaapelivälillä ja ne ovat huipussaan keskellä kaapelia. Kuten avoimen kosketussuojapiirin kytkennässä, suljetulla kosketussuojapiirillä suurimmat virrat esiintyvät voimaloiden päässä, johtuen indusoituneen ja varausvirran summautumisesta. Kosketussuojan vaihevuorottelulla saavutetaan tulosten mukaan alhaisimmat virrat, jotka ovat lähes yhtä suuret koko kaapelivälillä, mutta jännitteet ovat suuremmat kuin suljetun kosketussuojapiirin kytkennällä. Kosketussuojan jännitteen huippuarvot taas esiintyvät vaihevuorottelun kytkentäkoteloidella. Simuloituissa tuloksissa virrat ovat pienentyneet Sähköasema – WTG 1 ja Sähköasema – WTG 5 kaapeliväleillä vaihevuorottelun ansiosta 87% ja 78% verrattuna suljetun piirin kytkentään.

Suomessa säännöksissä ei ole määritelty suurinta kosketussuojassa esiintyvää jännitettä normaalikuormituksen aikana. IEEE standardin 575-2014 mukaan suurimmat sallitut jännitteet kaapeleiden kosketussuojissa normaalikuormituksen aikana vaihtelevat eri maiden välillä. Jännitteille on asetettu rajoiksi esimerkiksi Yhdysvalloissa 65 V – 90 V, Isossa-Britanniassa 65 V ja Norjassa 60 V. Kuitenkin joissain maissa jännitteelle asetetut rajat ovat noin 150 V – 200 V. Standardissa ei kuitenkaan määritellä kyseisille kosketussuojan jännitearvoille verkon jännitetasoa. [12, s.36]

Kaapelin kosketussuojan virrankestoisuudelle on määritelty kaapelivalmistajan datalehdessä vain 1 sekunnin kestävän vikavirran kestoisuus [9]. Huomioitavaa virrankestoisuudessa on se, että kaikkien kosketussuojapiirissä olevien komponenttien tulee kestää siinä kulkevat virrat. Varsinkin kaapelijatkoksien komponentit ovat alttiita vikaantumiselle, mikä rajoittaa sallittua virran suuruutta kosketussuojassa. Madridissa järjestetyssä CIREN 2019 konferenssissa esitettiin tutkimus, jossa keskijännitekaapeleiden kosketussuojien liitoksia kaapelijatkoksissa tutkittiin käyttämällä eri kiinniketyyppejä. Tutkimuksessa kosketussuojaan muodostettiin 50 A virta, joka kuvasti normaalissa kuormitustilanteessa kosketussuojassa kulkevaa virtaa, sekä tietyin aikaväleihin kaapeliin kohdistettiin 9 kA vikavirta. Virtaa jaksotettiin siten, että kaapelia kuormitettiin 5 tuntia, jonka jälkeen kaapelin annettiin jäähtyä kuormittamattomana 3 tuntia. Tutkimuksessa mitattiin jatkoksissa olevien kosketussuojien kiinnikkeiden kytkentäresistanssit ennen testiä ja 3 vuoden testauksen jälkeen. Tutkimuksen tuloksena suuressa osassa kiinniketyypeistä kytkentäresistanssi kasvoi moninkertaiseksi testauksen tuloksena. Kosketussuojan kiinnikkeen laadulla on siis suuri vaikutus liitoksen elinikään varsinkin, kun kosketussuojassa kulkevat virrat ovat suuria. [34, s.4]

Taulukon 2 tulosten perusteella kolmivaiheisessa oikosulussa esiintyviä jännitteitä ja virtoja voidaan approksimoida käyttäen kaavoja (3-1) ja (3-2). Laskennoista voidaan nähdä, että tulokset ovat suuntaa antavia ja erot simuloituihin tuloksiin vaihtelevat. Kolmivaiheisen oikosulun aikana jännitteiden ja virtojen huippuarvot ovat useassa tilanteessa korkeammat kuin johtimen ja kosketussuojan välisessä yksivaiheisessa maasuolussa.

Avoimella ja vaihevuorotellulla kosketussuojapiirillä kolmivaiheisen oikosulun indusoima sähkömotorinen voima kasvattaa kosketussuojan jännitteet todella korkeaksi verrattuna suljettuun kosketussuojan asennustapaan. Jännitteiden arvot ovat suurimmillaan avoimen kosketussuojapiirin maadoittamattomassa päässä ja vaihevuorotellulla kosketussuojalla kytkinkopeilla, mitkä ovat yhden ylijännitesuojien mitoitusarvoista kriteereistä. Suljetun kosketussuojapiirin vikatilanteen tuloksista saadaan kosketussuojassa

kulkeva suurin virta, jota voidaan verrata kaapelivalmistajan ja mahdollisesti kaapelijatkosten valmistajan antamiin virtarajoituksiin.

Simulaation syöttökaapeleiden asennustapana olisi suositeltavaa käyttää kaapeleiden vaihevuorottelua aikaisempien rajoitusten perusteella. Kaapelivälit ovat huomattavan pitkiä, jonka takia kaapeleissa on useita kaapelijatkoskohtia, joissa voi aiheutua vikoja. Molempien kaapeleiden kosketussuojissa kulkee nimelliskuormituksessa noin 45 A suljetulla kosketussuojapiirin asennustavalla. Virran arvo on tarpeeksi suuri aiheuttamaan ongelmia jatkoksissa, minkä vuoksi suljetun kytkennän asennustapa ei ole suositeltavaa. Vaihevuorotelluilla kosketussuojilla virrat tippuvat alle 10 A:iin, jonka voi luokitella turvaliseksi jatkosten osalta. Vaikka kosketussuojien jännitteet ylittävät joidenkin maiden jänniterajoitukset kosketussuojassa sallittavasta seisovasta jännitteestä, on ne kuitenkin esimerkiksi Yhdysvaltojen rajoitusten 65 V – 90 V sisällä. Jos jännitetaso halutaan pitää alle Norjan käyttämän suositustason 60 V, voidaan vaihevuorottelu tehdä molemmilla kaapeliväleillä kahdesti, jolloin niissä esiintyvät jännitteet ja virrat tippuvat entisestään. Tämä toisaalta tuo lisäkustannuksia komponenttien ja asennusten yhteydessä.

Kosketussuojien asennustapojen vaikutus kaapelin kuormitettavuuteen voidaan laskea käyttäen alaluvun 4.3 kaavaa (4-2). Tarkastelussa on käytetty samoja ympäristöllisiä muuttujia, kuin kaapelivalmistajan ilmoittamassa kaapelin datalehdessä [9]. Kun tarkastelun kohteeksi sähköasemalta WTG 5:lle kulkeva 9 km pituinen AHXAMK-W 3x(1x630) mm<sup>2</sup> kaapeli, saadaan sen kuormitettavuudeksi suljetulla kosketussuojapiirillä 642 A, joka on lähellä kaapelivalmistajan antamaa arvoa 635 A [9]. Laskemalla kuormitettavuus avoimelle tai ideaaliselle vaihevuorotellulle kosketussuojapiirille saadaan kaapelin kuormitettavuudeksi 660 A, joka vastaa 18 A suurempaa kuormitettavuutta verrattuna suljettuun kosketussuojapiiriin.

Kaapelin johtimessa ja kosketussuojassa tapahtuvat tehohäviöt voidaan laskea käyttämällä alaluvun 4.4 kaavoja. Kun lasketaan Sähköasema – WTG 1 kaapelin tehohäviöt suljetulla kosketussuojapiirillä 407 A kuormituksella, saadaan kokonaishäviöiksi 285 kW. Avoimen piirin kytkennällä tai vaihevuorottelulla kaapelivälin kokonaishäviöiksi saadaan 263 kW. Laskennallisia metodeja käyttäen suljetulla kosketussuojapiirillä kaapelilla tehohäviöt nousevat 8,3%, mikä on lähellä simulointiohjelmalla saatua tulosta 8,8%. Täten tuulipuiston häviöitä voidaan alentaa käyttämällä syöttökaapeleiden kosketussuojien asennustapana vaihevuorottelua tai avointa kytkentää.

Laskennallisten ja simuloitujen tulosten perusteella työssä esitetyn kuvitteellisen tuulipuiston molemmille syöttökaapeleille suositeltaisiin kosketussuojien asennustavaksi niiden vaihevuorottelua. Avoimella kosketussuojapiirin kytkennällä maadoittamattoman

pään jännitteet nousevat normaalikuormituksessa useiden maiden suosittelemien jännitetasojen yläpuolelle, sekä maadoitetussa päässä kosketussuojissa esiintyvät varausvirrat ovat kohtuullisen suuret. Suljetun kosketussuojapiirin asennustavalla jännitteet pysyvät suositusten alapuolella, mutta indusoituneet virrat ovat lähes 50 A, minkä suuruisilla virroilla on todettu olevan vaikutus kaapelijatkosten liitosten toimintakykyyn. Vaihevuorotelluilla kosketussuojilla sen sijaan jännitteet pysyvät normaalikuormituksessa suositeltujen jänniteikkunoiden sisäpuolella, sekä kosketussuojassa kulkevat kokonaisvirrat ovat alle 10 A koko kaapelivälillä. Vaihevuorottelun kytkentäkoteloiden ylijännitesuojien tulee myös mitoittaa vikatilanteista saatujen tulosten mukaan. Vaihevuorottelu mahdollistaa parhaimmat todennäköisyydet kaapeleiden keskeytyksettömään toimintaan, jolloin voimaloiden tuottama teho voidaan luotettavasti siirtää verkkoon.

## 6. YHTEENVETO

Tuulipuistojen kapasiteetit ovat olleet nopeassa kasvussa viime vuosikymmenenä. Voimaloiden lukumäärän kasvu puistoissa sekä teknisesti tehokkaammat voimalat kykenevät tuottamaan suuremman määrän energiaa, mistä on aiheutunut ongelmia puistojen keskijännitekaapeleissa. Tuulipuistojen suuren energiantuotannon myötä puistojen keskijännitekaapeleissa kulkee suuremmat virrat kuin aikaisemmin. Kaapeleissa on todettu ongelmia raskaasti kuormitetuilla ja pitkillä kaapeleilla kosketussuojassa esiintyvien virtojen ja jännitteiden vuoksi. Kaapeleiden ulkovaipan sisäpinnalla on metallinen kosketussuoja, joka kokee kaapelin johtimessa kulkevan virran muodostaman muuttuvan magneettikentän. Muuttuva magneettikenttä indusoi kosketussuojaan sähkömotorisen voiman, jonka voimakkuus riippuu johtimessa kulkevan virran suuruudesta. Kuormitetulla kaapelilla indusoitunut sähkömotorinen voima muodostaa kosketussuojaan joko seisovan jännitteen tai kiertävän virran riippuen kosketussuojan asennustavoista. Muiden vaihekaapelien muodostamien muuttuvien magneettikenttien indusoimiin sähkömotorisiin voimiin voidaan vaikuttaa käyttämällä kaapeleilla eri asennusmuotoja ojituksessa. Kolmioasennuksessa kuhunkin kosketussuojaan indusoituvat sähkömotoriset voimat ovat alhaisimmillaan vaihesiirron aiheuttaman voimien kumoutumisen ansiosta.

Kaapelin kosketussuoja tarkoituksena on toimia alhaisen resistanssin väylänä kaapelin varausvirroille ja vikavirroille. Tyypillisesti kosketussuojat ovat maadoitettuja molemmista päistä, jolloin kosketussuojapiiri on suljettu, koska se on halpa ja yksinkertainen tapa asentaa kosketussuojat sekä silloin niiden jännitteet pysyvät mahdollisimman alhaisina. Kaapelin ollessa kuormitettu, indusoi sähkömotorinen voima kosketussuojaan virran, sen päästessä kiertämään maadoitusten kautta. Kosketussuojassa kulkeva virta on ongelmallinen, sillä sen on todettu aiheuttavan vikaantumisia kaapelijatkoksissa ja kaapelipäätteillä. Pitkillä matkoilla keskijännitekaapeleita tarvitsee liittää toisiinsa käyttäen kaapelijatkoksia, joissa yhdistyvien kaapeleiden johtimet ja kosketussuojat kytketään toisiinsa. Kosketussuojassa kulkeva virta lämmittää kaapelijatkoksessa tehtyä kosketussuojien liitosta kiinnikkeen läpi kulkevan virran ja liitosresistanssien suuruuksien mukaisesti. Kaapelin johtimesta kosketussuojaan kulkeutuva varausvirta summautuu kosketussuojassa kiertävän indusoituneen virran kanssa, mikä tarkoittaa sitä, että tehon syötöpäässä kosketussuojassa kulkee suuremmat virrat. Jatkoksen liiallinen lämpeneminen saattaa aiheuttaa jatkoksessa liitosten ja eristeiden heikkenemistä tai vikaantumista. Koska kosketussuojissa kulkevat virrat ovat suurempia voimaloiden päässä, on niiden

läheisyydessä olevat kaapelijatkokset riskialttiimpia virtojen aiheuttamille vikaantumisille. Kaapeleiden vikaantuminen aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia korjaustyönä sekä menetettynä tuotantona, minkä takia optimaalisen kosketussuojan asennustavan määrittäminen suunnitteluvaiheessa on tärkeää vikaantumisien ehkäisemiseksi.

Kosketussuojilla käytetään tyypillisesti suljettua kytkentää, mutta tilanteissa, joissa virtaa halutaan rajoittaa, voidaan kosketussuojille käyttää avointa kytkentää tai kosketussuojien vaihevuorottelua. Avoimessa kosketussuojapiirin kytkennässä vain toinen pää kosketussuojasta maadoitetaan ja toinen pää jää maadoittamattomaksi. Tässä asennustavassa kosketussuojaan indusoitunut sähkömotorinen voima ei muodosta kosketussuojaan virtaa, koska kosketussuojapiiri on avoin. Maadoittamattomaan päähän indusoituu seisova jännite, jonka suuruuteen vaikuttaa kaapelivälin pituus ja kaapelin johtimessa kulkevan virran suuruus. Maadoittamaton pää tyypillisesti suojataan ylijännitesuojalla, jotta transienttitilanteissa esiintyvät jännitteet eivät aiheuttaisi eristeongelmia.

Kaapelivälin kosketussuojat voidaan vaihevuorotella käyttämällä siihen tarkoitettuja jakotusjatkoksia ja kosketussuojien vuorotteluun tarkoitettua kytkentäkoteloa. Vaihevuorottelussa kosketussuojapiirissä kosketussuojaan indusoituneet virrat kumoavat toisensa, jolloin virtojen suuruus on koko kaapelivälillä alhainen. Kytkentäkotelolle muodostuu kuitenkin transienttitilanteissa suurempi jännite kuin suljetun kosketussuojapiirin asennustavassa, minkä takia kytkentäkotelolla kosketussuojille asennetaan usein ylijännitesuojat. Pitkillä kaapeliväleillä kaapelijatkoksissa tapahtuvien vikojen todennäköisyys kasvaa jatkosten lukumäärän kasvaessa, minkä vuoksi raskaasti kuormitetuilla pitkillä kaapeleilla kosketussuojien asennustavaksi suositellaan vaihevuorottelua. Vaihevuorottelun kustannukset eivät myöskään muutu kaapelivälin pituuden kasvaessa, minkä vuoksi sen kustannustehokkuus kasvaa kaapeleiden pituuksien kasvaessa.

Kaapelin kuormitettavuus määräytyy kaapelin suurimman käyttölämpötilan mukaan. Kuormitettavuuteen vaikuttaa ympäristölliset tekijät, kuten asennussyvyys, rinnakkaisten kaapeleiden lukumäärä ja maa-aineksen lämpötila, mutta myös kosketussuojien asennustapa. Kosketussuojassa kulkeva virta lämmittää kaapelia mikä alentaa sen kuormitettavuutta. Tämän vuoksi avoimen kosketussuojapiirin ja vaihevuorottelun kosketussuojan kaapeleilla on suurempi kuormitettavuus kuin suljetun kosketussuojapiirin kaapelilla. Kosketussuojassa kulkeva virta aiheuttaa myös ylimääräisiä tehohäviöitä kaapelissa, minkä vuoksi kosketussuojassa kulkevan virran minimointi vähentää myös kaapeliverkossa tapahtuvia häviökustannuksia.

Työssä luotiin kuvitteellinen tuulipuiston simulointimalli DigSILENT Powerfactory simulointiohjelmalla, jolla simuloitiin kahta sähköasemalta lähtevää syöttökaapelia ja niiden



kosketussuojia. Kosketussuojien jännitteet ja virrat simuloitiin normaalikuormitustilanteessa ja vikatilanteissa, joita verrattiin laskennallisten metodien tuloksiin. Johtopäätöksenä laskennalliset metodit olivat suhteellisen tarkkoja, ja niitä voidaan käyttää kosketussuojien jännitteiden ja virtojen suuruuden arvioimiseen. Työssä esitettyjen jännite- ja virtarajoitusten mukaan simulointimallin kosketussuojien asennustavaksi suositeltaisiin kosketussuojien vaihevuorottelua, jotta kaapeleiden toimintakyky voidaan varmistaa.

## LÄHTEET

- [1] European Commission, “2020 Climate & Energy package”, (Viitattu 20.5.2021), Saatavilla: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en)
- [2] Suomen Tuulivoimayhdistys, ”Uusiutuvan energian tukeminen”, (Viitattu 20.5.2021), Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/uusiutuvan-energian-tukeminen>
- [3] Fingrid, ”Fingrid debt investor presentation 2016”, 2016
- [4] Suomen Tuulivoimayhdistys, ”Tuulivoima Suomessa”, (Viitattu 20.5.2021), Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>
- [5] T. Bragatto, A. Cerretti, L. D’Orazio, F. M. Gatta, A. Geri, & M. Maccioni, (2019). “Thermal Effects of Ground Faults on MV Joints and Cables”, *Energies*, 12(18), 3496. <https://doi.org/10.3390/en12183496>
- [6] X. Chen, K. Wu, Y. Cheng, L. Yan, “Sheath Circulating Current Calculations and Measurements of Underground Power Cables”, in *Jicable 2007*, 2007
- [7] L. Kehl, R. Meier, D. Quaggia, “Cross-bonding for MV Cable Systems: Advantages and Impact on Accessories Design”, in 3-6.2019 Madrid, in 25<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, Paper N° 37.
- [8] IEEE, “Std. 422-2012 IEEE Guide for the Design of Cable Raceway Systems for Electric Generating Facilities”, 2012
- [9] Reka Cables, “Technical Specification AHXAMK-W 18/30 (36) kV”, 2018
- [10] J. H. A. Monteiro, E. C. M. Costa, A. J. G. Pinto, S. Kurokawa, O. M. O. Gatous, & J. Pissolato, (2014). Simplified skin-effect formulation for power transmission lines. *IET Science, Measurement & Technology*, 8(2), 47–53. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0072>
- [11] X. Yiyang, D. Finney, L. Bin, “Charging Current in Long Lines and High-Voltage Cables – Protection Application Considerations”, in 37<sup>th</sup> Annual Western Protective Relaying Conference, October, 2012.
- [12] IEEE, “Std. 575-2014 IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV”, 2014
- [13] IEEE, “Std. 525-2016 IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations”, 2017
- [14] E. Kalogrianitis, K. Damianaki, C. Christodoulou, T. Papadopoulos, I. Gonos, “Case study of the implementation of cross-bonding to underground long medium voltage cables in wind parks”, in 3-6.2019 Madrid, in 25<sup>th</sup> International Conference

on Electricity Distribution, Paper N° 2091.

- [15] L. Yan, F. Peng, X. Chen, Y. Cheng, X. Li, "Study on Sheath Circulating Current of Cross-linked Power Cables", in 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, November 9-13, 2008
- [16] R. R. Beer, & R. A. Nelson, (1978). "Practice and Accepted Rules of Shielding Power Cables", *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-14(4), 352–356. <https://doi.org/10.1109/tia.1978.4503550>
- [17] K. Lowczowski, Z. Nadolny, & B. Olejnik, (2019). "Analysis of Cable Screen Currents for Diagnostics Purposes", *Energies*, 12(7), 1348. <https://doi.org/10.3390/en12071348>
- [18] R. G. Arrabé, Doctoral Thesis, "New methods and protection systems for AC and DC power networks", 2018
- [19] O. E. Gouda, & A. A. E. Farag, (2011). "Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2(1), 7–16. <https://doi.org/10.11591/ijece.v2i1.115>
- [20] M. Shaban, M. A. Salam, S. P. Ang, W. Voon, "Calculation of Sheath Voltage of Underground Cables Using Various Configurations"
- [21] J. Riba Ruiz, & X. Alabern Morera, (2006). "Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(04), 26–30. <https://doi.org/10.24084/repqj04.217>
- [22] SFS 6001, Suurjännitesähköasennukset, Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2018, 155 s.
- [23] S. Czapp, & K. Dobrzynski, (2020). "Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study", *Applied Sciences*, 10(19), 6706. <https://doi.org/10.3390/app10196706>
- [24] M. Shaban, M. A. Salam, S. P. Ang, M. Norfauzi, F. Wen, & W. Voon, (2015). "Calculation of induced sheath voltage for transposed and untransposed cable conductors", *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/tencon.2015.7372833>
- [25] INMR, "Sheath Voltage Limiters Protect HV Power Cables", 2019, (Viitattu 19.2.2021), Saatavilla: <https://www.inmr.com/sheath-voltage-limiters-protect-power-cables/>
- [26] A. Ametani, N. Nagaoka, Y. Baba, T. Ohno, K. Yamabuki, (17. Nov 2016), "Transients on Cable Systems", *Power System Transients, Theory and Applications*, CRC Press, Accessed on: 27 Apr 2021, Saatavilla: <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/9781315366791-4>

- [27] SFS 5653, "Pex-eristeiset 10, 20 ja 30 kV Al- ja Cu-voimakaapelit. Rakenne ja testaus", Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki, 2017, 85 s.
- [28] J. Andruszkiewicz, J. Lorenc, K. Łowczowski, A. Weychan, & J. Zawodniak, (2019). "Energy losses' reduction in metallic screens of MV cable power lines and busbar bridges composed of single-core cables", *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 22(1), 15–25. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.1.3>
- [29] IEC 60287-1-1, Electric cables – Calculation of Current Rating – Part 1-1 Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. IEC, Geneva 2006.
- [30] S. Czapp, K. Dobrzynski, J. Klucznik, Z. Lubosny, "Impact of Configuration of Earth Continuity Conductor on Induced Sheath Voltages in Power Cables", in The International Conference on Information and Digital Technologies 2016, 2016, pp. 59-63.
- [31] Energy Networks Association, "Engineering Recommendation C55", Issue 5, 2014
- [32] INMR, "Sheath Voltage Limiter Failure from Improper Bonding of Cable Sheaths", (Viitattu 19.2.2021), Saatavilla: <https://www.inmr.com/sheath-voltage-limiter-failure-from-improper-bonding-of-cable-sheaths/>
- [33] Insulect, "SVL Sheath Voltage Limiters 1,5kV to 9kV", 2019, Saatavilla: <https://static1.squarespace.com/static/57243cb920c647f685d9c42c/t/5c808f5b6e9a7f10d44a86b5/1551929189545/Insulect+Switchgear+-+SVL+V2019-1.pdf>
- [34] Fingrid, "Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018", 2018, Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarmasahkonsiirto/vjv2018.pdf>
- [35] K. U. Bentkowski, K. D. Haim, "Screen Connection for MV Cables with Laminated Aluminium Screen", in 3-6.2019 Madrid, in 25<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, Paper N° 409