



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **Sähkösiirtojohdon reaktanssin pienentäminen**

## **Reducing the reactance of transmission line**

Pauli Partinen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Pauli Partinen  
**Sähkösiirtojohdon reaktanssin pienentäminen**

2017

Kandidaatintyö.  
26 sivua, 13 kuvaa, 14 taulukkoa, 1 liite  
Tarkastaja: professori Jarmo Partanen

Tässä kandidaatintyössä etsitään ratkaisua ongelmaan, joka syntyy, kun alkuperäisellä johtokadulla on kaksi voimajohtoa ja kolmas voimajohto kiertää pidemmän matkan. Mikäli toinen alkuperäisen johtokadun voimajohdoista vioittuu, joudutaan asemavälillä siirtämään tehoa vain yhdellä alkuperäisellä johtokadulla olevalla johdolla sekä kiertävällä voimajohdolla. Koska kiertävän voimajohdon impedanssi on suurempi, kuormittuu alkuperäisellä johtokadulla oleva johto enemmän. Tällöin on mahdollista, että kyseinen voimajohto ylikuormittuu. Suurjännitejohdon impedanssi koostuu resistanssista ja reaktanssista, mutta reaktanssi on suurjännitejohdoilla huomattavasti suurempi.

Työn tavoitteena oli selvittää, miten voimajohdon reaktanssia pystytään pienentämään johdin- ja osajohdinasettelulla sekä laskea erilaisten asetteluiden reaktansseja. Työssä selvitettiin myös vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien välillä ja vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien ja ukkosjohtimien välillä. Työhön kuului myös karkea kustannusanalyysi, jossa etsittiin suuntaa-antavat kustannusarviot erityyppisten voimajohtojen rakentamiselle. Työ tehtiin Fingrid Oyj:lle.

Työtä varten tehtiin Excel-laskentataulukko, jolla pystytään laskemaan erilaisten johdin- ja osajohdinasetteluiden reaktansseja. Työssä koottiin erilaisten asetteluiden reaktanssit ja arvioitua kustannukset taulukkoon, jota voi käyttää verkkosuunnittelun apuna. Lasketut reaktanssit verifioitiin PSCAD-ohjelmistolla.

Tutkimuksessa havaittiin, että voimajohdon reaktanssia pystytään pienentämään suurentamalla osajohtimien etäisyyttä tai pienentämällä vaiheväliä. Yksittäisellä voimajohdolla osajohdinvälin suurentaminen ei pienennä voimajohdon reaktanssia merkittävästi. Vaiheväliä voidaan pienentää vaihtamalla eristinketjun tyyppiä, mutta se ei alenna reaktanssia merkittävästi. Voimajohdon toteuttaminen delta-asettelulla pienentää reaktanssia merkittävästi vain, jos lisätään kolmas osajohdin. Kolmen osajohtimen delta-rakenteisen johdon rakennuskustannukset ovat kuitenkin korkeat. Reaktanssia voidaan pienentää huomattavasti, jos johto toteutetaan kaksoisjohtona, jonka vaiheet on kytketty rinnan.

Työn jatkotutkimus- ja kehityskohteita ovat selvitettyjen johdingeometrioiden vaikutukset koronahäviöihin, sähkökenttiin ja vuorottelun toteuttamiseen. Lisäksi voimajohtorakenteiden kustannusanalyysiä tulee tarkentaa ja jatkotutkimuksissa tulee selvittää käytännön toteutustapoja matalareaktanssiselle voimajohdolle.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Pauli Partinen

### **Reducing the reactance of transmission line**

2017

Bachelor's Thesis.

26 pages, 13 pictures, 14 tables, 1 appendix

Examiner: professor Jarmo Partanen

This thesis seeks to find a solution to a problem which occurs when two transmission lines are on the original right-of-way and a third goes a longer distance. If one of the lines in the original right-of-way is damaged, power will only go through the remaining line in the original right-of-way and the longer line. Because the longer line has greater impedance the line in the original right-of-way will take more load. In this case it is possible that the line in the original right-of-way will overload. Impedance in high voltage transmission lines consists of resistance and reactance, but reactance is much higher.

The goal of this bachelor's thesis was to find out how to reduce the reactance of a transmission line with conductor and sub-conductor positioning and to calculate the reactances of different layouts. The minimum distances between the phase conductors and between the phase and earthing conductors were also researched. The thesis includes rough cost analysis which finds directional costs of building transmission lines with different layouts. The thesis was made for Fingrid Oyj.

For this thesis, an Excel spreadsheet was made for calculating the reactances of different conductor and sub-conductor layouts. The reactances and estimated costs with different layouts are compiled into a table which can be used in designing transmission line routes. Calculated reactances were verified with PSCAD software.

The study found that the reactance of the transmission line can be reduced by enlarging the distance between sub-conductors or by reducing the spacing between phase conductors. Enlarging the sub-conductor spacing does not significantly reduce the reactance of the transmission line. The phase conductor spacing can be reduced by changing the type of insulation strings, but it does not significantly reduce reactance. Transmission line can be made with a delta-layout but it reduces reactance significantly only if a third sub-conductor is added. However, the construction costs of a three sub-conductor delta-layout are expensive. Reactance can be significantly reduced if the conductor is made by a double circuit line where phases are coupled in parallel.

The future research and development targets are different layout's effects to the corona discharges, electric fields and phase transposition. Cost analysis also needs to be refined and further studies should clarify practical implementation methods for a low-reactance transmission line.

# SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Voimajohdon reaktanssi .....	8
2.1	Yksittäisen johdon induktanssi .....	8
2.2	Kaksoisjohdon induktanssi .....	9
2.3	Ukkosjohtimien vaikutus reaktanssiin .....	11
3.	Kuormien epätasainen jakautuminen rinnakkaisilla voimajohdoilla .....	12
4.	Vaihejohtimien vähimmäisetäisyydet .....	12
4.1	Vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien välillä .....	12
4.2	Vähimmäisetäisyydet vaihejohtimen ja maadoitetun osan välillä .....	14
5.	Voimajohdon reaktanssin minimointi .....	15
5.1	2-Duck ja 3-Duck johdot .....	16
5.2	Osajohdinvälin suurentaminen .....	16
5.3	Kaksoisjohto.....	17
5.4	Delta-rakenne .....	21
5.4.1	Epäsymmetrinen delta-rakenne .....	22
5.5	Tulosten verifiointi .....	23
5.6	Karkea kustannusanalyysi.....	23
6.	Yhteenveto .....	25
	Lähteet.....	26

Liitteet

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

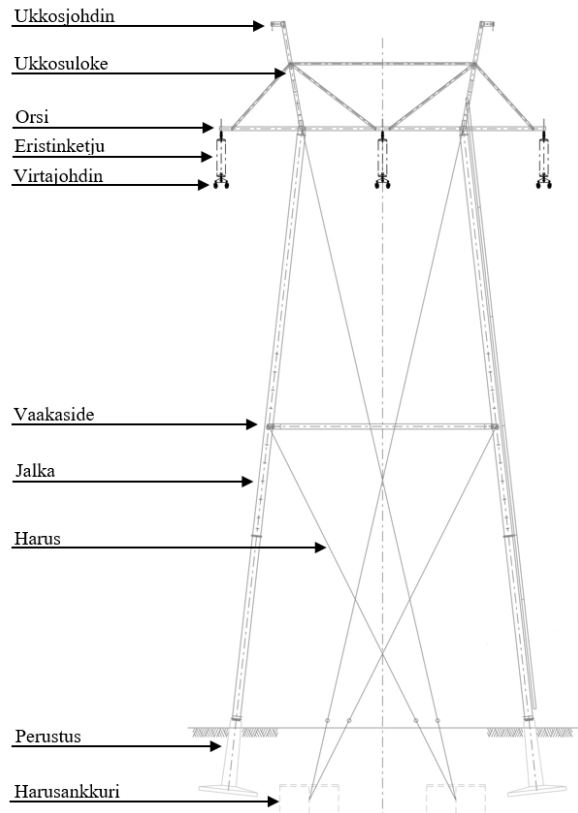
<i>a</i>	vaiheväli
<i>c</i>	vähimmäisetäisyys
<i>D</i>	etäisyys
<i>e</i>	eristinketjun pituus
<i>f</i>	taajuus
<i>h</i>	riippuma
<i>I</i>	virta
<i>k</i>	kerroin
<i>l</i>	induktanssi
<i>n</i>	lukumäärä
<i>r</i>	säde
<i>x</i>	reaktanssi
<i>Z</i>	impedanssi

## Alaindeksit

ekv	sisäisen magneettivuon huomioiva
el	vaiheen ja maadoitetun osan välinen
eq	equivalent, ekvivalenttinen
i	johdin
kok	kokonais-
pp	vaiheiden välinen
s	kaksoisjohdon vaihejohtimien geometrinen keskiarvo

## 1. JOHDANTO

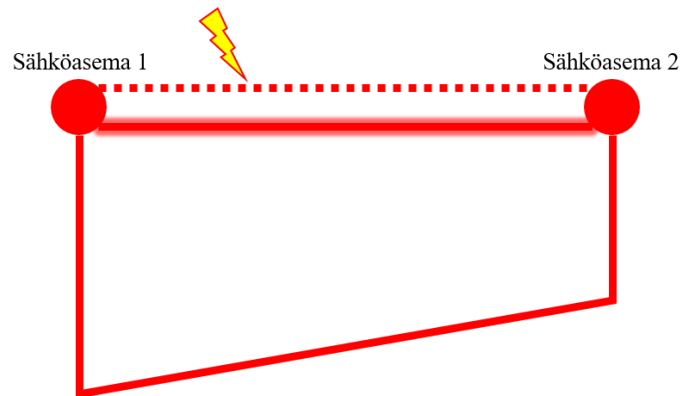
Voimajohtojen tehtävä on siirtää sähkötehoa. Voimajohdoilla tarkoitetaan 110 kV, 220 kV ja 400 kV nimellisjännitteellä toimivia sähkönsiirtojohtoja. Voimajohdon kuormitettavuus määrittelee sen tehonsiirtokapasiteetin. Kuvassa 1.1 on esitetty harustettu portaalipylväs perusosineen.



Kuva 1.1 Harustettu portaalipylväs perusosineen. (Fingrid 2017a)

Mikäli voimajohdon kapasiteettia pitää suurentaa, tulee rakentaa rinnan uusi voimajohto. Jos uutta voimajohtoa ei voi sijoittaa samalle johtokadulle, uusi voimajohto kiertää pidemmän matkan. Näin ollen uuden voimajohdon impedanssi on suurempi kuin alkuperäisen voimajohdon. Tämä aiheuttaa voimajohtojen epätasaisen kuormittumisen, sillä rinnakkaiset johdot kuormittuvat niiden impedanssien suhteessa.

Ongelma syntyy, kun alkuperäisellä johtokadulla on kaksi voimajohtoa ja kolmas voimajohto kiertää pidemmän matkan. Mikäli toinen alkuperäisen johtokadun voimajohdoista vioittuu, joudutaan asemavälillä siirtämään tehoa vain yhdellä alkuperäisellä johtokadulla olevalla johdolla sekä kiertävällä voimajohdolla. Koska kiertävän voimajohdon impedanssi on suurempi kuin alkuperäisellä johtokadulla olevan johdon, kuormittuu alkuperäisellä johtokadulla oleva johto enemmän. Tällöin on mahdollista, että kyseinen voimajohto ylikuormittuu. Tilanne on havainnollistettu kuvassa 1.2.



Kuva 1.2 Vika kahden sähköaseman välillä, mikä voi aiheuttaa ylikuormitustilanteen.

Tilannetta, jossa yhden komponentin vikaantuminen aiheuttaa haitan järjestelmän turvallisuudelle, ei saa pohjoismaisten yhteisten verkkosääntöjen mukaan syntyä (Nordel 2007). Lyhyellä johdolla, jonka pituus on alle 80 km, kuormitettavuutta rajoittaa yleensä johtimen lämpeneminen ja siitä aiheutuva riippuman kasvu. 80 km – 320 km pitkän johdon kuormitettavuutta rajoittaa yleensä jännitteenalenema (Kundur 1994). Mikäli kiertävän voimajohdon impedanssi olisi lähempänä alkuperäisellä johtokadulla olevan voimajohdon impedanssia, kuormittuisivat voimajohdot vikatapauksessa tasaisesti eikä ylikuormitustilannetta tapahtuisi.

Voimajohdon impedanssi koostuu resistanssista ja reaktanssista. Suurjännitejohdoilla reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin resistanssi ja vaikuttaa siten paljon johdon impedanssiin. Resistanssiin pystytään vaikuttamaan vain johtimen ominaisuuksia tai poikkipinta-alaa muuttamalla. Reaktanssi on induktiivista ja se aiheutuu itseinduktanssista ja keskinäisinduktanssista. Induktanssiin pystytään vaikuttamaan johtimien ominaisuuksien lisäksi johtimien ja osajohtimien asetteluilla ja sarjakondensaattorilla. Sarjakondensaattoria ei ole kustannustehokasta rakentaa lyhyille voimajohtolinjoille. Lisäksi sarjakondensaattori voi aiheuttaa arvaamattomia resonansseja ja vaikeuttaa voimajohtoliityntöjen tekemistä (Fingrid 2017a). Työssä tutkitaan mahdollisuutta pienentää 110 kV voimajohdon reaktanssia johtimien ja osajohtimien asetteluilla. (Elovaara & Haarla 2011a)

Työn tutkimuskysymys on: *Millä tavoin voidaan vaikuttaa sähkönsiirtojohdon reaktanssiin?* Työssä lasketaan vaihtoehtoisia matalaimpedanssisia johdinasetteluja. Laskentatulokset verifioidaan PSCAD-ohjelmistolla, jolla saa laskettua yksittäisten voimajohtojen reaktansseja. Työssä selvitetään karkealla tasolla uusien voimajohtotyyppien kustannukset. Voimajohtojen koronahäviöitä, magneettikenttiä ja geometrian vaikutusta vaihejohtimien vuorottelun tiheyteen ei huomioida tässä työssä. Voimajohdon vaiheiden oletetaan olevan symmetrisesti vuorotellut.

Työn teoriaosassa käsitellään voimajohtojen reaktanssilaskuja ja standardeja. Empiriaosassa etsitään keinoja reaktanssin pienentämiseksi, lasketaan ja mallinnetaan vaihtoehtoisia matalareaktanssisia voimajohtorakenteita sekä tehdään karkea kustannusanalyysi. Liitteessä 1 on laskettuja reaktanssin arvoja ja rakennuskustannuksia erilaisille johdin- ja osajohdinasetteluille.

## 2. VOIMAJOHDON REAKTANSSI

Voimajohdon reaktanssi aiheutuu induktanssista. Koska voimajohdon reaktanssi aiheutuu vain induktanssista, saadaan voimajohdon yhden vaiheen reaktanssi yhtälöstä

$$x = 2\pi fl, \quad (2.1)$$

jossa  $f$  on taajuus ja  $l$  on voimajohdon yhden vaiheen induktanssi. Symmetrisesti vuorotellulla kolmivaihejohdolla vaiheiden induktanssit ovat samat, joten vaiheiden reaktanssitkin ovat samat. (Elovaara & Haarla 2011a) (Stevenson 1955)

### 2.1 Yksittäisen johdon induktanssi

Induktanssilaskuissa käytetään ekvivalenttista vaiheväliä, jossa johtimet voivat olla mielivaltaisesti sijoitettuina suhteessa toisiinsa. Ekvivalenttinen vaiheväli  $a_{eq}$  saadaan laskettua yhtälöllä

$$a_{eq} = \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{31}}, \quad (2.2)$$

jossa  $a_{12}$  on vaiheiden R ja S väli,  $a_{23}$  on vaiheiden S ja T väli ja  $a_{31}$  on vaiheiden R ja T väli. Mikäli vaihejohtimissa käytetään useampaa osajohdinta, tulee laskea vaihejohtinnipun ekvivalenttisarake  $r_{eq}$ . (Elovaara & Haarla 2011a) (Grainger & Stevenson 1994) Toisistaan etäisyydellä  $D$  sijaitsevien osajohdinten vaihejohtinnipun ekvivalenttisarake 2-3 osajohdintella saadaan yhtälöstä

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r_{ekv}D^{n-1}}, \quad (2.3)$$

jossa  $n$  on osajohdinten määrä ja  $r_{ekv}$  on johtimen sisäisen magneettivuon huomioiva ekvivalenttinen johdinsäde (Grainger & Stevenson 1994). Ekvivalenttinen johdinsäde saadaan yhtälöstä

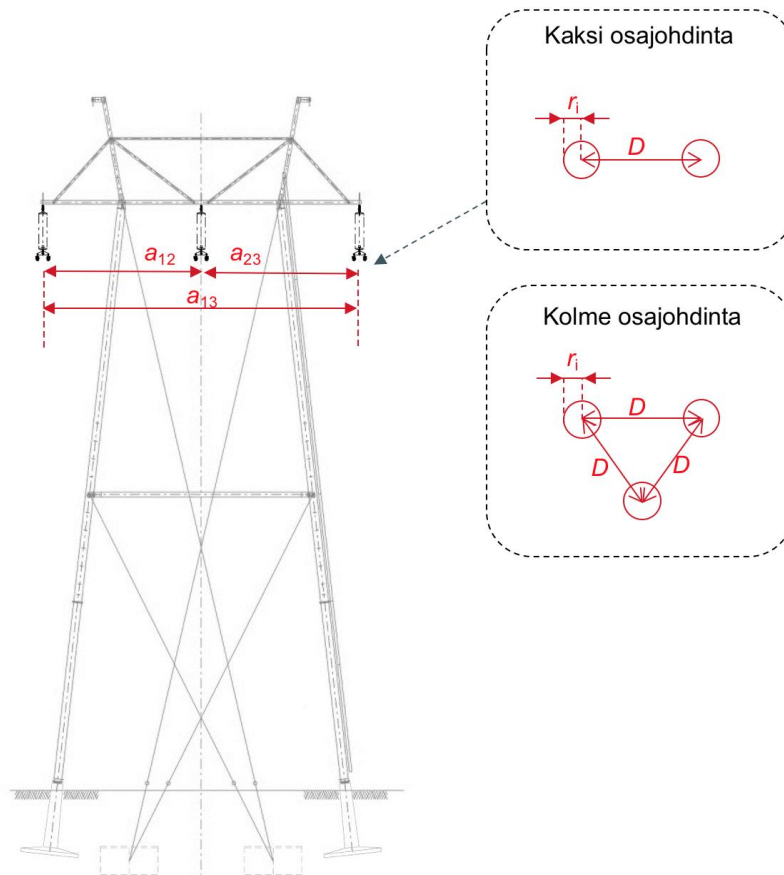
$$r_{ekv} = r_i \cdot e^{-\frac{1}{4}}, \quad (2.4)$$

jossa  $r_i$  on osajohdinten säde. Symmetrisesti vuorotellun ukkosjohtimettoman kolmivaihejohtimon yhden vaiheen induktanssi saadaan yhtälöstä

$$l_R = l_S = l_T = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a_{eq}}{r_{eq}}. \quad (2.5)$$

Yhtälöissä käytetyt muuttujat on esitetty kuvassa 2.1.





Kuva 2.1 Yksittäisen johdon induktanssin laskussa käytetyt muuttujat.

Symmetrisesti vuorotellun voimajohdon kaikkien vaiheiden induktanssit ovat samat. (Elovaara & Haarla 2011a) (Grainger & Stevenson 1994) (Saadat 1999)

## 2.2 Kaksoisjohdon induktanssi

Kaksoisjohto tarkoittaa voimajohtoa, jossa samassa pylväässä on kaksi erillistä virtapiiriä. Kaksi erillistä virtapiiriä voidaan kytkeä rinnan, jolloin eri virtapiirien samat vaiheet ovat yhdessä. Tällöin saadaan huomattavasti suurennettua osajohtimien etäisyyttä toisistaan. Kaksoisjohdon reaktanssilaskuissa tulee vaihejohtimien etäisyydet määrittellä geometrisia keskiarvoja käyttäen, jolloin vaihejohtingometria voi olla mielivaltainen. (Stevenson 1955)

Nimitetään etäisyyksiä johtimien  $i$  ja  $j$  välillä merkinnällä  $D_{ij}$ . Merkitään 1. virtapiirissä olevia vaihejohtimia tunnuksilla  $a_1$ ,  $b_1$  ja  $c_1$  ja 2. virtapiirissä olevia vaiheita tunnuksilla  $a_2$ ,  $b_2$  ja  $c_2$ . Ekvivalenttinen vaiheväli  $D_{eq}$  saadaan nyt laskettua yhtälöllä

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}}, \quad (2.6)$$

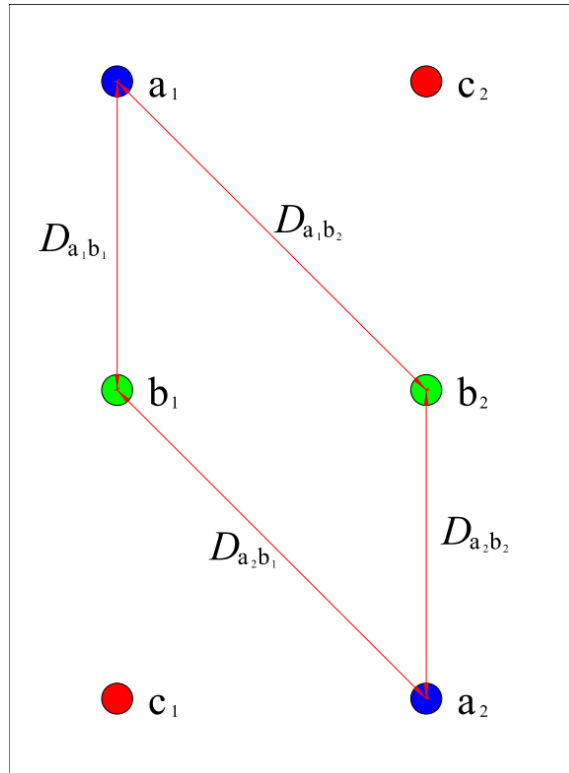
jossa  $D_{AB}$ ,  $D_{BC}$  ja  $D_{AC}$  saadaan yhtälöistä

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a_1b_1}D_{a_1b_2}D_{a_2b_1}D_{a_2b_2}}, \quad (2.7)$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{b_1c_1}D_{b_1c_2}D_{b_2c_1}D_{b_2c_2}}, \quad (2.8)$$

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a_1c_1}D_{a_1c_2}D_{a_2c_1}D_{a_2c_2}}, \quad (2.9)$$

Vaiheiden a ja b välisen geometrisen keskiarvon  $D_{AB}$  laskemiseen tarvittavat muuttujat on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2  $D_{AB}$  laskemiseen tarvittavat muuttujat.

Vaihejohtimien välinen geometrinen keskiarvo  $D_s$  saadaan yhtälöstä

$$D_s = \sqrt[3]{D_{SA}D_{SB}D_{SC}}, \quad (2.10)$$

jossa  $D_{SA}$ ,  $D_{SB}$  ja  $D_{SC}$  saadaan yhtälöistä

$$D_{SA} = \sqrt{r_{eq}D_{a_1a_2}}, \quad (2.11)$$

$$D_{SB} = \sqrt{r_{eq}D_{b_1b_2}}, \quad (2.12)$$

$$D_{SC} = \sqrt{r_{eq}D_{c_1c_2}}, \quad (2.13)$$

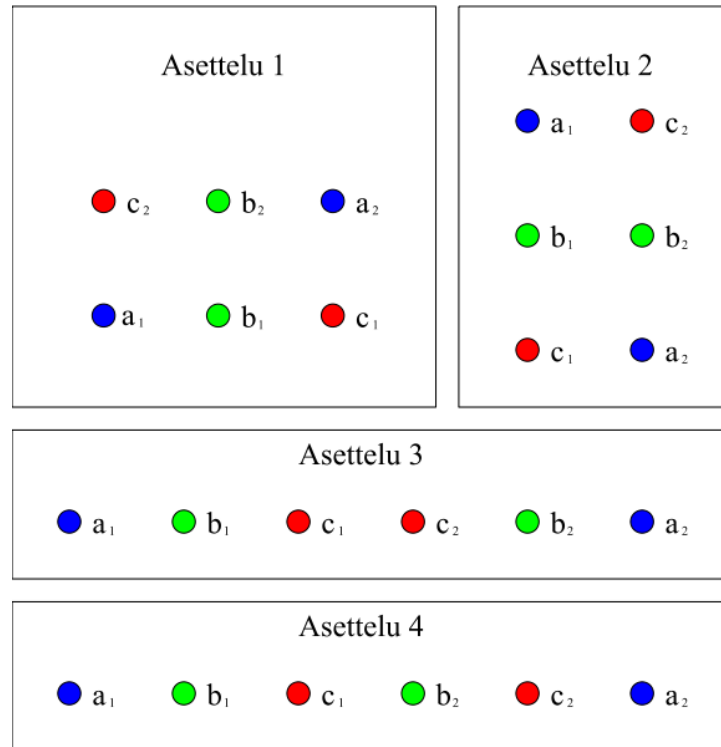
$r_{eq}$  saadaan kappaleen 2.1 mukaisesti yhtälöstä (2.3).

Rinnankytketyn yhden vaiheen induktanssi saadaan nyt yhtälöstä

$$l_R = l_S = l_T = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_S}. \quad (2.14)$$

(Stevenson 1955) (Saadat 1999)

Kaksoisjohdon vaiheet voidaan asettaa eri tavoin, mikä vaikuttaa johdon reaktanssiin. Tässä kandidaatintyössä käytetyt asetellut on esitetty kuvassa 2.3, jossa vaiheita on merkitty tunnuksilla a, b ja c. Eri virtapiirien samat vaiheet on kytketty rinnan, joten vaihe a koostuu virtapiirin 1 johtimesta  $a_1$  ja virtapiirin 2 johtimesta  $a_2$ .



Kuva 2.3 Kolmivaiheisen kaksoisjohdon vaihejohtimien asetellut.

Asettelussa 3 on peilisymmetrisesti vuoroteltu vaakatasossa oleva kaksoisjohto ja asetellussa 4 on pistesymmetrisesti vuoroteltu kaksoisjohto (Elovaara & Haarla 2011a).

### 2.3 Ukkosjohtimien vaikutus reaktanssiin

Ukkosjohtimet vaikuttavat sarjaimpedanssien arvoihin, joten ne vaikuttavat voimajohdon reaktanssiin. Sarjaimpedansseihin vaikuttavat vain kahdesta kohdasta maadoitetut ukkosjohtimet, sillä silloin vaihevirratt indusoivat ukkosjohtimiin virtoja. Ukkosjohtimet on maadoitettu jokaisella voimajohtopylväällä. Ukkosjohtimien vaikutus voimajohdon reaktanssiin on alle prosentti, joten ukkosjohtimien sijoittelua ei oteta huomioon tämän kandidaatintyön laskuissa. (Elovaara & Haarla 2011a)

### 3. KUORMIEN EPÄTASAINEN JAKAUTUMINEN RINNAKKAISILLA VOIMAJOHDOILLA

Rinnakkaisilla voimajohdoilla virrat jakautuvat voimajohtojen impedanssien suhteessa. Nimitetään voimajohdon 1 impedanssia tunnuksella  $Z_1$  ja voimajohdon 2 impedanssia tunnuksella  $Z_2$ . Tällöin kokonaisvirta  $I_{\text{kok}}$  jakautuu rinnakkaisiin voimajohtoihin siten, että pienemmän impedanssin voimajohdosta kulkee enemmän virtaa. Voimajohdon 1 läpi kulkeva virta  $I_1$  saadaan yhtälöstä

$$I_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_{\text{kok}}. \quad (3.1)$$

Vastaavasti voimajohdon 2 läpi kulkeva virta  $I_2$  saadaan yhtälöstä

$$I_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} I_{\text{kok}}. \quad (3.2)$$

Havaitaan, että suurempi virta kulkee pitkin pienemmän impedanssin johtoa. Suuremmalla virralla myös johdon lämpötehohäviöt ovat suuremmat, jolloin johtimen lämpölaajeneminen aiheuttaa suuremman riippuman. Tällöin pienemmän impedanssin voimajohto ylikuormittuu ennen suuremman impedanssin voimajohtoa, jos stabiiliutta rajoittava tekijä on johtimen riippuman kasvu. Kuva 1.2 havainnollistaa ilmiötä, koska kiertävän johdon impedanssi on suurempi kuin suoraan menevän voimajohdon.

### 4. VAIHEJOHTIMIEN VÄHIMMÄISETÄISYYDET

Vähimmäisetäisyydet ylilyönnin välttämiseksi esitetään standardissa SFS-EN 50341-1. Standardia tarkentaa toinen osa SFS-EN 50341-2-7, jossa ovat Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Standardissa määritellään vähimmäisetäisyydet kahden vaihejohtimen sekä vaihejohtimen ja maadoitetun osan välillä. Käytännössä etäisyydet ovat yleensä suuremmat kuin vähimmäisetäisyydet kustannustehokkuuden ja toteutusmahdollisuuksien takia. Tässä työssä ei oteta kantaa pylvään rakenteeseen tai voimajohdon häviöihin, joten laskennassa käytetään vähimmäisetäisyyksiä.

#### 4.1 Vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien välillä

Vaihejohtimien vähimmäisetäisyys  $c$  janteen keskellä tyynellä säällä on oltava vähintään

$$c = k\sqrt{h + e} + k_1 D_{\text{pp}}, \quad (4.1)$$

jossa  $h$  on johtimen riippuma lämpötilassa  $+40\text{ °C}$ ,  $e$  on johdon suuntaa vastaan kohtisuoraan heilahtavan eristinketjun pituus,  $k$  on taulukon 4.1 mukainen kerroin. Kerroin  $k_1$  ja vähimmäisetäisyys  $D_{\text{pp}}$  saadaan standardista SFS-EN 50341-2-7. Siinä kertoimelle  $k_1$  on annettu arvoksi 0,65. Vähimmäisetäisyys  $D_{\text{pp}}$  on esitetty taulukossa 4.2. (SFS-EN 50341-1 2014)

Eristinketjun pituus 110 kV voimajohdolla, jossa on Duck-johtimet, on I-kannatusketjulla noin 1,6 m. V-kannatusketju ei heilahda sivuttaissuunnassa, joten V-kannatusketjulla  $e$  on 0 m (Fingrid 2017a). Kannatusketju on vaihejohdinta kannatteleva eristinketju. Kuvassa 1.1 on esitetty I-kannatusketju. V-kannatusketju koostuu kahdesta kannatusketjusta, jotka ovat kiinnitetty eri kohtaan ortta, jolloin eristinketjut muodostavat v-kuvion.

Taulukko 4.1 Kertoimen  $k$  arvoja. (SFS-EN 50341-1 2014)

		Kerroin $k$		
		Johtimien 1 ja 2 välinen kulma		
		$0^\circ \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq 80^\circ$	$> 80^\circ \leq 90^\circ$
Johtimien heilahduskulmat	$\geq 65,1^\circ$	0,95	0,75	0,70
	$55,0^\circ \leq 65,0^\circ$	0,85	0,70	0,65
	$40,0^\circ \leq 55,0^\circ$	0,75	0,65	0,62
	$\leq 40,0^\circ$	0,70	0,62	0,60

Taulukossa 4.1 johtimien 1 ja 2 välinen kulma määritellään siten, että johdin 1 on origossa, jolloin johtimien välinen kulma on johtimen 2 poikkeama pysty akselista. 110 kV jännitetasolla käytettävien johtimien heilahduskulma on alle  $40^\circ$  (Fingrid 2017b).

Taulukko 4.2 Vähimmäisetäisyyden  $D_{pp}$  arvoja. (SFS-EN 50341-2-7 2015)

Nimellisjännite [kV]	Suurin käyttöjännite [kV]	$D_{pp}$ [m]
1...10	1,1...12	0,15
20	24	0,25
30	36	0,40
45	52	0,70
110	123	1,4
220	245	2,3
400	420	3,9

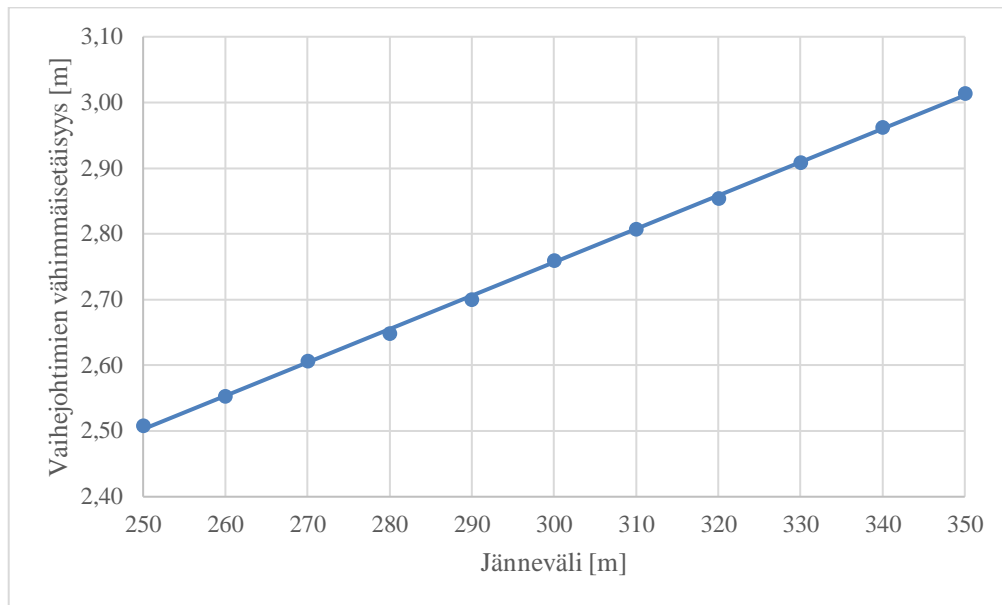
Taulukosta 4.2 havaitaan, että työssä tutkittavalla 110 kV nimellisjännitteellä  $D_{pp}$  saa arvon 1,4 m.

Voimajohdon riippuma 110 kV Duck-johtimella yleisesti käytetyillä jänneväleillä lämpötilassa  $+40^\circ\text{C}$  on esitetty taulukossa 4.3 (Fingrid 2017a).

Taulukko 4.3 Duck-johtimen riippuma lämpötilassa  $+40^\circ\text{C}$ .

Jänneväli [m]	Riippuma [m]
250	5,5
260	5,9
270	6,4
280	6,8
290	7,3
300	7,9
310	8,4
320	8,9
330	9,5
340	10,1
350	10,7

Yhtälöstä (4.1) voidaan laskea vaihejohtimien vähimmäisetäisyydet. Kuvassa 4.1 on esitetty 110 kV Duck-vaihejohtimien vähimmäisetäisyydet ylilyönnin välttämiseksi I-kannatusketjulla.



Kuva 4.1 110 kV Duck-vaihejohtimien vähimmäisetäisyydet ylilyönnin välttämiseksi I-kannatusketjulla.

Vaihejohtimien vähimmäisetäisyys ylilyönnin välttämiseksi suurenee lineaarisesti jännevälin funktiona. Jos johtimet asetetaan delta-muotoon, jolloin vaiheiden väliset kulmat ovat 30-80°, saa kerroin  $k$  arvon 0,62. Pystyyn asetetuilla johtimilla kerroin  $k$  on 0,70. Valitaan reaktanssitarcasteluissa keskimääräiseksi jänneväliksi 330 m. Taulukossa 4.4 on esitetty vähimmäisetäisyydet ylilyönnin estämiseksi vaihejohtimien välillä 330 m jännevälillä.

Taulukko 4.4 Vähimmäisetäisyydet ylilyönnin estämiseksi vaihejohtimien välillä 330 m jännevälillä.

	I-kannatusketju [m]	V-kannatusketju [m]
<b>Vaaka</b>	2,91	2,76
<b>Delta</b>	2,98	2,82
<b>Pysty</b>	3,24	3,07

## 4.2 Vähimmäisetäisyydet vaihejohtimen ja maadoitetun osan välillä

Vaihejohtimen ja maadoitetun osan vähimmäisetäisyys  $c$  jänteen keskellä tyynellä säällä on oltava vähintään

$$c = k\sqrt{h + e} + k_1 D_{el}. \quad (4.2)$$

Yhtälöstä (4.1) poiketen vähimmäisetäisyys  $D_{pp}$  korvataan etäisyydellä  $D_{el}$ .  $D_{el}$  on määritelty standardissa SFS-EN 50341-2-7, jonka mukaan se saa arvon 0,9 m.

Taulukossa 4.5 on esitetty vähimmäisetäisyydet ylilyönnin välttämiseksi vaihejohtimien ja maadoitetun osan välillä 330 m jänneväliä.

Taulukko 4.5 Vähimmäisetäisyydet ylilyönnin välttämiseksi vaihejohtimien ja maadoitetun osan välillä.

	<b>I-kannatusketju [m]</b>	<b>V-kannatusketju [m]</b>
<b>Vaaka</b>	2,58	2,43
<b>Delta</b>	2,65	2,50
<b>Pysty</b>	2,92	2,74

Taulukossa 4.5 esitetyt etäisyydet määrittävät vaihejohtimen minimietäisyyden ukkosjohtiimiin, sillä voimajohdon jänteen keskellä ei ole muuta maadoitettua osaa. (SFS-EN 50341-1 2014) (SFS-EN 50341-2-7 2015)

## 5. VOIMAJOHDON REAKTANSSIN MINIMOINTI

Tämän kappaleen tavoitteena on etsiä keinot reaktanssin pienentämiseksi ja laskea voimajohdon reaktansseja erilaisilla johdinasetteluilla. Tässä kappaleessa myös verifioidaan tulokset ja tehdään karkea kustannusanalyysi. Reaktanssien laskentaa varten tehtiin Excel-laskentataulukko, jonka avulla pystyy laskemaan erilaisten johdin- ja osajohdinasettelujen reaktanssit yksittäisillä voimajohdoilla ja kaksoisjohdoilla.

Yhtälöstä (2.5) havaitaan, että yksittäisen voimajohdon induktanssia voidaan pienentää suurentamalla vaihejohdinnipun ekvivalenttisädettä tai pienentämällä ekvivalenttista vaiheväliä. Vaiheväliä ei voi kuitenkaan pienentää alle standardin määrittämän raja-arvon. Ekvivalenttista vaiheväliä voidaan pienentää erilaisilla vaihejohtimien asettelulla. Jos vaihejohtimet asetetaan kolmioon, on niiden ekvivalenttinen vaiheväli pienempi kuin silloin, kun vaihejohtimet asetetaan vaaka- tai pysty tasoon. Kannatusketut voidaan vaihtaa V-kannatusketjuiksi, jolloin voidaan käyttää pienempää vähimmäisetäisyyttä vaihejohtimien välillä.

Vaihejohtimen ekvivalenttisädettä voidaan suurentaa lisäämällä osajohtimia tai suurentamalla osajohdinväliä. Kun osajohdinväliä suurennetaan, on huomioitava, että eri vaihejohtimien väli pysyy kappaleessa 4.1 laskettua vähimmäisetäisyyttä suurempana. Jos osajohtimet sijoitetaan vaakatasoon, tulee osajohdinväliä suurennettaessa suurentaa myös vaiheväliä. Tämä heikentää reaktanssin pienentymistä osajohdinväliä suurentamalla. Jos osajohdinväliä suurennetaan pystysuunnassa, se vaikuttaa johtimien heilahteluun ja siten vähimmäisvaiheväli suurenee. Kahta pystysuuntaista osajohdinta ei käytetä nykyisissä ratkaisuisissa.

Reaktanssia voidaan pienentää merkittävästi muuttamalla johto kaksoisjohdoksi. Jos virtapiirit ovat äärimmäisen kaukana toisistaan, kaksoisjohdon reaktanssi on puolet yksittäisen virtapiirin reaktanssista. Eri virtapiirit sijoitetaan toistensa lähelle, joten viereisestä voimajohdosta aiheutuva keskinäisimpedanssi tulee ottaa huomioon. Kaksoisjohdon reaktanssia voidaan pienentää tuomalla virtapiirit lähemmäs toisiaan. Vaikka tällöin osajohdinnipun ekvivalenttisäde on pienempi, on myös ekvivalenttinen vaiheväli pienempi.

Kaikissa laskuissa käytetään 330 m jänneväliä ja vaiheiden välillä käytetään taulukon 4.4 mukaisia vähimmäisetäisyyksiä. Laskuissa käytetään yleisesti 110 kV jännitetasolla käytettyä teräsvahvisteista alumiinijohdinta ACSR 305/39 Duck. Merkintä 2-Duck tarkoittaa, että

jokaisella vaiheella on kaksi osajohdinta. Merkintä 2xDuck tarkoittaa kahta virtapiiriä, jossa molemmissa on vain yksi Duck-johdin. Vastaavasti 2x2-Duck tarkoittaa kolmivaihejohtoa, jossa on kaksi virtapiiriä, joiden kaikissa vaiheissa on kaksi osajohdinta.

Reaktanssin pienenemisen vertailuarvona käytetään perinteistä I-kannatusketjullista 2-Duck kolmivaihejohtoa, jossa osajohdinväli on 30 cm. Kaavojen (2.5) ja (2.1) mukaan voimajohdon reaktanssiksi saadaan  $0,2723 \Omega/\text{km}$ . Fingridin olemassa olevilla 110 kV 2-Duck johdoilla reaktanssi vaihtelee  $0,3 \Omega/\text{km}$  molemmin puolin riippuen käytetystä vaihevälisestä (Fingrid 2017a). Vähimmäisvaihevälää käytettäessä reaktanssi on pienempi kuin käytössä olevilla Fingridin pylväillä.

## 5.1 2-Duck ja 3-Duck johdot

Reaktanssia voidaan pienentää suurentamalla osajohdinväliä, lisäämällä osajohtimia tai vaihtamalla kannatusketjun tyyppiä, jolloin voidaan käyttää pienempää vähimmäisetäisyyttä vaihejohtimien välillä. Osajohtimia lisätessä tulee huomioida, ettei 3-Duck johdinrakennetta voida käyttää samoilla pylväsrakenteilla kuin 2-Duck johdinrakennetta, koska 3-Duck johdinrakenteesta aiheutuu suuremmat kuormat pylväsrakenteisiin (Fingrid 2017b).

Taulukossa 5.1 on esitetty laskentatuloksia erilaisille johdinasetteluille. Johdon tyyppi ”2-Duck 30 cm” tarkoittaa kolmivaihejohtoa, jossa on kaksi osajohdinta 30 cm etäisyydellä toisistaan.

Taulukko 5.1 2-Duck ja 3-Duck kolmivaihejohdon reaktanssi erilaisilla johdinrakenteilla ja kannatusketjuilla.

	Reaktanssi I-kannatusketju [ $\Omega/\text{km}$ ]	Pienennys	Reaktanssi V-kannatusketju [ $\Omega/\text{km}$ ]	Pienennys
2-Duck 30 cm	0,2723		0,2693	1,10 %
2-Duck 45 cm	0,2624	3,62 %	0,2596	4,68 %
2-Duck 60 cm	0,2561	5,94 %	0,2534	6,94 %
3-Duck 30 cm	0,2360	13,32 %	0,2330	14,43 %
3-Duck 45 cm	0,2219	18,51 %	0,2190	19,56 %
3-Duck 60 cm	0,2126	21,93 %	0,2098	22,93 %

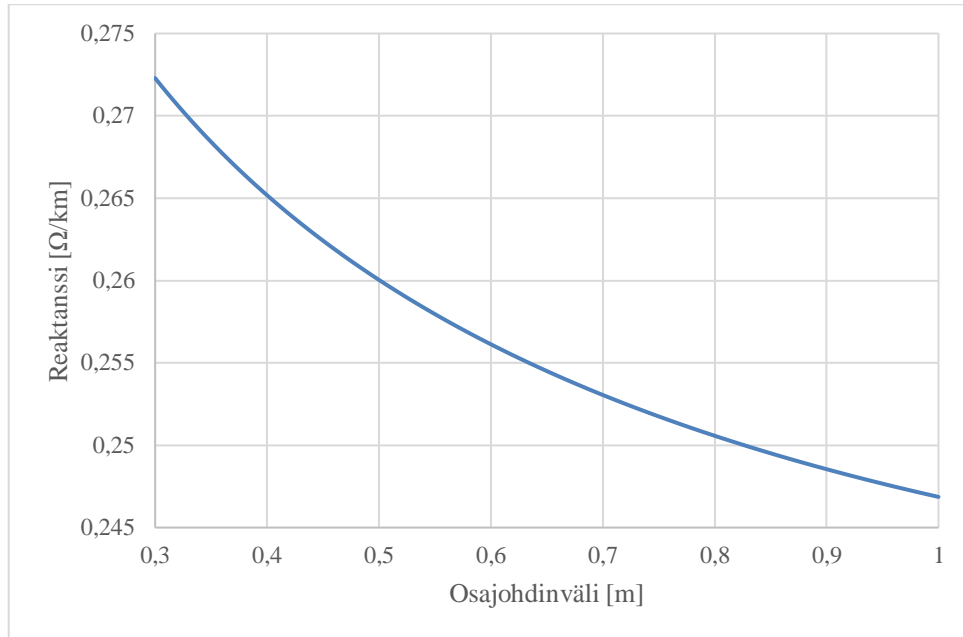
Havaitaan, että reaktanssia saadaan pienennettyä huomattavasti lisäämällä kolmas osajohdin. Kahdella osajohtimella osajohdinvälin suurentaminen ei vaikuta huomattavasti voimajohdon reaktanssiin.

## 5.2 Osajohdinvälin suurentaminen

Laskuissa on käytetty 2-Duck-johdinta. Kuvassa 2.1 esitettyä osajohdinväliä  $D$  suurennetaan 30 senttimetrinä 1 metriin. Laskuissa käytetään I-kannatusketjun vähimmäisetäisyyttä yllilyönin välttämiseksi. On huomioitava, että osajohdinväliä suurennettaessa on suurennet-



tava myös vaiheväliä, jotta vähimmäisetäisyys vaihejohtimien välillä säilyy. Reaktanssi lasketaan kaavoilla (2.5) ja (2.1). Kuvassa 5.1 esitetään reaktanssin pieneneminen osajohdinvälin funktiona.

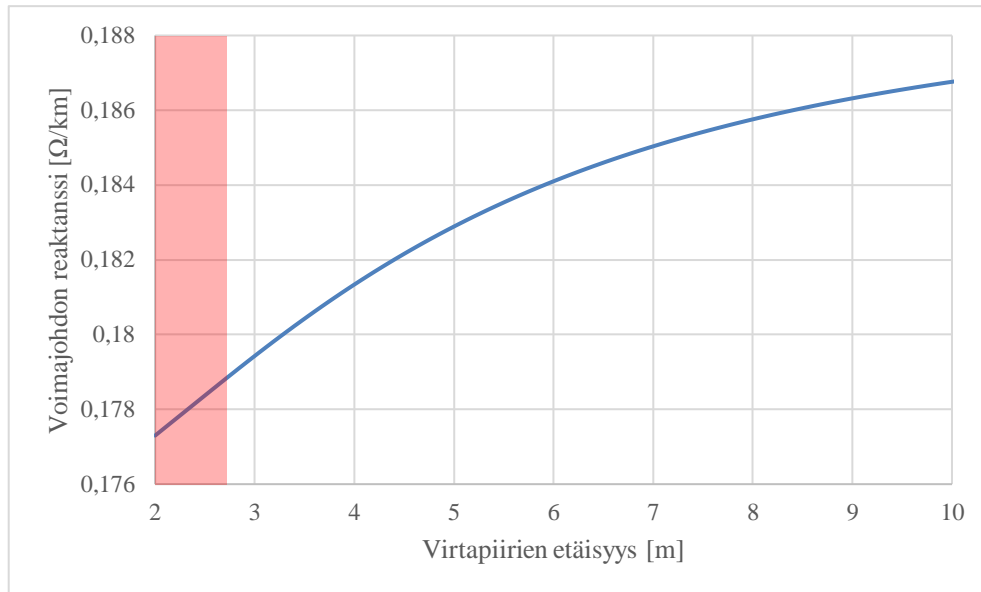


Kuva 5.1 2-Duck kolmivaihejohdon reaktanssi osajohdinvälin funktiona.

Reaktanssin pienenemisen havaitaan hidastuvan osajohdinvälin suurentuessa. Osajohdinvälin muutos ei vaikuta merkittävästi johdon reaktanssiin. Osajohdinvälin suurentaminen 30 cm:stä 45 cm:iin pienentää reaktanssia vain 3,6 %. 45 cm osajohdinväli on yleisesti käytetty 400 kV voimalinjoilla. Osajohdinvälin suurentaminen kaksinkertaiseksi pienentää reaktanssia 5,9 %.

### 5.3 Kaksoisjohto

Kaksoisjohdon reaktanssiin vaikuttaa käytetty johdinasettelu. Laskennassa on käytetty kuvassa 2.3 esitettyjä johdinasetteluja ja kaikissa laskuissa käytetään V-kannatusketjuja. Kuvassa 5.2 on esitetty reaktanssi asetelulla 2, kun virtapiirien etäisyyttä toisistaan suurennetaan. Kuvassa punaisella on merkitty alue, jossa kappaleessa 4.1 määritetty 2,76 m vähimmäisetäisyys virtapiirien välillä ei täyty.



Kuva 5.2 Kaksoisjohdon reaktanssi asettelulla 2 virtapiirien etäisyyden funktiona.

Kuvasta 5.2 havaitaan, että reaktanssi suurenee etäisyyden suurentuessa. Virtapiirien etäisyys tulee minimoida pienimmän reaktanssin saavuttamiseksi.

Eri asetteluilla kaavojen (2.14) ja (2.1) mukaan lasketut reaktanssien arvot on esitetty taulukossa 5.2. 2x2-Duck johtimissa on käytetty 30 cm osajohdinväliä.

Taulukko 5.2 Kaksoisjohdon reaktanssit eri johdinasetteluilla.

	Asettelu 1	Asettelu 2	Asettelu 3	Asettelu 4
2xDuck	0,1769 Ω/km	0,1789 Ω/km	0,1907 Ω/km	0,1862 Ω/km
2x2-Duck	0,1142 Ω/km	0,1142 Ω/km	0,1287 Ω/km	0,1241 Ω/km

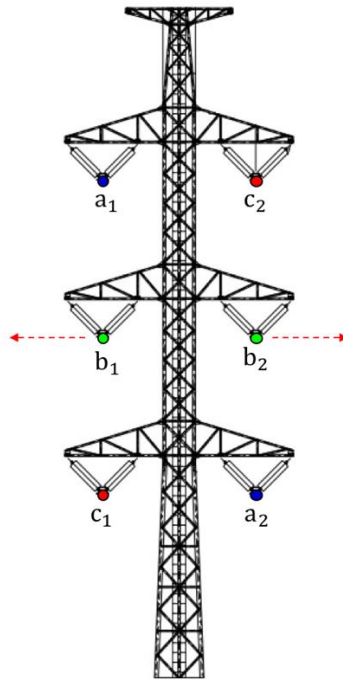
Taulukossa 5.3 on reaktanssin pieneneminen suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon.

Taulukko 5.3 Reaktanssin pieneneminen suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon.

	Asettelu 1	Asettelu 2	Asettelu 3	Asettelu 4
2xDuck	35,03 %	34,29 %	29,95 %	31,61 %
2x2-Duck	58,07 %	58,04 %	52,74 %	54,40 %

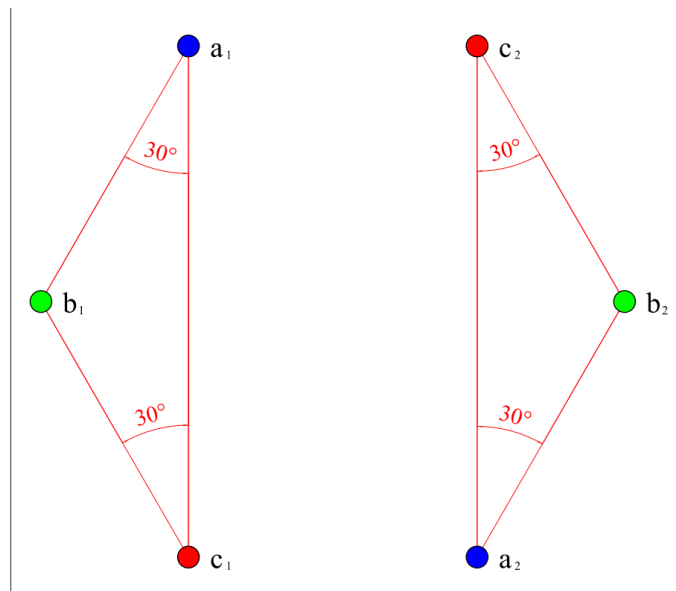
Havaitaan, että muuttamalla voimajohto kaksoisjohdoksi lisäämättä osajohtimia, voidaan saavuttaa 35 % pienempi reaktanssi suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon. Parhaat asetellutavat reaktanssin pienentämiseksi ovat asetellut 1 ja 2. Tällöin ekvivalenttinen vaiheväli on pienempi, koska eri vaiheiden vaihejohtimet sijaitsevat lähempänä toisiaan.

Asettelujen 1 ja 2 reaktanssia pystytään pienentämään lisää, mikäli sijoitetaan keskimmäiset eli b-vaiheen johtimet kauemmas toisistaan kuten kuvassa 5.3 on esitetty.



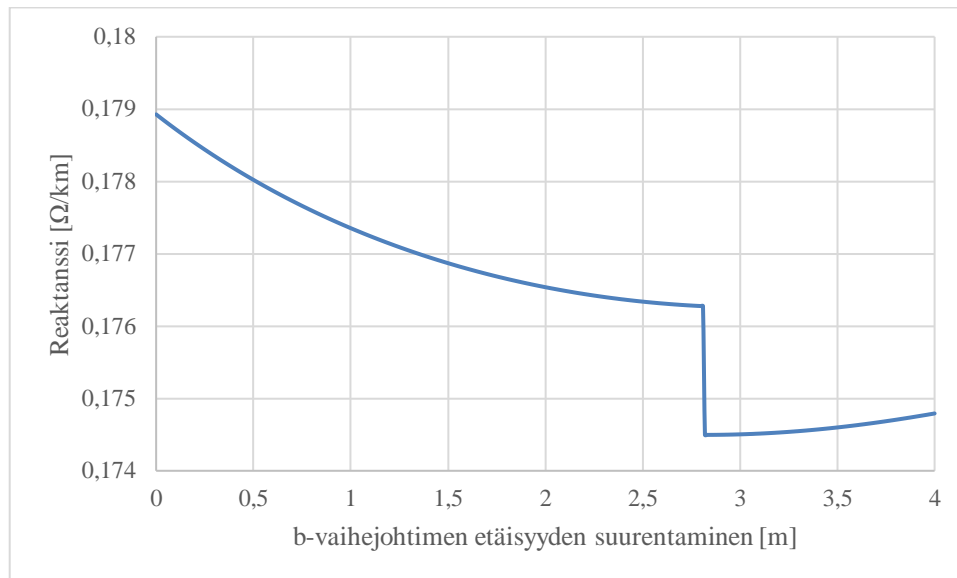
Kuva 5.3 B-vaihejohtimien etäisyyden suurentaminen kaksoisjohdon asettelussa 2.

Tällöin ekvivalenttinen vaiheväli suurenee, mutta vastaavasti myös vaihejohdinnipun ekvivalenttisarve suurenee. Ekvivalenttisen vaihevälän kasvua hidastaa se, että vaihejohtimia voidaan tuoda lähemmäs toisiaan b-vaihejohtimien siirtyessä sivulle. Kun päällekkäisten vaihejohtimien välinen kulma pystyakselista on yli  $30^\circ$ , voidaan kappaleen 4.1 mukaisesti käyttää pienempää vähimmäisetäisyyttä vaiheiden välillä. Asettelu on esitetty kuvassa 5.4.



Kuva 5.4 Päällekkäisten vaihejohtimien kulma  $30^\circ$  kaksoisjohdon asettelussa 2.

Päällekkäisten vaihejohtimien välinen kulma on yli  $30^\circ$ , kun etäisyyttä b-vaihejohtimien välillä on suurennettu 2,82 m. Asettelussa 1 b-vaiheiden etäisyyttä suurennettaessa pylväskorkeus kasvaisi, jolloin kustannukset nousisivat huomattavasti. Asettelussa 2 b-vaiheiden etäisyyttä suurennettaessa tulee keskimmäisen orren leveyttä suurentaa. Orren leventäminen on edullisempaa kuin pylväskorkeuden kasvattaminen. Kuvassa 5.5 on esitetty 2xDuck voimajohtolinjan reaktanssi b-vaiheiden etäisyyden suurenemisen funktiona kaksoisjohtoasettelussa 2.



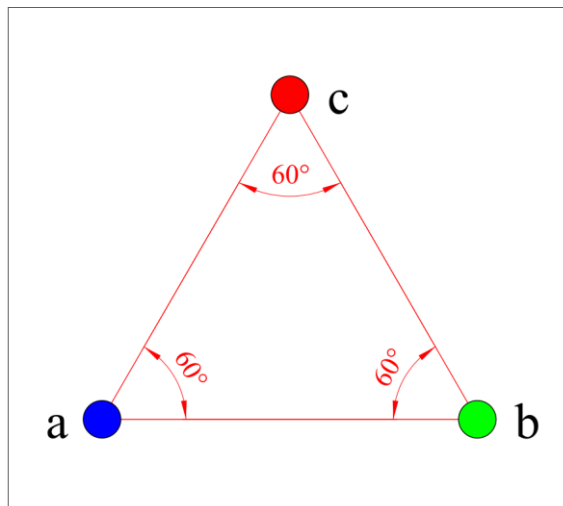
Kuva 5.5 Kaksoisjohdon reaktanssi asettelussa 2 b-vaihejohtimien etäisyyden suurentamisen funktiona.

Kuvasta 5.5 havaitaan, että b-vaihejohtimien etäisyyden suurentaminen 2,82 m saakka pienentää johdon reaktanssia. 2,82 m etäisyyden suurenemisen jälkeen voidaan käyttää pienempää vähimmäisetäisyyttä, jolloin reaktanssi pienenee huomattavasti. Jos b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennetaan yli 2,82 m, alkaa johdon reaktanssi suurentua. Reaktanssi pienenee etäisyyden suurennusvälillä 0 - 2,82 m, koska johdinnipun ekvivalenttisäde suurenee nopeammin kuin ekvivalenttinen vaiheväli. 2,82 m eteenpäin voimajohdon ekvivalenttinen vaiheväli ja johdinnipun ekvivalenttisäde molemmat pienenevät, mutta ekvivalenttisäde pienee nopeammin kuin ekvivalenttinen vaiheväli. Tämän takia reaktanssi suurenee.

Havaitaan, että pienin reaktanssi asettelulla 2 saadaan, kun b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennetaan 2,82 m vähimmäisetäisyydestä. Tällöin b-vaihejohtimien välinen etäisyys on 5,58 m. 2xDuck johdon reaktanssiksi saadaan 0,1745 Ω/km 2,82 m b-vaihejohtimien etäisyyden lisäyksellä. Reaktanssin pienenee 35,92 % suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon. 2x2-Duck johdolla saadaan myös pienin reaktanssin arvo, kun b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennetaan 2,82 m. 2x2-Duck johdolla reaktanssiksi saadaan 0,1109 Ω/km 2,82 m b-vaihejohtimien etäisyyden lisäyksellä. Tällöin reaktanssi pienenee 59,26 % suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon.

## 5.4 Delta-rakenne

Johtimet voidaan sijoittaa symmetriseen delta-vaihekoordinaatioon, jolloin johtimet sijaitsevat tasasivuisen kolmion kulmissa. Symmetrinen delta-vaihekoordinaatio on esitetty kuvassa 5.6.



Kuva 5.6 Symmetrinen delta-vaihekoordinaatio

Symmetrisen delta-rakenteen etuna on symmetrinen muoto, jolloin vaiheiden vuorottelua ei tarvita. Lisäksi delta-rakenteessa johtojen geometrinen keskiarvo on pienempi kuin perinteisessä vaakatasoon asetetuissa vaihejohtimissa, joten reaktanssi on pienempi. Delta-rakenteen reaktanssi lasketaan kaavoilla (2.5) ja (2.1). Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4 Symmetrisen delta-vaihekoordinaation reaktanssi eri asetteluilla.

	30 cm osajohdin	45 cm osajohdin
2-Duck	0,2534 $\Omega/\text{km}$	0,2415 $\Omega/\text{km}$
3-Duck	0,2171 $\Omega/\text{km}$	0,2010 $\Omega/\text{km}$

Delta-rakenteella saadaan pienempi reaktanssi kuin perinteisellä 2-Duck johdolla. Delta-rakenteisen kolmivaihejohdon reaktanssin pienennys suhteessa perinteiseen 30 cm osajohdinvälillä olevaan 2-Duck johtimeen on esitetty taulukossa 5.5.

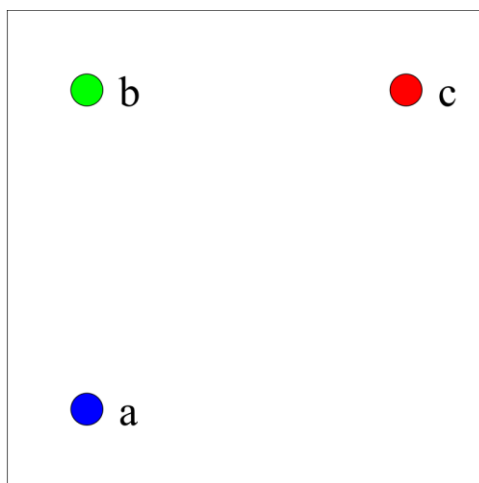
Taulukko 5.5 Symmetrisen delta-vaihekoordinaation reaktanssin pienennys suhteessa perinteiseen 2-Duck johtimeen.

	30 cm osajohdin	45 cm osajohdin
2-Duck	6,93 %	11,30 %
3-Duck	20,25 %	26,18 %

Delta-rakenteisella kolmivaihejohdolla saadaan merkittävä reaktanssin pienennys, jos lisätään kolmas osajohdin. Kahdella osajohtimella oleva delta-rakenteinen johto ei pienennä reaktanssia merkittävästi.

### 5.4.1 Epäsymmetrinen delta-rakenne

Deltarakenne voidaan toteuttaa myös epäsymmetrisenä, jolloin joudutaan toteuttamaan vaiheiden vuorottelu. Kuvassa 5.7 on esitetty epäsymmetrinen delta-vaihekoordinaatio.



Kuva 5.7 Epäsymmetrinen delta-vaihekoordinaatio.

Kuvan 5.7 mukaisella koordinaatiolla saadut reaktanssin arvot lasketaan kaavoilla (2.5) ja (2.1). Saadut reaktanssin arvot on esitetty taulukossa 5.6.

Taulukko 5.6 Epäsymmetrisen delta-vaihekoordinaation reaktanssit eri asetteluilla.

	30 cm osajohdin	45 cm osajohdin
2-Duck	0,2621 $\Omega/\text{km}$	0,2509 $\Omega/\text{km}$
3-Duck	0,2258 $\Omega/\text{km}$	0,2104 $\Omega/\text{km}$

Verrataan saatuja arvoja perinteisen 2-Duck johtimen reaktanssiin. Reaktanssin pienennys suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon on esitetty taulukossa 5.7.

Taulukko 5.7 Epäsymmetrisen delta-vaihekoordinaation reaktanssin pienennys suhteessa perinteiseen 2-Duck johtoon.

	30 cm osajohdin	45 cm osajohdin
2-Duck	3,73 %	7,85 %
3-Duck	17,06 %	22,74 %

Epäsymmetrisellä delta-rakenteella reaktanssi on selvästi suurempi kuin symmetrisellä delta-rakenteella. Epäsymmetrisellä delta-rakenteella voidaan kuitenkin pienentää reaktanssia huomattavasti lisäämällä kolmas osajohdin.

## 5.5 Tulosten verifiointi

Laskentatulokset verifioidaan PSCAD-ohjelmistolla. PSCAD on Fingridillä käytössä oleva ohjelmisto, jolla pystyy simuloimaan laajoja verkkokokonaisuuksia. PSCAD-ohjelmistolla pystyy myös mallintamaan voimajohtojen johdinasetteluja ja niiden reaktansseja. PSCAD-ohjelmistosta ei saa kuitenkaan ulos reaktanssiarvoja rinnankytketylle kaksoisjohdolle. Ohjelmistoa tässä työssä käytetään 2-Duck, 3-Duck ja symmetrisen delta-rakenteen tulosten verifiointiin. Simuloitujen reaktanssien ero suhteessa laskettuihin reaktansseihin on esitetty taulukossa 5.8.

Taulukko 5.8 Laskettujen arvojen ja PSCAD:llä simuloitujen reaktanssien vertailu.

	Laskettu reaktanssi [ $\Omega/\text{km}$ ]	PSCAD reaktanssi [ $\Omega/\text{km}$ ]	Ero
2-Duck 30 cm	0,2723	0,2719	0,15 %
2-Duck 45 cm	0,2624	0,2618	0,23 %
3-Duck 30 cm	0,2360	0,2358	0,08 %
2-Duck delta 30 cm	0,2534	0,2532	0,08 %
2-Duck delta 45 cm	0,2415	0,2412	0,12 %
3-Duck delta 30 cm	0,2171	0,2169	0,09 %

Taulukosta 5.8 havaitaan, että ero laskettujen ja simuloitujen reaktanssien arvojen välillä ei ole merkittävä. Laskennan tulokset ovat siis oikeellisia.

## 5.6 Karkea kustannusanalyysi

Voimajohdon rakennuskustannuksia voidaan arvioida karkeasti pylvään painon ja käytettyjen komponenttien perusteella. Saadut kustannukset on arvioitu yhdessä Fingridin voimajohtoasiantuntijoiden kanssa. Rakennuskustannusten laskentamenetelmiä ei ole eritelty tässä kandidaatintyössä. Kustannukset perustuvat Fingridin tyyppipylväiden ja olemassa olevien pylväiden kustannuksiin. Kustannusarviossa on käytetty 330 m jänneväliä. Saadut arviot on esitetty halvimmasta kalleimpaan taulukossa 5.9.

Taulukko 5.9 Arvioidut voimajohtojen rakennuskustannukset

Voimajohdon tyyppi	Voimajohdon arvioitu hinta [€/km]	Rakennuskustannusten suureneminen
2-Duck 30 cm I-kannatusketju	116 990	
2-Duck 45 cm I-kannatusketju	117 840	0,73 %
2-Duck 30 cm V-kannatusketju	118 360	1,17 %
2-Duck 60 cm I-kannatusketju	118 990	1,71 %
2-Duck 45 cm V-kannatusketju	119 210	1,90 %
2-Duck 60 cm V-kannatusketju	120 360	2,88 %
2-Duck 30 cm delta	131 400	12,32 %
2-Duck 45 cm delta	132 250	13,04 %
3-Duck 30 cm I-kannatusketju	135 550	15,86 %
3-Duck 45 cm I-kannatusketju	143 210	22,41 %
3-Duck 30 cm V-kannatusketju	143 470	22,63 %
3-Duck 45 cm V-kannatusketju	144 580	23,58 %
3-Duck 60 cm I-kannatusketju	144 930	23,88 %
3-Duck 60 cm V-kannatusketju	146 290	25,04 %
2xDuck asettelu 3	151 660	29,64 %
2xDuck asettelu 4	151 660	29,64 %
2xDuck asettelu 1	162 880	39,23 %
2x2-Duck asettelu 3	168 790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 4	168 790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 1	178 670	52,72 %
3-Duck 30 cm delta	215 070	83,84 %
3-Duck 45 cm delta	216 420	84,99 %
2-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	256 110	118,92 %
2-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	256 680	119,40 %
3-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	262 960	124,77 %
3-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	263 830	125,52 %
2xDuck asettelu 2	301 120	157,39 %
2xDuck asettelu 2, b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	309 270	164,36 %
2x2-Duck asettelu 2	316 760	170,76 %
2x2-Duck asettelu 2, b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	324 910	177,72 %

Epäsymmetrinen delta-rakenne ja kaksoisjohto asettelulla 2 käyttävät vapaasti seisovia pylväitä, joten niiden perustus- ja pylväsrakenteet ovat huomattavasti kalliimpia. Muut voimajohtotyypit käyttävät harustettuja pylväitä.

Voimajohtojen kustannuksia ei pysty arvioimaan tarkasti, koska kustannukset vaihtelevat maaston, reitin ja jännevälin mukaan. Voimajohtopylväiden korkeus vaihtelee pylväskohtaisesti, jolloin pylväskustannuksetkin vaihtelevat. Kulmapylväät ovat kalliimpia kuin suoran linjan pylväät, joten reittivalinnat vaikuttavat myös voimajohdon rakennuskustannuksiin.



Tässä kappaleessa arvioidut rakennuskustannukset ovat vain suuntaa-antavia ja todelliset rakennuskustannukset saattavat poiketa tässä kappaleessa esitetyistä arvioista.

## 6. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää, miten voimajohdon reaktanssia voidaan pienentää johdingeometriaa muuttamalla, jotta rinnakkaisten johtojen ylikuormitustilanteilta vältytään. Työssä tutustuttiin alan kirjallisuuteen ja voimajohdoille käytettäviin standardeihin.

Työssä selvitettiin keinot voimajohdon reaktanssin laskemiseksi ja pienentämiseksi. Työssä selvitettiin myös vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien välillä ja vähimmäisetäisyydet vaihejohtimien ja ukkosjohtimien välillä. Työtä varten tehtiin Excel-laskentataulukko, jolla pystytään laskemaan erilaisten johdin- ja osajohdinasetteluiden reaktansseja. Työhön kuului myös karkea kustannusanalyysi, jossa etsittiin suuntaa-antavat kustannusarviot erityyppisten voimajohtojen rakentamiselle. Työn tarkoituksena on koota erilaisten johdingeometrioiden reaktanssit ja arvioidut kustannukset.

Työssä havaittiin, että voimajohdon reaktanssia pystytään pienentämään suurentamalla osajohtimien etäisyyttä tai pienentämällä vaiheväliä. Yksittäisen voimajohdon osajohtimien välin suurentaminen ei pienennä reaktanssia huomattavasti, sillä vaihejohtimien vähimmäisetäisyyttä toisiinsa tulee myös suurentaa, kun osajohdinväliä suurennetaan vaakasuunnassa. Vaiheväliä voidaan pienentää vaihtamalla kannatusketjun tyyppiä, jolloin standardin SFS-EN 50341 mukaan voidaan käyttää pienempiä vähimmäisetäisyyksiä vaihejohtimien välillä. Vaihevälin pienennys ei alenna reaktanssia merkittävästi. Voimajohdon toteuttaminen delta-rakenteella pienentää reaktanssia huomattavasti vain, jos lisätään kolmas osajohdin. Kolmen osajohtimen delta-rakenteisen johdon rakennuskustannukset ovat kuitenkin korkeat. Reaktanssia voidaan pienentää huomattavasti, jos johto toteutetaan kaksoisjohtona, jonka vaiheet on kytketty rinnan. Kaksoisjohdon asettelut 3 ja 4 ovat kustannustehokkaimpia, mutta eivät alenna reaktanssia yhtä paljon kuin asettelut 1 ja 2. Kaksoisjohdon reaktanssia voidaan pienentää lisäämällä etäisyyttä keskimmäisten vaihejohtimien välillä. Pienin reaktanssi on kaksoisjohdon asettelulla 2, jonka keskimmäisten vaihejohtimien etäisyyttä on suurennettu 2,82 m. Tämä asettelu voidaan toteuttaa vapaasti seisovilla pylväillä, joiden rakennuskustannukset ovat korkeat.

Kaikki työssä lasketut reaktanssit ja kustannukset eri voimajohtotyypeillä on esitetty liitteessä 1. Työn tavoitteet saavutettiin hyvin ja liitteen taulukot ovat hyödyllisiä työkaluja Fingridin verkkosuunnittelijoille. Taulukoista voidaan tulkita, mikä on edullisin tapa toteuttaa matalareaktanssinen johto, jolloin ylikuormitustilannetta ei pääse tapahtumaan. Tulokset voidaan tulkita kappaleen 5.5 mukaisesti oikeellisiksi.

Työn jatkotutkimus- ja kehityskohteita ovat selvitettyjen johdingeometrioiden vaikutukset koronahäviöihin, sähkökenttiin ja vuorottelun toteuttamiseen. Lisäksi voimajohtorakenteiden kustannusanalyysiä tulee jatkotutkimuksissa tarkentaa ja selvittää käytännön toteutustapoja matalareaktanssiselle johdolle.

**LÄHTEET**

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 2. painos. Otatieto: Gaudeamus Helsinki University Press.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Otatieto: Gaudeamus Helsinki University Press.

Fingrid Oyj. 2017a. Sisäinen lähde.

Fingrid Oyj. 2017b. Asiantuntijahaastattelu: Ritva Laine.

Grainger, J & Stevenson, W. 1994. Power system analysis. McGraw-Hill, Inc.

Kundur, P. 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc.

Nordel. 2007. Nordic Grid Code.

Saadat, H. 1999. Power system analysis. McGraw-Hill Companies, Inc.

SFS-EN 50341-1. 2014. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.

SFS-EN 50341-2-7. 2015. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.

Stevenson, W. 1955. Elements of power system analysis. New York: McGraw-Hill Book Company Inc.

## Liite 1 Lasketut reaktanssit ja arvioidut rakennuskustannukset

	Reaktanssi [ $\Omega$ /km]	Reaktanssin pienennys	Voimajohdon arvioitu hinta [€/km]	Rakennuskus- tannusten suureneminen
2-Duck 30 cm I-kannatusketju	0,2723		116990	
2-Duck 30 cm V-kannatusketju	0,2693	1,10 %	118360	1,17 %
2-Duck 45 cm I-kannatusketju	0,2624	3,62 %	117840	0,73 %
2-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	0,2621	3,73 %	256110	118,92 %
2-Duck 45 cm V-kannatusketju	0,2596	4,68 %	119210	1,90 %
2-Duck 60 cm I-kannatusketju	0,2561	5,94 %	118990	1,71 %
2-Duck 30 cm delta	0,2534	6,93 %	131400	12,32 %
2-Duck 60 cm V-kannatusketju	0,2534	6,94 %	120360	2,88 %
2-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	0,2509	7,85 %	256680	119,40 %
2-Duck 45 cm delta	0,2415	11,30 %	132250	13,04 %
3-Duck 30 cm I-kannatusketju	0,2360	13,32 %	135550	15,86 %
3-Duck 30 cm V-kannatusketju	0,2330	14,43 %	143470	22,63 %
3-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	0,2258	17,06 %	262960	124,77 %
3-Duck 45 cm I-kannatusketju	0,2219	18,51 %	143210	22,41 %
3-Duck 45 cm V-kannatusketju	0,2190	19,56 %	144580	23,58 %
3-Duck 30 cm delta	0,2171	20,25 %	215070	83,84 %
3-Duck 60 cm I-kannatusketju	0,2126	21,93 %	144930	23,88 %
3-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	0,2104	22,74 %	263830	125,52 %
3-Duck 60 cm V-kannatusketju	0,2098	22,93 %	146290	25,04 %
3-Duck 45 cm delta	0,2010	26,18 %	216420	84,99 %
2xDuck asettelu 3	0,1907	29,95 %	151660	29,64 %
2xDuck asettelu 4	0,1862	31,61 %	151660	29,64 %
2xDuck asettelu 2	0,1789	34,29 %	301120	157,39 %
2xDuck asettelu 1	0,1769	35,03 %	162880	39,23 %
2xDuck asettelu 2, b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	0,1745	35,92 %	309270	164,36 %
2x2-Duck asettelu 3	0,1287	52,74 %	168790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 4	0,1241	54,40 %	168790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 2	0,1142	58,04 %	316760	170,76 %
2x2-Duck asettelu 1	0,1142	58,07 %	178670	52,72 %
2x2-Duck asettelu 2, b-vaihejohti- mien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	0,1109	59,26 %	324910	177,72 %

	Reaktanssi [ $\Omega$ /km]	Reaktanssin pienennys	Voimajohdon arvioitu hinta [€/km]	Rakennuskus- tannusten suu- reneminen
2-Duck 30 cm I-kannatusketju	0,2723		116990	
2-Duck 45 cm I-kannatusketju	0,2624	3,62 %	117840	0,73 %
2-Duck 30 cm V-kannatusketju	0,2693	1,10 %	118360	1,17 %
2-Duck 60 cm I-kannatusketju	0,2561	5,94 %	118990	1,71 %
2-Duck 45 cm V-kannatusketju	0,2596	4,68 %	119210	1,90 %
2-Duck 60 cm V-kannatusketju	0,2534	6,94 %	120360	2,88 %
2-Duck 30 cm delta	0,2534	6,93 %	131400	12,32 %
2-Duck 45 cm delta	0,2415	11,30 %	132250	13,04 %
3-Duck 30 cm I-kannatusketju	0,2360	13,32 %	135550	15,86 %
3-Duck 45 cm I-kannatusketju	0,2219	18,51 %	143210	22,41 %
3-Duck 30 cm V-kannatusketju	0,2330	14,43 %	143470	22,63 %
3-Duck 45 cm V-kannatusketju	0,2190	19,56 %	144580	23,58 %
3-Duck 60 cm I-kannatusketju	0,2126	21,93 %	144930	23,88 %
3-Duck 60 cm V-kannatusketju	0,2098	22,93 %	146290	25,04 %
2xDuck asettelu 3	0,1907	29,95 %	151660	29,64 %
2xDuck asettelu 4	0,1862	31,61 %	151660	29,64 %
2xDuck asettelu 1	0,1769	35,03 %	162880	39,23 %
2x2-Duck asettelu 3	0,1287	52,74 %	168790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 4	0,1241	54,40 %	168790	44,28 %
2x2-Duck asettelu 1	0,1142	58,07 %	178670	52,72 %
3-Duck 30 cm delta	0,2171	20,25 %	215070	83,84 %
3-Duck 45 cm delta	0,2010	26,18 %	216420	84,99 %
2-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	0,2621	3,73 %	256110	118,92 %
2-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	0,2509	7,85 %	256680	119,40 %
3-Duck 30 cm epäsymmetrinen delta	0,2258	17,06 %	262960	124,77 %
3-Duck 45 cm epäsymmetrinen delta	0,2104	22,74 %	263830	125,52 %
2xDuck asettelu 2	0,1789	34,29 %	301120	157,39 %
2xDuck asettelu 2, b-vaihejohtimien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	0,1745	35,92 %	309270	164,36 %
2x2-Duck asettelu 2	0,1142	58,04 %	316760	170,76 %
2x2-Duck asettelu 2, b-vaihejohti- mien etäisyyttä suurennettu 2,82 m	0,1109	59,26 %	324910	177,72 %