



Jere Tiuraniemi

110 kV:n ja 400 kV:n voimajohtodon vaihejärjestyksen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

19.01.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Jere Tiuraniemi
Otsikko:	110 kV:n ja 400 kV:n voimajohdon vaihejärjestyksen suunnittelu
Sivumäärä:	35 sivua + 1 liite
Aika:	19.01.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Yliopettaja Jarno Varteva Pääsuunnittelija Toni Aalto

Tämän insinööriyön tarkoitus oli päivittää ohjeistusta Eltel Networks Oy:n 110 kV:n ja 400 kV:n voimajohdon vaihejärjestyksen suunnitteluun. Nykyinen käytössä oleva ohjeistus vaihejärjestyksen suunnitteluun on kymmeniä vuosia vanha, mutta pääosin on vaihejärjestyksen suunnittelussa ollut vähintäänkin riittävä. Viime aikoina on kuitenkin ilmennyt, ettei vanha ohjeistus ole ollut riittävä tilanteissa, joissa olemassa olevan voimajohdon rinnalle on rakennettu uusi voimajohto.

Työssä käydään läpi vuorottelun vaikutusta voimajohtojen muodostamaan epäsymmetriaan, joka ilmenee muun muassa nollavirtana. Nollavirtaa ja näin ollen myös epäsymmetriaa muodostuu oikosulkutilanteissa, mutta myös rinnakkaisten voimajohdojen vaikutuksesta.

Työn tuloksena rakennettiin yksinkertainen laskentaohjelma, jolla pystyy tarkastelemaan impedanssien ja kapasitanssien, ja näiden kautta myös vuorottelun vaikutusta voimajohdon nollavirtaan. Johdot vaikuttavat toisiinsa sähkö- ja magneettikenttien kautta, joten työssä on myös käyty läpi näiden laskemiseen tarvittavia yhtälöitä johdon itseinduktanssista, keskinäisinduktansseista ja kapasitansseista. Voimajohdon virtoja ja jännitteitä laskiessa käytetään yleisesti T- tai π -sijaiskytkentää, joista π -sijaiskytkentä on yleisemmin käytetty. Kolmivaiheisen voimajohdon π -sijaiskytkennän virtojen ja jännitteiden ratkaisu sisällytettiin työhön.

Avainsanat: voimansiirto, voimajohto, vuorottelu, vaihejärjestys, nollavirta, avojohto, voimalinja

Abstract

Author: Jere Tiuraniemi
Title: 110 kV and 400 kV Update To The Overhead Line Phase Sequence Guideline
Number of Pages: 35 pages + 1 appendix
Date: 19 January 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Electrical power engineering
Supervisors: Jarno Varteva, Principal Lecturer
Toni Aalto, Head designer

The purpose of this work was to update the guidelines for the design of the phase-sequence of the 110 kV and 400 kV power line of Eltel Networks Oy's power transmission team. The current guidelines for phase sequence design are decades old, but for the most part have been at least adequate for phase sequence design. Recently however, it has become apparent that the old guidelines have not been adequate situations where a new power line has been built alongside an existing power line.

The work discusses the impact of transposition on the asymmetry of power lines, the effect of asymmetry on the transmission line and the effect of parallel transmission lines on each other. The impact of electric and magnetic fields on wires have also been covered in the work.

As a result of this work, the old guidelines have been found to be still valid, but not comprehensive, so the work has extended the current guidelines. In addition, a simple calculation program was built to check the influence of impedances as well as capacitances on the transmission line and thus to see the effect of transposition and phase sequence on the wires.

Keywords: power transmission, power line, overhead line, transposition, phase sequence, zero current

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suomen kantaverkko	1
3	Voimajohdon vuorottelu	5
4	Epäsymmetria ja symmetria	11
5	Nollavirta	12
6	Sähkö- ja magneettikentät	15
6.1	Itseisinduktanssi	16
6.2	Keskinäisinduktanssi	19
6.3	Carsonin korjauskertoimet	21
6.4	Kronin menetelmä	24
6.5	Kapasitanssit	24
6.6	Sijaiskytkentä	29
7	Yhteenveto	31
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1: Vaihejärjestyssuunnitelman malli	

Lyhenteet ja merkinnät

HVDC: *High Voltage Direct Current*. Suurjännitetasavirta, jota käytetään sähkön siirrossa.

I Virta

U Jännite

l Induktanssi

Z Impedanssi

Y Admittanssi

φ Magneettivuo

μ_0 Tyhjiön permeabiliteetti

μ_r Suhteellinen permeabiliteetti

ω Kulmataajuus

Ψ Sähkövuo

ε_0 Tyhjiön permittiivisyys

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tehdään Eltel Networks Oy:n toimeksiannosta päivitetty ohjeistus voimajohdon vaihejärjestyksen suunnitteluun. Eltel rakentaa, ylläpitää ja päivittää välttämättömiä sähkö- ja tietoliikenneverkkoja. Yhtiö on perustettu vuonna 2001 ja työllistää Pohjoismaissa, Puolassa, Saksassa ja Liettuassa yhteensä noin 5000 henkilöä. Maakohtaisesti suurin liikevaihto Eltelillä on Suomessa, jossa yhtiö on myös markkinajohtaja. Suomessa Eltelillä on yli 1500 työntekijää sekä yli 60 toimipistettä, kattaen koko Suomen etelästä pohjoiseen. Suomessa Eltelin palveluihin kuuluu mobiiliverkkopalvelut, sähköjakelun palvelut, sähköisen liikenteen ratkaisut, uusiutuvan energian palvelut sekä sähkönsiirron ja teollisuuden palvelut.

Työssä on ohjeistuksen lisäksi tarkoitus perehtyä vaihejärjestyksen vaikutukseen epäsymmetrian ja nollavirtojen kautta. Eltelissä on käytössä Imatran Voima Oy:n aikainen suunnitteluohje, joka on kirjoitettu 1990-luvulla. Tänä päivänä vaihejärjestykseen ja vuorotteluun on kiinnitetty entistä enemmän huomiota, ja on ilmennyt tapauksia, jossa vanhalla ohjeella suunniteltua vaihejärjestystä on jouduttu muuttamaan toteutusvaiheessa.

Nykyaikana uusien johtojen toteuttamiseen vaadittavien maankäyttölupien saaminen käy koko ajan hankalammaksi, joten olemassa olevia johtokatuja ja pylviä pyritään hyödyntämään myös uusissa johdoissa. Tämä johtaa myös siihen, että rinnakkaiset johdot vaikuttavat sähköisesti toisiinsa, minkä takia johdon toiminta häiriintyy, joten vaihejärjestyksen suunnittelun tärkeys korostuu entisestään. Hyvällä vaihejärjestyksen suunnittelulla pystytään kompensoimaan rinnakkaisten johtojen vaikutus toisiinsa lähestulkoon kokonaan.

2 Suomen kantaverkko

Suomen sähköjärjestelmä koostuu pääosin voimalaitoksista, kantaverkosta, alueverkoista, jakeluverkoista ja sähkönsiirtoverkkoista. Suomen sähköjärjestelmä on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää, johon kuuluvat Suomen lisäksi

Itä-Tanskan, Norjan ja Ruotsin järjestelmät. Lisäksi Suomen järjestelmään on tasasähköyhteys Virosta ja Venäjältä, joiden avulla yhteispohjoismainen järjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmään. (1; 2.)

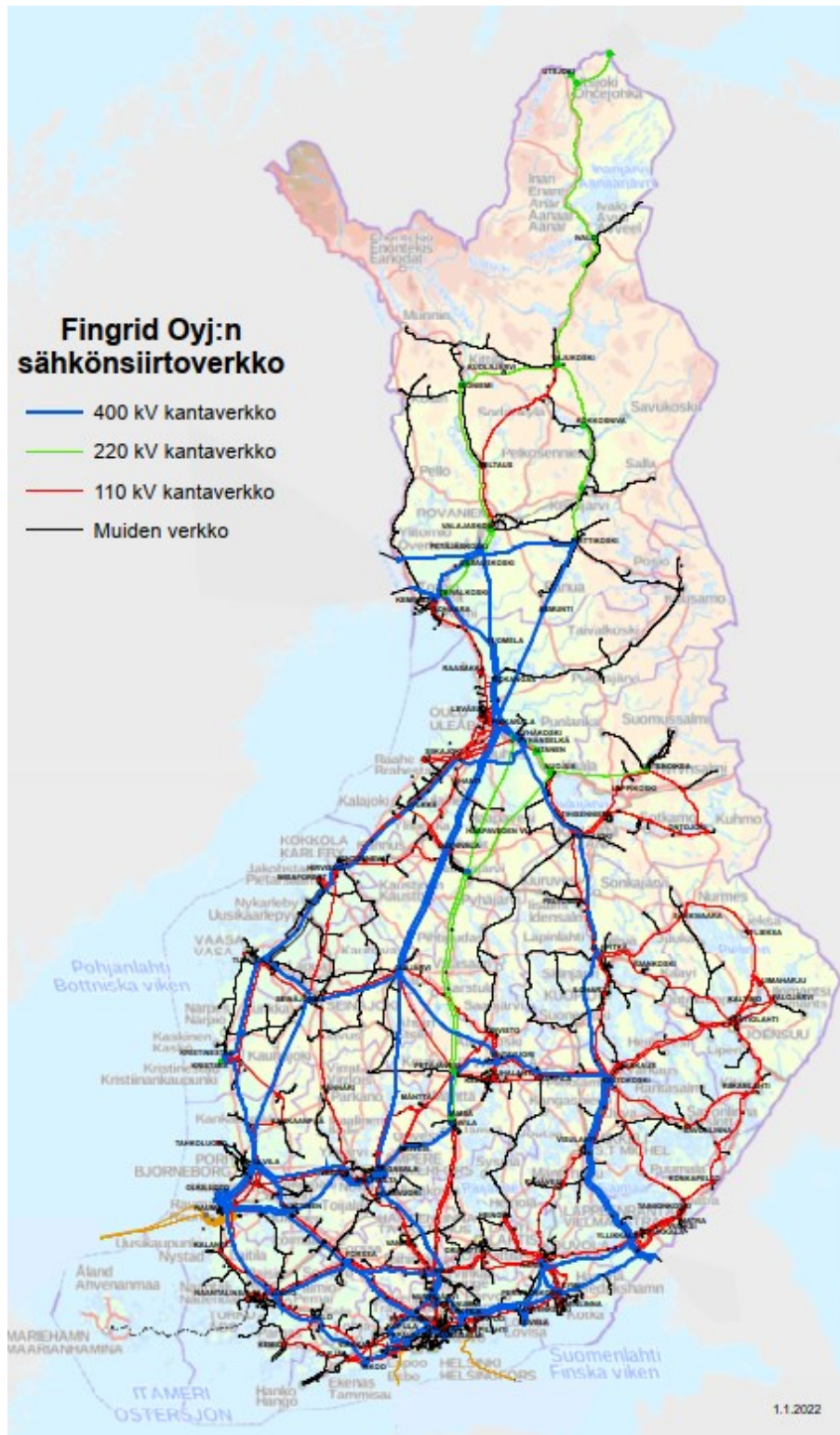
Kantaverkko

Suomen kantaverkon toiminnasta vastaa Fingrid. Kantaverkkoon kuuluu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n voimajohtoja sekä HVDC-kaapeleita, joiden kokonaispituudet Suomessa on ilmoitettu taulukossa 1. Kantaverkon pääasiallisena tehtävänä on siirtää sähköä sähköyhtiöille alueverkkoihin, joista siirretään sähkö jakeluverkkoihin ja kuluttajille. Kaapeleiden ja johtojen lisäksi kantaverkkoon kuuluu 116 sähköasemaa (2). Lisäksi kantaverkkoon kuulumattomia siirtojohtoja, eli alueverkkoja, jotka omistavat eri sähköyhtiöt, on noin 7500 km (3).

Taulukko 1. Voimajohtojen ja HVDC-kaapeleiden pituus Suomessa (2).

Jännite	400 kV	220 kV	110 kV	400-500 kV HVDC	150 kV HVDC
Pituus	5100 km	1300 km	7300 km	216 km	53 km

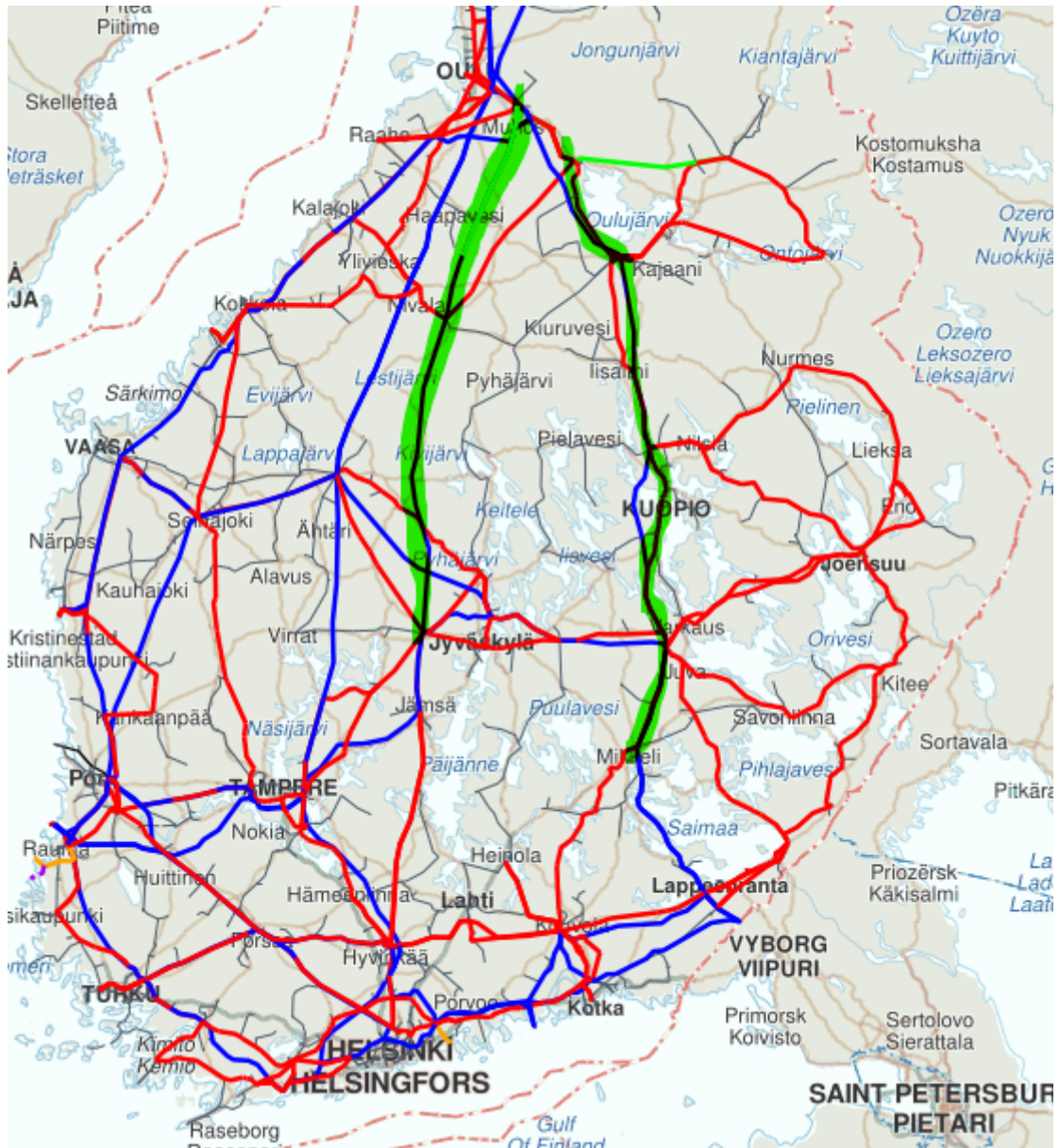
Kantaverkko kattaa koko Suomen alueen kuvan 1 mukaisesti, ja sen kautta kulkee noin 77 prosenttia kaikesta Suomessa siirretystä sähköstä (4).



Kuva 1. Suomen kantaverkko. Oranssit viivat ovat tasavirtakaapeleita. (5)

Tällä hetkellä Fingridillä on useampi pidempi voimajohtohanke, joka on joko suunnittelu- tai rakentamisvaiheessa (6). Näistä mainittakoon esimerkiksi

Metsälinja ja Järvininja, jotka kummatkin ovat noin 300 km pitkiä. Metsälinjan 400 kV:n voimajohto välillä Petäjävesi ja Oulunjoen Muhos tulee korvaamaan vanhoja 1940–1950 rakennettuja linjoja sekä tulee myös olemaan olemassa olevien voimajohtojen rinnalla osan reitistä (7). Järvininja, joka on 400 ja 110 kV:n voimajohdot välillä Nujuankangas ja Huutokoski, kulkee myös suurimmilta osin olemassa olevien voimajohtojen rinnalla (8). Kuvassa 2 näkyy merkattuna Metsälinjan sekä Järvinlinjan tulevat reitit.



Kuva 2. Metsälinja ja Järvininja merkattu vihreällä (5).

Edellä olevista kuvista sekä mainituista Fingridin projekteista voi huomata sen, että uudet, varsinkin suuremmat voimajohtohankkeet tulevat kulkemaan ainakin osittain jo olemassa olevien voimajohtojen rinnalla, mikä puolestaan nostaa voimajohdon vaihejärjestyksen suunnittelun tärkeyttä entisestään.

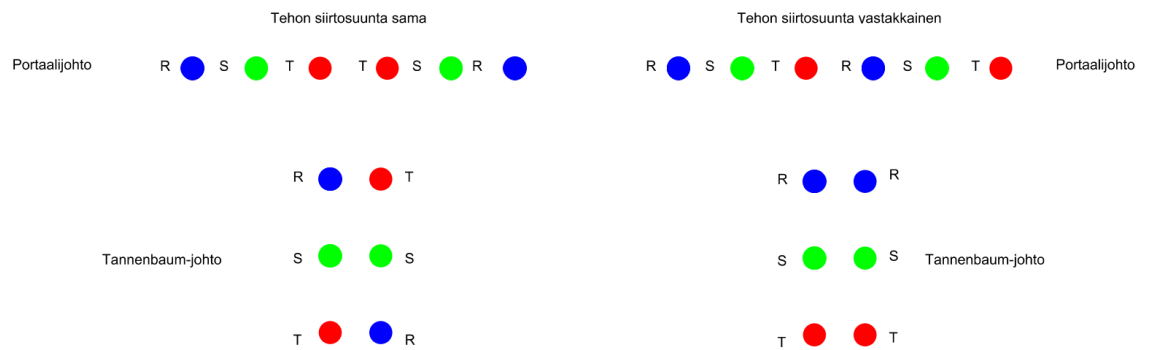
3 Voimajohdon vuorottelu

Siirtolinjoissa suunnitellaan vaihejärjestys, jotta johdolla ei ilmenisi epäsymmetriaa eikä nollavirtoja. Epäsymmetria synnyttää nollavirtoja, joka puolestaan luovat häiriötä ympäristöön sekä vaikuttaa nollavirtareleen toimintaan. Vaihejärjestyksen suunnittelussa tärkein osa on vaiheiden vuorottelu siten että jokainen vaihe on tietyssä kohtaa yhtä pitkän matkan, jolla saadaan kompensoitua epäsymmetriaa.

Suurjännitelinjojen pituudet voivat vaihdella muutamista kilometreistä satoihin kilometreihin. Johdon pituuden mukaan on yleensä myös voimajohtoon tehtävä vuorottelu. Vanhan Imatran Voiman ohjeen mukaan on vuorottelu tehtävä johdoille, jotka ovat pituudeltaan yli 12 km. (9.)

Vuorottelu tehdään sen takia että johdon sijaitessa pylväällä eri asemassa maahan ja toisiinsa nähden ovat vaihejohtimet sähköisesti erilaisessa tilanteessa. Tämä aiheuttaa johdolla epäsymmetriaa. Epäsymmetria voidaan kompensoida vuorottelemalla johdon vaiheiden asemaa pylväällä siten että jokainen vaihe on samassa asemassa yhtä pitkän matkan eli kolmanneksen johdon pituudesta. (9.)

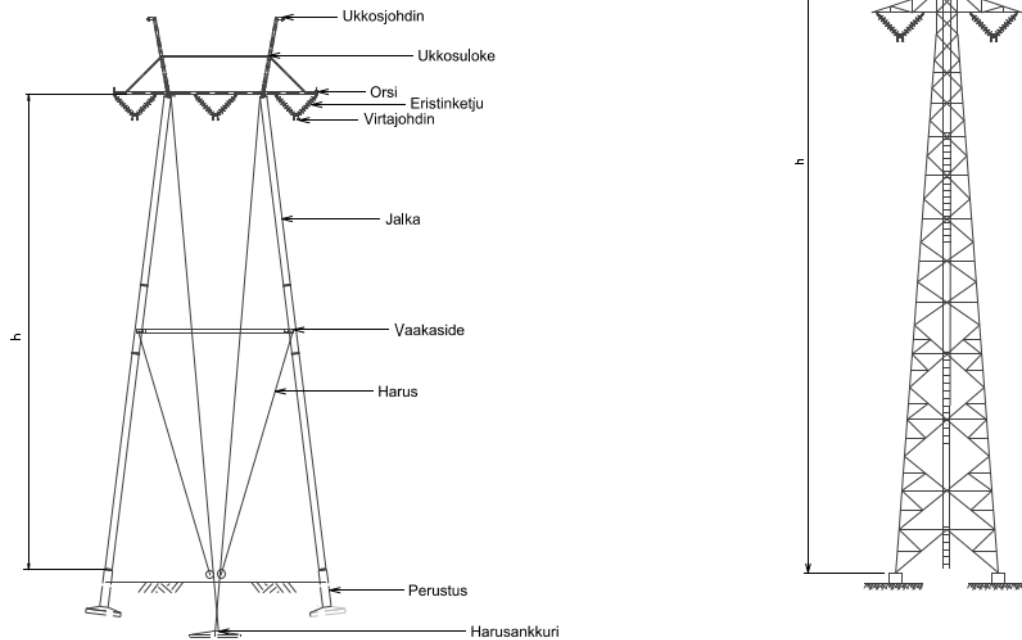
Vuorottelun lisäksi pyritään pitämään virtapiirit tietyssä järjestyksessä, jos niitä on useampi samassa pylväässä kuvan 3 mukaisesti. Järjestys määräytyy siirtosuunnan mukaisesti ja pylvästyyppin mukaan (9). Järjestyksen avulla voidaan kompensoida sähkö- ja magneettikentät, jotka vaikuttavat virtapiiristä toiseen. Tyypillisesti vaiheet ovat merkattuna seuraavasti: R=L1, S=L2 ja T=L3.



Kuva 3. Rinnakkaisten johtojen vaihejärjestys.

Portaalipylväessä vain keskimäinen vaihe on muihin nähden eri asemassa, joten vuorottelu on suunniteltava ja toteutettava siten että jokainen vaihe on yhtä pitkän matkan keskellä. Tannenbaum-johdolla pitää vuorottelu suunnitella ja toteuttaa siten että jokainen vaihe on yhtä pitkän matkan alimpana, ylimpänä sekä keskellä. (9.)

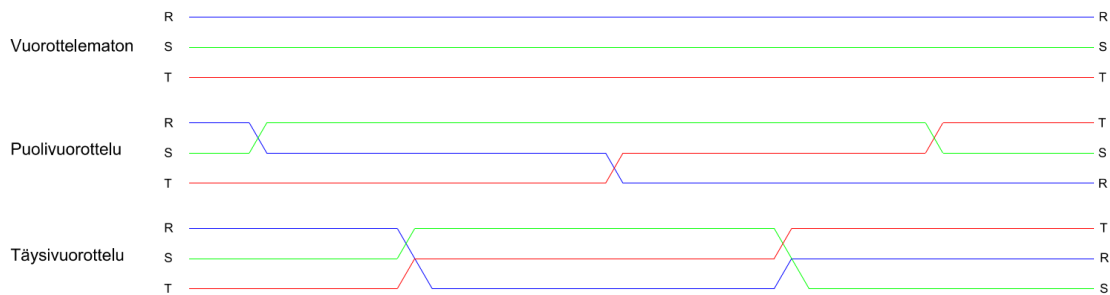
Käytännössä portaalijohto kulkee vaiheet vaakatasossa, ja yleensä myös matalammalla kuin Tannenbaum-pylväessä, ja vastaavasti Tannenbaum-pylväs on korkeampi, sekä vaiheet ovat päällekkäin. Kuvassa 4 on esitetty harustettu portaalipylväs osineen sekä Tannenbaum-pylväs. Näistä kahdesta pylvästä harustettu portaalipylväs on enemmän käytetty taajaman ulkopuolella, koska se on rakenteiltaan kevyempi ja näin ollen myös taloudellisempi. Haittapuolena harustetussa pylväessä tosin on sen vaatima pylväsala, joka on isompi kuin vapaasti seisovassa pylväessä. Taajamassa yleensä on käytössä Tannenbaum-pylväät niiden vaatiman pienemmän pylväsalan takia, sekä pylväs vie myös leveyssunnassa vähemmän tilaa. Harustetun portaalipylvään pylväsala on suurempi johdun jalkojen ja harusten etäisyydestä pylvään keskikohtaan eli juuripaaluun.



Kuva 4. Harustettu portaalipylväs ja Tannenbaum-pylväs.

Vuorottelu tehdään pääasiassa portaalipylväessä, koska virtajohtimet ovat rinnan, ja näin ollen vuorottelun jompit on helpompi toteuttaa. Tannenbaum-pylväessä johdon vuorottelua ei yleensä tehdä muuten kuin erikoistapauksissa, koska johtimet ovat päällekkäin. Tämän takia pääasiassa Tannenbaum-johdon vuorottelu tehdään siten että johdolle laitetaan portaalipylväs väliin, jossa vuorottelu tehdään, tai vaihtoehtoisesti vuorottelu tehdään sähköasemilla (9).

Johdolle tehdään joko puolivuorottelu tai täysivuorottelu. Pääasiassa puolivuorottelua käytetään 400 kV:n voimajohdoilla ja täysivuorottelua 110 kV:n voimajohdoilla (9). Puolivuorottelussa kaksi vaihetta kolmesta vaihtaa sijaintia, ja vastaavasti täysivuorottelussa kaikki kolme vaihetta vaihtavat sijaintia. Kuvassa 5 on havainnollistettu vuorottelematon voimajohto, puolivuoroteltu voimajohto sekä täysivuoroteltu voimajohto.



Kuva 5. Esimerkkejä vuorottelusta.

Työtä varten on haastateltu Fingridin rakentamisen sekä suunnittelun asiantuntijoita sähköpostitse (10). Haastattelun perusteella voi todeta, että normaalissa tilanteessa, jossa ei esimerkiksi uuden rakennettavan johdon rinnalla tai alla ole muita johtoja, vuorottelu tehdään siten että vaihejohtimet saapuvat oikeassa järjestyksessä sähköasemalle kuitenkin pyrkien pitämään johto symmetrisenä. Tilanteissa, joissa rakennetaan johto olemassa olevan johdon rinnalle, varsinkin jos johdot kulkevat rinnakkain pidempiä matkoja, tai niitä on kolme tai enemmän, ovat vuorottelut vaatineet tarkempaa suunnittelua ja mahdollisia muutoksia myös olemassa olevien johtojen vuorotteluun. (10.)

Eräässä Fingridin projektissa, jossa Eltel oli mukana, tarkasteltiin useampaa eri vaihtoehtoa vuorotteluille, joissa kolme voimajohtoa olisi harmonisoitu mahdollisimman hyvin, ja olisi toteutuskelpoinen. Käytännössä vuorottelun toteutettaviin muutoksiin vaikuttaa hyvin paljon pylvään sijainti ja itse pylväs, johtaen siihen että johtoa ei välttämättä voida harmonisoida parhaalla mahdollisimmalla tavalla. Myös tapauksissa, joissa johdon varrelle rakennetaan uusi sähköasema, joudutaan yleensä tekemään muutoksia johdon vuorotteluun.

Eräässä toisessa Fingridin esimerkkitapauksessa, jossa 400+110 kV:n johdolle (tarkoittaen että samoilla pylväillä on 400 kV:n ja 110 kV:n johdot päällekkäin) muodostui haasteeksi tilan puute tehdä uusia vuorotteluja 400 kV:n johdolle. Tilan puutteesta johtuen on alempaa 110 kV:n johtoa laskettava pylväällä, jotta vuorottelut voidaan tehdä 400 kV:n johdolle. Haastavuus tulee siitä, että johtoa

ei voi laskea millä pylväällä tahansa johtuen virtajohtimien maaetäisyydestä sekä itse pylvästä, joka ei välttämättä kestä suuria muutoksia rakenteisiin, sekä itse maastosta, johon on saatava raskaat työkoneet paikalle. Esimerkkita-pauksessa toteutus tehdään vuoden 2023 aikana, joten lopputulos jää vielä nähtäväksi. Vuorottelun suunnittelussa on myös siis otettava huomioon haas-teet toteutuksessa, jolloin hyvä kommunikaatio suunnittelun ja rakentamisen vä-lillä on tärkeää. (10.)

Vaihejärjestyksen suunnitelma

Vanhan ohjeistuksen mukaan vaihejärjestyksen suunnitelmasta on selvittävä luonnollisesti vuorotteluketjujen sijainti johdolla, pylväät, joissa vuorottelu teh-dään, sekä vaiheiden asennot ja matkataulukko. Vaiheiden asennot ilmaistaan portaalijohdoilla ilmansuunnilla ja johdoilla, joissa vaiheet ovat päällekkäin, teh-dään tikkukuva, josta selviää vaiheiden asennot katsomissuunta-merkinnöin. Näiden lisäksi dokumentissa tulee olla näkyvillä myös runkojohdon mahdolli-nessa haaroituskohdassa nuolet ja haarajohdon vaihejärjestysdokumentin nu-mero, dokumentissa olevien johtojen omistajat, rinnalla olevat johdot vähintään kahden jänteen pituudella sekä johdolla sijaitsevat erottimet.

Verrattaessa nykypäivän vaihejärjestyssuunnitelmia voi todeta, että suurin osa edellä mainituista ohjeista on vakiintunut suunnittelukäytäntöön. Vanhasta oh-jeesta poiketen uudemmissa suunnitelmissa myös ilmoitetaan kaikki johdolla olevat kiristyspylväät. Kiristyspylvään kiristysketjun merkki suunnitelmassa on ruksi sekä teksti "kiristysketjut pylväällä" tai vastaava. Johtimien asennot matka-aulukossa ilmaistaan tyypillisesti termein "ääri" ja "keski" ilmansuuntia käyttä-mättä portaalipylväällä, ja kun johtimet ovat päällekkäin termein "ylin", "keski", "alin". Rinnakkaisista voimajohdoista tyypillisesti merkataan jännitetaso, nimily-henne, suunnittelutunnus ja matka.

Liitteessä 1 on esitetty mahdollisimman laajasti suunnittelussa käytettävät mer-kinnät. Liitteessä ei ole todellista suunnitelmaa, vaan ajatuksena on tuoda

lukijalle tietoon mahdollisimman hyvin kaikki suunnitelmassa kerrottavat asiat, jotka ovat:

- ensimmäinen ja viimeinen pylväs
- toinen ja toiseksi viimeinen pylväs, nämä piirretään katkoviivana
- haarajohdot ja rinnalla olevat johdot
- mahdolliset väliketjut, erottimet sekä kiristysketjut
- pylväät, joissa tehdään vuorottelu
- vaiheiden asennosta pylväällä ”tikkukuvapiirros” katsomissuunta-merkinnöin
- matkataulukko, johon on kirjattu vaiheiden sijainti koko matkalta
- pylvästyypit tai -tyypit
- vaihe- ja ukkosjohtimet
- matka kuvassa esiintyvien pylväiden välillä
- johdon kokonaispituus ja suunnittelutunnus.

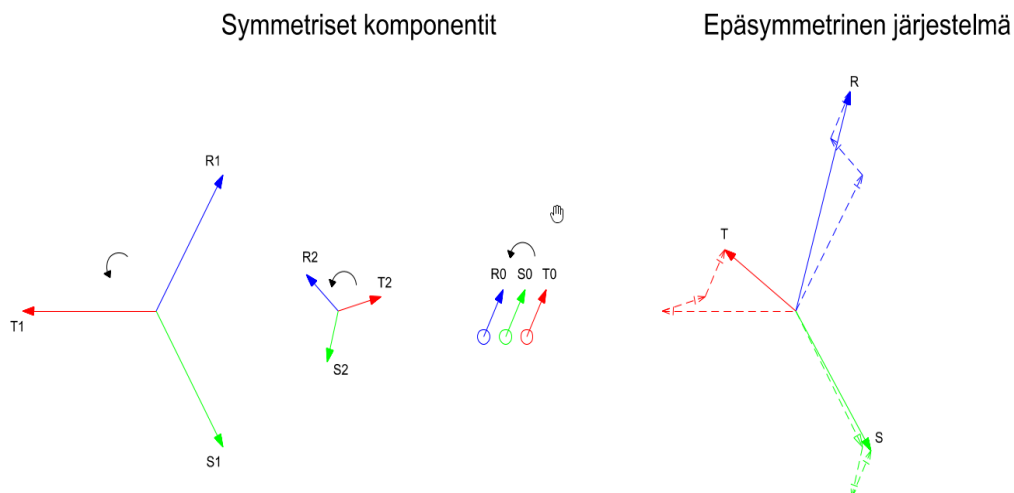
Tilanteessa, jossa rakennetaan voimansiirtojohto sellaiselle maalle missä ei ole muita voimansiirtojohtoja, on mielestäni järkevä käyttää vanhaa vuorottelun suunnitteluohjetta, eli vuorottelu suunnitellaan silloin kun johdon pituus on yli 12 kilometriä ja tehdään yksi täysi vuorottelukierros. Tämä sen takia koska suurin vaikutus nollavirran muodostumiseen tulee rinnakkaisilta voimajohtoilta. Suunniteltaessa voimajohtoa olemassa olevan johdon rinnalle on syytä suunnitella vuorottelu tarkemmin, mieluiten laskien johtojen vaikutus toisiinsa. Nollavirran suuruus johdoilla on myös riippuvainen johdon kuormituksesta ja rinnankulku-matkasta. Suuremmalla kuormituksella myös nollavirta kasvaa kummassakin

johdossa. Tilanteessa, jossa toinen rinnakkaisista johdoista on kuormittamaton ja toinen kuormitettu, ei kuormittamattoman johdon vuorottelu käytännössä vähennä nollavirtaa lainkaan. Nollavirran laskemiseen on olemassa kaupallisia ohjelmia, esimerkiksi PSCAD. Tämän työn yhteydessä on tarkoitus saada toimimaan nollavirtojen laskemisessa käytettävä Excel-ohjelma, jota pystyisivät käyttämään kaikki yhtiön suunnittelijat, jotka sitä tarvitsevat.

4 Epäsymmetria ja symmetria

Kun voimajohdon kuormitus on symmetrinen, tarkoittaa se sitä, että impedanssit vaihepiireissä ovat yhtä suuret, lisäksi symmetrisessä verkossa vaiheiden jännitteen sekä virran itseisarvot ja kulmat ovat yhtä suuret (11). Näin ollen myös kolmivaiheisen verkon virtojen summa on nolla. Vastaavasti epäsymmetrisessä tilassa kolmivaiheverkon vaihejännitteet ja -virrat eivät ole yhtä suuria. Näin ollen vaihevirtojen summakaan ei ole nolla, ja tästä muodostuu nollavirtaa, jota käsitellään seuraavassa luvussa.

Epäsymmetrisen järjestelmän voi jakaa symmetrisiin komponentteihin, mikä helpottaa epäsymmetrisen järjestelmän tilojen laskemista. Symmetriset komponentit ovat myötäkomponentti, vastakomponentti sekä nollakomponentti. Myötäkomponentin ja vastakomponentin ero on se, että vastakomponentissa kaksi vaihetta on vaihdettu keskenään verrattuna myötäkomponenttiin, joka myös muuttaa verkon pyörimissuunnan vastakkaiseksi. Nollakomponentissa kaikki vaihesuureet ovat samansuuruisia sekä samanvaiheisia. Kuvassa 6 on piirretty epäsymmetrinen järjestelmä symmetrisillä komponenteilla havainnollistamaan tekstiä. (12, s. 271.)



Kuva 6. Symmetriset komponentit ja epäsymmetrinen järjestelmä.

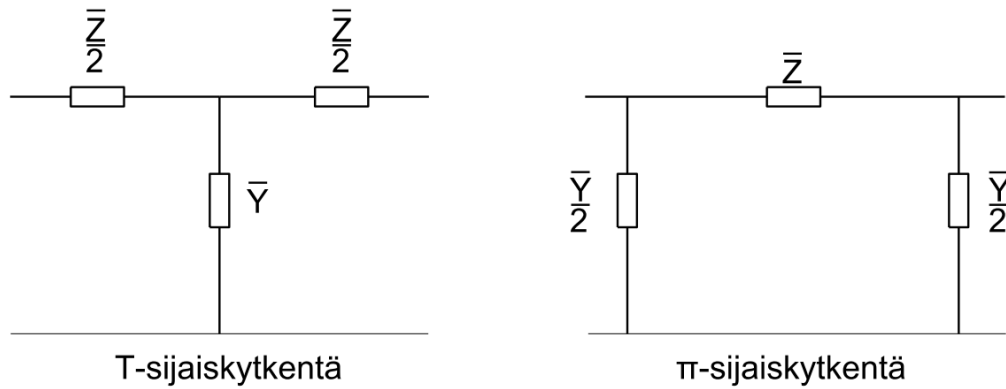
Kolmivaihejärjestelmään aiheutuu suurinta epäsymmetriaa tyypillisesti erilaisista vioista, esimerkiksi yksivaiheisesta oikosulusta eli maasulusta, kaksivaiheisesta oikosulusta sekä johtimen katkeamisesta (12, s. 270). Epäsymmetriaa ilmenee myös maadoitetun muuntajan tyhjäkäyntivirran kolmannen yliaallon vaikutuksesta, johtimista sekä voimajohtojen tapauksessa rinnakkaisista voimajohtoista. Pienjännitejohdoissa ilmenevää vinokuorman aiheuttamaa epäsymmetriaa ei suurjännitejohdoissa ole, koska toisin kuin pienjännitejohdoissa, suurjännitejohdoissa ei ole nollajohdinta. Nollajohtimen puuttuessa epäsymmetria ilmenee maata pitkin palaavana nollavirtana. (12, s. 233.)

5 Nollavirta

Sähköasemalla on nollavirtarele, jonka tarkoitus on suojata siirtojohtoa maasululta. Nollavirtarele on ylivirtarele, joka mittaa virtamuuntajien toisiokäämeistä vaihevirtojen summavirtaa. Nollavirtareleen toiminta-aika ilman hidastusta on sama kuin normaalilla ylivirtareleellä. Normaalilla nollavirtareleellä ei voi mitata vian suuntaa. Vaihtoehtoisesti sähköasemalla voi olla käytössä suunnattu maasulkurele, joka on nollavirtarele, joka mittaa myös vian suunnan nollavirran ja nollajännitteen välisestä vaihekulmasta (12, s. 21–22).

Voimajohdolla aiheutuu käytännössä aina nollavirtaa, vaikka johto ei olisi yksivaiheisessa oikosulussa. Nollavirtaa sekä virtaepäsymmetriaa aiheutuu varsinkin rinnakkaisilla johdoilla sähkömagneettisten kenttien kautta. Lisäksi myös johdon pituus vaikuttaa huomattavasti johdolla ilmestyvään nollavirtaan. Johdolla ilmenevä nollavirta normaalissa käyttötilanteessa on pidettävä mahdollisimman pienenä, koska johtoa valvovan nollavirtareleen toiminta häiriintyy ja katkaisee sähkön siirron, vaikka johdolla ei olisi vikaa. Nollavirtareleet on Fingridin sähköasemilla asetettu ennalta määritettyihin arvoihin, jotka ovat 110 kV:n johdolla 60 A, 220 kV:n johdolla 100 A ja 400 kV:n johdolla 225 A (10). Koska nollavirtareleet asetellaan ennalta määritettyyn arvoon, on voimajohdolla normaalissa käytössä ilmenevä nollavirta kompensoitava mahdollisimman hyvin, ettei johdolla aiheudu turhia sähkökatkoja. Käytännössä 110 kV sammutettuun verkkoon ei saa syntyä nollavirtoja juuri ollenkaan, 220 kV verkossa nollavirta pyritään pitämään alle 80 ampeerissa ja 400 kV verkossa pyritään nollavirta pitämään alle 150 ampeerissa (10).

Pitkillä siirtojohdoilla nollavirran syntyyn vaikuttaa johtojen impedanssi sekä rinnakkaisten johtojen sähkömagneettiset kentät. Tyypillisesti siirtojohtoa mallinnettaessa käytetään joko π - tai T-sijaiskytkentää, jos johto on alle 200 km pitkä. Yli 200 km pitkille johdoille käytetään π -sijaiskytkentää (11; 12 s. 137). Kyseisillä sijaiskytkennöillä voidaan mallintaa symmetrisesti kuormitetun vaihtovirtajohdon alku- ja loppupään jännitteet, muttei johdon varrella olevia. Laskentaohjelmissa pääsääntöisesti käytetään π -sijaiskytkentää (12, s. 50, 137). Työssä tehtävä laskentaohjelma perustuu myös π -sijaiskytkennän käyttöön. Sijaiskytkennät on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Sijaiskytkennät.

Voimansiirto johdon alku- ja loppupään jännitteiden ja virtojen kesken pätevät aina seuraavat yhtälöt (12, s. 50):

$$\begin{cases} U_a = AU_b + BIb \\ I_a = CU_b + DIb \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_b = DU_a - BIa \\ I_b = -CU_a + AIa \end{cases} \quad (2)$$

jossa U_a ja I_a ovat alkupään jännite sekä virta, U_b ja I_b loppupään virta. Sekä A, B, C ja D ovat siirtovakioita. π -kytkennän siirtovakiot saadaan yhtälöistä 3.

$$\begin{cases} A = 1 + Y_2Z \\ B = Z \\ C = Y_1 + Y_2 + Y_1Y_2Z \\ D = 1 + Y_1Z \end{cases} \quad (3)$$

jossa Y on admittanssi ja Z on impedanssi. T-kytkennän siirtovakiot saadaan yhtälöstä 4.

$$\begin{cases} A = 1 + YZ_1 \\ B = Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2 \\ C = Y \\ D = 1 + YZ_2 \end{cases} \quad (4)$$

siirtovakioissa myös pätee aina yhtälö

$$AD - BC = 1 \quad (5)$$

Sekä symmetrisessä π -kytkennässä myös

$$A = D \quad (6)$$

Tässä insinööriyössä on tarkoitus myös tehdä laskentaohjelma, jolla voidaan laskea johdon nollavirta sekä verrata vuorottelun vaikutusta nollavirtaan. Ohjelmaa ei kuitenkaan ole järkevää alkaa toteuttamaan tyhjästä, joten pohjana käytän työssä Jussi Rantasen (14) Teknisessä korkeakoulussa vuonna 2006 tekemää diplomityötä, jonka tuloksena on myös luotu vastaava ohjelma Excelissä toimivaksi. Rantasen diplomityö ”Rinnakkaisjohtojen kuormitusvirtojen aiheuttamien nollavirtojen määrittäminen kantaverkossa” tarjoaa hyvän teoriapohjan sekä laskuesimerkit vastaavanlaisen ohjelman luontiin. Käytännössä ohjelma perustuu laajennettuun π -malliin sekä silmukayhtälöihin eri tasoissa. Ohjelmaa käyttäessä laskennat on suoritettava iteratiivisesti, jotta lopputulos on tarpeeksi tarkka.

6 Sähkö- ja magneettikentät

Johdot vaikuttavat toisiinsa sähkö- ja magneettikenttien kautta, joten laskettaessa voimajohtojen vaikutusta toisiinsa on laskenta suoritettava näiden kenttien kautta. Sähkökenttä muodostuu jännitteestä ja magneettikenttä virrasta. Kun näiden kenttien vaikutukset saa laskettua, on mahdollista myös tarkastella johdolla ilmenevää epäsymmetriaa ja nollavirtaa. Seuraavissa alaluvuissa on tarkoitus käydä läpi, miten laskenta muodostuu ja mistä yhtälöt tulevat. Yhtälöitä on pelkistetty huomattavasti mutta haluttaessa lisää tietoa saa Martti Paavolan (12) vuonna 1975 julkaisemasta Sähköjohdot-kirjasta, johon tämä ja monet muut voimajohtojen sähköiseen laskentaan liittyvät työt perustuvat.

Johdinten sähköisiä arvoja laskiessa aloitetaan itseisinduktanssista ja keskinäisinduktanssista, joista päästään impedanssilaskentaan. Induktanssilaskennassa yleisesti oletetaan paluuvirran kulkevan peilikuvajohtimessa, koska nol-lajohtoa ei ole. Induktanssilaskenta suoritetaan magneettikenttien ja magneettivuon perusteella, jossa tarkastellaan sitä kiertovuota, joka syntyy tarkasteltavan johtimen ympärille. (12, s. 215–216; 14 s. 21.)

6.1 Itseisinduktanssi

Johtimen itseisinduktanssi lasketaan pyöreän johtimen sisäisen magneettivuon yhtälöstä, jonka tulos kertoo magneettivuon pituusyksikköä kohden (12, s. 216)

$$\varphi_{11s} = \frac{\mu_r \mu_0}{8\pi} i_1 \quad (7)$$

ja yhdistämällä kahden samansuuntaisen johtimen muodostama ulkoinen magneettivuon (12, s. 217)

$$\varphi_{11u} + \varphi_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 \ln \frac{r_0}{r_1} \quad (8)$$

jossa r_0 on suuri äärellinen arvo ja r_1 on johtimen säde, saadaan lopputulokseen yksivaihejärjestelmä, jossa on vaihe ja paluujohdin. Vaihejohtimen kokonaismagneettivuolle saadaan arvo yhtälöstä 9 (12, s. 217; 14 s. 22)

$$\varphi = \varphi_{11s} + \varphi_{11u} + \varphi_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{a_{12}}{r_1} \right) i_1. \quad (9)$$

a_{12} ollessa johtimien keskinäinen etäisyys toisistaan, ja kun $i_2 = -i_1$ sekä suhteellisen permeabiliteetin ollessa 1.

Yksivaihejohtimen käyttöinduktanssin määritelmän (12, s. 219)

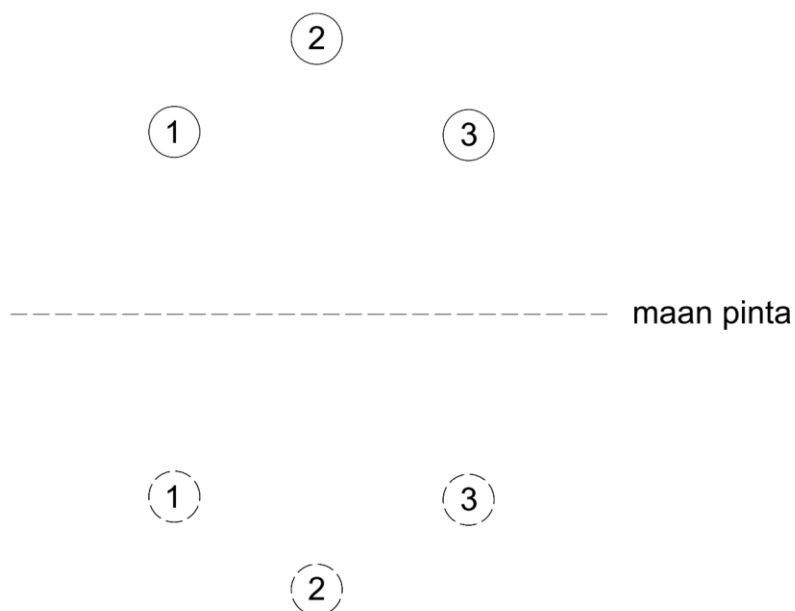
$$l_1 = \frac{d\varphi_1}{di_1} \quad (10)$$

mukaan saadaan johtimen induktanssiksi pituusyksikköä kohden (12, s. 220)

$$l_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{a_{12}}{r_1} + \frac{\mu_{r1}}{4} \right), \quad (11)$$

missä μ_{r1} johtimen suhteellinen permeabiliteetti.

Peilikuvajohdinta käytetään laskennassa helpottamaan Carsonin korjauskertoimien käyttöä. Todellisuudessa paluuvirta maata pitkin ei siis kulje peilikuvajohdinta pitkin. Carsonin korjauskertoimet kompensoivat paluuvirran kulkusyvyyden vaikutusta. Peilikuvajohdin sijoitetaan maan pinnan alapuolelle siten että peilikuvajohtimella on yhtä suuri etäisyys maan pintaan kuin reaalijohtimella (14, s. 24). Kuvassa 8 on esitetty kolme johdinta ja näiden peilikuvajohtimet.



Kuva 8. Johtimet ja peilikuvajohtimet. Peilikuvajohtimet katkoviivalla.

Koska johtimen etäisyys maahan ei ole vakio, on johtimen keskikorkeus määrittävä kiinnityspisteiden pystykoordinaatin ja johtimen riippuman avulla:

$$h = y - \frac{2}{3}f - 0,5 \quad (12)$$

missä y on kiinnityspisteiden pystykoordinaatti ja f johtimen riippuma. Mikäli kiinnityspisteet ovat eri korkeudella, voidaan se laskennassa huomioida käyttämällä näiden molempien korkeuksien keskiarvoa. Kun johtimen keskikorkeus on määritelty, voidaan laskea johtimen etäisyys peilikuvajohtimeen yhtälöllä

$$A_{11} = 2h. \quad (13)$$

Johdin myös muodostuu useasta johdinlangasta, joten laskennan tarkkuuden parantamiseksi on laskettava johtimen ekvivalenttisäde. Ekvivalenttisäde lasketaan johdinlankojen lukumäärän ja johdinlangan halkaisijan perusteella. Tyypillisesti Suomen kantaverkossa on käytössä ACSR-johtimia, joiden johdinlangat ovat pyöreitä. ACSR-johtimissa ulompi kerros johdinlankoja on alumiinia ja sisempi kerros terästä. Tällaisen johtimen ekvivalenttisäteen laskenta tehdään yhtälöllä

$$r_{ekv} = \sqrt{r_{m1}^2 * n_{m1} + r_{m2}^2 * n_{m2}}, \quad (13)$$

jossa r on johdinlangan säde ja n johdinlankojen määrä.

Kokonaisuuden laskentaa ajatellen tässä työssä on laskettu muutaman yleisesti käytetyn johtimen ekvivalenttisäde käytön helpottamiseksi taulukossa 2. Johdinten rakennetietojen lähteenä on käytetty Pyrsman groupin tuotekatalogia (15).

Taulukko 2. Johdinten ekvivalenttisäteet

Johdin	r_{m1}	r_{m2}	n_{m1}	n_{m2}	r_{ekv}
ACSR Duck	1,34	1,34	54	7	10,4657346
ACSR Finch	1,825	1,095	54	19	14,235
AACSR Sustrong	1,06	1,06	30	7	6,44772828

Edellä olevasta yhtälöstä 11 sekä peilikuvajohdinta hyödyntäen saadaan johtimien itseisinduktanssi korvaamalla yhtälöstä johtimien välinen etäisyys johtimen ja peilikuvajohtimen välisellä etäisyydellä (14, s. 23)

$$l_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{A_{11}}{r_1} + \frac{\mu r_1}{4} \right) \quad (14)$$

6.2 Keskinäisinduktanssi

Johtimet kytkeytyvät toisiinsa induktiivisesti, mikä kuvataan johtimien välisenä keskinäisinduktanssina. Laskenta on johdettu pyöreän johtimen ulkoisen magneettivuon yhtälöstä (12, s. 217)

$$\varphi_{11u} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 \ln \frac{r_0}{r_1}. \quad (15)$$

Seuraavaksi tarkastellaan johtimen 2 vaikutusta johtimen 1 ulkoiseen kiertovuohon yhtälöllä

$$\varphi_{12_v} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_2 \ln \frac{r_0}{a_{12}}. \quad (16)$$

Kaava on likiarvoistettu koska $a_{12} \ll r_0$. Jossa r_0 on etäisyys kaukana olevaan pisteeseen johtimelta 1.

Kun keskinäisinduktanssia lasketaan, otetaan myös huomioon rinnakkaisen johdon peilikuvajohtimen vaikutus tarkastelun kohteena olevalle johtimelle korvaamalla johdinten välinen etäisyys a_{12} etäisyydellä A_{12} , joka on rinnakkaisen johtimen peilikuvajohtimen ja tarkasteltavan johtimen etäisyys toisistaan. Rinnakkaisen johtimen peilikuvan vaikutuksen laskennassa on otettava huomioon, että vaikuttava virta kulkee vastakkaiseen suuntaan yhtälön 17 mukaisesti.

$$\varphi_{12.p} = \frac{\mu_0}{2\pi} (-i_2) \ln \frac{r_0}{A_{12}} \quad (17)$$

Näin ollen kokonaisvaikutus tarkasteltavan vaihejohtimen ympäröivään kiertovuohon on

$$\varphi_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_2 \ln \frac{A_{12}}{a_{12}}. \quad (18)$$

Tarkasteltavan johtimen oman peilikuvajohtimen vaikutusta ei tarvitse käsitellä, koska se on otettu huomioon itseisinduktanssin arvossa. Tästä saadaan keskinäisinduktanssin yhtälö

$$l_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{A_{12}}{a_{12}}. \quad (19)$$

Tämä keskinäisinduktanssi ei sellaisenaan riitä laskentaan, missä tarkastellaan nollavirtoja, joten sitä hyödynnetään yhdessä Carsonin korjauskertoimien kanssa.

Voimajohdolla voi myös olla, ja tyypillisesti onkin, useampi osajohdin jokaisessa vaiheessa, mitä myös nippujohtimiksi kutsutaan. Nämä nippujohtimet vaikuttavat voimansiirtokykyyn kasvattamalla kapasitanssia ja induktanssia sekä pienentämällä resistanssia (12, s. 227). Nippujohtimella myös pintakentänvoimakkuus pienenee, minkä seurauksena syntyy vähemmän koronahäviöitä. Nippujohtimia laskettaessa käytetään osajohtimista muodostuvaa geometrista keskipistettä, jonka mukaan määräytyvät keskinäisinduktanssia laskettaessa etäisyydet A ja a sekä vastaavasti peilikuvajohtimien etäisyydet. Tämä oletus on mahdollista silloin, kun osajohtimet ovat samassa potentiaalissa, johtimien säde on pienempi kuin johdinnippujen välinen etäisyys ja ne sijaitsevat toisiinsa nähden symmetrisesti. Tällä oletuksella osajohtimien määrä ei vaikuta keskinäisinduktansseihin, mutta sen sijaan osajohtimien määrä vaikuttaa itseisinduktansseihin.

Yksivaiheisen osajohtimen kokonaiskiertovuo saadaan laskemalla yhteen itse johtimen aiheuttama kiertovuo ja peilikuvajohtimen aiheuttama kiertovuo sekä lisäämällä nämä toisen johtimen aiheuttaman kiertovuon yhtälöön

$$\varphi_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(i_1 \frac{\mu_r}{4} + i_1 \ln \frac{A_{11}}{r_1} + i_2 \ln \frac{A_{12}}{a_{12}} + \dots + i_n \ln \frac{A_{1n}}{a_{1n}} \right) \quad (20)$$

Laskennassa oletetaan virran jakautuvan tasaisesti kaikille osajohtimille, joten edellisen yhtälön virrat voi korvata koko vaiheen virralla, josta yhtälö voidaan muuttaa muotoon

$$\varphi_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} i \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{\sqrt[n]{A_{11} * A_{12} * \dots * A_{1n}}}{\sqrt[n]{r_1 * a_{12} * \dots * a_{1n}}} \right). \quad (21)$$

Laskennassa käytetään osajohtimille keskimääräistä induktanssin arvoa, jota varten pitää olla tiedossa ekvivalenttietäisyys. Tällä ekvivalenttietäisyydellä oletetaan, että jokainen osajohdin on yhtä kaukana kaikista osajohtimien peilikuvista. Ekvivalenttietäisyys lasketaan geometrisenä keskiarvona

$$A_{ekv} = \sqrt[n]{\sqrt{(A_{11} * A_{12} * \dots * A_{1n}) * (A_{21} * A_{22} * \dots * A_{2n}) * (A_{n1} * A_{n2} * \dots * A_{nn})}} \quad (22)$$

jossa A_{12} on osajohtimen 1 etäisyys osajohtimen 2 peilikuvasta. Tämän avulla osajohtimen keskiarvoistettu induktanssi lasketaan yhtälöllä

$$l_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{A_{ekv}}{r_{ekv}} \right). \quad (23)$$

$$r_{ekv} = \sqrt[n]{r_1 * a^{n-1}} \quad (24)$$

Ekvivalenttisäteen yhtälössä 24 r_1 on osajohtimen säde ja a on osajohtimen 1 etäisyys osajohtimesta 2. Kyseinen kaava käy tapauksissa, joissa on käytössä kaksi tai kolme osajohdinta.

6.3 Carsonin korjauskertoimet

Kuten aiemmin on mainittu, paluuvirta ei todellisuudessa kulje peilikuvajohdinta pitkin, vaan maata pitkin jakautuen maaperän eri kerroksiin taajuuden ja

resistiivisyyden funktiona. Carsonin korjauskertoimien avulla huomioidaan paluvirran vaikutus johtojen impedansseihin. Carsonin kertoimia on käytetty vuosikymmeniä, koska kyseisten kertoimien käyttöä pidetään yleisesti luotettavana ja tarkkana, vaikka laskentatekniikka on vanha. (14, s. 23; 16, s. 2-27–2-30.)

Carsonin kertoimien käyttö aloitetaan jänniteyhtälöstä, joka on matriisimuodossa. Yhtälössä on matriisit syöttävän pään jännitteille, impedansseille sekä virroille. Koska maaperä on kuvattu ideaalisena johteena, ovat keskinäisimpedanssit täysin imaginaarisia. Tällöin myös itseisimpedanssit muodostuvat itseisinduktanssista ja resistanssista.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (25)$$

Yhtälössä 25 m on virtapiirien määrä ja n on johtimien määrä. Edellisten induktanssin laskentakaavojen avulla saadaan ratkaistua impedanssit yhtälöillä 26 ja 27.

$$Z_{11} = R_1 + j\omega l_{11} = R_1 + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{A_{ekv}}{r_{ekv}} \right) \quad (26)$$

$$Z_{12} = j\omega l_{12} = j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{A_{12}}{a_{12}} \quad (27)$$

Kun maaperää ei enää kuvata ideaalisena johteena, otetaan käyttöön Carsonin korjauskertoimet, joilla saadaan otettua huomioon maaperän epäideaalinen johtavuus

$$Z_{11} = R_1 + j\omega l_{11} = R_1 + \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(j \left(\frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{A_{ekv}}{r_{ekv}} \right) + 2(P + jQ) \right) \quad (28)$$

$$Z_{12} = j\omega l_{12} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(j \ln \frac{A_{12}}{a_{12}} + 2(P + jQ) \right) \quad (29)$$

missä P ja Q ovat Carsonin korjauskertoimet. Korjauskertoimet on alun perin määritelty päättymättöminä sarjoina, mutta kirjallisuuteen ja lähteisiin (14; 16) perustuen voi olettaa, että laskentaan riittävä tarkkuus saavutetaan neljällä ensimmäisellä sarjan termillä. Kertoimet P ja Q on määritelty seuraavilla yhtälöillä (16, s. 2-29)

$$P = \frac{8}{\pi} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos\theta + \frac{k^2}{16} \cos(2\theta) * \left(0,6728 + \ln \left(\frac{2}{k} \right) \right) + \frac{k^2}{16} \theta \sin(2\theta) + \frac{k^3 \cos(3\theta)}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi k^4 \cos(4\theta)}{1536} \quad (30)$$

$$Q = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{k} \right) + \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cos\theta - \frac{\pi k^2}{64} \cos(2\theta) + \frac{k^3 \cos(3\theta)}{45\sqrt{2}} - \frac{k^4 \theta}{384} \sin(4\theta) - \frac{k^4 \cos(4\theta)}{384} \left(\ln \left(\frac{2}{k} \right) + 1,0895 \right) \quad (31)$$

Kaavoissa esiintyvät muuttujat k ja θ määritetään eri tavoin laskiessa itseisimpedanssia ja keskinäisimpedanssia. Itseisimpedanssia laskiessa muuttujat määritellään seuraavien yhtälöiden mukaisesti

$$m = n$$

$$k = 2,81 * 10^{-3} * A_{11} * \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (32)$$

$$\theta = 0 \quad (33)$$

Yhtälöissä f on taajuus, ja ρ on maaperän resistiivisyys. Keskinäisimpedanssia laskiessa muuttujat määritellään seuraavasti

$$m \neq n$$

$$k = 2,81 * 10^{-3} * A_{12} * \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (34)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{H_{12}}{A_{12}} \right) \quad (35)$$

jossa H on johtimien 1 ja 2 horisontaalinen etäisyys toisistaan.

6.4 Kronin menetelmä

Kronin menetelmällä redusoidaan virtapiiristä mahdolliset ukkosjohtimet. Ukkosjohtimet on mahdollista redusoida impedanssimatriisista ja potentiaalikerroinmatriisista, jolloin ukkosjohtimissa kulkevia virtoja ja jännitteitä ei tarvitse laskea vaihevirtojen ja jännitteiden ratkaisemiseksi. Kronin menetelmällä saadaan lopulliset vaiheimpedanssit matriisimuodossa. Uusi impedanssi saadaan lasketua yhtälöllä (14, s. 45; 17, s. 3–5)

$$Z'_{mn} = Z_{mn} - \frac{Z_{mw} * Z_{wn}}{Z_{ww}} \quad (36)$$

missä alaindeksin w tarkoittaa ukkosjohtinta. Eli jos virtapiirissä on kaksi ukkosjohtinta, kummatkin redusoidaan vuorollaan samalla menetelmällä.

6.5 Kapasitanssit

Rinnakkaisten voimajohtojen keskinäisessä vaikutuksessa on induktanssien lisäksi myös olennaisena johtimien kapasitanssi. Johtimien kapasitanssit lasketaan Maxwellin potentiaalikerroimien avulla, joten ennen itse kapasitanssien laskemista on laskettava potentiaalikerroimet. (12, s. 243.)

Potentiaalikerroimien ratkaisu aloitetaan sähkövuon tiheyden yhtälöllä

$$D = \frac{d\Psi}{dA} \quad (37)$$

jossa dA on pinta, jonka lävitse $d\Psi$ kulkee. Sähkövuon tiheyden ja sähkökentän voimakkuuden kesken pätee yhtälö

$$D = \varepsilon K \quad (38)$$

Kun oletetaan yksivaihejohdon olevan niin kaukana maasta, että maan kapasitiivista vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon, on johtimien pituusyksiköllä olevien varausten hetkellisarvo q_1 ja $q_2 = -q_1$. Varaukset oletetaan jakautuneen tasaisesti johtimien pinnalle. Oletuksen voi tehdä, kun johtimen säde on pieni verrattuna niiden väliseen etäisyyteen, mikä avojohdoilla toteutuu aina. Hetkellinen sähkövuon tiheys, jonka johdin aiheuttaa x -säteisellä lieriöpinnalla, lasketaan yhtälöllä (12, s. 245)

$$d_1 = \frac{q_1}{2\pi x} \quad (39)$$

Sähkökentän voimakkuuden hetkellisarvo samassa paikassa voidaan ratkaista yhtälöllä 40.

$$k_1 = \frac{q_1}{2\pi x \varepsilon_0} \quad (40)$$

Kun sähkökentän voimakkuus ja varaus on ratkaistu, voidaan näistä laskea lieriöpinnan jännite maan suhteen.

$$u_1 = \frac{q_1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{x}{r_1} \quad (41)$$

jossa r_1 on johtimen säde. Paluujohtimen vaikutus potentiaaliin on myös otettava laskennassa huomioon ja se lasketaan yhtälöllä

$$u_2 = \frac{-q_1}{2\pi \varepsilon_0} \ln \frac{x}{r_2} \quad (42)$$

Johtimen ja paluujohtimen välinen jännite muodostuu siten yhtälöllä

$$u = u_1 - u_2 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{x^2}{r_1 r_2} \quad (43)$$

Peilikuvajohtimen avulla saadaan edellisestä kaavasta vielä laskettua johtimen ja maan välinen jännite. Tässä tilanteessa maataso toimii tasapotentiaalipintana, jonka suhteen johtimella on jännite

$$u = \frac{u_1 - u_2}{2} \quad (44)$$

Kun johtimen ja peilikuvajohtimen säteet merkitään yhteneviksi ja johtimien välinen etäisyys määritellään johtimen korkeuden avulla, voidaan maan ja johtimen välinen jännite laskea yhtälöllä

$$u_1 = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (45)$$

Korkeus h on johtimen keskikorkeus, jossa voidaan huomioida riippuma. Mieli-
valtaisen vaihejohtimen vaikutus pisteen Y potentiaaliin maan suhteen voidaan laskea peilikuvamenetelmällä. Johtimen osajännite saadaan yhtälöllä

$$u_{Y1} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{h}{a_{Y1}} \right) \quad (46)$$

jossa a on etäisyys pisteen Y ja johtimen 1 välillä. Peilikuvajohtimen osajännite lasketaan vastaavasti pisteen Y ja maatason välillä yhtälöllä

$$u_{Y2} = \frac{-q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{h}{a_{Y2}} \right) \quad (47)$$

josta saadaan johtimen ja peilikuvajohtimen synnyttävä potentiaaliero pisteseen Y yhtälöllä.

$$u_{Y1} + u_{Y2} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{a_{Y2}}{a_{Y1}}\right) \quad (48)$$

Edellisen yhtälöiden avulla voidaan laskea useampien johtimien aiheuttamat potentiaalierot. Jokaisen johtimen jännite on kaikkien siihen vaikuttavien osajännitteiden summa

$$u_1 = u_{11} + u_{12} + u_{13} \quad (49)$$

Johtimen itseensä aiheuttama osajännite saadaan aiemmin mainitusta yhtälöstä 46 ja muiden johtimien osajännitteet saadaan yhtälöstä 50, jossa mielivaltainen piste Y korvataan sen johtimen sijainnilla, jonka kohtaamat osajännitteet halutaan laskea (14, s. 41).

$$u_{12} = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{a_{12}}{a_{21}}\right) \quad (50)$$

Jos johdossa on osajohtimia, voidaan johdon osajohtimen vaikutus ottaa huomioon johtimen itsensä aiheuttaman osajännitteen yhtälöllä

$$u_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{A_{ekv}}{r_{ekv}}\right) \quad (51)$$

Maxwellin potentiaalikerroimien avulla voidaan muodostaa matriisiyhtälö, joka helpottaa kapasitanssien laskemista. Maxwellin potentiaalikerroimien mukaan saadaan yhtälö (12, s. 249; 14, s.42)

$$u_1 = q_1 p_{11} + q_2 p_{12} + q_3 p_{13} \quad (52)$$

josta saadaan matriisiyhtälö

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$q = uc \quad (54)$$

Näin ollen johtimen 1 varaus saadaan yhtälöllä

$$q_1 = u_1 c_{11} + (u_1 - u_2) c_{12} + (u_1 - u_3) c_{13} \quad (55)$$

ja kaikkien varauksien matriisiyhtälö on tällöin

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} + c_{12} + c_{13} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{21} & c_{22} + c_{21} + c_{23} & -c_{23} \\ -c_{31} & -c_{32} & c_{33} + c_{31} + c_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Varauksien matriisin ja potentiaalikerroimen käänteismatriisin avulla saadaan laskettua kapasitanssit yhtälöllä

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} + c_{12} + c_{13} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{21} & c_{22} + c_{21} + c_{23} & -c_{23} \\ -c_{31} & -c_{32} & c_{33} + c_{31} + c_{32} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Ukkosjohtimet voi redusoida Kronin menetelmää käyttäen potentiaalikerroinmatriisista käyttäen yhtälöä (14, s. 45; 17, s. 3–5)

$$p'_{mn} = p_{mn} - \frac{p_{mw} p_{wn}}{p_{ww}} \quad (58)$$

Nollakapasitanssi

Kolmivaiheisen voimajohdon vaihejohtimien nollakapasitanssit eli maakapasitanssit ovat yhtä suuret, kun johto on vuoroteltu. Vuorottelun takia jokaisen johtimen sijainti maahan nähden on kokonaisella vuorottelujaksolla keskimäärin sama. Yhden johtimen pituusyksikön nollakapasitanssi lasketaan yhtälöllä (12, s. 253)

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{2h(A)}{r(a)^2}} \quad (59)$$

jossa A on johtimen etäisyys peilikuvajohtimeen ja a johtimen etäisyys viereiseen johtimeen. Vuorotellun kolmivaihejohdon nollakapasitanssi vaihetta kohti saadaan, kun kerrotaan edellinen yhtälö johdon pituudella s ja sijoittamalla ϵ_0 arvo.

$$C_0 = \frac{1}{18} * 10^{-6} * \frac{1}{\ln\frac{2hA^2}{ra^2}} * \frac{s}{\text{km}} \text{ F} \quad (60)$$

Missä h on johtimen geometrinen keskikorkeus, a johtimen 1 geometrinen keskietäisyys johtimesta 2 sekä A geometrinen keskietäisyys johtimen 2 peilikuvasta. Yhtälöissä esiintyvä r on johtimen tai johdinnipun ekvivalenttisäde. (12, s. 254–255.)

Ukkosjohtimet vaikuttavat johtimen nollakapasitanssiin suurentamalla sitä. Vaikutus nollakapasitanssiin on suurempi kuin ukkosjohtimen vaikutus johdon käyttökapasitanssiin. Kahdella ukkosjohtimella suojatun kolmivaihejohdon virtajohtimen nollakapasitanssi lasketaan yhtälöllä 61.

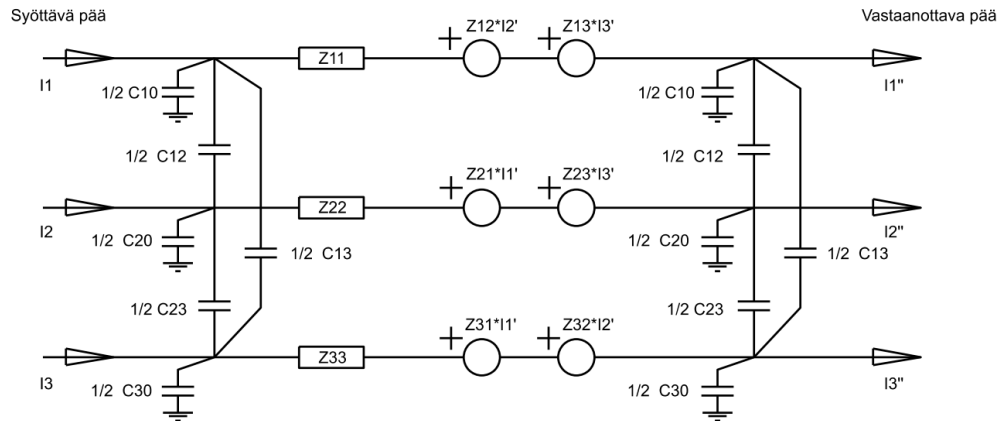
$$C_0 = \frac{1}{18} * 10^{-6} * \frac{1}{\ln\frac{2hA^2}{ra^2} \frac{6 \left[\ln\frac{B_e}{b_e} \right]}{\ln\frac{2kD}{r_u d}}} * \frac{s}{\text{km}} \text{ F} \quad (61)$$

missä D on ukkosjohtimen 1 etäisyys ukkosjohtimen 2 peilikuvaan, d ukkosjohtimen 1 etäisyys ukkosjohtimeen 2, B_e virtajohtimen tai virtajohdinnipun ekvivalenttietäisyys ukkosjohtimien peilikuviin 1 ja 2 sekä b_e virtajohtimen ekvivalenttietäisyys ukkosjohtimiin 1 ja 2. Ukkosjohtimen korkeus maasta on k sekä ukkosjohtimen ekvivalenttisäde r_u . (12, s. 261.)

6.6 Sijaiskytkentä

Kun voimajohdon johtovakiot on saatu selville, voidaan johto mallintaa sijaiskytkentää käyttämällä, josta on mahdollista laskea johdon loppupäässä ilmeneviä

virtoja ja jännitteitä. Aiemmin mainittu π -sijaiskytkentä näyttää kuvan 9 mukaiselta kolmivaiheisella voimajohdolla (14, s. 51).



Kuva 9. Voimajohdon π -malli.

Sijaiskytkentä on käytännössä kolme erillistä π -mallia, jotka on yhdistetty toisiinsa keskinäiskapasitanssein. Mallista on suhteellisen helppo ratkaista vastaanottavan pään virrat, koska jokaista johdinta käsitellään erillisenä. Laskenta aloitetaan johtimen keskiosan virroista, jotka lasketaan yhtälöllä 62 hyödyntäen yhtälöä 63.

$$I_i' = I_i - I_{i_{kap}} \quad (62)$$

$$I_{i_{kap}} = \left(\frac{U_i * j\omega C_{i0}}{2} + \sum_{j=1}^n \left[\frac{(U_i - U_j) * j\omega C_{ij}}{2} \right] \right), j \neq i \quad (63)$$

Vastaanottavan pään jännitteet voi ratkaista keskiosan virtojen avulla

$$U_i'' = U_i - (Z_{ii} * I_i' + \sum_{j=1}^n Z_{ij} * I_j'), j \neq i. \quad (64)$$

Jännitteiden ratkaisun jälkeen voidaan ratkaista vastaanottavan pään virrat yhtälöllä 65 hyödyntäen vastaanottavan pään jännitteitä yhtälössä 66.

$$I_i'' = I_i' - I_{ikap}''. \quad (65)$$

$$I_{ikap}'' = \left(\frac{U_i * j\omega C_{10}}{2} + \sum_{j=1}^n \left[\frac{(U_i - U_j) * j\omega C_{ij}}{2} \right] \right) - \left(\frac{U_i'' * j\omega C_{10}}{2} + \sum_{j=1}^n \left[\frac{(U_i'' - U_j'') * j\omega C_{ij}}{2} \right] \right), j \neq i \quad (66)$$

Tämä edellä läpi käyty sijaiskytkentä mallintaa siis yhden voimajohdon kolmella vaiheella, jossa lähtötietoina pitää olla johdon jännite ja virta alkupäässä. Pitkä voimajohto tyypillisesti tällaisissa laskennoissa jaetaan pienempiin osiin ja yhdistetään sarjakytkentänä toisiinsa tarkemman laskutuloksen saamiseksi. Laskennassa on myös mahdollista ottaa huomioon rinnalla oleva voimajohto yhdistämällä se keskinäiskapasitanssein tarkasteltavaan voimajohtoon. Laskentaa on myös mahdollista tarkentaa laskemalla iteratiivisesti π -mallilla ja silmukkamenetelmällä johdon virtoja ja jännitteitä, jolloin alkupään virtoja ei tarvitse olla tiedossa. Kirjoitushetkellä silmukkamenetelmän laskentaohjelman teko on vielä kesken, mutta kehitystyö sen parissa jatkuu.

7 Yhteenveto

Vaihejärjestyksen vuorotteluun on syytä kiinnittää huomiota sellaisissa tilanteissa, joissa suunnitellaan uutta voimajohtoa olemassa olevan johdon rinnalle. Tällaisissa tapauksissa on hyvin mahdollista, että voimansiirrossa voi ilmetä häiriöitä jopa lyhyilläkin matkoilla. Ertelin vanhan ohjeistuksen mukaan vain yli 12 kilometriä pitkät voimajohdot vuorotellaan, mutta tapauksissa, joissa on rinnakkaisia voimajohtoja, on syytä tarkastella jo lyhyemmälläkin voimajohdolla, onko vuorottelulle tarvetta, esimerkiksi laskemalla aiheutuvat epäsymmetriat.

Vanha ohjeistus on mielestäni pätevä vielä nykyäänkin varsinkin suunnitellessa voimajohtoa sellaiseen paikkaan, missä rinnakkaisia johtoja ei ole. Laskentaohjelman käyttö on todennäköisesti vähäistä silloin, kun johtovakiot pitää laskea ilman erikoisohjelmia. Vaikka johtovakioiden laskennassa käytetyt yhtälöt on mahdollista laskea käsin, se on vähintäänkin aikaa vievää. Kaupallisilla alaan keskittyvillä suunnitteluohjelmilla tosin on mahdollista laskea johtovakiot itse

johdon suunnittelun ohella, jolloin virtojen ja jännitteiden laskenta on suhteellisen nopeaa.

Lähteet

- 1 Kantaverkko 90 vuotta. 2019. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kantaverkko-90/>>. Luettu 22.7.2022.
- 2 Suomen sähköjärjestelmä. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahko-jarjestelma/>>. Luettu 22.7.2022.
- 3 Alueverkon pituus. 2021. Verkkoaineisto .Säteilyturvakeskus. <<https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>>. 20.1.2021. Luettu 22.7.2022.
- 4 Fingridin sähkösiirtoverkko. 2022. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>>. Luettu 22.7.2022.
- 5 Fingrid Oyj:n sähkösiirtoverkko. 2022. Kartta. Fingrid Oyj. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/sahkonsiirto/a3_kartta_selite_22.pdf>. 1.1.2022. Luettu 09.11.2022
- 6 Rakennamme alustaa puhtaalle sähköjärjestelmälle. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/?tag=3463&pageSize=5&page=1&language=fi>>. Luettu 22.7.2022.
- 7 Metsälinja - 400 kilovoltin voimajohtoyhteys Petäjävedeltä Ouluun. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/arkisto/metsalinja_rakentaminen/>. Luettu 09.11.2022.

- 8 Järvilinjan vahvistaminen. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/hankkeet/jarvilinjan-vahvistaminen/>>. Luettu 09.11.2022.
- 9 Vuorotteluohje. 1991. Sisäinen materiaali. Eltel Networks Oy.
- 10 Huhtanen, Ulla; Uusitalo, Risto & Raussi, Tommi. 2023. Sähköpostikeskustelu. Fingrid Oyj. 3.1.2023.
- 11 Korpinen, Leena. Sähköverkko. Verkkoaineisto.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/yksivaiheinen_symmetrinen.pdf> Luettu 1.8.2022.
- 12 Paavola, Martti. 1975. Sähköjohdot. Porvoo:WSOY.
- 13 Kuusisto, Arttu. 2017. Sähköaseman ylivirta- ja maasulkusuojausasettelujen määrittäminen. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 14 Rantanen, Jussi. 2006. Rinnakkaisjohtojen kuormitusvirtojen aiheuttamien nollavirtojen määrittäminen kantaverkossa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.
- 15 ACSR ja AACSR. 2013. Tuotekatalogi. Prysmian Group.
<https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/ACSRjaAACSR.pdf>. Luettu 1.9.2022.
- 16 Lings, Raymond J. 2005. EPRI AC Transmission Line Reference Book-200 kV and Above, Third Edition. Electric Power Research Institute.

- 17 Full Line Constants. 2020. Verkkoaineisto. Power Line Systems.
<https://www.powline.com/technotes/PLS_Full_Line_Constants.pdf>. Luettu 3.12.2022.

Vaihejärjestys suunnitelman malli

