

Jaakko Alfred Pääkkölä

LAPIN 110 kV:n SAMMUTETTU VERKKO

LAPIN 110 kV:n SAMMUTETTU VERKKO

Jaakko Alfred Pääkkölä
Opinnäytetyö
Syksy 2020
Sähkötekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, Sähkötekniikka

Tekijä: Jaakko Alfred Pääkkölä
Opinnäytetyön nimi: Lapin 110 kV:n sammutettu verkko
Työn ohjaaja: Heikki Kurki
Työn valmistumisaika: Syksy 2020
Sivumäärä: 74 + 1

Tämä opinnäytetyö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:lle. Projekti ja opinnäytetyö sisältää kehityshankkeen, joka on kirjoitettu julkaistavana versiona.

Sammutetulla verkolla tarkoitetaan järjestelmää, jossa yksi tai useampi verkon päämuuntajan tähtipiste on maadoitettu sammutuskuristimen kautta. Kuristimen tarkoituksena on toiminnallaan pienentää maasulkuvirtoja ja edesauttaa verkon normaalia käyttöä.

Normaalissa käyttötilanteessa Lapin 110 kV:n sammutettu verkko voidaan jakaa kolmeen eri sammutusalueeseen. Sammutusalueet elävät dynaamisesti verkon jakorajojen muutosten mukaisesti ja näin ollen opinnäytetyö suoritettiin sammutustilanteen päivitystä ja hallintaa kehittävänä projektina. Lisäksi katsottiin tarpeelliseksi suomenkielinen koottu opinnäytetyön muodossa oleva julkaisu sammutetun verkon teoriasta, käytöstä ja ominaisuuksista.

Kehitysprojektissa lisätään reaaliaikatiedon määrää Fingridin käytönvalvontajärjestelmään, mikä toteutetaan ala-asema- ja reaaliaikatiedonlisäyksillä. Reaaliaikatiedonvaihto tulee parantamaan vasteaikoja ja tätä voidaan hyödyntää sammutusrajausten yhteydessä. Lisäksi uutta tietoa tullaan saamaan eri kytkentätilanteista ja verkon säädölle luodaan etäohjausmahdollisuudet jatkokehitystä varten.

Opinnäytetyön käytännön osuus koostuu toteutuksesta, projektin valvonnasta, palveluntoimittajarajapinnassa tapahtuvasta vuorovaikutuksesta ja jälkiselvityksestä projektin vaikutuksiin. Projekti aloitettiin 1.3.2020 esiselvityksellä, jonka jälkeen se muutettiin 1.5.2020 opinnäytetyöksi.

Teoriaosuudessa käydään läpi peruseriaatteet sammutuskuristimen käytöstä tehomuuntajan tähtipisteessä kapasitiivista virtaa sammuttavana passiivisena komponenttina. Lisäksi työn teoriaosuudessa käydään läpi kaikki yleisimmät 110 kV verkon vikatilanteet ja sammutuskelan kautta kompensoidun verkon ominaisuuksia, joilla se vastaa näihin tilanteisiin. Teoriaosuudessa pohditaan myös hyötyjä ja haasteita voimajärjestelmän käytön, eli kytkentätilanteilla hallitun ja turvatus tehonsiirron näkökulmasta, nimellisjännitteeltään 110 kV:n sammutetussa verkossa.

Opinnäytetyön yhteydessä kertyneet koestus- ja käyttöönottopöytäkirjat ovat luottamuksellisia ja ne on sisällytetty ainoastaan toimeksiantajan käyttöön jäävän raportin liitteisiin.

Asiasanat: sammutuskuristin, nollakapasitanssi, resonanssi, epäsymmetria, siirtoverkko

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Electrical and Automation Engineering, Electrical Engineering

Author: Jaakko Alfred Pääkkölä
Title of thesis: 110kV Resonant Earthed Grid in Lapland
Supervisor: Heikki Kurki
Submitted time: Autumn 2020
Number of pages: 74 + 1

This thesis has been made for Finnish transmission system operator Fingrid Oyj. This project and thesis contain development work for the transmission system operator, and it is written in a publishable version.

In normal operation, Lapland's 110 kV resonant earthed grid can be divided into three different arc suppressing circuits. However, the suppressing grid behaves dynamically in the situations, where the allocation limit of the grid changes. Updating the grid operational state and development of the real time information exchange are the main reasons for this project. In addition, a complied thesis of usage and theory of resonant earthed grid was considered also necessary.

The progressive real time information exchange is implemented with new small remote terminal units. In addition, the new real-time information will be utilized in connection with limits by increasing the real-time information for grids supervisory control and data acquisition system.

The theoretical part of this thesis contains information about coil operation in between the system neutral and earth. Petersen coil is considered as an extinguished passive component, which suppresses the fault current to limits, where the residual fault current is at its minimal level.

The practical part of the thesis is based on implementation, project control, service provider interaction and evaluation of the project influences. Project was started in 1.3.2020 with pre-corrective actions followed by a change into thesis in 1.5.2020.

In addition, the theory chapters introduce all common fault types in 110 kV grid and the efficacy or effect of Petersen inductor to those situations. It is also appropriate to introduce symmetrical components so that we can also consider asymmetrical operating situations and faults that are important from the viewpoint of this thesis. Resonant earthed grid is also considered from the perspective of operator use.

Furthermore, distribution and transmission have differences in building and operating resonant earthed grid and that must be considered.

Keywords: resonant coil, capacitance to earth, resonance, asymmetry, transmission network

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
1.1	Toimeksiantajan esittely	9
1.2	Sammutettu verkko Suomessa.....	10
2	VERKON SYMMETRIA JA EPÄSYMMETRIA.....	13
2.1	Siirtoverkon symmetria	13
2.2	Siirtoverkon epäsymmetria	14
3	PÄÄMUUNTAJIEN TYYPILLISET MAADOITUSTAVAT SIIRTOVERKOSSA	18
3.1	Reaktanssin kautta maadoitettu verkko.....	20
3.2	Tehollisesti maadoitettu verkko	23
3.3	Sammutettu verkko	28
3.4	Maasta erotettu verkko.....	30
4	SAMMUTETTU SIIRTOVERKKO	33
4.1	Petersenin kela.....	34
4.2	Viritys ja resonanssi	35
4.3	Maasulkusuojaus.....	40
5	SAMMUTUSTARPEEN LASKENTA.....	48
5.1	Avojohtojen maakapasitanssien laskenta ilman ukkosköysiä	48
5.2	Avojohtojen maakapasitanssien laskeminen ukkosköysillä	51
5.3	Suurjännitekaapelit ja sammutettu verkko	57
5.4	Kompensointitarpeen kokonaisuuden muodostaminen	58
5.5	Kapasitanssien epäsymmetria ja sen vaikutukset	59
6	LAPIN SAMMUTETTU SIIRTOVERKKO.....	61
6.1	Verkon ominaisuuksia	61
6.2	Maaperän vaikutus	61
6.3	Maasulkujen tarkastelu.....	63
7	PROJEKTI	66
7.1	Aloite, esisuunnittelu ja hankintapäätös	66
7.2	Tilaus ja suunnittelu.....	66
7.3	Tehdas- ja kelpuutustestit.....	67
7.4	Asennukset.....	67
7.5	Koestukset ja käyttöönotot	69

7.6	Jatkokehitys.....	70
LÄHTEET	72
LIITTEET	75

Selitteet

Seuraavat suureet ovat tehollisarvoja, ellei toisin mainita:

U_L = vaihejännite

U_{L-L} = pääjännite

U_n = nimellisjännite

U_1 = myötäjärjestelmän jännite

U_2 = vastajärjestelmän jännite

U_0 = nollajännite

$3U_0$ = kolminkertainen nollajännite

U_{en} = epäsymmetriajännite

U_{NE} = tähtipisteen ja maan välinen jännite

U_{max} = suurin mahdollinen jatkuva pääjännite (jos ei määritelty $c * U_{L-L}$)

a = vaihesiirtokerroin (siirto-operaattori)

c = standardin IEC 60909 mukainen kerroin vikavirtalaskuissa (1,1 suurjännitteillä)

I_n = nimellisvirta

I_1 = myötäjärjestelmän virta

I_2 = vastajärjestelmän virta

I_0 = nollajärjestelmän virta

I_f = maasulkuvirta

I_{re} = vastuksen tuottama reaaliarvoinen virta

I_C = maasulkuvirran kapasitiivinen osuus

I_{RES} = jännösvirta sammutetussa järjestelmässä

$3I_0$ = todellinen epäsymmetriavirta

$I_E = -3I_0$ = epäsymmetriavirtojen maavirta (huomioiden suunta ja mittamuuntajan napaisuus)

I_{EW} = ukkosköönsien virta

r = reduktiokerroin = $(3I_0 - I_{EW})/3I_0$

iEs = herkkä maasulkuvirta

I_{NSTr} = mitoitettu lyhytaikainen epäsymmetriavirta

Z = impedanssi

Z_1 = myötäjärjestelmän impedanssi

Z_2 = vastajärjestelmän impedanssi

Z_0 = nollajärjestelmän impedanssi

Z_f = vikaimpedanssi

Z_y = muuntajan rakenteesta ja maadoitustavasta syntyvä impedanssi

R = resistanssi

X_0 = nollajärjestelmän reaktanssi

R_0 = nollajärjestelmän resistanssi

L_0 = nollajärjestelmän induktanssi

C_e = maakapasitanssi = C_s = itseiskapasitanssi pituusyksikköä kohden = C_0 = nollakapasitanssi

C_R = käyttökapasitanssi

f = taajuus

ω = kulmataajuus = $2\pi f$

ϵ_0 = tyhjiön permittiivisyys

ϵ_r = eristeen suhteellinen permittiviteetti

$3G_E$ = konduktiivisia linjahäviöitä kuvaava admittanssi

A_{eq} = geometrinen keskietäisyys johtimen ja peilikuvan välillä vuorotellussa järjestelmässä

a_{eq} = vaihejohtimien geometrinen keskietäisyys

h_{eq} = johdinten keskimääräinen korkeus maasta

h_j = johtimen keskikorkeus maasta riippuma huomioiden

p = potentiaalikerroin

\mathbf{P} = potentiaalikerroinmatriisi

a = eristimen hohtosuojan säde

c = etäisyys johtimen keskipisteestä kaapelin keskipisteeseen

RTU = kaukokäytön ala-asema

SCADA = valvontaohjelmisto

PJK = pikajälleenkytkentä

AJK = aikajälleenkytkentä

PTEF = transientti maasulkusuojaus

PSDE = herkkä suunnattu maasulkusuojaus

PDEF = maasulkusuojaus

AZVT = nollajännitesuojaus

PDIS = distanssisuojaus

RREC = jälleenkytkennät

TWFL = kulkuaaltomittaus

1 JOHDANTO

1.1 Toimeksiantajan esittely

Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa pääosin Suomen suurjännitteisestä sähkönsiirrosta sekä ylläpitää eurooppalaista tasoa ja luotettavuutta sähkömarkkinoilla. Fingrid Oyj:n tärkein tehtävä on turvata luotettavat siirtoyhteydet ja sähkönlaatu Suomessa ja näin ylläpitää sähkömarkkinoita tuottajien sekä kuluttajien näkökulmasta. Suurin osa kantaverkkoon liittyvistä sähkön tuottajista ja kuluttajista liittyy Suomessa 110 kV:n jännitetasoon, joka tekee tästä kantaverkkoasiakkaille kriittisimmän jännitetason. Tuulivoimateknologian kehityksessä ja ympäristökysymysten painoarvojen kasvassa tuulivoima lisääntyy myös Lapin alueella. Suomen tuulivoima-ala tavoittelee 30 TWh:n vuosituotantoa vuoteen 2030 mennessä. Näin myös Lapin 110 kV jännitetason siirtoyhteydet tulevat saamaan entistä tärkeämmän yhteiskunnallisen tehtävän. (1, s. 2; 2, s. 6.)

Siirtovarmuuden kehittäminen on jatkuvaa yhteiskunnallisesti tärkeää työtä markkinoiden, tuottajien sekä kuluttajien näkökulmasta ajateltuna. Kehityshanke on osa jatkuvaa siirtovarmuuden kehitystä ja hankkeella pyritään entistä parempaan ja ajantasaisempaan tilannekuvaan sekä reaaliaikaisen tiedonvaihdon mahdollistamaan jatkokehitykseen. Kehityshankkeen aikana kehitetään työkalut järjestelmän tilannekuvan ylläpitoon käytönvalvontajärjestelmän kautta. Kehitystoimet antavat paremmat edellytykset suuremmalle käyttäjämäärälle verkkotilanteiden tarkkailuun ja tehokkaisiin toimiin vikatilanteiden aikana.

Työ on tilattu ja suunnattu ensisijaisesti sähköalan ammattihenkilöille opinnäytetyönä koottuna kokonaisuutena. Edellytyksenä oletetaan, että lukijalla on teorian tietoa sähkövoimatekniikan perusteista. Lisäksi lukijaa auttaa käytännön kokemus sähköasemaolosuhteissa työskentelystä kytkin- sekä muuntolaitoksilla. Kohderyhmänä on lisäksi muut sähkönsiirto- ja markkina-alalla työskentelevät muiden alojen ammattilaiset, jotka ovat kiinnostuneita verkon toiminnallisesta teoriasta. Tämän työn taustalla on ollut selvä tarve kootulle suomenkieliselle sammutetun verkon teoriaosuudelle, joka on helposti luettavissa opinnäytetyön muodossa.

Aiheen käsittelyn helpottamiseksi perehdytään ensin siirtoverkon symmetria- ja asymmetriatilanteisiin. Tässä osuudessa esitetään lyhyesti verkon symmetria ja keskitytään asymmetria- eli epäsymmetriatilanteisiin, joissa verkon ominaisuudet tulevat ilmi. Lisäksi perehdytään syvemmin sammutettuun siirtoverkkoon ja sammutuskuristimen säätöön, sekä käsitellään sammutustarpeen laskeutusta. Työn yhteydessä tarkastellaan myös tarkemmin Lapin 110 kV:n sammutettua verkkoa ja sen ominaisuuksia, käyttöä sekä hyötyjä erilaisissa vikatilanteissa. Lopuksi käydään kehityshanke perusteellisesti läpi, pyritään selittämään verkossa tapahtuneita ilmiöitä ja pohditaan jatkoa.

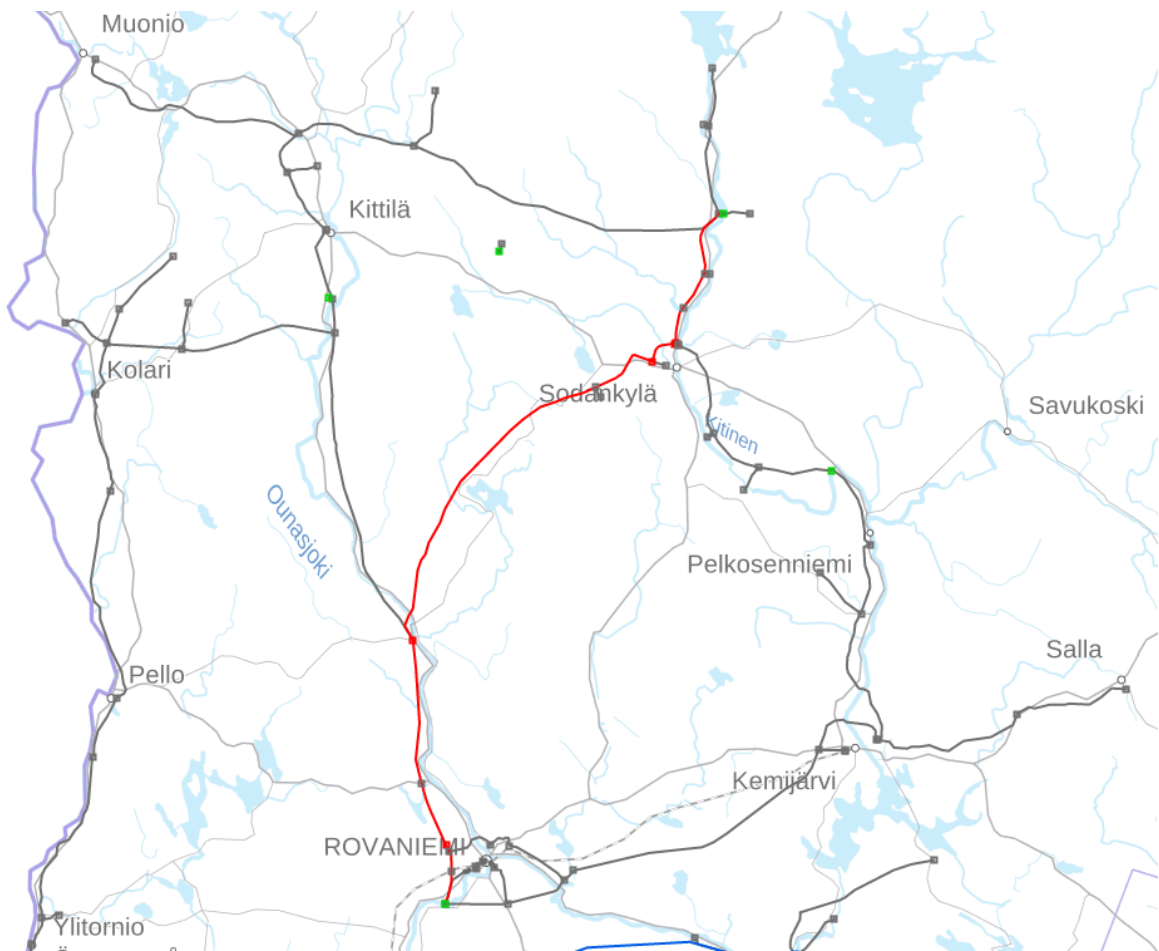
1.2 Sammutettu verkko Suomessa

Verkkotyypit ja tähtipisteiden maadoitusratkaisut ovat perustana sähkönsiirrolle ja -laadulle sekä turvallisuudelle. Vikatilanteiden jännitteisiin, virtoihin ja keston voidaan vaikuttaa verkon maadoitusratkaisulla ja näin myös vaarajännitteitä voidaan rajoittaa valitsemalla tilanteeseen soveltuvien ratkaisujen. Laitteisto on suunniteltava niin, että asiakkaan ja käyttäjien vaatimukset täyttyvät ja henkilöiden turvallisuus on varmennettu kaikkialla, missä kulkeminen on heille sallittua. Tämä tarkoittaa sitä, että vikatilanteiden automaattinen poiskytkentä tai vikavirtojen rajoittaminen on perusteltua ja välttämätöntä. Yhtenä tähtipisteen maadoitusratkaisuna käytetään sammutettua verkkoa. Suomessa sammutettua verkkoa käytetään ainoastaan kantaverkon osalta Lapissa pääjännitteeltään 110 kV:n jännitetasossa sekä jakeluverkkoyhtiöillä 110 kV:n ja 20 kV:n jännitetasoissa. Kantaverkkoyhtiö omistaa ainoastaan tietyt johto-osuudet, jotka muodostavat pohjan siirtoverkolle. Nämä runko-osuudet, jakeluverkkoyhtiöiden verkosto-osuudet ja sähköntuottajat muodostavat normaali-ikäisessä käyttötilanteessa Lapin sammutettuun verkkoon kolme erillistä aluetta. Alueet on suojattu yhdellä tai useammalla sammutuskuristimella eli sammutuskelalla, ja ne liittyvät kantaverkkoon Fingridin tai muun organisaation omistamilta muuntoasemilta. (3, s. 26 - 36.)

Työssä tutkitaan sammutettua 110 kV:n jännitetasoista verkkoa ja käsitellään tähän pohjautuvaa kehityshanketta. Lapin sammutettu verkko on omistusrajoiltaan moniosainen. Tutkimuksen kohteena on erityisesti sammutuskuristimien säätö ja ominaisuudet vikatilanteissa. Verkon sammutusalueilla tapahtuvia jakorajamuutoksia on tutkittu käytännön tilanteissa ja näistä saatuja tuloksia sovelletaan työssä. Työn aikana pyritään käsittelemään ja osoittamaan verkossa tapahtuvia ilmiöitä mahdollisimman kattavasti niin teoreettisesti kuin käytännön esimerkkien avulla.

Kehityshankkeen aineistona ja tutkimuksen tukena on käytetty IEEE- kirjaston julkaisuja, ulkomaalaista kirjallisuutta, Fingrid Oyj:n sisäisiä lähteitä, IEC- standardeja, SFS- standardeja, suomalaista kirjallisuutta ja muita alaan liittyviä julkaisuja.

Kuvassa 2 on esitettyä Suomen suurjännitteinen siirtoverkko ja kuva 1 rajaa näkyviin 110 kV:n sammutetun verkon kokonaisuuden Lapin verkosta. Selkeyden vuoksi kuvasta 1 on poistettu 220 kV:n voimalinjat. Vihreä väri kuvaa nimellisjännitteeltään 220 kV:n jännitetasossa olevaa verkkoa ja sinisellä värillä kuvataan 400 kV:n siirtoverkkoa. Punaisella kuvataan Fingridin nimellisjännitteeltään 110 kV:n verkkoa ja harmaalla jakeluverkkoyhtiöiden siirtoverkkoa 110 kV:n jännitetasossa.



KUVA 1. Lapin 110 kV:n sammutetun verkon verkkokartta. Kuvasta poistettu nimellisjännitteeltään 220 kV:n kantaverkon voimalinjat. Huomioidaan, että ainoastaan 110 kV:n jännitetasossa tähtipisteitä on maadoitettu sammutuskuristimilla Lapin sammutetussa verkossa. (7.)



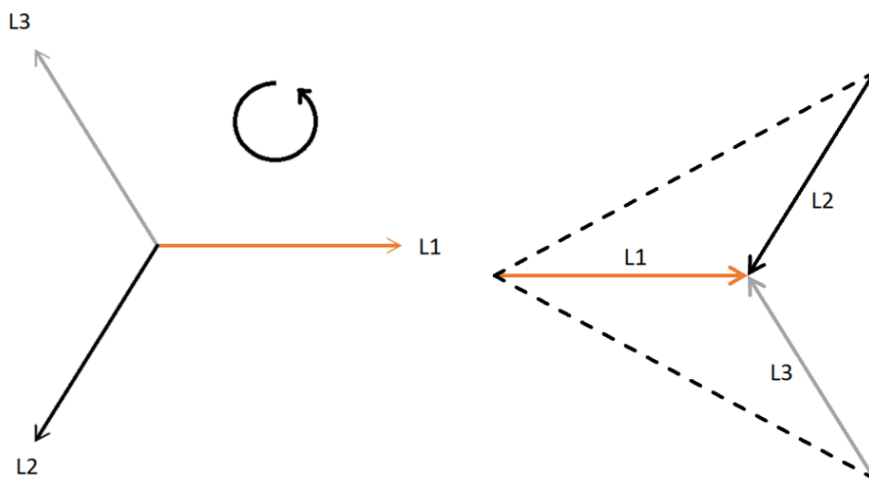
KUVA 2. Suomen suurjännitteinen siirtoverkko 2020 (8).

2 VERKON SYMMETRIA JA EPÄSYMMETRIA

Sammutetussa verkossa tapahtuvien ilmiöiden ymmärtämisen helpottamiseksi on syytä aluksi käsitellä verkon symmetriaa ja epäsymmetriaa. Sammutetun verkon hyödyt ja perusidea perustuvat epäsymmetriseen vikatilanteeseen eli yksivaiheiseen maasulkuun. Tarkastelussa vaaditaan perusymmärrystä myötä-, vasta- ja nollajärjestelmästä. (6, s. 7; 9, s. 283 - 285.)

2.1 Siirtoverkon symmetria

Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä vaihejännitteiden välinen vaihe-ero on 120° . Yksikköympyrässä esitettynä symmetrisen järjestelmän kiertosuunta on L1, L2, L3 tai R, S, T. Osoittimet voidaan esittää tehollisarvoina 50 Hz:n taajuudella vastapäivään pyörivänä järjestelmänä. Teoreettisesti täysin symmetrisessä järjestelmässä verkossa ei synny jännitteiden nollakomponentteja. Siirtoverkossa mahdollisimman symmetrisen tilanteen saavuttaminen edellyttää onnistunutta vaihevuorottelua. Kuvassa 3 on esitettyä verkon symmetrisen järjestelmä. Työn kannalta on tärkeää ymmärtää järjestelmän kiertosuunta ja tähtipisteen sijainti pääjännitteiden muodostaman kolmion sisällä, kun oletetaan tähtipisteen olevan terveessä käyttötilanteessa nollapotentiaalissa. Tässä työssä puhuttaessa pääjännitteestä tarkoitetaan tällä 10 min keskiarvoa, jonka tulee olla 95 % ajasta 105 - 122 kV:n jännitetasossa. Järjestelmän pääjännitteen nimellisarvo on 110 kV ja nimellinen vaihejännite $\frac{110 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$. (4, s. 253-261; 5, s. 13-22; 1, s. 3.)



KUVA 3. Vasemmalla symmetriset vaihejännitteiden osoittimet ja oikealla kuva tähtipisteen kelluvasta sijainnista pääjännitteiden muodostaman kolmion sisällä symmetriatilanteessa.

2.2 Siirtoverkon epäsymmetria

Yleisin syy epäsymmetriatilanteille on epätasapainossa olevat kuormitusilanteet, kuormaimpe-
danssit ja epäonnistuneet vaihevuorottelut. Tämän lisäksi epäsymmetriaa järjestelmään aiheutta-
vat esimerkiksi epäsymmetriset vikatilanteet, joissa jännitteet eivät ole tasapainossa keskenään.
Epäsymmetriset tilanteet voidaan mallintaa jakamalla järjestelmä kolmeen symmetriseen tilantee-
seen hyödyntäen symmetrisiä komponentteja. (4, s. 253 - 261; 6, s. 7.)

Niin kuin aikaisemmin todettiin, symmetrisessä järjestelmässä vaiheiden välinen ero on 120° .
Koska haluamme mallintaa epäsymmetrisiä tilanteita, tavoitteena on esittää eri vaiheet suhteutet-
tuna samaan kulmaan. Tässä käytämme hyväksi vaihejännitteitä ja a -vaihesiirtokerrointa, joka on
vektorioperaattori. Tämä operaattori siirtää osoittimen vaihekulmaa 120° vastapäivään. Voidaan
muodostaa kolme tarvittavaa operaattoria. On huomioitava, että näiden yhteydessä eksponentilla
ei ole matemaattista merkitystä. (10, s. 8 - 10; 6, s. 7 - 9.)

$$a = 1\angle 120^\circ \ominus, a^2 = 1\angle 240^\circ \ominus, a^3 = 1\angle 360^\circ \ominus \quad \text{KAAVA 1}$$

Esitetään vaihejännitteet myötäjärjestelmässä kiertosuunnalla L1, L2, L3 vaihesiirtokertoimen
avulla:

$$\begin{aligned} U_{L1} &= U_{L1} = U_{L11} \\ U_{L2} &= U_{L1} * a^2 = U_{L21} \\ U_{L3} &= U_{L1} * a = U_{L31} \end{aligned} \quad \text{KAAVA 2}$$

Vastajärjestelmässä tarkastellaan järjestelmää vaihtamalla vastapäivään pyörivän järjestelmän vai-
hejärjestys L1, L3, L2. Näin pyörimissuunta säilyy samana, mutta tarkastelu tapahtuu kuin myötä-
päivään pyörivässä järjestelmässä. Suhteuttamalla muu järjestelmä vaiheeseen U_{L1} siirto-operaat-
torilla vastajärjestelmästä saadaan (10, s. 8-18; 6, s. 7-9):

$$\begin{aligned} U_{L1} &= U_{L1} = U_{L12} \\ U_{L2} &= U_{L1} * a = U_{L22} \\ U_{L3} &= U_{L1} * a^2 = U_{L32} \end{aligned} \quad \text{KAAVA 3}$$

Nollajärjestelmässä kaikkien vaiheiden kulmat ovat samat sekä jännitteet yhtä suuret (10, s. 8-18;
6, s. 7-9).

$$U_{L10} = U_{L20} = U_{L30} \quad \text{KAAVA 4}$$

Järjestelmän kolminkertainen nollajännite on tällöin laskettavissa kaavan 5 avulla.

$$3U_0 = U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} \quad \text{KAAVA 5}$$

Näiden perusteella vaihejännitteet voidaan ilmoittaa järjestelmien osoittimien summana sekä matriisimuodossa (10, s. 8-18; 6, s. 7-9; 11, s. 428-430).

$$\begin{aligned} U_{L1} &= U_{L10} + U_{L11} + U_{L12} = U_{L10} + U_{L1} + U_{L1} \\ U_{L2} &= U_{L20} + U_{L21} + U_{L22} = U_{L20} + a^2U_{L1} + aU_{L1} \\ U_{L3} &= U_{L30} + U_{L31} + U_{L32} = U_{L30} + aU_{L1} + a^2U_{L1} \end{aligned} \quad \text{KAAVA 6}$$

$$\begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ U_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad \text{KAAVA 7}$$

Kuvassa 4 on esitettyä erään distanssireleen häiriötallenteen toisiopiirin mitaamat arvot redusoiduna ensiöpiiriin eli primääripuolen arvoihin epäsymmetrisen vikatilanteen aikana. Ensiö- ja toisiopiirin arvoista puhuttaessa tarkoitetaan näillä mittamuuntajien ylä- ja alajännitearvoja.

iL1	93,9 A	157,2°
iL2	97,6 A	30,0°
iL3	108 A	-86,4°
uL1	3,02 kV	152,2°
uL2	114 kV	-10,8°
uL3	114 kV	-72,4°

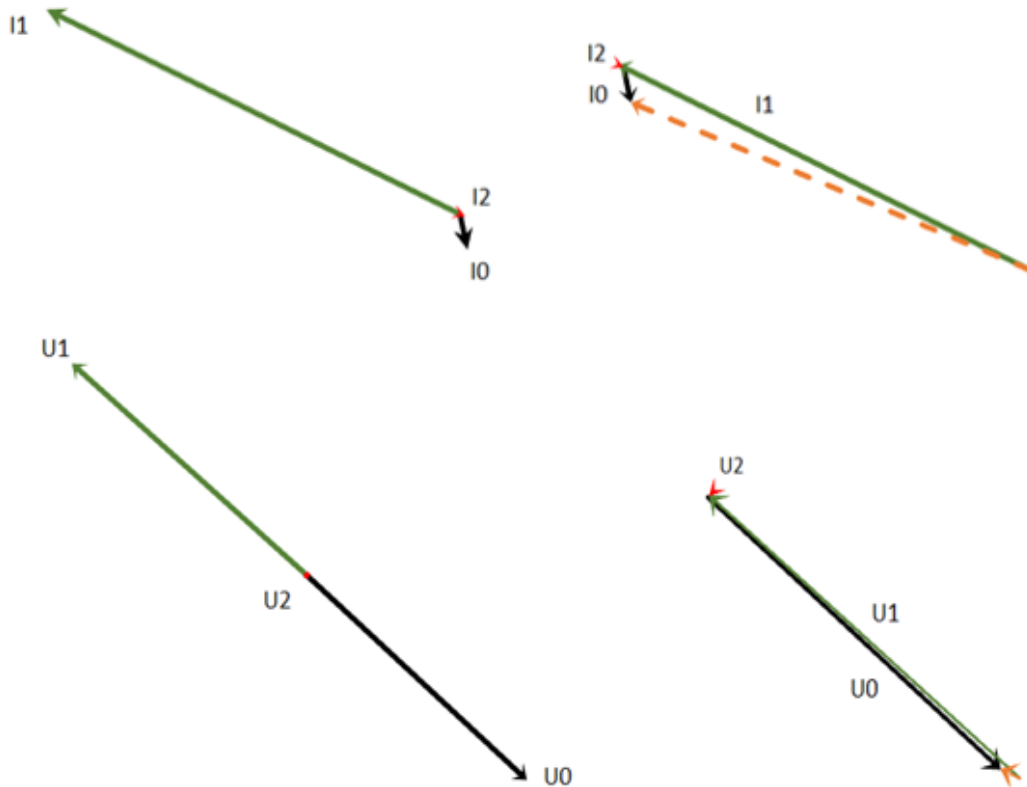
KUVA 4. Distanssireleen mitaamat vaihevirrat ja -jännitteet epäsymmetrisen verkkovian aikana (12).

Kun tiedetään epäsymmetriatilanteen vaihevirtojen ja -jännitteiden suuruudet sekä kulmat, pystytään jakamaan nämä myötä-, vasta- ja nollajärjestelmään edellä mainitulla tavalla. Matriisilaskennan laskusääntöjen mukaisesti voimme yksinkertaistaa laskentaa ja selvittää komponentit myös seuraavien yhtälöiden avulla: (11, s. 428 - 430.)

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{3}(U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}) \\ U_1 &= \frac{1}{3}(U_{L1} + aU_{L2} + a^2U_{L3}) \\ U_2 &= \frac{1}{3}(U_{L1} + a^2U_{L2} + aU_{L3}) \end{aligned} \quad \text{KAAVA 8}$$

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \\
 I_1 &= \frac{1}{3}(I_{L1} + aI_{L2} + a^2I_{L3}) \\
 I_2 &= \frac{1}{3}(I_{L1} + a^2I_{L2} + aI_{L3})
 \end{aligned}
 \tag{KAAVA 9}$$

Kuvassa 5 on esitettyä vaihejännitteet ja -virrat jaettuna myötä-, vasta- ja nollajärjestelmään. On huomioitava, että kuvassa esiintyvät ainoastaan vaiheen L1 symmetriset järjestelmät. Mikäli halutaan jakaa muut vaiheet symmetrisiin komponentteihin, tulisi tämä tehdä suhtauttamalla α -operaattori laskettavan vaiheen mukaisesti. Lisäksi on huomioitava, että kuvassa esitetään ainoastaan yhdestä vaiheesta syntyneet nollajärjestelmän arvot ja verkon tähtipiste on maadoitettu sammutuskuristimen kautta.



KUVA 5. Vikaantunut vaihe jaettuna myötä-, vasta- ja nollajärjestelmään.

Virrat sekä jännitteet vaikuttavat ainoastaan omassa järjestelmässään ja näin ollen syntyvät häviöt tapahtuvat ainoastaan myötä-, vasta- ja nollapiirien sisäisesti. Järjestelmät eivät vaikuta suoraan keskenään toisiinsa, vaan tarkastelua täytyy tehdä erillisesti, jolloin esimerkiksi sijaiskytkentöjä esittäessä on tarpeellista mallintaa järjestelmäkohtaiset piirit. Seuraavia yhtälöitä hyödyntäen

(kaava 10) voidaan ratkaista myötä-, vasta- ja nollajärjestelmissä vaikuttavat impedanssit, kun tiedetään järjestelmistä symmetrisiin komponentteihin jaetut vaihejännitteet ja -virrat ja oletetaan vikaimpedanssin olevan merkityksetön. (10, s. 19; 6, s. 7 - 9; 11, s. 428 - 430; 36, s. 188.)

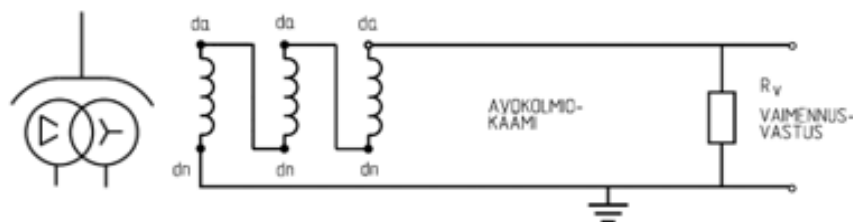
$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{U_0}{I_0} \\ Z_1 &= \frac{U_1}{I_1} \\ Z_2 &= \frac{U_2}{I_2} \end{aligned} \quad \text{KAAVA 10}$$

Tämän opinnäytetyön kannalta erityisesti järjestelmän nolлайmpedanssi on ratkaiseva muuttuja. Tähän palataan sammutettua siirtoverkkoa käsittelevissä luvuissa.

Kuvan 4 vikatilanne on esimerkki yksivaiheisesta maasulusta. Maasulun tunnistamiseen ja erottamiseen käytetään jännitemuuntajan piirejä, jotka on syytä esitellä tässä vaiheessa työtä. Suojauksessa käytetään jännitemuuntajan avokolmiopiirissä olevaa sarjaan kytkettyä käämitystä U_0 -mittaukseen. Vaihtoehtoisesti mikäli jännitemuuntajaa ei ole käytettävissä, nollajännitetieto voidaan saada myös joistakin kuristimista sisäisesti. Tyypillinen avokolmion päiden väliltä mitattu jännite täydellisen yksivaiheisen maasulun aikana on mittamuuntajan toisiopuolella 100 V jännitemuuntajan muuntosuhteen ollessa $\frac{110000}{\sqrt{3}} / \frac{110000}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3}$. Kuvassa 6 on esitettyä jännitemuuntaja ja avokolmion toisiomittauspiiri. Avokolmiossa yksi vaiheiden päistä on maapotentiaalissa. Kaavassa 11 on esitettyä redusoidut arvot primääripuolelta toisiopiiriin mittausten perusteella. Ferroresonanssin vaimennusvastus on esitettyä tunnuksella R ja sarjaan kytketty käämitys potentiaalien mukaisesti da ja dn. (13, s. 7 - 12.)

$$\begin{aligned} U_0' &= 3 * \frac{1}{3} (U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}) * \left(\frac{100}{\sqrt{3} * \sqrt{3}} / \frac{110000}{\sqrt{3}} \right) \\ U_{L1}' &= U_{L1} * \left(\frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{110000}{\sqrt{3}} \right) \end{aligned} \quad \text{KAAVA 11}$$

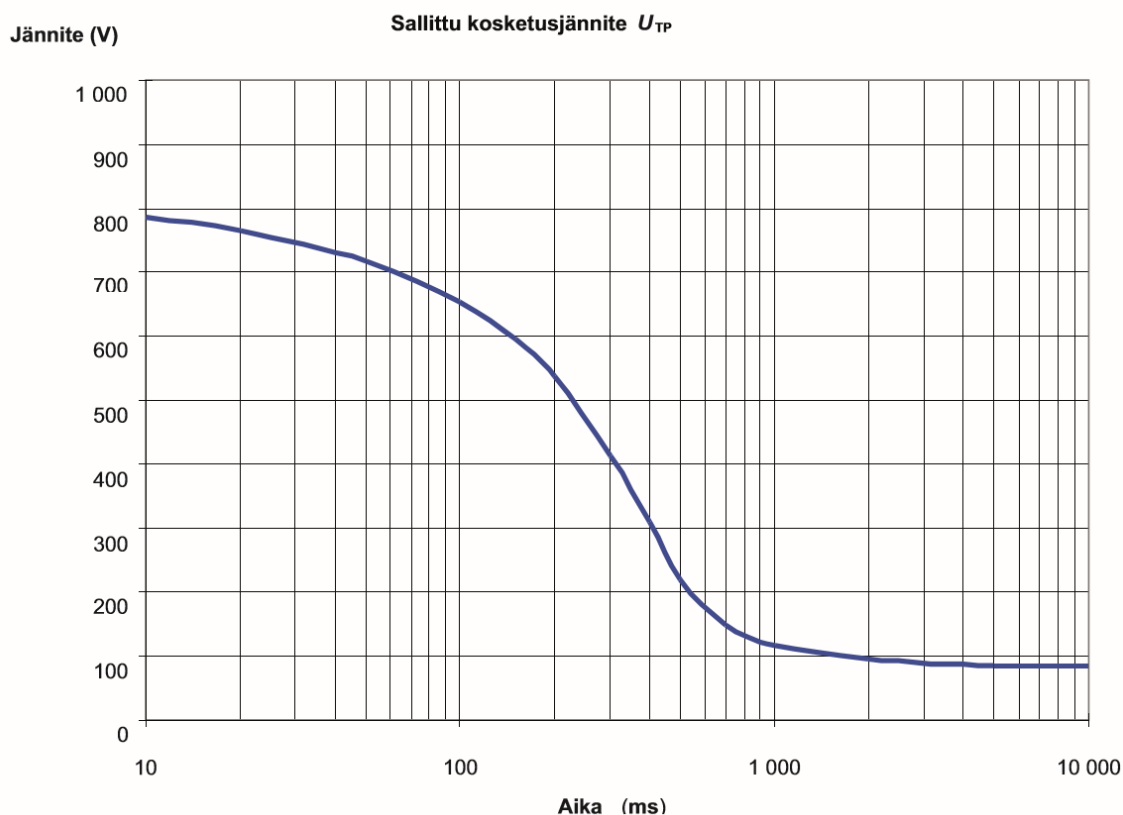
, jossa U_0' on jännite avokolmiossa ja U_{L1}' vaihejännite tähtikämin toisiossa.



KUVA 6. Vasemmalla mittamuuntaja ja oikealla ABB:n malli jännitemuuntajan avokolmiokäämityksestä (13, s. 11).

3 PÄÄMUUNTAJIEN TYYPILLISET MAADOITUSTAVAT SIIRTOVERKOSSA

Maadoitusjärjestelmien tulee turvata ihmisten turvallisuus kaikissa paikoissa mihin ammattihenkilöiden ja maallikoiden pääsy on sallittua. Järjestelmän tulee turvata joka tilanteessa kosketus- ja askeljäännitteet, olettaen että katkaisijat ja suojarieleet toimivat normaaleilla asetteluiden mukaisilla toiminta-ajoilla. Maadoitusjärjestelmän perustana onkin järjestelmää syöttävien jännitelähteiden maadoitustapa sekä potentiaalin tasaamiseen tarkoitettua maadoitusverkot. Kun maadoitustapoja suunnitellaan standardien SFS-EN 50522 ja SFS 6001 mukaisesti, täytyy huomioida seuraavat yksityiskohdat: vikavirtojen suuruudet symmetrisissä ja asymmetrisissä vioissa, vikojen kestoajat ja maadoitusolosuhteet. Nämä vaikuttavat olennaisesti järjestelmässä esiintyviin kosketus- ja askeljäännitteisiin verkkovikojen aikana. Voidaankin todeta, että maasulkujen poiskytkentä, niiden todennäköisyydet, kestot ja maavirtojen suuruudet ovat tärkeimpiä kriteerejä turvallisen sähköjärjestelmän tähtipisteiden maadoitusratkaisuja suunnitellessa. Kuvassa 7 on esitetty sallittu kosketusjännite ajan funktiona standardin SFS 6001 mukaisesti. (3, s. 87 - 93.)



KUVA 7. SFS 6001 mukaiset sallitut kosketusjännitteet vian kestoajan funktiona. Vian keston lisäksi arvoihin vaikuttavat erityisesti vian aikaisten maavirtojen suuruudet. (3, s. 93.)

Järjestelmän maadoituksella pyritään vaikuttamaan nollaimpedanssin suuruuteen, joka on merkittävässä roolissa vikatilanteiden aikana. Järjestelmän nollaimpedanssiin Z_0 voidaan vaikuttaa muuntajien tähtipisteisiin liitetyillä laitteilla. Mitä enemmän muuntajien tähtipisteitä maadoitetaan, sitä pienempi on järjestelmän nollaimpedanssi. Voidaan todeta, että nollaimpedanssi on suurimmillaan, kun järjestelmän muuntajien kaikki tähtipisteet on maasta erotettu ja pienimmillään kun järjestelmän kaikki muuntajien tähtipisteet on maadoitettu suoraan kiinteästi maahan.

Tässä työssä tarkastellaan tilannetta, jossa järjestelmän nollaimpedanssin vaikutus on merkittävä. Tarkastelu tehdään yksivaiheisen maasulun avulla, sillä nollaimpedanssin ja maadoitustavan merkitys korostuu tämän vikatilanteen aikana. (18, s. 1 - 27; 19, s. 263 - 289.)

Tähtipisteiden maadoitustapa muodostaa erilaisia maadoitusjärjestelmiä. Suomen kantaverkossa päämuuntajien tähtipisteet maadoitetaan tyypillisesti maadoituskuristimen eli tähtipistemaadoituskelan kautta tai suoralla maadoituksella tai ne pidetään maasta erotettuna. Lisäksi Lapissa asiakaan verkon päämuuntajia ja yhden kantaverkon aseman päämuuntaja on maadoitettu sammutuskuristimen eli sammutuskelan kautta maahan. Suomessa 400/220 kV:n verkko maadoitetaan normaalisti tähtipistekelan kautta tai suoraan maahan, kun taas 110 kV:n verkossa on käytössä kaikkia edellä mainittuja ratkaisuja. Useampi muuntaja voidaan maadoittaa saman tähtipistejärjestelmän kautta, kuitenkin siten, että vaihtelevat käyttötilanteet turvataan erottimilla. Tässä osiossa käsitellään myös maasta erotettua verkkoa, joka on käytössä 10 kV:n – 60 kV:n jännitetasoissa. (15; 19, s. 270.)

Yleisesti yksivaiheisen maasulun virta voidaan laskea käyttäen symmetrisiä komponentteja (10, s. 104 - 106).

$$I_f = \frac{3U_L}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad \text{KAAVA 12}$$

Standardin SFS 6001 mukaisesti kosketusjännitteisiin vaikuttava kaukana vikapaikasta esiintyvä virta voidaan laskea ukkosköysien reduktiokertoimen avulla sammutetussa järjestelmässä kaavalla 13 (3, s. 94).

$$I_E = r * \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2} \quad \text{KAAVA 13}$$

Standardi IEC 60076-6 käsittelee muuntajia ja niiden tähtipisteessä sijaitsevaa laitteistoa. Suurjännitteinen vaihejärjestelmä voidaan maadoittaa neljällä eri tavalla: suurjännitevastuksella, suoraan maahan, kuristimella tai sammutuskuristimen kautta. Verkon muuntaja ja tähtipisteessä sijaitsevien laitteiden tulee olla testattu tämän standardin mukaisesti. Laitteiston on kestettävä joka tilanteessa maasulkujen muodostamat virrat. Tämä voidaan määrittää lyhytaikaisen nollavirran avulla yhtälön 14 mukaisesti. (6, s. 63 - 64.)

$$I_{NSTr} = 3 * \frac{U_{max}}{\sqrt{3} * Z_0} \quad \text{KAAVA 14}$$

On oleellista mainita sammutetun verkon tähtipistepiiriin vaatimuksiin liittyvät erikoisuudet. Sammutetun verkon tapauksessa normaalien testien lisäksi tulee ottaa huomioon standardin IEC 60076-6 mukaiset testaukset (16, s. 70.):

- nollajärjestelmän impedanssin Z_0 määrittäminen koko vaikutusalueelta, mikäli kelan induktanssi on merkittävä
- tähtipistevirta yksivaiheisen maasulun aikana
- kelan vaikutuspiiriin liittyvien kytkin- ja ohjauslaitteiden testit.

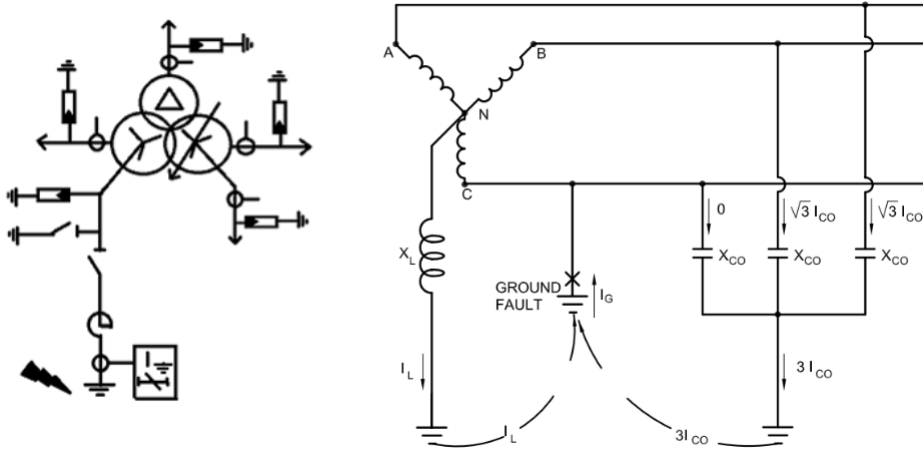
Näiden lisäksi tilaaja voi vaatia laitteistolle seuraavia lisätestejä (16, s.70):

- häviöiden testaus jatkuvan mitoitetun nollavirran aikana
- kestävyys ja ympäristötestit säädettävän suuren induktanssin omaavalle laitteistolle
- lineaarisuuden testaukset.

3.1 Reaktanssin kautta maadoitettu verkko

Suurin osa kantaverkon päämuuntajista maadoitetaan joko oman tai yhteisen tähtipistemaadoituskelan kautta. Tämän lisäksi erityisesti 110 kV:n verkossa osa järjestelmän päämuuntajista on maasta erotettuna ja näin ollen ratkaisu muodostaa konventionaalisen verkon eli osittain pienen reaktanssin kautta maadoitetun verkon. Pienen reaktanssin kautta maadoitetussa verkossa voidaan osa muuntajista pitää maasta erotettuna. Tällä on nollaimpedanssia kasvattava vaikutus ver-rattuna tilanteeseen, missä nämä olisivat myös maadoitettu ja näin vikavirtoja pyritään rajoittamaan

suojauksen kannalta haluttuihin arvoihin. Reaktanssin kautta maadoitettuja päämuuntajien tähtipisteitä käytetään jossakin määrin kantaverkossa kaikissa jännitetasoissa. 400 kV:n ja 220 kV:n jännitetasoissa on huomioitava, että nämä pysyvät tehollisesti maadoitettuna. (15; 18, s. 264.)

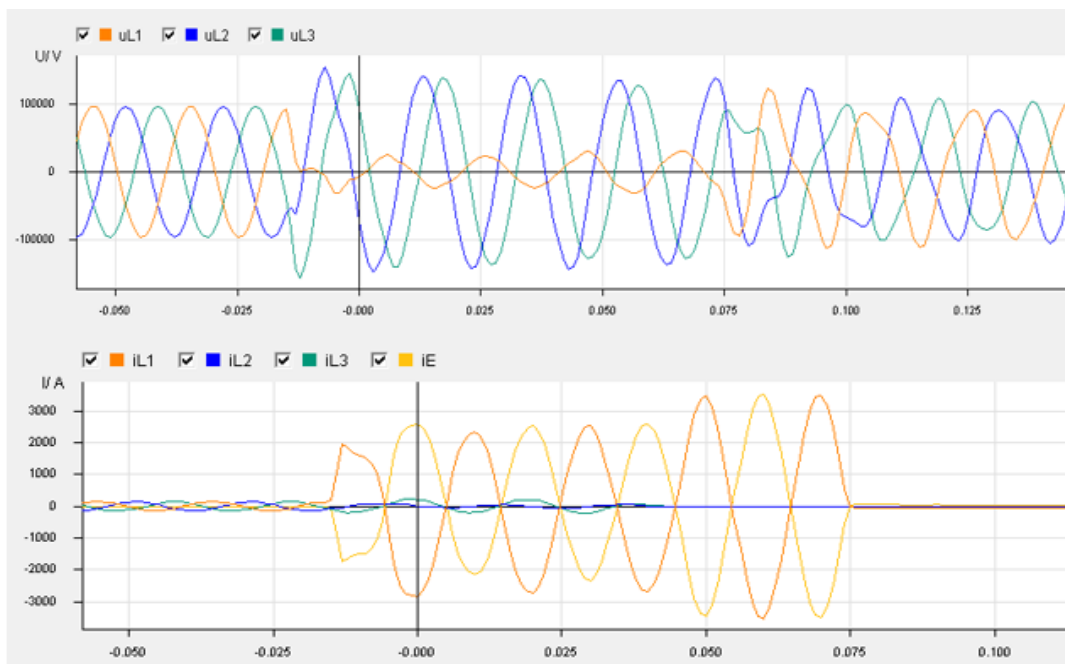


KUVA 8. Vasemmalla päämuuntajan 110 kV puoli maadoitettu pienen reaktanssin kautta. Oikealla IEEE:n malli pienen impedanssin kautta maadoitetusta järjestelmästä (18).

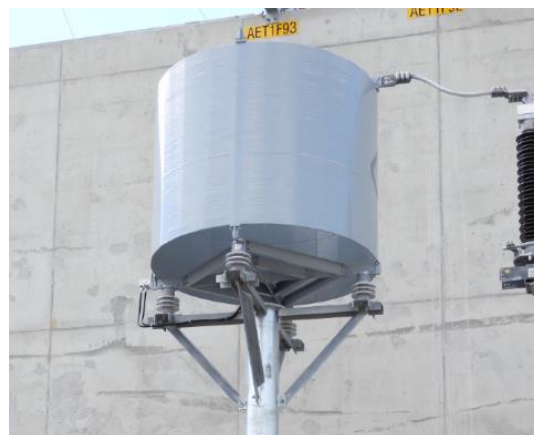
Reaktanssin kautta maadoitettu verkko voidaan jakaa pienen reaktanssin kautta maadoitettuun verkkoon tai suuren reaktanssin kautta maadoitettuun verkkoon. Molemmissa ratkaisussa on tarkoituksena rajoittaa kapasitiivista virtaa yksivaiheisen maasulun aikana niin, että vikavirta jää lähelle järjestelmän kolmivaiheisen oikosulun suuruusluokkaa. Suomessa on käytössä pienen reaktanssin avulla tehty vikavirtaa rajoittava järjestelmä. Tähtipistekela on virran muutoksia rajoittava komponentti ja tämän avulla pyritään rajoittamaan maasulkuvirran ensimmäisiä transienttisysäyksiä. Maasulkuvirtaa pyritään rajoittamaan noin 60 %:iin kolmivaiheisen oikosulun suuruudesta, jotta haitallisilta transientti-ilmiöiltä vältytään. Suurjännitteillä maadoituskelojen käyttö on taloudellisempi vaihtoehto kuin resistanssin kautta maadoittaminen. (18, s. 15 - 16; 16; 19, s. 263 - 270.)

Kuvassa 9 tarkastellaan distanssireleen häiriötallennetta yksivaiheisessa maasulussa nimellijännitteeltään 110 kV jännitetasossa, mikä päättyy lopulta releen herkän maasulkutoiminnon laukaisukäskyyn ja katkaisijan kolminapaiseen avaamiseen. Aseman toisen päämuuntajan 110 kV tähtipiste on maadoitettu ilmasydämisen maadoituskelan kautta ja toisen muuntajan tähtipiste on maasta erotettu. Huomataan, että maasulun aikana vikaantuneen vaiheen jännite lähestyy nollaa ja samalla hetkellä terveiden vaiheiden jännitteet nousevat kohti pääjännitteiden tasoa. Terveiden vaiheiden jännitteenousu on maasulkuvirtaa rajoittavassa ja pienen reaktanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä $1,38 - \sqrt{3}$ -kertainen, johtuen järjestelmän tähtipisteen liikkumisesta kohti

maasulun aiheuttamaa nollapotentiaalia ja näin ollen aiheutuvasta potentiaalierosta maan ja tähtipisteen välillä. Tämän lisäksi vaihejännitteiden osoittimien väliset kulmat kapenevat vikaantuneen jännitteen laskiessa kohti nollaa. On huomioitava, että pienen reaktanssin kautta maadoitetussa verkossa nolлайmpedanssin ja myötäimpedanssin suhteen Z_0/Z_1 tulee olla suurempi kuin neljä, jotta järjestelmä on vikavirtaa rajoittava. Tarkasteltaessa virtoja havaitaan, että vikaantuneen vaiheen virta kasvaa kohti kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruusluokkaa. Lisäksi releen mittaama epäsymmetriavirta I_E kasvaa vikaantuneen vaiheen kanssa lähes identtisesti peilikuvana, jonka perusteella voidaan päätellä vaihe-eron olevan lähellä 180° (kuva 9). (18, s. 263 - 270.)



KUVA 9. Häiriötallenne: Yksivaiheinen maasulku pienen reaktanssin kautta maadoitetussa verkossa. Vikaantunut vaihe L1. Terveiden vaiheiden jännitteen nousu $1,38 - \sqrt{3}$ (20.)

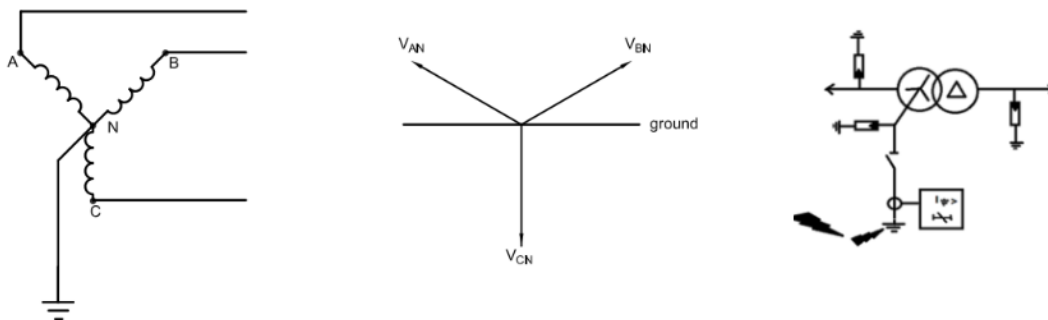


KUVA 10. Päämuuntajan tähtipisteen ilmasydäminen maadoituskela (17.)

3.2 Tehollisesti maadoitettu verkko

Kantaverkon 400 kV:n ja 220 kV:n jännitetasot pidetään tehollisesti maadoitettuna. Päämuuntajien tähtipisteet maadoitetaan suoraan maahan tai pienen reaktanssin kautta tähtipistekelan avulla, kuitenkin huomioiden, että järjestelmä täyttää ratkaisulle asetetut kriteerit. IEEE määrittää tehollisen maadoitetun verkon kriteereiksi tilanteet, joissa järjestelmän nolhareaktanssin ja myötäreaktanssin suhde X_0/X_1 on positiivinen ja pienempi kuin 3. Järjestelmän nolaresistanssin ja myötäreaktanssin suhde R_0/X_1 ei saa olla suurempi kuin yksi. Kantaverkossa tehollisesti maadoitettu verkko muodostuu pääosin maadoittamalla pienen reaktanssin kautta tai kiinteällä suoralla maadoituskellalla. Joissakin harvoissa tapauksissa jokin muuntajan tähtipiste voidaan pitää maasta erotettuna, mutta nämä ovat poikkeustilanteita. Näissäkin tilanteissa järjestelmän on säilyttävä tehollisesti maadoitettuna. (15; 18, s. 1 - 19.)

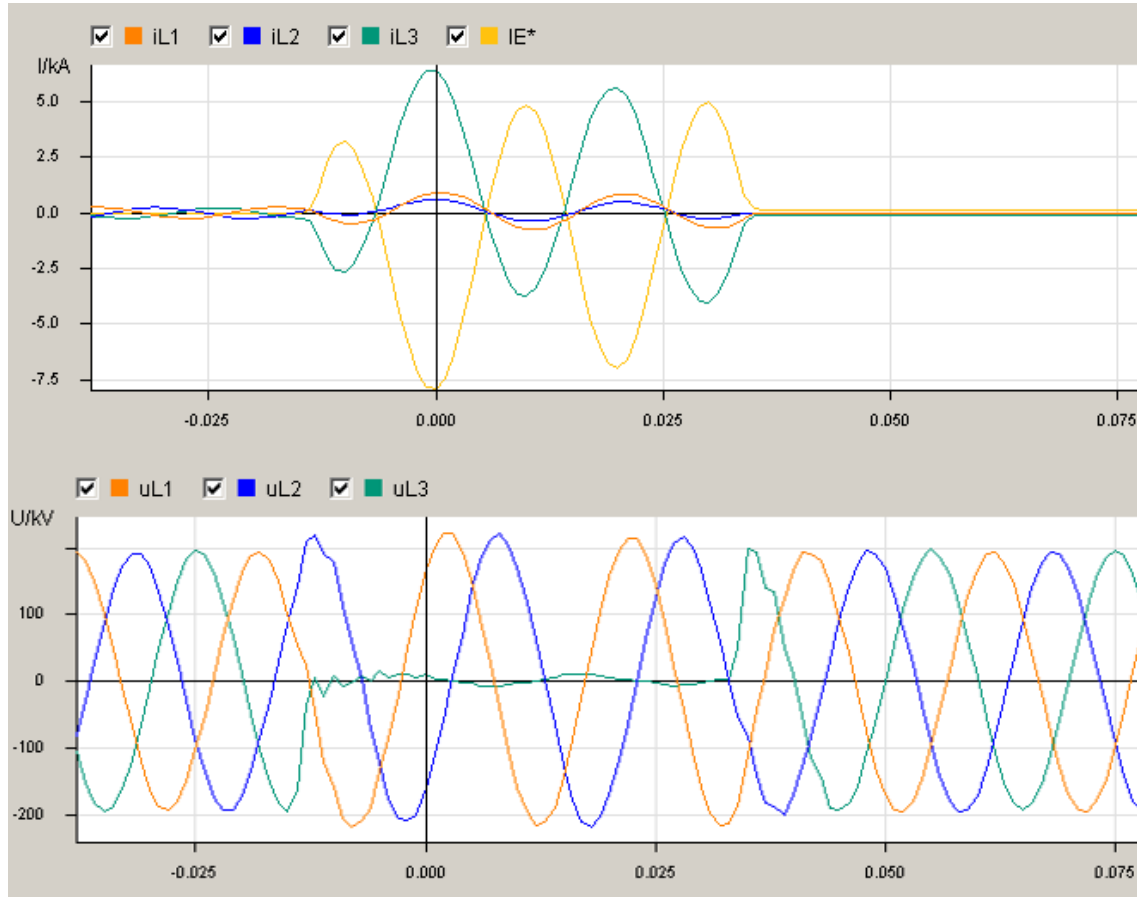
Koska suoraan maadoitetussa verkossa päämuuntajan tähtipiste maadoitetaan suoraan maahan, ei siinä esiinny merkittävää nolaimpedanssia. Kuitenkin tehollisesti maadoitetussa verkossa järjestelmä sallii nolaimpedanssin kasvattamisen ehtojen mukaisesti. Nolaimpedanssia kasvatetaan tietyillä asemilla niin, että vikavirrat säilyvät järkevissä suuruusluokissa. Suojauksen on toimittava välittömästi yksivaiheisen maasulun aikana. (15; 18, s. 17 - 20.)



KUVA 11: Päämuuntajan tähtipisteen 220 kV:n puolen maadoitus suoraan maahan sekä IEEE-mallit suoraan maahan maadoitetusta järjestelmästä (18).

Tarkastellaan kuvan 12 mukaista täydellistä yksivaiheista maasulkua nimellisjännitteeltään 220 kV:n verkossa, jossa sähköaseman päämuuntajan tähtipiste on maadoitettu suoraan kiinteästi maahan. Vika päättyy kolminapaiseen katkaisijoiden laukaisuun. Huomataan, että releen mittaama epäsymmetriavirta I_E kasvaa vikahetkellä todella suureksi ja se käy hetkellisarvoltaan noin 7,5 kA:ssa johtuen tehollisesti maadoitetun verkon nolaimpedanssin pienuudesta. Huomataan myös,

että suoraan maadoitetussa järjestelmässä ei tapahdu terveissä vaihejännitteissä transientti-ilmiöitä, eli maasulun aikainen jännitteenousu terveissä vaiheissa on kertoimeltaan lähellä yhtä. Tämä onkin yksi järjestelmän hyvistä ominaisuuksista, sillä se suojaa verkkoa hyvin erilaisilta transienttiylijännitteiltä vikojen aikana. (15, 18, s. 17-20.)



KUVA 12. Distanssireleen häiriötallenne: täydellinen yksivaiheinen maasulku tehollisesti maadoitetussa järjestelmässä. Terveissä vaiheissa ei ole jännitteen nousua. (20.)

Tarkastellaan seuraavaksi toisen sähköaseman distanssireleen häiriötallenteita tehollisesti maadoitetussa verkossa ja osoitetaan, että jännitteiden nousuja ei tapahdu yleisimpien vikojen aikana, kun järjestelmä on maadoitettu tehollisesti. Päämuuntaja on maadoitettu suoraan maahan ja järjestelmän nimellisjännite on 220 kV. Tarkasteltavat viat ovat kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku ja maasulku.

Kuvassa 13 on esitettyä kolmivaiheinen oikosulku, joka päättyy katkaisijan kolminapaiseen laukaisuun. Kolmivaiheinen oikosulku ei kaikissa tilanteissa tuota suurinta vikavirtaa, vaan tämä riippuu vian sijainnista ja muuntajasta. Tehollisesti maadoitetussa verkossa kuitenkin lähtökohtaisesti oletetaan kolmivaiheinen oikosulkuvirta suurimmaksi vikavirraksi. Huomataan, että vaihejännitteet alenevat kaikista vaiheista merkittävästi kohti nollaa ja samanaikaisesti virrat nousevat suuriksi.

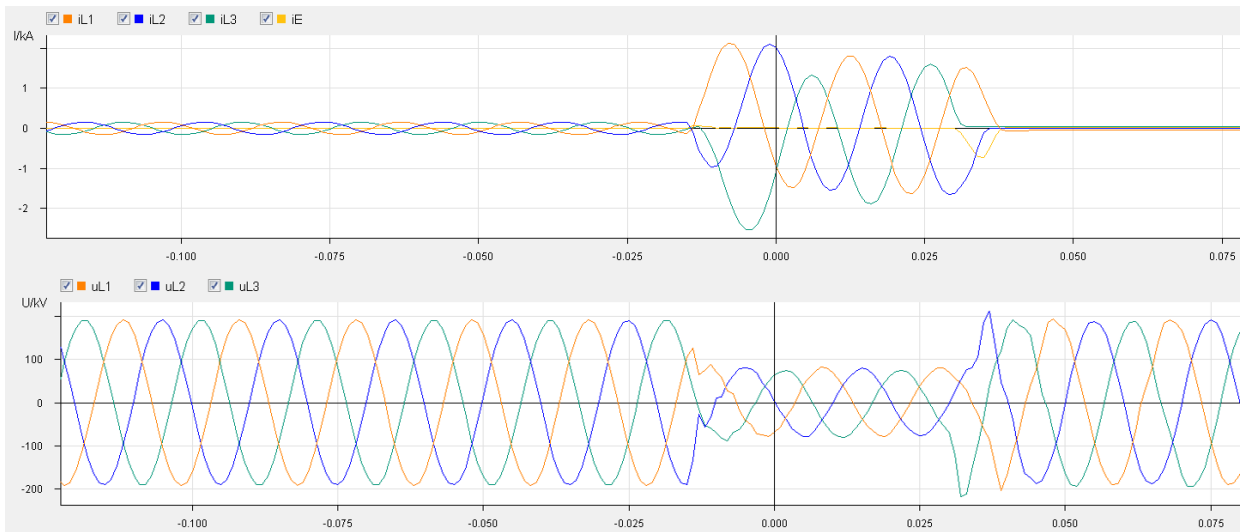
Vika päättyy katkaisijan kolminapaiseen laukaisuun. Kyseinen kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, sillä vaihekulmat säilyttävät likimäärin symmetrian vaatimukset, eikä epäsymmetriavirtaa juuri esiinny. Kuvan mukainen kolmivaiheisen oikosulun vikavirta on määritettävissä yhtälöillä 15. (21; 10, s.109 - 110.)

$$I_{L1} = I_1 = \frac{U_{L1}}{Z_1 + Z_f}$$

$$I_{L2} = a^2 I_1$$

$$I_{L3} = a I_1$$

KAAVA 15

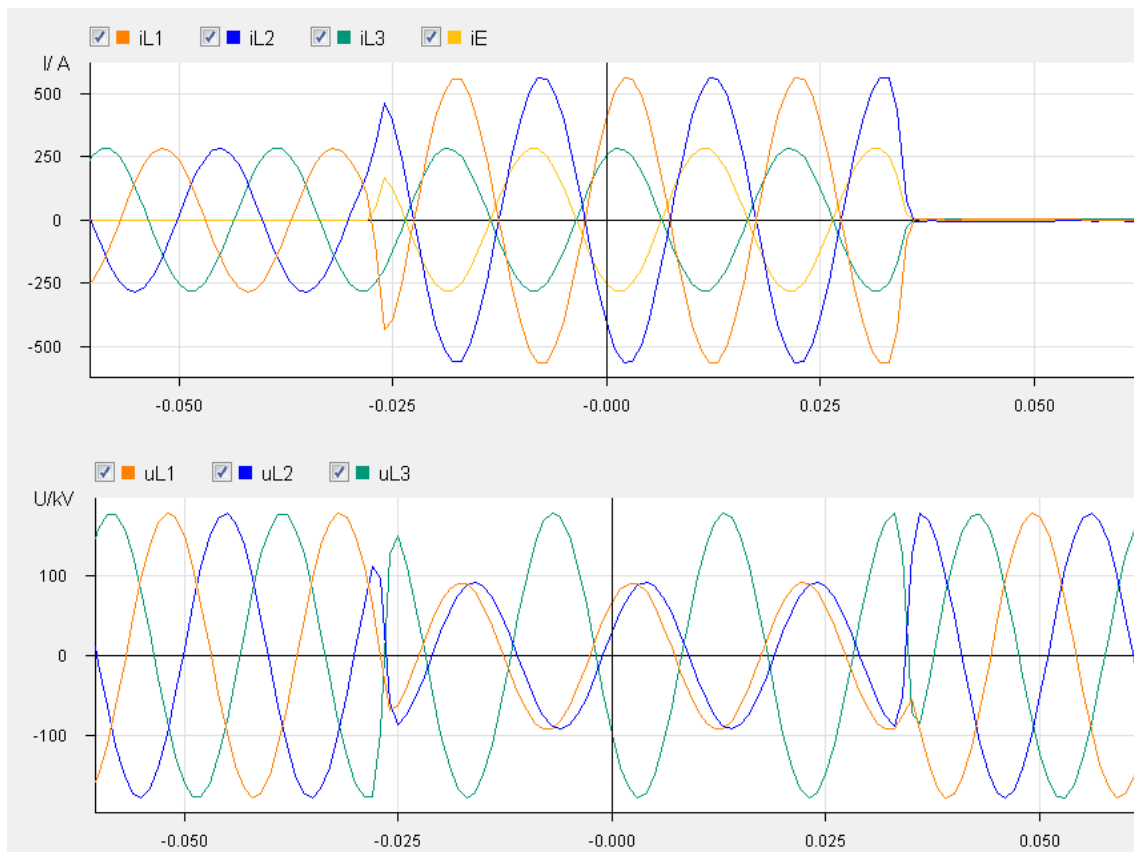


KUVA 13. Kolmivaiheinen oikosulku tehollisesti maadoitetussa verkossa (20).

Kuvassa 14 on esitettyä kaksivaiheinen oikosulku, eli kahden vaihejohtimen välinen oikosulku, joka päättyy katkaisijan kolminapaiseen laukaisuun. Vikaantuneiden vaiheiden muodostamat vaihevirit ovat peilikuvat toisistaan ja vastakkaisuuntaiset, kuten kuvasta 14 käy ilmi. Mikäli I_{L2} olisi toisen vikaantuneen vaiheen I_{L1} kanssa saman suuntainen vaihe-eron ollessa pieni, olisi kyseessä kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella. Vika on tyypiltään epäsymmetrinen, sillä releen nolla-piiri mittaa epäsymmetriavirtaa. Kuvan mukaiset vikavirrat ovat määritettävissä yhtälön 16 mukaisesti. (21, s.1; 10, s. 106 -107.)

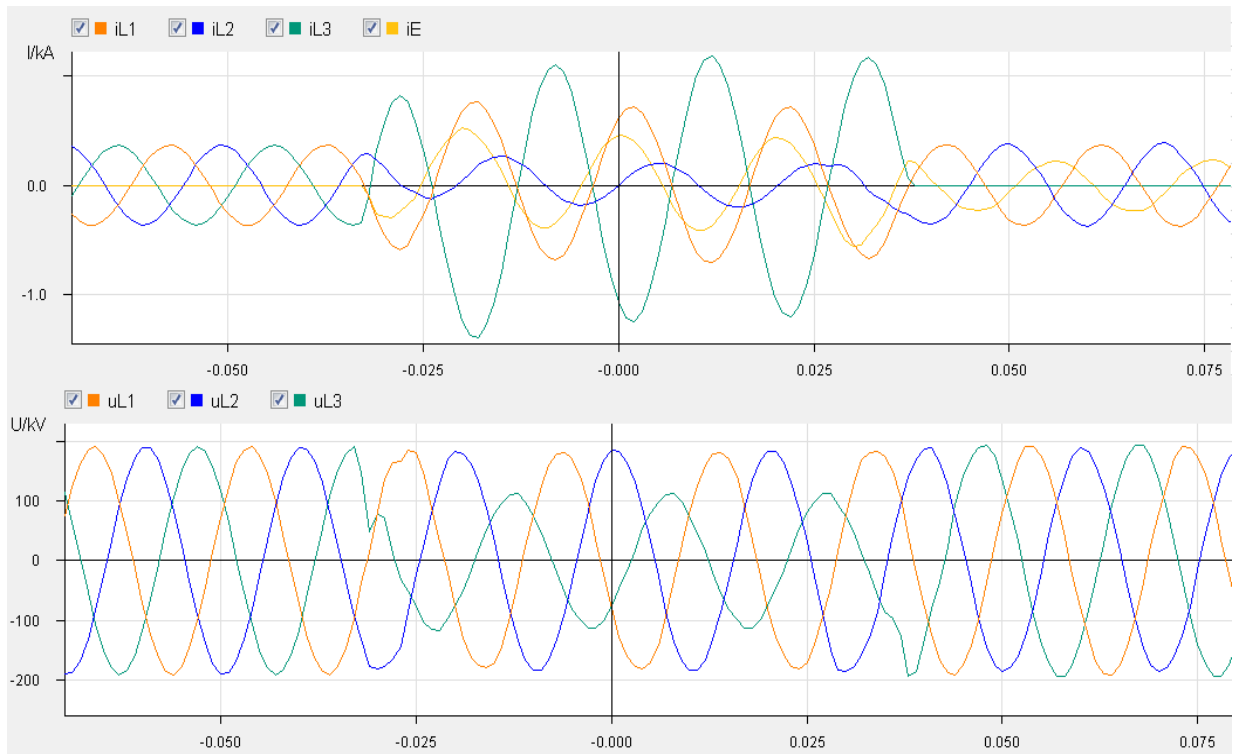
$$I_{L1} = -I_{L2} = \frac{-j\sqrt{3}U_{L1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

KAAVA 16



KUVA 14: Kahden vaihejohtimien välinen oikosulku tehollisesti maadoitetussa verkossa (20).

Kuvassa 15 on esitettyä epätäydellinen yksivaiheinen maasulku, joka poistetaan verkosta katkaisijan yksinapaisella laukaisulla. Tämä kuvastaa tilannetta, joka on verrattavissa johdinkatkeamaan ilman maakosketusta. Johdinkatkeama ilman maakosketusta on myös epäsymmetrinen vikatilanne, tosin tässä tilanteessa se on aiheutettu tietoisesti katkaisijan avulla vian erottamiseksi verkosta. Virralla ei ole paluureittiiä maan kautta ja epäsymmetria havaitaan tehollisesti maadoitetussa verkossa suojareleen toisiopiirin paluujohtimen epäsymmetriavirtana. Tässäkään tilanteessa tehollisesti maadoitetun verkon jännitteissä ei havaita minkäänlaisia vaihejännitteiden ylijännitteitä. Voidaan päätellä, että maasulku ei ole täydellinen, sillä vaihejännite ei putoa yhtä paljon kuin täydellisen maasulun aikana tai vika on tapahtunut hyvin etäällä tallenteen mittaamasta releestä. Tehollisesti maadoitetun järjestelmän terveet vaihejännitteet eivät reagoi tässä tapauksessa. Muussa maadoitusratkaisussa vika voisi aiheuttaa jännitteiden heittelyä, jolloin vian määrittäminen graafien avulla tulee haasteelliseksi. Vikavirta ei myöskään ole suurehko, mikä voisi selittyä sillä, että vika on etäällä asemasta. Vian paikannusta voidaan tarkemmin määrittää hyödyntäen kulkuaaltoihin perustuvia mittauksia. (21.)



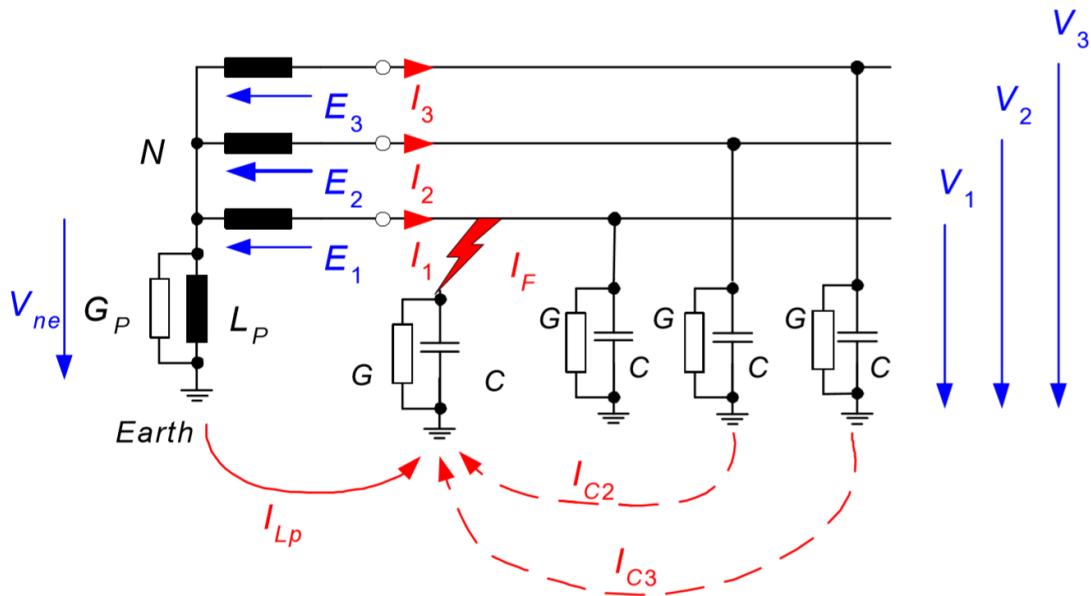
KUVA 15. Katkaisijan yksinapainen laukaisu yksivaiheisen maasulun seurauksena tehollisesti maadoitetussa verkossa (20).



KUVA 16. Tähtipisteen maadoituserotin. Tähtipiste on maadoitettuna suoraan maahan, koska maadoitusveitsi on ylhäällä. (24.)

3.3 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa muuntajan tähtipisteet on maadoitettu sammutuskuristimien eli sammutuskelan kautta maahan. Lisäksi osaa verkon muuntajista voidaan pitää maasta erotettuna ja näin keskittää verkon kuristimen viritys aseman yhdelle päämuuntajalle. Viritystä käsitellään kappaleessa 4.2 tarkemmin. Jokaisella asemalla maadoitetaan ainoastaan yksi päämuuntajan tähtipiste sammutuskuristimella, koska useamman kuristimen säätö samalla asemalla tuottaisi hankaluuksia, eikä se ole vikavirtojen ja taloudellisuuden kannalta järkevä ratkaisu. Sammutuskuristimen yhteydessä käytetään lisäksi verkon nolaresistanssia R_0 kasvattavana komponenttina suurjännitevasuksia tai kelan sisäisiä kuormitusvastuksia. (9; 18, s. 17). Näiden merkitystä käsitellään sammutettua verkkoa käsittelevässä osiossa tarkemmin.



KUVA 17. Sammutettu verkko yksivaiheisen maasulun aikana vikavirran kulkiessa vikaimpedanssin kautta (22, s. 2).

Sammutetussa verkossa sammutuskuristimen induktanssi L_0 viritetään resonanssiin maakapasitanssien eli nolakapasitanssien C_0 kanssa. Resonanssitaajuutena toimii verkon käyttötaajuus 50 Hz. Rinnakkaisresonanssin yhtälö on esitetty kaavassa 17. (9; 18, s. 17; 22; 19, s. 275 - 289; 23.)

$$\omega L_0 = \frac{1}{\omega C_e} \text{ tai } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_e}} \quad \text{KAAVA 17}$$

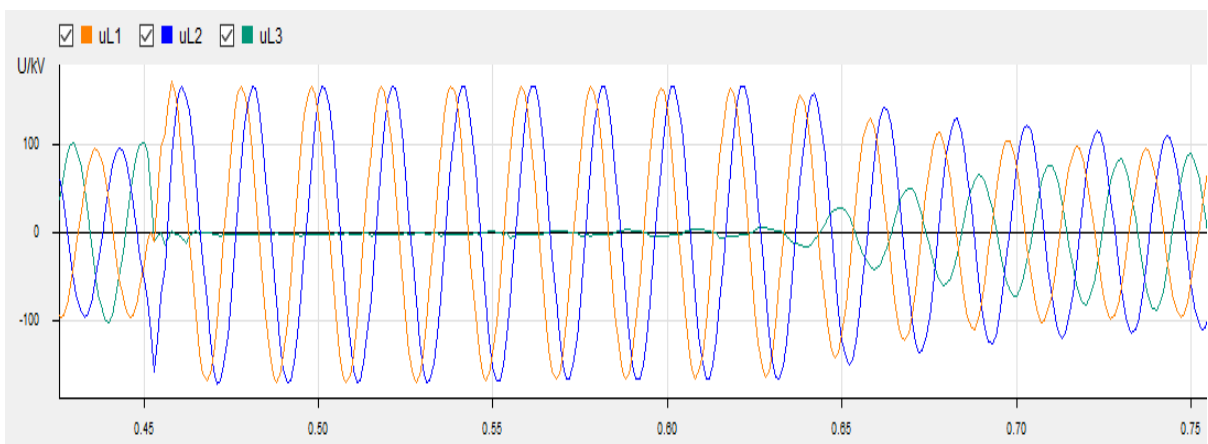
Kun sammutuskuristin on viritettynä täydellisesti resonanssiin nollakapasitanssien kanssa, muodostuvat kapasitiivinen ja induktiivinen virta kumoavat toisensa yksivaiheisen maasulun aikana yhtälön 18 mukaisesti. Tällöin vikavirta on pienimmillään ja jäljellä oleva virta muodostuu jäännösvirrasta, jonka järjestelmän vikaimpedanssi ja nolaresistanssi aiheuttavat (9; 18, s. 17; 22; 19, s. 275-289; 23). Resonanssitilanteessa pätee kaavan 18 mukaiset yhtälöt.

$$I_L = I_C \quad \text{KAAVA 18}$$

$$\omega L_0 = \frac{1}{\omega C_e}$$

,jolloin $\frac{U_L}{\omega L_0} = U_L 3\omega C_e$

Kuvassa 18 on esitetty täydellinen yksivaiheinen maasulku nimellisjännitteeltään 110 kV sammutetussa verkossa. Vika päättyy vian sammumiseen eli vikavirran ”kuolemiseen” verkon häviöihin. Verkko palautuu siis itsestään normaaliin käyttötilanteeseen ilman suojaustoimintoja ja turhia siirron keskeytyksiä. Terveiden jännitteiden jännitteen nousu yksivaiheisen maasulun aikana on suuri, sillä verkon nolлайmpedanssi on sammutetussa verkossa suurta. Jännitteet nousevat tyypillisesti likimain $\sqrt{3}$ -kertaisiksi. Lisäksi verkon epäsymmetriavirrat ovat pieniä vastakkaissuuntaisten reaktiivisten virtojen summutuessa toisiinsa. Syvällisempää tarkastelua käydään sammutettua verkkoa käsittelevässä osiossa. (9; 17, s. 17; 21; 18, s. 275-289; 22.)



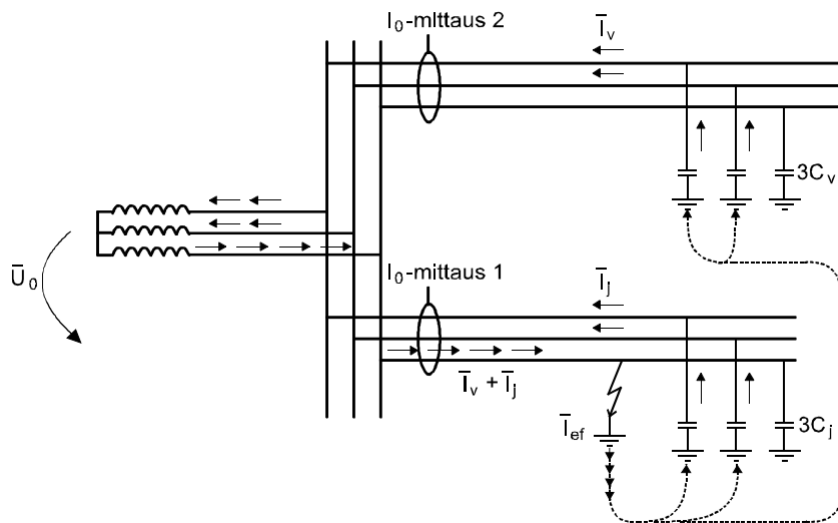
KUVA 18. Distanssireleen häiriötallenne: sammuva yksivaiheinen maasulku. Vikaantunut vaihe L3. (20.)



KUVA 19. Tähtipisteen sammutuskuristin rinnakkaisella kuormitusvastuksella (24).

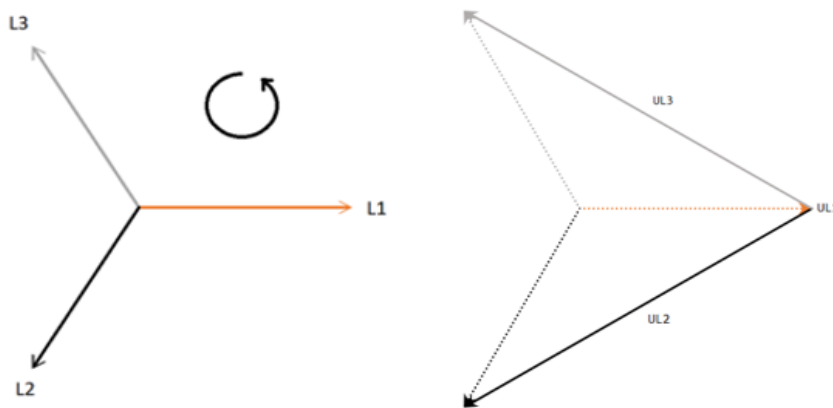
3.4 Maasta erotettu verkko

Kantaverkossa ei ole täysin maasta erotettua järjestelmää. On kuitenkin yleistä, että asemilla osa päämuuntajien tähtipisteistä pidetään maasta erotettuina. Tällä pyritään hallitsemaan maasulkuvirtojen suuruuksia kuten työssä aiemmin mainittiin. Täysin maasta erotetussa verkossa nollaimpe-danssi on suurimmillaan, sillä vikavirralla ei ole paluureittiä muuntajan tähtipisteen kautta. Tällöin vikavirta kulkee maakapasitanssien ja maan välillä. Maasta erotettu verkko on taloudellisin ratkaisu ilmajohtojen yhteydessä ja tästä syystä sitä käytetään yleisesti jakeluverkkoyhtiöiden verkossa. (18, s. 5 - 7; 19, s. 270 - 275.)



KUVA 20. Erotettu verkko yksivaiheisen maasulun aikana (14).

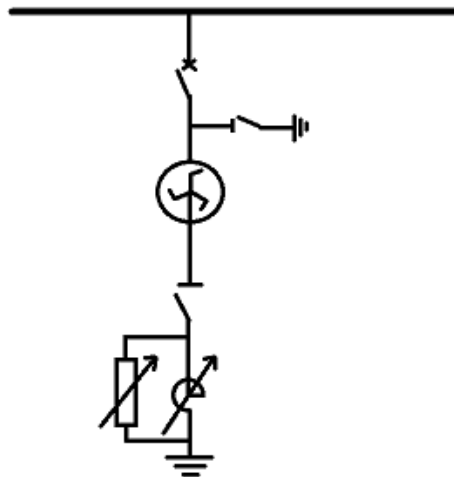
Maasta erotetussa järjestelmässä yksivaiheisen maasulun aikana järjestelmän kelluva tähtipiste siirtyy nollopotentiaaliin vikaantuvan vaiheen osoittimen päähän. Samanaikaisesti järjestelmän terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat pääjännitteen tasolle. Maasulun aikana vikavirrat ovat maasta erotetussa verkossa pieniä. Seuraavassa kuvassa (kuva 21) on esitettyä verkon jännitteiden osoittimet terveessä tilanteessa ja yksivaiheisen maasulun aikana. (18, s. 5 - 7; 19, s. 270 - 275.)



KUVA 21. Vasemmalla terveet vaihejännitteet ja oikealla vaihejännitteet yksivaiheisen maasulun aikana.

Poikkeustilanteissa maasta erotettuun verkkoon voidaan luoda keinotekoisesti tähtipiste ja näin verkko voidaan maadoittaa kompensointikelalla muualta kuin järjestelmän päämuuntajan tähtipisteestä. Tämä on suotuisaa tilanteissa, joissa verkon maasulkuvirtojen kanssa on ollut ongelmia.

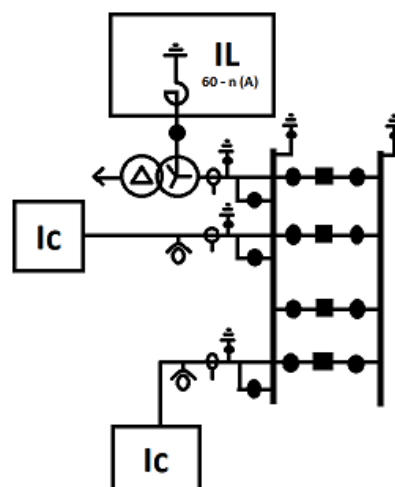
Häiriöiden siirtymisen estämiseksi käytetään muuntajissa toisena käämityksenä kolmiota. Nollajärjestelmän virrat jäävät kiertämään kolmioon kytketyssä käämeissä sisäisesti eivätkä näin indusoidu muualle esimerkiksi korkeamman jännitetason verkkoon. Tästä syystä liittyminen kantaverkkoon on järkevää muuntajalla, jonka alemman jänniteportaan käämitys on kolmiossa. Mikäli tässä tilanteessa järjestelmään halutaan jokin muu maadoitusratkaisu, on tähtipiste luotava keinotekoisesti liitettynä esimerkiksi sähköaseman pääkiskoon tai jakeluverkkoyhtiöllä yleisimmin tiettyyn kokoojakiskoon. Tähtipiste voidaan luoda useammalla eri tavalla, esimerkiksi käyttämällä yksikäämistä hakatähtimuuntajaa, jonka tähtipisteeseen haluttu elementti sijoitetaan. Kuvassa 22 on esitettyinä sammutettu verkko, jolle on luotu keinotekoisesti tähtipiste järjestelmän pääkiskoon. Erillisen maadoitusmuuntajan selkeä etu on se, että päämuuntajan keskeytyksen aikaan mahdollinen kompensointilaitteisto pysyy käytössä. (18, s. 22-24; 10, s. 26-28.)



KUVA 22. Verkkoon luotu tähtipiste hakatähtimuuntajan avulla. Verkko voidaan maadoittaa hakatähtimuuntajan kautta, mikäli järjestelmän päämuuntajan tähtipiste ei ole käytettävissä.

4 SAMMUTETTU SIIRTOVERKKO

Kuten jo aikaisemmin todettiin, sammutetussa verkossa yksivaiheiset hetkelliset maasulut sammuvat verkon häviöihin ilman ylimääräisiä siirron keskeytyksiä, mikäli sammutuskuristin on viritetty oikein ja suojarleiden asettelut ovat sammutetulle verkolle tarkoitettuja. Näin ollen paras tapa esittää sammutettu verkko on kuvata alueen sammutuskuristimet liitettynä sähköasemaan ja havainnollistaa näiden johtolähdöt sekä kaapeliosuudet sammutustarpeena, eli kapasitiivisen virran I_c arvona, jonka tulisi vastata kuristimen virta-arvoa yksivaiheisen maasulun aikana. Todistimme jo aikaisemmin, että verkon ollessa rinnakkaisresonanssissa maakapasitanssien, eli nollakapasitanssien tai itseiskapasitanssien kanssa, kumoavat vastakkaissuuntaiset reaktiiviset virrat toisensa. Maasulkuvirtojen jäännösvirran pienuus sekä verkon automaattinen palautuminen loivalla paluujännitteellä normaaliin käyttötilanteeseen ovatkin sammutetun verkon edut ja vahvuudet. Jäännösvirran ollessa pieni ja käydessä samoihin aikoihin hetkellisarvoltaan nollakohdassa jännitteen kanssa, ovat transientit valokaaret ja muut lyhytaikaiset viat itsestään sammuvia. Kantaverkon muilla ratkaisulla lähes jokainen vastaava vika aiheuttaisi katkaisijoiden laukaisun ja pikajälleenkynnän (PJK). Vaikka verkolla on suojausten kannalta hyviä ominaisuuksia, tulee esittää ongelmat, jotka liittyvät verkon käyttöön sekä vian paikannukseen. Verkon käytössä ja vianpaikannuksessa havaitaan selviä ongelmia muihin ratkaisuihin verrattuna. Voidaankin todeta, että sammutetulla verkolla on paljon muusta kantaverkosta poikkeavia ominaisuuksia ja ratkaisun käytännöllisyys jakaa paljon mielipiteitä laidasta laitaan, kun tarkastelun kohteena on kantaverkko. (9; 17, s. 18; 21; 19, s. 275 - 289; 23; 26; 37, s.122.)

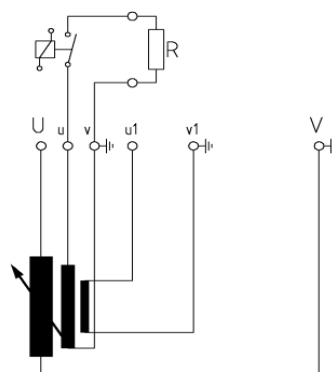


KUVA 23. Yksinkertainen sammutettu järjestelmä esitettynä johtolähtöjen kapasitiivisena virtana ja kelan induktiivisena virtana.

4.1 Petersenin kela

Sammutuskuristimesta voidaan käyttää myös nimitystä Petersenin kela, sammutuskela tai maasulun kompensointikela. Sammutuskuristin on suuri öljyristein kela, jonka tehtävä on tuottaa induktiivista virtaa yksivaiheisen maasulun aikana. Tästä syystä sammutuskelaa mitoitettaessa ja säädettäessä suurena käytetään virtaa. Sammutuskuristin viritetään rinnakkaisresonanssiin virta-arvoltaan sellaiseksi, että se vastaa maakapasitansseista muodostuvaa kapasitiivista virtaa. (9; 18, s. 17; 22; 19, s. 275-289; 23; 26.)

Voimajärjestelmän käytön kannalta sammutuskuristimen on hyvä olla säädettävissä, jotta järjestelmä pysyy joustavana ja suojaus toimivana. Nykyaikaiseen nopeasti muuttuvaan sähköjärjestelmään eivät sovellu hyvin kiinteäasentoiset kuristimet ja näin kuristimessa tulee olla moottorillinen säätöpiiri sekä nolajännitemittaukseen soveltuva rinnakkainen käämitys. Säädettävässä kelassa on myös oltava mahdollisuus asennonosoitukseen esimerkiksi potentiometrin eli kolminapaisen muuttuvan resistanssin kautta. Tämän lisäksi keloissa, joiden yhteydessä on rinnakkainen kuormitusvastus resistanssia kasvattavana komponenttina, tulee olla kuormakontaktorin ohjaus mahdollista kuormitusvastuksen kytkemiseksi eroon tai käyttöön. Toiossa sijaitsevan kuormitusvastuksen resistanssi voidaan redusoida ensiöpuolelle. Vastus tuottaa primääripuolelle muuntosuhteen mukaisen pätovirran maasulun aikana. Vaihtoehtoisesti suurjännitevastusta voidaan käyttää pätovirtaa tuottavana komponenttina kuristimen kanssa rinnakkain. Resistanssia lisäämällä jäännösvirta kuitenkin kasvaa ja näin vian valokaaren sammuminen voi osittain hankaloitua. Lisäresistanssi on osittain vastoin verkon perusidea eli maasulkuvirran kompensointia, mutta voi olla välttämätöntä suojauksen kannalta selektiivisyyttä ajatellen. Ylilyönnin toistumisen todennäköisyys voi myös kasvaa liian suureksi suurilla nolapiirin resistanssin arvoilla sammumisen jälkeisen paluujännitteen nousun nopeutuessa. (27; 9.)



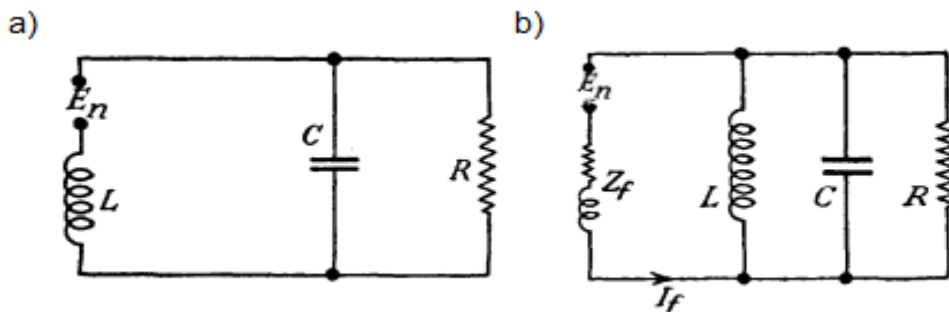
KUVA 24. Sammutuskuristimen sisäinen kytkentä. Nollajännite mitattavissa päiden u1 ja v1 välillä. (27.)

Esimerkiksi jos sammutuskuristin mitoitetaan nimellisjännitteeltään ($123000 \text{ V} / \sqrt{3}$) -jännitetasolle ja kuormitusvastuksen nimelliset arvot ovat 500 V ja 1000 A, tällöin kuormitusvastus tuottaa maasulun aikana ensiöön noin 7 A virran ohmin lain sekä muuntosuhteen redusointinsa mukaisesti. Tämä reaaliarvoinen virta summautuu maasulun jäännösvirtaan osoitinlaskennan mukaisesti.

$$I_{re} = \frac{Un_{toisio}}{Rn_{toisio}} * \frac{Un_{toisio}}{Un_{ensiö}} = \frac{500^2}{1000 * \frac{123000}{\sqrt{3}}} * \frac{V^2}{V^2/A} \sim 7A$$

4.2 Viritys ja resonanssi

Rinnakkaisresonanssipiiri muodostuu sammutuskuristimen, verkon maa- eli nollakapasitanssien sekä järjestelmän häviöiden välille. Resonanssitaajuutena toimii verkon käyttötaajuus. Resonanssiin sijaiskytkentä voidaan esittää vastuksen, kelan, kondensaattorin sekä vikaimpedanssin rinnankytkentänä yksivaiheisen maasulun aikana. Symmetristen järjestelmien yksivaiheisen maasulun mallissa merkittävin osa on nollajärjestelmä, jossa resonanssipiiri muodostuu. Näin voidaan mallintaa resonanssipiiri sievennettynä piirinä yksinkertaisemmassa muodossa, joka on esitettyä kuvassa 25. (9; 21; 19, s. 275 - 289; 23; 26.)



KUVA 25. a) LCR rinnakkaisresonanssi piiri b) Piiri yksivaiheisen maasulun aikana (9, s. 286 - 287.)

Kaavan 17 mukaisesti resonanssi saavutetaan, kun sammutuskuristimen induktiivinen reaktanssi on suuruudeltaan samansuuruinen kuin johtimien ja kaapeleiden maakapasitanssien kapasitiivinen reaktanssi. Helpoimmin säädettävissä oleva suure on kelan induktanssi. Tästä syystä sammutuskuristimella tulee olla moottorillinen säätöpiiri. Kela säädetään kompensointivirtansa perusteella, nollajännitteen avulla tai vaihtoehtoisesti kompensointikertoimella. Mikäli käytössä on automaattisäätäjä, voidaan säätö toteuttaa nollajännitteen lisäksi virtainjektioilla. Ennen kuin säätö voidaan aloittaa, on selvitettävä järjestelmän johdinten ja kaapeleiden muodostama sammutustarve eli näiden muodostama kapasitiivinen virta yksivaiheisen maasulun aikana. Kelan virta-arvo asetetaan

samaan suuruusluokkaan hieman ylikompensoiduksi järjestelmän sammutustarpeen kanssa. Lievä ylikompensointi on sallittua ja joissakin tapauksissa toivottua, mikäli alueen nollakapasitansseissa on merkittävää epäsymmetriaa. Kapasitanssien epäsymmetria aiheuttaa tähtipisteisiin jännitteen nousua terveessä käyttötilanteessa. Sammutetun järjestelmän nollakapasitansseissa on käytännössä aina epäsymmetriaa, vaikka järjestelmän vuorottelu säilyisi hyvänä, johtuen ympäristöstä ja sähkökenttien vaikutuksista. Onnistunut symmetrinen vuorottelu pienentää merkittävästi terveen tilanteen nollajännitettä, mutta ei poista sitä kokonaisuudessaan ja järjestelmässä on käytön aikana jatkuvaa nollajännitettä tähtipisteisiin yli. Nollajännite on suurimmillaan resonanssipisteessä, eli pisteessä, jossa järjestelmän kapasitanssien ja kelan induktanssin muodostavat virrat kompensoivat toisensa yksivaiheisen maasulun aikana. Koska nollajännitteen nousu voi olla liian suurta järjestelmän resonanssipisteessä, suojauksen kannalta voi olla mielekästä asettaa kela ylikompensoidun puolelle pisteeseen, jossa nollajännite pysyy hallitulla tasolla. Lisäksi ylikompensoinnilla voidaan välttää pienet kapasitanssien vuodenaikaiset säästä ja erityisesti lumitilanteesta aiheutuvat muutokset sekä pienet heittelyt kapasitanssien muutoksissa ilman järjestelmän muuttumista alikompensoiduksi. Ylikompensointia joudutaan myös käyttämään tilanteissa, joissa kokeellisten havaintojen perusteella jäännösvirta maasulun aikana jää erittäin pieneksi, eikä tätä voida taloudellisesti järkevin keinoin korjata nollajärjestelmän häviöitä lisäämällä. Kaavalla 19 voidaan laskea jäännösvirran suuruus yksivaiheisen maasulun aikana, mikäli vikaimpedanssia ei oteta huomioon ja kaavalla 20 kapasitanssien muodostama sammutustarve (9; 21; 19, s. 275 - 289; 23; 26.)

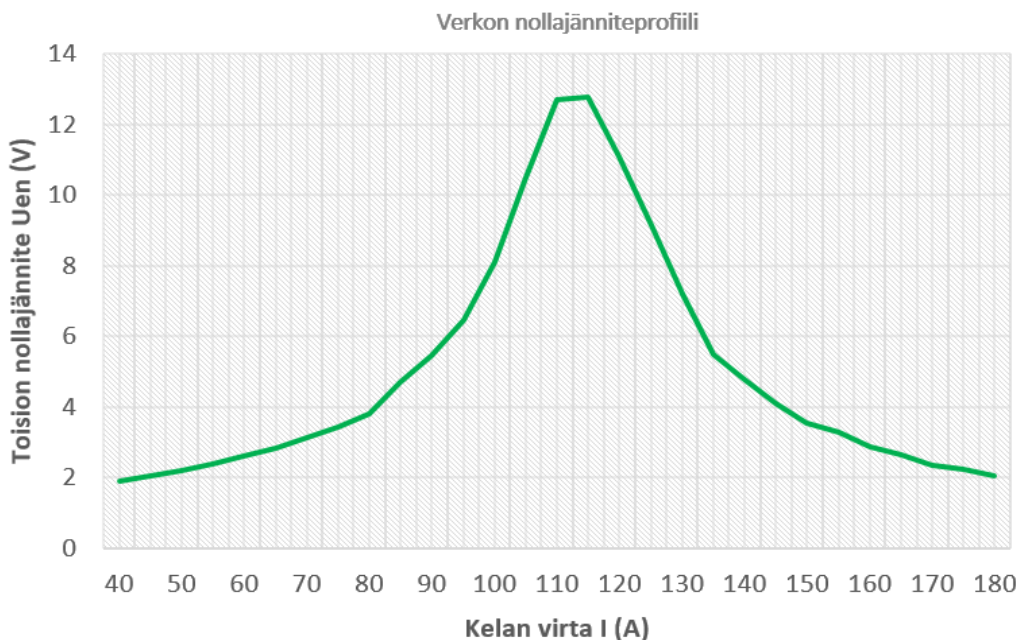
$$I_f = U_L \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad \text{KAAVA 19}$$

$$I_C = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \omega 3 C_e = \sqrt{3} U_n \omega C_e \quad \text{KAAVA 20}$$

Alikompensoitua tilannetta ja vahvasti ylikompensoitua tilannetta tulee välttää, sillä nämä vaikuttavat vian sammumisen todennäköisyyteen. Maasulun aikana vikapaikassa jäännösvirta on samassa vaihekulmassa vikaantuneen vaiheen jännitteen kanssa, kun järjestelmä on täysin sammutettu. Tällöin vikaantuneen vaiheen jännite ja jäännösvirta käyvät nollakohdassaan samalla hetkellä hetkellisarvojen näkökulmasta. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi syttynyt valokaari sammuu itsestään paljon todennäköisemmin kuin tilanteessa, jossa vikavirta on selvästi jännitettä edellä eli vikavirta on kapasitiivista kuten maasta erotetussa verkossa. Myös sammutetun verkon alikompensoinnissa voi aiheutua vikapaikassa tilanne, jossa vikavirta on vikaantuneen vaiheen jännitettä edellä. Lievä ylikompensointi ei ole yhtä haitallista. Silloin vikapaikassa jäännösvirta on jännitettä jäljessä ja jännitteen ylittäessä nollakohdan virta käy vielä nollakohdassaan. Lisäksi lievä ylikompensointi

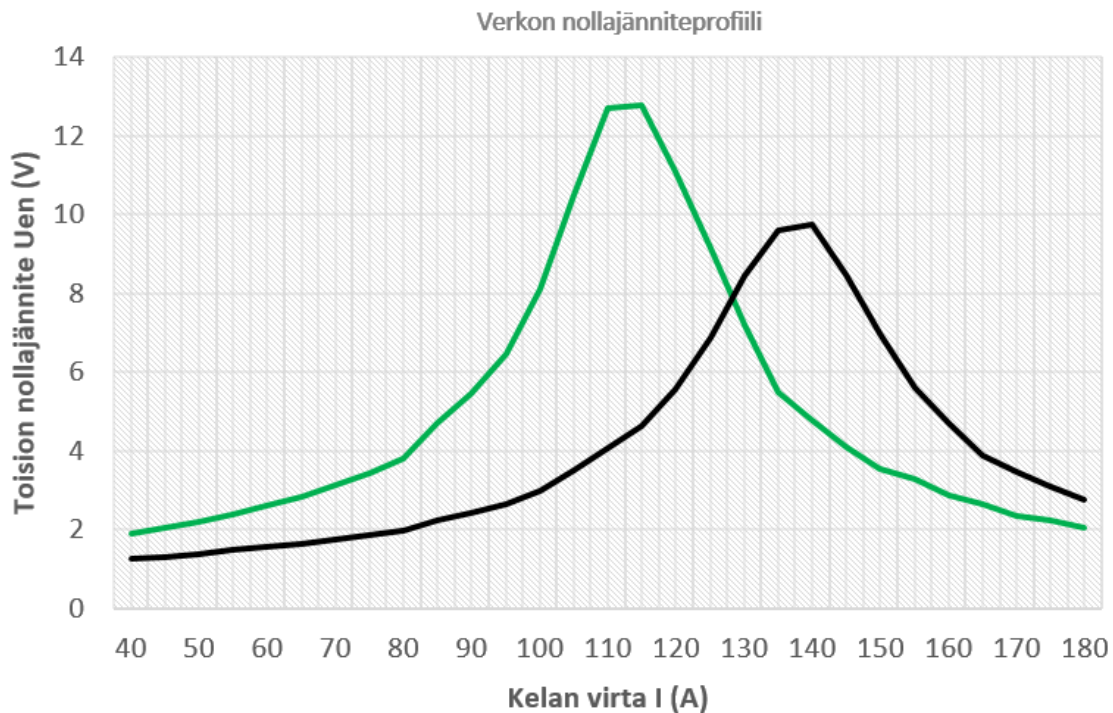
on joissakin tilanteissa välttämätöntä verkon toiminnan turvaamiseksi. Mikäli ylikompensointi kasvaa liian suureksi, voi tämä vaikuttaa paluujännitteen nousun nopeuteen merkittävästi. Paluujännitteen nousun nopeudella on merkittävä vaikutus esimerkiksi valokaaren uudelleen ylilyöntiin viansammuessa. Mikäli paluujännite nousee liian nopeasti, on paljon todennäköisempää, että myös vika lyö uudestaan läpi. Vikaantuneen vaiheen paluujännitteen kasvun nopeuteen lievä ylikompensointi ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi. Joidenkin lähteiden mukaan ylikompensointi voi olla suuruudeltaan jopa 30 %:n luokkaa ilman merkittävää paluujännitteen nopeuden nousua. (9, s.283 - 290.)

Sammutuskuristin voidaan virittää oikeaan pisteeseen laskennallisesti, käytännön kautta kokeellisesti tai automaattisäätäjällä. Tarkastellaan käytännön kautta tehtyjä virityksiä sekä myöhemmissä kappaleissa laskennallisesti tapahtuvaa sammutustarpeen määrittystä. Verkosta voidaan etsiä resonanssipiste ajamalla sammutuskuristin laidasta laitaan ja mittaamalla tähtipisteen jännitettä säädön aikana. Arvojen perusteella voidaan määrittää resonanssikäyrä ja tästä järjestelmän resonanssipiste. Verkko on täysin sammutettu tilanteessa, jossa tähtipisteen ja maan välinen jännite on suurimmillaan. Kuvassa 26 on esitettyä erään sammutusalueen virityksen aikana muodostunut nollajännitteen profiili.



KUVA 26. Ajettu nollajänniteprofiili verkon normaalissa käyttötilanteessa. Kapasitiivinen ja induktiivinen virta kumoavat toisensa maasulun aikana, kun kela asetetaan käyrän korkeimpaan jännitearvoon. Kela asetetaan ylikompensoiduksi, jolloin terveen käytön nollajännite on toisiossa noin 8-9 V.

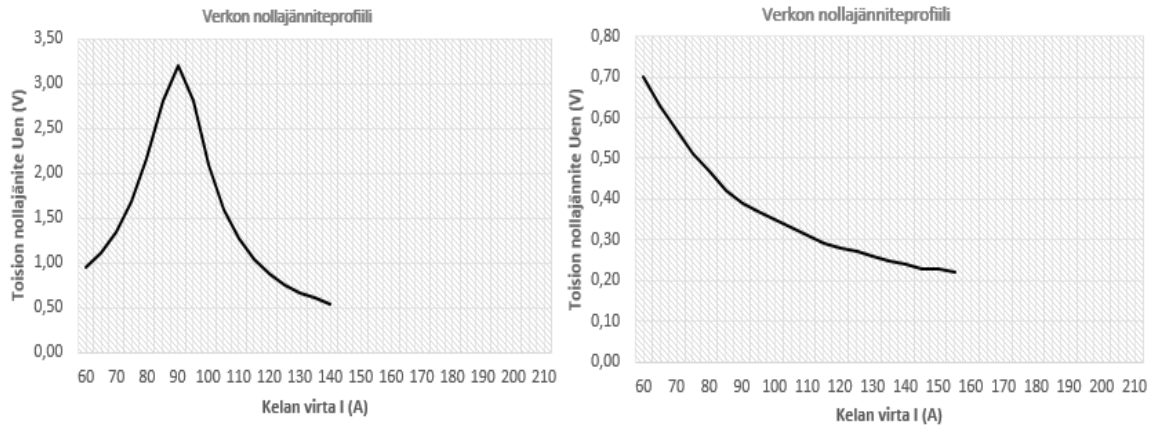
Kuvan 27 mukaisessa tilanteessa samaan alueeseen kytkeytyy lisää sammutustarvetta kytkentätilanteen muuttuessa ja verkon rajauksen muuttuessa suuremmaksi. Verkkoon kytkeytyy noin 59 km lisää avojohto-osuutta. Lisääntynyt kilometrimäärä muutetaan laskennallisesti virtamääräksi. Lisääntynyt verkko-osuus on kilometreinä ja virta-arvona niin suuri, että se aiheuttaa kelan säätötarpeen. Lähes jokaisessa verkon rajapinnan muutoksessa sammutuskuristin tulee säätää uuteen arvoon. Tämä voidaan katsoa käytön kannalta sammutetun verkon haasteeksi, sillä verkon on pysyttävä suojausten näkökulmasta jatkuvasti resonanssipisteen tuntumassa.



KUVA 27. Ajettu nolajänniteprofiili verkon jakorajauksen muutoksen yhteydessä. Vihreä = normaali käyttötilanne, Musta = Verkkoon kytkeytyy hetkellisesti 59 km lisää avojohto-osuutta. Verkko tippuu alikompensoiduksi, mikäli uutta säätöä ei suoriteta.

Useamman kelan käyttö samalla alueella turvaa verkon käyttöä käytön näkökulmasta. Se pienentää riskiä tilanteesta, jossa verkko muuttuisi laitevian seurauksena maasta erotetuksi. Useamman kelan käyttö antaa myös paremman mahdollisuuden toimia odottamattomassa verkon poikkeuksellisessa tilanteessa tai jakorajojen muutoksessa. Kelojen maantieteellinen sijainti ratkaisee paljon verkon käytännöllisyyden näkökulmasta, eivätkä niiden välimatkat saa olla ylimitoitettuja. Jakorajojen muutokset ja kelojen vaihtelu jakorajojen välillä vaikuttavat kuitenkin aina suojaukseen ja sen toimivuuteen. Suojareleiden poikkeusasetteluiden tulisi olla tiedossa jokaisessa muutoksessa, jossa kelan alue muuttuu. Arvioimatta jääneestä muutoksesta ei voida koskaan olla täysin varmoja, miten tämä vaikuttaa suojausten suunnantunnistukseen ja jääkö näin ollen suojaus epäselektiviseksi nolajännitesuojaukselle. Useamman kelan käyttö voi kuitenkin aiheuttaa säädön kanssa

ongelmia. Mikäli kelojen kapasiteetti kasvaa todellista sammutustarvetta suuremmaksi, voi resonanssipiste jäädä ulos kelojen säätöalueelta. Tämä pätee myös alimitoituksessa, jolloin kelakapasiteettia on lisättävä. Seuraavassa kuvassa on esitettyä erään alueen nollajänniteprofiilit kahdessa eri tilanteessa. Ensimmäisessä tilanteessa sammutusalue on yhden kuristimen perässä ja toisessa verkko toimii kahden kuristimien kautta.

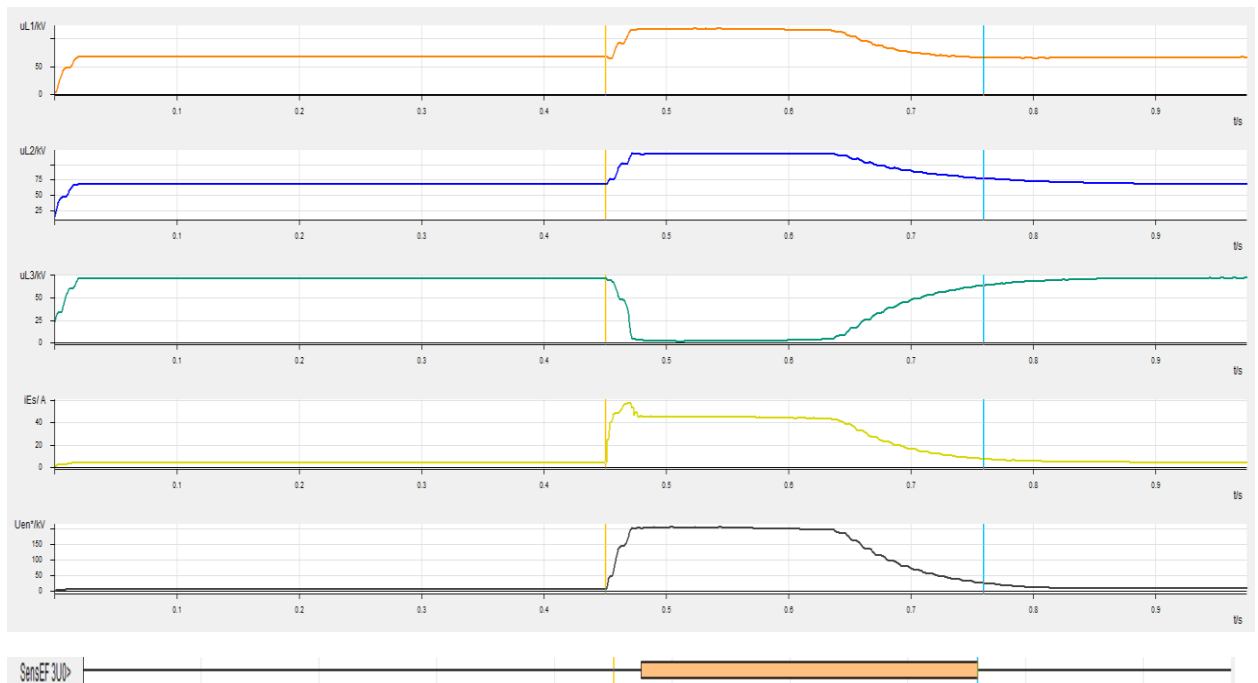


KUVA 28. Verkon nollajänniteprofiilit kahdessa eri tilanteessa. Vasemmalla alue sammutettuna yhden kuristimen kautta ja oikealla sama alue sammutettuna kahdella kuristimella. Kuvassa oikealla verkon resonanssipiste jää kelan säätöalueen ulkopuolelle ylimitoituksen seurauksena. Järjestelmä jää näin ollen ylikompensoiduksi.

On syytä muistaa, että keloja ajamalla etsityt resonanssipisteet muodostavat riskin, mikäli säädön aikana sattuisi verkossa vikatilanne. Tästä syystä säätö täytyy ajoittaa ajankohtaan, jolloin riskit on minimoitu. Riskeinä voidaan pitää tuuli- ja myrskyolosuhteita, sekä liian suurta ilmankosteusprosenttia esimerkiksi vesisateen, lumisateen tai sumun seurauksena. Säätöä tulee myös välttää ajankohtana, jolloin kuuran aiheuttama liian suuri johdinriippuma on mahdollista. Mikäli verkon resonanssipisteen nollajännitteen nousun teoreettinen ja kokeellinen maksimiarvo ei ole tiedossa, täytyy nämä selvittää vähintään teorian tasolla ennen säädön aloitusta. Jos verkossa on muitakin liittyjiä, täytyy näiden liittyjien nollajännitesuojien rajat selvittää täydellisesti kaikilta osin ennen säädön suoritusta. Lisäksi täytyy huomioida ajankohta, sillä säädön yhteydessä on aina riskinä esimerkiksi voimalaitoksen putoaminen verkosta. Tästä syystä esimerkiksi resonanssipisteen etsimistä ei tule suorittaa suuren tuotannon aikana, jolloin lyhyetkin keskeytykset toisivat merkittävät tappiot verkkoon liittyneelle sähköntuottajalle.

4.3 Maasulkusuojaus

Verkon suojaus perustuu oletukseen, että lyhyet yksivaiheiset maasulut tukahdutetaan sammutuskuristinta hyödyntäen ja suojauksen on toimittava ainoastaan tilanteissa, joissa vika jää pitkäaikaiseksi. Esimerkiksi maasulku, joka alkaa ylilyönnistä valokaarena, vaatii suuren virran palamiiseen. Vika sammuu itsestään maasulun alun jälkeen vikavirran asettuessa sammutuksen seurauksena pienen jäännösvirran tasolle. Pieni vikavirta ei kykene ylläpitämään valokaarta ja vika poistuu näin ilman erillisiä suojaustoimintoja. Seuraavassa kuvassa on esitettyä tehollisarvoina yksivaiheinen maasulku ja palautuminen normaaliin käyttötilanteeseen ilman siirronkeskeytyksiä ja katkaisijoiden turhaa mekaanista kuormitusta. (9; 21; 19, s. 275 - 289; 23; 26.)



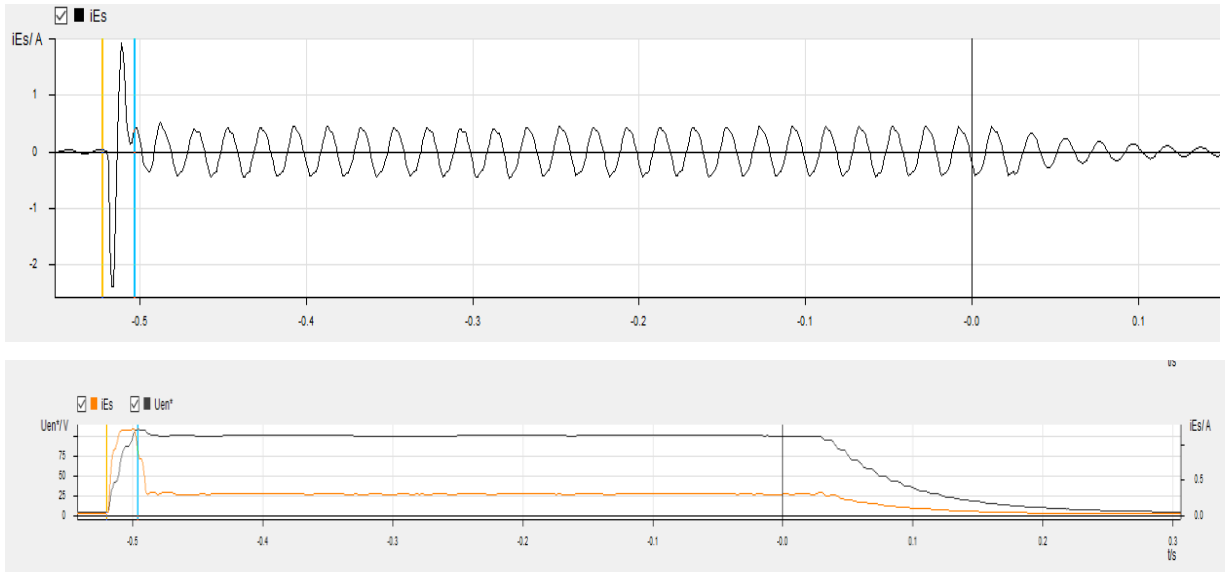
KUVA 29. Distanssireleen 7SA häiriötallenne, yksivaiheinen sammuva maasulku. Vian kestoaika on noin 310 ms. Vikaantunut vaihe L3. Vaihejännitteet ylhäällä kolmella ensimmäisellä rivillä. Herkkä maasulkuvirta ja kolminkertainen nollejännite alapuolella. SenseEF 3U0> havahtuneena vika-ajalta binäärisignaaleista. (20.)

Selektiivisen maasulkusuojauksen toteutus voi tuottaa hankaluuksia, varsinkin tilanteessa, jossa virran loiskomponentti on huomattavan suuri. Jäännösvirran pätökomponentti summutuneena suureen loiskomponenttiin aiheuttaa hankaluuksia suojukselle. Maasulkuvirta voi kuitenkin olla vian sijainnin mukaan induktiivista tai kapasitiivista. Tilanteissa joissa vika ei ole tyypiltään hetkellinen, vaan kyseessä on pysyvä vika, esimerkiksi kuuran aiheuttama liian suuri johdinriippuma tai johdinkatkeama, on mahdollista että maasulkusuojaus ei kykene havaitsemaan vikaa. Toisena

haasteena verkon suojuksessa ovat todella suuret vikaimpedanssit, joiden luotettavassa havaitsemisessa voi olla haasteita. Näistä syistä on yleisesti tarpeellista lisätä kelan rinnakkaispiirin resistanssia ja kasvattaa hallitusti vikavirran reaaliarvoista suuruutta. Sammutetussa verkossa vikavirran havaitsematta jäämiseen täytyy varautua varasuojauksella, joka tässä tapauksessa on nol-lajännitteen perusteella tapahtuva laukaisu. Nollajännite vaikuttaa kuitenkin laajalti koko verkosto-osuuteen jännitekuoppaana, mikä aiheuttaa haasteita selektiivisyydelle. Nollajännitesuojiiin voidaan asettaa ajallista eroa, jolloin laukaisuja voidaan muodostaa porrastetusti. Tämä tapa ei kuitenkaan ole selektiivisyyden kannalta mielekäs vaihtoehto ja se toimii näin varasuojana. Verkolle onkin ol-tava nollajännitesuojan lisäksi myös standardin IEC61850-5 mukainen maasulkusuojaus. Yleisesti ottaen sammutetussa verkossa käytetään herkkää suunnattua maasulkusuojausta, joka perustuu wattimetriseen toimintaan. Maailmalla perinteisenä ratkaisuna on käytetty maasulun suunnan ha-vaitsemiseen tarkoitettua transienttipiikin havaitsevaa funktiota yhdessä wattimetrisen resistanssin avulla toteutetun $\cos\varphi$ -suojuksen kanssa. Näiden lisäksi mahdollinen distanssisuojaus herkällä maasulkusuojaustoiminnolla ja jälleenkytkennöillä on tehokas tapa suojata sammutettua sähkön-siirtoverkkoa. (28; 27.)

Transientti maasulkusuojaus (PTEF) havaitsee sammutetussa järjestelmässä ainoastaan alkavan vian ja sen suunnan, sillä jäännösvirta voi nousta hetkellisesti erittäin jyrkästi latautuneiden maa-kapasitanssien purkautuessa aiheuttaen tyypillisesti transientin virtapiikin maasulun alkuosuuteen. Tämän suojuksen käyttö ei ole välttämätöntä verkossa, jossa on käytössä myös jännitemuuntaja tähti- sekä avokolmiopiirillä, tai muita jännitettä mittaavia mittamuuntajia esimerkiksi kapasitiivisilla ulosotoilla. Vian alku voidaan havaita luotettavasti myös nollajännitteen perusteella. Transientin vikavirran aikana voidaan kuitenkin virranmittauksella suorittaa jo luotettava suunnan määrittäminen. La-tautuneita virtapiikkejä havaittiin hankkeen aikana lähes jokaisen maasulun yhteydessä. Koska sammutetussa verkossa jäännösvirta tippuu erittäin pieneksi kelan virran kompensoidessa nolla-kapasitanssien aiheuttamaa kapasitiivista vikavirtaa, jää transientti kapasitanssien lataussyysäys niin lyhytaikaiseksi, ettei tämän perusteella voida tehdä luotettavia laukaisuja pysyvien vikojen erot-tamiseksi verkosta. Tästä syystä verkon suojaamiseksi on käytettävä herkkää suunnattua maasul-kusuojausta (PSDE), jonka toiminta perustuu nollajännitteen U_0 ja nollajärjestelmän virran $-3I_0$ väliseen kulmaan tai $-U_0$ ja $3I_0$ väliseen kulmaan. Tämä toiminto perustuu siis toisin sanoen tehokertoimeen $\cos\varphi$, jossa φ on osoittimien $-U_0$ ja $3I_0$ välinen kulma. (28; 27; 33.)

Kuvassa 30 on esitettyinä maasulun transientit vikavirrat.



KUVA 30. Sammutuvan maasulun transienttijakso oranssin ja sinisen kursorin välissä. Alemmassa kuvassa tähtipisteen U_{en} ja i_{Es} muodostuminen tehollisarvoina toisiopiirin arvoina. Maasulun luotettavan alun arvioimiseen voidaan käyttää myös nollajännitettä, ajallinen ero ei ole merkittävä, vaikka transientti virta ylittää mahdollisen havahtumisrajansa aikaisemmin. (20.)

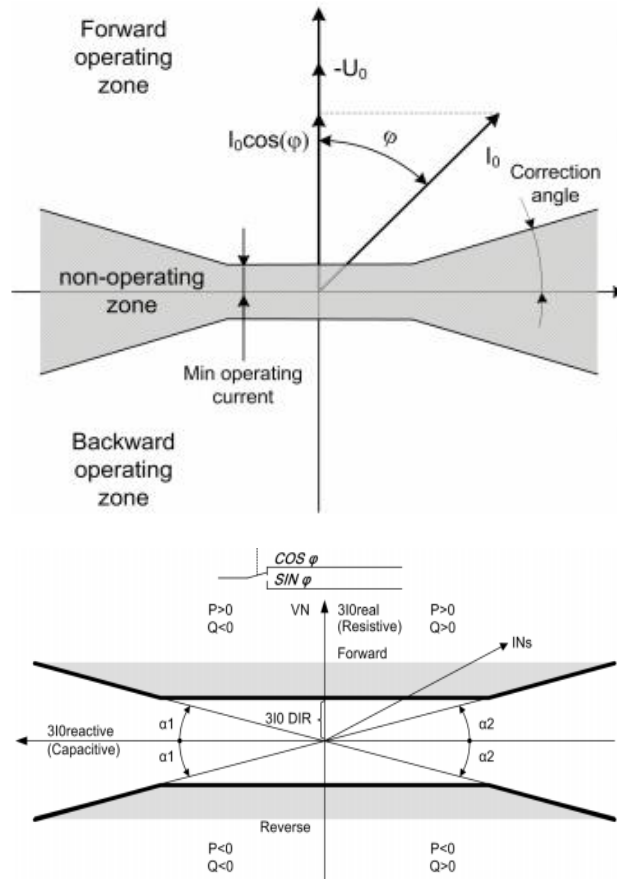
Sammutetussa järjestelmässä virtamuuntajan mittaama virta yksivaiheisen maasulun aikana on induktiivista verkon terveessä johtolähdössä, jolloin terveen johtolähdön kapasitanssien kautta ei kulje merkittäviä virtoja. Terveen johtolähdön nollavirta on noin 90° nollajännitettä jäljessä. Vikaantuneen lähdön kohdalla kulma poikkeaa puolestaan teoreettisesti tästä kulmasta ja on vähän suurempi tai pienempi. Kulmaero vikaantuneen ja terveen johtolähdön välillä jää yleensä erittäin pieneksi ja näin verkon tähtipistepiiriin on saatava lisää resistanssia, jolloin maasulun syntyessä vikavirran reaaliosa kasvaa ja näin mittaussignaalien välistä kulmaeroa saadaan kasvatettua. Tällöin wattimetrinen toiminto on luotettava indikoimaan vikaa, mikäli terveen ja vikaantuneen johtolähdön välinen kulmaero saadaan kasvatettua tarvittavan suureksi. On myös erittäin tärkeää pystyä erottamaan vikaantunut ja terve johtolähtö toisistaan, sillä suojaus ei saa antaa johtoviassa laukaisukäskyä vian suuntautuessa taakse aseman kiskoa päin. Vian suunta pystytään päättämään päätö- ja loiskomponenttien avulla. Vian suunta noudattaa jäännösvirran suuntaa sekä seuraavia ehtoja, jotka voidaan määrittää nollajärjestelmän jännitteen ja virran avulla: (28; 27; 30; 31.)

$$\text{Eteenpäin suuntautunut vika, kun } \begin{matrix} P_0 > 0 \\ Q_0 < 0 \end{matrix}, \text{ tai } \begin{matrix} P_0 > 0 \\ Q_0 > 0 \end{matrix} \quad \text{KAAVA 21}$$

$$\text{Taaksepäin suuntautunut vika, kun } \begin{matrix} P_0 < 0 \\ Q_0 < 0 \end{matrix}, \text{ tai } \begin{matrix} P_0 < 0 \\ Q_0 > 0 \end{matrix} \quad \text{KAAVA 22}$$

$$\text{Eteenpäin, kun } I_0 * \cos\varphi \text{ (ABB), tai } -3I_0 * \cos\varphi \text{ (Siemens)} \quad \text{KAAVA 23}$$

$$\text{Taaksepäin, kun } -(I_0 * \cos\varphi) \text{ (ABB), tai } 3I_0 * \cos\varphi \text{ (Siemens)} \quad \text{KAAVA 24}$$

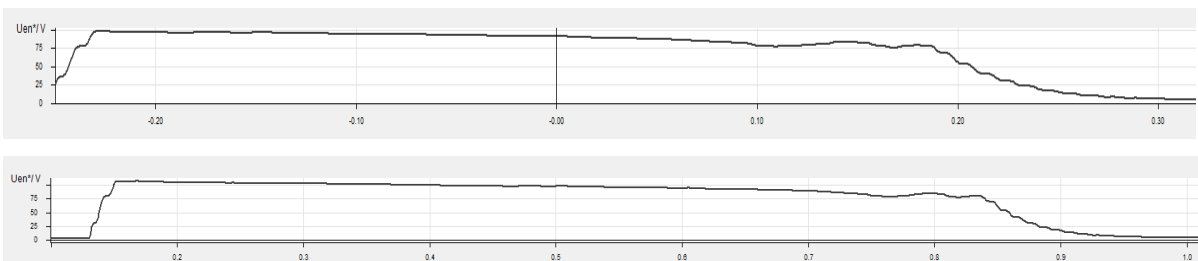


KUVA 31. $\cos \varphi$ periaate wattimetrisessä suojausfunktiossa ABB ja Siemensin releiden toteutuksessa (31, s.164; 30, s. 222).

Pelkällä nolajännitesuojauksella ja nolajännitelaukaisulla (AZVT), ei voida toteuttaa selektiivistä maasulkusuojausta täydellisesti. Nolajännitesuojien ajallinen porrastaminen on mahdollista, mutta tämä ei tuota haluttua lopputulosta. Tästä syystä sammutetun verkon kohdalla jäännösvirta on ratkaisevassa roolissa selektiivisyyden kannalta tietyissä haastavissa vikatilanteissa. Verkolla täytyy olla mittamuuntajat, joiden kulmavirheet voidaan korjata ohjelmallisesti suojarleessä oikeaksi. Mittamuuntajien kulmavirheet on otettava huomioon ja käytettävä suojauksessa korjattua herkkää maasulkuvirtaa. On myös huomioitava, että luotettavan suojauksen toteuttamiseksi on mittamuuntajien toteutettava tietyt tarkkuuskriteerit. Mikäli kulmaero ei riitä luotettavaan vian havaitsemiseen, on tätä kasvatettava lisäämällä nolajärjestelmän häviöitä eli reaali-osaa. Suojaustoiminnot tulee asettaa viiveellisesti niin, että sammutuskuristimelle annetaan mahdollisuus poistaa automaattisesti verkosta sammuvat viat. Näin vältetään ylimääräisiltä siirronkeskeytyksiltä. Tarkkaa vikapaikkaa ei voida määrittää hyödyntäen suojarleitä. Tähän tarvitaan esimerkiksi kulkuaaltomittaukseen (TWFL) soveltuvaa GPS-aikasynkronoinnilla varusteltua laitteistoa johtolähdön molempiin päihin. (28; 27; 30; 31; 32, s. 286.)

Suojauksen kannalta sammutetulla verkolla on muitakin haasteita. Verkon suojaus perustuu siihen oletukseen, että sammutuskuristin on koko ajan resonanssipisteen tuntumassa. Voidaankin todeta, että tietyissä tilanteissa verkko-osalla, tai ”sammutussaarekkeella”, tulisi olla varasuojausmahdollisuudet. Esimerkiksi sammutuskuristimen, eristimen, ylijännitesuojan tai tähtipistepiirin erottimen vioittuessa voidaan yhden sammutuskuristimen varassa toimivalla verkko-osuudella joutua tilanteeseen, jolloin suojareleillä tulisi olla varalta toiset asetteluryhmät maasta erotetun verkon asetteilla. Erotetussa verkossa käytetään $\sin\varphi$ -arvoon perustuvaa maasulkusuojausta, joka perustuu virran reaktiiviseen osaan. Kantaverkon jännitetasoissa on kuitenkin vältettävä tilannetta, jossa verkko joutuisi maasta erotetuksi, sillä tämä saattaa altistaa verkon laitteet korkeille transientti-ilmiöille. Maasta erotetussa verkossa esiintyy poikkeuksellisen suuria transientti-ilmiöitä verrattuna muihin ratkaisuihin. Vaihtoehtoisesti riski voidaan poistaa useammalla sammutuskuristimella, joiden säätörajan on katettava koko alueen säätötarve toisen kelan vioittuessa tai ollessa eroon kytkettynä. Useamman kelan ratkaisu toisaalta tuottaa taas omat haasteensa verkon virityksen kannalta ja suojausten suunnittelussa. (28; 27; 30; 31; 32; 18, s. 5 - 8; 19, s. 270 – 275.)

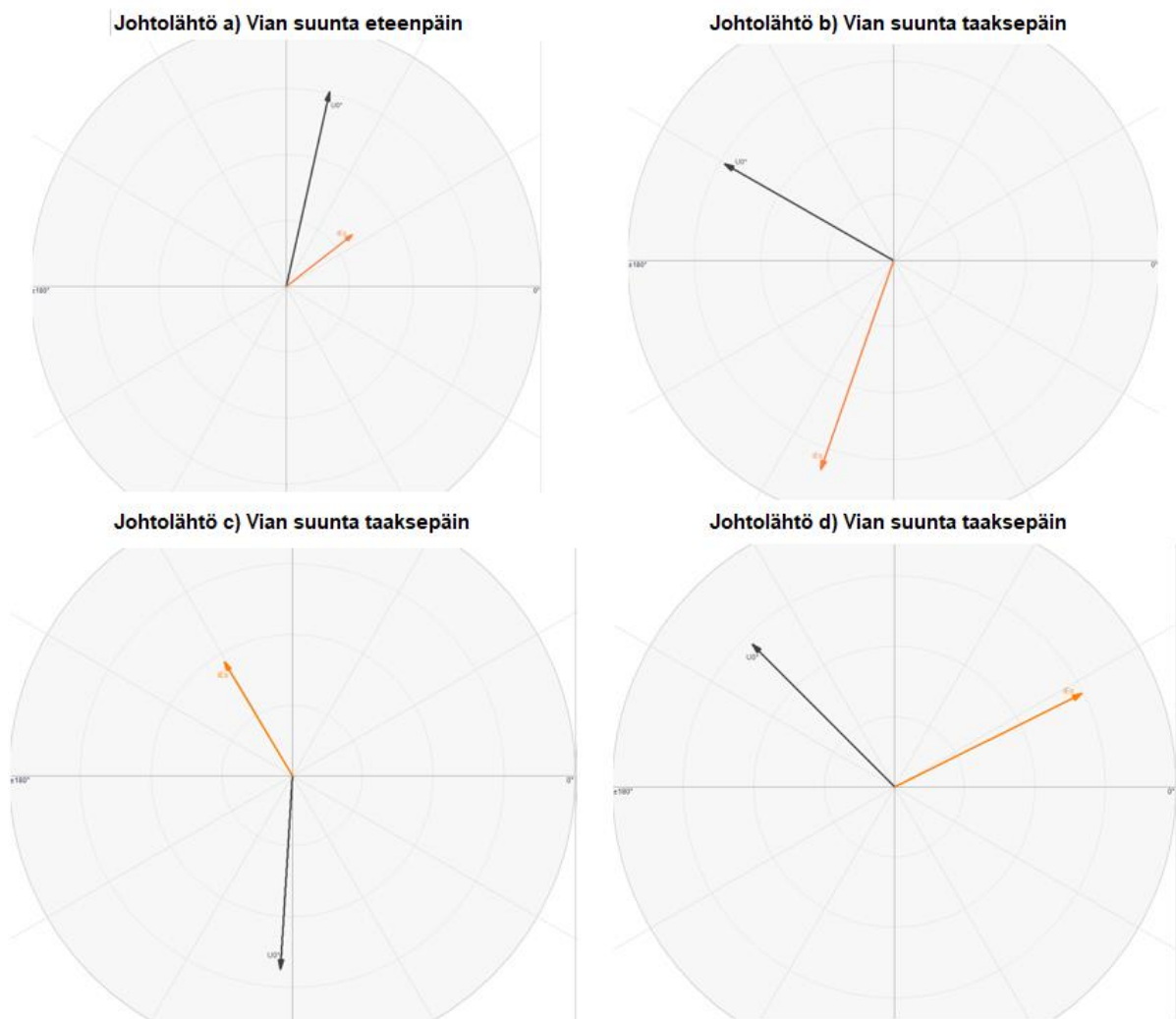
Seuraavaksi tarkastellaan nollajännitteen tehollisarvon käyttäytymistä sammuvan maasulun aikana sammutetussa verkossa 7SA6-distanssireleen häiriötallennetta hyödyntäen ja osoitetaan, että nollajännitettä voidaan käyttää ainoastaan vian alun havaitsemiseen sekä viimeisenä varasuojana verkolle. Kuvassa 32 on havainnollistettuna nollajännitteen tehollisarvon muodostuminen vikaantuneen vaiheen jännitekuopan seurauksena alueen sisällä. Vaikka jännite on pääosin paikallinen suure, vaikuttaa maasulun aiheuttama jännitekuoppa todella laajalle alueelle nollajännitteen nousuna. Välimatkaa mittauskohdilla on noin 130 km. On huomioitava, että lähes identtiset käyrät pienillä aikaeroilla saadaan jokaisesta sammutusalueella olevasta nollajännitettä mittaavasta mittamuuntajasta, kun maasulun ajallinen kesto ylittää tietyn minimiarvonsa.



KUVA 32. Nollajännitehavahtumiset tehollisarvona 130 km:n välimatkaerolla (20).

Kuvassa 33 on esitetty yksivaiheisen maasulun suunnan tunnistus distanssireleiden 7SA6 häiriötallenteista aseman eri johtolähdöiltä. Siemensin SIGRA4-ohjelmassa valitaan halutut analogiasig-

naalit tarkastelua varten. Suunnan päättely tehdään $\cos\varphi$ -suojaustoiminnon perusteella. Johtolähdöistä kolme havahtuu taaksepäin ja yksi eteenpäin. Kulmavertailussa käytetään signaaleja iEs (oranssi) ja skaalausyistä arvoa U_0^* (musta). Kuvassa 31 on käytetty ABB:n toteutuksessa vertailuun arvoja $-U_0$ ja I_0 , voimme suorittaa vertailun myös arvoilla iEs ja U_0 Siemensin toteutuksen mukaisesti. Näiden osalta kulma säilyy samana, sillä iEs ja I_0 sekä U_0 ja $-U_0$ ovat vastakkaisuuntaiset toisiinsa nähden. Mikäli on mahdollista suorittaa vertailu käyttäen herkkää maasulkuvirtaa iEs, tulisi vertailu tehdä tätä hyödyntäen. U_0 sekä U_{en} ovat saman suuntaiset, joten skaalausyistä käytämme arvoa U_0 . (30; 31.)

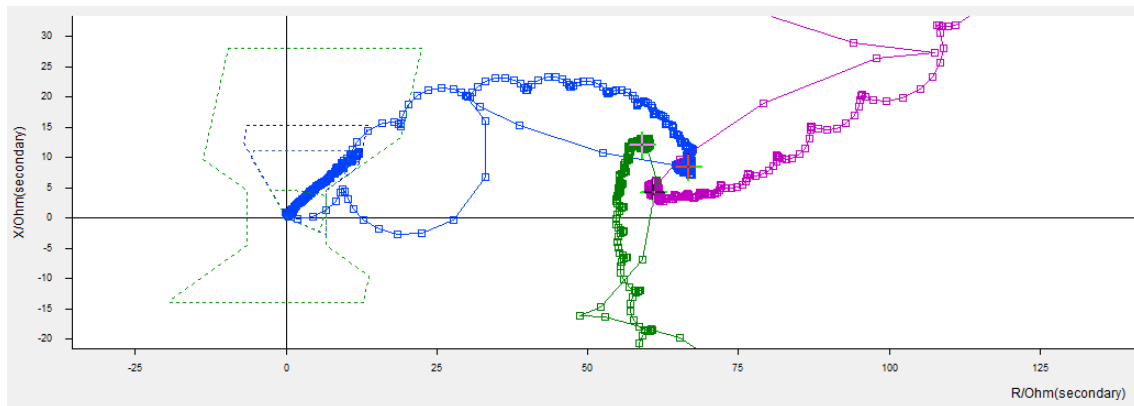


KUVA 33. Johtolähtöjen 7SA6 häiriötallenteet, $\cos\varphi$ suojauksen tehollisarvojen vektorit (20).

Distanssisuojaus (PDIS) ei saa laukaista yksivaiheisen maasulun aikana, kun verkko on sammuttu. Distanssireleen suunnattua maasulkusuojausta voidaan kuitenkin käyttää viiveellisesti, koska

sammutuskuristimen ja verkon muiden suojiin oletetaan hoitavan maasulut. Distanssirelettä voidaan käyttää automaattisten jälleenkytkentöjen (RREC) käynnistyksessä sekä ylivirtoihin ja virtojen epäsymmetriaan perustuvissa vioissa. (32, 9.)

Tarkastellaan seuraavaksi distanssireleen maasulkuvyöhykkeitä ZE kuvassa 34. Vaikka laukaisevilla vyöhykkeillä käydään, releen maasulkuimpedanssit eivät saa laukaista yksivaiheisen maasulun aikana. Kuvassa vikaantunut vaihe on L3 (sininen).



KUVA 34. Distanssireleen vyöhykkeet ZE ympyrädiagrammissa. Impedanssien hetkellisarvot kuvattuna pisteinä. Vikaantunut ZL3E* käynyt myös laukaisevalla vyöhykkeellä. Distanssireleen mitatun maasulun impedanssin hetkellisarvot eivät saa laukaista vikaa. (20.)

Maasulkusuojausta voidaan myös toteuttaa käyttämällä virtamuuntajaa tähtipisteessä kuristimen maadoituspiirissä. Virtamuuntajan toisiopiirit johdotetaan ylivirtareleelle, jolle voidaan asettaa viiveellisiä ja välittömiä laukaisuportaita. Standardin SFS 6001 mukaan sammutuskuristimen maadoitusjohdin tulee mitoittaa kelan maksimivirran mukaisesti. Tällöin ylivirtareleen on lauettava välittömästi lähellä maksimivirran arvoa. Ylivirtareleen hidastettu laukaisu voidaan toteuttaa tarvittaessa esimerkiksi 4 s:n viiveellä maavirran ylittäessä 10 % mitoitettusta kapasitiivisesta virrasta. (3, s.94.)

Lopuksi on syytä nostaa esille seuraavat kohdat sammutetun verkon suojauksesta: Koska kapasitiivinen ja induktiivinen virta kumoavat toisensa yksivaiheisen maasulun aikana, on olemassa aina riski, että suurilla vikaimpedansseilla erittäin kaukana tapahtuvassa viassa vikavirta jää erittäin pieneksi, eikä suojaus havaitse tätä esimerkiksi virheellisen toiminnan seurauksena. Tämän lisäksi Lapin verkko on moniomisteinen ja pitkiä johtolähtöjä on myös asiakkaiden verkossa. Asemat sekä voimajohdot ovat sammutusalueissa kantaverkkoyhtiön, jakeluverkkoyhtiöiden ja sähköntuottajien omistuksessa. Näin ollen suojalaitteisto verkossa on myös useamman tahon omistuksessa. Histo-

riassa on ollut tilanteita, jolloin suojat eivät ole havahtuneet vikoihin, jotka ovat jääneet jäännösvirraltaan erittäin pieneksi. Näissäkin tilanteissa viimeistään verkon nollajännitesuojauksien pitäisi toimia ja havaita viat, mutta on kuitenkin varauduttava tilanteeseen, jossa näin ei tapahdu. Hankkeen myötä jokaiselta asemalta, jossa sammutuskuristin sijaitsee, tuodaan nollajännitteet hälytysrajoi-
neen kaukokäyttöön, mikä mahdollistaa verkkokeskuksen reaaliaikaisen jatkuvan valvonnan. Näin Fingridin kantaverkkokeskuksella on reaaliaikainen kuva asiakkaiden verkon tilasta, millä pienennetään sammutetun verkon jäännösvirran aiheuttamaa riskiä ja saadaan verkkokeskuksen nopeiden vasteaikojen tuoma viimeinen turva verkon siirtovarmalle käytölle.

5 SAMMUTUSTARPEEN LASKENTA

Käytön ja suojauksen näkökulmasta kuristimien jatkuva säätö jakorajojen muutostilanteissa tuottaa vuosittain ylimääräistä työtä. Jakeluverkkoyhtiöillä on käytössä automaattisia laitteistoja, jotka pitävät kuristimen säätöä resonanssipisteen tuntumassa nollajännitteen vaihtelua seuraamalla tai virtainjektioiden avulla. (35.) Kysymyksenä on kuitenkin kyseisten laitteistojen luotettavuus, kun samalla alueella on useita säädettäviä keloja tai jakorajojen muutosten seurauksena virta-arvot ovat monia kymmeniä ampeereita. Automaattisäätö voikin olla erittäin toimiva ratkaisu yhden kelan ratkaisuisissa jakeluverkon jännitetasoissa, mutta useamman kelan alueilla, joissa muutokset voivat olla suuria, halutaan kantaverkkokäytössä lisää käyttökokemukseen perustuvaa näyttöä laitteiston luotettavuudesta. Tästä syystä jatkossa on mielestäni järkevämpi ratkaisu mahdollistaa kelojen etäsäätö käytönvalvonnan kautta verkkokeskuksesta, jonka jälkeen automaattisäätäjien käytännöllisyyttä voidaan tarkastella jatkokehityksenä.

Kuristimien säätöön tarvitaan siis luotettava tapa, jolla sammutustarve voidaan määrittää kelan moottoriin käyttöikä säästämällä eli välttämällä fyysisistä äärialue säätöä. Kuten aikaisemmin todettiin, fyysinen säätö tulisi toteuttaa ainoastaan tilanteissa, joissa tämä koetaan välttämättömäksi. Yllä mainituista syistä, mikäli järjestelmä on symmetrisesti vuoroteltu, sammutustarve voidaan selvittää riittävällä tarkkuudella määrittämällä järjestelmän nollakapasitanssit laskennallisesti. (9.)

5.1 Avojohtojen maakapasitanssien laskenta ilman ukkosköysiä

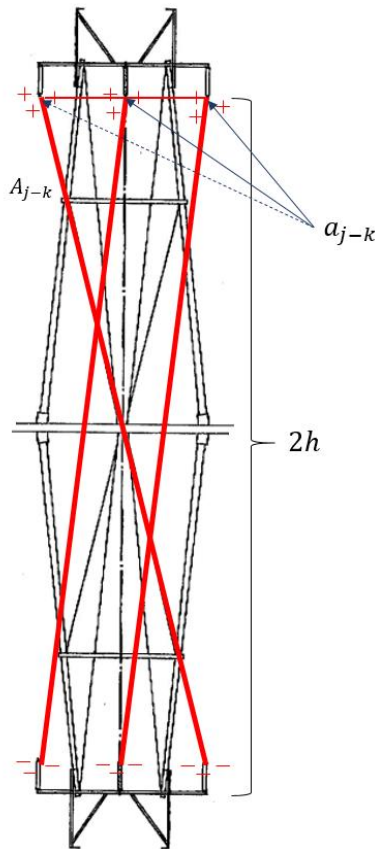
Vuorotellun ukkosjohdottoman kolmivaihejärjestelmän johtimien itseiskapasitanssit eli maakapasitanssit voidaan laskea johdinta kohden riittävällä tarkkuudella kaavalla 25, mikäli johtimet ovat samassa potentiaalissa ja muodostuneet varaukset pituusyksikköä kohden oletetaan samaksi. (37, s.97 - 130; 9.)

$$C_s = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{2h_{eq}}{r} \left(\frac{A_{eq}}{a_{eq}}\right)^2} F/m \quad \text{KAAVA 25}$$

Maakapasitanssien suuruuteen vaikuttaa johdinten geometriset etäisyydet, peilikuvat maanpintaan nähden sekä johdinten keskimääräinen korkeus, joka voidaan laskea kaavalla 26 (37, s. 117).

$$h_j = h - \frac{2}{3}s_j \quad \text{KAAVA 26}$$

Vuorotellun kolmivaiheisen ukkosjohdottoman järjestelmän potentiaalikerroimien laskemiseen käytettyjen etäisyyksien määrittämiseksi riittää kuvan 35 mukaiset etäisyydet (37, s. 97 - 130; 9, s. 291).



KUVA 35. Peilikuvamenetelmä: vuorotellun ukkosjohdottoman kolmivaihejärjestelmän maakapasitanssien laskentaa havainnollistava kuva. Kun ei oteta huomioon ukkosköysiä ja järjestelmä on vuoroteltu, riittää ainoastaan kuvan mukaisten punaisten viivojen etäisyyksien määrittäminen. On huomioitava, että laskettaessa on käytettävä johdinten keskikorkeutta, ei ripustuskorkeutta.

Etäisyyksien määrittämisen jälkeen saaduista tuloksista on ratkaistava geometriset keskietäisyydet (37, s. 109, 11, s. 204).

$$\begin{aligned}
 A_{eq} &= \sqrt[3]{A_{13}A_{21}A_{32}} \\
 a_{eq} &= \sqrt[3]{a_{12}a_{23}a_{31}} \\
 h_{eq} &= \sqrt[3]{h_{j1}h_{j2}h_{j3}}
 \end{aligned}
 \tag{KAAVA 27}$$

Mikäli johtimena toimii niputettu johdin esimerkiksi 2-DUCK, täytyy tämän lisäksi laskea johtimen keskimääräinen geometrinen säde. Nippujohtimen tapauksessa osajohtimien määrä ja etäisyydet toisiinsa vaikuttavat tähän merkittävästi. Ekvivalenttinen säde on laskettavissa kaavalla 28. (23.)

$$r_n = \sqrt[n]{re^{n-1}}$$

KAAVA 28

Maakapasitanssin arvo per pituusyksikkö saadaan sijoittamalla ratkaistut arvot yhtälöön 25. On huomioitava, että laskentaa voidaan käyttää ainoastaan tapauksissa, joissa järjestelmä on varmuudella vuoroteltu tasaisesti sekä epäsymmetriaa aiheuttavia tekijöitä ei ole merkittävästi johtomatkalla. Lisäksi täysin tarkkoihin tuloksiin on laskennallisesti erittäin työlästä päästä. Etenkin tilanteissa, joissa maaston korkeus ja pylvästyypit vaihtelevat rajusti, voi olla hankaluuksia päästä luotettaviin tuloksiin. On myös huomioitava, että johtojen riippumat voivat vaihdella erikohdissa verkkoa. Nämä poikkeukset huomioiden pylväsväleittäin toteutetulla laskennalla voidaan mielestäni päästä tarpeeksi lähelle tarkkaa arvoa. Harkinnan varaan jää, onko työmäärä tämän arvoista.

Tarkastellaan vuoroteltua avojohto-osuutta ilman ukkosjohtimia. Valitaan johdintyyppiä 1-DUCK ja lasketaan johtimen tuottama sammutustarve kilometriä kohti seuraavien tietojen mukaisesti. Voimajohtojen ekvivalenttinen halkaisija kapasitanssin kannalta on 23,81 mm. Oletetaan keskimääräiseksi asennuskorkeudeksi 12 m ja keskikorkeudeksi maasta 10 m riippuman huomioiden. Käytetään jännitteen kertoimena IEC60909 mukaista kerrointa c . Virtajohtimien väliseksi etäisyydeksi oletetaan 4,4 m ja pylväsrakenteet ovat tyypiltään H1 suurimman osan matkasta. Saadaan:

$$C_s = \frac{2 * \pi * 8,854 * 10^{-12}}{\ln\left(\frac{(2 * 10 * (\sqrt[3]{(\sqrt{20^2 + 4,4^2})(\sqrt{20^2 + 4,4^2})(\sqrt{20^2 + 8,8^2}))^2)}{(0,011905 * (\sqrt[3]{4,4 * 4,4 * 8,8})^2)}\right)} F/m$$

$$= 5,517235568 * 10^{-12} F/m$$

$$I_c = \frac{1,1 * 110000}{\sqrt{3}} * 2 * \pi * 50 * 3 * 5,517235568 * 10^{-12} * 1000$$

$$\sim \mathbf{0,363 A/km}$$

Samaan vastaukseen päästään käyttämällä potentiaalikerroimia, jotka esitellään tarkemmin ukkosköysiä käsittelevässä luvussa 6.2. Kertoimia käyttämällä saadaan vuoroteltuna samoilla parametreillä:

$$P = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \left[\frac{\ln \frac{2 * 10}{0,011905}}{\sqrt[3]{4,4 * 4,4 * 8,8}} \ln \frac{\sqrt[3]{\sqrt{20^2 + 4,4^2} \sqrt{24^2 + 4,4^2} \sqrt{24^2 + 8,8^2}}}{\sqrt[3]{4,4 * 4,4 * 8,8}} \ln \frac{\sqrt[3]{\sqrt{20^2 + 4,4^2} \sqrt{20^2 + 4,4^2} \sqrt{20^2 + 8,8^2}}}{\sqrt[3]{4,4 * 4,4 * 8,8}} \right]$$

$$= \begin{bmatrix} 1,33495461 * 10^{11} & 2,387736495 * 10^{10} & 2,387736495 * 10^{10} \\ 2,387736495 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} & 2,387736495 * 10^{10} \\ 2,387736495 * 10^{10} & 2,387736495 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$C_e = \frac{1}{P_s + 2p_m} = \frac{1}{1,33495461 * 10^{11} + 2 * 2,387736495 * 10^{10}} = 5,517235568 * 10^{-12} F/m$$

$$I_c = \frac{1,1 * 110000}{\sqrt{3}} * 2 * \pi * 50 * 3 * 5,517235568 * 10^{-12} * 1000$$

$$\sim \mathbf{0,363 A/km}$$

Kyiseisillä parametreillä esimerkiksi 50 km:n johto-osuus tuottaa noin 18 A:n kompensointitarpeen. On huomioitava, että ukkosköydet lisäävät maakapasitanssien suuruutta arviolta 10 - 20 % ja näin ollen myös kompensoinnin tarvetta, kun tarkastelun kohteena on laajoja johto-osuuksia.

5.2 Avojohtojen maakapasitanssien laskeminen ukkosköysillä

Ukkosköysillä laskettaessa kapasitanssien laskeminen on haastavampaa, eikä vuorotellussakaan tilanteessa voida muodostaa selvää kuvan 35 tapaista kuvaa. Tästä syystä tilannetta on käsiteltävä kuin vuorottelematonta tilannetta ja laskettava etäisyydet jokaisen johtimen ja ukkosköyden näkökulmasta. Ukkosköydet lisäävät maakapasitanssien suuruutta oleellisesti, mutta toisaalta taas pienentävät järjestelmän käyttökapasitanssin suuruutta. Koska sammutetun verkon kannalta merkityksellinen suure on järjestelmän maakapasitanssit, on ukkosköysillä sammutustarvetta kasvattava vaikutus. Lisäksi ukkosköydet kuljettavat osan maasulkuvirroista ja suojaavat järjestelmää sään aiheuttamilta poikkeusoloilta. Ukkosköysien yhteydessä maavirtaan vaikuttaa ukkosköysien reduktiokerroin, jota ei kuitenkaan sammutustarpeen tapauksessa huomioida, sillä kapasitanssit muutetaan virroiksi ainoastaan siitä syystä, että kelojen asennonosoitus esitetään virtana. Vastaavasti ukkosköysistä voi olla haittaa, mikäli ne painuvat vaihejohtimien kanssa samalle tasolle esimerkiksi kuuran vaikutuksesta ja aiheuttavat häiriöitä verkkoon heilumansa mukaisesti. (9, 291 - 298; 37, s. 117 - 127; 23; 11, s. 210 - 212; 3, s. 121.)

Ukkosjohtimien mukaan ottaminen vaatii potentiaalikertoimien käytön, tässä työssä laskentatapa on esitetty Elovaaran ja Haarlan esittämän tavan mukaisesti kirjassa Sähköverkot 1 sekä Power System Analysis and Design- kirjan kapasitanssiyhälöitä soveltaen (37, s.117 - 298, 11, s.178 - 232).

Potentiaalikertoimet muodostuvat seuraavalla tavalla peilikuvamenetelmää käyttäen:

$$p_{jj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_j}{r_n}$$

$$p_{jk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{A_{jk}}{a_{jk}}$$

KAAVA 29

Potentiaalikertoimet voidaan johtojen etäisyyksien perusteella sijoittaa potentiaalimatriisiin. Matriisissa vaihejohtimien numerointi on järjestyksessä ja ukkosjohtimien merkinnässä käytetään kirjaimia u ja w. Matriisi on seuraavanlainen tilanteessa, jossa käytössä on kolmivaihejärjestelmä kahdella ukkosjohtimella:

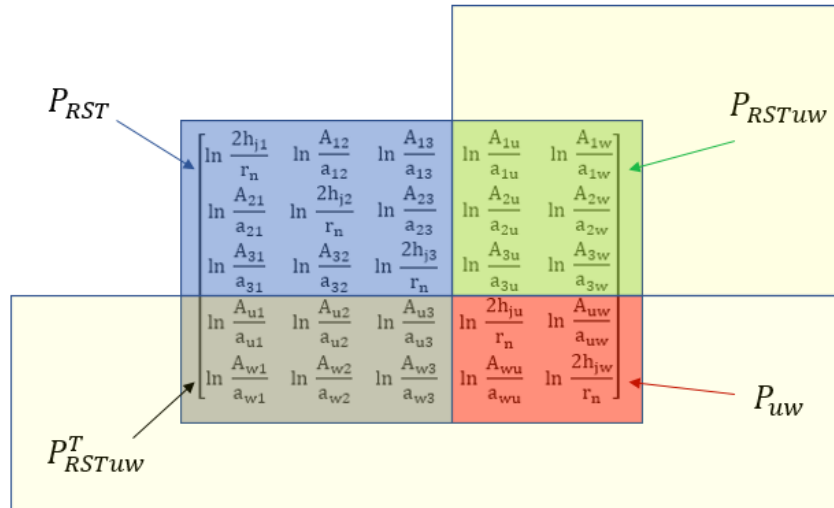
$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{1u} & p_{1w} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{2u} & p_{2w} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{3u} & p_{3w} \\ p_{u1} & p_{u2} & p_{u3} & p_{uu} & p_{uw} \\ p_{w1} & p_{w2} & p_{w3} & p_{wu} & p_{ww} \end{bmatrix}$$

KAAVA 30

Koska jokaisella p-arvolla on sama kerroin, matriisi voidaan ilmoittaa sijoittamalla varauskerroimet matriisiin:

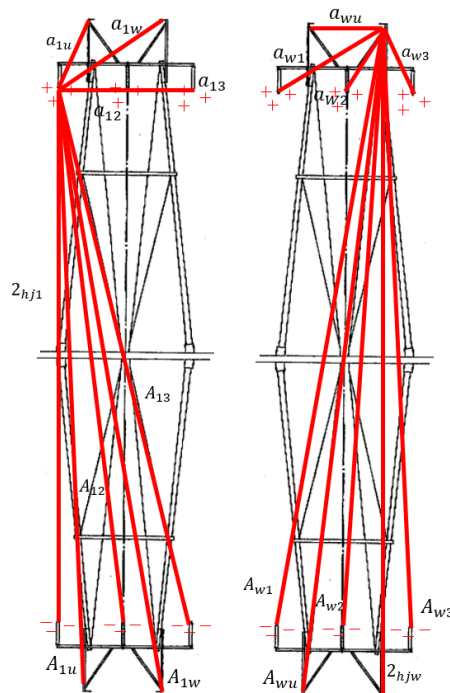
$$P = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_{j1}}{r_n} & \ln \frac{A_{12}}{a_{12}} & \ln \frac{A_{13}}{a_{13}} & \ln \frac{A_{1u}}{a_{1u}} & \ln \frac{A_{1w}}{a_{1w}} \\ \ln \frac{A_{21}}{a_{21}} & \ln \frac{2h_{j2}}{r_n} & \ln \frac{A_{23}}{a_{23}} & \ln \frac{A_{2u}}{a_{2u}} & \ln \frac{A_{2w}}{a_{2w}} \\ \ln \frac{A_{31}}{a_{31}} & \ln \frac{A_{32}}{a_{32}} & \ln \frac{2h_{j3}}{r_n} & \ln \frac{A_{3u}}{a_{3u}} & \ln \frac{A_{3w}}{a_{3w}} \\ \ln \frac{A_{u1}}{a_{u1}} & \ln \frac{A_{u2}}{a_{u2}} & \ln \frac{A_{u3}}{a_{u3}} & \ln \frac{2h_{ju}}{r_n} & \ln \frac{A_{uw}}{a_{uw}} \\ \ln \frac{A_{w1}}{a_{w1}} & \ln \frac{A_{w2}}{a_{w2}} & \ln \frac{A_{w3}}{a_{w3}} & \ln \frac{A_{wu}}{a_{wu}} & \ln \frac{2h_{jw}}{r_n} \end{bmatrix}$$

Voimme jakaa matriisin useampaan osaan, jolloin huomataan ukkosköysien vaikutus. Keltaisella alueella ukkosköysien vaikutus ja muut värit kuvaavat matriisien rajouksia kuvassa 36. (37, s.125; 11 s. 211.)



KUVA 36. Mallinnus matriisien jaosta. Kuvassa yläindeksi $T =$ transponointi.

Edellistä teoriaa soveltaen voidaan muodostaa etäisyyksien välimatkat. Tämä voidaan tehdä yhden vaiheen ja toisen ukkosköyden näkökulmasta kuvan 37 mukaisesti (11, s. 210 - 211).



KUVA 37. Etäisyyksien muodostuminen esimerkein. Vasemmalla vaiheen 1 suhteen ja oikealla ukkosköyden w suhteen. Huomioidaan, että todellisuudessa arvot pitää laskea keskikorkeuden mukaisesti eikä johtimen ripustuskorkeuden mukaan.

Kuvan 36 mukaisesti voimme siis muodostaa matriiseista yhtälön 31. Kun sovelletaan hieman lähteiden yhtälöitä, huomataan myös, että potentiaalikerroimista saadun matriisin P käänteismatriisi on yhtä suuri kuin järjestelmän kapasitanssmatriisi. (37, s.117 - 124.)

$$P = \{P_{RST} - P_{RSTuw} P_{uw}^{-1} P_{RSTuw}^T\} \quad \text{KAAVA 31}$$

$$P^{-1} = C \quad \text{KAAVA 32}$$

Seuraavassa vaiheessa on tärkeää ymmärtää, mitä kapasitanssia järjestelmästä lasketaan. Koska sammutetun verkon osalta kela viritetään resonanssiin järjestelmän maakapasitanssien kanssa, on sen arvo näin kapasitansseista merkityksellinen. Järjestelmän käyttökapasitanssin tai keskinäiskapasitanssin arvoja käyttämällä päädytään virheelliseen tulokseen. Keskinäiskapasitanssilla tarkoitetaan kolmivaihejohdon johdinten välistä kapasitanssien kolmiokytkennästä muodostuvaa ekvivalenttista tähtikytkentää ja käyttökapasitanssilla maakapasitanssin ja keskinäiskapasitanssien muodostamaa sarjakytkentää. Kaavassa 33 on esitettyä avojohtojen kapasitanssien yhtälö. (9, s.283 - 298; 37, s. 122.)

$$C_R = C_s + 3C_m = C_{11} - C_{12}, \text{ jossa } C_s = C_e \quad \text{KAAVA 33}$$

$$C_s = C_e = \frac{1}{p_s + 2p_m} \quad \text{KAAVA 34}$$

Tarkastellaan teoriaa nyt käytännön näkökulmasta esimerkin avulla. Voimajohtimet ovat matkalla tyyppiä 1-DUCK ja näiden ekvivalenttinen halkaisija kapasitanssin kannalta on 23,81 mm. Ukkosköysinä toimii 1 - 67 FE, jonka ekvivalenttien halkaisija kapasitanssin kannalta on 10,13 mm. Etäisyyksien määrittämiseen käytetään pylvästyyppeä H1. Tarpeeksi tarkkaan arvoon päästään käyttämällä laskennassa pylvästyyppeä 1H ja tämän sekä riippuman avulla määritettyjä etäisyyksiä. Oletetaan voimajohtojen asennuskorkeudeksi 12 m ja keskikorkeudeksi maasta 10 m riippuman huomioiden. Voimajohdinten väliseksi etäisyydeksi oletetaan 4,4 m. Oletetaan, että ukkosköysien asennuskorkeus on 15 m ja keskikorkeus maasta 13,5 m. Ukkosköysien suojauskulma huomioidaan ja toisena kateettina käytetään arvoa 2 m. Kun selvitetään solmuvälin tuottama kapasitiivinen virta maasulussa kilometriä kohden, saadaan:

$$P = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{2 * 10}{0,011905} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4}} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 8,8^2}}{\sqrt{0^2 + 8,8^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 10}{0,011905} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{20^2 + 8,8^2}}{\sqrt{0^2 + 8,8^2}} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 10}{0,011905} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} & \ln \frac{2 * 13,5}{0,005065} & \ln \frac{\sqrt{27^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2^2}} & \ln \frac{\sqrt{27^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 13,5}{0,005065} \end{bmatrix}$$

$$P_{RSTuW} P_{uw}^{-1} P_{RSTuW}^T$$

$$= \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2^2}} \end{bmatrix} \right) * \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{2 * 13,5}{0,005065} & \ln \frac{\sqrt{27^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{27^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 13,5}{0,005065} \end{bmatrix} \right)^{-1} * \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 6,4^2}}{\sqrt{3,5^2 + 6,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2,2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2,2^2}} & \ln \frac{\sqrt{23,5^2 + 2^2}}{\sqrt{3,5^2 + 2^2}} \end{bmatrix} \right)$$

$$= \begin{bmatrix} 8046834077 & 8942244781 & 7209469674 \\ 8942244781 & 1,048271495 * 10^{10} & 8942244781 \\ 7209469674 & 8942244781 & 8046834077 \end{bmatrix}$$

$$P_{RST} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{2 * 10}{0,011905} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 8,8^2}}{\sqrt{0^2 + 8,8^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 10}{0,011905} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} \\ \ln \frac{\sqrt{20^2 + 8,8^2}}{\sqrt{0^2 + 8,8^2}} & \ln \frac{\sqrt{20^2 + 4,4^2}}{\sqrt{0^2 + 4,4^2}} & \ln \frac{2 * 10}{0,011905} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,33495461 * 10^{11} & 2,764198753 * 10^{10} & 1,634811978 * 10^{10} \\ 2,764198753 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} & 2,764198753 * 10^{10} \\ 1,634811978 * 10^{10} & 2,764198753 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} \end{bmatrix}$$

$$P_{RST} - P_{RSTuW} P_{uw}^{-1} P_{RSTuW}^T$$

$$= \begin{bmatrix} 1,33495461 * 10^{11} & 2,764198753 * 10^{10} & 1,634811978 * 10^{10} \\ 2,764198753 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} & 2,764198753 * 10^{10} \\ 1,634811978 * 10^{10} & 2,764198753 * 10^{10} & 1,33495461 * 10^{11} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 8046834077 & 8942244781 & 7209469674 \\ 8942244781 & 1,048271495 * 10^{10} & 8942244781 \\ 7209469674 & 8942244781 & 8046834077 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1,254486269 * 10^{11} & 1,869974275 * 10^{10} & 9138650106 \\ 1,869974275 * 10^{10} & 1,230127461 * 10^{11} & 1,869974275 * 10^{10} \\ 9138650106 & 1,869974275 * 10^{10} & 1,254486269 * 10^{11} \end{bmatrix} = \text{vuorottelemattomat potentiaalit ukkosköysillä}$$

$$P^{-1} = C = \begin{bmatrix} 1,254486269 * 10^{11} & 1,869974275 * 10^{10} & 9138650106 \\ 1,869974275 * 10^{10} & 1,230127461 * 10^{11} & 1,869974275 * 10^{10} \\ 9138650106 & 1,869974275 * 10^{10} & 1,254486269 * 10^{11} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} 8,177772937 * 10^{-12} & -1,179304189 * 10^{-12} & -4,19941787 * 10^{-13} \\ -1,179304189 * 10^{-12} & 8,487781982 * 10^{-12} & -1,179304189 * 10^{-12} \\ -4,19941787 * 10^{-13} & -1,179304189 * 10^{-12} & 8,177772937 * 10^{-12} \end{bmatrix}$$

Vuoroteltuna:

$$C_{jj} = \frac{1}{3} * (8,177772937 * 10^{-12} + 8,487781982 * 10^{-12} + 8,177772937 * 10^{-12}) = 8,281109285 * 10^{-12}$$

$$C_{jk} = \frac{1}{3} * (-1,179304189 * 10^{-12} + (-1,179304189 * 10^{-12}) + (-4,19941787 * 10^{-13})) = -9,261833883 * 10^{-13}$$

Asetetaan arvot matriisiin ja käännetään ne takaisin potentiaaleiksi P_s ja P_m :

$$\begin{bmatrix} C_{jj} & C_{jk} & C_{jk} \\ C_{jk} & C_{jj} & C_{jk} \\ C_{jk} & C_{jk} & C_{jj} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} p_s & p_m & p_m \\ p_m & p_s & p_m \\ p_m & p_m & p_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,281109285 * 10^{-12} & -9,261833883 * 10^{-13} & -9,261833883 * 10^{-13} \\ -9,261833883 * 10^{-13} & 8,281109285 * 10^{-12} & -9,261833883 * 10^{-13} \\ -9,261833883 * 10^{-13} & -9,261833883 * 10^{-13} & 8,281109285 * 10^{-12} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} 1,242568449 * 10^{11} & 1,564728554 * 10^{10} & 1,564728554 * 10^{10} \\ 1,564728554 * 10^{10} & 1,242568449 * 10^{11} & 1,564728554 * 10^{10} \\ 1,564728554 * 10^{10} & 1,564728554 * 10^{10} & 1,242568449 * 10^{11} \end{bmatrix}$$

Lasketaan maakapasitanssi metriä kohden:

$$C_e = \frac{1}{P_s + 2p_m} = \frac{1}{1,242568449 * 10^{11} + 2 * 1,564728554 * 10^{10}} = 6,428742507 * 10^{-12}$$

Lasketaan kapasitiivisen virran sammutustarve kilometriä kohden:

$$I_c = \frac{1,1 * 110000}{\sqrt{3}} * 2 * \pi * 50 * 3 * 6,428742507 * 10^{-12} * 1000$$

$$\sim \mathbf{0,423 A/km}$$

Kuten huomataan kyseisillä parametreillä lasketuilla arvoilla, ukkosjohdot kasvattavat maakapasitansseja, mutta toisaalta pienentävät keskinäiskapasitansseja. Pienillä matkoilla ero ei ole merkittävä, mutta yli 10 km:n matkoilla ero alkaa jo syntymään selvästi. Ukkosjohtimet kasvattivat tässä esimerkissä maakapasitansseja verrattuna ukkosjohdottomaan johto-osuuteen seuraavasti:

$$100\% - \left(\frac{5,517235568 * 10^{-12}}{6,428742507 * 10^{-12}} * 100\% \right) \sim 14\%.$$

Huomioidaan, että käytetyt välimatkaparametrit vaikuttavat merkittävästi tuloksiin. Esimerkiksi johdinten etäisyys maasta ja vaihejohtimien sekä ukkosjohtimien väliset etäisyydet vaikuttavat selvästi vastaukseen. Mitä lähempänä keskikorkeus maasta on sitä suuremmaksi maakapasitanssi kasvaa. Näin ollen lumitilanne voi vaikuttaa maakapasitanssien suuruuteen. Toisaalta, jos johtimien keski korkeus on erittäin suuri, maata ei välttämättä tarvitse ottaa huomioon laskuissa. Nämä huomioiden laskennallisesti eri parametreillä saadaan esimerkissä käytetylle 1-DUCK johtimelle ukkosjohdoilla sammutustarpeeksi noin 0,39 - 0,46 A / km.

TAULUKKO 1. Taulukossa esitettyinä joidenkin yleisten johdinten ja ukkosjohdinten ekvivalenttisia säiteitä kapasitanssien kannalta.

1-OSTRICH	0,008475	mm
1-TURKU	0,010615	mm
1-DUCK	0,011905	mm
1-FINCH	0,01621	mm
1-PIPER	0,00875	mm
1-HAWK	0,010695	mm
1-IBIS	0,00976	mm
1-281 AMS	0,010715	mm
2-DUCK	0,179892	mm
SUSTRONG	0,00725	mm
1-67 FE	0,005065	mm
HASTRONG	0,0107	mm
1-OP 121/34	0,009435	mm
1-52 FE	0,004415	mm

5.3 Suurjännitekaapelit ja sammutettu verkko

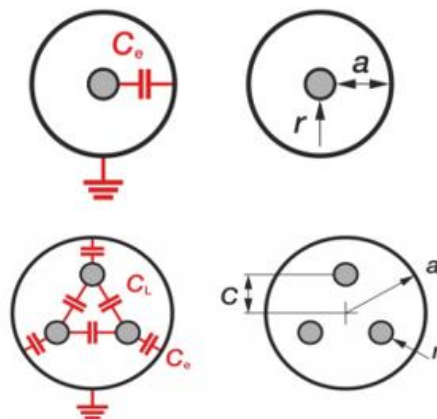
Kaapelit lisäävät kompensointitarvetta merkittävästi. Kaapelin kapasitanssit vaikuttavat kokonaisuudessaan rinnakkaisesti resonanssipiiriin. Yksinkertaisesti ajateltuna kaapeliverkossa tapahtuvassa maasulussa maasulkuvirtaan vaikuttaa kaapelin käyttökapasitanssi pituusyksikköä kohden kokonaisuudessaan. Käyttökapasitanssi on tällöin yhtä suuri kuin maakapasitanssi, kun käsitellään yksivaiheista suurjännitekaapelia. Käyttökapasitanssi voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla. (38; 6.)

$$C = C_e = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\frac{a}{r}} \quad \text{KAAVA 35}$$

Kolmivaiheisen kaapelin osalta kapasitansseissa on otettava huomioon myös johdinten välinen keskinäiskapasitanssi. Kapasitanssiyhtälö on tällöin kaavan 33 mukainen ja maakapasitanssi laskettavissa yhtälön 36 mukaisesti (38; 6.)

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\frac{a^6 - c^6}{3c^2ra^3}} \quad \text{KAAVA 36}$$

Koska suurjännitteillä kaapelit ovat yleisesti ottaen yksivaiheisia, on näiden kapasitanssien vaikutus erittäin suurta. Tämä on otettava huomioon verkkoa suunnitellessa. Avojohtoihin verrattuna sammutustarve kasvaa kaapeliverkon vaikutuksesta moninkertaiseksi. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää Rovaniemen 110 kV kaapeliverkkoa, joka vie yksistään jo noin 150 A kuristinkapasiteettia. Tämä on moninkertainen määrä verrattuna saman pituisiin avojohto-osuuksiin.



KUVA 39. Kapasitanssien muodostuminen kaapeleissa. (Muokattu lähteestä: 38.)

Seuraavassa taulukossa on esiteltyä yleisiä arvoja käyttökapasitanssien muodostumiselle kilometritä tietyille kaapelityypeille.

TAULUKKO 2. Taulukossa esitettyä kaapeleiden merkityksellisiä arvoja kompensoinnin kannalta. (39; 6, s.26; 40.)

Yleiset 110 kV Kaapelit	Käyttökapasitanssi (F/km)	Maasulkuvirta (jännitteellä c * 110 kV) (A/km)
AHXCHBMK-W 1*300	0,00000015	9,9
AHXCHBMK-W 1*500	0,00000018	11,86
AHXCHBMK-W 1*800	0,00000023	15,1
AHXLMK-W 1x300	0,00000015	9,9
AHXLMK-W 1x500	0,00000018	11,86
AHXLMK-W 1x800	0,00000023	15,1
AHXLMK-W 1x1200	0,00000026	17,1

Esimerkiksi 2,674 km kaapeliosuus kaapelilla AHXCHBMK-W 1*800 tuottaa likimäärin kompensointitarvetta:

$$\frac{1,1 * 110000}{\sqrt{3}} * 2 * \pi * 50 * 3 * 0,0000023 * 2,674$$

$$\sim 40,5 A$$

5.4 Kompensointitarpeen kokonaisuuden muodostaminen

Sammutetun verkon kuristimien laskennallisen säädön kokonaistarpeen määrittäminen on yksinkertaista, kun solmuvälikohdaiset sammutustarpeet ovat riittävällä tarkkuudella tiedossa. Maakapasitanssit ovat toisiinsa nähden rinnankytkentöjä, joten piiriteorian mukaisesti kapasitanssien rinnankytkentä voidaan summata yhteen. Myös virta-arvot pystytään summaamaan yhteen solmuväleittäin, mikäli samaa jännitettä on käytetty maasulkuvirtoja laskettaessa. Tästä muodostuu laskennallinen kompensointitarve kyseisen kuristimen tai kuristimien vaikutuspiirissä olevalle verkolle. On huomattava, että epäsymmetriasyistä verkolle tulisi tehdä kokeellinen määrittäminen myös useammassa eri kytkentätilanteessa. (4.)

5.5 Kapasitanssien epäsymmetria ja sen vaikutukset

Pitkillä ilmajohto-osuuksilla on käytännössä mahdotonta päästä täysin symmetriseen tilanteeseen, vaikka vaihevuorottelu olisikin onnistunut toivotusti. Kaapeliverkolla ongelmana puolestaan voi olla liian symmetriseen tilanteeseen pääsy, jolloin säätöä joudutaan tutkimaan logaritmisella asteikolla, jotta resonanssipiste löydetään varmasti. Kuten aikaisemmin todettiin, maakapasitanssien epäsymmetria aiheuttaa potentiaalın nousua järjestelmän tähtipisteessä. Nousu on suurimmillaan tilanteessa, jossa kelan induktanssi ja järjestelmän maakapasitanssit ovat rinnakkaisresonanssissa. Voimme laskea tähtipisteen ja referenssimaan välisen jännite-eron seuraavan yhtälön avulla. (19, s.271 - 283.)

$$U_{NE} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} * \frac{j\omega * (C_{L1e} + a^2 C_{L2e} + a C_{L3e})}{j\omega * (C_{L1e} + C_{L2e} + C_{L3e}) - j\frac{1}{\omega L_0} + 3G_E} \quad \text{KAAVA 37}$$

Kuten kohdan 6.2 laskuesimerkissä huomataan, keskimmäisen vaiheen maakapasitanssi on suurempi kuin uloimpien vaiheiden kapasitanssit. Tästä syystä jokaisen vaiheen on kuljettava solmuväleittäin yhtä pitkän matkan keskellä, jotta selvää epäsymmetriaa ei synny. Kapasitanssien erojen lisäksi eroja syntyy myös induktanssien osalta ja tästä syystä johto-osuuksien tulee olla vuoroteltuna mahdollisimman tarkasti. (37.)

Viereiset voimalinjat vaikuttavat merkittävästi symmetriaan. Viereiset voimalinjat lisäävät johtimien välisiä kapasitansseja, sillä tässä tapauksessa on myös laskettava mukaan viereisen voimalinjan vaikutus kapasitansseihin. Epäsymmetriaa luo varsinkin tilanne, jossa viereinen voimalinja kulkee ainoastaan osan matkasta tarkasteltavan linjan kanssa rinnakkain. Erityisesti korkeamman jännitetaso linjat vaikuttavat kapasitansseihin ja luovat epäsymmetriaa. (23; 37 s. 117 - 298.)

Täydelliseen kapasitanssien symmetriaan on käytännössä mahdotonta päästä, sillä maaston epätasaisuus ja kasvillisuus aiheuttavat aina jonkin verran epäsymmetriaa pitkillä johto-osuuksilla. Tämän lisäksi myös sääolosuhteet aiheuttavat epäsymmetriaa ja muutostilanteita. Erityisesti kuuran aiheuttama ukkojohtimien riippuman kasvu voi olla sammutetun verkon kannalta ongelmallista, sillä esimerkiksi ukkosjohtinten lähestyessä vaihejohtimia, on tällä kapasitansseja kasvattava vaikutus. Tilanteessa, jossa vaihejohtimiin ja ukkosköysiin vaikuttavat eri jääkuormat ja etäisyydet muuttuvat merkittävästi, syntyy epäsymmetriaa ja tähtipisteen jännitteenousua. Näiden lisäksi myös erilaiset

vikatilanteet aiheuttavat kapasitanssien epäsymmetriaa. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää johdin-
katkeamaa ilman maakosketusta.

6 LAPIN SAMMUTETTU SIIRTOVERKKO

6.1 Verkon ominaisuuksia

Lapin verkko muodostuu normaalissa käyttötilanteessa kolmesta erillisestä sammutusalueesta, joita käytetään säteittäisesti. Verkon käyttö säilyy taloudellisena säteittäisessä käytössä. Sammutusalueita kompensoidaan käyttötilanteen mukaisesti yhdellä tai useammalla sammutuskuristimella. Jännösvirrat pyritään laskemaan muutamien kymmenien ampeerien tasolle, jotta vaarajännitteiltä ja muilta haitallisilta ilmiöiltä vältytään vikatilanteissa. Kun järjestelmä on riittävästi kompensoitu, jännösvirta voidaan olettaa olevan noin 10 prosenttia kapasitiivisesta virrasta. (3, s.94.)

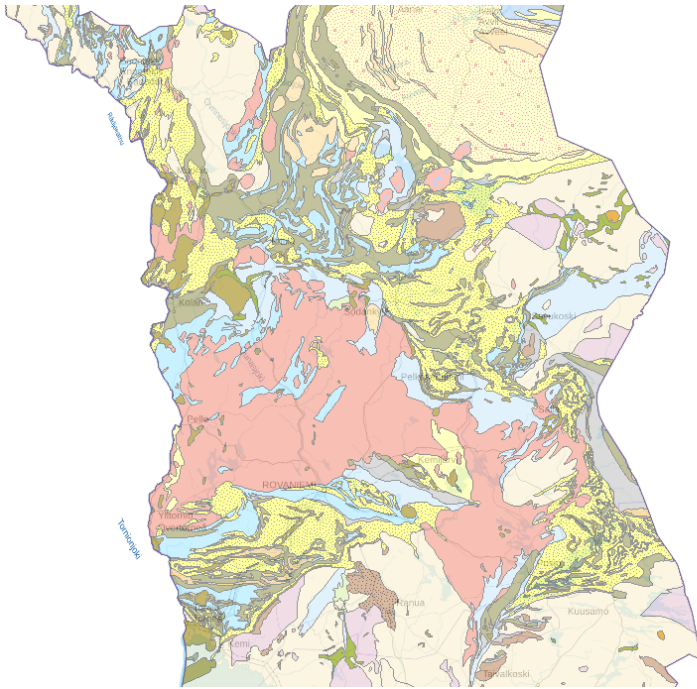
Sammutuksen lisäksi maasulkuvirtoihin vaikutetaan ukkosköysien avulla, jotka kuljettavat osan vikavirroista tietyissä vioissa. Verkolla on kuitenkin myös johto-osuuksia, joilla ei ole käytössä olevia ukkosjohtimia. Ukkosköysien vaikutusta maavirtaan voidaan tutkia reduktiokertoimen avulla. (3, s.121.)

Lapin verkkoon liittyy lisäksi suurjännitekaapeliverkkoa. Tämä kasvattaa merkittävästi verkon maakapasitansseja ja kapasitiivista virtaa, jota ei voida jättää kompensoimatta.

6.2 Maaperän vaikutus

Maadoitusolosuhteet ovat Suomessa yleisesti ottaen heikot. Lapin sammutetun verkon alueella esiintyy suuri graniittiesiintymä sekä jääkauden muodostamia moreeniesiintymiä. Kuvassa 39 on esitettyä maadoitusolosuhteita havainnollistava kuva Geologian tutkimuslaitoksen verkkopalvelusta. (41.)

Maasulun aikana muodostuu induktiovaarajännitteitä. Vikavirta palaa maasulun aikana maankautta muodostaen virtajohtimien kanssa induktiosilmukoita. Maan ominaisvastus on maasulun aikana merkittävässä roolissa. Mitä suurempi ominaisvastus maasulun aikana on, sitä syvemmillä maahan ja laajemmalle alueelle muodostuu vian aikaisia vaarajännitteitä esimerkiksi metallirakenteisiin. (6.)



KUVA 39. Oranssilla kuvatut graniittimuodostumat ja siniset jääkauden muodostamat moreeni-siintymät antavat selvän yleiskuvan verkon sijainnin maadoitusolosuhteista. Maadoitusolosuhteet vaihtelevat kuitenkin paljon paikallisesti. (41; 3, s.123.)

Taulukossa 3 on esiteltyä Suomen maaperän ominaisvastusarvoja. Graniitin ja moreenin ominaisvastusarvojen vaihteluvälit yltyvät kymmeniin tuhansiin ja tästä syystä maaperä on ongelmallista. Maasulun aikaiset induktiojännitteet voivat vaikuttaa laajoille alueille maasulun sattuessa epäsuotuisassa kohdassa. Tämä osaltaan tukee sammutetun verkon käyttöä Lapin alueella. Rajoittamalla vikavirtaa jäännösvirran tasolle voidaan ehkäistä myös vaarajännitteiden muodostumista.

TAULUKKO 3. Yleisimpiä resistiivisyysarvoja Suomen maaperästä standardin SFS6001 mukaisesti. Maadoitusolosuhteet ovat Suomessa yleisesti ottaen heikot ja maadoituksiin joudutaan investoimaan laajalti. (3, s.148.)

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2 000	1 000...3 000
Moreenisora	3 000	1 000...10 000
Harjusora	15 000	3 000...30 000
Graniittikallio	20 000	10 000...50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10 000	2 000...100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

6.3 Maasulkujen tarkastelu

Tarkasteluajavälillä suurin osa verkossa tapahtuvista vioista oli lyhytaikaisia ohimeneviä yksivaiheisia maasulkuja. Maasulkujen tarkastelu suoritettiin yhden sähköaseman ja sen vasta-asemien häiriötallenteita keräämällä. Tarkastelun kohteena oli alue, joka oli maadoitettuna aikavälillä useamman sammutuskuristimen kautta. Maasulkujen tunnistamisessa käytettiin seuraavia kriteereitä:

- vikaantuneen vaiheen jännitteen tuli lähestyä selvästi nollaa
- nollajännitteen tuli ylittää suojarajaa
- terveiden vaiheiden jännitteiden tuli nousta vika-aikana pääjännitteen tasolle
- terveiden vaiheiden välisen vaihekulman tuli pienentyä selvästi
- terveiden vaiheiden vaihevirroista kumpikaan ei saanut olla vastakkaissuuntainen vikaantuneen vaiheen vaihevirran kanssa.

Mikäli verkkohäiriö ei noudattanut yllä mainittuja kriteerejä, häiriö tulkittiin muuksi kuin maasulkuksi. Verkon voidaan olettaa olevan lievästi ylikompensoitu vikojen aikana, ellei toisin ole mainittu. Häiriön alku tulkittiin hetkestä, jolloin vikaantuneen vaiheen jännite alkoi laskea. Häiriö tulkittiin päättyneeksi, kun jännite nousi takaisin vaihejännitteen tasolle. Tallenteita keräiltiin aikavälillä 11.11.2019 – 8.10.2020. Maasulkujen määrä oli noin 30 kyseisellä aikavälillä. Lisäksi verkossa esiintyi muutamia muiksi häiriöiksi tulkittuja tapahtumia. Eri kentissä tapahtuneet samanaikaiset havahtumiset tulkittiin samaksi häiriöksi (havahtumiset eteen- ja taaksepäin). Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukosta näemme, että sammutetulla verkolla voidaan säästää katkaisijoita ja pitää jälleenkytkentöjen määrä vähäisenä. Huomataan myös, että suuri osa maasuluista oli myös lyhyitä ”räpsäisyjä”, jotka poistuivat verkosta välittömästi. Kyseiset todella nopeat häiriöt ovat yleisiä muuallakin verkossa. Näitä voisi selittää luonnonilmiöillä, pölyävällä lumella tai esimerkiksi linnuilla. Pitempiaikaisissa häiriöissä sammutus poisti maasulun verkosta lukuun ottamatta tilannetta, jossa verkko oli hetkellisesti reilusti alikompensoituna. Kyseinen vika on hyvä esimerkki siitä, miksi verkon ei tule koskaan joutua alikompensoitukseksi. Sammutetussa verkossa suojiin toiminta on hitaampaa kuin muualla kantaverkossa 110 kV jännitetasossa verkon asetteluiden seurauksena.

TAULKUKKO 4. Tarkasteluajavälin yksivaiheisten maasulkujen tulokset esitettynä yhdeltä sähkö-
asemalta. Maasulkujen epäsymmetriavirrat olivat keskimäärin 10 - 80 A kentästä riippuen.

17.5.2020 tapahtuneessa viassa poikkeustilanteen vuoksi verkko oli vikahetkellä vahvasti alikom-
pensoituna, jonka seurauksena maasulku aiheutti sammumattoman häiriön.

	Päivämäärä	Aika	maasulun kesto (ms)	vikaantu- nut vaihe	Laukaisu
1	11.11.2019	12:33:47	687	L3	EI
2	12.11.2019	13:38:44	715	L1	EI
3	13.11.2019	12:02:32	375	L3	EI
4	16.11.2019	14:26:28	641	L1	EI
5	6.12.2019	11:38:57	236	L1	EI
6	8.12.2019	10:48:55	292	L3	EI
7	9.12.2019	12:11:08	291	L3	EI
8	4.2.2020	14:26:39	219	L1	EI
9	15.2.2020	15:15:22	873	L3	EI
10	1.5.2020	17:26:13	172	L3	EI
11	17.5.2020	9:20:20	234	L3	EI
12	3.6.2020	8:45:22	> 1500	L1	SENS EF TRIP
13	23.6.2020	20:29:25	258	L3	EI
14	25.6.2020	14:57:05	299	L3	EI
15	13.7.2020	17:03:33	221	L1	EI
16	20.7.2020	19:39:23	232	L3	EI
17	23.7.2020	5:08:24	264	L1	EI
18	29.7.2020	5:18:27	256	L3	EI
19	1.8.2020	14:31:00	291	L1	EI
20	11.8.2020	18:50:21	148	L3	EI
21	11.8.2020	19:16:52	194	L3	EI
22	15.8.2020	21:03:02	221	L3	EI
23	24.8.2020	15:55:24	194	L3	EI
24	30.8.2020	14:30:01	647	L2	EI
25	9.9.2020	15:27:10	448	L2	EI
26	16.9.2020	11:26:39	495	L1	EI
27	23.9.2020	16:25:38	272	L3	EI
28	27.9.2020	9:34:02	274	L2	EI
29	7.10.2020	13:14:14	209	L3	EI
30	8.10.2020	13:46:39	340	L3	EI

Kuvassa 40 jokaisesta viasta on esitettynä vikaantuneen vaiheen käyttäytyminen maasulun aikana. Kuva havainnollistaa maasuluista aiheutuvien jännitekuoppien ajallista kestoa. Kaikki jännitekuopat eivät näkyneet vasta-asemalla tai eivät ylittäneet vasta-asemalla releen havahtumisrajaa.



KUVA 40. Kuvassa taulukossa 3 esitettyjen maasulkujen aiheuttamat jännitekuopat aikaväliltä 11.11.2019 – 8.10.2020 (20).

7 PROJEKTI

Kehityshanke ja projektin kokonaisuus suoritettiin sisäisen projektimallin mukaisesti. Tässä työssä käydään ainoastaan yleiset tavanomaiset käytännöt läpi. Tilaajaorganisaationa vastuu projektista kattoi esisuunnittelun, päätöksenteon, tiedottamisen, suunnittelun hallinnan, käyttöönotot, testaukset ja osittain myös asennukset sekä niiden valvonnan. Lisäksi muut tavanomaiset vastuut kuten ympäristöasiat ja turvallisuus kuuluivat vastuualueisiin.

7.1 Aloite, esisuunnittelu ja hankintapäätös

Kehityshanke ja projektin kokonaisuus koostui tarpeesta kehittää verkon tilannekuvaa. Jatkuva kehitystoiminta on osa luotettavan sähkönsiirron perustaa.

Esitetyn aloitteen hyväksynnän jälkeen pystyttiin aloittamaan esisuunnittelu. Esisuunnittelussa pyrittiin suunnittelemaan vaihtoehtoisia toteutuksia kehitystä vaativiin kohteisiin. Halutun laiteoimintuksen laajuus ja kriteerit olivat olennainen osa esisuunnittelua. Budjetointi sekä toteutuksen vaatimukset suunniteltiin rajojen mukaisesti. Tarpeeksi selvän ja perustellun esisuunnittelun jälkeen voitiin esittää hankintaesitys, jota seurasi hankintapäätös.

7.2 Tilaus ja suunnittelu

Hankintapäätöksen jälkeen haluttu kokonaisuus kilpailutettiin kustannustehokkaasti ja saadut tarjoukset käytiin läpi. Tarjouksista esitettiin tasapuolisesti tarkentavat kysymykset kaikille osapuolille. Parhaan tarjouksen jättäneelle urakoitsijalle jätettiin tilauspyyntö.

Tilauksen jälkeen voitiin aloittaa tiedotusprosessi hanketta koskevia toimijoita varten. Tiedotusten jälkeen suunnittelu ja sen valvonta pystyttiin aloittamaan ja suunnitteluprosessi jatkui tasaisesti läpi hankkeen. Suunnittelu päättyi vasta käyttöönottojen jälkeisten punakynämerkintöjen korjaukseen ja loppukuvien palautukseen. Kuvien kommentointi ja tarkistus tehtiin useaan otteeseen hankkeen aikana. Tästäkin huolimatta alkuperäisestä suunnittelusta saatettiin joutua poikkeamaan esimerkiksi vanhoissa vesivoimalaitoskohteissa.

7.3 Tehdas- ja kelpuutustestit

FAT-testit eli tehdas- ja kelpuutustestit suoritettiin sovituille ala-asemille ja tietoliikennelaitteille toimittajan tiloissa. Testien tarkoituksena oli varmistaa automaation toiminta, jotta toiminnan korkeat kriteerit täytyivät laitteiston osalta. Kaikki havaitut puutteet pystyttiin korjaamaan jo testien aikana.

Testeissä toiminta testattiin laajasti. Mittaukset, ohjaukset, hälytykset ja laukaisut testattiin kaukokäyttöön saakka. Jokaisen signaalin ala-aseman aikaleimat ja valvontaohjelmiston tulevat nimet tarkastettiin sekä suoritettiin tarvittavat toimenpiteet virheiden kohdalla. Sisääntulojen I/O-blokkaus virhetilassa testattiin pumppauksen estolla sekä paikallisohjaus kytkimen ollessa paikallisohjauksella. Näiden lisäksi testattiin ohjauspaneelit, mittauksien esitystavat, korttihälytykset ja laitteen uudelleenkäynnistys. Myös tietoliikenneyhteyksien palautuminen testattiin virhetilan ja uudelleenkäynnistuksen jälkeen. Konfiguraatiomuutokset pystyttiin tekemään testien yhteydessä ja laitteet saatiin valmiiksi asennuksia ja käyttöönottoja varten.

7.4 Asennukset

Suunnittelu tapahtui porrastetusti kohde kerrallaan ja materiaalihankinnat tehtiin kohteittain. Asennukset aloitettiin kaapelireittien suunnittelemisella. Pisimmät reitit olivat noin 100 m:n luokkaa, joten kaapeleiden veto aloitettiin kaapeleiden suoristamisella, jotta vetovaiheessa vältyttiin kaapeleiden kierteiltä. Läpiviennit tehtiin niille tarkoitettuihin paikkoihin ja korjattiin palosulkumassalla. Erityisesti vanhoissa vesivoimalaitoskohteissa ja pitkien vetojen suhteen reitin suunnittelun tärkeys korostui.

Asennustöissä kaapeleiden vedon jälkeen seuraava vaihe oli läpivientien ja vedonpoistojen teko kytkentäpaikkoihin sekä sähköasennustyöt rele- ja kaukokäyttökaapeissa. Asennustöissä asennonosoitus ja nollajännitetiedot vietiin vanhalle tai lisätylle ala-asemalle mA-muuntimien avulla. Asennonosoitukseen käytettiin ohjelmoitavia kolminapaiselle resistanssille soveltuvia muuntimia ja nollajännitteeseen valmiiksi mittaskaalassa olevia muuntimia. Hälytykset, ohjaukset ja muut tapahtumat toteutettiin apureleistyksillä. Punakynämerkinnät piirrettiin sitä mukaa, kun asennuksia tehtiin. Tällä tavalla varmistuttiin siitä, että loppukuviin saatiin oikea toteutus. Valvomossa tehtyjen asennusten valmistumisen jälkeen suoritettiin aistinvaraiset tarkastukset ja tehtiin kaikille asennetuille johtimille jatkuvuusmittaukset, joilla varmistettiin kytkentöjen oikeellisuus relekaappien välillä

ja kaappien sisäisesti. Aistinvarainen tarkastelu korostui erityisesti vanhoissa kohteissa ja myös projektin ulkopuoliset havaitut puutteet kirjattiin ylös.

Valvomon sisäisten töiden valmistuttua siirryttiin kentän puoleiseen työhön, mikäli sinne jouduttiin tekemään muutoksia tai lisäyksiä. Jotta kuristimien läheisyydessä pystyttiin työskentelemään turvallisesti ja laitteistojen toiminta voitiin koestaa turvallisesti, jouduttiin kuristimille ottamaan lyhyet keskeytykset. Kuristin erotettiin verkosta selvällä erotusvälillä hyödyntäen tähtipiste-erotinta. Työmaadoitukset kytkettiin kytkennänjohdon ohjeistuksen mukaisessa järjestyksessä kuristimen puoleisen erotuspisteen ja maan välille. Kuvassa 41 on esitettyä työn aikaisia valmisteluita. On huomioitava, että mikäli suurjännitteisten osien välittömässä läheisyydessä jouduttaisiin työskentelemään, tulisi lisätyömaadoitus tehdä kaksinkertaisena. Projektissa työt kohdistuivat kuitenkin ainoastaan pienjännitteisiin osiin, joten erotuksella ja kuristimen puoleisella maadoituksella saatiin toteutettua turvallinen ympäristö.



KUVA 41. Työn aikaisia kytkentöjä. Maadoitusta ei tule koskaan tehdä väärälle puolelle erotinta, tähtipisteen jännite voi olla useita kilovoltteja. Maadoitusköyden pää on oltava aina kiinni maadoituspisteessä ennen lisäystä tai poistoa.

Muutokset kuristimien puoleisessa päässä vaihtelivat. Osaan kohteista jouduttiin asentamaan kaapelia kuristimelle saakka keskeytyksen aikana ja osassa riitti johdotuslisäykset ja ketjutusten poisto kuristimen jakokaapissa.

7.5 Koestukset ja käyttöönotot

Käyttöönotettavaan laitteistoon täytyy tehdä asianmukaiset mittaukset sekä koestaa toiminta sähköasemaympäristöön tarkoitetulla koestuslaitteistolla. Koestuksessa hyödynnettiin tarkkuusmittalaitteita kuten Omicron-analysaattoria, Sverker-reletesteriä ja yleismittareita. Lisäksi mA-kalibraattoria hyödynnettiin kohteissa milliampeerisilmukatestauksissa.

Kaukokäyttöön siirrettävä nollajännitetieto koestettiin antamalla koestuslaitteelta muuntimen jänniteskaalaa vastaava jännitetieto. Kaikissa kohteissa käytettiin samaa SINEAX U539 mitta-arvonmuunninta nollajännitteen mittauksissa. Aluksi tarkastettiin RTU:n kaukokäyttöön lähettämä tieto lähettämällä virtaviestiä 4 - 20 mA alueella mA-kalibraattorilla ja tarkastelemalla kaukokäytön näkymästä vastaavaa jännitteen tulosta. Koska avokolmion nollajännite maasulussa on noin 100 V, asetetaan tällöin kaukokäyttöön 4 mA vastaamaan 0 V:a ja 20 mA vastaamaan 100 V:a. Tällöin myös kaukokäytön näkymässä voidaan nollajännite ilmoittaa 0 % – 100 % vaihejännitteestä. Kun kaukokäytön näkymä vastaa oikeaa, voidaan muunnin koestaa syöttämällä jännitetietoa liittimiltä 5 V:n askelissa muuntimelle 100 V:iin asti ja kirjaamalla tulokset ylös myös kaukokäytön näkymästä. Samalla tapahtumalistasta tulee katsoa mielekkyyusrajojen hälytykset ja kirjata näiden toiminta ylös.

Asennonosoitukset toteutettiin ohjelmoitavalla muuntimella kaikissa kohteissa. Muuntimena käytettiin mallia STATUS SEM1700 mallia. Ohjelmointityökalu ladattiin valmistajan sivuilta. Muunnin ohjelmoitiin vaihtelevasti kolminapaisen resistanssin arvolle. Resistanssien alaraja asetettiin 4 mA:iin ja yläraja 20 mA:iin. Muuntimen ohjelmoinnissa tuli löytää moottoripiirin ajon aikaiset minimi- ja maksimiresistanssin arvot. Näiden jälkeen muunnin viritettiin milliampeerisilmukassa käyttäen saman resistanssiluokan potentiometrejä, jotta kuristimen moottoripiiriä ei tarvinnut kuormittaa liikaa. Asennonosoituksen luotettavan toiminnan toteamiseksi moottoripiiri tuli ajaa säätöalueellaan laidasta laitaan keskeytyksen aikana. Tuloksista laadittiin koestuspöytäkirja ja toiminnan prosentuaalinen virhe kirjattiin ylös.

Asennonosoitus ja nollajänniteteieto mahdollistaa kuristimen etäsäädön. Ilman kyseisiä tietoja kuristinta ei voida pitää etäohjauksella. Ohjauspulssin pituus viritettiin ala-aseman kautta tai mikäli RTU:n pulssinpituutta ei voitu muuttaa, ohjausta pidennettiin päästöhidastetulla aikareleellä. Ohjauksien toiminta koestettiin ja hiottiin kohdilleen ja toiminnasta laadittiin pöytäkirja.

Kuristimilta saatavat hälytykset ja laukaisut lisätään paikallisista järjestelmistä kaukokäyttöön al asemien kautta. Hälytykset ja laukaisut koestettiin kaukokäyttöön saakka ja toiminnasta laadittiin pöytäkirjat.

Käyttöönottomittauksien, koestusten, korjaustoimenpiteiden ja viimeisten aistinvaraisten tarkastusten jälkeen laitteisto voitiin ottaa jatkuvaan käyttöön. Samat toimenpiteet tullaan toteuttamaan kaikissa jäljellä olevissa kohteissa, jotka valmistuvat vuoden 2020 loppuun mennessä. Uudet signaalit siirrettiin testitilasta käytön puolelle ja näistä alettiin muodostamaan käytönvalvontajärjestelmään uutta verkon tilannetta paremmin havainnollistavaa näkymää.

7.6 Jatkokehitys

Verkon tähtipisteen nollajännitteestä ja sammutuskuristimen asentotiedosta pystytään jatkossa muodostamaan tärkeää dataa verkon käyttäytymisestä. Jatkokehityksenä kaukokäyttöön lisätyt nollajännitteet ja asentotiedot laitettiin historiapiirtoon, jolla saadaan selkää käyrää nollajännitteen muodostumisesta. Koska kuristimen asento vaikuttaa verkon nollajännitteeseen merkittävästi, ei nollajännite pelkästään ole riittävä tieto. Näiden yhteiskäytön avulla voidaan tarkastella, miten nollajännite käyttäytyy jatkossa erilaisissa kytkentätilanteissa. Lisäksi saadaan tarkempaa tietoa ja reaaliaikaista dataa, miten eri vuodenaajat vaikuttavat nollajännitteeseen ja sen kautta sammutustarpeeseen. Jatkuvan nollajännitteen mittaamisen perusteella voidaan tehdä oikeaa tutkimusta verkosta ja sen ominaisuuksista.

Toisena jatkokehityksen kohteena on väyläteknikkaa tukevan automaattisäätäjän lisäys, joka pitää kompensointia resonanssipisteen tuntumassa nollajännitteen avulla. Käyttökokemusta on saatava automaattisäätäjistä, jotta näiden toiminnan perusteella voidaan miettiä automaattisäädön tarpeellisuutta. Säätäjä voitaisiin asettaa alueella yhdelle kuristimelle, joka vastaisi näin ollen pienten muu-

tosten toteuttamisesta automaattisesti. Muita alueen keloja voitaisiin säätää etänä tarpeen mukaan, jolloin toiminnasta saataisiin tarpeeksi tietoa. Säättäjälle on kuitenkin asetettava nollajännitteelle raja, sillä laite ei saa itsestään aiheuttaa tilannetta, jossa jännitesuojien laukaisurajat ylittyvät.

Kolmantena ja tärkeimpänä kehityskohteena on sammutuskapasiteetin lisäys ja varakapasiteetin hankkiminen tietyille alueille, joissa vakaviin laiterikkoihin ei kyetä nykyisin vastaamaan toivotulla tavalla.

LÄHTEET

1. Fingrid Oyj. 2015. 110 kV verkon sähkön laaturaportti. Viitattu 2.5.2020. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/sahkomarkkinainformatio/20150911_110-kv_verkon_sahkonlaatu.pdf
2. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2019. Tuulivoiman tulevaisuudennäkymät. Viitattu 2.5.2020. Saatavissa: https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1388-Tuulivoiman_tulevaisuudennakymat.pdf
3. SFS 6001. 2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
4. Hietalahti, Lauri – Tarkka, Pertti 2006. Piirianalyysi 2. Helsinki: Edita Prima.
5. Hietalahti, Lauri 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Vantaa: Tammertekniikka.
6. Fingrid Oyj 2002. Kantaverkon peruskoulutus. Sisäinen lähde, luku 1.8 , 2.2 ja 3.5.
7. Fingrid Oyj. 2020. Verkkokartta Lapin 110 kV sammutetusta verkosta. Sisäinen lähde. Julkinen verkkokartta. Saatavissa: <https://fingrid.navici.com/pl-form/?header=false&tab=projects>
8. Fingrid Oyj. 2020. Kantaverkon julkinen verkkokartta. Viitattu 30.5.2020. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/kuvat/kartat/verkko_2020_tekstit.jpg
9. Sumner, J.H 1946. The theory and operation of Petersen coils. IEEE kirjasto.
10. Das, J.C 2017. Understanding symmetrical components for power system modeling. New Jersey: IEEE Press series on power engineering.
11. Glover, Duncan – Samara, Mulukutla – Overby, Thomas 2012. Power system analysis and design fifth edition. USA: Cengage Learning.
12. Fingrid Oyj. 2020. Siemens SIGRA4 Distanssireleen häiriötallenne. Sisäinen lähde.
13. ABB Oy. TTT-käsikirja 2000-07, luku 10.2. Helsinki: ABB Oy
14. ABB Oy. TTT-käsikirja 2000-07, luku 8. Helsinki: ABB Oy
15. Fingrid Oyj. 2020. Muuntajien 110, 220 ja 400 kV tähtipisteiden maadoittaminen. Sisäinen lähde.
16. IEC 60076-6. 2007. Power transformers – Part 6: Reactors. Geneva: International Standard IEC.
17. Fingrid Oyj. 2020. Koulutusmateriaali oppilaitoksille. Sisäinen lähde.
18. IEEE Green book. 2007. Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Julkaisija: IEEE.

19. Schlabbach, Jurgen – Rofalski, Karl-Heinz 2008. Power System Engineering. Saksa: WILEY-VCH.
20. Fingrid Oyj. 2020. Siemens SIGRA4: Distanssireileiltä hankkeen aikana kerätyt häiriötalenteet. Sisäinen lähde.
21. Costello, David 2012. Event Analysis Tutorial Part 2: Answer keys. Sveitsi: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
22. Druml, Gernot – Kugi, Andreas – Parr, Bodo 2001. Control of Petersen Coils. IEEE members: International symposium of electrical engineering.
23. Imatranvoima osakeyhtiö 1958. Johtojen nollakapasitanssien laskeminen. Sisäinen lähde.
24. Fingrid Oyj. 2020. Tähtipisteen maadoituserotin. Sisäinen lähde.
25. Fingrid Oyj. 2020. Tähtipisteen sammutuskuristin. Sisäinen lähde.
26. Wang, Peng – Chen, Baichao – Zhou, Hong – Cuihua, Tian – Sun, Bin 2018. Fault Location in Resonant Grounded Network by Adaptive Control of Neutral-to-Earth Complex Impedance. IEEE transactions on power delivery.
27. Fingrid Oyj. 2020. Trench kuristimen käyttöohjeet. Sisäinen lähde.
28. IEC61850-5. communication networks and systems for power utility automation. Geneva: International Standard IEC.
29. Kaufmann, Gerd – Vaitkevičius, Ramūnas 2018. Sensitive ground fault detection in compensated systems (arc suppression coil), IET Journals.
30. Siemens. SPIROTEC 7SJ Käyttöohje V4.9. Sisäinen lähde.
31. ABB Oy. 2009. REF615 manual. Viitattu 1.7.2020. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/0bf06cb26c50628cc1257b130056c974/RE_615_tech_756887_ENb.pdf
32. Siemens. SPIROTEC 7SA käyttöohje V4.61. Sisäinen lähde
33. Siemens. SPIROTEC 7SN60. Esite. Viitattu 1.7.2020. Saatavissa: http://www.automation-berlin.com/downloads/siemens/energy_ptd/7SN600_Catalog_SIP_E6.pdf
34. A-eberle. Info letter No.12 E-coil control: Resonance curve procedure – Location curve procedure, ohje lehti. Viitattu 14.7.2020. Saatavissa: https://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/I012-1-D-1-001-04_Infobrief%20Nr%2012-EN.pdf
35. A-eberle. The petersen coil regulator, manuaali. Viitattu 14.7.2020. Saatavissa: https://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/ba_REG-DP_en_201610.pdf
36. Fingrid Oyj. 2011. Kantaverkon käsikirja. Sisäinen lähde.

37. Elovaara, Jarmo – Haarala, Liisa 2011. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto Helsinki University press.
38. A-eberle. Capacitance of conductors, Manuaali. Viitattu 28.7.2020. Saatavissa: https://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/1020-1-D-1-001-04_Info-brief%20Nr%202020-EN.pdf
39. Prysmiangroup. Kaapeleiden teknisiä tietoja. Viitattu 29.7.2020. Saatavissa: https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXCHBMK-W_HXCHBMK-W_110kv.pdf
40. Prysimiangrop. Kaapeleiden teknisiä tietoja. Viitattu 29.7.2020. Saatavissa: https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXLMK-W_HXLMK-W_110kv.pdf
41. Geologian tutkimuslaitos. 2020. Maankamara karttapalvelu. Viitattu 10.10.2020. Saatavissa: <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>

(LIITTEET YRITYKSEN SISÄISESSÄ VERSIOSSA)