

Heikki Varho

MAASULUN KOMPENSOINTI VAKKA-SUOMEN VOIMAN
VERKOSSA

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2016

MAASULUN KOMPENSOINTI VSV:N VERKOSSA

Varho, Heikki
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2016
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 38
Liitteitä: 7

Asiasanat: maasulku, kompensointi, sähköverkko, maakaapeli

Tämän insinööriyön tarkoituksena on perehtyä maasulkuun ja sen kompensointiin keskijänniteverkossa. Työssä käydään läpi hyvin paljon teoriapohjaisesti maasulun eri tyypit, eri kompensointi tavat ja maasulun haittavaikutukset sähköverkossa.

Työ sisältää paljon laskennallista osuutta, jolloin työn lopussa esiteltävien simulointien ja liitteenä olevan maasulkuraportin ymmärtäminen on helpompaa. Laskennoissa ja simuloinneissa käytettiin Vakka-Suomen Voima Oy:n verkkotietojärjestelmän laskemia tuloksia ja sen olettamia arvoja, joten todellisuudessa tulokset voivat olla hieman poikkeavia.

Opinnäytetyössä syvällisen teorian jälkeen keskityn Lapin ja Hinnerjoen väliseen kaapelointiin, mikä antaa hyvän esimerkin maasulusta, sen kompensoinnista ja näiden vaikutuksesta keskijänniteverkkoon.

Opinnäytetyön sisältöä voi käyttää informatiivisiin sekä opetuksellisiin tarkoituksiin.

EARTH FAULT COMPENSATION IN VSVs GRID

Varho, Heikki

Satakunta University of Applied Sciences

Bachelor's Degree Programme in electric engineering

May 2016

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 38

Appendices: 7

Keywords: earth fault, shortage, compensation, power-distribution network

The purpose of this thesis is to study and make a research about earth fault, ground contact and compensating it in power distribution grid. In the work earth fault types itself, compensation methods of this fault, and the injurious effects on power grid are explained theoretically really deeply.

Work contains quite lot of calculated share in which case it is easier to understand the simulations to be demonstrated at the end of the work. In arithmetics and simulation values and results calculated by computer can be little differing in reality.

In this thesis I concentrated after profound theory to the cabling between Lappi substation and Hinnerjoki, which gives a good example of shortage to the ground, its compensation and their impact on power distribution network. Calculations are based on a real installations, substations and use of equipment in Vakka-Suomen Voima Ltd.

The contents of the thesis can be used for informative or educational purposes.

KÄSITTEET

A = ampeeri

C = kapasitanssi

f = taajuus

I_c = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

I_e = maasulkuvirran itseisarvo

I_l = kuristimen virta suorassa maasulussa

I_m = elektrodin kautta kulkeva virta

I_r = resistiivinen vikavirta

K = kompensointiaste

L = induktanssi

L1 = vaihe

R_e = maadoitusresistanssi

R_f = vikaresistanssi

R_l = tehovastus

R_m = yksittäisen elektrodin maadoitusresistanssi

StM = sähköturvallisuusmääräykset

U = verkon pääjännite

U_a = askeljännite

U_c = maasulkujännite

U_e = maadoitusjännite

U_{\max} = suurin sallittu maadoitusjännite

U_k = kosketusjännite

U_m = elektrodissa syntyvä maadoitusjännite

U_o = nollajännite

U_{tp} = sallittu kosketusjännite

U_v = vaihejännite

V = voltti

Z_f = vikaimpedanssi

Z_i = verkon sisäinen impedanssi vikakohdassa

$\omega = 2 \pi f$

Ω = ohmi

MAASULUN KOMPENSOINTI VSV:N VERKOSSA

EARTH-FAULT COMPENSATION IN VSVs GRID

KÄSITTEET

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
1.1	Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoitteet.....	8
2	VSV-KONSERNI	9
2.1	Vakka-Suomen Voima Oy.....	9
2.2	VERTEK Oy.....	10
2.3	Enertel Oy.....	10
3	MAASULKU	11
3.1	Sähköverkon vikatapaukset	11
3.2	Määritelmä	11
3.2.1	1-vaiheinen maasulku.....	12
3.2.2	2-tai monivaiheinen maasulku.....	13
3.3	Maasulkuvirta	14
3.4	Maasulkuylijännite.....	15
3.5	Verkon symmetria.....	15
3.6	Maadoitusjännite & kosketusjännite.....	18
4	KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS.....	21
4.1	Yleistä.....	21
4.2	Maasta erotettu verkko.....	21
4.2.1	Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku.....	22
4.3	Sammutettu verkko	23
4.3.1	Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku	24
4.4	Suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko.....	25
5	MAASULUN KOMPENSOINTI KJ-VERKOSSA	27
5.1	Kompensointi ja sen tarkoitus.....	27
5.2	Kompensoitu verkko.....	28
5.3	Keskitetty kompensointi	29
5.4	Hajautettu kompensointi	30
6	MAASULUN KOMPENSOINTI VSV:N VERKOSSA	31
6.1	Lapin sähköasema.....	31

6.2	Sähköaseman laitteisto.....	32
6.3	Laskenta	33
6.4	Tulokset.....	37
7	YHTEENVETO	38
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoitteet

Kesällä 2015 ollessani insinööriharjoittelijana Vakka-Suomen Voimalla minulle tarjottiin opinnäytetyötä varten aihe, jonka otin vastaan mielelläni. Työtä tarjonnut VSV-konsernin toimialana on sähköjakelu 24000 asiakkaalleen. Vakka-Suomen Voima Oy oli rakentamassa tuolloin uutta sähköasemaa Lappiin yhteistyössä VEOn kanssa, johon opinnäytetyö kohdistettiin. Työn alussa pyrin kirjoittamaan tekstin ”maallikon” näkökulmasta että myöskin sähköalan ammattilaisen näkökulmasta.

Opinnäytetyössä keskitytään paljon maasulun ominaisuuksiin, eri tyypeihin ja sen kompensointiin eri tavoin teoriassa että myös käytännössä. Maasulun teoria on alustettu perusteellisesti, jotta itse kompensointi ja erilaiset suojaustavat voitaisiin ymmärtää paremmin. Työn tekemistä selvitti ja auttoi paljon kun käytössäni oli Vakka-Suomen Voima Oy:n verkkotietojärjestelmä, millä verkon laskenta ja simulointiosuus oli melko tarkka. Työssä on paljon laskennallisia osuuksia, kuten kaavoja virtojen ja jännitteiden selvittämiseen vikatilanteissa sekä mitoituksia varten.

Tänä päivänä maakaapelointi lisääntyy radikaalisti Suomen maaperään, jolloin aihe on hyvin ajankohtainen. Työn tarkoituksena on olla siis hyvin informatiivinen ja käytännönläheinen sen tarjoamien esimerkkien ansiosta, mitkä perustuvat oikeisiin mittauksiin, laskentoihin ja simuloiteihin.

2 VSV-KONSERNI

2.1 Vakka-Suomen Voima Oy

Konsernin emoyhtiön Vakka-Suomen Voima Oy:n toimiala on sähkönjakelu noin 24000 asiakkaalleen. Sähkön toimittaminen asiakkaille alkoi Uudessakaupungissa yli 100 vuotta sitten vuonna 1909. Konserniin kuuluvien tytäryhtiöiden liiketoimintaa ovat kaukolämpötoiminta sekä erilaisten sähköverkojen suunnittelu, rakentaminen ja kunnossapito. Vuonna 2015 Vakka-Suomen Voima Oy:n liikevaihto oli reilut 11,6 milj. euroa. Sähkökauppaliiketoiminta siirrettiin vuoden 2009 alusta alkaen VSV:n ja Rauman Energia Oy:n puoliksi omistaman Lännen Omavoima Oy:n hoidettavaksi.

VSV panostaa sähkön toimitusvarmuuteen turvatakseen asiakkailleen hyvänlaatuisen sähkön kohtuullisella hinnalla. Sama koskee kaukolämpöyhtiö VSV-Energia Oy:n toimintaa lämmön toimittajana.

Yhtiöllä on hyvistä suomalaisista yrityksistä muodostunut yhteistyöverkko, joka takaa tarpeelliset suuruuden edut. Verkosto tuo asiantuntemusta ja kustannussäästöjä, joista myös asiakkaat hyötyvät.

Toimintansa laadun takaamiseksi Vakka-Suomen Voima Oy:llä on käytössään ISO-9001 mukainen standardin mukainen sertifioitu laatujärjestelmä.

(Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut, 2016)

2.2 VERTEK Oy

VERTEK Oy on Vakka-Suomen Voima Oy:n ja Rauman Energia Oy:n omistama yritys. VERTEKillä on liiketoimintaa Vakka-Suomen, Pirkanmaan, Satakunnan ja Turun talousalueilla. VERTEK tuottaa sähkö- ja tietoliikennealan monipuolisia palveluita ja ratkaisuja. (VERTEK Oy:n www-sivut, 2015)

2.3 Enertel Oy

Suunnittelutoimisto Enertel Oy on vuonna 1992 perustettu taloteknistä suunnittelua ja – konsultointia harjoittava yritys Laitilassa, osana VSV-konsernia.

Enertel Oy on sähköenergian jakelu- ja käyttöjärjestelmiä, sähkötekniisiä tieto- ja turvajärjestelmiä, lämmitys-, vesihuolto- ja ilmastointijärjestelmiä sekä näihin läheisesti liittyviä muita palveluja tuottava yritys. (Enertel Oy:n www-sivut, 2015)

3 MAASULKU

3.1 Sähköverkon vikatapaukset

Sähköverkon normaali toiminta edellyttää, että estetään vaarallisten jännitteiden syntyminen ja että virtapiirien virrat eivät vahingoita laitteita tai aiheuta ympäristöä turmelevaa lämpötilaa. Sähköturvallisuusmääräyksissä annetaan määräyksiä erityisesti sellaisten vikatapauksen varalta, jotka voivat aiheuttaa hengen tai omaisuuden vaaraa.

Sähköverkon vikoja voivat aiheuttaa erimerkiksi,

- ylikuormitus,
- ylijännitteet,
- laitteiden vioittuminen tai toimintahäiriö,
- inhimillinen erehdys.

Turvallisuuden lisäksi jakelujärjestelmä on suunniteltava niin, että viat eivät aiheuta tarpeettomia käyttökeskeytyksiä. Sähköverkko suunnitellaan niin, että mahdolliset vikatilanteet ovat jo ennakoitu ja otettu huomioon ja suunniteltu eri vikatyypeille soveltuvat suojalaitteet. (Aura, L. & Tonteri, A.J. 1993, 159)

3.2 Määritelmä

Maasulku on StM:ssä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Kaksoismaasulku on kyseessä silloin, kun verkon kahdessa eri vaiheessa ja eri kohdissa verkkoa esiintyy samanaikaisesti eristysvika. (Tukes www-sivut 2016)

Virtapiiriin syntyy yksivaiheinen oikosulku eli *maasulku*, kun eristysvian tai muun vian vaikutuksesta virtapiirin johdin joutuu johtavaan yhteyteen maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan laitteiston osan kanssa. Maasulkuvirran aiheuttamien erilaisten vaarajännitteen vuoksi maasulusta aiheutuu maadoitetussa verkossa

vikapaikkaan ja sen ympäristöön hengenvaara. (Elovaara Haarla. Sähköverkot I 2011, 340)

Maasulut tai maasuluista alkaneet viat muodostavat keskijänniteverkkojen (mm. 20kV tai 10kV verkossa) yleisimmän vikaryhmän. Suurin osa näistä on yksivaiheisia maasulkuja. Joskus yksivaiheisena maasulkuna alkanut vika laajenee kaksoismaasuluksi, jolloin verkko on samanaikaisesti maasulussa kahdessa eri paikassa ja eri vaiheissa. Huomattavasti yleisemmin laajenee maasulkuna alkanut vika kuitenkin paikalliseksi kaksi- tai kolmivaiheiseksi maasuluksi tai kolmivaiheiseksi oikosuluksi. Valtaosa pysyvistä vioista sattuu verkon suojavaadoittamattomissa kohdissa. (Energiateollisuus ry 2016)

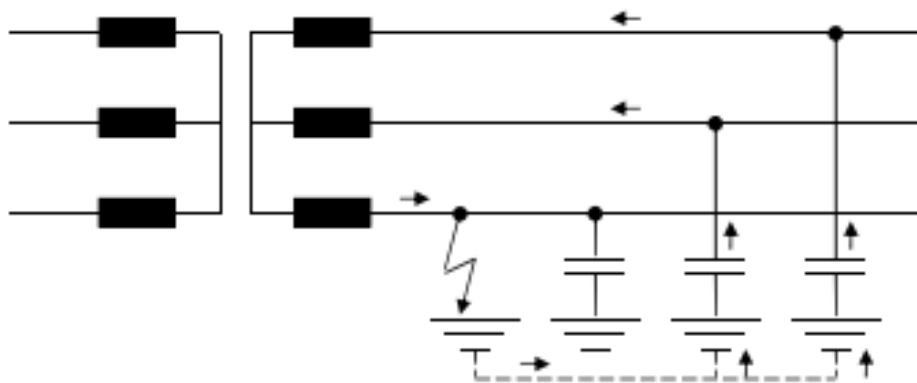
Maasulkuilmiö poikkeaa olennaisesti oikosulusta silloin, kun verkon tähtipistettä ei ole maadoitettu. Verkkoon tulee tällöin haitallinen epäsymmetria, mutta ei kovin suurta vikavirtaa. (Leena Korpinen www-sivut, 2015)

Luvussa 3.5 perehdyn enemmän verkon symmetrioihin.

3.2.1 1-vaiheinen maasulku

Yksivaiheinen maasulku muodostuu yhden johtimen ja maapotentiaalin välille. Yksivaiheinen maasulku on maasulkutyypeistä yleisin. Yksivaiheinen maasulku voi kehittyä monivaiheiseksi maasuluksi tai oikosuluksi jänniteheilahteluiden sekä johtimen ympärillä ionisoituneen ilman takia. (Lehtonen, Hakola 1996)

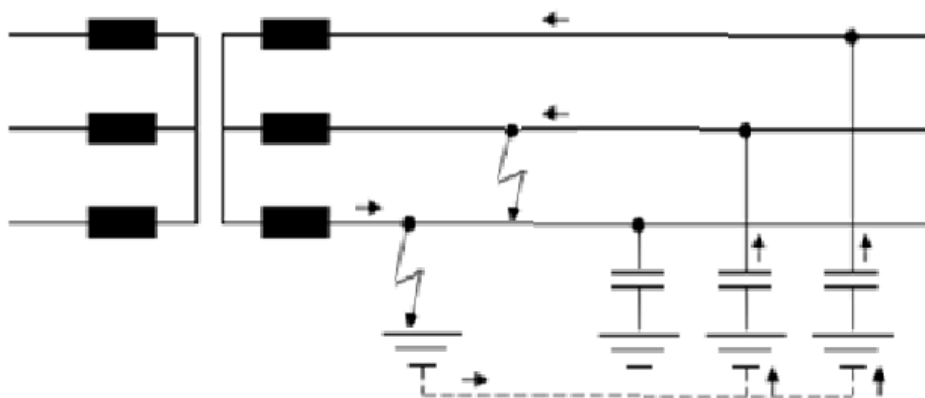
Periaatekuva (Kuva 1) maasulkuvirrasta, jossa vaihejohdin joutuu johtavaan yhteyteen maapotentiaalin C_0 kanssa, muodostaen vikavirran I_c .



Kuva 1: Maasulkuvirran kulku vikatilanteessa. Terveet vaiheet syöttävät maasulkukohtaa kolmannessa vaiheessa.

3.2.2 2-tai monivaiheinen maasulku

Toisinaan syntyy tilanteita, jolloin verkossa on samassa muuntopiirissä samanaikaisesti kaksi eri maasulkua (Kuva 2) eri vaiheissa (*cross-country fault*). Tilanne syntyy tavallisesti niin, että ensimmäisen maasulun syntyessä kahden muun vaiheen jännitteet nousevat eikä jokin eriste kestäkään syntynyttä jännitteennousua. Tällöin voi syntyä uuteen paikkaan uusi vika. Tällainen vika on hyvin vaarallinen, sillä siihen liittyy suuria maassa kulkevia virtoja, ilman että voitaisiin tietää millaista kulkureittiä myöten virta lopulta palaa takaisin syöttölähteeseen. Kaksoismaasulun aiheuttajina siis voivat olla myös yksivaiheisen maasulun ylijännitteet. (Elovaara, Haarla, Sähköverkot II, 2011, 342)



Kuva 2: Kaksoismaasulku toisen ja kolmannen vaiheen välillä, mitä terve vaihe syöttää.

Kaksoismaasulkutilanteessa kahdella vaihejohtimella on maahan nähden eristysvika kahdessa tai useammassa eri kohtaa johtimia. Kaksoismaasulku aiheuttaa oikosulun kaltaisen tilan verkkoon ja ne tulisi kytkeä välittömästi pois verkosta. Kaksoismaasulun kaltainen tilanne voi syntyä myös silloinkin, kun kuormituksen puoleinen pää maakaapelista tai katkennut avojohto joutuu johtavaan yhteyteen maapotentiaalin kanssa. Jos monivaiheisen maasulun eristysviat ovat samassa kohtaa järjestelmää, kyseessä on silloin kaksois- tai kolmoismaasulku. (Lehtonen ja Hakola 1996)

3.3 Maasulkuvirta

Maasulkuvirralla tarkoitetaan vikapaikan kautta maahan, maadoitus- tai suojaajohtimeen maasulussa menevää virtaa. Oikosulkuvirran suuruus riippuu vikapaikan ja verkon syöttöpisteen välisestä etäisyydestä. Maasulkuvirta on etäisyydestä lähes riippumaton. Maasulkuvirran suuruuden määrittää käytännössä vikaimpedanssin ja maasulussa olevan verkon laajuus (Liite 1). Maasulkuvirran aiheuttaman vaarajännitteen vuoksi maasulusta aiheutuu maadoitetussa verkossa vikapaikkaan ja sen ympäristöön hengenvaarallisia tilanteita.

Maasulkuvirta aiheuttaa:

- hengenvaaraa maasulkukohtaan,
- tulipalonvaaraa virran lämpövaikutuksen takia
- ylijännitevaaraa maasulkuvalokaaren takia

Maasulkuvirta synnyttää maadoitusresistanssissa jännitehäviön:

$$U_e = R_e \times I_c$$

Jossa U_e on maadoitusjännite, R_e on maadoitusresistanssi ja I_c on maasulkuvirta. (SAMK www-sivut, 2015)

3.4 Maasulkuylijännite

Yksivaiheinen maasulku on yleisin käyttötaajuisia ylijännitteitä aiheuttava tilanne. Tämä tapahtuma saa aikaan kahden terveeseen vaiheeseen jännitteen nousun. Ylijännite on perustaajuinen ja esiintyy normaalisti vain vaihe-maa – eristysvälissä. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2011, 245)

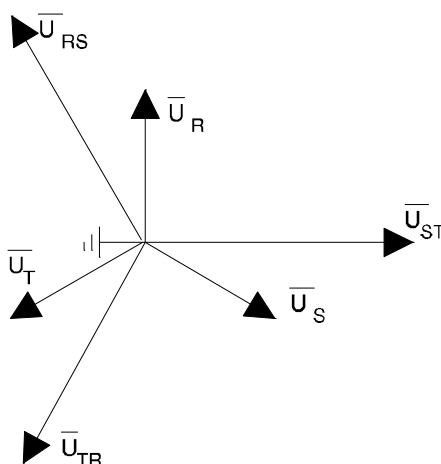
Ylijännitteen amplitudi riippuu verkon tähtipisteen maadoitustavasta ja vikapaikasta. Maadoitustavan perusteella verkot jaetaan maasta erotettuihin, sammutettuihin, suoraan tai impedanssin kautta maadoitettuihin verkkoihin (joista kerron tarkemmin kappaleessa 4). Impedanssina käytetään tavallisesti kuristinta tai vastusta. Maasulun aikana terveessä vaiheessa vaikuttavan ylijännitteen suuruus ilmoitetaan maasulkukertoimella k , jolla tarkoitetaan vian aikana terveessä vaiheessa vaikuttavan vaihejännitteen huippuarvon suhdetta samassa vaiheessa ja paikassa ennen vikaa vaikuttaneeseen huippuarvoon. Maasta erotettujen verkkojen maasulkukerroin on suurimmillaan noin 1,8. Samaan arvoon päästään sammutetuissa verkoissa. Suoraan maadoitetuissa tai pienellä impedanssilla maadoitetuissa verkoissa maasulkukerroin on pienempi. Verkkoja kutsutaan tehollisesti maadoitetuiksi, jos niiden maasulkukerroin pätee $k \leq 1,4$. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2011, 245)

3.5 Verkon symmetria

Osa vikatapauksista on *symmetrisiä*, mikä tarkoittaa että vian pääasialliset vaikutukset kohdistuvat kaikkiin vaiheisiin samankaltaisina. Näistä vioista mainittakoon johtimen tai muuntajan kolmivaiheinen oikosulku, johtimen tai muuntajan laukeaminen tai suuren tuotantoyksikön nopea irtoaminen verkosta. Tämän kaltaiset muutokset vaikuttavat huomattavasti tehonjakoon ja jännitetason laatuun. Symmetrisiä vikoja analysoitaessa voidaan käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää. (Elovaara, Haarla, Sähköverkot I, 2011, 166)

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet (Kuva 3) maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on joka hetki nolla. Vastaavasti maakapasitanssien kautta kulkeva osa verkon varausvirroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun sattuessa terveiden vaiheiden vaihejännitteet maahan nähden kasvavat. Epäsymmetrian seurauksena varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa varausvirtaa kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07)

Terveessä tilassa maakapasitanssit muodostavat symmetrisen jännitteenjakajan, joka symmetrioi järjestelmän jännitteet. Tilannetta voidaan kuvata seuraavalla osoitinpiirroksella:



Kuva 3: Terveen tilan osoitinpiirros jossa, pääjännitteet U_{st} , U_{rs} ja U_{tr} . Sekä vaihejännitteet U_s , U_r ja U_t . (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07) (OAMK www-sivut, 2016)

Tavallisimpia epäsymmetrisiä vikoja ovat 1-vaiheinen oiko- ja maasulku sekä 2-vaiheinen oikosulku. Jälkimmäiseen saattaa liittyä myös kosketus maahan tai kojeistoon. Tällaisten vikojen aikana eri vaiheiden jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä. Laskennassa verkosta ei voida käyttää tavanomaista yksivaiheista sijaiskytkentää, koska 1-vaiheisen sijaiskytkennän käyttäminen edellyttää symmetristä verkkoa, vaan jokaista vaihetta on tarkasteltava erikseen. Tästä seuraa ratkaistavien jännite- ja virtayhtälöiden määrää kolminkertaiseksi. (Elovaara, Haarla, Sähköverkot I, 2011, 167)

Epäsymmetristen vikojen vaikutukset näkyvät eri tavalla eri vaiheissa. Epäsymmetrisiä poikkaisvikoja ovat esimerkiksi edellä mainitut 1- tai 2-vaiheiset maasulut, joita syntyy tavallisesti johdoille osuvien salamaniskujen yhteydessä. Jännitteen puuttumista vähintään yhdestä vaiheesta kutsutaan *sarjaviaksi* tai *1-vaiheiseksi katkokseksi*. Sen voi synnyttää esimerkiksi katkaisijan tai sulakkeen epätäydellinen toiminta. (Elovaara, Haarla, Sähköverkot I, 2011, 167)

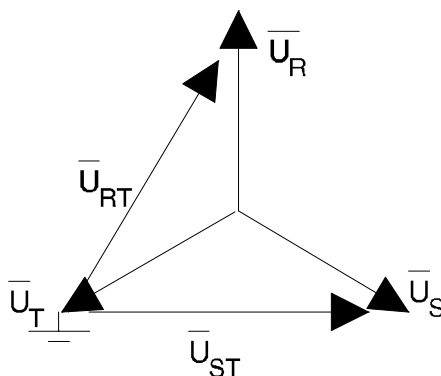
Toisinaan viat ovat epäsymmetrisiä yhdistelmävikoja, jolloin vikoja voi mahdollisesti olla kaksi tai useampia eri puolilla verkkoa, esimerkiksi kaksoismaasulut ja johdinkatkos. Nämä viat on laskennallisesti erittäin haastavia käsitellä. (Elovaara, Haarla, Sähköverkot I, 2011, 167)

Kuva 4 on osoitinpiirroksen avulla esitetty maasulun jännitteet kuvan esittämässä tapauksessa. Jännite $IeRf$ on vioittuneen johtimen jännite maahan nähden vikapaikassa ja jännitteet U_S ja U_R terveiden vaihejohtimien jännitteet maahan nähden. (Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 165)

Verkon maakapasitanssien edustama kapasitiivinen reaktanssi on melko suuri. Se on sitä suurempi, mitä suppeampi verkko on. Tämän takia melko suuri-impedanssiset viat kykenevät heiluttamaan jännitetasapainoa. Osoitindiagrammi muuttuu, kun vaihe U_t joutuu vastuksettomaan maasulkuun. Tällöin tapahtuu seuraavaa:

- Maasulussa olevan vaiheen potentiaali on nolla
- Terveiden vaiheiden potentiaali kohoaa pääjännitteen suuruiseksi
- Tähtipisteen potentiaali kohoaa vaihejännitteen suuruiseksi

Jännitteet muodostavat nyt seuraavan diagrammin:



Kuva 4. Maasta erotetun verkon osoitinpiirros, yksivaiheisessa maasulussa.

Maasta eristetyn verkon yksivaiheinen maasulkuvirta on helpoimmin laskettavissa Thevenin menetelmällä. Maasulkukohdan ja maan välillä on jännite U_v . Jos vikaimpedanssin suuruus on Z_f ja verkon sisäinen impedanssi vikakohdassa on Z_i , maasulkuvirran suuruus on silloin:

$$I_c = \frac{U_v}{Z_i + Z_f}$$

Maasulkukohdasta katsottuna Thevenin lähteen sisäisen impedanssin muodostavat eri vaiheiden rinnan kytkettyjen maakapasitanssien muodostamat kapasitiiviset reaktanssit. Johtojen ja muuntajien impedanssit ovat em. reaktanssien rinnalla häviävän pieniä. Kyseessä on siis resistanssin ja kapasitiivisen reaktanssin muodostama sarjapiiri. Vikaimpedanssi on piirissä oletettu puhtaaksi resistanssiksi R_f . Oletus pitää hyvin paikkansa, koska em. impedanssin muodostaa yleensä ilmassa sattuva valokaari, jonka impedanssi on resistiivinen. Maasulkuvirraksi saadaan silloin:

$$I_c = \frac{U_v}{\sqrt{R_f + \left(\frac{1}{3\omega C_0}\right)^2}}$$

Maasulkuvirta on tällöin puhdasta kapasitiivista loisvirtaa. Maasulkuvirran laskemiseksi on siis tunnettava verkon maakapasitanssi. Eri johtotyypeille se saadaan käsikirjojen taulukoista (Liite 1). Suurjännitekaapeleiden valmistajat antavat kaapeleiden ominaismaasulkuvirran kaapelikilometriä kohti, jolloin maakapasitanssia ei aina tarvitse laskea. (SAMK www-sivut, 2015)

3.6 Maadoitusjännite & kosketusjännite

Vikapaikassa maasulkuvirta kohtaa aina jonkin suuruisen maadoitusresistanssin R_e . Tästä seuraa maasulkupaikan jännitteeseen nähden nousu arvoon (maadoitusjännite U_e).

$$U_e = I_e \times R_e$$

Standardissa SFS6001 on määritelty suurimmat sallitut arvot maadoitusjännitteelle:

$$U_{max} \leq k \times U_{tp}$$

missä k on asennuksen mukaan määräytyvä kerroin ja U_{tp} on sallittu kosketusjännite. Keski-jänniteverkko on Suomessa joko maasta erotettu tai sammutuskuristimen kautta maadoitettu.

Maadoitusjännite ei ole sama kuin maasulun vikakohtassa olevan henkilön tai eläimen kokema kosketusjännite. Sallitut kosketusjännitteet ovat:

Laukaisuaika [s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_{tp} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110

Kuva 5. Laukaisuaajat sallittujen kosketusjännitteiden mukaan.

Perustilanteessa k saa arvon 2, mikä on jakelumuntamon standardin ohjeiden mukainen. Jos taloudellisten tai teknisten asioiden takia ei saavuteta tavoitetasoa, voi kerroin k olla 4. Erityisen hankalissa oloissa voidaan käyttää kertoimen k arvolla 5, jolloin muuntamolle on tehtävä potentiaalitasaus ja jokaiselle liittymälle maadoitus, joka on suositeltavaa yhdistää rakennuksen pääpotentiaalitasausjärjestelmään.

Maadoitukset ovat välttämättömiä verkon turvallisen toiminnan kannalta. Maadoitukset jaetaan *käyttö-* ja *suojavaadoituksiin*. Erona näissä on, että käyttömaadoituksessa kytketään virtapiirin osa, esimerkiksi pienjännitejärjestelmän 0-piste maahan. Suojavaadoituksessa kytketään virtapiiriin kuulumaton osa maadoitusjärjestelmään. (Lappeenranta University of Technology www-sivut, 2016)

Maasulkuvirta määräytyy galvaanisesti yhteen kytketyn johtoverkon pituuden perusteella. Suurjännitejärjestelmän maasulkuvirta voi kulkea useiden yhteen kytkettyjen maadoituselektrodien kautta, jolloin voidaan käyttää yhtälöä:

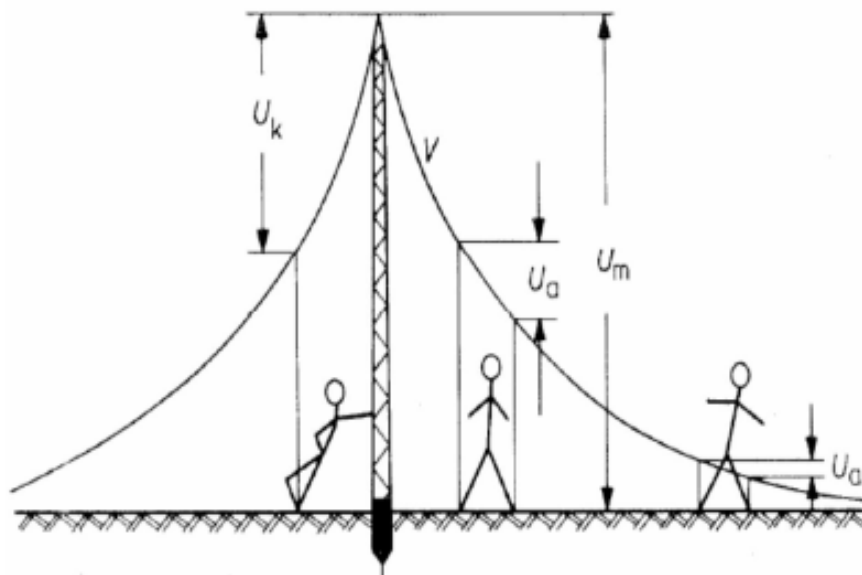
$$R_m = \frac{U_m}{I_m}$$

jossa R_m = yksittäisen elektrodin maadoitusresistanssi

U_m = elektrodissa syntyvä maadoitusjännite

I_m = elektrodin kautta kulkeva virta

Yli 1000 V:n järjestelmässä maasulkuvirrat voivat olla hyvin suuria, jolloin huomioon on otettava maasulkuvirran maaresistanssissa aiheutuva *askeljännite* (Kuva 6). (Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 188, 189, 190)



Kuva 6. Maan pinnan potentiaali V , maadoitusjännite U_m , kosketusjännite U_k ja askeljännite U_a .

4 KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS

4.1 Yleistä

Pienjänniteverkot ovat yleensä suoraan maadoitettuja. Keskijänniteverkkoja käytetään maasta erotettuina, sammutettuina tai tehollisesti maadoitettuina. Suurvoimansiirtoverkot ovat yleensä tehollisesti maadoitettuja, koska näin voidaan alentaa verkon eristysmitoitusta. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2011, 245)

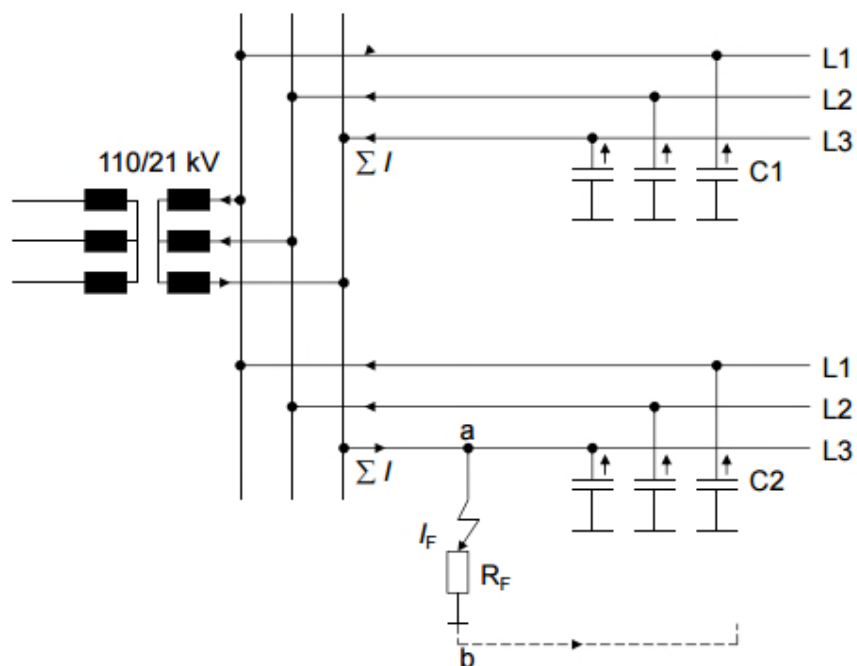
4.2 Maasta erotettu verkko

Suomen olosuhteissa keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään tähtipisteestään (Kuva 7) *maasta erotettua verkkoa* tai sen erityismuotoa, ns. *sammutettua verkkoa* (Kuva 8). Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään induktanssi, jonka reaktanssi vastaa suunnilleen verkon johtojen maakapasitanssien muodostamaa reaktanssia.

Keskeisin syy maasta erotetun keskijänniteverkon käyttöön on huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuva kosketusjänniteongelma. Maasulku aiheutuu usein vaihejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitettuun osaan. Tällöin kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja suojamaadoituksen resistanssista. Tähtipisteistään erotetussa verkossa maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta maahan (usein vikaresistanssin kautta), johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta 110/20 kV:n päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. (Lakervi, Partanen. Sähköjälkelutekniikka, 2008, 182)

Jos sammutuskuristimen reaktanssi on yhtä suuri kuin maakapasitanssien muodostama reaktanssi, niin maasulkuvirta on tällöinkin hyvin pieni. Pienen maasulkuvirran ansiosta maadoitusjännite-vaatimukset on helpompi saavuttaa ja

pienivirtainen maasulkuvalokaari sammuu usein myös itsestään. (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07) (OAMK www-sivut, 2016)



Kuva 7. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

4.2.1 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

Kuvassa 7 on esitetty maasta eristetyn verkon yksivaiheinen maasulkutilanne. Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä (Kuva 3) ja niiden summa on nolla. Verkon maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat symmetrisiä ja niidenkin summa on nolla. Jonkin vaiheen joutuessa maakosketukseen vikaresistanssin kautta, pienentyy viallisen vaiheen jännite maahan nähden, ja terveiden vaihejännite nousee. Tapauksessa, jossa vikaresistanssin arvo on nolla, putoaa viallisen vaiheen jännite nolleen ja muiden vaiheiden jännite maahan nähden nousee järjestelmän pääjännitteen suuruiseksi. (Aura, L. & Tonteri, A.J. 1993, 163)

Maasulkuvirran itseisarvo I_e voidaan laskea yhtälöstä:

$$I_e = \sqrt{3}\omega CU$$

jossa U = verkon pääjännite

C = yhden vaiheen maakapasitanssi

$$\omega = 2 \pi f \text{ (jossa } f \text{ on taajuus)}$$

Vikapaikan resistanssin kasvaessa maasulkuvirta pienentyy. Maasulkuvirran I_e itseisarvo voidaan tällöin laskea yhtälöstä:

$$I_e = \frac{3\omega C}{\sqrt{1 + (3\omega CR_f)^2}} U$$

jossa $R_f =$ maasulun vikaresistanssi.

Edellinen lauseke voidaan esittää myös muodossa:

$$I_e = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U}\right)^2}}$$

mikä on käyttökelpoinen, kun tiedetään maasulkuvirta suoraan maasulussa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07)

Maasulku aiheuttaa jännite-epäsymmetrian, jonka seurauksena verkon nollapisteen ja maan välille syntyy jännite-ero, jota sanotaan nollajännitteeksi U_0 . Tämä jännite on sama kuin se jännite, jonka maasulkuvirta aiheuttaa kulkiessaan verkon maakapasitanssien kautta. (Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 164)

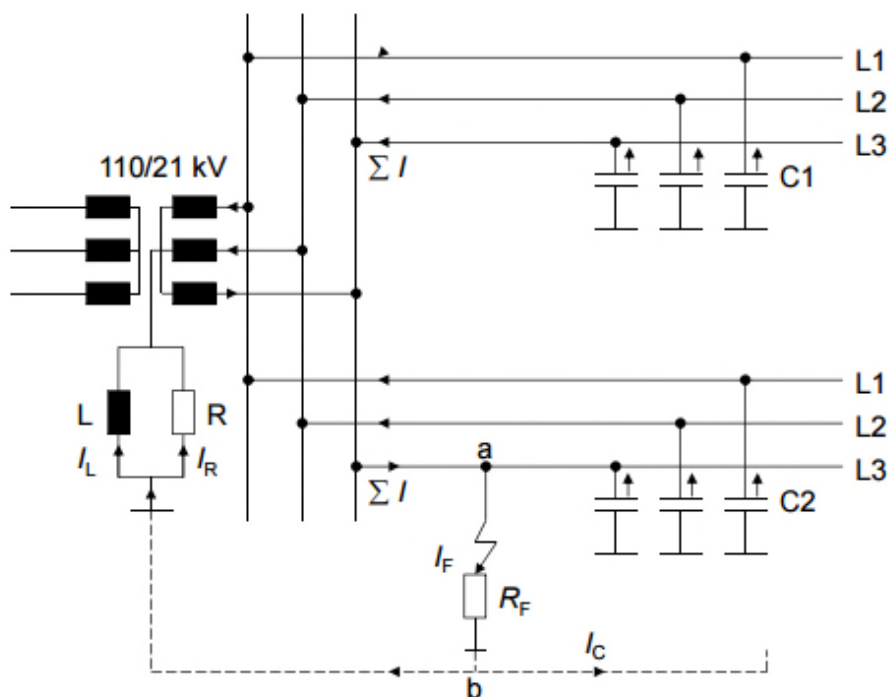
Nollajännite voidaan laskea yhtälöstä:

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C} I_e$$

4.3 Sammutettu verkko

Järjestelmä, jossa muuntajan nollapiste on yhdistetty maahan induktanssin välityksellä, sanotaan sammutetuksi järjestelmäksi. Nimitys johtuu siitä, että johtokapasitanssien kautta kulkevalle kapasitiiviselle vikavirralla kehitetään lähes 180° vaihesiirrossa oleva muuntajan nollapistevirta, joka summautuu vikapaikassa

johtokapasitanssien summavirtaan, jolloin vikavirta jää hyvin pieneksi. Vikavirta niin sanotusti ”sammutetaan”. (Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 165)



Kuva 8. Maasulku tilanne sammutetussa verkossa kun maasulku muodostuu pisteiden *a* ja *b* välille.

Kuvassa 8 on esitetty sammutetun verkon periaatekytkentä. Maasulkuvirta voidaan sammuttaa vain määrättyllä verkkopituudella. Kun verkon kytkennällisillä toimenpiteillä muutetaan, pitäisi sammutuskelan induktanssia muuttaa samassa suhteessa. Sammutettua järjestelmää käytetään Suomessa keskijänniteverkossa. (Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 166)

4.3.1 Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku

Täysin sammutetussa verkon tapauksessa voidaan kirjoittaa yhtälö:

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C}$$

jossa L = sammutuskelan induktanssi
 C = verkon vaiheen kapasitanssi

Jolloin muuntajan tähtipisteen jännite eli nollajännite saa arvon:

$$U_o = \omega L I_L = \omega L \frac{U_v}{\frac{1}{3\omega C}} = 3\omega^2 L C U_v$$

jossa U_v = verkon vaihejännite

U_o = nollajännite

(Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993, 165)

4.4 Suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko

Suoraan maadoitetulla verkolla (Kuva 9) tarkoitetaan verkkoa jossa tähtipiste on maadoitettu suoraan järjestelmän maadoitusjohtimeen. Kun suoraan maadoitetussa verkossa tapahtuu esimerkiksi yksivaiheinen maasulku, verkon oikosulkusuoja toimii koska tilanne vastaa oikosulkua. Maasulkusuojausta ei siis tarvitse erikseen huomioida maadoitetussa verkossa. (Lehtonen ja Hakola 1996)

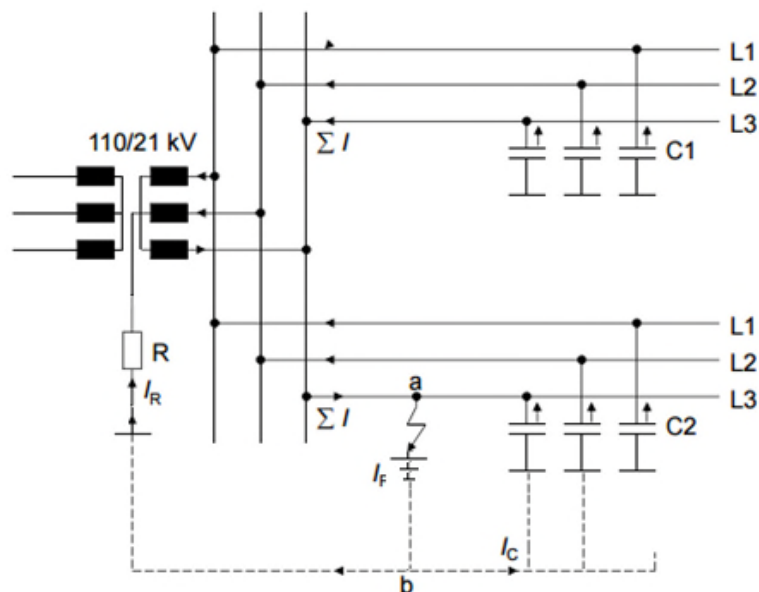
Vikapaikan virta voidaan laskea:

$$I_c = \frac{\sqrt{1 + (R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f + R_e)^2 + (R_f R_e 3\omega C_0)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}}$$

jossa R_e = maadoitusresistanssi

R_f = vikaresistanssi

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi



Kuva 9. Maasulku tilanne maadoitetussa verkossa kun maasulku muodostuu pisteiden *a* ja *b* välille.

Tähtipisteeseen kytketyn resistanssin *R* avulla kasvatetaan maasulkuvirtaa ja toisaalta pienennetään kytkentä- ja katkaisutilanteissa syntyviä ylijännitteitä samoin kuin katkeilevan maasulun synnyttämiä ylijännitteitä. Vikapaikassa kulkee virta, joka muodostuu maadoitusresistanssin ja verkon maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summasta. (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07, 2015)

Jos maakapasitanssi on pieni, eli maakapasitanssien muodostaman reaktanssin arvo on suuri suhteessa maadoitusresistanssiin, voidaan maasulkuvirta laskea lausekkeesta:

$$I_f = \frac{1}{R_e R_f} \frac{U}{\sqrt{3}}$$

(ABB:n TTT-käsikirja 2000–07,2015)

5 MAASULUN KOMPENSOINTI KJ-VERKOSSA

5.1 Kompensointi ja sen tarkoitus

Sähkömarkkinalaki on asettanut entistä tiukemmat vaatimukset sähköyhtiöille, sähkön toimitusvarmuuteen liittyen. Tiukentuneilla määräyksillä jakeluverkon maakaapelointi lisääntyy tulevaisuudessa, jolloin verkkojen maasulkuvirtaa rajusti. Maakaapelin tuottama maasulkuvirta avojohtoihin verrattuna on noin 40 kertainen, joten maasulkuvirran kompensointitarve tulee lisääntymään. 20kV jakeluverkon kaapeloinnin lisääntyminen aiheuttaa uusia haasteita maasulkuvirran kompensointiin. Maasulkuvirran kasvaessa nykyiset kuristimet keskitetyssä kompensoinnissa jäävät helposti pieneksi.

Maakaapeloinnin lisääntyessä, se aiheuttaa myös muita ongelmia:

- Verkon resistiivinen vikavirta I_r kasvaa kaapelipituuden kasvaessa
- I_r :n kasvaessa aiheuttaa maadoitusjännitteen nousua
- Maasulkuvirta I_c aiheuttaa jännitehäviöitä kaapelissa, jolloin suuriohmisten maasulkujen havainnointi vaikeutuu
- Laajamittainen kaapelointi lisää loistehon tuottoa

(Maviko www-sivut, 2016)

Kompensointilaitteiden avulla saadaan sammutettua verkon valokaari vikakohdassa n. 80 % tapauksissa jolloin vältetään verkon pikajälleenkytkentä eli tutummin sanottuna ”räpsy”. Maasulkuvirtojen pienentäminen kompensoidussa verkossa ja sitä kautta kosketusjännitteiden pienentäminen vikakohdissa mahdollistaa verkon käyttämisen maasulussa. Tällöin saadaan aikaa vian paikantamiseen ja eristämiseen aktiivisen verkon ulkopuolelle. Kompensointi vähentää myös laitevaurioita ja rasiitusta verkolle.

Maasulkuvirran kompensointitarve kasvaa sen mukaan, kuinka paljon maakaapelointia lisätään. Maasta erotetun keskijänniteverkon avojohtojen maasulkuvirta- ja kapasitanssiarvot ovat suhteellisen pieniä verrattuna kaapeloidun

verkon arvoihin. Yleensä maasulkuvirran kompensointi tapahtuu keskitetyksi sähköasemilla. Säädetty kompensointikela tai kuristin asennetaan sähköverkon tähtipisteen ja maapotentiaaliväliin. Tavallisesti perusrakenteeltaan kompensointikela on öljyristeinä säädetty sydämellä oleva induktanssikela, mikä mitoitetaan kohteen maasulkuvirran mukaan ja on säädetty 10–100% maksimi mitoitussvirta-arvolle. (Multirel www-sivut, 2016)

5.2 Kompensoitu verkko

Kompensoidussa verkossa verkon kapasitiivinen maasulkuvirta kompensoidaan verkon tähtipisteeseen kytketyn kuristimen avulla. Keskijänniteverkoissa on harvoin muuntajan tähtipiste, jolloin voidaan muodostaa keinotekoinen tähtipiste. Tämä voidaan toteuttaa maadoitusmuuntajan avulla, jonka tähtipisteeseen kytketään kompensointikuristin. Tällöin kompensointi on *keskitetty* (Kuva 10b). Kompensointi voidaan toteuttaa myös *hajautetusti* (Kuva 11), jolloin tarpeellinen määrä kompensointikuristimia asetetaan verkkoon johtojen varsille. (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07,2015)

Kompensoinnin määrää kuvataan kompensointiasteella K . Jos K :n arvo on yksi tai lähellä yhtä, verkko on täysin kompensoitu eli sammutettu. Jos K on enemmän kuin yksi, verkko on tällöin ylikompensoitu ja vastaavasti K :n ollessa alle yksi verkko on alikompensoitu.

$$K = \frac{I_L}{I_C}$$

jossa I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa

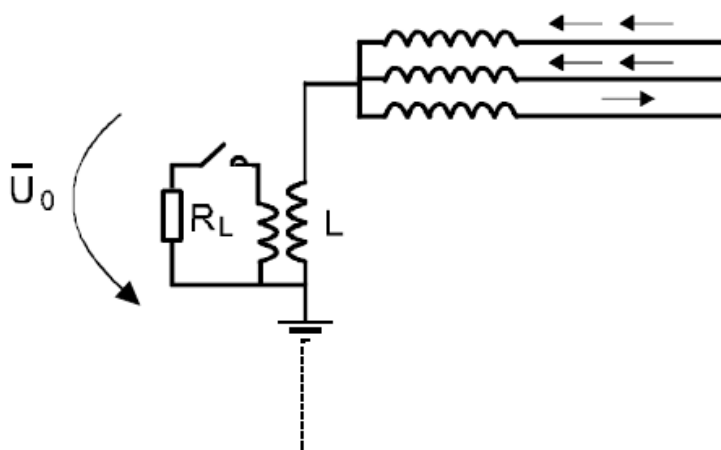
I_C = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

K = kompensointiaste

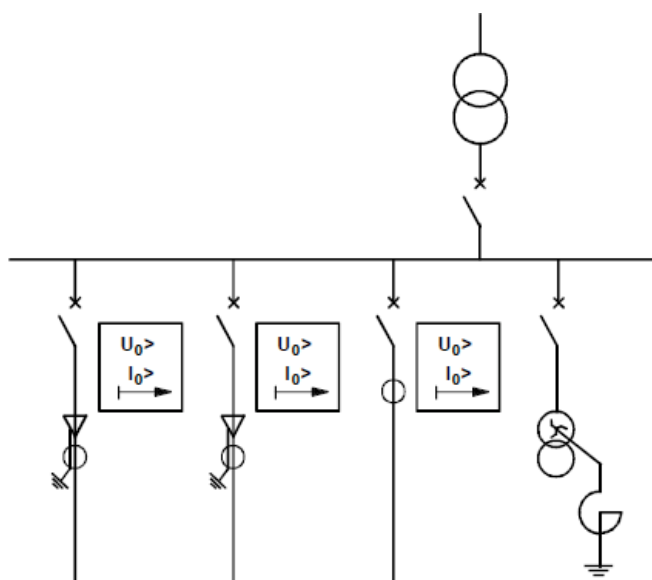
(ABB:n TTT-käsikirja 2000–07,2015)

5.3 Keskitetty kompensointi

Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointikelaa ohjaa maasulkuvirran kompensoinnin säätäjä, mikä muuttaa kelan induktanssia eli maasulkuvirran arvoa säätömoottorin avulla. Säätötoimenpide tehdään vain silloin kun verkko on terveessä tilassa. Kelan yhteydessä, usein omassa koteloinnissaan on tehokäämin rinnalle kytkettävä rinnakkaisvastus, jonka avulla muutetaan vikapaikan päätövirtakomponenttia. Tällöin valokaari saadaan sammutettua muuttamalla valokaaren virtaa ja jännitettä. Lisävastuksella (Kuva 10a) saadaan myöskin kasvatettua suojaireiden toiminnan varmistamiseksi välttämätöntä päätövirtaa. (Multirel www-sivut, 2016)



Kuva 10a. Tehokäämin rinnalle kytketty tehovastus R_L

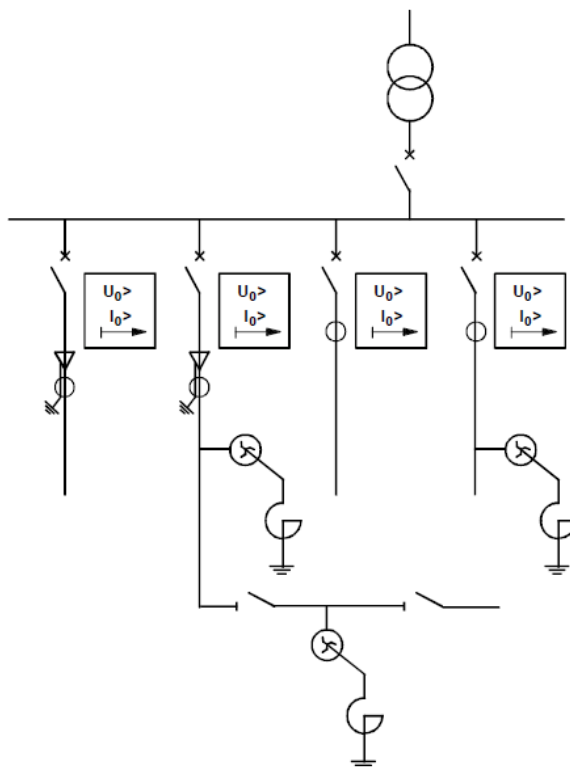


Kuva 10b. Keskitetyn kompensoinnin periaatekuva

5.4 Hajautettu kompensointi

Maasulkuvirran kompensoinnin yksi toteutustapa on *hajautettuna kompensointi*, jolloin jakelumuuntajana käytetään ns. kelamuuntajaa, missä kompensointikelan yleisin säätöalue on 5-15A. Tällaisen kompensointiratkaisun pääasiallisia käyttökohteita ovat lähinnä pitkät johtolähdöt tai haja-asutusalueet. (Multirel www-sivut, 2016)

Johdon varrella sijaitseva kuristin mitoitetaan johdon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaan. Yleensä hajautetussa kompensoinnissa vain osa verkon maasulkuvirrasta kompensoidaan sillä tavalla, että yksittäisiä johtoja ei missään tapauksessa tule ylikompensoitua. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07,2015)



Kuva 11. Hajautetun kompensoinnin periaatekuva

6 MAASULUN KOMPENSOINTI VSV:N VERKOSSA

6.1 Lapin sähköasema

Lapin sähköasema sijaitsee koillisella puolella Vakka-Suomen Voiman operatiivista verkkoa (Liite 2). Kyseisessä kuvassa keskijänniteverkon alueet on eroteltu eri väreillä johtolähdöittäin selkeyden vuoksi. Lapin sähköaseman sijainti (Liite 3) on myös merkitty kuvaan. Asema itsessään on täysin uusi. Asema on yhteistyössä VEO Oy:n ja Vakka-Suomen Voima Oy:n kanssa rakennettu ja käyttöön otettu vanhan Lapin aseman tilalle.

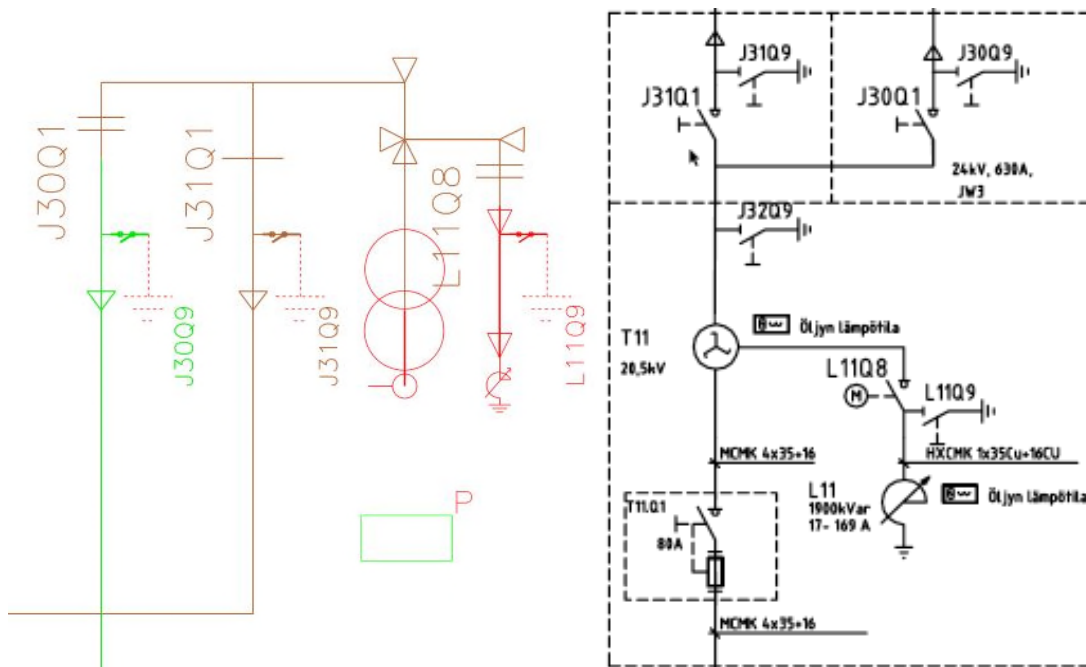
Vuoden 2016 ajan Lapin ja Hinnerjoen välinen kaapelointi tulee olemaan osittainen. Sähköasemat sijaitsevat (Liite 6) noin 15 km päässä toisistaan ja kaapelointia on toteutettu Lapin asemalta noin 1 km Hinnerjoen aseman suuntaan AHXAMK-W 3x185 maakaapelilla. Tästä eteenpäin verkko on vielä alumiinista avojohtoa noin 14 km. (Kuva 12), mikä on tarkoitus vaihtaa maakaapeliksi seuraavan vuoden sisällä. Jatkossa tulen simuloimaan maasulkua kyseisten asemien välillä ja vertaan tuloksia 2015 syksyllä tehtyyn maasulkukoeraporttiin (Liite 7).

JOHTOPITUUDET	Avo	Riippu	Maa	Vesi	PAS	Muu	Eimäär	Summa
LÄHTÖ: HINNERJOEN KA	13020	0	1000	0	0	0	0	14020
LÄHTÖ: KODIKSAMI	19126	0	34	0	16	0	0	19176
LÄHTÖ: KODISJOKI	12392	0	78	0	0	0	17	12487
LÄHTÖ: KOLLA EA	16095	0	73	0	0	0	30	16198
LÄHTÖ: KONDENSAATTOR	0	0	30	0	0	0	0	30
LÄHTÖ: LAITILA	10400	0	65	0	0	0	62	10527
LÄHTÖ: LAPINKYLÄ	10018	0	6918	0	3	0	11	16950
LÄHTÖ: NARVIJÄRVI	49952	0	1774	0	1025	0	0	52751
LÄHTÖ: RAUTAVUORI	1136	0	35	0	0	0	0	1171
LÄHTÖ: SAARI	3076	0	495	0	5	0	0	3576
LÄHTÖ: TEILINUMMI	4911	271	1225	0	717	0	0	7124
LÄHTÖ: TEOLLISUUS	1566	0	700	0	0	0	0	2266
LÄHTÖ: TURAJÄRVI	30545	0	35	0	0	0	0	30580
LÄHTÖ: AUVAINEN	6616	329	1844	0	228	0	0	9017
LÄHTÖ: KARINKULMA	17500	0	35	0	355	0	0	17890
LÄHTÖ: KIRKONKYLÄ	4930	0	1209	0	0	0	0	6139
LÄHTÖ: KIVIJÄRVI EA	29099	0	389	0	361	0	27	29876
LÄHTÖ: KODIKSAMI	13956	0	338	0	398	0	0	14692
KOKO VERKKO:	244338	600	16282	5	3108	0	147	264480

Kuva 12. Johtopituudet Lapin sähköaseman lähdöistä, joista Hinnerjoen KA korostettu.

6.2 Sähköaseman laitteisto

Lähtöjä kaiken kaikkiaan asemassa on 12 kappaletta ja yksi lähtö varalla (Liite 4 ja 5) tarkasteltuna. Molemmille pääkiskoille on oma sammutuksensa, vaunukatkaisija A14J20Q1 kuormaerottimelle J31Q01 ja katkaisija A112J17Q1 kuormaerottimelle J30Q01 (Kuvat 13a ja 13b), joista jälkimmäinen on Hinnerjoki KA lähdön puolella.



Kuvat 13a ja 13b. SF6-kojeiston osat ovat: kuormaerottimet J30Q1 ja J31Q1, maadoituserottimen elektrodit J30Q9, J31Q9 ja L11Q9, kuormaerotinmuuntamo L11Q8 ja sammutuskela L11 edellä mainitun takana.

6.3 Laskenta

Kuten syksyllä 2015 tehdyn maasulkukoeraportin (Liite 7) mukaan, simuloitiin maasulkutilanteen samoilla parametreilla. Laskentajännitteenä 20,5 kV, vikaresistanssiarvoina 0Ω ja 500Ω sekä maadoitusten mitoitusvirta 50A (Kuvat 14a ja 14b). Maasulkulaskenta simuloitiin sammutetun verkon järjestelmällä (Kuva 16).

Kuva 14a.

Kuva 14b.

Releasettelu, A14J13A2, 268 - ELEKTR. VAIHEKULMASUUNTARELE

Vapaat attribuutit	Vapaat attribuutit -lista	Liitteet	Huomautus	Kunnossapitotiedot	Mittauseri
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Aikalaukaisu	Pikalaukaisu	Jälleenkytkennät	Sijainti

Aikalaukaisuasetus: Io> -as., primääri (A) 1.500

Toimintahidastus

Ennen jälleenkytkentöjä	Vakioaika (s)	0.900
PJK:n jälkeen	Vakioaika (s)	0.900
AJK:n jälkeen	Vakioaika (s)	0.900

OK Hyväksy Peruuta Ohje

Kuva 15. Lähdön Hinnerjoki KA:n vaihekulmasuuntareleen asetellut.

Sähköaseman päämuuntaja, A14PM1, 122 - PÄÄMUUNTAJA SA

Vapaat attribuutit -lista +	Liitteet	Huomautus +	Kunnossapitotiedot +	Mittauseri
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Impedanssit	Sijainti	Vapaat attribuutit

Minimioikosulkuresistanssi (%)	0.530	Minimioikosulkuimpedanssi (%)	10.800
Keskioikosulkuresistanssi (%)	0.550	Keskioikosulkuimpedanssi (%)	10.300
Maksimioikosulkuresistanssi (%)	0.570	Maksimioikosulkuimpedanssi (%)	9.400
Nollaresistanssi (ohm)	0.000	Nollareaktanssi (ohm)	0.000
Kuormitushäviöt (kW)	0.000		

Ension tähtipiste		Toision tähtipiste	
Maadoitustapa	Maasta erotettu	Maadoitustapa	Maadoitettu
Resistanssi (ohm)	0.000	Sammutus	Automaattinen
Reaktanssi (ohm)	0.000	Resistanssi (ohm)	1401.000
		Reaktanssi (ohm)	176.000

Syöttävä alueverkko			
Resistanssi (ohm)	0.200	Nollaresistanssi (ohm)	0.000
Reaktanssi (ohm)	3.000	Nollareaktanssi (ohm)	0.000

OK Hyväksy Peruuta Ohje

Kuva 16. Lapin sähköaseman päämuuntajan asetukset sammutetussa verkossa.

Sammutuskelan resistanssi 1401Ω ja sammutuskuristimen reaktanssi 176Ω .

Ensimmäisen laskennan tulokset (Kuva 17). Tässä tapauksessa maakaapeloitu osuus on noin kilometri Lapin sähköasemalta Hinnerjoelle päin, jossa 'vika muualla' ja 'oma vika' kohdissa on ilmaistu maasulkuvirrat 0Ω ja 500Ω vikaresistansseilla.

K J - M A A S U L K U L A S K E N T Ä (VIIMEISIMMÄN LASKENNAN TULOKSET)

S Ä H K Ö A S E M A: A14 LAPPI
M U N T A J A: A14PM1

Mitoitusjännite (kV): 21.0
Tähtipistekuristimen induktiivinen virta (A): 67.25
Tähtipistekuristimen induktanssi (mH): 560.23
Tähtipistekuristimen reaktanssi (ohm): 176.00
Tähtipistekuristimen resistanssi (ohm): 1401.00
Optimaalinen sammutuskuristimen induktanssi (mH): 610.05 (191.65 ohm)
Laskentaajännite (kV): 20.5
Pienin tähtipisteajännite (kV): 8.6 (73 %)
Maasulkuvirta 1 (A): 10.1 (0 ohm)
Maasulkuvirta 2 (A): 7.3 (500 ohm)
Maasulkuvirta resistanssien laskennassa (A): 50.0

M Ä Ä S U L U N S U O J A U S Ä L U E T (VIIMEISIMMÄN LASKENNAN TULOKSET)

Katkaisijan tunnus	Lähdön tunnus	Vika muualla		Oma vika		Asetteluarvot		Uo/ Ir/ Po/		Sallittu resistanssi						
		1 (A)	2 (A)	1 (A)	2 (A)	Uas (kV)	Ic> (A)	Pas (kW)	to (s)	Uas (%)	Ic> (%)	Pas (%)	A (ohm)	B (ohm)	D 2UTP 4UI (ohm)	
B16J02Q0	AUVAINEN	B16 HINNERJO	5.6	4.1	14.0	10.1	1.2	2.5	0.3	745	406	27	73	18	16	32
A14J13Q0	HINNERJOEN K	A14 LAPPI	18.7	13.6	25.6	18.6	2.0	1.5	0.9	426	1240	15	41	10	5	10
B16J08Q0	KARINKULMA	B16 HINNERJO	1.3	1.0	10.8	7.9	1.2	2.5	0.3	745	315	27	73	18	16	32
B16J08Q0	KIRKONKYLÄ	B16 HINNERJO	3.2	2.3	12.1	8.8	1.2	2.5	0.3	745	351	27	73	18	16	32
B16J01Q0	KIVIJÄRVI EA	B16 HINNERJO	3.0	2.2	12.0	8.7	1.2	2.5	0.5	745	348	27	73	18	16	32
B16J09Q0	KODIKSAMMI	B16 HINNERJO	1.8	1.3	11.1	8.1	1.2	2.5	0.3	745	324	27	73	18	16	32
A14J08Q0	KODIKSAMMI	A14 LAPPI	1.4	1.0	10.9	7.9	2.0	1.5	0.9	426	527	15	41	10	5	10
A14J04Q0	KODISJOKI	A14 LAPPI	1.1	0.8	10.7	7.8	2.0	1.5	0.9	426	518	15	41	10	5	10
A14J15Q0	KOLLA EA	A14 LAPPI	1.3	0.9	10.8	7.9	2.0	1.5	0.9	426	525	15	41	10	5	10
A14J18Q0	KONDENSATTO	A14 LAPPI	0.1	0.1	10.1	7.4	2.0	1.5	0.9	426	490	15	41	10	5	10
A14J06Q0	LAITILA	A14 LAPPI	0.9	0.7	10.6	7.7	2.0	1.5	0.9	426	513	15	41	10	5	10
A14J05Q0	LAPINKYLÄ	A14 LAPPI	19.4	14.1	26.3	19.1	2.0	1.5	0.9	426	1274	15	41	10	5	10
B16J10Q0	LAPPI SA	B16 HINNERJO	14.9	10.8	22.0	16.0	1.2	2.5	0.3	745	641	27	73	18	16	32
A14J10Q0	NARVIJÄRVI	A14 LAPPI	8.1	5.9	16.0	11.6	2.0	1.5	0.9	426	775	15	41	10	5	10
A14J11Q0	RAUTAVUORI	A14 LAPPI	0.2	0.1	10.2	7.4	2.0	1.5	0.3	426	493	26	68	17	14	29
A14J14Q0	SAARI	A14 LAPPI	1.7	1.2	11.1	8.1	2.0	1.5	0.9	426	538	15	41	10	5	10
A14J07Q0	TEILINUMMI	A14 LAPPI	4.6	3.3	13.2	9.6	2.0	1.5	0.9	426	637	15	41	10	5	10
A14J09Q0	TEOLLISUUS	A14 LAPPI	2.2	1.6	11.4	8.3	2.0	1.5	0.9	426	552	15	41	10	5	10
A14J12Q0	TUPAJÄRVI	A14 LAPPI	2.1	1.6	11.4	8.3	2.0	1.5	0.9	426	552	15	41	10	5	10
A14J16Q0	VARA	A14 LAPPI	0.0	0.0	10.1	7.3	2.0	1.5	0.9	426	488	15	41	10	5	10

Kuva 17. Osittain maakaapeloituidun lähdön maasulkulaskenta.

Edellisen laskennan jälkeen 13 kilometrin pituinen avojohto muutettiin näennäisessä verkossa samaksi maakaapeliksi kuin lähdössäkin, jonka jälkeen suoritettiin laskenta (Kuva 18) samoilla parametreilla kuin aikaisemmin. Nyt laskettava kokonaispituus on noin 14,5 kilometriä.

K J - M A A S U L K U L A S K E N T A (VIIMEISIMÄN LASKENNAN TULOKSET)																
S Ä H K Ö A S E M A: A14 LAPPI																
M U N T A J A: A14PM1																
Mitoitusjännite (kV): 21.0																
Tähtipistekuristimen induktiivinen virta (A): 105.37																
Tähtipistekuristimen induktanssi (mH): 357.56																
Tähtipistekuristimen reaktanssi (ohm): 112.33																
Tähtipistekuristimen resistanssi (ohm): 1401.00																
Optimaalinen sammutuskuristimen induktanssi (mH): 376.41 (118.25 ohm)																
Laskenta-jännite (kV): 20.5																
Pienin tähtipistejännite (kV): 8.6 (73 %)																
Maasulkuvirta 1 (A): 10.0 (0 ohm)																
Maasulkuvirta 2 (A): 7.2 (500 ohm)																
Maasulkuvirta resistanssien laskennassa (A): 50.0																
M A A S U L U N S U O J A U S Ä L U E E T (VIIMEISIMÄN LASKENNAN TULOKSET)																
Katkaisijan tunnus	Lähdön tunnus	Sähköaseman tunnus	Vika muualla		Oma vika		Asetteluarvot		Uo/ Ir/ Po/ Uas Io> Pas to Pas to Pas to		Sallittu resistanssi					
			1 (A)	2 (A)	1 (A)	2 (A)	Uas (kV)	Io> (kA)	Uas (%)	Io> (%)	Pas (ohm)	A B D	Pas (ohm)	A B D		
B16J02Q0	AUVAINEN	B16 HINNERJO	5.6	4.1	13.8	10.0	1.2	2.5	0.3	745	401	27	73	18	16	32
A14J13Q0	HINNERJOEN K	A14 LAPPI	57.0	41.5	62.9	45.7	2.0	1.5	0.9	426	3047	15	41	10	5	10
B16J03Q0	KARINKULMA	B16 HINNERJO	1.3	1.0	10.7	7.8	1.2	2.5	0.3	745	312	27	73	18	16	32
B16J08Q0	KIRKONKYLÄ	B16 HINNERJO	3.2	2.3	11.9	8.7	1.2	2.5	0.3	745	347	27	73	18	16	32
B16J01Q0	KIVIJÄRVI EA	B16 HINNERJO	3.0	2.2	11.8	8.6	1.2	2.5	0.5	745	344	27	73	18	16	32
B16J09Q0	KODIKSAMI	B16 HINNERJO	1.8	1.3	11.0	8.0	1.2	2.5	0.3	745	320	27	73	18	16	32
A14J08Q0	KODIKSAMI	A14 LAPPI	1.4	1.0	10.8	7.8	2.0	1.5	0.9	426	522	15	41	10	5	10
A14J04Q0	KODISJOKI	A14 LAPPI	1.1	0.8	10.6	7.7	2.0	1.5	0.9	426	512	15	41	10	5	10
A14J15Q0	KOLLA EA	A14 LAPPI	1.3	0.9	10.7	7.8	2.0	1.5	0.9	426	519	15	41	10	5	10
A14J18Q0	KONDENSRAITO	A14 LAPPI	0.1	0.1	10.0	7.3	2.0	1.5	0.9	426	485	15	41	10	5	10
A14J06Q0	LAITILA	A14 LAPPI	0.9	0.7	10.5	7.6	2.0	1.5	0.9	426	507	15	41	10	5	10
A14J05Q0	LAPINKYLÄ	A14 LAPPI	19.4	14.1	26.1	19.0	2.0	1.5	0.9	426	1266	15	41	10	5	10
B16J10Q0	LAPPI SA	B16 HINNERJO	14.9	10.8	21.9	15.9	1.2	2.5	0.3	745	636	27	73	18	16	32
A14J10Q0	NARVIJÄRVI	A14 LAPPI	8.1	5.9	15.8	11.5	2.0	1.5	0.9	426	767	15	41	10	5	10
A14J11Q0	RAUTAVUORI	A14 LAPPI	0.2	0.1	10.1	7.3	2.0	1.5	0.3	426	488	26	68	17	14	29
A14J14Q0	SRAPI	A14 LAPPI	1.7	1.2	11.0	8.0	2.0	1.5	0.9	426	532	15	41	10	5	10
A14J07Q0	TEILINUMMI	A14 LAPPI	4.6	3.3	13.0	9.4	2.0	1.5	0.9	426	630	15	41	10	5	10
A14J09Q0	TEOLLISUUS	A14 LAPPI	2.2	1.6	11.3	8.2	2.0	1.5	0.9	426	546	15	41	10	5	10
A14J12Q0	TURAJÄRVI	A14 LAPPI	2.1	1.6	11.2	8.2	2.0	1.5	0.9	426	545	15	41	10	5	10
A14J16Q0	VARA	A14 LAPPI	0.0	0.0	10.0	7.2	2.0	1.5	0.9	426	483	15	41	10	5	10

Kuva 18. Laskentatulokset asemien välimatka kokonaan kaapeloituna.

6.4 Tulokset

Pystyriiveillä 'Vika muualla' ja 'Oma vika' kuvastavat maasulun arvoja 0Ω ja 500Ω vikaresistanssilla simuloituja maasulkuvirran arvoja. 'Vika muualla' termillä tarkoitetaan tilannetta kun jossain muussa syöttävässä lähdössä on maasulkutilanne. Tällöin nähdään kuinka paljon kyseinen lähtö kuormittaa vikapaikkaa. Kun taas 'oma vika' näyttää arvon kyseisessä lähdössä ja kuinka paljon muut lähdöt syöttävät tuolloin kyseistä lähtöä.

Tästä saadaan summavirta maasulkuvirralla Lapin sähköasemalle:

Verrattuna avojohdollista ja kokonaan maakaapeloitua osuutta keskenään on osassa arvoissa huomattavia eroja. Maakaapelointi myös nostaa maasulkuvirtojen arvoja huomattavasti. Laskentoja keskenään vertailtaessa arvot maasulkuvirralla nousivat Hinnerjoki KA lähdössä 0Ω vastuksella 25,6 A:sta 62,9 ampeeriin ja 500Ω 18,6 A:sta 45,7 ampeeriin omassa lähdössä. Sekä 0Ω vastuksella 18,7 A:sta 57 ampeeriin ja 500Ω vastuksella 13,6 A:sta 41,5 ampeeriin kun vika on jossain muussa lähdössä. Laskennoissa käytettiin todenmukaista sammutuskuristimen arvoa 1401Ω

Laskennat jotka edellä on suoritettu, ovat koneen laskemia arvioita. Todellisuudessa kun kaapelointi tullaan toteuttamaan kyseiselle matkalle, arvot muuttuvat mm. maaston muodon tai vesistöjen vuoksi. Tällöin johtopituuden myötä maasulkuvirtojen arvot kasvavat.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyöni tavoitteena oli selvittää perusteellisesti maasulkua, sen aiheuttamia ongelmia verkossa ja sen pois kitkemistä. Aihe itsessään oli minulle suhteellisen vieras, mutta tämän takia motivaationi työtä kohtaan oli suhteellisen hyvä kokoajan tiedonhalukkuuteni vuoksi. Tein työni maallikon näkökulmasta sekä sähköalan ammattilaisen näkökulmasta, jotta työ olisi informatiivinen ja lukija pystyisi ymmärtämään työn lopussa esitellyn maasulkulaskennan, liitteenä olevan maasulkukoeraportin ja sen kompensoinnin tarkoituksen.

Työtä kirjoittaessani käytin kirjallisuutta, mistä löytyi muuttumatonta tietoa mm. laskentakaavoja ja lakeja. Internetin avulla sain päivitettyä tietoa mm. standardeista, kompensointilaitteistoista ja maadoitusmenetelmistä, mitkä muuttuvat aina ajan saatossa.

Teoria osuus koostui hyvin paljon maasulun aiheuttamista vioista ja sen vaikutuksista sähköjakeluverkkoon. Tämä auttoi ymmärtämään mikä on kompensoinnin tarkoitus, miltä se suojaa ja miten se käytännössä tapahtuu. Työn lopussa esitelty ja simuloitu maasulkulaskenta onnistui mielestäni suhteellisen todenmukaisesti, vaikka arvot saattavat muuttua silloin kun Lapin ja Hinnerjoen välinen matka on kaapeloitu kokonaan.

Syvällisen teorian pohjalta kykenin kirjoittamaan ja ymmärtämään kompensoinnin vaiheet ja tarkoituksen hyvin. Työ itsessään oli hyvin ajankohtainen, koska nykypäivänä avojohtoverkoston korvataan maakaapeloinnilla todella paljon. Tästä seuraa se, että kompensointilaitteistoja täytyy alkaa uusimaan sähköasemiin ja muuntamoihin, koska muuten vanhat sammutuskelat ja kuristimet jäävät alimitoitetuiksi. Yhteistyö Vakka-Suomen Voima Oy:n kanssa oli sujuvaa ja sain kaiken tarvittavan tiedon ja avustuksen mitä tarvitsin työtä kirjoittaessani. Minulla oli yrityksen kautta käytössä näennäisen verkoston verkkotietojärjestelmä, mistä sain ajan tasalla olevat tiedostot ja informaation mm. Lapin uuden sähköaseman maasulkukoeraportin sekä pääkaaviokuvat.

LÄHTEET

ABB Oy. TTT Teknisiä taulukoita ja tietoja. Helsinki: ABB Oy 2000

Aura, L. & Tonteri, A.J., Sähkölaitostekniikka, WSOY 1993

Elovaara & Haarla. 2011. Sähköverkot I. Tallinna: Raamatutrükikoda 2011.

Elovaara & Haarla. 2011. Sähköverkot II. Tallinna: Raamatutrükikoda 2011.

Energia www-sivut. Viitattu 24.2.16. www.energia.fi

Enertel Oy:n www-sivut. Viitattu 1.11.15. www.enertel.fi

Lappeenranta University of Technology www-sivut. Viitattu 15.5.2016. www.lut.fi
<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/.../maasulkusuojaus.pdf>

Leena Korpinen www-sivut. Viitattu 24.2.16. www.leenakorpinen.fi
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf>

Lehtonen & Hakola. Neutral Earthing and Power System. Vaasa: Fram Oy 1996

Maviko www-sivut. Viitattu 15.5.16. www.maviko.fi

Multirel Oy www-sivut. Viitattu 15.5.16. www.multirel.fi.
<http://www.multirel.fi/tuotteet/kompensointilaitteet/toimintaperiaate>

Mörsky, J. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Karisto Oy 1992

Oulun ammattikorkeakoulun www-sivut. Viitattu 3.5.2016 www.oamk.fi
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf

Pylväs, K. Kaapeliverkon maasulkuvirran kompensointi. AMK-opinnäytetyö. Centria ammattikorkeakoulu. Viitattu 18.11.15

Satakunnan ammattikorkeakoulu www-sivut. Viitattu 16.5.2016.
salabra.tp.samk.fi

Tukes:n www-sivut. Viitattu 4.5.16. www.tukes.fi

Vakka-Suomen Voima Oy:n tietokanta. Viitattu 30.3.2016

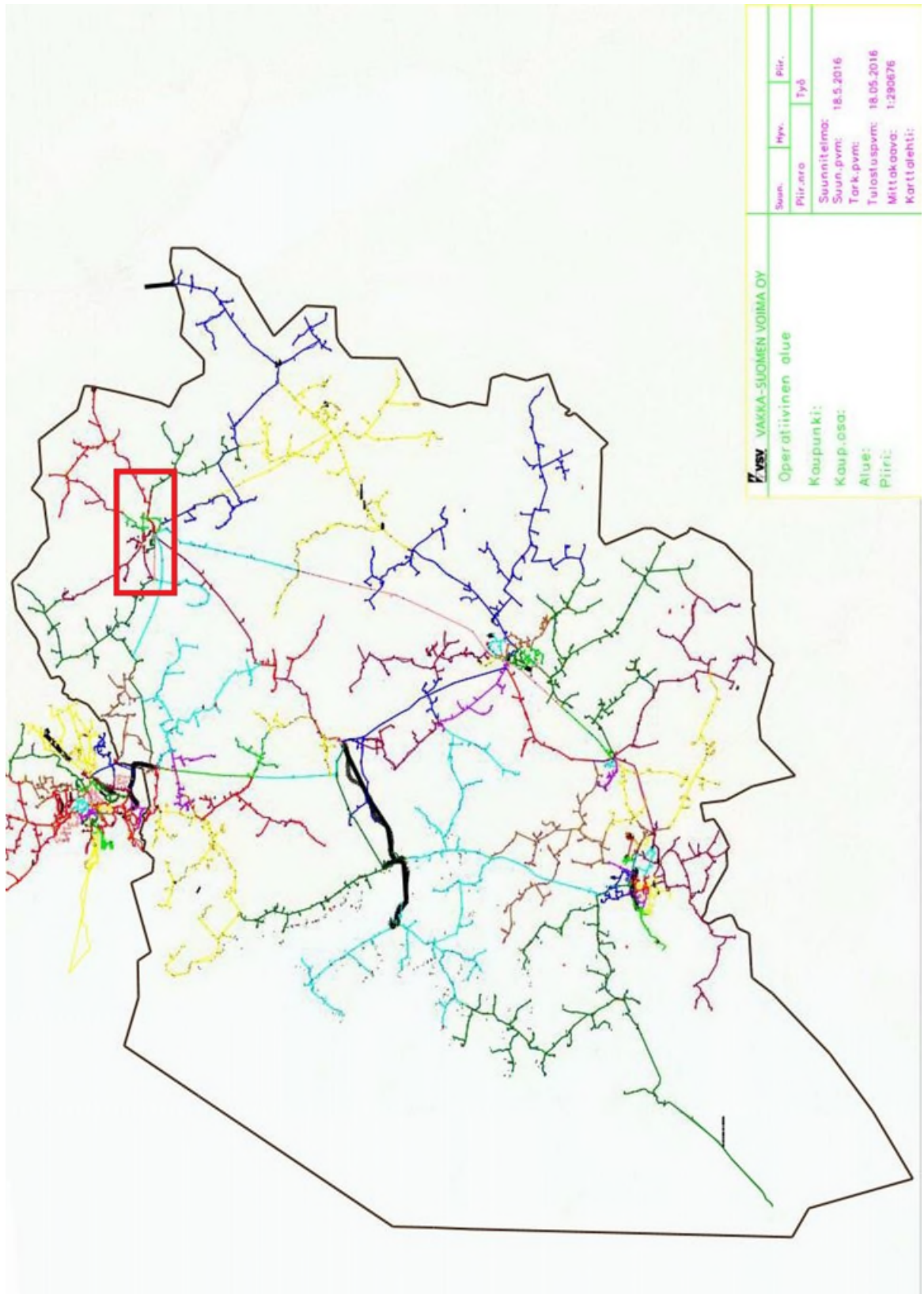
Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut. Viitattu 1.11.2015. www.vsv.fi

VERTEK Oy:n www -sivut. Viitattu 1.11.15. www.verttek.fi

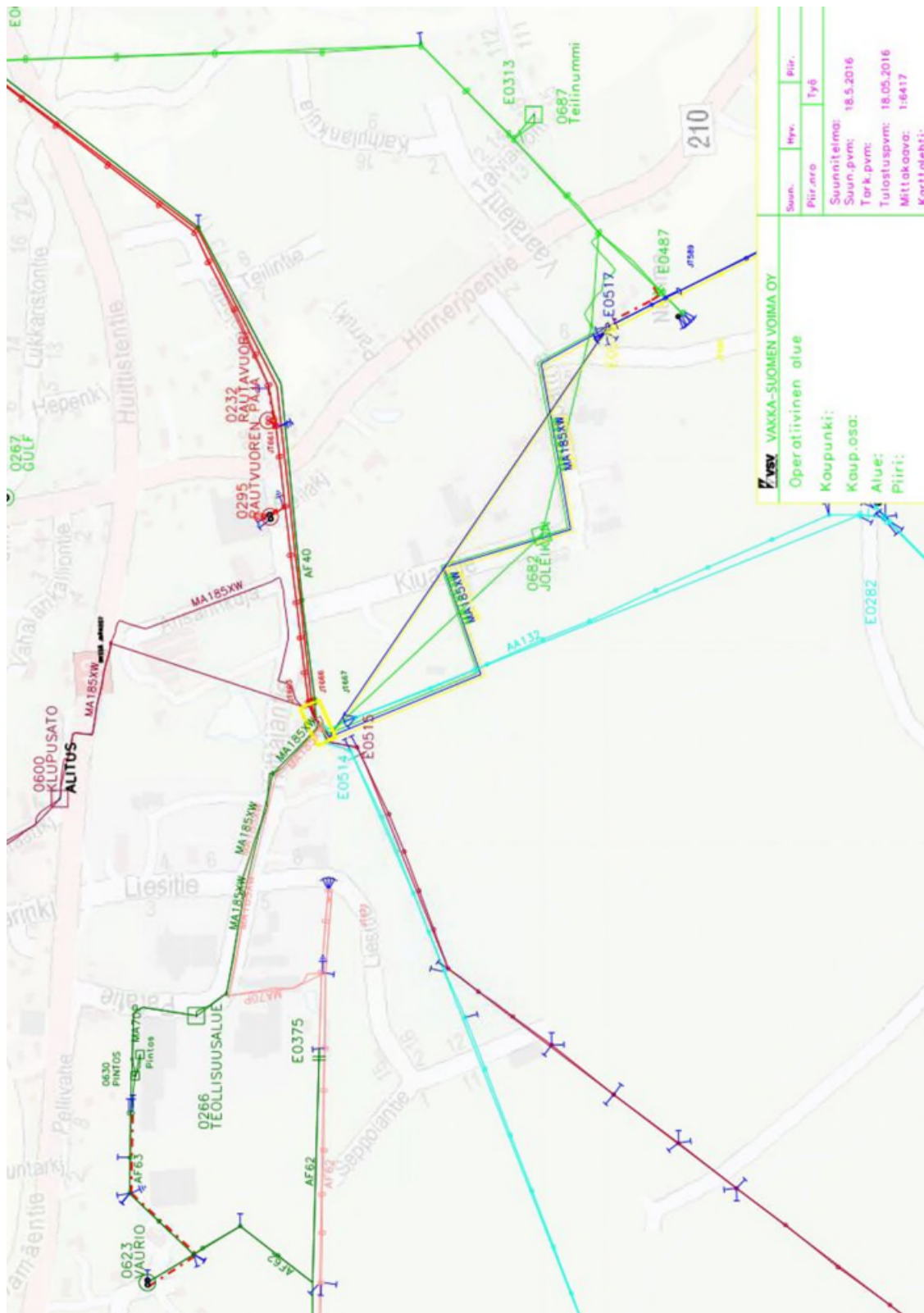
LIITE 1

Poikki- pinta	10 kV voimakaapelit					15 kV voima- kaapelit	20 kV voimakaapelit				30 kV voima- kaapelit
	Paperi- eristeiset PLKVJ APAKM APLKPJJ	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WTC AHXCMK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K		XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K	Paperi- Eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXAMK- WP AHXCMK- WTC AHXCMK HXCMK	
3x25	0,6	1,3	1,0	-	-	-	2,1	1,6	1,5	-	-
3x35	0,8	1,4	1,1	-	-	-	2,3	1,7	-	-	-
3x50	0,9	1,7	1,3	-	1,3	1,6	2,5	1,9	-	1,7	2,1
3x70	1,0	1,9	1,4	-	1,4	1,7	2,8	2,0	2,0	2,0	2,4
3x95	1,1	2,3	1,6	-	1,6	2,0	3,2	2,2	2,3	2,3	2,6
3x120	1,2	2,5	1,7	1,8	1,8	2,2	3,5	2,3	2,4	2,5	2,8
3x150	1,3	2,7	1,8	-	2,0	2,4	3,7	2,5	2,6	2,7	3,1
3x185	1,4	3,0	1,9	2,1	2,2	2,5	4,0	2,6	2,8	2,9	3,3
3x240	1,5	3,2	2,2	2,4	2,4	2,9	4,5	2,9	3,2	3,2	3,6
3x300	1,5	3,4	2,4	2,6	2,7	3,1	4,9	3,1	3,5	3,5	3,9
3x1x35	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
3x1x50	-	-	-	-	1,3	1,6	-	-	-	1,7	2,1
3x1x70	-	-	1,4	-	1,4	1,7	-	2,0	-	2,0	2,4
3x1x95	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	2,6
3x1x120	-	-	1,8	-	1,8	2,2	-	2,5	-	2,5	2,8
3x1x150	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	3,1
3x1x185	-	-	2,1	-	2,2	2,5	-	2,8	-	2,9	3,3
3x1x240	-	-	-	-	-	2,9	-	-	-	-	3,6
3x1x300	-	-	2,6	-	2,7	3,1	-	3,5	3,6	3,5	3,9
3x1x400	-	-	-	-	2,9	3,5	-	-	-	3,9	4,2
3x1x500	-	-	3,3	-	3,3	3,9	-	4,2	4,4	4,4	4,7
3x1x630	-	-	-	-	3,7	4,4	-	-	-	4,8	5,2
3x1x800	-	-	4,1	4,1	4,1	4,8	-	5,3	5,4	5,3	5,9
3x1x1000	-	-	-	-	4,6	5,3	-	-	-	6,0	6,5
3x1x1200	-	-	-	-	5,0	5,7	-	-	-	6,4	7,0

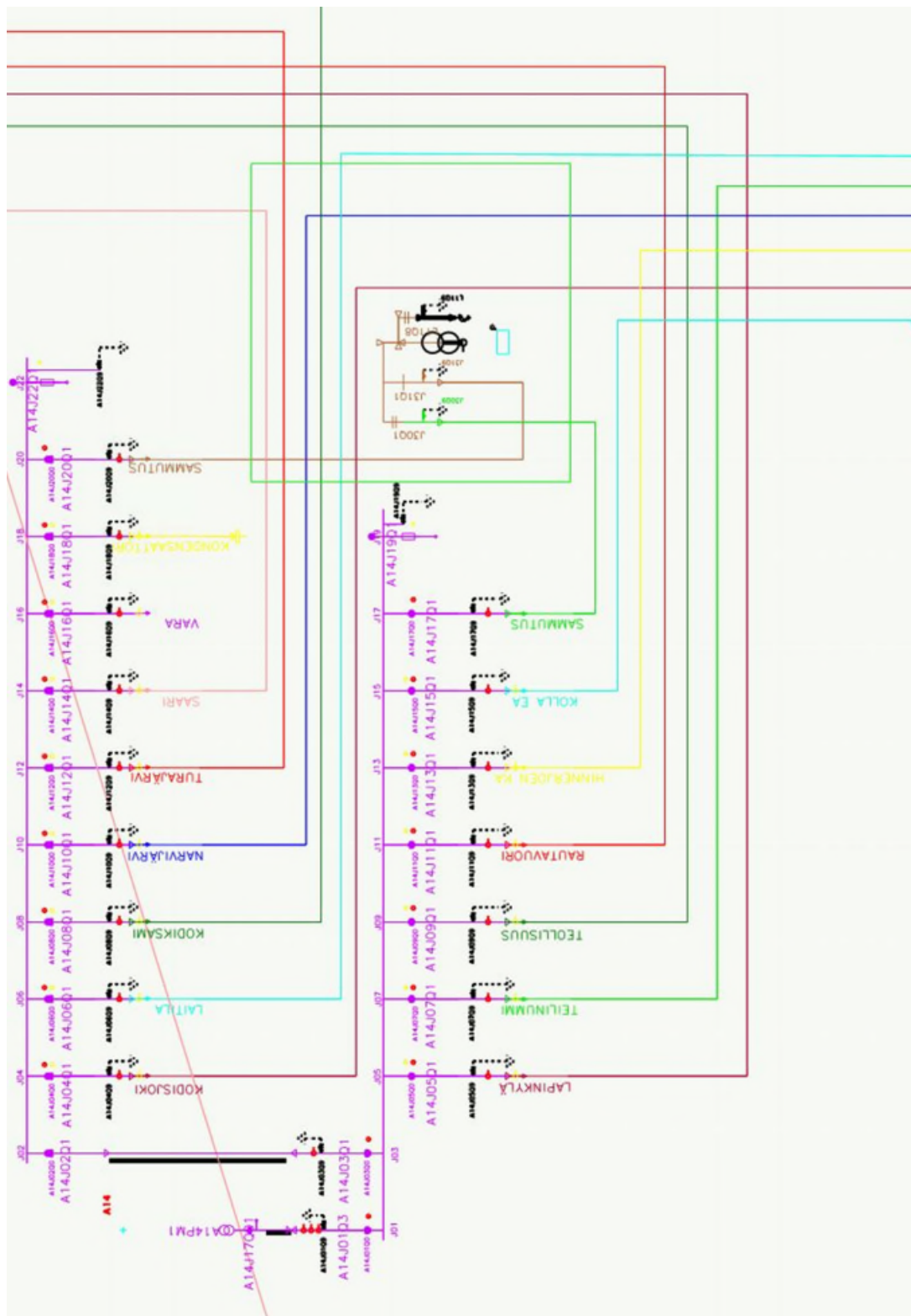
Erityyppisten 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja [A/km], 50 Hz



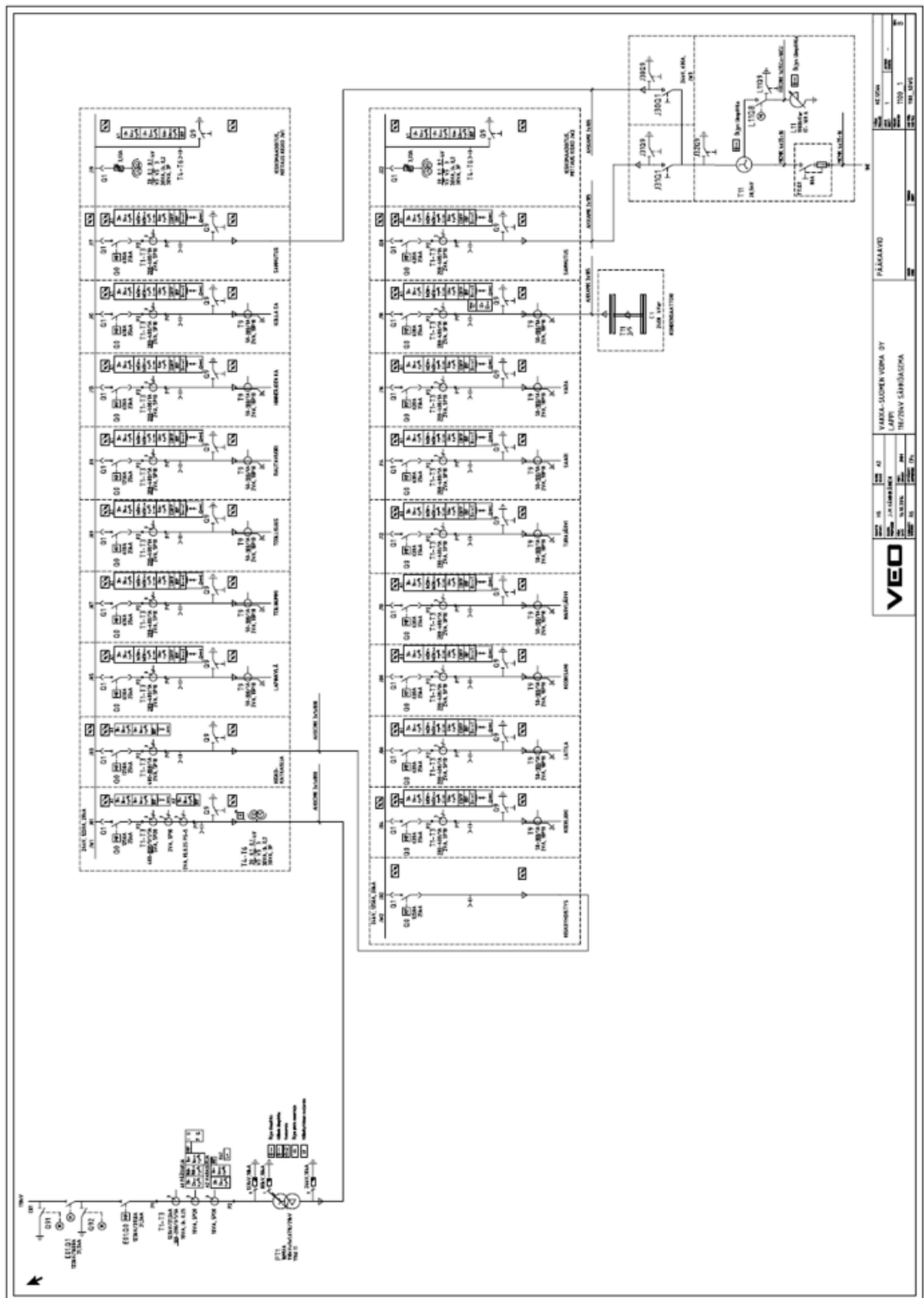
Vakka-Suomen Voiman operatiivinen alue. Lapin sähköaseman sijainti merkittynä koilliseen osaan kartassa.



Lapin sähköaseman sijainti Huittisentien ja Hinnerjoentien risteyksessä Lapissa.



Pääkaavio Lapin sähköasemasta, jossa SF6 kojeisto on merkattu kuvan oikeassa laidassa.



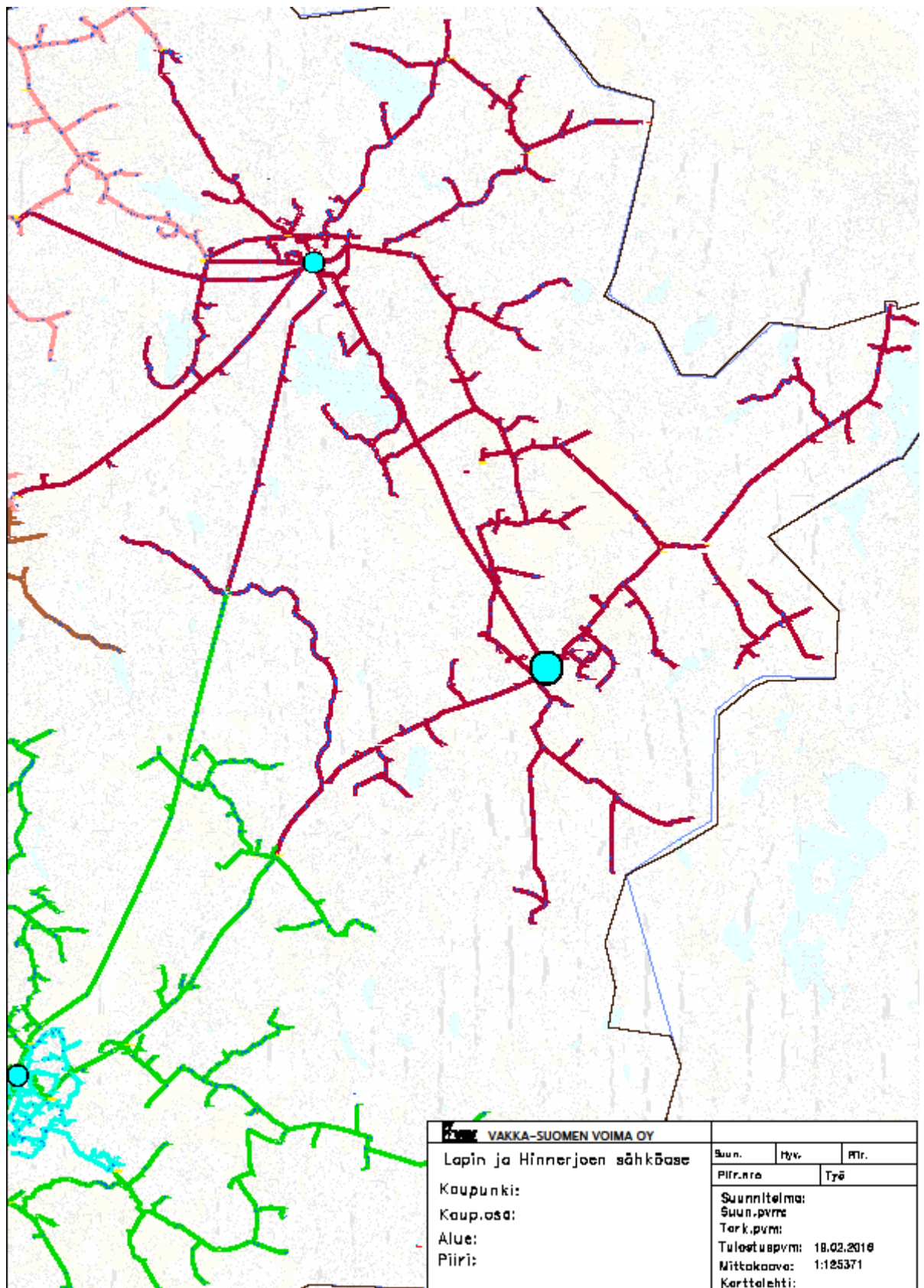
VED

VALKO-SUOMEN VEIKKAUS OY
INSTRUMENTTI- JA SÄHKÖALUEIDEN
TUOTOSSA

PÄÄKAAVIO

KIRJASTON N:o	1123	KÄSITTELYN N:o	1
LAATUNUT	1954	VOIMASTA	1954
PIK. N:o	1123	LAATUNUT	V. J.
LAATUNUT	V. J.	VOIMASTA	1954

Lapin sähköaseman pääkaavio



Kartan pohjoisella puolella Lapin sähköaseman sijainti ja keskellä Hinnerjoen sähköasema



Maasulkukoe raportti

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme: Lappin SA komp maasulkukokeet
Sivu: 1(9)

Asiakas: VEO Oy / Vakka-Suomen Voima Oy
Sähköasema: Lappin sähköasema

Ensin tutustuimme asemaan, suojarleiden asetteluihin/konfiguraatioon, kompensointi säätäjän asetteluihin, suojarleiden koestuspöytäkirjoihin ja Vakka-Suomen Voiman järjestelmien toiminta toiveisiin.

Niiden pohjalta mietittiin säätäjälle kohteeseen parhaat mahdolliset asetellut, sekä aseteltiin maasulkuvirran kompensointi säätäjä toimimaan niin että suojarleet toimivat vioissa suojarleasettelutaulukon mukaisesti.

1. Suora maasulku (vikavastus 0Ω), kompensoitu verkko

Lähtökentän J15 katkaisijan taakse tehtiin 1-vaiheinen suora maasulku, kytkemällä yksi vaihe maadoitusvälineillä suoraan maahan.

J15 kentän suojarleellä mitattiin todellinen vikavirta sekä virran ja jännitteen välinen suuntakulma. Sekä tarkasteltiin lisävastuksen todelliset kytkeytymiset. Vastusarvo on $2,5\Omega$.

1.1 Koe

Vikalähdön katkaisija suljettiin käyttökeskuksesta. Katkaisija laukesi oikein maasulusta ja kaikki "terveet" lähdöt pysyivät päällä. Kokonaislaukaisuaika oli noin 0,93s.

Häiriötallentimelta luettiin seuraavat tulokset:

Vastus irti kytkettynä

Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	0,02613 A	-125,9°	-0,01533 A → -1,53A
U0(ss) N	99,347 V	0,0°	99,347 V

Vastus kytkettynä

Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	0,09739 A	-178,5°	-0,09735 A → -9,74A
U0(ss) N	99,237 V	0,0°	99,237 V

Selvennykset:

Value	50Hz komponentti eli Itseisarvo
Phase	Peruskulma
Real	I _o :sta U _o :n kanssa samansuuntainen komponentti: cosφ

Maasulkukoe raportti

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme:
Lappin SA komp maasulkukokeet

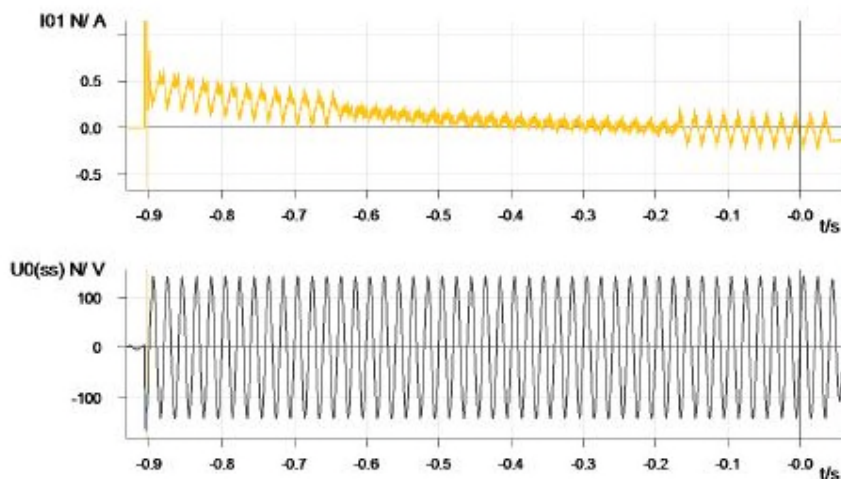
Sivu:
2(9)

Säätäjä aseteltiin niin että lisävastus kytkeytyy vian aikana hetkeksi pois päältä, tällä valokaaren itsesammumiseen auttava vaikutus.

Kuristimen lisävastuksen laskennallinen vaikutus vikavirtaan +20 asteen lämpötilassa ja suorassa maasulussa on 8,55A. Lisäksi huomioitava vastusvalmistajan ilmoittama toleranssi.

Maasulkukokeen tuloksista todettu vastuksen vaikutus vikavirtaan: 8,2A.

Eli mitattu tulos vastaa laskennallista kun otetaan vielä huomioon vastusvalmistajan antama vastuksen toleranssiarvo.

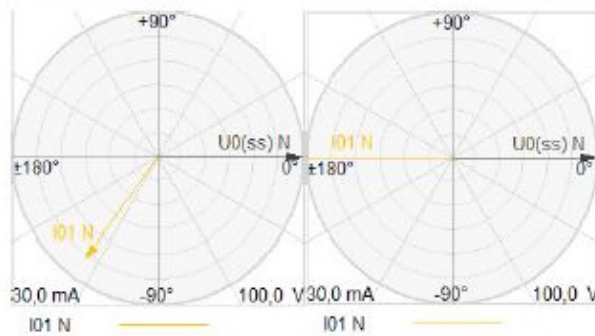


Kuva1, Maasulkukokeen 0Ω kompensoitu verkko I_0 ja U_0 .

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme: Lappin SA komp maasulkukokeet
Sivu: 3(9)



Kuva2, Maasulkukokeen I_0 ja U_0 välinen peruskulma. Vasemmalla lisävastus irti kytkettynä ja oikealla lisävastus päälle kytkettynä.

2. Maasulku vikavastuksella $2k\Omega$, kompensoitu verkko

Lähtökentän J15 katkaisijan taakse tehtiin 1-vaiheinen maasulku, kytkemällä yksi vaihe maadoitusvälineillä $2k\Omega$ vastuksen läpi maahan.

J15 kentän suojareleellä mitattiin todellinen vikavirta sekä virran ja jännitteen välinen suuntakulma.

2.1 Koe

Vikalähdön katkaisija suljettiin käyttökeskuksesta. Katkaisija laukesi oikein maasulusta ja kaikki "terveet" lähdöt pysyivät päällä.

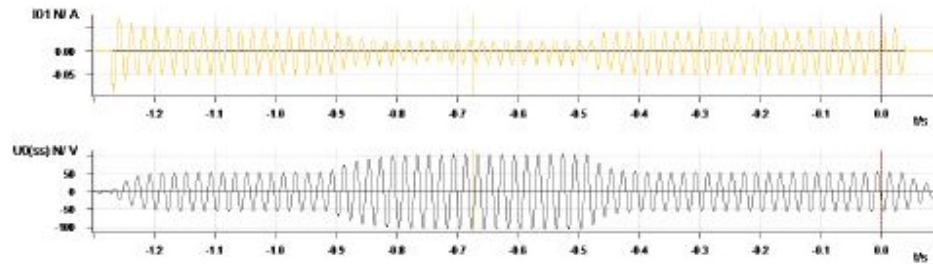
Häiriötallentimelta luettiin seuraavat tulokset:

Vastus irti kytkettynä

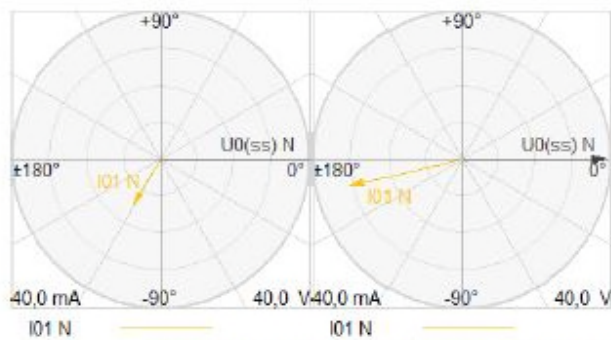
Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	14,238 mA	-121,0°	-7,3306 mA → -0,73A
U0(ss) N	74,928 V	0,0°	74,928 V

Vastus kytkettynä

Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	31,594 mA	-167,3°	-30,823 mA → -3,08A
U0(ss) N	39,053 V	0,0°	39,053 V



Kuva3, Maasulkukokeen $2k\Omega$ kompensoitu verkko I_0 ja U_0 .



Kuva4, Maasulkukokeen I_0 ja U_0 välinen peruskulma. Vasemmalla lisävastus irti kytkettynä ja oikealla lisävastus päälle kytkettynä.

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme:
Lappin SA komp maasulkukokeet

Sivu:
5(9)

3. Maasulku vikavastuksella 500Ω, kompensoitu verkko

Lähtökentän J15 katkaisijan taakse tehtiin 1-vaiheinen maasulku, kytkemällä yksi vaihe maadoitusvälineillä 500Ω vastuksen läpi maahan.

J15 kentän suojaareleella mitattiin todellinen vikavirta sekä virran ja jännitteen välinen suuntakulma.

3.1 Koe

Vikalähdön katkaisija suljettiin käyttökeskuksesta. Katkaisija laukesi oikein maasulusta ja kaikki "terveet" lähdöt pysyivät päällä.

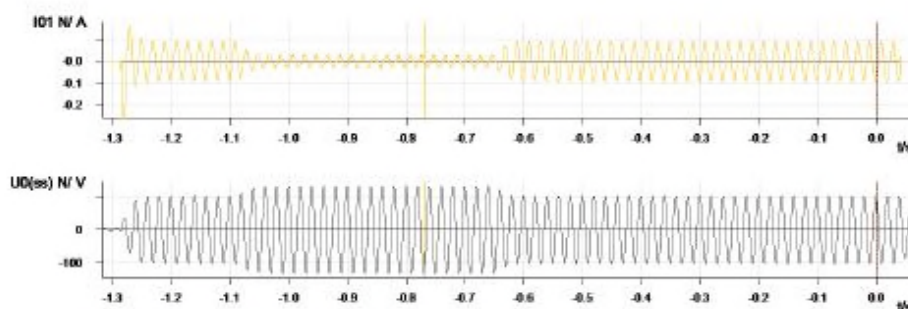
Häiriötallentimelta luettiin seuraavat tulokset:

Vastus irti kytkettynä

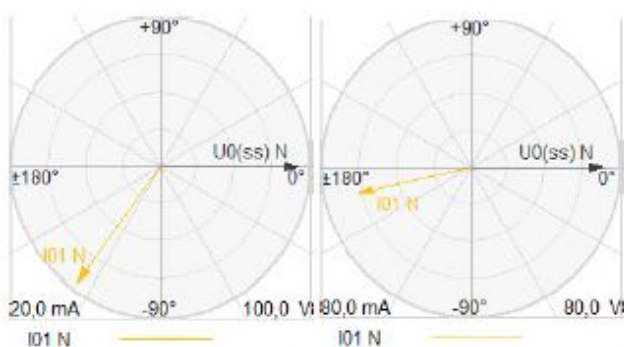
Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	19,112 mA	-126,1°	-11,271 mA → -1,13A
U0(ss) N	93,267 V	0,0°	93,267 V

Vastus kytkettynä

Measuring Signal	Value	Phase	Real
I01 N	62,417 mA	-167,2°	-60,855 mA → -6,09A
U0(ss) N	72,053 V	0,0°	72,053 V



Kuva5, Maasulkukokeen 500Ω kompensoitu verkko I_o ja U_o.



Kuva6, Maasulkukokeen I_{01} ja U_0 välinen peruskulma. Vasemmalla lisävastus irti kytkettynä ja oikealla lisävastus päälle kytkettynä.

4. Suora maasulku (vikavastus 0Ω), Maasta erotettu verkko

Lähtökentän J15 katkaisijan taakse tehtiin 1-vaiheinen maasulku, kytkemällä yksi vaihe maadoitusvälineillä suoraan maahan.

J15 kentän suojareleellä mitattiin todellinen vikavirta sekä virran ja jännitteen välinen suuntakulma.

4.1 Koe

Vikalähdön katkaisija suljettiin käyttökeskuksesta. Katkaisija laukesi oikein maasulusta ja kaikki "terveet" lähdöt pysyivät päällä. Kokonaislaukaisuaika kokeessa oli noin 0,73s.

Häiriötallentimelta luettiin seuraavat tulokset:

Arvot	Value	Phase	Real
Measuring Signal			
I01 N	0,6288 A → 62,9A	-89,2°	0,00882 A
U0(ss) N	100,50 V	-0,0°	100,50 V

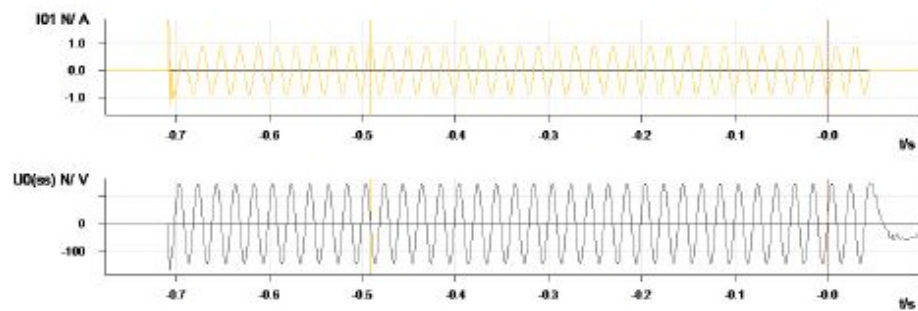
Maasulkukoe raportti

Päivämäärä:
18.9.2015

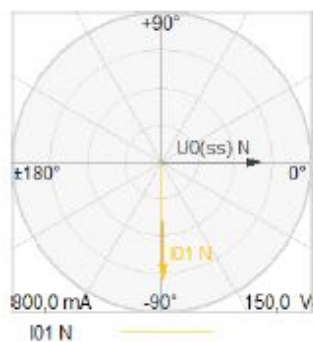
Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme:
Lappin SA komp maasulkukokeet

Sivu:
7(9)



Kuva7, Maasulkukokeen 0Ω maasta erotettu verkko I_o ja U_o .



Kuva8, Maasulkukokeen I_o ja U_o välinen peruskulma.

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

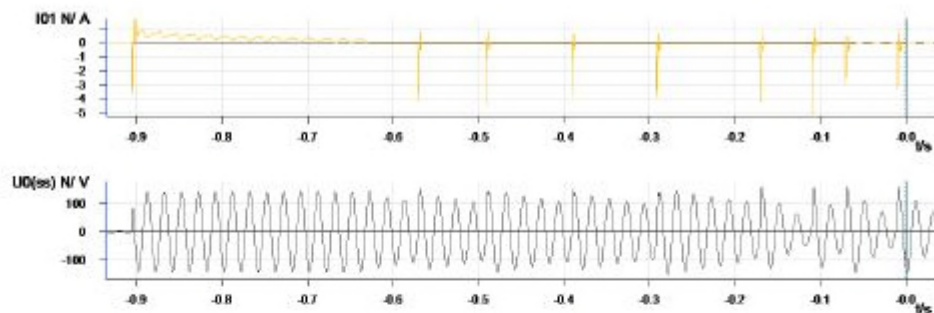
Viitteemme: Lappin SA komp maasulkukokeet
Sivu: 8(9)

5. Katkeileva maasulku

Lähtökentän J15 katkaisijan taakse tehtiin 1-vaiheinen katkeilevan maasulun testi käyttäen apuna säädettävää kipinäväliä. Kipinävälin ilmapäliksi kokeeseen säädettiin noin 11,5mm. Katkaisija suljettiin ja kipinäväliin syttyi katkeileva valokaari. Suojarele tulkitse katkeilevan maasulun oikein ja laukaisi suojalla lähdön.

5.1 Koe

Vikalähdön katkaisija suljettiin käyttökeskuksesta. Katkaisija laukesi oikein katkeilevasta maasulusta ja kaikki ”terveet” lähdöt pysyivät päällä.



Kuva9, Maasulkukokeen, katkeileva maasulku I_o ja U_o .

Maasulkukoe raportti

Päivämäärä:
18.9.2015

Käsittelijä:
Kalle Haapaniemi

Viitteemme: Lappin SA komp maasulkukokeet Sivunumero: 9(9)

Yhteenveto

Maasulkukokeessa todettiin viallisen lähdön laukaisevan oikein. Kokeessa mitattiin vikavirrat ja vikavirran suuntakulmat lisävastus päälle kytkettynä ja lisävastus irti kytkettynä.

Kuristimen lisävastus on normaalitilanteessa päälle kytkettynä.

Lisävastuksen vastusarvo on 2,5 ohmia.

Vian ilmaantumisen jälkeen vastus kytketään heti hetkeksi irti, jolloin vikavirta pienenee. Tällä autetaan valokaaren itesesammumista. Vastus kytkeytyi takaisin päälle 0,45s kuluttua.

Jos kyseessä on pysyvä vika, niin kuin kokeessamme niin vastus kytketään takaisin päälle, jolloin vikavirta nousee ja suojarile laukaisee viallisen lähdön.

Maasulkukokeessa todettiin suojarileiden havaitsevan myös katkeilevan maasulun ja tekevän siitä oikein laukaisun.

Lappin sähköasemalla maasulkuvirran kompensointilaitteisto sekä 20kv lähdön suojarile toimivat hienosti ja moitteettomasti maasulkukokeissa.

Maasulkuvirran kompensointi säätäjälle aseteltiin -5A sivuun viritys.

Kalle Haapaniemi
Sähkölandia Oy