

**Markus Päivärinta**

**MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINNIN LISÄYS**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2015**

<b>Yksikkö</b> Ylivieskan yksikkö	<b>Aika</b> Toukokuu 2015	<b>Tekijä/tekijät</b> Markus Päivärinta
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkötekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINNIN LISÄYS		
<b>Työn ohjaaja</b> Halme Jari	<b>Sivumäärä</b> 32 + 2	
<b>Työelämäohjaaja</b> Karvonen Jouni		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa hyödyllistä tietoa maasulkuvirran kompensoinnin lisätarpeesta sähköjakeluverkkoyhtiölle. Työssä on perehdytty nykyisen kompensointikapasiteetin lisäykseen maasulkuvirran kasvaessa tulevaisuudessa.</p> <p>Opinnäytetyö on tehty Verkko Korpela Oy:lle, joka saa työstä hyödyllistä tietoa sähköjakeluverkon suunnitteluun ja rakentamiseen sää- ja toimitusvarmaksi.</p>		
<b>Asiasana</b> Kompensointi, Maasulku.		

**ABSTRACT**

<b>CENTRIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b> Ylivieska Unit	<b>Date</b> May 2015	<b>Author</b> Markus Päivärinta
<b>Degree programme</b> Electric Engineering		
<b>Name of thesis</b> EARTH FAULT CURRENT COMPENSATION INCREASE		
<b>Instructor</b> Halme Jari	<b>Pages</b> 32 + 2	
<b>Supervisor</b> Karvonen Jouni		
<p>Purpose of this thesis is to provide useful information for the earth fault current compensation, the need for additional power distribution network company. Thesis has been examined the current compensation capacity increase of the earth fault current increases in the future.</p> <p>The thesis has been made in the Verkko Korpela Oy, which get useful information for the work of the electricity distribution network design and construction of weather and confident.</p>		
<b>Key words</b> Compensation, Earth fault.		

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$C_0$	Verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
$I_0$	Tähtipisteen nollavirta
$I_c$	Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta
$I_e$	Maasulkuvirta
$I_f$	Maasulkuvirta vikaresistanssilla
$I_L$	Sammutuskuristimen virta
$K$	Kompensointiaste
km	Kilometri
kV	Kilovoltti
$l$	Galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus
$L$	Kompensointikuristimen reaktanssi
$R_0$	Häviöresistanssi
$R_f$	Vikaresistanssi
$U$	Verkon pääjännite
$U_0$	Tähtipisteennollajännite
$U_v$	Verkon yhden vaiheen jännite ennen vikaa
$\omega$	Kulmataajuus $2\pi f$

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 VERKKO KORPELA OY</b>	<b>3</b>
<b>3 MAASULKU</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Määritelmä</b>	<b>5</b>
<b>3.1.1 Yksivaiheinen maasulku</b>	<b>6</b>
<b>3.1.2 Kaksoismaasulku</b>	<b>6</b>
<b>4 KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS</b>	<b>7</b>
<b>4.1 Maasta erotettu verkko</b>	<b>7</b>
<b>4.2 Kompensoitu verkko</b>	<b>11</b>
<b>5 KOMPENSOINNIN TOTEUTTAMISTAVAT</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Keskitetty kompensointi</b>	<b>16</b>
<b>5.2 Hajautettu kompensointi</b>	<b>17</b>
<b>5.3 Kompensoinnin vaikutus relesuojaukseen</b>	<b>18</b>
<b>6 NYKYINEN KOMPENSOINTI</b>	<b>20</b>
<b>7 MAASULKUVIRRAN KASVU</b>	<b>23</b>
<b>7.1 Verkon saneerauksen suunnitelmat</b>	<b>23</b>
<b>7.2 Maasulkuvirran kasvun laskeminen</b>	<b>25</b>
<b>8 KOMPENSOINNIN LISÄYS</b>	<b>27</b>
<b>8.1 Lisäkompensoinnin toteutus</b>	<b>27</b>
<b>8.2 Lisäkompensoinnin kustannukset (poistettu julkisesta versiosta)</b>	<b>29</b>
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>32</b>
<b>LIITTEET</b>	

LIITE 1. Maasulun sammutuslaitteistot (poistettu julkisesta versiosta)

LIITE 2. Kaapelien maasulkuvirta ampeereina kilometriä kohti (ABB 2000, luku 8)

**KUVIOT**

KUVIO 1. Verkko Korpela Oy:n jakelualue (Korpela 2015)	4
KUVIO 2. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (ABB 2000, luku 8)	8
KUVIO 3. Kompensointilaitteisto	11

KUVIO 4. Keskitetty ja hajautettu kompensointi	12
KUVIO 5. Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa (ABB 2000, luku 8)	13
KUVIO 6. 200 kVA:n jakemuuntaja ja sammutuskuristin (Maviko 2015)	18
KUVIO 7. Virtakulmadiagrammi (Lakervi & Partanen 2008)	19
KUVIO 8. Nykyinen kompensointilaitteisto	22

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Maasulkulaskennan tulokset	20
TAULUKKO 2. Sammutuslaitteistot sähköasemittain	21
TAULUKKO 3. Alaviirteen sähköaseman tiedot	24
TAULUKKO 4. Kälviän sähköaseman tiedot	24
TAULUKKO 5. Metsäosuusien kaapelointi	26
TAULUKKO 6. Maakaapelointiaste 52 %	26
TAULUKKO 7. Keskitetyn kompensoinnin laitteisto hinnat	29
TAULUKKO 8. Jakelumuuntajan, jossa kompensointikuristin	30
TAULUKKO 9. Pelkkä kompensointiyksikkö	30

## 1 JOHDANTO

Viime vuosina Suomessa on esiintynyt harvinaisen voimakkaita sääilmiöitä. Näistä ilmiöistä suurimpia ovat olleet vuonna 2013 Eino-myrsky ja 2014-15 vuodenvaihteen tykkylumen aiheuttamat viat. Lukuisat sähkönkäyttäjät joutuivat tulemaan toimeen ilman yhtä perustarvettaan jopa useita päiviä.

Nämä erilaiset sääilmiöt ovat saaneet verkkoyhtiöt pohtimaan, kuinka sähkön toimitusvarmuutta pystytään parantamaan vaikeista sääilmiöistä huolimatta. Näin ollen on päädytty suunnittelemaan ja rakentamaan sää- ja toimitusvarmaa verkkoa. Yksi sää- ja toimitusvarman verkon rakentamisen toimenpiteistä on panostaa maakaapelointiin. Maakaapelointi on vielä kallista verrattuna ilmajohtorakentamiseen, mutta maakaapelit ovat suojassa näiltä edellä mainituilta sääilmiöiltä.

Verkko Korpela Oy:n verkossa maakaapelointi tulee lisääntymään tulevien vuosien aikana voimakkaasti. Sähköverkon maakaapeloinnin myötä maasulkuvirratt kasvavat nykyisten kompensointilaitteiden kapasiteetin yli. Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia lisäkompensoinnin toteuttamista hajautetusti ja keskitetysti, sekä vertailla eri kompensointitapojen kustannuksia.

Opinnäytetyöni toisessa pääluvussa käsitellään toimeksiantajani Verkko Korpela Oy:n tunnuslukuja. Maasulkujen teoriaa käsitellään kolmannessa pääluvussa. Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen teoriaa tarkastellaan neljännessä pääluvussa. Viidennessä pääluvussa esitellään Verkko Korpela Oy:n nykyinen kompensointilaitteisto. Lopuksi työssä pohditaan ja tarkastellaan tulevia maasulkuvirran kompensointimahdollisuuksia.

Työssä on käytetty lähteinä mm. sähköjakelutekniikasta kertovaa kirjallisuutta, josta on löytynyt pääasiassa työni aiheen teoriaosio. Lisäksi tietoa olen saanut Maviko Oy:ltä, joka on erikoistunut maasulkuvirran kompensointiin.



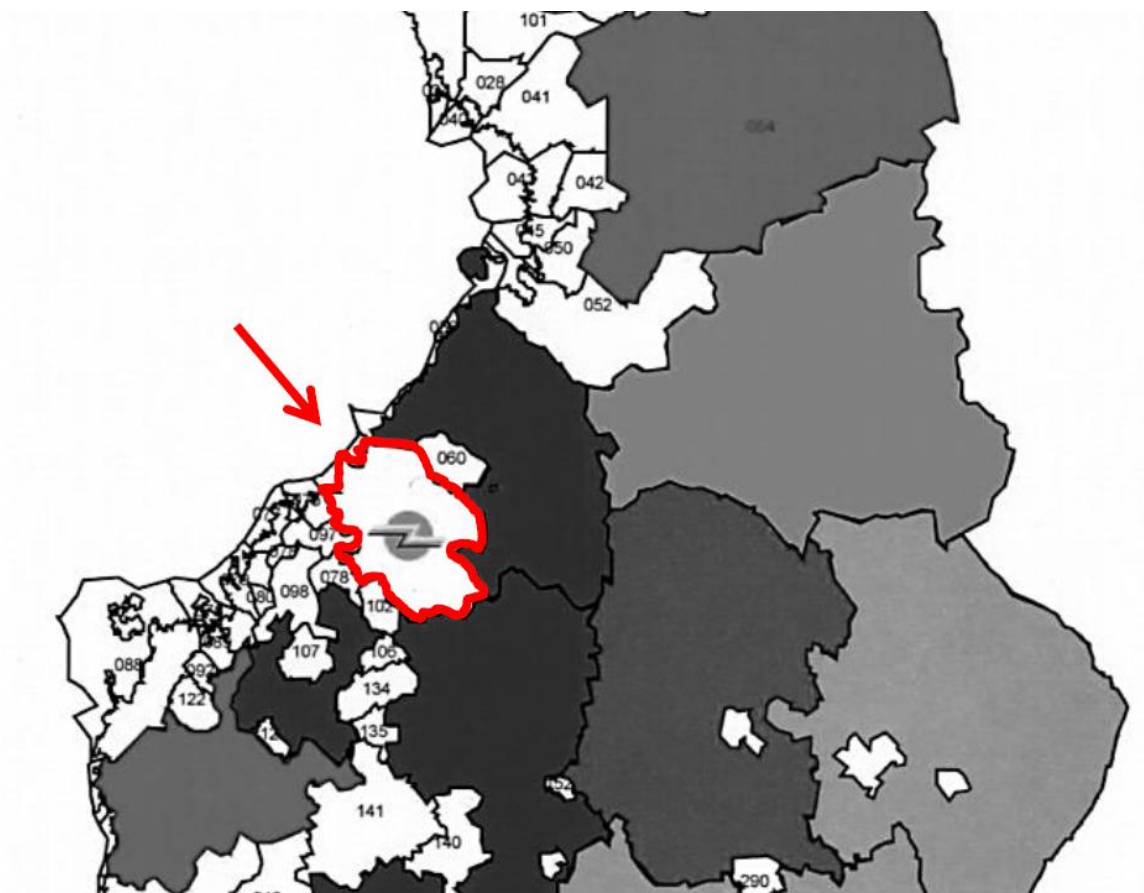
## 2 VERKKO KORPELA OY

Verkko Korpela Oy on sähkönsiirtoa harjoittava Korpelan Voimakuntayhtymäkonsernin tytäryhtiö. Konsernin pääkonttori sijaitsee Kannuksessa Keski-Pohjanmaalla. Konsernin liikevaihto vuonna 2013 oli 28,7 milj. euroa, ja henkilöstön määrä on 55. (Verkko Korpela Oy 2015.)

Verkko Korpela Oy:n jakelualue sijaitsee Keski- ja Pohjois-Pohjanmaan maakunnissa. Jakelualueeseen kuuluvat:

- Kannus
- Sievi
- Toholampi
- Lestijärvi
- Kaustinen
- Halsua
- Ullava (Kokkola)
- Kälviä (Kokkola)
- Lohtaja (Kokkola)
- Himanka (Kalajoki)
- Rautio (Kalajoki)

Alue on suuruudeltaan 5 000 km<sup>2</sup> ja kuluttajia on lähes 20 000. (Verkko Korpela Oy 2015.)



KUVIO 1. Verkko Korpela Oy:n jakelualue (Korpela 2015).

Verkko Korpela Oy:n jakeluverkossa sähköasemia on kahdeksan. Keski-jänniteverkkoa on hieman yli 1600 km, josta noin 4 % on maakaapelia ja loput on ilmajohto-  
 toverkkoa. Maakaapelit sijaitsevat pääasiassa taajama-alueilla, ilmajohtot pelloilla ja metsissä. Jakelumuuntajia on 1460 kpl. Pienjänniteverkkoa on 2300 km ja maa-  
 kaapelointiaste on noin 35 %. (Verkko Korpela Oy 2015.)

### 3 MAASULKU

#### 3.1 Määritelmä

Maasulku on vikatilanne, jossa yksi tai kaksi vaihetta on kytkeytynyt maahan. Maasta erotetussa verkossa ei normaalitilassa ole johtavaa yhteyttä maahan. Terveessä tilassa vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkevien varausvirtojen summa on hyvin pieni. Virran suuruus riippuu galvaanisesti yhtenäisen verkon pituudesta. (Mörsky 1992, 298.)

Maakaapeleiden synnyttämät maasulkuvirrat ovat huomattavasti suuremmat kuin avojohtoverkossa. Kaapeleiden maakapasitanssiin taas vaikuttaa oleellisesti kaapelin rakenne ja eristemateriaali. Nykyisillä pex-eristeisillä kaapeleilla päästään jopa 50 % aiempaa pienempiin maakapasitanssiarvoihin. (Lakervi & Partanen 2008, 186.)

Maasulut aiheuttavat suurimman osan keskijänniteverkon vikatilanteista. Maasulut ovat yleisimpiä häiriöitä keskijänniteverkon avojohto-osuuksilla, joissa vikataajuus on suuri. Noin 90 % sähkönkäyttäjien kokemista sähkökatkoista aiheutuu keskijänniteverkon keskeytyksistä. (Lakervi & Partanen 2008, 79.)

### 3.1.1 Yksivaiheinen maasulku

Vaihejohtimen joutuessa suoraan tai vikaimpedanssin kautta yhteyteen maan kanssa tapahtuu yksivaiheinen maasulku. Maan kanssa yhteyteen joutuneen vaiheen jännite ja varausvirta pienenevät. Ehyiden vaiheiden jännitteet kasvavat maata vastaan, ja myös varausvirrat kasvavat. Pääjännitteet pysyvät ennallaan, eivätkä kuormitukset häiriinny ennen kuin katkaisija on toiminut. Galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus vaikuttaa yksivaiheisen maasulun maasulkuvirran suuruuteen. ( Mörsky 1992, 298. )

### 3.1.2 Kaksoismaasulku

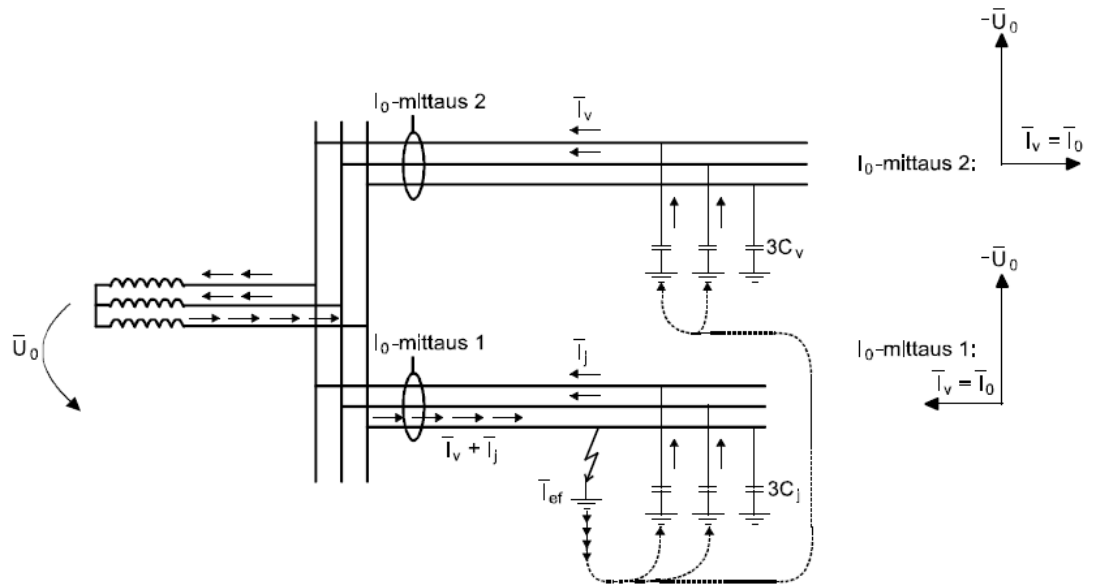
Kaksoismaasulussa on kaksi vaihejohtinta joko suoraan tai vikaresistanssien kautta galvaanisessa yhteydessä maahan. Maasulkupaikat voivat olla kaukanakin toisistaan. Kaksoismaasulku on tyypiltään samanlainen kuin kaksoisoiikosulku, sillä vikavirta kulkee osan matkasta maan kautta. Vikavirran suuruusluokka voi olla oiikosulkuvirran tasolla. Vikavirta on vaikeasti laskettavissa, koska se kulkee maassa muun muassa hyvin johtavia kanavia pitkin joita ovat mm. vesijohtoputket, telekaapeleiden vaipat ym. Kaksoismaasulun laukaisu tapahtuu yleensä oiikosukusuojien avulla, vikavirta riittää suojien toimintaan. Kaksoismaasulun syyinä on usein yksivaiheisen maasulun aiheuttama jännitteen nousu terveissä vaiheissa. ( Mörsky 1992, 306-309.)

## 4 KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUS

Keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään maasta erotettua tai sammutettua verkkoa. Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään induktanssi, jonka reaktanssi vastaa verkon johtojen maakapasitanssien muodostamaa reaktanssia. Maasta erotetun keskijänniteverkon käytön syynä on huonoista maadoitusolosuhteista johtuva kosketusjänniteongelma. Vaihejohtimen osuessa vikatilanteessa suojamaadoitettuun osaan riippuu kosketusjännitteen suuruus maasulkuvirrasta ja suojamaadoituksen resistanssista. Sallituilla kosketusjännitteillä pyritään välttämään sähköiskutilanteessa hengenvaarallinen sydänkammiovärinä. (Lakervi & Partanen 2008, 182.)

### 4.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetun verkon maasulkutilanteessa verkon tähtipisteen ja vaiheiden jännitteet muuttuvat, ja johtojen maakapasitanssien kautta kulkee kapasitiivisia vikavirtoja. Kuten kuviossa 2 on esitetty, maasta erotetussa verkossa maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta vikaresistanssin kautta maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. (Lakervi & Partanen 2008, 183.)



KUVIO 2. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (ABB 2000, luku 8).

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta voidaan laskea kaavasta 1, jossa ei ole otettu huomioon vikaresistanssia.

$$I_e = 3\omega C_0 U_v = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (1)$$

Yhtälössä:

$C_0$  verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

$U$  verkon pääjännite

$\omega$  kulmataajuus

Kaapeleille on taulukoita, joissa on maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohden. Näin ollen tarvitsee tuntea vain kaapelilaji sekä kaapelin pituus.(ABB 2000.)

Avojohdolle maasulkuvirta voidaan määrittää riittävän tarkasti kaavalla 2.

$$I_e = \frac{U / kV * l / km}{300} A \quad (2)$$

Yhtälössä:

l galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus [km]

U verkon pääjännite [ kV ]

Vikaresistanssin lisääminen laskentakaavaan ja maasulkuvirran pienentynyt arvo saadaan kaavasta 3.

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

Yhtälössä:

C<sub>0</sub> yhden vaiheen maakapasitanssi

R<sub>f</sub> vikaresistanssi

U<sub>v</sub> verkon yhden vaiheen jännite ennen vikaa

ω kulmataajuus

Kaavojen avulla laskettu maasulkuvirta on siis virta, joka kulkee viallisesta vaiheesta maahan.

Maasulun aikana viallisen johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirrassa ei ole mukana viallisen johdon maakapasitanssien tuottamaa maasulkuvirtaa. Summavirta voidaan laskea kaavasta 4.

$$I_0 = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} U \quad (4)$$

Yhtälössä:

$C_0$	yhden vaiheen maakapasitanssi
$R_f$	vikaresistanssi
$U$	pääjännite
$\omega$	kulmataajuus

Maasulun aikana maasta erotetun verkon jännite-epäsymmetriasta johtuen verkon tähtipisteeseen muodostuu potentiaaliero maahan nähden, josta syntyy nollajännite  $U_0$ . Nollajännite voidaan laskea kaavasta 5.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Yhtälössä:

$C_0$	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
$R_f$	vikaresistanssi
$\omega$	kulmataajuus



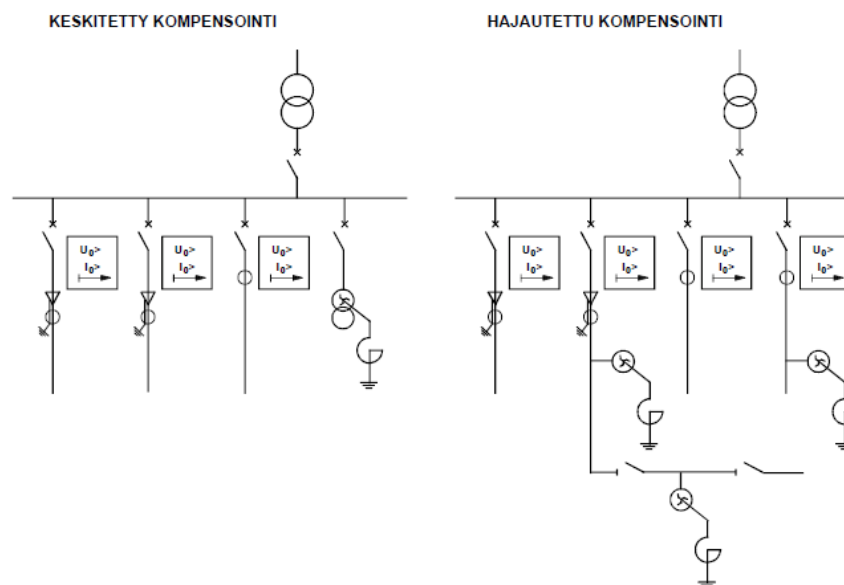
## 4.2 Kompensoitu verkko

Kompensoitu verkko voidaan toteuttaa keskitetysti tai hajautetusti (KUVIO 4). Keskitetyssä kompensoinnissa sammutuskuristin on sijoitettu yleensä 110/20 kV sähköasemalle. Hajautetussa kompensoinnissa sammutuskuristimet on sijoitettu 20 kV johtojen varsille. Kompensoidussa verkossa kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan verkon tähtipisteeseen kytketyn sammutuskuristimen avulla. Keskijännite verkoissa tähtipiste on vain harvoin käytettävissä. Näin ollen tähtipiste joudutaan tekemään keinotekoisesti, parhaiten tämä onnistuu ZN-kytkentäistä maadoitusmuuntajaa käyttämällä (KUVIO 3).(ABB 2000, luku 8.)

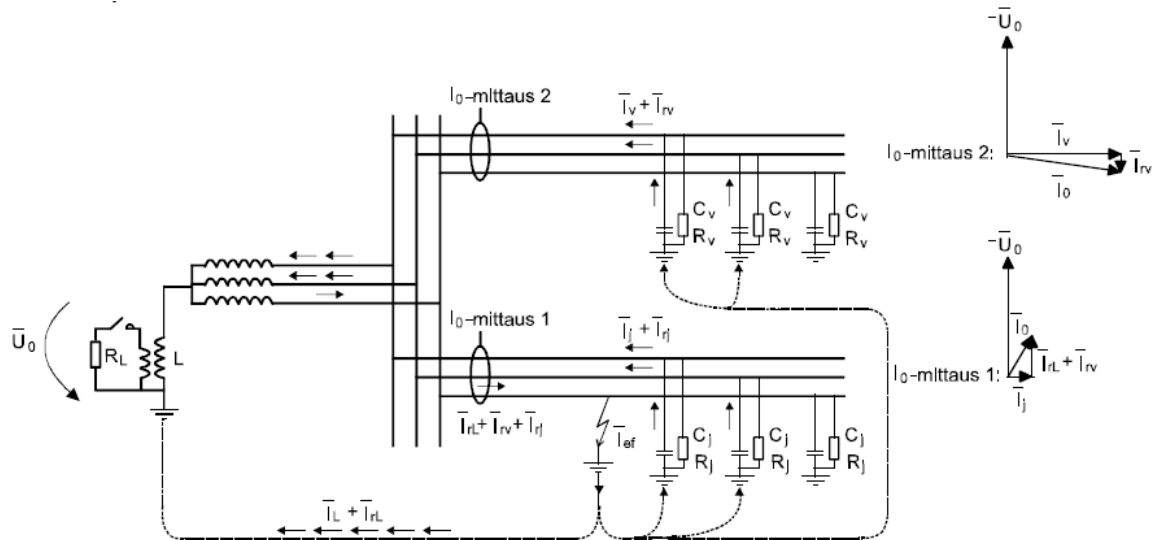


KUVIO 3. Etualalla kuvassa ZN-kytkentäinen maadoitusmuuntaja ja takana sammutuskuristin (Korpela 2015.)

Ajatuksena on, että sammutuskuristimen induktiivinen reaktanssi asetetaan siten, että se kompensoi jakeluverkon kapasitiivisen maasulkuvirran osittain tai kokonaan. Tällä tavalla saadaan maasulkuvirta pieneksi, koska induktiivinen ja kapasitiivinen virta ovat keskenään vastakkaisuuntaisia. Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa nähdään kuviosta 5. Maasulun seurauksena syntynyt valokaari ei kykene palamaan kovin pitkään pienen maasulkuvirran takia ja tästä johtuen valokaari sammuu. Tästä tulevat nimitykset sammutettu verkko ja sammutuskuristin, joita myös yleisesti käytetään. Sammutuskuristin pienentää myös maasulkuvirran suuruutta pysyvissä maasuluissa. Tämä mahdollistaa verkon tilapäisen käytön maasulun aikana. Näin ollen jälleenkytkennät vähenevät ja sähkön toimitusvarmuus paranee. (Lakervi & Partanen 2008, 72).



KUVIO 4. Keskitetty ja hajautettu kompensointi (ABB 2000, luku 8)



KUVIO 5. Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa (ABB 2000, luku 8)

Verkon kompensoinnin määrää kuvataan kompensointiasteella  $K$ , joka saadaan kaavasta 6.

$$K = \frac{I_L}{I_c} \quad (6)$$

Yhtälössä:

$I_c$            verkon kapasitiivinen maasulkuvirta

$I_L$            sammutuskuristimen virta

Kompensointiasteen ollessa suurempi kuin yksi on verkko ylikompensoitu, ja vastaavasti kompensointiasteen ollessa pienempi kuin yksi alikompensoitu. Jos kompensointiaste on yksi, verkko on täysin kompensoitu eli sammutettu. (ABB 2000, luku 8)

Sammutetun verkon maasulkuvirta voidaan laskea kaavasta 7.

$$I_f = \frac{U_v \frac{R_0}{R_f + \frac{R_0}{1 + jR_0(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}}}{R_f + \frac{R_0}{1 + jR_0(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (7)$$

Yhtälössä:

$C_0$	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
$L$	kompensointikuristimen reaktanssi
$R_0$	kuristimen resistanssi sekä tähtipisteeseen redusoitu verkon häviöresistanssi
$R_f$	vikaresistanssi
$U_v$	verkon vaihejännite ennen vikaa
$\omega$	kulmataajuus

Tähtipisteen nollajännite voidaan laskea kaavasta 8.

$$U_0 = \frac{-R_0}{R_f + R_0 + jR_0 R_f (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})} U_v \quad (8)$$

Yhtälössä:

$C_0$	yhden vaiheen maakapasitanssi
$L$	kompensointikuristimen reaktanssi
$R_0$	kuristimen resistanssi sekä tähtipisteeseen redusoitu verkon häviöresistanssi
$R_f$	vikaresistanssi
$U_0$	tähtipisteennollajännite
$U_v$	verkon vaihejännite ennen vikaa
$\omega$	kulmataajuus

Täysin kompensoidussa verkossa voidaan kaavat 7 ja 8 sieventää seuraavaan muotoon:

$$I_f = \frac{1}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Yhtälöissä:

$R_0$	kuristimen resistanssi sekä tähtipisteeseen redusoitu verkon häviöresistanssi
$R_f$	vikaresistanssi
$U$	verkon pääjännite

## 5 KOMPENSOINNIN TOTEUTTAMISTAVAT

### 5.1 Keskitetty kompensointi

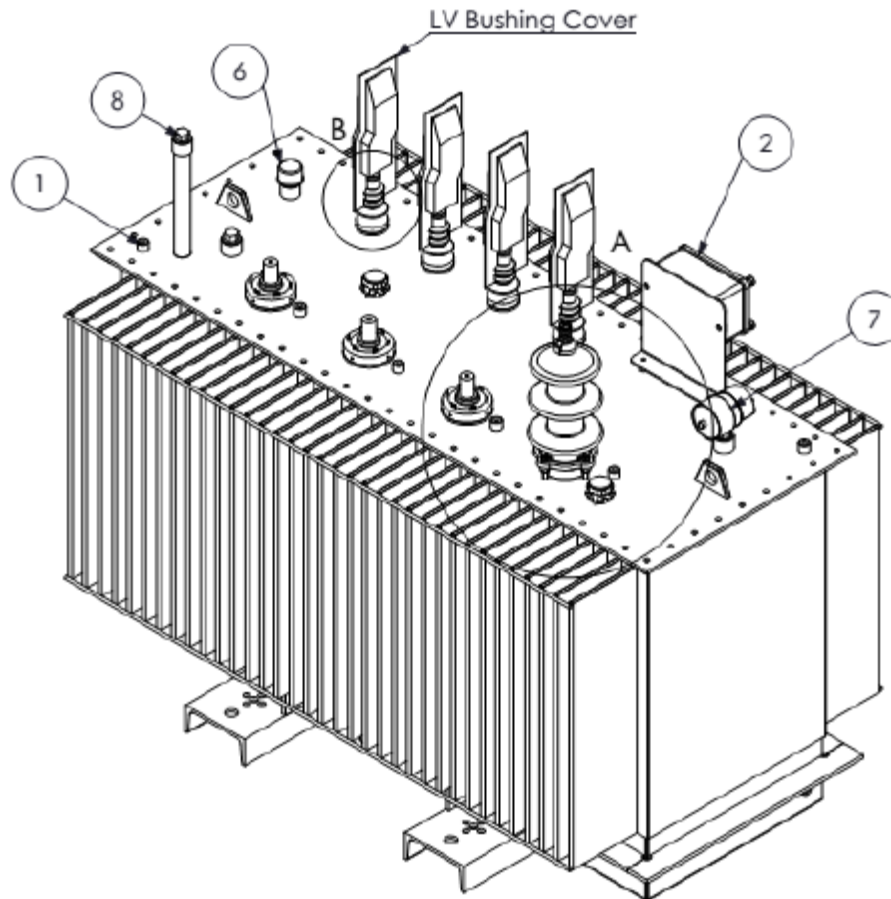
Keskitetyssä kompensoinnissa kuristin apulaitteineen sijoitetaan yleensä sähköasemalle. Keskitetyn kompensoinnin laitteistoon kuuluvat maadoitusmuuntaja, kompensointikuristin sekä automaattisäätäjä. Tämän laitteiston voi sijoittaa erilliseen tilaan, joka voi olla esimerkiksi puistomuuntaja tyyppinen koppi. Mikäli tähtipiste tehdään keinotekoisesti maadoitusmuuntajalla vaatii tämä sähköasemalla yhden vapaan kennon. Maadoitusmuuntaja voidaan varustaa myös pienjännitekäämityksellä (0,4 kV), jolloin se voi samalla toimia sähköaseman omakäyttömuuntajana. ( Mörsky 1992, 320 ).

Kompensointikuristin voi olla kiinteä tai säädöllä varustettu. Sääto vaihtoehtoja on väliottokytkimellä varustettu, käämikytkin säätö tai jatkuva säätö. Jatkuvasäätöisessä kuristimessa on mahdollista muuttaa induktanssia jännitteisenä, joka tapahtuu rautasydämen ilmaväliä muuttamalla ja näin ollen se ei aseta rajoituksia kompensoinnin toteuttamiselle verkon kytkentätilanteen muuttuessa. Varustettaessa kompensointikuristin moottoriohjaimella ja automaattisäätäjällä tapahtuu järjestelmän säätö automaattisesti, joka mahdollistaa käytön myös kauko-ohjauksella. ( Mörsky 1992, 322).

## 5.2 Hajautettu kompensointi

Suomessa on kehitetty hajautettua kompensointia keskitetyn kompensoinnin lisäksi. Alustavissa tutkimuksissa on todettu, että paras lopputulos saadaan käyttämällä keskitettyä ja hajautettua kompensointia yhdessä. Hajautetut kompensointiyksiköt säästävät säädettävän, keskitetyn kompensoinnin kapasiteettia. Hajautettu kompensointi on keskitettyä kompensointia kustannuksiltaan edullisempaa pienillä maasulkuvirroilla. Keskitetty kompensointi on edullisempi ratkaisutapa yli 35 A maasulkuvirroilla. Hajautetussa kompensoinnissa käytetään pienempää kompensointiasetetta, tyypillisesti vain 40 -60 % kapasitiivisesta maasulkuvirrasta.

Hajautetussa kompensoinnissa kompensointiyksiköitä sijoitetaan hajautetusti johdolähdöille sekä mahdollisesti sähköasemalle. Yksikköön kuuluvat maadoitusmuuntaja ja kompensointikuristin. Kompensointikuristin voidaan myös varustaa jakelumuuntajakäämillä, kuten kuviossa 6. Tarkoitus on, että kuristimen nimellisvirta vastaa suurin piirtein kyseisen lähdön osuutta verkon maakapasitanssien tuottamasta maasulkuvirrasta. Kun hajautetusti kompensoidusta verkosta eroteetaan osa johdoista tilapäisesti pois, johdoilla olevat kompensointiyksiköt putoavat myös verkosta pois ja siten verkon suojausjärjestelmä pysyy tasapainossa maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavissa muutoksista huolimatta. Hajautetussa kompensoinnissa on huolehdittava, ettei yksikään lähtö tule ylikompensoiduksi kytkentätilanteen muuttuessa, sillä silloin virtaan perustuva suojaus ymmärtäisi lähdön aina vialliseksi maasulkutilanteessa. Parhaat sijoituspaikat hajautetuille kompensointiyksiköille ovat lähtöjen päätöshaarat tai rengasverkon säteittäiset pistojohdot, jolloin lähtöjen ylikompensoitumisen riski on pienin. (Maviko 2015).



KUVIO 6. 200 kVA:n jakelumuuntaja ja kompensointikela. (Maviko 2015)

### 5.3 Kompensoinnin vaikutus relesuojaukseen

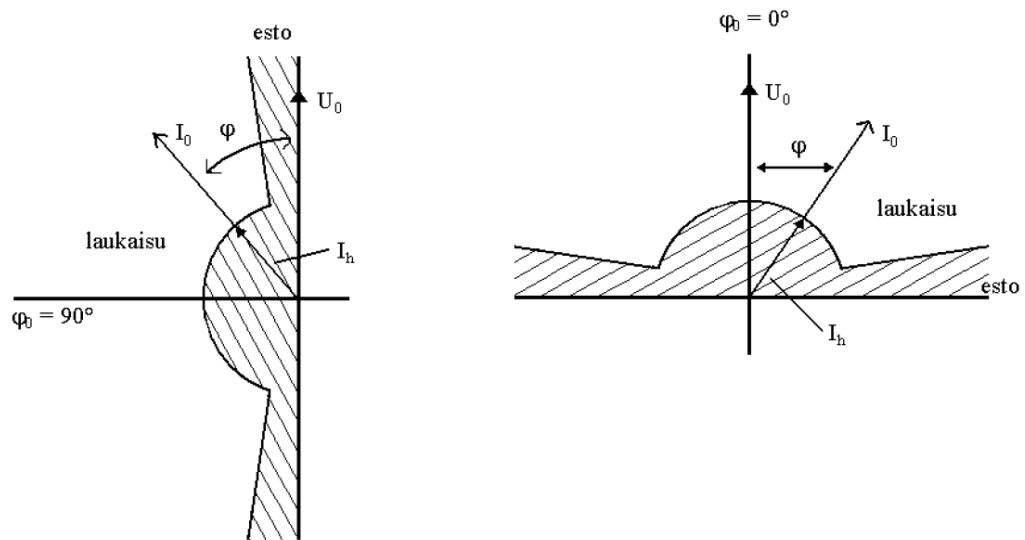
Maasulun hälytys- tai erotuslaitteen tulee sähköturvallisuusmääräysten mukaan toimia selektiivisesti 500 ohmin vikaresistanssin kautta syntyvässä maasulussa, aina kun vähintään kaksi lähtöä on kytkettynä (Lakervi & Partanen 2008, 194).

Rengasverkoissa, samoin kuin sammutetuissa verkoissa, käytetään maasulun suuntarelettä. Kompensoiduissa rengasverkoissa ei aina päästä selektiiviseen laukaistukseen suunnatulla maasulkureleellä ja koska vikavirta on pieni, niin verkkoa saatetaan käyttää maasulun aikana, jolloin suunnattu maasulkurele antaa pelkän hälytyksen. Vain kaksivaiheinen maasulku laukaistaan. (ABB 2000, luku10.)



Kuviossa 7 on esitetty vaihekulmasuuntareleen toiminta sekä loisvirtakytkennässä sekä pätövirtakytkennässä. Loisvirtakytkentää ei kompensoidussa verkossa voi käyttää, joten releiden toimintakarakteristika täytyy vaihtaa. Tämä täytyy ottaa huomioon eri kytkentä tilanteissa, joissa maasta erotettua verkkoa ei voi kytkeä renkaaseen kompensoidun verkon kanssa.

Nykyaikaisten suojarleiden toimintakarakteristika pätö- tai loisvirtaan perustuvaksi on mahdollista toteuttaa automaattisesti käyttötilanteen muuttuessa.



KUVIO 7. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi, vasemmalla maasta erotetussa verkossa ja oikealla sammutetussa verkossa. (Lakervi & Partanen 2008)

Vaihekulmansuuntareleen toiminnan ehtoina on kolme seuraavaa kriteeriä;

- nollavirta suurempi kuin asetteluarvo
- nollajännite suurempi kuin kynnyisarvo
- nollavirran ja nollajännitteen välinen kulma  $\varphi$  on laukaisu alueella

Vaihekulmasuuntareleen hyviä ominaisuuksia on jännite-, virta- ja kulmakriteerin riippumattomuus toisistaan. Tämä rele on myös herkkä.

## 6 NYKYINEN KOMPENSOINTI

Verkko Korpela Oy:n sähköverkossa kompensointi on nykyisin hoidettu keskitetysti, eli jokaisella sähköasemalla on kompensointikapasiteettia (LIITE 1). Kuudella sähköasemalla kuristimien säätöarvo on noin 8 -80 A. Kannuksen sähköaseman kuristimen säätöarvo on 13,5 -135 A, ja Kaustisen sähköaseman säätöarvo on 10 -100 A. Nykyisen verkon maasulkuvirtojen määrittämiseen käytetään Tekla Xpower -laskentaohjelmaa. (Taulukossa 1 on Alaviirteen sähköaseman maasulkulaskennan tulokset.)

### TAULUKKO 1. Maasulkulaskennan tulokset (Korpela 2015).

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

S Ä H K Ö A S E M A: PMA1  
M U U N T A J A: 01\_PT1  
Mitoitusjännite (kV): 21.0  
Tähtipisteen maadoittamistapa: TÄHTIPISTE MAASTA EROTETTU  
Optimaalinen sammutuskuristimen induktanssi (mH): 2679.02 ( 841.64 ohm)  
Laskentajännite (kV): 20.5  
Pienin tähtipistejännite (kV): 10.2 ( 86 %)  
Maasulkuvirta 1 (A): 14.1 ( 0 ohm)  
Maasulkuvirta 2 (A): 12.1 ( 500 ohm)  
Maasulkuvirta resistanssien laskennassa (A): 35.0

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

Katkaisijan tunnus	Lähdön tunnus	Sähköaseman tunnus	Vika muualla		Oma vika		Asetteluarvot			Uo/	Ir/	Q0/	Sallittu resistanssi				
			1 (A)	2 (A)	1 (A)	2 (A)	Uas (kV)	Io> (A)	Qas (kvar)	to (s)	Uas (%)	Io> (%)	Qas (%)	A (ohm)	B (ohm)	D (ohm)	2UTP (ohm)
01_J03_Q0	KUNGAS	PMA1	3.6	3.1	10.4	9.0	1.2	1.0	0.5	872	895		31	83	21	13	27
01_J06_Q0	LOHTAJA KK	PMA1	3.5	3.0	10.6	9.1	1.2	1.0	0.5	872	910		32	84	21	14	28
01_J07_Q0	SORTO	PMA1	4.6	4.0	9.5	8.1	1.2	1.0	0.5	872	813		31	83	21	13	27
01_J05_Q0	VATTAJA	PMA1	2.3	2.0	11.7	10.1	1.2	1.0	0.5	872	1009		32	84	21	14	28

JOHTOPITUUDET	Avo	Riippu	Maa	Vesi	PAS	Muu	Eimäär	Summa
LÄHTÖ: KUNGAS	51202	0	59	0	0	0	0	51261
LÄHTÖ: LOHTAJA KK	8359	183	694	0	6784	0	0	16020
LÄHTÖ: SORTO	52277	0	223	0	8497	0	0	60997
LÄHTÖ: VATTAJA	21205	0	445	0	1044	0	0	22694
KOKO VERKKO:	133043	183	1421	0	16325	0	0	150972

Maasulkuvirran kompensointiaste on 95 % eli verkko on alikompensoitu. Kompensointia hoidetaan automatiikalla, mikä sähköasemalle sijoitetun säätäjän avulla säätää moottoriohjatun sammutuskuristimen kelaan annettujen asetteluarvojen mukaan. Laitteiston kapasiteettia on vielä jäljellä jokaisella sähköasemalla, mikä näkyy taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Maasulun sammutuslaitteistot sähköasemittain.

Sähköasema	Säätöalue max A:	Maasulkuvirta A	Käyttöaste
ALAVIIRRE	84	14,1	16,8 %
TOHOLAMPI	80	49,8	62,3 %
SIEVI	83	45,7	55,1 %
KAUSTINEN	100	35	35,0 %
KÄLVIÄ	80	39,1	48,9 %
KANNUS	135	36,9	27,3 %
HIMANKA	80	47,1	58,9 %
POLVIKOSKI	80	18,8	23,5 %



KUVIO 8. Nykyinen kompensointilaitteisto (Korpela 2015).

## 7 MAASULKUVIRRRAN KASVU

### 7.1 Verkon saneerauksen suunnitelmat

Verkko Korpela Oy saneeraa verkkoaan järjestelmällisesti. Tavoitteena on säävarma ja toimitusvarma verkko. Tämä tarkoittaa sitä, että ne sähköverkon osat, jotka ovat alttiita erilaisille sääilmiöille, sanerataan verkosta pois. Käytännössä ilmajohdot, jotka kulkevat metsässä, vaihdetaan maakaapeliksi tai siirretään tienvarsille. Tavoitteena on nostaa verkon maakaapelointiaste vuoteen 2028 mennessä jopa yli 50 %.

Maasulkuvirran kasvun laskeminen joudutaan tässä työssä perustamaan oletukseen, koska tarkkoja verkon saneeraussuunnitelmia ei ole. Verkon kehittämissuunnitelmasta kuitenkin saadaan tietoon alueet, jotka tullaan saneeraamaan ensin. Nämä alueet sijaitsevat rannikkoseudulla sähköasemien Alaviirre ja Kälviä jakelualueella. Näiden kahden sähköaseman vaikutuksen alaisen verkon johtotiedot näkyvät taulukoissa 3 ja 4.

TAULUKKO 3. Alaviirteen sähköaseman johtotiedot (Korpela 2015).

Johtolähtö	Avojohto [km]	Päällystetty ilmajohto [km]	Maakaapeli [km]	Metsä [km]	Tienvarsi [km]	Pelto [km]
Kungas	52,71	0	0,25	17,49	0,73	34,50
Vattaja	20,56	1,05	0,45	10,86	1,93	8,81
Lohtaja kk	8,38	6,98	0,69	2,50	4,24	8,62
Sorto	52,36	8,50	0,20	18,11	14,49	28,26
<b>Yhteensä</b>	<b>134,01</b>	<b>16,53</b>	<b>1,59</b>	<b>48,95</b>	<b>21,39</b>	<b>80,19</b>

TAULUKKO 4. Kälviän sähköaseman johtotiedot (Korpela 2015).

Johtolähtö	Avojohto [km]	Päällystetty ilmajohto [km]	Maakaapeli [km]	Metsä [km]	Tienvarsi [km]	Pelto [km]
Peltokorpi	47,20	0	1,15	24,70	3,66	18,84
Marinkainen	45,72	1,34	0,55	24,89	8,75	13,42
Kälviä kk	1,30	0,32	4,96	0	0	1,61
Ullava	42,26	0	0,14	26,38	1,29	14,59
Passoja	12,87	0	0,36	5,51	0,40	6,96
Vuolle	43,43	0	0,81	22,73	2,90	17,80
Marttila	0	0	1,99	0	0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>192,77</b>	<b>1,66</b>	<b>9,95</b>	<b>104,21</b>	<b>16,99</b>	<b>73,23</b>

Maakaapelointiaste on Alaviirteen sähköasemalla vain noin 1 % ja Kälviän sähköasemalla 4,9 %. Molempien sähköasemien maakaapeliosuudet sijaitsevat pääasiassa taajama-alueilla, Lohtajalla ja Kälviällä.

## 7.2 Maasulkuvirran kasvun laskeminen

Maasulkuvirta tulee kasvamaan Verkko Korpela Oy:n sähköverkossa huomattavasti. Tämän työn tarkoituksena on laskea, kuinka paljon maasulkuvirrat kasvavat tulevaisuudessa. Tarkempien suunnitelmien vielä puuttuessa, joudutaan oletta-  
maan olevassa olevien johtotietojen perusteella kaapelointimäärät. Jotta sää- ja toimitusvarman verkon edellytykset täyttyvät, metsässä olevat sähkölinjat siirretään teiden varsiin tai kaapeloidaan.

Alaviirteen sähköaseman osalta sää- ja toimitusvarman verkon rakentaminen tarkoittaa käytännössä metsäosuuksien (48,95 km) maakaapelointia. Myös maakaapelointiasteen noston kautta maasulkuvirran kasvua kannattaa tarkastella.(TAULUKKO 5 ja 6). Metsäosuuksien muuttaminen maakaapeliksi tarkoittaisi sitä, että maasulkuvirta kasvaisi noin 135 ampeeriin. Tällöin kaapelointiaste olisi 32 %, kun kaapelointiaste nostetaan 52 % kasvaa maasulkuvirta 210 ampeeriin. Maakaapelia verkossa olisi tällöin noin 80 km. Maakaapelin tuottama maasulkuvirta kilometriä kohden riippuu toki kaapelityypistä, joista yleisempiä on esitetty liitteessä 2(LIITE 2).

Kälviän sähköaseman sähköverkon pituus on noin 204 kilometriä. josta metsäosuuksia on noin puolet. Kälviän sähköasemalla metsäosuudet kaapeloimalla maasulkuvirta nousisi lähelle 250 ampeeria ja kaapelointiaste olisi 50 %, mikä olisi jo lähellä verkon kehittämissuunnitelman tavoitetta.

TAULUKKO 5. Metsäosuuksien kaapelointi.

Sähköasema	Verkon pituus	kaapelointiaste	Maakaapelia verkossa	Avojohtoa verkossa	Avojohton kerryttämä le	Kokonais maasulkuvirta
Alaviirre	152,13	32	48,68	103,45	7,24	133,81
Kälviä	204,38	50	102,19	102,19	7,15	242,19

TAULUKKO 6. Maakaapelointiaste 52 %.

Sähköasema	Verkon pituus	kaapelointiaste	Maakaapelia verkossa	Avojohtoa verkossa	Avojohton kerryttämä le	Kokonais maasulkuvirta
Alaviirre	152,13	52	79,11	73,02	5,11	210,79
Kälviä	204,38	52	106,28	98,10	6,87	251,31



## 8 KOMPENSOINNIN LISÄYS

Maasulkuvirran kompensointikapasiteettia joudutaan lisäämään tulevaisuudessa jokaisella Verkko Korpela Oy:n sähköasemalla, jos tavoite on pitää verkko sammutettuna laajoista maakaapeloinneista huolimatta. Kompensoinnin lisäystä joudutaan tutkimaan sähköasemakohtaisesti, ottaen huomioon myös eri kytkentätilanteet. Sähköasemalle sijoitetun kompensointikapasiteetin lisäys tarkoittaa Alaviirteen sähköaseman osalta noin 140 ampeeria ja Kälviän osalta noin 210 ampeeria.

### 8.1 Lisäkompensoinnin toteutus

Yksi vaihtoehto lisäkompensoinnille olisi se, että Alaviirteen ja Kälviän nykyiset laitteet jätettäisiin paikoilleen ja lisättäisiin uudet, suuremmat laitteet sähköasemille nykyisten viereen. Uusi laitteisto asennettaisiin muuntamoon, jossa olisi välikojeisto, josta jaettaisiin syötöt uudelle ja vanhalle laitteistolle. 20 kV kojeistosta nykyiselle kompensoinnille menevä kaapeli käännettäisiin uuteen kojeistoon, josta syöttö taas toteutettaisiin nykyisille laitteille. Tämä vaatisi uuteen muuntamoon kojeiston, jossa olisi 3 kennoa (1 syöttö, 1 nykyisille laitteille, 1 uudelle laitteistolle).

Nykyinen laitteisto jätettäisiin ilman säätäjää, mutta kuitenkin moottorihjattuna. Moottorihjaus voidaan toteuttaa painonappiohjauksella, ohjaus voidaan myös automatisoida kaukokäyttöiseksi. Nykyinen laitteisto toimisi kiinteänä peruskuormana ja se voitaisiin kytkeä verkkoon automaattisesti, kun uuden säädettävän sammutuskuristimen kapasiteetistä on käytössä yli 80 %, ja irti verkosta kun säädettävän kapasiteetistä on käytössä alle 20 %. Näin välttyttäisiin verkon ylikompensoitumiselta. Kustannuksia ja verkon suojausta ajatellen tämä vaihtoehto

olisi paras ratkaisu kompensoinnin lisäykseen, se olisi myös helposti toteutettavissa.

Toinen vaihtoehto olisi käyttää hajautettua kompensointia, missä sammutuskuristimet sijoitettaisiin hajautetusti eri johtolähdöille. Hajautetusti sijoitetut kuristimet tulisi kuitenkin sijoittaa johto-osuuksien loppupäihin. Tämä tarkoittaisi rengasverkossa sitä, että hajautettua kompensointia olisi paras käyttää vain säteittäisillä johdoilla. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että maasulkuvirta kompensoidaan pieneksi kaapelikohtaisesti. Markkinoilta löytyy myös jakelumuuntajia, joissa on kompensointikuristin rakennettu samaan pakettiin. Hajautetun kompensoinnin tarvetta kannattaa miettiä tarkemmin, kun verkonrakennussuunnitelmat tarkentuvat.

## 8.2 Lisäkompensoinnin kustannukset (poistettu julkisesta versiosta)




## 9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tuottaa Verkko Korpela Oy:lle hyödyllistä tietoa maasulkuvirran kompensoinnista tulevaisuudessa. Työssäni käsittelin vain kahden sähköaseman jakeluverkkoa ja maasulkuvirtoja. Maasulkuvirran kompensoinnin lisäämisen toteutusvaihtoehtojen tutkiminen oli kohtuullisen haastavaa, koska tarkempia jakeluverkoston rakentamissuunnitelmia ei vielä ole. Mielestäni sain kuitenkin riittävän tarkat tiedot verkon kehittämissuunnitelmasta. Maasulkuvirrasta ja yleensä maasulkusuojauksen teoriasta olen hakenut tietoa sähköjakeluverkkoja käsittelevistä teoksista. Maasulkuvirtojen kompensointi tuntuu olevan tänä päivänä kaikkien jakeluverkkoyhtiöiden suunnitelmissa, syynä ilmeisesti viranomaisten vaatimukset sää- ja toimitusvarmasta jakeluverkosta. Toivon, että työstäni olisi apua sähköjakeluverkon suunnittelussa ja rakentamisessa. Opinnäytetyön tekeminen kiinnostavasta aiheesta on täydentänyt paljon opiskelu aikana opittua teoriaa sähköverkoista. Uskon myös tästä työstä olevan apua minulle tulevaisuudessa sähköalalla toimiessa.

## LÄHTEET

ABB TTT-käsikirja. 2000-07. Luku 8. Maasulkusuojaus.

ABB TTT-käsikirja. 2000-07. Luku 10. Mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot.

Autio K. 2014. 20 kV jakeluverkkojen kaapeloinnin aiheuttamat haasteet maasulkuvirran kompensointiin. pdf -tiedosto. Maviko Oy

Karvonen J. 2015. Suunnittelupäällikön haastattelu 17.03.2015. Verkko Korpela Oy. Kannus

Lakervi E & Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto Oy

Mörsky Jorma. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Otatieto Oy

Sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelma. 2014. Verkko Korpela Oy

(poistettu julkisesta versiosta)

Kaapeleiden maasulkuvirta ampeereina kilometriä kohti. ( ABB 2000, luku 8)

Poikki- pinta mm <sup>2</sup>	10 kV voimakaapelit						15 kV voima- kaapelit				20 kV voimakaapelit				30 kV voima- kaapelit
	Paperi- eristeiset PLKVJ APAKM APLKPJJ	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMM AHXCMM HXCMMK AHXCMMK	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMMK- WTC AHXCMMK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMM AHXCMM HXCMMK AHXCMMK	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMMK- WP AHXCMMK- WTC AHXCMMK HXCMMK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX- FXLJ AX- FXKJ AX- FXTLJK AX- FXPLJK AX- FXBTLJK	
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	-	-		