

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# KESKIJÄNNITEVERKON MAAKAAPE- LOINNIN VAIKUTUKSET MAASUL- KUVIRTOIHIN

TEKIJÄ Oskari Suutari

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Oskari Suutari			
Työn nimi Keskijänniteverkon maakaapeloinnin vaikutukset maasulkuvirtoihin			
Päiväys	30.4.2024	Sivumäärä/Liitteet	36/3
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savon Voima Verko Oy			
Tiivistelmä			
<p>Savon Voima Verkon alueella rakennetaan säävarmaa sähköverkkoa, mikä tarkoittaa ilmajohtojen saneerausta maakaapeliksi. Tämä lisää maasulkuvirtojen määrää, mikä puolestaan voi aiheuttaa nykyisten kompensointilaitteiden kapasiteetin jäävän alimitoitetuksi. Se voi johtaa kosketusjännitteiden nousuun standardiarvojen yläpuolelle. Työn tavoitteena oli tutkia Savon Voima Verkon maakaapelointiaste ja niiden aiheuttamat maasulkuvirratt, sekä laskea miten tulevat maakaapelointihankkeet vaikuttavat maasulkuvirtoihin. Maakaapeloinnin ennusteen tekemiseksi oli tarkoitettu suunnitella tavoiteverkko vuodelle 2036 ja koota kaikki kompensointiin liittyvät tiedot Exceliin. Tämän analysoinnin perusteella tavoite oli keksiä kustannustehokkaimmat kompensointiratkaisut jokaiselle sähköasemalle. Loistehon kompensointia ei käsitelty tässä työssä lainkaan.</p> <p>Aluksi tutustuttiin maasulkuvirran teoriaan oppimateriaalin ja kirjallisuuden avulla. Lisäksi perehdyttiin Savon Voima Verkon strategiaan, jonka perusteella suunniteltiin tavoiteverkko vuodelle 2036 NIS:ssä. Tavoiteverkko jaoteltiin päämuuntajittain, jotta nähtäisiin jokaisen keskitetyn kompensointikelan tilanteen erikseen. Nykyisen verkon keskitetyn kompensoinnin asennot katsottiin Scada-järjestelmän avulla, minkä lisäksi niitä verrattiin kaapelien pituuksista laskettuihin maasulkuvirtoihin.</p> <p>Työn tuloksena saatiin muodostettua Excel-taulukko, josta nähdään jokaisen sähköaseman kompensoinnin tilanne päämuuntajittain tavoiteverkossa. Sen pohjalta voidaan laskea esimerkiksi keskitetyn kompensoinnin kelan koko tavoiteverkossa sekä paljon muuta kompensointiin liittyen. Kaikki sähköasemat jaoteltiin viiteen erilaiseen kompensoinnin tarpeeseen, minkä jälkeen kaikille asemille saatiin pohdittua kustannustehokas ratkaisu maasulkuvirtojen kompensoinnille. Varsinaisia hankintapäätöksiä ei vielä tässä vaiheessa tehty, mutta työ toimii hyvin sen pohjana tulevaisuudessa.</p>			
Avainsanat maasulkuvirta, kompensointi, kustannustehokkuus, maakaapeloinnin vaikutukset			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Oskari Suutari	
Title of Thesis The effects of ground cabling in the medium voltage network on earth fault currents	
Date 30.4.2024	Pages/Appendices 36/3
Client Organisation /Partners Savon Voima Verkko Oy	
<p><b>Abstract</b></p> <p>Weather-proof electricity network is being built at a fast pace, which means the renovation of overhead lines into underground cables. This increases earth fault currents, which in turn can cause the capacity of compensating devices to remain undersized. It can lead to an increase in contact voltages above the standard values. The purpose of the work was to research the ground cabling level of Savon Voima Verkko and the ground fault currents and calculate how future ground cabling projects affect ground fault currents. To make a forecast for underground cabling, the idea was to plan a target network for 2036 and gather all compensation-related information in Excel. Based on this analysis, the goal was to come up with the most cost-effective compensation solutions for each substation. Reactive power compensation was not discussed in this work at all.</p> <p>The work was started by getting to know the theory of earth fault current with the help of educational material and literature. Along with that, company's strategy was studied. Based on that the target network for 2036 was planned at NIS. The target network was divided by main transformer to see the situation of each centralized compensation coil separately. The positions of the centralized compensation of the current network were checked using the Scada system. They were also compared to the ground fault currents calculated from the cable lengths.</p> <p>As a result of the work, an Excel table was created, which shows the compensation situation of each substation by main transformer in the target network. It can be used to calculate for example the centralized compensation of the coil in the entire target network and much more. All power stations were divided into five different compensation needs. After that a cost-effective solution for compensation of earth fault currents could be considered for all stations. The actual procurement decisions have not yet been made at this stage, but the work will serve well as a basis for it in the future.</p>	
<p><b>Keywords</b> earth fault current, compensation, cost effectiveness</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	SAVON VOIMA OYJ.....	7
3	MAASULKU .....	9
3.1	Maasulkuvirran mallintaminen maasta erotetussa verkossa .....	9
3.2	Maasulkuvirran mallintaminen sammutetussa verkossa.....	11
3.3	Maakaapeloinnin vaikutuksia maasulkuvirtoihin .....	13
4	KOSKETUS- JA MAADOITUSJÄNNITTEET .....	14
4.1	Sähköturvallisuusmääräyksiä .....	15
5	MAASULKUVIRTOJEN KOMPENSOINTI .....	18
5.1	Keskitetty kompensointi.....	18
5.2	Hajautettu kompensointi .....	20
5.3	Maadoitusmuuntaja.....	21
6	MAASULKUVIRTOJEN KOMPENSOINTI SAVON VOIMAN VERKOSSA .....	22
6.1	Nykyisen kompensoinnin tila.....	22
6.2	Tavoiteverkon suunnittelu vuodelle 2036 .....	23
6.3	Kompensoinnin tarve tulevaisuudessa .....	26
6.4	Sähköasemien valinta ja tarkempi kompensoinnin suunnittelu.....	27
6.4.1	Asemat, joiden kompensointi ei tarvitse muutoksia tavoiteverkossa .....	27
6.4.2	Asemat, jonne on suunnitteilla tai rakenteilla isompi kompensointilaitteisto .....	28
6.4.3	Asemat, joiden kompensointi käy pieneksi ensimmäisinä.....	29
6.4.4	Asemat, joiden kompensointi käy pieneksi 2036 mennessä.....	30
7	YHTEENVETO.....	32
	LÄHTEET .....	33
	LIITE 1: KOMPENSOINTIKURISTIMEN TYYPPIKILPI .....	34
	LIITE 2: MAADOITUSMUUNTAJAN TYYPPIKILPI .....	35
	LIITE 3: SHUNT-REAKTORIN TYYPPIKILPI.....	36

## KUVALUETTELO

KUVA 1. Konsernirakenne (Savon Voima, 2023) .....	7
KUVA 2. Savon voiman toimialue (Savon Voima, yritysesittely).....	8
KUVA 3. Erilaisia maasulkutilanteita (Lakervi & Partanen, 2009) .....	9
KUVA 4. Maasulkuvirtojen mallinnus maasta erotetussa verkossa. (Lakervi & Partanen, 2009) .....	10
KUVA 5. Yksivaiheinen sijaiskytkentä maasulkutilanteessa maasta erotetussa verkossa. (Rouvali, 2022) .....	10
KUVA 6. Maasulkuvirtojen mallinnus sammutetussa verkossa (Pylkkö, 2016) .....	12
KUVA 7. Yksivaiheinen sijaiskytkentä maasulkutilanteessa sammutetussa verkossa. (Rouvali, 2022).....	12
KUVA 8. Tähtipiste jännite verkon pituuden funktiona maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2009).....	14
KUVA 9. Jännitteiden osoitinpiirros maasulun aikana ( $R_f > 0$ ). (Lakervi & Partanen, 2009).....	14
KUVA 10. Maadoitusjännite $U_m$ , maasulkuvirta $I_f$ ja maadoitusresistanssi $R_f$ . (Lakervi & Partanen, 2009).....	14
KUVA 11. Sallitut kosketusjännitteet. (Suurjännitesähköasennukset, 2018 s. 93) .....	16
KUVA 12. Säädetä kompensointikuristin Siilinjärven sähköasemalla .....	18
KUVA 13. Kompensointikuristimen rakenne (Pylkkö, 2016).....	19
KUVA 14. Virtainjektiolaitteisto .....	19
KUVA 15. Kiinteä kompensointilaitteisto 25–50 A 20.5kV (Sonepar Oy).....	20
KUVA 16. Shunt-reaktori.....	21
KUVA 17. Maadoitusmuuntaja Siilinjärven sähköasemalla .....	22
KUVA 18. Tavoiteverkko 2036 .....	25
KUVA 19. Maakaapeloinnin ja maasulkuvirtojen kasvuennuste tulevina vuosina.....	26
KUVA 21. Asemien kompensointi kunnossa .....	28
KUVA 22. Maasta erotetut verkot, jotka voisivat tarvita sammutusta <b>Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.</b>	
KUVA 23. Asemat, joihin tulossa uusi kompensointilaitteisto.....	29
KUVA 24. Kompensointi jää pieneksi ensimmäisenä.....	30
KUVA 25. Kompensointi jää pieneksi 2036 mennessä .....	31

## 1 JOHDANTO

Vuonna 2013 astui voimaan uusi sähkömarkkinalaki, joka asetti uusia vaatimuksia sähkön toimitusvarmuuteen liittyen. Jakeluverkon tulee olla säävarmaa eivätkä myrskyt tai lumikuormat saa aiheuttaa pitkäkestoisia sähkökatkoja. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkön jakelu ei saa keskeytyä taajama-alueella yli kuudeksi tunniksi ja haja-asutusalueella yli 36 tunniksi. Lakimuutoksen takia sähkökatkoista maksetaan myös entistä suurempia vakiokorvauksia. Vaatimusten kiristymiset johtuvat isoista myrskyistä, jotka olivat aiheuttaneet laajoja sähkökatkoja ja paljastaneet sähköverkon haavoittuvuuden (Yle, 2013).

Kiristyneiden vaatimusten myötä keskijänniteverkon maakaapelointi on lisääntynyt Suomessa hurjaa vauhtia, sillä maakaapeli on suojassa monilta sääilmiöiltä. Näin ollen toimitusvarmuutta on saatu parannettua selvästi. Maakaapelointi on kuitenkin hyvin kallista verrattuna ilmajohdon rakentamiseen, mikä aiheuttaa taloudellisia ongelmia sähköverkkoyhtiöille. Sen lisäksi maakaapelointi aiheuttaa maasulkuvirtojen ja loistehon kasvua, jotka täytyy ottaa huomioon.

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena on analysoida Savon Voima Verkon tavoiteverkon maakaapelointiaste maasulkuvirtoineen. Vaarana on, että sähköasemien kompensointikuristimet eivät kykene enää kompensoimaan kaikkea maasulkuvirtaa tulevien maakaapelointien myötä. Tämä voi johtaa myös kosketusjännitteiden nousemisen standardiarvojen yläpuolelle, mikä on suuri turvallisuusriski. Analysoinnin tuloksena valitaan tarkemmin tarkasteltavat sähköasemat, joihin lasketaan kustannustehokkaimmat ratkaisut maasulkuvirtojen kompensoinnille. Loistehon kompensointia ei käsitellä tässä työssä lainkaan.

## 2 SAVON VOIMA OYJ

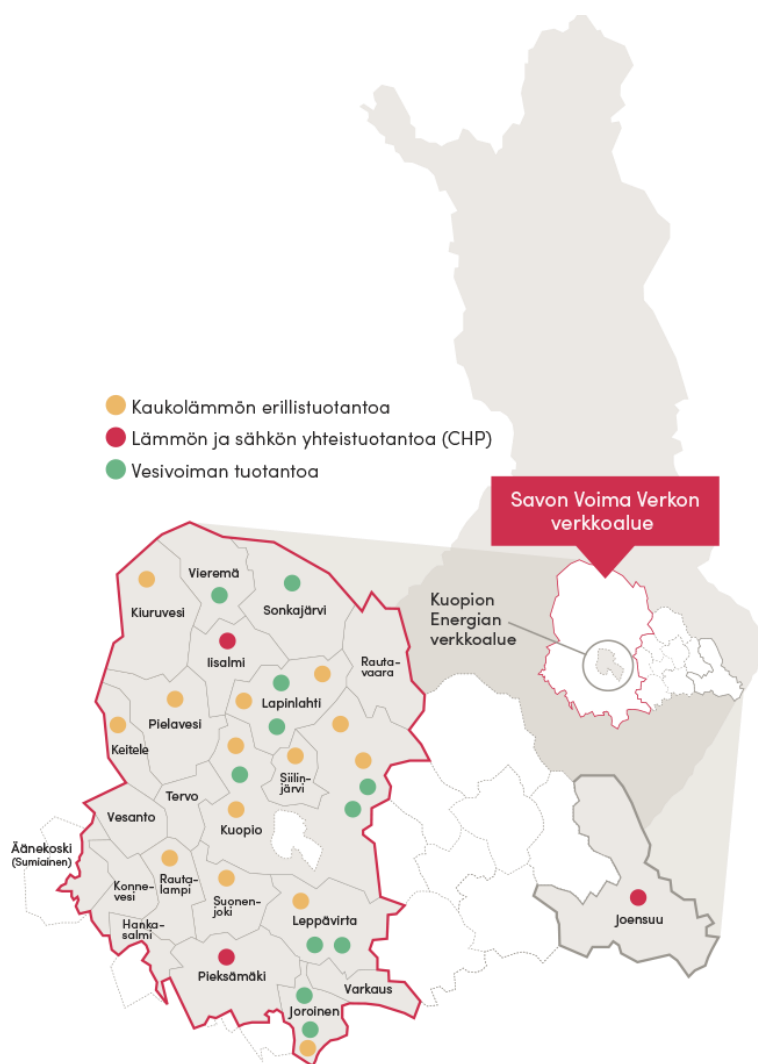
Kuvassa 1 näkyy Savon Voima Oyj:n konsernirakenne. Yrityksen omistaa kokonaan Savon Energiaholding Oy, jonka taas omistaa 20 verkkoalueen kuntaa. Konsernin liiketoimintaa ovat sähkönsiirto ja verkkopalvelut, kaukolämmön tuotanto ja jakelu, sähköntuotanto sekä energia-alan muille toimijoille tarjottavat asiakaspalvelu- ja laskutusratkaisut. (Savon Voima, 2023)



KUVA 1. Konsernirakenne (Savon Voima, 2023)

Savon Voiman toimialue ylettyy pohjoiseteläsuunnassa Sukevalta Joroiseen ja länsi-itäsuunnassa Äänekoskelta Juankoskelle. Keskellä Savon Voiman verkkoa on Kuopion Sähköverkko Oy:lle kuuluva toimialue. Joensuussa sijaitsee Savon Voiman omistama lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos, mutta sillä alueella ei ole sähkön siirron liiketoimintaa.

Savon Voima Verkko Oy on Savon Voima Oyj:n tytäryhtiö, joka vastaa yli 120 000 asiakkaan sähkönsiirrosta ja muista verkkopalveluista kuvan 2 mukaisella alueella. Sähköverkkoa on yhteensä yli 28 000 kilometriä, mikä tarkoittaa keskimäärin 230 metriä asiakasta kohden. Keskijänniteverkon osuus tästä on reilu 12 000 km ja kaapelointiaste on 21,6 %. Pienjänniteverkon kaapelointiaste on puolestaan 47,6 %. Verkkoa on siis melko pitkä matka asiakasmäärään nähden, sillä suurin osa heistä sijaitsee haja-asutusalueella ja taajamissa, missä välimatkat ovat suuria. Vain noin kolmannes asuu kaupunkialueella. (Savon Voima OYJ, ei pvm)



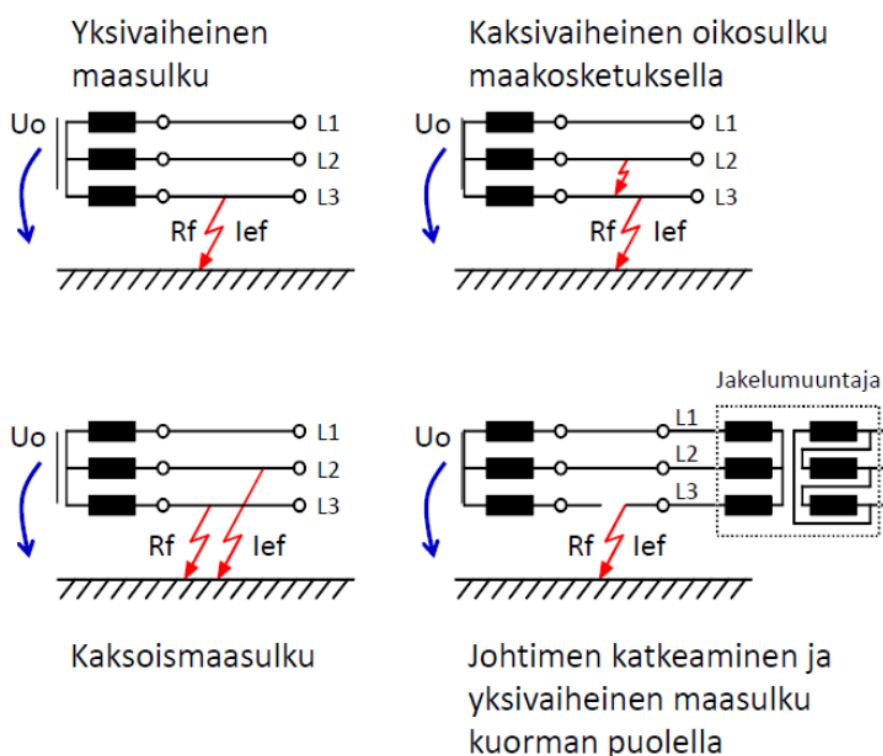
KUVA 2. Savon voiman toimialue (Savon Voima, yritysesittely)

### 3 MAASULKU

#### 3.1 Maasulkuvirran mallintaminen maasta erotetussa verkossa

Maasulku syntyy yleensä siten, että sähköverkon yksi tai useampi virtajohdin on johtavassa yhteydessä maapotentiaaliin. Tämän seurauksena syntyy vaiheesta maahan kulkeva vikavirta, jota kutsutaan maasulkuvirraksi. Yleisiä maasulun aiheuttajia ovat esimerkiksi kaapeleiden eristysvauriot tai kaatunut puu ilmajohtojen päälle.

Kuvassa 3 on havainnollistettu erilaisia maasulkutilanteita. Maasulkuvirran ( $I_{ef}$ ) ja nollijännitteen ( $U_0$ ) suuruus riippuu vikatyypistä, vikaresistanssin ( $R_f$ ) suuruudesta, verkon maadoitustavasta sekä taustaverkon suuruudesta. Yleensä vikavirta on kuormitusvirran suuruinen ja vikatilanteeseen liittyy jännitteen nousua tähtipisteen ja maan välillä. Mikäli kuitenkin kaksi vaihetta ovat kosketuksissa maihin hyvin lähellä toisiaan, vikavirrat voivat olla oikosulkuvirtojen tasoa. (Rouvali, 2022)



KUVA 3. Erilaisia maasulkutilanteita (Lakervi & Partanen, 2009)

Keskijänniteverkko Suomessa on joskus maasta erotettu, mikä tarkoittaa sitä, että muuntaja on kytketty kolmioon ja näin ollen tähtipistettä ei ole voitu maadoittaa. Myös Savon Voiman verkko on toteutettu osittain tällä tavoin, mutta tavoitteena on sammutettu verkko. Tässä tilanteessa virtapiiri sulkeutuu keskijännitejohtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien kautta päämuuntajalle ja sieltä viallisen vaiheen kautta takaisin vikapaikkaan. Kuvassa 4 on mallinnettu maasulkuvirtojen reitti pienten nuolten avulla ja tunnukset tarkoittavat seuraavia asioita: (Rouvali, 2022)

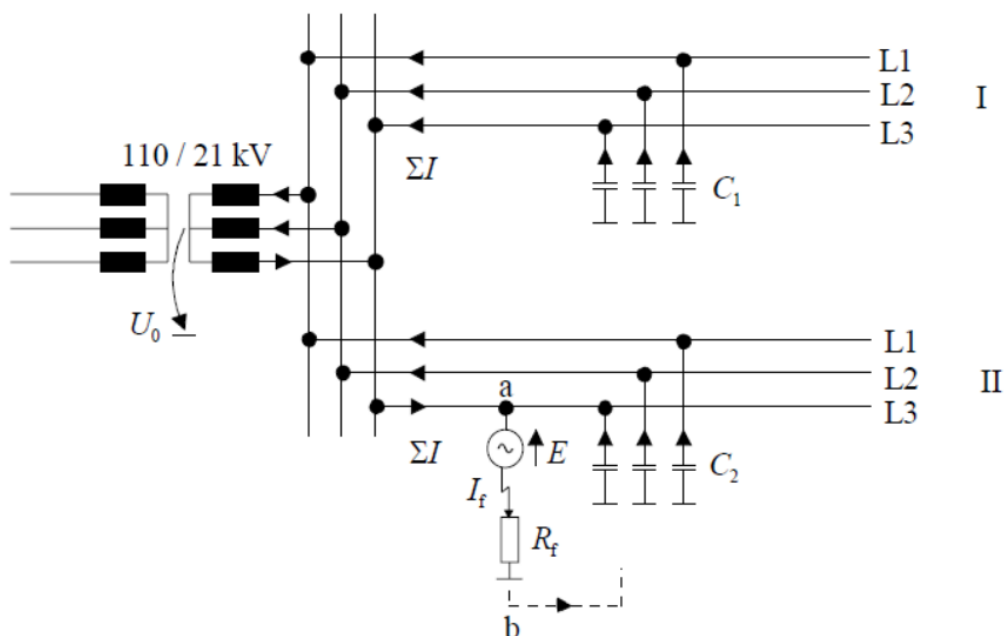
$U_0$ =nollijännite

$I_f$ =maasulkuvirta vikapaikassa

$R_f$ =vikaresistanssi

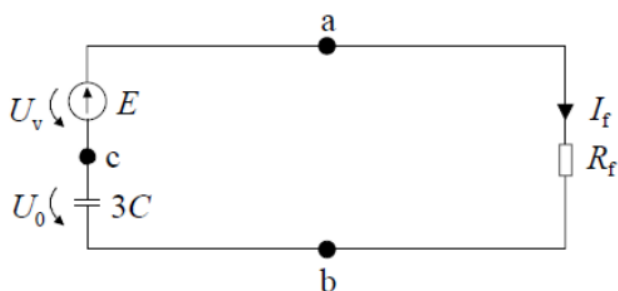
$C_1$ =1. lähdön maakapasitanssi

$C_2$ =2. lähdön maakapasitanssi



KUVA 4. Maasulkuvirtojen mallinnus maasta erotetussa verkossa. (Lakervi & Partanen, 2009)

Vaihejohtimien ja päämuuntajan impedanssit ovat hyvin pieniä verrattuna kaapeleiden maakapasitansseihin, joten ne voidaan yksinkertaistaa nolaksi maasulkulaskelmissa. Näin saadaan kuvan 5 mukainen Theveninin sijaiskytkentä. Siinä huomataan, että Theveninin lähde sijaitsee maasulkupaikassa pisteessä a, jonka lähdejännite on ennen vikaa olleen vaihejännitteen suuruisen. Oletetaan vaihejohtimien impedanssi nolaksi ja näin Theveninin lähteen sisäinen impedanssi muodostuu vain maakapasitansseista ( $3C$ ). Ne ovat kytkennässä tähtipisteen (c) ja maan (b) välillä eli maakapasitanssien ( $3C$ ) yli vaikuttava jännite on tähtipistejännite ( $U_0$ ). (Rouvali, 2022)



KUVA 5. Yksivaiheinen sijaiskytkentä maasulkutilanteessa maasta erotetussa verkossa. (Rouvali, 2022)

Sijaiskytkennän avulla saadaan maasulkuvirran  $I_f$  lausekkeeksi kaavan 1 mukainen:

$$I_f = \frac{E}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega C R_f} U_v \quad (1)$$

Tähtipiste- eli nollajännite saadaan laskettua kaavan 2 avulla:

$$U_0 = \frac{1}{j3\omega C} * (-I_f) = \frac{-1}{1 + j3\omega C R_f} * U_v \quad (2)$$

missä:

$U_0$ =nollajännite

$I_f$ =maasulkuvirta

$R_f$ =vikaresistanssi

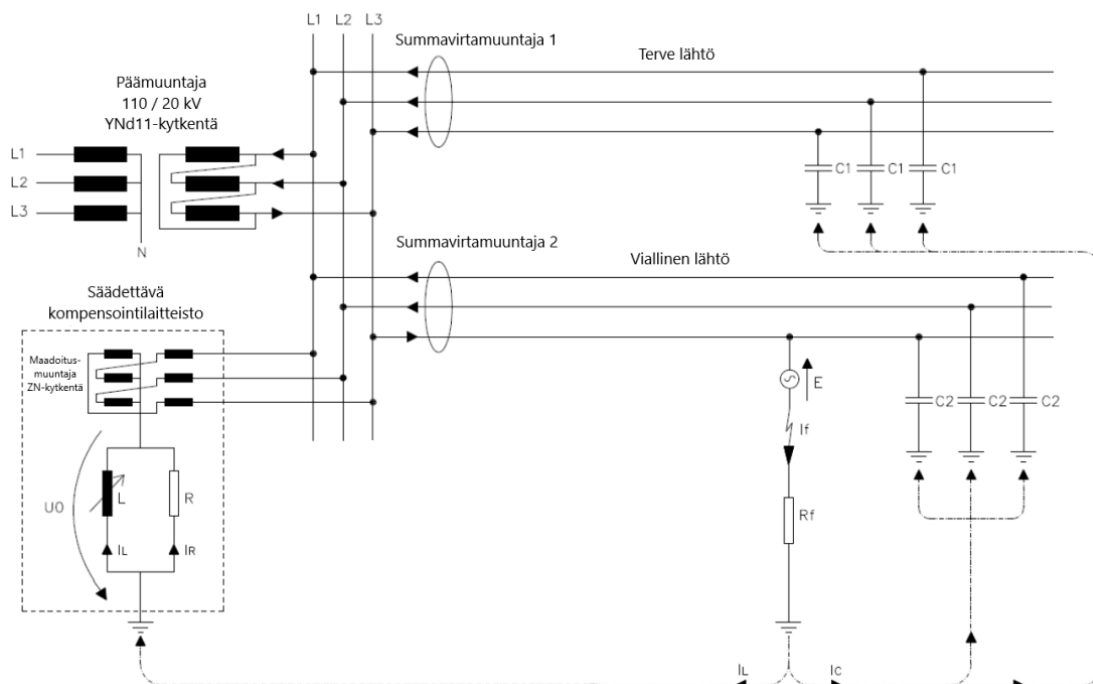
$U_v$ =vaihejännite

$3C$ =verkon kaikkien vaiheiden ja lähtöjen maakapasitanssi

$\omega$ =kulmataajuus= $2\pi * 50Hz$

### 3.2 Maasulkuvirran mallintaminen sammutetussa verkossa

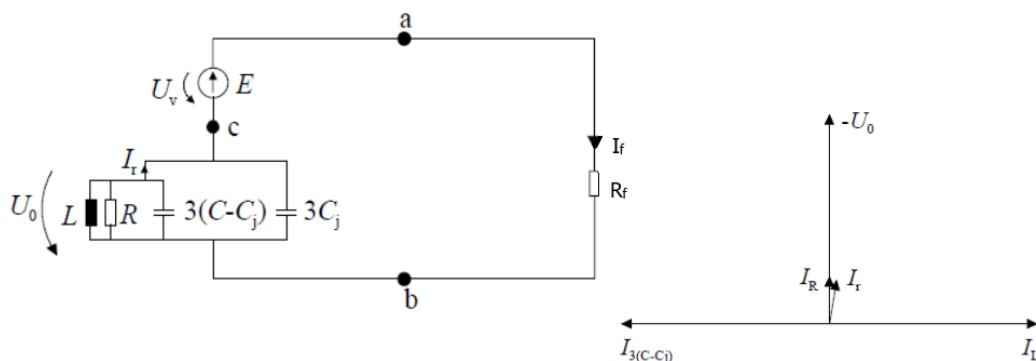
Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen on kytketty kela eli sammutuskuristin, mikä kompensoi kapasitiiviset maasulkuvirrat. Näin saadaan pienennettyä maasulkuvirtoja ja loivennettua viikapaikkaan palaavaa jännitettä. (Lakervi & Partanen, 2009) Kuvassa 6 nähdään yleinen tapa esittää kompensointikuristimen kytkentä verkon tähtipisteeseen. Monesti kuitenkin päämuuntajan kytkentäryhmä on tähtikolmiokytkentä esimerkiksi YNd11, jolloin tähtipistettä ei ole muuntajan toiossa. Tällöin asennetaan ZN-kytkentäinen maadoitusmuuntaja 20 kV kiskostoon, joka muodostaa tähtipisteen keinotekoisesti. Tämä mahdollistaa kompensointikuristimen kytkemisen nollapisteen ja maan välille. (Pyökkö, 2016)



KUVA 6. Maasulkuvirtojen mallinnus sammutetussa verkossa (Pylkkö, 2016)

Sammutetun verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä on kuvan 7 mukainen. Se on muuten samanlainen, kuin maasta erotetulla verkolla, paitsi tähtipisteen (c) ja maan (b) välille on lisätty sammutuskuristinta kuvaava induktanssi (L) ja lisävastusta kuvaava resistiivinen osa (R).

Sammutuskuristin viritetään sopivalle tasolle siten, että maakapasitanssien- ja kuristimen kautta kulkeva virta ovat lähes yhtä suuria. Näin maasulkuvirta  $I_f$  jää pieneksi, sillä kapasitiivinen ja induktiivinen virta ovat vastakkaisuuntaisia, kuten kuvan 8 osoitinpiirroksesta nähdään. Summavirtamuuntaja havaitsee virran  $I_r$ , joka määräytyy lähinnä tähtipistejännitteestä  $U_0$  ja sammutuskuristimen resistiivisestä osasta R. Tämä edellyttää sen, että virtapiiri on lähellä resonanssia. Osoitinpiirroksesta voidaan myös huomata jännitteen  $-U_0$  ja virran  $I_r$  olevan lähes samansuuntaiset. Kyseisen virran suuruuteen vaikuttaa enimmäkseen lisävastuksen arvo, mutta myös verkon resistiiviset vuotovirrat ja kaapeleiden resistanssit. (Rouvali, 2022)



KUVA 7. Yksivaiheinen sijaiskytkentä maasulkutilanteessa sammutetussa verkossa. (Rouvali, 2022)

Sijaiskytkennän avulla voidaan johtaa lauseke sammutetun verkon maasulkuvirralle  $I_f$

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (3)$$

ja tähtipistejännitteelle  $U_0$  kaavalla 4:

$$U_0 = \frac{-R}{R_f + R + \frac{RR_f(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}{1}} * U_v \quad (4)$$

missä:

$U_0$ =nollajännite

$I_f$ =maasulkuvirta

$R_f$ =vikaresistanssi

$U_v$ =vaihejännite

$C_0$ =yhden vaiheen maakapasitanssi (nollakapasitanssi?)

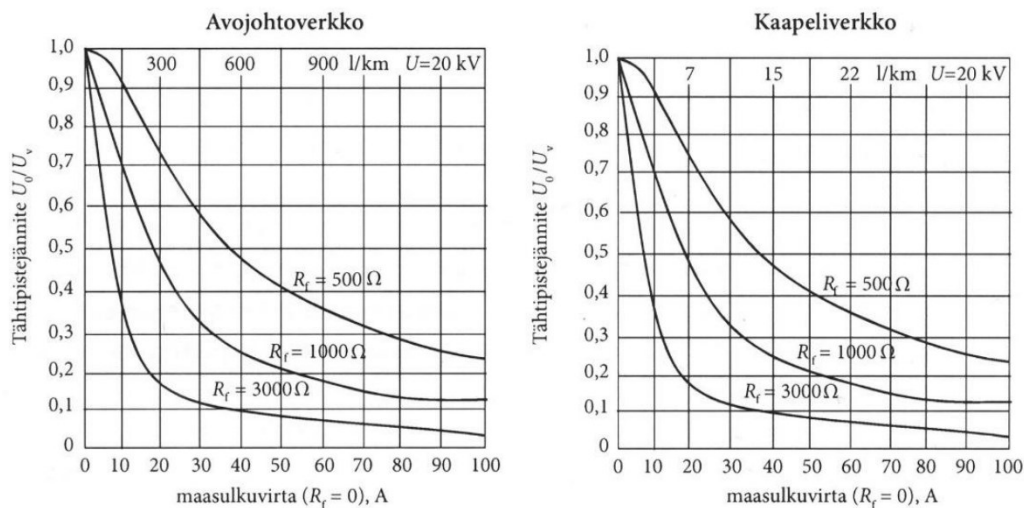
$\omega$ =kulmataajuus= $2\pi * 50\text{Hz}$

$L$ =kelan induktanssi

$R$ =lisävastuksen resistanssi

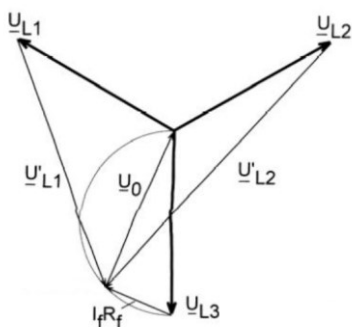
### 3.3 Maakaapeloinnin vaikutuksia maasulkuvirtoihin

Maasulkuvirrat ovat yleensä hyvin pieniä 5–100 A suuruisia, mikä ei poikkea kuormitusvirrasta juuriin. Maasulkuvirrat ovat suurempia, mitä pidempi verkko kokonaisuudessaan on. Esimerkiksi nykyään yleisesti käytetyn AHXAMK-W 3X150 maakaapelin synnyttämä maasulkuvirta on 2,8 A/km, toisin kuin avojohdolla se on vain keskimäärin 0,067 A/km. Tähtipistejännite puolestaan pienenee, mitä pidempi verkko ja mitä suurempi vikaresistanssi on. Kuvassa 8 on havainnollistettu verkon tähtipistejännite eri vikaresistanssin ja verkon pituuden funktiona. (Lakervi & Partanen, 2009) Huomataan, että esimerkiksi 600 km pituinen ilmajohtoverkko synnyttää yhtä suuren maasulkuvirran, kuin 15 km laajuinen maakaapeliverkko.



KUVA 8. Tähtipiste jännite verkon pituuden funktiona maasta erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2009)

Maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa terveiden vaiheiden ja maan välinen jännite nousee maasulun aikana jopa pääjännitettä suuremmaksi, kuten kuvassa 9 huomataan vaiheella  $U'_{L2}$ . Ylijännitteen suuruus riippuu erityisesti vikapaikan resistanssista. Mikäli vikaresistanssi  $R_f=0$ , terveiden vaiheiden jännite on pääjännitteen suuruinen. Vikavirta  $I_f$  on maasulkutilanteessa kapasitiivista, joten se muodostaa  $90^\circ$  kulman tähtipistejännitteen  $U_0$  välille. (Elovaara & Laiho, 1988)

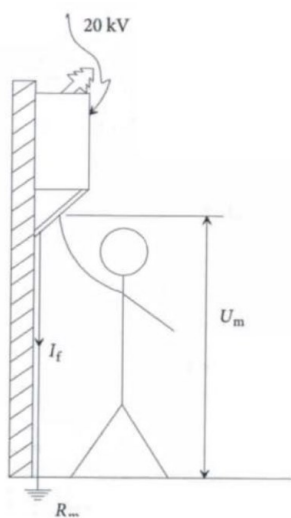


KUVA 9. Jännitteiden osoitinpiirros maasulun aikana ( $R_f > 0$ ). (Lakervi & Partanen, 2009)

#### 4 KOSKETUS- JA MAADOITUSJÄNNITTEET

Maasulkupaikassa syntyy myös maasulkuvirran aiheuttama maadoitusjännite. Esimerkiksi joissain tilanteissa maasulkuvirta voi mennä ylijännitesuojan läpi muuntajan maadoitukseen salaman aiheuttaman ylijännitteen takia. Maasulkuvirta ja maadoitusresistanssi synnyttää näin ollen maadoitusjännitteen kaavan 5 mukaisesti. (Lakervi & Partanen, 2009)

$$U_m = I_f * R_m \quad (5)$$



KUVA 10. Maadoitusjännite  $U_m$ , maasulkuvirta  $I_f$  ja maadoitusresistanssi  $R_f$ . (Lakervi & Partanen, 2009)

## 4.1 Sähköturvallisuusmääräyksiä

Maadoitusjännite aiheuttaa ihmisen kosketeltavissa olevan niin sanotun kosketusjännitteen. Standardi SFS 6001 määrittelee sallitut kosketusjännitearvot erilaisille kosketusjännitetapauksille, kuten virran kulku vasemmasta kädestä jalkoihin tai kädestä käteen. Sallitut kosketusjännitteet voi laskea kaavan 6 mukaisesti:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) * \frac{1}{HF} * Z_t(U_t) * BF \quad (6)$$

missä:

$U_{Tp}$  = Sallittu kosketusjännite

$U_t$  = Kosketusjännite

$t_f$  = Vian kestoajaka

$I_B(t_f)$  = Kehon kautta kulkevan virran raja-arvot. Perustuu julkaisuun IEC/TS 60479-1, jonka mukaan sydänkammiövärinän todennäköisyys on pienempi kuin 5 %.  $I_B$  riippuu vian kestoajasta.

$HF$  = Sydämen virtakerroin. Perustuu julkaisun IEC/TS 60479-1 taulukkoon 12, jossa kerroin on:

1 kosketusjännitteen ollessa vasemmasta kädestä jalkoihin

0,8 kosketusjännitteen ollessa oikeasta kädestä jalkoihin

0,4 kosketusjännitteen ollessa kädestä käteen

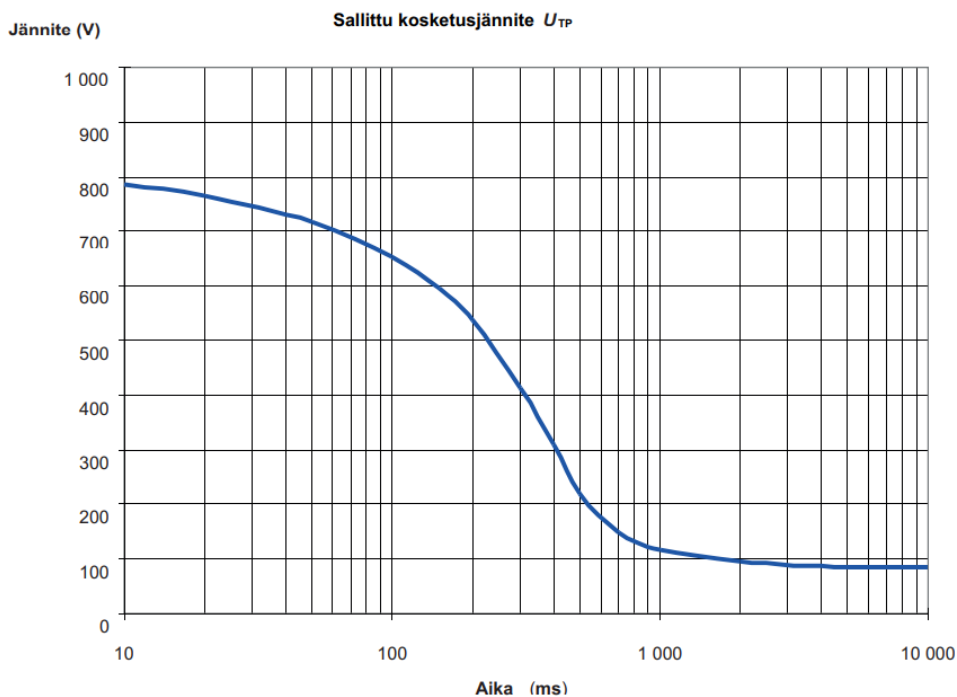
$Z_t(U_t)$  = Kehon impedanssi. Perustuu julkaisuun IEC/TS 60479-1, jonka mukaan 50 %:lla väestöstä impedanssi on enintään tämän suuruinen.

$BF$  = Kehon kerroin. Perustuu julkaisuun IEC/TS 60479-1, jossa kerroin on:

0,75 kädestä jalkoihin

0,5 käsistä jalkoihin.

Kuvan 11 sallitut kosketusjännitteet perustuvat neljän erilaisen kosketusjännitetapauksen painotettuun keskiarvoon, jossa painotus on 1, mikäli kosketusjännite on vasemmasta, oikeasta, tai molemmista käsistä jalkoihin. Painotus on 0,7 mikäli kosketusjännite on kädestä käteen. Lisäresistansseja, kuten jalkineita tai pintamateriaaleja ei ole otettu huomioon. (Suurjännitesähköasennukset, 2018 s. 101)



KUVA 11. Sallitut kosketusjännitteet. (Suurjännitesähköasennukset, 2018 s. 93)

Maadoitusjännite  $U_m$  ei saisi ylittyä kaavan 7 mukaisesti:

$$U_m \leq k * U_{TP} \quad (7)$$

missä:

$U_m$ =maadoitusjännite

$k$ =kerroin

$U_{TP}$ =Sallittu kosketusjännite

Kerroin  $k$  saa Suomessa yleensä korkeintaan arvon 2, jolloin muuntamon ja pienjänniteverkko on maadoitettu standardien mukaisesti. Mikäli arvon 2 saavuttaminen ei onnistu esimerkiksi huonosti johtavan maaperän tai taloudellisten syiden vuoksi, voidaan käyttää arvoa 4. Joissain tapauksissa voidaan käyttää jopa arvoa 5, jos esimerkiksi koko muuntopiiri on huonosti johtavalla maaperällä.

Esimerkiksi 1 sekunnin laukaisuajalla kertoimen  $k$  ollessa 2, sallituksi maadoitusjännitteeksi saadaan kaavan 7 ja taulukon 1 mukaisesti  $2 * 117 \text{ V} = 234 \text{ V}$ . Mikäli maasulkuvirta olisi 40 A, suurin sallittu maadoitusresistanssi olisi  $\frac{234 \text{ V}}{40 \text{ A}} = 5,85 \text{ } \Omega$ . (Lakervi & Partanen s.188)

TAULUKKO 1. Sallitut kosketusjännitteet  $U_{TP}$  vian kestoajan  $t_f$  funktiona. (Suurjännitesähköasennukset, 2018 s. 104)

Vian kesto aika $t_f$ s	Sallittu kosketusjännite $U_{TP}$ V
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Maadoitusjännitevaatimus voidaan saavuttaa käytännössä kolmella eri keinolla: parantamalla maadoituksia eli pienentämällä maadoitusresistanssia, lyhentämällä maasulkusuojuuksen laukaisuaikaa ja pienentämällä maasulkuvirtaa. (Lakervi & Partanen s. 189) Maakaapeloinnin lisääntyessä maasulkuvirrat kuitenkin lisääntyvät huomattavasti ja aiheuttavat näin ollen ongelmia maadoitus- ja kosketusjännitteissä.

Standardin mukaan kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät on varustettava automaattisella maasulkusuojuuksella, jolla maasulku voidaan havaita ja kytkeä pois. Yleensä pois kytkeminen tapahtuu automaattisesti. Käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, jos verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys tarvitaan siirtää sopivampaan ajankohtaan etukäteen laadittujen ohjeiden mukaisesti. Käsin tapahtuvaa poiskytkentää ja hälytystä käytettäessä on täyttyvä seuraavat ehdot: (Suurjänniteasennukset, 2018)

*”- Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään.*

*- Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan välittömästi verkon käyttöä valvovan henkilöstön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pitkempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.*

*- Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla muualla kuin laajassa maadoitusverkossa pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V.*

*- Kaksoismaasulkutilanteessa pitää maasulut kytkeä pois.*

*-Tietoliikenneverkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.”(SESKO ry, 2018)*

## 5 MAASULKUVIRTOJEN KOMPENSOINTI

Maasulkukompensoinnin tarkoitus on vähentää maasulkuvirtoja ja näin ollen hallita kosketusjännitetasoa. Lisäksi todennäköisyys valokaaren itsestään sammumiselle kasvaa, sillä kompensoinnilla saadaan pienennettyä vikavirtaa ja valokaarelta loppuu energia jatkaa palamistaan. Kompensointi myös loiventaa vikakohtaan palaavaa jännitettä ja vähentää todennäköisyyttä valokaaren uudelleen syttymiselle. Tämä auttaa vähentämään pikajälleenkytkentöjen ja lyhyiden sähkökatkojen määrää asiakkaille. Kompensoinnin ansiosta vikavirrat ja kosketusjännitteet saadaan siis pidettyä kurissa, mikä voi säästää taas maadoituskustannuksissa. (Pylkkö, 2016)

Kompensointilaitteiden toimintaperiaate on kumota verkon maakapasitanssit likimain samansuuruisella induktanssiarvolla. Maasulkuvirtojen kompensointi voidaan suorittaa keskitetysti sähköasemalla, jossa kompensointikuristin kytketään päämuuntajan tai maadoitusmuuntajan muodostaman tähtipisteen ja maapotentiaalilin välille. Toinen vaihtoehto on käyttää hajautettua kompensointia, jossa kompensointilaitteet asennetaan hajautetusti keskelle verkkoa. Hajautettua kompensointia käytetään yleensä pitkillä johtolähdöillä ja haja-asutusalueella. (Multirel Oy)

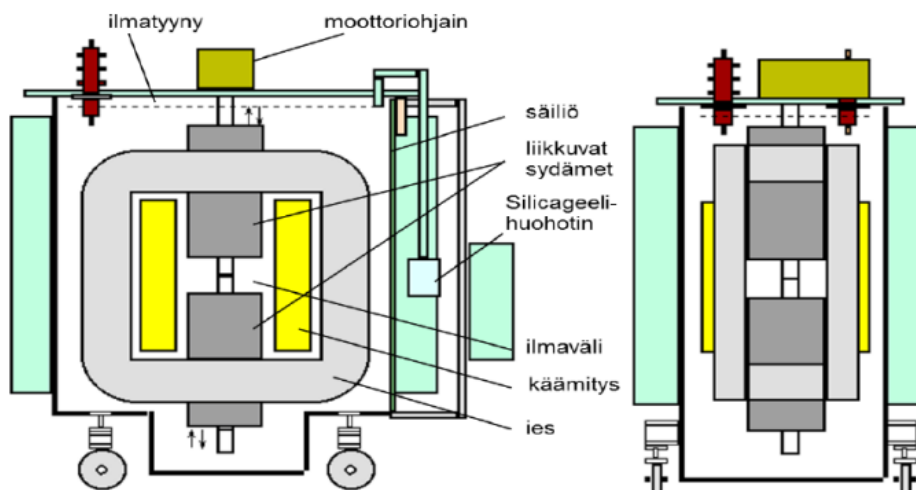


KUVA 12. Säädettä kompensointikuristin Siilinjärven sähköasemalla

### 5.1 Keskitetty kompensointi

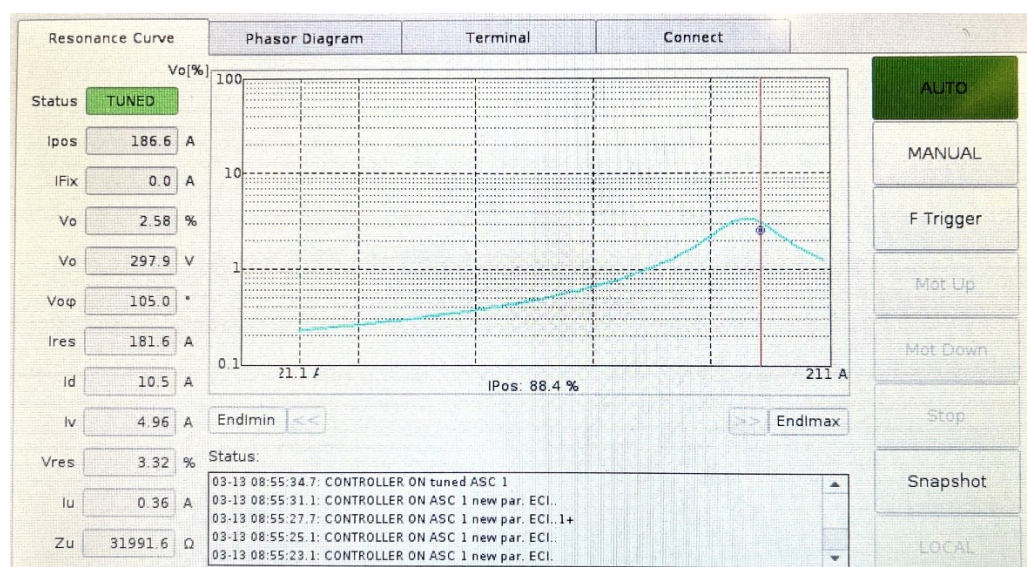
Keskitetyn kompensoinnin voi toteuttaa sähköasemalla joko kiinteällä tai säädettävällä kuristimella. Säädettävän kuristimen reaktanssia voidaan säätää yleensä sähkömoottorin avulla siten, että kelan

keskellä olevien rautasydänten ilmarakoa muutetaan. Näin saadaan säädettyä kuristimen reaktanssia portaattomasti ja saadaan koko ajan pidettyä verkon vaatima asetteluarvo yllä eikä ylikompensointia tapahdu kytkentätilan muutoksista huolimatta. Kuvassa 13 on vielä havainnollistettu säädetävän kompensointikuristimen rakennetta. (Pylkkö, 2016)



KUVA 13. Kompensointikuristimen rakenne (Pylkkö, 2016)

Kompensoinnin säädön ohjaukseen käytetään resonanssisäätäjää, joka mittaa jatkuvasti verkon maasulkuvirran suuruutta ja asettelee kompensoinnin oikealle tasolle. Toiminta perustuu mittaukseen, jossa säätäjä etsii nollijännitteen huippuarvon, jolloin johtojen kapasitanssi ja kelan induktanssi ovat yhtä suuret eli niin sanotusti resonanssissa. (Pylkkö, 2016) Nykyään kompensoinnin säätöön voidaan käyttää myös virtainjektioilaitteistoja, jossa resonanssi käyrän muodostus tapahtuu nopeammin verkkoon syötettyjen virtaimpulssien taajuusvasteiden avulla. (Multirel Oy) Kuvassa 14 nähdään Siilinjärven sähköaseman 2. päämuuntajan virtainjektioilaitteisto. Resonanssipiste  $I_{res}$  on 181,6 A, mutta suojauslaitteiden toimivuuden kannalta keskitetty kompensointi on asetettu muutama ampeerin ylikompensoiduksi, jolloin kelan asento  $I_{pos}$  on 186,6 A.



KUVA 14. Virtainjektioilaitteisto

Kiinteässä kompensoinnissa puolestaan ei ole mahdollisuutta jatkuvaan ja portaattomaan reaktanssin säätöön eikä se voi mukautua verkon kytkentätilanteisiin. Reaktanssin asettelua voidaan kuitenkin säätää manuaalisesti portaittain, jotka voivat olla esimerkiksi 25 A välein. Kelan säätö tapahtuu erillisellä väliottokytkimellä jännitteettömänä muuntajan kannelta. (Pylkkö, 2016) Kuvassa 15 on keskitetty 50 A:n maasulkuvirran kompensointilaitteisto, joka sisältää myös loistehon kompensoinnin.



KUVA 15. Kiinteä kompensointilaitteisto 25–50 A 20.5kV (Sonepar Oy)

## 5.2 Hajautettu kompensointi

Maasulkuvirtojen kompensointi voidaan toteuttaa myös verkon varrelle sijoitelluilla kompensointilaitteilla, jota kutsutaan hajautetuksi kompensoinniksi. Sitä käytetään monesti myös keskitetyn kompensoinnin rinnalla, jolloin maasulkuvirtojen lisääntyessä keskitetyn kompensoinnin mitoitus ei tarvitsisi välttämättä kasvattaa. Hajautetun kompensoinnin avulla saadaan maasulkuvirtoja pienennettyä jo lähellä vikapaikkaa, mikä pienentää verkossa kiertäviä vikavirtoja. Kuvassa 16 nähdään hajautettu kompensointilaitte shunt-reaktori, joka sijaitsee lähellä Kuopion lentoasemaa.



KUVA 16. Shunt-reaktori

Kompensointi on monesti jakelumuuntajan yhteydessä. Tällaisia laitteita sanotaan kelamuuntajiksi, jossa perinteisen jakelumuuntajan lisäksi samaan säiliöön on rakennettu ZN-kytkennällä tähtipiste ja siihen yhdistetty induktiivinen kela. Kelan säätöalue on yleensä 5–15 A ja säätö tapahtuu erillisellä välitokytkimellä muuntajan kannelta jännitteettömänä. Kelamuuntaja on kustannustehokas ratkaisu hajautetussa kompensoinnissa, sillä siinä ei tarvita erillistä maadoitusmuuntajaa kelan kytkemiseen. (Pylkkö, 2016) (Multirel Oy)

### 5.3 Maadoitusmuuntaja

Sähköverkkojen päämuuntajat ovat kytkentäryhmältään yleensä tyyppiä YNd11, mikä tarkoittaa sitä, ettei niillä ole tähtipisteulosottoa ja näin ollen maasulkuvirran kompensointikuristinta ei voida kytkeä suoraan päämuuntajan toisiosion tähtipisteeseen. Näin ollen tähtipiste joudutaan tekemään keinotekoisesti ZN-kytkentäryhmäisen maadoitusmuuntajan avulla. Maadoitusmuuntaja voi myös monissa tapauksissa syöttää sähköasemalle omakäyttösähkön. Tällöin muuntajan ja kompensointikelan välille asennetaan erotinkoje, jotta kompensointilaite voidaan kytkeä pois verkosta katkaisematta omakäyttösähkön syöttöä. (Multirel Oy, ei pvm) (Pylkkö, 2016) Kuvassa 17 on maadoitusmuuntaja Siilinjärven sähköasemalta.



KUVA 17. Maadoitusmuuntaja Siilinjärven sähköasemalla

## 6 MAASULKUVIRTOJEN KOMPENSOINTI SAVON VOIMAN VERKOSSA

Savon Voiman verkossa on tällä hetkellä 41 omaa sähköasemaa, joista suurimassa osassa on maasulkuvirtojen keskitetty kompensointikuristin eli ovat niin sanotusti sammutettuja verkkoja. Pienemmillä sähköasemilla ei ole välttämättä keskitettyä kompensointia, jos niiden perässä ei ole paljon maakaapelia. Näitä kutsutaan maasta erotetuiksi verkoiksi. Hajautettu kompensointi on toteutettu pääsääntöisesti kiinteillä 5–15 A kompensointilaitteilla siten, ettei missään kytkentätilanteessa tapahtuisi ylikompensointia. Näin maasulkusuojaus toimii suunnitellusti eikä esimerkiksi katkaise vahingossa ehjänä olevaa johtolähtöä. Loput maasulkuvirrat kompensoidaan sähköasemien keskitetyllä kompensoinnilla, joka pystyy säätämään kompensoinnin oikealle tasolle verkon kytkentätilanteiden muuttuessa. Keskitetty kompensointi on asetettu Savon Voiman verkossa suunnilleen 2–5 ampeeria ylikompensoinnin puolelle maasulkusuojauksen toimivuuden takia.

### 6.1 Nykyisen kompensoinnin tila

Nykyisen kompensoinnin tilannetta lähdettiin tutkimaan siten, että katsottiin kuinka paljon maakaapelia, on kunkin päämuuntajan takana verkon normaalissa kytkentätilanteessa. Eri poikkipintaisille maakaapeleille annettiin niille ominaiset sähkötekniset arvot maasulkuvirtojen osalta ja näin saatiin selville, kuinka paljon nykyinen verkko tuottaa maasulkuvirtaa. Tämän jälkeen tutkittiin, kuinka pal-

jon kiinteää hajautettua kompensointia kunkin päämuuntajan takana on sekä onko alustavasti mahdollisuutta säätää kompensointilaitteita isommalle. Lisäksi katsottiin sähköasemien keskitetyn kompensoinnin koko ja säätyvän kelan asento. Näiden tietojen pohjalta oli tarkoitus katsoa, kuinka paljon kompensointi varaa jää tavoiteverkossa sähköasemalla sekä verrata niitä tuloksia automaattisesti säätyvän kompensointikelan asentoon.

Teorian mukaan kaapeleiden aiheuttamat maasulkuvirrat ja yhteenlaskettu kompensointi olisivat samansuuruisia. Tulokset vaihtelivat kuitenkin selvästi yli- ja alikompensoinnin välillä. Nämä virheet johtuivat pääosin siitä, että säätyvän kompensointikelan asento on katsottu Scadasta ja kaapelin pituudet päämuuntajittain taas NIS:stä, jossa verkon jakorajat voivat vaihdella. Lisäksi eri valmistajien kaapeleiden maasulkuvirtojen määrät voivat vaihdella, vaikka poikkipinta-ala olisi yhtä suuret. Myöskään ilmajohtojen aiheuttamaa maasulkuvirtaa ei ole otettu huomioon, mikä voi aiheuttaa pientä laskuvirhettä.

Muutamien sähköasemien kompensointikelan koko oli jäämässä pieneksi tavoiteverkossa, mutta näille asemille oli jo suunnitteilla uusi isompi kompensointilaitteisto.

## 6.2 Tavoiteverkon suunnittelu vuodelle 2036

Maasulkuvirtojen kasvun ja sitä myötä kompensoinnin tarpeen ennustaminen 12 vuoden päähän tulevaisuuteen on haastavaa. Ennustetta lähdettiin kuitenkin tekemään suunnittelemalla Savon Voiman sähköverkkoa maakaapeloinnin osalta. Suunnittelu tehtiin NIS:in omapiirtotyökalulla, josta saatiin lopuksi suunniteltujen kaapeleiden ja ilmajohtojen pituudet päämuuntajittain.

Ensin piirrettiin valmiiksi tehdyt suunnitelmat, joita oli vuosille 2024–2026. Osa näistä suunnitelmista saattaa tosin toteutua myöhemmin, mutta se on silti hyvä vertailukohta sille, kuinka paljon maakaapelia ja ilmajohtoa rakennetaan noin 3 vuoden aikana. Lisäksi nähdään millä sähköasemalla keskitetyn kompensoinnin koko käy mahdollisesti pieneksi tavoiteverkon rakentamisessa ensimmäisinä. Kuten taulukosta 2 huomataan, maakaapelia suunniteltiin 688 km ja ilmajohtoa lisäksi 278 km. Energiaviraston hinnoilla on arvioitu mitä tämä verkko tulisi kustantamaan. Muuntamoiden määrä on keskimäärin noin 1 kpl keskijänniteverkon kilometriä kohden.

TAULUKKO 2. Vuosien 2024–26 suunniteltu verkon pituus ja hintaennuste Energiaviraston hinnoilla

Maakaapelointia 2024-2026 (km):	688,0
Ilmajohdon rakentamista 2024-2026 (km):	278,0
Puistomuuntamoiden määrä (kpl):	619,0
Pylväsmuuntamoiden määrä (kpl):	250,0
Puistomuuntamon hinta (€):	22 500,0
Pylväsmuuntamon hinta (€):	10 000,0
Maakaapeloinnin keskihinta (€/km):	71 000,0
Ilmajohdon rakentamisen keskihinta (€/km):	23 900,0
Yhteensä (€):	71 919 700,0
Hinta(€)/vuosi:	23 975 400,0

Tämän jälkeen katsottiin valmiit suunnitelma-alueet, mihin olisi tarkoitus tehdä verkon saneerausta suurin piirtein vuosien 2027–3030 aikana. Näihin alueisiin verkko suunniteltiin Savon Voima Verkon

tavoitteiden mukaisesti. Maakaapelia suunniteltiin arviolta 626 km ja ilmajohtoa 705 km. Maakaapeloinnin vuosittainen määrä näyttäisi hieman laskevan ja ilmajohtoon taas lisääntyvän edellisvuosiin verrattuna. Tämä on ymmärrettävää, sillä vuoteen 2027 mennessä on kaapeloitu jo kriittisimmät ja suurimmat kaapelointikohteet, jonka jälkeen kaapeloinnin määrä nykyisen suunnitelman mukaan hieman rauhoittuu ja painopiste siirtyy ilmajohtoon korjausvelan kuitaamiseen. Taulukosta 3 nähdään vielä suunnitellun verkon pituus ja energiaviraston hinnoilla laskettu kustannusarvio.

TAULUKKO 3. Vuosien 2027–30 suunniteltu verkon pituus ja hintaennuste Energiaviraston hinnoilla

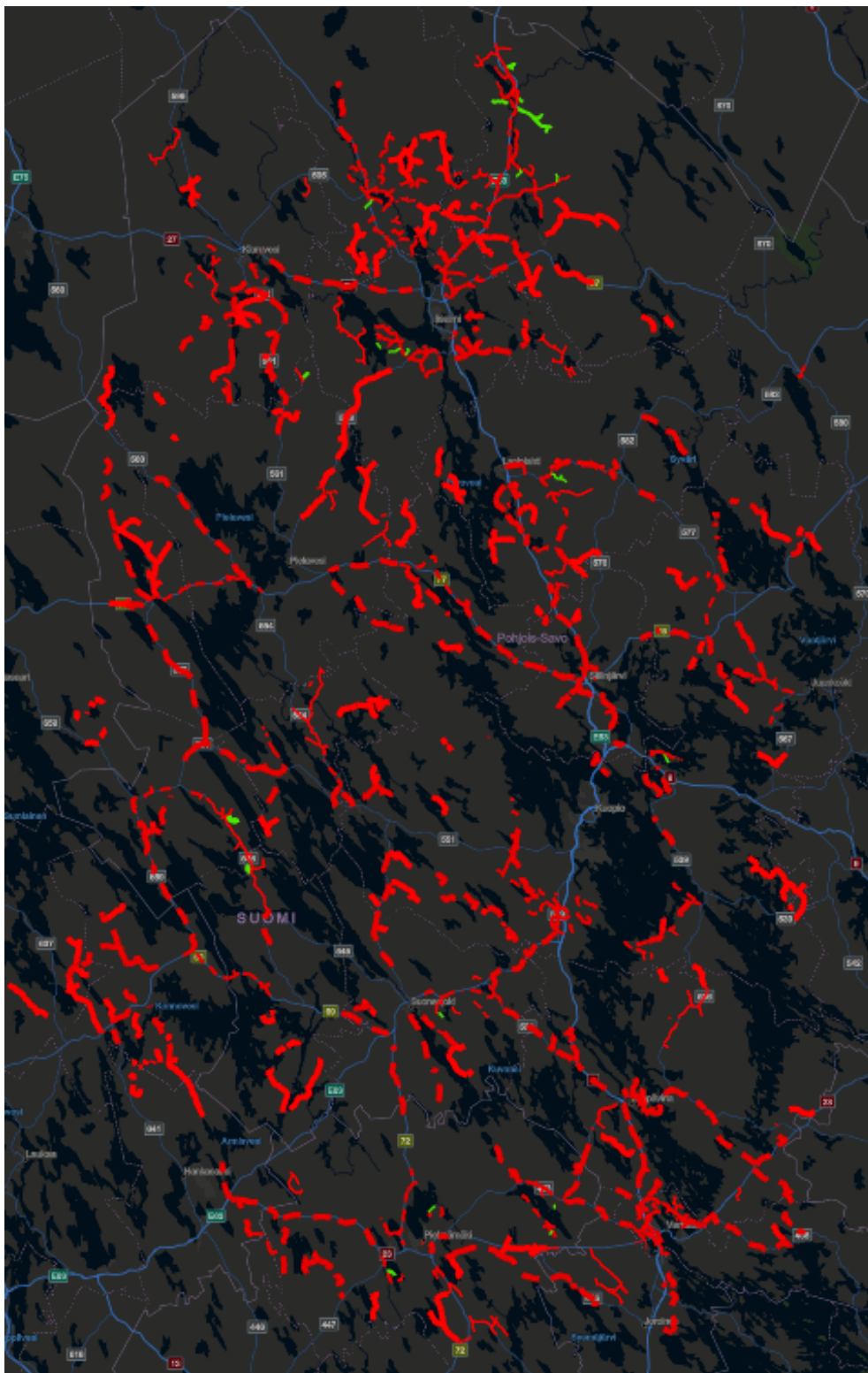
Maakaapelointia 2027-2030 (km):	626,0
Ilmajohdon rakentamista 2027-2030 (km):	640,0
Puistomuuntamoiden määrä (kpl):	563,0
Pylväsmuuntamoiden määrä (kpl):	576,0
Puistomuuntamon hinta (€):	22 500,0
Pylväsmuuntamon hinta (€):	10 000,0
Maakaapeloinnin keskihinta (€/km):	71 000,0
Ilmajohdon rakentamisen keskihinta (€/km):	23 900,0
Yhteensä (€):	78 169 500,0
Hinta(€)/vuosi:	19 542 375,0

Seuraavaksi tavoiteverkon suunnittelussa oli mietittävä seuraavaksi tärkeimmät kohteet erityisesti kaapeloinnin osalta. Valittiin kaikki asemakaava-alueet sekä runkoyhteydet, jotka kaapeloitiin lähes kokonaan uusimpia ilmajohtoja lukuun ottamatta. Lisäksi pyrittiin kaapeloimaan kohteet, jossa energiaa kuluu paljon. Toteutusajankohta tälle olisi 2031–2036, jolloin maakaapelia tulisi lisää arviolta 522 km. Ilmajohdolle ei tehty enää tarkempaa suunnittelua, mutta kaapeloinnin jälkeen olisi mahdollista rakentaa vielä esimerkiksi 1500 km ilmajohtoa. Tällöin keskijänniteverkon ikä ei ylittäisi 55 vuotta. Tällä tavalla mallinnettuna kaapelointiaste olisi noin 36,6 %, mikäli ajatellaan uuden kaapelin korvaavan vanhan ilmajohtoon. Tilannehan ei aivan näin tule olemaan, mutta on suuntaa antava arvio. Taulukosta nähdään edelleen suunnitellun verkon pituus ja hintaennuste vuosille 2031–36.

TAULUKKO 4. Vuosien 2031–36 suunniteltu verkon pituus ja hintaennuste Energiaviraston hinnoilla

Maakaapelointia 2031-2036 (km):	522,0
Ilmajohdon rakentamista 2031-2036 (km):	1 500,0
Puistomuuntamoiden määrä (kpl):	470,0
Pylväsmuuntamoiden määrä (kpl):	1 350,0
Puistomuuntamon hinta (€):	22 500,0
Pylväsmuuntamon hinta (€):	10 000,0
Maakaapeloinnin keskihinta (€/km):	71 000,0
Ilmajohdon rakentamisen keskihinta (€/km):	23 900,0
Yhteensä (€):	96 987 000,0
Hinta(€)/vuosi:	16 164 500,0

Kuvassa 18 nähdään Savon Voima Verkon suunnittelutiimin tekemä alustava tavoiteverkko vuodelle 2036. Katkoviiva tarkoittaa maakaapelia ja normaali viiva ilmajohtoa. Punainen kapea viiva kuvaa verkkoprojekteja, joiden on tarkoitus toteutua vuosien 2024–2026 aikana. Paksumpi punainen viiva taas kuvaa tämän jälkeen toteutuvia töitä vuoteen 2036 asti. Vihreä viiva kuvaa 1 kV verkkoa, jota on suunniteltu vain vuoteen 2026 asti. Kuvassa on siis alustava hahmotelma tavoiteverkosta ja siinä ei näy tämänhetkistä olemassa olevaa verkkoa ollenkaan.

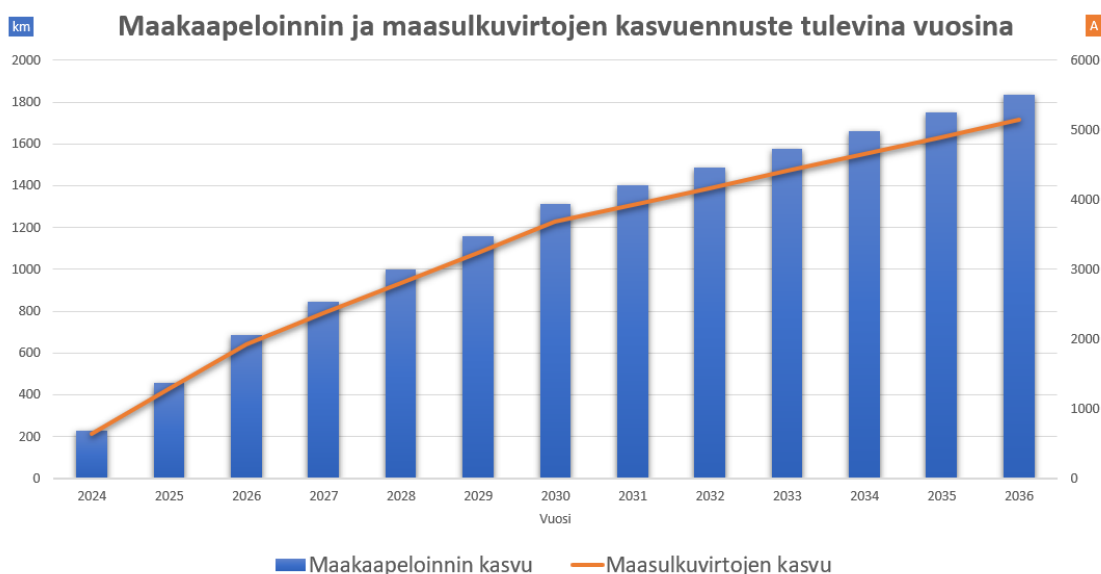


KUVA 18. Tavoiteverkko 2036 kaapeloinnin lisäyksen osalta

Suunnittelussa ei ole otettu huomioon tulevia sähköasemia, sillä niiden sijainnista ja toteutuksesta ei ole vielä varmuutta. Uusi sähköasema voi keventää jonkun toisen sähköaseman kuormitusta ja näin ollen maasulkuvirran kompensoinnin tarvetta. Tämä on otettava huomioon, kun valitaan sähköasemien kompensointeja tarkempaan tarkasteluun. Lisäksi ei ole täyttä varmuutta voidaanko kaikille alueille kaivaa maakaapelia kallioperäisen maan takia, vaikka tätäkin on pyritty ottamaan huomioon tavoiteverkon suunnittelussa. Maakaapelin muuttuminen ilmajohdoksi vaikuttaisi maasulkujen vähenemiseen selvästi. Myös kaapelin paksuudessa ja niiden pituuksissa voi tulla muutoksia, jotka vaikuttavat maasulkuvirtojen määrään. Näiden vaikutus on kuitenkin keskitetylle kompensointikelalle suhteellisen pieni, mikäli verkkoa on kompensoitu hajautetusti. Kaiken kaikkiaan tämä on siis tarkin ennuste, mitä on pystytty tekemään.

### 6.3 Kompensoinnin tarve tulevaisuudessa

Maakaapelia tulisi edellä mainittujen suunnitelmien perusteella lisää koko verkkoalueelle noin 1836 km, mikä tuottaa arviolta 5140 A maasulkuvirtaa. Tämä on laskettu koko verkkoalueen kaapeleiden keskimääräisellä maasulkuvirran tuotolla, mikä on suunnilleen 2,8 ampeeria jokaista kilometriä kohden. Se tarkoittaisi maasulkuvirtojen kasvua jopa 70 %, mikä on hyvin merkittävä määrä. Kuvassa 19 on kumulatiivisesti havainnollistettu, kuinka maasulkuvirrat kasvavat maakaapeloinnin myötä tulevina vuosina. Ilmajohdon vähentymisen vaikutusta ei ole otettu huomioon, sillä niiden vaikutukset ovat mitättömän pieniä tämän työn kannalta.



KUVA 19. Maakaapeloinnin ja maasulkuvirtojen kasvuennuste tulevina vuosina

Työn tarkoitus on kuitenkin löytää analysoinnin pohjalta sähköasemat, joiden keskitetty kompensointi tulee jäämään alimitoitetuksi. Tämä vaatii tiedon siitä, kuinka paljon maasulkuvirtoja tulee lisää kunkin päämuuntajan taakse. Tavoiteverkon kaapelit on jaoteltu karkeasti omien päämuuntajien taakse, jolloin on saatu tietää maakaapeleiden pituudet ja näin ollen lisääntyvät maasulkuvirrat päämuuntajittain. Jokainen johto on tarkistettu vielä käsin, että ne ovat merkattuna varmasti oikean päämuuntajan takana verkon ollessa normaalissa kytkentätilassa.

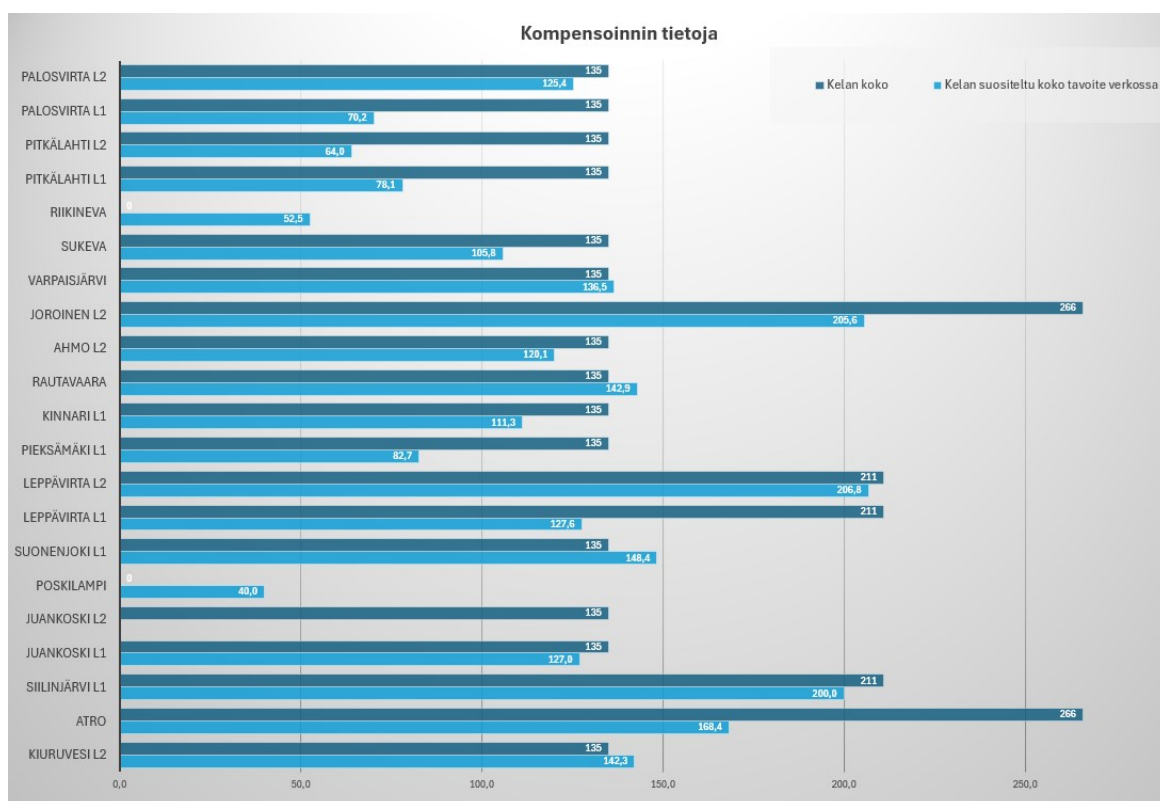
## 6.4 Sähköasemien valinta ja tarkempi kompensoinnin suunnittelu

Sähköasemien kompensoinnin tilanteen vertailun kannalta oli järkevintä luoda Excel-taulukko, josta nähdään tärkeimmät kompensointiin liittyvät asiat, kuten nykyisen kompensoinnin kapasiteetti, maasulkuvirtojen kasvu ja mikä kelan koko olisi hyvä olla tavoiteverkossa ja paljon muuta. Tämän pohjalta pystyttiin jakamaan asemat kriittisyys järjestykseen tavoiteverkossa kompensoinnin kannalta. Alla on esitelty sähköasemien neljä erilaista kompensoinnin tilannetta ja pohdittu niihin kompensoinnin ratkaisuja.

### 6.4.1 Asemat, joiden kompensointi ei tarvitse muutoksia tavoiteverkossa

Kuvassa 20 nähdään lista niistä asemista, joilla maasulkuvirrat näillä näkymin eivät tulisi ylittämään kompensoinnin kapasiteettiaan ainakaan vuoteen 2036 mennessä. Tähän voi tulla tietenkin muutoksia, mikäli jonkun sähköaseman verkossa toteutetaan esimerkiksi verkon vahvistamista maakaapeliksi, mistä ei ole vielä tietoa.

Tummansinisellä näkyy kompensointikelan tämänhetkinen koko. Pienimmät asemat ovat maasta erotettuja ja niillä ei ole välttämätöntä tarvetta sammutukselle. Vaaleamman sinisellä oleva palkki kuvaa kelan suositeltua kokoa tavoiteverkossa vuonna 2036. Siihen on summattu keskitetyn kompensoinnin kelan tämänhetkinen asento sekä keskitetyille kompensoinnille kohdistuvat maasulkuvirrat tavoiteverkossa. Sen päälle on lisätty 40 A varmuusvara, jotta kela olisi valmis kompensoimaan lisää maasulkuvirtaa verkon kytkentätilanteen muuttuessa. Huomataan, että useimmilla asemilla kelan suositeltu koko tavoiteverkossa ei ylitä nykyistä kelan kokoa, mikä tarkoittaa kompensoinnin olevan kunnossa tavoiteverkossa. Muutamien asemien kohdalla tavoiteverkon suositeltu kelan koko ylittää tämän hetken kelan koon, mutta ylitys on alle 40 A varmuusvaran, joten nämäkään kohteet eivät ole näillä näkymin kovin kriittisiä. Näitä asemia ovat Varpaisjärvi, Rautavaara, Suonenjoki ja Kiuvesi.

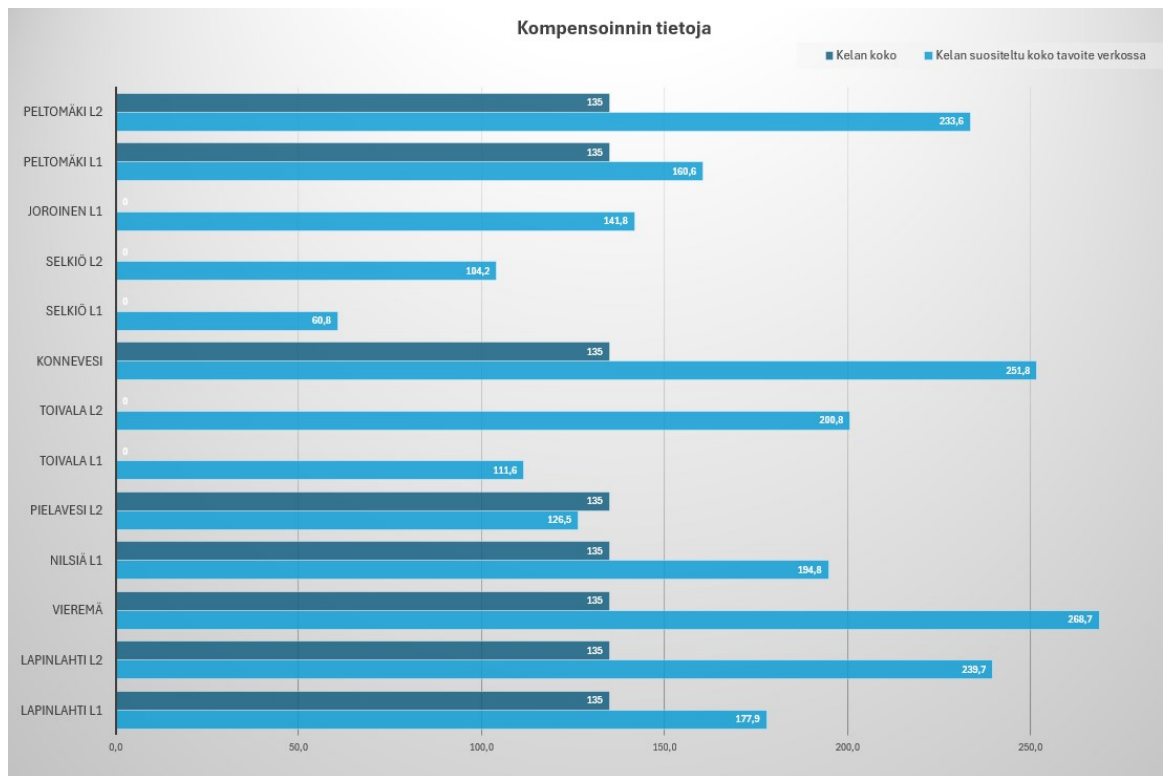


KUVA 20. Asemien kompensointi kunnossa

#### 6.4.2 Asemat, jonne on suunnitteilla tai rakenteilla isompi kompensointilaitteisto

Kuvan 21 sähköasemille on jo suunnitteilla tai rakenteilla isompi kompensointikela. Osalla asemista kompensointi käy pieneksi tavoiteverkossa ja toisilla asemilla ei ole vielä ollenkaan keskitettyä kompensointia. Myös taulukkomme perusteella nykyinen kela tulisi jäämään pieneksi ja uuden kelan koko tulisi olla monen aseman kohdalla 211 A tai 266 A. Mikäli hintaero on näiden kelojen välillä pieni, itse olisin isomman 266 A kannalla, ettei mitoitus kävisi heti pieneksi.

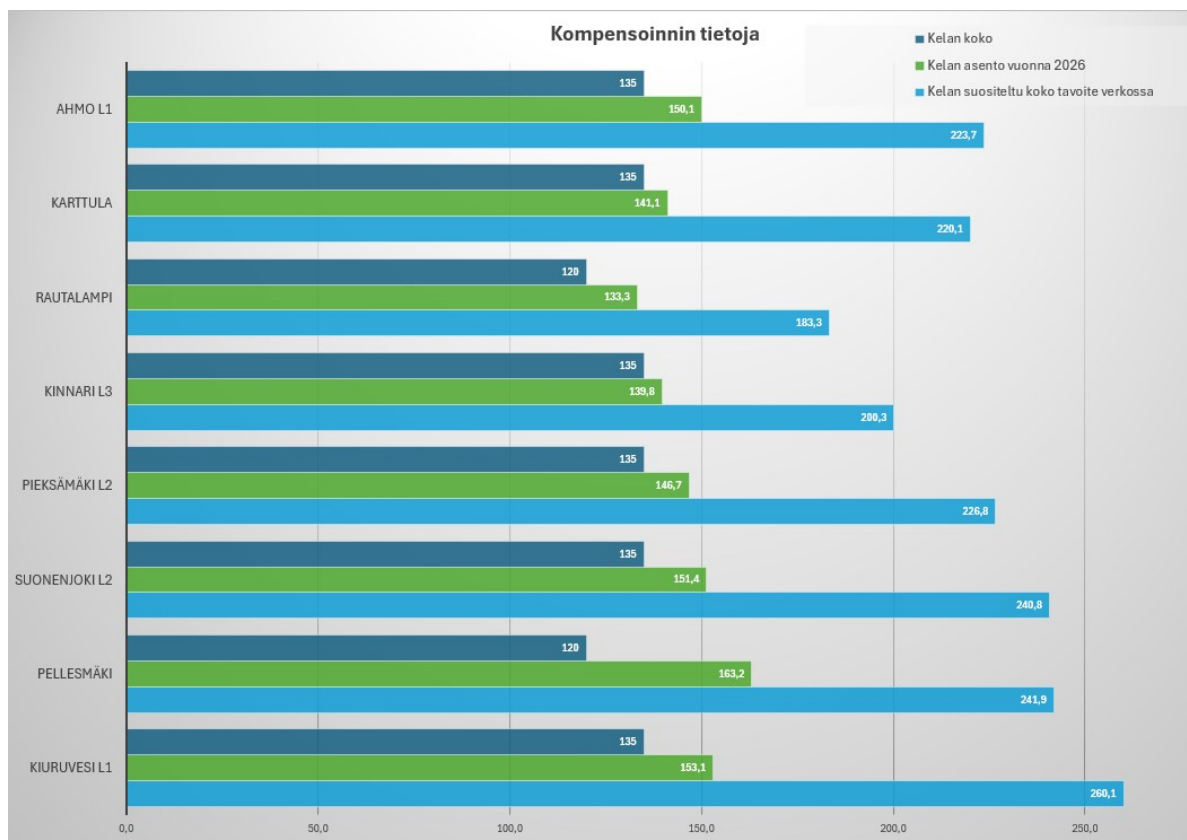
Selkiön asemalla kompensoinnin tarve ei näytä kasvavan kovin suureksi, joten sinne voisi käydä jonkun aseman vanha 135 A kela. Myös muiden maasta erotettujen verkkojen kohdalla voisi harkita samanlaista ratkaisua uuden kelan sijasta. Lisäksi Pielaveden toisella muuntajalla ei näyttäisi olevan tämän tiedon mukaan tarvetta isommalle sammutuskelalle.



KUVA 21. Asemat, joihin tulossa uusi kompensointilaitteisto

#### 6.4.3 Asemat, joiden kompensointi käy pieneksi ensimmäisinä

Kuvassa 22 nähdään asemat, joiden kompensointi käy arvioiden mukaan pieneksi vuoteen 2026–2028 mennessä riippuen maakaapelihankkeiden etenemisvauhdista. Vihreällä nähdään ennuste kelan asennosta vuonna 2026 ja vaalean sininen palkki kertoo kelan tavoite koon vuonna 2036. Tummempi sininen kertoo nykyisen kelan koon. Tästä voidaan siis huomata kelan jäävän alimitoitetuksi, minkä perusteella kyseisille asemille olisi hyvä ruveta jo nyt miettimään uutta kompensointiratkaisua, sillä kelojen toimitusajat voivat olla pitkiä.



KUVA 22. Kompensointi jää pieneksi ensimmäisenä

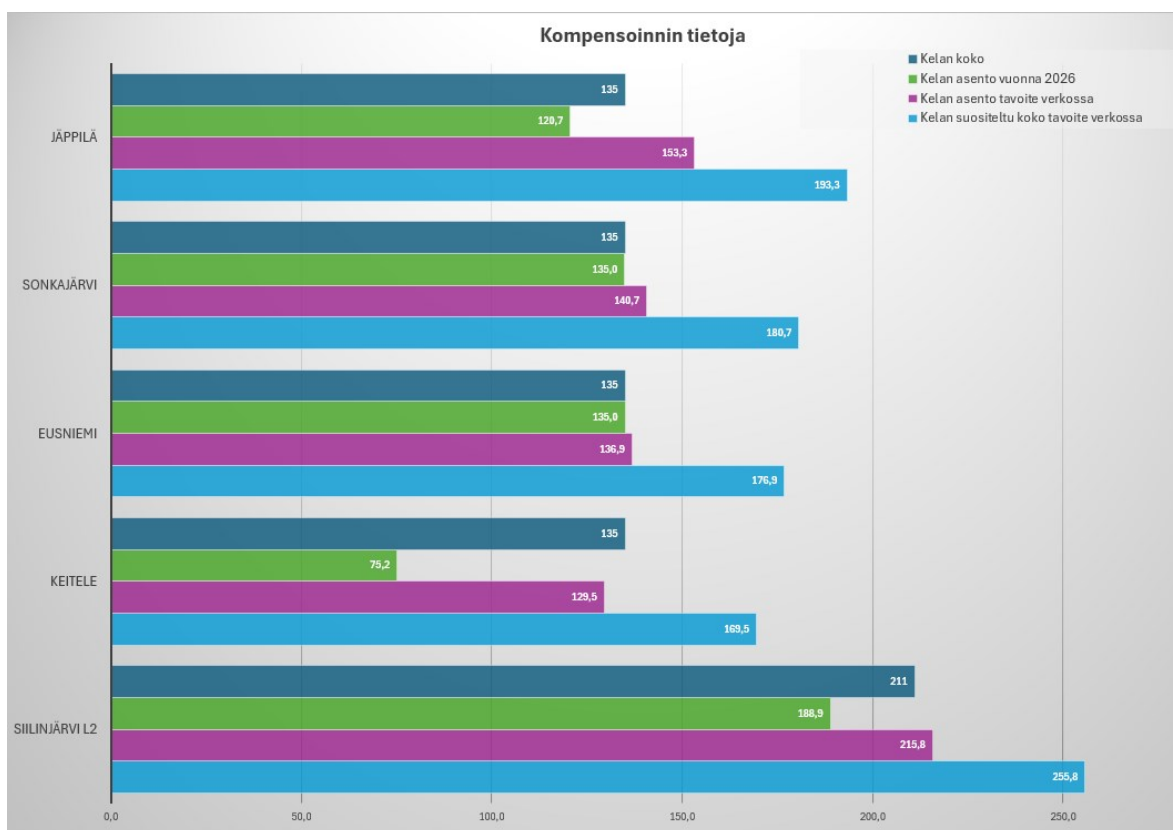
Pellesmäen ja Suonenjoen asemilla on tulossa suojauslaitteiden saneeraus tämän hetken tiedon mukaan vuonna 2030, joten voisi miettiä olisiko järkevämpää suurentaa kompensointia ennen saneerausta vai sen yhteydessä. Muidenkin asemien kohdalla sopivaa kompensoinnin saneeraus ajankohdaksi olisi syytä tarkastella.

Myös kompensoinnin kapasiteetin lisäämiselle pitäisi löytää tähän tilanteeseen kustannustehokkain ratkaisu. Yksi vaihtoehto on uusia keskitetty kompensointilaitteet kokonaan 211 A tai 266 A keloihin. Toinen vaihtoehto voisi olla lisätä kiinteä kompensointilaitteet sähköasemalle niin sanotusti pohjakuormaksi. Kolmas vaihtoehto on näiden kahden vaihtoehdon yhdistelmä. Esimerkkinä neljälle asemalle hankittaisiin uusi 266 A säädettävä kela, joista vanhat kelat asennettaisiin lopuille neljälle asemalle kiinteäksi pohjakuormaksi ja niiden nykyiset kelat jäisivät normaalisti käyttöön. Näin uusia komponentteja tarvittaisiin vain puolet vähemmän ja vanhat kelat saataisiin uusiokäyttöön. Huomioitavaa tässä on se, että rinnalle asennettava kela tarvitsee yhden ylimääräisen katkaisijalähdön.

#### 6.4.4 Asemat, joiden kompensointi käy pieneksi 2036 mennessä

Kuvassa 23 puolestaan nähdään sähköasemat, joiden kompensoinnin arvioidaan jäävän pieneksi vuoteen 2036 mennessä. Vihreä palkki kertoo kelan asennon vuonna 2026, joten se ei vielä ylitä nykyisen kelan kokoa, mutta on maksimiasennossa tai lähellä sitä. Kelan asento tavoiteverkossa tulee kuitenkin ylittämään nykyisen kompensointikapasiteetin ja jos sen päälle lasketaan vielä 40 A varmuusvara, nykyinen kela jää hieman pieneksi. Näin ollen lisäkompensoinnin tarvetta kannattaa pitää silmällä, mutta kyseiset kohteet eivät ole kuitenkaan listalla ensimmäisiä, johon kannattaa ruveta suunnittelemaan uutta kompensointilaitteistoa. Tosin yksi keino tässä vaiheessa voisi olla lisätä

uusissa kaapelointihankkeissa hajautettua kompensointia, jolloin voitaisiin säästyä kokonaan uuden kalliin keskitetyn kompensointikelan ostolta.



KUVA 23. Kompensointi jää pieneksi 2036 mennessä

## 7 YHTEENVETO

Vuonna 2013 voimaan astunut sähkömarkkinalaki asetti tiukempia vaatimuksia sähkön toimitusvarmuuteen, mikä ohjasi sähköverkkoyhtiöitä rakentamaan entistä enemmän säävarmaa verkkoa. Maakaapelointi on lisääntynyt Suomessa hurjaa vauhtia, sillä se on myrskyiltä ja lumikuormilta suojassa. Tämä on puolestaan aiheuttanut maasulkuvirtojen kasvua, jotka pitää kompensoida.

Tutkimuksen tuloksena saatiin selville Savon Voiman verkon maasulkuvirtojen määrä nykyään ja minkälainen kompensoinnin tilanne on koko Savon Voiman verkon alueella. Monilla sähköasemilla kaikki oli kunnossa, mutta joillain asemilla sammutuskuristimen kapasiteetti oli puolestaan jäämässä tavoiteverkossa pieneksi tai verkko oli kokonaan maasta erotettu. Näille asemille oli kuitenkin pääsääntöisesti jo suunnitteilla uusi isompi kompensointilaitteisto, jotta verkko ei jäisi alikompensoiduksi uusien maakaapelointihankkeiden myötä. Kompensointikeloja tulisi vielä siitä huolimatta lisätä osalla asemista.

Lisäksi suunniteltiin tavoiteverkko vuodelle 2036, minkä avulla pystyttiin arvioimaan, kuinka paljon maasulkuvirrat tulisivat kasvamaan koko Savon Voiman verkossa. Arvioiden mukaan maasulkuvirtoja tulisi noin 5140 A lisää, mikä tarkoittaa 70 % kasvua. Tavoiteverkon avulla tarkasteltiin maasulkuvirtojen kasvua myös päämuuntajittain, minkä perusteella saatiin analysoitua kaikkien sähköasemien keskitetyn kompensoinnin tilanne.

Sähköasemat jaoteltiin erilaisiin kategorioihin ja esitin niille tapauskohtaiset muutosehdotukset. Verkosta löytyi siis asemia, joiden kompensointi on kunnossa tavoiteverkossa. Näihin kohteisiin ei suunnitella kompensoinnin lisäystä.

Toinen kategoria on asemat, joille uusi kompensointilaitteisto on jo suunnitteilla tai rakenteilla. Kompensoinnin lisäys näille asemille on myös laskelmien perusteella kannattava ratkaisu ja vanhat kelat voisi siirtää maasta erotettujen verkkojen sähköasemille.

Kolmas kategoria on asemat, joiden kompensointi tulee käymään pieneksi suunnilleen vuoteen 2026 mennessä. Näihin kohteisiin olisi hyvä kiinnittää huomio ja keksiä uusi kompensointi ratkaisu jo tässä vaiheessa, sillä komponenttien toimitusajat voivat olla pitkiä. Yksi vaihtoehto voisi olla uusia keskitetty kompensointilaitteisto kokonaan isompiin keloihin. Toinen vaihtoehto voisi olla lisätä kiinteä kompensointilaitteisto sähköasemalle niin sanotusti pohjakuormaksi. Kolmas vaihtoehto on edellä mainittujen keinojen yhdistelmä hyödyntäen vanhoja keloja.

Neljäs kategoria on asemat, joiden kompensointi tulee käymään pieneksi myöhemmin vuoteen 2036 mennessä. Näiden asemien kompensoinnin tilannetta on hyvä pitää silmällä, mutta eivät ole ensimmäisiä kohteita, johon tarvitsisi vielä tutkia keskitetyn kompensoinnin ratkaisuja. Toisaalta hajaute- tun kompensoinnin lisääminen tulevissa maakaapelointihankkeissa voisi säästää siinä, ettei uutta keskitettyä kompensointia tarvitsisi hankkia välttämättä ollenkaan.

## LÄHTEET

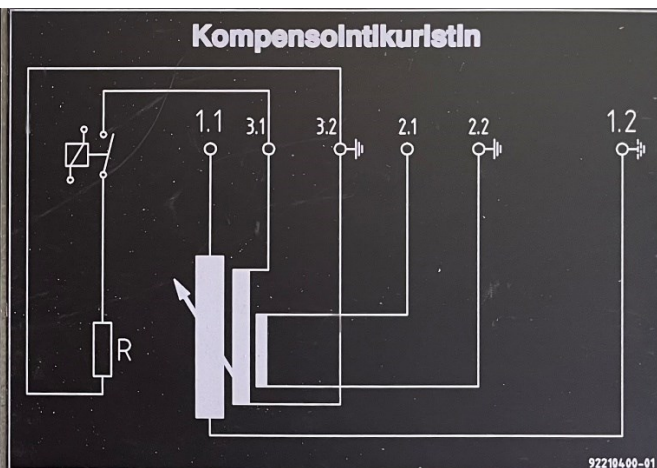
- Elovaara, J.;& Laiho, Y. (1988). *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Hämeenlinna: Otatieto.
- Lakervi, E.;& Partanen, J. (2009). *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto.
- Multirel Oy. (ei pvm). *Kompensointi ja maasulkureleet*. Noudettu osoitteesta <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/virtainjektiolaitteisto/>
- Multirel Oy. (ei pvm). *Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>
- Pylkkö, S. (2016). *Opinnäytetyö, Leväsen sähköaseman maasulkuvirran lisäkompensoinnin suunnittelu*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106939/Pylkko\\_Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106939/Pylkko_Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rouvali, J. (2022). *maasulkuvirta luentomateriaali*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta [https://moodleold.savonia.fi/pluginfile.php/1827672/mod\\_resource/content/13/Jakelu%20-%20maasulku.pdf](https://moodleold.savonia.fi/pluginfile.php/1827672/mod_resource/content/13/Jakelu%20-%20maasulku.pdf)
- Savon Voima OYJ. (2023). *Organisaatio*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta <https://savonvoima.fi/tietoa/savonvoima/organisaatio/>
- Savon Voima OYJ. (ei pvm). *Kotitalouksille*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta <https://savonvoima.fi/kotitalouksille/sahkoverkko/>
- SESKO ry. (2018). *Suurjännitesähköasennukset, SFS 6001*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Sonepar Oy. (ei pvm). *Verkkokauppa, Kompensointilaitteisto - Subcomp 25-50 A 20.5 kV*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta <https://verkkokauppa.sonepar.fi/fi/kompensointilaitteisto-subcomp-25-50-a-20-5-kv-5709020>
- Yle. (2013). *Uusi laki suitsii sähkökatkon enimmäiskesto*. Haettu 19. 2. 2024 osoitteesta <https://yle.fi/a/3-6810328>

## LIITE 1: KOMPENSOINTIKURISTIMEN TYYPPIKILPI

<b>Kompensointikuristin</b>		made by: TRENCH Austria GmbH-Linz/Leonding	
tyyppi	ENK 20/211/2500	Valm. Vuosi	2021
normi	IEC 60076-6	Jäähdytystapa	ONAN
Nimellisjännite Ur (1.1-1.2)	20.5/√3 kV	Nimellistajuus	50 Hz
Virran säätöalue	portaaton	Eristystaso	L1125AC50 - L1175AC28
Asento	min - max		
Nimellisvirta	21.1A	211A	
Käyttöaika	120min		
Lämpötilan nousu: öljyn yläosa/keskimääräinen käämin lämpö	-90/100 K		
Suurin jatkuva jännite	10% Ur		
Toisiokäätitys (3.1-3.2)	500V; 200A; 90s		
Mittauskäämi (2.1-2.2)	100V; 1A; jatkuva		
Virtamuuntaja	---		
Eristystaso	LI-AC3		
Massa	-ilman öljyä	2.346 t	-kok. 4.10t
	-öljy	1.201 t	-kulj. 4.21 t
Nimellisteho	2497 kVA <sub>r</sub>		

**TRENCH**

92210400-01



## LIITE 2: MAADOITUSMUUNTAJAN TYYPIKILPI

TYPE NO		HTYAA3KH-005710		APPLICATION		EARTHING	
ORDER NO		T1-21/026		SERIAL NO		15267	
REPORT NO		24377		COOLING		ONAN	
RATED POWER		50 kVA		FREQUENCY(Hz)		50	
VOLTAGES (V)		1 20500 400		PHASE		3	
RATED CURRENT(A)		1,41 72,17		VECTOR GROUP		Znyn11	
NO-LOAD LOSS		1103 W		NO LOAD CUR.(%)		4,67	
LOAD LOSS		240 W		TEMP. RISE O/W		60/65°C	
IMPEDANCE VOLT.		0,67 %		INSULATION OIL		SHELLDIAA3K/2A	
ACTIVE PART W.		1480 kg		YEAR OF MANUF.		07/2021	
OIL WEIGHT		650 kg		STANDARD		EN 60076-6	
TOTAL WEIGHT		2750 kg		INSULATION HV-LV		50/3 kV	
				HV -TANK 30 sec		21,0	
				60 sec		27,6	
				INSULATION RESISTANCE (GΩ) HV-LV 30 sec		31,6	
				60 sec		41,3	
				LV-TANK 30 sec		17,2	
				60 sec		25,6	
				<b>MADE IN TURKEY</b>			
211A 2 Hours Neutral Current, Zero Sequence Impedance = 12,61 ohm/phase							

**HERMETICALLY SEALED,  
OIL FILLED AT 20°C**


**KKM POWER d.o.o.**
**KKM POWER d.o.o.**  
**Beograd**
**THREE - PHASE SHUNT REACTOR**
**Type** SHR - 8 5-15 A 20,5 kV - KKM

**Ser.no** 3624

**SNRO** 57 090 00

**Voltage** 20500 kV **Cool.** ONAN **Year** 2019

**No of ph.** 3 **Insul.liqu.** TR.oil **Freq.** 50 Hz

	Power		Current		Impedan.	
Tap position	1	60 kVAr	1.67	A	7101	$\Omega$
Tap position	2	89 kVAr	2.5	A	4735	$\Omega$
Tap position	3	119 kVAr	3.33	A	3550	$\Omega$
Tap position	4	148 kVAr	4.17	A	2840	$\Omega$
Tap position	5	178 kVAr	5	A	2367	$\Omega$

**Cop.tem.rise** 65 k **Vect.group** YN

**Oil tem.rise** 60 k **Oil mass** 350 kg

**Insulat.level** LI125 AC50 **Unt.mass** 807 kg

**Standard** IEC 60076-6 **Total mass** 1400 kg

**MADE IN SERBIA**