



Loistehon & maasulkuvirran hallinta Koillis-Satakunnan Sähkö -konsernissa

Joni Maskonen

Opinnäytetyö, AMK

Maaliskuu 2022

Tekniikan ala

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Maskonen, Joni

Loistehon & maasulkuvirran hallinta Koillis-Satakunnan Sähkö -konsernissa.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Maaliskuu 2022, 55 sivua

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Vuoden 2013 sähkömarkkinalain myötä sähköverkkoyhtiöiden täytyi alkaa parantamaan sähköverkkojensa toimitusvarmuutta muuttamalla ilmajohtoja maakaapeliksi. Tämä on vaikuttanut verkon kapasitiivisen loistehon sekä maasulkuvirtojen kasvuun. Verkkoyhtiöt ovat pyrkineet hillitsemään kapasitiivista loistehoa sijoittamalla verkkoon kompensointia vuonna 2016 Fingrid Oyj:n uudistaman kantaverkkosopimuksen myötä. Maasulkuvirran kompensoinnilla verkkoyhtiöt ovat pyrkineet hallitsemaan maasulun aiheuttaman vaarikonnan vaarallista kosketusjännitetasoa.

Opinnäytetyön tehtävänä oli tarkastella Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n jakeluverkon loistehotilannetta sekä tuottamaa maasulkuvirtaa. Loistehon tarkastelun tavoitteena oli määrittää toimeksiantajan jakeluverkon loistehotilanne sekä arvioida ja esittää sopiva ratkaisu kompensointiin ottamalla huomioon myös taloudellinen näkökulma. Maasulkuvirran tarkastelun tavoitteena oli hajautetun kompensoinnin vaikutuksien selvittäminen maasulkusuojaukseen ja sen perusteella esittää sopiva ratkaisu maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin toteutukseen.

Loistehotilannetta selvitettiin tuoreiden mittaustietojen avulla viideltä sähköasemalta, joiden loistehomittaukset netotettiin. Tarkastelulla määritettiin tarvittava loistehon kompensointitarve, jonka perusteella voitiin arvioida sopivaa kompensointiratkaisua. Maasulkuvirran kompensoinnin määrittelyä varten tutustuttiin suunnatun maasulkusuojauksen toimintaan ja tutkittiin johto- ja kaapelipituuksia sekä maasulkuvirta-arvoja verkkotietojärjestelmässä, jotta pystyttiin mallintamaan hajautettua kompensointia.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin luotua loistehon sekä maasulkuvirran kompensoinnin toteutusehdotukset onnistuneesti ja asetetut tavoitteet täyttyivät. Verkon loistehon tarkastelusta huomattiin, että kompensoinnin säätövirheistä huolimatta nykyiset kompensointilaitteet olisivat loistehon tuoton kasvaessa jäämässä pieneksi ja tulevaisuudessa uuteen reaktoriin olisi investoitava. Ehdotus maasulkuvirran hajautettuun kompensointiin toteutettiin maasulkusuojauksen toiminta sekä muutokset verkon kytkennöissä mielessä pitäen. Todettiin, että tuloksia voidaan hyödyntää hajautetun kompensoinnin suunnittelussa myös jatkossa.

Avainsanat (asiasanat)

Jakeluverkko, loisteho, maasulkuvirta, kompensointi

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Maskonen, Joni

Management of reactive power & earth fault current at Koillis-Satakunnan Sähkö Group

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, March 2022, 55 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Electrical and automation Technology. Bachelor's Thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Due to renewed Electricity Market Act of 2013 power grid companies had to start making improvements to their grid for better reliability of delivery by changing aerial lines to underground cables. This has had an influence on the increased production of capacitive reactive power and earth fault current on the grid. Grid companies have intended to control the capacitive reactive power by compensation due to Fingrid PLC's renewed grid agreement in 2016. By compensation of earth fault current grid companies have intended to control the dangerous touch voltage level of the damaged part of the grid caused by earth fault.

The task was to examine the level of reactive power and earth fault current produced in Koillis-Satakunnan Sähkö Ltd.'s grid. The goal in analyzing the grid's reactive power was to determine the level of reactive power in the grid and consider an appropriate solution for the compensation also from the aspect of cost-effectiveness. The goal in examining grid's earth fault current was to study the impacts of distributed compensation to earth fault protection of the grid and consider an appropriate solution to the distributed compensation of earth fault current.

The level of reactive power was analyzed with the latest reactive power measurements, which were measured from five different substations. The measurement data determined the need for compensation of reactive power, which was used to consider the appropriate solution for compensation. The impacts of distributed compensation of earth fault current on the earth fault protection was studied, and the cable lengths and the produced earth fault current was studied in the network information system so the appropriate solution for distributed compensation could be determined.

The results of the thesis were suggestions for compensation of reactive power and compensation of earth fault current and the goals were achieved as planned. By analyzing grid's reactive power, it was discovered that even though there were mistakes in the compensation adjustments there is still a need for a new compensation reactor in the future, because of the increasing capacitive reactive power in the grid. The suggestion for distributed compensation of earth fault current was executed with the ground fault protection and the changes in the connections in the grid in mind. It was noted that the results can be used for further distributed compensation planning.

Keywords/tags (subjects)

Distribution Network, reactive power, earth fault current, compensation

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

Lyhenteet ja määritelmät	4
1 Johdanto	5
1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat	5
1.2 Koillis-Satakunnan Sähkö -konserni	5
1.3 Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus	6
2 Tutkimusasetelma	7
2.1 Tutkimusmenetelmä & tutkimuskysymykset.....	7
2.2 Tietoperusta	7
2.3 Tutkimuksen eettisyys.....	8
3 Loisteho.....	8
3.1 Pätöteho, loisteho ja näennäisteho	8
3.2 Vaikutus sähkönsiirrossa	10
3.2.1 Häviöt.....	10
3.2.2 Loistehon ja -energian laskutus	11
3.2.3 Loissähkön otto- ja antorajojen muodostuminen	13
3.3 Loistehon kompensointi.....	14
3.3.1 Kompensointitarpeen syntyminen	14
3.3.2 Kompensointi teoriassa ja sen vaikutukset verkkoon	16
3.4 Loistehon kompensointitavat ja -laitteistot.....	17
3.4.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto	18
3.4.2 Sarjakondensaattoriparisto	19
3.4.3 Rinnakkaiskuristin tai -reaktori.....	20
4 Maasulkuvirta.....	21
4.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen.....	21
4.1.1 Maasta erotettu verkko	23
4.1.2 Kompensoitu verkko	25
4.1.3 Suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko.....	27
4.2 Maasulkuvirran kompensointi	28
4.2.1 Maasulkuvirran kompensoinnin tarkoitus.....	29
4.2.2 Maasulkuvirran kompensointi ja vaikutus maasulkusuojaukseen	29
5 Työn toteutus	35
5.1 Verkon loistehon tarkastelu ja kompensointi	35
5.1.1 Netotetun loistehon tarkastelu	36
5.1.2 Taloudellinen vaikutus kompensoinnin toteutukseen	37

5.1.3	Reaktorin sijoituspaikka.....	39
5.2	Verkon maasulkuvirran tarkastelu ja kompensointi	41
5.2.1	Maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin toteutus	42
5.2.2	Lähtöjen maasulkuvirtojen tarkastelu	43
6	Tulokset.....	44
6.1	Kehitysehdotus loistehon kompensointiin	44
6.2	Kehitysehdotus maasulkuvirran hajautettuun kompensointiin	46
7	Pohdinta.....	47
	Lähteet	50
	Liitteet	53
	Liite 1. KSAT kuukausikohtaiset loisikkunat	53
	Liite 2. KSAT asemakohtaiset loistehokaaviot.....	55

Kuviot

Kuvio 1.	Konsernin taloudellista asemaa ja tulosta kuvaavat tunnusluvut	6
Kuvio 2.	Tehokolmio.....	9
Kuvio 3.	Loistehoikkuna	12
Kuvio 4.	Maakaapelien loistehotase eri kuormituksilla 20kV jännitetasolla	15
Kuvio 5.	Ilmajohdojen loistehotase eri kuormituksilla 20kV jännitetasolla	16
Kuvio 6.	Rinnakkaiskompensoinnin periaatekuva	19
Kuvio 7.	Sarjakondensaattori	20
Kuvio 8.	Sarjakondensaattorilava	20
Kuvio 9.	Havainnekuva yksivaiheisesta maasulusta	22
Kuvio 10.	Maasulkusuojan näkemä toimintapiste katkeilevan maasulun aikana terveessä johtolähdössä	30
Kuvio 11.	Maasulkuvirran kompensointikela (vas.) ja maadoitusmuuntaja.....	32
Kuvio 12.	Keskitetty kompensointi	33
Kuvio 13.	Hajautettu kompensointi	33
Kuvio 14.	Netotettu loisteho loistehoikkunassa tarkasteluajankohtana.....	36
Kuvio 15.	Ähtärin sähköaseman loistehomittaukset	40
Kuvio 16.	Heinäahon sähköaseman loistehomittaukset.....	41
Kuvio 17.	Toopakan sähköaseman loistehomittaukset	41
Kuvio 18.	Mallinnettu loistehoikkuna kompensointiehdotuksen toteutumisen jälkeen.	46

Taulukot

Taulukko 1. Kompensointireaktorien hintoja	38
Taulukko 2. Virtain sähköaseman laajasti kaapeloitujen johtolähtöjen tuottamat maasulkuvirrat.	44
Taulukko 3. Heinäahon sähköaseman laajasti maakaapeloitujen johtolähtöjen tuottamat maasulkuvirrat.	44

Lyhenteet ja määritelmät

I	Virta (A)
U	Jännite (V)
P	Pätöteho (W)
Q	Loisteho (VAr)
S	Näennäisteho (VA)
ω	Verkon kulmataajuus
Jakeluverkko	Sähköverkko, jonka nimellisjännite < 110 kV
Keskijänniteverkko	Sähköverkko, jonka nimellisjännite on 1–36 kV
Kantaverkko	Fingrid Oyj:n omistama sähköverkko, jonka jännite > 110kV
Alueverkko	Kantaverkkoon kuulumaton sähköverkko tai -johto, jonka nimellisjännite > 110kV
Liittymispiste	Verkon piste, missä kantaverkkoon liittyminen tapahtuu
Loistehoikkuna	Loistehon anto- ja ottorajan muodostama alue, jonka ylittämisestä koi- tuu maksuja

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Sää- ja toimintavarman verkon rakentamisen myötä sähköverkkoyhtiöt ovat lisänneet mm. maakaapelointia jakeluverkoissaan 1. syyskuuta 2013 voimaan astuneen sähkömarkkinalain myötä. Laissa sanotaan, että vuoden 2028 loppuun mennessä asemakaava-alueella lumikuorman tai myrskyn takia syntyvän jakeluverkon vioittumistilanteen myötä sähkönjakelu ei saa keskeytyä yli kudeksi tunniksi. Asemakaava-alueen ulkopuolella vikatilanteen aiheuttamaa keskeytystä ei sallita yli 36 tunniksi. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 51 §, 117 §, 119 §.) Maakaapeloinnin yleistymisen yhteydessä verkossa lisääntyy kapasitiivisen maasulkuvirran kasvun lisäksi myös kapasitiivisen loistehon tuotto. Vuonna 2016 voimaan tulleen kantaverkkosopimuksen myötä sähköverkkoyhtiöiden on täytynyt alkaa kompensoimaan loistehojaan, jotta sopimuksessa määritetyt loistehon anto- ja ottorajat eivät ylittyisi ja sakkomaksuilta vältyttäisiin. (Kantaverkkopalveluhinnoittelu 2021.) Loistehomaksut eivät kuitenkaan yksin ole syy loistehon kompensoinnin tarpeeseen, sillä liiallisella loisteholla on haittavaikutuksia myös sähkönsiirrossa verkon häviöiden kasvaessa ja siirtokapasiteetin pienentyessä (Eronen, Pakonen, Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilén 2018, 83).

1.2 Koillis-Satakunnan Sähkö -konserni

Työn toimeksiantajana toimi Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Koillis-Satakunnan Sähkö -konserniin kuuluu Koillis-Satakunnan Sähkö Oy, tytäryhtiö Killin Voima Oy sekä Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n ja Keuruun Sähkö Oy:n yhdessä omistama alueverkkoyhtiö Sähkö Virkeät Oy. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy on sähköyhtiö, joka on perustettu vuonna 1946. Virroilla sijaitsee yhtiön keskustoimipaikka ja Ähtärissä aluetoimisto. Koillis-Satakunnan Sähköllä on käyttöpaikkoja yhteensä noin 16 000 ja johtoja noin 4000 kilometriä. Yhtiön pääosakkaita ovat Virrat, Alavus, Kihniö, Keuruu ja Ähtäri. (Koillis-Satakunnan Sähkö Oy n.d.) Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n tytäryhtiö Killin Voima Oy on perustettu vuonna 1955 ja se tuottaa verkkoon sähköä yhteensä kuudella vesivoimalaitoksella (Killin voima n.d.). Sähkö-Virkeät Oy:n ylläpidettävänä toimii noin 190 kilometriä 110 kilovoltin alueverkkoa. Koillis-Satakunnan Sähkön jakeluverkko liittyy tähän 110kV alueverkkoon, eli Koillis-Satakunnan Sähkön ja kantaverkon välissä toimii Sähkö-Virkeät Oy. (Sähkö-Virkeät Oy n.d.)

Toimitusvarmuuden parantamiseksi toimeksiantajan suunnitelmissa on maakaapeloinnin lisäksi siirtää valtaosa verkon metsissä kulkevista vaikeasti tavoitettavista ilmajohdoista tienvarsille, missä mahdolliset huolto- ja korjaustyöt on helppo toteuttaa nopeasti ja tehokkaasti. Yhtiön kaapelointiaste vuonna 2020 oli 30,1 %, josta 13,8 % keskijänniteverkossa ja 41,8 % pienjänniteverkossa (Vuosikertomus 2020, 8).

Konsernin liikevaihto oli vuonna 2020 yli 15 miljoonaa euroa (Toimintakertomus ja tilinpäätös 2021).

Konserni	2020	2019	2018
Liikevaihto EUR	15 610 400	16 151 244	15 827 850
Liikevoitto EUR	3 023 943	3 301 594	3 045 562
Liikevoitto %:a liikevaihdosta	19,4 %	20,4 %	19,2 %
Oman pääoman tuotto%	10,4 %	12,3 %	12,5 %
Omavaraisuusaste (liittymismaksut rinnastettu omaan pääomaan)	59,5 %	58,7 %	56,7 %

Kuvio 1. Konsernin taloudellista asemaa ja tulosta kuvaavat tunnusluvut (Toimintakertomus ja tilinpäätös 2021)

1.3 Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Koillis-Satakunnan Sähkö -konsernin siirto- ja jakeluverkon nykytilan tarkastelu loistehon sekä maasulkuvirran osalta. Loistehon tarkastelun tavoitteena oli selvittää nykyisin verkossa käytetyt kompensointilaitteet ja määrittää verkossa tarvittava lisäkompensointi sähköasemilla mitattujen lois- ja pätötehohuippujen perusteella. Tehomittaukset sovitettuna loistehoikkunaan nähdään tapahtuneet anto- ja ottorajojen ylitykset vuosi- sekä kuukausikohtaisesti ja sen perusteella voidaan päätellä verkon nykyisen kompensoinnin riittävyys.

Tarkastelun pohjalta loistehon kompensoinnin osalta laadittiin kehitysehdotus. Loistehon kompensoinnin kannalta säädettävyys on tärkeää, joten se tuli ottaa ehdotuksessa huomioon. Toimeksiantajan mukaan varsinkin kesäaikana ja pienen kuormituksen aikana loistehoa esiintyy liikaa.

Maakaapeloinnin yhteydessä loistehon lisäksi myös kapasitiivisen maasulkuvirran kasvusta muodostuu ongelma. Kapasitiivista maasulkuvirtaa voidaan kompensoida, mutta tämä voi tuoda myös haasteita maasulkusuojauksen toiminnan kannalta. Tarkastelun tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon johtolähdöt tuottavat maasulkuvirtaa sekä miten maasulkuvirran hajautettu kompensointi

tulisi toteuttaa jo olemassa olevan keskitetyn kompensoinnin lisäksi ottamalla maasulkusuojaukseen liittyvät seikat huomioon. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa työ sekä kompensoinnin teknisestä näkökulmasta että myös taloudellisesta näkökulmasta ottaen samalla huomioon tulevaisuudessa kaapelointiasteen kasvaminen.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimusmenetelmä & tutkimuskysymykset

Tutkimusmenetelmillä kuvaillaan tapoja, joilla tutkimustyöhön kerätään aineisto ja miten sitä analysoidaan. Opinnäytetyön tutkimuskysymyksiin vastaukset saatiin käyttämällä osaksi kvalitatiivista eli laadullista tutkimusotetta, jolloin olennaista oli oppia ymmärtämään tässä työssä tutkittavien ilmiöiden laatua, merkityksiä sekä ominaisuuksia. Laadullinen tutkimus vastaa muun muassa kysymyksiin: Miksi? Miten? (Heikkilä 2014, 8; Tutkijan ABC 2015.)

- "Miten loistehoa kompensoidaan?"
- "Miten maasulkuvirtaa kompensoidaan?"
- "Miten loistehon ja maasulkuvirran kompensointi tulisi toteuttaa?"
- "Miten maasulkuvirran kompensointi vaikuttaa maasulkusuojaukseen?"

Kvalitatiivisen tutkimusotteen lisäksi opinnäytetyössä käytettiin osaksi myös kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusotetta, jolloin tutkimuskohdetta tulkittiin tilastollisesti ja matemaattisesti. Kvantitatiivisella tutkimuksella voidaan vastata kysymyksiin: Mikä? Kuinka paljon? (Heikkilä 2014, 8; Tutkijan ABC 2015.)

- "Mikä on sähköverkon nykyinen loistehotilanne?"
- "Paljonko kohdeverkossa on ennestään kompensointia?"
- "Kuinka paljon on kompensointitehon tarve?"

2.2 Tietoperusta

Opinnäytetyön tekeminen aloitettiin aiheeseen tutustumisella ja työn tietoperustan kokoamisella. Tietoperustaa kerätessä pyrittiin mahdollisuuksien mukaan käyttämään alkuperäisiä lähteitä. Opinnäytetyön tietoperustassa tuodaan esiin mm. perustietoa loistehon muodostumisesta, siihen

liittyvästä laskennasta sekä kompensointilaitteista ja -tavoista. Tietoperustassa esiin tuodaan tietoa myös loissähkön hinnoittelusta ja laskutuksesta sekä loistehon vaikutuksista sähkönjakeluverkon häviöihin ja siirtokykyyn.

Loistehon kompensoinnin lisäksi työssä perehdytään maasulkutilanteeseen ja siihen liittyvään laskentaan, maasulkuvirtaan ja sen kompensointiin sekä suojaustoimintaan. Tietoperusta on kerätty käyttäen mm. kirjastosta lainattuja aiheeseen liittyvää ammattikirjallisuutta, aiheeseen liittyviä diplomitöitä sekä lähdekriittisyys ja lähteen luotettavuus mielessä pitäen myös muita internet-lähteitä. Työn käytännön osuutta varten tarvittavia laitteistotietoja kerättiin suoraan laitetoimittajaa haastatteleamalla. Loistehotilanteen kartoittamisessa tarkasteltiin toimeksiantajalta hankittua mitausdataa, josta nähdään eri sähköasemien mittaamat pätö- ja loistehohuiput tuntikohtaisesti.

2.3 Tutkimuksen eettisyys

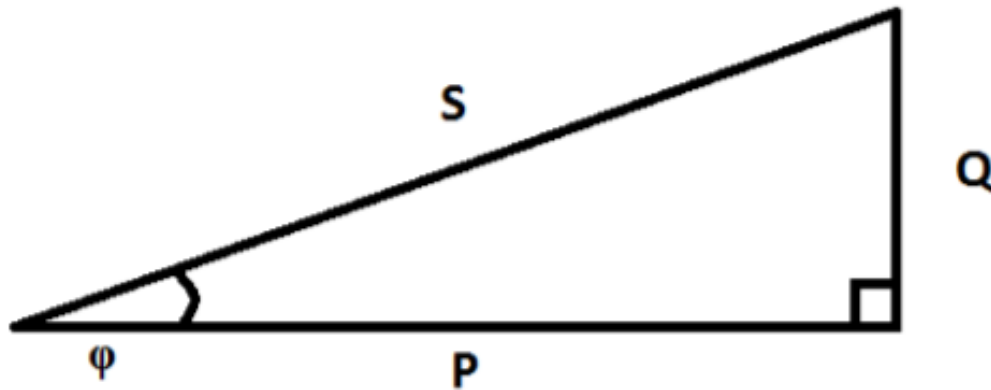
Opinnäytetyö tehdään noudattaen hyvää tieteellistä käytäntöä, jotta saadut tulokset ovat uskottavia ja luotettavia. Tutkimustyötä tehdessä hyvään tieteellisen käytännön noudattamiseen kuuluu mm. kaikkien tutkimuksen vaiheiden ajan rehellisyys, huolellisuus sekä tarkkaavaisuus. Työn tietoperustaa kerätessä on tärkeää kiinnittää huomiota eettisesti kestäviin tiedonhankintamenetelmiin ja kunnioittaa muiden tutkijoiden tekemiä tutkimuksia viittaamalla niihin aina asianmukaisella tavalla. Tutkimuksen avulla saavutettujen tuloksien kannalta avoimuus sekä vastuullinen viestintä on tärkeitä hyvän tieteellisen käytännön piirteitä. Tutkimusta tehdessä ei loukata hyvää tieteellistä käytäntöä harrastamalla vilppiä eikä muutenkaan osoiteta piittaamattomuutta hyvästä tieteellisestä käytännöstä. (Helin, Spoof, Jäppinen & Launis 2012.)

3 Loisteho

3.1 Pätöteho, loisteho ja näennäisteho

Tässä luvussa käsitellään perusteoriaa näennäis-, pätö- ja loistehosta. Mekaanista työtä tekevän tehon, eli pätötehon lisäksi monet eri laitteet tarvitsevat toimiakseen myös verkossa edestakaisin värähtelevää loistehoa, jonka tehtävä on ylläpitää eri laitteiden magneettikenttiä. Näitä tällaisia laitteita ovat mm. sähkömoottorit, purkauslamput sekä muuntajat. Induktiivisella loisteholla virran vaihesiirto on 90° jännitettä jäljessä ja kapasitiivisella loisteholla virran vaihesiirto taas puolestaan

90° edellä. Työtä tekevää pätötehoa kuvataan kirjaimella P ja loistehoa kuvataan kirjaimella Q. Nämä suureet muodostavat yhdessä näennäistehon S. Pätö- lois- ja näennäisteho voidaan esittää suhteessa toisiinsa tehokolmiolla kuvion 2 mukaisesti. (Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa 2016, 1–2; Matias 2013, 7.)



Kuvio 2. Tehokolmio (Eno 2016, 5)

Perustaajuinen näennäisteho, joka muodostuu pätötehosta ja loistehosta voidaan laskea kaavalla 1. Pätöteho ja loisteho voidaan laskea ottamalla laskentaan mukaan tehokerroin $\cos \varphi$ ja $\sin \varphi$ kaavojen 2 ja 3 mukaan. (Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa 2016, 2; Eronen ym. 2018, 16; Matias 2013, 7.)

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

missä

- P = pätöteho [W]
- Q = loisteho [Var]
- S = näennäisteho [VA]
- U = vaihejännitteen tehollisarvo [V]
- I = vaihevirran tehollisarvo [A]
- φ = vaihekulma

3.2 Vaikutus sähkösiirrossa

Tässä luvussa tarkastellaan loistehon siirrossa syntyviä häviöitä sekä loistehon vaikutusta jännitteeseen sähköverkossa. Häviöiden lisäksi käsitellään liiallisesta loistehosta syntyviä loistehoikkunan rajojen ylityksiin liittyviä laskutuskustannuksia.

3.2.1 Häviöt

Sähkösiirrossa syntyvillä häviöillä on merkittävä rooli sähkösiirrossa syntyviin kustannuksiin. Loisteho aiheuttaa ongelmia sähkösiirrossa normaaleissa käyttötilanteissa sekä varasyöttötilanteissa, sillä se vaikuttaa verkon pätötehon siirtokykyyn laskevasti. Siirtokyky huononee, kun loisteho syö kokonaissiirtokapasiteettia ja vähemmän työtä tekevää pätötehoa voidaan siirtää. Pääasiassa tämän takia kaikista kannattavinta olisi aina tuottaa tarvittava loisteho mahdollisimman lähellä sen kulutuspaikkaa, eikä siirtää sitä turhaan pitkiä matkoja. Pätötehon siirtokapasiteetin vähenemisen lisäksi sähkösiirrossa muuttuvia kustannuksia aiheuttaa muun muassa teho- ja energiahäviöt siirron aikana. Loistehon siirto lisää häviöiden määrää mm. johtimissa ja muuntajissa. Nämä loisvirran myötä syntyvät häviöt aiheuttavat kustannuksien kasvua verkkoyhtiölle pelkän pätötehon siirrossa syntyvien häviöiden aiheuttamiin kustannuksiin verrattuna. Loisteho aiheuttaa verkon rakennuksessa syntyviä kustannuksia vahvistus- ja uusinvestoinnin myötä. (Eronen ym. 2018, 83.)

Kolmivaihejohdon virtalämpöhäviöihin kuluva teho pätö- ja loiskomponenttien avulla voidaan laskea kaavalla 4.

$$P_h = 3 \cdot (I_p^2 + I_q^2) \cdot R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot R \cdot \left(\frac{Q}{U}\right)^2 \cdot R \quad (4)$$

missä I_p = pätövirta [A]

I_q = loisvirta [A]

R = resistanssi [Ω]

P = pätöteho [W]

Q = loisteho [Var]

U = jännite [V]

Yhtälöstä ilmenee, kuinka virtalämpöhäviöihin kuluva tehoa voitaisiin saada alhaisemmaksi, kun loistehon määrää pienennettäisiin kompensoimalla. (Elovaara & Laiho 1988, 137–138.)

Kun sähköverkossa esiintyy induktiivista loisvirtaa, vaikuttaa se häviöiden lisäksi myös verkon jännitteenalenemaan. Induktiivisen loistehon kompensoinnin vaikutus jännitteenalenemaan on todella merkittävä loisvirran pienentyessä, etenkin paksuilla poikkipinnoilla sekä pitkillä siirtoetäisyyksillä kaapelin kokonaisreaktanssin kasvaessa. Kompensoimattoman jakeluverkon induktiivinen loisvirta vaikuttaa jännitteenalenemaan (U_a) nostattavasti kaavan 5 mukaan. (Eronen ym. 2018, 83.)

$$U_a = R \cdot I_p + X \cdot I_q \quad (5)$$

missä R = siirtoverkon resistanssi [Ω]

X = siirtoverkon reaktanssi [Ω]

I_p = pätövirta [A]

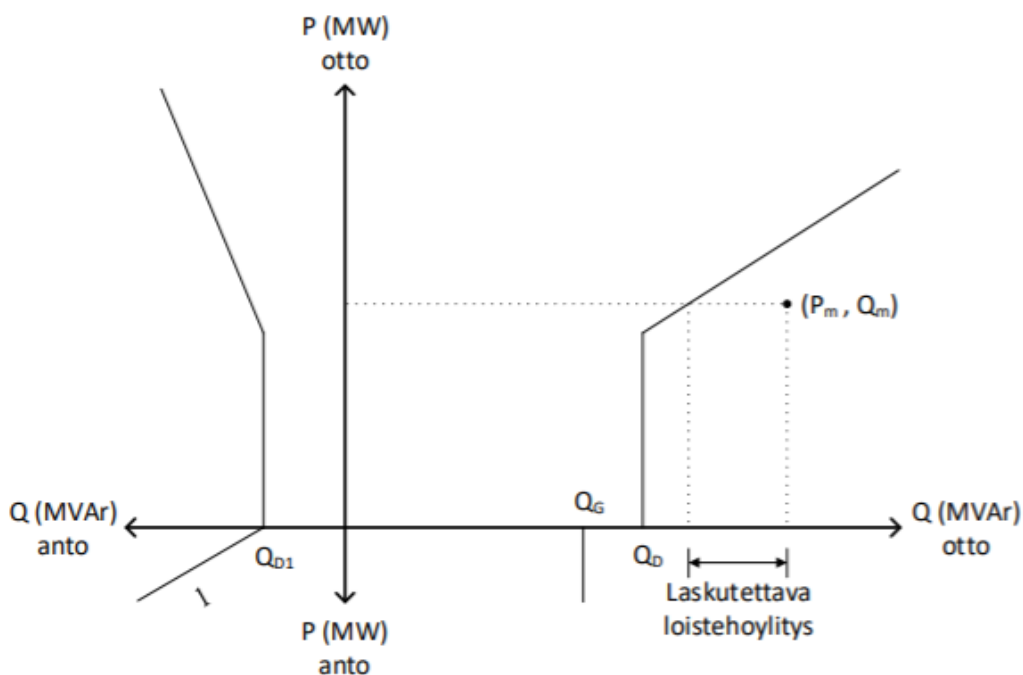
I_q = loisvirta [A]

3.2.2 Loistehon ja -energian laskutus

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid on määrittänyt liittymispisteilleen loistehorajat, joiden perusteella kantaverkkoon liittyvät maksavat Fingridin toimittamasta ja vastaanottamasta loissähköstä vuonna 2016 voimaan tulleen kantaverkkosopimuksen mukaan (Kantaverkkosopimus n.d.). Ilman loistehon kompensointia jakelu- tai alueverkkoyhtiöille voi aiheutua suuria kustannuksia kantaverkosta otetun ja kantaverkkoon annetun loistehon myötä, sillä loistehon ilmaisosuuden ylittämisestä jakelu- ja alueverkkoyhtiöt joutuvat maksamaan kantaverkkoyhtiölle sakkomaksuja. Näillä maksuilla Fingrid pyrkii siihen, että verkkoyhtiöt pitävät loistehon tuoton ja kulutuksen kurissa. (Eronen ym. 2018, 20.)

Kantaverkkosopimuksessa määritetään palveluehdot ja hinnat, sekä kantaverkkoon liittyjän oikeudet sähkön tuottamisesta ja ottamisesta kantaverkkoon liittymispisteensä kautta. (Kantaverkkosopimus n.d.) Fingridin tavoite on vähentää kantaverkosta otettua loistehoa tällä loissähkömaksulla sekä saada jakelu- ja alueverkkoyhtiöt kompensoimaan omaa loistehoaan sähköverkoissaan. Kom-

pensointivelvoitteestaan sähköverkkoyhtiöt siirtävät myös osan sähkökäyttäjilleen loistehomaksun muodossa. (Eronen ym. 2018, 20.) Loistehomaksu sekä -energiamaksu määritetään kuukauden suurimman liittymispistekohtaisen loissähköikkunan ylityksestä kuvion 3 mukaan. Fingrid on antanut laskutukseen muutamia lievennyksiä, joiden mukaan huipputehon hinnoittelussa ei mm. lasketa mukaan kuukauden viittäkymmentä suurinta ylitystä. Loistehosta ei myöskään laskuteta, mikäli loisikkunan ylitys johtuu kantaverkossa syntyvästä häiriö- tai vikatilanteesta (Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito 2021, 7.) Tämänhetkinen kuukausittainen loistehomaksu on 1000 €/MVA_r ja loisenergiamaksu 5 €/MVA_rh (Kantaverkkopalvelumaksut N.d.).



Kuvio 3. Loistehoikkuna (Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito 2021, 8)

Tietyissä tilanteissa loissähkön laskutus voidaan toteuttaa siten, että loissähkön hinnoittelussa käytetään yhden liittymispisteen sijasta usean liittymispisteen loistehojen netotusta. Tässä tilanteessa yhdellä samalla kantaverkkoon tai myös muun toimijan alueverkkoon liittyjällä tulee olla usea liittymispiste yhden kytkinlaitoksen samassa kiskossa. Silloin anto- ja ottomaksun perusteena oleva pätö- ja loisenergiamäärä lasketaan nettosummana kaikista näistä liittymispisteistä tuntikohtaisesti. Mikäli samassa kiskostossa on usea eri liittyjä kantaverkkoon, tällöin netotuksesta on erikseen tehtävä sopimus liittyjien ja Fingridin kanssa. (Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito 2021, 9.)

3.2.3 Loissähkön otto- ja antorajojen muodostuminen

Kantaverkosta otetulle ja annetulle sähkölle määrätyt rajat on määritetty perustuen liittymispisteen kautta siirrettyyn vuotuisen pätötehon ottoenergiaan ja liittymispisteen takaisten voimalaitosten yhteenlaskettuun nettosähkötehoon sekä sähkövarastojen yhteenlaskettuun maksimitehoon. (Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito 2021, 3–4.) Mikäli taas liityntä ei ole suoraan kantaverkkoon, vaan välissä on jokin toinen alueverkkotoimija, tällöin loissähkörajoista voidaan sopia erikseen. Tässä opinnäytetyössä tarkastelun alla oleva verkko ei liity suoraan kantaverkkoon, vaan välissä on 110 kV alueverkko, jota ylläpitää Koillis-Satakunnan Sähkön ja Keuruun Sähkön yhdessä omistama alueverkkoyhtiö Sähkö-Virkeät Oy (Sähkö-Virkeät Oy n.d.). Tällöin otetusta ja annetusta loistehosta maksetaan Sähkö-Virkeät Oy:lle. Myös sallittavien loistehoikkunan anto- ja ottorajojen ylitysten määrä on erikseen sovittu.

Kantaverkkoon liittyjillä ottorajat ja antorajat määräytyvät sen mukaan, tuotetaanko vai kulutetaanko liittymispisteessä pätötehoa. Liittymispistekohtaiset loissähkörajat kuluttaessa pätötehoa saadaan laskemalla liittymispisteen ottoraja (Q_D) kaavan 6 avulla ja antoraja (Q_{D1}) kaavan 7 avulla.

$$Q_D = 0,16 \cdot \frac{W_{otto}}{t_k} + 0,1 \cdot \frac{P_{netto}}{0,9} \quad (6)$$

$$Q_{D1} = -0,25 \cdot Q_D \quad (7)$$

missä W_{otto} = liittymispisteen ottoenergia vuodessa [MWh]

t_k = 7000 h (prosessiteollisuuden huipunkäyttöaika)

t_k = 5000 h (muulle kulutukselle huipunkäyttöaika)

P_{netto} = Liittymispisteen takaisten voimalaitosten nettosähkötehojen sekä suuntaajakytkettyjen sähkövarastojen maksimitehojen summa [MW]

Kantaverkkoliitynnässä loistehoikkunan minimikoot määritellään niin, että ottoraja on kuitenkin aina minimissään 2 MVAR, kun kyseessä on voimajohtoliityntä ja 4 MVAR, kun kyseessä on sähköasemaliityntä. Korkeimmillaan ottoraja voi olla 50 MVAR.

Liittymispisteen loissähkön ottorajaa (Q_G) ja antorajaa (Q_{G1}) sovelletaan tuotettaessa päätötehoa kantaverkkoon siten, että kyseiset loissähkörajat voivat olla jännitteestä riippuvia. Käytännössä jänniteriippuvat rajat tarkoittavat sitä, että loistehoa saa antaa ja ottaa rajattomasti, kun liittymispiste säätää kantaverkon jännitettä. Tässä tapauksessa edellytyksenä kuitenkin on, että liittymispisteen jännitetieto on saatavilla ja energiamittaus ei sijaitse muuntajan alajännitepuolella. Mikäli nämä edellytykset eivät täyty, jänniteriippuvien loissähkörajojen noudatus ei ole mahdollista ja tällöin käytössä ovat anto- ja ottorajat, jotka voidaan laskea kaavoilla 8 ja 9. (Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito 2021, 3–4.)

$$Q_G = 0,1 \cdot \frac{P_{netto}}{0,9} \quad (8)$$

$$Q_{G1} = -Q_G \quad (9)$$

missä Q_G = Loistehon ottoraja [MVar]

Q_{G1} = Loistehon antoraja [MVar]

P_{netto} = Liittymispisteen takaisten voimalaitosten nettosähkötehojen sekä suuntaajakytettyjen sähkövarastojen maksimitehojen summa [MW]

3.3 Loistehon kompensointi

3.3.1 Kompensointitarpeen syntyminen

Kompensoinnin tarkoituksena on parantaa verkkokytken tehokerrointa sekä laskea verkossa syntyviä häviöitä ja sitä kautta saada myös kustannukset kuriin. Kompensointi helpottaa myös verkon jännitteen säätöä ja lisää siirtokapasiteettia. (Matias 2013.) Sähkönjakeluverkoissa varsinkin kapasitiivisen loistehon kompensointitarvetta tuo lisääntyvä maakaapelointi ja ilmajohtojen muuttaminen maakaapeliksi. Maakaapeli tuottaa verkkoon kapasitiivista loistehoa huomattavasti enemmän kuin ilmajohdot. Tämä johtuu kaapelien suuremmista maakapasitanssien arvoista. Loistehon tuotto on suurimmillaan pienen kuormituksen aikana. Kuvio 4 osoittaa, että maakaapelin loistehotase pysyttelee kapasitiivisella puolella melkein täysin kuormituksesta riippumatta, eli tällöin se tuottaa verkkoon kapasitiivista loistehoa. Riippuen kaapelin tyypistä, kapasitiivinen loisteho voi alkaa kulumaan loistehotaseen kääntyessä induktiiviselle puolelle ja tämä tapahtuu vasta kun

kuormitus on todella korkea. Vastaavasti taas kuvio 5 osoittaa, kuinka ilmajohtdot ovat jo pienelläkin kuormituksella kapasitiivista loistehoa kuluttavia. Maakaapeleiden ja ilmajohtojen loistehotaseet on laskettu käyttäen kaavaa 10. (Väisänen 2012, 41, 43–46.)

$$Q_{lt} = \omega \cdot C \cdot U^2 - 3 \cdot \omega \cdot L \cdot I^2 \quad (10)$$

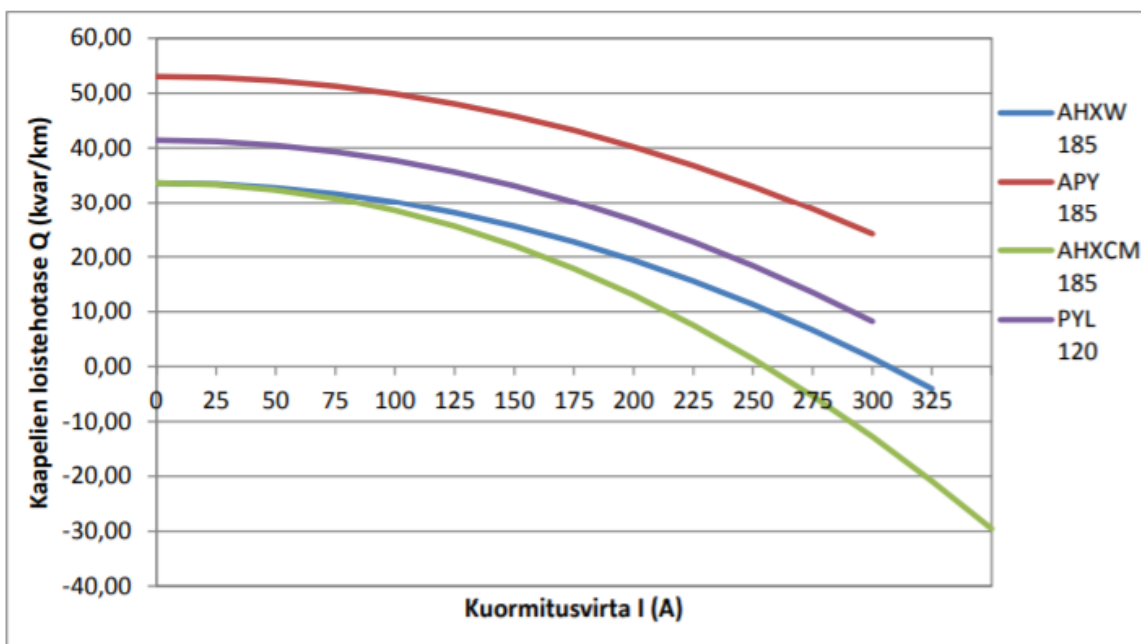
missä C = käyttökapasitanssi [F]

L = induktanssi [Ω]

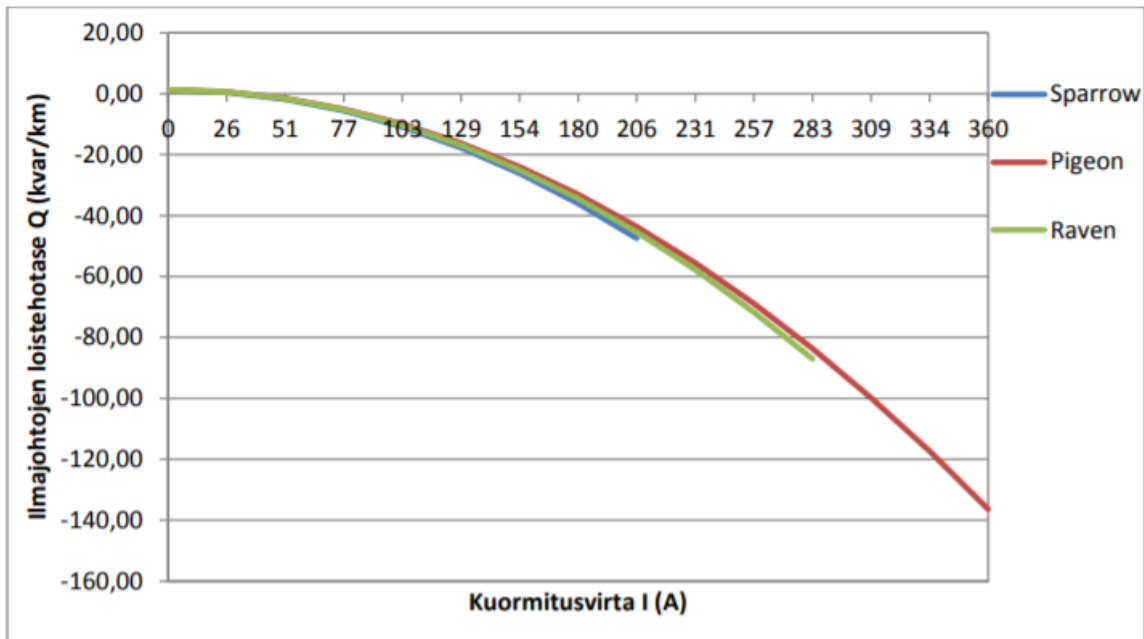
I = kuormitusvirta [A]

U = jännite [U]

ω = verkon kulmataajuus



Kuvio 4. Maakaapelien loistehotase eri kuormituksilla 20kV jännitetasolla (Väisänen 2012, 45)



Kuvio 5. Ilmajohtojen loistehotase eri kuormituksilla 20kV jännitetasolla (Väisänen 2012, 46)

3.3.2 Kompensointi teoriassa ja sen vaikutukset verkkoon

Yksinkertaistettuna loistehon kompensointi on sitä, kun induktiivisen kuorman rinnalle kytketään esimerkiksi kondensaattori, joka on kapasitiivista loistehoa tuottava komponentti tai vastaavasti kapasitiivisen kuorman rinnalle kytketään kela, joka taas on kapasitiivista loistehoa kuluttava komponentti. (Eno 2016, 8, 14; Loistehon kompensointi 2018, 1.) Loistehon kompensointi tulisi aina suunnitella ja toteuttaa niin, kun se on tarpeellista ottaen huomioon teknisen ja taloudellisen näkökulman. Lisäksi sen tulee olla riittävässä määrin säädeltävissä kuormituksen mukaan tapahtuvien loistehovaihteluiden takia, jotta yli- ja alikompensoinnilta vältyttäisiin. Näin voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun kompensointi toteutetaan esimerkiksi kiinteillä kondensaattoriparistoilla, joissa ei ole säädettävyttä. Tällöin verkon kuormituksen ollessa pienimmillään, kytkettynä olevat kaapelit ja kiinteät kondensaattorit saattavat tuottaa verkkoon tarpeellista määrää enemmän loistehoa. Jossain tapauksissa myös säädettävät kompensointiyksiköt saattavat aiheuttaa ylikompensointia esimerkiksi laitteiston säätäjän ollessa viallinen tai jos säätäjän viritys on tehty väärin. (Eronen ym. 2018, 76, 84.)

Kompensointitarpeen määrittäminen aloitetaan selvittämällä verkossa mahdollisesti jo olemassa olevan kompensoinnin määrä ja laitteistojen tiedot. Tarvittavan kompensoinnin määrittely aloite-

taan kompensoitavan kohteen kuormitusasteen määrittämisellä, joka saadaan mittaamalla pätötehoa. Mittauksista selvitetään viikko- ja päiväkohtaiset pätöteho- ja loistehohuiput. Jokaisesta vaiheesta olisi hyvä mitata pätöteho, virta ja tehokerroin, ja jos kohteessa on jo kompensointia, niin mittaus tulisi suorittaa uudelleen laitteen usealla eri kompensointiasteella. Näiden perusteella pitäisi saada mallinnettua tarvittava kompensointiteho. Kompensointia suunnitellessa olisi tärkeää myös tuntea verkon yliaaltopitoisuus. (Eronen ym. 2018, 100)

Kompensointilaitteiden oikeaoppinen mitoitus on erittäin tärkeää, sillä kompensointilaitteilla on muitakin vaikutuksia verkkoon, kuin pelkkä kompensointi. Esimerkiksi kompensointikondensaattorin kytkeytyessä verkkoon verkon jännite nousee, jonka vaikutus nähdään esim. valaistuksessa melko häiritsevä. Jännitteen nousemisen takia esimerkiksi valot kirkastuvat äkillisesti. Jännitteen nousun osalta tulisi pyrkiä siihen, että se saadaan pidettyä alle 3 prosentissa. Jännitteen nousumisen määrä saadaan laskettua kaavalla 11. (Elovaara & Haarla 2011, 230.)

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_R}{S_K}} \quad (11)$$

missä U'_1 = jännite kytkennän jälkeen [V]

U_1 = jännite ennen kytkentää [V]

Q_R = pariston mitoitusteho [Var]

S_K = verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä [VA]

3.4 Loistehon kompensointitavat ja -laitteistot

Tässä luvussa käsitellään erilaisia tapoja ja laitteistoja, joilla voidaan kompensoida joko kapasitiivista tai induktiivista loistehoa sähköverkossa. Kompensointilaitteita löytyy kiinteinä ja säädettävänä, ja niiden sijoittelu verkkoon voidaan toteuttaa keskitetysti sähköasemalla ja hajautetusti verkon eri johtolähtöjen varrella. Yhdistämällä hajautettua ja keskitettyä kompensointia saataisiin teoriassa paras lopputulos loistehon kompensoinnin kannalta. Hajautetulle kompensoinnille parhaiten sopiva sijainti on maakaapeloidut alueet kaukana sähköasemasta, jolloin kompensointi voitaisiin toteuttaa mahdollisimman lähellä loistehon tuottopaikkaa, eikä loistehoa siirrettäisi pitkiä matkoja sähköasemalle kompensoitavaksi siirtokapasiteettia syöden. Kompensointia suunnitellessa täytyy ottaa huomioon ylikompensoinnin mahdollisuus ja kuormituksen mukaan syntyvät

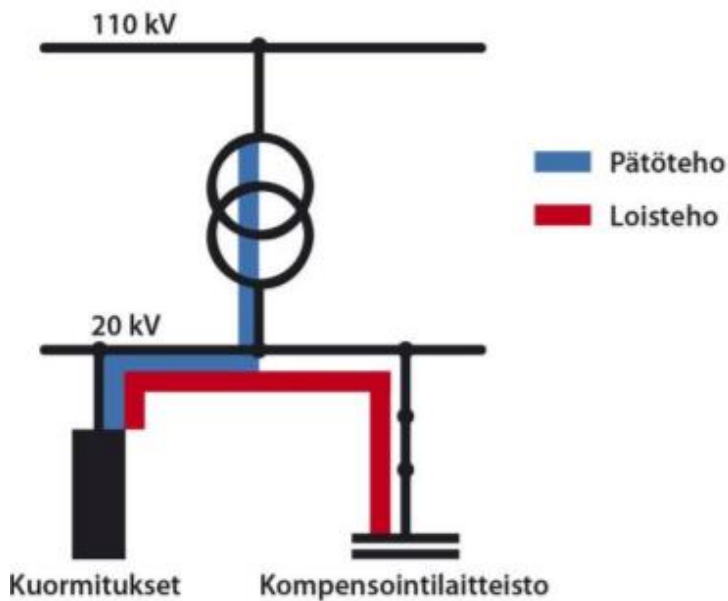
loistehovaihtelut. Yleensä kompensointiin suositellaan säädettäviä kompensointilaitteita loistehovaihteluiden takia. Kompensointiasteen säätö on toteutettavissa sekä jännitteettömänä että jännitteellisenä, riippuen kompensointilaitteen säädön toteutustavasta. (Loistehon kompensointi n.d.)

3.4.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Keskijänniteverkossa induktiivisen loistehon kompensoinnilla keskitetysti sähköasemalla voidaan vaikuttaa loistehon ottoon kantaverkosta ja päämuuntajan häviöihin vähentävästi. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi rinnakkaiskondensaattoriparistolla kuvion 6 periaatteen mukaisesti. (Eronen ym. 2018, 58, 85–86.) Rinnakkaiskondensaattoripariston sarjaan kytkettyjen yksiköiden määrä katsotaan verkon mitoitusjännitteen ja kompensointiyksikön mitoitusjännitteen mukaan ja rinnan kytketyiden määrä pariston tehon mukaan. Pariston teho voi olla 110 kV verkossa esimerkiksi 20–50 MVar ja 20 kV verkossa 1–5 MVar. Verkon yliaaltopitoisuuden kannalta mainittakoon, että kondensaattoripariston mitoituksen osalta tulee ottaa huomioon muun muassa se, että verkossa esiintyvien virtojen yliaaltokomponenttien takia pariston mitoitusvirta tulisi olla 1,3-kertainen, jotta se kestää lämpenemisen. Myös sen oheislaitteet kuten kytkinlaitteet, virtamuuntajat ym. kannattaa mitoittaa mitoitusvirraltaan pariston edellyttämää mitoitus-tehoa suuremmaksi. Suositeltavaa on, että mitoitusvirta olisi vähintään 43 % suurempi, kuin pariston mitoitus-teho edellyttäisi. Rinnakkaiskondensaattorin tuottaman loistehon määrä saadaan laskettua kaavan 12 mukaan. (Elovaara & Haarla 2011, 228–230.)

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2 = \left(\frac{U}{U_R}\right)^2 \cdot Q_R \quad (12)$$

missä U = verkon jännite [V]
 U_R = kondensaattorin mitoitusjännite [V]
 Q_R = kondensaattorin mitoitus-teho [Var]
 ω = verkon kulmataajuus = $2\pi f$
 C = kondensaattorin kapasitanssi [F]

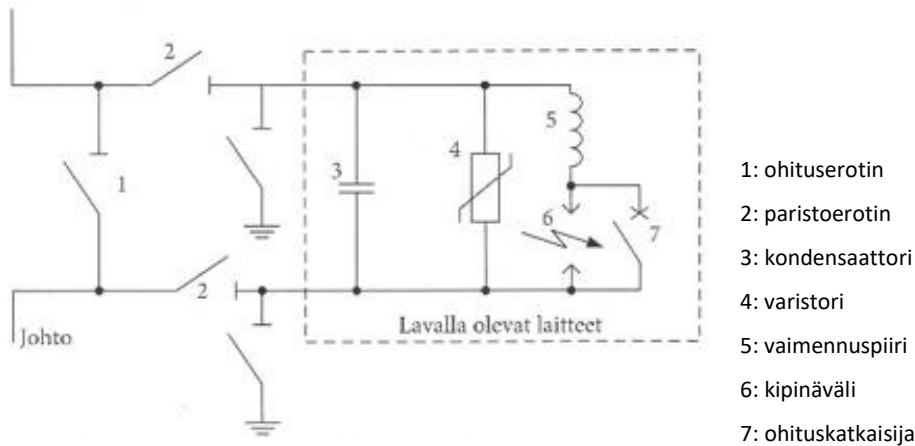


Kuvio 6. Rinnakkaiskompensoinnin periaatekuva (Väisänen 2012, 12)

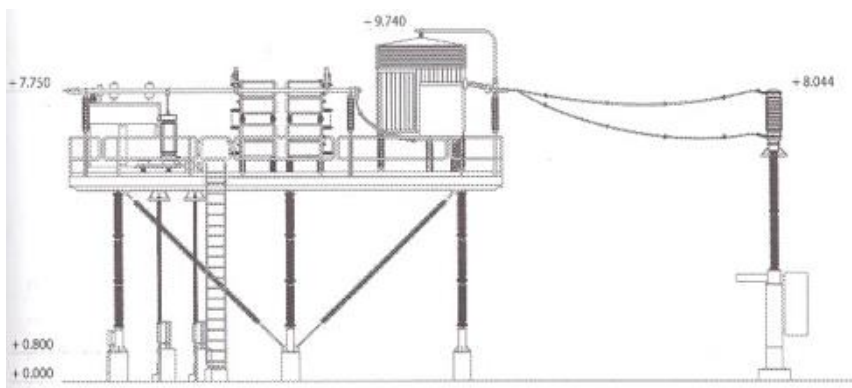
3.4.2 Sarjakondensaattoriparisto

Induktiivisen loistehon kompensointi voidaan myös toteuttaa hajautetusti keskijännitejohtolähtöjen varrelle sijoitetuilla kondensaattoriparistoilla, mikä vähentää myös loistehon oston tarvetta sekä lisäksi muun kompensoinnin tarvetta, parantaa verkon siirtokykyä ja vähentää häviöitä edeltävässä verkossa (Eronen ym. 2018, 58, 85–86). Kun käytetään tätä kompensointitapaa, käytetty laitteisto on sarjakondensaattoriparisto, joka on nimensä mukaisesti johtojen välille sarjaan kytkettävä kompensointilaitte. Tällä laitteella voidaan vähentää verkossa johtojen päiden välistä induktiivista reaktanssia, joka parantaa verkon siirtokykyä. Sen tuottaman loistehon määrä riippuu johdon kuormitusvirran suuruudesta. Sarjakondensaattorin ja rinnakkaiskondensaattorin ero ilmenee vain niiden verkkokytken ja suojauksen osalta, rakenteeltaan se on periaatteessa samankaltainen kuin rinnakkaiskondensaattoriparisto. Sarjakondensaattori on yllättävän monimutkainen laite rakenteeltaan, ottaen huomioon sen passiivisuuden ja ohjaamattomuuden. Se täytyy tarpeen mukaan saada erotettua verkosta ilman siirtoyhteyden pitkäaikaista katkeamista. Tästä johtuen se liitetään verkkoon käyttäen ohitus- ja paristoerottimia. Itse kytkennät tapahtuvat ohituskatkaisijalla, joka on auki, kun laitteisto on kytkettynä verkkoon. Katkaisijoiden ollessa hitaita kytkentälaitteita, ylijännitesuojaukseen käytetään metallioksidivaristoreita, jotka auttavat sarjakompensaattoria säilyttämään suojujen jäännösjännitteen edustaman osan kompensoimiskapasiteetistaan myös silloin, kun varistorit toimivat. Laitteistosta löytyy myös vaimennuskela siltä varalta, että varistori

täytyy ohittaa ohjattavalla kipinävälillä tai ohituskytkimellä sen energianpurkamiskyvyn ylityksen uhatessa. Vaimennuskelalla saadaan rajoitettua vaimennuspiirissä kulkevaa purkausvirtaa. Kuviot 7 sekä 8 havainnollistavat sarjakondensaattorin rakennetta. (Elovaara & Haarla 2011, 232–233.)



Kuvio 7. Sarjakondensaattori (Elovaara & Haarla 2011, 234)



Kuvio 8. Sarjakondensaattorilava (Elovaara & Haarla 2011, 235)

3.4.3 Rinnakkaiskuristin tai -reaktori

Loistehotasapainon ylläpidon myötä kondensaattoriparistojen lisäksi pienen kuormituksen aikana varsinkin pitkillä siirtoetäisyyksillä jännitettä nostavan verkossa kapasitiivisen loistehon kompensointiin käytetään rinnakkaiskuristimia eli reaktoreita. Tällöin kapasitiivinen loisteho kompensoidaan induktiivisella loisteholla. Reaktoreita voidaan käyttää keskijänniteverkossa myös rajoittamaan oikosulkuvirtoja sekä ylijännitteitä. (Elovaara & Haarla 2011, 225–227.) Hajautettuun kompensointiin tarkoitettuja yhdistelmälaitteita, jotka sisältävät maasulkuvirran kompensointikäymityksen, voidaan käyttää loistehon kompensoinnin lisäksi myös maasulkuvirran kompensointiin.

Tämän lisäksi laitteita saa myös jakelumuuntajakäämitykset sisältävinä yhdistelmälaitteina. (Loistehon kompensointi n.d.). Reaktoreita on olemassa öljyeristeisiä sekä kiinteää eristettä käyttäviä, ilmasydämissä ja ilmajähdytteisiä. Reaktorit kytketään yleensä tähteen ja asennetaan tasasivuisen kolmion kärkiin samaan tasoon. Näin vältetään epäsymmetrinen reaktori-impedanssi sekä reaktorin luoman magneettikentän laajeneminen. Koska reaktorit luovat ympärilleen voimakkaan magneettikentän, maadoitukset tulisi toteuttaa säteittäiselektrodeilla ja sitä ympäröivät suoja-aidat on rakennettava sellaisesta materiaalista, joihin ei voi induoitua silmukkavirtoja, esimerkiksi puusta. Reaktorin luomien magneettisten voimien myötä laitteiston eliniän väheneminen on yleistä niiden aiheuttaman värinän ja lämpöliikkeiden takia. Reaktorin kuluttaman loistehon määrä saadaan kaavalla 13. (Elovaara & Haarla 2011, 225–227.)

$$Q = \left(\frac{U}{U_R}\right)^2 \cdot Q_R \quad (13)$$

missä Q = Reaktorin kuluttama loisteho [MVar]

U = verkon jännite [kV]

U_R = reaktorien mitoitusjännite [kV]

Q_R = reaktorien mitoitusteho [MVar]

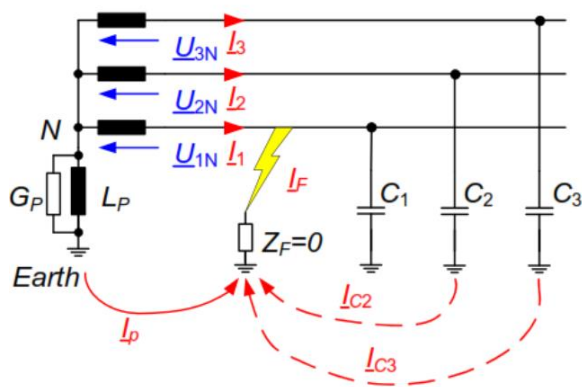
Reaktoreita on saatavana kiinteinä sekä säädettävänä yksiköinä. Jännitteettömänä kompensointiyksiköitä voidaan säätää väliottokytkimellä, joka voi olla käsikäyttöinen tai moottorikäyttöinen. Moottorikäyttöisessä säädössä etuna käsikäyttöiseen verrattuna on se, että kompensointiportaan muutoksen voi tehdä ilman käyntiä sähköasemalla. Jännitteellisenä säätö voidaan toteuttaa käämikytkimellä, sekä käämikytkimellä ja automaattisäätäjällä, mutta tämä automaattisesti säätävä säätötapa on reilusti kalliimpi vaihtoehto. (Loistehon kompensointi n.d.)

4 Maasulkuvirta

4.1 Maasulkuvirran ja nolajännitteen laskeminen

Tässä luvussa käsitellään maasulkutilannetta, maasulkutilanteen syntymistä sekä paljon siihen liittyvää laskentaa ja laskukaavoja riippuen verkon maadoitustavasta. Sähköverkko voi olla maasta erotettu, kompensoitu tai resistanssin kautta maadoitettu verkko.

Maasulkutilanne syntyy, kun verkossa syntyy eristysvika. Esimerkiksi silloin, kun jossain kohtaa verkossa puun oksa koskettaa sähköjohtoa, jolloin verkon yhden vaiheen ja maan välille syntyy yhteys. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.) Tällöin verkon vaihejännitteet eivät ole maahan nähden symmetrisiä ja terveissä vaiheissa ilmenee jännitteen nousua sekä vikapaikassa saattaa syntyä valokaari. Maasulkuvirta syntyy tämän epäsymmetrian myötä, kun verkon maakapasitanssien kautta kulkeva osa varausvirroista ei muodosta symmetristä järjestelmää. Silloin osa varausvirrasta kulkee vikapaikan kautta maahan. (Maasulkusuojaus 2000, 1.) Maasulkuvirtaa ja vikapaikan kosketusjännitetasoa voidaan hallita maasulkuvirran kompensointilaitteilla. Maasulkuvirran kompensointia käsitellään tarkemmin luvussa 4.2. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.) Maasulku voi ilmentyä yksivaiheisena ja monivaiheisena. Maasulku on useimmin kuvion 9 mukainen yksivaiheinen maasulku, joka avojohdoilla on yleisemmin salamaniskun aiheuttama vika. (Elovaara & Haarla 2011, 439.) Kaksoismaasulussa verkon eri paikoissa kahdessa vaiheessa ilmenee eristysvika. Maasulkuvirtoja ja nolajännitteitä määrittäessä täytyy tuntea koko galvaanisesti yhteen kytketty verkko riippumatta siitä, onko verkko maasta erotettu tai kompensoitu. (Maasulkusuojaus 2000, 1.)



Kuvio 9. Havainnekuva yksivaiheisesta maasulusta (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.)

4.1.1 Maasta erotettu verkko

Seuraavaksi käsitellään laskukaavoja, millä voidaan laskea vikapaikassa viallisesta vaiheesta maahan kulkeva maasulkuvirta. Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta (I_e) suorassa maasulussa voidaan laskea kaavalla 14. (Maasulkusuojaus 2000, 1.)

$$I_e = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U \quad (14)$$

missä C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

U = verkon pääjännite [V]

ω = verkon kulmataajuus = $2\pi f$

Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa vikaresistanssi. Maasulkuvirran suuruus (I_{ef}) pienenee vikaresistanssin vaikutuksesta, jolloin maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 15. (Maasulkusuojaus 2000, 1–2.)

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_0}{\sqrt{(1 + (3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_f)^2)}} \cdot U \quad (15)$$

missä C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

R_f = vikaresistanssi [Ω]

U = verkon pääjännite [V]

ω = verkon kulmataajuus = $2\pi f$

Maasta erotetussa verkossa vaihevirtojen summavirrassa ei näy maasulussa olevan johdon syöttöpäässä johtolähdön omien maakapasitanssien kautta kulkevaa maasulkuvirtaa. Taustaverkon syöttämä maasulkuvirta, eli vaihevirtojen summavirta ($\sum I_v$) voidaan laskea tällöin kaavalla 16.

$$\sum I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} \cdot I_{ef} \quad (16)$$

missä C_0 = suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

C_{0j} = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

Maasulkuvirta, jonka taustaverkko syöttää voidaan laskea myös kaavaa 17 käyttäen, mikäli on tiedossa suorassa maasulussa jokaisen johdon itsensä syöttämä maasulkuvirta. (Maasulkusuojaus 2000, 4.)

$$\sum I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} \cdot I_{ef} \quad (17)$$

missä I_e = verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ej} = johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

Maasulkuvirran myötä verkossa syntyneen vaihejännitteiden epäsymmetrian myötä verkon tähtipisteen potentiaali on maan potentiaalista poikkeava, jolloin syntyy nollajännite (U_0), joka voidaan laskea kaavalla 18. Ilman vikaresistanssia, eli suorassa maasulussa nollajännite on yhtä suuri kuin vaihejännite.

$$U_0 = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0} \cdot I_{ef} \quad (18)$$

missä C_0 = suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

ω = verkon kulmataajuus = $2\pi f$

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

Kaksoismaasulussa nollajännite voidaan laskea kaavalla 19. (Maasulkusuojaus 2000, 5–6.)

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{(R_f \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0)^2 + 4}} \quad (19)$$

missä R_f = viallisten vaiheiden vikaresistanssi [Ω]

C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

I_e = verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa yksivaiheisessa maasulussa [A]

U = verkon pääjännite [V]

Kaksoismaasulussa nollajännite on hyvin lähellä yksivaiheisen maasulun jännitettä suurilla vikaresistanssin arvoilla. Mikäli kumpikin maasulku on samassa lähdössä, lähdön vaihevirtojen summavirta, joka ei sisällä vaiheiden välistä vikavirtaa, on laskettavissa kaavoilla 16 ja 17 (Maasulkusuojaus 2000, 6.)

4.1.2 Kompensoitu verkko

Kompensoidussa verkossa, eli verkossa, jonka tähtipisteeseen on kytketty kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoiva kompensointikuristin, maasulussa vikapaikan kautta kulkee vain tämän kompensointikuristimen sekä verkon häviöiden aiheuttama jäännösvirta.

Vikapaikan virta (I_{ef}) saadaan kaavalla 20.

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1+R_0^2\left(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f+R_0)^2+R_f^2\cdot R_0^2\left(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L}\right)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

missä ωL = kompensointikuristimen reaktanssi [Ω]

R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi [Ω]

R_f = vikaresistanssi [Ω]

Täysin kompensoidussa verkossa yllä oleva yhtälö 20 sievenee ja vikapaikan maasulkuvirta voidaan tällöin laskea kaavalla 21.

$$I_{ef} = \frac{1}{R_0+R_f} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Kompensoidussa verkossa nollajännite (U_0) voidaan laskea kaavalla 22 ja täysin kompensoidussa verkossa kaavalla 23.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \cdot I_{ef} \quad (22)$$

$$\frac{U_0}{U_V} = \frac{R_0}{R_0 + R_f} \quad (23)$$

missä R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi [Ω]
 ωL = kompensointikuristimen reaktanssi [Ω]
 R_f = vikaresistanssi [Ω]

Johtolähtöjen maasulkusuojauksen kannalta tärkeä vaihevirtojen summavirran pätökomponentin (I_{efp}) laskemisessa voidaan käyttää kaavaa 24. Tällä saadaan likimääräinen arvo summavirran pätökomponentista.

$$I_{efp} = \frac{1}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 + R_0^2 \cdot \left(3 \cdot \omega \cdot C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

missä R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi [Ω]
 ωL = kompensointikuristimen reaktanssi [Ω]
 R_f = vikaresistanssi [Ω]
 C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

Toisin kuin maasta erotetussa verkossa, sammutetussa verkossa maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirtaan vaikuttaa myös johdon oman maakapasitanssin kautta kulkeva maasulkuvirta. Sen lisäksi summavirtaan vaikuttaa myös vuotohäviöresistanssien kautta kulkeva osa virrasta. Vaihevirtojen summavirta ($\sum I_v$) voidaan laskea kaavalla 25. Virran vaihekulma negatiivisena otettuun nollajännitteeseen nähden voidaan laskea kaavalla 26. (Maasulkusuojaus 2000, 7–10.)

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{((1-K) \cdot I_e - I_{ej})^2 + (I_r - I_{rj})^2}}{\sqrt{((1-K) \cdot I_e)^2 + I_r^2}} * I_{ef} \quad (25)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{(1-K) \cdot I_e - I_{ej}}{I_r - I_{rj}}\right) \quad (26)$$

missä K = kompensointiaste

I_e = verkon kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ej} = johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_r = kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisio-
resistanssin aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa [A]

I_{rj} = lähdön häviöiden aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa [A]

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

4.1.3 Suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko

Suuren resistanssin kautta maadoitetussa verkossa maasulkuvirtaa kasvatetaan verkon tähtipisteeseen kytketyllä resistanssilla. Tällä tavalla saadaan pienennettyä verkossa kytkentä- ja katkaisutilanteiden sekä katkeilevan maasulun aiheuttamia ylijännitteitä. Tässä tilanteessa vikapaikan virta (I_{ef}), joka kulkee viallisesta vaiheesta maahan, on verkon maakapasitanssien ja maadoitusresistanssin kautta kulkevien virtojen summa ja virran laskemiseen voidaan käyttää kaavaa 27.

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + (R_e \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0)^2}}{\sqrt{(R_f + R_e)^2 + (R_f \cdot R_e \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_0)^2}} * \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

missä C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

R_e = maadoitusresistanssi [Ω]

R_f = vikaresistanssi [Ω]

Kun tiedetään vikapaikan virta, voidaan laskea nollajännite (U_0). Se saadaan kaavalla 28.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_e}\right)^2 + (3 \cdot \omega \cdot C_0)^2}} \cdot I_{ef} \quad (28)$$

missä C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi [F]

R_e = maadoitusresistanssi [Ω]

I_{ef} = vikapaikan virta [A]

Suuren resistanssin kautta maadoitetun verkon johdon syöttöpään ollessa maasulussa vaihevirtojen summavirran määrä voidaan laskea kaavalla 29. Vaihekulma negatiivisena otettuun nollajännitteeseen nähden lasketaan kaavalla 30. Tämä summavirta sisältää jälleen johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevan maasulkuvirran sekä vuotohäviöresistanssin kautta kulkevan virran.

(Maasulkusuojaus 2000, 10–11.)

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{(I_e - I_{ej})^2 + I_r^2}}{\sqrt{I_e^2 + I_r^2}} \cdot I_{ef} \quad (29)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{I_e - I_{ej}}{I_r}\right) \quad (30)$$

missä I_e = verkon kapasitiivinen kokonismaasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ej} = johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_r = kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa [A]

I_{rj} = lähdon häviöiden aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa [A]

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

4.2 Maasulkuvirran kompensointi

Tässä luvussa perehdytään maasulkuvirran kompensointiin, sen tarkoitukseen ja siihen liittyviin kompensointilaitteistoihin. Maasulkuvirran kompensoinnilla on myös vaikutuksia suunnatun maasulkusuojausten toimintaan sekä katkeilevan maasulun suojaustoimintaan, joita tässä luvussa pohditaan.

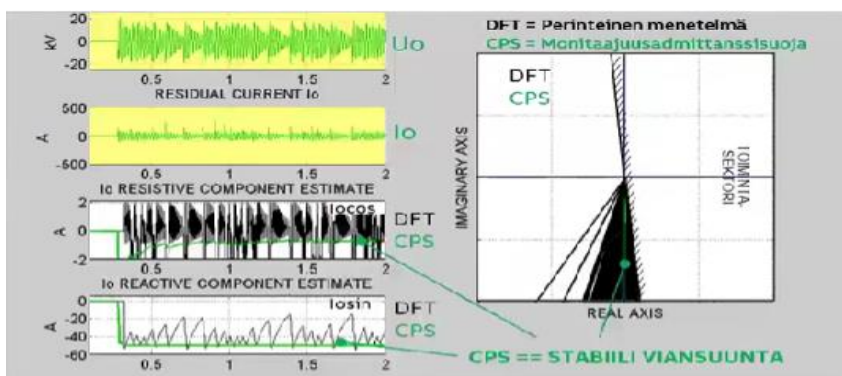
4.2.1 Maasulkuvirran kompensoinnin tarkoitus

Maakaapelin lisääntyessä sähköverkoissa maasulkuvirta kasvaa. Tämä johtuu siitä, että kaapeleiden kapasitanssiarvot sekä maasulkuvirta-arvot ovat paljon suurempia kuin avojohtojen. Tämä tarkoittaa siten kompensointitarpeen kasvua maakaapelin lisääntyessä. Kompensoinnin avulla saadaan maasulkuvirran pienentämisen lisäksi hallittua vaarallista kosketusjännitetasoa vauriokohdassa maasulkutilanteen tapahtuessa. Tämä pienentää myös verkon komponenttien rasitusta ja estää laitteiden vaurioitumista. Kapasitiivisen maasulkuvirran kompensointi perustuu maakapasitanssien kumoamiseen sopivalla induktanssilla. Tällöin saadaan vältettyä pikajälleenkytkentätilanne, kun vikapaikalla mahdollisesti syntyvä valokaari saadaan sammumaan kompensointilaitteiden avulla. Kompensointilaitteiden myötä valokaaren itsestään sammuminen ja pikajälleenkytkennän välttäminen onnistuu jopa noin 80 % tapauksista. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.) Maasulkuvirran kasvu aiheuttaa sähköverkkoyhtiöille lisäinvestointikuluja nykyisten kompensointikuristimien jäädessä liian pieniksi. Maasulkuvirran aiheuttamat jännitehäviöt kaapelin varrella vaikeuttaa suuriohmisten maasulkujen havainnointia asemalla mitatun nollajännitteen pienentyessä, joka ilmaisee verkon tähtipisteen ja maan välistä jännitettä maasulussa. (Vastaus maasulkuvirran kompensoinnin haasteisiin n.d.)

4.2.2 Maasulkuvirran kompensointi ja vaikutus maasulkusuojaukseen

Kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan kompensointikelloilla eli -kuristimilla, jotka voidaan kytkeä päämuuntajan alajännitepuolen tähtipisteen ja maan välille tai johtolähtöjen varsille, riippuen siitä, että toteutetaanko kompensointi keskitetysti tai hajautetusti (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.). Maasulkuvirran kompensointia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon myös maasulkusuojaus, sillä kompensoinnilla voi olla vaikutuksia maasulkusuojauksen toimintaan. Esimerkiksi maasulkutilanteen mennessä ohi, nollajännite ja summavirrat jäävät hetkeksi vaimevasti värähtelemään muilla lähdoilla aiheuttaen joissakin tapauksissa virheellisesti verkon terveen johtolähdön maasulkusuojauksen laukaisun. Tätä kutsutaan sympatialaukaisuksi. Viallisen lähdon katketessa verkosta kompensointiaste muuttuu. Jälkivärähtelyn taajuus riippuu kompensointiasteen muutoksen suuruudesta. (Mäkinen & Nikander 2017, 19.)

Tämän lisäksi kompensoidun kaapeliverkon maasulkusuojaukseen tuo haastetta myös katkeileva maasulkuvirta. Perinteisillä maasulkusuojilla katkeilevan maasulun havaitseminen vaikeutuu mitattujen nollavirran arvojen vaihtaessa suuntaa mittauksissa rajusti. Katkeilevan maasulun suojaukseen hyvä vaihtoehto olisi tällöin monitaajuusadmittanssisuoja (CPS), joka näyttää mitatut virrat stabiilimmin kuin perinteinen suoja ja ottaa huomioon perustaajuisien nollasuureiden lisäksi myös taajuudeltaan korkeammat harmoniset nollasuureet (Ks. kuvio 10). Tämän ratkaisun ansiosta myös terveen lähdön maasulkusuojan havahtumis- ja laukaisuriski vähenee katkeilevan maasulun aikana ja selektiivisyys säilyy. (Wahlroos 2018.)



Kuvio 10. Maasulkusuojan näkemä toimintapiste katkeilevan maasulun aikana terveessä johtolähdössä. (Wahlroos 2018.)

Kompensointiaste

Maasulkuvirran kompensoinnissa tulee huomioida mahdollinen yli- ja alikompensointi myös maasulkusuojauksen toiminnan kannalta. Verkon kompensoinnin määrän kertoo kompensointiaste K , joka voidaan laskea kaavalla 31.

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (31)$$

Missä I_C = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa [A]

Kompensointiasteen ollessa yli yksi, on verkko ylikompensoitu ja taas vastaavasti luvun ollessa alle yksi, on verkko alikompensoitu. Kompensoinnissa tavoitteena on saada kompensointiaste mahdollisimman lähelle lukua yksi mitoittamalla kuristimen virta maasulkuvirran mukaan, jolloin verkko

olisi sammutettu. Tämä tarkoittaa, että vikapaikan kautta verkossa kulkee mahdollisesti vain verkon ja kuristimen häviöistä syntynyt jäännösvirta. Myös mahdollinen kuristimen toisiovastuksen pätevirta ja yliaallot voivat vaikuttaa jäännösvirran suuruuteen. (Maasulkusuojaus 2000, 7.) Maasulun jäännösvirta alkaa kasvaa huomattavan määrän tietyn kaapelipituuden ylittyessä, ja vaikuttaa maasulun automaattisen sammumisen mahdollisuuteen laskevasti. Tämä on ongelmana ainakin pelkästään keskitetysti kompensoiduissa verkoissa (Lehtonen, Saarijärvi & Nurminen 2010, 24.). Verkon rinnakkaisresonanssitaajuus on 50 Hz, kun kompensointiaste on 1, eli maakapasitanssin kapasitiivisen reaktanssin ja maadoituskuristimen induktiivisen reaktanssin arvot ovat samansuuruisia. Kompensoinnissa käytetään kuitenkin yleensä 5–10 % vinoviritystä, jonka myötä verkon rinnakkaisresonanssitaajuus ei ole tasan 50 Hz. Vinoviritys tehdään yleensä alikompensoinnin puolelle, jolloin verkko on siis yleensä hieman alikompensoitu. (Mäkinen & Nikander 2017, 19.)

Keskitetty kompensointi

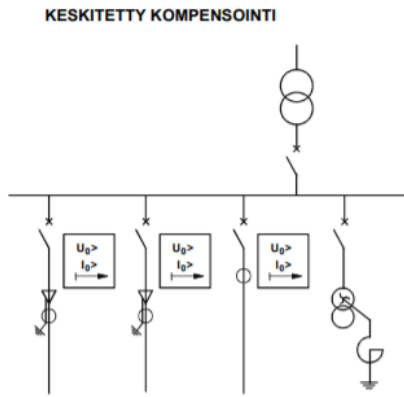
Yleisemmin kompensointi toteutetaan keskitetysti sähköasemalla kuvion 12 mukaisesti, jolloin yhdellä kompensointilaitteella voidaan kompensoida paljon maasulkuvirtaa. Keskitetyssä kompensoinnissa kuvion 11 mukainen kompensointikuristin kytketään verkon tähtipisteen ja maapotentiaalivälille mahdollisuuksien mukaan. Suomen sähköverkoissa on hyvin yleistä, että 110/20kV muuntajissa ei ole alajännitepuolen tähtipistettä. Tällöin mikäli tähtipistettä ei ole, esimerkiksi muuntajan ollessa YNd11-kytkentäinen, kompensointikuristin kytketään keinotekoiseen tähtipisteeseen, joka on toteutettavissa maadoitusmuuntajalla. Maadoitusmuuntaja on myös hyödyllinen silloin, mikäli kompensointilaitteistoa halutaan pitää käytössä jopa päämuuntajan keskeytyksen aikana. (Maasulkusuojaus 2000, 7; Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.) Maadoitusmuuntajaa käyttäessä kompensointikelan ja muuntajan välille asennetaan erotinkoje, millä mahdollistetaan kompensointikuristimen erottaminen verkosta ilman, että maadoitusmuuntajan omakäyttöjännite katkeaa. Maadoitusmuuntajaa ei välttämättä tarvita, mikäli päämuuntaja on YNyn0 kytkentäinen, jolloin alajännitepuolelta löytyy tähtipiste mihin kompensointikuristin voidaan kytkeä. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.)



Kuvio 11. Maasulkuvirran kompensointikela (vas.) ja maadoitusmuuntaja (Maasulkuvirran kompensointi n.d.)

Yleisesti keskitettyyn kompensointiin käytetty kompensointikela on rakenteeltaan öljyeristeinen säädettävissä oleva induktanssikela, jota voidaan säätää 10–100 % maksimi mitoitusvirta-arvolle. Se mitoitetaan maasulkuvirran mukaan ja tehdään yleensä vain lyhytaikaista käyttöä varten. Verkon terveessä tilassa kompensointikelan ohjauksen hoitaa kompensoinnin säätäjä. Tämän toiminta perustuu säätömoottoriin, joka muuttaa kelan induktanssia maasulkuvirran mukaan verkon terveen tilan aikana. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.)

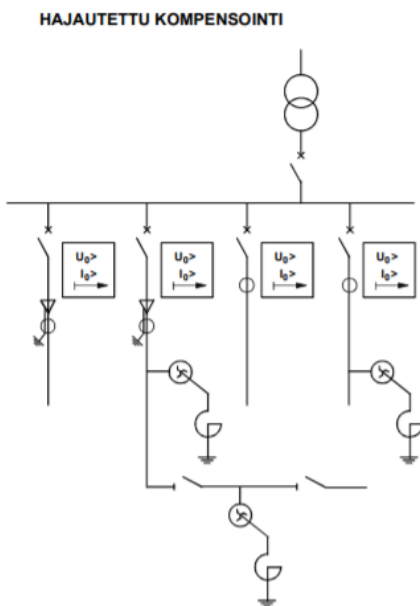
Vikapaikan valokaari saadaan sammumaan kompensointikelan yhteydessä olevan rinnakkaisvastuksen avulla, jolla voidaan muuttaa valokaaren virtaa ja jännitettä. Sen lisäksi rinnakkaisvastuksella voidaan vaikuttaa suojareiden näkemään pätövirtaan, joka on niiden toiminnan kannalta välttämätöntä. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.) Keskitetysti kompensoidun verkon maasulkusuojaus perustuu yleensä tähän vikavirran pätökomponenttiin. Maasulkutilanteessa viallisen lähdön irrotessa verkosta, voi loppuverkko jäädä hetkellisesti ylikompensoiduksi, jolloin nollajännitteen jälkivärähtelyn taajuus on yli 50 Hz. Kompensointiasteen muutos riippuu katkaistavan lähdön tuottamasta maasulkuvirrasta sekä mahdollisesti sille sijoitetusta kompensoinnista. Jälkivärähtely saattaa aiheuttaa toisissa lähdöissä maasulkureleen havahtumista, mikäli suojarele näkee jälkivärähtelyn summavirran pätövirtana. (Mäkinen & Nikander 2017, 20, 26)



Kuvio 12. Keskitetty kompensointi (Maasulkusuojaus 2000, 7.)

Hajautettu kompensointi

Hajautetun kompensoinnin kohdalla tarvittavat kompensointikuristimet sijoitetaan verkkoon johtojen varsille kuvion 13 mukaisesti. Kela mitoitetaan kompensoitavan johtolähdön tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaan. (Maasulkusuojaus 2000, 7.) Vaihtoehtona on myös tällöin käyttää kelamuuntajaa, jonka kompensointikelaa voidaan säätää tyypillisesti 5–15 ampeerin välillä. Tätä vaihtoehtoa käytetään yleensä alueilla, missä ei ole paljon asutusta tai pitkillä johtolähdöillä maasulkuvirran kompensointiin. (Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus n.d.)



Kuvio 13. Hajautettu kompensointi (Maasulkusuojaus 2000, 7.)

Pelkkää hajautettua kompensointia käytettäessä mikään verkon lähtö ei saa ylikompensoitua maasulkutilanteen sattuessa ja verkko onkin tällöin yleensä selvästi alikompensoitu. Ylikompensoituminen voi kuitenkin tapahtua maasulun jälkivärähtelyn aikana, jolloin verkon terveessä osassa voi tapahtua sympatialaukaisu. (Mäkinen & Nikander 2017, 20.) Ylikompensoitumista tulee välttää, sillä pelkästään hajautetusti kompensoidussa verkossa suunnattu maasulkusuojaus perustuu yleensä nollavirran imaginäärikomponenttiin. Suojauksen toiminnan kannalta siis hajautetun kompensoinnin kelan mitoitus tulisi toteuttaa niin, että johtolähtö olisi enemmän alikompensoitu kuin ylikompensoitu, jotta maasulkutilanteen sattuessa terveen lähdön maasulkusuojausrele ei näe vikavirtaa väärän suuntaisena ja katkaise verkosta tervettä lähtöä. Tämä tarkoittaa sitä, että terveen johtolähdön ylikompensoituessa kompensointikela tuottaa enemmän induktiivista maasulkuvirtaa, kuin johtolähtö itsessään tuottaa kapasitiivista maasulkuvirtaa. Tällöin maasulkuvirta summautuu induktiiviseksi ja terveen lähdön suunnattu rele näkee sen väärän suuntaisena ja laukaisee sen. (Wahlroos 2018.)

Keskitetty ja hajautettu kompensointi

Paras lopputulos kompensoidessa maasulkuvirtaa olisi käyttää keskitettyä kompensointia sähköasemalla, jonka lisäksi verkon varrella olisi hajautettua kompensointia. Tällä tavalla keskitetyn kompensointiyksikön kompensointikapasiteettia voitaisiin säästää. (Vastaus maasulkuvirran kompensoinnin haasteisiin n.d.) Tällöin hajautetulla kompensoinnilla toteutetut johtolähdöt voisivat olla alikompensoituja, sillä keskitetyt kompensointikelat sähköasemilla kompensoivat loput ja säätelevät kompensointiastetta. Vaikka vikatilanteen sattuessa hajautetusti kompensoitu lähtö laukaistaan pois ja täten koko verkon kompensointiaste laskee hieman hetkellisesti, rinnakkaisresonanssitaajuus ei muutu niin merkittävästi kuin silloin, kun kompensointi olisi toteutettu pelkästään keskitetysti. Nollajännitteen jälkivärähtelyn vaimenemista voidaan nopeuttaa pieniresistanssisella lisäkuormitusvastuksella, jonka kytkeminen verkkoon tulisi tapahtua vasta vian poistuttua. (Mäkinen & Nikander 2017, 19–21, 23.) Kompensoidussa verkossa käytetään yleensä suunnattua maasulkusuojausta, joka pohjautuu mitattavan nollavirtaosoittimen päätökomponenttiin. Tämä asettaa kuitenkin suuremmat vaatimukset nollajännitteen ja -virran mittauslaitteiden tarkkuuteen ja tällöin mittaukseen olisi syytä käyttää tarkkaa kaapelivirtamuuntajaa. Jotta mitattava päätökomponenttia saataisiin tarpeen mukaan kasvatettua, tulisi keskitetyn kompensoinnin yhteydessä käyttää kelan rinnakkaisvastusta. Kuitenkin pelkkään päätökomponenttiin perustuva suunnattu maasulkusuojaus ei aina ole luotettavin ratkaisu esimerkiksi keskitetyn kelan ja rinnakkaisvastuksen irrotessa verkosta jonkin vikatilanteen takia. Tällöin on erityisen tärkeää, että

johtolähtöjen ylikompensointia vältetään, jolloin ne voidaan olettaa maasulkuvirroiltaan aina kapasitiivisiksi. Tässä tapauksessa suojauksessa voidaan käyttää maasulkureleiden laajennettua toimintasektoria, joka ottaa nollavirran pätökomponentin $I_0 \cos$ lisäksi huomioon myös nollavirran imaginäärikomponentin $I_0 \sin$. Tämän ansiosta suunnattu maasulkusuojaus toimii silloinkin selektiivisesti, vaikka keskitetty kompensointikela ja sen rinnakkaisvastus olisivat jostain syystä irti verkosta. (Wahlroos 2018.)

5 Työn toteutus

5.1 Verkon loistehon tarkastelu ja kompensointi

Tässä luvussa tarkastellaan toimeksiantajan sähköverkon loistehotilannetta sekä pohditaan tarvetta uuden loistehon kompensointireaktorin lisäämiselle verkkoon. Tarkastelussa tutkitaan mitausdataa ajalta 1.10.2020-30.9.2021. Toimeksiantajan verkossa pätö- ja loistehomittauksia tarkasteltiin yhteensä viideltä sähköasemalta:

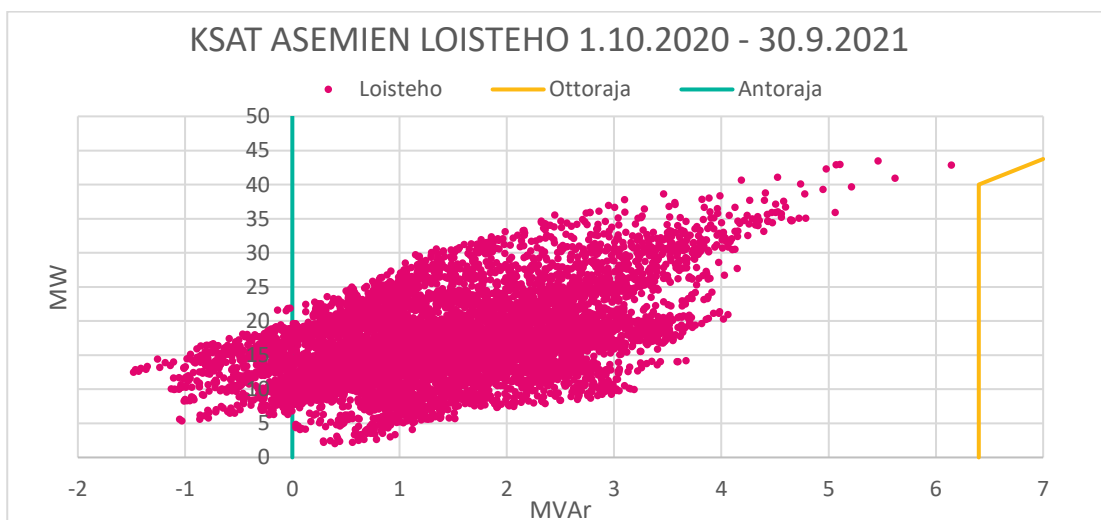
- Heinäahon sähköasema
- Inhan sähköasema
- Toopakan sähköasema
- Virtain sähköasema (PM1 & PM2)
- Ähtärin sähköasema

Kuten luvussa 3.2.3 mainittiin, tarkastelun alla oleva jakeluverkko ei liity suoraan kantaverkkoon, vaan jakeluverkon ja kantaverkon välissä on yksi toimija: Sähkö-Virkeät Oy, jonka ylläpitämään alueverkkoon liityntä tapahtuu. Toimeksiantajan sähköjakeluverkossa on olemassa jo hieman loistehon kompensointia, mutta tulevaisuudessa ajankohtaiseksi tulee uusiin kompensointilaitteisiin investointi, jotta loistehotilanne pysyy kurissa. Nykyhetkellä loistehoa kompensoidaan Virtain sähköaseman PM2:lla ja Inhan sähköasemalla. Näillä asemilla on käytössä 3 MVar:n säädettävät kompensointireaktorit, jotka joutuvat toimimaan välillä melkein täydellä teholla. Näiden reaktoreiden kompensointiasteen säätäminen tapahtuu jännitteettömänä väliottokytkimellä ja kompensointiportaita on kuusi välillä 1–3 MVar. Väliottokytkimillä kompensointiportaan säätöä täysin oikeaan aikaan vaikeuttaa välillä se, että loistehotilannetta ei tällä hetkellä voida seurata reaaliajassa. (Raikinmäki 2021.)

Koillis-Satakunnan Sähkön jakeluverkossa yllä mainittujen sähköasemien mittaamia pätö- ja loistehohuippuja tarkasteltiin yhteensä vuoden ajalta. Yllä mainittujen sähköasemien loistehot netotetaan, joten tarkastelu suoritettiin asemien loistehot netotettuna vuoden 2020 lokakuulta vuoden 2021 syyskuulle. Nettoloistehon tarkastelun lisäksi luvussa 5.1.3. verkon loistehoa tarkasteltiin myös jokaiselta asemalta erikseen, minkä tuloksista huomataan, millä sähköasemalla kapasitiivista loistehoa ilmenee suurin määrä. Tarkastelusta selvitetään sopiva sijoituspaikka uudelle kompensointireaktorille, jolla voitaisiin säästää verkossa olevien reaktorien kompensointikapasiteettia.

5.1.1 Netotetun loistehon tarkastelu

Koillis-Satakunnan Sähkö Oy ja Sähkö-Virkeät Oy ovat sopineet loistehon anto- ja ottorajoista siten, että Koillis-Satakunnan Sähkön jakeluverkosta ei sallita loisantoa ollenkaan Sähkö-Virkeät Oy:n alueverkon suuntaan. Kuten kuviosta 14 huomataan, antorajan ylityksiä tapahtui vuoden tarkasteluajanjakson aikana muutaman kerran. Loisikkunasta nähdään antorajan ylittäneiden pisteiden perusteella myös, että kompensointitehoa tarvittaisiin karkeasti katsottuna noin 1,5 MVar, jotta kapasitiivinen loisteho voitaisiin kompensoida kokonaan. Tämä on tilanne kompensointireaktorien väliottokytkimien ollessa nykyisissä asennoissaan, jolloin kompensoinnin säätövaraa ylöspäin on vielä yhteensä 1 MVar. Tämä huomioon ottaen, nykyhetkellä kompensointitehon tarve olisi siis noin 500 kVar, mikäli verkossa olevien reaktorien väliottokytkimet olisivat asennoissa 6, eli täydellä teholla. Tällä hetkellä kompensoinnin tarve ei ole suuri, mutta tarve kuitenkin on ja maakaapelointiasteen runsas kasvaminen verkossa tulee tietysti lisäämään kompensointitehon tarvetta tulevaisuudessa.



Kuvio 14. Netotettu loisteho loistehoikkunassa tarkasteluajankohtana

Toimeksiantajan mukaan Koillis-Satakunnan Sähkö ja Sähkö-Verkeät Oy ovat sopineen sallittavien ylityksien määräksi kymmenen ylitystä kuukaudessa. Ylityksistä siis vähennetään kymmenen huipputeholtaan suurinta ylitystä kuukausittain. Loissähkön kuukausikohtaisen laskutuksen hinnoittelussa käytetään kuitenkin samoja hintoja, kuin käytettäisiin kantaverkkoliitynnässäkin, eli 1000 €/MVA_r ja 5 €/MVA_rh. Antorajan ylitysten tarkastelu osoittaa, että suurimmat antorajan ylitykset, joista maksuja on koitunut ovat tapahtuneet joului-, tammi- ja toukokuussa. Väliottokytkimellä loistehon kompensointilaitteen säätöä ja säädön ajoittamista vaikeuttaa huomattavasti reaaliaikaisesti helposti seurattavan loistehoseurannan puuttuminen. Nämä talviaikaan tapahtuneet antorajan ylitykset ovat mitä ilmeisemmin seurausta väärään aikaan tehdystä kompensointiportaasta muutoksesta.

Kompensointitehon tarpeen kasvua vuosittain voidaan hahmotella suuntaa antavalla esimerkillä, jossa oletetaan, että maakaapelia lisättäisiin keskijänniteverkkoon esimerkiksi 30 kilometriä joka vuosi. Laskennassa esimerkikaapelina käytetään AHXAMK-W3x185Al+35Cu 20 kV maakaapelia (Prysmian cables & systems 2011). Laskentakaavana käytetään aiemmin työssä esiteltyä kaavaa 10, joka kertoo kaapelin kapasitiivisen loistehon tuoton per kilometri.

$$Q_{lt} = \omega \cdot C \cdot U^2 - 3 \cdot \omega \cdot L \cdot I^2 \quad (10)$$

Tällöin kaapelien kuormituksesta riippuen 30 kilometriä tätä kaapelia nostaisi kapasitiivisen loistehon tuottoa pienellä kuormitusvirralla hieman alle 1 MVA_r. Kuormitusvirran vaihdellessa pienen ja suuren arvon välillä kaapeli tuottaa 30 kilometrin matkalla keskimäärin noin 600 kVA_r kapasitiivista loistehoa. Mikäli keskijänniteverkkoa kaapeloitaisiin vuosittain 30 kilometriä, kompensoinnin tarve kasvaa vuodessa nykyisestä 0,5 MVA_r:sta noin 1,1–1,5 MVA_r:iin riippuen kuormituksesta.

5.1.2 Taloudellinen vaikutus kompensoinnin toteutukseen

Kuten luvussa 3.2.1 on mainittu, loistehon siirtäminen verkossa pitkiä matkoja ei ole kannattavaa. Se nostaa häviöitä verkon eri osissa, vaikuttaa jännitteeseen ja syö siirtokapasiteettia. Häviöiden vähentämisen kannalta verkon loistehoa tulisikin kompensoida aina siellä, missä loisteho tuotetaan. Tällöin sitä ei tarvitsisi siirtää verkossa. Kuten taulukko 1 osoittaa, kompensointilaitteet ovat kuitenkin hinnaltaan erittäin kalliita, jolloin keskitetty kompensointi tulisi halvemmaksi. Ideaalitalanteessahan loisteho kompensoitaisiin automaattisesti säädettävällä laitteistolla, mutta tämä on

todella paljon kalliimpaa kuin kiinteä tai väliottokytkimellä säätyvä reaktori, ja sen myötä kompensoinnilla mahdollisesti saavutettavat taloudelliset hyödyt katoaisivat. Lisäksi mitä useampi laitteisto verkossa on, sitä enemmän tarvetta on tietysti myös laitteistojen huolto- sekä korjaustöille. Toisaalta reaktorit ovat olleet suhteellisen huoltovapaita toimeksiantajan mukaan.

Koska verkon kaapelointiaste tulee kasvamaan tulevaisuudessa, on kompensointireaktoreiden korkeiden hankintakustannuksien takia järkevää investoida nykyistä tarvetta suurempaan reaktoriin, jotta kompensointiastetta voidaan säätää tarpeen mukaan suuremmaksi. Tällöin reaktoria voidaan pitää pienemmällä kompensointiasteella aluksi ja tulevaisuudessa kompensointitehoa voidaan nostaa loistehotilanteen muuttuessa, eikä jälleen uuteen reaktoriin tarvitse investoida jälleen muutaman vuoden päästä. Reaktorit ovat tietysti myös säätötavastaan riippuen hinnaltaan toisistaan poikkeavia ja kompensoinnin säädön kannalta paras säätötapa on tietenkin kallein.

Taulukko 1. Kompensointireaktorien hintoja (Autio 2022.)

Reaktori	Säätötapa	Hinta (€)
1 MVar	Kiinteä	46 100,00
1,5 MVar	Kiinteä	50 160,00
2 MVar	Kiinteä	54 960,00
3 MVar	Kiinteä	67 800,00
1 - 2 MVar	Väliottokytkin	66 000,00
1,5 - 3 MVar	Väliottokytkin	91 200,00
0,5 - 2 MVar	Käämikytkin	150 750,00
0,5 - 3 MVar	Käämikytkin	186 400,00

Mikäli päätetään investoida uuteen kompensointireaktoriin, sen sijainniksi valitaan tällöin sähköasema, missä kapasitiivisen loistehon tuotto olisi kaapeloinnin myötä tulevaisuudessa lisääntymässä tai missä kapasitiivisen loistehon tuotto on jo nyt suurta, eli esimerkiksi joko Ähtärin, Heinäahon tai Toopakan sähköasema. Näiden asemien lähdoissä kapasitiivisen loistehon tuotto oli tarkasteluhetkellä välillä 1 MVar:n luokkaa. Näiden kolmen sähköaseman loistehotilannetta käsitellään tarkemmin luvussa 5.1.3. Tämä reaktorihankinta säästäisi myös kompensointikapasiteettia jo verkossa olemassa olevilta kahdelta säädettävältä 3 MVar:n reaktoreilta, jotka käyvät nykyhetkellä melkein täydellä teholla.

Kompensoinnin näkökulmasta paras vaihtoehto olisi investoida esimerkiksi käämikytkimellä jännitteellisenä säädettävään reaktoriin, sillä loistehovaihtelua on mittaustietojen mukaan paljon ja usein. Mutta kuten aiemmin tässä luvussa mainittiin, tällaisen vaihtoehdon hinta on kuitenkin tarpeettoman korkea, joten taloudellinen näkökulma huomioon ottaen käämikytkimellä säädettävä reaktori ei ole kannattava.

Kompensointiin voitaisiin harkita väliottokytkimellä säädettävää kompensointireaktoria, jonka koko olisi esimerkiksi 2 MVAR tai 3 MVAR, jolloin kompensointiporrasta voidaan säätää tulevaisuudessa tarpeen mukaan suuremmaksi ja loistehomaksuilta vältytään vielä maakaapelointiasteen kasvaessa sekä sitä kautta kapasitiivisen loistehon lisääntyessä. Tällä vaihtoehdolla voitaisiin vaikuttaa netotettuun loistehotilanteeseen positiivisesti, mutta sähköasemakohtaista loistehotilannetta ei voitaisi kuitenkaan loppujen lopuksi parantaa, sillä kompensointiporrasta nostaessa korkealle kompensointiaste sähköasemalla siirtyisi jo reilusti ylikompensoinnin puolelle.

Tällöin näkisin, että parempi vaihtoehto olisi investoida esimerkiksi kiinteään 1 MVAR tai 1,5 MVAR:n reaktoriin yhdelle tai kahdelle eri sähköasemalle, missä loistehotilanne on kapasitiivisen loistehon kannalta huonoin. Tällä tavoin voidaan parantaa sähköasemakohtaisesti loistehotilannetta ja samalla tietysti myös netotettua loistehotilannetta. Tällä vaihtoehdolla saataisiin myös kompensointiin perustaso, jonka lisäksi kompensoinnin säädettävyydskin edelleen säilyy, sillä Inhan ja Virtain 3 MVAR:n reaktorit ovat väliottokytkimellä säädettäviä.

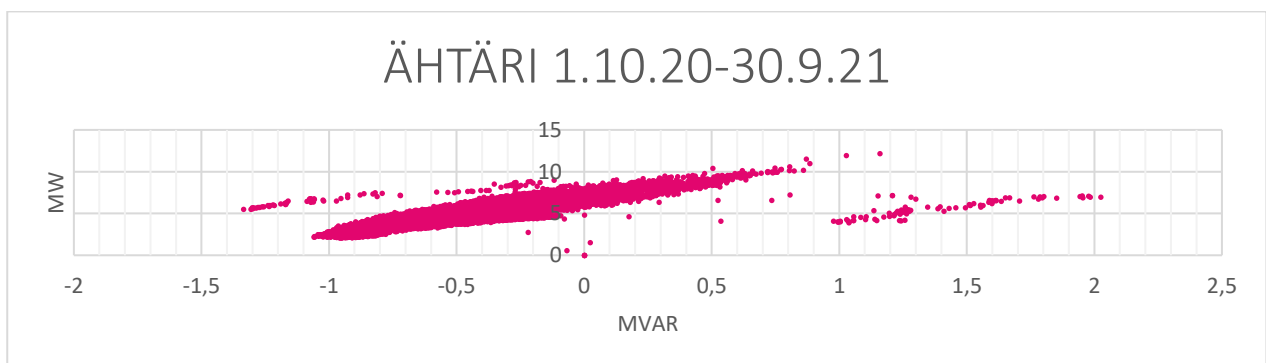
5.1.3 Reaktorin sijoituspaikka

Kuten luvussa 5.1 mainittiin, loistehojen netotus tehdään Heinäahon, Inhan, Toopakan, Virtain ja Ähtärin sähköasemilta saaduista loistehomittauksista. Liitteessä 2 on esitetty kaikkien sähköasemien vuoden aikaiset loistehomittaukset kaavioissa. Loistehomittauksien mukaan Inhan sekä Virtain sähköaseman PM2:sella loistehotilanne on parempi siellä sijaitsevien kompensointireaktoreiden ansiosta. Virtain aseman PM1:en mittaukset osoittavat loistehovaihtelun olevan melko tasaista. Loisteho on vaihdellut noin 0,5 MVAR sekä induktiiviselle että kapasitiiviselle puolelle. Sen sijaan Ähtärin, Heinäahon sekä Toopakan sähköasemien mittausten mukaan loistehon tuotto on ollut välillä melko suurta.

Liittymispistekohtaisen tarkastelun avulla hahmotetaan, millä liittymispisteellä loistehotilanne on sellainen, että se olisi nykyhetkellä paras vaihtoehto kompensointireaktorin sijoittamiselle. Tarkastelun suoritettiin Ähtärin, Heinäahon ja Toopakan mittauksista, sillä mittaustietojen mukaan näillä sähköasemilla kapasitiivista loistehon tuottoa esiintyy usein. Päättävöitteena on netotetun loistehon hallinta kokonaisuudessaan ja tämä voidaan saavuttaa sijoittamalla yhdelle tai useammalle asemalle kompensointireaktori.

Ähtärin sähköasema

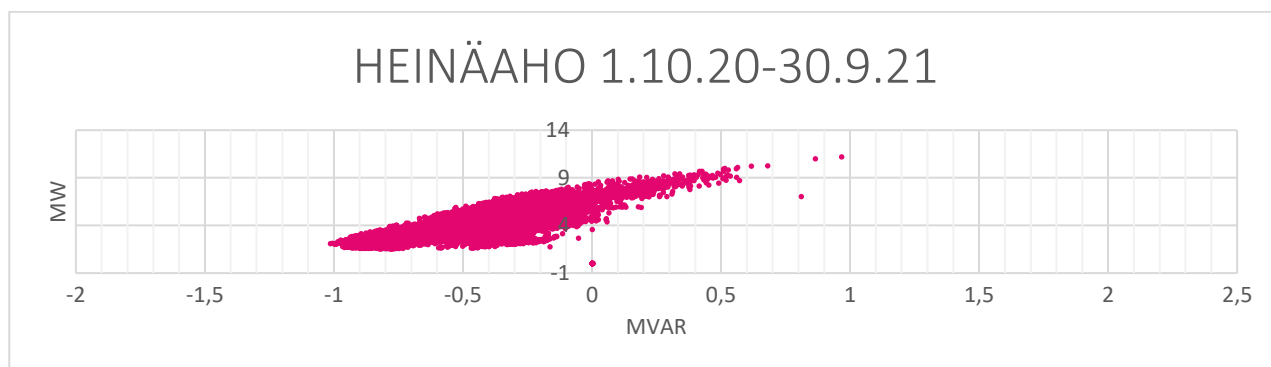
Tarkastelusta huomattiin, että esimerkiksi Ähtärin sähköaseman loistehovaihtelu on ollut melko suurta (Ks. kuvio 15). Ähtärin asemalla loistehon määrä on vaihdellut koko vuoden aikana rajusti. Vuoden sisään kapasitiivista loistehoa on suurimmillaan mitattu 1,33 MVAR ja induktiivista loistehoa 2 MVAR. Vaihtelua kapasitiiviselle ja induktiiviselle puolelle oli paljon joka kuukausi, paitsi ke-säaikaan. Tällöin loistehot pysyttelivät jatkuvasti kapasitiivisella puolella kuormituksen ollessa pientä. Tälle sähköasemalle kompensointireaktoria olisi hyvä harkita, sillä tälle sähköasemalle on myös tulossa 20 kV:n kojeistosaneeraus, jonka yhteydessä syntyisi paikka kompensointireaktorille.



Kuvio 15. Ähtärin sähköaseman loistehomittaukset

Heinäahon sähköasema

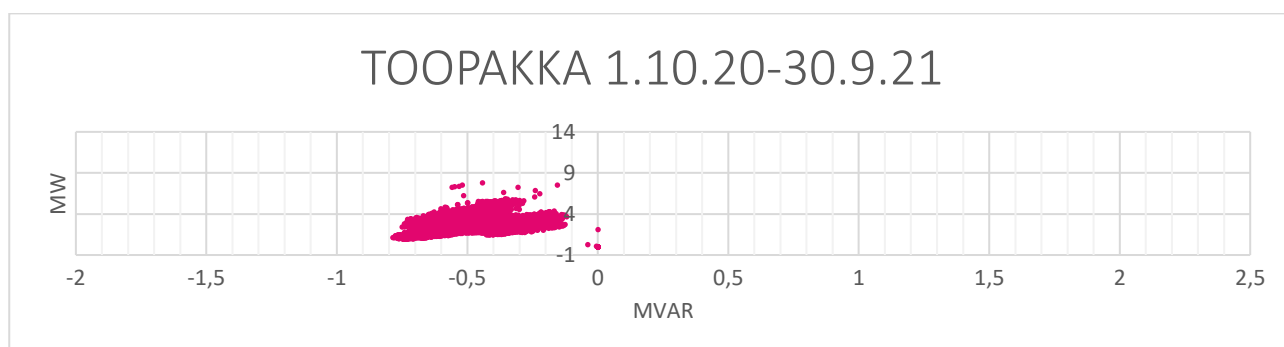
Heinäahon sähköasemallakin loistehovaihtelua tapahtuu melko paljon, mutta se on hieman lievempää kuin Ähtärin sähköasemalla (Ks. kuvio 16). Varsinkin pienen kuormituksen aikaan loistehot pysyttelevät kuviossa kapasitiivisella puolella, joten tällekin sähköasemalle kompensointireaktoriin investointi olisi kannattavaa. Tälle asemalle on myös maasulun kompensointilaitteiston asennuksen yhteydessä tehty valmius mahdollisen kompensointireaktorin asentamiselle. Toimeksiantajan mukaan kaapelointiaste ei tule tämän aseman lähdyissä enää kovinkaan paljoa kasvamaan.



Kuvio 16. Heinäähon sähköaseman loistehomittaukset

Toopakan sähköasema

Poiketen Ähtärin ja Heinäähon sähköasemilla mitatuista loistehoista, Toopakan sähköaseman loistehovaihteluiden kannalta tilanne on hieman parempi (Ks. kuvio 17). Vaikka loisteho onkin ollut jatkuvasti kapasitiivisella puolella, loistehoa on esiintynyt mittaustietojen perusteella hieman vähemmän. Tällä hetkellä kompensointireaktoriin investointia suositellaan joko Ähtärin tai Heinäähon asemille missä kapasitiivista loistehoa esiintyy enemmän. Sen lisäksi näillä asemilla on tai tulee olemaan valmius kompensointireaktorille.



Kuvio 17. Toopakan sähköaseman loistehomittaukset

5.2 Verkon maasulkuvirran tarkastelu ja kompensointi

Tässä luvussa tarkastellaan verkon maasulkuvirtoja sähköasemilta ja pohditaan hajautetun kompensoinnin lisäämistä näiden johtolähtöjen varsille sekä siihen liittyviä suojausteknisiä seikkoja. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n verkossa maasulkuvirtaa kompensoidaan tällä hetkellä vain automaattisesti säätävillä keskitetyillä kompensontikeloilla. Näiden keskitettyjen kompensointikelojen kompensointikapasiteettia voitaisiin säästää sijoittamalla verkkoon hajautettuja yksiköitä. Sen lisäksi hajautetulla kompensoinnilla olisi myös tärkeä rooli esimerkiksi jonkin aseman keskitetyn

kompensointikelan hajotessa tai muussa tilanteessa, jossa kela jostain syystä irtoaa verkosta. Tällöin yhden aseman kompensointikela pystyisi paremmin kompensoimaan myös toisen aseman lähdön maasulkuvirtaa, kun osa siitä kompensoidaan paikallisesti. Työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka hajautettu kompensointi tulisi toteuttaa, mille lähdöille ja miten se mahdollisesti vaikuttaa maasulkusuojauksen toimintaan. Aiheen laajuuden myötä maasulkuvirran osalta tarkastelu rajattiin yhteen sähköasemapariin ja niiden johtolähtöihin. Tarkasteluun valitut sähköasemat olivat Heinäahon ja Virtain asemat. Huolto- ja vikatilanteissa nämä asemat toimivat toistensa korvaavina asemina. Tavoitteena oli lisätä hajautettua kompensointia puistomuuntamoihin verkon pitkille, suuren kaapelointiasteen omaaville lähdöille.

5.2.1 Maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin toteutus

Hajautettua kompensointia suositellaan yleensä pitkille lähdöille, jotka tuottavat 40–50 A maasulkuvirran (Wahlroos 2018). Maasulun jäännösvirran suuruus vaikuttaa maasulun automaattisen sammumisen todennäköisyyteen. Ilman hajautettua kompensointia jäännösvirta voi kasvaa huomattavan määrän pitkällä kaapelilähdöllä. Tällöin maasulun jäännösvirran kasvun takia hajautetun kompensoinnin hyöty kasvaa jo 10–20 km pituisilla kaapelilähdöillä, kun maasulkuvirran ei tarvitse kulkea pitkää matkaa sähköasemalle samalla jäännösvirtaa kasvattaen. Sijoittamalla lähdölle hajautettua kompensointia voidaan maksimoida maasulun automaattisen sammumisen mahdollisuus. (Lehtonen, Saarijärvi & Nurminen 2010, 24–25).

Kuten luvussa 4.2.2 mainittiin, maasulkutilanteen jälkeen verkon nollajännite ja summavirrat jäävät värähtelemään vaimenevasti, joka saattaa aiheuttaa sympatialaukaisun terveessä johtolähdössä. Kompensointiasteen muutos vaikuttaa suoraan jälkivärähtelyn taajuuteen. Välttääkseen ylikompensoinnin sekä kompensointiasteen suuren muutoksen maasulkutilanteessa, hajautettu kompensointi olisi hyvä toteuttaa niin, että kun viallinen osa lähdestä irrotetaan verkosta, myös tätä verkon osaa kompensoiva kela irtoaisi verkosta samalla. Tällä tavoin voidaan pienentää verkon kompensointiasteen muutosta sekä mahdollista ylikompensoinnin riskiä.

Kompensoinnin mitoituksessa on tärkeää ottaa huomioon lähdön ylikompensoinnin riski siinä mielessä, mikäli maasulkusuojauksessa halutaan käyttää laajennetulla toimintasektorilla toimivaa maasulkusuojaa. Tällaisella suojausvaihtoehdolla mahdollistetaan maasulkusuojauksen toiminta

myös silloin, kun keskitetty kompensointikela ja sen rinnakkaisvastus jostain syystä irtoaisi verkosta. Tällöin johtolähdöt eivät saa ylikompensoitua, sillä tämä laajennettuun toimintasektoriin perustuva suojausmenetelmä ottaa nollavirran pätökomponentin lisäksi huomioon tämän imaginäärikomponentin ja tällöin oikean toiminnan takaamiseksi maasulkuvirta täytyy pystyä oletta-
maan aina kapasitiiviseksi.

Ensimmäisen hajautetun kompensointikelan mitoitus ja sijoitus tulisi toteuttaa lähdöllä niin, että kelan tuottama induktiivinen maasulkuvirta olisi noin 20 % vähemmän, kuin sen ja sähköaseman välisen johto-osuuden tuottama maasulkuvirta, ja maasulun automaattisen sammumisen takia lähdön olisi hyvä saavuttaa kokonaisuudessaan 65 % kompensointiaste eikä maasulkuvirran jäännösarvo saisi ylittää 20 A. (Verkostosuositus SA 1994, 24). Vaikka tämä suositus koskee enemmänkin pelkästään hajautetusti kompensoitua verkkoa, otetaan se tässä työssä huomioon, jotta välte-
tään lähtöjen ylikompensointi. Näin mahdollistetaan nollavirran pätö- ja imaginäärikomponentin huomioon ottava maasulkureleen käyttö.

Energiaviraston mukaan kompensointilaitteiden pitoaikaväli on 40–50 vuotta ja hinta vaihtelee sen koon mukaan. Hinnaston mukaan 10A tai sitä pienempi kompensointiyksikkö maksaa 11 200 euroa ja yli 10 A yksikkö 19 100 euroa. (Verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016.)

5.2.2 Lähtöjen maasulkuvirtojen tarkastelu

Seuraavaksi tarkastellaan mainittujen sähköasemien kaapeloituja johtolähtöjä, sekä niiden tuottamia maasulkuvirta-arvoja Virtain ja Heinäahon sähköasemilla. Virta-arvot ja muut tiedot on haettu toimeksiantajan verkkotietojärjestelmästä.

Virtain sähköasema

Virtain sähköaseman kaikkien johtolähtöjen tuottama yhteenlaskettu maasulkuvirta on 167,4 A. Alla oleva taulukko 2 osoittaa aseman laajasti kaapeloitujen lähtöjen maasulkuvirta-arvot. Tämän aseman keskitetty kompensointikela voi kompensoida maasulkuvirtaa maksimissaan 211 A. Tämän keskitetyn kelan kompensointikapasiteettia on siis jäljellä vielä noin 40 A. Tässä työssä Virtain sähköaseman osalta tullaan keskittymään Tapiolan johtolähdön kompensointiin, joka on pitkälti pelkästään kaapeloitu noin 15 km pitkä lähtö ja tuottaa noin 40 A maasulkuvirran.

Taulukko 2. Virtain sähköaseman laajasti kaapeloitujen johtolähtöjen tuottamat maasulkuvirrat.

Lähdöt	Pituus (km)	Maakaapeli (km)	Maasulkuvirta (A)
Tapiola	14,8	14,7	39,3
Ahjola	6,1	6,0	15,1
Purula	6,7	6,7	17,9

Heinäahon sähköasema

Heinäahon sähköaseman johtolähtöjen tuottama yhteenlaskettu maasulkuvirta on 118,9 A. Alla olevassa taulukossa 3 on esitelty laajasti kaapeloitujen lähtöjen maasulkuvirrat. Tämän aseman keskitetty kompensointikela on myös kooltaan 211 A. Kompensointikapasiteettia on jäljellä noin 90 A. Tämän aseman osalta keskitytään Keiturin lähdön kompensointiin, joka ei tuota aivan 40 A maasulkuvirtaa, mutta on yli 10 km pitkä lähtö.

Taulukko 3. Heinäahon sähköaseman laajasti maakaapeloitujen johtolähtöjen tuottamat maasulkuvirrat.

Lähdöt	Pituus (km)	Maakaapeli (km)	Maasulkuvirta (A)
Autio	2,9	2,9	8,8
Virrat	4,4	4,3	13,2
Keituri	11,6	11,2	33,1

6 Tulokset

6.1 Kehitysehdotus loistehon kompensointiin

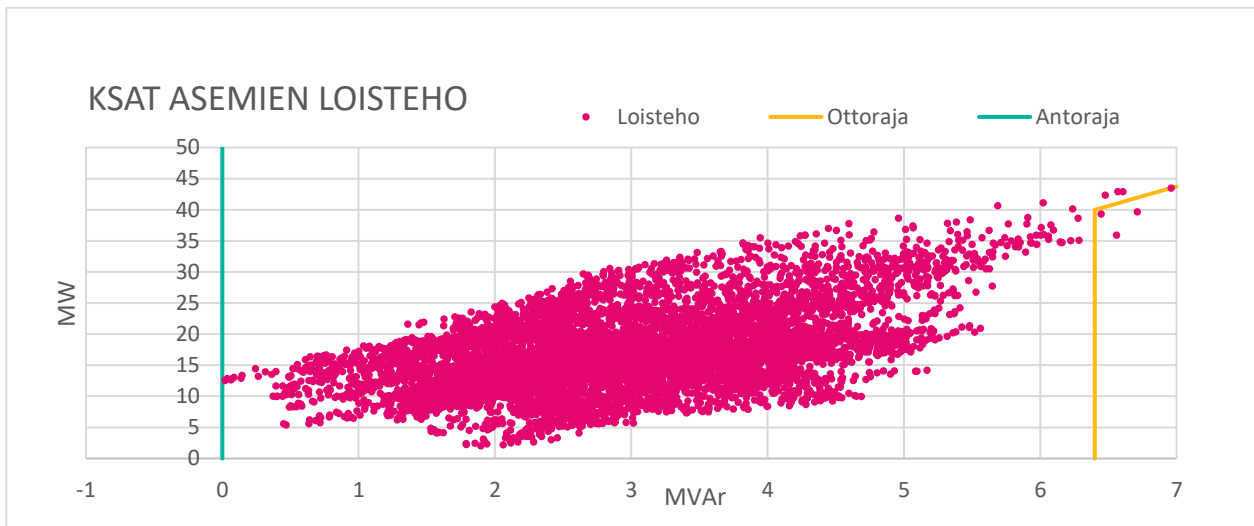
Tarkasteluajanjakson pahimmat loistehon antorajan ylitykset olivat tapahtuneet talviaikaan, eikä pienemmän kuormituksen aikaan kesällä. Tämä voi olla seurausta siitä, että kohdeverkon kompensointireaktorit ovat käsikäyttöisellä väliottokytkimellä säädettävissä, ja kompensointiasteen säätö on ollut vaikeaa tehdä oikeaan aikaan kuormituksen vaihdellessa. Esimerkiksi tammikuussa 2021 ilmatieteenlaitoksen säädätan mukaan vuorokauden ylimmän ja alimman lämpötilan ero on ollut jopa 24,1 celsiusastetta (Säähavainnot, 2020–2021). Tämä selittäisi liitteessä 1 esitetyn melko laajan loistehon hajonnan tammikuun loistehoikkunassa. Vaikka käänkytkimellä säädettävä reaktori

olisi tietysti kompensoinnin säädön näkökulmasta parempi vaihtoehto, se on hinnaltaan niin kallis, että taloudellisesta näkökulmasta kompensoinnin hyöty katoaisi lähes kokonaan.

Loistehon kompensointiratkaisuna ehdotetaan seuraavaa: Heinäahon sähköasemalle hankitaan kiinteä 1-1,5 MVAR:n kompensointireaktori. Uuden reaktorin ei välttämättä tarvitse olla säädettävä, sillä verkossa on jo kaksi säädettävää yksikköä. Reaktori asennettaisiin Heinäahon sähköasemalle, sillä siellä on kapasitiivisen loistehotilanteen lisäksi paras valmius reaktorin asentamiselle. Tällä saadaan jo täytettyä aiemmin määritetty kompensointitarve. Kapasitiivisen loistehon tuoton kasvaessa voidaan tarvittaessa myös Ähtärin sähköasemalle harkita kiinteän reaktorin hankkimista. Tällaisella ratkaisulla ensinnäkin parannettaisiin lopulta molempien asemien loistehotilannetta, jonka lisäksi saataisiin samalla kompensoitua netotettu kapasitiivinen loisteho ja säädettävien yksiköiden säätökapasiteettia säästyisi.

Kuten luvussa 5.1.1 osoitettiin, tulevat muutokset verkossa vaikuttavat tarvittavaan kompensointitehon määrään nostattavasti. Maakaapelin lisääntyminen verkossa tulee varmasti vaikuttamaan tarvittavan kompensointilaitteiden määrään ja kokoon. Lisääntyvä kaapelointi ja myös olemassa olevien ilmajohtojen muuttaminen maakaapeliksi vaikuttavat siihen, minkä vuoksi kompensointiteho tulisikin olla yli nykyisen tarpeen. Kuten aiemmin tarkasteltiin, maakaapelin lisääminen keskijänniteverkkoon voi lisätä kompensointitarvetta jopa 1 MVAR:n verran 30 km matkalla.

Alla oleva kuvio 18 havainnollistaa, millainen nettoloistehoikkuna tarkasteluajankohtana olisi ollut, mikäli Heinäahon sekä Ähtärin sähköasemalla olisi lisäksi esimerkiksi 1 MVAR:n kiinteät kompensointireaktorit ja säädettävien yksiköiden porrasta laskettaisiin. Inhan ja Virtain sähköasemien loistehotilanteen näkökulmasta katsottuna Inhan reaktorin väliottokytkintä voitaisiin pudottaa yhdellä portaalla kiinteiden reaktorien lisäyksen jälkeen. Tällöin tulevia vuosia varten kompensoinnin säätövaraa jää 1,5 MVAR.



Kuvio 18. Mallinnettu loistehoikkuna kompensointiehdotuksen toteutumisen jälkeen.

6.2 Kehitysehdotus maasulkuvirran hajautettuun kompensointiin

Kuten aiemmin työssä käsiteltiin, suojaustoiminnan kannalta pyritään kompensointia pohtiessa pitämään lähtö alikompensoituneena, jotta laajennetun toimintasektorin omaavaa suojaletettä olisi mahdollista käyttää. Tällaista suojausta kannattaa käyttää siinä mielessä, että saadaan lisäturvaa maasulkusuojauksen oikeaan toimintaan silloin, kun keskitetyn kompensointikelan rinnakkaisvastus on irti verkosta, ja pelkästään vikavirran pätökomponenttiin perustuva suojaus ei voi toimia luotettavasti. Pidetään lähtöjen kompensoinnin sijoittelussa nyrkkisääntönä luvun 5.2.1 mukaisesti sitä, että sähköaseman ja ensimmäisen kompensointikelan välinen johto-osa tuottaisi 20 % enemmän maasulkuvirtaa, kuin itse kela. Tavoitellaan kompensoituilla lähdöillä noin 65 % kompensointiastetta ja alle 20 A jäännösvirtaa, jotta maasulun automaattisen sammumisen mahdollisuus on hyvä silloinkin, kun keskitetty kela olisi irti verkosta.

Ehdotus hajautetun kompensoinnin toteutukseen Virtain sähköaseman Tapiolan lähtöön:

Kuten luvussa 5.2.2. tehdyssä maasulkuvirtojen tarkastelussa mainittiin, Tapiolan lähtö on lähes kokonaan kaapeloitu lähtö ja tuottaa noin 40 A maasulkuvirran. Kun otetaan huomioon hajautettujen kompensointiyksiköiden sijoituksessa alikompensoinnin lisäksi se, että sähköaseman ja ensimmäisen kelan väliin jäävä osa lähdöstä tuottaisi 20 % enemmän maasulkuvirtaa kuin kompensointikela, tällöin ensimmäistä hajautettua kela sijoittaessa Tapiolan johtolähdön varrelle päädyttiin sähköasemalta katsottuna kuudenteen puistomuuntamoon, ja kompensointiyksikkö

olisi kooltaan 15 A. Tällöin sähköaseman ja ensimmäisen paikallisen kompensointiyksikön välimatka olisi noin 6,5 km. Toinen lähdölle sijoitettava kompensointiyksikkö voitaisiin sijoittaa esimerkiksi noin 4,5 kilometrin päähän kymmenenteen puistomuuntamoon sähköasemalta katsottuna ja olla kooltaan 10 A. Lähdöllä olevat erottimet huomioon ottaen tällaisella sijoittelulla lähdön ei pitäisi ylikompensoitua missään tilanteessa. Tällöin lähtö olisi kompensoitu hajautetusti n. 63 % kompensointiasteella ja säästäisi keskitetyn kelan kapasiteettia 25 A ja maasulkuvirran jäännösarvo lähdöllä olisi 14,3 A.

Ehdotus hajautetun kompensoinnin toteutukseen Heinäahon sähköaseman Keiturin lähtöön: Myös tämän lähdön tapauksessa pyritään alikompensointiin maasulkusuojauksen oikean toiminnan takaamiseksi. Mikäli ensimmäisen kelan sijoitusperiaatteena on se, että sähköaseman ja ensimmäisen kompensointiyksikön väliin jäävä johto-osuus tuottaisi noin 20 % kompensointikelaa enemmän maasulkuvirtaa, sähköasemalta katsottuna ensimmäinen 10 A kompensoiva hajautettu yksikkö voitaisiin sijoittaa kolmanteen puistomuuntamoon 4,5 kilometrin päähän. Ja toinen 10 A:n yksikkö sijoitettaisiin seitsemänteen muuntamoon noin 4 kilometriä eteenpäin. Tällä sijoittelulla ja erottimien aukeamisia simuloimalla lähdön ei pitäisi ylikompensoitua missään tilanteessa ja voidaan käyttää maasulkusuojauksen laajennettua toimintasektoria. Normaalitylanteessa lähdön kompensointiaste olisi noin 60 % ja keskitetyn kelan kapasiteettia säästettäisiin 20 A ja maasulkuvirran jäännösarvo olisi lähdöllä noin 13,1 A.

7 Pohdinta

Opinnäytetyön yhtenä keskeisenä tavoitteena oli tarkastella toimeksiantajan, eli Koillis-Satakunnan Sähkön keskijänniteverkossa esiintyvää loistehoa ja sen perusteella pohtia sopivaa kompensointiratkaisua, joilla loistehotilanne saadaan pysymään kurissa ja antaa tämän pohjalta kompensointiehdotus. Opinnäytetyön toinen keskeinen tavoite oli verkon maasulkuvirran hajautetun kompensoinnin vaikutuksien selvittäminen suunnattuun maasulkusuojaukseen ja suojausvaikutukset huomioon ottaen laatia kompensointiehdotus maasulkuvirran hajautettuun kompensointiin.

Loistehon tarkastelussa käytetty mittausdata oli yhden vuoden ajalta ja se oli hyvin tuoretta, joka riitti hyvin antamaan selkeän ja luotettavan kuvan sähköverkon nykyisestä loistehotilanteesta. Se sisälsi tuntikohtaisesti pätö- sekä loistehohuippujen mittauksia usealta sähköasemalta. Maasulku-

virtojen tarkastelu tehtiin hyödyntäen toimeksiantajan verkkotietojärjestelmää, josta saatiin verkon lähtöjen pituudet ja maasulkuvirta-arvot. Opinnäytetyö pyrittiin tekemään kokonaisuudessa noudattaen hyvää tieteellistä käytäntöä ja eettisiä periaatteita. Tietoperustassa pyrittiin käyttämään asiantuntevia lähteitä, jotta saatu tieto olisi luotettavaa ja tietoperustan soveltaminen kompensointiehdotuksia pohtiessa voitaisiin tehdä asiantuntevasti ja kompensointiratkaisut olisivat luotettavia.

Loistehon kompensointiehdotuksessa tavoiteltiin sitä, että kompensointiratkaisu olisi taloudellisesti järkevä ja ehdotuksen myötä loistehoa voitaisiin kompensoida onnistuneesti vielä monen vuoden päästäkin ilman uusia reaktori-investointeja. Mittaustietoja analysoidessa selvisi, että loistehotilanne on muutamia heilahduksia lukuun ottamatta vielä tyydyttävä ja kompensointitarve ei ole suuri. Verkon loistehotilanne on parantunut huomattavasti aiempien reaktori-investointien myötä ja näin loistehomaksutkin ovat olleet vielä kohtalaisia. Teoriassa loistehon antorajan ylitykset tapahtuvat kesäaikaan, joten talviaikaan verkon loistehossa esiintyvät poikkeavuudet pyrittiin selvittämään ja tämän myötä huomattiin, että oikeilla kompensointiportaan säädöillä talvella 2020–2021 loistehomaksuilta olisi voitu välttyä. Jännitteettömänä väliottokytkimellä tehty kompensointiportaan säätö on kuitenkin välillä haastavaa, mikäli kuormitus vaihtelee runsaasti. Kesäaikaan kuitenkin loistehon osalta alkaa tekemään tiukkaa, ja seuraavina vuosina voi ilmetä jo monia antorajan ylityksiä. Jatkossa loistehotilanteen seurantaan olisi tehtävä parannuksia, jotta säädöt voidaan tehdä tarvittaessa oikein eikä anto- ja ottorajojen ylityksiä tapahtuisi virheellisen säädön takia.

Loistehon kompensointiehdotuksessa onnistuttiin siinä mielessä hyvin, että ehdotus on halutusti pitkälle kantava ja koska loistehotilanne on vielä kohtalainen, se voidaan myös toteuttaa tarvittaessa kahdessa osassa loistehon tuoton kasvun mukaan. Myös reaktorin säätötyypin valinnassa onnistuttiin taloudellisessa mielessä siten, että halvemman kiinteän reaktorin käyttö on verkossa mahdollista, koska netotun loistehon kompensointia voidaan säätää verkossa olevien reaktorien väliottokytkimillä. On otettava huomioon, että tämä ratkaisu ei välttämättä soveltuisi verkkoon, missä loistehoja ei netoteta eri sähköasemilta, sillä silloin kompensoinnilla puuttuisi säädettävyyttä. Kapasitiivisen loistehon tuoton kasvua verkossa on vaikea ennustaa, sillä se riippuu verkon kuormituksesta. Tällöin voitiin antaa vain suuntaa antava arvio loistehon tuoton kasvusta perustuen aikaisempina vuosina kaapeloituihin kilometrimääriin ja keskiarvoiseen kuormitukseen.

Loistehon kompensoinnin lisäksi toimeksiantajan tarkoituksena on ollut kompensoida verkon maasulkuvirtaa hajautetusti puistomuuntamoissa nykyisten keskitettyjen kompensointikelojen lisäksi, jotta keskitettyjen kelojen kompensointikapasiteettia säästyisi sekä kompensointia olisi verkossa silloinkin, kun keskitetty kela hajoaisi tai irtoaisi. Tarkastelussa otettiin huomioon suojauksen kanalta myös tilanne, jossa keskitetty kompensointikela irtoaisi verkosta. Kompensointiehdotusta alettiin pohtia ottamalla huomioon, että suunnattu maasulkusuojaus toimisi selektiivisesti keskitetyn kelan rinnakkaisvastuksen ollessa irti verkosta. Maasulkusuojauksen toiminnan takaamiseksi maasulkuvirran kompensointiehdotusta tehdessä täytyi keskittyä siis suunnattuun maasulkusuojaukseen ja sen toimintaperiaatteisiin tarkasti.

Kompensointiehdotuksessa onnistuttiin ottamaan maasulkusuojauksen toiminta huomioon ja päästiin suurimmaksi osaksi toivottuihin tavoitteisiin. Maasulkuvirran hajautettu kompensointi halettiin mielellään tehdä verkon varrella sijaitsevilla puistomuuntamoissa, sillä niissä oli hyvin tilaa kompensointilaitteistolle. Aiheen laajuuden myötä maasulkuvirtojen tarkastelu jouduttiin lopulta rajaamaan kahden sähköaseman välisiin lähtöihin ja kompensointiehdotus laadittiin tietoperustan mukaisesti kompensointiin soveltuviin lähtöihin. Kompensoinnin sijoittelua ja mitoitusta pohtiessa haasteelliseksi osoittautui jokaisen asetetun mitoituskriteerin täytyminen. Tavoiteltu 65 % kompensointiaste lähdöillä ei ihan ylittynyt, ilman että jossain kytkentätilanteessa lähtö olisi ylikompensoitunut. Huomattiin, että mitä pidempi lähtö on, sitä helpompaa korkeamman kompensointiasteen saavuttaminen olisi näillä mitoituskriteereillä. Eri kytkentätilanteisiin tulisi perehtyä vielä tarkemmin, jotta tavoiteltu kompensointiaste saavutettaisiin eikä ylikompensoitumisen riski kasvaisi. Työ pyrittiin toteuttamaan siten, että mitoituseriaatteita mukaillen hajautettua kompensointia voisi lisätä tulevaisuudessa myös muille lähdöille.

Tarkasteltavana aineistona käytettiin toimeksiantajan verkkotietojärjestelmästä saatuja tietoja johtolähtöjen pituuksista ja niissä saattaa olla todellisuudessa pieniä heittoja. Maasulkuvirta-arvojenkin luotettavuus laskee tietysti tämän myötä, sillä maasulkuvirtaan vaikuttaa kaapelin pituus. Heitot pituudessa ovat kuitenkin todennäköisesti pieniä, jolloin sen ei pitäisi vaikuttaa työn tulokseen merkittävästi lähtöjen sopivan alikompensoinnin myötä. Toimeksiantaja pystyy opinnäytetyön maasulkuvirran kompensoinnin mitoituseriaatteita ja tulosta mukaillen lisäämään hajautettua kompensointia tarvittaessa myös muille johtolähdöilleen.

Lähteet

Autio, K. Toimitusjohtaja Maviko Oy 2022. Tietoja kompensointireaktoreista. Sähköpostiviesti 16.2.2022. Vastaanottaja Maskonen, J. Kompensointireaktori hintoja eri säätötavoilla.

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Otatieto.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. 6. painos. Otatieto.

Eno, H. 2016. Kapasitiivisen loistehon kompensointi sähköverkkoyhtiössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23754/Eno.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Eronen, M. Pakonen, P. Männistö, M. Hietalahti, L. Seesvuori, R. Seesvuori, V. & Wilén, T. 2018. Yliaallot ja kompensointi. 2. uudistettu painos. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. Espoo: Sähköinfo.

Heikkilä, T. 2014. Kvantitatiivinen tutkimus. Diaesitys. <http://www.tilastollinentutkimus.fi/1.TUTKIMUSTUKI/KvantitatiivinenTutkimus.pdf>

Helin, M., Spoofo, S-K., Jäppinen, S. & Launis, V. 2012. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkaus-epäilyjen käsitteleminen Suomessa. Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Viitattu 13.1.2022. https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK_ohje_2012.pdf

Kantaverkkopalvelumaksut. N.d. Fingrid. Viitattu 17.10.2021 <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kantaverkkopalvelumaksut/>

Kantaverkkosopimus, N.d. Fingrid. Viitattu 17.10.2021 <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kantaverkkosopimus/>

Killin voima Oy. N.d. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Viitattu 19.10.2021 <https://ksat.fi/yritys/killin-voima-oy/>

Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. N.d. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Viitattu 19.10.2021 <https://ksat.fi/yritys/>

Lehtonen, M. Saarijärvi, E & Nurminen, K. 2010. Kevyt kaapelijärjestelmä haja-asutusalueiden Loissähkön toimituksen ja loistehoreservin ylläpito, 2021. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/loissahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito-2021-id-244241.pdf>

Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. 2016. ST 52.15. ST-kortisto. Sähkötieto ry. Sähköinfo.

Loistehon kompensointi. 2018. Loistehon kompensointiohje. Kymenlaakson sähköverkko <https://www.ksoy.fi/content/download/4298/48684/file/Loistehon+kompensointiohje.pdf>

Loistehon kompensointi. N.d. Tietoa loistehon kompensoinnista Mavikon verkkosivustolla. Viitattu 19.11.2021 <https://www.maviko.fi/tuotteet-ja-palvelut/loistehon-kompensointi/>

Maasulkusuojaus. 2000. Luku 8 ABB:n TTT-käsikirjasta OAMK:in sivustolla. Viitattu 23.11.2021 http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf

Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus. N.d. Tietoa maasulkuvirrasta Multirel Oy:n verkkosivustolla. Viitattu 23.11.2021 <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>

Maasulkuvirran kompensointi. N.d. Tietoa maasulkuvirran kompensointi Multirel Oy:n verkkosivustolla. Viitattu 10.12.2021 <https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maadoitusmuuntaja>

Matias, J. 2013. Reactive Power Compensation. ABB. Viitattu 15.11.2021 <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/4-jos%C3%A9-matias---reactive-power-compensation.pdf?sfvrsn=2>

Mäkinen, A. & Nikander, A. 2017. Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 18.1.2022 https://energia.fi/files/2130%20/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf

Prysmian cables & systems. 2011. Alumiinijohtimisen 20 kV vesitiiviin Wiski™ maakaapelin tekniset tiedot. Viitattu 9.2.2022. https://slofiles.blob.core.windows.net/pimfiles1/PDF/brochure_0624255.pdf

Raiskinmäki, E. Käyttöinsinööri Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. 2021. Tietoja loisteholaskutukseen liittyen. Sähköpostiviesti 30.12.2021. Vastaanottaja Maskonen, J. Loistehon netotus sekä loisenenergia sekä -teho hinnat.

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Annettu 9.8.2013. Viitattu 12.12.2021 <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#O7L17P119>

Sähkö-Virkeät. N.d. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Viitattu 11.12.2021. <https://ksat.fi/yritys/sahko-virkeat-oy/>

Säähavainnot 2020–2021. Säähavaintojen lataus ilmatieteenlaitoksen verkkosivuilla. Viitattu 8.2.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

Tarpeisiin. KAPELI-projektin loppuraportti. Viitattu 28.2.2022. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/10/kapeli_loppuraportti_286.pdf

Toimintakertomus ja tilinpäätös. 2021. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Viitattu 11.12.2021. <https://ksat.fi/wp-content/uploads/2021/03/Tilinpaaatos-Koillis-Satakunnan-Sahko-Oy.pdf>

Tutkijan ABC. 2015. RajatOn. Viitattu 2.1.2022 <https://raijatontatiedekasvata.wordpress.com/tutkijan-abc/>

Vastaus maasulkuvirran kompensoinnin haasteisiin. N.d. Tietoa maasulkuvirrasta Mavikon verkkosivustolla. Viitattu 23.11.2021 <https://www.maviko.fi/tuotteet/hajautettu-kompensointi/>

Verkkokomponentit ja yksikköhinnat. 2016–2023. Energiavirasto. Viitattu 27.1.2022 <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Verkkokomponentit-ja-yksikk%C3%B6hinnat-2016-2023.xlsx/7bd40be6-7486-fa81-fbef-3363c71d008e>

Verkostosuositus SA 5:94. 1994. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Sähköenergialiitto ry SENER. Viitattu 28.2.2022. <https://docplayer.fi/18598193-Verkostosuositus-sa-5-94-keskijanniteverkon-sahkoinen-mitoittaminen.html>

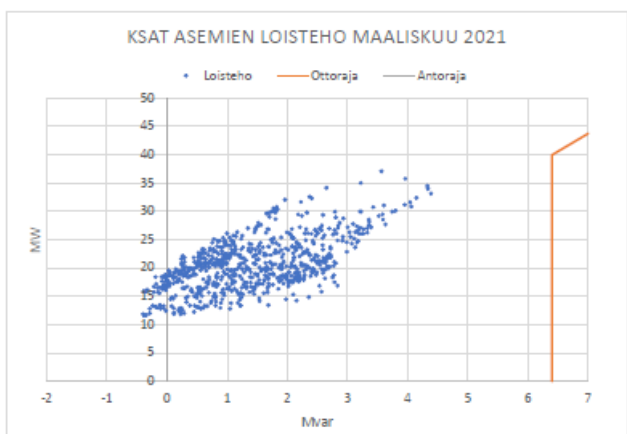
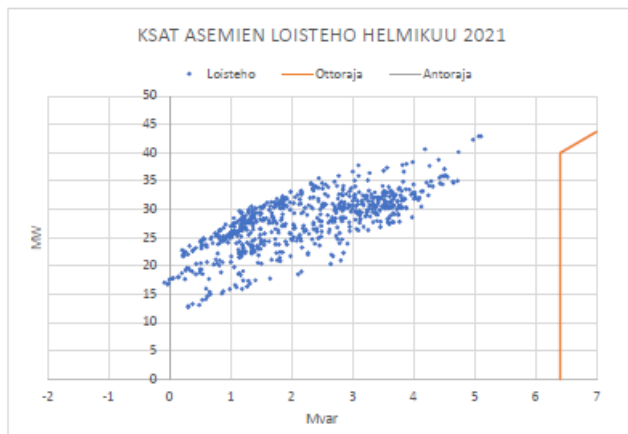
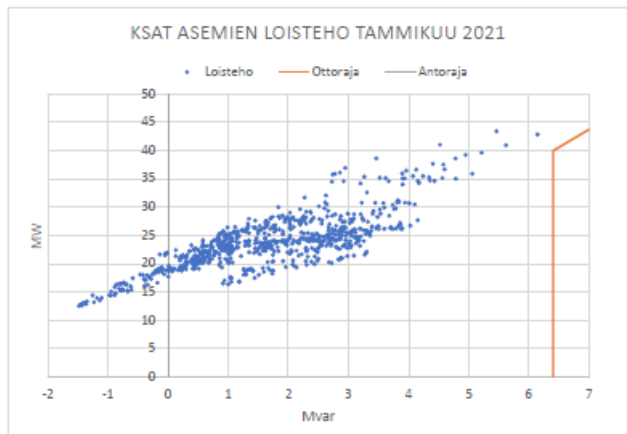
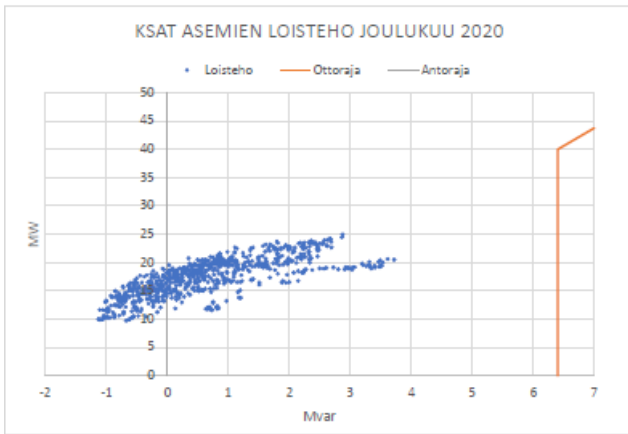
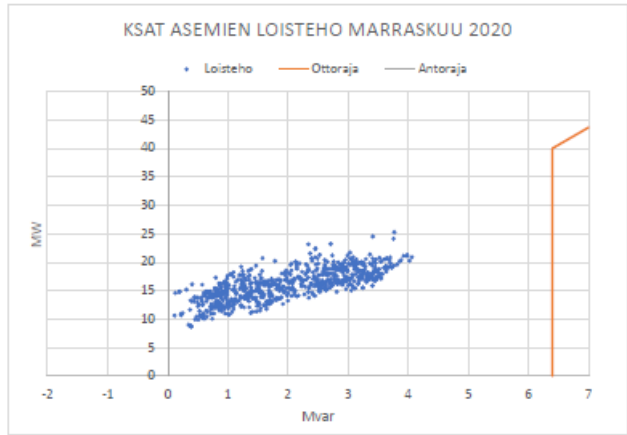
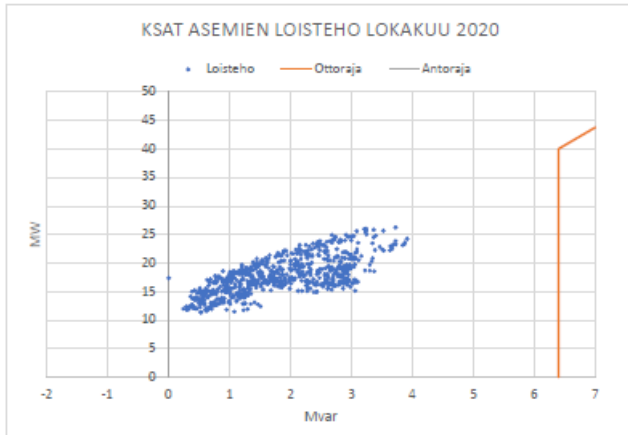
Vuosikertomus 2020. Koillis-Satakunnan Sähkö Oy. Viitattu 12.12.2021 <https://ksat.fi/wp-content/uploads/2021/04/Vuosikertomus-2020.pdf>

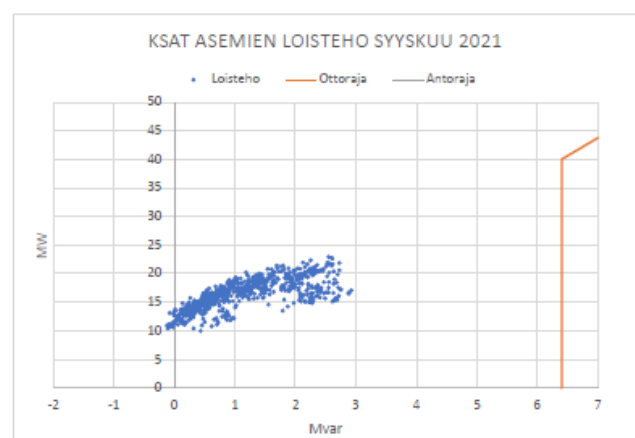
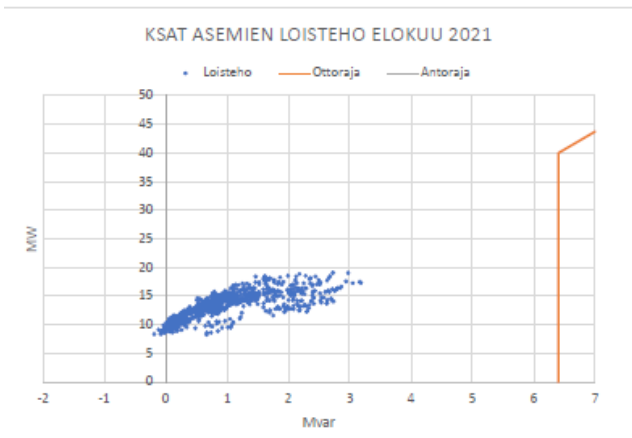
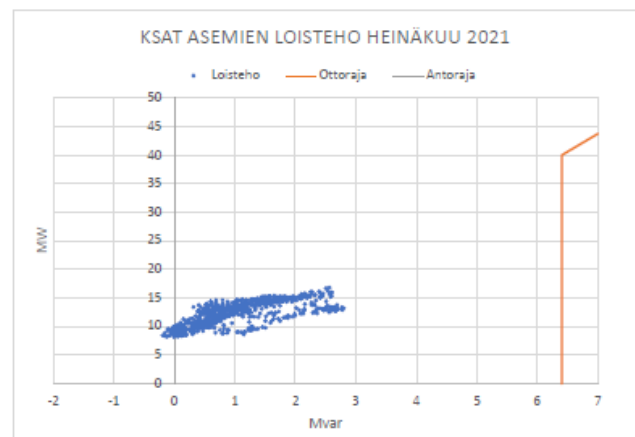
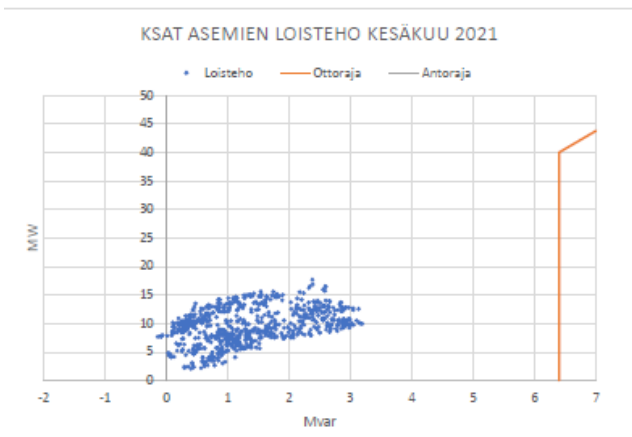
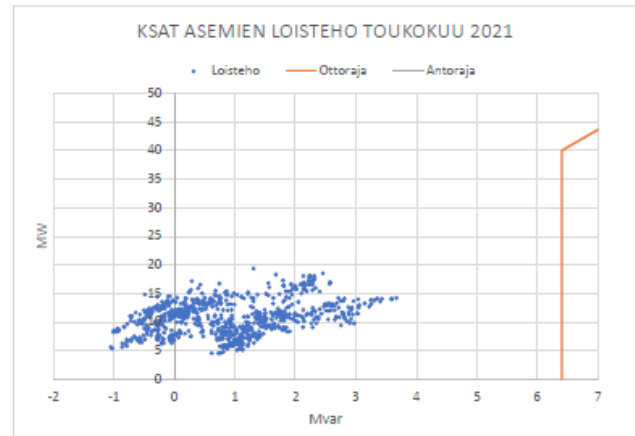
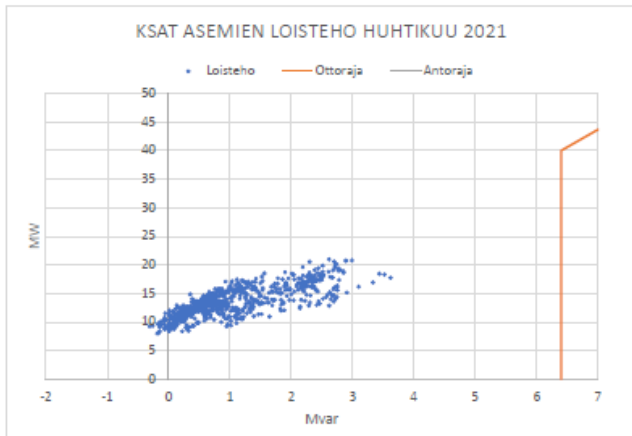
Väisänen, P. 2012. Loistehon kompensointi jakeluverkkoyhtiössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 14.11.2021 <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21284/Vaisanen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Wahlroos, A. 2018. Maasulun kompensointi – uudet haasteet ja ratkaisut. ABB. Webinaaritalenne. Viitattu 20.1.2022 <https://www.youtube.com/watch?v=YNPceSP6EJg>

Liitteet

Liite 1. KSAT kuukausikohtaiset loisikkunat





Liite 2. KSAT asemakohtaiset loistehokaaviot

