



# Kapasitiivisen loistehon kompensointi keskijänniteverkossa

Toni Tarvainen

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähkövoimatekniikka

TARVAINEN, TONI:  
Kapasiivisen loistehon kompensointi keskijänniteverkossa

Opinnäytetyö 48 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Toukokuu 2023

---

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tilaajan, Keuruun Sähkö Oy:n, keskijänniteverkon loistehotilannetta ja löydöksistä laadittiin tilaajalle raportti. Keuruun Sähkö Oy on alueellinen jakeluverkkoyhtiö, joka toimii Keuruun, Multian ja Petäjäveden alueella läntisessä Keski-Suomessa. Keskijänniteverkon rakenteellisten muutosten ja kantaverkkoyhtiön teho- ja energiamaksujen korotuksien vuoksi selvitettiin Keuruun Sähkön verkon kompensointitarve sekä loistehomaksuista aiheutuvat kulut.

Käytetty aineisto koostuu tuntikohtaisista päto- ja loistehomittaussarjoista Keuruun Sähkön kahdelta sähköasemalta vuosilta 2012–2017. Analyysiä tukevan aineiston muodostivat jakeluverkon johtoluettelo vuosilta 2012–2017 sekä suunniteltujen kaapelitöiden luettelo vuosille 2018–2022. Näistä selvitettiin ilmajohtojen ja maakaapelien määrien muutokset. Tuntitehoaineistosta muodostettiin Excel-tietomalli. Tietomallista tietokantakantakyselyillä luoduista kuvaajista valittiin raporttiin ne, jotka parhaiten havainnollistivat loistehotilanteen kehitystä. Johtoluettelon ja suunniteltujen kaapelitöiden perusteella laskettuun verkon kokonaiskäyttökapasitanssin muutokseen perustuen tuotettiin ennuste loistehon kehityksestä vuosille 2018-2022.

Saatuihin tuloksiin perustuen laadittiin minimimitoitus tarvittavalle kompensointilaitteistolle ja esitettiin, miten voidaan varautua tulevaisuudessa todennäköisesti kasvavaan kompensointitarpeeseen. Taloudellisia vaikutuksia arvioitaessa tarkasteltiin, miten mitoituksen mukainen laitteisto vaikuttaisi loisteho- ja energiakustannuksiin. Koska työn aiheena ollut kompensointi investointi on valmistunut, pystyttiin myös suorittamaan vertailu, miten toteutunut investointi suhteutuu tässä työssä esitettyyn laskentaan.

Kehitysehdotuksena jakeluverkkoyhtiöille on lisätä loistehotuotannon muutoksen tarkastelu ja kompensointitarpeen tarkastelu keskijänniteverkon muutos- ja laajennustöiden yhteydessä.

---

Asiasanat: kapasiivinen loisteho, maakaapelointi, kompensointi

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering

TARVAINEN, TONI:

Compensation of Reactive Power in 20 kV Distribution Grid

Bachelor's thesis 48 pages, appendices 1 page  
May 2023

---

The purpose of this thesis was to analyze the hourly power measurements of Keuruun Sähkö Oy network and prepare a report of the findings concerning the capacitive reactive power to the client. The report was to be used as a part of Keuruun Sähkö Oy internal investment planning process considering the purchasing of compensation gear.

The study problem was approached by forming a database of the hourly power data, and filtering and sorting it in such ways that the key figures and trends were clearly observable from tables and graphs.

The obtained results suggested that the power grid of Keuruun Sähkö Oy produces abundantly capacitive reactive power and an investment in compensation was needed to cut financial losses in the power and energy tariffs of the reactive power. A minimum specification for compensation gear was also produced.

In conclusion, many power distributors have had major changes in the reactive power balance of their power grids, due to an increase in the underground cabling in their 20 kV networks. This has led to a situation that demands compensation solutions for current time and furthermore careful consideration how the future compensation demands are going to be addressed where overhead lines are substituted with more underground cabling or network is being expanded.

---

Key words: reactive power, compensation, underground cabling

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	KAPASITIIVINEN LOISTEHO SÄHKÖVERKOISSA .....	8
	2.1 Loistehon määritelmä ja muodostuminen.....	8
	2.2 Kapasitiivisen loistehon lisääntyminen verkossa.....	10
	2.3. Ilmajohdosten ja maakaapeleiden kapasitanssin laskenta.....	15
3	LOISTEHO KEURUUN SÄHKÖN VERKOSSA .....	23
	3.1 Kaapelit ja johdot.....	28
	3.2 Kaapelien ja johdosten kapasitanssi .....	31
4	TALOUDELLISET VAIKUTUKSET .....	33
5	KOMPENSOINTI .....	38
	5.1. Laitteistot.....	38
	5.2. Mitoitus.....	40
6	TOTEUTUNUNEEN INSVESTOINNIN TARKASTELU.....	42
7	POHDINTA .....	46
	LÄHTEET .....	47
	LIITTEET .....	48
	Liite 1. Esimerkki valmistajan datalehdestä keskijännite maakaapelille	
	48	

## LYHENTEET JA TERMIT

$S$	näennäisteho [VA, voltiampeeri]
$P$	pätöteho [W, watti]
$P_l$	luonnollinen teho
$Q$	loisteho [VAR, vari, voltiampeeri reaktiivinen]
$Q_c$	kapasitiivinen loisteho
$Q_L$	induktiivinen loisteho
$R$	resistanssi [ $\Omega$ , ohmi]
$R_f$	vikaresistanssi
$Z$	impedanssi [ $\Omega$ , ohmi]
$Z_s$	aaltoimpedanssi
$X$	reaktanssi [ $\Omega$ , ohmi]
$X_L$	induktiivinen reaktanssi
$X_c$	kapasitiivinen reaktanssi
$G$	konduktanssi [S, siemens]
$Y$	admittanssi [S, siemens]
$B$	suskeptanssi [S, siemens]
$f$	taajuus [Hz, hertsi]
$\omega$	kulmataajuus [ $\frac{1}{s}$ rad]
ind.	induktiivinen
kap.	kapasitiivinen
$L$	induktanssi [H, henry]
$C$	kapasitanssi [F, faradi]
IGBT	insulated gate bipolar transistor, eristehilainen bipolaari-transistori
SVC	static var compensation
STATCOM	static synchronous compensator

## 1 JOHDANTO

Sähkö on yksi tärkeimmistä nykypäivän hyödykkeistä. Häiriötön sähkönjakelu onkin elinehto yhteiskunnan normaalille toiminnalle. Jo lyhyessäkin jakelukeskeytyksessä kaupungit joutuvat sulkemaan ovensa ja työskentely estyy monissa työpaikoissa. Kestoltaan pidemmissä häiriöissä vesihuolto, lämmitys ja tietoliikenneyhteydet lakkaavat toimimasta.

2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen myrskytuhoista johtuneet laajat ja osin pitkäkestoiset sähkökatkot ovat osaltaan olleet perusteena lainsäädännön muutoksiin. Sähkömarkkinalaki (9.8.2013/588) asettaakin vaatimuksia jakeluverkolle; esimerkiksi kaatuvat puut eivät saa aiheuttaa jakelukeskeytyksiä. Lisäksi jakelukeskeytyksestä määrätään vakiokorvaus keskeytyksen pituuden mukaan.

Jakeluverkon haltijan näkökulmasta keskijänniteverkon sääsuojaukseen on käytännössä kaksi vaihtoehtoa: avolinjojen raivaus, niin että niiden läheisyydessä ei ole puita, jotka voisivat myrskyssä kaatua linjalle tai koko linjan reitin siirtäminen esimerkiksi tien varteen. Toinen vaihtoehto on korvata ilmajohto maakaapelilla.

Maakaapelointiin siirtyminen onkin ollut jakeluverkkoyhtiöissä suosittu vaihtoehto. Maakaapelit ovat olleet jo pitkään kaupunkikeskustoissa käytännössä ainoa vaihtoehto, ilmajohtoille ei ole yksinkertaisesti tilaa. Mutta nyt trendi on ollut siirtää johdot maan alle myös pienemmissä taajamissa ja haja-asutusalueilla. Esimerkiksi Elenialla on päätös rakentaa kaikki uusi verkko maakaapelilla. (Elenia 2023)

Ilmajohtojen korvaaminen maakaapelilla ja verkon kaapeloidun osuuden kasvattaminen vaikuttavat verkon sähköisiin ominaisuuksiin: maasulkuvirrat kasvavat ja kapasitiivisen loistehon tuotanto kasvaa. Molemmat kysymykset on ratkaistava ja tässä työssä käsitellään näistä jälkimmäistä. Kapasitiivisen loistehontuotantoa ohjaa myös Fingrid:in loisteholle asettamat teho- ja energiamaksut.

Kapasitiivisen loistehon kompensoinnin tarve keskijännitejakeluverkossa on siinä määrin uusi ilmiö, että vanhempi alan kirjallisuus ei sitä juuri käsittele tai sitä ei

ole nähty lainkaan tarpeelliseksi 20 kV:n jännitetasossa (Hietalahti L. 2013 s.83; Elovaara J & Haarla L. 2011 s. 225; Lakervi E & Partanen J. 2008. s.126).

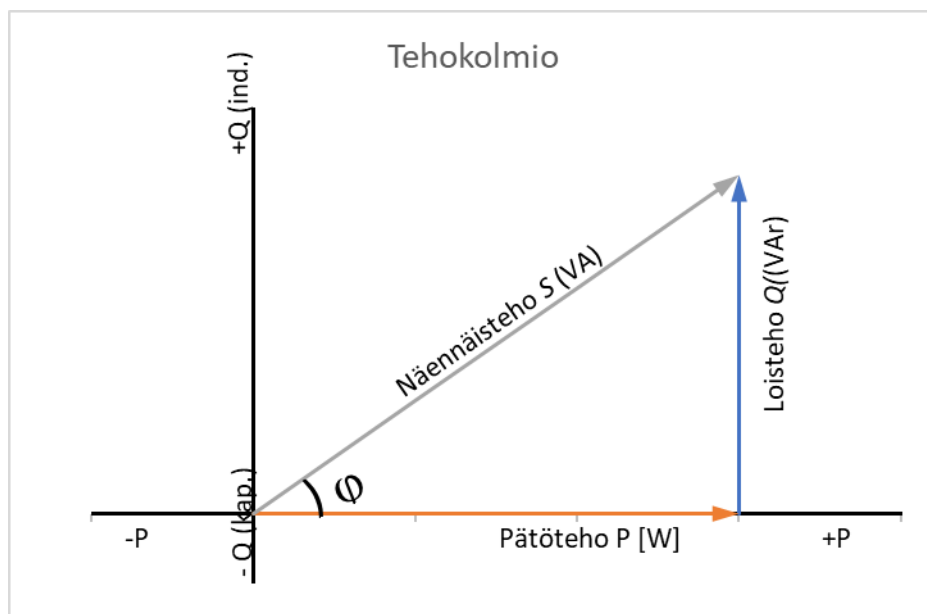
Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua Keuruun Sähkö Oy:n 20 kV verkon loistehotilanteen kehitykseen, tutkia kompensointivaihtoehtoja loisteholle sekä mittaamaan teknistaloudellisesti riittävä kompensointilaitteiston teho tarjouskyselyjen pohjaksi. Keuruun Sähkö Oy on paikallinen jakeluverkkoyhtiö, joka toimii Keuruun, Petäjäveden, Multian ja Mänttä-Vilppulan alueella. Ylläpidettävää sähkölinjaa yhtiöllä on lähes 1700 km ja sähkön käyttöpaikkoja noin 9000.

Työn tavoite oli tuottaa tilaajalle raportti, josta ilmenee tilaajan keskijänniteverkon loistehotilanne, välittömät kustannusvaikutukset sekä laatia mitoitus kompensointilaitteistolle. Raporttia varten loistehotuotantoa analysoitiin tilaajan toimittamista sähköenergian tuntiteho- ja energiataulukoista tietokoneavusteisesti ja analysoidusta materiaalista koostettiin tilaajalle raportti käytettäväksi investointipäätöksen tueksi suunniteltaessa kompensointiratkaisua. Lisäksi tarkasteltiin, miten toteutettu investointi ja raportissa esitetty mitoitus vertautuivat toisiinsa sekä minkälaiseen vaikutukseen rakennetulla kompensointilaitteistolla päästiin.

## 2 KAPASITIIVINEN LOISTEHO SÄHKÖVERKOISSA

### 2.1 Loistehon määritelmä ja muodostuminen

Tehoa voidaan käsitellä kompleksisuurena, jossa reaalikomponentin muodostaa pätöteho  $P$  ja imaginääriosan loisteho  $Q$ . Kompleksisuureen itseisarvo on näennäisteho  $S$ . Kuviossa 1. teho on esitettyä osoittimina kompleksikoordinaatistossa. Teho-osoittimien yhteenlasku on esitettyä kaavassa (1). Pythagoraan lauseen mukaisesti, näennäistehon itseisarvoille pätee kaava (2).



KUVIO 1. Tehokolmio. Laskettaessa yhteen pätötehon  $P$  ja loistehon  $Q$  osoittimesitykset, saadaan näennäistehon osoitin  $S$ .

$$\underline{S} = P + jQ \quad (1)$$

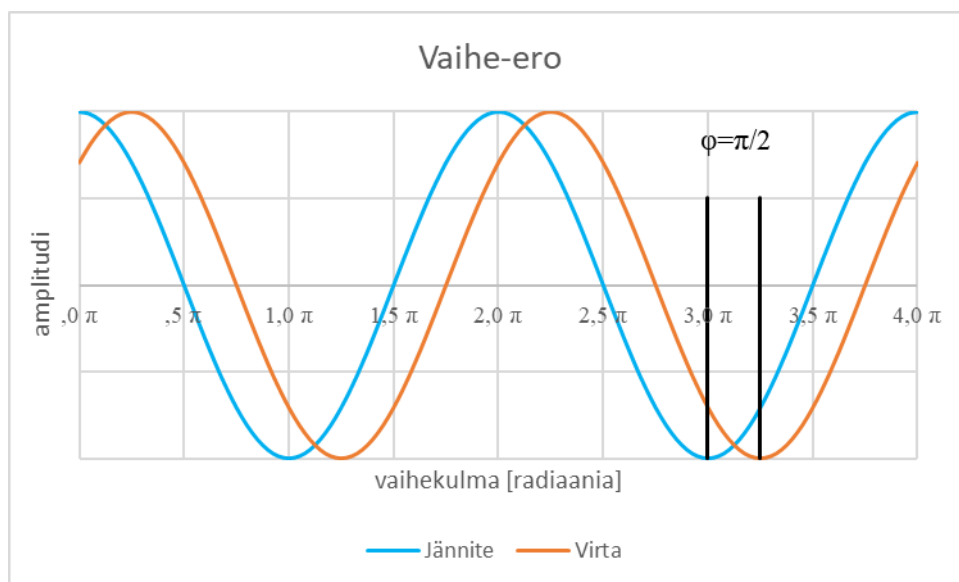
, missä  $S$  on näennäisteho,  $P$  on pätöteho ja  $Q$  on loisteho.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$



Pätöteho on verkossa siirrettävää tehoa, jota voidaan käyttää hyödyksi, kuten pyörittämään sähkömoottoria tai lämmittämään sähköpatteria. Loistehoa ei sen sijaan voida käyttää suoraan hyödyksi, vaikkakin monet laitteet sitä tarvitsevatkin toimiakseen. Esimerkiksi oikosulkumoottorissa loistehoa kuluu pyörivän magneettikentän synnyttämiseen ja muuntajissa muuntajan magnetointiin. (Kaján T & Oksanharju S. 1983. s.404)

Reaktiivista tehoa eli loistehoa esiintyy vaihtosähköpiirissä, kun virran ja jännitteen välillä on vaihe-ero. Vaihe-eron suuruuteen ja suuntaan vaikuttavat piirissä olevat reaktiiviset komponentit, induktanssit ja kapasitanssit. Kuviossa 2 on esitetty virran ja jännitteen kuvaajat, joissa niiden vaihe-ero on neljäsosa jaksosta, eli  $-90^\circ$ , siten, että jännite on virtaa edellä.



KUVIO 2. Jännitteen ja virran kuvaaja, kun  $\varphi = \frac{\pi}{2} = -90^\circ$ , eli jännite on virtaa edellä. Yksi jakso on  $2\pi$  eli  $360^\circ$ . (Young H & Freedman R. 2000. s. 1001 mukailten)

Tehokerroin  $\cos \varphi$ , kuvaa pätötehon ja näennäistehon suhdetta. Monesti kulutus laitteissa, kuten moottoreissa, on ilmoitettu tehokerroin  $\cos \varphi$ . Kulma  $\varphi$  on sama kuin kuviossa 1 näennäistehon ja pätötehon osoittimien välinen kulma. Tehokerrointa voidaan täydentää tarkkeella "kap." tai "ind.", sen mukaan onko laitteen kuormitus kapasitiivinen vai induktiivinen, ellei tämä ole asiayhteydessä itsestään

selvää. Kulmalla  $\varphi$  on kaavojen 3 ja 4 mukainen suhde pätö- ja loistehon, sekä näennäistehon välillä.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

On sovittu että, kapasitiivinen reaktanssi on etumerkiltään negatiivinen ja induktiivinen reaktanssi positiivinen. Sähkönjakelun mittauksissa kulutettu pätöteho on etumerkiltään positiivinen, mistä juontuu myös käytänne, että induktiivisten kuormien sanotaan kuluttavan loistehoa ja kapasitiivisten kuormien sanotaan tuottavat loistehoa. (Silvonen K. 2017. s. 7)

Verkkoyhtiöillä, niin kanta- kuin jakeluverkkoyhtiöilläkin, on oma vakiintunut terministönsä puhuttaessa loistehosta, sen kulutuksesta ja tuottamisesta. Jakeluverkkoyhtiön asiakkaan tehokertoimen ollessa induktiivinen, joutuu jakeluverkkoyhtiö tuottamaan vastaavan määrän kapasitiivista loistehoa tai ostamaan kapasitiivisen loistehon kantaverkkoyhtiöltä. Jakeluverkkoyhtiön näkökulmasta asiakas *ottaa* loistehoa ja samoin jakeluverkkoyhtiö *ottaa* vastaavan määrän loistehoa kantaverkosta. Vastaavasti jakeluverkkoyhtiön keskijänniteverkon kuormituksen ollessa vähäinen, niin lähes tyhjäkäyvän verkon tehokerroin on kapasitiivinen. Verkko tuottaa kapasitiivista loistehoa. Ellei loisteholle ole kulutusta, on se siirrettävä kantaverkkoon, jolloin käytetään termiä *anto*. (Fingrid kantaverkkosopimus ja kantaverkkopalvelumaksut, 2)

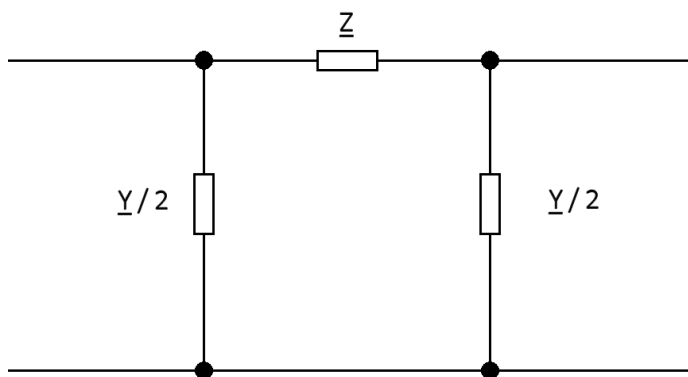
## 2.2 Kapasitiivisen loistehon lisääntyminen verkossa

Pienjännitejakelussa 400 V:n jännitetasossa on induktiivisen loistehon kompensointi kondensaattori paristoilla ollut normaalia ja totuttua toimintaa vuosikymmeniä. Etenkin teollisuudessa moottorikuormat ja induktiivisilla liitälaitteilla varustetut loiste- ja purkausvalaisimet ovat olleet huomattavia induktiivisen loistehon tuottajia.

Useilla alueellisilla verkkoyhtiöillä kapasitiivisen loistehonkompensointi keskijännitejakelussa on tullut tarkastelun alle vasta hiljattain. Keskijänniteverkossa reaktiivisia komponentteja ovat muuntajat, kuristimet, kondensaattorit sekä kaapelit ja johdot. Näistä puhtaasti induktiivista loistehoa tuottavat muuntajat ja kuristimet. Kondensaattorit tuottavat kapasitiivista loistehoa. Kaapeleiden ja johtojen tuottama loisteho vaihtelee niiden kuormituksen mukaan.

Kaapelit ja avojohdot ovat siirtolinjoja, joiden sijaiskytkennässä on kapasitiivisia, reaktiivisia sekä resistiivisiä komponentteja. Resisttiivinen komponentti, eli johtimen ominaisresistanssi, muodostuu johdinmateriaalin ohmisesta vastuksesta, joka on tyypillinen tietylle johdinmateriaalille ja johtimen poikkipinnalle. Ominaisresistanssi ilmoitetaan yleensä  $\Omega/\text{km}$ .

Johdon  $\pi$ -sijaiskytkentä on esitetty kuviossa 3. Tämä yksinkertaistettu johtomalli on käyttökelpoinen alle 200 km johtopituuksilla. Kytkennän sarjakomponentti  $\underline{Z}$  koostuu johdon resistanssista  $R$ , joka on johtimen ohminen vastus, sekä johtimen induktanssista  $X_L$ . Rinnakkaiskomponenteista muodostuva admittanssi  $\underline{Y}$  ajatellaan jakautuneeksi, siten että, puolet admittanssista on kytkeytynyt sarjakomponentin syötön puolelle ja puolet kulutuksen puolelle. Admittanssi muodostuu johdon kapasitanssista  $X_c$ , sekä johtimen eristeen konduktanssista  $G$ . Energiansiirtoverkkoja tarkasteltaessa voidaan eristeen resistiiviset häviöt ja vuotovirrat, eli eristeen konduktanssi  $G$  jättää yleensä huomiotta alle 220 kV:n jännitteellä. (Elovaara & Haarla 2011a)



KUVIO 3. Johdon  $\pi$ -sijaiskytkentä (Elovaara J & Haarla L 2011a, s. 97)

Kelan reaktanssi  $X_L$  taajuudella  $f$  [Hz] voidaan laskea kelan induktanssista  $L$  [H] kaavalla 5. Kondensaattorin reaktanssin itseisarvo  $X_C$  taajuudella  $f$  ja kapasitanssille  $C$  [F] lasketaan vastaavasti kaavalla 6. Reaktanssin käänteisarvon, susceptanssin  $B$  [S], laskenta on esitetty kaavassa 7.

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (5)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (6)$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = 2\pi \cdot f \cdot C \quad (7)$$

Kuten aikaisemmin todettiin, on johdolla sarjainduktanssi  $X_L$ , joka tuottaa johdon kuormitusvirrasta neliöllisesti riippuvan induktiivisen loistehon  $Q_L$  (kaava 8). Johdon käyttökapasitanssi  $X_C$  tuottaa käyttöjännitteen neliöstä riippuvan kapasitiivisen loistehon  $Q_C$  (kaava 9). Kun  $Q_L + Q_C = 0$ , kapasitiivinen ja induktiivinen loisteho ovat yhtä suuret ja kumoavat toisensa, joten johto näyttää puhtaasti resistiiviseltä. Pätötehon arvo, jolla em. ehto saavutetaan, on johdon luonnollinen teho  $P_l$ .

$$Q_L = I_l \cdot U_L = I_l^2 \cdot X_L \quad (8)$$

$$Q_C = U_n \cdot I = U_n^2 \cdot \frac{1}{X_C} = U_n^2 \cdot B_C \quad (9)$$

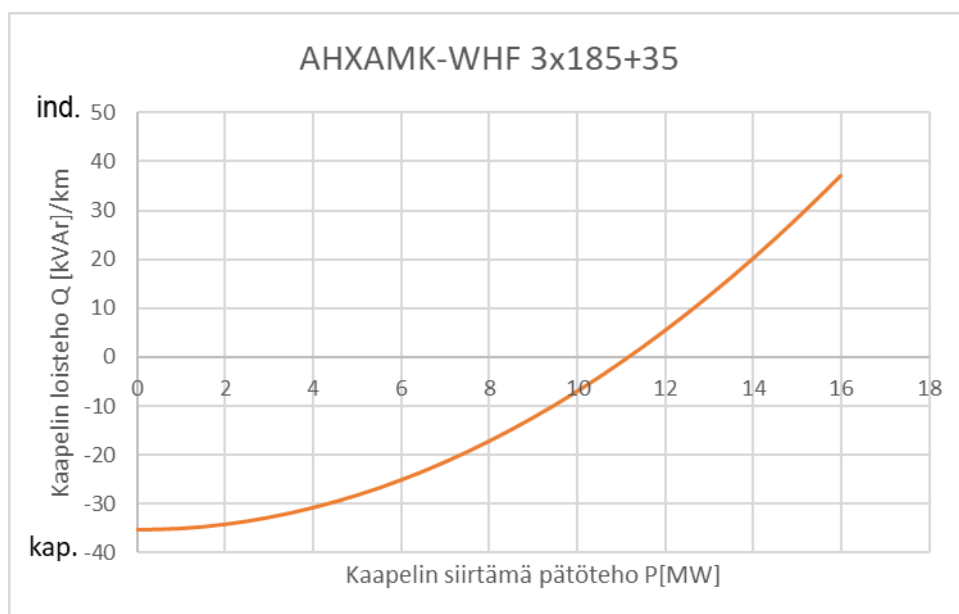
$$Q = Q_L - Q_C \quad (10)$$

Induktanssin ja käyttökapasitanssin suhde määrää johdon aaltoimpedanssin  $Z_s$ . Aaltoimpedanssi on johdon pituudesta riippumaton, johtotyypin ja rakenteen mukainen vakio. Yleisessä tapauksessa aaltoimpedanssi on osoitinsuure, jolla on reaali- ja imaginääriosia (kaava 11) mutta häviöttömälle siirtojohdolle aaltoimpedanssin arvo voidaan esittää paljaana lukuna, jonka laskenta on esitetty kaavassa 12. Luonnollisen tehon  $P_1$  ja aaltoimpedanssin  $Z_s$  suhteelle pätee häviöttömällä johdolla kaavan 13 yhtälö. (Elovaara J. & Haarla L. 2011a, s. 90)

$$\underline{Z}_s = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (11)$$

$$Z_s = \sqrt{X_L \cdot X_c} = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega \cdot \pi \cdot L}{2 \cdot \omega \cdot \pi \cdot C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

$$P_1 = UI = \frac{U^2}{Z_s} = Z_s I^2 \quad (13)$$



KUVIO 4. Wiski-kaapelin loistehon tuotannon suhde siirrettyyn pätötehoon nähdessä. Kaapelin luonnollinen teho,  $P_1$ , on n. 11 MW.

Reaktiiviset komponentit, sarjainduktanssi ja käyttökapasitanssi riippuvat voimakkaasti siirtolinjan tyypistä, eli onko kyseessä avojohto vai kaapeli. Erityisesti ilmajohtojen osalta linjan mekaaninen rakenne (orsien korkeus maasta, vaihejohtimien etäisyys toisistaan, johtimien vuorottelu, ukkosköydet) vaikuttaa linjan aaltoimpedanssiin enemmän kuin vaihejohtimen ominaisuudet. Koska ilmajohtoilla on huomattavasti pienempi ominaiskapasitanssi kuin kaapeleilla ja toisaalta kaapeleiden induktanssi on ilmajohtoja pienempi, on saman poikkipintaisen ilmajohtojen luonnollinen teho pienempi kuin vastaavaan kaapeliin.

Jos maakaapelia kuormitetaan huomattavasti alle sen luonnollisen tehon, tuottaa se verkkoon kapasitiivista loistehoa, mikä on huomioitava keskijänniteverkkoja rakennettaessa ja saneerattaessa. Ilmajohtoilla ilmiö on päinvastainen johtuen ilmajohtojen suuremmasta induktanssista. Esimerkiksi kantaverkon ilmajohtot tarvitsevat kapasitiivista kompensointia kuormitettuna, jotta pätöenergian siirto on ylipäättään mahdollista. Keskijänniteverkon loistehon tuoton lisääntymistä aiheuttaa erityisesti kevyesti kuormitettujen ilmajohtojen korvaaminen maakaapeleilla haja-asutusalueilla tai kevyesti kuormitetun uuden kaapelin rakentaminen. Taulukossa 1 on esitetty ilmajohtojen 3xACSR 54/9 Raven (tyypillinen puupylväs rakenne, vaiheväli 1,3m, orren korkeus 8m) ja AHXAMK-W 3x50/35 maakaapelin sähköiset ominaisuudet ja näistä lasketut luonnolliset tehot.

TAULUKKO 1. Avojohtojen ja kaapelin sähköiset arvot

	3XACSR 54/9	AHXAMK-W 3x50/35	
Kuormitettavuus	280	155	A
Käyttökapasitanssi	0,01 (laskettuna 6,7nF/km)	0,18	$\mu\text{F}/\text{km}$
Induktanssi	1,2	0,45	mH/km
Aaltoimpedanssi	346,4	28,7	$\Omega$
Luonnollinen teho	1,15	7,74	MW
Kuormitettavuuden mukainen teho	7,7	5,4	MW

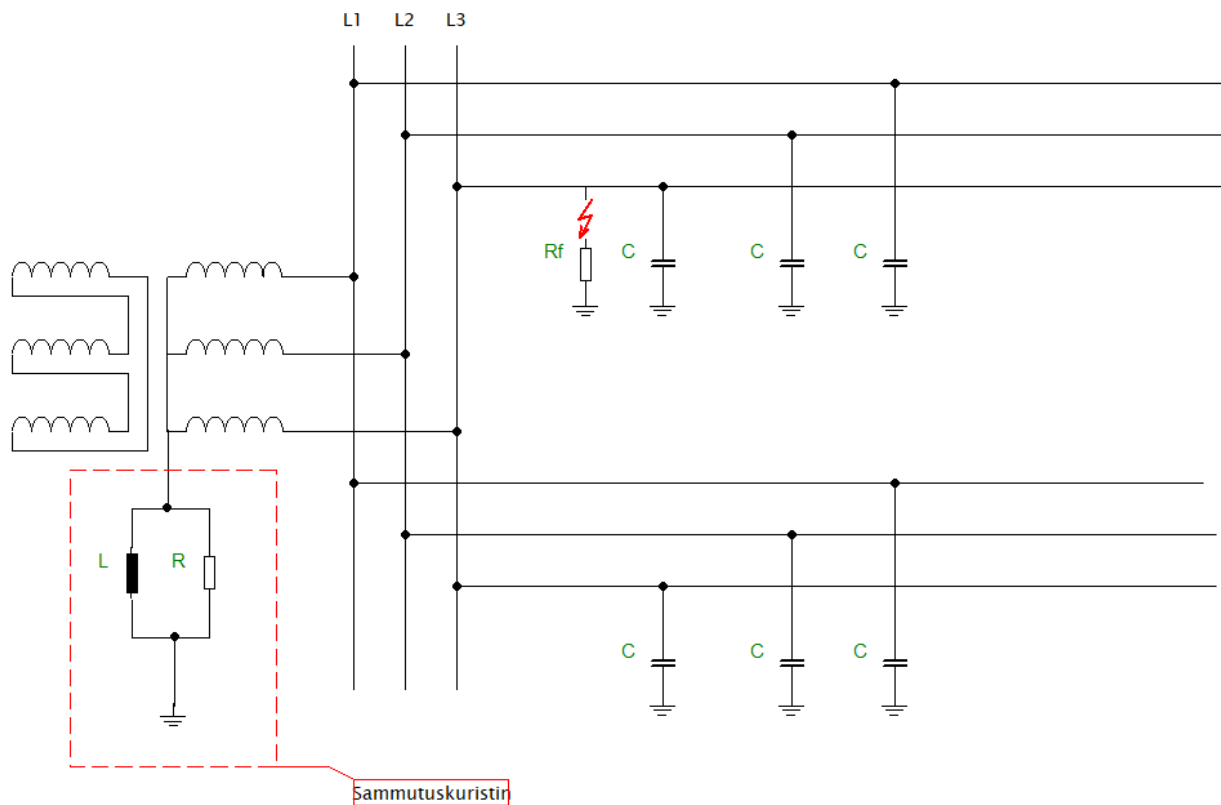
Kuten taulukosta 1 voidaan nähdä, ilmajohtojen terminen kuormitettavuus on huomattavasti suurempi kuin johdon luonnollinen teho. Maakaapelilla puolestaan kaapelin luonnollinen teho on suurempi kuin kaapelin kuormitettavuus.

### 2.3. Ilmajohtojen ja maakaapeleiden kapasitanssin laskenta

Ilmajohtojilla ja kaapeleilla on rakenteesta johtuva kapasitanssi. Kaapelirakenteille valmistajat ilmoittavat kapasitanssiarvot datalehdillään. Ilmajohtojille kapasitanssin suuruus riippuu pääasiassa käytetystä jännitetasosta ja linjan fyysisestä konstruktiosta.

Maakapasitanssi on suuri, joka vaikuttaa verkon käyttäytymiseen vikatilanteissa. Suuri maakapasitanssi suurentaa yksivaiheisen maasulun vikavirtaa. Suurta maasulkuvirtaa kompensoidaan sammutetussa verkossa muuntajan tähtipisteeseen kytketyllä reaktorilla, jonka reaktanssi on likimain yhtä suuri kuin verkon maakapasitanssien summa,  $X_L - X_C \approx 0$ . Reaktori voi olla kytkettynä muuntajan tähtipisteeseen, jolloin sitä nimitetään Petersen-kelaksi, tai jos muuntaja on

kolmioon kytketty tai tähtipistettä ei ole käytettävissä, voidaan tähtipiste muodostaa erillisellä tähtikytketyllä sammutusmuuntajalla. Kelan rinnalla voi olla resistanssi, joka tuottaa pätötehoikomponentin vikavirtaan. Tällä varmistetaan suoja-reiden toiminta.

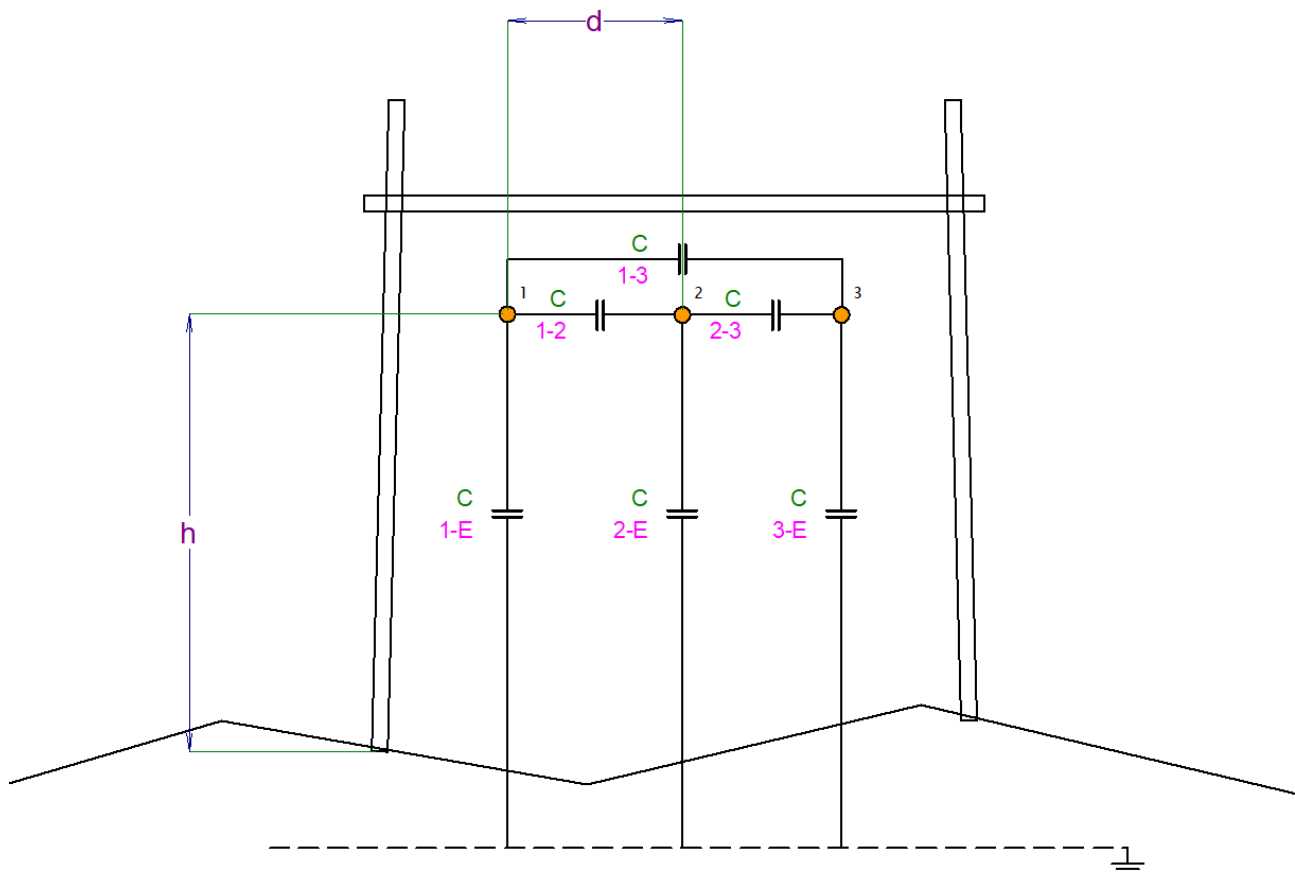


KUVIO 5. Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa.  $C$  on maakapasitanssi,  $L$  on sammutuskuristimen induktanssi,  $R_f$  on vikaresistanssi ja  $R$  on sammutuskuristimen mahdollinen lisäresistanssi.

Käyttökapasitanssi tarkoittaa verkon vaihejohtimien välistä kapasitanssia, joka tuottaa johdossa kapasitiivista loistehoa johdon ollessa jännitteinen. Ilmajohdoissa vaihejohtimien välillä sekä vaihejohtimien ja maatasen välillä vaikuttaa maakapasitanssi. Näistä voidaan laskemalla määrittää käyttö- ja maakapasitanssit. Laskeminen edellyttää matriisilaskentaa ja sitä on käsitelty tarkemmin esimerkiksi kirjassa Sähköverkot II (Elovaara & Haarla 2011b). Kuviossa 6 on esitetty avojohdossa vaikuttavat kapasitanssit. Huomiona esitetään, että avojohtolinjoissa on käytössä vaihejohtimien vuorottelu. Tämä tarkoittaa, että vaihejohtimien fyysistä järjestystä pylväillä kierrätetään niin, että jokainen johdin olisi keskimäärin yhtä pitkän matkan samalla paikalla (vasemmalla, keskellä, oikealla/ ylhäällä,

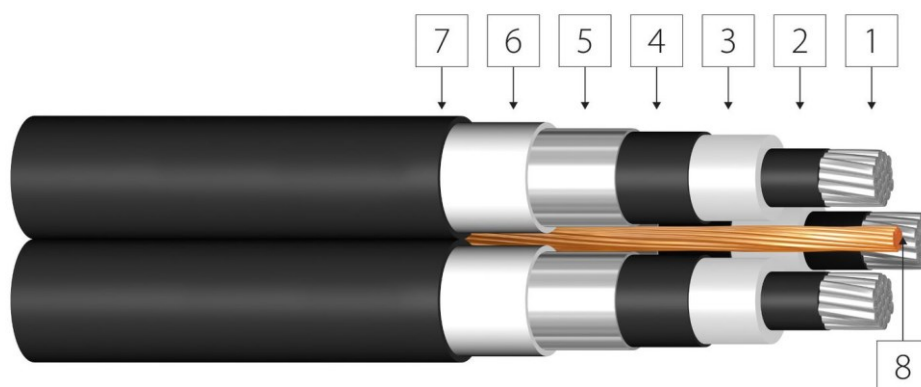


keskellä, alhaalla). Laskenta edellyttää johtorakenteen mittojen tuntemista. Tämän työn kannalta riittävä tarkkuus saavutetaan valmiiksi lasketuilla taulukkoarvoilla. Kaavoja kapasitanssien laskemiseen avojohdoissa kirjassa ovat esittäneet Heiniö S. ym. kirjassa Tekniikan käsikirja III s. 489-499.

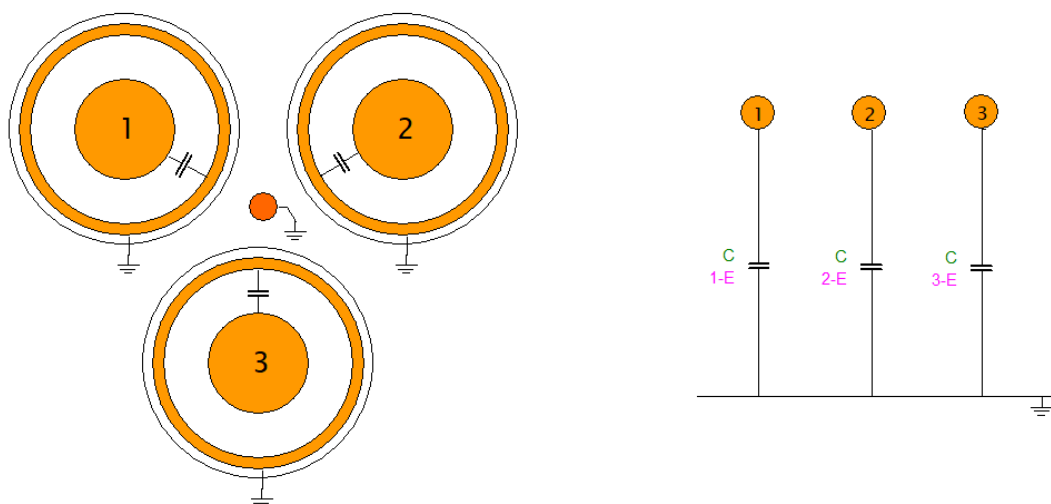


KUVIO 6. Avojohton kapasitanssit. Ukkosjohtimettoman kolmivaiheisen avojohdon keskinäis- ( $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$ ) ja maakapasitanssit ( $C_{1-E}$ ,  $C_{2-E}$  ja  $C_{3-E}$ ).  $h$  on linjan vaihejohtimen keskimääräinen korkeus maasta (huomioiden riippuma) ja  $d$  on vaihejohtimien keskimääräinen keskinäinen etäisyys. (Elovaara J & Haarla L 2011a, s. 119 mukaillen)

Tyypillinen keskijännitemaakaapelin rakenne on esitetty kuvassa 1, jossa uloimpana ennen vaippaa ja mahdollisia armeerauksia on maatasoon kytketty kosketussuoja. Kosketussuoja toimii vaihejohtimien välisenä staattisena suojana, joten vaihejohtimien välillä ei ole suoraa kapasitiivista kytkeytymistä. Kaapelien käyttökapasitanssi muodostuu vaihejohtimien maakapasitansseista (kuvio 6), jotka kytkeytyvät maatasoon kautta toisiinsa.



KUVA 1, AHXAMK-W kaapelin rakenne. 1) vaihejohdin, 2) puolijohtava muovi, 3) vaihe-eriste, 4) puolijohtava muovi, 5) veden vaikutuksesta paisuva puolijohtava nauha, 6) alumiini muovilaminaatti, kosketussuoja, 7) vaippa, 8) maadoitusköysi. (Kuva: NKT 2023)



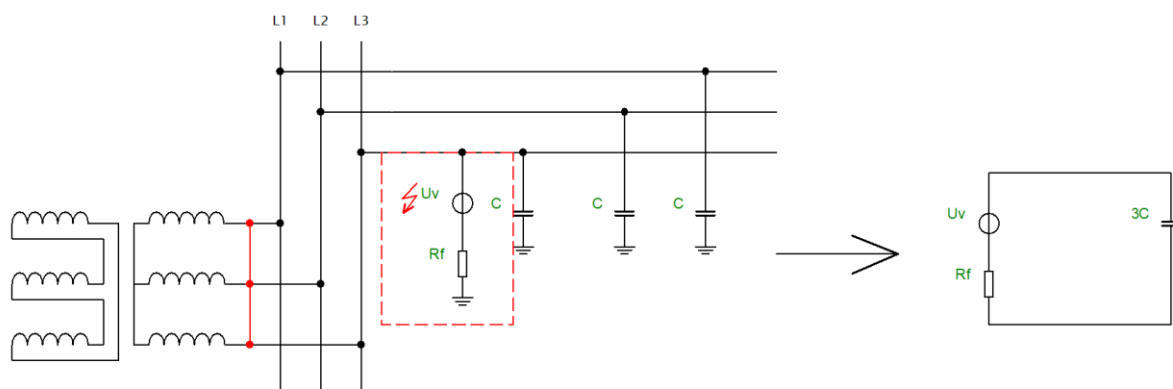
KUVIO 7. Maakaapelin kapasitanssit. Vasemmalla vaihejohtimet 1,2 ja 3, joissa käyttökapasitanssi kytkeytynyt vaihejohtimia ympäröivään maadoitettuun kosketussuojaan. Oikealla vastinkytkentä. Kosketussuojan resistanssia ja reaktanssia ei ole huomioitu.

Käyttökapasitanssi aiheuttaa johtoon varausvirran  $I = U_V \cdot \omega \cdot C$ , koska kapasitanssin  $C$  yli vaikuttaa verkon vaihejännite. Symmetrisessä verkossa

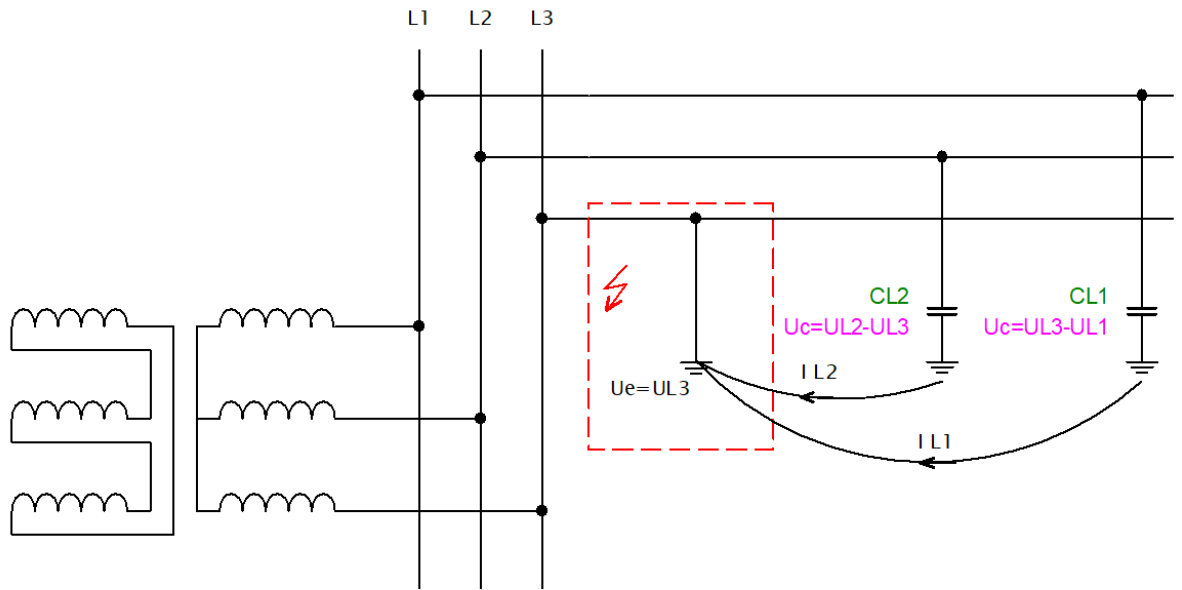
vaihejännitteiden summa  $\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} = 0$  ja maatason potentiaali on sama kuin muuntajan tähtipisteen potentiaali. Varausvirta on kapasitiivinen ja aiheuttaa kaapelissa loistehon tuottoa.

Kaksi esimerkkiä maasulkuvirran laskennasta maasta erotetussa verkossa:

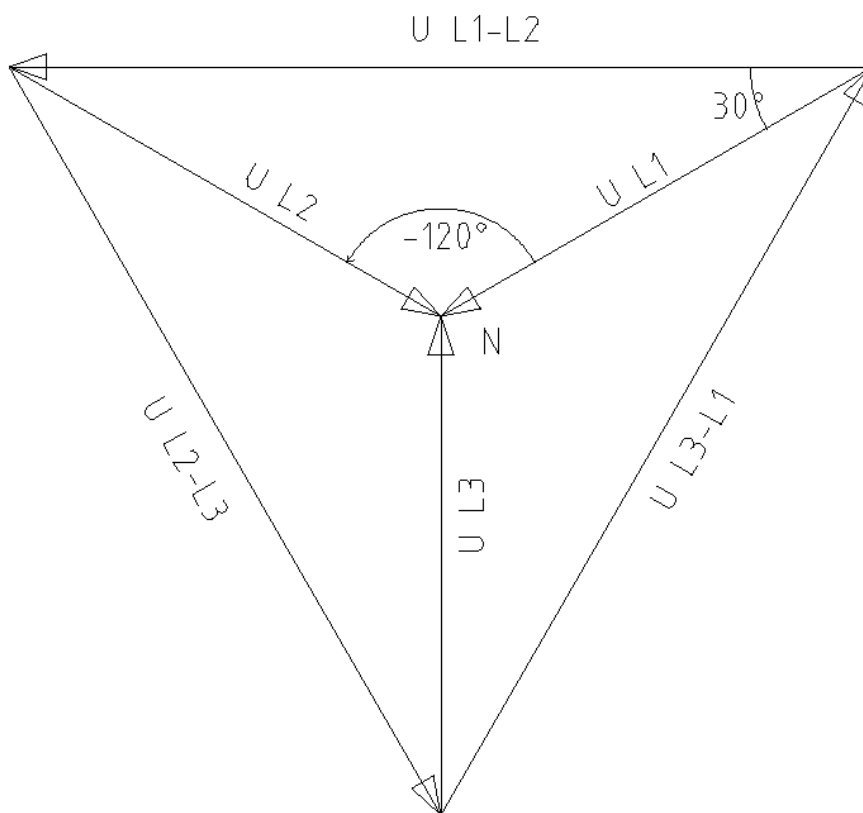
Theveninin menetelmä: Yksivaiheisen maasulun laskennassa tämän mallin mukaisesti ”sammutetaan” verkon lähteet (muuntaja) ja sijoitetaan Theveninin-lähde vikapaikkaan sarjaan vikaresistanssin  $R_f$  kanssa. Todetaan, että vaihejohtimien ja muuntajan käämien impedanssit ovat tässä tilanteessa merkityksettömiä ja ne voidaan olettaa nollassa. Muodostuu kuvion 8 mukainen virtapiiri.



KUVIO 8. Maasulkuvirran laskeminen Theveninin menetelmällä.  $U_v$  on Theveninin-lähteen jännite eli vaihejännite vikahetkellä.  $R_f$  on vikaresistanssi ja  $3C$  on maakapasitanssien  $C$  summa. Muuntajan lähdejännitteet on ”sammutettu” oikosulkemalla se. Sijaiskytkentä on esitetty kuvassa oikealla.



KUVIO 9. Maasulkuvirrat osoitinlaskennassa. Maatason potentiaali vikakohdassa on vaiheen  $L3$  vaihejännitteen suuruinen. Kapasitanssien  $C_{L2}$  ja  $C_{L1}$  yli vaikuttaa verkon pääjännite.



KUVIO 10. Vaihe- ja pääjännitteiden osoittimet

Lasketaan maasulkuvirrat molemmilla menetelmillä kaapelille AXHAMK-WHF 3x300+75 yhden kilometrin mittaiselle kaapelille. Kaapelin datalehti liitteenä 1. Valmistaja on ilmoittanut kaapelille taulukon 2 mukaiset arvot.

TAULUKKO 2.

Käyttökapasitanssi	0,34	μF/km
Varausvirta	1,2	A/km
Maasulkuvirta	3,7	A/km
Vaihejohtimen induktanssi	0,4	mH/km

Theveninin menetelmä:

$$I_f = U_v \cdot 3 \cdot \omega \cdot C$$

$$= \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,34 \text{ } \mu\text{F} = 3,7005$$

$$\approx 3,7 \text{ A}$$

Osoitinlaskentana:

Kuviossa 8. esitetyssä tilanteessa on Kirchoffin-virtalain mukaan maasulkuvirta yhtä suuri kuin virtojen  $I_{L1}$  ja  $I_{L2}$  summa. Jänniteosoittimien kulmat ja suunnat voidaan nähdä kuviossa 9. Tarkasteltaessa piiriä Kirchoffin jännite- ja virtalakien mukaisiksi yhtälöiksi saadaan:

$$\underline{U}_{L1} - \underline{U}_{L3} + \underline{I}_{L1} \cdot \omega \cdot C = 0$$

$$\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} + \underline{I}_{L2} \cdot \omega \cdot C = 0$$

$$I_f = \underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2}$$

Joista ratkaisemalla saadaan virraksi  $I_f$ :

$$I_f = U_{L1-L3} \cdot \omega \cdot C + U_{L2-L3} \cdot \omega \cdot C$$

$$= -U_{L3-L1} \cdot \omega \cdot C + U_{L2-L3} \cdot \omega \cdot C$$

$$= -20 \text{ kV} \angle 150^\circ \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,34 \mu\text{F} + 20 \text{ kV} \angle -90^\circ \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,34 \mu\text{F}$$

$$= 3,70015 \angle -60^\circ \approx 3,7 \text{ A}$$

### 3 LOISTEHO KEURUUN SÄHKÖN VERKOSSA

Laskettaessa aineistosta Keuruun Sähkön keskijänniteverkon loisteholle vuosikeskiarvot, huomataan että, keskiarvoloisteho on kääntynyt otolta annolle tarkastelujaksolla 2012–2017, ollen vuonna 2017 keskiarvoisesti n. 1,25 MVar kapasitiivisen annon puolella. Tämä on esitetty kuviossa 11.



KUVIO 11. Loistehon keskiarvon kehittyminen 2012–2017

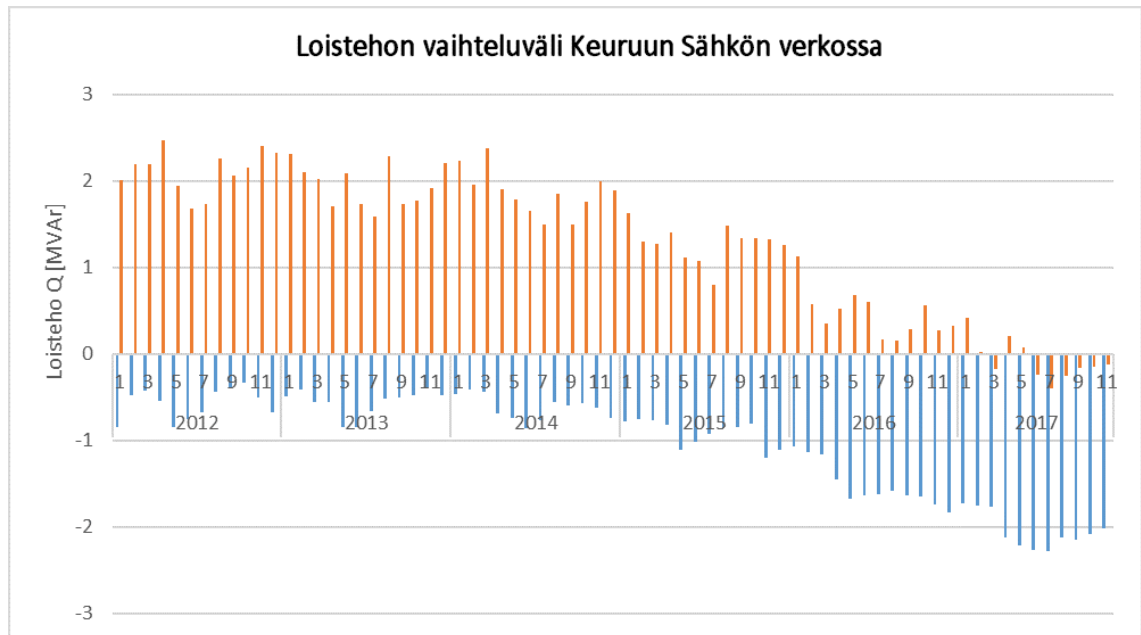
On huomioitava, että koska kyseissä kuvaajassa on esitettyinä vuosikohtaiset keskiarvot koko verkon osalta, niin tästä ei voida suoraan päätellä aiheutuvien kustannusvaikutuksien suuruutta tai loistehon kompensoinnin tarvetta, koska alueverkkoyhtiön laskutusperuste on sähköasemakohtaisesti netotetut mittaukset. Mutta kuvaaja antaa hyvän käsityksen loistehotilanteen trendistä. Netotus sanaa käytetään tässä samassa tarkoituksessa, kuin esim. Fingrid käyttää sitä materiaaleissaan ja sopimusehdoissaan; samassa verkon liittymispisteessä olevien energiamittausten loistehot lasketaan yhteen etumerkkeineen. Saatu summa kertoo liittymispisteeseen siirtyvän loistehon kokonaismäärän ja suunnan.

Kuviossa 12. on esitettyinä loisannon ja loisoton kuukausi kohtaisia huippuarvoja samalta tarkastelu jaksolta. Positiiviset arvot ovat loisottoa ja negatiiviset vastaavasti loisantoa. Näiden erotusta voidaan kutsua loistehon vaihteluväliksi.

Vaihteluväli on pysynyt vuosina 2012–2017 suunnilleen saman noin 2 MVar:ina. Kuitenkin on tärkeää huomata, että huippujen paikat ovat siirtyneet loistehon oton

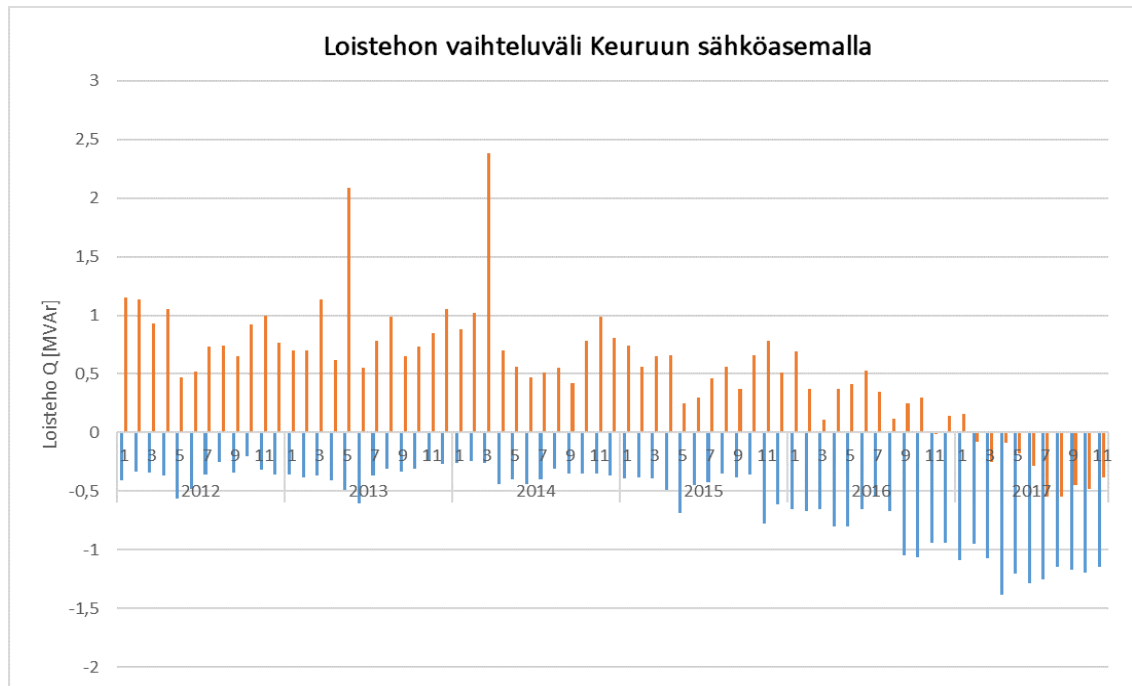
puolelta lähes täysin loisannon puolelle. Etenkin vuonna 2017 ei ole loisottoa ollut tammi-, huhti- ja toukokuussa ja niissäkin vähäisesti.

Kuvioissa 13. ja 14. on esitetty samat kuukausi kohtaiset loistehon huippuarvot erikseen Keuruun sähköasemalle ja Ylihön sähköasemalle. Näistä Keuruun sähköasemasta voidaan tehdä samankaltainen havainto kuin edellisestä, että vuonna 2017 loistehon vaihteluväli on ollut täysin loisannon puolella.

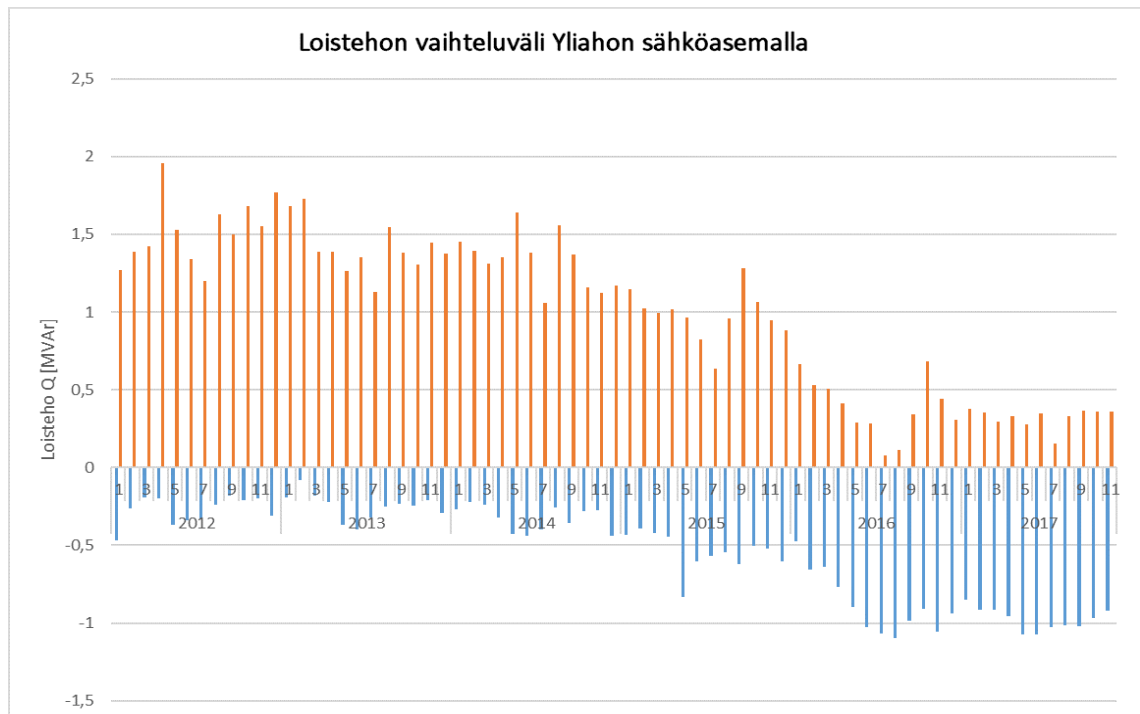


KUVIO 12. Loistehon vaihteluväli kuukausittain, molemmat sähköasemat. Suuren osan vuotta 2017 vaihteluväli on ollut kokonaan kapasitiivisen loistehon alueella.





KUVIO 13. Loistehon vaihteluväli kuukausittain, Keuruun sähköasema. Kuten kuviossa 12, myös Keuruun sähköaseman loistehon vaihteluväli on ollut kapasitiivisen loistehon alueella vuonna 2017.

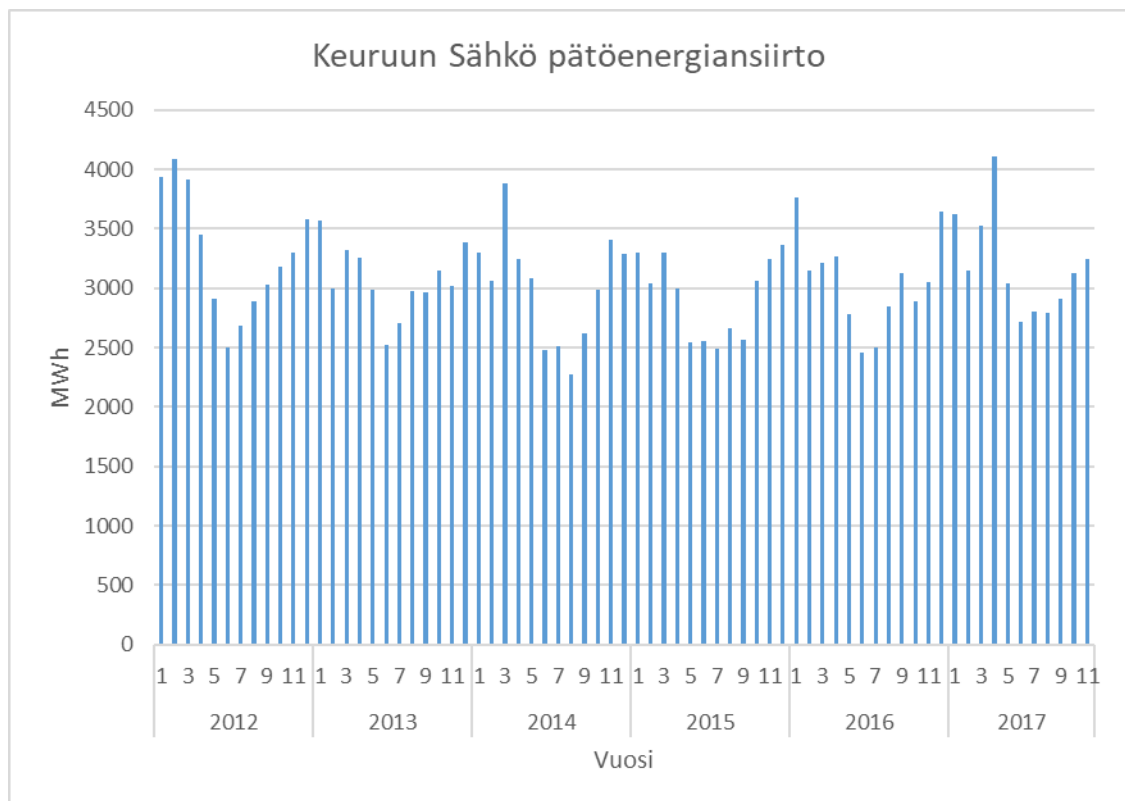


KUVIO 14. Loistehon vaihteluväli kuukausittain, Yliahon sähköasema

Kuten kuvioista 13 ja 14 nähdään, on loistehon keskitaso ollut Yliahon sähköasemalla suurempi kuin Keuruun sähköasemalla. Toisaalta myös loistehon

vaihteluväli on suurempi Yliahon asemalla kuin Keuruun asemalla. Syitä tälle ovat asemien syöttämien kulutusten erot: Yliaho syöttää keskimäärin enemmän teollista kuormaa ja kaapelointiasteeltaan pienempiä (13 %) lähtöjä ja Keuruun asema kevyemmin kuormitettuja ja enemmän kaapeloituja (19 %) lähtöjä.

Kuvioista 12–14 on havaittavissa kapasitiivisen loistehontuoton kasvun trendin lisäksi myös loistehon vaihtelun vuotuinen syklisyys; loisannon vuotuiset huiput osuvat useimmiten touko-, kesä- ja heinäkuulle. Sama huippujen toistuvuus käänteisenä nähdään kuvioista 15, jossa on esitettyä Keuruun Sähkön siirtämän pätöenergia. Voidaan todeta, että kun verkko on kevyemmin kuormitettu kesäaikaan, pienenee verkon kuormituksesta riippuva induktiivisen loistehon tuotto. Kapasitiivisen loistehon tuotto on kuormituksesta riippumaton vakio, joten kapasitiivisen loistehon huiput osuvat pienimmän kuormituksen hetkelle.

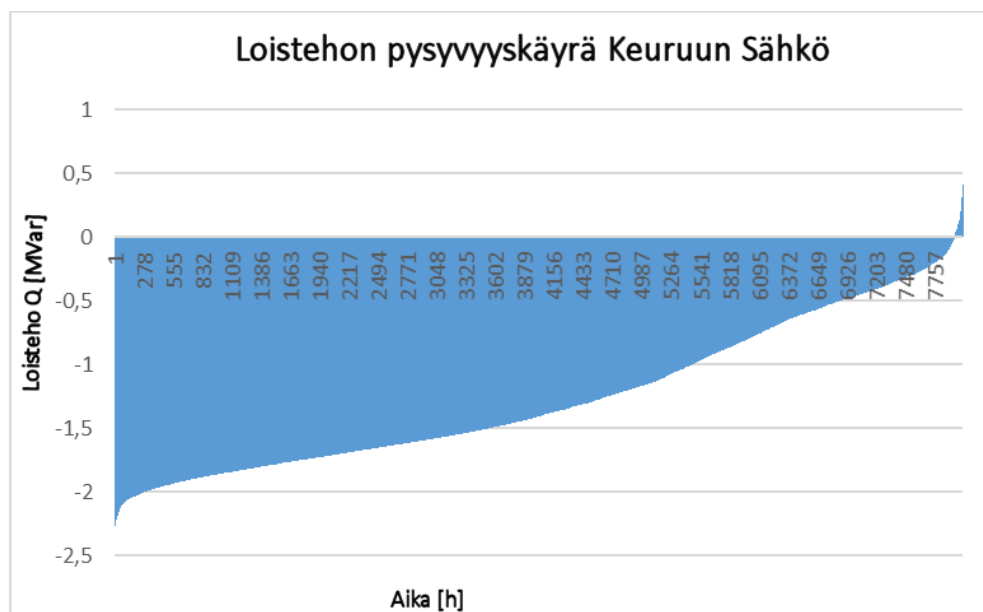


KUVIO 15. Keuruun Sähkön kuukausikohtaisesti siirtämä pätöteho. Kuvioista näkyy sama vuosittainen syklisyys, kesäkuukausina sähkön käyttö on vähäisempää.

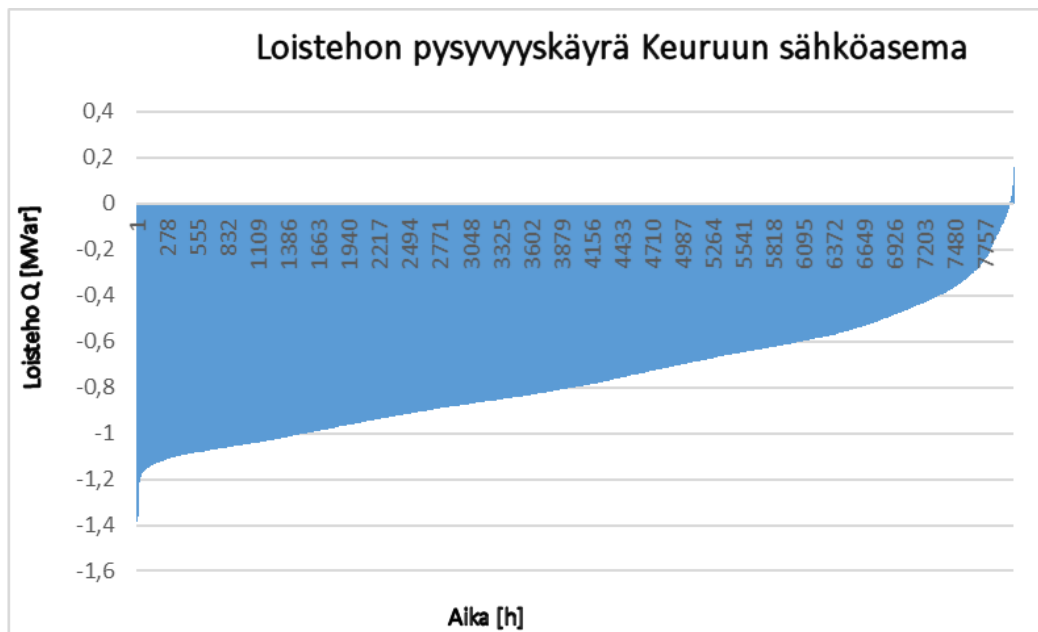
Tarkasteltaessa loistehon kulutusta ja tuottoa vuositasolla, pysyvyyskäyrä on havainnollinen työkalu. Pysyvyyskäyrässä tarkasteltava aikajakso on jaettu lyhyempiin askeliin. Askeliin arvot, järjestettynä suuruusjärjestykseen, muodostavat pysyvyyskäyrän.

Lähtöaineiston koostuessa tuntikohtaisista mittausarvoista, joten oli luonnollista käyttää askeleena tuntia ja ilmiön syklisestä luonteesta (vuodenajan vaikutus kulutukseen so. loistehotaseeseen) johtuen tarkastelujaksona yhtä vuotta. Näin saadaan kuvaajaan yhteensä 8760 diskreettiä arvopistettä (24 h/d \* 365 d/a).

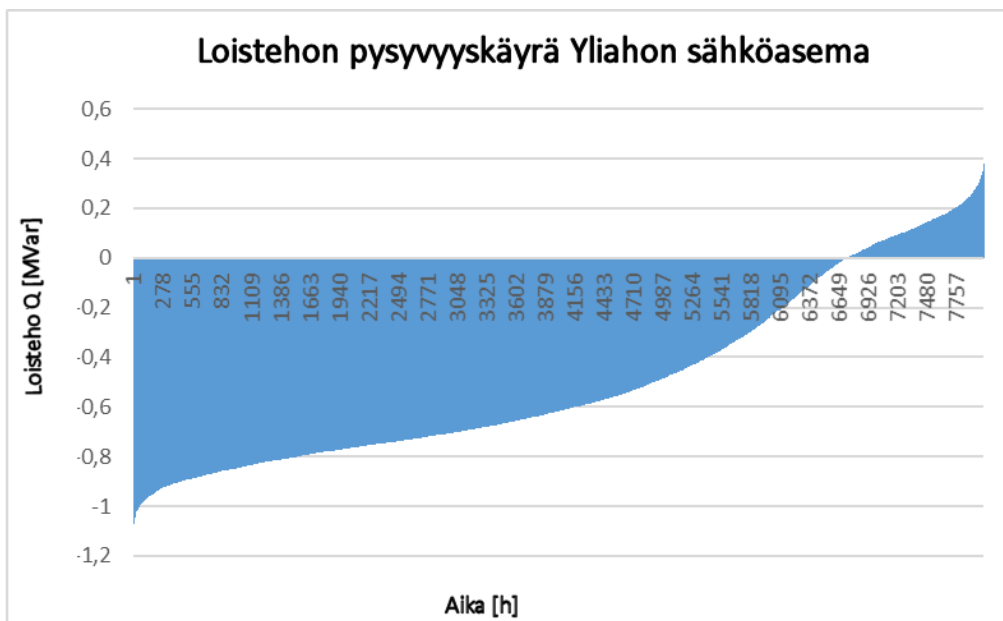
Kuvioista 16, 17 ja 18 nähdään koko Keuruun Sähkön verkon sekä sähköasema-kohtaiset loistehon pysyvyyskäyrät vuodelta 2017. Myös näistä kuvaajista voidaan havaita Keuruun asemaan kytketyn verkon suurempi loisannon määrä. Vuoden 2017 keskiarvot loisteholle ovat 0,76 MVar loisantoa Keuruun asemalle ja 0,49 MVar loisantoa Yliahon asemalle. Tässä erotus on siis 0,3 MVar.



KUVIO 16. Keuruun ja Yliahon sähköasemien yhteinen loistehon pysyvyyskäyrä vuonna 2017.



KUVIO 17. Keuruun sähköaseman loistehon pysyvyyskäyrä vuonna 2017.



KUVIO 18. Yliahon sähköaseman loistehon pysyvyyskäyrä vuonna 2017.

### 3.1 Kaapelit ja johdot

Tutkittaessa muutosta keskijänniteverkon kokoonpanossa, käytettävissä oli johto- ja kaapeliluetteloaineisto vuosilta 2014–2017, sekä suunnitellut työt vuosille 2018–2022. Keuruun Sähkö on lisännyt keskijänniteverkkonsa kaapelointi-astetta ja suunniteltujen töiden perusteella kaapeloinnin kokonaismäärä tulee

kasvamaan kaksinkertaiseksi vuoteen 2022 mennessä vuoden 2014 tasosta. Kaapelien yhteispituudet poikkipinnoittain on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3.

Pituudet		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kaapelit	<=70	27,44	28,59	30,59	29,10	29,22	30,52	31,22	32,22	32,22
	95-120	22,05	22,90	29,42	35,65	38,15	42,85	44,35	45,85	45,85
	150-185	12,98	17,41	27,16	40,28	41,98	42,88	44,08	45,38	46,58
	YHT	62,46	68,89	87,17	105,02	109,34	116,24	119,64	123,44	124,64

toteutunut ← | →suunniteltu

Osalla kaapeloinnista on korvattu vanhaa ilmajohtoa mutta osa on uutta verkkoa, mikä huomataan, kun verrataan esimerkiksi kaapeloinnin kokonaispituuden erotusta 2014–2017

$$\Delta d_{\text{kaapeli}} = 105,02 \text{ km} - 62,46 \text{ km} = 42,56 \text{ km}$$

ja ilmajohtojen kokonaispituuksien erotusta taulukosta 4 vastaavilta vuosilta:

$$\Delta d_{\text{ilmajohto}} = 566,47 \text{ km} - 597,03 \text{ km} = -30,56 \text{ km}$$

Osa erosta selittyy, sillä että kaapelointi on suoritettu eri reittiä kuin aikaisemmin käytössä ollut ilmajohto.

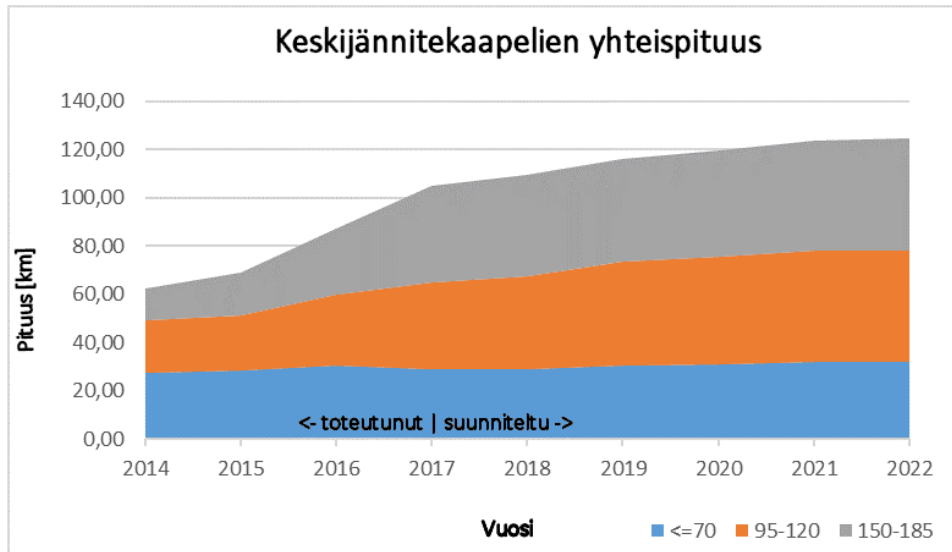
TAULUKKO 4.

Pituudet		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Avojohtot	<= 34/6	297,71	290,21	290,13	277,01	269,01	259,01	253,01	248,01	248,01
	54/9	92,66	91,46	86,94	78,26	78,26	76,26	76,26	76,26	76,26
	85/14	10,14	10,14	10,14	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41
	>=AL 132	42,57	42,19	42,19	40,35	40,35	37,05	37,05	37,05	37,05
	PAS 35-70	47,42	49,99	50,88	55,35	59,55	64,55	64,55	67,55	67,55
	>= PAS 95	106,53	107,04	111,12	109,09	111,59	116,29	117,79	119,29	119,29
	YHT	597,03	591,02	591,39	566,47	565,17	559,57	555,07	554,57	554,57

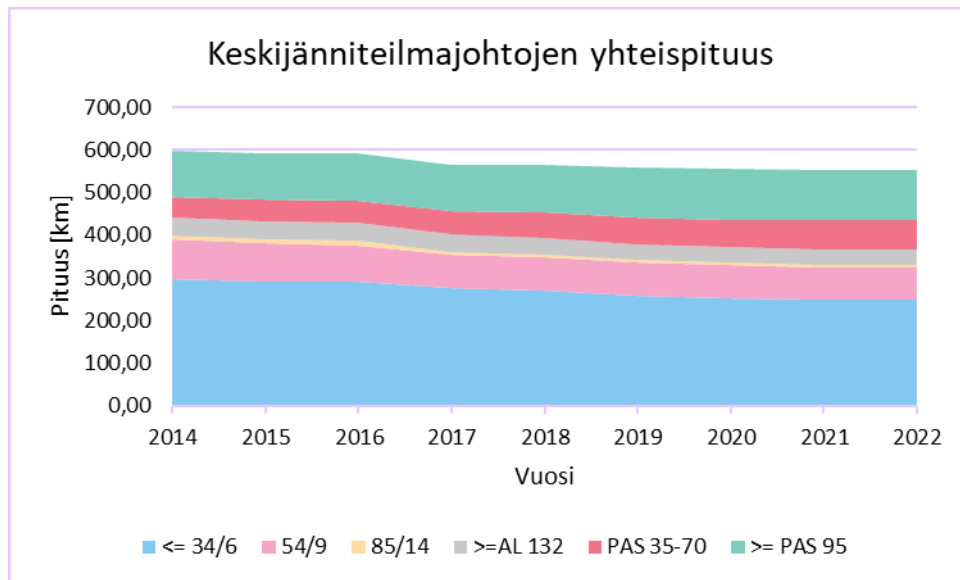
toteutunut ← | →suunniteltu

Taulukoiden 3 ja 4 tiedot kaapeli- johtomääristä on esitetty kuvioissa 19 ja 20. Kuvioista 19 on hyvä huomioida kuvaajan voimakas kasvu vuosina 2015–2017 ja verrata sitä kuviossa 11 esitetyn loistehon keskiarvon kuvaajan vastaavaan laskuun.

Avojohtoista eniten ovat vähentyneet pienet poikkipinnat ja vastaavasti kaapelointia on tehty voimakkaimmin suuripoikkipintaisilla kaapeleilla.



KUVIO 19. Kaapelien yhteispituudet poikkipinta-alojen mukaan.



KUVIO 20. Johtomäärät johtolajeittain. 34/6, 54/9 ja 85/14 ovat ACSR tyyppisiä avojohtoja. AL 132 ja suuremmat ovat seostettuja alumiiniköysiä tai seostettuja alumiiniköysiä ja PAS 35–70 ovat päällystettyjä avojohtoja, ns. puistojohtoja.

## 3.2 Kaapelien ja johtojen kapasitanssi

Kuten aikaisemmin esitettiin, eroavat keskijännitteisten avojohtojen ja maakaapeleiden sähköiset ominaisuudet huomattavasti toisistaan loistehotuotannon ja luonnollisen tehon osalta.

Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty kaapelien ja ilmajohtojen eri lajien ominaiskäyttökapasitanssit sekä kaapelien ja johtojen yhteenlasketut käyttökapasitanssit lajeittain eri vuosille.

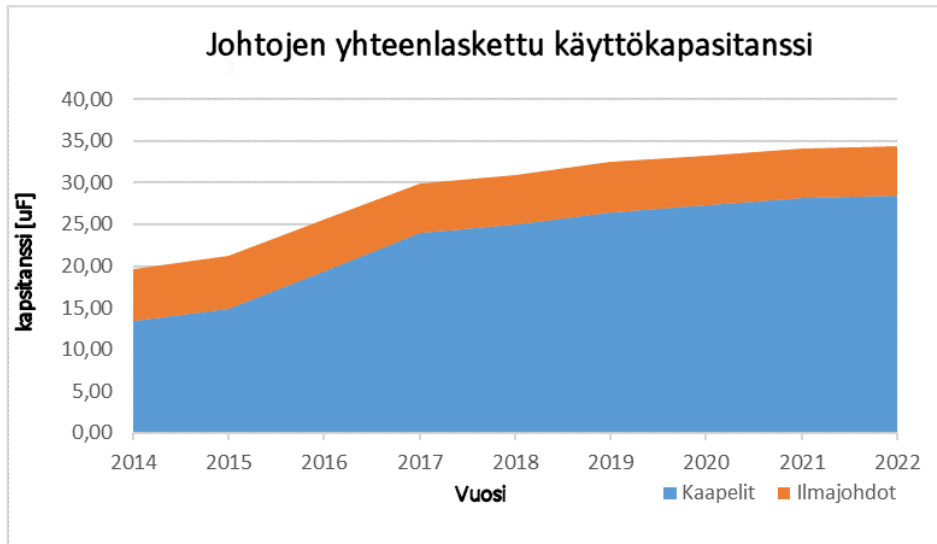
Ilmajohdon käyttökapasitanssi on tyypillisesti noin 5 % vastaavan poikkipinta-alaisen maakaapelin käyttökapasitanssista. Vaikka Keuruun Sähkön verkossa kaapeloinnin yhteispituus on alle viidesosa ilmajohtojen määrästä, on kaapelien yhteen laskettu käyttökapasitanssi kuitenkin noin nelinkertainen ilmajohtojen käyttökapasitanssiin nähden.

TAULUKKO 5. Kaapelien käyttökapasitanssit kaapelilaaduittain

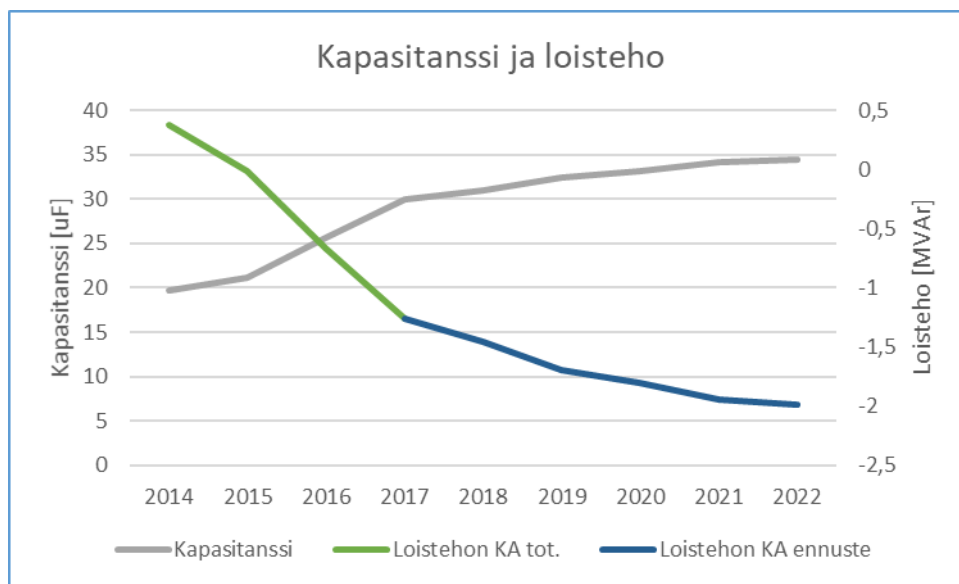
Kapasitanssit	uF/km	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Kaapelit	<=70	0,18	4,94	5,15	5,51	5,24	5,26	5,49	5,62	5,80	5,80
	95-120	0,23	5,07	5,27	6,77	8,20	8,77	9,85	10,20	10,54	10,54
	150-185	0,26	3,37	4,53	7,06	10,47	10,91	11,15	11,46	11,80	12,11
	YHT		13,38	14,94	19,33	23,91	24,95	26,50	27,28	28,14	28,45

TAULUKKO 6. Ilmajojtojen käyttökapasitanssit johtolaaduittain

Kapasitanssit	uF/km	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Avojohtot	<= 34/6	0,0095	2,83	2,76	2,76	2,63	2,56	2,46	2,40	2,36	2,36
	54/9	0,01	0,93	0,91	0,87	0,78	0,78	0,76	0,76	0,76	0,76
	85/14	0,01	0,10	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	>=AL 132	0,011	0,47	0,46	0,46	0,44	0,44	0,41	0,41	0,41	0,41
	PAS 35-70	0,012	0,57	0,60	0,61	0,66	0,71	0,77	0,77	0,81	0,81
	>= PAS 95	0,013	1,38	1,39	1,44	1,42	1,45	1,51	1,53	1,55	1,55
	YHT		6,28	6,23	6,25	6,00	6,01	5,98	5,94	5,95	5,95



KUVIO 21. Käyttökapasitanssien jakautuminen kaapelien ja ilmajohtojen kesken

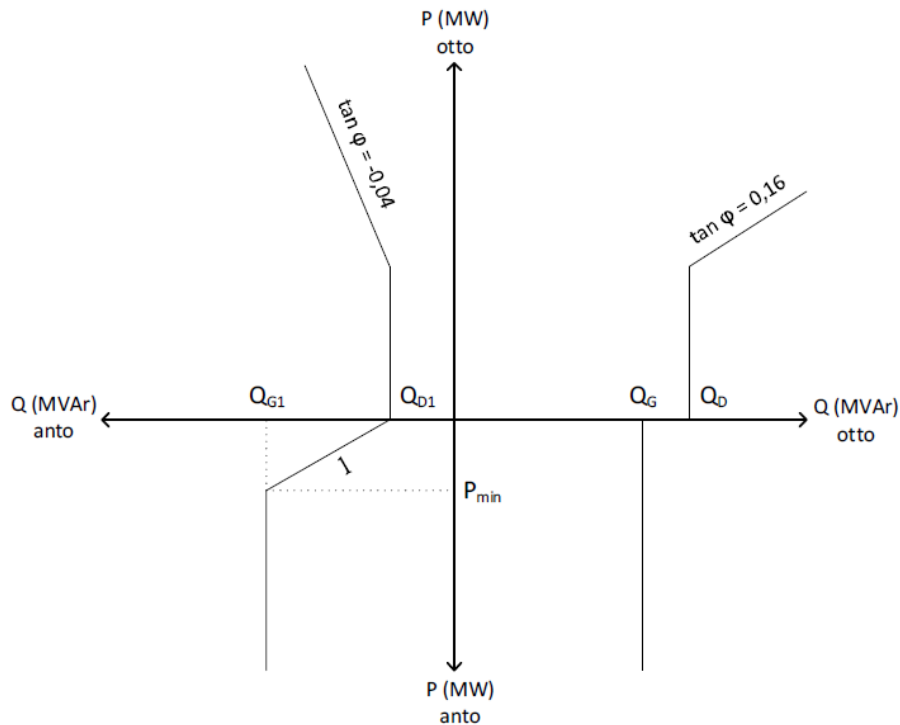


KUVIO 22. Loistehon kehitys kokonaiskäyttökapasitanssiin verrattuna.



#### 4 TALOUDELLISET VAIKUTUKSET

Alueelliset verkkoyhtiöt maksavat kantaverkkoyhtiölle sähkönsiirrosta käytetyn tehon mukaan. Loistehon osalta tehomaksuissa on tietty ilmaisosuus, loistehoikkuna, jonka ylittyessä kantaverkkoyhtiö perii loistehosta tuntikohtaisen huipputehon mukaisen maksun. Ilmaisosuuden suuruus määräytyy liittymispisteen vuotuisen ottoenergian mukaan ja ollen annolle vähintään 2 MVar ja otolle vähintään 5 MVar, muttei kuitenkaan enempää kuin 50 MVar. Kantaverkkoyhtiön loistehoikkuna on esitetty kuviossa 23.



KUVIO 23. Loistehoikkuna kantaverkossa.  $Q_D$  ja  $Q_{D1}$  ovat loistehon ilmaisosuudet kulutukselle,  $Q_G$  ja  $Q_{G1}$  vastaavasti tuotannolle. (Fingrid 2020, 1)

Koska Keuruun Sähkön keskijänniteverkko ei ole kytketty suoraan kantaverkkoon vaan alueverkkoyhtiö Sähkö Virkeät Oy:n 110 kV:n verkkoon, jossa Keuruun Sähkö on osaomistajana Koillis-Satakunnan Sähkö Oy:n kanssa, poikkeaa loisenergian hinnoittelu kantaverkkoyhtiön hinnoittelusta. Vuonna 2017 Sähkö

Virkeät Oy:n laskutusperuste loisenergialle on esitettyinä taulukossa 7 ja loisteholle taulukossa 8. Huomioitavaa tässä on, että poiketen Fingridistä, Sähkö Virkeät ei salli maksutonta loisantoa verkkoonsa.

TAULUKKO 7, Loisenergian laskutusperuste vuonna 2017

	Energiansiirron tuntitehon ilmaisosuuden ikkuna	Hinta ikkunan ylittävältä osuudelta
Loisotto	3,6 MVA <sub>r</sub> , kun $P \leq 22,5$ MW  0,16*P [MVA <sub>r</sub> ], kun $P > 22,5$ MW	5 €/MVA <sub>r</sub> h
Lois- anto	0 MVA <sub>r</sub>	5 €/MVA <sub>r</sub> h

TAULUKKO 8, Loistehon laskutusperuste vuonna 2017

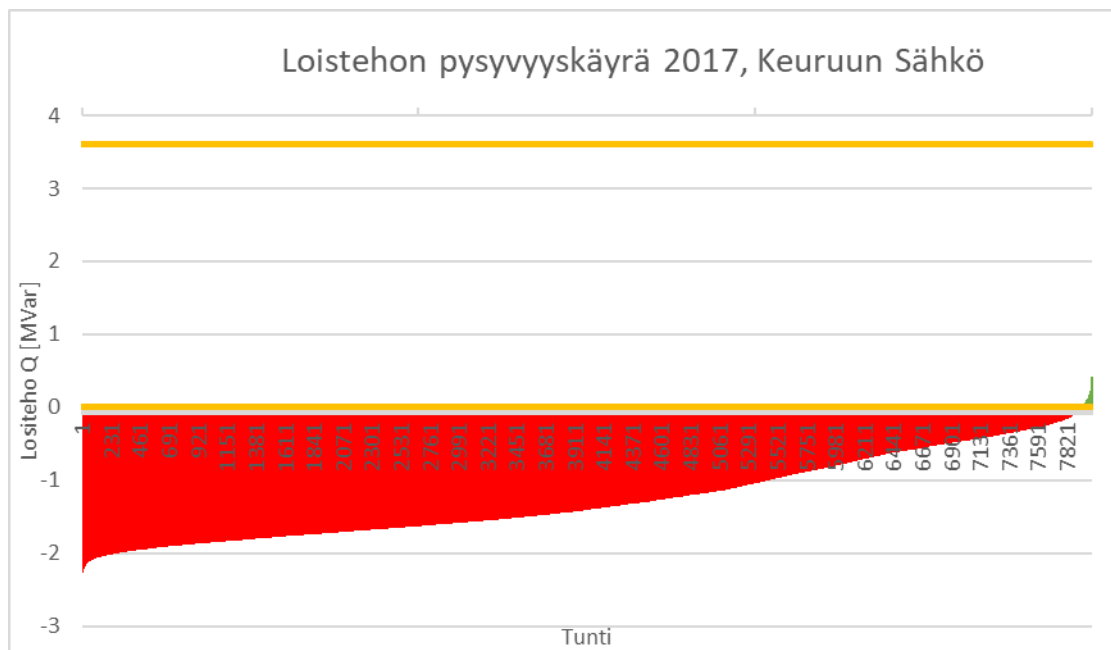
	Tehomaksun ilmaisosuuden ikkuna (joka kuukauden 11. suurin mittausarvo)	Hinta ikkunan ylittävältä osuudelta
Loisotto	3,6 MVA <sub>r</sub> , kun $P \leq 22,5$ MW  0,16*P [MVA <sub>r</sub> ], kun $P > 22,5$ MW	333 €/MVA <sub>r</sub> /kk
Lois- anto	0 MVA <sub>r</sub>	333 €/MVA <sub>r</sub> /kk

Taulukossa 7 esitetyt Sähkö Virkeät Oy:n tehomaksut noudattavat Fingridin tehomaksuja ja tulevat nousemaan vuosittain siten, että maksu on vuonna 2017 333 €/MVA<sub>r</sub>, vuonna 2018 666 €/MVA<sub>r</sub> ja vuonna 2019 1000 €/MVA<sub>r</sub>.

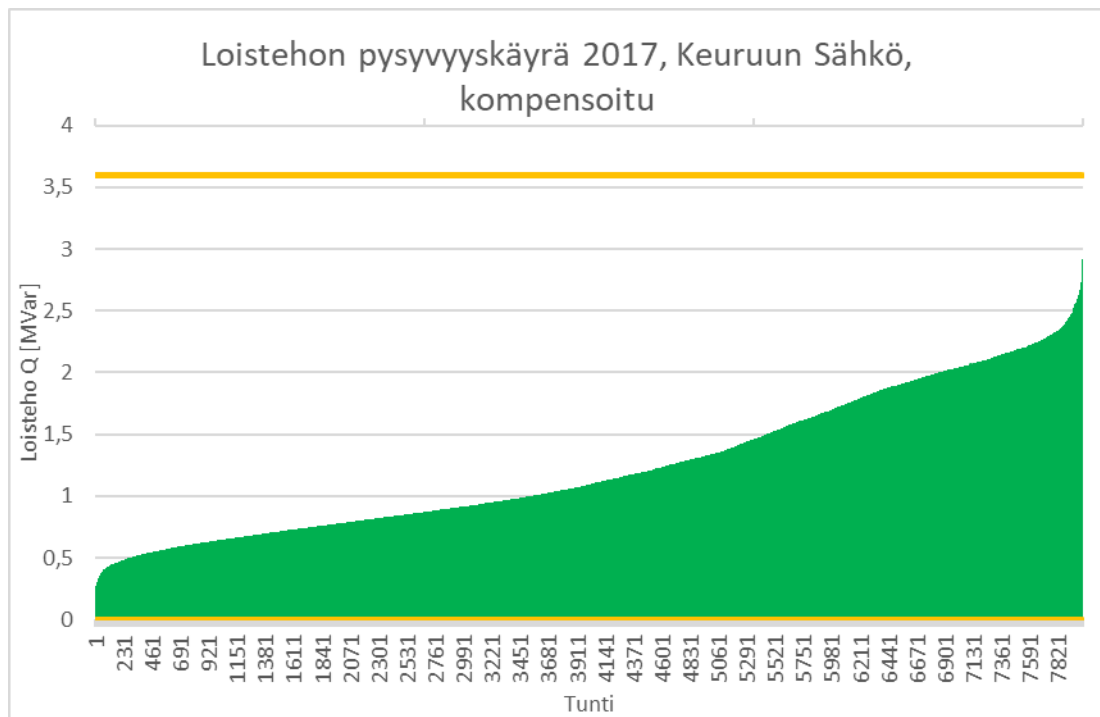
Kuvaajassa 23. on esitettyä uudelleen vuoden 2017 pysyvyyskäyrä, johon on lisätty loistehoikkunan rajoja kuvaavat vaakaviivat. Netotettu loisteho on

ikkunassa vain muutamana tuntina vuodessa. Toisaalta nähdään, että loistehon vaihteluväli on suuruudeltaan sellainen, että se mahtuisi helposti loistehoikkunan sisään kompensoituna.

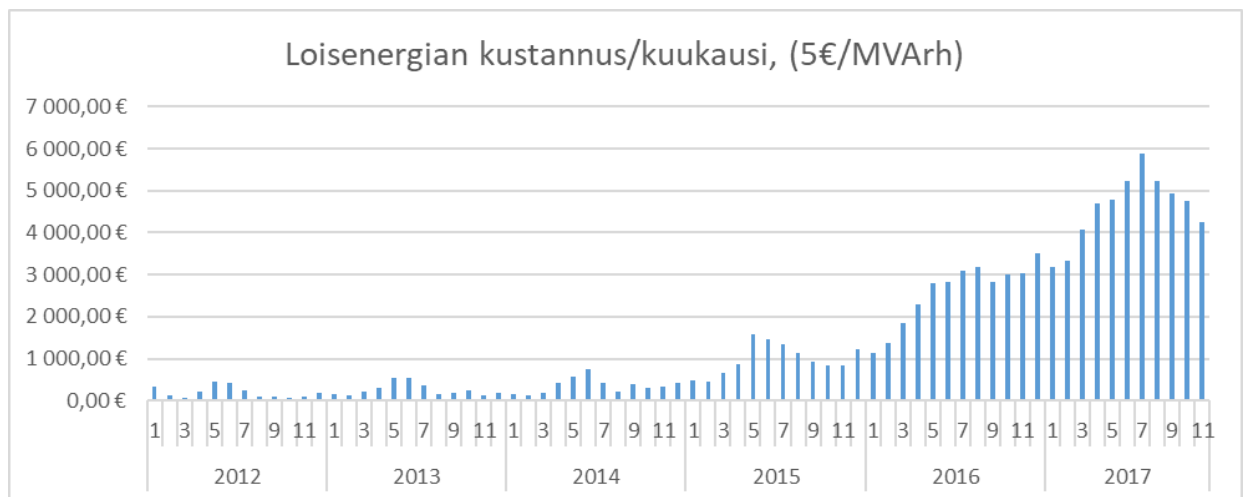
Sama mittausaineisto kuvitteellisen 2,5 MVar:n kompensoinnin jälkeen on esitetty kuviossa 24. Pysyvyyskäyrä mahtuu loistehoikkunan sisälle, jolloin ei muodostu energia- eikä tehomaksuja.



KUVIO 23. Vuoden 2017 loistehon pysyvyyskäyrä ja loistehoikkuna. Energiakustannus n. 50000 €.

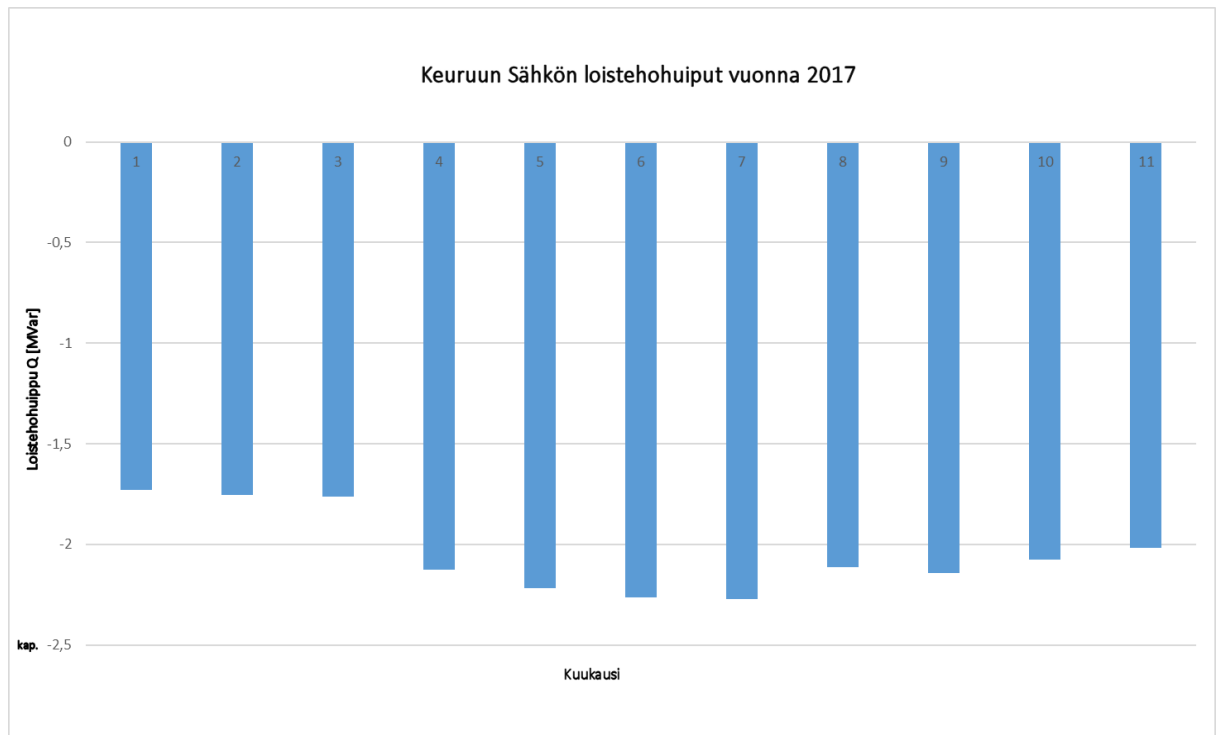


KUVIO 24. Vuoden 2017 loistehon kompensoitu (2,5 MVar) pysyvyyskäyrä ja loistehoikkuna.



KUVIO 25.

Keuruun Sähkön kuukausittaiset loistehon huippuarvot ovat esitettynä kuviossa 26, josta nähdään kuukausikohtaisten loistehon antohuippujen olevan välillä 1,7–2,2 MVar, joista muodostuu kuukausittaisiksi tehomaksuiksi 570–730 €, kun tehomaksu on 333 €/MVar/kk. Näistä muodostuva vuosikustannus on noin 7500 €.



KUVIO 26. Keuruun Sähkön kuukausikohtaiset loistehon huipputehot vuonna 2017.

## 5 KOMPENSOINTI

### 5.1. Laitteistot

Voimalaitoksilla loistehoa voidaan tuottaa ja kuluttaa säätämällä generaattorin magnetointia: ylimagnetoinnilla saadaan tuotettua kapasitiivista loistehoa ja alimagnetoinnilla kulutettua loistehoa. Aikaisemmin on ollut käytössä myös synkronikompensaattoreita, jotka ovat kuormittamattomia tahtikoneita, joiden tehtävänä on ollut pelkästään tuottaa tai kuluttaa loistehoa. Uusimpina vaihtoehtoina ovat tehoelektronikan kehittymisen mahdollistamat staattinen loistehon kompensointori (SVC, static var compensation) ja staattinen tahtikompensaattori (STATCOM, static synchronous compensator) laitteet (Elovaara J. & Haarla L. 2011). Näistä ensimmäinen perustuu tyristori tekniikkaan ja jälkimmäinen IGBT-transistoreilla ohjattuun H-siltaan. Molemmilla saavutetaan portaattomasti ja nopeasti säädettävä kompensointi. Kompensointilaitteistojen vertailu on esitetty taulukossa 9. Yllä mainitut laitteet pystyvät säätämään loistehoa nopeasti, ja osallistuvat näin ollen verkon jännitevakavuuden ylläpitoon verkon vika- ja kytkentätilanteissa.

TAULUKKO 9. Kompensointilaitteet

tyyppi	kompensointi	säätö	säädön nopeus	tekniikka
reaktori	kap.	porras	min	passiivinen
kondensaattori	ind.	porras	min	passiivinen
generaattori	kap. / ind.	jatkuva	s	sähköinen
tahtikone/synkronikompensaattori	kap. / ind.	jatkuva	s	sähköinen
staattinen kompensointori (SVC)	kap. / ind.	jatkuva	ms	passiivinen+tehoelektronikka
staattinen tahtikompensaattori (STATCOM)	kap. / ind.	jatkuva	ms	aktiivinen

Jakeluverkkoyhtiö tasolla, staattisen loistehotaseen ylläpitämiseksi, loistehon kompensointiin soveltuu rinnakkaiskuristimet eli reaktorit ja

rinnakkaiskondensaattorit. Nämä ovat sijoitettuina sähköasemille. On myös olemassa yhdistelmälaitteita, jotka sisältävät jakelumuuntajan ja reaktorin lisäksi esimerkiksi maasulkuvirran kompensointiin tarkoitettun Petersenin kelan. Viimeksi mainitut sijoitetaan hajautetusti verkon alueelle, missä kompensointia tarvitaan.

Valinta hajautetun ja keskitetyn kompensoinnin välillä riippuu tilanteesta. Esimerkiksi näiden yhdistelmä voisi tulla kyseeseen tilanteessa, jossa sähköasemalla oleva reaktori on kuormitettu täyteen kapasiteettiinsa, mutta ei haluta investoida suuremman reaktoriin. Tällöin jakelumuuntajan yhteydessä olevat laitteet ovat käyttökelpoinen ratkaisu, kun kompensoinnin lisätarve ei ole suuri. Hajautetun kompensoinnin laitteet tulisi sijoittaa mahdollisuuksien mukaan, sinne missä loistehoa tuotetaan. Ongelmallinen johtolähtö voi olla esimerkiksi pitkä, kevyesti kuormitettu, lähtö, jossa johdon kapasitanssi aiheuttaa sähkönlaatu ongelmia (jännitteen nousu) tai halutaan vähentää kapasitiivisen varausvirran aiheuttamaa kuormitusta syöttävään verkkoon.

Jakeluverkkoyhtiöllä, kuten Keuruun Sähköllä, keskitettyyn kapasitiivisen loistehon kompensointiin taulukossa 9. esitetyistä laitteista soveltuu rinnakkaisreaktori. Keskitetyssä kompensoinnissa laitteisto voidaan kytkeä joko 110 kV:n yläjännitepuolelle tai 20 kV:n verkon puolelle. Voidaan olettaa, että alajännitepuolelle kytketty ratkaisu on hankintahinnaltaan edullisempi. Yleensä reaktori on säädettävissä esimerkiksi väliottokytkimellä, jolloin tehoportaat voivat olla esim. 0,5 ja 1,0 MVAR ja säätö suoritetaan jännitteettömänä. Jos reaktori on varustettu käämikytkimellä, voidaan tehonsäätö suorittaa jännitteellisenä ja tehoportaita voi olla useampia. Tilantarve esim. 2 MVAR:n rinnakkaisreaktorille (kuva 2) on pienen puistomuuntajan luokkaa, joten sen sijoittamiseksi sähköasemalle löytyy useimmiten tilaa.



KUVA 2. 2 MVAR:n kompensointikuristin on tilantarpeeltaan puistomuuntajan luokkaa. (Toni Tarvainen, 2022)

## 5.2. Mitoitus

Koska alueverkkoyhtiö Sähkö Virkeät ei salli loisantoa verkkoonsa, voidaan minimivaatimuksena kompensointilaitteiston teholle pitää loisannon huipputehoa tarkastellulla jaksolla. Ilman aktiivista kompensointitehon säätöä tämä tarkoittaa, että verkosta siirretyn loistehon,  $Q$ , vaihteluväli on seuraavan lausekkeen mukainen:

$$Q \in \{Q_{\text{anto huippu}} + Q_{\text{kompensointiteho}}, Q_{\text{anto minimi}} + Q_{\text{kompensointiteho}}\}$$

Tarkasteltaessa vuoden 2017 loistehon pysyvyysskäyrää Keuruun sähkön verkossa (kuvio 23), nähdään, että 2,5 MVAR:ia staattista kompensointitehoa riittää tällä hetkellä siihen, että loistehotase pysyy loistehoikkunassa. Tämä on järkevintä toteuttaa sijoittamalla em. määrä kompensointia kahdelle käsitellylle sähköasemalla: esim. 1,5 MVAR Keuruun asemalle ja 1 MVAR Yliahon asemalle. Kompensoinnin ei tarvitse olla säädettävissä, koska loistehon vaihtelu on pienempi kuin loistehoikkuna. Laitteet ovat väliottokytkimellä tai käämikytkimellä varustettuja, joten kompensoinnin määrää voidaan tarvittaessa säätää. Koska



loistehonmuodostuksessa on voimakas vaihtelu vuodenajan mukaan, on mahdollista minimoida käyttöhäviöitä muuttamalla kompensoinnin tehoa esimerkiksi keväisin (lisää kompensointia) ja syksyisin (vähemmän kompensointia).

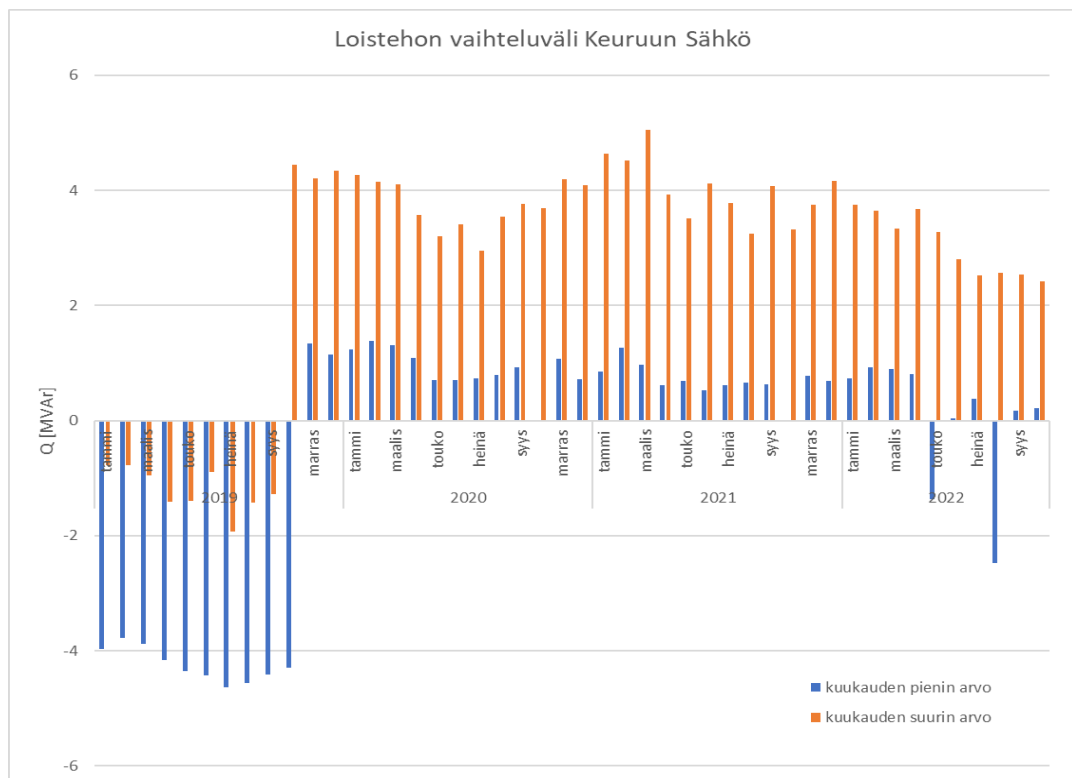
Uusien kaapelointien aiheuttamaa loistehontuotantoa voidaan kompensoida hajautetusti. Tämä voi olla perusteltua, koska verkkoon joudutaan joka tapauksessa sijoittamaan jakelumuuntajia ja maasulkuvirran kompensointikeloja tai jakelumuuntajia Petersen-kelalla, niin loistehon kompensoinnin yhdistäminen näihin on luonnollista; kompensointi kapasiteettia lisätään sitä mukaan, kun uutta kaapelointia asennetaan ja tuotettu loisteho kompensoidaan lähellä sen tuotantoa.

Jos kuitenkin halutaan rakentaa kompensointiteho reserviä keskitetysti sähköasemille, niin laitteisto tulee mitoittaa siten, että pysytään loistehoikkunan sisällä. Esimerkiksi jos reaktori on säädettävissä 50 %–100 % alueella  $Q_L$  nimellinen, voitaisiin valita 3MVAR:n laite Keuruun sähköasemalle ja 2MVAR: laite Yliahon sähköasemalle. Nämä olisivat säädettynä 50 prosenttiin tehoiltaan aiemmin esitetyn mitoituksen mukaisia ja reserviä jäisi 100 % mitoitustehosta. Mahdollisen Multian sähköaseman rakentamisen yhteydessä tulee loistehotilanne tarkastella uudelleen.

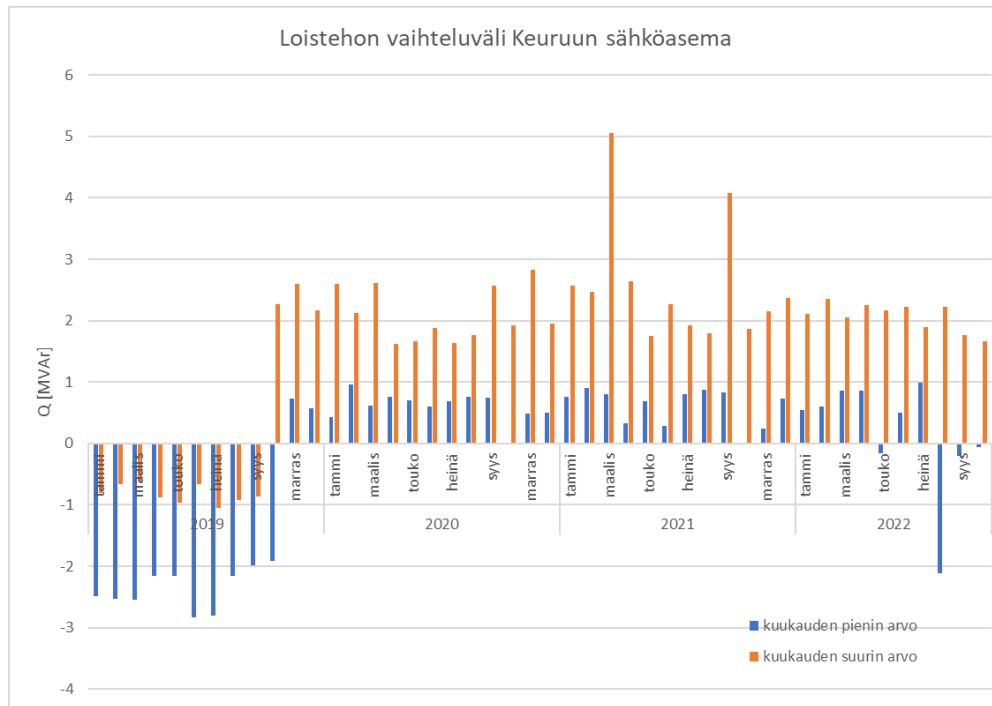
## 6 TOTEUTUNUNEEN INSVESTOINNIN TARKASTELU

Omassa tarkastelussaan Keuruun Sähkö päätti toteuttaa kompensoinnin kahdella kuristimella, joista toinen on sijoitettu Keuruun sähköasemalle ja toinen Yliahon sähköasemalle.

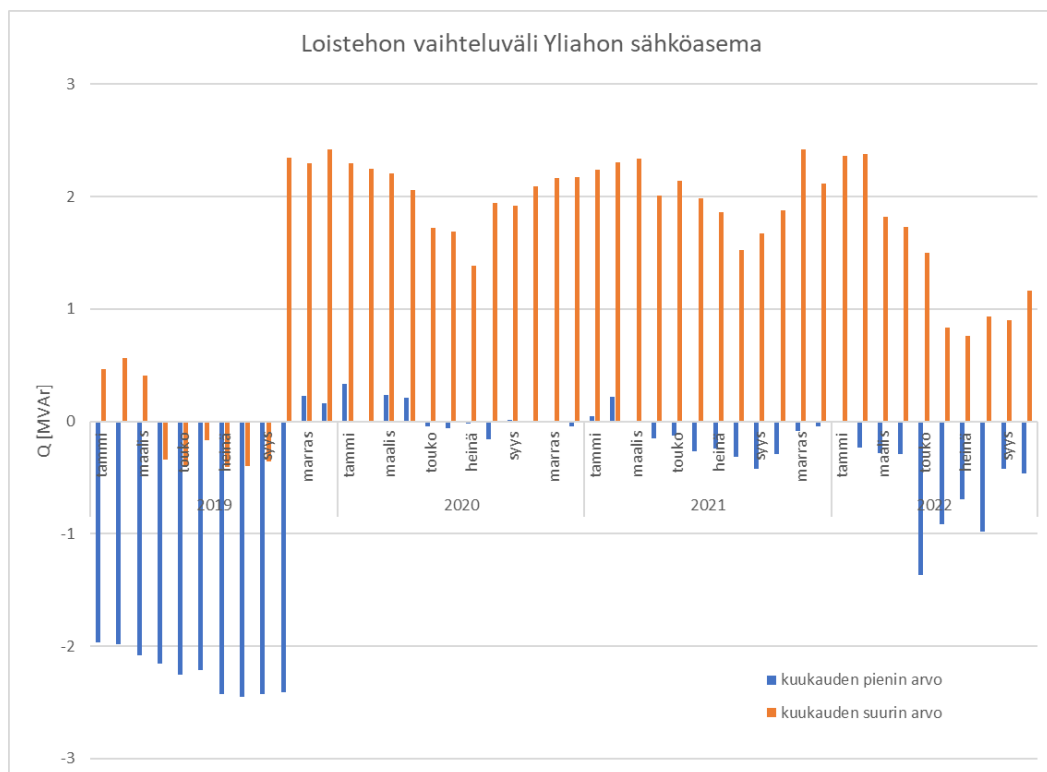
Kuristimet on kytketty verkkoon lokakuussa 2019, ja alla esitetyistä kuvioista 27–29 on kuristimien kytkentä hetki selkeästi havaittavissa.



KUVIO 27, Keuruun Sähkön loistehomittaus, kuukauden suurimmat ja pienimmät arvot. Kuristimien kytkentä lokakuussa 2019 siirsi mitatun loistehonannon puolelta loisoton puolelle.



KUVIO 28, Keuruun loistehon vaihteluväli, kuukauden suurimmat ja pienimmät arvot. Kompensointi on vaikuttanut toivotusti ja merkittävää loisantoa on ollut vain elokuussa 2022. Elokuun mittaustuloksen huomattava poikkeama huomioiden, voidaan spekuloida sen johtuneen kuristimen irtikytkennästä.



KUVIO 29, Yliahon sähköaseman netotettu loisteho, kuukauden suurimmat ja pienimmät arvot. Kompensointi on auttanut, mutta näyttäisi, että etenkin 2022 kesäkuukausina kompensointikapasiteettia ei ole kytkettynä tarpeeksi.

Asennetut kuristimet olivat koiltaan 3,0 MVA<sub>r</sub> ja 2,0 MVA<sub>r</sub>. Näistä suurempi on Keuruun sähköasemalla ja pienempi Yliahon sähköasemalla. Kuristimien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 10.

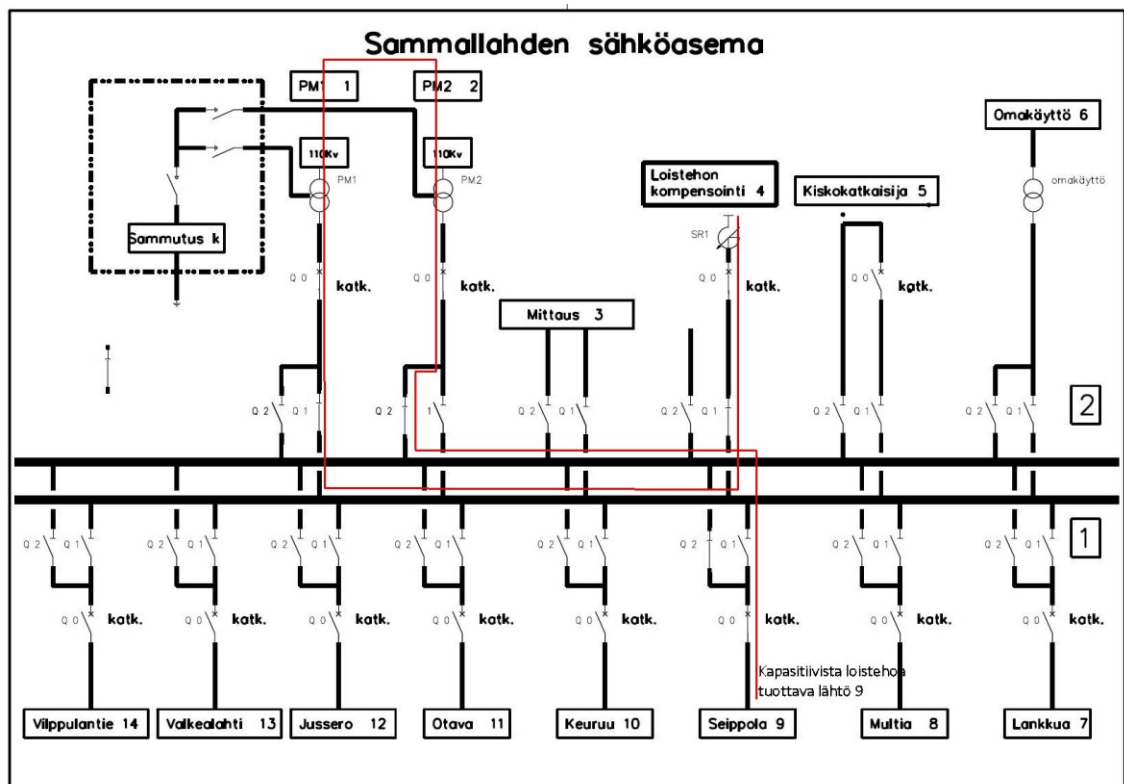
TAULUKKO 10. Kompensointikuristimien tekniset tiedot

	Yliahon sähkö- asema	Keuruun sähköasema	
Nimellisteho	2,0	3,0	MVA <sub>r</sub>
Nimellisjännite	20500	20500	V
Kytkeäryhmä	YN	YN	
Portaat	1; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0	1,5; 1,875; 2,250; 2,650; 3,0	MVA <sub>r</sub>
Portaan valinta	väliottokytkin	väliottokytkin	
Häviöt nimellisteholla	12441	19387	W

Kuviossa 30 on esitettyä Keuruun sähköaseman pääkaavio. Aseman 20 kV:n kojeisto on kaksi kiskoinen, niin kuin on myös Yliahon aseman kojeisto. Tämä tarkoittaa, että kaikki syötöt (päämuuntajat 1 ja 2), kuten myös lähdöt voidaan kytkeä kiskostoon 1. tai 2. Kiskot voidaan yhdistää kiskokatkaisijalla toisiinsa, esimerkiksi jos koko asemaa ajetaan vain yhdellä päämuuntajalla. Normaalisissa käyttötilanteissa toinen päämuuntaja syöttää toista kiskoa ja toinen vastaavasti toista. Lähdöt on kytketty kiskoihin siten, että haluttu kuormituksen jakauma päämuuntajille saavutetaan. Kiskokatkaisija on auki.

Koska kompensointilaitteisto on kytketty 20 kV:n kojeistoon, niin normaali tilanteessa se on kytkettynä vain toiseen kiskoon ja näin ollen vain toiseen päämuuntajaan. Toiseen kiskoon liitettyjen lähtöjen kapasitiivinen loistehoa siirtyy päämuuntajan kautta sähköaseman 110 kV kytkentäkenttään ja sieltä edelleen toisen päämuuntajan läpi takaisin 20 kV:n kojeiston toiselle kiskolle, johon kompensointikuristin on kytketty.

Sähköaseman energiamittaus on päämuuntaja kohtainen, joten mittauksissa näkyy, että toinen päämuuntaja kuluttaa loistehoa ja vastaavasti toinen tuottaa sitä. Taloudellisesti tällä ei ole merkitystä, koska loistehot (annot/otot) molemmilta päämuuntajilta lasketaan yhteen (netotetaan) ja ainoastaan erotus on laskutusperusteena. Tämä on myös käytännössä oikein, koska ainoastaan laskettu loistevirtojen erotus siirtyy alueverkkoyhtiön verkkoon ja sieltä edelleen kantaverkkoon, vaikka paikallisesti kompensointitehoa siirretäänkin 110 kV:n jännitetasossa sähköaseman kytkinkentällä.



KUVIO 30, Esimerkki loistehon siirtymisestä lähtö 9:stä päämuuntajien kautta loistehon kompensointiin, lähtöön 4, Keuruun (Sammallahti) sähköasemalla.

## 7 POHDINTA

Hallitsematon loistehotase aiheuttaa jakeluverkkoyhtiöille merkittäviä kustannuksia. Muutokset verkon rakenteessa, ilmajohtojen korvaaminen maakaapelilla ja uusien kaapelilähtöjen rakentaminen lisäävät verkon potentiaalista kapasitiivisen loistehon tuottoa. Kaapelointi-investointeja suunniteltaessa on verkkoyhtiöiden huolehdittava, että kompensointikapasiteetti riittää ja tarvittaessa rakennettava sitä lisää rinnan kaapeloinnin kanssa.

Vaikka kaapelointiasteen lisääminen aiheuttaa kompensointitarvetta on verkkoyhtiöillä ollut viime vuosina voimakkaita kannustimia maakaapeloinnin lisäämiseen ja kaapelointiasteen nostoon. Säävarman verkon rakentaminen ja energiamarkkinalainsäädännöstä aiheutuvat vaatimukset ovat saavutettavissa kaapelointiastetta nostamalla. Myös käytännön maankäytölliset asiat taajamissa puoltavat kaapeliverkkoa.

Aineiston analyysin perusteella todettiin Keuruun Sähkön keskijänniteverkon loistehotaseen siirtyneen lähes täysin kapasitiivisen loistehon puolelle. Vaihteluvälille saatu lukuarvo, mukaan luettuna vuodenajasta riippuva vaihtelu, oli kuitenkin pienempi kuin loistehoikkunan ilmaisosuus induktiivisella puolella. Tämä yksinkertaisti kompensointilaitteiston mitoitusta; riittävä kompensointi tulos saavutetaisiin mitoittamalla laitteisto kapasitiivisen loistehon huipun mukaan ja dynaamista säätöä kompensoinnille ei tarvita. Suuremman verkon kompensoinnissa, jossa loistehon vaihteluväli ei mahdu loistehoikkunaan staattisella kompensoinnilla, pitäisi varautua siihen, että kompensointi olisi automaattisesti säätyvä.

Yksi näkökohta kompensointilaitteistoihin on vikakeskeytykset. Jakeluverkoissa pyritään käyttövarmuuteen ja monet komponentit, kuten päämuuntajat, ovat kahdennettu. Tulisikin pohtia olisiko saavutettavissa parannuksia käyttövarmuuteen myös kahdentamalla keskitetyt kompensointikuristimet. Esimerkiksi normaali käytössä voitaisiin käyttää vain toista kuristinta toisen ollessa varalla ja toimien reservinä tulevaisuutta varten. Kompensoinnin hajoaminen ei toki aiheuta käyttökeskeytystä, mutta jos korjaus tai korvaavan laitteen toimitus kestää kuukausia, niin loisteho- ja energiamaksut ovat kuitenkin jo merkittäviä tällä ajalla.

## LÄHTEET

Fingrid, 2020, Loissähkön toimituksen ja loistehoreservin ylläpito. Viitattu 1.11.2022

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkon-siirto/loissahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito-2020.pdf>

Elenia, 2023, Elenia säävarman tarina. Viitattu 30.4.2023

<https://www.elenia.fi/palvelut/sahkoverkon-rakentaminen-ja-yllapito/elenia-saa-varma>

Keuruun Sähkö, 2023, Sähkön Siirto. Viitattu 30.4.2023

<https://www.keuruunenergia.fi/sahkon-siirto/>

Fingrid, 2023, Kantaverkkosopimus ja kantaverkkopalvelumaksut, internetsivu. Viitattu 26.4.2023

<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/kantaverkkosopimus-ja-palvelumaksut/#kantaverkkopalvelumaksut>

Elovaara J & Haarla L. 2011a. Sähköverkot I. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto/Gaudeamus.

Elovaara J & Haarla L. 2011b. Sähköverkot II. Verkon Suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto/Gaudeamus.

Lakervi E & Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto/Gaudeamus.

Hietalahti L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere: AMK Kustannus Oy Tammertekniikka.

Heiniö S ym. 1954. Tekniikan käsikirja III. Jyväskylä: K.J. Gummerus Osakeyhtiö.

Kajän T & Oksaharju S. 1983. Rakennusten sähköasennukset 1983. Sähköura-koitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy. Helsinki

Young H & Freedman R. 2000. University Physics with modern physics. Addison Wesley Longman Inc. San Francisco

Silvonen K. 2017. Sähkötekniikka ja elektroniikka, osa IV. viitattu 28.5.2023. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1513524/course/section/188482/tXt4.pdf>

## LIITTEET

Liite 1. Esimerkki valmistajan datalehdessä keskijännite maakaapelille

[https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo\\_2018\\_lowres.pdf](https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf)

Voimakaapelit 10 kV ja 20 kV  
AHXAMK-WHF Dca 20 kV

## OMINAISUUDET

TUOTTEEN NIMI		AHXAMK-WHF 3x185+35Cu 20 kV (8)	AHXAMK-WHF 3x240+70Cu 20 kV (8)	AHXAMK-WHF 3x300Al+70Cu 20 kV (8)
Sähkönumero		0624280	0624105	0624287
<b>RAKENNETIETOJA (1)</b>				
Johdinten halkaisija	mm	15,7	18,1	20,3
Vaihevaipan halkaisija	mm	36	40	42
Kaapelin ulkohalkaisija (ympäri piirretyn ympyrän halkaisija)	mm	79	88	93
Massa	alumiini	kg/km	1650	2200
	kupari	kg/km	305	600
	kaapeli	kg/km	4500	5750
<b>TOIMITUSTIETOJA</b>				
Vakiotoimituspituus	m	500	500	500
Toimituskela		K26	K28	K28
Massa (1)	kaapeli+kela	kg	3150	4060
<b>MEKAANISIA ARVOJA (3)</b>				
Pienin sallittu taivutussäde asennusvedossa	vaihe kaapeli	m	0,54	0,60
		m	0,63	0,70
Pienin sallittu taivutussäde lopullisessa asennuksessa (4)	vaihe kaapeli	m	0,38	0,42
		m	0,44	0,49
Suurin sallittu asennusvetovoima vetosukalla		kN	8,3	8,5
Suurin sallittu asennusvetovoima vetopäällä		kN	20,0	20,0
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (3)</b>				
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,164	0,125
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1) (2)	johdin 65°C	Ω/km	0,20	0,15
	johdin 90°C	Ω/km	0,21	0,16
Keskusköyden maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,524	0,268
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,36	0,35
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,28	0,31
Varausvirta (1)		A/km	1,0	1,1
Maasulkuvirta (1)		A/km	3,0	3,4
<b>KUORMITETTAVUUS (3)</b>				
Maassa (2)	johdin 65°C	A	330	385
Ilmassa (2)	johdin 65°C	A	345	400
	johdin 90°C	A	425	490
<b>TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (3)</b>				
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (5)	kA	17,4	22,6
	kosketussuojat (6)	kA	3,2	4,4
	keskusköyysi (7)	kA	5,0	9,7

(1) Likiarvo

(2) Kosketussuojat ja keskusköyysi kytketty yhteen yhteyden molemmissa päissä.

(3) Katso taulukkoarvojen lähtöolettamukset kappaleesta Yleistä tuotetietoa.

(4) Taivutus on tehtävä varovaisena ja tasaisena kertataivutuksena.

(5) Johdinten lämpötila on ennen oikosulkua 90°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(6) Kosketussuojan lämpötila on ennen oikosulkua 85°C ja oikosulun päättyessä 250°C.

(7) Keskusköyden lämpötila on ennen oikosulkua 55°C ja oikosulun päättyessä 200°C.

(8) Kaapeli on saatavana myös 35 mm<sup>2</sup> keskusköydellä.