



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Toni Virtanen

LOISTEHON KOMPENSOINTI ALA-
JÄRVEN SÄHKÖ OY:N JAKELUVER-
KOSSA

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|---|
| Tekijä | Toni Virtanen |
| Opinnäytetyön nimi | Loistehon kompensointi Alajärven Sähkö Oy:n jakeluver- kossa |
| Vuosi | 2020 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 47 + 31 liitettä |
| Ohjaaja | Jari Koski |

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Alajärven Sähkö Oy:n liittymispisteiden loistehon tuotanto ja mahdollinen loistehon kompensointi kahdessa eri liittymispisteessä. Loistehon kompensoinnin tarkoitus on vähentää turhan loistehon siirtämistä verkossa ja välttää loistehon siirrosta tulevat sakkomaksut.

Loistehon teoriaan tutustuttiin alan kirjallisuuden avulla. Työssä kerrotaan loistehon teoriasta, yliaaltojen vaikutuksista, maakaapeliin ja ilmajohtojen vaikutuksesta loistehon tuotantoon sekä erilaisista loistehon kompensointilaitteista. Loistehon tuotannon kasvu laskettiin Alajärven Sähkö Oy:n vuosien 2020-2027 uusien verkkoinvestointien mukaan.

Työssä esitetään jokaisen uuden verkon osan päivittämisestä tulevat muutokset loistehon tuotantoon sekä millainen tilanne tulee olemaan minäkin vuonna. Opinnäytetyössä esitetään ratkaisut loistehonkompensointiin ja loistehomaksujen välttämiseen molemmissa liittymispisteissä.

ABSTRACT

| | |
|--------------------|---|
| Author | Toni Virtanen |
| Title | Reactive Power Compensation in the Distribution Network of Alajärven Sähkö Oy |
| Year | 2020 |
| Language | Finnish |
| Pages | 47 + 31 Appendices |
| Name of Supervisor | Jari Koski |

The purpose of this thesis was to find out the reactive power production of Alajärven Sähkö Oy's connection points and possible reactive power compensation at two different connection points. The purpose of reactive power compensation is to reduce unnecessary reactive power transmission on the network and to avoid reactive power charges due to reactive power transmission.

Reactive power theory was studied using related literature. The thesis introduces the theory of reactive power, the effects of harmonics, the influence of underground cables and overhead lines on the production of reactive power and various reactive power compensation devices. The increase in reactive power production was calculated according to Alajärven Sähkö Oy's new grid investments in 2020-2027.

The thesis introduces the increase of reactive power production until 2027 and introduces what the situation will be in each year. The thesis presents solution for reactive power compensation and avoidance of reactive power charges at both connection points.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 10 |
| 1.1 | Alajärven Sähkö Oy | 10 |
| 1.2 | Sähkömarkkinalaki | 10 |
| 1.3 | Loistehomaksut | 11 |
| 2 | VAIHTOSÄHKÖN TEHO | 14 |
| 2.1 | Tehot | 14 |
| 2.1.1 | Pätöteho | 14 |
| 2.1.2 | Loisteho | 14 |
| 2.1.3 | Näennäisteho | 15 |
| 2.1.4 | Tehokerroin | 15 |
| 2.1.5 | Tehokolmio | 15 |
| 2.1.6 | Säröteho | 16 |
| 2.2 | Vaihesiirtokulma | 17 |
| 2.3 | Yliaallot | 19 |
| 2.3.1 | Yliaaltojen aiheuttajia | 21 |
| 2.3.2 | Yliaaltojen haitat | 21 |
| 2.4 | Johdon ja kaapelin tuottama loisteho | 23 |
| 3 | LOISTEHON KOMPENSOINTI | 27 |
| 3.1 | Hajautettu ja keskitetty kompensointi | 27 |
| 3.2 | Reaktorit | 28 |
| 3.3 | Kondensaattorit | 29 |
| 3.3.1 | Rinnakkaiskondensaattori | 30 |
| 3.3.2 | Sarjakondensaattori | 31 |
| 3.4 | Yliaaltojen kompensointi | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.4.1 | Estokelaparisto | 31 |
| 3.4.2 | Yliaaltosuodatin | 32 |
| 3.4.3 | Aktiivisuodatin | 32 |
| 4 | SÄNKIAHON SÄHKÖASEMA | 34 |
| 4.1 | Nykytilanne | 34 |
| 4.2 | Vuosien 2020-2027 säävarmuuden takia uusittavat linjat, Sänkiaho | 38 |
| 5 | HOISKON SÄHKÖASEMA | 42 |
| 5.1 | Nykytilanne | 42 |
| 5.2 | Vuosien 2020-2027 säävarmuuden takia uusittavat linjat, Hoisko | 43 |
| 6 | YHTEENVETO | 46 |
| | LÄHTEET | 47 |

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Loistehoikkuna. | 13 |
| Kuva 2. Tehokolmio..... | 16 |
| Kuva 3. Induktiivinen virta..... | 17 |
| Kuva 4. Kapasitiivinen virta..... | 18 |
| Kuva 5. Jännite, virta ja teho..... | 18 |
| Kuva 6. Puhdas resistanssi. | 19 |
| Kuva 7. Maakaapelien loistehon tuotto..... | 24 |
| Kuva 8. Avojohtojen loistehon tuotto. | 25 |
| Kuva 9. KJ-maakaapeleiden loistehon tuotto..... | 26 |
| Kuva 10. Uusi reaktori Sänkiahon asemalla..... | 35 |
| Kuva 11. Reaktorin kilpi. | 36 |
| Kuva 12. Sänkiahon sähköaseman vuoden 2019 loistehoikkuna tuntitasolla. | 37 |
| Kuva 13. Säävarmuuden takia Sänkiahon sähköaseman perässä olevat uudelleen rakennettavat alueet punaisella. | 38 |
| Kuva 14. Hoiskon sähköaseman vuoden 2019 loistehoikkuna tuntitasolla. | 42 |
| Kuva 15. Säävarmuuden takia Hoiskon sähköaseman perässä olevat uudelleen rakennettavat alueet punaisella. | 43 |
| | |
| Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittämiskohdassa. | 20 |
| Taulukko 2. Sänkiahon verkostoinvestoinnit 2019-2027. | 40 |
| Taulukko 3. Hoiskon verkostoinvestoinnit 2019-2027. | 44 |

LIITELUETTELO

LIITE 1. Sänkiaho säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat 2019-2023

LIITE 2. Sänkiaho säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat 2024-2027

LIITE 3. Hoisko säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat 2019-2022

LIITE 4. Hoisko säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat 2023-2027

LIITE 5. Pynttäri 2019

LIITE 6. Möksy alkupää 2020

LIITE 7. Hoisko-Kyrönlahti 2020

LIITE 8. Koulukeskus-Kaupinkartano 2020

LIITE 9. Hautasenkylä-Mäntykaari 2020

LIITE 10. Rengastie 2020

LIITE 11. Levijoen erotinasema 2020

LIITE 12. Möksy loppupää 2021

LIITE 13. Koskenvari 2021

LIITE 14. Aitasaari 2021

LIITE 15. Viinämäki-Pekkola 2021-2022

LIITE 16. Honkakangas 2023

LIITE 17. Porraslampi 2023

LIITE 18. Luoma-aho 2023

LIITE 19. Karhula 2024

LIITE 20. Saukonkylä 2024

LIITE 21. Haimari-Porraslampi 2025

LIITE 22. Isoniemi 2025

LIITE 23. Kultavuoren haara 2026

LIITE 24. Paalijärvi-Teerinevankytö 2026

LIITE 25. Unkan haara 2027

LIITE 26. Kaartunen 2027

LIITE 27. Kamppilan haara 2027

LIITE 28. Ilmajohtojen arvoja 1

LIITE 29. Ilmajohtojen arvoja 2

LIITE 30. Maakaapelien arvoja 1

LIITE 31. Maakaapelien arvoja 2

KÄYTETYT LYHENTEET

| | |
|----------|---------------------------------|
| P | Pätöteho |
| Q | Loisteho |
| S | Näennäisteho |
| U | Jännite |
| I | Virta |
| Z | Impedanssi |
| ω | Kulmataajuus |
| C | Kapasitanssi |
| U_R | Kondensaattorin mitoitusjännite |
| Q_R | Kondensaattorin mitoitusteho |
| D | Säröteho |
| THD | Kokonaissärö |
| EPA | EPV Alueverkko Oy |

1 JOHDANTO

Tein opinnäytetyöni Alajärven Sähkö Oy:lle ja aiheena oli loistehon kompensointi. Tarkoituksena oli selvittää Sänkiahossa joulukuussa 2019 käyttöönotetun reaktorin riittävyys, sekä tehdä suunnitelma Hoiskon sähköaseman liittymispisteessä olevan loistehon kompensoimiseksi. Loistehotilannetta tarkasteltiin vuoteen 2027 asti.

1.1 Alajärven Sähkö Oy

Alajärven Sähkö Oy on yksityinen osakeyhtiö, jonka omistaa noin 1 300 osakkeenomistajaa. Suurin yksittäinen omistaja on Alajärven kaupunki, jonka omistusosuus on 7 %. Yhtiön osakkeita on kaikkiaan 9 830 kpl. Yhtiön liikevaihto on noin 8 miljoonaa euroa. Henkilökunnan määrä on 14. Yhtiön hallitukseen kuuluu 5 jäsentä. /1/

Alajärven Sähkö Oy on perustettu vuonna 1944. Yhtiön toimialaan kuuluu sähkön siirto ja myynti. Yhtiö omistaa yhden vuonna 1962 valmistuneen 1 MVA:n tehoisen vesivoimalaitoksen. /1/

Alajärven Sähkö Oy:llä on 404,5 km keskijänniteverkkoa, josta avojohtoja on 297 km. PAS-ilmajohtoja 39,7 km ja maakaapeleita 67,8 km. Keskijänniteverkon maakaapelointiaste on 16,8 %. Pienjänniteverkkoa on yhteensä 569,6 km, josta ilmassa olevia AMKA-johtoja on 412,3 km ja pienjännitemaakaapeleita 157,3 km. Pienjänniteverkon kaapelointiaste on 27,6 %. Verkkoon kuuluu lisäksi 283 pylväsmuuntamo, 89 puistomuuntamo ja 1 kiinteistömuuntamo. /2/

1.2 Sähkömarkkinalaki

Vuoden 2011 lopun myrskyjen ja laajojen sähkökatkosten vuoksi sähkömarkkinalakiin (588/2013) säädettiin vaatimukset jakeluverkkojen toimitusvarmuuden parantamiseksi. Lain mukaan jakeluverkkoyhtiöiden on viimeistään vuoden 2028 loppuun mennessä huolehdittava, että myrskyn tai lumikuorman vuoksi sähkönjakelu

ei asemakaava-alueilla keskeydy yli 6 tunniksi, eikä näiden ulkopuolalla yli 36 tunniksi. /3/

Sähköverkkoyhtiö saa valita keinot, joilla se pääsee toimitusvarmuusvaatimukseen. Maakaapelointi on yksi hyväksytty ja yleisesti käytetty keino. /3/

Sähköverkon toimitusvarmuuden tason parantaminen maksaa. Pääsääntöisesti asiakas ei voi saada samaan aikaan korkeaa toimitusvarmuuden tasoa, kuten häiriötöntä sähkönsaantia ja sähkökatkosten alhaista tiheyttä sekä halpaa verkkopalvelun hintaa. /3/

Sähköverkkojen elinkaaret ovat vuosikymmenten mittaisia ja investoinnit pääomaa vaativia. Tämän vuoksi uudistamisnopeus on rajallinen. Sähkömarkkinalaki edellyttääkin verkkoyhtiöitä kehittämään verkkojaan asteittain. Yhtiöiden on täytettävä toimitusvarmuusvaatimukset 50 %:lla jakeluverkon käyttäjistä vuoden 2019 loppuun mennessä, 75 %:lla vuoden 2023 loppuun mennessä ja tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta kaikilla käyttäjillä vuoden 2028 loppuun mennessä. /4/

Tämä laki on velvoittanut sähköyhtiöt verkostoinvestointeihin, jotka ovat johtaneet myös maakaapelointiasteen nousuun. Maakaapelien lisääntyminen on vuorostaan johtanut loistehon tuotannon kasvuun.

1.3 Loistehomaksut

EPA:n alueverkkoon liittyneiden asiakkaiden liittymispisteiden loissähkön siirtoon on määrätty rajat ja sakkorangaistukset. Sakkorangaistukset pohjautuvat Fingridin taulukkoon. /5/

Jokaista asiakkaan liittymispistettä seurataan liittymispistekohtaisesti. Jos loissähköraajat ylittyvät, liittymispisteen haltijaa laskutetaan ylityksen osalta loissähkön käytöstä. /5/

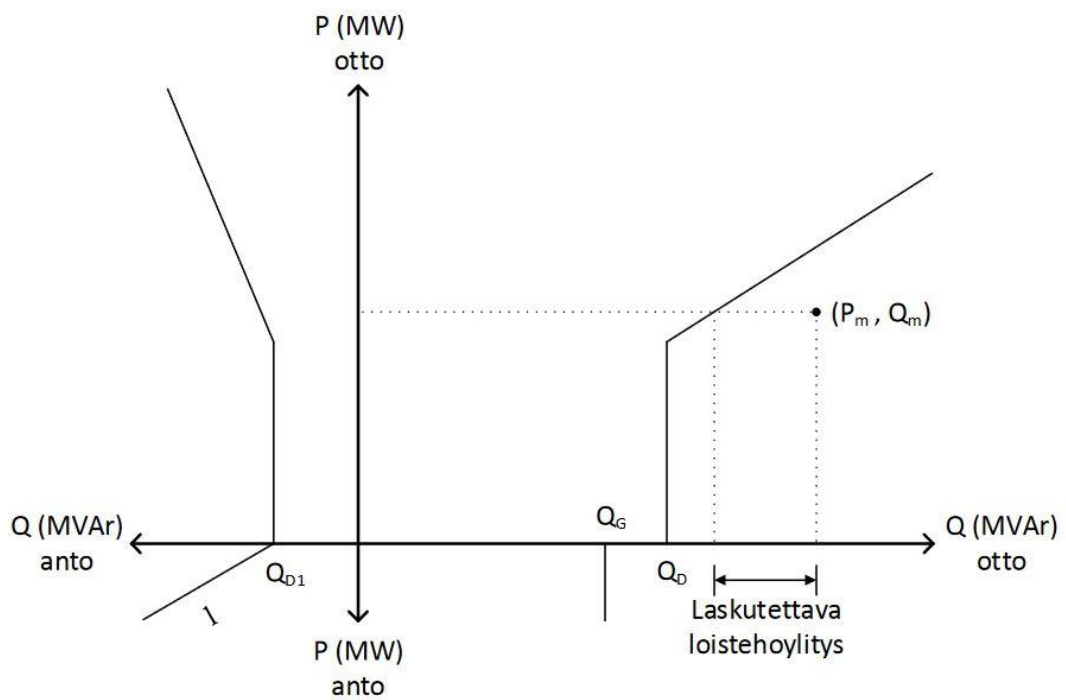
Kanta- tai alueverkon vioista johtuvista ylityksistä ei laskuteta asiakasta. On olemassa myös muita lievennyksiä. Laskutuksessa ei huomioida viidenkymmenen suurimman ylityksen itseisarvoa kuukauden aikana. /5/

Loissähköstä laskutetaan loissähköikkunan rajojen ylityksen määrästä. Loistehomaksu määräytyy kunkin kuukauden suurimman ylityksen mukaisesti keskituntitehona. Vastaavasti loisenergiamaksu määräytyy kunkin kuukauden loissähköikkunan ylitysenergian mukaisesti kerrottuna voimassa olevalla yksikköhinnalla. Laskutuksessa huomioidaan tämän sovellusohjeen maksujen määräytymisperiaatteet. /5/

Asiakkaille tulevien sopimusehtojen muutoksesta aiheutuvien investointien toteuttamisen helpottamiseksi ja niiden kustannusvaikutusten keventämiseksi loissähkön hinnoittelu tulee voimaan asteittain seuraavasti:

- V. 2016 ei loissähkön siirrosta peritä maksua
- V. 2017 loistehorajojen ylittävästä tehosta peritään kolmannes loistehon yksikköhinnasta (333 €/Mvar), loisenergia 5 €/Mvarh
- V. 2018 loistehorajojen ylittävästä tehosta peritään kaksi kolmannesta loistehon yksikköhinnasta (666 €/Mvar), loisenergia 5 €/Mvarh
- V. 2019 ja siitä eteenpäin loissähkön siirrosta peritään 1000 €/Mvar, loisenergiasta 5 €/Mvarh.

Kuvassa 1 on esitetty liittymispisteen loissähköikkunan periaate ja loissähkön käytön ylityksestä maksettavat maksut. /5/



Kuva 1. Loistehoikkuna.

Laskuttavan loissähkön määräytyminen. P_m tarkoittaa mitattua pätötehon tuntitehoa ja Q_m mitattua loissähkön tuntitehoa. /5/

Q_{anto} on kapasitiivista loistehoa ja se siirtyy jakeluverkosta siirtoverkkoon. Q_{otto} on induktiivista loistehoa ja se siirretään siirtoverkosta jakeluverkkoon.

2 VAIHTOSÄHKÖN TEHO

2.1 Tehot

2.1.1 Pätöteho

Vaihtosähkön pätöteho P on hetkellisen tehon aritmeettinen keskiarvo yhden tai useamman jakson aikana. Yksivaiheisen pätötehon kaava on /6/

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (1)$$

Pätötehon yksikkö on Watti (W).

Tätä vaihtosähkön keskimääräistä tehoa, joka impedanssin resistanssissa muuttuu lämmöksi, nimitetään pätötehoksi. Pätöteho on se osa vaihtosähkötehosta, joka tulee sähkön kuluttajan hyödyksi. /7/

Resistanssissa lämmöksi muuttuva teho, hehkulampun teho ja moottorin akselin pyörittämiseen kuluva teho, kuten kaikki muukin hyötyteho on pätötehoa. Häviöttömät komponentit, kuten ideaalinen kela, muuntaja, kondensaattori tai siirtojohto, eivät kuluta (pätö)tehoa. Jos puhutaan pelkästä tehosta, tarkoitetaan yleensä juuri pätötehoa. /8/

2.1.2 Loisteho

Vaihe-eron vuoksi vaihtosähköverkossa voi esiintyä myös loistehoa.

$$Q = U * I * \sin\varphi \quad (2)$$

Loistehon eli reaktiivisen tehon yksikkö on vari (var) eli ”volttiampeeria reaktiivista tehoa”. /8/

Loisteho syntyy tehon heilahdellessa edestakaisin piirissä, joka voi saada positiivisia ja negatiivisia arvoja. Teho sykkii energialähteiden (E ja J) ja energiaa varastovien komponenttien L (kela) ja C (kondensaattori) välillä. Vastus ei kuluta loistehoa. Loisteho on laskennallinen suure, jolla ei ole selvää vastinetta käytännössä, mutta se voidaan helposti perustella suorakulmaisen kolmion avulla. Loistehoa ei

voi käyttää hyödyksi. Jos sitä pystyisi hyödyntämään, se olisikin pätötehoa. Päinvastoin loisteho on usein haitallista. Jos jännite ja pätöteho pidetään vakiona, loistehon suurentaminen suurentaa piirissä kulkevaa virtaa, jolloin energian siirtohäviöt kasvavat. /8/

Kompensoinnilla pyritään saamaan loisteho Q nolaksi, jolloin $S = P$ Tällöin piiri on resonanssissa käytetyllä taajuudella, ja näyttää siis puhtaalta resistanssilta. Kelan ottama loisteho on positiivista ja kondensaattorin loisteho negatiivista. Kela siis ”kuluttaa” loistehoa ja kondensaattori ”tuottaa” sitä. /8/

2.1.3 Näennäisteho

Tehon yhtälöissä esiintyvää lauseketta UI , joka on vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvojen tulo, nimitetään näennäistehoksi. Sitä merkitään S :llä. /7/

$$S = U * I \quad (3)$$

Näennäistehon yksikkö on voltiampeeria (VA).

Näennäisteho sisältää sekä pätötehon, joka siirtyy pysyvästi sähkölähteestä kulutuskojeeseen, että sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä edestakaisin sykkivän loistehon. /7/

2.1.4 Tehokerroin

Kerrointa $\cos\varphi$ nimitetään tehokertoimeksi. Kulma φ on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma. /6/

Koska $\cos\varphi$ saa positiivisia arvoja negatiivisilla ja positiivisilla kulman arvoilla välillä $-90^\circ - +90^\circ$, ei siitä ilmene, onko kuorma induktiivinen vai kapasitiivinen. Tämän vuoksi tehokerroin ilmoitetaan joskus täsmennettynä joko alaindeksillä $_{ind}$ (kun $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$) tai $_{cap}$ (kun $-90^\circ \leq \varphi < 0$), esim. $\cos\varphi_{ind}$. /8/

2.1.5 Tehokolmio

Fysikaalisesti ottaen vaihtosähkötehon yksiköksi saadaan aina VA (voltiampeeri). Jotta vaihtosähkön eri tehot erotettaisiin toisistaan, on näennäistehon yksiköksi

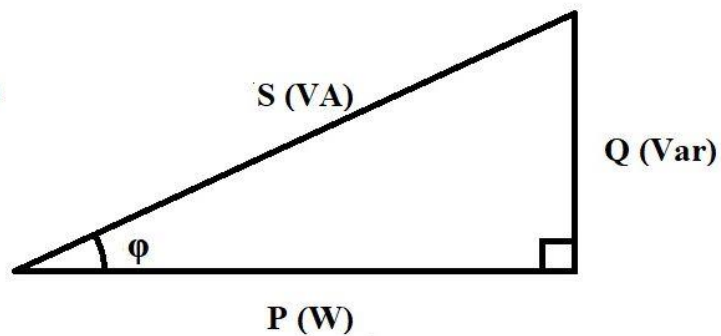
omistettu VA. Jos voltiampeerit joudutaan kertomaan tehokertoimella $\cos\varphi$, näitä nimitetään wateiksi (W). Jos taas voltiampeeri joudutaan kertomaan loistehon kertoimella $\sin\varphi$, niistä käytetään nimeä vari (var). /7/

S=Näennäisteho (VA)

P=Pätöteho (W)

Q=Loisteho (Var)

φ =Vaihesiirtokulma



Kuva 2. Tehokolmio.

Tehokolmion kateetit pätöteho P, loisteho Q sekä hypotenuusa näennäisteho S. (Kuva 2.) Näennäistehon S ja pätötehon P välinen kulma φ kertoo virran ja jännitteen välisen vaihe-eron. /8/

Pätöteho P, loisteho Q ja näennäisteho S pystytään laskemaan käyttämällä Pythagoraan lausetta.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

2.1.6 Säröteho

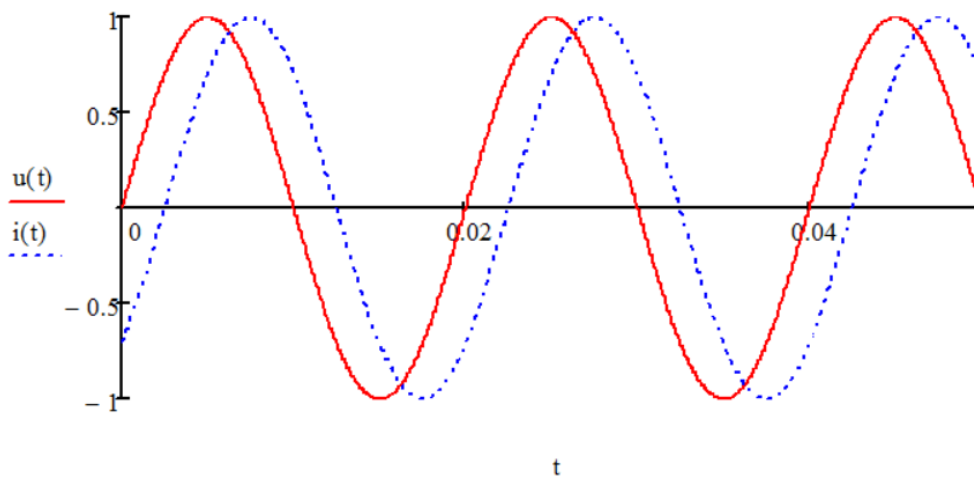
Yliaaltopitoisessa verkossa esiintyy pätö- ja loistehon lisäksi yliaaltojen muodostama säröteho D. Koska säröteho koostuu harmonisista yliaaltotaajuuksista, ei sitä ole mahdollista kompensoida perustaajuudelle mitoitetuilla kompensointilaitteilla.

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (5)$$

Yliaaltopitoisessa verkossa tehokerrointa (ja loistehoa) mitattaessa tulee ottaa huomioon mittalaitteen kyky erottaa perustaajuinen teho kokonaistehosta. /9/

2.2 Vaihesiirtokulma

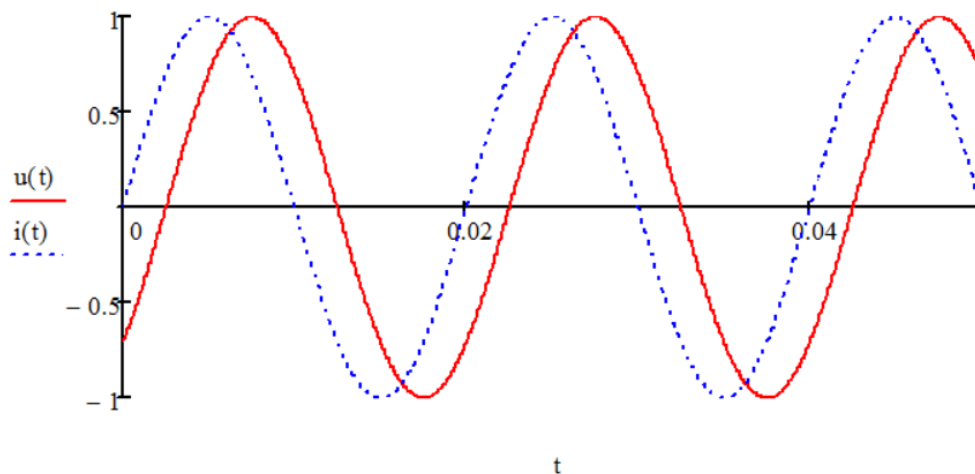
On sovittu, että loisteho ja siten myös vaihesiirtokulma on induktiivisella vaihesiirrolla positiivinen. Koska ensiksi induktiivisella kuormalla virta on jännitteestä jäljessä (**Kuva 3.**) ja toiseksi positiivinen kulma merkitsee kiertymistä vastapäivään, on vaihesiirtokulma laskettava virtaosoittimesta jänniteosoittimeen. /6/



Kuva 3. Induktiivinen virta.

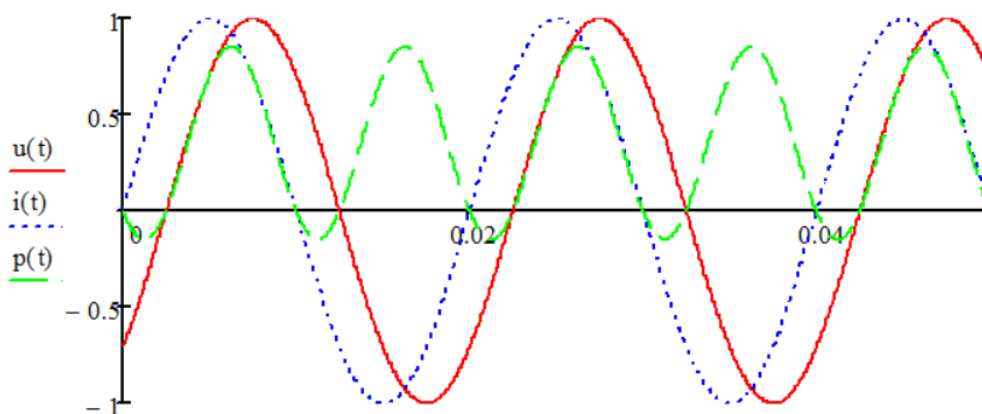
Kun kuormitusimpedanssi on puhdas induktiivinen reaktanssi $Z = X_L$, on vaihesiirtokulma $\varphi = +90^\circ$ ja tehokerroin $\cos\varphi = 0$, sekä hetkellinen teho ja keskimääräinen eli pätöteho $P = 0$. /7/

Loisteho ja vaihesiirtokulma on kapasitiivisella vaihesiirrolla negatiivinen. Kapasitiivisella kuormalla virta on jännitettä edellä (**Kuva 4.**).



Kuva 4. Kapasitiivinen virta.

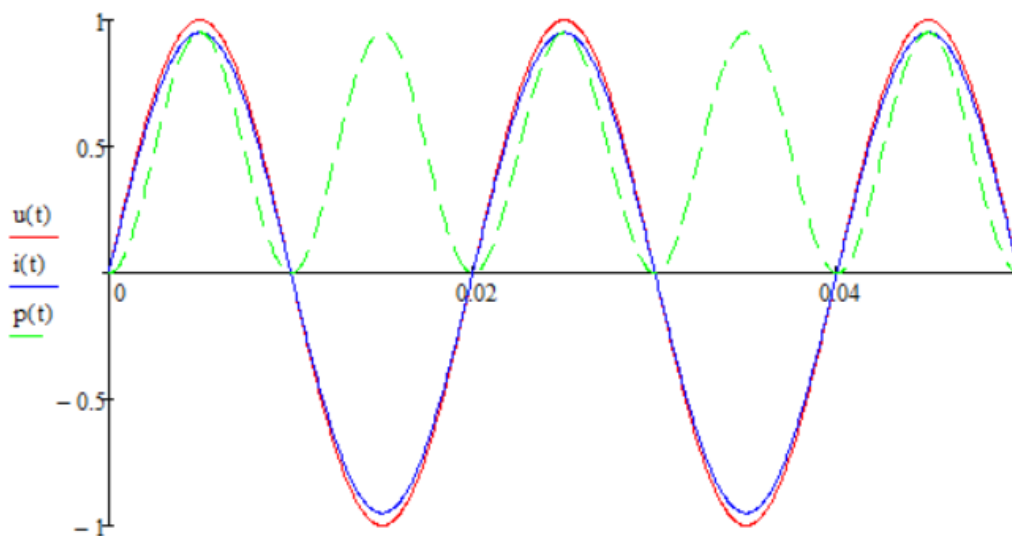
Kun kuormitusimpedanssi on puhdas kapasitiivinen reaktanssi $Z = X_C$, on vaihe-
siirtokulma $\varphi = -90^\circ$ ja tehokerroin $\cos\varphi = 0$, sekä hetkellinen teho ja keskimääräinen
teho eli pätöteho $P = 0$. //



Kuva 5. Jännite, virta ja teho.

Kun jännite ja virta ovat samansuuntaiset, teho on pätötehoa P . Kun taas jännite ja
virta ovat erisuuntaisia teho on loistehoa Q (**Kuva 5.**).

Kun kuormitusimpedanssi on puhdas resistanssi (**Kuva 6.**) $Z = R$, on vaihesiirto-
kulma $\varphi = 0^\circ$ ja tehokerroin $\cos\varphi = 1$, sekä hetkellinen teho $p = UI - UI \cos 2\omega t$ ja
keskimääräinen teho eli pätöteho $P = UI$. //



Kuva 6. Puhdas resistanssi.

Jännite ja virta ovat koko ajan samansuuntaisia, jolloin teho on puhdasta pätötehoa.

2.3 Yliaallot

Yleisen jakeluverkon yliaaltojännitteiden suurin sallittu taso on määritelty jännitestandardissa SFS-EN 50610 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Standardi käsittelee vain jännitteelle asetettavia vaatimuksia. Siinä ei ole määritelty sallittuja yliaaltovirtoja. /9/

Standardin SFS-EN 50610 mukaan viikon aikana 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvosta 10 minuutin keskiarvolla tulee olla pienempi kuin taulukossa 1 annettu arvo. Jakelujännitteen harmonisen kokonaissärön (THD), tulee olla korkeintaan 8 %. Tämä sisältää kaikki harmoniset yliaaltojännitteet järjestyslukuun 30 saakka. Silti on mahdollista, että jo 3 % jännitesärö saattaa aiheuttaa ongelmia joidenkin laitteiden toiminnassa. /9/

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittämiskohdassa.

| Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat | | Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset | | Parilliset yliaallot | |
|---|------------------------|---|------------------------|----------------------|------------------------|
| Järjestys- luku h | Yliaaltojän- nite % | Järjestys- luku h | Yliaaltojän- nite % | Järjestys- luku h | Yliaaltojän- nite % |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 6...24 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,5 | | | | |
| Kokonaissärö THD 8 % | | | | | |

Sähköturvallisuuslaissa asetetaan vaatimus sähkölaitteiden ja -laitteistojen häiriöpäästöille ja -siedolle.

Sähkömarkkinalain mukaan verkkoyhtiö on vastuussa sähkön laadusta, johon vaikuttavat mm. verkossa esiintyvät jännitteen käyrämuodon muutokset ja yliaaltojännitteet eli verkon jännitteen säröytyminen. Jännitteen säröytymiseen vaikuttavat olennaisesti asiakkaiden yliaaltovirtoja jakeluverkkoon syöttävät laitteet ja kompensointiratkaisut. Hallitakseen verkkonsa jännitesärön, verkkoyhtiön tulee pystyä kontrolloimaan jakeluverkkoon liitettävää tai liitettyä jännitesäröön vaikuttavaa laitekantaa. Tilanteen hallinta edellyttää verkkoyhtiön ja asiakkaan molemminpuolista tiedonvaihtoa. /9/

Liittyessään yleiseen sähkönjakeluverkkoon, liittäjän ja asiakkaan tulee saada tarvittavat ja riittävät tiedot suunnittelunsa perusteiksi verkkoyhtiöltä. Verkonhaltijan tulee todeta liitettävän laitteiston täyttävän tarpeelliseksi katsomansa yhteensopivuuskriteerit. Molemmat osapuolet hyötyvät menettelystä. Asiakas välttyy vääriä investoinneilta ja verkkoyhtiö hallitsee verkkonsa sähkön laadun. /9/

Jakeluverkon haltijan yleisissä verkkopalveluehdoissa määritellään, miten on toimittava, kun havaitaan häiriöitä sähkönjakeluverkossa. Käyttäjän tulee ilmoittaa

sähköverkon haltijalle. Tämän on ilmoituksen saatuaan ryhdyttävä välittömästi toimiin vian tai häiriön korjaamiseksi. /9/

Jos käyttäjän sähkölaitteet haittaavat merkittävästi toisten sähkökäyttäjien sähkönkäyttöä, jakeluverkon haltijan tulee yhdessä käyttäjän kanssa määritellä keinot haittan poistamiseksi tai pienentämiseksi. Laitteen käyttö voidaan kieltää vain, mikäli se ei ole lainkaan mahdollista ilman muille aiheutuvaa merkittävää haittaa. /9/

Sähköturvallisuuslain kohdissa 47 § ... 51 § käsitellään sähkölaitteistojen aiheuttamia häiriöitä sekä niiden poistamis- ja korvausvelvollisuuksia. Mitä säädetään sähkölaitteistoista, koskee soveltuvilta osin myös yksittäistä sähkölaitetta. /9/

2.3.1 Yliaaltojen aiheuttajia

Yleisiä yliaaltojen aiheuttajia ovat hakkuriteholähteet, tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, energiansäästölamput, tyristorisäätimet ja elektroniikka (televisiot, tietokoneet), purkauslamput, hitsauslaitteet, valokaariuunit sekä vikaantuneiden muuntajien ja moottorien magneettiärit (oikosulkumoottorin poikkinaiset sauvat, muuntajan löystynyt rautasydän). /9/

Myös osa UPS-laitteistoista aiheuttaa paljon yliaaltoja ja näin myös hankaluuksia, vaikka näitä laitteita toisaalta käytetäänkin parantamaan sähkön laatua. Erityisesti huoltamattomat UPS-laitteet kuivahtaneine akkuineen ovat monesti merkittäviä häiriön aiheuttajia. Myös suuritehoiset akkulaturit tai muut tasasuuntaajat ollessaan välillä melkein tyhjäkäynnillä ja hetken kuluttua taas täydellä teholla, ovat ongelmallisia jakeluverkon ja sähkön laadun kannalta. /9/

2.3.2 Yliaaltojen haitat

Yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvua sähköverkossa, sähkökäyttäjien laitteissa sekä alentavat erilaisten laitteiden kuormittavuutta. Ylikuormittuminen voi vaurioittaa sähkölaitteita, kuten kondensaattoreita. Mittareiden virhenäyttämät sekä automaatiolaitteiden ja suojarleiden virhetoiminnat ovat yksi yliaaltojen haitoista. Sähkökäyttäjien omien laitteiden yliaaltovirrat ja muut häiriöt ovat usein

ongelmien syy. Edellä mainitut ilmiöt korostuvat etenkin resonanssitilanteissa, joissa jännite säröytyy huomattavasti. /9/

Yliaaltovirtojen synnyttämät magneettikentät aiheuttavat toisinaan laitteiden kuten monitorien ja televisioiden näyttöjen välkyntää. 3. yliaalto esiintyy toisinaan haitallisena, koska se summautuu vaihejohtimien kautta nollajohtimeen. Tämän jälkeen se voi levitä verkon nollausten kautta myös rakennusten runkorakanteisiin. Yleensä tämä ongelma aiheutuu perustaajuisen virran ja 3. yliaaltovirran yhteisvaikutuksesta. /9/

Eräitä merkittäviä haittoja ovat suuritaajuiset häiriöt (ääni-, radio- ja tv-taajuudet), jotka leviävät säteilemällä ja ovat hankalasti selvitettävissä (esim. liike-, teatteri- ja sairaalakiinteistöt). /9/

Pienitaajuiset yliaallot ovat merkityksellisiä sähköverkon komponenttien ja sähkölaitteiden lämpenemisen kannalta. Suuremmat yliaaltotaajuudet aiheuttavat etupäässä ääni- ja radiotaajuisia häiriöjännitteitä. /9/

Yliaaltojen haittoina ovat myös ongelmat laskutusmittauksessa. Suuri yliaaltopitoisuus aiheuttaa muutoksia pätö-, loisteho- ja energialukemiin. Yliaaltojen vaihekulma perusaalton nähden voi vaikuttaa myös näihin muutoksiin. Pätöteholla muutosten kokonaisvaikutus on silti hyvin pientä. Yliaallot aiheuttavat induktiomitareihin mekaanista haittaa, kuten värähtelyjä. /9/

Kolmivaihejärjestelmän symmetrisillä kuormituksilla vaihevirtojen kolmella jaolliset parittomat yliaallot (3., 9. jne) ovat yhtä suuria ja samanvaiheisia. Koska ne ovat samanvaiheisia, ne summautuvat tähtipisteessä nollajohtimeen. Tällöin nollajohtimeen summautuva 3. yliaaltovirta on kolminkertainen vaiheiden 3. yliaaltovirtaan nähden. Yksivaiheiset, vaiheen ja nollan väliin kytketyt epälineaariset kuormitukset tuottavat kolmatta yliaaltoa ja sen kerrannaisvirtoja. Kolmatta yliaaltovirtaa tuottavat pääasiassa 1-vaiheiset tasasuuntaajat ja erilaiset purkausvalaisimen elektroniset liitäntälaitteet. Toisin kuin muut yliaaltovirrat kolmella jaolliset parittomat yliaaltovirrat, merkityksellisimpänä 3. yliaallon virta, eivät kumoudu kolmivaihejärjestelmässä, vaan ne summautuvat nollajohtimeen (N tai PEN).

Summautuminen aiheuttaa nollajohtimen ylikuormittumisvaaran ja TN-C-S-järjestelmässä 150 Hz:n taajuudella magneettikentän johtimen ympärille. Nollajohtimen poikkipinta-ala on yleisesti puolet äärijohtimen poikkipinta-alasta, ja tämä on joissain tapauksissa polttanut nollajohtimen poikki. Luonnollisesti kolmas yliaalto voi aiheuttaa kaikkia muitakin ongelmia kuin muut yliaallot. /9/

2.4 Johdon ja kaapelin tuottama loisteho

Johdon kuluttaman loistehon suuruus riippuu johdon reaktanssista ja johdolla siirretystä pätötehosta. Johdon kapasitanssit tuottavat loistehoa, ja tuotetun loistehon suuruus on riippuvainen johdon jännitteestä. /10/

Johdon tuottama loisteho ei riipu johdon kuormituksesta vaan johdon jännitteistä.

Loistehon määritelmän perusteella ($\underline{S} = \underline{U}^* \underline{I} = UI \angle \varphi = P + jQ$) loisteho on positiivinen, kun virta on jännitettä jäljessä. Näin käy, kun jännite syöttää induktiivista reaktanssia. Johdon induktiivisessa reaktanssissa kuluttama loisteho on siis etumerkillään positiivinen. Johdon loistehotase tarkoittaa johdon muusta verkosta ottamaa loistehoa. Loistehotase lasketaan siten, että johdon reaktansseissa kuluttamasta loistehosta vähennetään johdon kapasitansseissa tuottama loisteho. /10/

Loistehotase on positiivinen, jos johdon reaktansseissa kuluva loisteho on suurempi kuin sen kapasitansseissa tuotettu loisteho. Jos tilanne on päinvastainen eli jos johto tuottaa muuhun verkkoon loistehoa, johdon loistehotase on negatiivinen. Kun johto on tyhjäkäynnissä tai pienellä kuormalla, se toimii kuten kapasitanssi ja nostaa verkon jännitettä. Pätötehoa, jolla johdon tuottama ja kuluttama loisteho ovat yhtä suuret, sanotaan luonnolliseksi tehoksi. /10/

Kaapelin tai johdon tuottama/kuluttama loisteho voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{lt} = Q_t - Q_k = \omega C_k U^2 - 3XI^2 = \omega C_k U^2 - 3\omega L_k I^2 \quad (6)$$

missä Q_{lt} = johdon tai kaapelin tuottama loisteho [var]
 Q_t = kapasitanssin tuottama loisteho [var]
 Q_k = induktanssin kuluttama loisteho [var]

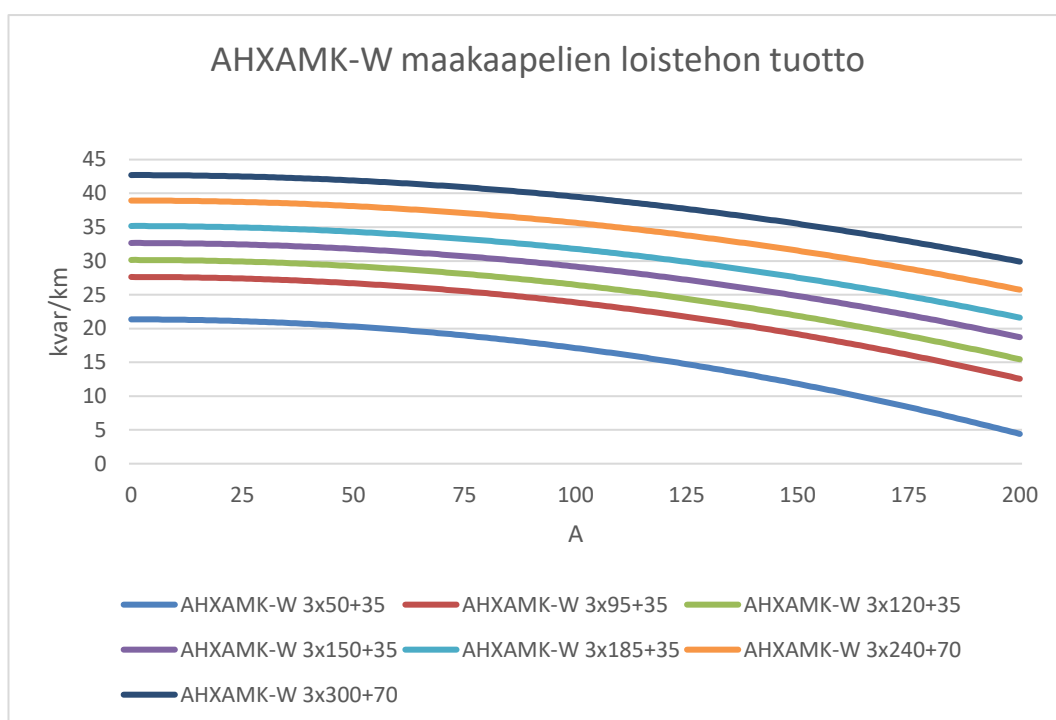
ω = kulmataajuus

C_k = käyttökapasitanssi [F]

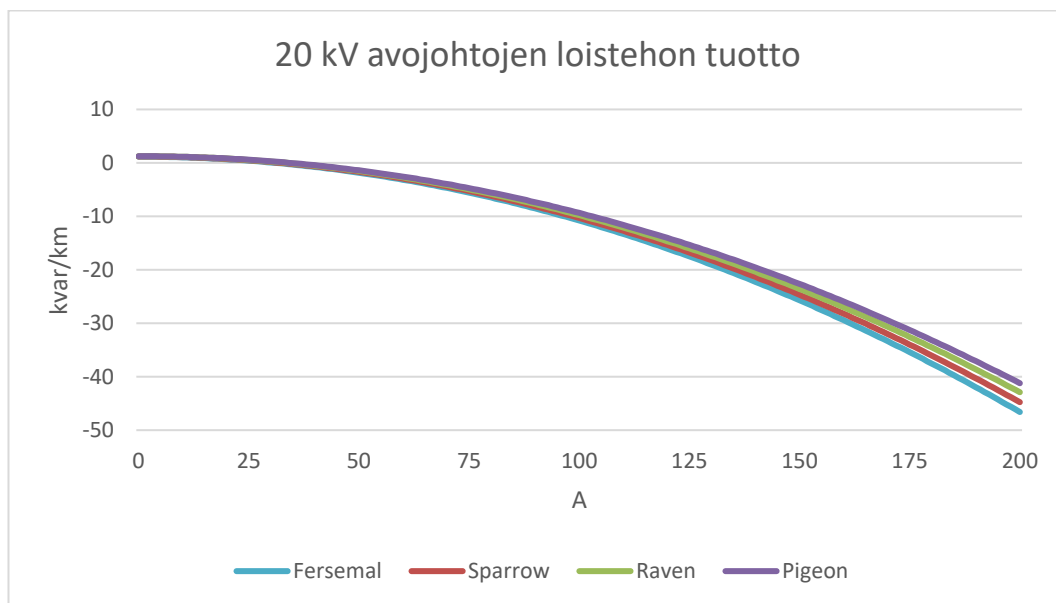
L_k = käyttöinduktanssi [H]

X = pitkittäisreaktanssi [Ω]

I = kuormitusvirta [A] /11/



Kuva 7. Maakaapeli loistehon tuotto.

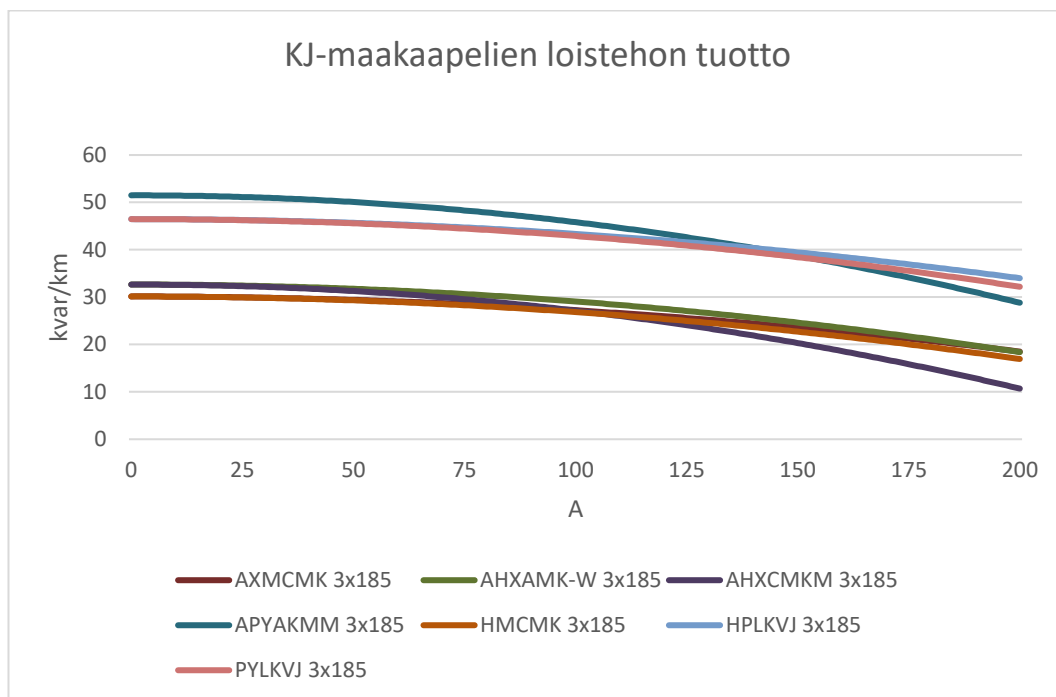


Kuva 8. Avojohtojen loistehon tuotto.

Kuten kuvista 7 ja 8 huomaamme, maakaapeli loistehontuotto eroaa huomattavasti ilmajohtojen loistehon tuotannosta.

Esimerkiksi AHXAMK-W 3x95+35-maakaapeli tuottaa nolalla ampeerilla noin 27 kvar kilometria kohden, kun taas lähes vastaavan kokoinen Pigeon 99-ilmajohto tuottaa nolalla ampeerilla vain hieman yli 1 kvar kilometriä kohden.

Opinnäytetyötä tehdessä huomasin, että eri tyyppisillä keskijännitemaakaapeleilla voi olla suuretkin erot loistehon tuotannossa.



Kuva 9. KJ-maakaapeleiden loistehon tuotto.

Kuvassa 9 on eri tyyppisiä, mutta samankokoisia KJ-maakaapeleita. Kuten kuvasta nähdään, kaapeliin loistehon tuotto jakautuu kahteen eri suuruusluokkaan.

Suurimmat loistehon tuotot ovat APYAKMM-, PYLKVJ- ja HPLKVJ-tyypin kaapeleilla.

Pienimmät loistehon tuotot ovat AXCMK-, AHXAMK-W-, AXCMKM- ja HMCMK-tyypin kaapeleilla.

Näiden kahden eri ”ryhmän” kaapeleiden loistehon tuotannossa on isot erot, mutta saman ”ryhmän” kaapeleilla erot ovat aika pieniä.

Alajärven Sähkö Oy:n käyttämä AHXAMK-W-tyypin kaapeli sijoittuu tähän pienemmän loistehon tuottoisten ryhmään. Voidaan siis päätellä, että AHXAMK-W-kaapeli on oiva valinta loistehon tuotannon kannalta.

3 LOISTEHON KOMPENSOINTI

Loistehon siirto pienentää pätötehon siirtokykyä ja lisää johtojen ja muuntajien jännite-, teho- ja energiahäviöitä niin normaaleissa käyttötilanteissa kuin varasyöttötilanteissakin. Loistehon siirto verkossa johtaa verkon vahvistus- tai uusinvestoihin. Loisvirran aiheuttamat pätöteho- ja energiahäviöt merkitsevät häviökustannusten kasvua pelkkään pätötehon siirtoon verrattuna. Edellä mainitun perusteella olisikin tarkoituksenmukaista tuottaa loissähkö mahdollisimman lähellä kulutusta. /9/

Sähköverkkoa voidaan kompensoida verkon eri osissa aina sen mukaan, mikä todetaan teknisesti ja taloudellisesti tarpeelliseksi. Yleensä jakeluverkkoyhtiöt hoitavat omien suurjännite-, keskijännite- ja pienjänniteverkkojensa kompensoinnit, jotka ovat sähkönsiirrossa syntyviä loistehoja, omien teknis-taloudellisten intressiensä mukaisesti. Sähkön käyttäjien aiheuttaman loistehon kompensointitarpeen he siirtävät loistehomaksulla käyttäjille. /9/

Jakeluverkkoyhtiöille kustannuksia aiheuttaa lisäksi loistehonotto kantaverkosta ilmaisosuuden ylittävältä osalta. Kantaverkkoyhtiön tavoitteena on loissähkön hinnoittelulla vähentää loissähkön ottoa kantaverkosta sekä ohjata $\tan \varphi = 0,16$ yllenevältä osalta kompensointia keski- ja pienjänniteverkkoon. Tavoitteen taustalla on kansantaloudellinen optimointi kantaverkosta oton ja jakeluverkonhaltijan oman kompensoinnin kesken. Jakeluverkonhaltija siirtää osan kompensointivelvoitteestaan loistehomaksulla sähkönkäyttäjille. /9/

Jakeluverkkoyhtiöille tulee hankaluuksia myös liiallisesta loistehon kompensoinnista pienen kuorman aikana, kun tyhjäkäyvien johtojen kapasitanssit ovat kuitenkin kiinni verkossa. Kantaverkkoyhtiö rajoittaa jakeluverkon loistehon tuoton arvoon $\tan \varphi = -0,04$. Siksi loistehon kompensointilaitteistojen tulee olla säädettyjä. /9/

3.1 Hajautettu ja keskitetty kompensointi

Loistehoa voidaan kompensoida joko hajautetusti tai keskitetysti. Keskitetty kompensointi tarkoittaa sitä, että esim. sähköasemalle asennetaan kompensointilaitte

(reaktori tai kondensaattori), jolla kompensoidaan koko sähköaseman perässä olevaa verkkoa.

Kompensointi sähköasemalla vähentää loistehon siirtoa kantaverkosta sekä pienentää päämuuntajan häviötä. /9/

Hajautettu kompensointi tarkoittaa sitä, että kompensointilaitteita asennetaan verkon varrelle useampaan paikkaan, sinne missä kompensoimistarve esiintyy. Tässä on etuna se, että loistehoa ei tarvitse siirtää asemalta asti vaan kompensointi tapahtuu siellä missä sitä tarvitaan. Loistehon siirtäminen pitkiä matkoja kuormittaa sähköverkkoa turhaan. /9/

Sijoittamalla kompensointilaitteita keskijänniteverkon johtolähdön varsille parantaa johtoyhteyksien siirtokykyä ja pienentää jännitteen alenemia sekä normaali- että varasyöttötilanteissa sekä pienentää häviöitä edeltävässä KJ-verkossa. /9/

3.2 Reaktorit

Reaktorilla saadaan yleisesti sähkönjakeluverkoissa aikaan päinvastainen vaikutus loistehoon kuin kondensaattoreilla. /9/

20 kV reaktorit ovat pääsääntöisesti öljyjäähdytteisiä. /12/

Reaktoreita on säädettävyydeltään eri tyyppisiä. Kiinteitä reaktoreita ei voi säätää, vaan ne tuottavat käynnissä ollessaan aina saman loistehon esim. 2 Mvar. Reaktori voidaan varustaa käsiohjatulla väliottokytkimellä, näitä reaktoreita säädetään väliottokytkimellä jännitteettömänä. Näissä reaktoreissa on reaktorin kannella väliottokytkin, jossa on tietty lukumäärä portaita. Esim. 5 porrasta, jonka portaat ovat 1 Mvar, 1,25 Mvar, 1,5 Mvar, 1,75 Mvar ja 2 Mvar. Väliottokytkimellä varustettuja reaktoreita on myös moottoriohjattuina versioina. Myös tämä malli on säädettävä jännitteettömänä. Moottoriohjatulla käänkytkimellä varustettuja jännitteisenä säädettäviä, joissa on esim. 15 porrasta. /12/

Reaktoreita voidaan valmistaa periaatteessa mille teholle tahansa. Yleensä yksi iso on edullisempi kuin kaksi pientä. Toisinaan kaksi pienempää reaktoria saatetaan

saada optimoitua paremmin ja saadaan lisää toimintavarmuutta. Asemien erilaisissa kytkentätilanteissa saattaa olla myös etu että reaktorit ovat eri paikoissa (eri kiskolla tai eri asemien perässä). /12/

Jännitteisenä säädettävän reaktorin hinta on suuruusluokkana noin 1,5 kertainen. Tähän vaikuttaa myös reaktorin koko. Pienillä reaktoreilla hinnan nousu on suhteessa suurempi. Säättöön käytetään suurmuuntajatekniikassa käytettyä ”oikeaa” käämikytkintä. Säädettävyydellä saadaan toki monia etuja. Käämikytkimellä varustettu reaktori voidaan varustaa automaattisäätäjällä, joka pitää säädön optimaalisena kaikilla kytkentätilanteilla ja kuormituksilla. /12/

Reaktorin häviöt ovat noin 0,5 %...0,7 % maksimiteholla. Pienempihäviöinen maksaa hieman enemmän. /12/

Reaktorin huoltokustannuksia voi verrata normaalin muuntajan huoltokustannuksiin. Käämikytkinlaitteissa tekniikka on vastaavaa kuin päämuuntajien käämikytkimissä. /12/

Lisäksi on olemassa rinnakkaisreaktoreita hajautettuun kompensointiin, jolla voidaan kompensoida loistehoa sekä maasulkuvirtaa. Nämä reaktorit ovat Petersenin kelan toiminnalla varustettuja, kun N-piste on maadoitettu. Reaktoreissa on aaltolevysäiliörakenne ja ne ovat hermeettisesti suljettu. Ne on suunniteltu koppiasenkukseen ja reaktorin lämpenemä (öljyt/käämi) on alhaisempi. Loistehoa ne kompensoivat, esim. 59-89-118-148-178 kvar ja maasulkuvirtaa, esim. 5-7,5-10-12,5-15 A. /12/

3.3 Kondensaattorit

Nykypäivänä maakaapeloinnin lisääntymisen takia sähkönjakeluverkoissa olevien kondensaattorien merkitys on vähentynyt ja ne ovat jääneet osin tarpeettomiksi ja ne on korvattu reaktoreilla.

Maakaapelit tuottavat kapasitiivista loistehoa samalla tavalla kuin kondensaattorit. Voidaankin sanoa, että maakaapeliverkko on ikään kuin valtava kondensaattori.

Aiemmin, kun maakaapelointiaste oli pienempi ja ilmajohtoaste suurempi, piti jakeluverkon induktiivinen loisteho kompensoida kondensaattoreilla.

3.3.1 Rinnakkaiskondensaattori

Rinnakkaiskondensaattoriparistot kytketään kuorman kanssa rinnakkain. Rinnakkaiskondensaattoriparistoja on kiinteitä ja säädettäviä. Kiinteissä paristoissa kondensaattoritehoa säädetään portaittain. Rinnakkaiskondensaattoriparisto muodostuu tarvittavasta määrästä kondensaattoriyksiköitä sekä kytkin- ja suojauslaitteista.

Keskijänniteverkossa kondensaattoriparisto liitetään yleensä keskitetysti kiskostoon katkaisijan avulla. Koska keskijännitteellä liitälaitteista aiheutuu huomattavan suuri kustannuserä, tulevat teholtaan suuret paristot kilovaria kohti edellisemmiksi pieniin paristoihin verrattuna. /9/

Rinnakkaiskondensaattoripariston kehittämä loisteho saadaan yhtälöstä:

$$Q = \omega C U^2 = \left(\frac{U}{U_R}\right)^2 Q_R \quad (7)$$

missä

Q = loisteho [var]

ω = kulmataajuus

C = kapasitanssi [F]

U = nimellisjännitejännite [V]

U_R = kondensaattorin mitoitusjännite [V]

Q_R = kondensaattorin mitoitusteho [var] /13/

Yhtälö paljastaa, että rinnakkaiskondensaattori soveltuu huonosti voimansiirron kompensointiin silloin, kun verkossa sattuu vika. Johdon lauetessa verkon loisteho pienenee ja jännite laskee. Verkko tarvitsisi siis loistehotukea. Kuitenkin rinnakkaiskondensaattorin syöttämä loistehokin pienenee jännitteen laskiessa, vieläpä nelikymmentä eli verrannollisena suureen toiseen potenssiin.

Paristokoko on tyypillisesti Suomen 110 kV:n verkossa 20-50 Mvar ja 20 kV:n verkossa 1-5 Mvar. /13/

3.3.2 Sarjakondensaattori

Sarjakondensaattori on johdon kanssa sarjaan kytkettävä laite, jolla pienennetään johdon päiden välistä induktiivista reaktanssia. Tämän vaikutuksen kautta sarjakondensaattori lieventää pitkiin siirtoyhteyksiin liittyviä kulma- ja jännitestabiiliusongelmia ja lisää siirtokapasiteettia. Sarjakondensaattorin vaikutuksesta johdon päiden välinen kulmaero, ja johdon kuormittuessa verkosta ottama loisteho pienenevät. Sarjakondensaattorin etuihin kuuluu, että sen kehittämä loisteho on verrannollinen johdossa kulkevan kuormitusvirran suuruuteen. Tuotettu loisteho seuraa portaattomasti johdon kuormitusvirtaa. /13/

Sarjakondensaattoria käytetään pääasiassa johdon siirtokyvyn lisäämisen takia eikä niinkään loistehon kompensoinnin vuoksi. /9/

3.4 Yliaaltojen kompensointi

3.4.1 Estokelaparisto

Yliaaltopitoisissa verkoissa kompensointi kannattaa toteuttaa joko estokelaparistolla tai yliaaltosuodattimilla. Estokelaparisto estää haitallisten resonanssien syntyminen kondensaattorin kapasitanssin ja syöttävän verkon induktanssin välille. Kondensaattorin kapasitanssi ja syöttävän verkon induktanssi voi aiheuttaa rinnakkaisresonanssiin jollain yliaaltotaajuudella. Tämä yliaaltotaajuus voi vahvistua jopa 20-kertaiseksi. Resonanssin aiheuttama virtasärön nousu kasvattaa myös jännitesäröä. Tästä johtuen pelkillä kondensaattoriparistoilla ei voi kompensoida loistehoa verkoissa joissa on suuri yliaaltopitoisuus Estokelaparistoa käytetään tyypillisesti verkoissa joiden harmoninen kokonaissärö on yli 3 %:a. /9/

Estokelapariston jokainen porraskoostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkenästä. Nämä muodostavat sarjaresonanssiin, joka on viritetty alemmalle taajuudelle kuin verkossa esiintyvä pienin harmoninen yliaaltotaajuus. Viritystaajuutensa yläpuolella estokelaparisto on induktiivinen eikä se vahvasta yliaaltotaajuuksista. Viritystaajuuden alapuolella se on kapasitiivinen ja tuottaa loistehoa. /9/

Estokelaparistoja käytetään yliaaltopitoisissa verkoissa sekä pien- että keskijännitteellä mm. keskitettyyn kompensointiin. /9/

Paristo kytketään yleensä kompensoitavan laitteen tai laiteryhmän rinnalle, jolloin paristo kytkeytyy päälle ja pois samanaikaisesti kompensoitavan laitteen kanssa. Tarvittaessa kotelon sisälle voidaan asentaa myös kontaktori, mikäli paristoa halutaan ohjata erikseen päälle ja pois. /9/

3.4.2 Yliaaltosuodatin

Yliaaltosuodattimia käytetään, kuten estokelaparistojakin verkoissa, joissa yliaaltopitoisuus on suuri. Yliaaltosuodatin tuottaa tarvittavan loistehon sekä nostaa sähkön laatua pienentämällä verkon jännitesäröä ja poistamalla yliaaltovirtoja. /9/

Yliaaltosuodatin koostuu kondensaattoreista ja niiden kanssa sarjaan kytketystä kuristimesta. Kondensaattoreiden perustaajuudella tuottama loisteho mitoitetaan siten, että saavutetaan haluttu kompensoimisaste. Kuristimen induktanssi valitaan siten, että se yhdessä kondensaattoreiden kanssa muodostaa yliaaltotaajuudella hyvin pieni-impedanssisen sarjaresonanssiipiirin ja tällöin suurin osa syntyvistä yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Perinteinen yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssiipiiristä. Piirit ovat viritetty yleisimmille yliaaltotaajuuksille kuten 5., 7. ja 11. harmoninen yliaalto. Jokainen suodatin koostuu kontaktorista, termisestä ylivirtareleestä, kuristimesta ja kondensaattorista. /9/

Yliaaltosuodattimia käytetään pien- ja keskijänniteverkoissa yleensä keskitettynä kompensointina. Yliaaltosuodattimia käytettäessä on tunnettava sen verkonosan tila, johon suodattimet kytketään. Muuntopiirissä, jossa on useampia sähkönkäyttäjiä, voi verkonosan tilan tarkastelu olla olennaisesti vaikeampaa kuin yhden sähkönkäyttäjän muuntopiirissä. /9/

3.4.3 Aktiivisuodatin

Passiivisilla komponenteilla toteutettujen yliaaltosuodattimien rinnalle ovat tulleet puolijohdetekniikalla toteutetut yliaaltosuodattimet. Passiivisilla suodattimilla ei pystytä suodattamaan verkon yliaaltotilanteen muutoksia. Niillä pystytään

suodattamaan vain ennalta määrättyjä yliaaltoja. Aktiivisilla suodattimet mittaavat virran yliaaltokomponentteja ja tuottavat 180°:n vaihesiirrossa olevan virran, jolla kumotaan alkuperäinen yliaaltovirta. Aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua. Jos aktiivisuodattimen kapasiteetti ylittyy suodatin jättää kapasiteettinsä ylittävän osan suodattamatta. /9/

Aktiivisuodatin on siis ohjattu virtalähde. Se toimii samalla periaatteella kuin taa-juusmuuttajatkin: kompensoitavan verkon lataamat tasajännitekondensaattorit toimivat energialähteinä ja invertteri tuottaa PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon. Invertteireissä käytetään useimmiten IGBT-transistoreita, mutta myös muita puolijohteita voidaan käyttää (GTO, MOSFET). /9/

Aktiivisen suodattimen periaate on hyvin tunnettu ja sen etuja perinteisiin passiivisuodattimiin ovat mm. mahdollisuus suodatukseen ilman loistehon tuotantoa., rinnakkaisresonanssivaaran välttäminen ja pienempi tilantarve. Aktiivisuodattimella voidaan myös kompensoida kolmella jaolliset parittomat yliaallot eli nollajohtoon summautuvat yliaallot, kuten 3. harmoninen yliaalto. Yleistymisen esteenä on ollut puolijohdekytkinten suorituskyky ja passiivisuodattimiin verrattuna toistaiseksi korkeampi hinta. /9/

Aktiivisuodatin voidaan asentaa mihin tahansa verkon pisteeseen. Kustannustehokkuus ja säröä aiheuttavien kuormien laatu ja niiden sijainti määräävät suodattimien sijoituspaikan. /9/

Aktiivisuodatin on riippumaton kompensoitavan virran suunnasta, käyrämuodosta ja virtamuutoksen dynamiikasta. Vaihesiirto voi olla induktiivinen tai kapasitiivinen ja kuorma epäsymmetrinen. Verkon impedanssi ja jännitteen laatu eivät vaikuta suodattimen toimintaan. /9/

Aktiivisuodattimia valmistetaan 17-100 kVA:n kokoluokassa. Jos halutaan suurempi teho, voidaan laitteita kytkeä useampi rinnan. /9/

4 SÄNKIAHON SÄHKÖASEMA

4.1 Nykytilanne

Sänkiahon asemalla poistettiin loistehon kompensoimiskondensaattori käytöstä 21.11.2016. Kondensaattori hankittiin vuonna 2000. Se oli kiinteä (tehoa ei voinut säätää) ja sen tuottama loisteho oli 1,68 Mvar. Asemalla ei ollut loistehon kompensointia, kunnes uusi 0,5-2,0 Mvar reaktori (**Kuva 10.**) otettiin käyttöön 12.12.2019.

Loistehon kompensointitilanne on muuttunut nopeasti. Vuonna 2000 pohdittiin vielä, että onko hankittava kondensaattori tarpeeksi suuri kompensoimaan tulevien vuosien tarpeet. Vuonna 2016 kondensaattori jouduttiin poistamaan pois käytöstä ja jo kolmen vuoden päästä loistehoa piti alkaa kompensoimaan toiseen suuntaan.

Kondensaattori purettiin kesällä 2019. Uusi reaktori asennettiin aikoinaan kondensaattorille tehtyjen perustusten päälle. Myös kondensaattoria varten ollut katkaisija saatiin hyödynnettyä uudestaan reaktorin käyttöön. Katkaisijan ja reaktorin väli kaapeloitiin uudestaan AHXAMK-W 3x150+35-kaapelilla vanhan kondensaattoria syöttäneen kaapelin jäädessä lyhyeksi. Vanhojen perustusten päälle asennettiin betoninen valuma-allas, jonka päällä reaktori on.



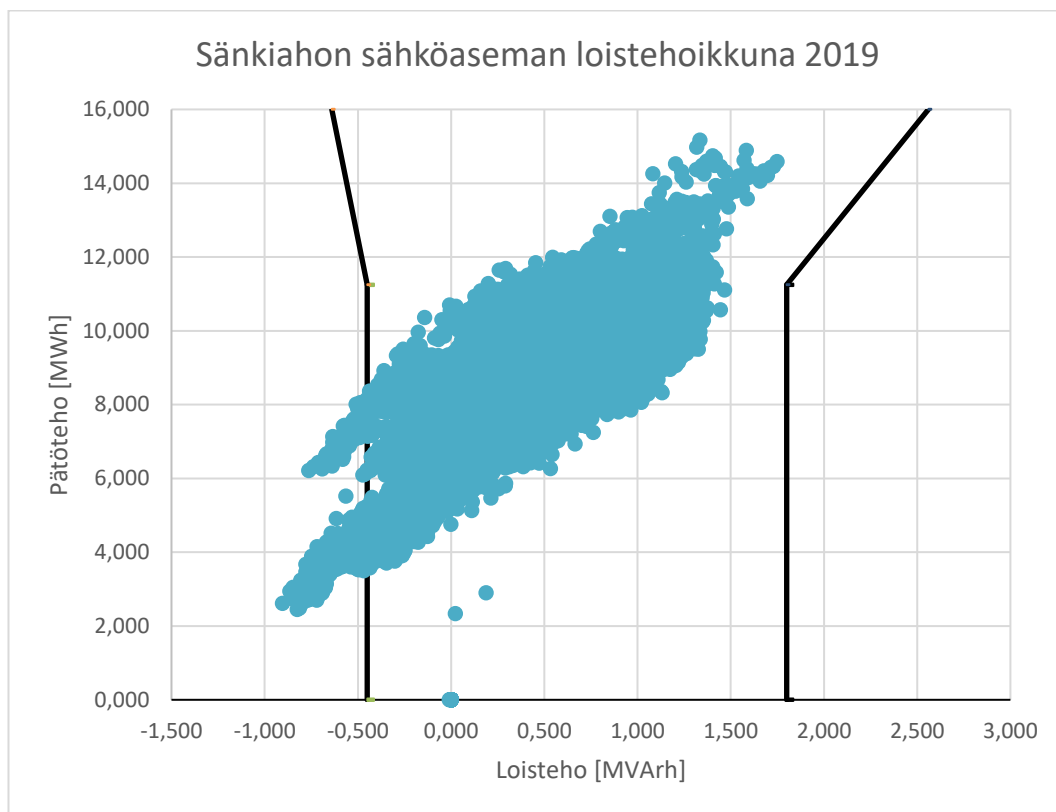
Kuva 10. Uusi reaktori Sankiahon asemalla.



Kuva 11. Reaktorin kilpi.

Hankittu reaktori on varustettu käsikäyttöisellä väliottokytkimellä. Reaktorissa on 9 porrasta ja sitä säädetään jännitteettömänä reaktorin kannella olevan väliottokytkimen avulla. Säästöalue on 0,5 Mvar-2 Mvar (**Kuva 11.**). Reaktori saadaan jännitteettömäksi ottamalla katkaisin auki asemalta.

Sänkiähön aseman kohdalla päädyttiin keskitettyyn loistehon kompensointiin, koska valtaosa maakaapeloinnista on aseman välittömässä läheisyydessä.



Kuva 12. Sänkiahon sähköaseman vuoden 2019 loistehoikkuna tuntitasolla.

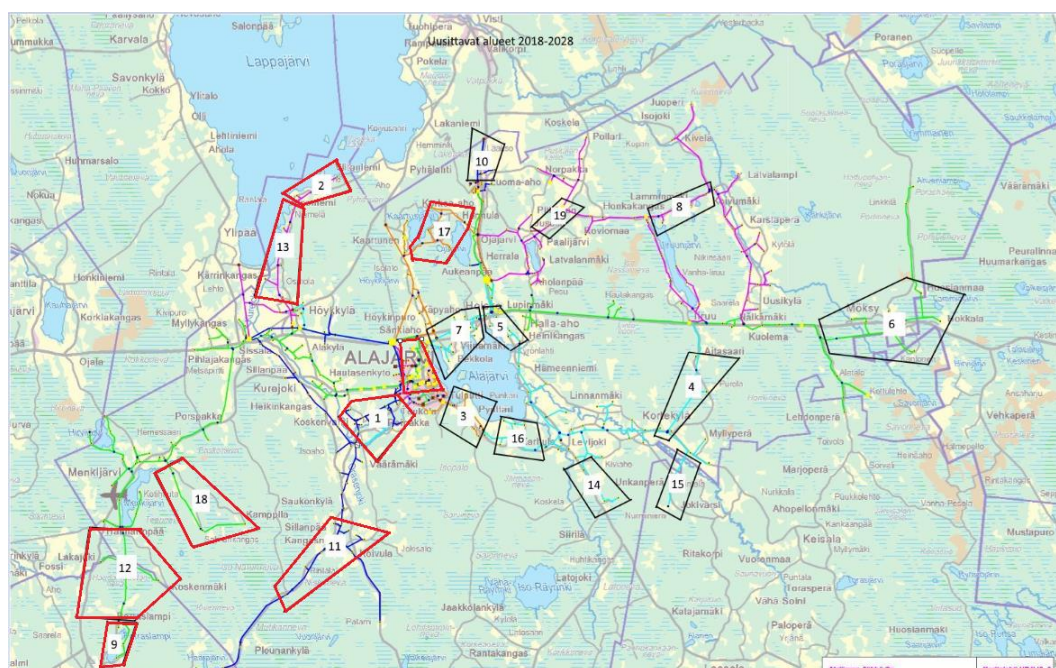
Loisteho ei pysynyt sallittujen rajojen sisällä heinä-elokuun vaihteessa ja joulukuun alussa. Kesällä loistehon työntäminen alueverkkoon on ollut rajojen ulkopuolella, koska kesällä kuormitukset ovat pienemmät ja pienempi virta tuottaa loistehoa negatiiviseen suuntaan. Joulukuun alun ylitykset johtuvat taas siitä, että eräs suurempi teollisuusasiakas otti loistehonkompensointia käyttöön tehtaillaan. He kompensoivat kondensaattorilla 300 kvar kiinteistöissään.

Kun uusi reaktori otettiin käyttöön 12.12.2019, loisteho palasi takaisin rajojen sisäpuolelle. Aluksi oli tarkoitus käyttää reaktoria pienimmällä teholla 500 kvar, mutta asiakkaan kompensoinnin vuoksi reaktori asetettiin 2-portaalle, joka on 600 kvar.

Kesän ja talven erilaisten kuormitusten takia reaktoria tullaan käyttämään eri teholla kesäisin ja talvisin. Myös tulevien vuosien kaapeloinnit tulevat vaikuttamaan reaktorin väliottokytkimen asentoon.

4.2 Vuosien 2020-2027 säävarmuuden takia uusittavat linjat, Sänkiaho

Jotta sähkömarkkinalain (588/2013) asettamat vaatimukset säävarmasta verkosta vuonna 2028 saavutettaisiin, täytyy jakeluverkkoyhtiöiden investoida uudelleen rakennukseen. Vanhat metsässä kulkevat avojohdot täytyy joko kaapeloida tai tuoda tienvarsille, jossa niiden huoltaminen on helpompaa ja vikaantuminen harvinaisempaa.



Kuva 13. Säävarmuuden takia Sänkiahon sähköaseman perässä olevat uudelleen rakennettavat alueet punaisella.

Kuvassa 13 on esitetty alueet, jotka on tarkoitus rakentaa vuosina 2020-2028 säävarmuuden parantamisen vuoksi. Tulevina vuosina on varmasti myös muita osioita, joita tullaan rakentamaan iän ja muiden syiden vuoksi, mutta niiden ennustaminen on vaikeaa, koska suunnitelmat ja tilanteet elävät. Seuraavat suunnitelmat ja laskelmat on tehty loistehon kompensoinnin varalle kuvan 13 alueiden mukaan. Vuonna 2020 töissä on huomioitu myös työmaat, jotka eivät esiinny kuvassa 13.

Tarkoituksena on selvittää paljonko uudet investoinnit lisäävät loistehon tuotantoa ja riittääkö 2019 käyttöön otettu reaktori vielä vuonna 2028 vai pitääkö kompensointia lisätä jo ennen tätä.

Vuonna 2019 Sänkiahon loistehorajat olivat alaraja -0,45 Mvar ja yläraja 1,8 Mvar. Vuonna 2020 rajat ovat muuttuneet hieman ja ovat alaraja -0,53 Mvar ja yläraja 2,1. Rajat ovat siis hieman kasvaneet edellisvuodesta.

Kuten kaava 6 osoittaa, virta vaikuttaa loistehon tuotantoon. Loistehon tuotanto on suurimmillaan silloin kun kuormat ovat pienimmillään. Virrat on laskettu Sänkiahon huippu- ja minimitehon suhteella. Koska johtolähdöt, jonka varrella tulevat investoinnit ovat, eivät kuulu teollisuusjohtolähdön piiriin, niin huipputehosta on otettu pois teollisuuden vaikutus. Virran huippuarvot on otettu verkkolaskentajärjestelmästä ja ne on jaettu huipputehon ja minimitehon suhteella. Virran arvoissa voi siis olla pientä heittoa, mutta kuten kuvat 7 ja 8 osoittavat, niin esim. loistehon tuotanto ei muutu hirveästi edes 50 ampeerin kuormalla verrattuna kuormittamattomaan tilanteeseen. Verkon osissa, johon uudet investoinnit kohdistuvat virrat ovat vain muutaman ampeerin luokkaa, joten merkitys on vähäinen. Tarkemmat virrat, joilla loistehon tuotannot on laskettu löytyvät liitteistä 1 ja 2.

Sänkiahon virrat on siis laskettu kaavalla:

$$\frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} * I_{MAX} = \frac{8000 MW}{2400 MW} * I_{MAX} \quad (8)$$

Taulukko 2. Sänkiahon verkostoinvestoinnit 2019-2027.

| Vuosi | Työmaa | Uusitun verkon muutos loistehoon [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] | Loisteho yli rajan [kvar] |
|-------|---------------------------|---|---|---------------------------|
| 2019 | Pynttäri | 141,816 | 141,816 | 441,816 |
| | Asiakkaan kompensointi | 300 | 441,816 | 741,816 |
| 2020 | Koulukeskus-Kaupinkartano | 17,069 | 458,885 | 758,885 |
| | Hautasenkylä-Mäntykaari | 28,005 | 486,89 | 786,89 |
| | Rengastie | 16,872 | 503,762 | 803,762 |
| 2021 | Koskenvarsi | 134,875 | 638,637 | 938,637 |
| | Voimalaitos | 100,464 | 739,101 | 1039,101 |
| 2023 | Porraslampi | 1,043 | 740,144 | 1040,144 |
| 2024 | Saukonkylä | 9,283 | 749,427 | 1049,427 |
| 2025 | Haimari-Porraslampi | 4,334 | 753,761 | 1053,761 |
| | Isoniemi | 26,258 | 780,019 | 1080,019 |
| 2027 | Kaartunen | 60,822 | 840,841 | 1140,841 |
| | Kamppilan haara | 10,702 | 851,543 | 1151,543 |

Sänkiahon aseman loistehon tuottoa verrattuna vuoteen 2019 on käytetty heinäkuun 27. päivän arvoa vuodelta 2019, kun loistehon tuotto oli suurimmillaan. Loisteho oli tuolloin -0,83 Mvar. Loisteho on pääsääntöisesti suurimmillaan kesällä, kun kuormitukset ovat pienimmillään. Heinäkuun 27. päivän jälkeen on otettu kesän 2019 Pynttärin kaapelointi mukaan verkkoon, joten Pynttärin kaapelointi täytyy ottaa myös huomioon loistehon tuotannon laskuissa. Kaavalla 5 saatu kapasitiivinen loistehon tuotanto on positiivista ja induktiivinen loistehon tuotanto negatiivista, joten ne ovat päinvastoin kuin loistehoikkunassa ilmoitetut arvot. Heinäkuun 27. päivän jälkeen on myös otettu jo käyttöön reaktori Sänkiahon asemalla, joka tällä hetkellä tuottaa 750 kvaria induktiivista loistehoa.

Taulukon 2 mukaan suurin loistehorajan ylitys on 1,151 Mvar. Eli jos Sänkiahon reaktoria käytetään 1,250 Mvarin teholla, niin kaikki loistehot saadaan

kompensoitua ilman, että EPAn ilmoittama loistehoraja rikkoontuu. Sänkiahon reaktoriin jää vielä varaa 0,75 Mvarin verran, joten Sänkiahon reaktori riittää helposti kompensoimaan tulevat investoinnit. Varaa jää vielä tulevien vuosienkin loistehon tuotannon kasvulle.

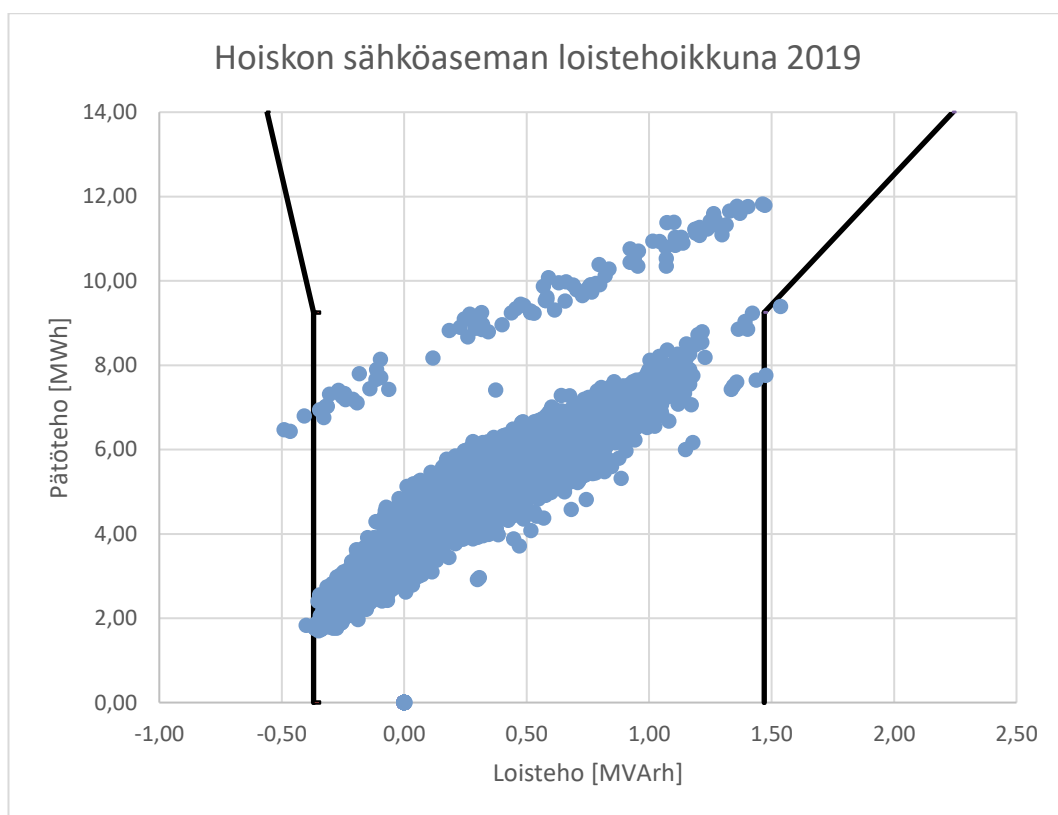
Sänkiahon vuosien 2019-2027 tulevissa investoinneissa tulee arviolta noin 57 km uutta keskijänniteverkkoa, josta maakaapeleiden osuus on noin 19 km ja ilmajoh-tojen osuus noin 38 km. Purettavien linjojen määrä on arviolta noin 47 km, jotka kaikki ovat ilmalinjoja. (LIITE 2)

Ylläolevat määrät ovat nykyisten suunnitelmien mukaisia, jotka tulevat varmasti vähän elämään ja myös muita uusia investointeja tulee olemaan vuoteen 2027 mennessä. Täytyy ottaa huomioon, että myös loistehon tuotanto tulee muuttumaan hie-man taulukon 1 arvoja enemmän.

5 HOISKON SÄHKÖASEMA

5.1 Nykytilanne

Hoiskon sähköasemalla ei ole ollut vielä tähän päivään mennessä loistehonkompensointia käytössä. Rajat ovat kuitenkin menneet muutaman kerran rikki vuonna 2019, mutta tilanne on parempi mitä se on ollut Sänkiahon sähköasemalla. Koska muutamia ylityksiä sallitaan, Hoiskon aseman takia ei ole tarvinnut maksaa sakkomaksuja.

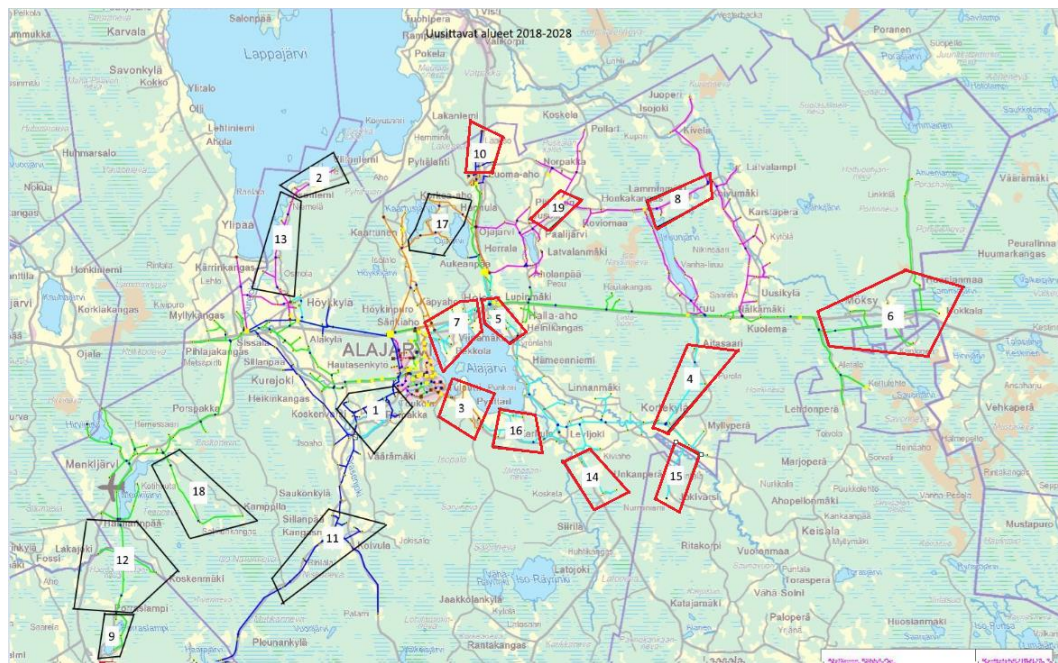


Kuva 14. Hoiskon sähköaseman vuoden 2019 loistehoikkuna tuntitasolla.

Hoiskon sähköaseman loistehorajat olivat vuonna 2019 -0,37 Mvar ja 1,47 Mvar (**Kuva 14.**).

5.2 Vuosien 2020-2027 säävarmuuden takia uusittavat linjat, Hoisko

Hoiskon aseman vuosien 2020-2027 tulevat verkostoinvestoinnit esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Säävarmuuden takia Hoiskon sähköaseman perässä olevat uudelleen rakennettavat alueet punaisella.

Kuten kohdassa 4.2 Sänkiahon kohdalla myös Hoiskon asemalla on käytetty samaa kaavaa virtojen laskemiseen. Hoiskon aseman laskuissa on käytetty Hoiskon aseman maksimi- ja minimitehoja. Myös Hoiskon aseman perässä on yksi suurempi teollisuusjohtolähtö ja se on poistettu laskuista.

$$\text{Hoiskon virrat ovat siis laskettu kaavalla: } \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} * I_{MAX} = \frac{7190 \text{ MW}}{1800 \text{ MW}} * I_{MAX} \quad (9)$$

Virran huippuarvot on otettu verkkotietojärjestelmästä. Tarkemmat virrat, joilla loistehon tuotannot on laskettu, löytyvät liitteistä 3 ja 4.

Taulukko 3. Hoiskon verkostoinvestoinnit 2019-2027.

| Vuosi | Työmaa | Uusitun verkon muutos loistehoon [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] | Loisteho yli rajan [kvar] |
|-----------|---------------------------|---|---|---------------------------|
| 2019 | Pynttäri | 5,552 | 5,552 | 135,552 |
| 2020 | Mökky alkupää | 9,482 | 15,034 | 145,034 |
| | Hoisko-Kyrönlahti | 126,229 | 141,263 | 271,263 |
| | Levijoen erotinasema | 46,163 | 187,426 | 317,426 |
| 2021 | Mökky loppupää | 61,311 | 248,737 | 378,737 |
| 2021-2022 | Viinämäki-Pekkola | 290,866 | 539,603 | 669,603 |
| 2022 | Aitasaari | 10,47 | 550,073 | 680,073 |
| 2023 | Honkakangas | 12,691 | 562,764 | 692,764 |
| 2023 | Luoma-aho | 67,513 | 630,277 | 760,277 |
| 2024 | Karhula | 120,028 | 750,305 | 880,305 |
| 2026 | Kultavuoren haara | 0,525 | 750,83 | 880,83 |
| 2026 | Paalijärvi-Teerinevankytö | 12,374 | 763,204 | 893,204 |
| 2027 | Unkan haara | 2,284 | 765,488 | 895,488 |

Hoiskon aseman loistehon tuottoa verrattuna vuoteen 2019 on käytetty elokuun 9. päivän arvoa vuodelta 2019. Silloin loistehon tuotto oli suurimmillaan. Loisteho oli tuolloin -0,49 Mvar. Loistehon tuotto on pääsääntöisesti suurimmillaan kesällä, kun kuormitukset ovat pienimmillään.

Vuoden 2020 aikana loistehon tuotanto alkaa kasvamaan, mutta jos Hoisko-Kyrönlahden (**Taulukko 3.**) välistä maakaapelointiverkkoa ei oteta vielä käyttöön 2020 kesän aikana vaan vasta syksymmällä, loistehorajat eivät välttämättä ylitä syksyn 2020- kevään 2021 aikana radikaalisti, koska loistehotilanne on parempi talvisin kuin kesäisin. Pientä ylitystä tulee kuitenkin luultavasti olemaan kesällä 2020, jos

kuormitukset ovat samanlaisia kuin 2019, ne eivät kuitenkaan välttämättä aiheuta vielä sakkomaksuja.

Vuosien 2021-2022 Viinämäki-Pekkola kaapeloinnin loistehon tuotanto tulee olemaan niin suuri, että viimeistään silloin loistehorajat alkavat käymään ongelmalliseksi. Hoisko-Kyrölahti kaapelointi näkyy kuitenkin jo vuoden 2021 kesän loistehon tuotannoissa ja näistä luultavasti aiheutuu sakkomaksuja.

Taulukon 3 mukaan suurin loistehorajan ylitys vuonna 2027 tulee olemaan 0,895 MVAR. Eli loistehon kompensointia varten täytyy hankkia vähintään 1 MVAR:n tuottava reaktori.

Hoiskon vuosien 2019-2027 tulevissa investoinneissa tulee arviolta noin 56 km uutta keskijänniteverkkoa, joista maakaapeleiden osuus on noin 26 km ja ilmajohtojen osuus noin 55 km. Purettavien linjojen määrä on arviolta noin 47 km, joista lähes kaikki on ilmajohtoja. (LIITE 4)

6 YHTEENVETO

Alajärven Sähkö Oy:n Sänkiahon ja Hoiskon sähköasemien loistehon kompensointi tulevaisuudessa näyttää seuraavalta.

Sänkiahon aseman tilanne näyttää todella hyvältä nykyisen syksyllä 2019 hankitun 0,5-2 Mvarin reaktorin vuoksi. Vuoteen 2027 ulottuvien investointien loistehon tuotanto ei tule olemaan niin suurta, että Sänkiahon reaktori jäisi pieneksi. Osion 4.2 mukaan reaktoriin jäisi ylimääräistä loistehokapasiteettia jäljelle vielä 0,75 Mvar. Se tarkoittaa sitä, että kaapelointia voidaan lisätä jopa 20-30 km lisää, riippuen hieman kaapelin koosta.

Hoiskon asemalle täytyy myös hankkia loistehon kompensointiin reaktori. Niin kuin Sänkiahon asemalla, myös Hoiskon asemalle ehdotan keskitettyä kompensointia. Suurin osa kaapeloinnista tulee olemaan aseman lähellä, joten ehdotan samanlaisen reaktorin hankkimista, mikä on Sänkiahon asemalla. Reaktorin koon on oltava vähintään 1 Mvar, jotta suunniteltujen investointien tuottama loisteho saataisiin kompensoitua. 1,5 Mvarin reaktori olisi turvallinen ratkaisu, koska sen jälkeen jäisi kapasiteettia myös muille mahdollisille kaapeloinneille. Esimerkiksi Hoiskon aseman johtolähtöjen alkupää tullaan luultavasti kaapeloimaan jollain aikavälillä. Riippuen hieman reaktorien hintaeroista myös 2 Mvarin reaktori olisi mahdollinen, jolla pystyttäisiin kompensoimaan luultavasti myös molemmat asemat asemien korvaustilanteissa. Reaktori kannattaisi hankkia ehkä jo kesällä/syksyllä 2020, mutta viimeistään kesällä 2021.

LÄHTEET

- /1/ Alajärven Sähkö Oy. Kotisivut. Viitattu 02.02.2020. <http://www.alajarven-sahko.fi/index.php?sivu=Yritys&kieli=fi>
- /2/ Pitkänen, M. Alajärven Sähkö Oy.
- /3/ Usein kysyttyä verkkopalvelusta. Viitattu 17.01.2020. <https://energiavirasto.fi/usein-kysyttya-verkkopalvelusta>
- /4/ Verkkoyhtiöt haluavat eroon pitkistä sähkökatkoista. Viitattu 17.01.2020. https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/verkkoyhtiöt_haluavat_eroon_pitkista_sahkokatkoista.html
- /5/ EPA. 2017. Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito. Viitattu 17.01.2020.
- /6/ Saari, R. 1967. Sähkötekniikan käsikirja 1. Helsinki. Tammi Oy.
- /7/ Aura, L. & Tonteri A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki. WSOYpro OY.
- /8/ Silvonen, K. 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria. Helsinki. Otatieto.
- /9/ Vitikka, V-P. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere. Tammer-Paino Oy.
- /10/ Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I. Helsinki. Otatieto.
- /11/ Väisänen, P. 2012. Loistehon kompensointi jakeluverkkoyhtiössä. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Viitattu 18.02.2020. <https://docplayer.fi/16588889-Pasi-vaيسانen-loistehon-kompensointi-jakeluverkkoyhtiössä-diplomityö.html>
- /12/ Autio, K. Toimitusjohtaja. Maviko Oy. Haastattelu 21.1.2020.
- /13/ Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Helsinki. Otatieto.

LIITE 1

Sänkiaho säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat
2019-2023

| Vuosi | Työmaa | Uudet kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Purettavat kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] |
|-------|-------------------------------|---------------------------|----------------|--------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|-------------------------------|---|
| 2019 | Pynttäri | AHXW150 | 2,83 | 1,11 | 92,266 | | | | | 92,266 |
| | | AHXW95 | 1,794 | 0,51 | 49,55 | | | | | 141,816 |
| 2019 | Asiakkaan kompensointi | | | | 300 | | | | | 441,816 |
| 2020 | Koulukeskus- Kaupinkartano | AHXW150 | 0,506 | 5,1 | 15,958 | SP40 | 0,445 | 5,1 | -1,111 | 458,885 |
| 2020 | Hautasenkytö- Mäntykaari | AHXW150 | 0,619 | 13,8 | 15,142 | SAX70 | 0,253 | 13,8 | -5,008 | 479,035 |
| | | | | | | RV63 | 0,318 | 13,8 | -7,855 | 486,89 |
| 2020 | Rengastie | AHXW150 | 0,506 | 0,81 | 16,51 | RV63 | 0,31 | 0,81 | -0,362 | 503,762 |
| 2021 | Koskenvarsi | AHXW95 | 4,7 | 9,57 | 109,847 | RV63 | 0,781 | 6,16 | -3,061 | 616,67 |
| | | | | | | SP40 | 2,174 | 9 | -22,385 | 639,055 |
| | | | | | | FES25 | 0,435 | 0,96 | 0,418 | 638,637 |
| | Voimalaitos | AHXW95 | 3,813 | 0 | 105,361 | RV63 | 3,899 | 0 | 4,897 | 739,101 |
| 2023 | Porraslampi | PAS50 | 2,692 | 1,4 | 4,003 | FES25 | 2,323 | 1,5 | 2,615 | 740,489 |
| | | | | | | RV63 | 0,279 | 1,2 | 0,345 | 740,144 |

LIITE 2

Sähköverkko säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat
2024-2027

| Vuosi | Työmaa | Uudet kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Purettavat kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] |
|-------|-------------------------|---------------------------|----------------|--------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|-------------------------------|---|
| 2024 | Saukonkylä | PAS70 | 7,929 | 0,9 | 11,232 | FES25 | 0,671 | 0,06 | 0,775 | 750,601 |
| | | AHXW50 | 0,365 | 0,27 | 7,791 | SP40 | 3,461 | 0,45 | 4,251 | 754,141 |
| | | | | | | RV63 | 4,263 | 1,05 | 4,714 | 749,427 |
| 2025 | Haimari- Porraslampi | PAS70 | 9,422 | 0,6 | 13,821 | SP40 | 4,69 | 0,81 | 5,471 | 757,777 |
| | | | | | | RV63 | 3,209 | 0,18 | 4,016 | 753,761 |
| 2025 | Isoniemi | PAS70 | 6,28 | 1,8 | 7,189 | SP40 | 1,246 | 1,05 | 1,378 | 759,572 |
| | | AHXW50 | 1,207 | 0,45 | 25,759 | RV63 | 5,331 | 1,38 | 5,312 | 780,019 |
| 2027 | Kaartunen | PAS70 | 1,52 | 0,75 | 2,195 | FES25 | 0,491 | 0,21 | 0,564 | 781,65 |
| | | PAS95 | 2,904 | 0,75 | 4,565 | PG99 | 5,6 | 0,96 | 6,357 | 779,858 |
| | | AHXW95 | 2,21 | 0,9 | 60,983 | | | | | 840,841 |
| 2027 | Kamppilan haara | PAS50 | 7,34 | 0,3 | 10,987 | SP40 | 6,491 | 0,3 | 8,073 | 843,755 |
| | | AHXW95 | 0,282 | 0,6 | 7,788 | | | | | 851,543 |

Uudet yhteensä
joista maakaapeleita
ilmajohtoja

56,919
18,832
38,087

Purettavat yhteensä
joista maakaapeleita
ilmajohtoja

46,67
0
46,67

LIITE 3

**Hoisko säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat
2019-2022**

| Vuosi | Työmaa | Uudet kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Purettavat kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] |
|---------------|---------------------------|---------------------------|----------------|--------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|-------------------------------|---|
| 2019 | Pynttäri | AHXW150 | 0,17 | 0 | 5,552 | | | | | 5,552 |
| 2020 | Möksy alkupää | PAS50 | 2,09 | 1,85 | 1,441 | SP40 | 2,414 | 1,85 | 0,457 | 6,536 |
| | | AHXW50 | 0,405 | 1,85 | 8,498 | | | | | 15,034 |
| 2020 | Hoisko- Kyrönlähti | AHXW150 | 2,344 | 7,5 | 64,814 | RV63 | 2,04 | 7,5 | -29,779 | 109,627 |
| | | AHXW95 | 1,198 | 0,25 | 33,096 | SP40 | 1,243 | 0,25 | 1,46 | 141,263 |
| 2020 | Levijoen eroti- nasema | AHXW95 | 1,693 | 1,2 | 46,546 | SP40 | 0,193 | 1,2 | 0,149 | 187,66 |
| | | | | | | RV63 | 0,275 | 1,2 | 0,234 | 187,426 |
| 2021 | Möksy loppupää | AHXW50 | 2,981 | 0,175 | 63,64 | SP40 | 6,159 | 0,875 | 5,966 | 245,1 |
| | | PAS50 | 6,671 | 0,875 | 8,834 | FES25 | 4,648 | 0,35 | 5,197 | 248,737 |
| 2021- 2022 | Viinämäki-Pek- kola | AHXW150 | 4,167 | 0,46 | 135,999 | PG99 | 3,747 | 3,4 | -7,037 | 391,773 |
| | | AHXW150 | 4,945 | 4,293 | 153,405 | RV63 | 2,352 | 0,975 | 2,324 | 542,854 |
| | | | | | | SP40 | 2,885 | 0,475 | 3,251 | 539,603 |
| 2022 | Aitasaari | PAS70 | 5,351 | 0,375 | 7,891 | FES25 | 0,572 | 0,175 | 0,656 | 546,838 |
| | | AHXW95 | 0,497 | 0,3 | 13,729 | SP40 | 3,698 | 0,375 | 4,26 | 556,307 |
| | | | | | | RV63 | 1,091 | 0,3 | 1,343 | 554,964 |
| | | | | | | AHXW95 | 0,177 | 0 | 4,891 | 550,073 |

LIITE 4

**Hoisko säävarmuuden vuoksi uusittavat linjat
2023-2027**

| Vuosi | Työmaa | Uudet kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Purettavat kaapelit/ johdot | Pituus [km] | Virta [A] | Loistehon tuotto [kvar] | Loistehon tuotto verrattuna vuoteen 2019 [kvar] |
|-------|----------------------------|---------------------------|-------------|-----------|-------------------------|--------------------------------|-------------|-----------|-------------------------|---|
| 2023 | Honkakangas | PAS70 | 3,631 | 4,5 | -11,538 | SP40 | 3,231 | 4,25 | -13,263 | 551,798 |
| | | AHXW50 | 0,383 | 0,175 | 8,177 | RV63 | 0,593 | 4,675 | -2,908 | 562,883 |
| | | | | | | FES25 | 0,103 | 0,05 | 0,119 | 562,764 |
| 2023 | Luoma-aho | AHXW95 | 2,547 | 0,5 | 70,317 | SP40 | 0,884 | 0,55 | 0,976 | 632,105 |
| | | | | | | RV63 | 1,572 | 0,575 | 1,828 | 630,277 |
| 2024 | Karhula | PAS50 | 1,122 | 0,3 | 1,667 | RV63 | 3,984 | 0,625 | 4,565 | 627,379 |
| | | AHXW50 | 0,22 | 0,325 | 4,695 | SP40 | 1,718 | 0,3 | 2,005 | 630,069 |
| | | AHXW150 | 3,856 | 0,625 | 125,788 | AHXW150 | 0,17 | 0 | 5,552 | 750,305 |
| 2026 | Kultavuoren haara | PAS70 | 5,347 | 0,625 | 7,576 | SP40 | 1,343 | 0,4 | 1,54 | 756,341 |
| | | | | | | RV63 | 3,934 | 0,55 | 4,606 | 751,735 |
| | | | | | | FES25 | 0,799 | 0,275 | 0,905 | 750,83 |
| 2026 | Paalijärvi-Teer-inevankytö | AHXW95 | 0,329 | 0,425 | 9,085 | SP40 | 0,458 | 0,425 | 0,522 | 759,393 |
| | | PAS70 | 2,253 | 6,875 | -21,234 | RV63 | 1,995 | 7 | -25,045 | 763,204 |
| 2027 | Unkan haara | PAS50 | 3,838 | 0,075 | 5,779 | SP40 | 2,933 | 0,075 | 3,495 | 765,488 |

Uudet yhteensä
joista maakaapeleita
ilmajohtoja

56,038
25,735
30,303

Purettavat yhteensä
joista maakaapeleita
ilmajohtoja

55,211
0,347
54,864

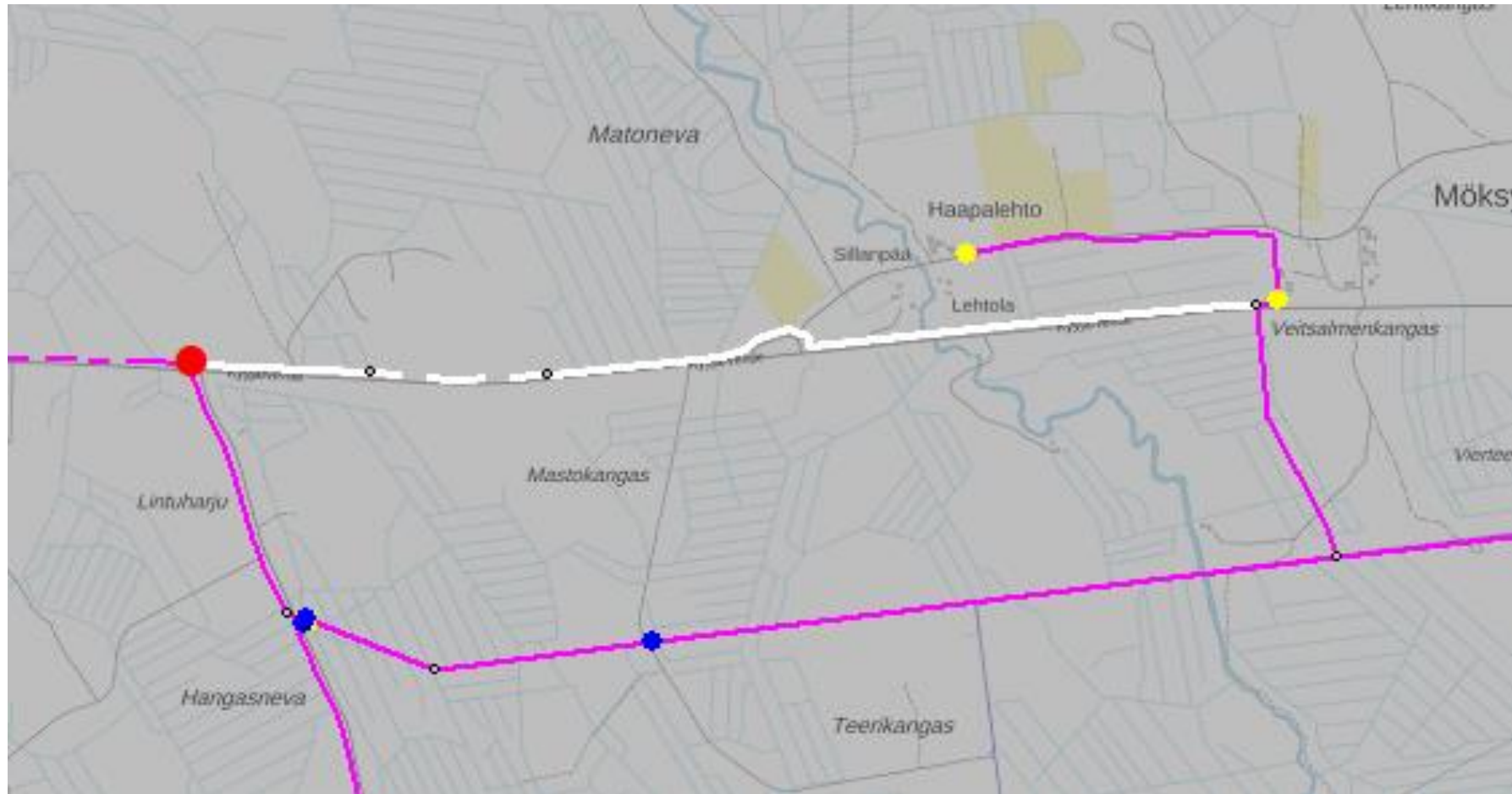
LIITE 5

Pynttari 2019



LIITE 6

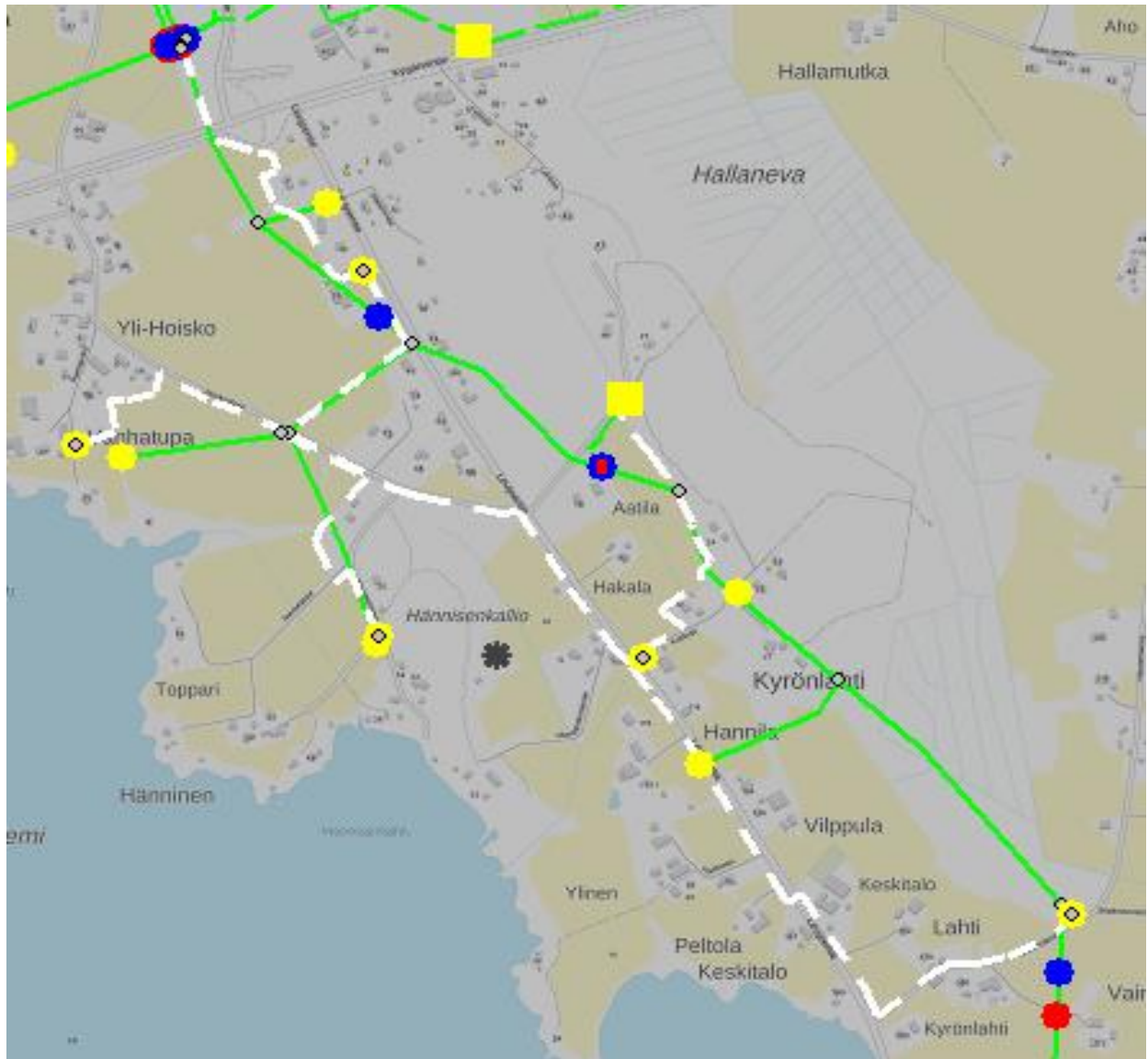
Möksy alkupää 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 7

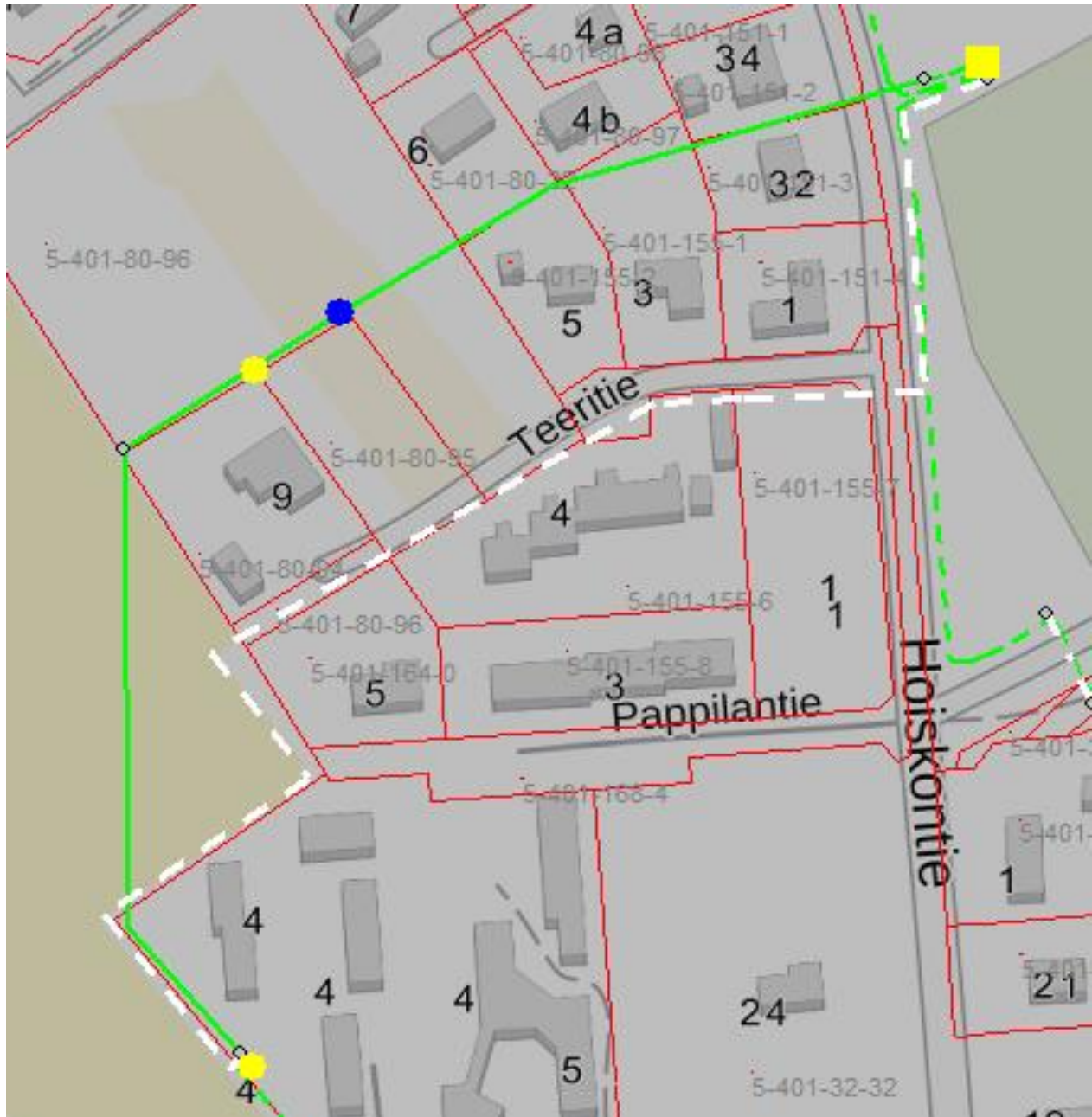
Hoisko-Kyrönlahti 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 8

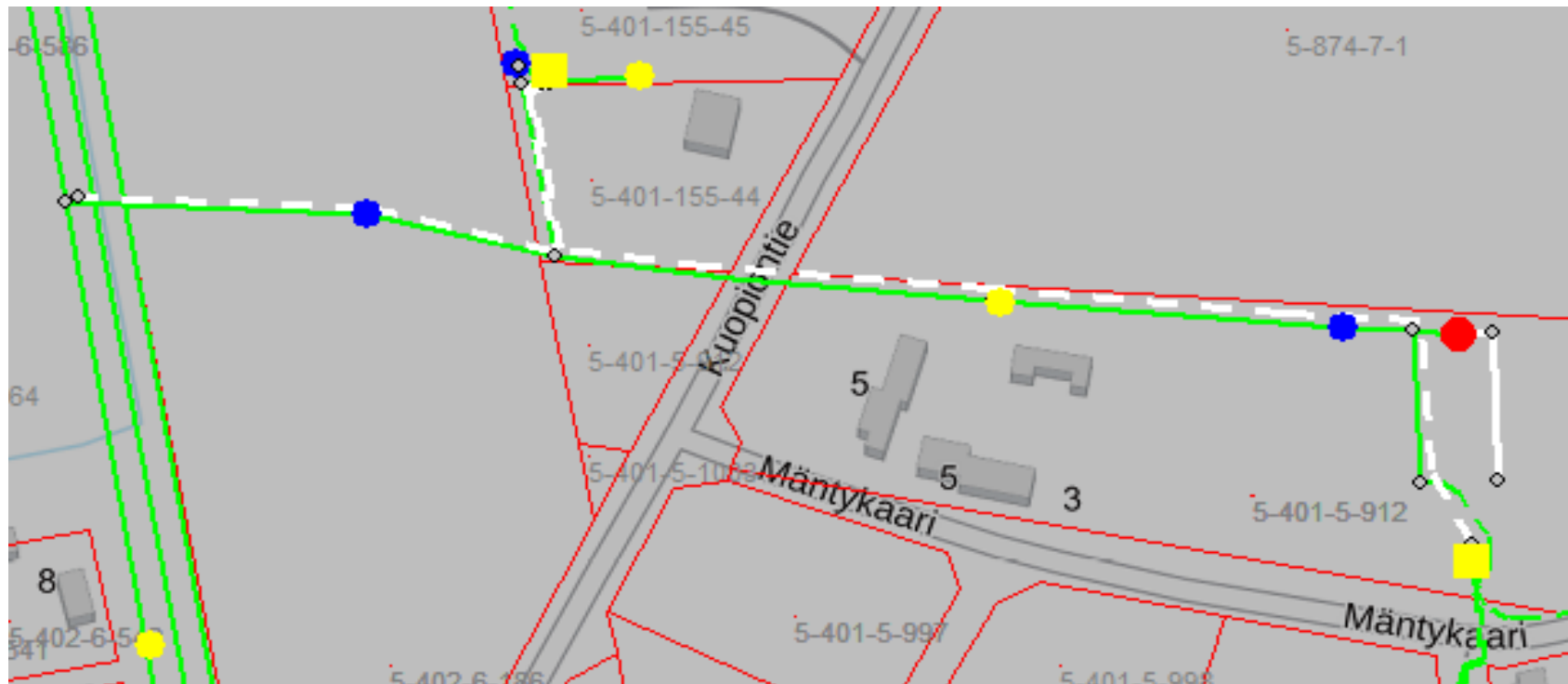
Koulukeskus-Kaupinkartano 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 9

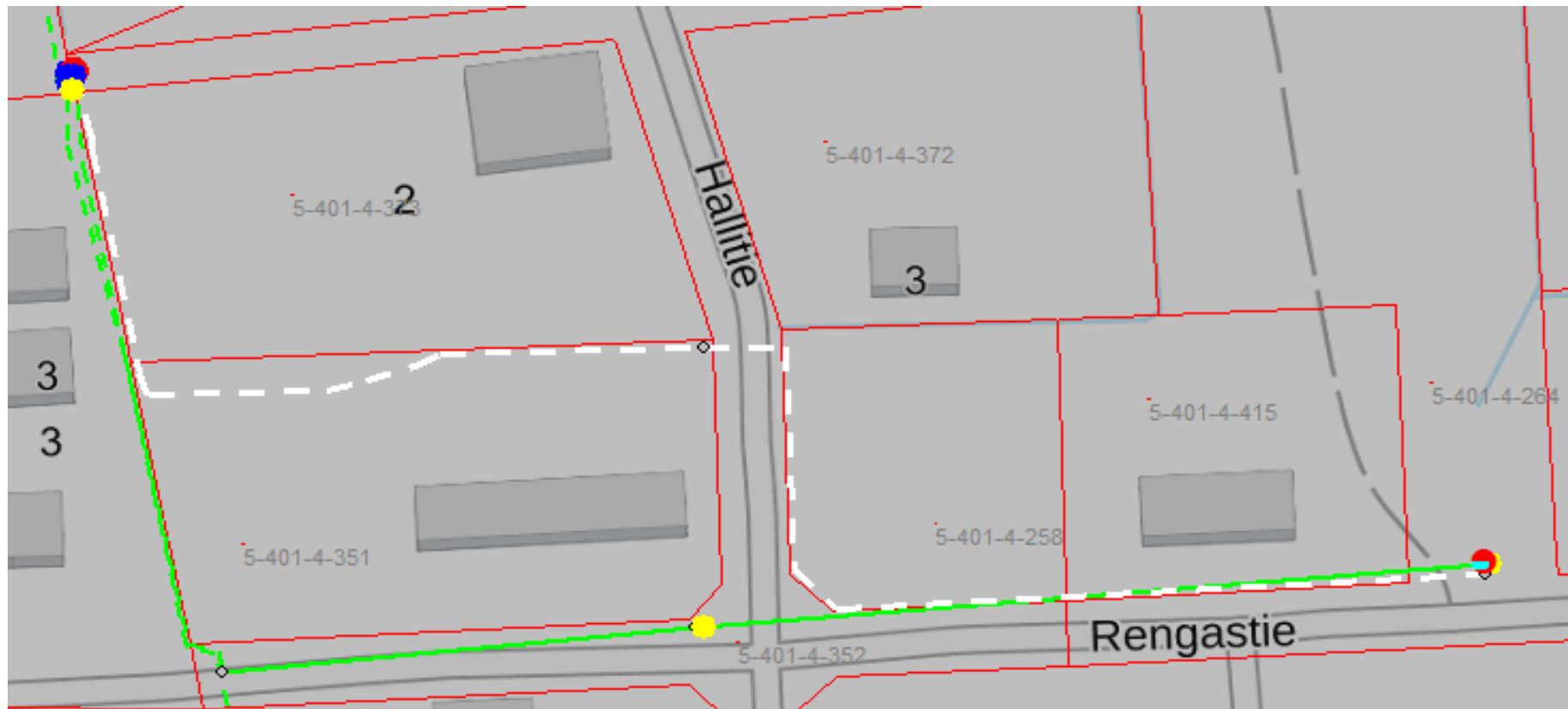
Hautasenkäyttö-Mäntykaari 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 10

Rengastie 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 11

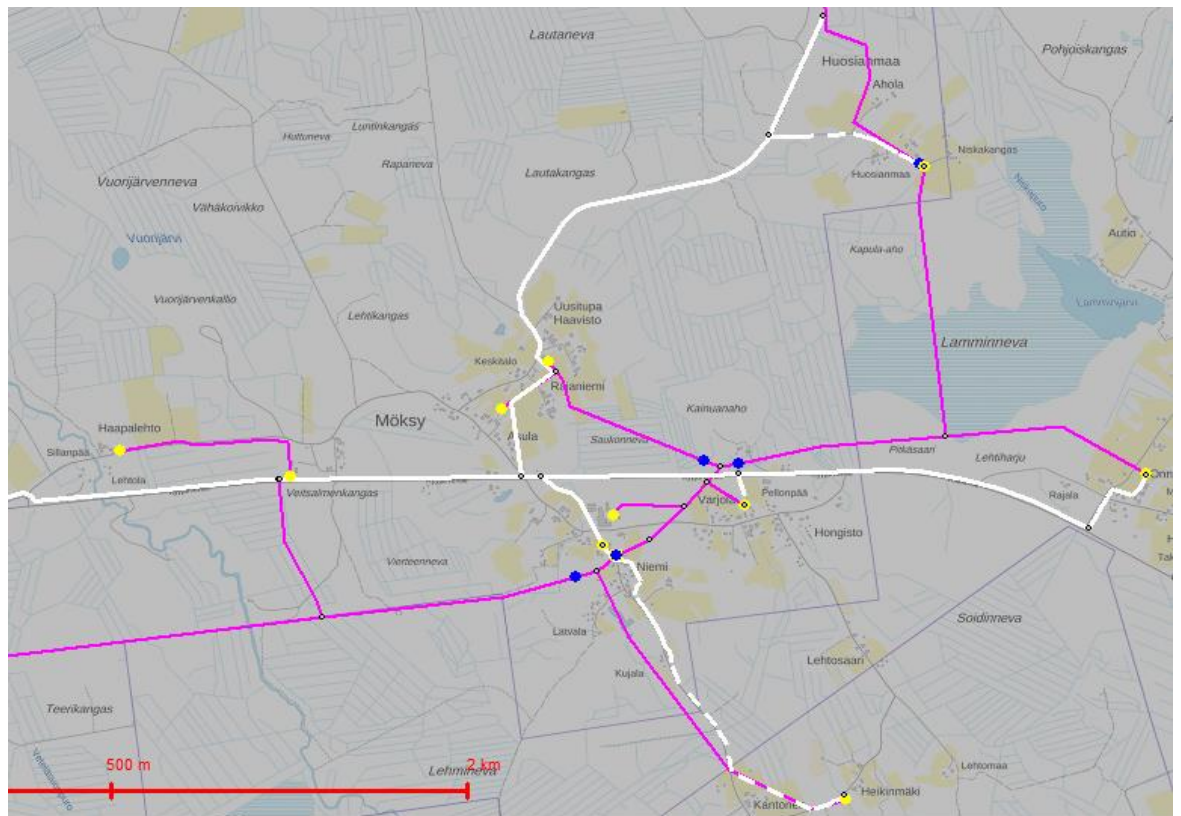
Levijoen erotinasema 2020



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 12

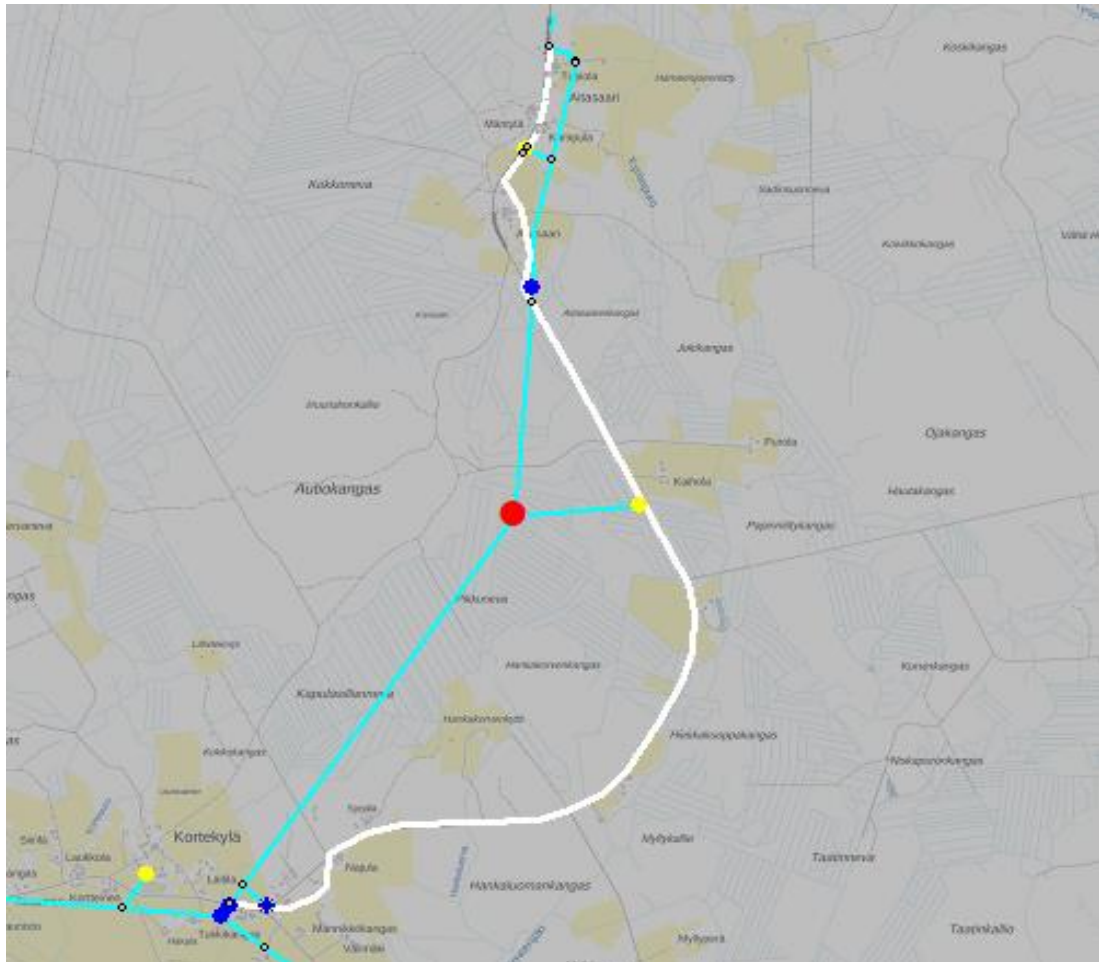
Möksy loppupää 2021



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 14

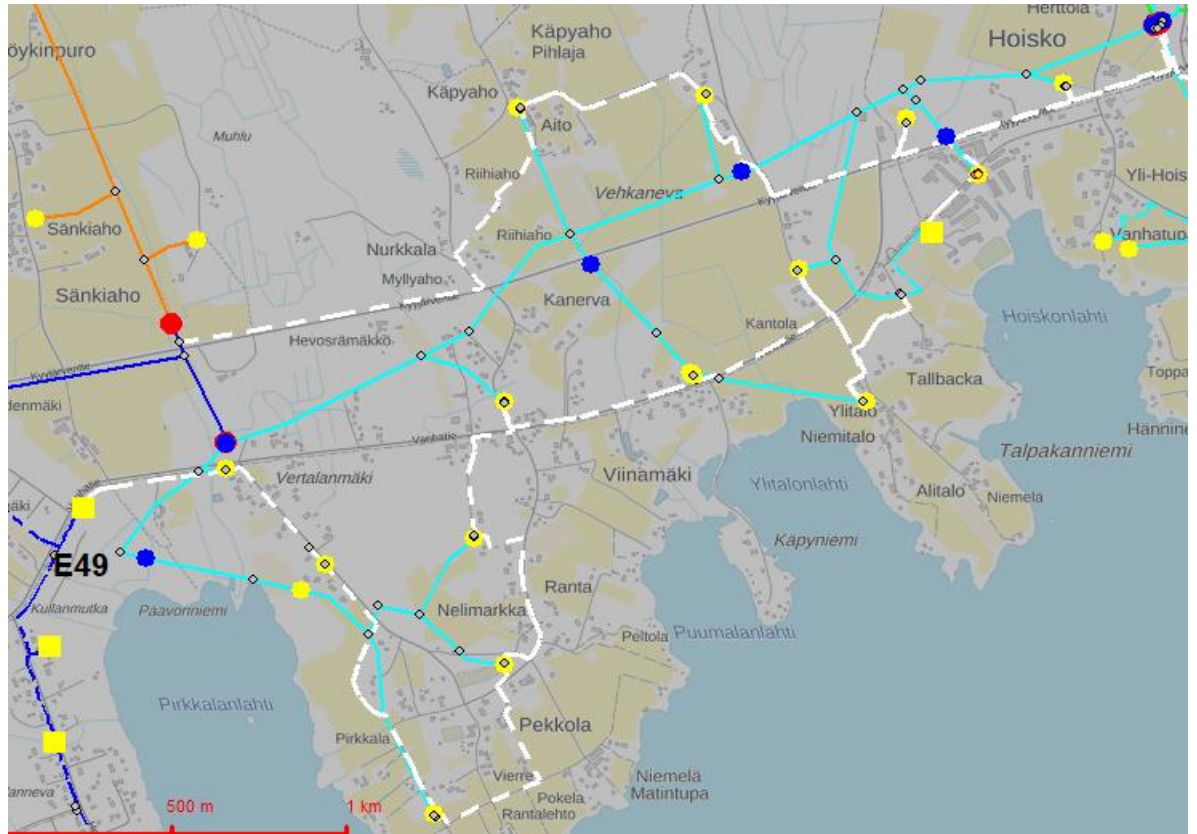
Aitasaari 2022



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 15

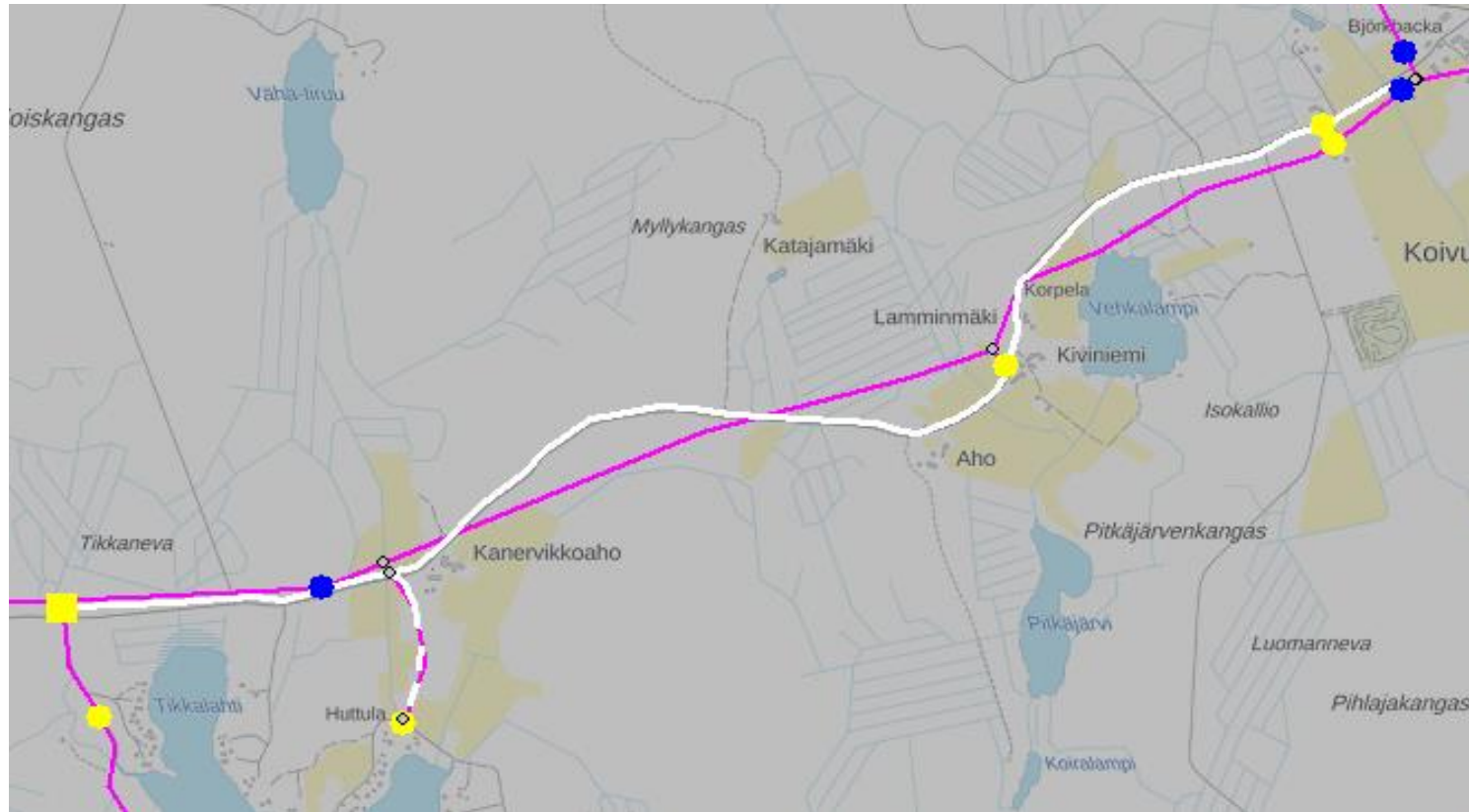
Viinämäki-Pekkola 2021-2022



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 16

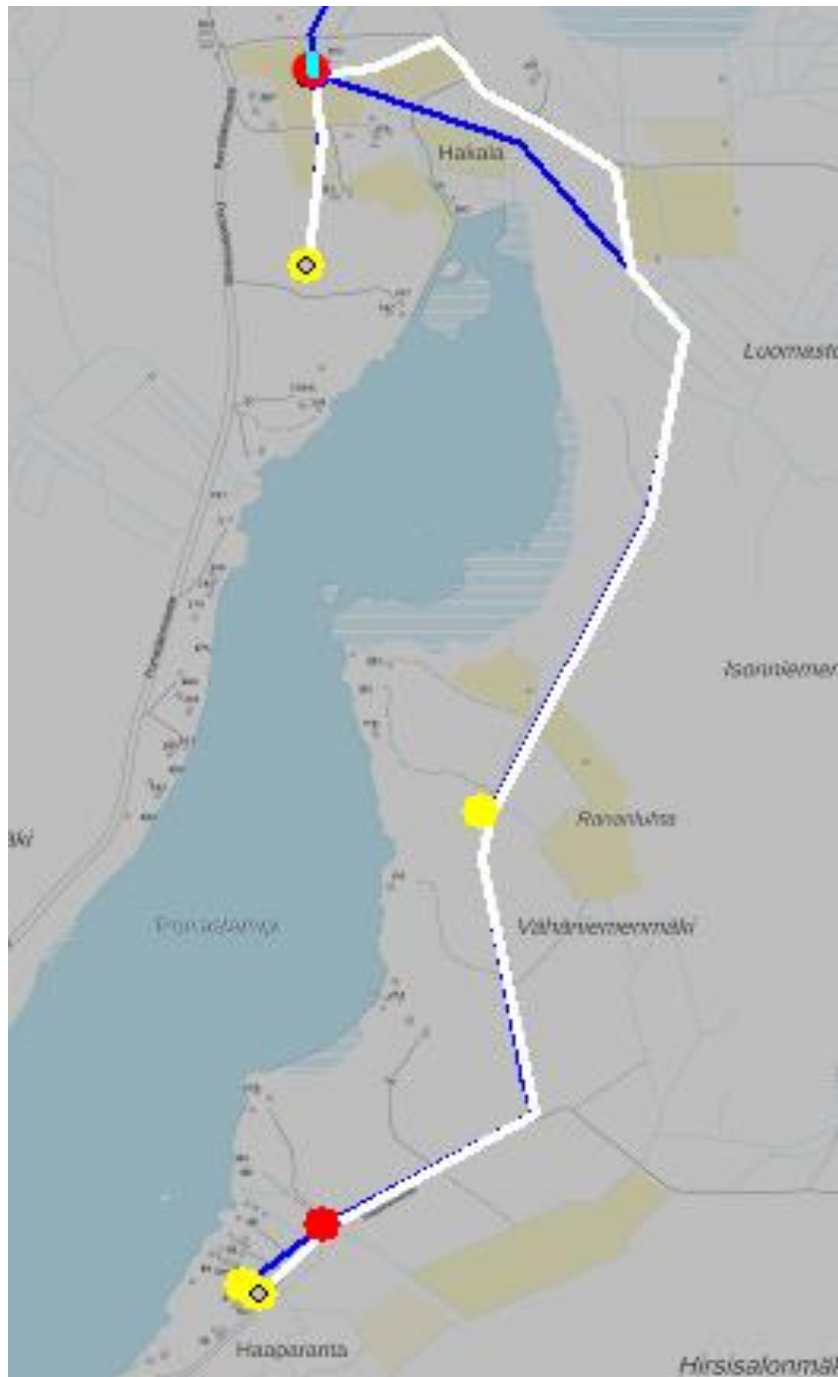
Honkakangas 2023



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 17

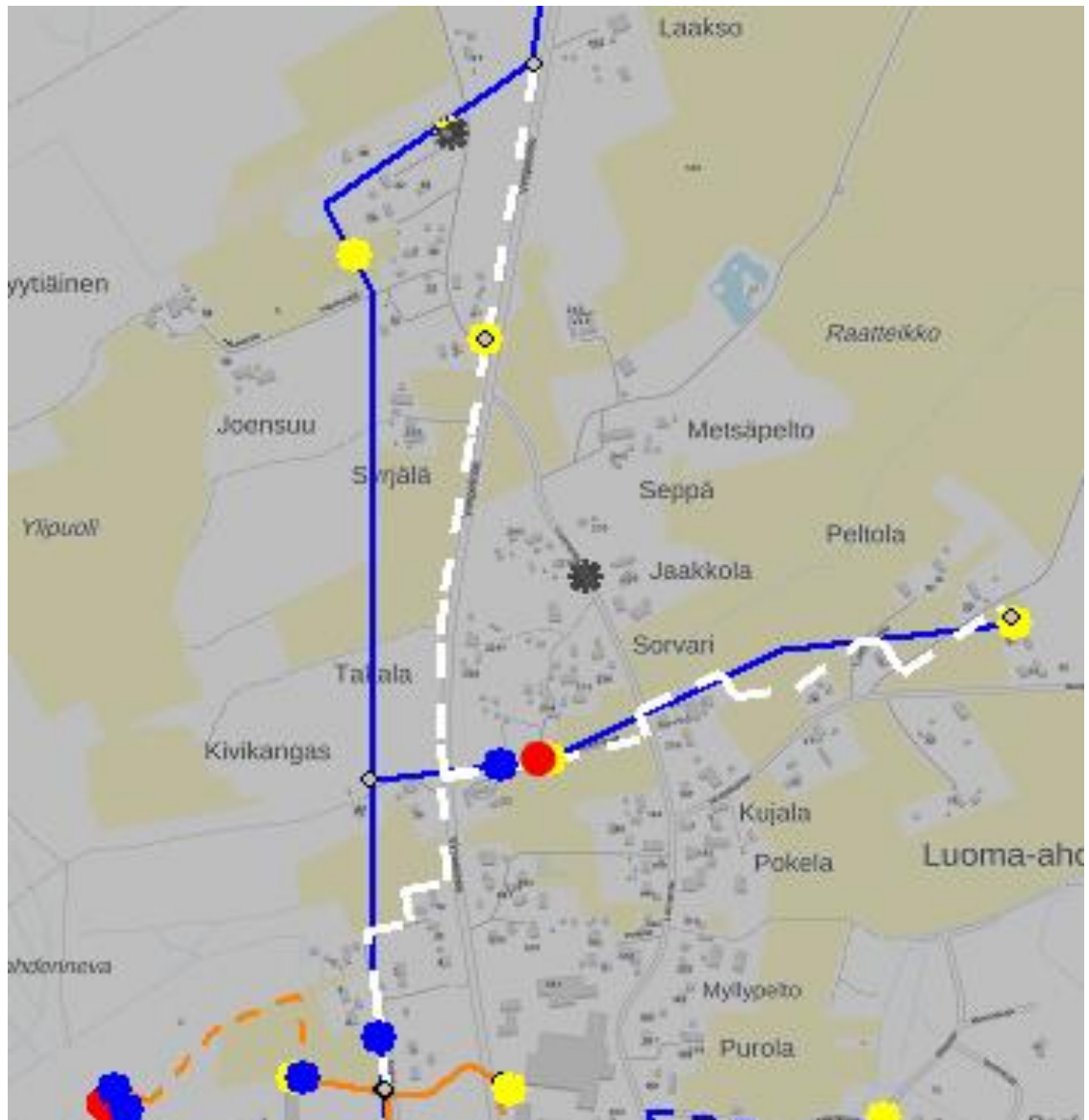
Porraslampi 2023



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 18

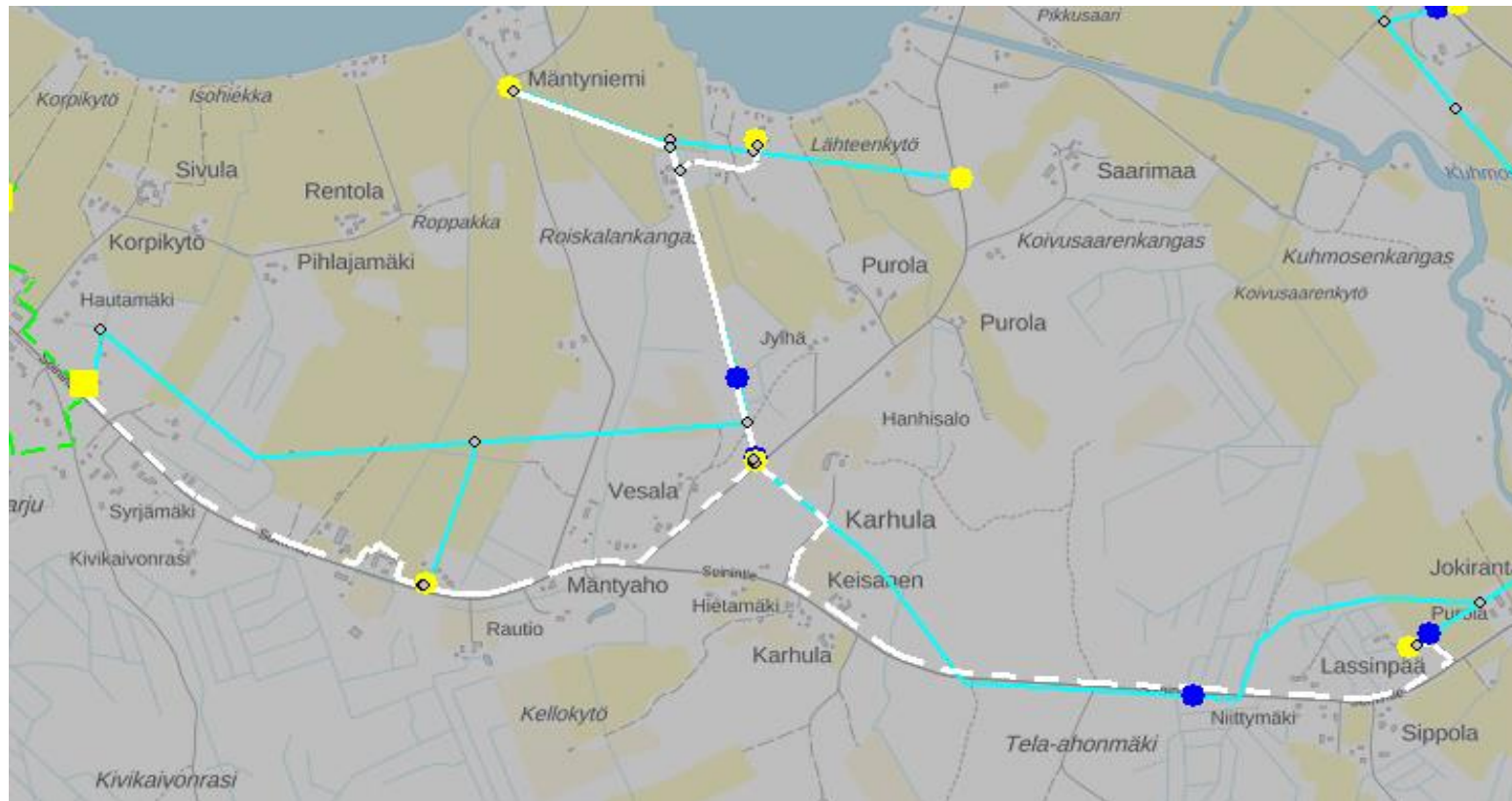
Luoma-aho 2023



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 19

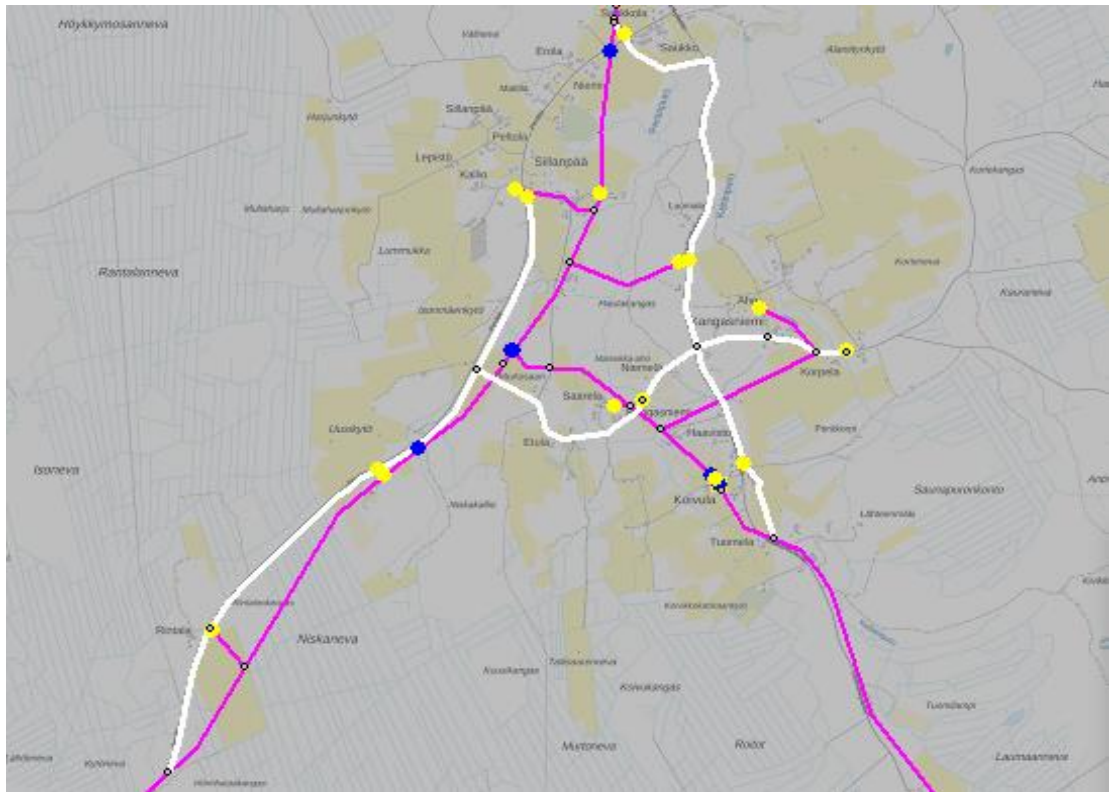
Karhula 2024



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 20

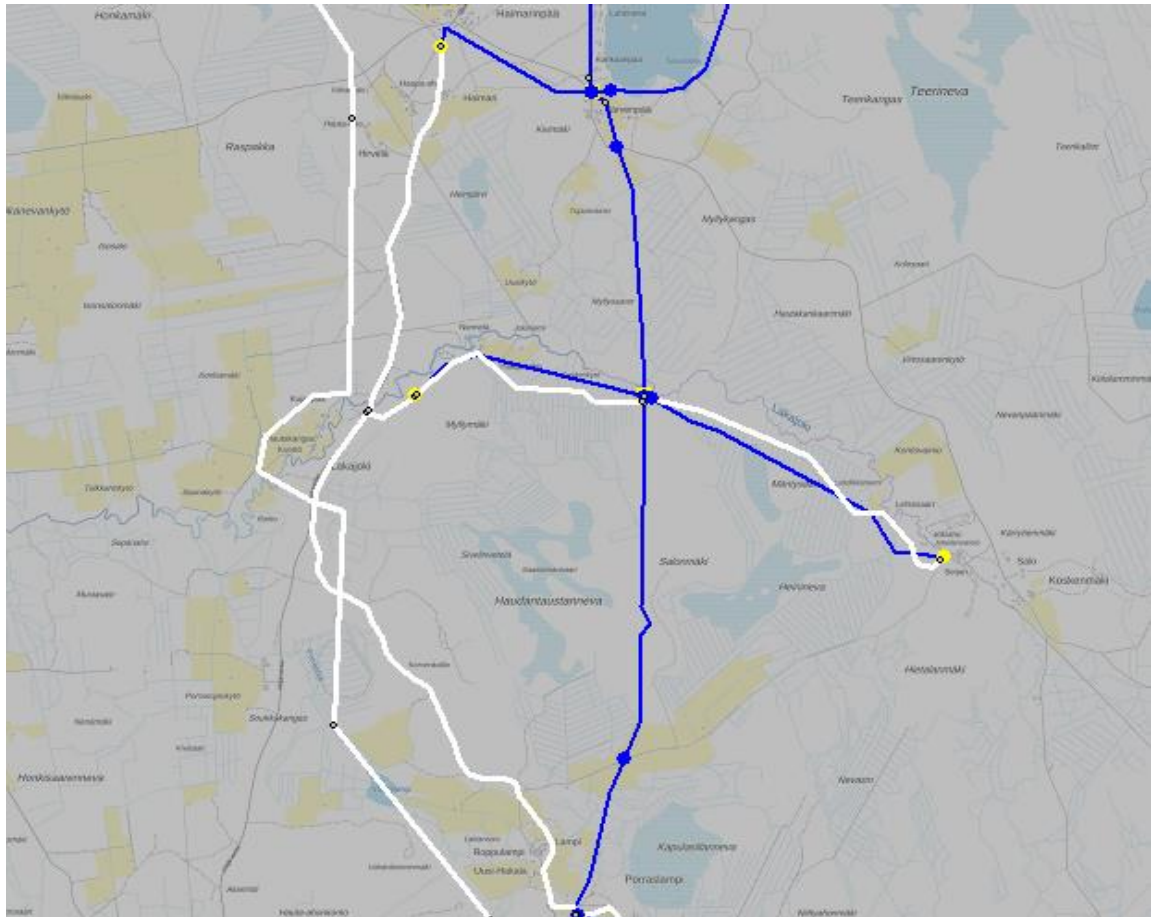
Saukonkylä 2024



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 21

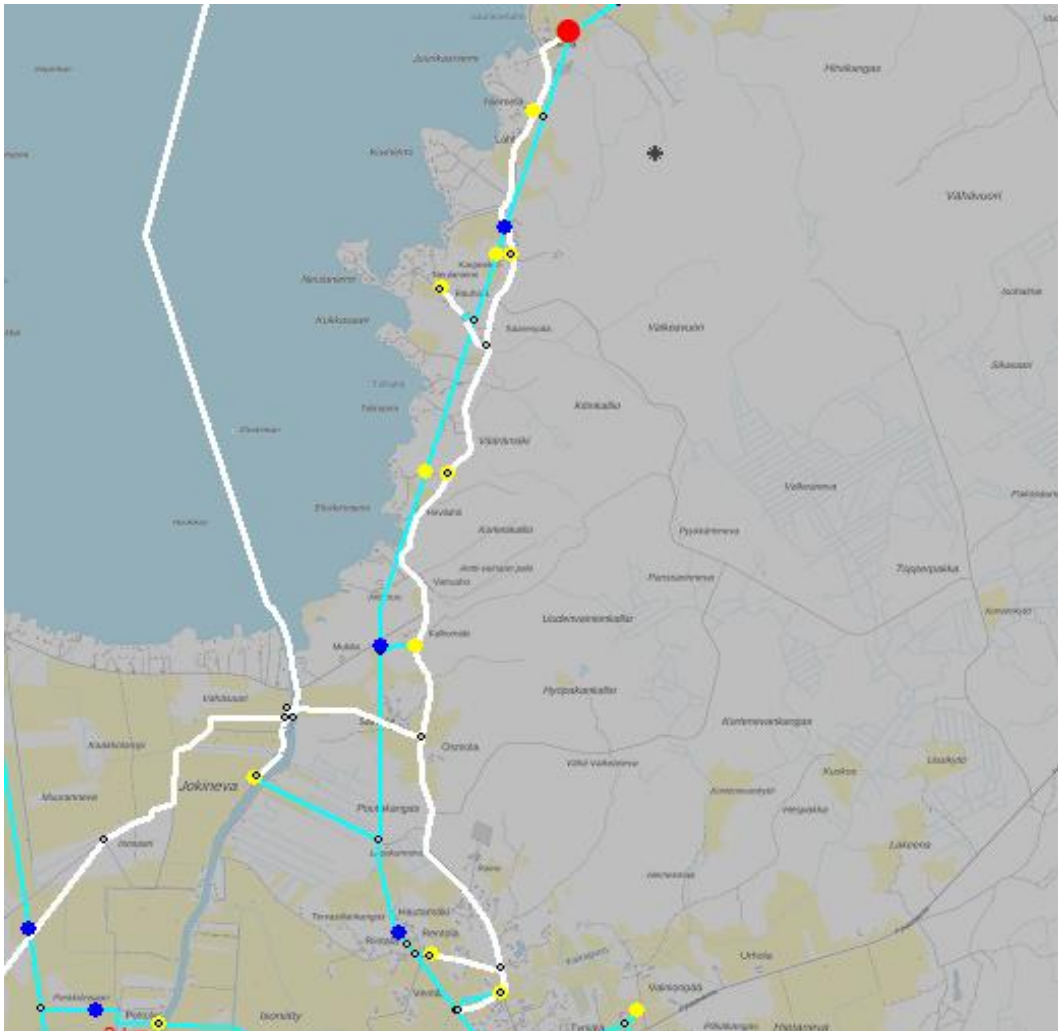
Haimari-Porraslampi 2025



Uusi tuleva linja valkoisella. Myös pitäjän raja valkoisella vasemmalla.

LIITE 22

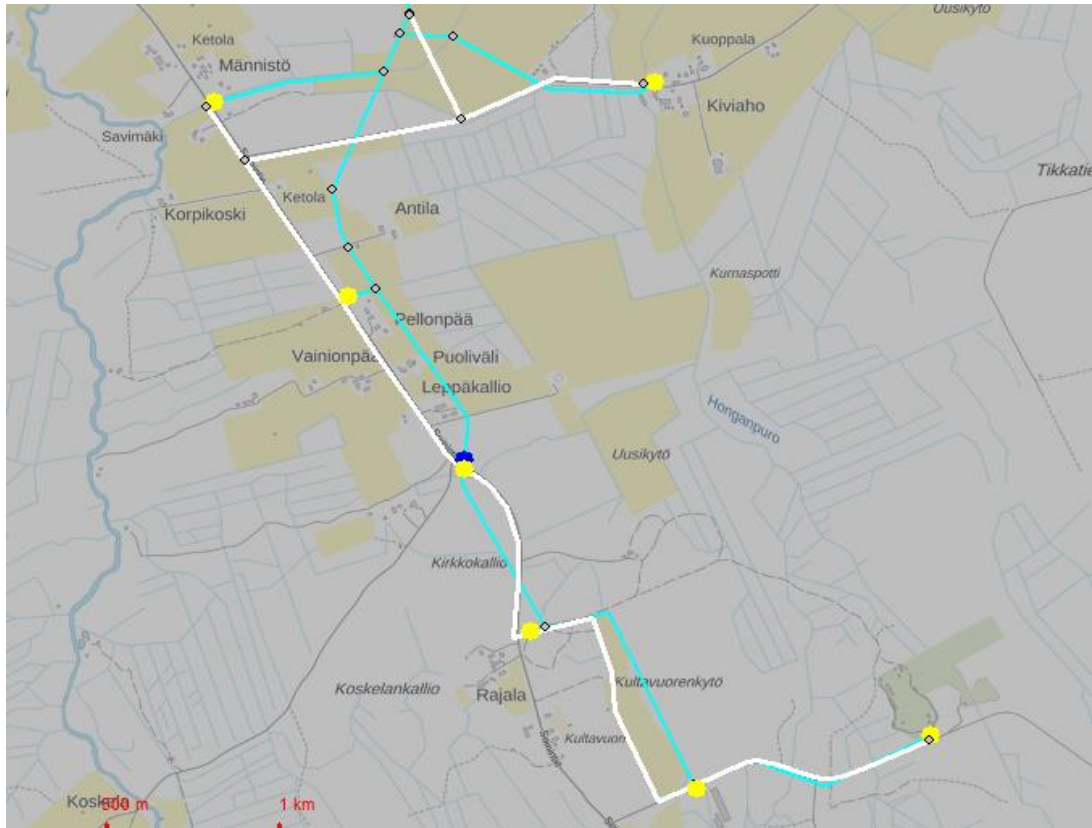
Isoniemi 2025



Uusi tuleva linja valkoisella. Myös pitäjän raja valkoisella vasemmalla.

LIITE 23

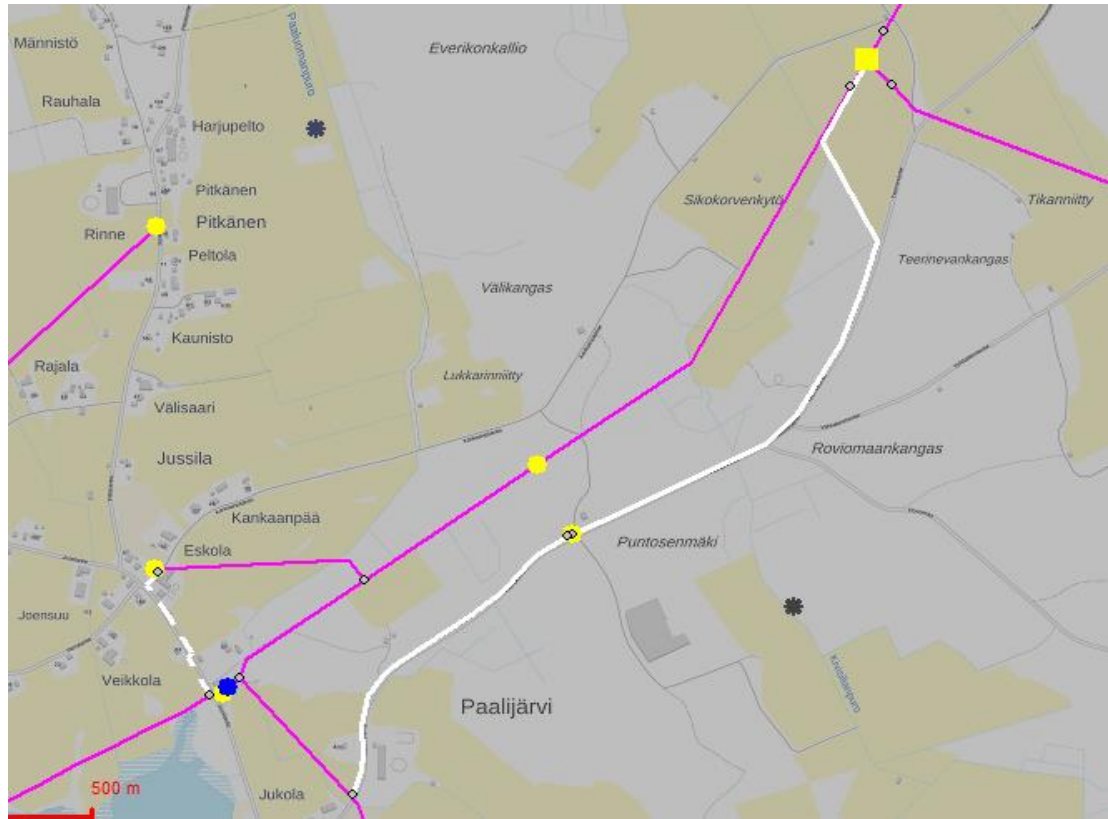
Kultavuoren haara 2026



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 24

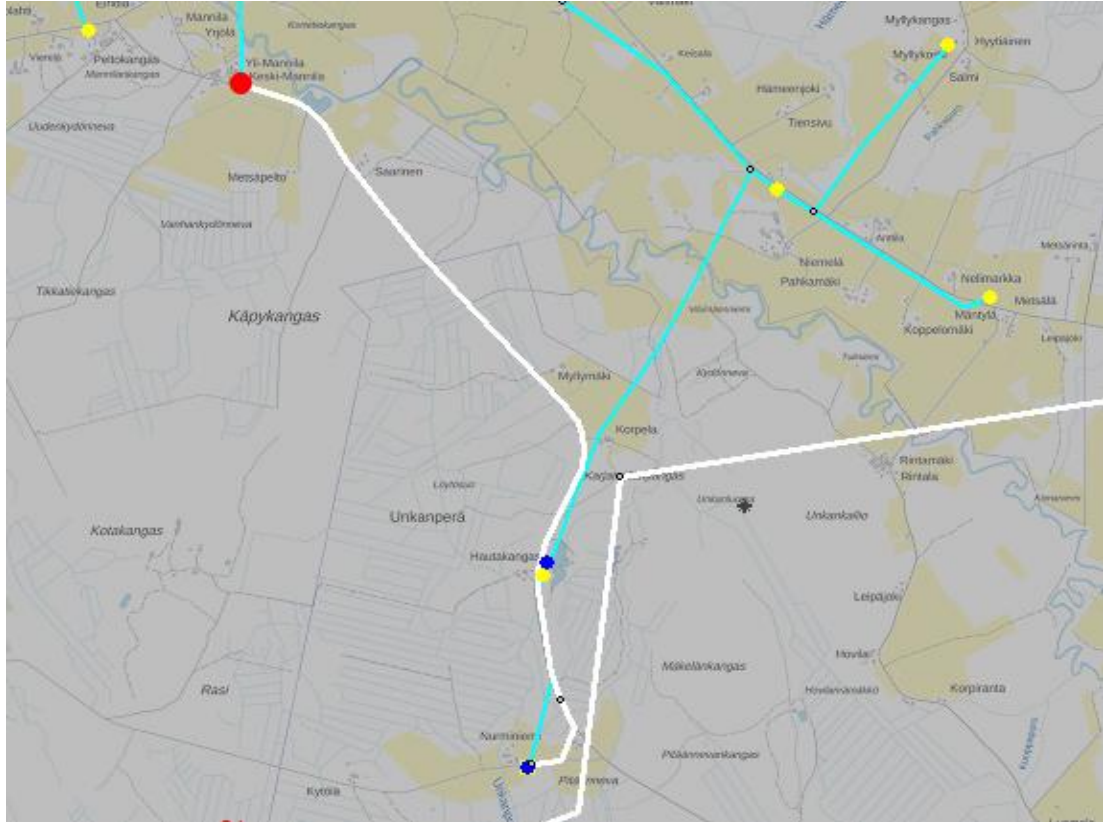
Paalijärvi-Teerinevankytö 2026



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 25

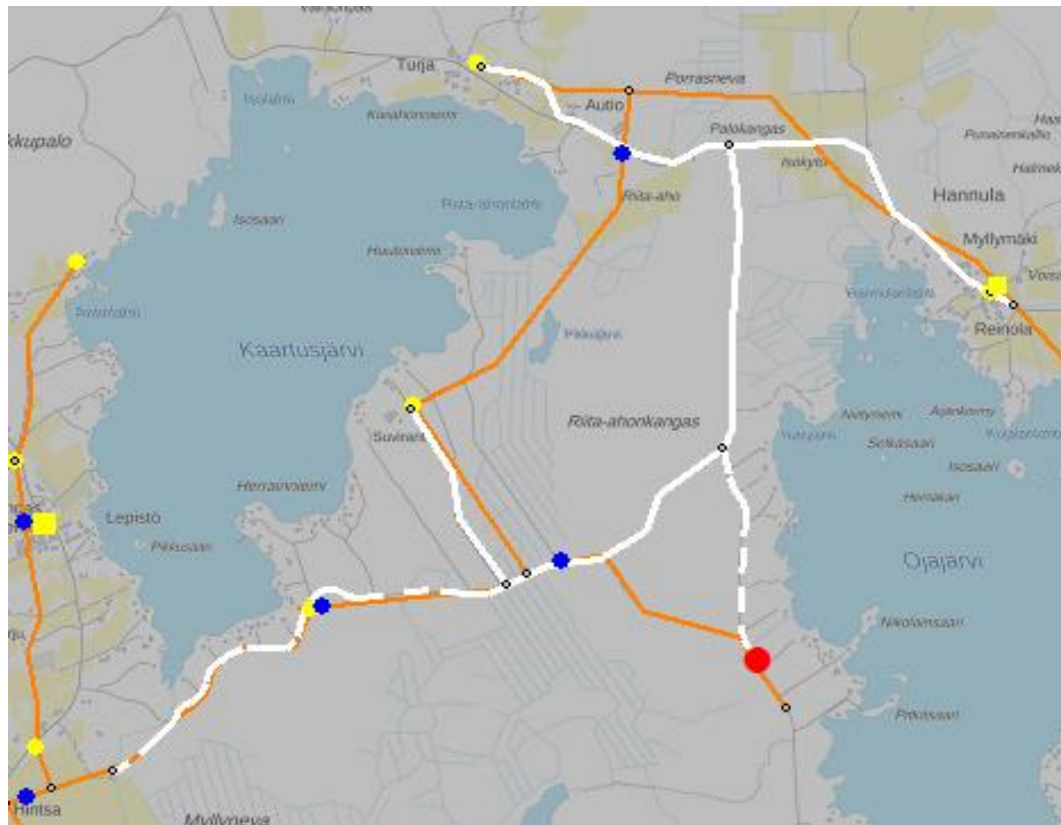
Unkan haara 2027



Uusi tuleva linja valkoisella. Myös pitäjän raja valkoisella oikealla.

LIITE 26

Kaartunen 2027



Uusi tuleva linja valkoisella.

LIITE 28

Ilmajohtojen arvoja 1

Sivu 36(72)

| Johdin | Vaiheresistanssi (DC) | | Vaiho-reaktanssi | Maakapa-sitanssi | Käyttöka-pasitanssi | Suurin sallittu kuor-mitusvirta | Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta | | Jäähty-misaika-vakio τ min |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | Rv Ω / km | Xv Ω / km | | | | | Cm μF /km | Ck μF /km | |
| | +20 °C 1) | +40 °C 2) | 3) | 4) | 3) | 5) | T1-liittimet | T2-liittimet | |
| Cu 16 | 1,14 | 1,23 | 0,412 | 0,0061 | 0,0088 | 145 | 2,2 | 2,3 | 3 |
| Cu 25 | 0,718 | 0,774 | 0,398 | 0,0061 | 0,0092 | 195 | 3,5 | 3,7 | 4 |
| Cu 35 | 0,526 | 0,567 | 0,387 | 0,0061 | 0,0094 | 240 | 4,8 | 5,1 | 5 |
| Cu 50 | 0,365 | 0,394 | 0,377 | 0,0061 | 0,0097 | 305 | 6,9 | 7,3 | 7 |
| Cu 70 | 0,266 | 0,287 | 0,365 | 0,0061 | 0,010 | 370 | 9,5 | 10,1 | 9 |
| Cu 95 | 0,195 | 0,210 | 0,355 | 0,0061 | 0,010 | 465 | 13,1 | 13,8 | 11 |
| Cu 120 | 0,150 | 0,162 | 0,348 | 0,0061 | 0,011 | 535 | 17,1 | 18 | 13 |
| Al 25 | 1,16 | 1,25 | 0,397 | 0,0061 | 0,0092 | 170 | 2,1 | - | 3 |
| Al 40 | 0,725 | 0,783 | 0,382 | 0,0061 | 0,0095 | 230 | 3,5 | - | 4 |
| Al 62 | 0,459 | 0,496 | 0,368 | 0,0061 | 0,0099 | 305 | 5,6 | - | 6 |
| Al 99 | 0,288 | 0,311 | 0,354 | 0,0061 | 0,010 | 415 | 8,7 | - | 8 |
| Al 132 | 0,218 | 0,236 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 495 | 11,6 | - | 10 |
| Al 178 | 0,162 | 0,175 | 0,335 | 0,0061 | 0,011 | 600 | 15,6 | - | 13 |
| Al 201 | 0,143 | 0,155 | 0,331 | 0,0061 | 0,011 | 645 | 17,7 | - | 15 |
| AlMgSi 25 | 1,37 | 1,48 | 0,397 | 0,0061 | 0,0092 | 155 | 2,5 | - | 3 |
| AlMgSi 40 | 0,834 | 0,901 | 0,382 | 0,0061 | 0,0095 | 210 | 3,5 | 3,7 | 4 |
| AlMgSi 62 | 0,527 | 0,569 | 0,368 | 0,0061 | 0,0099 | 285 | 5,5 | 5,8 | 6 |
| AlMgSi 99 | 0,332 | 0,359 | 0,354 | 0,0061 | 0,010 | 390 | 8,8 | 9,3 | 8 |
| AlMgSi 132 | 0,251 | 0,271 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 460 | 11,7 | 12,4 | 10 |
| AlMgSi 178 | 0,188 | 0,203 | 0,335 | 0,0061 | 0,011 | 560 | 15,8 | 16,7 | 13 |
| AlMgSi/Fe 21/4 Fersomal | 1,56 | 1,68 | 0,398 | 0,0061 | 0,0092 | 145 | 1,9 | 2 | 3 |
| AlMgSi/Fe 106/25 | 0,317 | 0,343 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 400 | 9,4 | 9,9 | 10 |
| Al/Fe 7/9 Bantam | 4,31 | 4,66 | 0,413 | 0,0061 | 0,0088 | 80 | 0,6 | 0,7 | 2 |
| Al 11/14 Magpic | 2,71 | 2,93 | 0,397 | 0,0061 | 0,0092 | 110 | 1,1 | 1,2 | 3 |
| Al/Fe 21/4 Swan | 1,35 | 1,46 | 0,398 | 0,0061 | 0,0092 | 155 | 2 | 2,1 | 3 |
| Al/Fe 34/6 Sparrow | 0,847 | 0,915 | 0,383 | 0,0061 | 0,0095 | 210 | 3,2 | 3,3 | 4 |
| Al/Fe 42/25 Savo | 0,682 | 0,737 | 0,365 | 0,0061 | 0,010 | 250 | 4 | 4,2 | 7 |
| Al/Fe 54/9 Raven | 0,535 | 0,578 | 0,368 | 0,0061 | 0,010 | 280 | 5,1 | 5,3 | 6 |
| Al/Fe 75/14 Loviisa | 0,380 | 0,411 | 0,357 | 0,0061 | 0,010 | 335 | 7,1 | 7,5 | 9 |
| Al/Fe 85/14 Pigeon | 0,337 | 0,364 | 0,354 | 0,0061 | 0,010 | 360 | 8 | 8,4 | 9 |
| Al/Fe 89/52 Dotterel | 0,323 | 0,349 | 0,342 | 0,0061 | 0,011 | 400 | 8,4 | 8,8 | 13 |
| Al/Fe 93/39 Imatra | 0,310 | 0,335 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 405 | 8,7 | 9,2 | 12 |
| Al/Fe 106/25 Suursevo | 0,279 | 0,301 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 430 | 10 | 10,5 | 10 |
| Al/Fe 108/23 Vaasa | 0,266 | 0,287 | 0,344 | 0,0061 | 0,011 | 420 | 10 | 10,5 | 10 |
| Al/Fe 148/68 Kuopio | 0,196 | 0,212 | 0,328 | 0,0061 | 0,011 | 550 | 13,9 | 14,6 | 16 |
| Al/Fe 152/25 Ostrich | 0,190 | 0,205 | 0,335 | 0,0061 | 0,011 | 550 | 14,3 | 15 | 15 |
| Al/Fe 305/39 Duck | 0,095 | 0,103 | 0,314 | 0,0061 | 0,012 | 845 | 28,7 | 30,2 | 22 |

Huomautukset 1) 2) 3) 4) ja 5), katso seuraava sivu.

10 kV JA 20 kV ILMajohtojen JOHTOTIETOJA

1(2)

LIITE 1.1

SA 5:94

LIITE 29

Ilmajohtojen arvoja 2

| Johdin | Vaiheresistanssi (DC) | | Vaihe-reaktanssi | Maakapasitanssi | Käyttökapasitanssi | Suurin sallittu kuormitusvirta | Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta | | Jäähtymisaikavakio τ min |
|--------------------|-----------------------|-----------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | Rv Ω / km | | | | | | Xv Ω / km | Cm μ F/km | |
| | +20 °C 1) | +40 °C 2) | 3) | 4) | 3) | 5) | T1-liittimet | T2-liittimet | |
| PAS 35 | 0,986 | 1,065 | 0,324 | 0,005 | 0,011 | 200 | - | 3,2 | 7 |
| PAS 50 | 0,720 | 0,778 | 0,312 | 0,005 | 0,012 | 245 | - | 4,3 | 8 |
| PAS 70 | 0,493 | 0,533 | 0,302 | 0,005 | 0,012 | 310 | - | 6,4 | 10 |
| PAS 95 | 0,363 | 0,392 | 0,292 | 0,005 | 0,013 | 370 | - | 8,6 | 13 |
| PAS 120 | 0,288 | 0,311 | 0,284 | 0,005 | 0,013 | 430 | - | 11 | 15 |
| PAS 150 | 0,236 | 0,255 | 0,277 | 0,005 | 0,013 | 485 | - | 13,5 | 18 |
| PAS 185 | 0,188 | 0,203 | 0,270 | 0,005 | 0,014 | 560 | - | 17 | 20 |
| 20 kV RIIPPUJOHDOT | | | | | | | | | |
| SAMKA 3x70 | 0,446 | 0,482 | 0,140 | 0,21 | 0,21 | 180 | 5 | 5 | 42 |
| SAMKA 3x120 | 0,256 | 0,277 | 0,130 | 0,25 | 0,25 | 250 | 8,5 | 8,5 | 60 |
| SAMKA 3x185 | 0,168 | 0,182 | 0,120 | 0,30 | 0,30 | 310 | 13 | 13 | 65 |
| SAMI 3x67 | 0,428 | 0,462 | 0,272 | - | - | 250 | 6 | 6 | 20 |
| SAMI 3x107 | 0,268 | 0,290 | 0,257 | - | - | 378 | 9,7 | 9,7 | 20 |
| SAXKA 3x70 | 0,446 | 0,482 | 0,140 | 0,18 | 0,18 | 235 | 5,7 | 6,7 | 42 |
| SAXKA 3x120 | 0,256 | 0,277 | 0,130 | 0,23 | 0,23 | 330 | 9,8 | 11,4 | 60 |
| SAXKA 3x185 | 0,168 | 0,182 | 0,120 | 0,26 | 0,26 | 425 | 15 | 17,5 | 65 |
| AHMCMKK 3x16 | 1,89 | 2,04 | 0,147 | 0,12 | 0,12 | 60 | 0,94 | 0,94 | 18 |
| AHMCMKK 3x25 | 1,21 | 1,31 | 0,135 | 0,14 | 0,14 | 78 | 1,46 | 1,46 | 20 |
| AHMCMKK 3x35 | 0,867 | 0,937 | 0,129 | 0,15 | 0,15 | 96 | 2,05 | 2,05 | 25 |
| AHMCMKK 3x50 | 0,608 | 0,657 | 0,119 | 0,17 | 0,17 | 117 | 2,9 | 2,9 | 30 |
| AHMCMKK 3x70 | 0,435 | 0,470 | 0,116 | 0,18 | 0,18 | 144 | 4,1 | 4,1 | 35 |
| AHMCMKK 3x95 | 0,322 | 0,348 | 0,110 | 0,20 | 0,20 | 171 | 5,6 | 5,6 | 55 |

10 kV JA 20 kV ILMASJOHTOJEN JOHTOTIETOJA

LIITE 30

Maakaapelien arvoja 1

| Johdin | Vaiheresistanssi | | Vaihe- reaktanssi Xv Ω/ km | Maakapa- sitanssi Cm μF/km | Käyttöka- pasitanssi Ck μF/km | Suurin sallittu kuormitusvirta | | Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta | | Jäähdytys- aikavakio τ min | Maasulku- virta Ie A |
|---------------------|------------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|----------|---------------------------------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Rv Ω/ km | | | | | In A | Ik kA | Ik kA | | | |
| | +20 °C 1) | +40 °C 2) | | | | | | | Ilmassa 3) | | |
| AHMCMK 3x70 | 0,444 | 0,480 | 0,118 | 0,18 | 0,18 | 150 | 170 | 5,4 | 5,4 | 35 | 2,1 |
| AHMCMK 3x120 | 0,254 | 0,274 | 0,107 | 0,21 | 0,21 | 200 | 225 | 9,1 | 9,1 | 55 | 2,4 |
| AHMCMK 3x185 | 0,165 | 0,178 | 0,097 | 0,24 | 0,24 | 265 | 285 | 14,1 | 14,1 | 80 | 2,7 |
| AHMCMK 3x300 | 0,103 | 0,111 | 0,091 | 0,28 | 0,28 | 350 | 375 | 22,1 | 22,1 | 105 | 3,2 |
| AHMDMK 3x70 | 0,446 | 0,482 | 0,127 | 0,18 | 0,18 | 150 | 170 | 5,4 | 5,4 | 30 | 2,1 |
| AHMDMK 3x120 | 0,256 | 0,277 | 0,111 | 0,21 | 0,21 | 200 | 225 | 9,1 | 9,1 | 50 | 2,4 |
| AHMDMK 3x185 | 0,169 | 0,183 | 0,100 | 0,24 | 0,24 | 265 | 285 | 14,1 | 14,1 | 75 | 2,7 |
| AHMDMK 3x300 | 0,105 | 0,113 | 0,101 | 0,28 | 0,28 | 350 | 375 | 22,1 | 22,1 | 100 | 3,2 |
| AHXAMK-W 3x70 | 0,446 | 0,482 | 0,138 | 0,18 | 0,18 | 235 | 200 | 5,7 | 6,7 | 42 | 2,1 |
| AHXAMK-W 3x120 | 0,256 | 0,277 | 0,129 | 0,23 | 0,23 | 325 | 285 | 9,8 | 11,4 | 47 | 2,6 |
| AHXAMK-W 3x185 | 0,169 | 0,183 | 0,119 | 0,26 | 0,26 | 425 | 330 | 15 | 17,5 | 53 | 3,0 |
| AHXAMK-W 3x240 + 70 | 0,130 | 0,140 | 0,116 | 0,30 | 0,30 | 510 | 375 | 19,4 | 22,6 | 60 | 3,4 |
| AHXAMK-W 3x300 | 0,106 | 0,115 | 0,113 | 0,32 | 0,32 | 565 | 435 | 24,2 | 28,2 | 65 | 3,7 |
| AHXCMK 3x1x70 | 0,456 | 0,493 | 0,190 | 0,18 | 0,18 | 255 | 215 | 5,7 | 6,7 | 25 | 2,1 |
| AHXCMK 3x1x120 | 0,266 | 0,287 | 0,180 | 0,23 | 0,23 | 350 | 280 | 9,8 | 11,4 | 30 | 2,6 |
| AHXCMK 3x1x185 | 0,184 | 0,199 | 0,172 | 0,28 | 0,28 | 440 | 350 | 15 | 17,5 | 35 | 3,0 |
| AHXCMK 3x1x300 | 0,120 | 0,130 | 0,163 | 0,32 | 0,32 | 580 | 440 | 24,2 | 28,2 | 44 | 3,7 |
| AHXCMK 3x1x500 | 0,088 | 0,095 | 0,157 | 0,39 | 0,39 | 755 | 550 | 40,3 | 47 | 55 | 4,5 |
| AHXCMK 3x1x800 | 0,073 | 0,079 | 0,154 | 0,49 | 0,49 | 950 | 650 | 63,9 | 74,4 | 67 | 5,6 |
| AHXCMKM 3x70 | 0,446 | 0,482 | 0,132 | 0,18 | 0,18 | 190 | 175 | 5,7 | 6,7 | 45 | 2,1 |
| AHXCMKM 3x120 | 0,256 | 0,277 | 0,121 | 0,23 | 0,23 | 265 | 230 | 9,8 | 11,4 | 65 | 2,6 |
| AHXCMKM 3x185 | 0,169 | 0,183 | 0,114 | 0,26 | 0,26 | 340 | 290 | 15 | 17,5 | 84 | 3,0 |
| AHXCMKM 3x300 | 0,106 | 0,115 | 0,107 | 0,32 | 0,32 | 460 | 380 | 24,2 | 28,2 | 90 | 3,7 |
| APYAKMM 3x25 | 1,21 | 1,31 | 0,145 | 0,20 | 0,20 | 85 | 94 | 2,3 | 2,5 | 18 | 2,3 |
| APYAKMM 3x35 | 0,876 | 0,947 | 0,138 | 0,22 | 0,22 | 105 | 115 | 3,3 | 3,7 | 20 | 2,5 |
| APYAKMM 3x50 | 0,649 | 0,701 | 0,131 | 0,25 | 0,25 | 125 | 140 | 4,6 | 5,25 | 25 | 2,9 |
| APYAKMM 3x70 | 0,451 | 0,487 | 0,124 | 0,29 | 0,29 | 155 | 170 | 6,5 | 7,3 | 30 | 3,3 |
| APYAKMM 3x95 | 0,329 | 0,356 | 0,118 | 0,32 | 0,32 | 190 | 205 | 8,7 | 9,9 | 40 | 3,7 |
| APYAKMM 3x120 | 0,262 | 0,283 | 0,115 | 0,35 | 0,35 | 210 | 225 | 11 | 12,5 | 50 | 4,0 |
| APYAKMM 3x150 | 0,216 | 0,233 | 0,111 | 0,38 | 0,38 | 240 | 255 | 13,7 | 15,6 | 60 | 4,3 |
| APYAKMM 3x185 | 0,175 | 0,189 | 0,107 | 0,41 | 0,41 | 270 | 290 | 16,9 | 19,2 | 65 | 4,7 |
| APYAKMM 3x240 | 0,138 | 0,149 | 0,104 | 0,45 | 0,45 | 315 | 335 | 21,9 | 24,8 | 80 | 5,1 |
| APYAKMM 3x300 | 0,114 | 0,123 | 0,101 | 0,49 | 0,49 | 360 | 375 | 27,3 | 31 | 90 | 5,6 |

20 kV KAPELJEN JOHTOTIETOJA

LIITE 31

Maakaapeliin arvoja 2

| Johdin | Vaiheresistanssi | | Vaihe- reaktanssi Xv Ω/ km | Maaka- pasi- tanssi Cm μF/km | Käyttöka- pasi- tanssi Ck μF/km | Suurin sallittu kuormitusvirta | | Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta | | Jäähtymis- aikavakio τ min | Maasulku- virta Ie A |
|--------------|------------------|-----------|-------------------------------------|--|---|-----------------------------------|----------|---------------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Rv Ω/ km | | | | | In A | Ik kA | Ik kA | | | |
| | +20 °C 1) | +40 °C 2) | | | | | | | T1-liittimet | | |
| HMCMK 3x25 | 0,728 | 0,785 | 0,135 | 0,14 | 0,14 | 140 | 145 | 2,95 | 2,95 | 18 | 1,6 |
| HMCMK 3x35 | 0,525 | 0,566 | 0,129 | 0,15 | 0,15 | 165 | 175 | 4,1 | 4,1 | 20 | 1,7 |
| HMCMK 3x50 | 0,388 | 0,418 | 0,119 | 0,17 | 0,17 | 205 | 215 | 5,8 | 5,8 | 25 | 1,9 |
| HMCMK 3x70 | 0,269 | 0,290 | 0,116 | 0,18 | 0,18 | 250 | 260 | 8,1 | 8,1 | 28 | 2,1 |
| HMCMK 3x95 | 0,194 | 0,209 | 0,110 | 0,20 | 0,20 | 295 | 310 | 11 | 11 | 33 | 2,3 |
| HMCMK 3x120 | 0,155 | 0,167 | 0,107 | 0,21 | 0,21 | 340 | 350 | 13,8 | 13,8 | 35 | 2,4 |
| HMCMK 3x150 | 0,126 | 0,136 | 0,101 | 0,23 | 0,23 | 390 | 400 | 17,2 | 17,2 | 40 | 2,6 |
| HMCMK 3x185 | 0,102 | 0,110 | 0,097 | 0,24 | 0,24 | 435 | 440 | 21,2 | 21,2 | 45 | 2,7 |
| HMCMK 3x240 | 0,078 | 0,084 | 0,094 | 0,26 | 0,26 | 515 | 510 | 27,4 | 27,4 | 48 | 3,0 |
| HPLKVJ 3x25 | 0,732 | 0,790 | 0,148 | 0,19 | 0,19 | 105 | 120 | 3,6 | 4,6 | 20 | 2,2 |
| HPLKVJ 3x35 | 0,529 | 0,571 | 0,138 | 0,21 | 0,21 | 135 | 150 | 5 | 5,6 | 25 | 2,4 |
| HPLKVJ 3x50 | 0,392 | 0,423 | 0,129 | 0,23 | 0,23 | 160 | 175 | 7,1 | 8,6 | 35 | 2,6 |
| HPLKVJ 3x70 | 0,274 | 0,296 | 0,123 | 0,26 | 0,26 | 200 | 220 | 9,8 | 11,1 | 45 | 3,0 |
| HPLKVJ 3x95 | 0,199 | 0,215 | 0,116 | 0,29 | 0,29 | 240 | 260 | 13,3 | 15 | 55 | 3,3 |
| HPLKVJ 3x120 | 0,160 | 0,173 | 0,112 | 0,32 | 0,32 | 275 | 300 | 16,8 | 19 | 70 | 3,7 |
| HPLKVJ 3x150 | 0,131 | 0,141 | 0,107 | 0,34 | 0,34 | 315 | 335 | 20,9 | 23,7 | 80 | 3,9 |
| HPLKVJ 3x185 | 0,107 | 0,115 | 0,104 | 0,37 | 0,37 | 360 | 380 | 25,8 | 29,1 | 85 | 4,2 |
| HPLKVJ 3x240 | 0,084 | 0,091 | 0,101 | 0,41 | 0,41 | 415 | 440 | 33,3 | 37,7 | 90 | 4,7 |
| HPLKVJ 3x300 | 0,070 | 0,076 | 0,098 | 0,45 | 0,45 | 470 | 495 | 41,6 | 47,1 | 100 | 5,1 |
| HXCMK 3x1x35 | 0,537 | 0,579 | 0,204 | 0,15 | 0,15 | 215 | 185 | 4,4 | 5,1 | 20 | 1,7 |
| HXCMK 3x35 | 0,527 | 0,568 | 0,150 | 0,15 | 0,15 | 165 | 140 | 4,4 | 5,1 | 35 | 1,7 |
| HXCMK 3x185 | 0,104 | 0,112 | 0,116 | 0,26 | 0,26 | 435 | 360 | 22,9 | 26,7 | 70 | 3,0 |
| PYLVJ 3x25 | 0,732 | 0,790 | 0,157 | 0,19 | 0,19 | 105 | 120 | 3,6 | 4 | 20 | 2,2 |
| PYLVJ 3x35 | 0,530 | 0,572 | 0,149 | 0,21 | 0,21 | 135 | 150 | 5 | 5,6 | 25 | 2,4 |
| PYLVJ 3x50 | 0,393 | 0,424 | 0,140 | 0,23 | 0,23 | 160 | 175 | 7,1 | 8 | 35 | 2,6 |
| PYLVJ 3x70 | 0,275 | 0,297 | 0,132 | 0,26 | 0,26 | 200 | 220 | 9,8 | 11,1 | 45 | 3,0 |
| PYLVJ 3x95 | 0,201 | 0,217 | 0,127 | 0,29 | 0,29 | 240 | 260 | 13,3 | 15 | 55 | 3,3 |
| PYLVJ 3x120 | 0,162 | 0,175 | 0,123 | 0,32 | 0,32 | 275 | 300 | 16,8 | 19 | 70 | 3,7 |
| PYLVJ 3x150 | 0,134 | 0,145 | 0,119 | 0,34 | 0,34 | 315 | 335 | 20,9 | 23,7 | 80 | 3,9 |
| PYLVJ 3x185 | 0,110 | 0,119 | 0,116 | 0,37 | 0,37 | 360 | 380 | 25,8 | 29,1 | 85 | 4,2 |
| PYLVJ 3x240 | 0,089 | 0,096 | 0,113 | 0,41 | 0,41 | 415 | 440 | 33,3 | 37,7 | 90 | 4,7 |
| PYLVJ 3x300 | 0,076 | 0,082 | 0,110 | 0,45 | 0,45 | 475 | 495 | 41,6 | 47,1 | 100 | 5,1 |

20 kV KAPELIEN JOHTOTIETOJA