

JAKELUMUUNTAMON SUUNNITTELU

Koponen Janne

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Janne Koponen	Vuosi	2019
Ohjaaja	DI Jaakko Etto		
Toimeksiantaja	Voimatel Oy		
Työn nimi	Jakelumuuntamon suunnittelu		
Sivu- ja liitesivumäärä	55 + 26		

Tämä opinnäytetyö tehtiin Voimatel Oy:lle. Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella jakelumuuntamo yhden olemassa olevan liittymän tarpeisiin, jonka tehontarve oli kasvanut ja sähkönlaatu ei ollut enää riittävä. Opinnäytetyössä tavoitteisiin kuuluivat uuden muuntamon sähköinen mitoitus, maastosuunnittelu ja työkuvien laadinta. Tavoitteena oli myös laskea jakeluverkon mitoitukseen vaikuttavia arvoja, kuten oikosulkuvirtoja ja jännitteenalenemaa ja verrata tuloksia verkkotietojärjestelmän laskemiin tuloksiin. Voimatel Oy toteutti tässä opinnäytetyössä suunnitellun jakelumuuntamon rakentamisen ja käyttöönoton.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsiteltiin sähköverkon yleistä toimintaa ja sähköverkon hallintaa Suomessa. Teoriaosuudessa käsiteltiin myös standardien asettamia määräyksiä eri maadoitusjärjestelmille ja niiden toteutustavoille. Sähköverkon suojausien osalta keskityttiin erityisesti jakeluverkon mitoituksiin. Maakaapeloinnin osalta perehdyttiin standardin asettamiin vaatimuksiin ja suosituksiin.

Opinnäytetyössä saatiin suunniteltua ja toteutettua jakelumuuntamon rakentaminen. Muuntamo varten suunnitellut kaapeloinnit ja asennukset toteutettiin, kuten oli suunniteltu. Tarvittavat luvat ja sopimukset tehtiin viranomaisten ja maanomistajien kanssa. Sähköverkon mitoitukseen tarvittavia arvoja laskettiin ja tulokset ovat yhteneviä verkkotietojärjestelmän tuloksiin nähden.

Technology, Communication and Transport
Electrical and Automation Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Janne Koponen	Year	2019
Supervisor	Jaakko Etto M.Sc. (Elect. Eng)		
Commissioned by	Voimatel Oy		
Subject of thesis	Design of the Distribution Substation		
Number of pages	55 + 26		

This thesis was done for Voimatel Oy. The objective of this thesis was to design a distribution substation for the needs of one existing electricity connection, which had an increased power demand and no longer had sufficient quality. The objectives of the thesis included the determination of electrical values of the new distribution substation, terrain design and the preparation of work instructions. The objective was also to calculate the values affecting the distribution network design such as short-circuit currents and voltage drops and compare the result with those computed by the network information system. Voimatel Oy implemented the construction and commissioning of the distribution substation that was designed in the thesis.

The theoretical part of the thesis dealt with the general operation of the grid and the management of the grid of Finland. The theoretical part also dealt with the standard specifications for different grounding systems and their implementation. Concerning the power grid protection, the focus was particularly on the distribution network. With regard to ground cabling, the requirements and recommendations of the standard were regarded.

In this thesis, the construction of the distribution substation was planned and implemented. The cabling and installation planned for the distribution substation were completed as planned. The necessary permits and agreements were made with authorities and landowners. The values needed for the grid sizing were calculated and the results are consistent with those of the network information system.

Key words distribution network, distribution substation, grounding systems

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖVERKKO	7
2.1	Sähköverkon hallinta.....	7
2.2	Sähkönjakeluverkko.....	9
2.3	Sähköverkon ylläpito ja rakentaminen	12
3	RAKENTAMISTAVAT	13
3.1	Jakelumuuntamot	13
3.2	Pienjänniteverkon maadoitus.....	17
3.3	Laajamaadoitusjärjestelmä	21
3.4	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	23
3.5	Erillinen maadoitusjärjestelmä	24
4	SÄHKÖVERKON MITOITUS	26
4.1	Kuormitusten arviointi	26
4.2	Jännitteenalenema	27
4.3	Oikosulkuvirta	31
4.4	Vikasuojaus	33
4.5	Ylikuormitussuojaus.....	34
4.6	Oikosulkusuojaus.....	34
4.7	Maadoitusresistanssi	35
5	KAPELOINTI	39
5.1	Kaapelin asennus maahan	39
5.2	Kaapelin kuormitettavuus maassa	42
6	UUDEN MUUNTAMON SUUNNITTELU	44
6.1	Nykyinen tilanne	44
6.2	Tavoitteet	45
6.3	Muuntamon valinta ja sijainti.....	45
6.4	Kaapelivalinnat	46
6.5	Pienjännitekytkimien- ja sulakkeiden valinta	46
6.6	Muuntamon maadoitus	47
6.7	Luvat ja sopimukset	48
6.8	Työkuvat ja kaaviot	49

6.9 Sähköverkon laskennat.....	50
7 POHDINTA.....	52
LÄHTEET.....	53
LIITTEET	55

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä on tarkoitus suunnitella jakelumuuntamo yhdelle liittymälle, jonka sähkönlaatu ei ole riittävä nykyisellä kuormituksella. Työ tehdään Voimatel Oy:lle, joka toteuttaa muuntamon rakentamisen. Työssä tehdään sähköinen mitoitus, jossa määritetään jakelumuuntajan teho, kaapelien tyypit ja poikkipinnat, sulakkeiden koko ja muuntamon tyyppi.

Teoriaosuudessa selvitetään jakelumuuntamon suunnitteluun ja toteuttamiseen eri rakenneratkaisuja ja muuntamotyyppejä. Sähköverkon eri maadoitustapojen määrittämiä ja vaatimuksia selvitetään standardin pohjalta. Jakelumuuntamon maadoitukseen liittyen lasketaan tarvittava maadoituselektrodin pituus, jolla saavutetaan riittävä suojaustaso kosketusjännitteen kannalta.

Työhön kuuluu myös maastosuunnittelu, jolloin suunnitellaan muuntamon sijainti ja kaapelien todelliset reitit maastossa. Maastosuunnittelun yhteydessä laaditaan sopimukset maanomistajien, viranomaisten ja yksityisteiden tiekuntien kanssa sekä selvitetään mahdolliset muut haittaavat tekijät reiteillä, kuten olemassa olevat kaapelit ja vesijohdot. Sovitut kaapelireitit ja muuntamon sijainti merkataan maastoon.

Sähköverkon mitoituksista laaditaan laskelmat, joita verrataan verkkotietojärjestelmän laskelmiin. Laskelmissa huomioidaan jännitteenalenema nykyisellä kuormituksella ja oikosulkuvirrat.

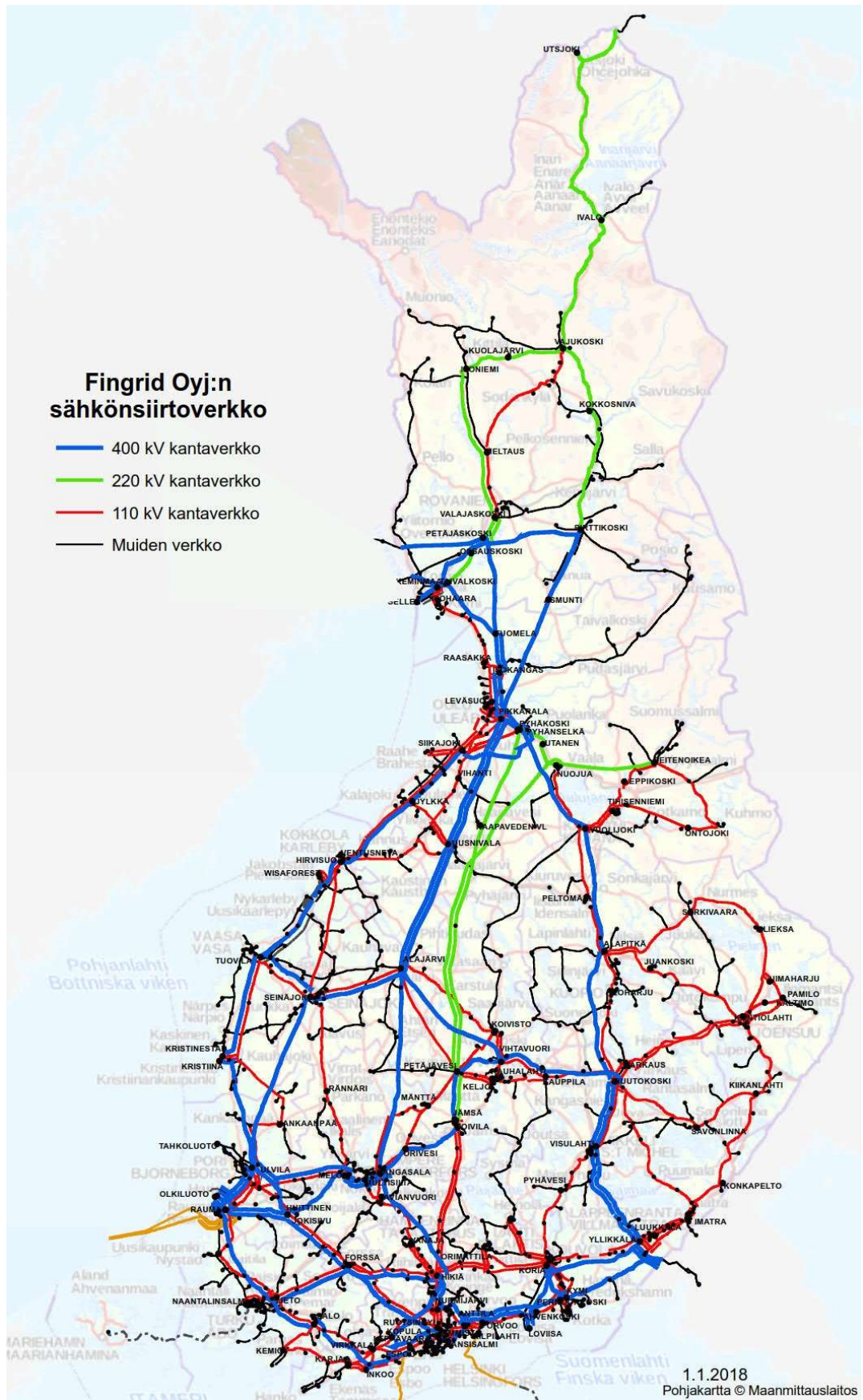
2 SÄHKÖVERKKO

2.1 Sähköverkon hallinta

Suomessa sähköverkkopalveluita tarjoavia yhtiöitä kutsutaan yhtiön hallitseman verkon mukaan kanta-, alue- tai jakeluverkon haltijoiksi tai verkkoyhtiöiksi. Sähköverkkotoiminta on Suomessa luvanvaraista monopolitoimintaa. Sähköverkkotoimintaan tarvitaan sähköverkkolupa, jonka myöntää Energiamarkkinavirasto (Sähkömarkkinalaki 588/2013 2:4 §). Lupaan liittyy maantieteellinen vastuualue, jolla verkonhaltijalla on yksinoikeus rakentaa jakeluverkkoa. Verkonhaltijoilla on oman verkon ylläpito- ja kehittämisvelvollisuus, sähkönkäyttöpaikkojen ja tuotantolaitosten liittämisvelvollisuus sekä sähkönsiirtovelvollisuus. (Elovaara & Haarla 2011a, 58.)

Suomessa sähkönsiirtoon käytettävää kantaverkkoa ylläpitää Fingrid Oyj. Kantaverkkoon kuuluu noin 14 400 kilometriä voimajohtoja ja lähes 120 sähköasemaa. Kantaverkon kautta kulkee lähes 77 prosenttia kaikesta Suomessa siirretystä sähköstä. Kuvio 1 esittää Suomen kantaverkkoa sen nykyisessä laajuudessaan. (Fingrid Oyj 2018.)

Muut verkkoyhtiöt omistavat alue- ja jakeluverkot. Jakeluverkkoyhtiöitä on Energiaviraston julkaisun mukaan Suomessa tällä hetkellä noin 80 ja niistä suurimmat ovat Caruna Oy, Elenia Oy ja Helen Sähköverkko Oy. Jakeluverkkoyhtiöillä voi olla keski- ja pienjännitteisten verkkojen lisäksi 110 kV:n verkkoa. Alueverkkoyhtiöt käyttävät vain 110 kV:n aluesiirtoverkkoa. Alueverkkoyhtiöitä on 11 ja niistä suurin on UPM sähkönsiirto Oy. (Energiavirasto 2018; Elovaara & Haarla 2011a, 62.)

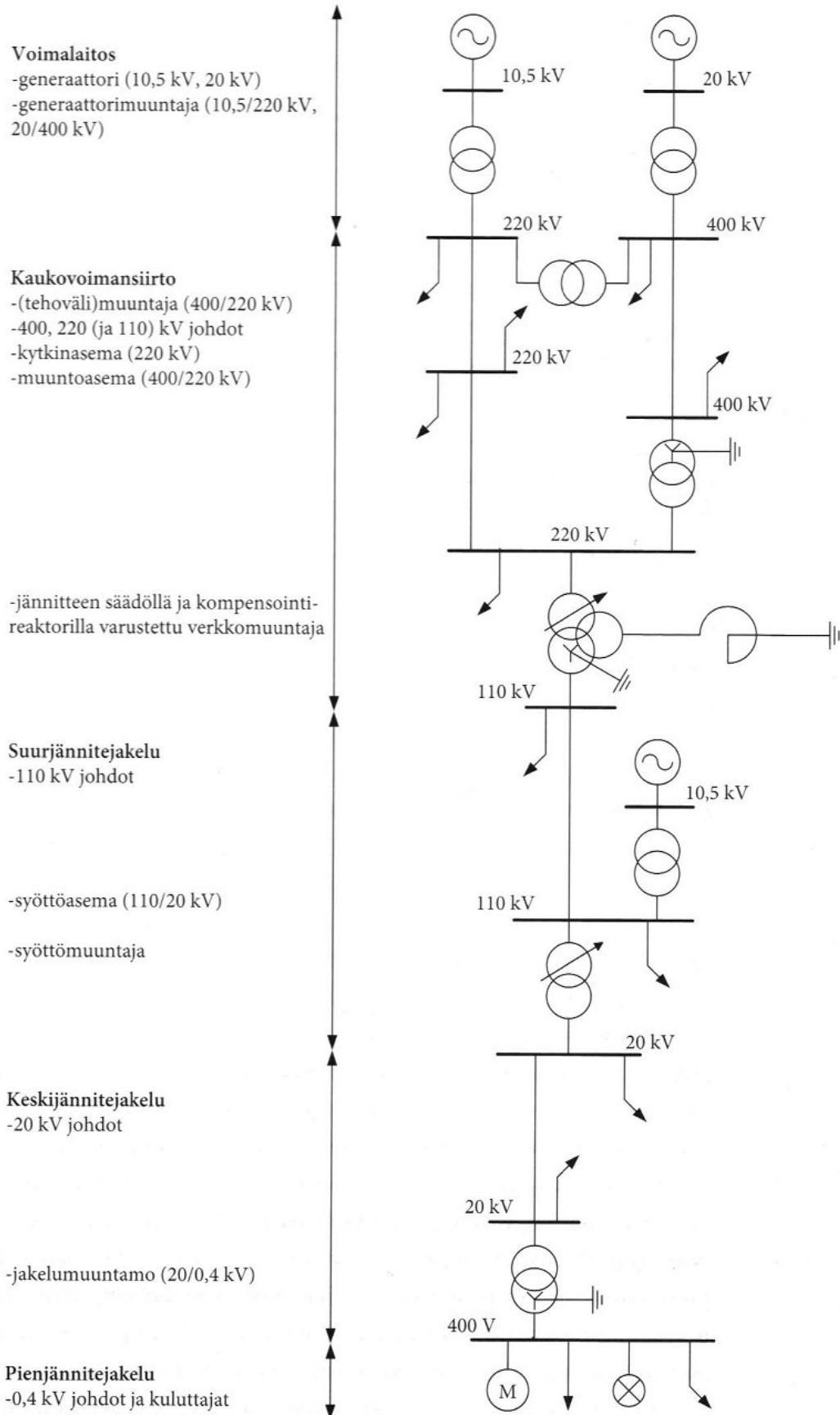


Kuvio 1. Suomen kantaverkko (Fingrid Oyj 2018)

2.2 Sähkönjakeluverkko

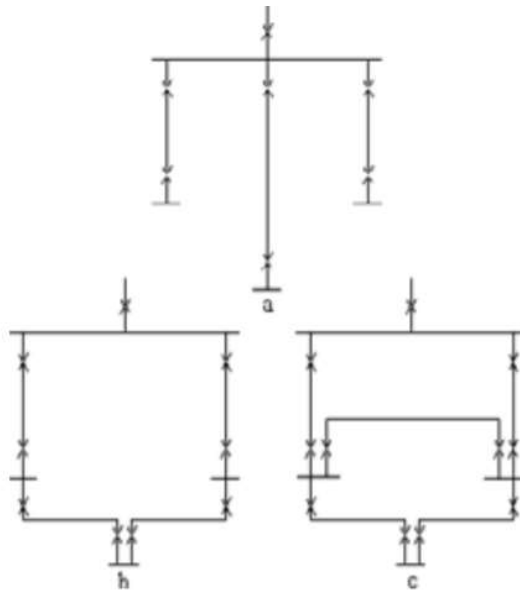
Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, alueverkosta, jakeluverkosta ja sähköä kuluttavista laitteista. Kaikki kuluttajat ja merkittävät voimalaitokset on yhdistetty yhteiseen sähköverkkoon. Sähköverkot jaetaan jännitetason perusteella siirto- ja jakeluverkkoihin. Jakeluverkot voidaan jakaa suur-, keski- ja pienjänniteverkkoihin. Suomessa käytetään siirto- ja jakeluverkoissa kolmivaiheista vaihtosähköjärjestelmää. Ulkomailla käytetään myös yksi- ja kaksivaihejärjestelmiä. Vaihtosähkön taajuus Euroopassa on 50 Hz. (Elovaara & Haarla 2011a, 54.)

Voimalaitosten tuottama sähkö siirretään kantaverkkoa pitkin 110 kV:n, 220 kV:n tai 400 kV:n jännitteellä. Sähköasemilla kantaverkon tai alueverkon jännite muunnetaan 20 kV:n suuruiseksi keskijännitteeksi. Myös 10 kV:n keskijänniteverkkoa esiintyy kaupunkien keskustoissa. Jakelumuuntamoilla 20 kV:n jännite muunnetaan 400 V:n jännitteeksi ja siirretään pienjännitejohdoissa kuluttajien sähkölaitteistoon. Kuviossa 2 on esitetty siirto- ja jakeluverkon periaatekaavio. (Elovaara & Haarla 2011a, 55.)



Kuvio 2. Siirto- ja jakeluverkon periaatekaavio. (Elovaara & Haarla 2011a, 55)

Sähköverkot voidaan jakaa niiden rakenteen perusteella avoimiin eli säteittäisverkkoihin ja suljettuihin eli silmukkaverkkoihin. Säteittäisessä verkossa kuormitukset saavat sähkötehoa vain yhtä reittiä ja silmukoidussa verkossa useampaa reittiä pitkin. Kuviossa 3 on periaatekuvat säteittäisestä ja silmukoidusta verkosta. Silmukoidussa verkossa käyttövarmuus on parempi, koska yhden reitin vikaantuminen ei vielä aiheuta sähkökatkoa. Myös jännitteenalenema ja tehohäviöt ovat silmukoidussa verkossa pienemmät. Silmukoidun verkon haittapuolina ovat suojausten monimutkaisuus ja mahdollinen pienempijännitteisen johdon ylikuormittuminen vikatilanteessa. (Elovaara & Haarla 2011a, 57.)



Kuvio 3. a) Säteittäinen verkkomuoto. b) ja c) silmukoitu verkkomuoto. (Korpinen 1998)

Siirto- ja keskijänniteverkot rakennetaan silmukkaverkoiksi. Johtorenkaat pidetään yleensä suljettuina kantaverkossa. Alue- ja keskijänniteverkoissa silmukat pidetään yleensä avoimina eli käytetään kuten säteisverkkoa. Rengasmuotoa käytetään yleensä vian etsinnässä ja muutettaessa verkon kytkentää. Pienjänniteverkot rakennetaan harvaan asutuilla alueilla yleensä säteittäisiksi. Kaupungeissa ne rakennetaan yleensä silmukoiduiksi, mutta niitä käytetään säteittäisesti. (Elovaara & Haarla 2011a, 57.)

2.3 Sähköverkon ylläpito ja rakentaminen

Sähköverkkotoiminnan päätoimintoja ovat:

- liiketoimintasuunnittelu ja toteutus
- hallinnon tukipalvelut
- verkostojen suunnittelun eri muodot
- verkkojen rakentaminen tai rakennuttaminen
- verkkojen käyttö
- kunnonvalvonta
- energiamittaukset
- taseselvitykset ja asiakaspalvelu. (Lakervi & Partanen 2009, 21.)

Edellä luetellut toiminnot voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan: verkkojen omistaminen, verkkojen käyttäminen ja erilaiset palvelutoiminnot. Kasvavana trendinä on palvelujen käyttö eli ulkoistaminen. Verkkoyhtiöiden ydintoimintoja ovat aina omaisuuden hallinta. Omaisuuden hallintaan sisältyy liiketoiminnan suunnittelu ja toteutus, verkostojen kehittämissuunnittelu, verkostojen rakennuttaminen sekä yleensä asiakaspalvelu. Tyypillisiä ostettavia palvelutoimintoja ovat maastosuunnittelu, verkkojen rakentaminen, vikojen korjaus, ennakoiva kunnonvalvonta ja taseselvitykset. (Lakervi & Partanen 2009, 21.)

3 RAKENTAMISTAVAT

3.1 Jakelumuuntamot

Pienjänniteverkkoa syöttävällä muuntamolla muunnetaan suurempi jännite pienemmäksi. Suomessa yleensä 20 kV keskijännite muunnetaan 400 V pienjännitteeksi. Muuntamoita rakennetaan, kun sähköistetään uudisrakennusaluetta tai saneerataan vanhaa sähköverkkoa. Muuntamon saneeraus uudeksi johtuu yleensä nykyisen pienjänniteverkon liian suuresta jännitteenalenemasta tai liian pienestä oikosulkuvirrasta sulakekokoon nähden. Vaihtoehtoinen tapa on pienjännitejohtojen vaihtaminen suurempipoikkipintaisiin kaapeleihin. Jakelumuuntamo koostuu keskijännitekiskostosta, yhdestä tai useammasta jakelumuuntajasta, pienjännitelähdöistä ja mahdollisesta apujännitejärjestelmästä. (Lakervi & Partanen 2009, 157-158.)

Jakelumuuntamoina käytetään pylväs-, puisto- ja kiinteistömuuntamoita. Pylväsmuuntamoita on käytössä lähinnä maaseudun harvaan asutuilla alueilla. Pylväsmuuntamot soveltuvat pienille enintään 315 kVA muuntajille. Taajamaverkossa jakelumuuntamo toimii usein keskijännitekaapelirenkaan osana. Lähdöt on varustettu katkaisijoilla tai erottimilla. Kiinteistö- ja puistomuuntamot ovat yleisiä taajamissa. Muuntamoiden nimellistehot ovat yleensä 1000 kVA luokkaa. Pienjänniteverkon vika- ja ylikuormitussuojaus hoidetaan jakelumuuntamoilla. Suomessa jokainen pienjännitelähtö varustetaan sulakkeella. (Lakervi & Partanen 2009, 157-158.)

Pylväsmuuntamo kytkeytyy tavallisesti keskijänniteilmajohtoverkkoon. Muuntajan ja ilmajohtojen välissä on yleensä muuntajaerotin, josta kytkeydytään muuntajan ensiöliittimiin. Muuntajan suojauksena käytetään ylijännitesuojia, kuten suojakipinäväliä tai metallioksidisuojia. Kuviossa 4 on pylväsmuuntamorakenne. (Lakervi & Partanen 2009, 157-158.)



Kuvio 4. Pylväsmuuntamo (Määttä & Järvinen 2019)

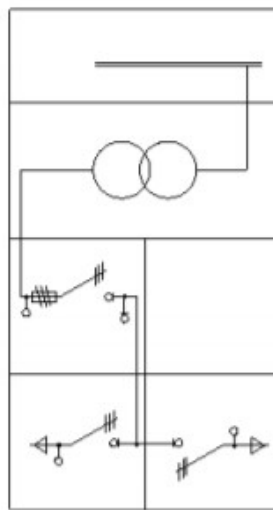
Puistomuuntamoihin kytkeydytään maakaapeleilla. Puistomuuntamot ovat tehdasvalmisteisia ja yleensä kalustettuja kokonaisuuksia. Tehdasvalmisteisen kokonaisuuden sisään on asennettu jakelumuuntaja ja kytkinlaitteet. Puistomuuntamossa käytetään keskijännitekojeistona tyypillisesti ilmaeristeistä tai SF₆-eristeistä kojeistoa. SF₆-eristeiset kojeistot ovat korkeussuunnassa noin puolet ja pituussuunnassa noin kolmasosan pienempiä ilmaeristeisiin nähden. (Elovaara & Haarla 2011b, 122-126.)

Kytkinlaitteina käytetään SF₆-katkaisijaa, tyhjiökatkaisijaa, kuormaerotinta tai varokekuormaerotinta. Jakelumuuntamoissa kytkinlaitteena käytetään yleensä

kuormaerotinkojeistoja ja sähköasemilla katkaisijakojeistoja. Kuviossa 5 on 1600 kVA puistomuuntamo ja kuviossa 6 muuntamon sisärakenne. (Elovaara & Haarla 2011b, 122-124.)

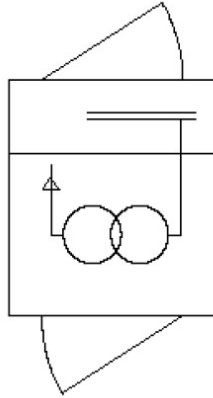


Kuvio 5. Puistomuuntamo (Norelco Oy 2019b, 1)



Kuvio 6. Puistomuuntamon rakenne (Norelco Oy 2019b, 7)

Maakaapeliverkoissa käytetään myös pieniä, niin sanottuja satelliittimuuntamoita, joissa ei ole keskijännitekytkinlaitteita. Kytkinlaitteet sijaitsevat haaraa syöttävällä muuntamolla tai ketjussa olevissa muuntamoissa. Satelliittimuuntamot ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja voivat sisältää luokkaa 300 kVA tehoisen muuntajan. Kuviossa 7 on satelliittimuuntamon sisärakenne. (Lakervi & Partanen 2009, 158.)



Kuvio 7. Satelliittimuuntamon rakenne (Norelco Oy 2019a, 4)

Kiinteistömuuntamoita käytetään tilan puutteen vuoksi erityisesti kaupunkien keskustoissa ja taajaan asutuilla alueilla, missä puistomuuntamo ei ole mahdollinen. Muuntamo voidaan asentaa kerrostalon kellariin tai muuhun sille soveltuvaan paikkaan. Kuviossa 8 on kiinteistömuuntamo kojeistoineen. (Lakervi & Partanen 2009, 160.)



Kuvio 8. Kiinteistömuuntamo (Supperi 2017, 39)

Muuntamon suunnittelussa huomioitavia asioita ovat keskijännitejohtolähtöjen määrä, kuormaerottimien, maadoituserottimien, katkaisijoiden ja varokeuormamerottimien tarve, oikosulkukestoisuudet, mittamuuntajien tarve, pienjännitekeskuksen kytkimien määrä, mitoitusvirta ja muuntajan teho. Muuntajan tehon kas-

vaessa kasvaa tilantarve ja muuntamon koko. Puistomuuntamoita on vakiorakenteisia ja niihin voidaan valita valmistajan määrittämiä kojeistovaihtoehtoja. Kiinteistömuuntamoon täytyy valita kuhunkin tilanteeseen sopiva keskijännitekojeisto, muuntaja, pienjännitekeskus ja välikaapelit. (Norelco Oy 2019b, 2-9; Supperi 2017, 10.)

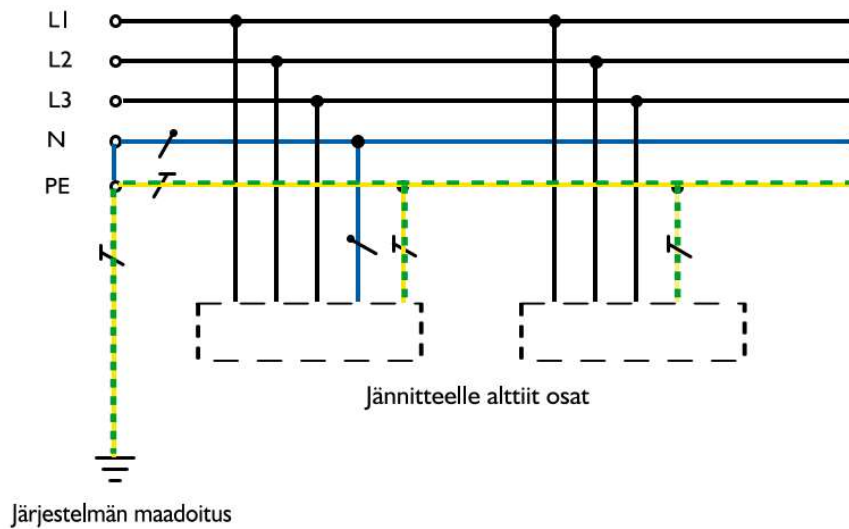
3.2 Pienjänniteverkon maadoitus

Pienjännitejakelujärjestelmän maadoitustavoista tunnetaan TN-, TT- ja IT-järjestelmät. Lisäksi TN-järjestelmä jaotellaan suojajohtimen käytön perusteella kolmeen eri tyyppiseen maadoitusjärjestelmään; TN-S, TN-C ja TN-C-S. TN-järjestelmässä virtapiirin yksi piste on maadoitettu suoraan. Sähkölaitteiden ja –laitteistojen jännitteelle alttiit osat on yhdistetty suojajohtimen välityksellä tähän pisteeseen. (D1-2017, 62-63.)

Standardi 6000-8-801 määrittää TN-järjestelmällä toteutetulle jakeluverkolle vaatimuksia. Jakeluverkon tähtipiste tulee maadoittaa verkon syöttöpisteen tähtipisteessä muuntajan tai generaattorin luona tai toisena vaihtoehtona on, että maadoitus tehdään korkeintaan 200 metrin päässä syöttöpisteestä. Lisäksi maadoitus on tehtävä jokaisen yli 200 metrin pituisen johtohaaran loppupäässä tai enintään 200 metrin etäisyydellä loppupäästä. Suositeltavaa on myös tehdä maadoitus jakokaapeilla ja muissa mahdollisissa jakeluverkon keskuksissa. Maadoitusimpedanssin tavoitearvo näille maadoituselektrodeille on korkeintaan 100 Ω. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 243.)

TN-S-järjestelmä

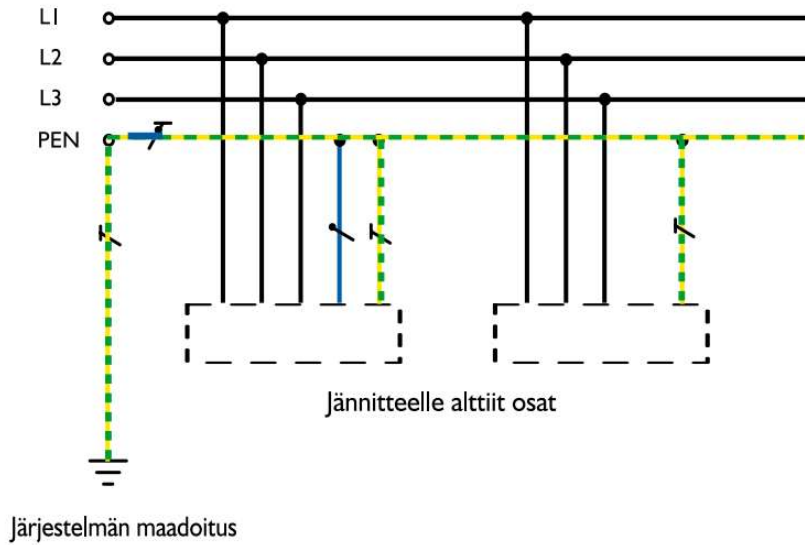
TN-S-järjestelmän koko järjestelmässä käytetään nollajohtimesta erotettua suojajohdinta. Kolmivaihejärjestelmässä on yleensä viisi johdinta (3L+N+PE) tai neljä johdinta (3L+PE). Yksivaihejärjestelmissä on yleensä kolme johdinta (L+N+PE). Suojajohdinta ei kuitenkaan ole 0- ja II-luokan laitteissa, eikä sitä tarvita yksinomaan tällaista laitetta syöttävissä ryhmäjohdoissa. Jos suojajohdinta ei käytetä, täytyy varmistaa, ettei virtapiiriin myöhemmin asenneta I-luokan laitetta. Rakennusten sisäinen verkko on etenkin uusissa asennuksissa TN-S-järjestelmän mukainen. Kuviossa 9 on esitetty TN-S-järjestelmän periaate. (D1-2017, 62-63.)



Kuvio 9. TN-S järjestelmä (D1-2017, 62-63)

TN-C-järjestelmä

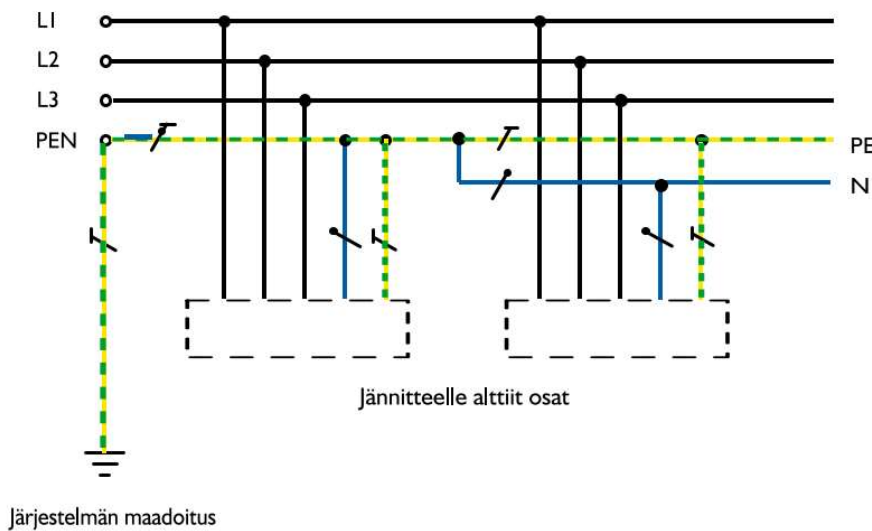
TN-C-järjestelmässä on PEN-johdin, joka toimii sekä nolla- että suojajohtimena koko järjestelmässä. TN-C järjestelmää käytettäessä johtimien poikkipinnan on oltava vähintään 10 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia. PEN-johdinta ei voi käyttää uudiskohteissa liittymiskohdan jälkeen olevissa asennuksissa. TN-C-järjestelmää käytetään kolmivaihejärjestelmässä, jolloin tarvitaan neljä johdinta (3L+PEN). Vanhoissa asennuksissa on käytetty nollausta ryhmäjohtotasolla. Nämä asennukset ovat maadoitustavaltaan TN-C-järjestelmän tai TN-C-S-järjestelmän mukaisia. Yleiset jakeluverkot ovat tavallisesti TN-C-järjestelmän mukaisia. Kuviossa 10 on esitettyä TN-C-järjestelmän periaate. (D1-2017, 63-67.)



Kuvio 10. TN-C-järjestelmä (D1-2017, 64)

TN-C-S-järjestelmä

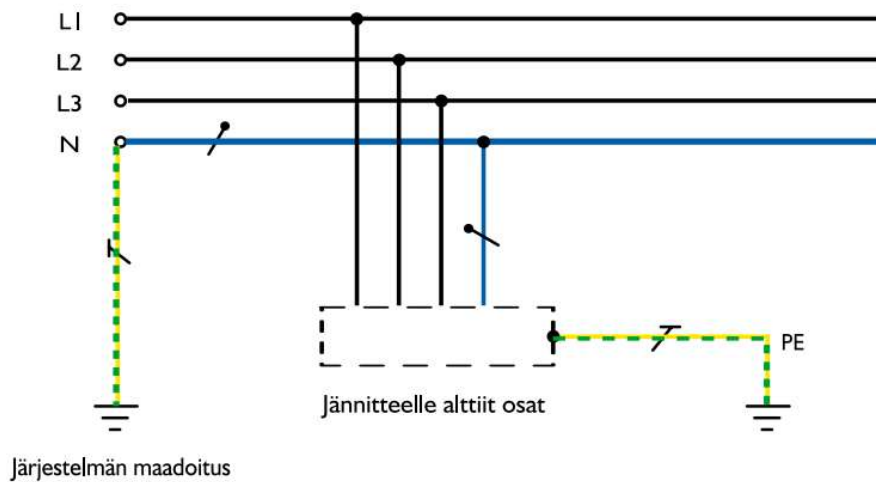
TN-C-S-järjestelmä muodostuu TN-C ja TN-S-järjestelmien yhdistelmästä. TN-C-järjestelmä täytyy olla aina syöttävän verkon puolella ja TN-S-järjestelmän jäljempänä verkossa, koska nolla- ja suojajohdinta ei saa kytkeä uudelleen yhteen PEN-johtimeksi. Kuviossa 11 on esitettyä TN-C-S-järjestelmän mukainen verkko. (D1-2017, 64.)



Kuvio 11. TN-C-S-järjestelmä (D1-2017, 64)

TT-järjestelmä

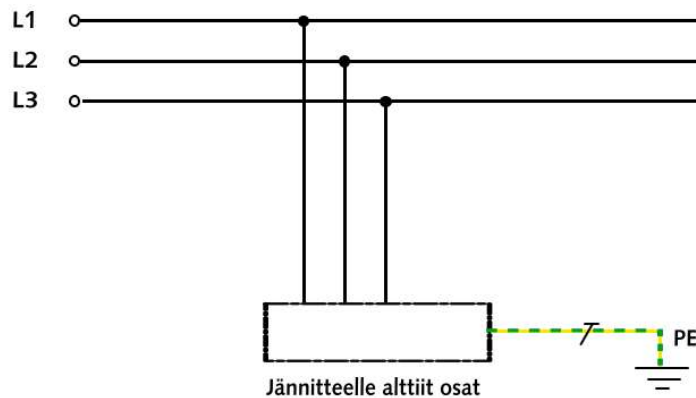
TT-järjestelmässä yksi piste on suoraan maadoitettu. Yleensä maadoitus toteutetaan muuntajan tähtipisteessä. TN-järjestelmästä poiketen TT-järjestelmässä jännitteelle alttiit osat on maadoitettu erillisen tai erillisten maadoituselektrodien avulla. Elektrodien on oltava sähköisesti erillään syöttävästä maadoitus elektrodista. TT-järjestelmää ei käytetä Suomessa, mutta järjestelmä on yleinen Etelä-Euroopassa. Kuviossa 12 on esitetty TT-järjestelmän periaate. (D1-2017, 66.)



Kuvio 12. TT-järjestelmä (D1-2017, 66)

IT-järjestelmä

IT-järjestelmä on maasta erotettu järjestelmä. Mitään virtapiirin osaa ei ole kytetty suoraan maahan. Maadoitukset toteutetaan siten, että sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat on kytketty erillisiin maadoituselektrodeihin tai suojajohtimella yhteiseen elektrodiin. Elektrodina voi olla myös verkon maadoituselektrodi. IT-järjestelmässä ei suositella nollajohtimen käyttöä. Kuviossa 13 on esitetty IT-järjestelmän periaate. (D1-2017, 66.)



Kuvio 13. IT-järjestelmä (D1-2017, 67)

Vaikka IT-järjestelmä on maasta erotettu järjestelmä, virtapiiriin soveltuva piste voidaan kytkeä maahan impedanssin välityksellä. Järjestelmän maasulkuvalvonta voidaan toteuttaa esimerkiksi järjestelmän keskipisteen ja maan välille kytketyn vastuksen avulla. IT-järjestelmä kytketään syöttävään TN-järjestelmään muuntajan välityksellä ja IT-järjestelmän suojajohdin viedään yleensä suoraan TN-järjestelmän suojajohtimeen ja siitä edelleen maadoituselektrodiin. Yksittäiselle IT-järjestelmälle ei yleensä rakenneta omaa maadoituselektrodia. (D1-2017, 66-68.)

IT-järjestelmää käytetään erityisesti silloin, jos on tarve estää tai siirtää maasulusta aiheutuva käyttökeskeytys. Käyttökohteita ovat esimerkiksi teollisuuden prosessisähkönjakelu, sairaaloiden leikkaussalit sekä ohjauspiirit. (D1-2017, 69.)

3.3 Laajamaadoitusjärjestelmä

Standardissa SFS 6001 määritellään laajan maadoitusjärjestelmän toteutumisen periaatteet. Standardin mukaan laajalla maadoitusjärjestelmällä tarkoitetaan aluetta, jossa ei esiinny lainkaan potentiaalieroja tai esiintyy vähäisiä potentiaalieroja. Näiden alueiden määrittämiseen ei ole kuitenkaan yksittäistä eikä yksinkertaista sääntöä. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 138.)

Uuden muuntopiirin rakentamisen yhteydessä täytyy pystyä toteamaan laajaan maadoitusjärjestelmään liittyminen, jolloin muuntopiirin maadoitusimpedanssia ei tarvitse mitata. Liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään täytyy toteutua usean

yhteyden kautta luotettavasti. Maadoitusjärjestelmään liittyminen täytyy varmistaa mittaamalla ja tulokset on dokumentoitava (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 150). Yhteyksien muodostumisista on syytä laatia kaavio, jotta se voidaan tarvittaessa todentaa. (Verkostosuositus RJ 19:16, 6-7.)

Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituksia ovat sähköasemien, muuntamoiden, pienjänniteverkon ja liittymien maadoitukset. Johtimina näiden välillä voivat toimia suurjännitekaapeleiden vaipat ja keskusköydet, pienjänniteverkon PEN-johtimet, mahdolliset muuntamoita yhdistävät erilliset maadoitusjohtimet tai elektrodit sekä keskijänniteilmajohdon pylväisiin rakennetut maadoitusjohtimet. (Verkostosuositus RJ 19:16, 6-7.)

Jokaiselle uudelle muuntopiirille on tehtävä standardien mukaiset maadoitukset, vaikka muuntopiiri kytkeytyisikin laajaan maadoitusjärjestelmään. Laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu usein ruutukaavamaiselle taajama-alueelle. Ketjussa esimerkiksi joen varressa olevat muuntamot eivät yleensä muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää. (Verkostosuositus RJ 19:16, 7.)

Standardissa SFS 6001 luetellaan esimerkkejä tyypillisistä laajoista maadoitusjärjestelmistä:

- *sähköasemaa ympäröivät perustusmaadoituselektrodilla varustetut rakennukset, joiden maadoitusjärjestelmät on keskenään yhdistetty esim. kaapelivaippojen tai pienjännitejärjestelmän maadoitusten välityksellä*
- *sähköasema syöttää kaupungin keskustaa tai muuta tiheästi rakennettua aluetta*
- *sähköasema syöttää esikaupunkialuetta, jossa on laajalti pienjännitejärjestelmän maadoitusten välityksellä toisiinsa yhdistettyjä maadoituselektrodeja*
- *sähköasema, jonka läheisyydessä sijaitsee tietty lukumäärä muita sähköasemia*
- *sähköasema, josta lähtee ulos tietty lukumäärä pitkiä maadoituselektrodeja*

- *sähköasema, jonka liitynnät on tehty maadoitusvaikutusta omaavilla kaapeleilla*
- *sähköasema syöttää laajaa teollisuusaluetta*
- *sähköasemat ovat osa järjestelmää, jossa suurjänniteverkon neutraalijohdin on useasta pisteestä maadoitettu.*

(SFS-käsikirja 601:2018 2018, 138.)

Laajojen maadoitusjärjestelmien maadoitusten eheys ja yhteys toisiinsa varmistetaan laitteiston kunnossapitotarkastusten yhteydessä. Tarkastuksen tulokset dokumentoidaan. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 150.)

3.4 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Standardissa SFS 6001 määritellään galvaanisesti yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä. Galvaanisesti yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä muodostuu esimerkiksi kolmen jakelumuuntamon ketjusta, kun muuntamoiden maadoitukset yhdistetään kaapelivaippojen ja/tai keskusköyisien kautta ja mahdollisten pienjänniteverkon suoja- ja PEN-johtimien kautta. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän voi muodostaa myös jokin muu vastaava suurjännitelaitteisto, jonka maadoitukset on yhdistetty vähintään kahteen muuhun suurjännitelaitteistoon. Tällä tavalla yhdistettyjä maadoitusjärjestelmiä voidaan käsitellä yhtenä maadoitusjärjestelmänä. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 149.)

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän riittävän pienen maadoitusresistanssin arvo voidaan määritellä eri tavoin riippuen asennuksen yksityiskohdista. Standardi SFS 6001 määrittelee maadoitusresistanssin määrittämiseen neljä vaihtoehtoa:

- *Maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin suuruus voidaan todeta mittaamalla. Mittaamalla todetaan yhden erikseen mitatun maadoitusjärjestelmän (esimerkiksi yhden erillisen tai useamman yhteen liitetyn jakelumuuntamon) maadoitusresistanssin täyttävän vaatimukset.*

- *Jos maadoitus yhdistetään aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen, voidaan mitoituksessa käyttää hyväksi tiedossa olevaa maadoitusresistanssin arvoa.*
- *Jos maadoitusten mittaaminen yhteen kytketyissä maadoitusjärjestelmissä ei ole kohtuullisilla mittausjärjestelyillä mahdollista ja tiedossa on maadoitusjärjestelmän sijaintipaikan maaperän sähköisen resistiivisyyden arvo, maadoitusresistanssin arvo voidaan laskea käytettyjen maadoituselektrodien rakennetietojen avulla. Maadoitusten toteutuminen suunnitelman mukaisena on dokumentoitava esimerkiksi valokuvaamalla.*
- *Maadoituksen turvallisuus varmistetaan muulla tavoin esim. mittaamalla kosketusjännitteen suuruus.*

(SFS-käsikirja 601:2018 2018, 149.)

Maadoitusjärjestelmään voidaan liittää muita maadoitusjärjestelmiä, jos jollain edellä luetellulla tavalla saavutetaan riittävän pieni maadoitusresistanssin arvo. Liitettävien järjestelmien liittyminen täytyy varmistaa yhteen mitattuun järjestelmään. Myös käyttöönottovaiheessa ja tarkastusten yhteydessä varmistetaan maadoitusjärjestelmien eheys ja yhteys toisiinsa. Maadoitus resistanssia ei kuitenkaan tarvitse mitata, jos verkon rakenteeseen ei ole tullut olennaisia muutoksia. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 149.)

3.5 Erillinen maadoitusjärjestelmä

Standardi SFS 6001 määrittelee myös maadoitusjärjestelmän, joka ei ole galvaanisesti yhteydessä muihin suurjännitejakelujärjestelmiin. Tällainen järjestelmä tulee kyseeseen, kun liitetään esimerkiksi jakelumuuntamo tai vastaava ilmajohtoverkkoon, joka ei ole yhteydessä muihin suurjännitejärjestelmän maadoitukseen. Maadoitusjärjestelmälle on määritetty vaadittu maadoitusresistanssin arvo, joka täytyy mitata ennen käyttöönottoa. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 149.)

Järjestelmä voidaan kuitenkin ottaa käyttöön ennen mittausta, jos maan jäätyminen takia mittausta ei voida suorittaa. Mittaus on suoritettava mahdollisimman

pian, mutta viimeistään vuoden kuluessa käyttöön otosta. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 150.)

Yksittäisen maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi tulee mitata määrävälein. Standardi suosittelee mittausväliksi 6 vuotta siinä tapauksessa, kun järjestelmän maadoitus on toteutettu yhdellä maadoitusjohtimella ja 12 vuotta silloin, kun maadoitus on toteutettu useammalla maadoitusjohtimella. Mikäli erillinen maadoitusjärjestelmä on luonteeltaan sellainen, ettei sille ole vaadittua maadoitusresistanssin arvoa, riittää maadoituksen eheyden varmistamiseksi silmämääräinen tarkastus. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 149.)

4 SÄHKÖVERKON MITOITUS

4.1 Kuormitusten arviointi

Sähköverkon kuormitusten arviointi on tarpeellinen sähköverkon mitoituksessa. Sähköverkon suunnittelu aloitetaan arvioimalla erityyppisten kuormien suuruus ja kasvuprosentit. Näiden arvioinnilla saadaan määritettyä maksimi kuormitusteho, joka sähköverkon tulee siirtää. (Elovaara & Haarla 2011a, 58.)

Kuormitusten arvioinnissa lähtötietoina yleensä käytetään verkkoyhtiön verkkotietojärjestelmässä olevia tietoja. Järjestelmästä käytetään kuluttajien vuosienenergiaa, kuluttajien tyypistä riippuvia kuormituskäyriä, tehokertoimia ja liittymien pääsulaketietoja. (Verkostosuositus SA2:08, 3.)

Muuntamon kuormituksen arvioimiseksi täytyy luoda verkkotietojärjestelmään pienjänniteverkko, joka sisältää liittymiskaapelit, liittymien pääsulakkeet, jakokaapit ja runkokaapelit. Kaapeleina käytetään verkkoyhtiön vakiokaapelityyppejä. Verkkotietojärjestelmän laskelman avulla määritetään muuntamolle optimi sijoituspaikka. Laskelmalla määritetään johtolaadut, jotka toimivat parhaiten oikosulkusuojauksen, tehohäviöiden, jännitehäviöiden ja taloudellisuuden kannalta. Laskentatietojen avulla voidaan arvioida lisäksi kuormitusten kasvu tulevaisuudessa muuntajan valinnan kannalta. Valintaan vaikuttaa kuormituksen kasvun nopeus verrattuna siihen, jos muuntaja vaihdetaankin vasta myöhemmin suurempaa, jolloin tulee ottaa huomioon vaihtokustannukset. (Verkostosuositus SA2:08, 6-7.)

Huipputehon määrittämiseen voidaan käyttää myös Welanderin kaavaa (1). Welanderin kaava antaa erityisesti keskijännitteisissä jakeluverkoissa melko luotettavia tuloksia. Pienjänniteverkoissa taas kuluttajamäärät ovat yleensä niin pieniä, että tulokset ovat epäluotettavia. Taulukossa 1 on Welanderin kaavan kertoimia eri kuluttajatyypeille. (Elovaara & Haarla 2011a, 86.)

$$P_{max} = k_1 * W + k_2 * \sqrt{W} \quad (1)$$

missä

P_{max} on huipputeho (kW)
 k_1 on kerroin
 k_2 on kerroin
 W on vuosienergia (MWh)
 (Elovaara & Haarla 2011a, 87)

Taulukko 1. Welanderin kaavan kertoimia (Lakervi & Partanen 2009, 53)

Sähkön käyttäjäryhmä	k_1	k_2
Kotitalous	0,29	2,50
Sähkölämmitys	0,22	0,90
Palvelu	0,25	1,90

4.2 Jännitteenalenema

Sähkönkuluttajalle toimitettavan sähkön laadussa on tärkeää jännitteen suuruus. Sähkölaitteet eivät toimi aina oikein, jos jännitteen taso on liian alhainen tai liian korkea. Sähkön käyttäjälle näkyvä jännitteenalenema on koko jakeluverkon siirtotien jännitteenalenemien summa. Siihen kuuluvat keskijännitejohdot, jakelumuuntaja ja pienjännitejohdot. Jakeluverkkolaskuissa kiinnitetään huomiota maksimikuormituksella johdon loppupäässä olevan jännitteen itseisarvoon ja jännitteenalenemaan eli alku- ja loppupään jännitteiden itseisarvojen erotukseen. (Lakervi & Partanen 2009, 38.)

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee jännitteenvaihtelun siten, että normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitevaihtelut eivät saisi ylittää +/- 10 % nimellisjännitteestä. Jos jakeluverkkoa ei ole kytketty yleiseen siirtoverkkoon ja kyseessä on erityinen syrjäseudun sähkökäyttäjä, jännitevaihtelu ei saisi ylittää + 10 % / -15 % nimellisjännitteestä. Yksittäisten sähkökäyttäjien hetkellistä sähkökulutusta ei voida täysin etukäteen ennustaa, joten jakeluverkot suunnitellaan todennäköisyyksiin perustuen. Jos mittauksin todetaan jakelujännitteen poikkeaminen rajoista, tulee verkko-operaattorin tehdä tarvittavat korjaustoimenpiteet. (SFS-EN 50160 2010, 20.)

Johdon jännitteenalenema

Jos johdon kuormitus on kohtuullisen pieni, voidaan jännitteenalenema laskea likimääräisyhtälöllä 2. Vikatapausten käsittelyyn tätä kaavaa ei voi käyttää. (Lakervi & Partanen 2009, 38-39.)

$$U'_h = \frac{100 \cdot \sqrt{3} (I_p R + I_q X)}{U} = 100 \cdot \frac{P}{U^2} (R + X \tan \varphi) \quad (2)$$

missä

U'_h	on	jännitteenalenema (%)
I_p	on	kuormitusvirran pätökomponentti (A)
I_q	on	kuormitusvirran loiskomponentti (A)
R	on	johdon resistanssi (Ω)
X	on	johdon reaktanssi (Ω)
P	on	kuormitusteho (W)
U	on	alkupään pääjännite (V)

(Lakervi & Partanen 2009, 38-39)

Muuntajan jännitteenalenema

Muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan yleensä muuntajan suhteellinen oikosulkum-
pedanssi u_z , muuntajan nimellisteho S_N , nimelliskuormitushäviöt P_k ja tyhjäkäyn-
tihäviöt P_0 . Kilpiarvoilla voidaan laskea jännitteenalenema- ja oikosulkuvirtalas-
kuissa tarvittavat reaktanssi- ja resistanssiarvot. (Lakervi & Partanen 2009, 38-
39.)

Muuntajan jännitteenalenema prosentteina voidaan laskea kaavalla 3. (Verkos-
tosuositus SA2:08, 45)

$$\Delta U = \frac{S}{S_N} * (r_k \cos \varphi + x_k \sin \varphi) \quad (3)$$

missä

ΔU	on	muuntajan jännitteenalenema (%)
S	on	muuntajan kuorma (VA)
S_N	on	muuntajan nimelliskuorma (VA)
r_k	on	muuntajan oikosulkuresistanssi (%)
x_k	on	muuntajan oikosulkureaktanssi (%)
φ	on	kuorman virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma

(Verkostosuositus SA2:08, 45)

Muuntajan nimellisimpedanssi voidaan laskea muuntajan nimellisarvojen avulla kaavalla 4. (Hietalahti 2011, 75)

$$Z_N = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = \frac{U_N^2}{S_N} \quad (4)$$

missä

Z_N	on	muuntajan nimellisimpedanssi (Ω)
S_N	on	muuntajan nimellisteho (VA)
I_N	on	muuntajan nimellisvirta (A)
U_N	on	muuntajan nimellisjännite (V)

(Hietalahti 2011, 75)

Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi voidaan laskea kuormitushäviöiden ja näennäistehon avulla kaavalla 5. (Hietalahti 2011, 75)

$$r_k = \frac{100 \cdot P_k}{S_N} \quad (5)$$

missä

r_k	on	muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi (%)
P_k	on	muuntajan kuormitushäviöt (W)
S_N	on	muuntajan nimellisteho (VA)

(Hietalahti 2011, 75)

Muuntajan oikosulkuresistanssi ja –impedanssi voidaan laskea suhteellisilla arvolla impedanssista kaavoilla 6 ja 7. (Hietalahti 2011, 75)

$$R_k = r_k \cdot Z_N \quad (6)$$

$$Z_k = z_k \cdot Z_N \quad (7)$$

missä

R_k	on	muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
Z_k	on	muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
Z_N	on	muuntajan nimellisimpedanssi (Ω)
r_k	on	muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi (%)
z_k	on	muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)

(Hietalahti 2011, 75)

Muuntajan oikosulkureaktanssi voidaan laskea impedanssista ja -resistanssista kaavalla 8. (Hietalahti 2011, 75)

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (8)$$

missä

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi (Ω)
 R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
 Z_k on muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
 (Hietalahti 2011, 75)

Muuntaja on epäjatkuvuuskohta sähköverkossa, jolloin impedanssi ja virta ovat erisuuruiset, riippuen tarkastellaanko niitä ensiön vai toisiojännitepuolella. Laskuissa ne kannattaa redusoida tarkasteltavaan jännitepuolelle. Siirrettävä teho ei muutu jännitepuolelta toiseen siirryttäessä. (Elovaara & Haarla 2011a, 134-135.)

Impedanssin reduointi suoritetaan kaavalla 9 jännitteiden avulla.

$$Z'_2 = \left(\frac{U_{1R}}{U_{2R}}\right)^2 * Z_2 \quad (9)$$

missä

Z'_2 on muuntajan ensiön puolelle redusoitu Z_2 :n arvo (Ω)
 U_{1R} on muuntajan nimellinen ensiöjännite (V)
 U_{2R} on muuntajan nimellinen toisiojännite (V)
 Z_2 on muuntajan toisiojännitepuolella vallitseva impedanssi (Ω)
 (Elovaara & Haarla 2011a, 134-135)

Jännitteen ja virran reduointi suoritetaan kaavoilla 10 ja 11.

$$U'_2 = \left(\frac{U_{1R}}{U_{2R}}\right) * U_2 \quad (10)$$

$$I'_2 = \left(\frac{U_{2R}}{U_{1R}}\right) * I_2 \quad (11)$$

missä

U'_2 on muuntajan toisiojännite redusoituna (V)
 U_{1R} on muuntajan nimellinen ensiöjännite (V)
 U_{2R} on muuntajan nimellinen toisiojännite (V)
 U_2 on muuntajan toisiojännitepuolella vallitseva jännite (V)
 I'_2 on muuntajan toisiovirta redusoituna (A)
 I_2 on muuntajan toisiojännitepuolella vallitseva virta (A)
 (Elovaara & Haarla 2011a, 134-135)

4.3 Oikosulkuvirta

Jakeluverkon virtapiiri voi sulkeutua oikosulkuun eristysviasta tai muusta vikatilanteesta johtuen. Oikosulku voi olla kolmen tai kahden vaiheen välillä. Oikosulku voi tulla myös vaiheen ja maan välille. Verkon tähtipisteen maadoitus vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen maasulkuviassa. Oikosulkuviat voivat aiheuttaa henkilövahinkoja, johtojen ja laitteiden kuumenemista sekä häiriöitä ja keskeytyksiä sähköjakeluun. (Lakervi & Partanen 2009, 28-29.)

Kolmivaiheisen vikavirran suuruus voidaan laskea Theveninin menetelmällä kaavalla 12. Laskentaan tarvitaan vikapaikan jännite ja siitä näkyvä impedanssi. Oikosulkuvirta lasketaan määrittäessä johdinten oikosulkukestoisuutta ja oikosukusuojausten asetteluarvoja sekä vianpaikannuksessa vikapaikkojen löytämiseksi. Laskelmissa kiinnostaa oikosulkuvirran suuruus, mutta ei niinkään vaihekulma. Laskelmat voi tällöin suorittaa itseisarvoilla kaavalla 12. (Lakervi & Partanen 2009, 28-29.)

3-vaiheoikosulkuvirta

$$I_{k3} = \frac{U_v}{\sqrt{(R_{110}+R_m+R_j)^2 + (X_{110}+X_m+X_j)^2}} \quad (12)$$

missä

I_{k3}	on	kolmivaiheoikosulkuvirta (A)
U_v	on	vaihejännite (V)
R_{110}, X_{110}	on	verkon oikosulkuresistanssi ja –reaktanssi (Ω)
R_m, X_m	on	muuntajan oikosulkuresistanssi ja –reaktanssi (Ω)
R_j, X_j	on	sähköaseman ja vikapaikan välisen johtojen resistanssi ja reaktanssi (Ω)

(Lakervi & Partanen 2009, 30)

IEC-standardi 60909 suosittelee, että vikavirtojen laskennassa käytetään minimi- ja maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa taulukon 2 mukaista kerrointa c. Kertoimen arvoon vaikuttaa myös verkon jännite, missä oikosulkuvirtoja tarkastellaan.

Taulukko 2. Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c. (Nikkinen 2018, 19)

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta	Minimioikosulkuvirta
Pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1,00 1,05	0,95 1,00
Keskijännite 1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV – 230 kV	1,10	1,00

1-vaiheoikosulkuvirta

Pienjänniteverkon nopeaan poiskytkentään vaikuttaa pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta. Vikavirran tulee olla riittävän suuri, jotta sulake toimii nopeasti vikatilanteessa. Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla 13. (Lakervi & Partanen 2009, 201.)

$$I_{k1v} = \frac{3 \cdot U_v}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3(r_j + r_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + l(2x_j + x_{j0} + 3x_0))^2}} \quad (13)$$

missä

I_{k1v}	on	yksivaiheoikosulkuvirta (A)
U_v	on	vaihejännite (V)
r_j	on	vaihejohtimen resistanssi (Ω)
R_m	on	muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
x_j	on	vaihejohtimen reaktanssi (Ω/km)
X_m	on	muuntajan oikosulkureaktanssi
x_{j0}	on	vaihejohtimen nolhareaktanssi (Ω/km)
R_{m0}	on	muuntajan nolaresistanssi (Ω)
r_0	on	nollajohtimen resistanssi (Ω/km)
X_{m0}	on	muuntajan nolhareaktanssi (Ω)
x_0	on	nollajohtimen reaktanssi (Ω/km)
l	on	johdon pituus (km)

(Lakervi & Partanen 2009, 201)

Toisaalta D1-2017 mukaan voidaan minimi yksivaiheinen oikosulkuvirta laskea kaavalla 14. Kertoimen c arvona käytetään 0,95, kun lasketaan pienjänniteverkon minimioikosulkuvirtaa. Tällä tavalla laskettuna virhe voi olla korkeintaan 10 prosenttia. (D1-2017, 95.)

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (14)$$

missä

c	on	kerroin 0,95
U	on	pääjännite (V)
I_k	on	oikosulkuvirta (A)
Z	on	impedanssi (Ω)

(D1-2017, 95)

Usein täytyy määrittää suurin sallittu johtopituus, kun suojalaitetta edeltävä impedanssi tai oikosulkuvirta on tunnettu. Kaavalla 15 voidaan laskea sallittu johtopituus. (D1-2017, 96.)

$$l = \frac{\frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} - Z_v}{2 \cdot z} \quad (15)$$

missä

l	= johdon pituus (km)
c	= kerroin 0,95
U	= pääjännite (V)
I_k	= oikosulkuvirta (A)
Z_v	= impedanssi ennen suojalaitetta (Ω)
z	= suojattavan johtimen impedanssi (Ω/km)

(D1-2017, 96)

4.4 Vikasuojaus

Jakeluverkon vikasuojauksen tulee yleensä noudattaa SFS 6000-4-41 mukaisia vaatimuksia, jolloin syötön automaattisen poiskytkentäajan on oltava alle 5 sekuntia. Verkon haltian harkinnan mukaan voidaan kuitenkin käyttää yli 5 sekunnin poiskytkentäaikoja verkon rakenteesta ja luonteesta riippuen. Jakeluverkossa voidaan valita sulakkeet taulukon 3 mukaan edellyttäen, että liittymiä koskevat vaatimukset täyttyvät, jolloin päävarokkeiden on toimittava enintään 5 sekunnissa. Vähintään 25 A päävarokkeilla olevalla liittymällä on pienin oikosulkuvirta oltava vähintään 250 A. Jos 250 A oikosulkuvirtaa ei kohtuudella saavuteta, hyväksytään vähintään 180 A pienin oikosulkuvirta. Muilla toimenpiteillä pitää tällöin saavuttaa riittävä turvallisuustaso. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 242.)

Taulukko 3. Pienin oikosulkuvirta, jonka mukaan jakeluverkon vikasuojaukseen käytetty ylivirtasuoja voidaan mitoittaa. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 242)

Ylivirtasuoja	Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta jakeluverkossa
gG-tyypin sulake $I_N \leq 63 \text{ A}$	$2,5 \times I_N$
gG-tyypin sulake $I_N > 63 \text{ A}$	$3,0 \times I_N$

4.5 Ylikuormitussuojaus

Jakeluverkko voidaan toteuttaa siten, että ylikuormitussuojaus voidaan jättää pois jakeluverkonjohtimista. Tällöin asennuksessa voidaan käyttää maakaapeleita, paljaita avojohtoja tai itsestään sammuvalla johdineristeellä varustettuja avojohtoja. Johtojen osat, joita ei ole asennettu palonkestävästi on asennettava siten, etteivät ne ole lähellä palavaa ainetta. AMKA-riippukierrekaapeli on kuitenkin aina suojattava ylikuormitussuojalla. Ylikuormitussuojan voi sijoittaa myös kaapelin loppupäähän. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 244.)

4.6 Oikosulkusuojaus

Jakeluverkon muissa osissa, lukuun ottamatta liittymisjohtoja, voidaan käyttää verkon haltijan harkinnan mukaan taulukon 3 mukaisia ylivirtasuojia, jolloin oikosulun poiskytkentäaika voi olla yli 5 s. Liittymisjohtojen oikosulkusuojauksessa voidaan käyttää syötön puoleiseen päähän sijoitettuja ylivirtasuojia siten, että oikosulku kytketään pois enintään 5 sekunnissa. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 244.)

Jos liittymisjohdon alkupäässä ei ole ylivirtasuojaa, jolla oikosulku kytketään enintään 5 sekunnissa pois, liittymisjohto asennetaan koko matkalta palonkestävästi. Kaapelin lähellä ei saa olla muita kaapeleita tai mitään palavaa materiaalia. Liittymiskaapeli täytyy ylikuormitussuojata loppupäästä ja vikasuojaus toteutetaan taulukon 3 mukaan ja oikosulkusuojaus taulukon 4 viimeisen sarakkeen mukaisesti. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 244.)

Jos kumpaakaan näistä vaihtoehdoista ei voida noudattaa, pitää liittymisjohdon asennuksessa ja suojauksessa noudattaa standardin SFS 6000-8-801.434 kohdan 3 mukaisia kokemusperäisiä vaatimuksia, joissa määritellään vaatimukset

kaapelin poikkipinnasta, asennuspituuksista rakennuksessa, läpivienneistä ja kaapelin suojuuksista. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 245.)

Taulukko 4. Liittymisjohdon oikosulkusuojana toimivan sulakkeen suurin sallittu mitoitusvirta. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 245)

Kaapelin poikkipinta mm ²		gG-tyyppisen sulakkeen suurin sallittu mitoitus- virta, kun 5 s poiskytkentä- aika ei toteudu	gG-tyyppisen sulakkeen suurin sallittu mitoitus- virta, kun 5 s poiskytkentä- aika toteutuu
kupari	alumiini		
10	16	100	125
16	25	125	160
25	35	160	200
35	50	200	250
50	70	250	315
70	95	315	400
95	120	400	500

4.7 Maadoitusresistanssi

Suomessa käytetään keskijänniteverkon maadoitustapana tähtipisteestään maasta erotettua verkkoa tai niin sanottua sammutettua verkkoa. Sammutetussa verkossa on tähtipisteeseen kytketty induktanssi. Induktanssin reaktanssi on suuruudeltaan suunnilleen verkon johtojen maakapasitanssien aiheuttaman reaktanssin suuruinen. (Lakervi & Partanen 2009, 182.)

Maasta erotetussa verkossa maasulkutilanteessa verkon kaikkien vaiheiden ja verkon tähtipisteen jännitteet muuttuvat ja verkon osissa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Tähtipisteestään maasta erotetussa verkossa maasulkuvirran kulkureitti on vikapaikasta maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen kautta vikapaikkaan. (Lakervi & Partanen 2009, 182-183.)

Maasulkuvirrasta aiheutuu vikapaikkaan kosketusjännite, jonka suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja suojamaadoituksen resistanssista. Standardissa SFS 6001 määritetään sallittu kosketusjännite huomioiden kehon kautta kulkeva virta, vian kesto aika ja kehon kokonaisimpedanssiin vaikuttava virran kulkutie kehossa. Standardin vaatimukset voidaan täyttää maadoituksia parantamalla, vian poiskytkentäaika lyhentämällä tai verkon maasulkuvirtaa pienentämällä. (Lakervi & Partanen 2009, 183.)

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 16.

$$I_f = \frac{j3\omega C}{1+j3\omega C} U_v \quad (16)$$

missä

I_f	on	maasulkuvirta (A)
R_f	on	vikapaikan resistanssi (Ω)
U_v	on	vaihejännite (V)
C	on	maakapasitanssi (F)
ω	on	kulmanopeus $2\pi f$
f	on	taajuus (Hz)

(Lakervi & Partanen 2009, 184)

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään maakapasitanssin kompensoiva reaktori, sammutuskuristin. Tällä saadaan maasulkuvirtaa pienennetyksi. Sammutetun verkon maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 17. (Lakervi & Partanen 2009, 184-185.)

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1+jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (17)$$

missä

I_f	on	maasulkuvirta (A)
R_f	on	vikapaikan resistanssi (Ω)
U_v	on	vaihejännite (V)
R	on	sammutuskuristimen resistanssi (Ω)
C	on	maakapasitanssi (F)
L	on	sammutuskuristimen induktanssi (H)
ω	on	kulmanopeus $2\pi f$
f	on	taajuus (Hz)

(Lakervi & Partanen 2009, 185)

Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa niin sanotun maadoitusjännitteen, joka muodostuu maadoitusresistanssiin. Tyypillinen maasulkutilanne on salamiskun aiheuttama ylijännite, joka menee ylijännitesuojan läpi muuntamon maadoitukseen. Maadoitusjännite lasketaan kaavalla 18. (Lakervi & Partanen 2009, 187.)

$$U_m = I_f * R_m \quad (18)$$

missä

U_m on maadoitusjännite (V)
 I_f on maasulkuvirta (A)
 R_m on maadoitusresistanssi (Ω)
 (Lakervi & Partanen 2009, 187)

Maadoitusjännite aiheuttaa kosketeltavissa olevan niin sanotun kosketusjännitteen. SFS 6001-standardi määrittelee sallitun kosketusjännitteen U_{Tp} erilaisille sähköasennuksille. Maasulun kesto aika vaikuttaa sallitun kosketusjännitteen määrittämiseen taulukon 5 mukaisesti. Maadoitusjännite ei saa ylittää kaavan 19 mukaisia arvoja. Kerroin k määritetään standardissa SFS 6001 eri asennusolosuhteiden mukaisesti. (Lakervi & Partanen 2009.)

$$U_m \leq k * U_{Tp} \quad (19)$$

missä

U_m on maadoitusjännite (V)
 k on kerroin
 U_{Tp} on sallittu kosketusjännite (V)
 (Lakervi & Partanen 2009, 188)

Taulukko 5. Sallittu kosketusjännite U_{Tp} vian kestoajan t_f funktiona (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 108)

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

Tavoitearvona on, että kerroin k saa arvon 2, jolloin muuntamon maadoituksen lisäksi maadoitetaan pienjänniteverkko vaatimusten mukaisesti. Ellei arvoa 2 saavuteta teknisten ja taloudellisten seikkojen vuoksi, voidaan käyttää arvoa 4 tai

5. Tällöin tulee tehdä standardin SFS 6001 määrittämät toimenpiteet. (Lakervi & Partanen 2009, 188-189; SFS-käsikirja 601:2018 2018, 117-118)

Maadoitusresistanssi voidaan määrittää standardin SFS 6001 mukaan, jolloin maadoitusresistanssi R_E riippuu maaperän resistiivisyydestä, maadoituselektrodin mitoista ja asennustavasta. Maadoituselektrodin pituudella on suurin vaikutus, ei niinkään poikkipinta-alalla. Tyypilliset maadoituselektrodin mitat voidaan laskea kaavoilla 20 ja 21. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 152.)

Vaakasuora johdin upotettuna

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 * h * d} \quad (20)$$

Pystysuora tanko tai putki upotettuna

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,3 * d} * \frac{2h+L}{4h+L} \quad (21)$$

missä

L	on	elektrodin pituus (m)
d	on	johtimen halkaisija tai puolet nauhan halkaisijasta (m)
ρ_E	on	maaperän resistiivisyys (Ωm)
h	on	elektrodin upotussyvyys (m)

(SFS-käsikirja 601:2018 2018, 152)

Maaperän resistiivisyyden arvoa voidaan arvioida tai mitata. Standardin SFS 6001 taulukossa NA.J.1 on esitettyinä maaperätyypeittäin esiintyviä maaperän resistiivisyyden arvoja. Resistivisyyden arvoa tarvitaan laskettaessa kaavoilla 20 ja 21 maadoitusresistanssin arvoa. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 151.)

5 KAAPELOINTI

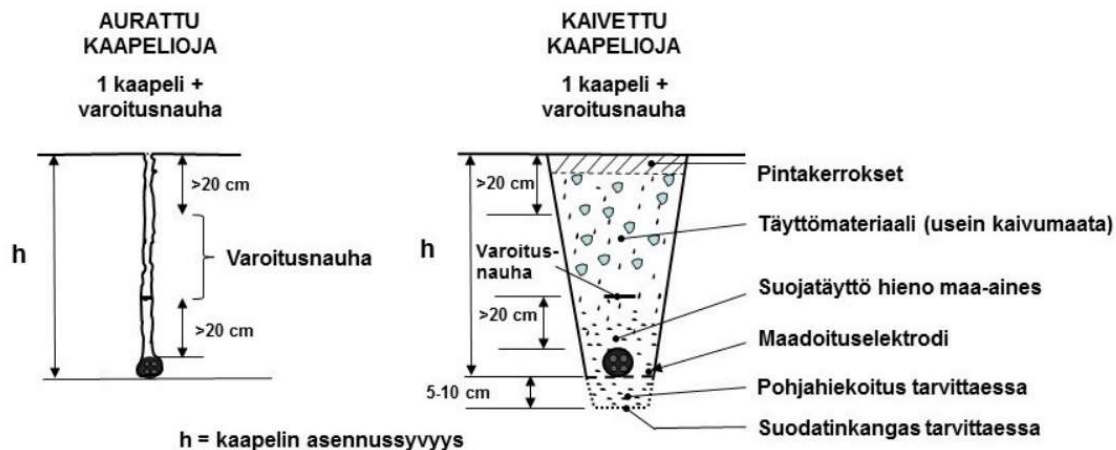
Sähköenergian siirrossa ja jakelussa käytettävät johdot ovat, joko ilmajohtoja tai kaapeleita. Ilmajohdon ja kaapelin ero määritetään asennustavan mukaan. Ilmajohdot ripustetaan pylväiden varaan ulkoilmaan ja kaapelit asennetaan kaapelikanaviin. Sisätiloissa kaapelit asennetaan hyllyihin tai vastaaviin ja ulkotiloissa kaapelit upotetaan maahan tai veteen. (Elovaara & Haarla 2011b, 250.)

5.1 Kaapelin asennus maahan

Standardi SFS 6000-8-814 asettaa vaatimukset kaapelien maahan asennukseen. Kaapelin tulee olla maahan asennettavaksi tarkoitettu ja mekaanisesti riittävän vahva vaipallinen kaapelityyppi. Kaapeli voi olla metallisella kosketussuojalla varustettu, esimerkiksi konsentrisella johtimella oleva kuten MCMK-, AMCMK- tai AXCMK-kaapeli. Kaapeli voi olla myös ilman maadoittavaa kosketussuojaa kuten AXMK-kaapeli. Veteen asennettavan kaapelin täytyy olla valmistajan asennusohjeen mukaan soveltuva veteen asennettavaksi, mekaanisesti riittävän kestävä ja kaapelissa täytyy olla vedenpitävä vaippa. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 301-303.)

Kaapelia tulee käsitellä siten, että se ei vahingoitu missään vaiheessa. Maahan asennettava kaapeli tulee suojata isoilta tai teräviltä kiviltä tai muilta vastaavilta esineiltä esimerkiksi putkella tai käyttämällä kaapelin ympärillä hienojakoista hiekkaa tai vastaavaa. Kaapelin kunto pitää tarkistaa silmämääräisesti ennen kaapelin peittämistä. Tarkastusta ei vaadita silloin, jos kaapeli asennetaan auramalla maahan, jossa ei todennäköisesti esiinny teräviä kiviä. Kaapelien kunto varmistetaan mittaamalla johtimien välinen eristysresistanssi ennen käyttöönottoa. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 302.)

Maahan asennettava kaapeli suositellaan asennettavaksi siten, että kaapelin asennusalustan syvyys on 0,7 metriä maan pinnasta. Kuviossa 14 on esitetty kaapeliojan periaatteellinen poikkileikkaus. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 302.)



Kuvio 14. Kaapeliojan periaatteellinen poikkileikkaus. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 303)

Kaapeleilla, jotka on varustettu maadoitettavalla metallisella kosketussuojalla, voidaan käyttää asennuksen tekijän ja haltijan harkinnan mukaan pienempää asennussyvyyttä. Jos kaapelia peittävän maakerroksen paksuus on pienempi kuin 0,3 metriä, kaapeli on suojattava mekaanisesti esimerkiksi suojaputkella. Taulukossa 6 on esitetty suojausvaatimukset. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 303-304.)

Jos kaapelia joudutaan kuljettamaan maan tai kallion pinnalla, kaapeli täytyy suojata mekaanisesti ja kiinnittää luotettavasti alustaansa. Suojana voidaan käyttää raskaan käytön suojaputkia-, kouruja tai vastaavia suoja. Kallion pinnalla olevan kaapelin suojana suositellaan käytettävän betonivalua suojaputken tai kourun lisäksi. Maasta tai vedestä nouseva kaapeli on suojattava vähintään 1,5 metrin korkeudelle ja liikenneväylän varrella vähintään kahden metrin korkeudelle maan pinnasta. Suojuksen on ulotuttava vähintään 0,2 metriä maan tai vedenpinnan alle. Suojana voi käyttää muototerästä, vähintään SFS-EN-61386-1 mukaista lujuusluokan 4 asennusputkea, raskaan käytön suojaputkea tai saman arvoista muuta tapaa. Sähkökaapeliin suojaukseen käytettävien putkien, kourujen ja levyjen tulee olla huomattavalta osalta keltainen ja televerkon suojauksessa punainen. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 303-304.)

Jos kaapeli, jossa ei ole maadoitettavaa metallista kosketussuojaa, asennetaan veteen, suojataan se rantaosuudella kahden metrin syvyyteen saakka alaveden

korkeudesta sopivalla tavalla tai kaivetaan pohjaan. Pohjaan kaivettaessa kaapeli suojataan yleisten vaatimusten mukaisesti. Maahan asennettavien kaapelien suojausvaatimukset ovat taulukossa 6. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 303.)

Taulukko 6. Ilman metallista kosketussuojaa olevan kaapelin suojaus eri asennussyvyyksillä. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 304)

Kaapelin tai suojaputken asennussyvyys h (kaapelin asennusalustan syvyys)	Standardin SFS-EN 61386-24* mukaisen iskunkestävyyden ja puristuskestävyyden mukaan varoituss nauha	Standardin SFS-EN 50520 mukaisen iskunkestävyyden mukaan varoituss nauha
$h \geq 0,7$ m		
$0,5$ m $< h < 0,7$ m	L 450	suojalevy, -kouru tai -nauha
$0,3$ m $\leq h \leq 0,5$ m piha ja puistoalueilla	N 750	suojalevy, -kouru tai -nauha
$0,3$ m $\leq h \leq 0,5$ m muilla alueilla	N 450	suojalevy, -kouru tai -nauha
* Standardin SFS-EN 61386-24 korvaava standardi SFS-EN 50626-1 Conduit systems buried underground for the protection and management of insulated electrical cables or communication cables - Part 1: General requirements on valmisteilla.		

Myös kaapelin sijoitusluvan myöntäjä voi määrittää lisävaatimuksia kaapelin asennukseen ja suojaukseen. Liikenneviraston määräyksessä tiealueelle kaapeloitaessa tulee noudattaa taulukon 7 mukaisia asennussyvyysjä ja suojaustapoja jyrkkäluiskaisella tiellä. (LIVI/44/06.04.01/2018 3:16.)

Taulukko 7. Kaapelin asennussyvyys ja suojaustapa tiealueella jyrkkäluiskaisella tiellä. (LIVI/44/06.04.01/2018 3:16)

Asennussyvyys (m)	ojan pohja ¹⁾	ulkoluiska ja muu tiealue ojan takana
paljas kallio	ei sallittu	konekaivun kestävä ²⁾
0,2...0,29	ei sallittu	konekaivun kestävä ²⁾
0,3...0,49	konekaivun kestävä ^{2, 3)}	sähkö: muoviputki B ⁵⁾ tele: (halkaistu) putki
0,5...0,69	sähkö: muoviputki A ⁴⁾ tele: (halkaistu) putki	sähkö: muoviputki B ⁵⁾ tele: ei suojausta
0,7...0,79	sähkö: muoviputki A ⁴⁾ tele: ei suojausta	ei suojausta
vähint. 0,8	ei suojausta	ei suojausta

- 1) Ojan pohjaan tai ojan pohjan viereen sijoitettu pituussuuntainen johto enintään 0,5 m vaakasuoralla ojan pohjasta.
- 2) Kallion tai suuren maakiven pintaan kiinnitetty tai tasatun louheen pintaan tehty betonivalu, sinkitty teräs tai betonikouru tai UV-suojattu massiiviseinäinen muoviputki, jonka seinämäpaksuus on vähintään 9 mm (alle 110 mm putkissa 6 mm) ja rengasjäykkyys on vähintään 60 kN/m². Betonivalun sisällä on oltava kouru.
- 3) Tämän tapauksen käyttöä on rajoitettu 14 §:ssä lyhyelle matkalle, ja silloinkin vain, kun muut sijaintipaikat eivät ole mahdollisia.
- 4) Luokan A (N750) muoviputki tai lyhyellä matkalla vastaavan suojan antava vähintään 1 m pituinen kouru tai halkaistu muoviputki. Louheessa putki suojataan murskeella lohkkareiden paineelta.
- 5) Luokan B (N450) muoviputki tai vastaavan suojan antava kouru.

Loivaluiskaisen tien tiealueelle kaapelin asennuksessa tulee noudattaa taulukon 8 mukaisia asennussyvyksiä ja suojaustapoja. Loivaluiskaisella tiellä on mahdollista kaapelin asennus tien sisäluiskaan edellyttäen luiskan olevan rakenteeltaan ja maaperältään soveltuva siihen. (LIVI/44/06.04.01/2018 3:16.)

Taulukko 8. Kaapelin asennussyvyys ja suojaustapa tiealueella loivaluiskaisella tiellä. (LIVI/44/06.04.01/2018 3:16)

Asennussyvyys (m)	sisäluiska	ojan pohja ¹⁾	ulkoluiska ja muu tiealue ojan takana ³⁾
paljas kallio	ei sallittu	ei sallittu	konekaivun kestävä ²⁾
0,2...0,29	konekaivun kestävä ^{2, 3)}	konekaivun kestävä ^{2, 3)}	konekaivun kestävä ²⁾
0,3...0,49	muoviputki A ⁴⁾ tele: (halkaistu) putki	sähkö: konekaivun k. ²⁾ tele: (halkaistu) putki	sähkö: muoviputki B ⁵⁾ tele: (halkaistu) putki
0,5...0,69	sähkö: muoviputki B ⁵⁾ tele: ei suojausta	sähkö: muoviputki A ⁴⁾ tele: ei suojausta	sähkö: muoviputki B ⁵⁾ tele: ei suojausta
0,7...0,79	ei suojausta	ei suojausta	ei suojausta
vähint. 0,8	ei suojausta	ei suojausta	ei suojausta

- 1) Ojan pohjaan tai ojan pohjan viereen sijoitettu pituussuuntainen kaapeli enintään 1 m etäisyydellä ojan pohjasta.
- 2) Kallion tai suuren maakiven pintaan kiinnitetty tai tasatun louheen pintaan tehty betonivalu, sinkitty teräs tai betonikouru tai UV-suojattu massiiviseinäinen muoviputki, jonka seinämäpaksuus on vähintään 9 mm (alle 110 mm putkissa 6 mm) ja rengasjäykkyys on vähintään 60 kN/m². Betonivalun sisällä on oltava kouru.
- 3) Tämän tapauksen käyttöä on rajoitettu 13 §:ssä.
- 4) Luokan A (N750) muoviputki tai lyhyellä matkalla vastaavan suojan antava vähintään 1 m pituinen kouru tai halkaistu muoviputki.
- 5) Luokan B (N450) muoviputki tai vastaavan suojan antava kouru.

Standardin 6001 mukaan keskijännitekaapeleiden maahan asennuksessa noudatetaan vähimmäisvaatimuksena ilman metallista kosketussuojaa olevan pienjännitekaapelin suojausta koskevia vaatimuksia. (SFS-käsikirja 601:2018 2018, 144)

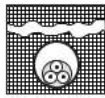
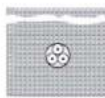
5.2 Kaapelin kuormitettavuus maassa

Kuormituksen luonteen ja haltijan harkinnan mukaan jakeluverkoissa voidaan käyttää soveltuvaa ympäristön lämpötilaa ja maan lämpöresistiivisyyden arvoa.

Kuormitettavuuden määrittelyssä voidaan ympäristönlämpötilana maassa käyttää +15 °C. Maan lämpöresistiivisyyden perusarvona voidaan käyttää 1,0 K m/W maahan asennettavilla kaapeleilla. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 251.)

Tyypillisten jakeluverkkokaapelien kuormitettavuusarvot edellä mainituissa olosuhteissa on esitetty taulukossa 9. Asennustapa D1 vastaa asennusta putkeen ja umpinaiseen johtokanavaan. Asennustapa D2 vastaa asennusta suoraan maassa ilman mekaanista suojaa tai mekaanisella suojalla esimerkiksi suojakourulla. Kuormitettavuus on ampeereina PVC-eristeiselle kuparijohtimiselle kaapelille ja PEX-eristeiselle alumiinikaapelille. Johtimien lämpötilat ovat PVC kaapelilla +70 °C ja PEX kaapelilla +65 °C. (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 251.)

Taulukko 9. Maahan asennettujen kaapelien kuormitettavuus ampeereina (SFS-käsikirja 600-1-2 2017, 252)

Johtimen nimellinen poikkipinta mm ²	Kuormitettavuus taulukon B.52.1 mukaisilla asennustavoilla	
	D1	D2
		
Kupari		
1,5	22	26
2,5	29	35
6	47	57
10	61	77
16	79	100
25	101	130
35	120	160
50	142	190
70	175	240
95	207	285
120	236	325
Alumiini		
16	61	78
25	79	100
35	94	125
50	112	150
70	137	185
95	162	220
120	184	255
150	207	280
185	233	330
240	267	375
300	303	430

6 UUDEN MUUNTAMON SUUNNITTELU

6.1 Nykyinen tilanne

Eräällä liittymällä on havaittu liian huono sähkönlaatu. Jännitteenalenema on liian suuri, jolloin moottorit eivät käynnisty oikein. Liittymän taakse on rakennettu uutta, sähkönkulutusta lisäävää tekniikka, jota ei ole osattu ottaa huomioon, kun liittymä on aiemmin liitetty uuteen maakaapeliverkkoon. Liittymällä olevat laitteet ja moottorit vaativat syöttävältä verkolta riittävää oikosulkuvirtaa käynnistykseen asianmukaisesti. Verkkoyhtiö on tehnyt sähkönlaadun mittausta liittymällä ja todennut nykyisen sähkönsyötön riittämättömäksi.

Nykyinen sähkönsyöttö (Liite 5):

- Muuntamon lähdössä on 200 A:n sulakkeet.
- Runkokaapelina on 151 metriä AXMK 4x150 kaapelia ja sen jälkeen 738 metriä AXMK 4x95 kaapelia.
- Liittymän läheisyydessä on jakokaappi, jossa on 400 A:n nimellisvirtainen jonovarokeytkin. Jonovarokeytkimeen on asennettuna tällä hetkellä 100 A sulakkeet.
- Liittymiskaapelina jakokaapilta pääkeskukselle on AXMK 4x240 kaapeli, joka on 8 m mittainen.
- Liittymän pääsulakkeina ovat 63 A:n sulakkeet.
- Samassa muuntamon lähdössä on 15 liittymää.
- 3-vaiheoikosulkuvirta liittymällä on $I_{k3} = 742$ A verkkotietojärjestelmän laskennassa.
- 1-vaiheoikosulkuvirta on $I_{k1} = 349$ A verkkotietojärjestelmän laskennassa.
- Jännitteenalenema on $U_h = 9,1$ %.
- Liittymiskaapelin osalta oikosulkuvirta ei ole riittävä nopeaan vian poiskytkentään, mutta ylikuormitussuojaus on toteutettu johdon loppupäässä 63 A sulakkeilla ja kaapeli on asennettu palonkestävästi. Taulukon 3 mukainen vaadittu minimioikosulkuvirta on $I_{k1} \geq 3,0 \times I_N = 3,0 \times 100$ A = 300 A.

- Liittymän pääsulakkeina on 63 A sulakkeet. D1-2017 taulukon 41.5 mukaan 63 A gG sulakkeen minimoioikosulkuvirta, jolla suojaus toimii alle 5 sekunnissa, on 320 A ja vaadittu mitattu arvo on 400A (D1-2017, 94).

6.2 Tavoitteet

Uuden muuntamon suunnittelussa on tavoitteena suunnitella uusi puistomuuntamo, josta syötetään ensisijaisesti yhtä liittymää, mutta muuntamoon on myöhemmin mahdollista lisätä kulutuspisteitä. Tavoitteena on saavuttaa pienempi jännitteenalenema, suurempi oikosulkuvirta ja parempi jännitejäykkyys sähkölaitteiden käynnistymisen varmistamiseksi.

6.3 Muuntamon valinta ja sijainti

Muuntamon sijainniksi suunnitellaan paikka, jossa se on mahdollisimman optimi paikassa kulutusliittymään nähden ja toisaalta lähellä päätietä, josta se on helppo liittää mahdolliseen laajenevaan keksijännitemaakaapeliverkkoon. Valtatien toisella puolella kulkee keskijänniteavojohtolinja, josta syöttö muuntamolle voidaan ottaa. Valtatien tiealueelle kaapelointia tulee noin 300 metriä. Tätä kaapelia voidaan hyödyntää myöhemmin, kun maakaapelointi jatkuu tältä alueelta.

Puistomuuntamoita on verkkoyhtiöllä kolmea vakiomallia, jotka ovat kooltaan ja kytkentätavoiltaan erilaisia. (Liite 10)

- 2+0+0; 2 kpl kiskoliitoksia, ilmaeristeinen, 630A, 200 kVA
- 0+2+1 tai 0+3+1; ei kiskoliitoksia, kuormaerottimet ja muuntajaerotin, KJ-kojeisto 24kV, 630 A, SF6, 630A, 315 kVA
- 0+2+1 tai 0+3+1 tai 0+4+1; ei kiskoliitoksia, kuormaerottimet ja muuntajaerotin, KJ-kojeisto 24 kV, 630 A, SF6, 1000 kVA

Liittymän pääsulakkeet ovat 63 A, jotka voivat suurentua 100 A suuruisiksi, jolloin näennäisteho $S = 69,3$ kVA, joka olisi noin 70 % 100 kVA jakelumuuntajan kokonaistehosta. Valitaan jakelumuuntajaksi seuraava verkkoyhtiön muuntajakoko, joka on 200 kVA. Tällöin jää reserviä liittää myöhemmin viereisiä kiinteistöjä, kun maakaapeliverkon saneerausta jatketaan.

Muuntamoon ei tarvita erottimia. Muuntamo tulee sellaiselle paikalle, ettei haara-johtoja lähde ja muuntamo voidaan liittää myöhemmin ketjuun. Valitaan muuntamoksi 2+0+0 200 kVA muuntamo. Muuntamo yleensä valitaan siten, että muuntamoon voidaan lisätä yhden pykälän suurempi muuntaja, mutta tässä tapauksessa muuntaja on jo nyt ylimitoitettu, joten 200 kVA muuntamo on riittävä.

6.4 Kaapelivalinnat

Kuormitusvirta muuntamon ylikuormitustilanteessa olisi $1,5 \times 200 \text{ kVA} = 300 \text{ kVA}$, jolloin virta 20 kV:n tasossa on $I_{20\text{kV}} = 15 \text{ A}$. Kaapeliksi käy mikä koko vain, koska AHXAMK-WP 3x50 kuormitettavuus maassa 65 asteisena on 155 A. Suurin 1 s oikosulkuvirta kaapelille on 4,7 kA. Liitteessä 9 on kaapelien ominaisarvoja verkkotietojärjestelmästä. Verkkotietojärjestelmän mukaan ilmajohtolla maksimioikosulkuvirta maakaapelin kytkeytymispisteessä on 1,14 kA (Liite 7). Keskijännite- maakaapeliverkon saneeraus on toteutettu ympäristössä AHXAMK-WP 3x95 kaapelilla. Kaapeliksi valitaan sama kaapelityyppi ja koko, jotta se on sopiva liittää maakaapeliketjuun myöhemmin.

Pienjännitekaapeliksi muuntamolta jakokaapille valitaan AXMK 4x150 kaapeli. Taulukon 9 mukaan 150 mm^2 alumiinikaapelia voidaan kuormittaa 207 A, kun kaapeli on asennettu suojaputkeen. Jos kaapeli on asennettu suoraan maahan tai suojattu suojakourulla, kaapelia voidaan kuormittaa 280 A.

6.5 Pienjännitekytkimien- ja sulakkeiden valinta

Verkkotietojärjestelmän laskennasta saadaan liittymälle oikosulkuvirtojen uudet arvot: $I_{k3} = 3245 \text{ A}$ ja $I_{k1} = 2136 \text{ A}$ (Liite 6).

Liittymän tämänhetkiset pääsulakkeet ovat 63 A, mutta voivat suurentua 100 A suuruisiksi. Liittymän pääkeskukselta verkkoyhtiön jakokaapille on kaapeli AXMK 4x240. Jakokaapilla annetaan olla 100 A sulakkeet. Jakokaapin sulakkeet voidaan muuttaa suuremmiksi siinä yhteydessä, jos liittymän pääsulakekoko kasvaa, jotta verkko säilyy selektiivisenä.

Muuntamolle valitaan 200 A sulakkeet. Taulukon 3 mukaan 200 A sulakkeille jakeluverkossa vaaditaan pienimmäksi 1-vaiheiseksi oikosulkuvirraksi $3,0 \times I_N = 3,0 \times 200 \text{ A} = 600 \text{ A}$, joten suojaus toteutuu tältä osin.

Jakokaapilla olevat 100 A sulakkeet ovat liittymiskaapelille, jolloin oikosulkusuojaustarkastelussa tulee noudattaa taulukon 4 viimeisen sarakkeen arvoja. Liittymiskaapelin osalta tulee pyrkiä enintään 5 sekunnin poiskytkentäaikaan, jolloin sulakkeelle tarvittava oikosulkuvirta voidaan tarkistaa D1-2017 kirjan taulukosta 41.5 (D1-2017, 94). Taulukon mukaan 100 A sulakkeelle vaaditaan 580 A oikosulkuvirta, jotta se toimii enintään 5 sekunnissa. Taulukon 4 mukaan sulakkeen mitoitusvirta voi olla 500 A, jos kaapelina on 120 mm^2 alumiinikaapeli ja suojaus toimii alle 5 sekunnissa. Tässä tapauksessa, kun sulakkeet ovat 100 A, kaapeli 240 mm^2 ja oikosulkuvirtaa 2136 A, suojaus toimii riittävän nopeasti, alle 5 sekunnissa.

6.6 Muuntamon maadoitus

Muuntamon syöttö otetaan avojohtolinjasta, jolloin maadoitusjärjestelmä muuntamolle on erillinen muusta suurjännitelaitteiston maadoituksesta. Verkkotietojärjestelmä antaa kyseiselle muuntamolle vaadituksi maadoitusimpedanssin arvoksi $17,7 \Omega$ (Liite 8), jolla saavutetaan $2 \times U_{TP}$ vaatimus. Muuntamoa ympäröivän maaperän resistiivisyyden arvo on arviolta $500 \Omega\text{m}$. Verkkotietojärjestelmä antaa muuntamolle maasulun laukaisuajan asetteluarvon 0,36 s. Jos maasulun poiskytkennän kokonaisaika on noin 0,5 sekuntia, taulukosta 5 saadaan sallittu kosketusjännitteen arvo $U_{TP} = 220 \text{ V}$. Maadoitusjännitteen voi laskea kaavalla 19:

$$U_m \leq 2 * U_{Tp} = 2 * 220 \text{ V} = 440 \text{ V}$$

Tarvittava maadoituselektrodin pituus on laskettu liitteeseen 12 maaperän resistiivisyyden arvolla $500 \Omega\text{m}$, maadoituselektrodin halkaisijalla 25 mm^2 kuparia, asennussyvyydellä 0,8 m ja maadoitusresistanssilla $17,7 \Omega$. Laskennan tuloksena 60,15 m vaakamaadoituselektrodia on riittävä määrä saavuttamaan verkkotietojärjestelmän vaatima $17,7 \Omega$ maadoitusresistanssiarvo.

Muuntamolle asennetaan työkartan (Liite 1) mukaisesti kaksi potentiaalirengasta sekä maadoituselektrodi. Tällöin muuntamolla on noin 60 metriä maadoituskuparia. Avojohtolinjaan tehtävän pylväs nousun kaapelipäätteelle asennetaan ylijännitesuojat ja näitä varten myös asennetaan pylvään luokse 25 metrin maadoituselektrodi, joka yhdistyy muuntamon maadoitukseen kaapelin kosketussuojien kautta. Näiden lisäksi on jakokaapilla 25 metrin pituinen maadoituselektrodi, joka yhdistyy PEN-johtimen kautta muuntamon maadoitukseen. Riittävän pieni maadoitusresistanssin arvo täytyy varmistaa mittaamalla.

6.7 Luvat ja sopimukset

Kaikista verkkoyhtiön sijoittamista laitteista ja kaapeleista laaditaan maankäyttö-sopimukset maanomistajien kanssa ja tarvittavilta osin viranomaisten kanssa. Maanomistajien kanssa tehdään johtoaluesopimukset, joissa määritellään kaikki mitä maanomistajan maille tullaan asentamaan ja mahdollisimman tarkasti kaapelointireitit. Maanomistajille maksetaan korvaukset sijoitetuista kaapeleista ja laitteista.

Yksityistien tiekuntien kanssa tehdään sopimukset, kun kaapelia asennetaan tiealueelle tai tehdään alituksia yksityistiehen. Sopimuksissa ilmenevät kaapelien sijoituspaikat, kuten kaapelin asennus tien sisäluiskaan tai ojan ulkoluiskaan sekä tiehen tulevat alitukset ja alitusten toteutustapa. Toteutustapa voi olla esimerkiksi tunkkaus, suuntaporaus tai kaivaminen. Yksityistien alueelle sijoitettavista yhdyskuntaa palvelevan maahan sijoitettavan johdon ja sellaiseen liittyvän vähäisen laitteen sijoittamisesta antaa suostumuksen tiekunta tai tieosakkaat, jos tiekuntaa ei ole perustettu (Yksityistielaki 560/2018 30 §).

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen eli ELY-keskuksen tiealueelle asennettavasta kaapelista haetaan sijoituslupaa ELY-keskukselta. ELY-keskuksen sijoituslupaa varten on laadittu suunnitelmakartta, joka on liitteessä 4. Suunnitelmakarttaan on merkitty kaapelireitti tiealueella sekä muuntamon sijainti. ELY-teille on määritetty suoja-alue, joka vaikuttaa muuntamon etäisyyteen tien keskilinjasta. Maantien suoja-alue ulottuu pääsääntöisesti seutu- ja yhdysteillä 20 m, valta- ja kantateillä 30 m sekä moottori- ja moottoriliikenneteillä 50 m päähän ajoradan keskilinjasta (ELY-keskus 2019).

ELY-lupahakemukseen edellytetään liitettäväksi esiselvitysten tarkastuslista, jossa on listattu hakemusta varten selvitettävät asiat, pohjavedensuojaukset tiealueella, mahdolliset tulevat tiehankkeet, alituskohdat, ojaluisen kaltevuus, sillat, rummut, tiealueen maaperä sekä olemassa olevat johdot ja kaapelit. Hakemukseen tulee liittää myös liikenteenohjaussuunnitelma.

Toimenpidelupahakemus kaupungille laaditaan Lupapiste-palvelussa. Toimenpidelupahakemukseen tarvitaan muuntamon perustustapaselvitys ja asemapiirros, jossa näkyy muuntamon tarkka sijainti valtatie ja yksityistien keskilinjaan nähden. Tässä tapauksessa, kun kyseessä on valtatie, suoja-alueeksi määräytyy 30 metriä. Muuntamo tulee sijoittaa suoja-alueen ulkopuolelle. Yksitystiehen nähden muuntamon etäisyys suunniteltiin 12 metrin päähän yksityistien keskilinjasta, koska se on yksityistielain mukainen suoja-alue yksityistiellä (Yksitystielaki 560/2018 2:5 §).

6.8 Työkuvat ja kaaviot

Työalueesta laadittiin työkuvat, jossa on kartat työalueelle saapumiseen sekä tarkka työkartta (Liite 1). Työkarttaan kirjattiin kaikki maastosuunnittelun yhteydessä ilmenneet asiat ja maanomistajien kanssa sovitut asiat. Kaapelien sijainnit merkattiin karttaan, kuten sijoitussopimuksissa on sovittu. Kaapelien tyypit ja pituudet merkittiin työkarttaan sekä alituskohdat, putken halkaisija ja alitustapa. Myös työalueella olevat vesijohdot ja olemassa olevat kaapelit, joita tulee varoa, kirjattiin karttaan. Olemassa olevien johtojen sijainnista pyydettiin kartat jo kaapelireitin suunnittelun yhteydessä. Työkuvaan merkattiin myös muuntamolle tulevat maadoitukset, jotka täytyy tehdä maatöiden yhteydessä.

Pienjännitekaapeli asennetaan muuntamolta olemassa olevaan jakokaappiin ja nykyinen jakokaapin syöttö irrotetaan molemmista päistä. Vanha syöttökaapeli jää pois käytöstä. Jakokaapeista laadittiin uudet kaaviot, jotka ovat liitteessä 3. Jakokaappikaavioissa näkyy uudet sulakekoot, lähtöjen suunnat ja kaapelityypit.

Muuntamokaavio on liitteessä 2. Kaaviossa on keskijännitelähdöt ja pienjännitekeskuksen lähdöt. Keskijännitepuolelle on merkitty ylijännitesuoja, lähdön

suunta, kaapelin tyyppi ja pituus. Pienjännitekeskukseen on merkitty jonovaro-kekytkimien koko, sulakkeiden koko, lähtöjen suunnat, kaapelityyppi ja kaapelin pituus.

6.9 Sähköverkon laskennat

Liitteessä 12 on laskettuna opinnäytetyössä esitetyillä kaavoilla sähköverkon mitoitusliittymien maksimi kolmivaiheisia oikosulkuvirtoja ja minimi yksivaiheisia oikosulkuvirtoja. Myös jännitteenalennemat on laskettu liitteen 12 laskuissa muuntajalle ja jokaiselle kaapelille erikseen sekä näiden yhteenlaskettu tulos. Laskennat on suoritettu uudelle suunnitellulle verkolle.

Liitteen 12 laskennat:

1. Syöttävän 20 kV verkon resistanssi ja reaktanssi on saatu verkkotietojärjestelmän laskennasta, joka on liitteessä 6. Nämä tulokset on redusoitu tarkasteltavaan 0,4 kV tasoon.
2. Keski-jännitekaapelin resistanssi ja reaktanssi pylväs-nousulta muuntamolle on laskettu verkkotietojärjestelmän käyttämistä arvoista, jotka ovat liitteessä 6. Laskentatulokset on redusoitu tarkasteltavaan 0,4 kV tasoon.
3. Pienjännitekaapeleille on myös laskettu resistanssit ja reaktanssit verkkotietojärjestelmän arvoja käyttäen. Kaapelien resistanssi- ja reaktanssiarvot kilometriä kohden on esitetty liitteessä 9. Kaapelit sijaitsevat muuntajaan nähden 0,4 kV puolella, joten niiden arvoja ei tarvitse redusoida.
4. Jakelumuuntajan kilpiarvojen avulla, jotka ovat liitteessä 11, on laskettu oikosulkureaktanssi ja oikosulkuresistanssi. Laskentajännitteenä on käytetty samaa vaihejännitettä 237 V, kuin verkkotietojärjestelmän laskelmissa liitteessä 6.
5. Oikosulkuvirrat on laskettu opinnäytetyössä esitetyillä kaavoilla käyttäen vaihejännitteenä 237 V. Maksimi oikosulkuvirtaa laskettaessa on käytetty kerrointa 1,0 ja kerrointa 0,95 minimi oikosulkuvirtalaskuissa.

Oikosulkuvirtaan vaikuttavat impedanssit muodostuvat suurjännitepuolen impedanssista sekä muuntajan ja pienjännitekaapelien impedansseista. Maksimi oikosulkuvirtaa laskettaessa, ei paluu johtimen impedanssia huomioida. Minimi oikosulkuvirtaa laskettaessa taas huomioidaan myös paluujohtimen impedanssi. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välikaapeleita ja kiskostoja ei huomioitu laskuissa.

6. Jännitteenalenema on laskettu liitteeseen 12 pienjännitekaapeleille ja muuntajalle erikseen. Jännitteenaleneman laskemiseen tarvitaan kuormitustiedot, jotka löytyvät verkkotietojärjestelmän laskennasta liitteestä 6. Liitteestä löytyy laskentajännitteen suuruus, pätöteho ja virta, joiden avulla voidaan laskea näennäisteho ja edelleen loisteho. Laskennat voidaan suorittaa opinnäytetyössä esitetyillä kaavoilla ja lisäksi matematiikan ja sähkötekniikan peruskaavoilla. Kokonaisjännitteenalenemaprocentti saadaan laskemalla kaikki lasketut jännitteenalenemaprocentit yhteen. Jännitteenalenema on laskettu syöttävältä muuntajalta eli jakelumuuntajalta liittymälle saakka.

Laskentatuloksia liitteestä 12 on esitetty taulukossa 10. Laskelmista voidaan todeta, että lasketut arvot ja verkkotietojärjestelmän arvot ovat yhtenevät. Laskuissa ei ole huomioitu lämpötilan vaikutusta impedanssiarvoihin laskettaessa I_{k1} minimiarvoa ja I_{k3} maksimiarvoa, kuten verkkotietojärjestelmän laskennoissa.

Taulukko 10. Laskentatulokset

	Opinnäytetyön laskelmat	Verkkotietojärjestelmästä
I_{k3} muuntamalla	5027 A	5020 A
I_{k1} kaapelissa AXMK 4x150	2181 A	2188 A
I_{k3} jakokaapilla	3227 A	3245 A
I_{k1} kaapelissa AXMK 4x240	2130 A	2136 A
Uh jännitteenalenema	0,995 %	1,0 %

7 POHDINTA

Opinnäytetyössä perehdyttiin pien- ja suurjännitestandardien määritelmiin, vaatimukseen ja suositukseen erityisesti jakeluverkon osalta. Eri maadoitustapoja tutkittiin standardin ja julkaisujen pohjalta, jotta saadaan käsitys, kuinka maadoituksia tulee käsitellä kunkin tyyppisessä suur- ja pienjännitelaitteistossa. Jakeluverkkojen suojausvaatimuksia käsiteltiin standardin vaatimusten mukaisten suojaustasojen saavuttamiseksi ja mitä vaatimuksia tulee tarkastella, jos suojaustasoista joudutaan tinkimään.

Muuntamon suunnittelun yhteydessä laadittiin tarvittavat dokumentit, joita tarvittiin muuntamon kaapeloinnissa, kytkemisessä, maanrakennuksessa ja sijoitusluvhakemuksissa. Luvat ja sopimukset hankittiin maanomistajilta ja viranomaisilta. Muuntamo rakennettiin opinnäytetyössä tuotetuilla suunnitelmillä. Liitteessä 13 on kuvia suunnitteluvaiheesta ja käytössä olevasta verkosta.

Sähköverkon laskentoja varten perehdyttiin tarvittaviin laskentakaavoihin, joilla saadaan sähköverkon mitoitus tehtyä. Laskentatulokset ovat yhtenevät verkkotietojärjestelmän laskentatuloksiin verrattuna. Laskenta olisi käsin laskettuna haastava erityisesti jännitteenaleneman osalta, jos jakelumuuntajan lähdössä olisi suuri määrä kulutuspisteitä. Verkkotietojärjestelmän käyttämiin laskentakaavoihin tai muihin järjestelmän sisäisiin toimintoihin ei puututtu tässä työssä, joten poikkeavuuksia voi löytyä niin laskentaparametrien käytöstä kuin kaavoistakin.

Työssä suunniteltiin uusi puistomuuntamo erityisesti yhtä sähköliittymää varten, jolloin muuntajan koko arvioitiin tämän liittymän mukaan ja mahdollisten lisäliittymien valossa. Myös liittymällä oleva kuormitus voi kasvaa ja pääsulakekoko sen seurauksena. Jos muuntamo suunniteltaisiin uudelle asuinalueelle tai muuhun vastaavaan paikkaan, tulisi jakelumuuntajan kuormituksen arvioinnissa käyttää arviointimenetelmiä, jossa otetaan huomioon kulutusvaihtelut eri tyyppisillä sähkökäyttäjillä.

Opinnäytetyöhön kerättiin jakeluverkon suunnittelussa tarvittavia perusasioita niin teorian, kuin käytännönkin kannalta. Tätä opinnäytetyötä voi hyödyntää uuden jakelumuuntamon suunnittelun runkona tai suunniteltaessa kaapelointia muuntamolta kulutuspisteille.

LÄHTEET

D1-2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 26. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I, 1. painos. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II, 1. painos. Helsinki: Otatieto.

ELY-keskus 2019. Maantien suoja-alueelle rakentaminen. Viitattu 24.10.2019. <https://www.ely-keskus.fi/web/ely/suoja-ja-nakemaalueelle-rakentaminen>.

Energiavirasto 2018. Tekniset tunnusluvut 2018. Viitattu 16.9.2019 <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>.

Fingrid Oyj 2018. Fingridin sähkönsiirtoverkko. Viitattu 16.9.2019 <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko>.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Viitattu 16.9.2019 www.leenakorpinen.fi.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto.

LIVI/44/06.04.01/2018. Liikenneviraston määräys johtojen ja rakenteiden sijoittamisesta maantien tiealueelle.

Määttä, J. & Järvinen, J. 2010. 20/0,4 kV Uusittu pylväsmuuntamo. Viitattu 9.12.2019 <https://calm.iki.fi/tolpat/kuva/4301>.

Nikkinen, J. 2018. Jakelumuuntamon suunnittelutyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö.

Norelco Oy 2019a. Maaseutumuuntamot NPM 400. Viitattu 9.12.2019 <https://norelco.fi/wp-content/uploads/2016/03/NPM400-1.pdf>.

Norelco Oy 2019b. Modulaarinen puistomuuntamojärjestelmä NPM 200. Viitattu 9.12.2019 <https://norelco.fi/wp-content/uploads/2016/03/NPM200-1.pdf>.

SFS-EN 50160 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-käsikirja 600-1-1 2017. Pienjännitesähköasennukset. 1. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-käsikirja 600-1-2 2017. Pienjännitesähköasennukset. 1. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

SFS-käsikirja 601:2018 2018. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 3. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Supperi, V. 2017. Kiinteistömuuntamon saneeraus. Oulun ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö.

Sähkömarkkinalaki 588/2013.

Verkostosuositus SA2:08. Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Yksityistielaki 560/2018.

LIITTEET

- Liite 1. Työkuva (Luottamuksellinen)
- Liite 2. Muuntamokaavio (Luottamuksellinen)
- Liite 3. Jakokeskuskaaviot (Luottamuksellinen)
- Liite 4. Suunnitelmakartta (Luottamuksellinen)
- Liite 5. Laskentatulos vanha verkko (Luottamuksellinen)
- Liite 6. Laskentatulos uusi verkko (Luottamuksellinen)
- Liite 7. Laskentatulos keskijänniteverkko (Luottamuksellinen)
- Liite 8. Laskentatulos maasulkuvirta (Luottamuksellinen)
- Liite 9. Kaapelien tekniset tiedot
- Liite 10. Verkkoyhtiön muuntamotyytit (Luottamuksellinen)
- Liite 11. Jakelumuuntajan arvokilpi
- Liite 12. Jakeluverkon laskelmat
- Liite 13. Valokuvat

LIITE 9 KAAPELIEN TEKNISET TIEDOT

Kuvaus	Vaihe	Ala (mm ²)	Johdinaine	Eristysaine	Vaihe- resistanssi 20 °C:ssa (ohm/km)	Vaihejohtimen reaktanssi (ohm/km)	Maasuskeptanssi (µS/km/vaihe)	Maakapasitanssi (nF/km/vaihe)	Suurin sallittu kuormitusvirta (A)	Sallittu 1 s olkosulkuvirta (kA)	Mitoitusjännite (kV)				
Keskijännite															
AHXW/P50 AHXAMK-WP	3	50	Alumiini	PEX(XLPE)	0,641	0,138	53	170	155	4,7	20				
AHXW/P95 AHXAMK-WP	3	95	Alumiini	PEX(XLPE)	0,380	0,126	66	210	235	8,9	20				
Kuvaus															
AX150 AXMK 4x150	3	150	Alumiini	Eristysaine	Vaihe- resistanssi 40 °C:ssa (ohm/km)	Vaihejohtimen reaktanssi (ohm/km)	Nollajoht. resistanssi 40 °C:ssa (ohm/km)	Nollajohtimen reaktanssi (ohm/km)	Suurin sallittu kuormitusvirta (A)	Sallittu 1 s olkosulkuvirta (kA)	Runkojohdon ylikuormitusvirta (A)	Littymisjohdon ylikuormitusvirta (A)	Runkojohdon olkosulkuvirta (A)	Littymisjohdon olkosulkuvirta (A)	
AX240 AXMK 4x240	3	240	Alumiini	PEX(XLPE)	0,277	0,082	0,277	0,082	255	12,2	250	250	630	315	
									375	22,6	400	400	800	500	

LIITE 11 JAKELUMUUNTAJAN ARVOKILPI

CE		ABB		ABB Sp. z o.o. Ul. Żegańska 1 04-713 Warszawa Poland	
Laji CTO-200/20.5PNSm					
N:o			Valmistusvuosi 2019		
Nimellisteho		200 kVA	Vaiheiden lukumäärä 3		
Stand. EN(IEC) 60076-1					
Nimellisjännite [V]		Virta [A]	Eristystaso		
Y.J.	20500	5.63	LI125AC50		
A.J.	410	281.60	AC3		
Ympäristön max. lämpötila	40°C	Kytöntäryhmä Dyn11			
Sallittu lämpenemä:		Nimellistajuus 50 Hz			
Käämille	65K	Oikosulkuimpedanssi 4.26 %			
Öljylle	60K	Tyhjäkäyntihäviöt 238 W			
		Kuormitushäviöt 2650 W			
		Jäähdytys ONAN			
		Kokonaispaino 768 kg			
		Öljyn paino 146 kg			
		Sydänlevymateriaali kidesuunnattu teräs			
		Sydämen paino 312 kg			
		Käämien materiaali Al/Al			
		Käämien paino 97 kg			
Öljy täyttää standardin IEC 60296					
Öljyn tyyppi Inhibited Nynas Nyltro 100N					
SSTL 5760961					

LIITE 12 1(2) JAKELUVERKON LASKELMAT

IMPEDANSSIT

1. Syöttävä verkko		0,4 kV tasossa		
20 kV tasossa				
R	26,397 Ω	(liite 6)	(kaava 9)	0,01056 Ω
X	19,561 Ω	(liite 6)	(kaava 9)	0,00782 Ω
Z	32,9 Ω	(kaava 8)	(kaava 9)	0,01314 Ω

2. Kaapeli AHXAMK-WP 3x95 (Liite9)		0,4 kV tasossa		
Pituus 0,412 km		20 kV tasossa		
R(Ω/km)	0,380	R=R(Ω/km)*pituus=	0,15656 Ω	(kaava 9) 0,00006 Ω
X(Ω/km)	0,126	X=X(Ω/km)*pituus=	0,05191 Ω	(kaava 9) 0,00002 Ω
		Z= (kaava8)	0,14770 Ω	(kaava 9) 0,00006 Ω

3. Kaapeli AXMK 4x150 (Liite9)		0,4 kV tasossa		
Pituus 0,112 km				
R	0,277 Ω/km	R=R(Ω/km)*pituus=	0,03102 Ω	
X	0,082 Ω/km	X=X(Ω/km)*pituus=	0,00918 Ω	
		Z= (kaava8)	0,02963 Ω	
Kaapeli AXMK 4x240 (liite 9)		0,4 kV tasossa		
Pituus 0,008 km				
R	0,135 Ω/km	R=R(Ω/km)*pituus=	0,00108 Ω	
X	0,079 Ω/km	X=X(Ω/km)*pituus=	0,00063 Ω	
		Z= (kaava8)	0,00088 Ω	

4. Jakelumuuntaja		0,4 kV tasossa		
Un1=	20500 V (liite 11)			
Un2=	410 V (liite 11)			
Sn=	200000 VA (liite 11)			
P0=	238 W (liite 11)			
Pkn=	2650 W (liite 11)			
uz=	4,26 % (liite 11)			
ur=	1,32500 % (kaava 5)			
ux=	4,04870 % (kaava 8)			
Zkm=	89,51325 Ω (kaava 4 ja 7)	(kaava 9)	Zkm =	0,03581 Ω
Rkm=	27,84156 Ω (kaava 4 ja 6)	(kaava 9)	Rkm =	0,01114 Ω
Xkm=	85,07332 Ω (kaava 8)	(kaava 9)	Xkm =	0,03403 Ω

LIITE 12 2(2) JAKELUVERKON LASKELMAT

OIKOSULKUVIRRAT

5. Ik3 muuntamolla ja kaapelin AXMK 4x150 pienin oikosulkuvirta			
Ik3=	5027 A	(kaava 12)	Liitteessä 6 arvo on 5020 A
Ik1=	2181 A	(kaava 12)	Liitteessä 6 arvo on 2188 A
Ik3 jakokaapilla ja kaapelin AXMK 4x240 pienin oikosulkuvirta			
Ik3=	3227 A	(kaava 12)	Liitteessä 6 arvo on 3245 A
Ik1=	2130 A	(kaava 12)	Liitteessä 6 arvo on 2136 A

JÄNNITTEENALENEMA

6. Kuormitustiedot			
S=	30536 VA		
Uv	237 V	(liite 6)	
P	29000 W	(liite 6)	
Q	9563 Var	(kaava 8)	
I	43 A	(liite 6)	
cosφ=P/S=	0,950	-> sinφ=	0,313
		-> tanφ =	0,330
Jännitteenalenema muuntajassa		(kaava 3) Uh=	0,386 %
Jännitteenalenema kaapelissa AXMK 4x150		(kaava 2) Uh=	0,587 %
Jännitteenalenema kaapelissa AXMK 4x240		(kaava 2) Uh=	0,022 %
Kokonaisjännitteenalenema		Uh=	0,995 %
Liitteessä 6 jännitteenalenema		Uh=	1,0 %

MAADOITUSELEKTRODIN MITOITUS

L=	60,15 m	kaava 20
ρ _E =	500 Ωm	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \cdot h \cdot d}$
d=	0,0056 m	
A=	25 mm ²	
h=	0,8 m	
Re=	17,17 Ω	

LIITE 13 VALOKUVAT

Suunniteltu muuntamon paikka



Käytössä oleva muuntamo



Suunniteltu pylväs nousu



Käytössä oleva pylväs nousu

