



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# JAKELUMUUNTAMON SUUNNITTELUYÖ

Yara Suomi Oy, Siilinjärvi

TEKIJÄ: Juha Nikkinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Juha Nikkinen			
Työn nimi Jakelumuuntamon suunnittelutyö			
Päiväys	20.4.2018	Sivumäärä/Liitteet	64 / 8
Ohjaajat lehtori Jari Ijäs, yliopettaja Juhani Rouvali			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Yara Suomi Oy, Siilinjärvi			
Tiivistelmä <p>Yara Suomi Oy, Siilinjärvi laajentaa lähivuosina avolouhostaan. Jotta suunniteltu louhoslaajennus voidaan toteuttaa louhoksen pohjoispäähän, täytyy alueen kohdalla sijaitseva prosessivesiallas tyhjentää. Allas tyhjennetään pumpaamalla se tyhjäksi kahdella lauttapumpulla.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella tyhjennyspumppausta varten alueelle tarvittava sähkönjakelu. Sähkönjakelun kokonaisuus muodostuu keskijänniteverkon liitännästä, jakelumuuntajasta, keskijännitekojeistosta sekä pienjännitekeskuksesta. Tässä opinnäytetyössä keskitytään sähkönjakelun sekä muuntamon suunnitteluun, eikä työ ota kantaa itse pumppuihin tai pumppauksen käytännön järjestelyihin.</p> <p>Opinnäytetyössä on kerrottu yleisesti sähköverkoista sekä sähköverkoissa tapahtuvista vioista ja niiden suojauksesta, mutta työn päätarkoituksena oli toteuttaa sähkönjakelun suunnittelutyö sähkölaitteiston ja muuntamoraennuksen osalta sekä luoda suunnitteluaineiston pohjalta tarjouskyselyaineisto, jonka perusteella pyydettiin kokenaistarjous sähkölaitteistosta ja muuntamorakennuksesta neljältä eri toimittajalta. Eri toimittajien tarjousten perusteella voitiin vertailla eri valmistajien laitteita sekä luoda kustannusarvio koko sähkönjakelukokonaisuudelle.</p>			
Avainsanat Jakelumuuntamo, sähkönjakeluverkko, keskijänniteverkko, jakelumuuntaja, keskijännitekojeisto			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Juha Nikkinen			
Title of Thesis Engineering of the Distribution Substation			
Date	20 April 2018	Pages/Appendices	64 / 8
Supervisors Mr. Jari Ijäs, Senior Lecturer, Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Yara Suomi Ltd. Siilinjärvi			
Abstract			
<p>The purpose of this thesis was to engineer a distribution substation. The substation includes a distribution transformer, a medium voltage switchgear and a low voltage switchboard.</p> <p>Yara Suomi Ltd. Siilinjärvi is planning to expand the opencast mine in the near future. In order to carry out the expansion to the northern part of the mine, the water from the process water reservoir needs to be pump out. Extraction pumping will be carried out with two ferry pumps. For these extraction pump station, the distribution of electricity must be engineered. This thesis focused on the distribution network. Matters regarding the pumps or measures for pumping are not addressed.</p> <p>As a result of this project a bid regarding the necessary electiricity equipment and transforming station was sent to four different suppliers based on the engineered material. Based on the bids from the suppliers, a comparison among different manufacturers' equipment was made, and the costs for the entire project could be estimated. In addition, the best solution for the electricity distribution network could be chosen. The acquired solution can be utilized also in the future after the extraction pump project.</p> <p>Also in this thesis, the electric distribution network, the system faults and the protection of the power distribution system are generally described. The main purpose of this thesis, however, was to engineer the electricity network for electrical equipment and the transforming station.</p>			
Keywords			
Distribution substation, distribution network, medium voltage network, distribution transformer,			
medium voltage switchgear			

## ESIPUHE

Haluan kiittää yhteistyöstä Yara Suomi Oy, Siilinjärven yksikköä sekä erityisesti sähköpäällikkö Pasi Raatikaista opinnäytetyöni ohjauksesta sekä mielenkiintoisesta opinnäytetyöaiheesta. Lisäksi haluan kiittää lehtori Jari Ijasta sekä yliopettaja Juhani Rouvalia työni ohjauksesta sekä hyvistä neuvoista työn aikana.

Kuopiossa 20.4.2018

Juha Nikkinen

## LYHENTEET

AIS	Air Insulated Switchgear
CIS	Customer Information System
DA	Distribution Automation
GIS	Gas Insulated Switchgear
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event
IEC 61850	Tietoliikennestandardi
IED	Intelligent Electronic Device
NCS	Network Control System
NIS	Network Information System
RIO	Remote I/O-unit

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
2	YARA INTERNATIONAL ASA .....	9
2.1	Yara Suomi Oy .....	9
2.2	Yara Siilinjärvi .....	10
3	SÄHKÖNJAKELUVERKKO .....	11
3.1	Siirtoverkko .....	12
3.1.1	Siirtoverkon rakenne .....	13
3.2	Keskijänniteverkko .....	14
3.2.1	Keskijänniteverkon rakenne .....	15
3.3	Pienjänniteverkko .....	15
3.3.1	Pienjänniteverkon rakenne .....	15
3.4	Sähköverkon vikatilanteet .....	16
3.4.1	Oikosulku .....	17
3.4.2	Maasulku .....	23
3.4.3	Ylijännitteet .....	25
3.5	Keskijänniteverkon suojaus .....	26
3.5.1	Oikosulkusuojaus .....	26
3.5.2	Maasulkusuojaus .....	28
3.5.3	Ylijännitesuojaus .....	29
3.6	Pienjänniteverkon suojaus .....	31
3.6.1	Oikosulkusuojaus .....	31
3.6.2	Ylijännitesuojaus .....	31
3.7	Teollisuussähköverkko .....	32
3.8	Sähkönjakeluverkon automaatio .....	33
3.8.1	IEC 61850 .....	36
3.9	Yaran kaivoksen sähkönjakeluverkko .....	37
3.9.1	Käytössä oleva laitekanta ja automaatorakenne .....	37
4	MUUNTAMON SUUNNITTELU .....	40
4.1	Lähtökohdat .....	40
4.2	Muuntamorakennus .....	41
4.3	Keskijännitekojeisto .....	42

4.4	Jakelumuuntaja .....	44
4.5	Pienjännitekeskus .....	45
4.5.1	PSK 1801-standardi .....	48
4.5.2	Pumppulähdöt ja louhosvalaistus .....	48
4.6	Maadoitusjärjestelmä .....	49
4.7	Muuntamon varusteet .....	50
4.8	Tarkastukset ja kunnossapito-ohjelma .....	51
5	MUUNTAMON SÄHKÖTEKNINEN MITOITTAMINEN .....	52
5.1	Oikosulkuvirtalaskenta .....	52
6	TARJOUSKYSELY JA KUSTANNUSARVIO .....	57
7	YHTEENVETO .....	62
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	63
	LIITE 1 PÄÄJAKELUKAAVIO .....	65
	LIITE 2 MUUNTAMON PÄÄKAAVIO .....	66
	LIITE 3 MAADOITUSKAAVIO .....	67
	LIITE 4 MUUNTAMOMAADOITUS .....	68
	LIITE 5 400 V PÄÄKAAVIO .....	69
	LIITE 6 PUMPPULÄHTÖ PIIRIKAAVIO .....	71
	LIITE 7 LOUHOSVALAISTUS PIIRIKAAVIO .....	72
	LIITE 8 400 V LÄHTÖLUETTELO .....	73

## 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli suunnitella sähkönjakelun kokonaisratkaisu jakelumuuntamon osalta prosessivesialtaan tyhjennyspumppausprojektia varten. Lisäksi työssä tehtiin jakelumuuntamon sähkötekni-  
nen mitoittaminen. Suunnitteluaineiston perusteella luotiin tarjouskyselyaineisto neljälle eri toimittajalle, jonka jälkeen voitiin tehdä vertailua eri laitetoimittajien ja -valmistajien ratkaisuista sekä luoda kustannusarvio koko sähkönjakelun kokonaisuuden toteuttamiseksi. Lähtökohtana suunnittelulle tiedettiin muuntamon arvioitu paikka sekä 10 kV:n avojohdon käyttömahdollisuus, johon suunniteltava muuntamo voidaan liittää.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa on kerrottu yleisesti sähköverkoista ja niiden vikatilanteista sekä suojauksesta. Lisäksi opinnäytetyössä on sivuttu sähkönjakeluverkon automaatiota, joka on tärkeä osa nykypäivän sähkönjakeluverkkoa.

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikan kanssa. Opinnäytetyöaihe muotoutui syksyn 2017 aikana. Suunniteltavan muuntamon tarkkaa rakennusajankohtaa ei vielä tiedetä, mutta työssä toteutettava suunnitteluaineisto toimii projektin yleissuunnitelmana ja kustannusarviona sähköistyksen osalta.



## 2 YARA INTERNATIONAL ASA

Yara International ASA on norjalainen kemianteollisuuden yhtiö, joka on syntynyt vuonna 2004 kun se erotettiin omaksi pörssiyhtiökseen norjalaisesta Norsk Hydrosta, jolla on pitkä historia lannoitteiden valmistajana. Norsk Hydro aloitti typpilannoiteteuotannon vuonna 1905 ja oli tuolloin ensimmäinen typpilannoitteiden valmistaja maailmassa. Kun vuonna 2004 Yara erotettiin omaksi yhtiökseen, yhtiö keskittyi kehittämään uusia käyttötapoja perustuotteillensä kuten ammoniakille, urealle ja typpihapolle. Tuloksena on syntynyt kasvava tuotevalikoima, jossa on tuotteita niin ympäristönsuojeluun, kuin ruoka- ja juomateollisuuteen. Tällä hetkellä Yara on maailman suurin kivennäislannoitteiden tarjoaja ja sen toimipisteitä on yli 60 maassa. Pääkonttori sijaitsee Osllossa, Norjassa. (Yara Suomi Oy, 2018)

### 2.1 Yara Suomi Oy

Yaran juuret Suomessa tunnetaan paremmin Kemira-yhtiönimen alla. Kemira perustettiin vuonna 1920 ja sen alkuperäinen nimi oli Valtion Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat. Kemira nimen yhtiö sai vuonna 1972. Kemira otti kansainvälistymisen ensiaskeleet 1960-luvun lopulla, kun se aloitti lannoiteviennin ulkomaille. Kansainvälinen laajentuminen jatkui 1980-luvulle saakka viennin lisäämisellä, kansainvälisten myyntikonttoreiden perustamisella sekä yritysostojen tekemisellä. Kemira-konsernin liiketoimintarakennetta uudistettiin 1990-luvulla, kun Kemiran liiketoimintayksiköt yhtiöitettiin ja samassa yhteydessä Kemiran osakkeet listattiin Helsingin Pörssiin. Lannoitetoiminnan nimeksi tuli Kemira Agro, ja 1990-luvun aikana perustettiin yhtiöitä Baltian maihin; Puolaan ja Unkariin. Kemira Agro kaksinkertaisti liiketoimintansa koon vuonna 1998 ostamalla BASF:n Euroopan rehufosfaattiliiketoiminnan. (Yara Suomi Oy, 2018)

Vuonna 2004 Kemira Agro Oy irtautui kokonaan erilleen Kemira Oyj:stä ja muutti nimensä Kemira GrowHow:ksi, jonka jälkeen vuonna 2007 siitä tuli Yara Internationalin ASA:n tytäryhtiö. Muutos Yaraksi sai alkunsa, kun Suomen valtio myi osuutensa Kemira GrowHow:n osakkeista Yaralle. Tällä hetkellä Yara Suomi Oy:llä on Suomessa tuotantoa kolmella eri toimipaikalla: Uudessakaupungissa, Kokkolassa ja Siilinjärvellä. Lisäksi Vihdissä sijaitsee Kotkanniemen tutkimusasema, jossa on tehty tutkimus- ja kehitystyötä vuodesta 1961 lähtien. (Yara Suomi Oy, 2018)

Yara Suomi Oy tarjoaa viljelijöille ja metsänomistajille kattavan lannoitevalikoiman sekä myös typpikemikaaleja ja teknisiä nitraatteja eri teollisuuden aloille. Lisäksi tarjontaan kuuluu ympäristön suojeleluun käytettäviä tuotteita. Yara Suomi Oy työllistää Suomessa noin 1300 henkilöä ja sen pääkonttori sijaitsee Espoossa. Yara on investoinut Suomeen vuosien 2008-2016 aikana noin 780 miljoonaa euroa. (Yara Suomi Oy, 2018)

## 2.2 Yara Siilinjärvi

Siilinjärven tehtaiden päätuotteita ovat lannoitteet, fosforihappo, apatiitti sekä AN-liuos. Siilinjärvellä sijaitsee myös Länsi-Euroopan suurin fosfaattikaivos, joka on samalla Suomen suurin avolouhos. Kaivoksesta louhittavasta apatiittimalmista irrotettava fosfori irroitetaan rikastusprosessilla, josta lopputuote apatiitti jatkojalostetaan lannoitteeksi. (Yara Suomi Oy, 2018)

Lannoitteita tuotetaan Siilinjärvellä vuodessa noin 500 000 tonnia, pääosin kotimaan peltoviljelyyn, ja fosforihappoa noin 300 000 tonnia lannoite-, eläinrehu- ja elintarviketeollisuuteen. Fosforihappotehtaan raaka-ainetta apatiittia tuotetaan n. 1000 kilotonnia vuodessa, josta menee osa myös vientiin. Lisäksi Siilinjärven toimipaikalla toimii mm. rikki- ja typpihappotehdas sekä oma voimalaitos. (Yara Suomi Oy, 2018)

Yara on tehnyt Siilinjärvelle viime vuosien aikana merkittäviä investointeja. Pelkästään vuonna 2015 investointien määrä kaivokselle oli noin 30 miljoonaa euroa ja tehtaille noin 40 miljoonaa euroa. Vuonna 2017 Siilinjärvelle valmistui uusi rikastushiekankäsittelylaitos. Rikastushiekankäsittelylaitos eli ns. pastalaitos prosessoii apatiitin tuotannosta syntyvän rikastushiekan muotoon, joka on parempi läjittää läjitysalueille. Siilinjärvellä Yara työllistää, aliurakoitsijat mukaan lukien noin 700 henkilöä. (Yara Suomi Oy, 2018)

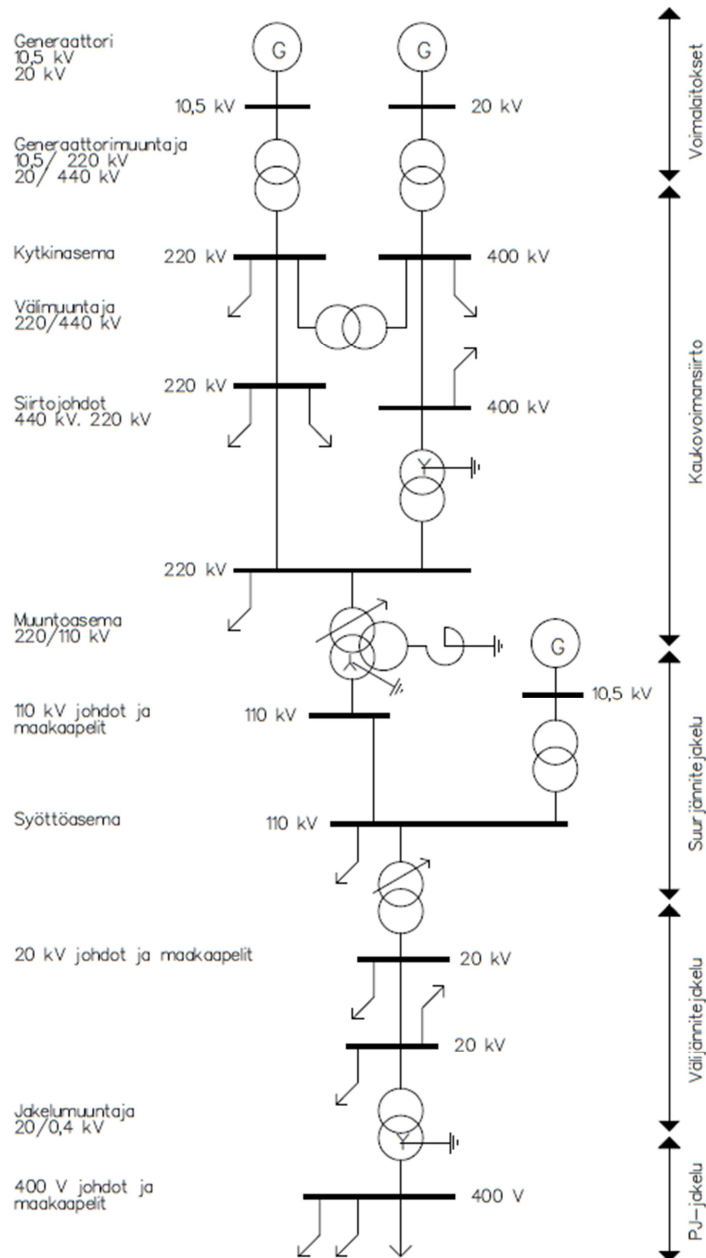
### 3 SÄHKÖNJAKELUVERKKO

Suomessa kaikki kuluttajat sekä voimalaitokset ovat yhdistetty toisiinsa sähköverkolla. Sähköjakeluverkot jakaantuvat joko siirto- tai jakeluverkkoihin käytetyn jännitetason perusteella. Käyttöjännitteet on standardisoitu. Siirtoverkoilla siirretään sähköä kulutusalueille, joiden sisällä sähköä siirretään jakeluverkkojen kautta pienille ja keskiuurille sähkökäyttäjille. (Korpinen, 1998)

Rakennettua sähköverkkoa oli vuonna 2015 Suomessa yhteensä 404 760 kilometriä, joista suurjänniteverkkojen osuus oli n. 22 500 km, keskijänniteverkkojen osuus n. 140 000 km ja pienjänniteverkkojen osuus n. 240 000 km. (Energiateollisuus Oy, 2018)

Standardit SFS 6002 (sähkötyöturvallisuus) sekä SFS 6001 (suurjännitesähköasennukset) määrittelevät jännitteet, joiden jännitetaso on alle 1000 voltia vaihtojännitettä pienjännitteeksi ja, joiden jännitetaso ylittää 1000 voltia suurjännitteeksi. Tästä poiketen, kansankielessä puhutaan kuitenkin yleisemmin pienjännitteestä, keskijännitteestä ja suurjännitteestä. Pienjännitteestä puhuttaessa, tarkoitetaan, aiemmin mainittujen standardien mukaisesti, alle 1000 voltin jännitteitä ja suurjännitteestä, standardeista poiketen yli 110 kilovoltin jännitteistä. Keskijännitteestä puhutaan siis jännitetasoista, jotka ovat yli 1000 voltia, mutta alle 110 kilovoltia. (SFS 6001, 2012) (SFS 6002, 2012)

Suomessa keskijännitettä käytetään keskijännitejakeluverkoissa ja käytetyimmät jännitteet ovat 20 kV ja 10 kV. Teollisuuslaitosten sisäisessä jakelussa ja suurissa moottorikäyttöissä esiintyy usein myös 6 kV:n ja 3 kV:n keskijännitteitä. Sähköjakeluverkon periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 1. (Hietalahti, 2013 s. 82)



Kuva 1. Sähkön siirto- ja jakelujärjestelmän periaatteellinen rakenne

Suomessa sähköverkoissa käytetään kolmivaihejärjestelmää. Kolmivaihejärjestelmän etuja ovat mm. vaihtosähköverkossa olevien muuntajien käyttö, jotka mahdollistavat jännitetason muuttamisen tarkoitukseen sopivaksi, verkon suojauksen helppo toteutus sekä sähkötehon tasainen virtaus. Jännite- tasojen arvoista puhuttaessa, käytetään kolmivaihejärjestelmän pääjännitettä. Pääjännite muodostuu kahden vaiheen välisestä jännitteestä. (Hietalahti, 2013 s. 82)

### 3.1 Siirtoverkko

Suomessa siirtoverkon jännitetasot ovat yleisesti joko 400 kV, 220 kV tai 110 kV. 400 kV:n, 220 kV:n ja tärkeimmät 110 kV:n verkot muodostavat Suomen kantaverkon, joka on sähkönsiirron runkoverkko. Kantaverkkoon on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaat sekä alueelliset jakeluverkot. Kantaverkkoon kuulumattomat 110 kV:n verkon osia kutsutaan suurjännitejakeluverkoksi ja ne kuuluvat

sähköyhtiöiden omistamiin alueverkkoihin, joiden kautta sähkö siirretään kantaverkosta jakeluverkkoon. (Korpinen, 1998)

Suurin osa Suomessa kulutetusta sähköstä siirretään kantaverkon kautta. Kantaverkko mahdollistaa sähköntuottajien ja -kuluttajien keskinäisen kaupan valtakunnan tasolla sekä sähkökaupan valtakunnan rajojen yli. (Finggrid Oyj, 2018)

Koko Suomen sähkönsiirron kantaverkon omistaa Finggrid Oyj. Suomen ainoana kantaverkkoyhtiönä toimivalle Finggrid:lle on asetettu seuraavat perustehtävät ja edellytykset:

- sähkön siirto kantaverkossa (valvonta ja käytön suunnittelu)
- kantaverkon ylläpito, rakentaminen sekä kehittäminen
- sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito
- tasepalvelu, eli eri osapuolten välisten sähköntoimitusten selvittäminen valtakunnan tasolla
- sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen.

Lisäksi kantaverkkoyhtiön tulee huolehtia siitä, että kantaverkko on teknisesti käyttövarma, kaupalliselta siirtokyvyltään riittävä sekä kantaverkkoyhtiön toiminnan on oltava tehokasta ja tasapuolista. (Finggrid Oyj, 2018) (Rouvali, 2017)

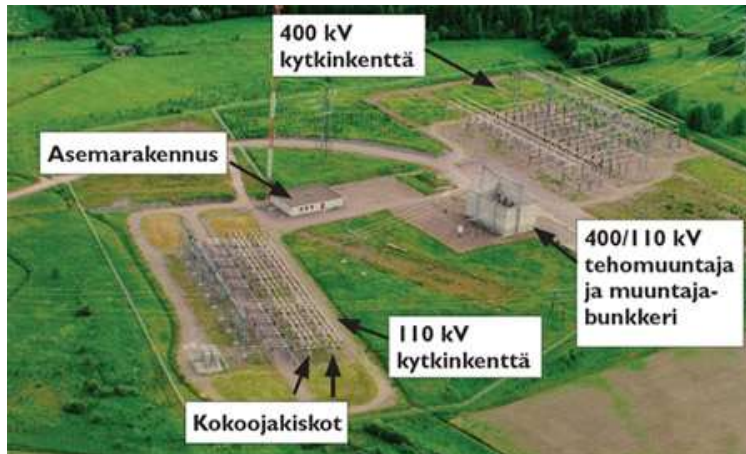
### 3.1.1 Siirtoverkon rakenne

Siirtoverkon johdot rakennetaan yleensä johtorenkaiksi ja silmukkaverkoiksi. Näin saadaan parannettua sähköverkon käyttövarmuutta, sillä syöttöasemat saavat sähköä useampaa eri tietä. Silmukaverkon etuna säteittäisverkkoon verrattuna on se, että verkon häviöt saadaan pienemmäksi. (Elovaara;ym., 2011 s. 57)

400 kV:n ja 220 kV:n siirtojännitteillä johtorengaat pidetään yleensä aina suljettuina. Tämä parantaa käyttövarmuutta sekä vähentää jännitteenalenemaa ja tehonhäviöitä. Rengaskäytön suojaus on monimutkaisempi verrattuna säteittäisverkkoon ja se vaatii huomattavasti kalliimman suojareleistyksen kuin säteittäiskäyttö. Mm. tämän takia suurjännitteisten jakeluverkkojen (osa 110 kV:n verkosta ja 20 kV:n verkot) johtorengaat pidetään normaalitilanteessa auki. Pääosin rengasmuotoa käytetään vain verkon kytkentämuutoksissa ja vianetsinnässä. (Elovaara;ym., 2011 s. 57)

Siirtoverkon käytännön toteutuksen mahdollistamiseksi on käytössä runsaasti sähköasemia. Sähköasemat ovat siirtoverkon kohtia, joissa voidaan suorittaa kytkentöjä, muuntaa jännitettä tai keskittää ja jakaa sähköenergiaa eri verkon osille. Sähköasemat voivat olla tyypiltään joko ilmaeristeisiä AIS- tai SF6-kaasueristeisiä GIS-laitoksia. Kuvassa 2 on esitetty sähköasema, joka on ilmaeristeinen ulkokytkeilaitos. Sähkönsiirtoverkossa käytetään usein ilmaeristeistä sähköasemaa, mutta kaupunkiolosuhteissa on monesti käytännöllisempää käyttää vähemmän tilaa vievää GIS-asemaa. Sähköasemat

voivat olla pääteasemia tai johdonvariasemia. Johdonvariasemassa alueen läpi kulkevasta sähkölinjasta otetaan tehoa esimerkiksi jakeluverkon tarpeisiin. (Hietalahti, 2013 s. 106)



Kuva 2. Sähkö-asema (Finngird Oyj, 2018)

Siirtoverkkojen johdintyyppinä käytetään lähes poikkeuksetta päällystämättömiä avojohtoja. Avojohtojen etuna on sen edulliset rakennuskustannukset. Koska avojohto on nimensä mukaisesti avoin, päällystämätön johdin, toimii ilma sen eristysaineena. Tästä syystä avojohtojen vaatima tilantarve on suuri, mikä aiheuttaa suuria rakenteita, joiden rakentaminen tiettyyn ympäristöön (esim. kaupunkeihin) voi olla haastavaa. Lisäksi suurilla avojohtoverkoilla on aina vaikutus alueen maisemaan. Paikoissa, joissa avojohtoverkon rakentaminen on mahdotonta, käytetään voimakaapelia. Kaapeleita valmistetaan aina 400 kV:n nimellisjännitteelle asti. (Korpinen, 1998)

### 3.2 Keskijänniteverkko

Sähkönsiirrosta alue- ja jakeluverkoissa eli niin sanotusta jakelusiirrosta vastaa Suomessa noin 90 verkonhaltijaa. Ero alue- ja jakeluverkkoyhtiöiden välillä on sähköverkossa käytettävä jännite ja se, liittykö verkkolupa maantieteellinen vastuualue.

Alueverkkoyhtiöt käyttävät yleisesti ottaen vain suurjännitteisiä 110 kV:n aluesiirtoverkkoa, eikä näillä ole jakelujännitteen (esim. 20 kV:n) verkkoa lainkaan. Alueverkkoyhtiöillä ei ole maantieteellistä vastuualueita ja ne huolehtivatkin pääasiassa sähkönsiirrosta 110 kV:n jännitteellä omistajiensa muuntoasemille. Jakeluverkkoyhtiöiden vastuualueeseen taas kuuluu maantieteellinen vastuualue, jossa jakeluverkkoluvan haltijalla on verkkomonopoli. Verkkomonopoliin liittyy liittämisen-, siirto- ja sähköverkon kehittämisvelvoite. Jakeluverkkoyhtiöillä verkko muodostuu pääosin keski- ja pienjänniteverkoista, mutta näiden verkkojen lisäksi jakeluverkkoyhtiöillä voi olla käytössä myös 110 kV:n verkkoa. (Elovaara;ym., 2011 ss. 61-62)

Suomessa keskijänniteverkon jännitetasot ovat yleisesti joko 20 kV tai 10 kV.

### 3.2.1 Keskijänniteverkon rakenne

Keskijännitejakeluverkkoja käytetään lähes poikkeuksetta säteittäisinä. Silmukoituun verkkoon verrattuna säteittäisessä verkossa on oikosulkuvirrat pienempiä, häiriöiden rajoittaminen helpompaa sekä suojausten toteuttaminen yksinkertaisempaa. (Lakervi, 1996 s. 29)

Myös rakentamiskustannuksien kannalta keskijänniteverkko on edullisinta rakentaa säteittäiseksi. Yleensä verkko kuitenkin keskeisiltä osiltaan rakennetaan silmukoiduksi, mutta renkaita käytetään avoimena. Tähän rakennusmalliin johtaa silmukoidun verkon käyttövarmuus. Erityisesti taajamien maakaapeliverkot pyritään rakentamaan siten, että kullekin jakelumuuntamolle tulisi ainakin kaksi keskijännitesyöttöä. Keskijännitekaapelin vikaantuessa on viankorjaus hidasta ja näin ollen kalliimman rengasyhteyden rakentaminen tulee kannattavaksi, sillä kuluttajakatkoksen aika jää minimiin, koska käyttöön saadaan välittömästi syötön varayhteys. (Lakervi, 1996 s. 29)

Haja-asutusalueilla, etenkin asumattomien seutujen reunoilla, avojohtoverkot jätetään yleensä säteittäiseksi. Näissä olosuhteissa jakelun varmistavien rengasjohtojen kustannukset tulisivat usein paljon suuremmiksi kuin hyöty, joka saadaan jakelun keskeytyskustannuksien pienenemisenä. (Lakervi, 1996 s. 29)

Siirtojännite muunnetaan 110 kV:sta keskijänniteverkon jännitetasoon alueellisilla sähköasemilla. Kuluttajien käyttämä 400 V pienjännite muunnetaan keskijänniteverkkoon liitettävillä jakelumuuntamoilla. Jakelumuuntamolla keskijänniteverkko liittyy keskijännitekojeistoon, jossa on muuntajaliityntä sekä verkkoa voidaan jakaa eri johto-osiin. Kojeistojen kytkinlaitteina on käytössä katkaisijoita ja erottimia. Muuntajatehon ollessa pieni, käytetään avojohtoverkoissa pylväsmuuntamoita. Kaapeliverkon jakelumuuntajat voidaan sijoittaa esimerkiksi rakennusten kellaritiloihin tai niitä varten rakennettuun erilliseen muuntajarakennukseen.

## 3.3 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkolla tarkoitetaan verkkoa, jonka nimellisjännite on alle 1000 voltia. Suomessa käytetyin pienjänniteverkon jännitetaso on 400 voltia. Tavalliselle sähkökuluttajalle tuttu 230 voltin jännite on 400 V verkon vaihejännite. Tietyissä kohteissa, mm. teollisuuden sisäisessä jakelussa käytetään usein myös 690 tai 500 voltin jännitetasoa. (Hietalahti, 2013 s. 82) (Korpinen, 1998)

Pienjänniteverkko ja keskijänniteverkko ovat keskenään hyvin samankaltaisia rakenteeltaan ja suojausperiaatteiltaan. Siinä missä keskijänniteverkon kuormitus muodostuu jakelumuuntajista, pienjänniteverkkoa kuormittavat sähkön loppukäyttäjien pienkulutuskojeet. (Lakervi, 1996 s. 61)

### 3.3.1 Pienjänniteverkon rakenne

Keskijänniteverkon tapaan pienjänniteverkkoa käytetään tavallisesti säteittäisenä. Tällöin verkossa on siis yksi syöttöpiste, joka tavallisesti on siis jakelumuuntamo. Pienjänniteverkon liityntäpisteen

jakelujärjestelmänä käytetään yleensä jäykästi käyttömaadoitettua TN-järjestelmää tai sen variaatioita, jotka eroavat toisistaan nolla- ja suojamaadoitusjohtimen keskinäisen järjestelyn osalta. TN-järjestelmän variaatioita ovat TN-S-järjestelmä, TN-C-S-järjestelmä sekä TN-C-järjestelmä. (Hietalahti, 2013 s. 112)

Standardissa SFS 6000-1 (pienjännitesähköasennukset) ovat TN- järjestelmä ja sen variaatiot määritetty seuraavalla tavalla:

- TN-järjestelmissä yksi piste on maadoitettu suoraan teholahteessa ja sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat on yhdistetty tähän pisteeseen suojamaadoitusjohtimilla.
- TN-S-järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin koko järjestelmässä.
- TN-C-S-järjestelmässä nolla- ja suojamaadoitusjohdintoiminnot on yhdistetty yhteen johtimeen osassa järjestelmää.
- TN-C-järjestelmässä nolla- ja suojamaadoitusjohtimien toiminnot on yhdistetty yhteen johtimeen koko järjestelmässä. (SFS 6000, 2012 ss. 71-73)

Rakennusten sähköasennuksissa käytetään yleisesti TN-S-järjestelmää, mutta esimerkiksi teollisuuden moottorikäytöissä ja muissa symmetrisissä ja yliaallottomissa kuormissa nollajohdin on useimmiten tarpeeton eikä sitä käytetä. (STUL ry, 2015 s. 63)

### 3.4 Sähköverkon vikatilanteet

Vikatilanteiden analysoiminen on oleellinen osa voimansiirtojärjestelmän suunnittelua sekä verkon käyttöä. Sähkönjakeluverkossa tapahtuvat häiriöt ja viat voivat aiheuttaa laitteiden rikkoontumista, vaaratilanteita ja sähkönjakelun keskeytyksiä. Laiterikkojen korjaaminen saattaa kestää useista tunteista jopa vuorokausiin ja näin ollen katkoksesta aiheutunut haitta voi olla kuluttajalle merkittävä. Verkon vikatilanteista aiheutuu erityisesti haittaa silloin, kun verkossa on teollisuusliitäntöjä. Sähkönjakelun keskeytys aiheuttaa prosessin pysäytyksen ja pitkittyessään aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä. (Elovaara;ym., 2011 s. 166) (Putkonen, 2016)

Tavallisimpia verkon vikoja ovat oiko- ja maasulut, mutta toisinaan esiintyy myös katkoksia. Vika voi johtaa häiriöön, mikä ilmenee todennäköisimmin sähkönjakelun täydellisenä tai osittaisena katkeamisena. Säteittäisessä verkossa tapahtuu täydellisiä katkeamisia, mutta silmukkaverkossa sähkönsiirto asiakkaille saadaan järjestettyä katkeamattomana. Jotta silmukkaverkossa ei aiheudu katkoksia, on verkko oltava mitoitettu ja sen käyttö suunniteltu niin, ettei vika johda sähköntoimituksen tilapäiseenkin keskeytykseen. Edellä mainittujen vikojen lisäksi häiriöitä aiheutuu inhimillisistä virheistä. Näitä ovat esimerkiksi kytkentävirhe tai reletestaajan tahaton katkaisijalaukaisu. Lisäksi häiriön voi aiheuttaa jonkin verkko-osan tai laitteen ylikuormittuminen. (Elovaara;ym., 2011 s. 166)

Vikatapaukset voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä vikoja. Symmetrisellä vialla tarkoitetaan esimerkiksi 3-vaiheisen oikosulun aiheuttamaa vikaa, jossa vian pääasialliset vaikutukset kohdistuvat

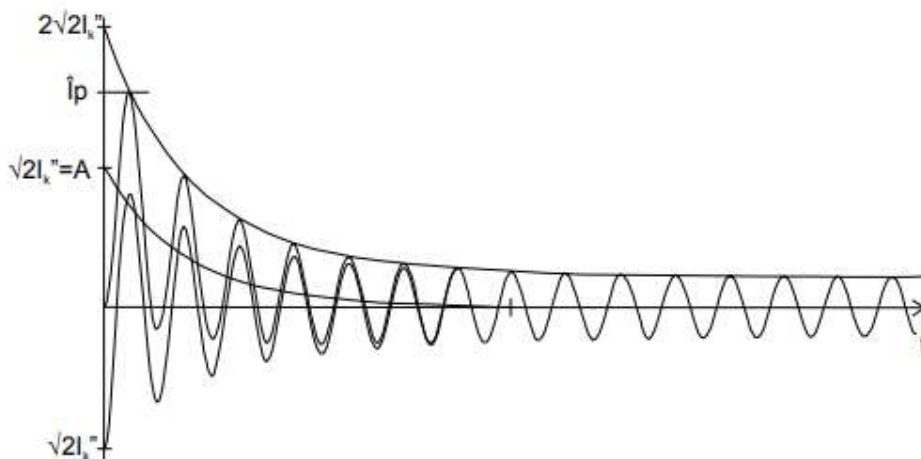


kaikkiin vaiheisiin melko tarkasti samanlaisina. Symmetrisiä vikoja mallintaessa ja analysoidessa voidaan käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää. Epäsymmetrisissä vioissa vikojen vaikutukset näkyvät eri lailla eri vaiheissa. 1- ja 2-vaiheiset maasulut esimerkiksi ovat epäsymmetrisiä poikittaisvikoja. (Elovaara;ym., 2011 ss. 166-167)

### 3.4.1 Oikosulku

Kolmivaihejärjestelmässä suurin vikavirta aiheutuu, kun tapahtuu 3-vaiheinen oikosulku. 3-vaiheisen oikosulkuvirran suuruus on usein 10–40-kertainen verrattuna nimelliseen kuormitusvirtaan. Verkon komponentit on mitoitettava siten, että ne kestävät oikosulun aikaiset dynaamiset ja termiset rasitukset. (ABB Oy, 2000 s. 197) (Elovaara;ym., 2011 s. 170)

Oikosulkuvirta muodostuu kuvassa 3 esitetyllä tavalla vaimenevasta tasavirtakomponentista sekä vaihtosähkökomponentista, joka voi myös olla vaimeneva. Tasavirtakomponentin suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta. (ABB Oy, 2000 s. 197)



Kuva 3. Oikosulun käyrämuoto (ABB Oy, 2000 s. 197)

Kuvassa 3

$A$  = vaimeneva tasavirtakomponentti

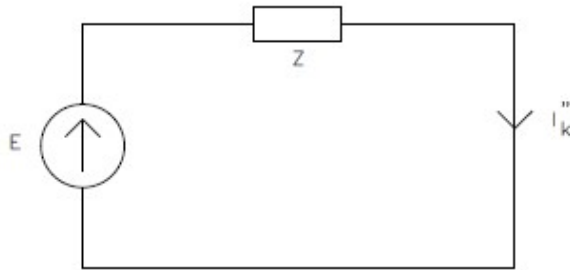
$I_k''$  = symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä

$i_p$  = sysäyoikosulkuvirta.

Symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo  $I_k''$  vastaa generaattoreiden reaktansseja vian alkuhetkellä. Reaktanssit kasvavat vian aikana ja virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon  $I_k$ . Sysäyoikosulkuvirta  $i_p$  on oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, jossa on huomioitu myös tasavirtakomponentti. (ABB Oy, 2000 s. 197)

Standardissa IEC 60909 esitetään oikosulkuvirran laskennalle Theveninin menetelmä, jossa oikosulkupiiristä tehdään kuvan 4 mukainen yksivaiheinen sijaiskytkentä. Theveninin sijaiskytkennässä

komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ns. ekvivalenttisella jännitelähteellä. (ABB Oy, 2000 s. 197) (IEC60909-0)



Kuva 4. Yksivaiheinen sijaiskytkentä

Alla on esitetty yhtälö oikosulkuvirrälle.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_k^2 + X_k^2)}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (1)$$

jossa  $I_k''$  = oikosulkuvirta  
 $c$  = taulukon 1 mukainen jännitekerroin  
 $U_N$  = syöttävän verkon jännite  
 $Z_k$  = impedanssi vikapaikasta katsottuna  
 $R_k$  = resistanssi vikapaikasta katsottuna  
 $X_k$  = reaktanssi vikapaikasta katsottuna.

Riippuen siitä, lasketaanko verkon maksimi- vai minimoioikosulkuvirtaa tulee kaavassa 1 käyttää jännitekerroimen  $c$  paikalla taulukon 1 mukaista arvoa sekä valita verkon kytkentätilanne vastaamaan joko maksimi- tai minimoioikosulkuvirtaa. Lisäksi minimoioikosulkuvirtaa laskettaessa moottorit oletetaan seisoviksi ja johtimille käytetään resistanssia, joka vastaa suurinta käyttölämpötilaa. (Hietalahti, 2013 s. 268)

Nimellisjännite $U_n$	Maksimioikosulkuvirta $C_{max}$	Minimioikosulkuvirta $C_{min}$
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

Taulukko 1. Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c (IEC60909-0)

Yksi- ja kaksivaiheisissa vioissa sijaiskytkentä muodostuu myötä-, vasta- ja nollakomponenteista. Vasta- ja myötäimpedanssit ovat johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla yhtä suuria. Pyörivillä koneilla myötä- ja vastareaktanssit voivat erota toisistaan. Nollaimpedanssit ovat erilaisia myötäimpedansseihin verrattuna kaikilla verkon komponenteilla. (Hietalahti, 2013 s. 268)

Kolmivaiheisessa oikosulussa oikosulkuimpedanssi muodostuu myötäimpedansseista. Tällöin kolmivaiheisen oikosulkuvirran yhtälö on

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * Z_1} , \quad (2)$$

jossa  $I_{k3}''$  = kolmivaiheinen oikosulkuvirta  
 $c$  = taulukon 1 mukainen jännitekerroin  
 $U_N$  = syöttävän verkon jännite  
 $Z_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi eli ns. myötäimpedanssi.

Jos oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, voidaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskea vastaavasta kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta kaavalla

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3}'' \approx 0,87 * I_{k3}'' . \quad (3)$$

Yleisesti kaksivaiheisen oikosulkuvirran yhtälö on

$$I_{k2}'' = \frac{c * U_N}{|Z_1 + Z_2|} , \quad (4)$$

jossa  $I_{k2}''$  = kaksivaiheinen oikosulkuvirta  
 $c$  = taulukon 1 mukainen jännitekerroin  
 $U_N$  = syöttävän verkon jännite  
 $Z_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi

$\bar{Z}_2$  = vastakomponenttiverkon impedanssi.

Oikosulkuvirran laskemiseksi on siis tiedettävä vikapaikan impedanssi eli täytyy selvittää se summaimpedanssi, joka muodostuu vikapaikasta katsottuna syöttösuuntaan päin. Tämä impedanssi muodostuu verkossa olevien oikosulkupiirin komponenttien mukaan ja näille laskettavista oikosulkuimpedansseista. Kokonaisimpedanssi muodostuu mm. verkkosyötön, muuntajan sekä kiskostojen ja johtojen impedansseista. (ABB Oy, 2000 s. 200)

Verkkosyötön impedanssilla tarkoitetaan impedanssia verkon syöttöpisteessä. Verkon syöttöpisteellä ei välttämättä tarkoiteta kuitenkaan pistettä, johon esim. sähköä tuottava generaattori on liittynyt, vaan yleisesti pistettä, josta oikosulkuvirtalaskelmaa tehdään. Tämä piste voi niin ikään olla esimerkiksi sähköasemalla tai tietyn kojeiston kiskostossa, jossa alkuoikosulkuvirta tiedetään. (Sähköenergiailiitto ry, 1994)

Verkkosyötön impedanssi saadaan laskettua yhtälöllä 5, kun tiedetään joko alkuoikosulkuteho tai alkuoikosulkuvirta. Alkuoikosulkuteho tai -virta saadaan yleensä joko kantaverkkoyhtiöltä tai verkon haltijalta. (ABB Oy, 2000 s. 200)

$$Z_{Q''} = \frac{c \cdot U_N^2}{S_{kQ}''} = \frac{c \cdot U_N^2}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''}, \quad (5)$$

jossa  $Z_{Q''}$  = verkkosyötön impedanssi  
 $c$  = taulukon 1 mukainen jännitekerroin  
 $U_N$  = syöttävän verkon jännite  
 $S_{kQ}''$  = alkuoikosulkuteho  
 $I_{kQ}''$  = alkuoikosulkuvirta.

Verkossa käytettävän muuntajan oikosulkuimpedanssi, oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi saadaan laskettua yhtälöillä

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} * \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}, \quad (6)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \%} * \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2}, \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (8)$$

joissa  $Z_T$  = muuntajan oikosulkuimpedanssi  
 $R_T$  = muuntajan oikosulkuresistanssi  
 $X_T$  = muuntajan oikosulkureaktanssi

$U_{kr}$  = muuntajan oikosulkujännite  
 $U_{rT}$  = muuntajan nimellisjännite  
 $S_{rT}$  = nimellisteho  
 $R_T$  = nimellinen resistanssi  
 $P_{krT}$  = kuormitushäviöt  
 $I_{rT}$  = nimellisvirta  
 $U_{Rr}$  = resistiivinen oikosulkujännite.

Avojohtojen sekä kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan yleensä suoraan valmistajien taulukoista, mutta tarvittaessa ne voidaan myös laskea. (ABB Oy, 2000 s. 201)

Johtojen ja kaapeleiden resistanssit saadaan yhtälöllä

$$R_L = \frac{\rho}{q_n} * L, \quad (9)$$

jossa  $R_L$  = johtimen resistanssi  
 $\rho$  = johtimen ominaisresistanssi  
 $q_n$  = johtimen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)  
 $L$  = johtimen pituus.

Johtimen ominaisresistanssi  $\rho$  on määritetty siten, että kuparijohtimille  $\rho = 1/54 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , alumiinijohtimille  $\rho = 1/34 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  ja alumiiniseoksille  $\rho = 1/31 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Avojohtojen reaktanssi saadaan käyttämällä yhtälöä

$$X_L = 0,0628 \left( \frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) * L, \quad (10)$$

jossa  $d$  = johtimien välinen geometrinen keskietäisyys  
 $r$  = yksittäisen johtimen säde  
 $n$  = nippujohdon osajohtimien lukumäärä  
 $L$  = johtimen pituus (km).

Kiskostoille voidaan yleisesti käyttää reaktanssin arvoa 0,15 mΩ/m.

Laitteiden mekaanisten rakenteiden mitoittamista varten tulee laskea sysäysoikosulkuvirta, joka kuvaa oikosulkuvirran suurinta hetkellisarvoa. Sysäysoikosulkuvirta esiintyy vian alkamishetkestä noin yhden puolijakson kuluttua. Sysäysoikosulkuvirran suuruus riippuu jännitteen siniaallon kohdasta, jossa vika tapahtuu. Oikosulkulaskuissa oletetaan aina vian tapahtuvan jännitteen nollakohdassa, jolloin sysäysoikosulkuvirta saa suurimman arvonsa. (Elovaara;ym., 2011 s. 174) (Putkonen, 2016)

Standardin IEC 60909-1 määrittää sysäysoikosulkuvirran laskennalle yhtälön

$$i_s = k * \sqrt{2} * I_k'' , \quad (11)$$

jossa  $i_s$  = sysäysoikosulkuvirta  
 $I_k''$  = oikosulkuvirta.

Kertoimen  $k$  arvo riippuu oikosulkupiirin resistanssin  $R$  ja reaktanssin  $X$  suhteesta yhtälön 12 mukaisesti.

$$k \approx 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{R}{X}} \quad (12)$$

Yleensä suurjänniteverkoissa kerroin  $k$  on alle 1,8 ja pienjänniteverkoissa alle 1,44. (ABB Oy, 2000 s. 204)

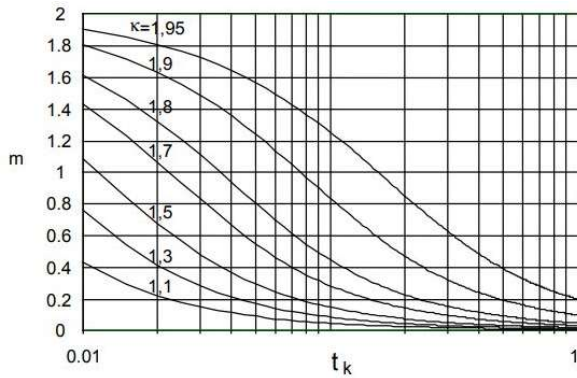
Oikosulusta aiheutuu laitteiden ja kojeiden lämpeämistä, jota varten käytetään mitoituksessa termistä oikosulkuvirtaa. Koska oikosulkuvirran suuruus vaihtelee tapauskohtaisesti, on määritetty keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta alkuoikosulkuvirran tehollisarvosta yhden sekunnin aikana. Tätä oikosulkuvirtaa kutsutaan termiseksi oikosulkuvirraksi. Laitteille ja kojeille on määriteltä (yleensä 1 sekunnin) nimellinen terminen oikosulkukestoisuus, joka kertoo oikosulkuvirran, jonka laite termisesti kestää ilmoitetun ajan. Yleensä laitteiden terminen kestoisuus ilmoitetaan nimenomaan 1 sekunnin arvona, mutta myös esim. 3 sekunnin arvoa käytetään. (ABB Oy, 2000 s. 205) (Putkonen, 2016) (Welling, 2010)

Terminen oikosulkuvirta lasketaan kaavalla

$$I_{th} = I_k'' * \sqrt{m + n} , \quad (13)$$

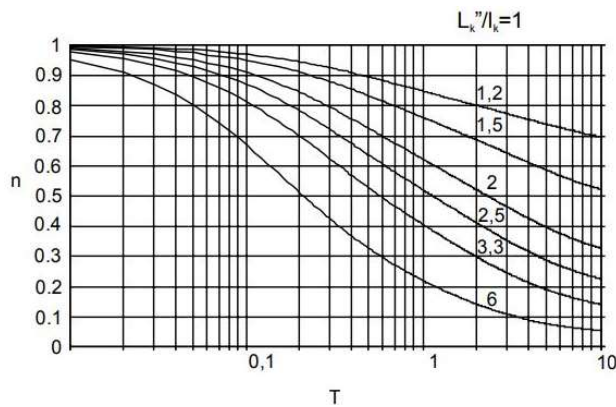
jossa  $I_{th}$  = terminen oikosulkuvirta  
 $I_k''$  = oikosulkuvirta  
 $m$  = tasavirtatekijä  
 $n$  = vaihtovirtatekijä.

Termisen oikosulkuvirran yhtälössä kerroin  $m$  kuvaa vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutusta ja se saadaan kuvan 5 mukaiselta käyrästöltä. Kertoimen  $m$  arvo riippuu oikosulkuvirran sysäyskertoimesta ja oikosulun kestoajasta. (ABB Oy, 2000 s. 204)



Kuva 5. Tasavirtatekijän  $m$  määrittäminen (ABB TTT 204)

Kerroin  $n$  taas kuvaa vaimenevan vaihtovirtakomponentin vaikutusta ja se saadaan kuvasta 6. Vaihtovirtakomponentin  $n$  suuruus riippuu oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta  $I_k''/I_k$ . (ABB Oy, 2000 s. 204)



Kuva 6. Vaihtovirtatekijän  $n$  määrittäminen (ABB Oy, 2000 s. 204)

Jos vikapaikka sijaitsee kaukana generaattoreista, voidaan standardin IEC 60909-0 mukaan vaihtovirtatekijälle käyttää arvoa  $n = 1$ . Oikosulkuvirran kestoajan ylittäessä 0,5 sekuntia, voidaan tasavirta- ja vaihtovirtatekijän summasta käyttää  $n+m = 1$ .

### 3.4.2 Maasulku

Maasulku syntyy tilanteesta, jossa jännitteinen, käyttömaadoittamaton virtajohdin joutuu kosketuksiin maapotentiaalin eli maaperän tai maadoitetun osan kanssa. Maakosketus voi tapahtua joko suoraan tai valokaaren kautta. (Rouhiainen, 2008)

Maasulku voi olla joko yksi- tai monivaiheinen. Kun vaihejohdin on yhteydessä maahan suoraan tai vikaimpedanssin kautta, on kyse yksivaiheisesta maasulusta. Jos maahan on kosketuksissa kaksi tai kolme vaihejohdinta, on kyse monivaiheisesta oikosulusta. Mikäli monivaiheisen maasulun eristysviat tapahtuvat samassa paikassa, puhutaan maaoskulusta ja jos viat ovat järjestelmän eri kohdissa, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku. (Putkonen, 2016)

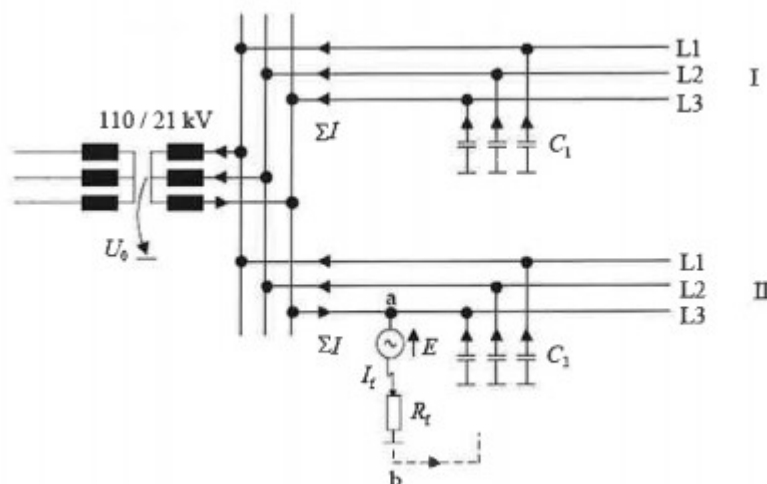
Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään tähtipisteestään maasta erotettua verkkoa tai ns. sammutettua verkkoa, joka on maasta erotetun verkon erityismuoto. Keskeisin syy maasta erotetun keskijänniteverkon käyttöön on kosketusjänniteongelma, joka aiheutuu huonoista maadoitusolosuhteista. Maasulun aikainen kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja suoja- maadoituksen resistanssista. Kosketusjännitettä määrittäessä pyritään arvoon, jolla vältetään sähköskutilanteessa hengenvaarallisen sydänkammiovärinän syntyminen. (Rouvali, 2016)

Standardin SFS 6001 mukaan kosketusjännitteen tarkastelussa on otettava huomioon seuraavat tekijät:

- se osa virrasta, joka kulkee sydämen kautta
- kehon impedanssi virran kulkureitillä
- kehon kosketuspisteiden välinen resistanssi
- vian kesto aika. (SFS 6001, 2012 s. 91)

Tämä voidaan toteuttaa maadoituksia parantamalla sekä laukaisun hidastusaikaa lyhentämällä ja verkon maasulkuvirtaa pienentämällä. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää jakamalla verkko galvaanisesti eri osiin tai käyttämällä sammutuskuristinta. (Rouvali, 2016)

Maasulkutapauksessa muodostuu vikavirtapiiri, jossa virta kulkee vikaantuneesta vaiheesta maahan. Tätä vikavirtaa kutsutaan maasulkuvirraksi. Maasulkuvirran kulkureitti tähtipisteestään maasta erotetussa verkossa on vikapaikasta maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtotimien impedanssien kautta päämuuntajien käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. Maasulkuvirran kulkureitti on esitetty kuvassa 7. (Rouhiainen, 2008) (Rouvali, 2016)



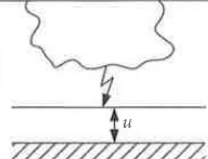
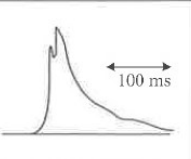
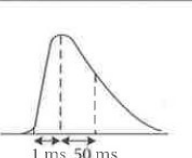
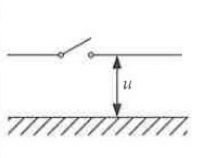
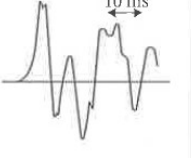
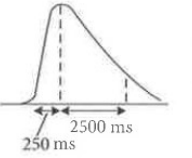
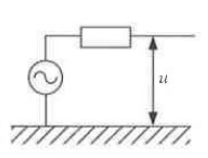
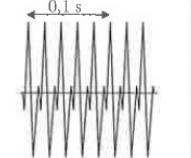
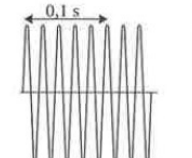
Kuva 7. Maasta erotetun kolmivaihejärjestelmän yksivaiheinen maasulku (Lakervi;ym., 2008)

Maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa on melko pieni, yleensä noin 5-100 ampeeria. Maasulkuvirran suuruus riippuu päämuuntajan jälkeen kytketystä galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuudesta sekä mahdollisesta vikaresistanssista. (Rouvali, 2016)



### 3.4.3 Ylijännitteet

Sähköverkkoon muodostuu ylijännitteitä mm. salaman iskujen, verkon vika- ja resonanssitilanteiden ja kytkentäoperaatioiden seurauksena. Ylijännitteet voivat vaurioittaa verkon sähkölaitteita ja muuttaa niiden käyttöominaisuuksia. Ylijännitteet voidaan lajitella kahteen ryhmään: pientaajuisiin ylijännitteisiin ja transienttiylijännitteisiin, jotka ovat havainnoillistettu kuvassa 8. (Elovaara;ym., 2011 s. 11)

	Ylijännitteen aiheuttaja	Ylijännitteen muoto	Testijännitteen muoto
Lyhytaikainen	Ilmastollinen syy 		
	Kytkentäilmiö 		
Pitkäaikainen			

Kuva 8. Ylijännitelajit (Elovaara;ym., 2011 s. 12)

Pientaajuiset ylijännitteet ovat heikosti vaimenevia, joiden kesto aika saattaa olla melko pitkä. Lisäksi pientaajuisille ylijännitteille ominaista on jaksollisuus. Tyypillisimpiä pientaajuisien ylijännitteiden aiheuttajia ovat maasulut, kuorman äkillinen poiskytkeminen ja resonanssi sekä epälineaaristen verkkokomponenttien vaikutukset. Transienttiylijännitteet poikkeavat pientaajuisista ylijännitteistä merkittävästi kestoajaltaan, sillä niiden kesto aika on enintään millisekunteja. Transienttiylijännitteet voidaan edelleen jakaa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttiylijännitteisiin. Ero transienttiylijänniteryhmien välillä on jänniterasituksen kesto aika. Jyrkkä transienttiylijännite saavuttaa huippuarvonsa vain joissain mikrosekunneissa ja vaimenee tämän jälkeen muutaman mikrosekunnin kuluessa. Jyrkkiin ylijännitteisiin verrattuna loivat ylijännitteet ovat kestoajaltaan huomattavasti pidempiä. Loivat ylijännitteet saavuttavat huippuarvon yleensä noin sadoissa millisekunneissa ja vaimenevat millisekunneissa. Kestoajaltaan lyhimpien eli erittäin jyrkkien ylijännitteiden nousuaika on vain nanosekuntien luokkaa. (Elovaara;ym., 2011 ss. 11-12)

Pientaajuiset sekä loivat transienttiylijännitteet aiheutuvat useimmiten verkon tilanmuutoksista eli vikojen syntymisestä sekä esimerkiksi vikojen takia tehtävistä katkaisija- ja erotintoiminnoista. Lisäksi pientaajuisien ylijännitteiden syntymiseen ja suuruuteen vaikuttavat usein myös resonanssi sekä epälineaariset verkon osat. Yleisin jyrkkien transienttiylijännitteiden aiheuttaja on ukkonen. Ylijännite syntyy salamapurkauksen seurauksena kun salamanisku kohdistuu suoraan avojohtoon tai sen välittömään läheisyyteen. Salamaniskun kohdistuessa johdon läheisyyteen puhutaan

indusoituneista ylijännitteistä. Indusoituneet ylijännitteet voivat olla suurimmillaan 100-300 kV:n suuruusluokkaa. Tämän suuruusluokan ylijännitteet ovat eristykselle vaarallisia keskijänniteverkossa, koska keskijänniteverkon eristyskestoisuus on alle 52 kV ( $U_m \leq 52$  kV). Suoraan avojohtoon kohdistunut salamanisku saattaa aiheuttaa megavolttien suuruisia ylijännitteitä, jonka seurauksena johdolla tapahtuu lähes aina ylilyönti ja näin ollen maasulkutilanne. (Elovaara;ym., 2011 ss. 13-23)

### 3.5 Keskijänniteverkon suojaus

Suojausjärjestelmän tehtävänä on havaita voimajärjestelmän viat tai epänormaalit olosuhteet, jotta viat tai epänormaalit olosuhteet voidaan selvittää ja saada loppumaan. Suojausjärjestelmässä oleellista on suojauksen toimintanopeus; suojauksen toimiessa nopeasti, jäävät verkon termiset rasitukset sekä aiheutuvat vahingot ja vaaratekijät pienemmiksi. (ABB Oy, 2000 s. 217) (Elovaara;ym., 2011 s. 335)

Keskijänniteverkon ja sitä suurempien jännitetasojen suojaustapana käytetään relesuojausta. Sähkö- ja kytkinasemat sekä voimalaitokset ovat varustettu katkaisijoilla, joilla vikaantunut verkon osa saadaan erotettua muusta verkosta. Näitä katkaisijoita ohjaavat suoja releet, jotka tarkkailevat verkon tilaa ja antavat releelle annettujen asetusarvojen ylitettyä katkaisijalle laukaisusignaalin. (Korpinen, 1998)

Hyvin toteutettu suojausjärjestelmä on nopea, luotettava, herkkä sekä selektiivinen. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa vain vikaantunut komponentti erotetaan muusta verkosta. Lisäksi selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että jokainen verkon osa on suojattu jollain suoja releellä. (Elovaara;ym., 2011 s. 342)

#### 3.5.1 Oikosulkusuojaus

Oikosulkusuojaukseen käytetään ylivirtareleitä, differentiaalireleitä ja distanssireleitä.

Ylivirtarelettä voidaan käyttää silloin, kun verkon pienin vikavirta on suurempi kuin normaali kuormitusvirta. Ylivirtarele ei havaitse virran suuntaa, joten silmukoidussa verkossa se ei ole paras suoja. Toisin kuin ylivirtarele, distanssirele havaitsee virran suunnan ja etäisyyden, joten se soveltuu käytettäväksi silmukoidussa verkossa. (Elovaara;ym., 2011 s. 340)

Ylivirtarele (eng. overcurrent relay) toimii, kun virta ylittää releelle asetetun virta-arvon. Kuten edellisessä kappaleessa on mainittu, ei ylivirtarele havaitse virran suuntaa, joten sitä käytetään yleisesti vain säteisjohdolla. Ylivirtarele voi toimia vakioaikaylivirtareleenä tai käänteisaikaylivirtareleenä. Vakioaikaylivirtarele toimii, kun mittausvirta ylittää asetteluarvon ja tämän lisäksi aseteltu asettelu-aika ylittyy. Rele palautuu, kun virta on palautunut riittävästi asetteluarvon alle. Käänteisaikaylivirtareleen toiminta on virtaan nähden käänteinen; mitä suurempi on vikavirta, sitä nopeammin rele toimii. Käänteisaikaylivirtarele soveltuu parhaiten käytettäväksi säteittäisverkkoihin, joissa kytkentätilanteista aiheutuneet oikosulkuvirtatasojen vaihtelut ovat pieniä tai erot johtojen päiden välillä olevissa oikosulkuvirtatasoissa ovat suuria. (ABB Oy, 2000 s. 217) (Elovaara;ym., 2011 s. 346)

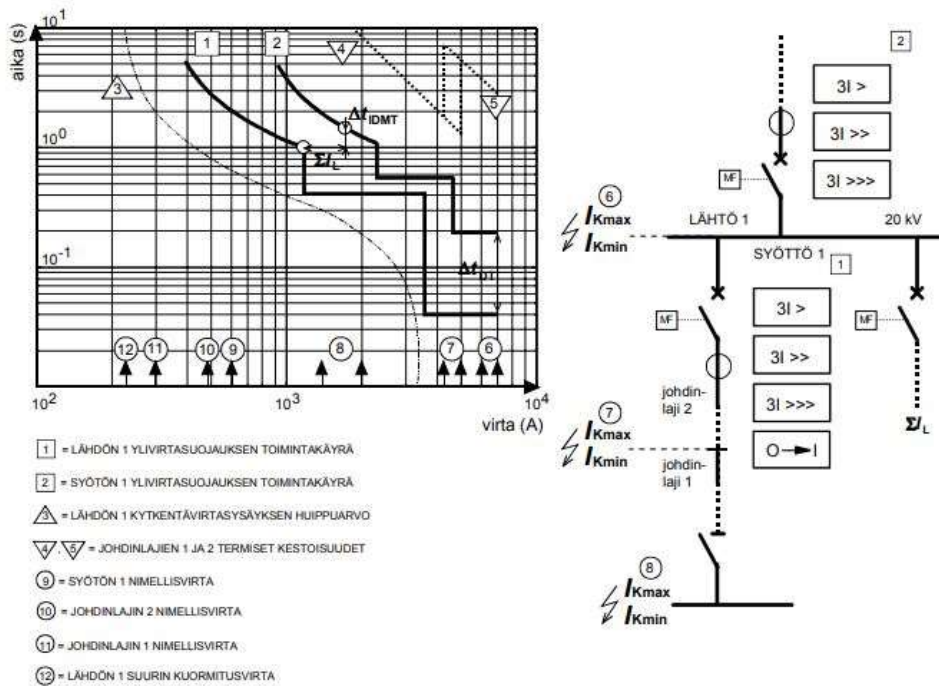
Distanssirele mittaa suojattavan johdon virran ja johdon alkupään jännitettä ja laskee niistä impedanssin. Vian suunnan rele saa määritettyä virran ja jännitteen vaihesiirtokulman avulla. Vian ollessa releen sijaintipaikasta katsottuna verkon etupuolella, on virta noin  $90^\circ$  jännitettä jäljessä, koska vikavirta on induktiivista loisvirtaa. Vian ollessa distanssireleestä katsottuna verkon takapuolella, on virta  $90^\circ$  jännitettä edellä. (Elovaara;ym., 2011 s. 348)

Differentiaalireleen eli erovirtareleen toiminta perustuu siihen, että rele vertaa kiskostoon tulevien ja kiskostosta lähtevien johtojen virtoja keskenään. Jos virrat ovat yhtä suuret ei vikaa ole, mutta virtojen erottua toisistaan asetteluarvoa enemmän, kisko tulkitaan vialliseksi. (Elovaara;ym., 2011 s. 354)

Jotta verkon suojauksesta saadaan selektiivinen, on yksinkertaisin tapa käyttää aikaselektiivisyyttä. Aikaselektiivisyys toteutetaan porrastamalla suojauksen toiminta-ajat siten, että rele, joka on lähimpänä vikakohtaa, toimii aina ensimmäisenä aiheuttaen katkaisijalaukaisun. Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan joko vakioaikaisilla- tai käänteisaikaisilla ylivirtareleillä. (ABB Oy, 2000 s. 217)

Aikaselektiivisen suojauksen toiminnan suunnittelua ja tarkastelua on helppo tehdä selektiivisyyskäyrästöjen avulla. Selektiivisyyskäyrästössä on piirretty kaikkien suojausketjuun kuuluvien suojien eli suojareleiden toimintakäyrät virta-aika- akselille. Lisäksi selektiivisyyskäyrästössä on esitetty tekijät, jotka vaikuttavat suojauksen toimintaan ja suunnitteluun. Näitä ovat mm. suojien sijaintipaikoilla esiintyvät suurimmat ja pienimmät vikavirtatasot, verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet ja nimellisvirrat sekä suurimmat kuormitusvirrat. (ABB Oy, 2000 s. 218)

Kuvasta 9 voidaan tarkastella säteittäisen verkon aikaselektiivistä suojausta, jossa suojaus on toteutettu kolmiportaisena. Moniportaisen suojauksen käyttäminen on usein välttämätöntä, jotta saavutetaan hyvä ja luotettava selektiivisyystaso sekä voidaan täyttää suojauksen herkkyys- ja toimintanopeusvaatimukset. Lisäksi kuvassa 9 on kahden suojareleen selektiivisyyskäyrästö.



Kuva 9. Säteiläisverkon aikaselektiivinen suojaus ja selektiivisyyskäyrästä (ABB Oy, 2000 s. 219)

Suojauksen alin porras (3I >) voi olla käänteisaikainen tai vakioaikainen. Ylempien portaiden (3I >> ja 3I >>>) tarkoitus on nopeuttaa suojauksen toimintaa tilanteissa, joissa vikavirta on suuri ja ne toimivat vakioaikaisina. (ABB Oy, 2000 s. 218)

Tärkein asia selektiivisyyden kannalta on porrassajan valinta. Porrassajalla tarkoitetaan peräkkäisten suojausportaiden toiminta-aikojen erotusta. Käänteisaikasuojauksessa käytetään yleensä pidempiä porrassaikoja kuin vakioaikasuojauksessa. Kuvan 9 tilanteessa jokaiselle portaalle on määritetty porrassaika erikseen. Käänteisaikaisten portaiden välistä porrassaikaa on merkitty tunnuksella  $\Delta t_{IDMT}$  ja vakioaikaportaiden välistä porrassaikaa tunnuksella  $\Delta t_{DT}$ . (ABB Oy, 2000 s. 219)

### 3.5.2 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojauksessa voidaan käyttää ylivirtareleitä, jotka ovat asetettu mittaamaan nollavirtaa eli vaiheiden summavirtaa. Kun ylivirtarelettä käytetään maasulkusuojaukseen, puhutaan nollavirtareleestä. Myös distanssireleitä tai suunnattuja maasulkureleitä voidaan käyttää maasulkusuojauksessa. Distanssirele ja suunnattu maasulkurele havaitsevat myös maasulkuvirran suunnan. (Elovaara;ym., 2011 ss. 340-341)

Nollavirtarele mittaa vaihevirtojen summavirtaa, mutta ei tunnista vikavirran suuntaa. Rele on kytketty virtamuuntajien toisiokäämeihin ja toiminta-aika ilman hidastusta releellä on sama kuin ylivirtareleellä. Johdonsuojareleissä on käytössä kahden tyyppisiä nollavirtareleitä: karkeita ja herkkiä nollavirtareleitä. Uusissa prosessorireleissä nämä voivat olla yhdistettynä kaksiporraisesti samaan laitteeseen. Karkean nollavirtareleen virta-asettelu on isompi kuin herkällä nollavirtareleellä ja hidastus lyhyt, kun herkällä nollavirtareleellä hidastus on suuri. (Elovaara;ym., 2011 ss. 353-354)

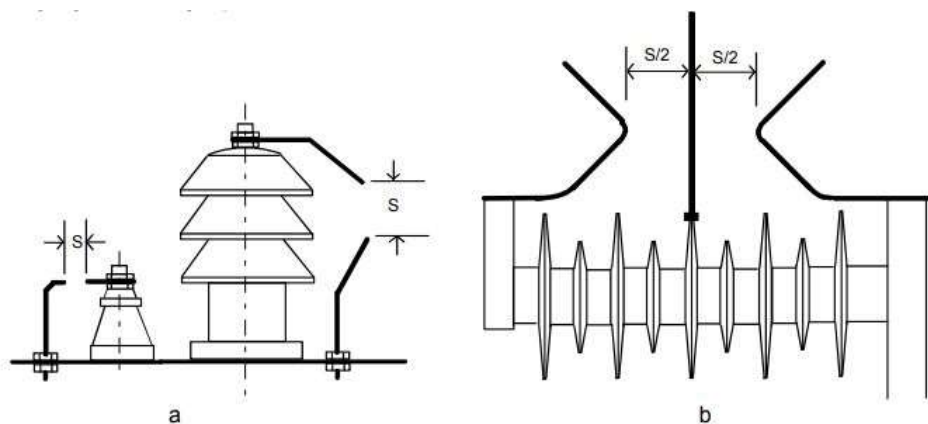
Suunnattu maasulkurele on nollavirtarele, mutta vikavirran suuruuden lisäksi se mittaa myös vian suunnan nollavirran ja nollajännitteen vaihekulmasta. Tehollisesti maadoitetussa verkossa vikaresistanssittoman maasulun nollajännite on aina pieni ja virta suuri. Tällaisessa tapauksessa maasulkureleen vian suunnan selvitys on vaikeaa ja onkin parempi käyttää nollavirtarelettä. Paras selektiivisyys saavutetaan käyttämällä käänteisaika-asetteluja. Vakioaika-asettelulla selektiivinen laukaisu saavutetaan aika-asettelujen porrastuksella. (Elovaara;ym., 2011 s. 354)

### 3.5.3 Ylijännitesuojaus

Ylijännitesuojauksen tarkoitus on ehkäistä ja rajoittaa verkossa esiintyvät ylijännitteet sellaiselle tasolle, etteivät ne vaurioita verkon komponentteja, eivätkä vaarana verkoston häiriötöntä käyttöä. Eryityisesti tärkeä suojattava kohde on muuntaja. Keskijänniteverkossa ylijännitesuojina käytetään pääsääntöisesti kahta ylijännitesuojastapaa: suojakipinäväliä tai venttiilisuojaa. Näiden kahden suojaustavan lisäksi on olemassa yhdistelmäsuojia, jotka ovat suojakipinävälin ja venttiilisuojan yhdistelmiä. Venttiilisuojiilla saavutetaan tarkempi suojaustaso kipinävälisuojaukseen verrattuna. (Elovaara;ym., 2011 ss. 29-31) (Turto, 2017)

Vallitsevan käytännön mukaan pylväsmuuntamoilla käytetään muuntajan ylijännitesuojana kipinävälisuojaa 200 kVA muuntajatehoon saakka. Tätä suuremmat muuntajat suojataan venttiilisuojiilla. Kipinävälin tarkoitus on alentaa ulkoisen eristyksen jännitelujuus matalemmalle mitä muuntajan sisäinen jännitelujuus eli vaadittu kestoajännitetaso on. Täällöin voidaan välttää läpilyönnit, jotka tapahtuvat sisäisessä eristyksessä, esim. käämityksessä. (Elovaara;ym., 2011 s. 35)

Kuvassa 10 on esitetty käytetyimmät kipinävälirakenteet, joita ovat muuntajan läpivientieristimien rinnalle kytkettävät yksivälisuojat sekä kaksivälisuoja, jota käytetään 20 kV:n suurjännite-erottimien yhteydessä. (Elovaara;ym., 2011 s. 35)



Kuva 10. Kipinävälisuojarakenteet. a) yksivälisuoja b) lintuestein varustettu kaksivälisuoja (ABB Oy, 2000 s. 147)

Kipinävälin ylilyöntijännite salamasyökyjännitteellä riippuu elektrodien välien etäisyydestä  $s$  ja kipinävälin rakenteesta sekä muotoilusta. Lisäksi ylilyöntijännite riippuu lähiympäristön mahdollisesta vaikutuksesta. Elektrodien välinen matka valitaan niin suureksi, ettei pientaajuiset ylijännitteet sekä

loivat transienttilyijännitteet johda ylilyöntiin kipinävälissä. Suomessa esimerkiksi 24 kV:n verkossa yksivälisuojan elektrodivälin  $s$  arvoina käytetään yleisesti 80 mm ja 100 mm. Kaksivälisuojoilla  $s = 60$  mm ja  $s = 80$  mm. (Elovaara;ym., 2011 s. 36)

Kipinävälisuojausten etuna on sen yksinkertainen rakenne ja halpuus. Haittana kipinävälisuojauksessa on mm. se, että kipinäväli toimiessaan aiheuttaa lähes aina maasulun, joka johtaa verkon kytkinlaitteiden toimintaan ja näin ollen sähkönjakeluhäiriöön. Jännitteen romahtaminen rasittaa myös muuntajan käämejä. Lisäksi jyrkillä syöksyjännitteillä kipinävälin ylilyöntijännite voi kasvaa niin suureksi, että se ylittää suojattavan laitteen kestotason ja näin ollen voi johtaa laiterikkoon. (Elovaara;ym., 2011 s. 36) (Rouvali, 2017)

Kipinävälisuojausta tehokkaammin ylijännitteitä voidaan rajoittaa käyttämällä venttiilisuoja. Venttiilisuoja kytketään yleensä maan ja vaiheen väliin suojattavan laitteen rinnalle. Tietyissä tapauksissa voidaan venttiilisuoja kytkeä myös vaihejohtimien väliin. (Elovaara;ym., 2011 s. 36)

Venttiilisuojaat ovat jännitteestä riippuvaisia varistoreja, joiden resistanssi on suojattavan laitteen nimellisjännitteellä hyvin suuri, mutta jännitteen noustessa nimellisjännitettä selvästi suuremmaksi resistanssi romahtaa. Nykymarkkinoilla olevat ylijännitesuojaat ovat pääsääntöisesti kipinävälittömiä metallioksidisuoja. Joissain siirto- ja jakeluverkon osissa voi olla kuitenkin edelleen käytössä vanhoja, sisäisillä kipinäväleillä varustettuja metallioksidisuoja. (Elovaara;ym., 2011 s. 37) (Rouvali, 2017)

Venttiilisuojaat tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle tärkeintä suojeltavaa kohdetta. Yleensä tämä on tehomuuntaja tai kaasueristeinen kytkinlaitos. Jos muuntajan lisäksi halutaan suojata joitakin tärkeitä, muuntajan läheisyydessä olevia komponentteja, voidaan venttiilisuoja etäisyyttä muuntajasta kasvattaa. Kuitenkaan yli 50 m:n etäisyyttä ei tulisi ylittää, koska tällöin muuntajan suojaustaso heikkenee merkittävästi. Venttiilisuojaat kytketään kiinni aina kaikkiin kolmeen vaiheeseen. Lisäksi myös muuntajan tähtipisteen ja maan välille tulee kytkeä venttiilisuoja, mikäli muuntajan tähtipiste on tuotu muuntajan kannelle, eikä sitä ole suoraan maadoitettu. Venttiilisuoja maadoitus tulee tehdä aina samaan pisteeseen mihin suojattavan laitteen maadoitus on kytketty. Esimerkiksi muuntajalla ylijännitesuoja maadoitus kannattaa tehdä muuntajakaukaloon, mikäli tämä on mahdollista. (Elovaara;ym., 2011 s. 38) (Rouvali, 2017)

Muuntajat joudutaan usein kytkemään avojohtoverkkoon kaapelin välityksellä. Jos liittymiskaapelin pituus on alle 50 metriä, varmistavat muuntajan liittimiin kytketyt venttiilisuojaat riittävän suojausvaikutuksen. Jos taas kaapelin pituus ylittää 50 metriä, on venttiilisuojaat sijoitettava kaapelin molempiin päihin eli avojohdon liittymäkohtaan sekä muuntajan liittimiin. (Elovaara;ym., 2011 s. 39)

### 3.6 Pienjänniteverkon suojaus

Pienjänniteverkon ja keskijänniteverkon vikatilanteet ja suojausperiaatteet ovat pitkälti samankaltaisia. Pienjänniteverkossa vaikuttaa verkon tähtipisteen maadoitustapa osaltaan suojaustavan valintaan, sillä pienjänniteverkossa on yleisesti käytössä maadoitettu järjestelmä toisin kuin keskijänniteverkossa, joka on yleensä maasta erotettu tai sammutettu verkko. (Lakervi, 1996 s. 61)

Pienjänniteverkon toimiva suojaus on erityisen tärkeää, sillä pienjänniteverkkoon on liitetty sähkökäyttäjän kulutuskojeet. Pienjänniteverkossa käytettävä 230 V:n suuruinen vaihejännite on kosketusjännitteenä ihmisille ja eläimille vaarallinen ja tehokkaalla suojauksella ehkäistään sähkötapaturmia. (Lakervi, 1996 s. 65)

#### 3.6.1 Oikosulkusuojaus

Siinä missä keskijänniteverkossa käytetään suojareleitä, on pienjänniteverkon tavallisin vikavirtasuojalaite sulake. Sulaketta voidaan käyttää oikosulku- sekä ylivirtasuojaukseen. Lisäksi sulakkeen tehtävänä on kosketusjännitesuojaus (autom. poiskytkentä) sekä vikapaikan selektiivinen erottaminen. Pienjänniteverkossa käytetään myös suojareletekniikkaa ja katkaisijoita esimerkiksi nimellisvirraltaan suurissa keskuksissa. (Energiateollisuus ry, 2008)

Sulake sijoitetaan tyyppillisesti jakelumuuntamolle kunkin lähdön vaihejohtimiin. Sulake tulee mitoittaa siten, että se kestää kuormitusvirran, mutta toimii riittävän nopeasti myös verkoston loppupäässä tapahtuvasta yksivaiheisesta oikosulusta. Jos tätä ei pystytä täyttämään, täytyy käyttää suurempaa johdinpintaa tai asettamaan johdolle välisulakkeita. Sulakkeet voidaan jakaa niiden rakenteen puolesta tulppasulakkeisiin ja kahvasulakkeisiin. Kahvasulakkeita käytetään suuremmilla nimellisvirroilla sekä jännitteen ylittäessä 500 V. (Lakervi, 1996 s. 65)

Pienjänniteverkon selektiivisellä suojauksella vika rajoittuu mahdollisimman pienelle alueelle. Selektiivinen suojaus toteutetaan siten, että aiemman suojan koko on aina isompi kuin seuraava, eivätkä peräkkäisten suojien laukaisukäyrät leikkaa toisiaan. Käytännön toteutuksessa katsotaan usein, että selektiivisyys toteutuu, kun suuremman sulakkeen koko on kaksi porrasta pienempää suurempi.

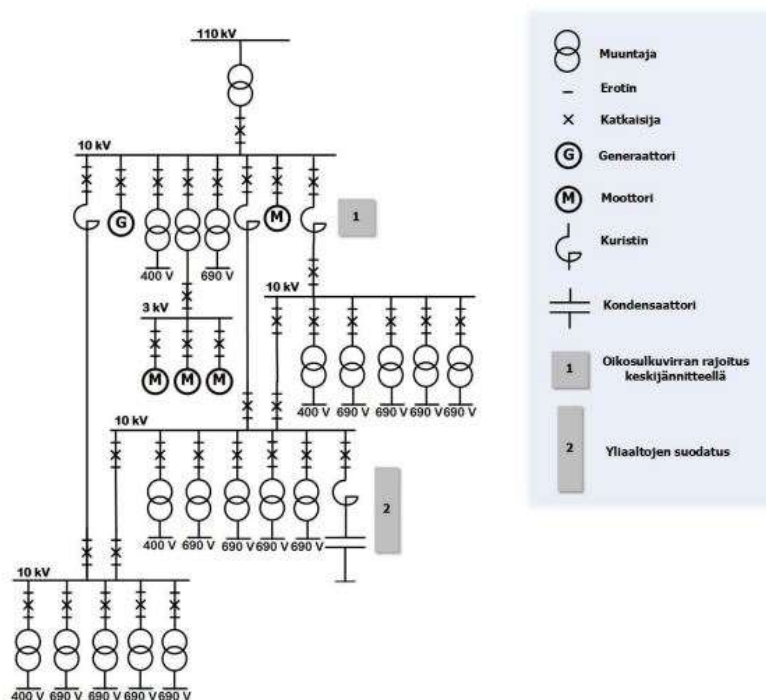
#### 3.6.2 Ylijännitesuojaus

Pienjänniteverkon ylijännitesuojaus pyritään toteuttamaan selektiivisesti ja portaittain siten, että suojaustaso on parempi kuin laitteiden ylijännitekestotaso. Pienjänniteverkon ylijännitesuojaus toteutetaan kolmiportaisena: tyyppin 1 karkeasuojaa asennetaan järjestelmän pääkeskukseen ja se toimii ns. ukkossuojana suodattaen kaikista karkeimmat ylijännitepiikit matalammaksi. Keskisuojaa eli tyyppin 2 ylijännitesuojaa asennetaan ryhmäkeskustasolle ja sen tarkoituksena on madaltaa ylijännitettä entisestään. Jos järjestelmään on kytketty herkkiä elektronisia laitteita tai automaatiota, suositellaan vielä käytettäväksi tyyppin 3 ylijännitesuojaa eli ns. hienosuojaa mahdollisimman lähelle suojattavaa laitetta. Käytetyin ylijännitesuojaustapa on käyttää tyyppin 1 ja 2 yhdistelmäsuojaa.

### 3.7 Teollisuussähköverkko

Teollisuusverkon liityntä yleiseen sähköverkkoon riippuu teollisuuskohteen koosta. Isot tuotantolaitokset liittyvät tyypillisesti 110 kV:n verkkoon ja keskisuuret tuotantolaitokset keskijänniteverkkoon. Tällöin jännitetaso lasketaan päämuuntajilla tehdasjakeluun sopivalle tasolle, joka tyypillisesti on 20 kV, 10 kV, 6 kV tai 3 kV. Pienet teollisuuskohteet voivat liittyä suoraan pienjänniteverkkoon. Pienjänniteverkkoon liityttäessä teollisuuskohteen sähköverkko ei poikkea juurikaan esimerkiksi julkisen rakennuksen sähköverkosta. (Hietalahti, 2013 s. 123)

Teollisuusverkon sähkönjakelu on yleensä keskittynyt maantieteellisesti pienelle alueelle, jolloin jakelutäisyydet ovat lyhyitä verrattuna normaaliin kuluttajajakeluverkkoon, mutta sähkötehon määrä, jota verkossa siirretään, on suuri. Tehdasalueen sisäisessä jakelussa käytetään säteittäistä jakeluverkkoa. Mikäli verkolle halutaan luotettavuutta, voidaan käyttää silmukoituja rakenteita ja kaksoiskiskostolla varustettuja kojeistoja. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki teollisuuden sähkönjakeluverkon rakenteesta, jossa kuvattuna on suuren teollisuuslaitoksen jakeluverkko. (Hietalahti, 2013 s. 123) (Putkonen, 2016)



Kuva 11. Esimerkki teollisuuden sähkönjakeluverkosta (Putkonen, 2016)

Säteittäisverkon käytöllä voidaan rajoittaa oikosulkuvirtoja, joka yksinkertaistaa ja helpottaa suo-  
jauksen järjestämisestä. Teollisuuslaitoksien kuormitus muodostuu yleensä suuritehoisista muuntajista  
sekä pyörivistä moottorikuormista, jolloin myös oikosulkuvirrat voivat kasvaa todella suuriksi. Kuor-  
matehojen ollessa suuria ja vaihtelevia, on huolehdittava, että jakeluverkon liitännä on riittävän  
vahva. Lisäksi verkkoon voi olla liitettynä omaa energiantuotantoa. (Hietalahti, 2013 s. 123)



Teollisuusverkon osajärjestelmiä ovat tyypillisesti prosessijakelu, valaistus- ja huoltosähköverkko sekä apusähköjärjestelmät. Valtaosa prosessijakelun kuormalaitteista on kolmivaiheisia. Yksivaiheisia kuormalaitteita käytetään teollisuusverkossa tyypillisesti kiinteistöjärjestelmissä. Esimerkiksi pistorasiat, valaistus ja yksivaiheiset puhaltimet ovat kiinteistöjärjestelmän laitteita. (Hietalahti, 2013 s. 124)

Teollisuuden pienjänniteverkko voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin. Nämä päätyypit ovat keskitetty jakelu, porrastettu jakelu sekä hajautettu jakelu. Keskitetyssä jakelussa kaikki moottorilähdöt on keskitetty pääkeskuksiin. Tällöin jakelun komponenttien oikosulkukestävyyden tulee olla erittäin hyvällä tasolla. Keskitetyn jakelun rakenne on helppo toteuttaa sillä kojeistot voivat sijaita yhdessä sähkötilassa. Porrastetun jakelun periaate on käyttää pääkeskus-alakeskus järjestelmää. Porrastettua sähkönjakelua käyttämällä voidaan rajoittaa oikosulkuvirtoja alakeskuksissa, jolloin komponentit voidaan mitoittaa pienemmille virroille. Lisäksi alakeskukset voidaan sijoittaa lähemmäksi kuormalaitteita, jolla saavutetaan optimaalisempia kaapelipituuksia. Hajautetussa jakelussa on sähkökäyttöjen ohjauslaitteet sijoitettu välittömään moottoreiden läheisyyteen ja pääsähkönjakelu toteutetaan standardirakenteisilla tehdasmuuntamoilla. Hajautetussa jakelujärjestelmässä käytetään standardirakenteita ja kenttäväyläohjausta, joka tekee sen rakentamisesta edullisen. Käytännössä pienjänniteverkko-rakenteet voivat kuitenkin sisältää osia useammasta tai kaikista päätyyppirakenteista. (Hietalahti, 2013 ss. 125-126)

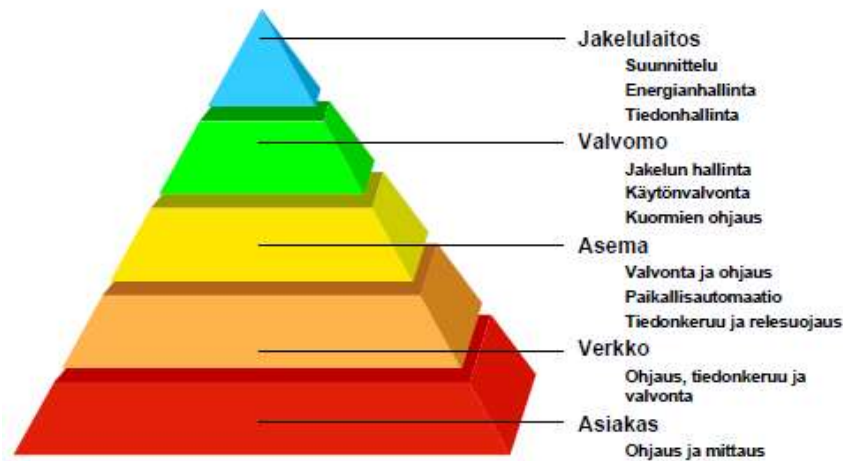
Alle 1000 V:n jakelujärjestelmissä käytetään teollisuudessa yleensä jäykästi maadoitettua TN-S-järjestelmää tai vastuksen kautta maahan yhdistettyä IT-järjestelmää. TN-S-järjestelmä on selvästi käytetympi jakelujärjestelmä ja sen jännite on yleensä joko 400 V tai 690 V. (Hietalahti, 2013 ss. 124-125)

### 3.8 Sähkönjakeluverkon automaatio

Automaatiota käytetään keskijänniteverkossa parantamaan verkon käyttöastetta ja käytettävyyttä sekä lisäämään luotettavuutta. Lisäksi verkon automatisointi säästää kustannuksia verkon rakennusvaiheessa, muutostilanteissa sekä korjaus- ja ylläpitokustannuksissa. (ABB Oy, 2000 ss. 401-402)

Verkostoautomaation päätehtävät ovat verkoston häiriötilanteiden selvittäminen, keskijännitejakeluverkon käyttö, sähköasemien kaukokäyttö ja paikallisautomaatio, verkoston tilan seuranta sekä verkostonhallinnan tukitoiminnot. Lisäksi automaatioon voi olla liitetty kuluttajan automaatiotoimintoja, joita ovat mm. laskutusmittareiden kaukoluku ja kuormien ohjaustoiminnot. (ABB Oy, 2000 s. 403)

Verkostoautomaation käytännön toteutus on jaettu kuvan 12 mukaisesti moneen eri toimintotasoon. Näitä toimintotasoja ovat mm. valvomo- ja ala-asematoiminnot, jotka voidaan toteuttaa myös asteittain. (ABB Oy, 2000 s. 401)



Kuva 12. Jakeluautomaatiojärjestelmän hierarkia (ABB Oy, 2000 s. 401)

Jakeluautomaatiojärjestelmä eli DA-järjestelmä (Distribution Automation) rakentuu monista eri järjestelmistä, joiden avulla verkkoa voidaan ohjata ja hallita aina kaikissa käyttötarpeissa jakelulaitoksesta asiakkaalle. Näitä järjestelmiä ovat verkkotietojärjestelmä, käytönvalvontajärjestelmä, asiakastietojärjestelmä sekä käytöntukijärjestelmä. Jokainen järjestelmä välittää keräämäänsä ja käsittelemäänsä tietoa muille järjestelmille. (ABB Oy, 2000 s. 401) (Launonen, 2016)

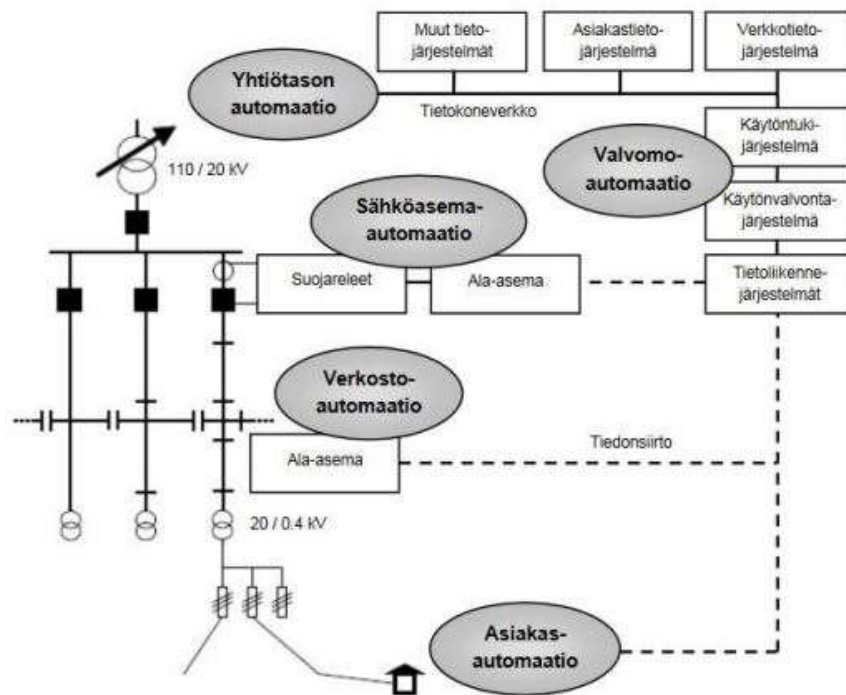
Verkkotietojärjestelmä (NIS) on tietokanta sähköasemien, keskijänniteverkon, pienjänniteverkon ja muuntamoiden komponenteista sekä keskeisimmistä sähköteknisistä tiedoista. Verkkotietojärjestelmään on siis talletettuna verkon tiedot, joiden avulla voidaan tehdä mm. verkon kunnossapidon ja käytön koordinointia sekä verkon laskentaa ja suunnittelua. Verkkotietojärjestelmällä on usein graafinen käyttöliittymä, joka helpottaa uuden verkon rakentamista ja sen avulla voidaan mm. havainnollistaa verkon ympärillä olevaa maastoa. (ABB Oy, 2000 s. 406) (Launonen, 2016)

Sähköasemilta ja verkosta kerätään valvomoon reaaliaikaista tietoa käytönvalvontajärjestelmällä (NCS). Lisäksi käytönvalvontajärjestelmällä lähetetään ohjauksia verkkoon ja sähköasemille. Käytönvalvontajärjestelmän tietokantoihin kerätään mm. mittaus- ja tilatietoja sekä parametrejä, mutta tietokantoihin tallennetaan tietoa vain viimeisimmiltä ajanjaksoilta, sillä mittaus- ja tilatietoja tulee jatkuvasti ja näin ollen datamäärä kasvaa valtavan suureksi. Käytönvalvontajärjestelmät varustetaan graafisella käyttöliittymällä, josta ilmenee verkon tila selkeästi. Käytönvalvontajärjestelmästä saadaan esimerkiksi katkaisijoiden ja erottimien tilatiedot sekä kiskostojen jännitteet. Lisäksi käytönvalvontajärjestelmä antaa mahdollisista vikatapauksista hälytyksen valvomoon, josta voidaan seurata verkon tilaa ja tehdä mm. releasettelujen muutoksia. (ABB Oy, 2000 s. 406) (Launonen, 2016)

Asiakastietojärjestelmää (CIS) käyttävät sähkölaitokset tallettaakseen ja käsitelläkseen asiakaidensa perustiedot. Näitä tietoja ovat mm. sopimustiedot ja sähkömittarilukemat sekä kulutushistorian tiedot. Asiakastietojärjestelmään talletettujen tietojen pohjalta sähkölaitos hoitaa laskutuksensa ja taloudenpitonsa. (ABB Oy, 2000 s. 406) (Launonen, 2016)

Käytäntökijärjestelmä on käytönohjauksen sovelluskokonaisuus, joka toimii työkaluna käyttöhenkilöstölle verkon kytkentätilan hallintaan ja seurantaan. Järjestelmään on mallinnettu sähköjakeluverkon komponentit aina muuntajista katkaisijoihin sekä erottimiin. Käytäntökijärjestelmä toimii vuorovaikutuksessa muiden tietojärjestelmien kanssa käyttäen näitä tietolähteinä. (Launonen, 2016) (Vaara, 2011)

Alla olevasta kuvasta 13 selviää jakeluautomaatiojärjestelmän rakenne. Järjestelmä rakentuu edellä esitetyistä tietojärjestelmien lisäksi tietokoneverkosta, tietoliikenneverkosta, valvomosta, ala-ase-  
masta sekä asema-automaatiosta.



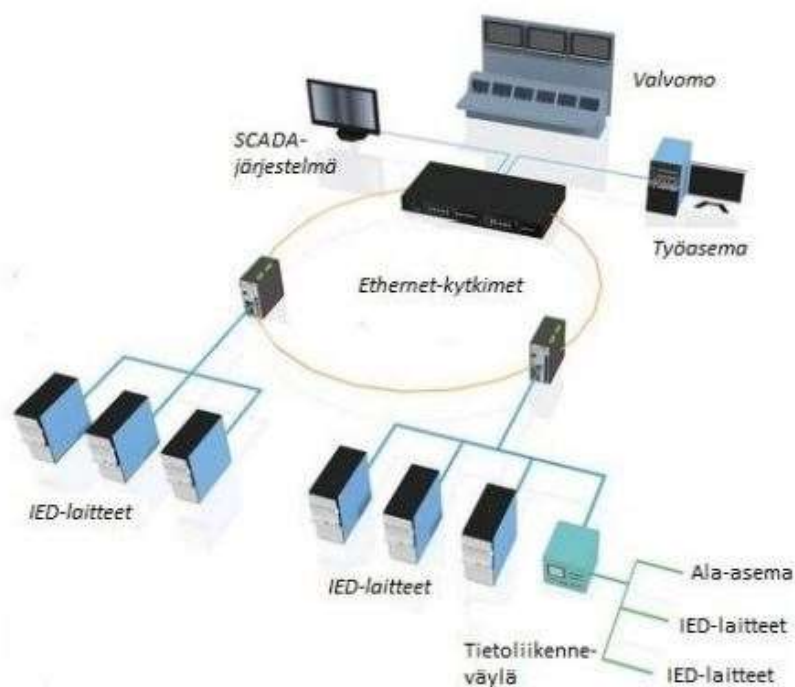
Kuva 13. Jakeluautomaatiojärjestelmän rakenne (Launonen, 2016)

Jakeluverkon automaatiojärjestelmän ydin on valvomo, josta muodostetaan tietojärjestelmien kautta yhteys ala-asemiin. Ala-aseman kautta muodostuu yhteys sähköasema-automaatioon tai verkostoautomaatioon, josta voidaan ohjata aseman kytkinlaitteita, erottimia ja katkaisijoita tai muuttaa esimerkiksi suojareleiden asetuksia. Lisäksi valvomosta voidaan tarkkailla asiakasautomaatiotasolla esim. yksittäisen asiakkaan etäluettavaa energiamittaria, jonka perusteella saadaan tietoa sähkönsiirron tilasta sekä voidaan laskuttaa asiakasta kuluttamastaan sähköstä. (Launonen, 2016)

Ala-asematason automaatio rakentuu sähköasemalla sijaitsevasta ala-asemasta sekä IED-laitteista. Ala-asema on mikroprosessoriohjattu laite, jota käytetään käytönvalvontajärjestelmässä kommunikointiin ylemmän tason järjestelmän kanssa. Ala-aseman kautta välittyy sähköaseman mittaustietoja valvomoon sekä valvomosta annetut käskyt ala-aseman laitteisiin. Ala-asema muuttaa keräämänsä mittaus- ja tilatiedot muotoon, jonka käytönvalvontajärjestelmä ymmärtää. Ala-asema toimii tällöin siis protokollamuuntimena. (Launonen, 2016)

IED-laitteita ovat esimerkiksi sähköaseman suojarieleet. IED-laitteet voivat olla yhdistettynä suoraan ala-asemaan tietoliikenneväylän kautta tai välissä voi olla kytkettynä erillinen ethernet-kytkin. Esimerkiksi käytettäessä IEC 61850-tiedonsiirtoprotokollaa, on IED-laitteet yhdistetty ala-asemaan 61850-standardin mukaisen verkkokytkimen kautta. Verkkokytkintä voidaan käyttää ala-aseman kanssa tai se voi toimia itsenäisenä tiedonkeruuyksikkönä ilman ala-asemaa. (Launonen, 2016)

Jos sähköaseman automaatiolle halutaan käyttövarmuutta, voidaan ala-asemaan yhdistää usempi verkkokytkin. Tällöin järjestelmä ei ole riippuvainen yhden kytkimen hajoamisesta vaan toiminta voi jatkua hajoamisesta huolimatta. Kytkimet ovat kytketty renkaaseen, josta tieto välittyy ala-asemalle ja käytönvalvontajärjestelmään sekä lopuksi valvomoon. Kuvassa 14 on esitetty esimerkki kahden ethernet-kytkimen järjestelmästä.



Kuva 14. Kahdella ethernet-kytkimellä toteutettu sähköasema-automaation rakenne (Launonen, 2016)

### 3.8.1 IEC 61850

IEC 61850-standardi on valmistajista riippumaton tietoliikennestandardi, joka mahdollistaa eri valmistajien laitteiden yhdistämisen suoraan sähköaseman sisäiseen verkkoon. IEC 61850-tiedonsiirtoprotokollaa käyttävät laitteet voivat kommunikoida keskenään ilman protokollamuuntimia. Lisäksi IEC 61850-väylään liitetyt kenttälaitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään ja keräämään tietoja toisiltaan ilman ala-asemaa sekä kiinteää palvelinta muodostaen näin ollen vertaisverkon. Standardi on luotu juuri tietoliikennettä varten, jossa toiminnan tulee olla nopeaa ja aikakriittistä. Käytettäessä IEC 61850-protokollaa, tulee laitteet kytkeä protokollan mukaisiin verkkokytkimiin. IEC 61850-protokollaa käytetään yleensä sähköasemien sisäisessä sisäisessä tiedonsiirrossa rele- ja asemaväylätasolla, eikä protokolla näin ollen ulotu asemaväylätason ulkopuoliseen liikennöintiin. (Launonen, 2016) (Vaara, 2011)

IED-laitteiden välillä kommunikointiin käytetään GOOSE-sanomia. Etenkin sähköaseman suojareleiden välisessä viestinnässä käytetyt GOOSE-viestit voivat sisältää mm. mittaus-, I/O-, laukaisu- ja hälytystietoja. GOOSE-sanomaa voidaan hyödyntää myös suojareleiden asetteluja muutettaessa, sillä jokaisen releen muutoksia ei tarvitse tehdä erikseen vaan riittää muutos yhteeseen, jonka jälkeen rele voi toimittaa muutetut tiedot muille releille. GOOSE-viestintä on IEC 61850-standardin mukaisesti mahdollista myös eri valmistajien laitteiden välillä. Viestejä varten voidaan rakentaa oma väylä, mutta ne voivat kulkea myös samassa väylässä, joka kulkee kennoterminaaleilta alasmalle. (Launonen, 2016) (Lehtomäki, 2014)

### 3.9 Yaran kaivoksen sähköjakeluverkko

Kaivoksen sähköjakeluverkko huolehtii kaivosalueen sekä kolmen eri tuotantolaitoksen sähköjake-  
lusta. Kaivoksella tuotantolaitoksia ovat rikastamo, rikastushiekan käsittelylaitos eli ns. pastalaitos  
sekä LKAB Minerals:n omistama kiilletehdas. Kaivoksella kulutettu sähköteho normaalin tuotannon  
aikana on yli 20 MW.

Kaivoksen sähköverkko liittyy 110 kV:n suurjänniteverkkoon, josta jännite muunnetaan jakelutason  
jännitteeseen kahdella päämuuntajalla. Kaivoksen sähköjakeluverkossa käytetään sekä 20 kV:n  
että 10 kV:n jakelujännitettä. Jakeluverkkoa käytetään säteittäisenä ja suurin osa kaivoksen sähkö-  
jakeluverkon laitteista on 10 kV:n verkossa. 20 kV:n jakelu on keskittynyt käytännössä kokonaan  
vuonna 2017 käynnistyneen pastalaitoksen sähköjakeluun. Keskijännitekojeistoja kaivoksen säh-  
köjakeluverkossa on n. 15 kpl.

110 kV:n liittynnän lisäksi on kaivokselle Yaran omalta voimalaitokselta 10 kV:n varayhteys. Varayh-  
teyttä käytetään seisokin aikasena yhteytenä, kun tehdään esimerkiksi huoltotoimenpiteitä 110 kV:n  
verkossa. Varayhteydellä siirtokapasiteetti on n. 5 MW ja sillä huolehditaankin vain kiinteistösähkö-  
järjestelmien toiminnasta eikä tuotantoa ole varayhteyden aikana käynnissä.

110 kV:n siirtolinja on tällä hetkellä tehtaille ja kaivokselle sama, jolloin suurjänniteverkon häiriöti-  
lanteessa on sen vaikutuksen piirissä koko Yara Siilinjärven toimintopaikka. Käyttövarmemman yh-  
teyden vuoksi on rakenteilla uusi 110 kV:n siirtolinja Alapitkän sähköasemalta, johon kaivoksen säh-  
köverkko liittyy. Uusi sähkölinja valmistuu loppuvuodesta 2018.

#### 3.9.1 Käytössä oleva laitekanta ja automaattiorakenne

Yara Siilinjärven toimipaikalla sähköjakeluverkon keskijännitekojeistoina käytetään mm. ABB:n  
Unigear ZS1- sekä Siemensin keskijännitekojeistoja. Usein kriittisen prosessijakeluun liittyvässä jake-  
lussa on käytössä Unigear-kojeistotyyppi. Unigear-kojeistossa katkaisijoina käytetään VD4-tyyppin  
tyhjäkatkaisijoita.



Kuva 15. Viisikenttäinen Unigear ZS1-kojeisto (ABB Oy, 2018)

Uudet sähköjakoaluerakenteiden osat rakennetaan pääsääntöisesti IEC 61850-standardin mukaisesti. Lisäksi aktiivisilla suojariepäiväyksillä voidaan vanhat kojeistot päivittää vastaamaan IEC 61850-protokollaa. Siirryttäessä käyttämään IEC 61850-protokollaa, on suojarieletyypiksi valittu Relion 630-sarjan suojarieleet. Suojarieleet liitetään IEC 61850-protokollan mukaiseen verkkokyttimeen, jonka kautta ne liittyvät suoraan käytönvalvontajärjestelmään ilman erillistä ala-asemaa. Suojarieiden välisessä kommunikoinnissa käytetään nopeita GOOSE-viestejä, joiden välityksellä välittyy mm. laukaisusignaaleja, lukitusignaaleja, tilatiedot ja katkaisijan vikatieoet. GOOSE-viesteille ei ole rakennettu omaa väylää vaan GOOSE-viestit kulkevat samassa väylässä muun tietoliikenteen kanssa. Kaivoksen sähköjakoaluerakenteiden IEC 61850-verkko on toteutettu optisella redundantisella kuiturenkaalla, johon on yhdistetty kaikki IEC 61850-protokollan mukaiset keskijännitekojeistot ja -laitteet.

Kaikki keskijännitekojeistot eivät suinkaan ole uusia IEC 61850-standardin mukaisia kojeistoja, vaan käytössä on myös vanhoja kojeistoja, joissa on käytössä mm. 541-sarjan suojarieleet. 541-tyyppin releet ovat yhdistettynä Profibus-väylään. Vanhat 541-suojarieleillä varustetut kojeistot saadaan kommunikoidaan tarvittaessa uusien kojeistojen kanssa käyttämällä hajautetun I/O:n RIO-yksiköjä. RIO-yksiköillä voidaan myös laajentaa IED-laitteiden tilatietojen määrää. Lisäksi kaivokselta löytyy Strömberg:n vanhoja kojeistoja, joissa ei ole käytössä väyläteknikkaa lainkaan.

Käytönvalvontajärjestelmänä Yaralla on käytössä Valmet DNA-järjestelmä, joka toimii samalla toimipaikan pääautomaatiojärjestelmänä. Sähköjakoaluerakenteiden päähallintapaikkana toimii voimalaitoksen valvomo. Valmet DNA-järjestelmässä on sähköjakelun toimintojen lisäksi mm. tuotantolaitosten prosessiohjausjärjestelmät. Kun koko toimipaikalla käytetään vain yhtä automaatiojärjestelmää, on se käyttäjälle yksinkertaisempaa ja helpottaa merkittävästi kunnossapidon toimintaa, mutta asettaa haasteita mm. kytkinlaitteiden kommunikoinnin konfiguroinnille sekä sovellussuunnittelulle verrattuna siihen, että käytönvalvontajärjestelmänä käytettäisiin esimerkiksi ABB:n käytönvalvontajärjestelmää Valmet:n järjestelmän sijaan.

IEC 61850-standardin ja Relion 630-sarjan suoja-alueiden käyttö tuo monia etuja. Se lisää joustavuutta sekä luotettavuutta sähkönjakeluun. Lisäksi yhtenäinen laitekanta koko toimipaikalla takaa laitteiden helppokäyttöisyyden ja mahdollisuuden yhtenäiseen tyyppikonfiguraatioon. Käyttäessä IEC 61850-protokollan laitteita, ei tarvita erillisiä protokollamuuntimia, kuten esimerkiksi Profibus-väylään liityttäessä. IEC 61850-standardin käyttö on myös pitkäaikainen sekä turvallinen investointi ajatellen tulevaisuuden sähkönjakeluverkon automaation kommunikointitapoja.

## 4 MUUNTAMON SUUNNITTELU

Muuntamalla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka sisältää suurjännitekojeiston, jakelumuuntajan sekä pienjännitekojeiston. Tarvittaessa muuntamoon voidaan myös sijoittaa loistehokompensointi, yliaaltojen suodatus ja kaukokäyttö. Muuntamo voidaan sijoittaa rakennukseen tai se voi sijaita omassa erillisessä muuntamorakennuksessaan. Maastoon sijoitettuja jakelumuuntamoita kutsutaan nimellä puistomuuntamo. Puistomuuntamot ovat usein tehdasrakenteisia valmismuuntamoita. (ABB Oy, 2000 s. 365) (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamon suunnittelulle annetaan ohjeita mm. ST-kortissa 53.11 Kuluttajamuuntamot. Lisäksi standardeissa SFS 6000 sekä SFS 6001 on annettu edellytyksiä koskien mm. muuntamon sähkölaitteistoa ja muuntamorakennusta.

Tässä kappaleessa on kerrottu muuntamon suunnittelun vaiheista nojaten ST-kortin 53.11 ohjeistukseen sekä edellisessä kappaleessa mainittuihin standardeihin. Lisäksi suunnitteluun vaikuttavat Yaran vakiintuneet ratkaisut sähkölaitteistoissa ja niiden varustelussa sekä suunnittelukäytännöissä.

### 4.1 Lähtökohdat

Suunniteltavan muuntamon rakentaminen poikkeaa ns. normaalista jakelumuuntamon rakentamisesta, sillä muuntamo rakennetaan Yaran omalle teollisuusalueelle sekä liitetään Yaran omaan keskijänniteverkkoon. Jakelumuuntamoita rakentaessa täytyy normaalisti olla yhteydessä verkon haltijaan ja tehdä mm. liittymissopimus sekä sähkönmyynti- ja verkkopalvelusopimus. Lisäksi tarvitaan maanomistajan sijoituslupaa muuntamon rakentamiselle. (Sähköinfo Oy, 2017)

Suunnittelun alkuvaiheessa lähtötietoja ei käytännössä ollut kuin muuntamon arvioitu paikka sekä muuntamon läheisyydessä kulkevan 10 kV:n avolinjan käyttömahdollisuus. Muuntamon syöttöliityntä otettaisiin siis 10 kV:n avolinjasta, josta syöttökaapelin pituudeksi tulisi n. 50-200 metriä. Avolinjaan sähkönsyöttö tulee läheiseltä keskijännitekojeistolta ja avolinjaan on liitetty suunniteltavan muuntamon lisäksi kaksi pylväsmuuntajaliityntää.

Suunnittelun alkuvaiheessa määritettiin muuntamon käytettävyyks sekä kuormitus sähkötekniistä mitoittamista varten. Suurimman kuormituksen muodostaa kaksi kappaletta tyhjennyspumppuja. Todellista pumppujen vaatimaa tehoa ei tiedetty, koska itse pumppausta ei ole suunniteltu, mutta pumppujen tehoksi määritettiin tässä vaiheessa suunnittelua 90 kW per pumppu, jota voidaan pitää realistisena tehona ottaen huomioon prosessivesialtaan koon. Pumppujen lisäksi suuri kuormitus muodostuu kolmesta eri louhosvalaistusmastosta. Tehokasta louhosvalaistusta tarvitaan pitämään louhostoiminta (mm. louhosajoneuvoliikenne) turvallisena. Yhden valomaston valaistustehoksi arvioitiin n. 10 kW.

Käytettävyydellä tarkoitetaan muuntamon ensisijaisen käyttötarkoituksen lisäksi sen jatkokäyttömahdollisuuksia. Tyhjennyspumppausta ei tarvita ikuisesti, joten muuntamon käyttötarkoitus ja jopa



paikka voi muuttua sen elinkaaren aikana. Tätä varten keskijännitekojeistoon suunniteltiin yksi varalähtö keskijänniteverkon laajentamista varten sekä muuntamorakennukseksi haluttiin ratkaisu, joka olisi mahdollisesti siirrettävissä eri käyttökohteeseen tulevaisuudessa. Lisäksi pienjännitepuolelle 400 V:n pääkeskukseen suunniteltiin pumppu- ja louhosvalaistuslähtöjen lisäksi varalähtöjä mm. työmaa-keskuskäyttöön. Sekä keskijännitevaralähtö että pienjännitepuolen varustelu vaikuttivat totta kai myös jakelumuuntajan tehoon, johon oli otettava niin sanotusti varoja.

Kuvassa 16 näkyy muuntamon arvioitu rakennuspaikka sekä 10 kV avolinja.



Kuva 16. Muuntamon paikka sekä 10 kV avolinja

Kuvassa 17 nähdään prosessivesiallas kokonaisuudessaan. Kuvasta näkyy hyvin altaan kokoluokka. Muuntamon rakennuspaikka on kuvasta 17 katsottuna vasemman puoleisella rannalla.



Kuva 17. Prosessivesiallas

## 4.2 Muuntamorakennus

Muuntamorakennus on rakennus, johon sijoitetaan itse jakelumuuntaja, keskijännitekojeisto sekä pienjännitekeskus. Muuntamorakennuksen koko riippuu sijoitettavien laitteiden koosta, etenkin keskijännitekojeistosta. Ilmaeristeisen kojeiston tilantarve on suuri verrattuna esimerkiksi SF<sub>6</sub>-kaasu-eristeiseen kojeistoon. Lisäksi pienjännitekeskuksen sijoituksella on olennainen vaikutus muuntamora-

kennuksen kokoon. Standardissa SFS 6000-7-729 annetaan seuraavat vaatimukset koskien sähkötilojen tilantarvetta: sähkötilassa käytävän leveys kytkinkahvojen ja erotusasennossa olevan katkaisijan tai kytkinkahvan ja seinän välillä tulisi olla vähintään 600 mm, käytävän leveys tulisi olla vähintään 800 mm, kattoverhouksen korkeus lattian yläpuolella vähintään 2000 mm ja jännitteisten osien korkeus lattian yläpuolella vähintään 2500 mm. (SFS 6000, 2012)

Muuntamorakennus suunniteltiin toteutettavaksi erillisellä muuntajatilalla sekä erillisellä sähkötilalla. Muuntajatilassa sijaitsee sisältähoidettava muuntaja ja sähkötilassa keskijännitekojeisto sekä pienjännitekeskus. Muuntajatila on ns. kylmätila, mutta sähkötilassa olevien automaatiolaitteiden takia tilan tulisi olla vähintäänkin puolilämmin. Sähkötilan lämmitys hoidetaan sähkötilaan sijoitettavalla ilmalämpöpumpulla. Erillisissä muuntamoissa riittää yleensä luonnollinen ilmanvaihto, mutta muuntajatehon ollessa suuri ja kuormitushuipun ollessa kesällä, tulee koneellisen ilmanvaihdon tarve selvittää. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamon vähimmäisetäisyydeksi rakennuksesta tai varastosta suositellaan 8 metriä. Jos rakennus on esimerkiksi uhanalainen tai varasto arvokas, tällöin tulee harkita vielä suurempaa etäisyyttä rakennuksesta paloviranomaisten kanssa. (Sähköinfo Oy, 2017)

Suunniteltavan muuntamon tapauksessa ei vähimmäisetäisyyttä tarvinnut miettiä, sillä matkaa lähimpään rakennukseen on n. 150 metriä.

ST-kortin 53.11 mukaan rakennettaessa erillistä muuntamorakennusta on huomioitava vielä seuraavat seikat:

- pinta-, pohja- ja vuotovesien pääsy muuntamoon on estettävä
- muuntajan eristysnesteen pääsy ympäristöön on estettävä esimerkiksi sijoittamalla muuntaja altaaseen, jonka tilavuus on mitoitettu muuntajan eristysnesteen määrän mukaan
- muuntamon ovien tulee aueta ulospäin ja ovet ovat varustettava aukiasennon varmistavilla tuulihaoilla. KytKentätoimenpiteiden aikana on kulkuovi lukittava aukiasentoon
- irroitettavat lattialevyt ja kaapelikanavan kannet on kiinnitettävä kunnolla, sillä kaapelien päätetilassa syntyvä tai kojeistosta purkautuva valokaaripaine aiheuttavat lattiaa nostavan voiman. (Sähköinfo Oy, 2017)

Lisäksi standardin SFS 6000-7-729 mukaan sähkötilojen ovista pitää olla mahdollista poistua ulkopuolelle avaamalla ne ilman avainta, työkalua tai muuta laitetta, joka ei ole osa avausmekanismia. Näin ollen muuntamon kulkuoveen asennetaan sisäpuolinen hätäavauskahva. Lisäksi yli 6 m pituisiin sähkötiloihin suositellaan järjestettäväksi kulkumahdollisuus kumpaankin päähän. (SFS 6001, 2012)

#### 4.3 Keskijännitekojeisto

Lähtökohdissa kojeisto määritettiin kaksilähtöiseksi; muuntajalähtö sekä yksi varalähtö jakeluverkon mahdollista laajentamista varten. Tällöin kojeisto rakentuu nelikenttäiseksi sisältäen syöttökentän, mittauskentän, muuntajalähdön sekä varalähdön liitteen 1 mukaisen pääjakelukaavion mukaisesti.

Koska Yaralla on käytössään keskijännitekojeistona ABB:n Unigear ZS1-kojeistoja, olisi luonteva valinta rakentaa uusi kojeisto myös samalla tyypillä. Katkaisijat ovat Unigear-kojeistossa VD4-tyhjökatkaisijoita. Suojareleet tulisi olla IEC 61850-protokollan mukaisesti Relion 630-sarjan releitä.

Ainoana varjopuolena Unigear-kojeiston hankinnassa on sen kallis hinta, joten jokin kevyempi kojeisto voisi olla parempi ratkaisu ottaen huomioon myös sen, että muuntamon sähkönjakelun piirissä ei ole kriittisiä prosessilaitteita. Käytettäessä kuitenkin Unigear-kojeistoa, säilyy toimipaikan yhteinen laitekanta, mikä tuo luotettavuutta sekä etua kunnossapidon toiminnalle, huoltoihin sekä varaosien saatavuuteen.

Kojeistolle ei ole tarkoitus järjestää kuituyhteyttä muuntamon nykyiseen paikkaan eikä nykyistä käyttötarkoitusta varten, mutta kojeisto varustetaan valmiiksi IEC 61850-protokollan mukaisella verkkokytkimellä, jolloin kojeisto on mahdollista yhdistää tulevaisuudessa osaksi jakeluverkon kuiturengasta sekä käytönvalvontajärjestelmää. Verkkokytkimen ostaminen sekä sen asentaminen on kannattavaa samalla kertaa kojeistohankinnan kanssa, sillä jälkiasennuksen kustannukset voivat olla moninkertaiset verrattuna siihen, että kytkin ostetaan samalla kertaa kojeiston kanssa.

Käytettäessä suojareletekniikkaa, tulee kojeiston rinnalla olla tasasähköjärjestelmä, joka huolehtii suojareleiden sähköistyksestä. Tasasähköjärjestelmän jännite on yleisesti 220 VDC ja järjestelmä tulee varustaa akustolla, joka huolehtii suojareleiden sähköistyksestä sähkökatkon aikana.

Kojeisto liitetään siis 10 kV avojohtoverkkoon, jolloin kojeiston nimellisjännite on 12 kV ja käyttöjännite 10,5 kV. Kojeiston nimellisvirta on 630 A. Terminen oikosulkuvirta kojeistolla on 10,0 kA ja dynaaminen oikosulkuvirta 17,2 kA. Oikosulkuvirtalaskenta on tehty muuntamon suunnitellulle paikalle, mutta jos muuntamo tullaan siirtämään tulevaisuudessa, voivat oikosulkuvirrat olla uudessa paikassa olla suuremmat, joten kojeiston oikosulkukestoisuudeksi määritettiin

$$I_{th} = 20 \text{ kA (1s)}$$

$$I_{Dyn} = 50 \text{ kA.}$$

Kojeiston ulkoisen koteloinnin tulee olla luokkaa IP 31 ja sisäisen IP 2X sekä kojeisto tulee varustaa kenttäkohtaisilla maadoituskytkimillä.

Suujännitekojeistossa tulee olla jännitteen ilmaisimien lisäksi liityntäkaapeleille sekä jokaiselle muuntaja- tai kaapelilähdölle etenkin silloin, kun on olemassa takasyötön mahdollisuus. Uusissa kojeistoissa jokaista kaapelilähtöä, muuntajaa sekä kiskostoa varten on oltava maadoituskytkimet. Muuntajan maadoituskytkimen tulee maadoittaa muuntajan suurjännitesulakkeen kumpikin napa tai sulakkeen vaihdon tulee olla muuten täysin turvallista. Mittauskennon maadoituskytkin voidaan korvata maadoituskohtioilla tai siirrettävillä työmaadoituslaitteilla. Suurjännitekojeiston pääkatkaisija (tai pääkytkin), mittamuuntajat, muuntaja sekä lähdöt tulee merkitä selvästi esimerkiksi tekstein "PÄÄKATKAISIJA" ja "MITTAUS". (Sähköinfo Oy, 2017)

Taulukossa 2 on esitetty keskijännitekojeiston keskeisimmät sähkötekniset tiedot sekä varusteet.

<b>Tekniset tiedot</b>	
Nimellisjännite	12 kV
Käyttöjännite	10,5 kV
Nimellisvirta	630 A
Oikosulkukestoisuus	
$I_{th}$	20 kA (1s)
$I_{dyn}$	50 kA
Kojeiston kotelointi	Ulkoinen IP31 Sisäinen IP2X
<b>Varusteet</b>	
IEC61850-verkkokytin	
220 VDC-tasasähköjärjestelmä	

Taulukko 2. Keskijännitekojeiston tiedot

#### 4.4 Jakelumuuntaja

Jakelumuuntaja voi olla joko kuivaeristeinen tai öljyeristeinen. Öljyeristeisten muuntajien rakenteet ovat kehittyneet vuosikymmenten aikana ja ne ovat osoittautuneet luotettaviksi. Öljy on eristysnesteenä hyvä eriste ja se toimii hyvin väliaineena muuntajan jäähdytyksessä. Lisäksi eristysneste toimii myös valokaaren sammuttajana tilanteessa, jossa muuntajan eristysnestetilassa syttyy oikosulkulokaari. Öljyeristeisen muuntajan palokuorma on verrattain suuri ja joihinkin käyttökohteisiin onkin valittava kuivaeristeinen muuntaja. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi sairaalat sekä tunnelitilat. Öljyeristeinen muuntaja ei sovellu myöskään pohjavesialueille tai vedenpuhdistuslaitoksille. Prosessivesialtaan rannalle rakennettavalle muuntamolle öljyeristeinen jakelumuuntaja soveltuu hyvin, sillä palokuorma ei ole haitaksi eikä paikka ole pohjavesialueella. (Sähköinfo Oy, 2017)

Jakelumuuntajan tehoksi määritettiin 800 kVA. Muuntajateho määräytyi pääkeskuksen nimellisvirran mukaan, joka on 800 A. 800 kVA:n muuntajan nimellisvirta pienjännitepuolella on n. 1150 A, joka riittää syöttämään pienjännitekeskusta. Kokoa pienempi muuntaja, eli 500 kVA:n muuntaja, olisi jäänyt nimellisvirraltaan alle 800 A:n.

Jakelumuuntajan jännitetaso määräytyy liityttävän verkon mukaan. Muuntajan ensiöjännite on siis 10,5 kV ja toisiojännite 420 V. Muuntajan kytkennän tulee olla Dyn 11 ja jakelumuuntajan tulee soveltua käytettäväksi lämpötilassa -40 - +40 °C.

Muuntajien normaalivarustukseksi tulee valita nestemäärämittari sekä ainakin lämpömittari, jossa on lämpötilan jatkuva näyttö ja palautettava maksimilämpötilan osoitus. Muuntamon kuormittumista voidaan seurata parhaiten tarkkailemalla muuntajan lämpötilaa. Ylikuormitusuojaukseen voidaan

muuntajalla käyttää kosketinlämpömittaria, jonka koskettimet voidaan kytkeä hälyttämään muuntajan lievistä lämpeamisestä ja laukaisemaan muuntajälhdön katkaisija muuntajan reilusta ylikuormittumisesta. (Sähköinfo Oy, 2017)

Nestemäärämittarin, lämpömittarin ja kosketinlämpömittarin lisäksi muuntajalle määritettiin taulukon 3 mukaiset varusteet. Taulukossa 3 on esitetty lisäksi jakelumuuntajan keskeisimmät sähkötekniset tiedot.

<b><u>Tekniset tiedot</u></b>	
Nimellisteho	800 kVA
Ensiöjännite	10,5 kV ± 2x2,5 %
Toisiojännite	420 V
Taajuus	50 Hz
KytKentä	Dyn 11
Oikosulkuimpedanssi	5 %
Ympäristön lämpötila	-40 - +40 °C
<b><u>Varusteet</u></b>	
Paisuntasäiliö	
Buchholz-kaasurele kahdella vaihtokoskettimella	
apulaitekotelo IP54	
ilmankuivain	
apulaitteiden liitynnät johdotettuina koteloon	
koteloidut ja kosketussuojatut liittännät	
maadoitusliittimet	
muuntajan kannelle asennetut PE-liittimet	
laipattomat kuljetuspyörät	
suomenkieliset arvo- ja ohjekilvet	

Taulukko 3. Jakelumuuntajan tiedot

#### 4.5 Pienjännitekeskus

Pienjännitekeskuksen tulee täyttää jakokeskuksiin liittyvän standardin SFS-EN 61439 vaatimukset. Pienjännitekeskus on yleensä muuntajakohtainen, jolloin keskuskohtaiset oikosulkuvirrat pysyvät pienempinä. Yhteen keskukseen ei tulisi kytkeä yli 1600 kVA:n muuntajatehoa, jos siihen ei ole pakottavia syitä. Pienjännitekeskuksella käytetään yleisesti TN-S- eli 5-johdinjärjestelmää, jolloin keskuksella on N- ja PE-kisko erikseen. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamon pienjännitekeskuksen suunnittelu alkoi määrittelemällä tarvittavien lähtöjen määrä luomalla kuvan 18 mukainen lähtöluettelo, jonka perusteella keskuksen nimellisvirraksi määrytyi 800 A.

Nimitys	Jännite (V)	Teho (kW)	Virta (A)	Tyypipiirikaavio	Huom.
Pumppu 1	400	90	250	Liite 3.3.3 Pumppulähtö	OS400D_
Pumppu 2	400	90	250	Liite 3.3.3 Pumppulähtö	OS400D_
Louhosvalaistus (valomasto)	400	10	20	Liite 3.3.4 Louhosvalaistus piirikaavio	OS63GD_
Louhosvalaistus (valomasto)	400	10	20	Liite 3.3.4 Louhosvalaistus piirikaavio	OS63GD_
L. valaistus (Vara)	400	10	20	Liite 3.3.5 Louhosvalaistus piirikaavio VARA	OS63GD_
Työmaakeskus (Varaus)	400		160	Liite 3.3.6 Työmaakeskus (varaus)	OS250D_
VARA	400		160	Liite 3.3.8 VARA	OS250D_
VARA	400		125	Liite 3.3.9 VARA	OS160GD_
VARA	400		63	Liite 3.3.10 VARA	OS160GD_
PR Muuntamo	230		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
Ilmalämpöpumppu	230		C16		Vikavirtasuojia 30mA
Valaistus Muuntamo	230		B10		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	230		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	230		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	230		B10		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	230		B10		Vikavirtasuojia 30 mA

Kuva 18. Pienjännitekeskuksen lähtöluettelo

Huomioitavaa kuvan 18 lähtöluettelossa on virta-sarakkeen arvo, joka ei ole kulutuskojeen nimellisvirta vaan suojaavan sulakkeen koko. Lähtöjen etukojeet on määritetty Yaran kojevalintataulukon mukaisesti. Kojevalintataulukosta saadaan myös kontaktorin sekä lämpöreleen koko. Kojevalintataulukko helpottaa etukojeen sekä lämpöreleen valintaa ja taulukossa käytetyille laitteille on olemassa toimipaikalla varaosakanta. Näin ollen, esimerkiksi lämpöreleen rikkoontuessa, löytyy varastosta suoraan vastaava rele, joka voidaan vaihtaa hajonneen tilalle.

Kuten lähtöluettelosta nähdään, on keskukselle suunniteltu etukojevaralähtöjä, joilla voidaan laajentaa mm. louhosvalaistumäärää sekä ottaa lähtöjä työmaakeskuskäyttöön. Varalähtöjä on hyvä suunnitella keskukselle useampia, sillä jälkikäteen niiden asentaminen on kallista ja työlästä ja joissain tapauksissa jopa mahdotonta. Keskustoimituksen yhteydessä varalähtöjen varaaminen ei nosta keskuksen hintaa merkittävästi ja ne on helppo ottaa käyttöön tarvittaessa.

Oikosulkuvirtalaskelman mukaan pienjännitekeskuksen suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta on n. 23,1 kA. Laskennallinen 1 s terminen oikosulkuvirta on 24,3 kA ja sysäyoikosulkuvirta 48,9 kA. Näin ollen keskuksen oikosulkukestoisuudeksi määritettiin

$$I_{th} = 25 \text{ kA (1s)},$$

$$I_{dyn} = 50 \text{ kA}.$$

Pienjännitekeskuksesta luotiin liitteen 5 mukainen pääkaavio. Lisäksi mm. pumppu- ja louhosvalaistuslähdoistä piirrettiin tyypipiirikaaviot, jotka ovat esitetty liitteissä 6-7.

ST-kortti 53.11 antaa muuntamon pienjännitekeskukselle seuraavat vaatimukset:

- Pienjännitekeskuksessa tulee olla keskuksen pääkytkin, joka on mitoitettu siten, että se kestää muuntajan sallitun ylikuorman. Pääkytkimen tulee olla kuormankytkin ja sillä tulee voida avata ja sulkea myös ylikuormassa oleva muuntaja. Pääkytkimenä voidaan kuormakytken sijaan käyttää katkaisijaa, joka toimii releiden avulla muuntajan ja keskuksen ylikuormitus-suojana.
- 1000 A:n tai sitä suurempi keskus tulee varustaa maadoituskytkimillä tai maadoituskohtioilla. Käytettäessä maadoituskohtioita, on suositeltavaa rakentaa kohtiot keskuksen pääkytkimen kummallekin puolelle.
- Muuntajan kuormituksen valvontaa varten tulisi keskus varustaa huippuampeerimittauksella, josta voidaan lukea esimerkiksi suurin esiintynyt 15 minuutin aikainen keskivirta. Suositeltavaa on käyttää mittalaitetta, josta hetkellisten jännite- ja virta-arvojen lisäksi on mahdollista lukea esimerkiksi tunnin keskivirtoja koko käyttövuoden ajalta.

Suunniteltavan muuntamon keskuksessa pääkytkimenä toimii kytkinvaroke ja syöttökenttä varustetaan maadoituserottimella, jonka lukitus tulee olla mekaaninen. Varsinaiselle sähkönmittaukselle ei pienjännitekeskuksella ole tarvetta, mutta keskus varustetaan Diris A40-verkkoanalysointilaitteella, josta saadaan luettua mm. virtojen, jännitteiden, päto- ja loistehon hetkellisarvot sekä näiden maksimi- ja keskiarvot.

Taulukossa 4 on esitetty pienjännitekeskuksen keskeisimmät tiedot keskuksen rakenteen sekä sähkötekniisten mitoitusarvojen osalta.

<b>Tekniset tiedot</b>	
Nimellijännite	400 V
Nimellisvirta	800 A
Taajuus	50 Hz
Oikosulkukestoisuus	
$I_{th}$	25 kA (1s)
$I_{dyn}$	50 kA
Jakelujärjestelmä	TN-S
Ohjausjännitejakelu	Keskuksen vaihejännitteestä
Lämpötila	Max 25°C
<b>Rakennetiedot</b>	
Mekaaninen rakenne	Kennoskeskus
Kotelointiluokka	
Ulkoinen	IP31
Sisäinen	IP20 (Alapuoliset tilat IP30)
Ovet	Yksikkölähtökohtaisia
Pääkytkin	Kytkinvaroke
Työmaadoitus	Maadoituskytkin
Syöttökaapelointi	Ylhäältä
Muu kaapelointi	Alhaalta

Taulukko 4. Pienjännitekeskuksen tiedot

#### 4.5.1 PSK 1801-standardi

Pienjännitekeskuksen teknisten tietojen määrittelyyn käytettiin PSK 1801 standardisointia, joka on luotu prosessiteollisuuden jakokeskusten teknisten tietojen määrittelyyn. Jakokeskusstandardissa huomioidaan sähköteknisten mitoitustietojen lisäksi mm. keskuksen rakennetiedot, syöttöliitynnät, ohjausjännitejakelutiedot sekä lähtöyksiköiden rakenne ja laitevalinnat.

PSK Standardisointi on suomalaisen teollisuuden ja sitä palvelevien yritysten yhteinen kehitysyksikkö, jonka jäsenenä on n. 180 jäsenyritystä. PSK laatii standardit vain jäsenistön aloitteesta ja standardien laadintaan osallistuu vuosittain n. 200 asiantuntijaa, jotka antavat lausuntoja standardiehdotuksiin. Laaditut standardit ovat käytännönläheisiä ja menetelmätyyppisiä työkaluja, ja niiden pohjana käytetään eurooppalaisia sekä kansainvälisiä tuotestandardeja. (PSK Standardisointi, 2018)

#### 4.5.2 Pumppulähdöt ja louhosvalaistus

Pumppulähdöt suunniteltiin käytettäväksi paikallisohjauksena sähkökeskukselta. Ohjauskytkimet ovat keskuksen kannessa, eikä pumppuja ole etäohjattavissa. Liitteessä 6 on esitetty pumppulähdön tyyppiiriikaavio. Kojevalintataulukon mukaan kytkinvarokkeeksi valikoitui OS400D-kytkinvaroke ja



sulakkeeksi näin ollen 250 A aM-sulake. Mitoitus on tehty 90 kW:n pumpputehon mukaan, mutta tarvittaessa pumppaustehoa voidaan kasvattaa kojevalintataulukon mukaisesti aina 132 kW:iin asti nostamalla vain kytkinvarokkeen sulakekokoa.

Louhosvalaistusta ohjaa valaistuksen yhteinen hämäräkytkin. Lisäksi louhosvalaistusta on mahdollista käyttää käsiohjauksella, jonka kytkin sijaitsee keskuksen kannessa. Kytkinvarokkeena toimii OS63GD-kytkinvaroke ja suojaavana sulakkeena 20 A gG-sulake. Louhosvalaistuslähdön tyyppi-kaavio on esitetty liitteessä 7.

#### 4.6 Maadoitusjärjestelmä

Muuntamoa rakennettaessa tulee verkonhaltijalta tiedustella muuntamon maadoituselektrodeille vaadittava maadoitusimpedanssin mitoitusarvo. Samalla tulisi keskustella maadoitusverkon rakenteesta ja muuntamon maadoitusten liittymisestä laajempaan maadoitusverkkoon tai jopa laajaan maadoitusjärjestelmään. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamolle tulee aina rakentaa maadoituselektrodi. Maadoituselektrodin rakenne voi olla kolmenlainen. Ensimmäinen vaihtoehto on paalutuksien yhteyteen rakennettu syvämaadoitus, jossa esimerkiksi 2-4 paalun mukana asennetaan 25 mm<sup>2</sup> kupariköydet, jotka yhdistetään puristusliitoksin ja tuodaan muuntamoon kahdella 25 mm<sup>2</sup> :n köydellä. Toinen vaihtoehto, joka on varsin yleinen, on rakentaa rakennuksen kiertävä 25 mm<sup>2</sup> Cu-maadoitusköysi, jonka molemmat päät tuodaan muuntamon päämaadoituskiskoon. Kolmantena maadoitustapana voidaan asentaa liittymisjohtojen ojaan 2 kpl 25 mm<sup>2</sup> Cu-maadoitusköysiä, yksi kummankin liityntäkaapelin ojaan. Suositeltavat maadoituselektrodin rakennustavat ovat kaksi ensin mainittua. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamon maadoituksesta, jota ei liitetä laajaan maadoitusjärjestelmään, on aina mitattava maadoitusresistanssi ja maadoitusta parannettava, elleivät vaatimukset täyty. Jos muuntamo liitetään osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää, on varmistettava, että muuntamon maadoitukset yhdistyvät laajaan maadoitusjärjestelmään luotettavasti. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamoon tulee rakentaa muuntamon maadoituskisko, johon liitetään suurjännitekojeiston maadoituskiskon ja rungon suojamaadoitusjohdin, muuntajan sj-kaapeleiden suojamaadoitusjohdin, muuntajan vaipan ja mahdollisen suojakennon suojamaadoitusjohdin sekä maadoituselektrodi ja muut maadoituskiskot. Suojamaadoitusjohtimien minimipoikkipinta on 16 mm<sup>2</sup> Cu, mutta niiden kooksi on syytä valita jopa 50 mm<sup>2</sup> Cu, sillä esimerkiksi kaksoismaasulun aikana voi suojamaadoitusjohdin palaa poikki. (Sähköinfo Oy, 2017)

Muuntamorakennukseen tulee asentaa rakennuksen päämaadoituskisko, joka voi olla muuntamon maadoituskiskon kanssa yhteinen tai erillinen. Maadoituskiskojen ollessa erilliset, yhdistetään ne poikkipinnaltaan 50 mm<sup>2</sup> Cu-maadoitusjohtimella. Jos pääkeskuksessa on PEN-kisko erillisen PE- ja N-kiskon sijaan, ei yhdistystä saa tehdä, sillä nollavirralle tulee rinnakkainen kulkutie, josta aiheutuu hajamagneettikenttiä ja häiriöitä. (Sähköinfo Oy, 2017)

Suunniteltavalle muuntamolle rakennetaan rakennuksen kiertävä maadoituselektrodi ja muuntamon maadoituskisko, joka toimii samalla koko rakennuksen päämaadoituskiskona. Maadoituselektrodin maadoitusköysien poikkipinnaksi tulee  $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ , sillä Yaran rakennuskäytäntöjen mukaisesti maadoitusköydet ovat poikkipinnaltaan minimissään  $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ . Lähtökohtaisesti kaikki kohteet liitetään laajaan maadoitusjärjestelmään, mutta yksittäisten kaivosalueelle sijoitettujen muuntamoiden kohdalla tehdään poikkeuksia, kuten tässäkin tapauksessa.

Jos suurjännitteinen liittymiskaapeli asennetaan suoraan ilmajohdosta muuntamoon, tulee suurjännitekojeisto varustaa ylijännitesuojauksella. Metallioksidisoijat eli ns. venttiilisoijat sijoitetaan liittymiskaapelin päätteen yhteyteen. Käytettäessä ylijännitesuojia, tulee myös muuntajan n-napa yhdistää suoraan muuntajan vaippaan ja yhdistysjohdon tulee olla poikkipinnaltaan samaa kokoa kuin suurjännitelaitteiden suojamaadoitusjohtimet. Erityisen tärkeää ylijännitesuojauksen asentaminen on SF<sub>6</sub>-kojeistolla, koska ylijännitevahinko saattaa johtaa koko kojeiston tuhoutumiseen. (Sähköinfo Oy, 2017)

#### 4.7 Muuntamon varusteet

Muuntamon seinälle tulee olla kiinnitettyinä sähköenergian jakelu- ja käyttöjärjestelmän pääkaavio, maadoituskaavio, tarrakilpi ”muista työmaadoittaa” sekä hätäpuhelimen numero. Lisäksi muuntamosta pitäisi löytyä kansio, johon on koottu mm. käytön johtajan yhteystiedot, muuntamon suunnitteluvaiheen ja normaalin käyttötilanteen mukainen oikosulkuvirta, maadoitusresistanssin arvo valmistumishetkellä ja tarkistusmittausten yhteydessä, verkonhaltijan ilmoittama vaadittavan maadoitusresistanssin arvo sekä suojareleasettelut. Muuntamoon tulee myös sijoittaa huolto- ja kunnossapito-ohjeet, kaikki tarkastuspöytäkirjat sekä kaikki vuosittaiset toimenpidemuistiot. Hyvänä, ja Yaralla vaadittuna käytäntönä on myös sijoittaa jokaiseen sähkötilaan ensiapuohjeet sähkötapaturman sattuessa. (Sähköinfo Oy, 2017)

Jokaisen muuntamon tulee sisältää standardin SFS 6002 liite V:n mukaisia turvallisuuskilpiä vähintään seuraavasti:

- 2-3 kpl ”ÄLÄ KYTKE – TYÖ KÄYNNISSÄ”- kylttejä
- 2 kpl yleistä jännitteisyydestä varoittavaa kilpeä
- suorakaiteen muotoinen kilpi, jossa on varoitusnuoli kolmiossa ja teksti ”PÄÄSY SIVULLISILTA KIELLETTY”.

Muuntamon oven ulkopuolelle kiinnitetään kilpi ”MUUNTAMO” ja muuntamon nimi tai numero. (Sähköinfo Oy, 2017)

#### 4.8 Tarkastukset ja kunnossapito-ohjelma

Sähköturvallisuuslain 1135/2016 43 §:n mukaan sähkölaitteisto saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönottotarkastuksessa on riittävässä laajuudessa selvitetty, että siitä ei aiheudu sähköturvallisuuslain 1135/2016 6 §:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriötä. Sähkölaitteiston käyttöönottotarkastuksesta huolehtii sähkölaitteiston rakentaja. Jos rakentaja laiminlyö velvollisuutensa tai on estynyt huolehtimaan niistä, tulee sähkölaitteiston haltijan huolehtia tarkastuksesta. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016)

Rakennettavan muuntamon sähkölaitteisto kuuluu luokan 2 sähkölaitteistoon, sillä siihen kuuluu yli 1000 voltin nimellijännitteisiä osia. Sähköturvallisuuslain 1135/2016 45 §:n mukaan sähkölaitteistoluokan 2 sähkölaitteistolle on tehtävä käyttöönottotarkastuksen lisäksi varmennustarkastus, jonka ajakohdasta, sisällöstä ja suorittajasta on säädetty tarkemmin sähköturvallisuuslain 1135/2016 pykälässä 46 §. Sähkölaitteiston varmennustarkastuksesta huolehtii sähkölaitteiston rakentaja. Jos rakentaja laiminlyö velvollisuutensa tai on estynyt huolehtimaan siitä, tulee sähkölaitteiston huolehtia tarkastuksesta. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016)

Sähkölaitteiston kuuluessa luokan 2 sähkölaitteistoon, lukuun ottamatta asuinrakennuksia, on sille tehtävä määräaikaistarkastus kymmenen vuoden välein. Määräaikaistarkastuksen sisällöstä ja suorittajasta on säädetty sähköturvallisuuslain 1135/2016 pykälässä 50 §. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016)

Sähköturvallisuuslaissa 1135/2016 pykälässä 48 § on tarkastuksien lisäksi määrätty, että sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava siitä, että luokan 2 sähkölaitteistolle laaditaan sähköturvallisuuden ylläpitävä kunnossapito-ohjelma. Kunnossapito-ohjelman noudattamisesta vastaa sähkölaitteiston haltija. Kunnossapito-ohjelmaa laatiessa tulee ottaa huomioon sähkölaitteiston käyttöympäristöstä aiheutuvat tarpeet. (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016)

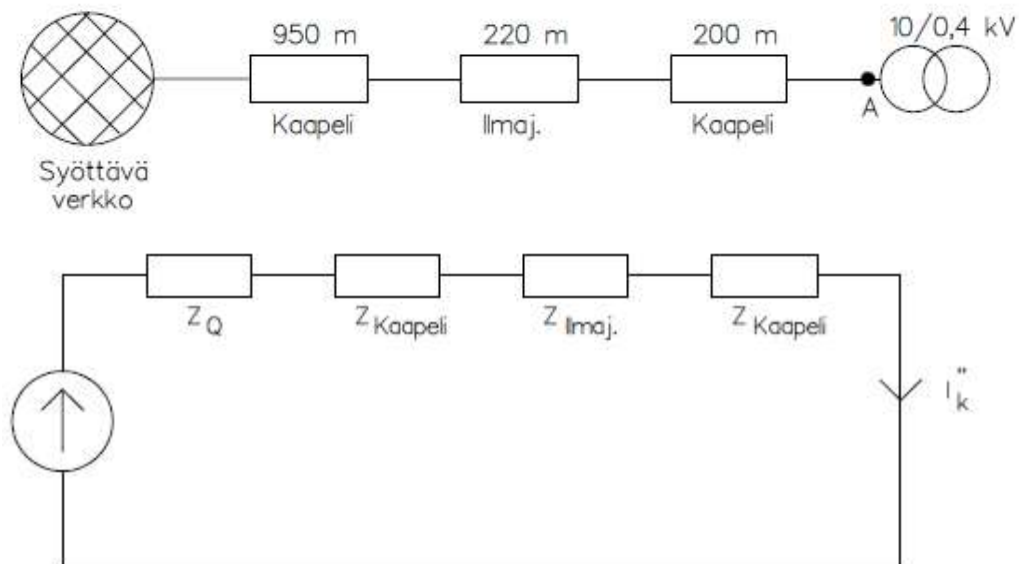
## 5 MUUNTAMON SÄHKÖTEKNINEN MITOITTAMINEN

Muuntamon suunnittelussa on tärkeintä tietää muuntamolla esiintyvät suurimmat oikosulkuvirrat. Kun oikosulkuvirrat tunnetaan, voidaan muuntamon sähkölaitteiden oikosulkukestoisuudet mitoittaa oikealle tasolle.

Muuntamon keskijännitekojeiston sekä pienjännitekojeiston oikosulkukestoisuuden määrittämistä varten on tunnettava suurimmat oikosulkuvirrat sekä suurjännite- että pienjännitepuolella. Sähkölaitteiden oikosulkukestoisuus määritetään 1 sekunnin termisen oikosulkuvirran sekä dynaamisen oikosulkuvirran eli sysäyoikosulkuvirran avulla.

### 5.1 Oikosulkuvirtalaskenta

Oikosulkuvirtalaskenta tehtiin Theveninin menetelmällä, jota varten verkosta oli muodostettava 1-vaiheinen sijaiskytkentä, jossa verkon komponentit korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitetaan ns. ekvivalenttinen jännitelähde. Syöttävä verkko rakentuu siten, että verkon syötötpisteenä toimii keskijännitekojeisto, josta lähtee 950 m:n maakaapeli, joka liittyy avojohtoon. Avojohtoa muuntamon syöttökaapelin liittymispisteeseen on 220 metriä. Muuntamon syöttökaapelin pituudeksi oikosulkuvirtalaskennassa on määritetty 200 metriä. Kuvassa 19 on esitetty verkon rakenne ja 1-vaiheinen sijaiskytkentä.



Kuva 19. Verkon rakenne ja 1-vaiheinen sijaiskytkentä.

Jokaisesta verkon osasta muodostuu siis oikosulkuimpedanssi  $Z$ , joiden summasta muodostuu vikapaikan oikosulkuimpedanssi.  $Z_Q$  kuvaa verkkosyötön impedanssia eli ns. alkuimpedanssia,  $Z_{\text{Kaapeli}}$  kaapelin oikosulkuimpedanssia ja  $Z_{\text{Ilmaj.}}$  ilmajohdon oikosulkuimpedanssia.

Tarkastellaan ensimmäisenä tilannetta, jossa kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu keskijännitekojeistolla, eli kuvan 19 mukaisessa pisteessä A.

Syöttävästä verkosta tiedetään sen alkuoikosulkuvirta, joka on 17,43 A. Kun tiedetään alkuoikosulkuvirta, voidaan verkkosyötön oikosulkuimpedanssi laskea aiemmin esitettyllä kaavalla 5:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_N^2}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ kV}^2}{\sqrt{3} \cdot 17,43 \text{ kA}} = 0,364 \Omega.$$

Laskettaessa maksimioikosulkuvirtaa, käytetään taulukon 1 mukaisesti kertoimen  $c$  arvona 1,1.

Verkkosyötön impedanssista erotetaan resistanssin ja reaktanssin osat kokonaisimpedanssin laskemista varten. Kun syöttävän verkon resistanssia ei tunneta, pätee yleisesti  $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$ , jossa  $X_Q = 0,995 \cdot Z_Q$ . Näin ollen

$$X_Q = 0,995 \cdot 0,364 \Omega = 0,362 \Omega \text{ ja}$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 0,362 \Omega = 0,0362 \Omega.$$

Kaapeleiden sekä ilmajohtojen ominaisresistanssit ja -reaktanssit saadaan suoraan taulukkoarvoista. Vaiheresistanssien ja -reaktanssien taulukkoarvoja käytettäessä, tulee oikosulkuvirtalaskennassa käyttää vaiheresistanssina  $+40^\circ\text{C}$  johdinlämpötilassa ilmoitettua arvoa.

Käytössä olevan AHXAMK-W 3x185- kaapelin vaiherestanssin arvo on 0,183  $\Omega/\text{km}$  ja kaapelin vaihereaktanssin arvo 0,11  $\Omega/\text{km}$ . 3x132 Al- ilmajohdon DC-vaiheresistanssi on 0,236  $\Omega/\text{km}$  ja vaihereaktanssi 0,344  $\Omega/\text{km}$ . Ominaisresistanssien ja -reaktanssien arvoja käytettäessä laskuissa, on huomioitava niiden yksiköiden olevan  $\Omega/\text{km}$ .

Kun ilmajohdon sekä käytetyn kaapelin ominaisresistanssit ovat tiedossa voidaan vikapaikan kokonaisresistanssi sekä -reaktanssi laskea seuraavasti:

$$R_{\text{kok}} = R_Q + R_{\text{kaapeli}} + R_{\text{johto}}$$

$$= 0,0362 + 0,95 \text{ km}(0,183 \Omega/\text{km}) + 0,22 \text{ km}(0,236 \Omega/\text{km}) + 0,2 \text{ km}(0,183 \Omega/\text{km}) = 0,299 \Omega.$$

$$X_{\text{kok}} = X_Q + X_{\text{kaapeli}} + X_{\text{johto}}$$

$$= 0,362 + 0,95 \text{ km}(0,11 \Omega/\text{km}) + 0,22 \text{ km}(0,344 \Omega/\text{km}) + 0,2 \text{ km}(0,11 \Omega/\text{km}) = 0,564 \Omega.$$

Kokonaisresistanssista ja -reaktanssista saadaan laskettua kokonaisimpedanssi  $Z_{\text{kok}}$ .

$$Z_{\text{kok}} = R_{\text{kok}} + j \cdot X_{\text{kok}} = 0,299 \Omega + j \cdot 0,564 \Omega$$

Kokonaisimpedanssin laskemisen jälkeen voidaan suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta laskea kaavan 2 mukaisesti

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_1} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{kok}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot (0,299 \Omega + j \cdot 0,564 \Omega)}$$

$$= 4,66 + j \cdot (-8,79) \text{ kA} = 9,95 \angle -62,1^\circ \text{ kA}.$$

Suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta pisteessä A eli keskijännitekojeiston kiskostossa on siis 9,95 kiloampeeria.

Kun kojeistolla olevan oikosulkuvirran suuruus tiedetään, voidaan seuraavaksi määrittää pienjännitekeskuksella vaikuttavan suurimman kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruus. Pienjännitepuolella vaikuttavan oikosulkuvirran määrittämiseksi tulee laskea muuntajan oikosulkuimpedanssi kaavalla 6. Lisäksi kokonaisimpedanssin laskemista varten täytyy määrittää muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi käyttäen kaavoja 7 ja 8.

Muuntajan oikosulkuimpedanssi:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{5}{100 \%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{800000 \text{ VA}} = 0,01 \Omega.$$

Muuntajan oikosulkuresistanssin laskemista varten tarvitaan muuntajan nimellisvirta, joka on

$$I_{rT} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{800 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \text{ kV}} = 1154,7 \text{ A}.$$

Tämän jälkeen oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi lasketaan seuraavasti:

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} = \frac{8500 \text{ W}}{3 \cdot (1155 \text{ A})^2} = 2,12 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,01^2 \Omega - 0,00212 \Omega} = 9,77 \text{ m}\Omega$$

Muuntajan oikosulkujännite  $u_{kr}$  ja kuormitushäviöt  $P_{krT}$  ovat muuntajan kilpiarvoja ja ne ovat ilmoitettu aina muuntajan tiedoissa.

Muuntajan oikosulkuresistanssin ja -reaktanssin määrittämisen jälkeen voidaan määrittää kokonaisoikosulkuimpedanssi pienjännitepuolella. Tätä varten tulee suurjännitepuolen kokonaisoikosulkuimpedanssi redusoida pienjännitepuolelle. Oikosulkuimpedanssin arvo suurjännitepuolella oli  $0,299 \Omega + j \cdot 0,564 \Omega$ . Tämä redusoidaan pienjännitepuolelle seuraavasti:

$$Z_{kok}' = Z_{kok} \cdot \mu^2 = (0,299 \Omega + j \cdot 0,564 \Omega) \cdot \left( \frac{0,4 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = 0,478 \text{ m}\Omega + j \cdot 0,9024 \text{ m}\Omega$$

Pienjännitepuolen kokonaisuikosulkuimpedanssi saadaan, kun lasketaan yhteen muuntajan oikosulkuimpedanssi ja redusoitu verkon oikosulkuimpedanssi osoitinsuureita käyttäen:

$$Z_{\text{kok}} = (R_T + j * X_T) + (R_{k0} + j * X_{k0}) = (2,12 \text{ m}\Omega + j * 9,77 \text{ m}\Omega) + (0,478 \text{ m}\Omega + j * 0,9024 \text{ m}\Omega)$$

$$= 2,598 + j * 10,67 \text{ m}\Omega.$$

Kun tiedetään pienjännitepuolen kokonaisuikosulkuimpedanssi, voidaan suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta laskea oikosulkuvirran kaavan 2 mukaisesti

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * Z_1} = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * Z_{\text{kok}}} = \frac{1,1 * 400 \text{ V}}{\sqrt{3} * (0,002598 + j * 0,01067) \Omega} = 5472,54 + j * (-22475,8) \text{ A}$$

$$= 23,132 \angle -76,3^\circ \text{ kA}.$$

Eli suurimman kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruus pienjännitekeskuksella on 23,13 kA. Tämä oikosulkuvirran arvo esiintyy tarkemmin ottaen muuntajan pienjännitenavoissa, mutta sitä voidaan käyttää pienjännitekeskuksen oikosulkuarvona, koska pienjännitekeskuksen liittymiskaapeloinnin tai kiskoston vaikutus laskennassa on hyvin vähäinen.

Sysäysoikosulkuvirta määritetään sekä keskijännitekojeistolle että pienjännitekeskukselle käyttämällä kaavan 11 mukaista yhtälöä. Kerroin  $\kappa$  riippuu oikosulkupiirin R/X suhteesta ja se saadaan käyttämällä kaavaa 12.

Keskijännitekojeiston sysäysoikosulkuvirta:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{0,299}{0,564}} = 1,22$$

$$i_s = \kappa * \sqrt{2} * I_k'' = 1,22 * \sqrt{2} * 9,95 \text{ kA} = 17,2 \text{ kA}$$

Pienjännitekeskuksen sysäysoikosulkuvirta:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 * e^{-3 * \frac{0,0026}{0,0107}} = 1,496$$

$$i_s = \kappa * \sqrt{2} * I_k'' = 1,496 * \sqrt{2} * 23,13 \text{ kA} = 48,94 \text{ kA}$$

Termisen oikosulkuvirran laskemista varten on käytettävä kaavan 13 mukaista yhtälöä. Tasavirtatekijä  $m$  luetaan kuvasta 5. Vaihtovirtatekijän  $n$  arvona käytetään arvoa 1.

1 sekunnin terminen oikosulkuvirta keskijännitekojeistolla:

$$I_{th} = I_k'' * \sqrt{m + n} = 9,95 \text{ kA} * \sqrt{0,05 + 1} = 10,20 \text{ kA}$$

1 sekunnin terminen oikosulkuvirta pienjännitekeskuksella:

$$I_{th} = I_k'' * \sqrt{m + n} = 23,13 \text{ kA} * \sqrt{0,1 + 1} = 24,26 \text{ kA}$$



## 6 TARJOUSKYSELY JA KUSTANNUSARVIO

Muuntamon suunnitteluaineiston pohjalta tehtiin tarjouskyselyaineisto, joka käsitti koko sähkönjakelun kokonaisuuden. Tarjouskyselyaineisto koostui toimituksen ehtojen ja laajuuden määrittämisestä sekä sähkölaitteiston teknisistä erittelyistä. Aineistoon liitettiin lisäksi tarvittavat sähköpiirustukset. Aineisto lähetettiin neljälle eri toimittajalle, joista kolme eri toimittajaa vastasivat tarjouspyyntöön omilla tarjouksillaan. Toimittajien tarjoukset erosivat toisistaan jonkin verran, jonka perusteella voitiin tehdä tarjousvertailua ja luoda kustannusarvio muuntamon sähkönjakelun kokonaisuuden toteuttamisesta.

Toimituksen laajuus sisälsi taulukon 5 mukaisesti sähkölaitteiston sekä muuntamorakennuksen toimituksen asennettuina ja käyttöön otettuina tilaajan toimipaikalle. Sähkölaitteistoon kuului keskijännitekojeisto, jakelumuntaja, pienjännitekeskus sekä kaapelointi. Muuntamorakennuksen asentamista varten rakennetaan tilaajan toimesta muuntamon asennuspaikalle kivimurskealusta sekä maadoituselektrodi.

Yaran käytäntönä on tilata tämänkaltaiset sähkölaitteistotoimitukset asennettuina ja käyttöön otettuina yhden toimittajan toimesta. Tällä toimintamallilla vältytään eri toimittajien rajapintojen sopimiselta ja sotkeentumiselta, jolla voidaan varmistua laitteistojen turvallisista kokonaisasennuksista.

<b>Sähkölaitteisto</b>
10 kV keskijännitekojeisto
800 kVA jakelumuuntaja (10,5 / 0,42 kV)
400 V Pääkeskus
Kaapelointi
Varaosat
Muuntamorakennus erillisellä muuntamo- ja sähkötilalla
<b>Maadoitukset</b>
Tilaaajan toimesta rakennetaan maadoituselektrodi
Toimituksen laitteet maadoitetaan muuntamon päämaadoituskiskoon maadoituskaavion mukaisesti
<b>Kaapelointi</b>
Toimituksen laajuuteen kuuluu laitetoimituksiin liittyvät kaapeloinnit ja asennukset pääkaavion mukaisesti. Lisäksi laajuuteen kuuluu toimitettujen laitteiden väliset välttämättömät kuuluvat toimittajan suunnittelun mukaiset ohjaus, suojaus, yms. Kaapelit.
<b>Asennus ja käyttöönotto</b>
Toimitus sisältää laitteiden toimituksen asennettuna ja käyttöönotettuina tilaaajan toimipaikalla.
Toimittaja suorittaa toimittamilleen laitteille tarvittavat koestukset ja testaukset ja toimittaa tarvittavat pöytäkirjat.
<b>Varaosat</b>
Erillishintaan on tarjottava toimittajan suosittelemat varaosat kullekin kokonaisuudelle.

Taulukko 5. Toimituksen laajuus

Sähkölaitteiston osakokonaisuuksien tekniset erittelyt sisälsivät selkeän määrittelyn laitteiden rakenteesta sekä sähköteknisistä mitoitusarvoista. Lisäksi teknisistä erittelyistä selvisi, jos jossain osakokonaisuudessa haluttiin käyttää tiettyä komponenttia tai laitemerkkiä ja -mallia. Esimerkiksi keskijännitekojeiston malliksi haluttiin ensisijaisesti ABB:n Unigear ZS1-kojeisto varustettuna Relion 630-sarjan suojarleillä. Lisäksi kojeisto varustettaisiin IEC 61850-protokollan mukaisella verkkokytkimellä. Pienjännitekeskuksen kytkinvarokkeet, kontaktorit sekä lämpöreleet haluttiin Yaran kojevalintataulun mukaisesti ABB:n tuotteilla, koska niille on olemassa varastossa varaosakanta ja näiden pienjännitelaitteiden käyttökokemukset ovat hyviä. Toimittajille jätettiin mahdollisuus tarjota keskijännitekojeistoa myös jollain muulla, toimittajan ehdottamalla kojeistoratkaisulla.

Tarjouskyselyaineistoa ja muuntamon sähkösuunnittelua varten luotiin sähköpiirustuksia tarvittavissa määrin. Sähköpiirustukset sisälsivät mm. jakelukaavion, pää- ja maadoituskaaviot sekä pienjännitekeskuslähtöjen tyyppiipiirikaaviot. Keskeisimmät suunnitteluaineiston sähköpiirustukset ovat esitetty liitteissä 1-7.

Kuten aiemmin on mainittu, saatiin tarjous kokonaistoimituksesta kolmelta eri toimittajalta, joista jokainen toimittaja tarjosi ratkaisua halutulla Unigear ZS1-kojeistotyypillä. Tämän lisäksi kaikki toimittajat tarjosivat tarjouksissaan keskijännitekojeistoa myös vaihtoehtoisilla kojeistoratkaisuilla. Kokonaiskustannus näillä vaihtoehtokojeistolla tulisi halvemmaksi verrattuna Unigear-kojeistoon, mutta hintaero on verrattain pieni ottaen huomioon kustannukset, jotka muodostuvat pitkällä tähtäimellä poiketessa yhtenäisestä laitekannasta.

Eri toimittajien tarjoukset ovat sisällöltään pääosin hyvin samankaltaisia ja sähkölaitteistojen laitteet sekä niiden mitoitus ovat pyydetyn mukaisia. Tarjouksista löytyy kuitenkin eroavaisuuksia toimituksen kokonaisuudesta sekä sähkölaitteiston varustetasosta. Alla on vertailtu eri toimittajien tarjouksia sekä tehty prosentuaalista vertailua sähkölaitteistojen osista ja kokonaiskustannuksista.

Jokainen toimittaja tarjosi siis pyydetysti ABB:n Unigear ZS1-kojeistoa VD4-katkaisijoilla. Yhden toimittajan tarjoukseen ei kuulunut haluttua verkkokytkintä eikä tarvittavaa tasasähköjärjestelmää. Näiden puuttuvien komponenttien hinta on karkeasti laskettuna n. 20 000 euroa. Kahden muun toimittajien kojeistotarjoukset sisälsivät verkkokytkimen sekä tasasähköjärjestelmän. Kojeston varustetaso eri toimittajien tarjouksien välillä vastasi muilta osin hyvin pitkälti toisiaan.

Toimittajien tarjoamat vaihtoehtokojeistot olivat jokainen eri merkkiä sekä mallia verrattuna toisiinsa. Näiden vaihtoehtokojeistojen käyttö alentaisi keskijännitekojeiston hintaa n. 10 – 60 %. Keskijännitekojeisto on suurin yksittäinen kustannus jakelumuuntamoita rakennettaessa. ABB:n Unigear-kojeistoa käytettäessä keskijännitekojeiston hankintahinta on n. 45 % laiteoimitusten kokonaiskustannuksista, joten keskijännitekojeiston valinnalla voidaan vaikuttaa suuresti koko projektin kokonaiskustannuksiin.

Vaihtoehtokojeiston hankinta alentaisi kyllä kokonaiskustannuksia, mutta mm. varaosien hankinta- sekä huolto- ja kunnossapitokustannuksien takia voi yhtenäisestä laitekannasta poikkeavan kojeiston hinta nousta pitkällä tähtäimellä reilusti yli Unigear-kojeiston hankintahinnan. Tosin 60 %:n alennus kojeiston hankintahinnasta on jo niin merkittävä rahallinen etu, että asiaa tulee tarkastella tarkemmin ottaen huomioon kojeiston valmistajan, mallin sekä aiemmin mainitut kunnossapito- sekä varaosakustannukset.

Toimittajat tarjosivat yhteensä kolmea erilaista 800 kVA jakelumuuntajaa. Kukin muuntaja oli öljy-eristeinen, kuten kyselyaineistossa oli eritelty sekä varustettuna tarvittavin varusteina taulukon 3 mukaisesti. Jakelumuuntajien mitoitus tiedot olivat myös teknisen erittelyn mukaisia. Jakelumuuntajien hinta kokonaistoimituksesta oli n. 6–8 %.

Kahden toimittajan tarjouksissa kaapeloinnin rajapinta oli rajattuna syöttökennon liittimiin. Tämä tarkoittaa sitä, että kaapelointi on rajattu muuntamon sisäiseen kaapelointiin. Yhden toimittajan tarjouksessa oli mukana myös muuntamon syöttökaapelointi kaivuutöineen sekä maadoituselektrodin 50 mm<sup>2</sup> Cu-maadoitusköydet. Lisäksi tämän toimittajan tarjoukseen kuului avojohtoliityntään tarvittava johtoerotin katkaisupiiskoin. Syöttökaapeloinnin hinta kaivuutöineen on karkeasti laskettuna

10 000 euroa, joka on huomioitava laskettaessa kokonaiskustannuksia kahden muun toimittajien tarjouksista.

Kaksi toimittajaa tarjosivat muuntamorakennusvaihtoehtona erään suomalaisen laitesuojatoimittajan vakioratkaisuja, jotka olivat molemmat keskenään hyvin samankaltaisia. Rakennustyyppi sekä rakenteet olivat käytännössä täysin samoja kuten myös rakennuksen varustelu. Muuntamorakennuksen koossa ja lattiapinta-alassa oli hieman eroavaisuutta, mutta kokonaisratkaisu oli näiden kahden toimittajan välillä käytännössä sama. Muuntamorakennus on keskijännitekojeiston tapaan iso yksittäinen kustannus. Muuntamorakennuksen hinta laitetoimituksen kokonaiskustannuksista on n. 30 %.

Kaksi toimittajaa tarjosi pienjännitekeskusta 400 V lähtöluettelon ja teknisen erittelyn mukaisesti. Yhden toimittajan tarjouksessa ei pienjännitekeskusta oltu eritelty, vaan oli annettu vain keskuksen hinta. Kahden muun toimittajan tarjouksessa oli toimitettu tekniset tiedot sekä keskuksen layout-kuva, josta keskuksen rakennetta oli helppo tarkastella ja varmentaa haluttujen lähtöjen määrä.

Yhden toimittajan tarjoukseen sisältyi myös muuntamon rakennusaikainen projektipäällikkö. Tämä on hyvä asia, koska tällöin muuntamo rakennettaessa on työnjohdollinen vastuu samalla yrityksellä kuin asennustekninen toteutus. Yaran resurssit tällaisen projektin työjohtamiseen ovat rajalliset, sillä se sitoo yhden henkilön kokonaan kiinni asennusaikaiseen työjohtoon muuntamon rakentamisen ajaksi. Yaran henkilöresurssit ovat keskitetty enemmän projektisuunnitteluun kuin työnaikaiseen asennusvalvontaan. Kahden muun toimittajan tarjouksiin ei oltu eritelty erillistä projektipäällikköä, joka tarkoittaa sitä, että on varauduttava siihen, että asennusaikainen työjohto on tällöin ns. Yaran omissa käsissä.

Tarjouskyselyssä ei otettu huomioon louhosvalaistuksen toteutusta muulta osin kuin pienjännitekeskukselle suunniteltujen lähtöjen osalta. Louhosvalaistuksen kokonaiskustannusta laskettaessa on otettava huomioon kolme kappaletta valomastoja, valaisimet, kaapelointi sekä kaivuutyöt. Valomastolle valaisimineen laskettiin hinnaksi n. 9000 euroa/kpl. Jos yhden maston etäisyys muuntamosta olisi keskimäärin 100 metriä, kaapelointikustannukset kaivuutöineen yhdelle mastolle tulisi olemaan n. 4500 euroa. Näin ollen kokonaiskustannus kolmelle louhosvalaistusmastolle tulisi olemaan n. 40 000 euroa.

Toimittajien tarjouksien perusteella voitiin luoda sähkönjakelun kokonaiskustannusarvio. Kustannusarvioita tehtiin itse asiassa kolme kappaletta; jokaisen toimittajan tarjouksen perusteella omansa. Lopullisissa kustannusarvioissa otettiin huomioon kaikki projektin kustannukset. Näitä kustannuksia olivat laitetoimitusten lisäksi mm. erilaiset kaivuutyöt sekä muuntamon kivimurskealustan ja maadoituselektrodin rakentaminen sekä Yaran oman projektisuunnittelun kustannukset.

Kokonaiskustannusarvion perusteella tyhjennyspumppausprojektin sähkönjakelun toteutuksen lopullinen hinta on n. 360 000 euroa. Kokonaiskustannukset vaihtelevat hieman valitun toimittajan mukaan. Lopulliseen päätökseen toimittajavalinnasta ei vaikuta aina kuitenkaan suoraan hinta. Esimer-

kiksi edellisten projektien perusteella todetulla hyvällä yhteistyökumppanuudella ja toimituksien varmuudella on osuutta toimittajavalintaan. On myös arvioitava toimittajan resurssit ja ammattitaito kyseisen projektin toteutuksessa. Lisäksi toimittajan tarjoamalla aikataululla sekä hankintaehdoilla on vaikutusta lopullisen urakoitsijan valintaan unohtamatta tarjouksen kokonaissisältöä sähkölaitteiston osalta ja kokonaisuusasetusten kattavuutta. Merkittävä seikka toimittajavalinnassa on myös toimittajan turvallisuuskäytäntöjen taso sekä asennoituminen Yaran omiin turvallisuuskäytäntöihin ja pelisääntöihin.

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa sähkönjakelun suunnittelu jakelumuuntamon osalta palvelemaan prosessivesialtaan tyhjennyspumppausprojektia. Lisäksi suunnitteluaineiston pohjalta tehtiin tarjouskysely neljälle eri toimittajalle, joiden tarjouksien perusteella voitiin tehdä tarjousvertailua sekä luoda kokonaiskustannusarvio sähkönjakelun rakentamiselle.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin yleisesti sähkönjakeluverkkoja ja niiden rakennetta sekä verkon vikatapauksia ja vikasuojausta. Lisäksi esiin nostettiin teoriaa sähkönjakeluverkon automaatiosta, joka on nykypäivänä iso osa sähkönjakeluverkon toimintaa.

Jakelumuuntamon tarkka rakennusaika ei ole vielä selvillä uusiksi menneiden louhossuunnitelmien takia, mutta opinnäytetyössä luotu suunnittelu- sekä tarjouskyselyaineisto toimii tyhjennyspumppausprojektin sähköistyksen esisuunnitelmana. Toivon aineiston palvelevan Yaran projektisuunnittelua sekä sen olevan mahdollisimman hyvin hyödynnettävissä, kun muuntamon rakennusaika on kässillä.

Työ oli kokonaisuutena mielenkiintoinen, sillä työ ei ollut vain sähkösuunnittelua vaan ennemminkin projektisuunnittelua, jossa otettiin huomioon sekä sähkötekniinen toteutus että laitevalinnat kokonaiskustannuksineen. Opinnäytetyön teoriaosuuden ansiosta minulla on hyvä tuntemus sähkönjakeluverkoista, niiden rakenteesta sekä vioista ja suojauksesta. Itse muuntamon suunnittelu tarjouskyselyprosessin kanssa antoi hyviä valmiuksia työelämään niin sähkösuunnittelun kuin projektisuunnittelunkin osalta.

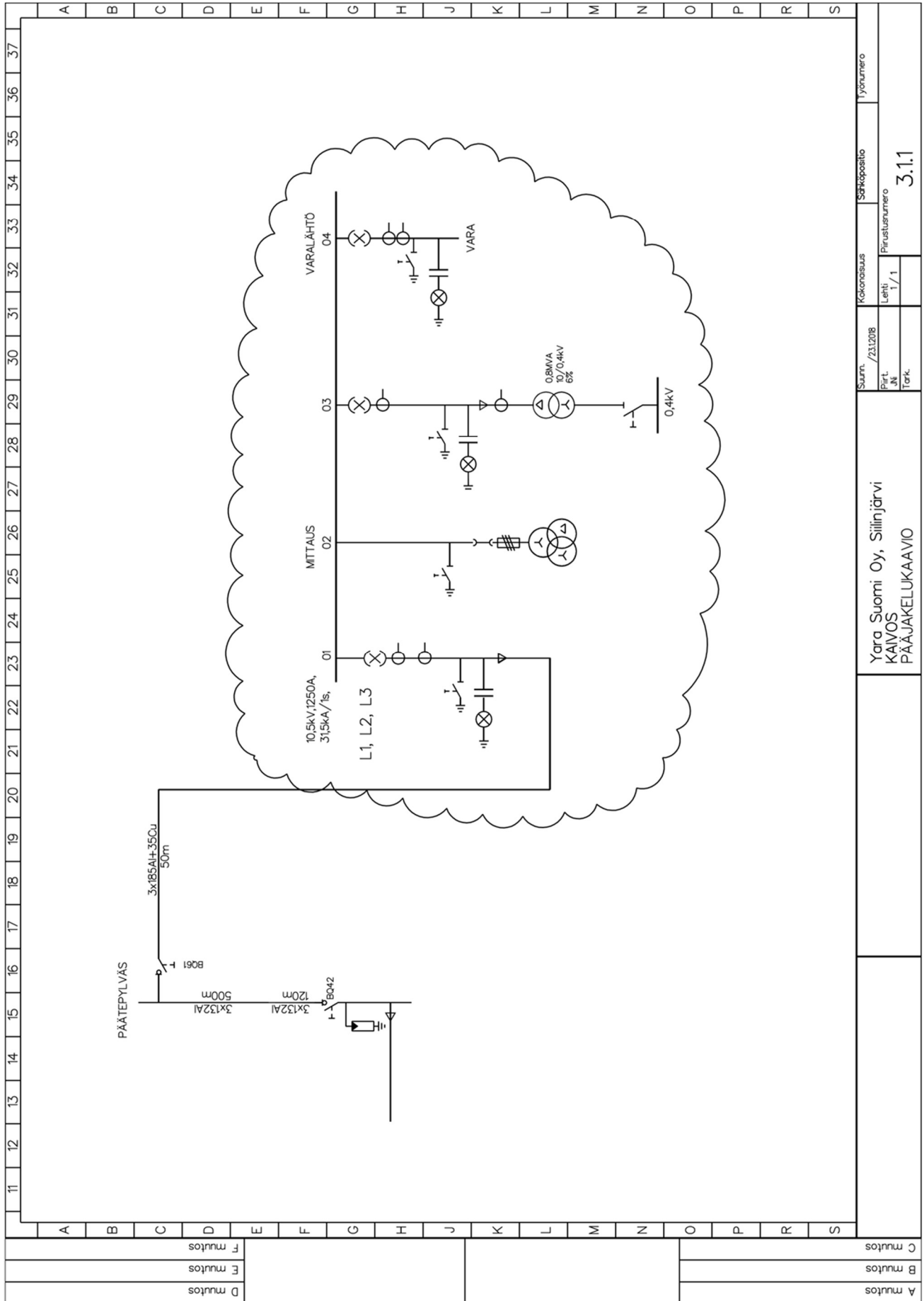
## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- ABB Oy. 2018.** [Online] 2018. <http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/air-insulated/iec-and-other-standards/iec-air-insulated-primary-switchgear-unigear-zs1>.
- **2000.** *Teknisiä tietoja ja taulukoita.* Vaasa : Ykkös-Offset Oy, 2000. ISBN 951-99366-0-2.
- Elovaara, Jarmo ja Haarla, Liisa. 2011.** *Sähköverkot I.* Helsinki : Gaudeamus Helsinki University Press/ Otatiето, 2011. ISBN 978-951-672-360-3.
- **2011.** *Sähköverkot II.* Helsinki : Gaudeamus Helsinki University Press/ Otatiето, 2011. ISBN 978-951-672-363-4.
- Energiateollisuus Oy. 2018.** Sähköverkot. *Energiateollisuus Oy.* [Online] 2018. [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/sahkoverkot).
- Energiateollisuus ry. 2008.** Verkostosuositus SA 2:08. *Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen.* Helsinki : s.n., 2008.
- Fingrid Oyj. 2018.** Suomen sähköjärjestelmä. [Online] 2018. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>.
- **2018.** Sähköasemat. [Online] 2018. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/sahkoasemat/>.
- Hietalahti, Lauri. 2013.** *Sähkövoimatekniikan perusteet.* Tampere : Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka, 2013. ISBN 978-952-5491-77-7.
- IEC60909-0.** IEC60909-0-Standardi.
- Korpinen, Leena. 1998.** [www.leenakorpinen.fi](http://www.leenakorpinen.fi). *Sähkövoimatekniikkaopus.* 1998.
- Lakervi, Erkki ja Partanen, Jarmo. 2008.** *Sähkönjakelutekniikka.* Helsinki : Otatiето/ Helsinki University Press, 2008. 978-951-672-357-3.
- Lakervi, Erkki. 1996.** *Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu.* Helsinki : Otatiето Oy, 1996. ISBN 951-672-220-2.
- Launonen, Antti. 2016.** Sähköaseman ala-asemat ja niiden konfigurointi. *Opinnäytetyö.* Tampere : Tampereen ammattikorkeakoulu, 2016.
- Lehtomäki, Lauri. 2014.** Kennotermiälin konfigurointi ja käyttöönotto. *Opinnäytetyö.* Jyväskylä : Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, 2014.
- PSK Standardisointi. 2018.** PSK Standardisointi. [Online] 2018. <https://psk-standardisointi.fi/psk/yleista/>.
- Putkonen, Anna. 2016.** Teollisuuden keskijänniteverkon vika- ja suojaustarkastelu. *Opinnäytetyö.* Kuopio : Savonia-Ammattikorkeakoulu, 2016.
- Rouhiainen, Jukka. 2008.** Maasulkuvirtojen kehitys ja kompensointi Haminan Enrgian Oy:n keskijänniteverkossa. *Diplomityö.* Lappeenranta : Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, 2008.
- Rouvali, Juhani.**
- **2017.** Kantaverkon käyttö. *4 ESV4740 Sähkön siirtojärjestelmät, kurssimateriaali.* Kuopio : Savonia-Ammattikorkeakoulu, 2017.
- **2016.** Maasulku. *16A ESV4730 Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu ja käyttö, Kurssimateriaali.* Kuopio : Savonia-Ammattikorkeakoulu, 2016.

- , **2017**. Ylijännitelajit. *17A ESV4530 Suurjännitetekniikka, kurssimateriaali*. Kuopio : Savonia-Ammattikorkeakoulu, 2017.
- , **2017**. Ylijännitteen rajoittaminen suurjänniteverkoissa. *17A ESV4530 Suurjännitetekniikka, kurssimateriaali*. Kuopio : Savonia-Ammattikorkeakoulu, 2017.
- SFS 6000. 2012**. *SFS-Käsikirja 600-1*. Helsinki : Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2012. ISBN 978-952-242-201-9.
- SFS 6001. 2012**. *SFS-Käsikirja 601*. Helsinki : Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2012. ISBN 978-952-242-338-2.
- SFS 6002. 2012**. *SFS-Käsikirja 600-2*. Helsinki : Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2012. ISBN 978-952-242-341-2.
- STUL ry. 2015**. *D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. Espoo : Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 2015. ISBN 978-952-231-079-8.
- Sähköenergialiitto ry. 1994**. Verkostosuositus SA 5:94. *Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen*. Helsinki : Sähköenergialiitto ry, 1994.
- Sähköinfo Oy. 2017**. ST 53.11. *Kuluttajamuuntamot*. Espoo : Sähköinfo Oy, 2017.
- Sätköturvallisuuslaki 1135/2016**. Annettu Helsingissä 16.12.2016.
- Turto, Eero. 2017**. Keskijänniteverkon ylijännitesuojaus. *Opinnäytetyö*. Pori : Satakunnan Ammattikorkeakoulu, 2017.
- Vaara, Janne. 2011**. Muuntamoliitynnän toteutus kaivoksen sähköverkon. *Opinnäytetyö*. Kemi : Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu, 2011.
- Welling, Juho. 2010**. Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma. *Diplomityö*. Lappeenranta : Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, 2010.
- Yara Suomi Oy. 2018**. Historia: Yara Suomi Oy. [Online] 2018. <http://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-global/history-of-yara>.
- , **2018**. Uutiset ja tapahtumat. [Online] 2018. <http://www.yara.fi/uutiset/196859/tuotantoennatykset-investoinnit-ja-rekrytoinnit-jatkuivat-yaran-siilinjarven-toimipaikalla/>.
- , **2018**. Yara Suomi. [Online] 2018. <http://www.yara.fi/tietoa-yarasta/about-yara-local/>.



LIITE 1 PÄÄJAKELUKAAVIO



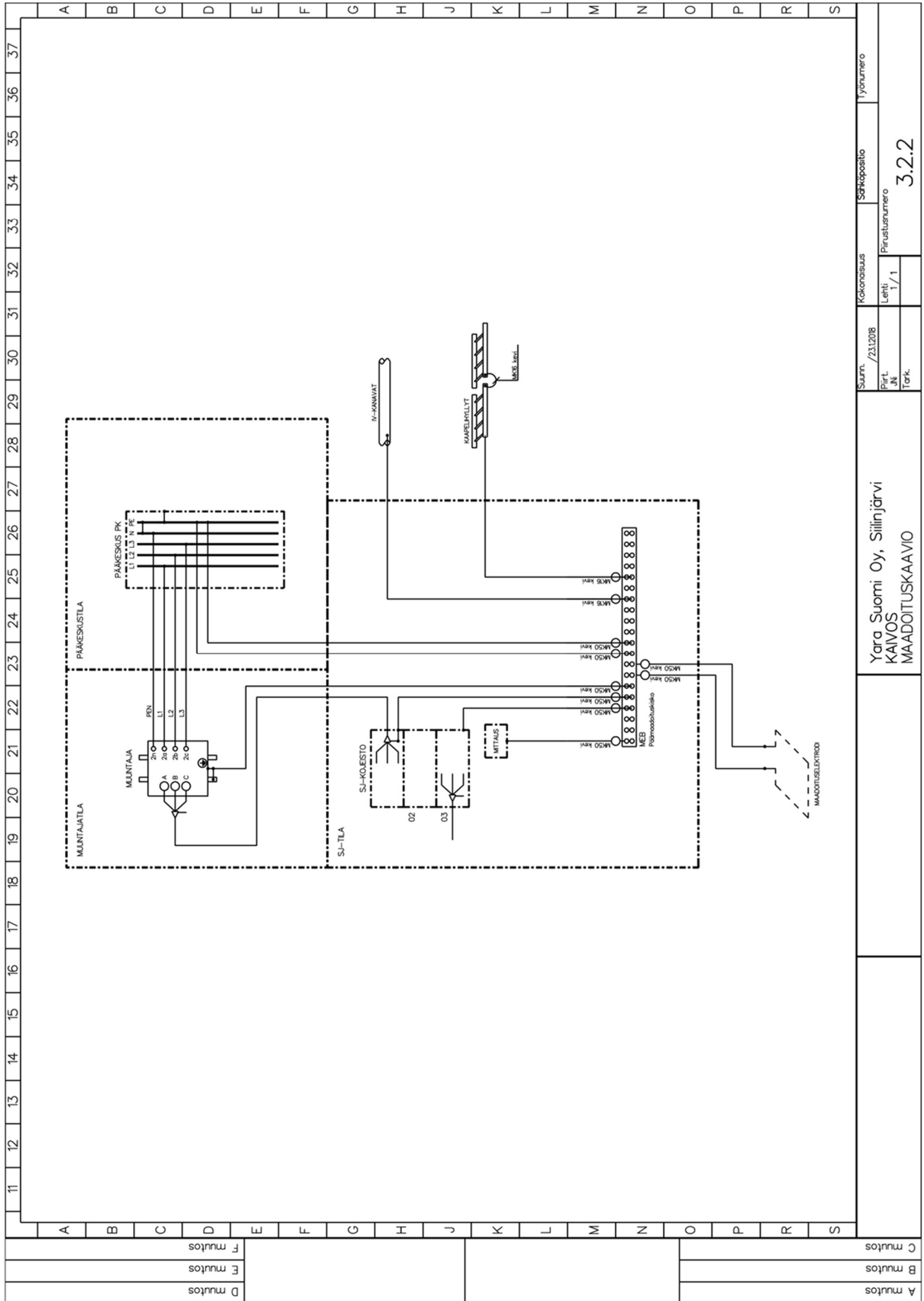
A B C D E F G H J K L M N O P R S

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37

A muutos		Yara Suomi Oy, Siilinjärvi KAIVOS PÄÄJAKELUKAAVIO		Suunn. / 23.12.08		Sähköpiirio		Työnumero	
B muutos				Pict. / 1/1		Kokoonasetus		Prustinumero	
C muutos				Tek.		Lehti		3.1.1	



LIITE 3 MAADOITUSKAAVIO

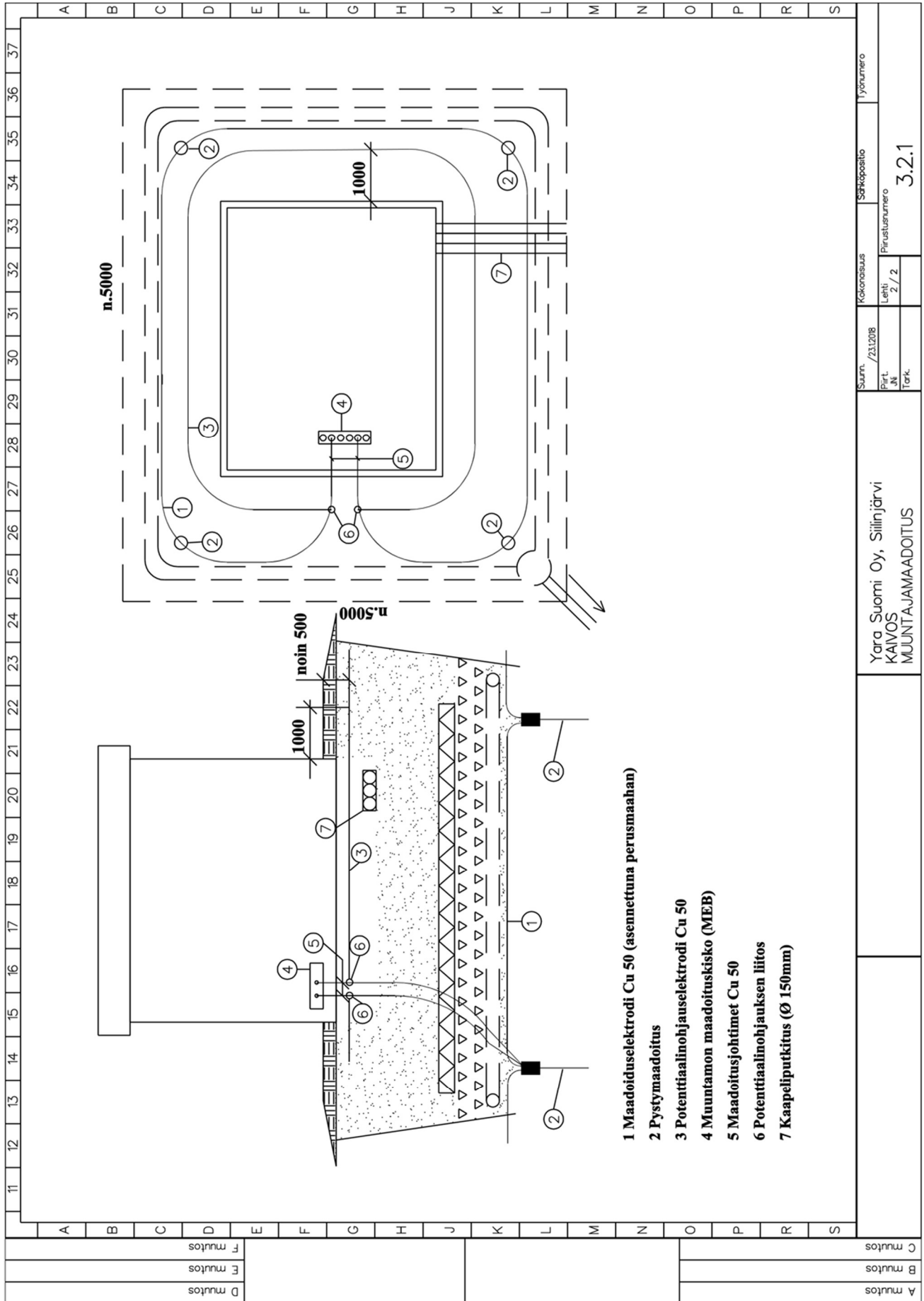


D	D muutos	
E	E muutos	
F	F muutos	
A	A muutos	
B	B muutos	
C	C muutos	

Yara Suomi Oy, Sillinjärvi  
 KAIVOS  
 MAADOITUSKAAVIO

Siirt.	23.12.08	Kokouspöytä	1/1	Työnumero
Prnt.	JM	Prustinumero	3.2.2	
Terä.				

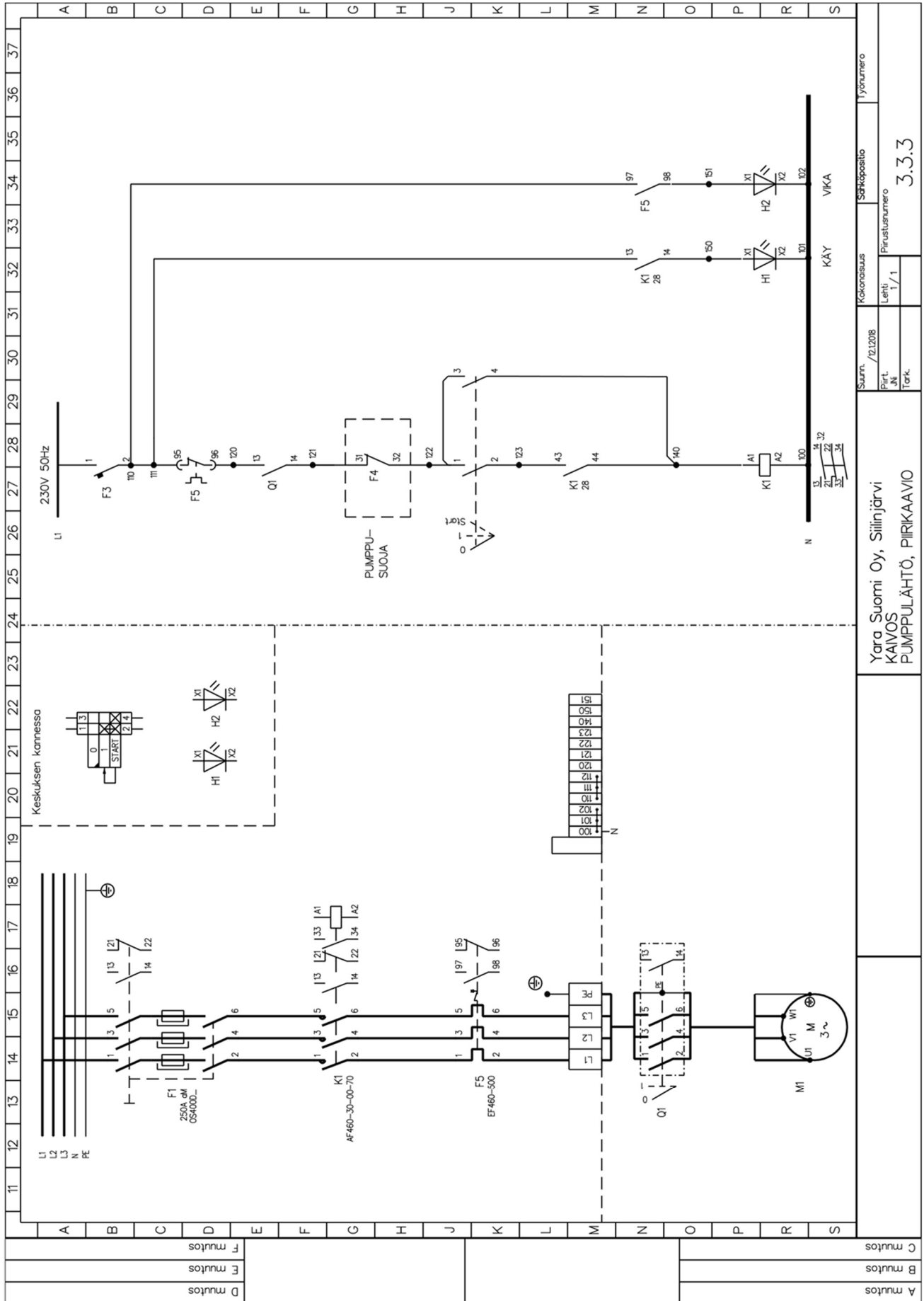
LIITE 4 MUUNTAMOADOITUS







LIITE 6 PUMPPULÄHTÖ PIIRIKAAVIO



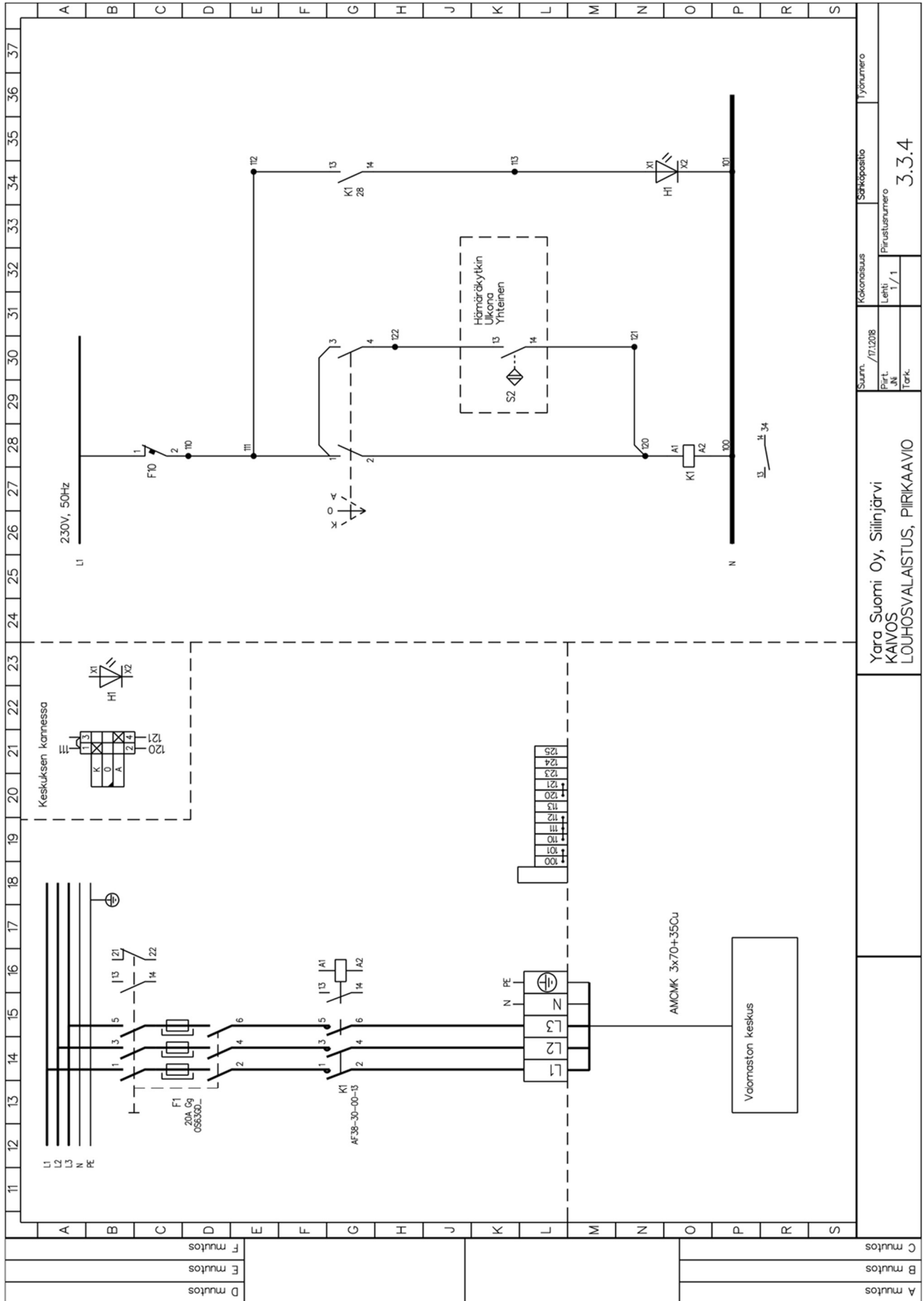
Keskuksen kanssa

Yara Suomi Oy, Siilinjärvi  
KAIVOS  
PUMPPULÄHTÖ, PIIRIKAAVIO

Siirto	12.12.2018	Kokoonasetus	Sähköpiirio	Työnumero
Prnt		Lehti	Prntusnumero	
Terä		1/1		
				3.3.3

D	mutos
E	mutos
F	mutos
C	mutos

LIITE 7 LOUHOSVALAISTUS PIIRIKAAVIO



Yara Suomi Oy, Siilinjärvi  
 KAIVOS  
 LOUHOSVALAISTUS, PIIRIKAAVIO

D	D muutokset	
E	E muutokset	
F	F muutokset	
C	C muutokset	



## LIITE 8 400 V LÄHTÖLUETTELO

Sivu 1 / 1

Liite 3.3.2  
LÄHTÖLUETTELO  
KESKUS 400 V



Nimitys	Jännite (V)	Teho (kW)	Virta (A)	Tyyppi/riikaavio	Huom.
Pumppu 1	400	90	250	Liite 3.3.3 Pumppulähti	OS400D_
Pumppu 2	400	90	250	Liite 3.3.3 Pumppulähti	OS400D_
Louhosvalaistus (valomasto)	400	10	20	Liite 3.3.4 Louhosvalaistus piirikaavio	OS63GD_
Louhosvalaistus (valomasto)	400	10	20	Liite 3.3.4 Louhosvalaistus piirikaavio	OS63GD_
L. valaistus (Vara)	400	10	20	Liite 3.3.5 Louhosvalaistus piirikaavio VARA	OS63GD_
Työmaakeskus (Varaus)	400		160	Liite 3.3.6 Työmaakeskus (varaus)	OS250D_
VARA	400		160	Liite 3.3.8 VARA	OS250D_
VARA	400		125	Liite 3.3.9 VARA	OS160GD_
VARA	400		63	Liite 3.3.10 VARA	OS160GD_
PR Muuntamo	400		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
Ilmalämpöpumppu	400		C16		Vikavirtasuojia 30mA
Valaistus Muuntamo	400		B10		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	400		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	400		C16		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	400		B10		Vikavirtasuojia 30 mA
VARA	400		B10		Vikavirtasuojia 30 mA

Registration No.  
VAT FI09486655

Telephone  
+47 24 15 70 00  
Telefax  
+47 24 15 70 01

Visiting Address  
Nilsåntie 501  
FI-71801 Sillinjärvi  
Web  
www.yara.com

Postal Address  
Yara Suomi Oy  
P.O. Box 20  
FI-71801 Sillinjärvi  
Finland