

Pienjänniteverkon selvitystyö

Antti Lapp

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Antti Lapp			
Työn nimi Pienjänniteverkon selvitystyö			
Päiväys	12.4.2012	Sivumäärä/Liitteet	51/5
Ohjaaja(t) lehtori Heikki Laininen, yliopettaja Juhani Rouvali			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Yara Suomi Oy, Siilinjärvi			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtaiden rikkihappo- ja energiantuotantoyksikön 400 V pienjänniteverkkoa. Ensimmäisenä tehtävänä oli tutkia olemassa olevat varasyöttöyhteydet pääkeskusten välillä ja niiden ominaisuudet ja päivittää niiden nykytilanteen tiedot ja piirustukset ajan tasalle. Sen jälkeen oli tarkasteltava neljää muuta pienjänniteverkon syöttöä ja niiden kehittämistä.</p> <p>Ensin päivitettiin nykytilanteen tiedot ja piirustukset ja tämän jälkeen suoritettiin laskenta. Laskenta varten kerättiin tietoa kentältä kaapeleista ja suoritettiin tehomittauksia keskuksista. Muuntajien kilpiarvot saatiin toimeksiantajalta. Kaapelin kuormitettavuudet, oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat laskettiin ja tarkastettiin myös sulakesuojauksen toiminta. Samat laskelmat tehtiin myös uusia syöttöjä suunniteltaessa. Lopuksi kehitysideoista tehtiin kustannusarviot. Näin toimeksiantajalle on työstä mahdollisimman paljon hyötyä. Laskenta suoritettiin pääosin käsin ja Exceltaulukko-ohjelmalla. Kaikki piirustukset päivitettiin ja piirrettiin AutoCad- ja Cads Planner-ohjelmia käyttäen.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin tehtyä tietojen päivitys, laskelmat ja suunnitelmat. Tämän opinnäytetyön pohjalta toimeksiantajalla on nyt selvä käsitys, miten varasyöttöyhteyksiä voidaan kuormittaa. Lisäksi uudet kehitysideat kustannusarvioineen ovat nyt myös hyödynnettävissä.</p>			
Avainsanat pienjänniteverkko, varasyöttöyhteys			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Antti Lapp			
Title of Thesis Study of Low-Voltage Network			
Date	12 April 2012	Pages/Appendices	51/5
Supervisor(s) Mr Heikki Laininen, Lecturer, Mr Juhani Rouvali, Principal lecturer			
Client Organisation/Partners Yara Suomi Oy, Siilinjärvi			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to examine the 400 Volt low-voltage network in Yara Suomi in Siilinjärvi. The focus was on the existing backup connections between the main hubs. The drawings and other data was to be updated. After that the purpose was to study four other parts of the network's electric inputs and determine how to upgrade them.</p> <p>First the data was updated and then calculations were done to find out the qualities of the backup connections. Information was gathered by measuring, inspecting and some information was found directly from the client organization. The calculations included the load capacity of the cable, short-circuit currents and voltage drops. Also the fuse-protection was checked. The same was done to the four other low-voltage electric inputs that needed updating. Finally the costs were determined for the new plans for the electric inputs. In this way the client will get the most of the plans. Calculations were done by hand and with the Excel spreadsheet program. The drawings were updated and drawn with AutoCad and Cads Planner applications.</p> <p>The data collection and update and calculations were successful. As a result the client has now useful information on how the backup connections can be used. Also the new plans for electric input changes are ready for use with the costs estimated.</p>			
<p>Keywords low-voltage network, backup-connection</p>			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtailla rikkihappo- ja energiatuotantoyksikössä. Työ tehtiin vuosien 2011 ja 2012 vaihteessa.

Kiitän Yara Siilinjärveä hyvästä aiheesta. Haluan myös kiittää työn ohjaajaa lehtoria Heikki Lainista, työtä Yaran puolelta ohjannutta sähköinsinööriä Pasi Raatikaista ja RET:in sähkö-automaatioryhmää.

Kuopiossa 12.4.2012

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	YARA SUOMI OY, SIILINJÄRVI	9
3	PIENJÄNNITEVERKKO	11
3.1	Jakelujärjestelmät	11
3.2	Muuntajat ja johdot.....	13
3.3	Suojaus.....	13
4	PIENJÄNNITEVERKON MITOITTAMINEN.....	15
4.1	Johdon mitoitus	15
4.2	Suojalaitteiden mitoitus	16
4.2.1	Ylivirtasuojaus.....	16
4.2.2	Oikosulkusuojaus.....	17
4.3	Jännitteenalenema johdossa	20
4.4	Muuntajan ja tehon laskenta	21
5	VARASYÖTTÖYHTEYKSIEN SELVITYS.....	23
5.1	Kuormitettavuudet	24
5.2	Oikosulkuvirrat.....	26
5.2.1	Kolmevaiheiset oikosulkuvirrat	26
5.2.2	Yksivaiheiset oikosulkuvirrat	29
5.3	Jännitteenalenemat	33
5.4	Muuntajien kuormitus varasyöttötilanteessa	35
5.5	Yhteenveto	36
6	ALUEEN PIENJÄNNITEVERKON KEHITTÄMINEN	39
6.1	Varasyöttöyhteys RIC5.1-VSK.....	39
6.2	Sataman syötön siirto.....	41
6.3	Varasyöttö näytteenottorakennukselle.....	42
6.4	Saniteettivesipuhdistamon varasyöttö	47
7	YHTEENVETO.....	50
	LÄHTEET	51

LIITTEET

- Liite 1 Tehdasalueen kaapelikartta, jossa suunnitellut syötöt
- Liite 2 AM01:n jakelukaavio, jossa KS01:n syötön ja sataman syötön suunnitelmat
- Liite 3 Näytteenottorakennuksen KS01-1-2:n varasyötön suunnitelma kuva

- Liite 4 PU02:n jakelukaavio, jossa näytteenottorakennuksen varasyötön suunnitelma
- Liite 5 Saniteettivesilaitoksen KS01:n syötön ja varasyötön suunnitelma kuva

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtaille. Työn tarkoituksena on selvittää 400 V:n pienjännitejakeluverkkoa tehtaan rikkihappo- ja energiantuotantoalueella. Aihetta tarjosi Yara Siilinjärvi.

Työn ensimmäinen vaihe on selvittää nykyiset pääkeskusten väliset varasyöttöyhteydet, joita käytetään poikkeustapauksissa, ja päivittää niiden tiedot, sillä olemassa olevat tiedot ovat osittain keskeneräisiä tai muuten epäkohtaisia. Työssä tehdään paljon selvitystyötä piirustusten pohjalta ja kentällä.

Toinen vaihe on uusien varasyöttöyhteyksien ja muiden kehittämistä vaativien piiverkon syöttöjen suunnittelu, johon kuuluu syöttöyhteyksien ja suojausten mitoitus. Lopuksi uusista syöttöyhteyksistä kootaan kustannusarviot.

2 YARA SUOMI OY, SIILINJÄRVI

Yara Suomi Oy on kemian alan yritys, jolla on Suomessa yhteensä neljä tuotantolaitosta Siilinjärvellä, Uudessakaupungissa, Harjavallassa ja Kokkolassa. Tärkeimpiä tuotteita ovat lannoitteet, ympäristötuotteet ja teollisuuskemikaalit. Yara International ASA on maailman johtavia kemian alan yrityksiä ja sen pääkonttori sijaitsee Norjassa. Sillä on toimipaikkoja yli 50 maassa ja niistä 23:ssa sijaitsee tuotantolaitoksia. Yara International ASA on perustettu vuonna 1905 nimellä Norsk Hydro. Henkilöstöä on noin 7 600. (Yara Suomi 2012a.)

Suomessa Yara Suomi Oy tunnettiin nimellä Kemira GrowHow Oyj, kunnes Yara International ASA osti sen vuonna 2008. Yara Suomi Oy onkin sen tytäryhtiö. Siilinjärven tuotantolaitos on perustettu 1960-luvun lopulla, kun alueelta löytyi laaja fosfaattiesiintymä yli kymmenen vuotta aikaisemmin. Siilinjärven fosfaattikaivos on myös Länsi-Euroopan ainoa. Ensimmäiset tehtaat saatiin vuonna 1969 ja laajennettiin vuosina 1971–73 ja 1979. Alueella sijaitsee kaivos, rikastamo, pasutto-rikkihappotehdas, typpihappotehdas, voimalaitos, ammonium-fosfaattitehdas, fosforihappotehdas, lannoitetehdas ja pakkaamo. Henkilöstöä Siilinjärvellä on noin 500. Siilinjärvellä tuotetaan lannoitteita ja fosforihappoja. Näihin tarvittavat typpihappo, rikkihappo ja apatiitti tuotetaan myös Siilinjärven tehtailla ja kaivoksessa. Siilinjärvellä valmistettavista lannoitteista pääosin kaikki käytetään Suomessa. (Yara Suomi 2012b.)

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin pienjännitejakeluverkkoa Yaran Siilinjärven tehtaiden rikkihappo- ja energiantuotantoyksikössä eli RET:ssä. RET:iin kuuluvat pasutto-rikkihappotehdas, typpihappotehdas, rikinpolttolaitos, voimalaitos ja lisäksi saniteettivesilaitos, pumppaamo ja satama.

Pasutto-rikkihappotehtaalla on kolme pasuttoa, joissa poltetaan uuneissa rikkikiisua (FeS). Rikkikiisusta muodostuu palaessaan hapen kanssa rikkidioksidia (SO₂), josta valmistetaan rikkihappoa (H₂SO₄) kahdessa rikkihappotehtaassa. Rikkihappoa käytetään myöhemmin fosforihappotehtaalla, kun kaivoksesta louhitusta apatiitista ja rikkihaposta valmistetaan fosforihappoa. Typpihappotehtaalla valmistetaan ammoniakista typpihappoa (HNO₃). Typpihappoa käytetään lannoitetehtaalla, jossa valmistetaan lopulliset lannoitetuotteet. Voimalaitoksella sähkönjakelu tapahtuu tehdasalueen kaikille muille laitoksille. Voimalaitokselle tulee kantaverkosta 110 kV:n linja ja tästä sähkönjakelu muille laitoksille voimalaitokselta tapahtuu pääasiallisesti 10 tai 6 kV:lla.

Voimalaitoksella on myös varavoimageneraattori. Saniteettivesilaitoksella puhdistetaan poistuvaa saniteettivettä kalkin avulla. Pumppaamolta pumpataan läheisestä järvestä vettä tehtaan vesilaitokselle, joka on voimalaitoksen yhteydessä. Satamassa on vain valaistus- ja pistorasiakuormaa.

3 PIENJÄNNITEVERKKO

Pienjänniteverkossa jännite on 50 ja 1 000 V:n välillä. Jännite muunnetaan pienjännitteeksi jakelumuuntajalla keskijännitteestä. Ylempi jänniteporras, josta sähkö muunnetaan pienjännitteeksi, on 20 tai 10 kV. Yleisin jännitetaso pienjänniteverkossa sähköjakelussa on 400 V, mutta teollisuudessa on moottorilähtöjen yhteydessä myös 690 V:n jännitteitä. Kun kyse on 400 V:n jännitteestä, tarkoitetaan pääjännitettä, joka on kahden vaiheen välinen jännite. Vaiheen ja nollan ja/tai maan välinen jännite on tällöin $400 \text{ V}/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$, joka on esim. yksivaiheisen pistorasian vaihejännite.

Pienjänniteverkossa sähköjakelu on toteutettu kaapeleilla tai ilmajohdoilla. Pienjänniteverkko on yleensä säteittäinen, jolloin siinä on yksi syöttöpiste, joka on esimerkiksi 20/0,4 kV:n muuntamo. Säteittäinen verkko on selkeä, käyttö on yksinkertaista ja suojaus helppoa. (Lakervi & Partanen 2008.)

3.1 Jakelujärjestelmät

Pienjännitejakelun jakelujärjestelmät jaotellaan maadoitustavan mukaan. Eri järjestelmiä ovat TN-, TT- ja IT-järjestelmät. TN-järjestelmät jaotellaan vielä erikseen suoja-johtimen käytön perusteella. (Rissanen 2010.)

Ensimmäinen kirjain järjestelmän tunnuksessa kuvaa jakelujärjestelmän maadoitustapaa:

T = Yksi piste on yhdistetty suoraan maahan.

I = Kaikki jännitteiset osat on eristetty maasta tai yksi piste on yhdistetty maahan impedanssin kautta. (Rissanen 2010.)

Toinen kirjain kuvaa sähkölaitteiston jännitteelle alttiiden osien maadoitustapaa:

T = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty galvaanisesti suoraan maahan riippumatta jakelujärjestelmän maadoitustavasta.

N = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty jakelujärjestelmän maadoitettuun pisteeseen, yleensä tähtipisteeseen. (Rissanen 2010.)

Lisäkirjain kuvaa nolla- ja suoja-johtimen keskinäistä järjestelyä:

C = Nolla- ja suoja-johtin on yhdistetty yhteen PEN-johtimeen.

S = Nolla- ja suojajohtimet ovat erillisiä. (Rissanen 2010.)

TN-järjestelmässä virtapiirin yksi piste on yhdistetty suoraan maahan ja sähkölaitteisten jännitteelle alttiit osat on yhdistetty tähän pisteeseen suojajohtimen välityksellä. Eri TN-järjestelmiä ovat TN-C, TN-S ja TN-C-S-järjestelmät. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 61.)

TN-C-järjestelmässä on yhdistetty suoja- ja nollajohdin eli PEN-johdin. TN-C-järjestelmää voidaan käyttää vain, kun johtimien poikkipinta on yli 10 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia. Kyseistä järjestelmää käytetään kolmevaihejärjestelmässä, jolloin johtimia tarvitaan neljä. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 61.)

TN-S-järjestelmässä on erillinen suojajohdin ja nollajohdin koko järjestelmässä. Esi-merkiksi moottorilähdöissä ja symmetrisissä ja yliaallottomissa kuormissa nollajohdin on tarpeeton ja sitä ei silloin käytetä. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 61.)

TN-C-S-järjestelmä on yhdistelmä edellä mainittuja, sillä siinä voi olla osassa verkkoa PEN-johdin ja osassa verkkoa PE- ja N-johtimet ovat erillisiä. Tässä tapauksessa yhdistetty PEN-johdin on aina syöttävän verkon puolella, sillä erillisiä N- ja PE-johtimia ei saa yhdistää enää myöhemmin verkossa. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 62.)

TT-järjestelmässä on myös virtapiirin yksi piste suoraan maadoitettu, mutta sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat on maadoitettu erillisten maadoituselektrodien avulla. Ne on siis maadoitettu erilleen verkosta. TT-järjestelmää ei käytetä Suomessa julkisissa sähkönjakelujärjestelmissä. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 64.)

IT-järjestelmässä mitään virtapiirin osaa ei ole kytketty suoraan maahan. Tällöin on kyseessä maasta erotettu järjestelmä. Sähkölaitteistojen jännitteelle alttiit osat on TT-järjestelmän tavoin maadoitettu erillisiin maadoituselektrodeihin tai suojajohtimen välityksellä yhteiseen maadoituselektrodiin. Nollajohtimen käyttö on mahdollinen, mutta sitä ei suositella. Maasta erotettu IT-järjestelmä voidaan kytkeä maahan impedanssin eli vastuksen avulla esim. maasulkuvalvonnassa. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 64.)

3.2 Muuntajat ja johdot

Pienjännitemuuntajat ovat yleisimmin 20/0,4 kV, 10/0,4kV ja teollisuudessa on myös 10/0,69 kV muuntajia. Kun muuntaja on esimerkiksi 10/0,4 kV, sen yläjännitepuolella on 10 000 V jännite ja se muunnetaan alajännitepuolelle 400 V:iin. Näennäistehot S_N ovat yleisemmin 30–2 000 kVA. Muuntajat ovat sitä isompia, mitä suurempia tehoja niillä muunnetaan. Esimerkiksi kaupungissa ja teollisuudessa muuntajat ovat isoja, sillä asiakkaita ja tehoja on paljon ja muuntajat sijaitsevat erillisessä rakennuksessa, kuten puistomuuntamossa. Koska haja-asutusalueella asiakkaita ja tehoja on vähän, muuntajat ovat pieniä ja pylväisiin sijoitettuja. Kaupungeissa 400 V sähkönjakelu tapahtuu useimmin maakaapeloinnilla. Teollisuudessa 400/690 V jakelu tapahtuu ilmajohdoilla, maakaapelilla, kaapelina hyllyllä ja kiskostoilla. Haja-asutusalueilla siirto tapahtuu lähes poikkeuksetta ilmajohdoilla.

Yleisin ilmajohdot on AMKA eli alumiininen riippukierrejohto. Muita johtotyyppisiä ovat esim. AMCMK, AXCMK, MCMK ja AXMK, jotka ovat kaapeleita, joiden johdinmateriaaleissa ja eristysmateriaaleissa on eroja.

Muuntajat voivat olla kytkettyinä kolmioon, tähteen tai hakatähteen. Kolmiossa pääjännite on yhtä suuri kuin vaihejännite. Tähtikytkennässä pääjännite on $\sqrt{3}$ -kertainen vaihejännitteeseen. Esimerkiksi kun muuntaja on DYN-kytkentäinen, sen ensiö on kolmiossa ja toisiö tähdessä.

3.3 Suojaus

Pienjännite on ihmisille ja eläimille vaarallinen, ja oikosulun sattuessa myös laitteistot ja sähkönjakeluun liittyvät laitteet ja komponentit ovat alttiita tuhoutumiselle. Tämän takia on jakeluverkossa oltava suojaus. Ihmisiä suojataan kosketusjännitteeltä suojamaadoituksilla ja riittävän nopealla poiskytkentäajalla oikosulussa. Laitteita ja kaapeleita suojataan pienjänniteverkossa enimmäkseen johdonsuojakatkaisijoilla, katkaisijalla ja sulakkeilla. Sulakkeita voi käyttää ylikuormitussuojana, joka suojaa laitteita ylikuormitukselta. Sulakkeita voidaan käyttää oikosulkusuojana, joka oikosulun tapahtuessa katkaisee piirin tietyssä ajassa. Johdonsuojakatkaisijoita on monia erilaisia esim. B, C, D ja K -tyypit, mikä vaikuttaa johdonsuojakatkaisijan toimintanopeuteen. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 128–129.)

Sulakkeita on olemassa kahvasulakkeina ja tulppasulakkeina. Sulakkeita voidaan jaotella eri toimintatapojen perusteella. Sulakkeissa on toimintaa kuvaavat kirjaintunnukset, esimerkiksi gG-sulake on yleiskäyttöön tarkoitettu sulake, joka käy johdon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukseen. Ensimmäinen kirjain ilmaisee katkaisualueen ja toinen kirjain käyttökohteen. Pieni g-kirjain tarkoittaa koko alueen kattavaa katkaisukykyä ja iso G-kirjain tarkoittaa johdon suojaukseen tarkoitettua sulaketta. Esimerkiksi aM-sulaketta ei saa käyttää johdon suojaukseen, koska pieni a tarkoittaa osa-alueen kattavaa katkaisukykyä ja vain oikosulkusuojaksi käytettävää sulaketta. Iso M-kirjain tarkoittaa moottorin suojaukseen käytettävää sulaketta. (ABB 2000–2007.)

4 PIENJÄNNITEVERKON MITOITTAMINEN

Pienjänniteverkossa tulee mitoittaa sähkönsiirtotiet ja suojaukset. Sähkönsiirtotien on oltava riittävä sähkönsiirtoon ja suojauksen on oltava toimiva. Sähkönsiirrossa ei saa tapahtua liian suurta jännitteenalenemaa eikä kaapeli saa lämmetä liikaa. Jännitteen alenema vaikuttaa siirtotien loppupään jännitteeseen, ja sen on oltava standardien mukainen, jotta sähkölaitteet toimivat. Suojauksen tulee toimia riittävän nopeasti eli poiskytkennän tulee tapahtua vaaditussa ajassa.

4.1 Johdon mitoitus

Kun johdossa kulkee sähkövirtaa, johto lämpenee. Lämpeneminen voi aiheuttaa tulipalon tai alentaa johdon käyttöikää, jos johto on väärin mitoitettu. Johdon kuormitettavuus eli se kuinka suurta virtaa sen läpi voi kulkea, määräytyy johdon ympäristöön luovuttamasta lämmöstä. Johdon kuormitettavuuteen vaikuttavat johtimen materiaali, asennustapa, ympäröivä lämpötila, eristysmateriaali ja muiden virtapiirien läheisyys. D1-2009-käsikirjassa on taulukoita, joilla johdon kuormitettavuus voidaan määrittää. Johdon kuormitettavuus saadaan selville, kun tiedetään johtimen materiaali, poikkipinta ja asennustapa. Tämä on D1-2009-käsikirjan taulukossa 52.1. Eri asennustapoja ovat uppo-, pinta-, maa- ja vapaasti ilmaan tehtävä asennus. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 211.)

Edellä saatuun kuormitettavuuteen vaikuttaa vielä ympäröivä lämpötila, josta saadaan korjauskerroin lämpötilan ja johtimen eristysmateriaalin perusteella. Johdon kuormitettavuus kerrotaan saadulla korjauskertoimella, joka saadaan D1-2009-käsikirjan taulukosta 52.7. Kirjan taulukosta 52.11 saadaan korjauskertoimet ryhmille, joissa on useita kaapeleita tai virtapiirejä. Kertoimen suuruuteen vaikuttaa kaapelien sijoitus, esim. rinnakkain kaapelihyllyllä, ja kaapeleiden lukumäärä. Kertoimia sovelletaan samantyyppisiin ja samalla tavalla kuormitettuihin kaapeleihin. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 217–218.)

Kun mitoitetään johdon poikkipintaa, on tiedettävä johdon kuormitusvirta, jolle johto mitoitetaan. Sen jälkeen valitaan kuormitusvirtaa lähinnä oleva suurempi sulake ja D1-2009:n taulukosta 43.1 saadaan sulaketta vastaava johdon vähimmäiskuormitusvirta, joka sen on vähintään kestettävä. Seuraavaksi määritetään asennusolosuhteis-

ta johtuvat korjauskertoimet ja jaetaan niiden tulolla johdon vähimmäiskuormitusvirta. Nyt saadun virran mukaan valitaan D1-2009:n taulukosta 52.1 asennustavan mukaan poikkipinta, joko kuparina tai alumiinina, jonka kuormitettavuus on suurempi kuin saatu virta. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 131 & 211.)

Johdon kuormitettavuuden voi laskea myös, kun tiedetään jo valmiiksi johdon poikkipinta ja johdinmateriaali. Tällöin katsotaan D1-2009:n taulukosta 52.1 johdon kuormitettavuus ja kerrotaan se asennusolosuhteista määräytyvillä korjauskertoimilla. Tästä saadaan johdon todellinen kuormitettavuus, jonka perusteella voidaan määrittää sulakkeet ja kuormitusvirta. Jos kaapelireitillä on useita asennustapoja tai olosuhteita, kaapelin kuormitettavuus lasketaan huonoimman tapauksen mukaan. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 211–220.)

Energiateollisuus ry:n verkostosuosituksessa SA2:08 on myös listattu eri kaapeleiden ja johtojen kuormitettavuuksia eri asennustavoilla, kun niitä käytetään runko- tai liittymiskaapelina. Kuormitettavuudet on taulukoitu taulukoihin 6, 7 ja 8. (Anjala 2008, 12–15.)

4.2 Suojalaitteiden mitoitus

Suojalaitteilla voidaan toteuttaa ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus. Samalla suojalaitteella voidaan toteuttaa molemmat, tai vain toinen.

4.2.1 Ylivirtasuojaus

Ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa johdonsuojakatkaisijoilla, katkaisijoilla tai sulakkeilla. Ylikuormitussuojan tulee olla pienempi tai korkeintaan yhtä suuri kuin kuormitusvirran. Johdonsuojakatkaisija voidaan valita suoraan johdon kuormitettavuuden mukaan.

Sulakkeilla ylempi sulamisrajavirta, jolla sulake toimii noin tunnissa, on suurempi kuin 1,45 kertaa sulakkeen nimellisvirta. Tällöin sulaketta ei voida valita suoraan kaapelin kuormitettavuuden mukaan, vaan käytetään seuraavaa kaavaa

$$k * I_N \leq 1,45 * I_Z \quad (1)$$

jossa

I_N on suojalaitteen nimellisvirta

I_Z on johtimen jatkuva kuormitettavuus

k on sulakkeen ylempään sulamisrajavirran ja sulakkeen nimellisvirran suhde.

(Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 129.)

D1-2009-kirjassa on taulukko 43.1, johon on koottu johdon pienin sallittu kuormitettavuus gG-sulaketta käytettäessä ylikuormitussuojana. Johdon kuormitettavuuden täytyy olla isompi kuin gG-sulakkeen nimellisvirta, koska muuten johto lämpenisi liikaa. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 131.)

Verkostosuosituksesta SA2:08 löytyy taulukko 9, johon on listattu eri johtojen ja kaapeleiden suurimmat sallitut tai suositeltavat ylivirtasuojat. (Anjala 2008, 19.)

4.2.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulkusuojaukseen varten on selvittävät oikosulkuvirrat. Oikosulkuvirtoja esiintyy yksi-, kaksi- ja kolmevaiheisina. Yksivaiheisessa oikosulussa jokin vaiheista on oikosulussa nollan tai suojamaan kanssa. Kaksivaiheisessa oikosulussa jotkin kaksi vaihetta on keskenään oikosulussa ja kolmevaiheisessa oikosulussa kaikki vaiheet ovat oikosulussa. Oikosulkuvirran suuruus riippuu nimellisjännitteestä ja verkon impedansseista, joita ovat myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit. Näitä ovat esim. muuntajan ja johtojen impedanssit. (ABB 2000–2007.)

Oikosulkuvirta voidaan laskea Theveninin menetelmällä.

$$I''_k = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (2)$$

jossa U_n = syöttävän verkon nimellisjännite,

c = jännitekerroin, jolla voidaan laskea minimi- ja maksimioikosulkuvirrat

ja

Z_k = vikapaikan impedanssi.

(ABB 2000–2007.)

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta saadaan myötäimpedanssin mukaan:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \quad (3)$$

jossa Z_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi.
(ABB 2000–2007.)

Myötäimpedanssit voidaan jakaa jakeluverkon kolmevaiheisessa oikosulussa syöttävän verkon impedanssiin, muuntajan impedanssiin ja johdon impedanssiin, jolloin kaava tulee muotoon:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot \bar{E}}{Z'_S + \bar{Z}_M + \bar{Z}_J} \quad (4)$$

jossa Z'_S = syöttävän verkon impedanssi redusoituna vikapaikan jännitepor-
taaseen,
 Z_M = muuntajan impedanssi $R+jX$ ja
 Z_J = johdon impedanssi.

(Rouvali 2010.)

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan myötä- ja vastakomponentin avulla kaavalla:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad (5)$$

jossa Z_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi ja
 Z_2 = vastakomponenttiverkon impedanssi.

Jos kaksivaiheisen oikosulun vikapaikan lähetyillä ei ole generaattoreita, voidaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskea likimääräisesti kaavasta:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_1|} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3} \approx 0,87 * I_{k3}. \quad (6)$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan myötä-, vasta- ja nollakomponentin avulla kaavalla:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} \quad (7)$$

jossa Z_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi,
 Z_2 = vastakomponenttiverkon impedanssi ja
 Z_0 = nollakomponenttiverkon impedanssi.

Jos yksivaiheisen oikosulun vikapaikan lähetyvillä ei ole generaattoreita, voidaan yksivaiheinen oikosulkuvirta laskea likimääräisesti kaavasta:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot U_n}{|2 \cdot Z_1 + Z_0|} \quad (8)$$

jossa Z_1 = myötäkomponenttiverkon impedanssi ja
 Z_0 = nollakomponenttiverkon impedanssi.

(ABB 2000–2007.)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea jakeluverkossa myös toisella tavalla, jos tunnetaan verkon komponentit eli muuntajan resistanssit ja reaktanssit ja johdon resistanssit ja reaktanssit. Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan silloin kaavasta:

$$I_{k1} = \frac{0,95 \cdot 3 \cdot U_V}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3L(R_v + R_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + L(2X_v + X_{v0} + 3X_0))^2}} \quad (9)$$

jossa U_V = verkon vaihejännite (V) ja 0,95 on IEC 60909 jännitekerroin

R_m = muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)

X_m = muuntajan oikosulkureaktanssi (Ω)

R_{m0} = muuntajan nolaresistanssi (Ω)

X_{m0} = muuntajan nolareaktanssi (Ω)

R_v = vaihejohtimen resistanssi (Ω/km)

X_v = vaihejohtimen myötäreaktanssi (Ω/km)

X_{v0} = vaihejohtimen nolareaktanssi (Ω/km)

R_0 = nolajohtimen resistanssi (Ω/km)

X_0 = nolajohtimen reaktanssi (Ω/km)

L = johdon pituus (km).

(Anjala 2008, 25.)

Kyseiset arvot löytyvät johtojen tiedoista ja ABB:llä on 20/0,4 kV:n muuntajille oma taulukko, josta löytyy R_m , R_{m0} , X_m ja X_{m0} eri muuntajille. Johtojen resistansseina ja reaktansseina laskennoissa käytetään aina +80 °C lämpötilan arvoja, sillä oikosulkutilanteessa johtimen lämpötila kasvaa. Johtoja on useampia eri tyyppisiä, niin ne summataan juuren alle muiden johtojen tietojen kanssa. (Rouvali, J 2010.)

Oikosulkusuojaus toteutetaan pienjänniteverkossa useasti sulakkeilla. Teollisuudessa yleinen sulake on gG-typin kahvasulake. Sulakkeen tulee toimia alle 5,0 s, mutta jos sulakekoko ryhmäkeskuksessa on pienempi kuin 32 A, niin sulakkeen tulee toimia alle 0,4 s. Pienimmän oikosulkuvirran on oltava $2,5 \times I_N$, kun gG-sulake $< 63 \text{ A}$ ja $3 \times$

I_N , kun gG-sulake ≥ 63 A. Toiminta-ajan saa selville, kun tunnetaan oikosulkuvirta ja sulakkeen koko. ABB:llä on olemassa gG-kahvasulakkeille toiminta-aikakäyrä, josta voidaan tarkastaa kunkin sulakkeen toiminta-aika tietyllä oikosulkuvirralla. D1-2009-käsikirjasta löytyy taulukko 41.5, johon on listattu gG-sulakkeiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat 0,4s ja 5,0s laukaisuajoilla. Oikosulkuvirran on oltava suurempi kuin sulakkeen pienin oikosulkuvirta, sillä muutoin sulake ei toimi vaaditussa ajassa. Poiskytkentäajalla rajoitetaan myös käyttäjälle vaarallista kosketusjännitettä oikosulkutilanteessa. (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 90–91.)

Jos samalla johdolla on pääsulakkeen lisäksi välisulake, niin sulakekokojen ei yleensä tulisi olla peräkkäiset koot, sillä silloin selektiivisyys ei toimi. Tällöin se sulake, jonka tulisi rajata vika-alue, ei toimi. Jos oikosulkuvirran taso on korkeintaan 1 kA, niin silloin selektiivisyys yleensä riittää, vaikka sulakekoot olisivat peräkkäiset. (Rouvali 2010.)

Verkostosuosituksesta SA2:08 löytyy taulukko 9, johon on listattu eri johtojen ja kaapeleiden suurimmat sallitut tai suositeltavat oikosulkusuojasulakkeet. Samanlainen taulukko on myös D1-2009-käsikirjassa taulukossa 43.2.

4.3 Jännitteenalenema johdossa

Kuormitetussa johdossa tapahtuu jännitteen alenemaa, mikä vaikuttaa johdon loppupään jännitteen suuruuteen. Jännitteenalenemaan vaikuttavat kuormitusvirta, johdon resistanssi ja impedanssi ja tehokerroin $\cos\varphi$ eli jännitteen ja virran välinen kulma. Jännitteen alenema yhtä vaihetta kohti voidaan laskea kaavalla:

$$U_a = RI * \cos\varphi + XI * \sin\varphi \quad (10)$$

jossa I = kuormitusvirta (A)

R = resistanssi (Ω)

X = reaktanssi (Ω)

φ = virran ja jännitteen välinen vaihekulma.

(ABB 2000–2007.)

Johdolla jännitteenalenema voidaan laskea johdon pituuden ja johdon ominaisresistanssin ja – reaktanssin avulla:

$$U_a = I_p * r * l + I_q * x * l = I * \cos\varphi * r * l + I * \sin\varphi * x * l \quad (11)$$

jossa I_p = pätövirta (A)
 I_q = loisvirta (A)
 r = johdon resistanssi pituuden mukaan (Ω/km)
 x = johdon reaktanssi pituuden mukaan (Ω/km)
 l = johdon pituus (km).

Kolmevaiheinen jännitteenalenema saadaan, kun kerrotaan lauseke $\sqrt{3}$:lla. Suhteellinen jännitteenalenema saadaan:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% \quad (12)$$

jossa Δu = suhteellinen jännitteenalenema
 ΔU = jännitteenalenema volteissa (V)
 U_N = nimellisjännite (V).

(Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL 2009, 226.)

Verkostosuosituksessa SA2:08 on määritelty taulukossa 13. suositellut jännitteenalenemat. Pienjännitejakelussa korkeassa laadussa alenema on $\pm 4\%$ ja normaalissa laadussa $\pm 10\%$. Teollisuudessa suositeltava jännitteenalenema on noin 3% . Jännitteenalenema voidaan laskea yksi- tai kolmevaiheisena, mutta suhteellinen jännitteenalenema pysyy aina samana. (Anjala 2008, 29.)

4.4 Muuntajan ja tehon laskenta

Kun lasketaan tehoja, niin voidaan laskea näennäisteho S_N , pätöteho P ja loisteho Q . Näissä tarvitaan tietää virta, jännite ja tehokerroin. Näihin on olemassa seuraavat kaavat. (ABB 2000–2007.)

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (13)$$

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi \quad (14)$$

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \sin\varphi \quad (15)$$

jossa S = näennäisteho (VA)
 P = pätöteho (W)
 Q = loisteho (Var)

I = virta

U = pääjännite.

(ABB 2000–2007.)

Näennäisteho S voidaan myös laskea P:n ja Q:n avulla suoraan.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (16)$$

Muuntajissa on aina kilpiarvot erillisessä kilvessä, joita voidaan käyttää laskennassa. Kilpiarvoja ovat näennäisteho S_N , suhteellinen oikosulkuiмпedanssi $z_k\%$ ja kuormitushäviöt P_k . Näistä voidaan laskea R_k ja X_k seuraavilla kaavoilla. (ABB 2000–2007.)

$$Z_k = \frac{z_k\%}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} \quad (17)$$

$$r_k = \frac{P_k}{S_N} \quad (18)$$

$$R_k = r_k * \frac{U_N^2}{S_N} \quad (19)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (20)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (21)$$

joissa U_N = nimellisjännite (V)
 S_N = näennäisteho (VA)
 P_k = kuormitushäviöt (W)
 $R_k = R_m$ = muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)
 $X_k = X_m$ = muuntajan oikosulkureaktanssi (Ω)

(ABB 2000–2007.)

5 VARASYÖTTÖYHTEYKSIEN SELVITYS

Työ aloitettiin selvittämällä nykyinen pienjänniteverkon varasyöttöyhteyksien tilanne. Tässä varasyöttöyhteyksillä tarkoitetaan keskuksien välisiä tilapäissyöttökaapeleita, joilla voidaan syöttää toista keskusta tilapäisesti esimerkiksi vika- tai huoltotilanteessa. Oikea varsinainen varasyöttö on esimerkiksi generaattorin avulla sähköä syöttävä varasyöttö, mutta tässä työssä kaikki varasyötöt ovat keskuksen välisiä tilapäissyöttökaapeleita.

Varasyöttöjä oli yhdeksän pääkeskuksen välillä, yhteensä kuusi kaapelia ja yksi kisko. Varasyötöt toimivat tässä tapauksessa siten, että varasyöttökaapeli on keskuksien välissä ja sen molemmissa päissä on OESA-kytkinvarokkeet. Kytkinvarokkeen avulla varasyöttöyhteys voidaan kytkeä jännitteiseksi manuaalisesti. Kytkinvarokkeet pidetään aina suljettuina toisessa päässä ja varasyöttöä käydään tarvittaessa kytkevässä kiinni toisesta päästä. VSK-keskuksessa kaikki kytkinvarokkeet on auki, mutta yhteyksien toisessa päässä kiinni. Osa varasyöttöyhteyksistä näkyi piirustuksissa ja muutamaa ei ollut vielä päivitetty piirustuksiin. Aluksi tuli selvittää kaapelien pituudet ja tyypit sekä niiden sulakkeet. Lisäksi tarvittiin myös muuntajien kilpiarvot ja syöttävän verkon oikosulkuvirtoja. Näissä varasyöttöyhteyksissä pääkeskuksia syöttävät muuntajat ovat tyyppiä 10/0,4 kV, tehoiltaan 1 MVA ja DYN-kytkentäisiä eli ne ovat lähestulkoon identtisiä. Varasyöttöyhteyksistä laskettiin kuormitettavuudet, oikosulkuvirrat ja jännitteenalenemat. Lisäksi laskettiin muuntajan kuormitus varasyöttötilanteissa. Tämän jälkeen tarkastettiin nykyisen tilanteen toimivuus. Tehomittauksissa mitattiin tehokerroin, jännite, virta ja pätöteho. Mittaukseen käytettiin Yaralta löytyvää Chauvin Arnoux-merkkistä tehomittaria. Mittaukset suoritettiin pääkeskusten virtamuuntajien toisista ja tulokset muunnettiin todellisiksi virtamuuntajien muuntosuhteen avulla.

Varasyöttöyhteydet on taulukoitu seuraavaan taulukkoon (taulukko 1). PK1, PK2, R02, R03, RIC5 ja RIC5.1 ovat pasutto-rikkihappotehtaalla. V01 ja V02 ovat voimalaitoksella ja TH01 on tyypihappotehtaalla. VSK-keskus on varasyöttökeskus, jossa yhdistyvät kolme varasyöttöyhteyttä, jotka ovat pasutto 3 (RIC5.1), tyypihappotehdas (TH01) ja voimalaitos (V02). Varasyöttökeskus VSK sijaitsee voimalaitoksella. R02 ja R03 saavat syöttönsä samalta muuntajalta, joten niiden välinen varasyöttötilanne on käytännössä mahdollinen kun RIC5:ltä syötetään R02:sta, voidaan kytkeä yhteys myös R02:n ja R03:n välille. VSK-keskuksella voidaan syöttää V02:lta, joko

RIC5.1:lle, joka on RIC5:n alakeskus, tai TH01:lle. RIC5.1:ltä voidaan syöttää V02:lle tai TH01:lle, mutta jälkimmäinen on epätodennäköinen tilanne käytännössä. TH01:ltä voidaan syöttää V02:lle tai RIC5.1:lle, mutta tässäkin jälkimmäinen on epätodennäköistä.

TAULUKKO 1. Varasyöttöyhteydet

Keskukset	Tyyppi	Pituus
PK1-PK2	2x MCMK 3x240+120	30 m
R02-R03	AMCMK 3x185+57	8 m
R02-RIC5	2x AMCMK 3x240+72	50 m
VSK-RIC5.1	AMCMK 4x185+57	95 m
VSK-V02	AMCMK 4x185+57	20 m
VSK-TH01	AMCMK 4x185+57	190 m
V01-V02	Kisko AI 3x200x10	2 m

5.1 Kuormitettavuudet

Ensiksi selvitettiin kaapelien kuormitettavuudet eli selvitettiin kaapelien tyypit, asennusolosuhteet ja kuormitusvirta. Kuormitusvirraksi otettiin sulakkeen nimellisvirta, sillä se määrää kuormitusvirran varasyöttökaapelissa.

Kun kaapeleista on saatu tarvittavat tiedot, voidaan kuormitettavuudet määrittellä D1-2009-käsikirjan avulla.

Esimerkkinä varasyöttöyhteys Pasutto 1 ja Pasutto 2 pääkeskusten PK1 ja PK2 välillä. Varasyöttökaapeli on 2 x MCMK 3 x 240 + 120. Niillä on ne molemmat mukaan lukien noin neljä vastaavanlaista kaapelia ympärillään kaapelihyllyllä. Ympäröivä lämpötila on pahimmillaan noin 30 °C. D1-2009-käsikirjan taulukosta 52.1 saadaan yhden 240 mm² kuparijohtimen kuormitettavuudeksi hyllyasennuksella 456 A. 30 °C lämpötilasta saadaan kerroin 0,94 taulukosta 52.7 ja muista kaapeleista saadaan taulukosta 52.11 kerroin 0,77. Yhden kaapelin kuormitettavuudeksi saadaan kertoimien avulla:

$$0,94 * 0,77 * 456 A = 330 A.$$

Varasyöttöyhteys on kahdella kaapelilla, joten kerrotaan 330 A kahdella ja saadaan varasyöttöyhteyden kuormitettavuudeksi 660 A.

D1-2009:n taulukon 43.1 mukaan kaapelin ylikuormitussuojaksi soveltuu 500 A:n gG-sulake, sillä se vaatii, että kuormitettavuus on vähintään 552 A ja 630 A:n gG-sulake vaatii, että kuormitettavuus on vähintään 695 A.

Seuraavissa taulukoissa (taulukko 2 ja 3) on taulukoitu kaikki lasketut varasyöttöyh-teyksien kuormitettavuudet ja sopivat ylikuormitussuojasulakkeet. V01:n ja V02:n välisen kiskoston kuormitettavuus on laskettu ABB:n Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirjan taulukosta 19.2B.

TAULUKKO 2. Varasyöttökaapeleiden kuormitettavuudet

Keskukset	PK1-PK2	R02-R03	R02-RIC5	VSK-RIC5.1
Tyyppi	2x MCMK 3x240+120	AMCMK 3x185+57	2x AMCMK 3x240+72	AMCMK 4x185+57
Johdin	Cu 240	Al 185	Al 240	Al 185
Asennustapa	Hylly->E->456A	Uppo A-> 187 A	Hylly->E-> 350 A	Hylly ->E -> 297 A
Muut kaapelit	4 kpl->kerroin 0,77	0->kerroin 1	4 kpl->kerroin 0,77	5 kpl->kerroin 0,75
Lämpotila	30->kerroin 0,94	25->kerroin 1	30->kerroin 0,94	30->kerroin 0,94
Kuormitettavuus	660 A	187 A	507 A	209 A
Ylikuorm. Sulake	500/630 A gG	160 A gG	400 A gG	160 A gG

TAULUKKO 3. Varasyöttökaapeleiden kuormitettavuudet

Keskukset	VSK-V02	VSK-TH01	V01-V02
Tyyppi	AMCMK 4x185+57	AMCMK 4x185+57	Kisko Al 3x200x10
Johdin	Al 185	Al 185	Al 200
Asennustapa	Hylly -> E -> 297 A	Hylly -> E -> 297 A	
Muut kaapelit	3 kpl->kerroin 0,82	3 kpl->kerroin 0,82	
Lämpotila	30->kerroin 0,94	30->kerroin 0,94	25->kerroin 1
Kuormitettavuus	229 A	229 A	2550 A
Ylikuorm. Sulake	200 A gG	200 A gG	erotin 2500 A

Lasketut kuormitettavuudet täsmäävät aika hyvin nykyisten ylikuormitussulakkeiden kanssa. Ainoastaan PK1-PK2:n välinen kuormitettavuus on aivan rajalla voidaanko käyttää 500 A:n sulaketta, vai 630 A:n. Koska kyseessä on erittäin harvoin kuormitetuna oleva kaapeli, voidaan 630 A hyväksyä. R02-R03:n välinen kuormitettavuus ei riitä kuin 160 A sulaketta vastaavaksi, vaikka nykyinen sulake on 400 A.

5.2 Oikosulkuvirrat

Oikosulkuvirtoina on laskettu sekä yksi- että kolmevaiheiset oikosulkuvirrat. Taustatietoina laskennassa on muuntajien kilpiarvot ja Pöyry Oy:n vuonna 2007 Neplan-ohjelmalla lasketut tehdasalueen pääkeskuksien kolmevaiheiset oikosulkuvirrat. Kyseisten oikosulkuvirtojen pitäisi vastata nykypäivän tilannetta, joten tietoja voidaan pitää luotettavina. Ainoastaan pari muuntajaa on vaihdettu, joten niiden syöttämän pääkeskuksen oikosulkuvirta on laskettava uudestaan. Oikosulkuvirtojen vaihekulmia ei ole tiedossa, mutta niiden vaikutus oikosulkuvirran itseisarvoon on pieni. Vaihekulmalla määritetään vektorin suunta eli tässä tapauksessa jännitteen ja virran välinen vaihe-ero.

5.2.1 Kolmevaiheiset oikosulkuvirrat

Kolmevaiheisten oikosulkuvirtojen lähtötietona on käytetty Neplan-ohjelmalla laskettua pääkeskuksen kolmevaiheista oikosulkuvirtaa, jonka avulla on voitu laskea syöttävän verkon impedanssi. Kun tähän impedanssiin lisätään varasyöttökaapelin impedanssi, joka riippuu kaapelin pituudesta ja poikkipinnasta, saadaan laskettua kolmevaiheinen oikosulkuvirta varasyöttökaapelin päässä. Kiskostoja esimerkiksi muuntajan ja pääkeskuksen välillä ei tarvitse huomioida pienen impedanssin vuoksi. Minioikosulkuvirta saadaan 400 V:n jännitteellä kertoimella 0,95 ja maksimioikosulkuvirta kertoimella 1.

Lasketaan esimerkkinä kolmevaiheinen oikosulkuvirta keskuksien PK1 ja PK2 välillä. Oikosulkuvirta lasketaan varasyöttökaapelin päähän ja molemmista suunnista eli PK1:ltä PK2:lle ja päinvastoin. PK1:llä oikosulkuvirta 400 V pääkeskuksella on 30,7 kA. Tästä voidaan laskea syöttävän verkon impedanssi. Kaapelina on kaksinkertainen MCMK 3 x 240 + 120- kuparikaapeli. Kaapelin pituus on 30 m. Syöttävän verkon impedanssiksi saadaan kaavan 2 (s. 17) mukaan

$$Z_s = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_s} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 30700 \text{ A}} = 7,52 \text{ m}\Omega.$$

Oikosulkuvirta on samassa jänniteportaassa, joten impedanssia ei tarvitse redusoida. Muuntajan impedanssia ei tarvitse erikseen laskea, sillä se kuuluu tässä tapauksessa syöttävän verkon impedanssiin. Johdon impedanssi saadaan johtimen resistanssin ja

reaktanssin mukaan. MCMK 3 x 240 + 120:llä 240 mm² kuparijohtimen resistanssi +80 °C lämpötilassa on D1-2009:n taulukon 41.6 mukaan 0,095 Ω/km ja reaktanssi 0,079 Ω/km. Kaapelin pituus on 30 m, joten impedanssiksi saadaan

$$Z_J = R * l + jX * l = 0,095 \frac{\Omega}{km} * 0,03 km + j0,079 \frac{\Omega}{km} * 0,03 km = (0,00285 + j0,00237) \Omega.$$

(Rouvali 2010.)

Koska kaapeli on kaksinkertainen, johdon impedanssi likimain puolittuu, joten saatu johdon impedanssi kerrotaan 0,5:llä. Tällöin impedanssiksi saadaan

$$Z_J = 0,5 * (0,00285 + j0,00237) \Omega = (0,001425 + j0,001185) \Omega.$$

Nyt kaavan 4 (s. 18) mukaan voidaan laskea minimi- ja maksimioikosulkuvirta varasyöttökaapelin päässä, kun syötetään PK1:ltä PK2:lle.

$$E = 400 \angle 0^\circ \text{ V} / \sqrt{3} = 230,94 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$I_{k3max} = \frac{c * \bar{E}}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_J} = \frac{1 * 230,94 \text{ V}}{7,52 * 10^{-3} \Omega + (0,001425 + j0,001185) \Omega} = 25 594 \text{ A}.$$

Maksimioikosulkuvirran kulmaksi tuli n. -7°, mutta sillä ei ole merkitystä. Oikosulkuvirta on siis n. 25,6 kA.

$$I_{k3min} = \frac{c * \bar{E}}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_J} = \frac{0,95 * 230,94 \text{ V}}{7,52 * 10^{-3} \Omega + (0,001425 + j0,001185) \Omega} = 24 314 \text{ A}.$$

Minimioikosulkuvirta on n. 24,3 kA.

Laskettaessa varasyöttöyhteyden oikosulkuvirta, kun syötetään PK2:lta PK1:lle, syöttävän verkon impedanssi täytyy laskea PK2-keskuksen oikosulkuvirrasta. Johdon impedanssi on sama. Oikosulkuvirta PK2:lla on 33,2 kA. Syöttävän verkon impedanssiksi saadaan

$$Z_S = \frac{U_N}{\sqrt{3} * I_S} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} * 33200 \text{ A}} = 6,96 \text{ m}\Omega.$$

Maksimi- ja minimioikosulkuvirrat saadaan kaavan 4 (s. 18) mukaan

$$I_{k3max} = \frac{c \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_J} = \frac{1 \cdot 230,94 \text{ V}}{6,96 \cdot 10^{-3} \Omega + (0,001425 + j0,001185) \Omega} = 27300 \text{ A}$$

$$I_{k3min} = \frac{c \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_J} = \frac{0,95 \cdot 230,94 \text{ V}}{6,96 \cdot 10^{-3} \Omega + (0,001425 + j0,001185) \Omega} = 25900 \text{ A}$$

Eli siis PK1:ltä PK2:lle syötettäessä oikosulkuvirta on 24,3–25,6 kA ja PK2:lta PK1:lle syötettäessä oikosulkuvirta on 25,9–27,3 kA.

Seuraavassa taulukossa (taulukko 4) on koottu kolmevaiheiset oikosulkuvirrat eri varasyöttöyhteyksien välillä. Keskuksien V01 ja V02 väliselle varasyöttökiskolle ei laskettu oikosulkuvirtaa, sillä kiskoyhteys on lyhyt ja se ei vaikuta oikosulkuvirtaan. Laskenta oli muuten samanlainen kuten edellä olleessa esimerkissä, mutta koska RIC5.1 on RIC5:n alakeskus, sen kolmevaiheista oikosulkuvirtaa ei ollut Neplan-laskelmassa, vaan se täytyi laskea erikseen. Tiedettiin, että sen syöttökaapeli RIC5:ltä oli 2 x AMCMK 3 x 240 + 72 ja pituus oli 130 m. Tämän johdon impedanssin avulla ja keskuksen RIC5:n oikosulkuvirran avulla saatiin keskuksen RIC5.1 kolmevaiheiseksi oikosulkuvirraksi 11,4 kA.

TAULUKKO 4. Kolmevaiheiset oikosulkuvirrat

Syöttösuunta	3-v. oikos.virta keskuksessa	Kaapeli	Kaapelin pituus	3-v. oikos.virta johdon päässä	Nykyinen sulake
PK1->PK2	30,7 kA	2xMCMK 3x240+120	30 m	24,3–25,6 kA	630 A gG ok
PK2->PK1	33,2 kA	2xMCMK 3x240+120	30 m	25,9–27,3 kA	630 A gG ok
R02->R03	31,8 kA	AMCMK 3x185+57	8 m	24,5–25,8 kA	400 A gG ok
R03->R02	31,8 kA	AMCMK 3x185+57	8 m	24,5–25,8 kA	400 A gG ok
R02->RIC5	31,8 kA	2xAMCMK 3x240+72	50 m	19,1–20,1 kA	400 A gG ok
RIC5->R02	25,2 kA	2xAMCMK 3x240+72	50 m	16,4–17,2 kA	400 A gG ok
RIC5->R02 ->R03	17,28 kA (R02)	AMCMK 3x185+57	8 m	14,6–15,3 kA	400 A gG ok
V02->VSK	29,4 kA	AMCMK 4x185+57	20 m	18–19 kA	200 A gG ok
V02->VSK ->RIC5.1	19 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	95 m	6,7–7 kA	125 A gG ok
V02->VSK ->TH01	19 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	190 m	4,1–4,3 kA	125 A gG ok
RIC5.1->VSK	11,4 kA	AMCMK 4x185+57	95 m	5,4–5,7 kA	160 A gG ok
RIC5.1->VSK ->TH01	5,68 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	190 m	2,7–2,8 kA	125 A gG ok
RIC5.1->VSK ->V02	5,68 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	20 m	4,9–5,2 kA	125 A gG ok
TH01->VSK	29,7 kA	AMCMK 4x185+57	190 m	4,4–4,7 kA	200 A gG ok
TH01->VSK ->RIC5.1	4,66 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	95 m	3,1–3,3 kA	125 A gG ok
TH01->VSK ->V02	4,66 kA (VSK)	AMCMK 4x185+57	20 m	4,1–4,3 kA	125 A gG ok

Taulukossa näkyy varasyöttöyhteyden suunta, keskuksen oikosulkuvirta, kaapelin pituus, oikosulkuvirta johdon päässä (min-max) ja nykyinen sulake, joka suojaaa varasyöttökaapelia. VSK-keskuksen lähdoissä on aina 125 A:n gG-sulake, koska kyseessä on käytännössä välisulake. Oikosulkuvirrat olivat järjestään niin suuria, että sulakkeet kyllä toimivat oikein.

5.2.2 Yksivaiheiset oikosulkuvirrat

Yksivaiheisten oikosulkuvirtojen laskentaan tarvittiin kaapelien resistanssi- ja reaktanssi arvot +80 °C lämpötilassa. Lisäksi tarvittiin muuntajien kilpiarvot. Kaikki muuntajat ovat DYN-kytkentäisiä, 1 MVA:n tehoisia ja 10/0,4 kV:n tyyppisiä. Muuntajan

kilpiarvoja ovat näennäisteho S_N , suhteellinen oikosulkuimpedanssi Z_k %, kuormitus-häviöt P_k ja tyhjäkäyntihäviöt P_0 . Näistä pystytään laskemaan kaavassa 8 (s. 19) tarvittavat arvot. Lasketut arvot ovat suuntaa antavia, sillä tarkkoja ABB:n arvoja ei löytynyt. Arvot laskettiin käyttämällä kaavoja 17, 18, 19, 20 ja 21 (s. 22). Lisäksi muuntajan nolaresistanssi ja – reaktanssi laskettiin suuntaa antavasti edellä mainittujen kaavojen avulla, mutta arvo P_k korvattiin tyhjäkäyntiteholla P_0 . Toinen vaihtoehto olisi ollut käyttää muuntajan nolaresistanssin ja – reaktanssin arvoina muuntajan oikosulkuresistanssin ja – reaktanssin arvoja, sillä ne ovat likimain yhtä suuria. Sama huomio voidaan tehdä ABB:n taulukosta, jossa on 20/0,4 kV:n muuntajien tiedot. Mutta ero käyttikö muuntajan nolaresistanssin ja – reaktanssin arvoina kumpia hyvänsä, on todella pieni, vain muutaman prosentin luokkaa. Sitä paitsi kaava 9 (s. 19), jolla yksivaiheiset oikosulkuvirrat lasketaan, on suuntaa antava.

Muuntajan resistansseilla ja reaktansseilla on kuitenkin pienempi vaikutus yksivaiheiseen oikosulkuvirtaan, kuin johdon resistansseilla ja reaktansseilla. Muuntajan vaikutus pienenee sitä mukaa, kun johdon pituus kasvaa. Kiskostoja esimerkiksi muuntajan ja pääkeskuksen välillä ei tarvitse ottaa huomioon, koska kiskon impedanssi on todella pieni. Laskennassa saadut oikosulkuvirran arvot ovat minimiarvoja.

Esimerkkinä varasyöttöyhteys PK1-PK2. Yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan molemmista suunnista. Kun lasketaan yksivaiheista oikosulkuvirtaa PK1:ltä PK2:lle, tarvitaan keskusta PK1 syöttävän muuntajan tiedot. Kyseisen muuntajan kilpiarvot ovat $S = 1\ 000\ \text{kVA}$, $Z_k\ \% = 5,9\ \%$, $P_k = 10\ 200\ \text{W}$ ja $P_0 = 1\ 220\ \text{W}$.

Kilpiarvoista voidaan laskea oikosulkuimpedanssi Z_k kaavan 17 (s. 22) avulla.

$$Z_k = \frac{z_k\ \%}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{5,9}{100} * \frac{(400\ \text{V})^2}{1\ 000\ 000\ \text{VA}} = 0,00944\ \Omega = 9,44\ \text{m}\Omega.$$

Kaavojen 18 ja 19 avulla voidaan laskea muuntajan oikosulkuresistanssi R_k .

$$R_k = \frac{P_k}{S_N} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{10\ 200\ \text{W}}{1\ 000\ 000\ \text{VA}} * \frac{(400\ \text{V})^2}{1\ 000\ 000\ \text{VA}} = 0,001632\ \Omega = 1,632\ \text{m}\Omega.$$

Nyt kaavan 21 avulla saadaan laskettua muuntajan oikosulkureaktanssi X_k .

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(0,00944\ \Omega)^2 - (0,001632\ \Omega)^2} = 0,009298\ \Omega = 9,298\ \text{m}\Omega.$$

Nyt lasketaan likimääräiset muuntajan nolaresistanssi ja -reaktanssi kaavoilla 17, 19 ja 21. $Z_0\ \%$ arvioidaan likimain yhtä suureksi kuin $Z_k\ \%$.

$$Z_0 = \frac{z_0 \%}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{5,9}{100} * \frac{(400 V)^2}{1\ 000\ 000 VA} = 0,00944 \Omega = 9,44 m\Omega.$$

Kaavojen 18 ja 19 avulla voidaan laskea muuntajan nolaresistanssi R_{m0} .

$$R_{m0} = \frac{P_0}{S_N} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{1\ 220 W}{1\ 000\ 000 VA} * \frac{(400 V)^2}{1\ 000\ 000 VA} = 0,000195 \Omega = 0,195 m\Omega.$$

Nyt kaavan 21 avulla saadaan laskettua muuntajan oikosulkureaktanssi X_{m0} .

$$X_{m0} = \sqrt{Z_0^2 - R_{m0}^2} = \sqrt{(0,00944 \Omega)^2 - (0,000195 \Omega)^2} = 0,009438 \Omega = 9,438 m\Omega.$$

Saaduilla arvoilla voidaan laskea kaavaa 9 (s. 19) käyttäen yksivaiheinen oikosulkuvirta johdon päässä. Johdon pituus on 30 metriä ja johdon resistanssi- ja reaktanssi arvot on otettu D1-2009-käsikirjan taulukosta 41.6 +80 °C lämpötilassa. Lisäksi kaapelin resistanssin ja reaktanssin arvot on puolitettu, koska kaapeli on kaksinkertainen.

$$I_{k1} = \frac{0,95 * 3 * U_V}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3L(R_v + R_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + L(2X_v + X_{v0} + 3X_0))^2}} = \frac{0,95 * 3 * 230,94}{\sqrt{(2 * 0,001632 + 0,000195 + 3 * 0,03 * (0,0475 + 0,0975))^2 + (2 * 0,009298 + 0,009438 + 0,03 * (2 * 0,04 + 0,04 + 3 * 0))^2}} A = 18\ 445 A.$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta on siis 18 445 A, kun syötetään PK1:ltä PK2:lle. Sulake varasyöttökaapelilla on 630 A gG. Kyseinen sulake vaatii D1-2009-käsikirjan taulukon 41.5 mukaan vähintään 5 100 A oikosulkuvirran, jotta 5,0 s poiskytkentäaika toteutuisi. Tämän perusteella syötön poiskytkentä toimii oikosulkutilanteessa oikein.

Kun lasketaan sama toisinpäin eli PK2:lta PK1:lle, tarvitaan tietää PK2:sta syöttävän muuntajan kilpiarvot. Kilpiarvot ovat $S = 1\ 000$ kVA, $Z_k \% = 5,9$ %, $P_k = 10\ 400$ W ja $P_0 = 1\ 200$ W. Muuntajan kilpiarvot ovat lähes identtiset T07-muuntajan kanssa, joten tulos ei paljoa eroa edellä saadusta 18 445 A:sta.

Kilpiarvoista voidaan laskea oikosulkuimpedanssi Z_k kaavan 17 (s. 22) avulla.

$$Z_k = \frac{z_k \%}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{5,9}{100} * \frac{(400 V)^2}{1\ 000\ 000 VA} = 0,00944 \Omega = 9,44 m\Omega.$$

Kaavojen 18 ja 19 (s. 22) avulla voidaan laskea muuntajan oikosulkuresistanssi R_k .

$$R_k = \frac{P_k}{S_N} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{10\ 400 W}{1\ 000\ 000 VA} * \frac{(400 V)^2}{1\ 000\ 000 VA} = 0,001664 \Omega = 1,664 m\Omega.$$

Nyt kaavan 21 (s. 22) avulla saadaan laskettua muuntajan oikosulkureaktanssi X_k .

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(0,00944 \Omega)^2 - (0,001664 \Omega)^2} = 0,009292 \Omega = 9,292 \text{ m}\Omega.$$

Nyt lasketaan likimääräiset muuntajan nolaresistanssi ja -reaktanssi kaavoilla 17, 19 ja 21. Z_0 % arvioidaan likimain yhtä suureksi kuin Z_k %.

$$Z_0 = \frac{z_0 \%}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{5,9}{100} * \frac{(400 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 0,00944 \Omega = 9,44 \text{ m}\Omega.$$

Kaavojen 18 ja 19 avulla voidaan laskea muuntajan nolaresistanssi R_{m0} .

$$R_{m0} = \frac{P_0}{S_N} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{1\,200 \text{ W}}{1\,000\,000 \text{ VA}} * \frac{(400 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 0,000192 \Omega = 0,192 \text{ m}\Omega.$$

Nyt kaavan 21 avulla saadaan laskettua muuntajan oikosulkureaktanssi X_{m0} .

$$X_{m0} = \sqrt{Z_0^2 - R_{m0}^2} = \sqrt{(0,00944 \Omega)^2 - (0,000192 \Omega)^2} = 0,009438 \Omega = 9,438 \text{ m}\Omega.$$

Saaduilla arvoilla voidaan laskea kaavaa 9 (s. 19) käyttäen yksivaiheinen oikosulkuvirta johdon päässä. johdon arvot ovat samat kuin edellä.

$$I_{k1} = \frac{0,95 * 3 * U_V}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3L(R_v + R_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + L(2X_v + X_{v0} + 3X_0))^2}} = \frac{0,95 * 3 * 230,94}{\sqrt{(2 * 0,001664 + 0,000192 + 3 * 0,03 * (0,0475 + 0,0975))^2 + (2 * 0,009292 + 0,009438 + 0,03 * (2 * 0,04 + 0,04 + 3 * 0))^2}} \text{ A} = 18\,436 \text{ A}.$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta on siis likimain sama riippumatta syöttösuunnasta, koska muuntajat ovat lähes identtisiä. Sama ilmiö toistuu myös muilla varasyöttöyhteyksillä. Taulukkoon 5 on koottu muiden varasyöttöyhteyksien yksivaiheiset oikosulkuvirrat. Laskenta on täysin samanlaista, mutta RIC5.1:ltä laskettaessa pitää huomioida myös RIC5.1:tä syöttävä kaapeli, joka tulee RI5:ltä. Kaapeli on siis 130 metrinen ja kaksinkertainen AMCMK 3 x 240 + 72. Tässä tapauksessa, kun mukana on useampi kaapeli, niin johtojen arvot lisätään kaavassa juuren alle, toisiin johtojen arvoihin erikseen.

TAULUKKO 5. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat

Syöttösuunta	1-v. oikos.virta johdon päässä	Nykyinen Sulake	Vaadittu pienin oikosulkuvirta 5,0 s poiskytkentäajalle	5,0 s poiskytkentä
PK1->PK2	18 445 A	630 A gG	5 100 A	OK
PK2->PK1	18 436 A	630 A gG	5 100 A	OK
R02->R03	18 465 A	400 A gG	2 840 A	OK
R03->R02	18 465 A	400 A gG	2 840 A	OK
R02->RIC5	13 785 A	400 A gG	2 840 A	OK
RIC5->R02	13 688 A	400 A gG	2 840 A	OK
RIC5->R02->R03	10 616 A	400 A gG	2 840 A	OK
V02->VSK	11 848 A	200 A gG	1 250 A	OK
V02->VSK->RIC5.1	2 659 A	125 A gG	715 A	OK
V02->VSK->TH01	1 480 A	125 A gG	715 A	OK
RIC5.1->VSK	2 774 A	160 A gG	950 A	OK
RIC5.1->VSK->TH01	1 042 A	125 A gG	715 A	OK
RIC5.1->VSK->V02	2 363 A	125 A gG	715 A	OK
TH01->VSK	1 633 A	200 A gG	1 250 A	OK
TH01->VSK->RIC5.1	1 096 A	125 A gG	715 A	OK
TH01->VSK->V02	1 480 A	125 A gG	715 A	OK

D1-2009-käsikirjan taulukon 41.5 mukaan sulakkeilla toteutuu viiden sekunnin poiskytkentäaika oikosulkutilanteessa.

5.3 Jännitteenalenemat

Jännitteenalenemat laskettiin varasyöttöyhteyksille eri tilanteissa. Tätä varten mitattiin keskuksista todelliset tehonkulutukset, virrat ja tehokertoimet. Jännitteenalenemat laskettiin kaavan 11 (s. 20) avulla, ja laskelmissa käytettiin mitattua $\cos \varphi$, eli tehokertoimen arvoa. Huomioon on otettava se, että todellisessa varasyöttötilanteessa tehokerroin voi olla eri kuin normaalissa kuormituksessa, sillä siinä tapauksessa mukana on vähemmän induktiivista ja kapasitiivista loistehoa. Varasyöttötilanteessa vain valaistus, pistorasiat ja välttämättömimmät laitteet ovat käytössä. Näin lasketut jännitteen alenemat ovat kuitenkin suurimmat mahdolliset, mitä johdolla voi olla.

Kuormitusvirtana käytettiin maksimivirtaa, joka tässä tapauksessa on sulakkeen nimellisarvo. Näin saadaan maksimi jännitteen alenema. Jännitteen alenemissa käytet-

tiin johtimen +40 °C:n lämpötilaa vastaavia resistansseja ja reaktansseja. Jännitteen alenema laskettiin yhtä vaihetta kohti.

Esimerkkinä PK1-PK2, jossa PK1 syöttää PK2:ta. PK2:n eli kuormituksen $\cos \varphi$ on 0,9. Kuormitusvirta on 630 A ja kulma φ on 25,84°. Koska kaapeli on kaksinkertainen, sen resistanssi ja reaktanssi on likimain puolet yksinkertaiseen verrattuna. Jännitteenalenema saadaan kaavalla 11 (s. 20).

$$\begin{aligned}
 U_a &= I * \cos\varphi * r * l + I * \sin\varphi * x * l \\
 &= 630 \text{ A} * 0,9 * 0,5 * 0,087 \frac{\Omega}{\text{km}} * 0,03 \text{ km} + 630 \text{ A} * \sin 25,84^\circ * 0,5 * 0,072 \frac{\Omega}{\text{km}} * \\
 &0,03 \text{ km} \\
 &= 1,04 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Jännitteenalenema on siis vain 1,05 V yhtä vaihetta kohti mikä tarkoittaa kaavan 12 (s. 21) mukaan suhteellista jännitteen alenemaa:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% = \frac{1,04 \text{ V}}{230 \text{ V}} * 100 \% = 0,45 \%.$$

Verkostosuosituksen SA2:08 mukaan normaalilaatuisessa pienjännitejaka-
lussa jännitteenalenema on $\pm 10 \%$, joten tilanne on hyvä.

Seuraavassa taulukossa 6 on esitetty laskettuina kaikkien varasyöttöjen johdolla ta-
pahtuvat jännitteenalenemat. Johtimien arvot ovat peräisin verkostosuositus SA2:08
liitteestä 3 olevasta taulukosta.

TAULUKKO 6. Jännitteenalenemat

Syöttösuunta	Cos fii	Virta	Jännitteen alenema	Suht. Jännitteen alenema
PK1->PK2	0,9	630 A	1,04 V	0,45 %
PK2->PK1	0,86	630 A	1,05 V	0,46 %
R02->R03	0,82	400 A	0,61 V	0,27 %
R02->RIC5	0,9	400 A	1,57 V	0,68 %
RIC5->R02	0,88	400 A	1,57 V	0,68 %
RIC5->R02->R03	0,82	400 A	2,17 V	0,94 %
V02->VSK->RIC5.1	0,92	160 A	3,58 V	1,55 %
V02->VSK->TH01	0,65	200 A	7,24 V	3,15 %
RIC5.1->VSK->TH01	0,65	160 A	9,17 V	4,00 %
RIC5.1->VSK->V02	0,76	160 A	3,54 V	1,54 %
TH01->VSK->RIC5.1	0,92	160 A	8,88 V	3,90 %
TH01->VSK->V02	0,76	200 A	7,74 V	3,30 %

Laskettujen jännitteenalenemien perusteella johdon laatu on jopa korkeassa laadussa, jossa jännitteenalenema saa olla ± 4 %. Lisäksi ollaan myös lähellä teollisuuden suosittamaa 3 %:a.

5.4 Muuntajien kuormitus varasyöttötilanteessa

Tämän jälkeen laskettiin myös kuinka paljon muuntajan kuormittuvat, kun ne syöttävät myös toista pääkeskusta varasyöttöyhteyden kautta. Laskennassa käytettiin mitattuja normaalikuormituksen arvoja. Tehokerrointa on vaikea arvioida varasyöttötilanteessa, mutta koska tällöin käytössä on käytännössä vain valaistus- ja pistorasakuormaa, tehokertoimena syötettävässä keskuksessa on käytetty 0,9:ää.

Laskenta on suoritettu siten, että syöttävän keskuksen $\cos \varphi$ on normaalikuormituksella mitattu arvo ja varasyötettävän keskuksen $\cos \varphi$ on 0,9. Laskennat on laskettu kaavoilla 14, 15 ja 16 (s. 21–22). Tulokset on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Muuntajien kuormitukset varasyöttötilanteessa

Syöttöväli ja muuntaja	Muuntajan S _N /kVA	Laskettu S varasyöttötilanteessa
PK1-> PK2 T07	1 000 kVA	1 255 kVA
PK2-> PK1 T08	1 000 kVA	1 174 kVA
R02+R03->RIC5 T10	1 000 kVA	1 523 kVA
RIC5-> R02 T12	1 000 kVA	459 kVA
RIC5-> R02-> R03 T12	1 000 kVA	736 kVA
V02-> VSK-> RIC5.1 T03	1 000 kVA	227 kVA
V02-> VSK-> TH01 T03	1 000 kVA	254 kVA
RIC5.1-> VSK-> TH01 T12	1 000 kVA	289 kVA
RIC5.1-> VSK-> V02 T12	1 000 kVA	289 kVA
TH01-> VSK-> RIC5.1 T22	1 000 kVA	469 kVA
TH01-> VSK-> V02 T22	1 000 kVA	496 kVA
V01->V02 T02	1 000 kVA	836 kVA
V02->V01 T03	1 000 kVA	393 kVA

Laskennan perusteella keskuksen ollessa normaalikuormituksella ja syöttäessä varasyötön kautta toista keskusta yhteyden maksimikuormitettavuudella muuntajat T07 ja T08 ylikuormittuisivat. Tämä johtuu siitä, että molemmissa keskuksissa PK1 ja PK2 oli mitattaessa todella suuri kuormitus. Myös muuntaja T10 ylikuormittuisi varasyöttötilanteessa, ja se on itse asiassa ylikuormassa jo syöttäessään pelkästään sen omia alakeskuksia R02:ta ja R03:a. Asiaan on tulossa muutos, sillä kyseinen T10-muuntaja aiotaan vaihtaa. Jos todellisuudessa tulisi tilanne, jolloin varasyöttöä tarvitaan, olisi tehtaan prosessi hyvin todennäköisesti alhaalla ja kuormitus ei enää olisi noin suurta syöttävässä keskuksessa. Muut muuntajat jäävät selvästi nimellistehon 1 000 kVA alle, joten kaiken kaikkiaan tilanne on hyvä.

5.5 Yhteenveto

Alkuselvityksen perusteella nykyiset varasyöttöyhteydet ovat kunnossa paria asiaa lukuun ottamatta. Yksi asia, joka vaatii huomiota, on keskuksien R02-R03 välinen AMCMK 3 x 185 + 57 kaapeli. Kaapelin pituus on 8 metriä ja se sijaitsee sähkötilassa. Kaapeli kulkee keskuksista toiseen lattian alla, eli käytännössä uppona, jolloin sen kuormitettavuus on vain 187 A. Kaapelilla on ylikuormitussuojana 400 A gG-sulake, joka vaatii kuormitettavuudeksi 441 A. Ratkaisu voisi olla, että sulakekoko pienennetään kokoon 160 A. Toinen ratkaisu voisi olla kaapelin tuplaaminen, jolloin

sen kuormitettavuus olisi n. 370 A, mikä mahdollistaisi 315 A gG-sulakkeen ylikuormitussuojaksi.

Toinen asia on PK1:n ja PK2:n välinen varasyöttöyhteys, jossa ylikuormitussuojana on 630 A:n gG-sulake, vaikka kuormitettavuus sallisi 500 A:n sulakkeen. Tilanne on kuitenkin paljolti kiinni laskentatavasta, sillä kuormitettavuus jää vain muutamasta kymmenestä ampeerista kiinni. Tässä laskennassa kuormitettavuus on laskettu varman päälle.

VSK-keskuksessa kaikkien lähtöjen kohdalla on 125 A:n sulakkeet ja niiden kaapeleiden toisessa päässä on 160, tai 200 A. Tämä siksi, koska oikosulkuvirta on pienempi VSK-keskukselta eteenpäin syöttäessä. Maksimi sulakkeet VSK:n lähdoissä voisivat olla yksivaiheisten oikosulkuvirtojen perusteella VSK-RIC5.1:llä 160 A, VSK-TH01:llä 200 A ja VSK-V02:lla 200 A. Ainoastaan jos RIC5.1:ltä syötetään TH01:lle, mikä on epätodennäköistä, niin silloin VSK-TH01 on oltava 160 A. Selektiivisyys voi kuitenkin kärsiä, jos sulakekoot ovat peräkkäisiä.

Kaiken kaikkiaan kyseessä on varasyöttökaapeleita, jotka ovat harvoin kuormitettui-
na. Niitä ei kannata ylimitoitaa, koska ne kestävät hieman ylikuormitusta. Laskento-
jen perusteella myös muuntajat sallivat suurtenkin kuormien varasyöttämisen, eivätkä
ylikuormitu.

Pääkeskuksista mitattiin normaalikuormitustilanteessa tehot, virrat ja jännitteet. Ny-
kyisten varasyöttöyhteyksien kuormitettavuuksien perusteella RIC5.1:ä, RIC5:ä ja
V02:a voidaan kuormittaa varasyötöllä täysin, sillä normaalikuormituksen aikainen
virta on pienempi kuin keskuksen varasyöttökaapelin kuormitettavuus. Myös V01-V02
välisellä varasyöttökiskolla voidaan kuormittaa molempia täysin. Muiden keskuksien
normaalikuormituksen aikaiset virrat olivat niin suuria, että varasyöttökaapelilla voi-
daan syöttää keskusta vain tärkeimpien toimintojen osalta.

Varasyöttöyhteyksien tärkeys on taata sähkönsaanti tärkeille sovelluksille. PK1-PK2
välisellä yhteydellä turvataan pasuttojen valaistusta, pistorasioita ja lämpösaattoja.
R02-R03-RIC5 välisellä yhteydellä turvataan rikkihappotehtaan valaistusta, pistorasi-
oita, kattoimureja, lämpösaattoja ja ilmastointia. VSK-keskuksen kautta turvataan
valaistusta ja pistorasioita pasutto 3:lla, voimalaitoksella ja typpihappotehtaalla. Ny-
kyisillä kuormitettavuuksilla nuo pystytään turvaamaan.

Lisäksi alueella on kaksi 690 V keskusta, joiden välillä ei ole varasyöttöyhteyttä. Tähän tulisi kiinnittää huomiota, sillä voi olla tilanteita, jolloin sähkönsyöttö on hyvä olla turvattu myös näiden keskusten välillä. Keskusten väliin olisi suhteellisen helppo laittaa varasyöttöyhteys. Keskuksissa on prosessiin liittyviä laitteita, jotka eivät toisaalta ole käytössä, jos prosessi on keskeytynyt muualta johtuvasta tekijästä. Alueella on myös muita pienempiä keskuksia, joiden toiminta sähkönjakelun häiriintyessä olisi turvattava, esimerkiksi kiisun purku, jossa rikkikiisua puretaan siiloihin. Tässä tapauksessa pysyvä varasyöttöyhteys tulisi niin kalliiksi, että helpompi ja halvempi tapa on vetää kumikaapelilla tilapäinen syöttö lähimmältä keskukselta kiisun purkuun.

Tämän jälkeen tehtaan 400 V pienjännitejakeluun liittyvät jakelukaaviot ja varasyöttökaavio päivitettiin ajan tasalle Yaralla Siilinjärvellä AutoCad-ohjelmalla. Kuviin päivitettiin VSK-keskus ja sen yhteydet. Lisäksi piirustuksissa oli joitakin puutteita alakeskusten nimissä ja joissakin keskusten tiedoissa, kuten sulakkeissa, katkaisijoissa ja nimellisarvoissa ja joitakin keskuksia oli poistettu. Nämä kaikki päivitettiin ajan tasalle.

6 ALUEEN PIENJÄNNITEVERKON KEHITTÄMINEN

Seuraavaksi opinnäytetyössä suunniteltiin uusia varasyöttöyhteyksiä ja muita pjakeluyhteyksiä toimeksiantajan toiveesta. Näitä olivat RIC5.1:n ja VSK:n välisen varasyöttöyhteyden parannus, varasyöttöyhteyden järjestäminen rannalla sijaitsevalle näytteenottorakennukselle, sataman syötön vaihto toisesta paikasta ja saniteettivesipuhdistamon varasyötön suunnittelu. Jokaiseen kohtaan tulee mitoittaa johtimet ja suojaus. Lisäksi tulee laskea jännitteen alenemat ja lopuksi kustannusarviot. Kustannusarvioita laskettaessa on käytetty materiaalihintoina netistä löytyviä yksikköhintoja. Suuntaa antavina hintoina on käytetty Ecu-sähkö Oy:n verkkokaupasta löytyviä. Työn kustannuksia laskettaessa on käytetty suunnittelulle 55 €/h, työlle 50 €/h ja telinetille 50€/h. Lisäksi henkilönostin kulut ovat noin 120 €/päivä. Kyseiset yksikköhinnat on saatu Yaralta. Liitteessä 1 on kaapelikartta jossa näkyy suunnitellut kaapelija johtoreitit sataman syötölle, näytteenottorakennuksen varasyötölle ja saniteettivesilaitoksen syötölle. Oikosulkuvirtoja käytiin myös mittaamassa näytteenottorakennuksen varasyötöksi suunnitellusta AMKA-linjasta.

6.1 Varasyöttöyhteys RIC5.1-VSK

Kyseinen varasyöttöyhteys on toteutettu AMCMK 4 x 185 + 57 kaapelilla ja sillä on pienin kuormitettavuus verrattuna muihin VSK-keskuksen kautta kulkeviin varasyöttöyhteyksiin. Kaapelia voidaan kuormittaa 160 A, kun muita voi 200 A. Tähän yksi ratkaisu on tuplata olemassa oleva kaapeli.

Kuormitettavuuden laskennassa tulee ottaa huomioon, että viereisten kaapelien lukumäärä kasvaa yhdellä, joka saa kertoimen 0,73, 0,75 sijaan. Tällöin taulukon 2 mukaan kuormitettavuus yhdelle kaapelille on 203,8 A. Koska kaapeleita on nyt kaksi kappaletta, niin kerrotaan saatu arvo kahdella. Kuormitettavuus on nyt 407,6 A. Tämä mahdollistaa 315 A:n gG sulakkeen käytön kaapelilla, mutta VSK-keskuksen kiskoston nimellisvirta on 250 A, mikä tulee rajoittamaan varasyöttökaapelin sulakkeen ja kuormitusvirran myös 250 A:iin.

Oikosulkulaskelmissa RIC5.1 ja VSK välisen johtimen impedanssit puolitettiin, koska kaapeli tuplattiin. Tämä nosti oikosulkuvirtojen arvoja. Kolme- ja yksivaiheiset oikosulkuvirrat on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Oikosulkuvirrat PAS3-VSK

Syöttösuunta	3-v. oikos.virta	1-v. oikos.virta
RIC5.1->VSK	7,2–7,6 kA	4,7 kA
V02->RIC5.1	9,8–10,3 kA	4,4 kA
TH01->RIC5.1	3,7–3,9 kA	1,3 kA

Kaapelin kuormitettavuuden mukaan kaapelille käy 250 A:n sulake, joka vaatii toimia-
kseen, pienimmän oikosulkuvirran olevan 1 650 A. Tämä ehto toteutuu välillä
RIC5.1-VSK. Johtoa suojaavat sulakkeet voisivat siis olla 250 A johdon molemmissa
päissä.

Jännitteenalenemat olivat kunnossa jo ennen tuplaamista, mutta jännitteenalenema
puolittuu johtovälillä, koska impedanssi puolittuu johdon kaksinkertaistuesssa. Jännit-
teenalenema välillä RIC5.1-VSK on 1,45 V ja suhteellinen jännitteenalenema on 0,63
%.

Kustannusarvioita laskettaessa on otettava huomioon suunnittelun ja työn lisäksi
myös telinetyöt ja nostinkulut. Kaapelireitti kulkee kahden tehdasrakennuksen välissä
putkisillalla, joten telineitä on rakennettava ainakin neljään paikkaan ja lisäksi käytet-
tävä henkilönostinta. Kaapelia menee noin 100 metriä AMCMK 4 x 185 + 57, jolle
laskettiin yksikköhinnalla arvoksi noin 4 000 €. Lisäksi muihin tarvikkeisiin menee
noin 200 €. Työn kustannuksiin laskettiin 16 h suunnittelua, 4 * 16 h asennusta, 4 *
12 telinetöitä ja 2 päivää henkilönostimen vuokraa. Kokonaiskustannuksiksi jää noin
11 000 €.

Kyseinen kaapelin vahvistaminen lisää kapasiteettia varasyöttöyhteyteen, sillä kuor-
mitettavuus kasvaa 209 A:sta 407 A:iin. Sulakekoko voidaan siis kasvattaa 160 A:sta
315 A:iin. VSK-keskuksen kiskosto rajoittaa kuormitusvirraksi 250 A. Lisäksi jatkuva
kuormitusvirta on muissa VSK-keskuksen kaapeleissa 200 A. Varasyöttöyhteyden
ollessa kyseessä, pystyy kaapeleita kuormittamaan myös hieman enemmän, koska
jatkovaa kuormitusta ei ole.

6.2 Sataman syötön siirto

Tehdasalueen sataman nykyinen syöttö tulee rantapumppaamolta noin puolen kilometrin päästä AMKA-linjaa pitkin. Johtimena on käytetty AMKA 3 x 25 + 35 suurimman osan matkasta. Sulakkeena on 100 A gG sulake. Tarkoituksena on ottaa syöttö satamalle sataman lähellä kulkevasta toisesta AMKA-linjasta, joka lähtee ammoniakiasemalta keskukselta AM01. Kyseinen lähtö AM01-07F syöttää edustussaunatiloja, jossa kuormitus on vähäistä. Johtimena on AMKA 3 x 120 + 95 ja sen pituus on noin 700 m. Pääsulakkeena on 160 A gG sulake. Sataman syöttö on tarkoitus ottaa sataman ja edustussaunan risteyksen kohdalta, johon on ammoniakiasemalta matkaa noin 400 m. Suunnitelmana on laittaa tähän kohti välisulakkeet ja ottaa sataman syöttö siitä AMKA 3 x 25 + 35-johdolla. Risteyksestä on matkaa satamaan noin 200 m.

Tämä lyhentää matkaa merkittävästi ja jännitteen alenema pienenee, koska välissä on nyt paksumpi johto. Satamassa kuormitus on hyvin vähäistä, joten nykyinen pääsulake 100 A on liiankin iso. Vanha syöttö katkaistaan rannalla olevan näytteenottorakennuksen kohdalle ja sitä käytetään myöhemmin näytteenottorakennuksen varasyöttönä.

Kaiken kaikkiaan sataman syöttö koostuisi 20 metristä AMCMK 3 x 120 + 41, 400 metristä AMKA 3 x 120 + 95 ja 200 metristä AMKA 3 x 25 + 35.

Kuormitettavuus määräytyy heikoimman kuormitettavuuden mukaan, eli tässä tapauksessa AMKA 3 x 25 + 35 mukaan. D1-2009:n taulukon 52.1 mukaan laskettaessa kuormitettavuudeksi saadaan 25 mm² alumiiniselle ilmajohtolle 83 A. Verkostosuosituksen SA2:08 taulukon 8 mukaan, AMKA 3 x 25 + 35 kuormitettavuus on 90 A. Tämä mahdollistaa sille ylikuormitussuojaksi 80 A sulakkeen maksimissaan.

Oikosulkuvirrat on laskettu kaavojen 4 ja 9 (s. 18–19) mukaan johdinlämpötilojen ollessa +80 °C. Oikosulkuvirtoja laskettaessa huomioon on otettu kaikki johdot ammoniakiasemalta satamalle asti. Kolmevaiheinen oikosulkuvirta keskuksella AM01 on 27,9 kA. Oikosulkuvirrat on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Sataman oikosulkuvirrat

Johtoväli	Johto	Pituus	3-v.oikos.virta	1-v.oikos.virta
AM01-risteys	AMKA 3x120+95	400 m	1,36–1,43 kA	700 A
risteys-satama	AMKA 3x25+35	200 m	480–500 A	265 A

Risteyksen kohdalle lisätään välisulake ja liitetään satamaan menevä AMKA 3 x 25 + 35 ammoniakiasemalta tulevaan AMKA 3 x 120 + 95 linjaan. AM01-07F lähdössä oleva 160 A:n gG-sulake toimii risteykseen saakka ylikuormitus- ja oikosulkusuojana. Välisulakkeeksi satamaan käy ylikuormitus- ja oikosulkusuojaksi 50 A. 50 A:n gG sulake vaatii pienimmäksi yksivaiheiseksi oikosulkuvirraksi 250 A, jotta 5,0 s poiskytkentäaika täyttyy.

Jännitteenalenema on laskettu kaavoilla 11 ja 12 (s. 20–21), johdinten +40 °C lämpötilassa, kuormitusvirran ollessa maksimi 50 A ja tehokertoimen ollessa mitattu 0,97. Tällöin yhteenlasketuksi jännitteenalenemaksi saadaan johdoilla vaihetta kohden 18,9 V ja suhteelliseksi jännitteenalenemaksi noin 8,2 %, mikä on vielä normaalin sähkönjakelulaadun puitteissa.

Kustannusarvioita laskettaessa otetaan huomioon, että koko työ tehdään ilmajohtoil- le, joten henkilönostinta tarvitaan, mutta telineitä ei tarvita. Lisäksi työtä helpottaa se, että sataman risteyksestä menee valmiit ilmajohtopylväät satamaan asti. Lisäpylväitä ei todennäköisesti tarvita lisää. Johdolle AMKA 3 x 25 + 35, jota tulee noin 200 metriä ja muille tarvikkeille arvioidaan kuluja noin 1 500 €. Suunnitteluun arvioidaan kuluvan 12 h, asennukseen 4 * 20 h ja henkilönostinta tarvitaan maksimissaan viisi päivää. Tällöin kokonaiskustannuksiksi arvioidaan noin 6 700€.

Kokonaisuutena sataman syötön siirto on suositeltavaa, koska tällöin saadaan syötöpaikka lähemmäksi, johtopituudet lyhemmiksi ja jännitteen alenemat pienemmiksi. Lisäksi poiskytkentäajat toteutuvat pienimmilläänkin oikosulkuvirroilla. Liitteessä 2 on jakelukaavio, jossa näkyy suunniteltu sataman syöttö.

6.3 Varasyöttö näytteenottorakennukselle

Näytteenottorakennus sijaitsee rannalla ja sillä on tärkeä rooli ympäristöasioissa. Siellä mitataan järveen pääviemäriin kautta palaavan veden johtavuutta. Näytteenot-

torakennuksen jakokeskuksen KS01-1-2 nimellisvirta 63 A ja sen syöttö tulee saniteettivesilaitokselta. KS01-1-2 on siis KS01:n alakeskus. Varassyöttöä suunniteltaessa helpoin vaihtoehto toteutukseen on ottaa varasyöttö vanhasta sataman syöttölinjasta. Edellä mainitussa kohdassa sataman syöttö siirrettäisiin toisaalle, niin sen vanha syöttölinja jää vapaaksi ja se kulkee aivan näytteenottorakennuksen vierestä. Syöttölinjan lähtö on PU02-e21 ja sen pääsulake on 100 A ja linja lähtee rantapumppaamolta ensin MCMK 3 x 35 + 16 kaapelilla pumppaamon sisällä. Kaapelilla on pituutta noin 35 m ja sen välillä on yksi pistorasiakeskus. Rantapumppaamon seinästä linja jatkuu noin 110 metriä AMKA 3 x 70 + 95 ja sen jälkeen 150 m AMKA 3 x 25 + 35. Tässä kohden on yksi pistorasiakeskus ja siitä eteenpäin on noin 100 m matkaa näytteenottorakennukselle. Tähän AMKA-linja laitetaan poikki ja jäljelle jäävä noin 250 m satamaan päin jää pois.

Ilmajohtopylväältä näytteenottorakennukseen on noin 30 metrin matka, jolle voisi laittaa MCMK 3 x 25 + 16 maa-asennuksena. Välisulake on myös sijoitettava jonkin kohti. Varassyöttö kytketään keskuksen KS01-1-2 keskuksen luo sijoitettavasta kytkimestä.

Jos sähkönsaanti on turvattu varasyötöllä jo KS01:lle, niin se syöttää poikkeustilanteessa myös alakeskusta KS01-1-2. Varassyöttö pelkästään KS01-1-2:lle on tarpeellinen vain silloin, jos pääsyötölle johtovälillä KS01-KS01-1-2 tapahtuu jotain. Johto on AMCMK 4 x 120 + 41 ja se on 300 metriä pitkä ja se voi olla alttiina vioille.

Kuormitettavuuden määrittää tässä tapauksessa ohuimmat johdot eli AMKA 3 x 25 + 35 tai MCMK 3 x 25 + 16. AMKA 3 x 25 + 35:lle saadaan SA2:08:n mukaan kuormitettavuudeksi 90 A. MCMK 3 x 25 + 16:lle saadaan maa-asennuksella D1-2009-käsikirjan taulukon 52.1 mukaan 130 A. Lämpötilan ollessa noin 25 °C ja muiden kaapelien poissa ollessa kuormitukseksi jää 130 A. Lisäksi kaapeli on pinta-asennettu ilmajohtopylvästä pitkin ja seinälle näytteenottorakennuksen sisällä. Pinta-asennuksella ilman muita kaapeleita ja lämpötilan ollessa noin 25 °C saadaan D1-2009:n taulukoiden 52.7 ja 52.11 mukaan kuormitettavuudeksi 102 A. Kuormitettavuus määräytyy siis AMKA 3 x 25 + 35 mukaan, eli maksimissaan 90 A, minkä mukaan maksimi ylikuormitussuojasulake on 80 A.

Kolmevaiheista oikosulkuvirtaa laskettaessa täytyi laskea oikosulkuvirta muuntajilta asti, sillä muuntajat on vaihdettu sen jälkeen, kun oikosulkuvirrat on laskettu Neplan-ohjelmalla 2007 Pöyryn toimesta. Muuntajina on yksi 10/6 kV:n ja yksi 6/0,4 kV:n

muuntajat. Lähtötietona käytettiin vanhaa oikosulkuvirran arvoa 10/6 kV:n ensiöpuolella ja siitä eteenpäin laskettiin kaikki uudestaan keskukselle PU02 asti, josta lähtee kyseinen AMKA-linja. 10/6 kV:n muuntaja eli T05, on yhdistetty kiskostolla 6/0,4 kV:n muuntajaan T06. T06 syöttää keskusta PU02 2 x MCMK 3 x 185 + 95 kaapelilla 10 metrin matkalta.

Oikosulkuvirta muuntajan T05 ensiöpuolella on 20,5 kA. Syöttävän verkon impedanssi saadaan kaavan 2 (s. 17) avulla. Nimellisjännite on 10 000 V.

$$Z_s = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_s} = \frac{10\,000\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 20\,500\text{ A}} = 0,282\ \Omega.$$

Arvo täytyy redusoida toisiopuolelle muuntajan muuntosuhteen neliöllä.

$$Z'_s = \mu^2 \cdot Z_s = \frac{6\,000\text{ V}^2}{10\,000\text{ V}} \cdot 0,282\ \Omega = 0,101\ \Omega.$$

(Rouvali 2010.)

Muuntajan T05 kilpiarvoista lasketaan muuntajan impedanssi kaavojen 17, 19 ja 21 (s. 22) avulla. Muuntajan kilpiarvoja ovat $S_N = 5\,000\text{ kVA}$, $Z_k\% = 5,3\%$, $P_k = 24\,000\text{ W}$ ja $P_0 = 5\,200\text{ W}$.

$$Z_k = \frac{Z_k\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{5,3\%}{100} \cdot \frac{6\,000\text{ V}^2}{5\,000\,000\text{ VA}} = 0,3816\ \Omega.$$

$$R_k = \frac{P_k}{S_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{24\,000\text{ W}}{5\,000\,000\text{ VA}} \cdot \frac{6\,000\text{ V}^2}{5\,000\,000\text{ VA}} = 0,035\ \Omega.$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,3816\ \Omega^2 + 0,035\ \Omega^2} = 0,38\ \Omega.$$

Muuntajan impedanssi $Z_M = R_k + jX_k = (0,035 + j0,38)\ \Omega$. Kaavan 4 (s. 18) avulla saadaan kolmevaiheinen oikosulkuvirta muuntajan toisiopuolella. Johdon impedanssia ei tarvitse huomioida, koska sähkö siirretään kiskostolla.

$$I_{k3} = \frac{c \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_M} = \frac{1 \cdot \frac{6\,000\text{ V}}{\sqrt{3}}}{0,101\ \Omega + (0,035 + j0,38)\ \Omega} = 8\,583\text{ A kulmassa } - 70^\circ.$$

Nyt lasketaan kolmevaiheinen oikosulkuvirta muuntajan T06 jälkeen. Oikosulkuvirta muuntajan ensiöpuolella on sama kuin edellä laskettu, koska välissä on pieni impedanssinen kiskosto. Syöttävän verkon impedanssiksi saadaan kaavalla 2 (s. 17),

$$Z_s = \frac{6\,000\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 8\,583\text{ A}} = 0,404\ \Omega.$$

Arvo täytyy redusoida toisiopuolelle muuntajan muuntosuhteen neliöllä.

$$Z'_s = \frac{400 \text{ V}^2}{6000 \text{ V}} * 0,404 \Omega = 0,00179 \Omega.$$

(Rouvali, J 2010.)

Muuntajan T06 kilpiarvot ovat $S_N = 400 \text{ kVA}$, $Z_k \% = 4,0 \%$, $P_k = 4310 \text{ W}$ ja $P_0 = 150 \text{ W}$.

$$Z_k = \frac{4,0 \%}{100} * \frac{400 \text{ V}^2}{400000 \text{ VA}} = 0,016 \Omega.$$

$$R_k = \frac{4310 \text{ W}}{400000 \text{ VA}} * \frac{400 \text{ V}^2}{400000 \text{ VA}} = 0,00431 \Omega.$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,016 \Omega^2 + 0,00431 \Omega^2} = 0,0154 \Omega.$$

Muuntajan impedanssi on siis $Z_M = (0,00431 + j0,0154) \Omega$. Johdon impedanssi on D1-2009-käsikirjan taulukon 41.6 mukaan $Z_J = 0,5 * (0,00125 + j0,0008) \Omega$. Kaavan 4 (s. 17) mukaan oikosulkuvirta keskuksessa PU02 on

$$I_{k3} = \frac{c * \bar{E}}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_M + \bar{Z}_J} = \frac{1 * \frac{400}{\sqrt{3}} \text{ V}}{0,00179 \Omega + (0,00431 + j0,0154) \Omega + 0,5 * (0,00125 + j0,0008) \Omega} =$$

12 590 A kulmassa -72° .

Edellä saadun arvon perusteella voitiin laskea kolmevaiheiset oikosulkuvirrat AMKA-linjalla. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat laskettiin muuntajan kilpiarvojen ja johtojen tietojen mukaan kaavalla 9 (s. 19). Arvot on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Oikosulkuvirrat

Johtoväli	Johto	Pituus	3-v.oikos.virta	1-v.oikos.virta
PU02-PRK1	MCMK 3x35+16	36 m	5,2–5,5 kA	2 725 A
PRK1-PRK2	AMKA 3x70+95	110 m	2,1–2,2 kA	1 180 A
	AMKA 3x25+35	150 m	670–700 A	385 A
PRK2-Näyt. Rak	AMKA 3x25+35	100 m	460–485 A	265 A
	MCMK 3x35+16	30 m	435–460 A	245 A

Varasyötön kannalta on viisainta sijoittaa linjalle välisulake. 5,0 s poiskytkentäaika vikatilanteessa toteutuu johdon loppupäässä, jos välisulakkeena on 50 A:n sulake, joka vaatii noin 250 A:n oikosulkuvirran. Paras vaihtoehto on sijoittaa 50 A:n gG-välisulake pistorasiakeskuksen PRK2 jälkeen pylväsvarokkeena AMKA-linjalle. Tällöin varasyötön kuormitettavuus on 50 A. Toisaalta lähdössä sijaitseva 100 A:n gG sulake on ehkä liian suuri, joten sitä voisi pienentää yhdellä pykälällä 80 A:iin. Tässä

tapauksessa se toimisi ylikuormitus- ja oikosulkusuojana PRK2:lle asti. Tällöin poiskytkentäaika jää hieman yli 5,0 s:iin, sillä 80 A:n gG-sulake vaatii noin 420 A:n oikosulkuvirran. Linja syöttää kuitenkin ainoastaan kahta pistorasiakeskusta ja niissä on myös omat suojaukset. Käyttäjiä pistorasiakeskuksilla on todella vähän. Oikosulkuvirta on kuitenkin suurempi kuin $3 \cdot I_N$, eli $3 \cdot 80 \text{ A} = 240 \text{ A}$, joten $3 \cdot I_N$ ehto täyttyy. Lasketut oikosulkuvirran arvot ovat aivan minimiarvoja, joten on mahdollista, että suojaus toimii nopeammin.

Olemassa olevasta AMKA-linjasta käytiin mittaamassa myös oikosulkuvirrat. Mittaukset tehtiin pistorasiakeskukselta, joka on 100 m ennen näytteenottorakennusta ja näytteenottorakennuksen kohdalta, mihin varasyöttö on suunniteltu liitettäväksi. Mittaukset tehtiin Fluke-asennustesterillä, jolla mitattiin silmukkaimpedanssi ja yksivaiheinen oikosulkuvirta. Mitatun arvon täytyy olla suurempi, koska oikosulkuutilanteessa johdinten lämpötila on $+80 \text{ °C}$ ja mitattaessa lämpötila on paljon vähemmän. Pistorasiakeskuksen kohdalta mitattiin oikosulkuvirraksi 545 A, kun laskennallinen arvo on 385 A. D1-2009-käsikirjan taulukon 41.5 mukaan 80 A:n gG-sulakkeelle mitattu oikosulkuvirran arvo täytyy olla vähintään noin 530 A 5,0 s poiskytkentäajalla. 80 A:n sulake on siis sopiva AMKA-linjan syötön pääsulakkeeksi. Tämän pistorasiakeskuksen taakse sijoitetaan 50 A:n välisulake, joka toimii suojana loppupätkälle. Näytteenottorakennuksen kohdalta mitattiin oikosulkuvirraksi 385 A, kun laskettu arvo on 265 A. D1-2009:n taulukon 41.5 mukaan 50 A:n gG-sulake vaatii mitatuksi arvoksi vähintään 313 A. 50 A:n sulake on siis sopiva välisulakkeeksi. Mitatut arvot tukevat laskelmia, joten laskelmia voidaan pitää luotettavina.

Jännitteenalenema on laskettu kaavoilla 11 ja 12 (s. 20–21) näytteenottorakennukselle asti välisulakkeen nimellisvirralla 50 A ja mitatulla tehokertoimella 0,97. Yhteenlasketuksi jännitteenalenemaksi johdoissa vaihetta kohden saatiin 20,8 V ja suhteelliseksi jännitteenalenemaksi vaihetta kohden noin 9 %, mikä on vielä normaalin jakelu- ja laadun puitteissa.

Kustannusarvioihin on laskettu tarvittava kaapeli asennusputkineen sekä kytkimet ja pylväsvaivokset. Näille kertyy hintaa noin 1 950 €. Suunnitteluun on arvioitu 16 tuntia ja asennukseen $5 \cdot 16$ tuntia. Nostimelle arvioidaan noin viisi käyttöpäivää, mutta telinetöitä tuskin tarvitsee kyseisessä työssä. Maakaapelin kaivutöihin arvioitiin kustannukset Verkostotöiden kustannusluettelosta KA 2:10, jossa on jakeluyhtiöiden keskimääräisistä kustannuksista laskettuja tietoja. Niiden perusteella kaapeliojan kaivulle haja-asutusalueelle, jota kyseinen kohde vastaa, tulee yksikköhinnaksi noin 9

500 €/km. 30 metrin matkalle saadaan hinnaksi 285 €. Kaikki edellä mainitut yhteenlaskettuna saadaan kustannusten arvioksi noin 7 700 €.

Lopullinen ratkaisu voisi olla, että lähdön 100 A:n sulake korvataan 80 A:n sulakkeella ja välisulakkeeksi laitetaan 50 A toisen pistorasiakeskuksen kohdalle. Näytteenottorakennuksen sisälle tulisi kytkin, josta varasyöttöyhteys kytketään tulemaan KS01-1-2-keskukselle. Kohtuullisilla kustannuksilla saadaan turvattua näytteenottorakennuksen sähkönjakelu vika- tai poikkeustilanteessa, jolloin mittaus on jatkuvaa ja ympäristölle ei aiheudu vaaraa. Liitteessä 3 on suunnitelmakuva näytteenottorakennuksen keskuksen KS01-1-2 varasyötöstä ja liitteessä 4 on suunnitelmakuva pumppaamon keskukselta PU02, josta varasyöttönä toimiva linja lähtee.

6.4 Saniteettivesipuhdistamon varasyöttö

Viimeisenä kohtana on saniteettivesipuhdistamon varasyötön suunnittelu. Laitos on tärkeä ympäristöllisistä syistä. Laitoksessa puhdistetaan poistuvaa saniteettivettä kalkin avulla. Vikatilanteessa kalkin syöttö ja pumput eivät toimi ja laitos alkaa tulvia. Kaiken lisäksi laitos on kahden rautatien välissä, joten se on sijainniltaan hankalassa paikassa. Kyseinen laitos on sähköteholtaan pieni, normaalikuormituksessa mitatut vaihevirrat olivat noin 30 A ja pätöteho noin 12 kW. Sen syöttö tulee noin 200 metrin päästä rikkihappotehtaalta keskukselta R02 keskukselle HP1 ja siitä eteenpäin KS01:lle. Syöttökaapeli on maahan kaapeloitu ja se on tyypiltään AMCMK 3 x 70 + 21. Keskuslähdön sulake on 100 A:n gG-sulake.

Yksi vaihtoehto on tuoda varasyöttö saniteettivesipuhdistamon pääkeskukselle KS01 läheiseltä ammoniakiasemalta AM01:ltä. Tämä voidaan toteuttaa joko omasta lähdöstä AM01:ltä tai samasta edustussaunan syöttölinjasta, josta on tarkoitus ottaa syöttö myös satamalle. Kyseinen AMKA-linja on siihen tarpeeksi järeä. Ongelmana on se, että matkaa tulee tarpeettoman paljon. Sopiva kohta AMKA-linjasta on noin 200 m:n päässä AM01:ltä, johon voisi liittää varasyötön KS01:lle. Tästä on vielä noin 250 m KS01:lle, joten kokonaismatka olisi lähemmäs puoli kilometriä. Parempi vaihtoehto olisi tuoda varasyöttö suoraan AM01:ltä omasta lähdöstä esimerkiksi AM01-07E. Matkaa kertyisi tällöin noin 250 m, josta osa on kaapelihyllyä pitkin ja loput maahan kaapeloituna. Tällöin täytyy mennä myös yhden rautatien alitse. Varasyöttökaapeli tulisi KS01:llä lähtöön KS01-04A.

Sopivana varasyöttökaapelina voi pitää samankokoista AMCMK 3 x 70 + 21 kaapelia, jolla varsinainen syöttö on toteutettu. Kuormitettavuus on maahan asennettuna D1-2009-käsikirjan taulukon 52.1 mukaan 70 mm² alumiinijohtimella noin 185 A. Hyllylle asennettuna kyseisen kaapelin kuormitettavuudeksi jää $0,94 * 0,88 * 159 \text{ A} = 131 \text{ A}$, kun lämpötila on pahimmillaan 30 °C ja vieressä toinen kaapeli. Kuormitettavuus määräytyy siis pienemmän mukaan eli se on 131 A. Se mahdollistaa ylikuormitus-suojasulakkeeksi 100 A.

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta on laskettu kaavalla 4 (s.18). Keskuksen AM01 oikosulkuvirtana on käytetty 27,9 kA. Yksivaiheinen oikosulkuvirta on laskettu kaavalla 9 (s.20) ja muuntajan arvot on laskettu muuntajan kilpiarvojen perusteella. Kolmevaiheiseksi oikosulkuvirraksi saadaan 1,5–1,57 kA ja yksivaiheiseksi minimoikosulkuvirraksi 600 A. Jos kyseistä 100 A:n gG-sulaketta käytetään myös oikosulkusuojana, niin se vaatii oikosulkuvirraksi vähintään 580 A, jotta poiskytkentäaika 5,0 s toteutuu. 100 A:n sulake siis käy oikosulkusuojaksi.

Jännitteen alenema kyseisellä AMCMK 3 x 70 + 21 kaapelilla on kaavan 11 (s.20) mukaan 10,2 V, kun kuormitusvirta on 100 A ja tehokerroin 0,75. Suhteellinen jännitteen alenema on siis kaavan 12 (s.21) mukaan 4,4 %.

Samalla tarkastettiin KS01:n varsinaisen syöttökaapelin riittävyys. Kyseessä on siis myös AMCMK 3 x 70 + 21, jolla on matkaa muuntajalta noin 200 m. Sen kuormitettavuudeksi saadaan noin 150 A. Kolmevaiheinen oikosulkuvirta on noin 1,64–1,73 kA ja yksivaiheinen oikosulkuvirta noin 615 A. 100 A:n sulake riittää siis ylikuormitus- ja oikosulkusuojaksi. Jännitteen alenema on noin 4,2 V ja 1,8 % johtovälillä HP1-KS01. Varsinainen syöttö on siis riittävä. Edellä mainittu varasyöttö vastaa siis lähes täysin nykyistä varsinaista syöttöä.

Toinen vaihtoehto on jättää nykyinen varsinainen syöttö varasyötöksi ja kytkeä se lähtöön KS01-04A. Tämän jälkeen varsinainen syöttö otetaan lähdestä AM01-07E samaa reittiä kuin edellä suunniteltu AMCMK 3 x 70 + 21. Samalla varsinaista syöttöä voidaan vahvistaa, jolloin saadaan keskukselle KS01 laajennusvaraa. Keskuksen kiskoston nimellisvirta on 250 A, joten syöttökaapelin voisi mitoittaa tätä vastaavaksi. Kaapelin kuormitettavuus voisi olla lähtökohtaisesti 250 A, tai vähän alle. Kaapeli, jolla on hyllylle asennettuna, kahden kaapelin läsnä ollessa ja 30 °C lämpötilassa kuormitettavuus noin 250 A, on AMCMK 3 x 185 + 57. Tällöin kuormitettavuus on

$0,94 * 0,88 * 297 = 245$ A. Maahan asennettuna kuormitettavuus on 330 A. Kaapelin ylikuormitussuojaksi käy 200 A:n gG sulake.

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta on 3,6–3,8 kA. ja yksivaiheinen oikosulkuvirta on 1 300 A. Tällöin 200 A sulake voi toimia myös oikosulkusuojana, koska se vaatii vähintään 1 250 A:n oikosulkuvirran, jotta 5,0 sekunnin poiskytkentäaika toteutuu. Jännitteen alenemaksi saadaan noin 10 V maksimikuormituksen ollessa 200 A ja suhteelliseksi jännitteenalenemaksi noin 4,3 %.

Kustannukset lasketaan molemmille vaihtoehdoille, vaikka käytännössä ainoa ero syntyy kaapelin hinnasta ja muista tarvikkeista. Maakaapeli menee tätä reittiä myös yhden rautatien alitse, josta voi aiheutua vielä lisäkustannuksia. Arvioidaan, että suunnitteluun kuluu kaikkiaan noin 24 tuntia, asennukseen 5 * 20 tuntia ja telineisiin 36 tuntia. Lisäksi KA 2:10:n mukaan arvioidaan maakaapeliojan kaivulle yksikköhinnaksi noin 10 000 €/km haja-asutusalueella. Maakaapelia tulee noin 170 m, joten sen kustannukset olisivat noin 1 700 €. Työkustannukset olisivat siis noin 9 800 €.

Jos toteutetaan varasyöttö AMCMK 3 x 70 + 21 AM01:ltä, niin kaapeliin, kaapelihyllyyn ja muihin tarvikkeisiin kuluu noin 7 000 €. Kokonaiskustannukset olisivat siis noin 16 700 €.

Jos nykyinen syöttö jätetään varasyötöksi ja otetaan uusi syöttö AM01:ltä AMCMK 3 x 185 + 57:llä, niin materiaalikulut olisivat noin 11 200 €. Lisäksi vanha syöttö täytyy siirtää keskuslähtöön KS01-04A, jolloin se toimii varasyöttönä. Tästä aiheutuu noin 300 € kustannukset. Kokonaiskustannukset olisivat siis noin 21 500 €.

Kaiken kaikkiaan kuluissa ei ole kuin 5 000 € ero. Ensimmäinen vaihtoehto on edullinen ja sillä turvataan saniteettilaitoksen toimivuus vikatilanteissa. Toinen vaihtoehto sallii KS01 keskuksen päivittämisen, jos keskusta aletaan joskus uudistaa. Se on kuitenkin hieman kalliimpi. Molemmat vaihtoehdot ovat hyviä, mutta KS01:n syötön vahvistaminen voi olla tulevaisuuden kannalta järkevämpi. Liitteen 2 jakelukaaviosta näkyy suunnitelma KS01:n syötöstä ja liitteessä 5 on jakelukaavio, jossa näkyy KS01:n suunniteltu syöttö ja varasyöttö.

7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli ensin selvittää Yara Suomi Oy:n Siilinjärven tehtaiden RET:n nykyiset pääkeskusten väliset varasyöttöyhteydet ja niiden kuormitettavuudet ja päivittää puuttuvat tiedot piirustuksiin. Lisäksi päivitettiin muita RET:n 400 V jakelupiirustuksia. Piirustukset päivitettiin Yaralla Siilinjärvellä AutoCad-ohjelmalla suoraan tietokantaan. Tässä onnistuttiin hyvin, ja nyt kun varasyöttöyhteyksien kuormitettavuudet ovat tiedossa, pystytään varasyöttöjä käyttämään mahdollisimman tehokkaasti vika- tai muissa poikkeustilanteissa.

Toimeksiantajan toiveesta toisessa vaiheessa tarkoitus oli selvittää muita kehitystä vaativia pienjänniteverkon osia. Niistä tehtiin tarvittavat laskelmat kustannusarvioineen ja piirrettiin suunnitelmakuvat olemassa olevien Pöyry Oy:n piirtämien sähkökuvien pohjalta. Jokaisesta neljästä kohdasta saatiin aikaan suunnitelmat, joita toimeksiantaja on valmis käyttämään ja kehittämään.

Työ oli monipuolinen, koska se sisälsi laskentaa, tiedonkeruuta, kustannusarviointia ja piirustusten piirtämistä. Aiheesta ja työn tuloksista on paljon hyötyä toimeksiantajalle Yara Suomi Oy:lle.

LÄHTEET

ABB. 2000–2007. *Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja*. ABB [viitattu 9.1.2012]. Saatavissa: <http://heikki.pp.fi/abb>.

Anjala, R. 2008. *Verkostosuositus SA 2:08: Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen*. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Ecu-Sähkö Oy Verkkokauppa. [viitattu 23.2.2012] Saatavissa: <http://www.ecu-sahko.fi/>

Lakervi, E & Partanen, J. 2008. *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto.

Lindberg P & Maasalo T. 2010. *Verkostotöiden kustannusluettelo KA 2:10*. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Rissanen, R. 2010. Teollisuuden sähköasennukset ja verkot. Luentomoniste. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

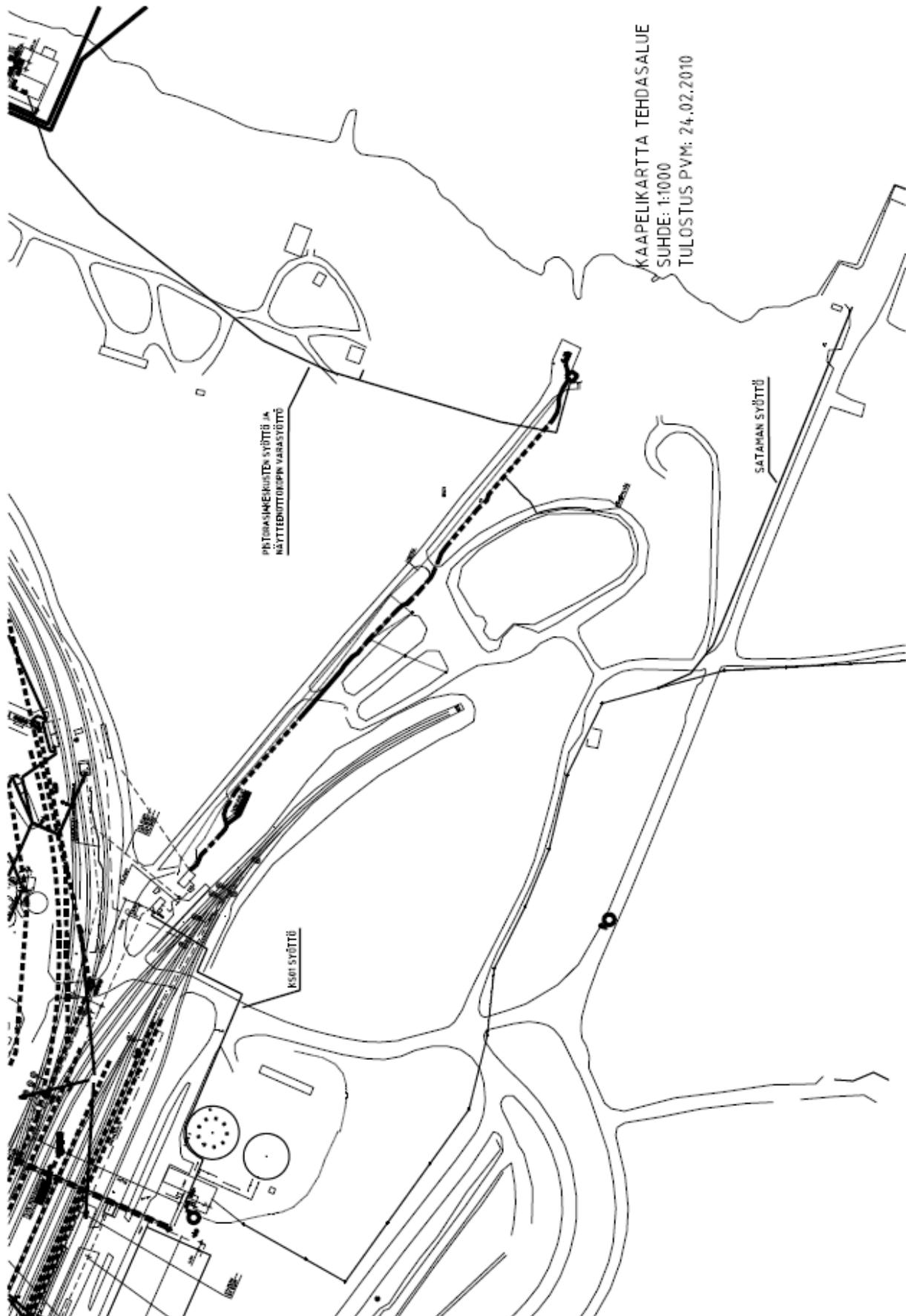
Rouvali, J. 2010. Sähkönjakelutekniikka 1. Luentomoniste. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2009. *D1-2009 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. Espoo: Sähköinfo Oy.

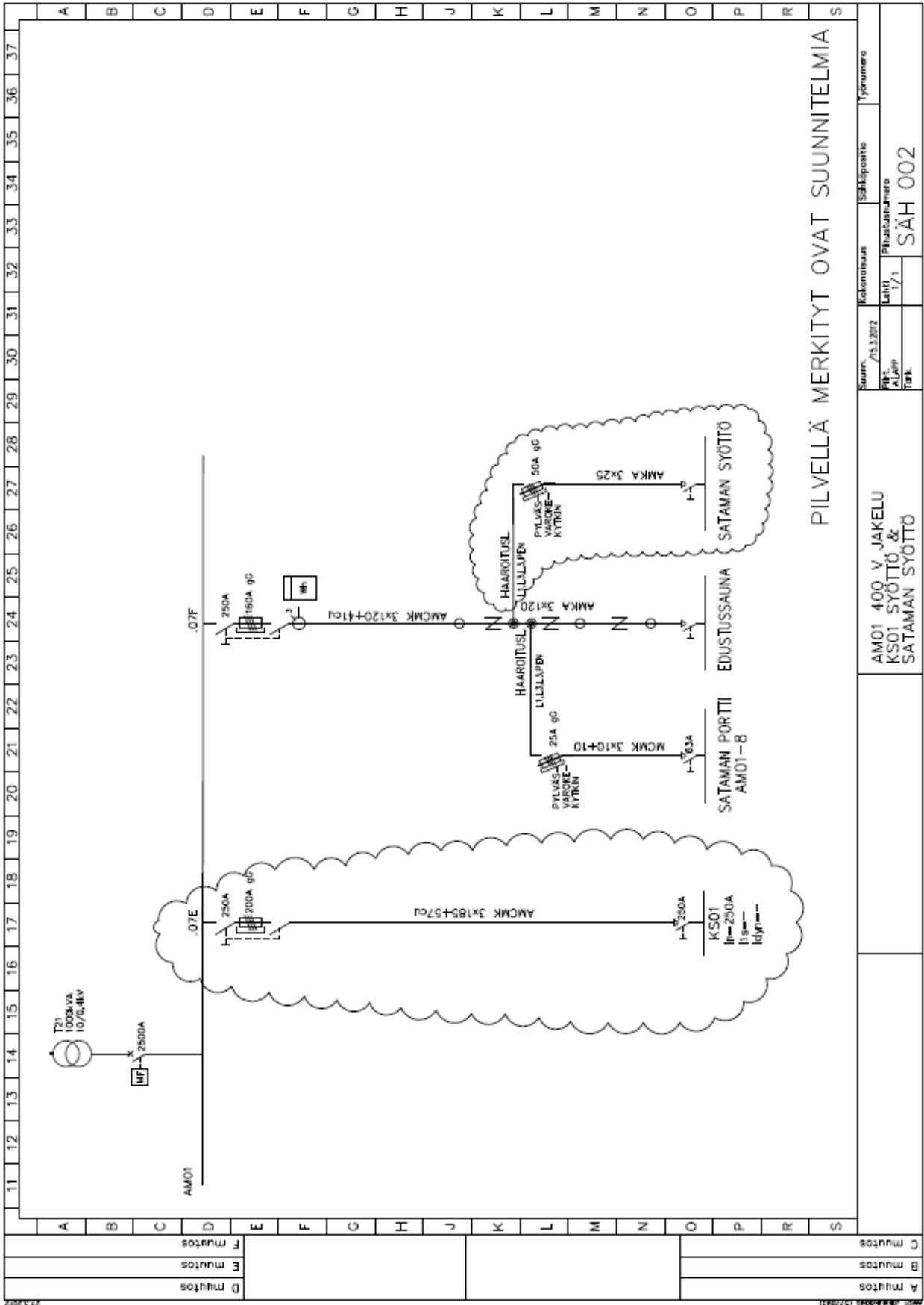
Yara Suomi. 2012a. Yara lyhyesti. [viitattu 14.3.2012]. Saatavissa: http://www.yara.fi/about/at_a_glance/index.aspx.

Yara Suomi. 2012b. Yara Suomessa. [viitattu 14.3.2012]. Saatavissa: http://www.yara.fi/about/yara_in_finland/index.aspx.

TEHDASALUEEN KAAPELIKARTTA, JOSSA SUUNNITELLUT SYÖTÖT



AM01:N JAKELUKAAVIO, JOSSA KS01:N SYÖTÖN JA SATAMAN SYÖTÖN SUUNNITELMAT

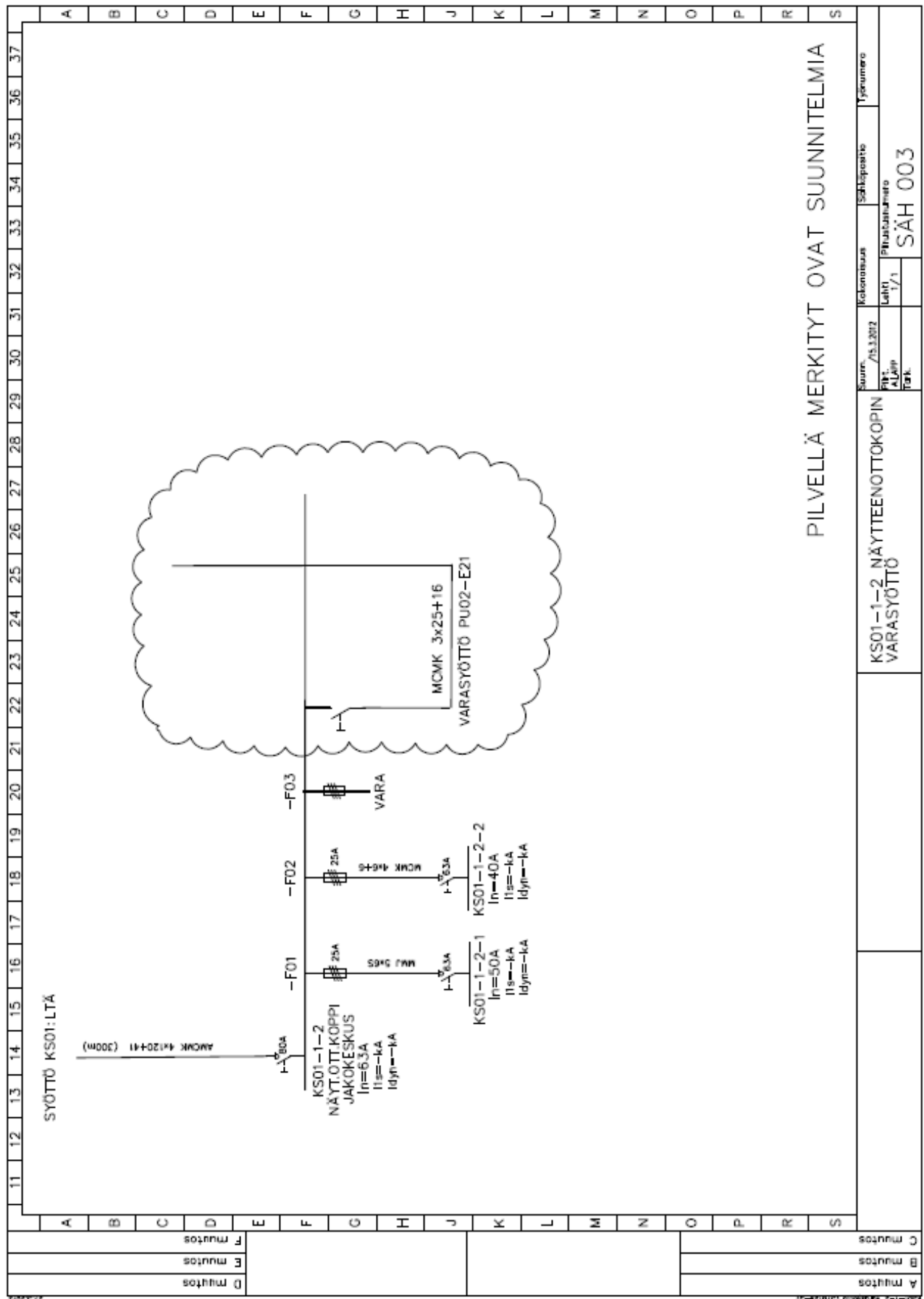


A muutokset			
B muutokset			
C muutokset			
D muutokset			
E muutokset			
F muutokset			

Kokonaisuus	Sähkösuhteet	Työnumero
Piir. / 25.1.2012		
Piir. / Alkuperä	Piirustanumero	
Tark.	1/7	SÄH 002

AM01 400 V JAKELU
 KS01 SYÖTTÖ &
 SATAMAN SYÖTTÖ

NÄYTTEENOTTORAKENNUKSEN KS01-1-2:N VARASYÖTÖN SUUNNITELMAKUVA



SYÖTÖ KS01:LTÄ

4x20+41 (300m)

KS01-1-2
NÄYTTÖKOPPI
JAKOKESKUS
In=6.3A
IIs=-kA
Idyn=-kA

25A
MKA 5x6S

I-VE3A

KS01-1-2-1
In=50A
IIs=-kA
Idyn=-kA

25A
MCK 4x6T

I-VE3A

KS01-1-2-2
In=40A
IIs=-kA
Idyn=-kA

I-VE3A

VARA

MCMK 3x25+16
VARASYÖTÖ PU02-E21

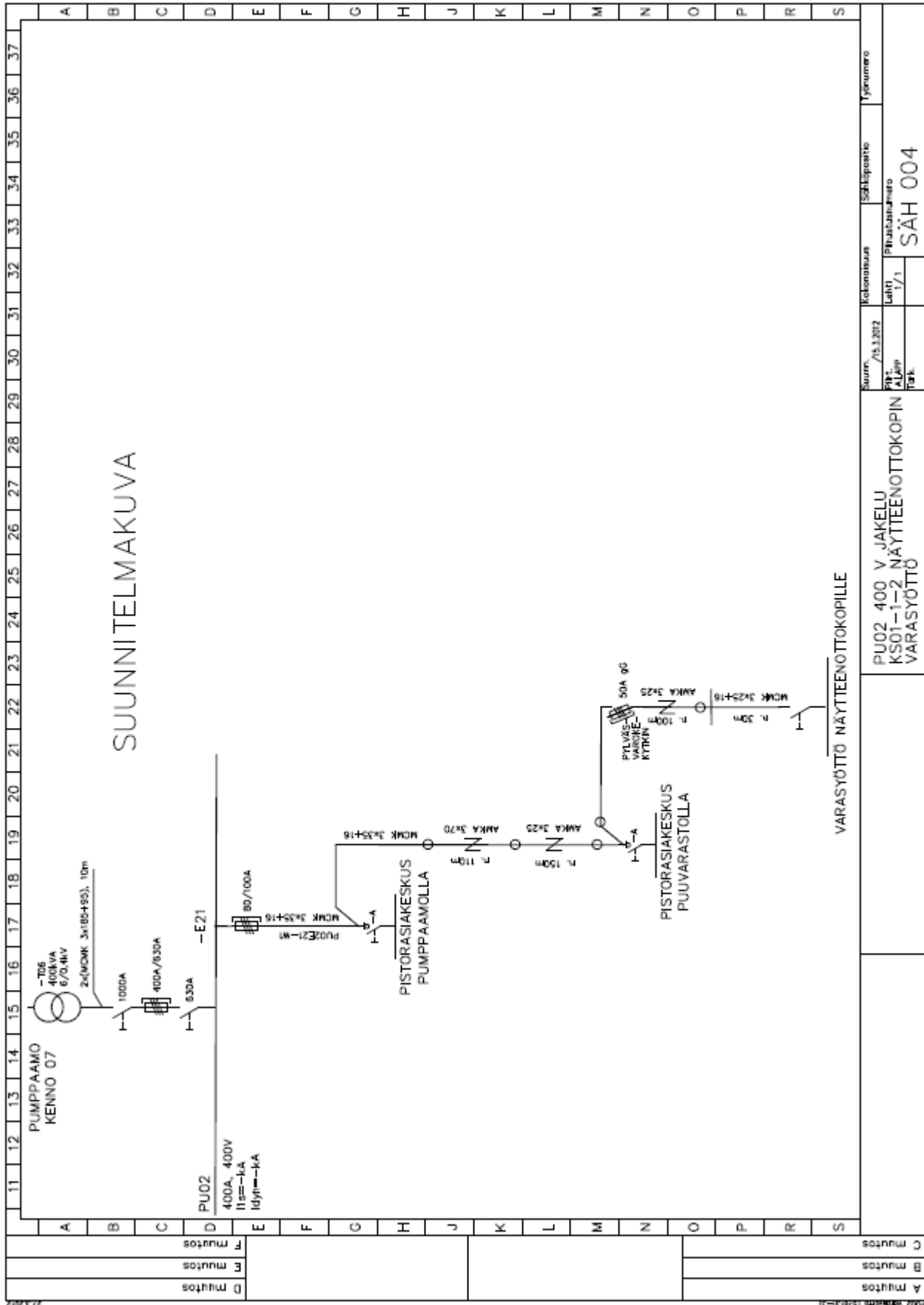
PILVELLÄ MERKITYT OVAT SUUNNITELMIA

D	muitos
E	muitos
F	muitos

A	muitos
B	muitos
C	muitos

KS01-1-2 NÄYTTÖKOPIN VARASYÖTÖ		Kokonaissivu		Sähköpaikka	Työnnumero
Suunn. 7/5.3.2012	PII: ALJA	Lehti		Platikanumero	
		1/1		SÄH 003	

**PU02:N JAKELUKAAVIO, JOSSA NÄYTTEENOTTORAKENNUKSEN VARASYÖTÖN SUUN-
NITELMA**



SANITEETTIVESILAITOKSEN KS01:N SYÖTÖN JA VARASYÖTÖN SUUNNITELMAKUVA

