



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Markku Lundelin

# KAIVOKSEN SÄHKÖNJAKELUN OPTIMOINTI

Tekniikka ja liikenne  
2014

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Markku Lundelin
Opinnäytetyön nimi	Kaivoksen sähkönjakelun optimointi
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	52 + 2 liitettä
Ohjaaja	Olavi Mäkinen, Yliopettaja Ralf Mitts, Myyntipäällikkö

---

Insinööriyössä tutkittiin mahdollisuutta toteuttaa kaivoksen sähköverkko suunnitellun 400 V ja 690 V jakelujännitteen sijaan 400 V jännitteellä. Työssä käytettiin esimerkkitapauksena Silver Recourses Oy:n suunnitteilla olevaa kaivosta Sotkamossa, jonka sähköverkko mitoitettiin uudelleen eri muuntaja vaihtoehdoilla ja jännitetasolla. Lopuksi tehtiin hintavertailua kahden parhaaksi osoittautuneen vaihtoehdon välillä.

Tutkimuksessa käytettiin Neplan -verkostolaskentaohjelmaa mallintamaan sähköjakeluverkon eri toteutusvaihtoehtoja. Aineistona käytettiin ABB Industry Solutions:in jo aikaisemmin tekemiä selvityksiä kyseisestä hankkeesta. Hintavertailussa käytettiin ABB:n käyttämää ja kehittämää E-Deco ohjelmaa.

Työssä saatiin selville, että 400 V jännitetaso olisi mahdollinen tämän kokoisella kaivoksella, jos etäisyydet muuntajien ja toimilaitteiden välillä pysyisivät tarpeeksi lyhyinä. 400 V jännitteellä joudutaan jakamaan kuormaa useammalle muuntajalle. Jännitteenalenemat pitkien syöttöjen päässä olevilla moottorilähdöillä osoittautuivat liian suuriksi käytettäessä 400 V jännitettä. Hintavertailussa 400 V jännitetaso osoittautui kilpailukykyiseksi ratkaisuksi ollen vain hieman kalliimpi.

## ABSTRACT

Author	Markku Lundelin
Title	Optimization of Power Distribution in a Mine
Year	2014
Language	Finnish
Pages	52 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Olavi Mäkinen, Senior lecturer Ralf Mitts, Sales manager

---

The purpose of the thesis was to research the possibility to execute a mine electrical grid in a mine with a 400 V distribution voltage instead of 400 V and 690 V. Silver Resources Oy's planned mine in Sotkamo was used as an example in the thesis, as it was re-dimensioned multiple different transformers and current levels. At the end a comparison of prices was made between two best solutions.

Tools that were used in the project included Neplan electrical grid planning program, to model the distribution networks different execution options of the distribution network and ABB's E-Deco program was used in price calculation. Previous documentations from ABB Industry Solutions about the project were used as source material.

The findings in the thesis were the thesis that 400 V voltage level would be possible in a mine of this size, if distances between the transformers and actuators stayed reasonably short. In the 400 V voltage, the load would have to be divided to multiple transformers. In this particular case, voltage losses at the end of motor inputs turned out to be too great to be efficient while using 400V. In comparison of prices it turned out that 400 voltage level would be competitive being just slightly more expensive than 400/690 V alternative.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	10
1.1	ABB Oy .....	10
1.1.1	ABB Industry Solutions .....	10
1.2	Sotkamo Silver Oy .....	11
2	KAIVOKSEN SÄHKÖVERKKO .....	13
2.1	Erytispiirteet .....	13
2.2	Sähköverkon rakenne .....	13
2.3	Sähkölaitteisto.....	15
2.4	Suosittelut jännitetasot .....	15
2.5	Johdot ja kaapelit .....	15
2.5.1	Kaapelin mitoitus.....	16
3	JÄNNITTEEN VAIKUTUS SÄHKÖNJAKELUSSA .....	18
3.1	Jännitteen vaikutus kaapelointikustannuksiin.....	18
3.2	Jännitteen vaikutus kaapelin valintaan.....	20
3.3	Jännitteen vaikutus suojalaitteiden valintaan.....	20
3.4	Tehon siirto.....	21
3.5	Oikosulkulaskelmat.....	21
3.5.1	Terminen oikosulkukestoisuus .....	21
3.5.2	Dynaaminen oikosulkukestoisuus .....	21
3.6	Jännitteenalenema .....	23
3.7	Jännitteen vaikutus momenttiin .....	25
4	KUPARI- JA ALUMIINIKAAPELEIDEN VERTAILU .....	28
4.1	Kaapelityypit.....	28
4.2	Kaapelimateriaalin vaikutus kaapeleiden ominaisuuksiin.....	28
4.3	Kuparin ja alumiinin hintavertailu .....	28
5	JÄNNITETASOJEN VERTAILU .....	30
5.1	Jakeluverkon toteutus 400 voltin jännitteellä .....	30
5.2	Oikosulkulaskelmat.....	30
5.2.1	Yhteenveto.....	36

5.3	Jännitteenalenematarkastelu .....	36
5.3.1	Yhteenveto.....	39
5.4	Jännitteenaleneman pienentäminen loistehon kompensoinnilla .....	40
5.4.1	Kompensointikondensaattorit.....	42
5.5	Jännitteenalenemat moottorin käynnistyksessä .....	43
5.6	Kompensoitu verkko .....	43
5.6.1	Loisvirta .....	45
5.6.2	Yhteenveto.....	47
6	HINTAVERTAILU.....	48
7	YHTEENVETO .....	50
	LÄHTEET.....	52
	LIITTEET	

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b> Kaapelin virtakestoisuus /1/ .....	19
<b>Taulukko 2.</b> Moottorin verkosta ottama virta ja syöttökaapelit 400 V:n ja 690 V:n jännitteellä. ....	20
<b>Taulukko 3.</b> aM-kahvasulakkeiden oikosulkuvirran katkaisukyky 500 V ja 690 V jännitteillä. /8/.....	22
<b>Taulukko 4.</b> Kahvasulakkeiden koot ja nimellisvirta alueet IEC-kokojen mukaan. /8/ .....	23
<b>Taulukko 5.</b> Oikosulkuvirrat 400 V ja 690 V verkossa.....	32
<b>Taulukko 6</b> Oikosulkuvirrat 400 voltin jännitteellä. ....	32
<b>Taulukko 7.</b> Murskaamon ja rikastamon oikosulkuvirrat 1 ja 2,5 MVA -muuntajilla.....	34
<b>Taulukko 8.</b> Oikosulkuvirrat kahdella rikastamon 2MVA -muuntajalla.....	35
<b>Taulukko 9.</b> Oikosulkuvirrat 2,5 MVA -muuntajalla.....	35
<b>Taulukko 10.</b> Jännitteet 400/690 voltin verkossa.....	37
<b>Taulukko 11.</b> Jänniteenalenemat moottorilähdöillä. ....	37
<b>Taulukko 12.</b> Normaalkäyttötilanteen prosenttiarvot nimellisjännitteestä 400 voltin jakelujännitteellä. ....	38
<b>Taulukko 13.</b> Prosenttiarvot moottorilähtöjen nimellisjännitteestä normaalikäytön aikana 400 voltin jakelujännitteellä. ....	38
<b>Taulukko 14.</b> Prosenttiarvot nimellisjännitteestä, rikastamo ja murskaamo erillisillä muuntajilla. ....	38
<b>Taulukko 15.</b> Moottorilähtöjen prosenttiarvot nimellisjännitteestä, 400 voltin jakelujännitteellä. ....	39
<b>Taulukko 16.</b> jännitteen alenemat 400 voltin verkossa 2*2MVA:n -muuntajilla.39	
<b>Taulukko 17.</b> moottorilähtöjen jännitteen alenemat 400 voltin verkossa. ....	39
<b>Taulukko 18.</b> Jänniteenaleneman kompensointi kondensaattorilla. ....	42
<b>Taulukko 19.</b> Jänniteenalenemat moottorikäynnistyksissä.....	43
<b>Taulukko 20.</b> Kompensointitarpeen määrittäminen, kun tehokerroin nostetaan $\cos \varphi_1$ :stä $\cos \varphi_2$ :een. /12/ .....	45
<b>Taulukko 21.</b> Muuntajien virrat kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa 400/690 voltia. ....	46

<b>Taulukko 22.</b> Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 3,15 MVA:n -muuntajalla. ....	46
<b>Taulukko 23</b> Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 2,5 MVA:n -muuntajalla. ....	46
<b>Taulukko 24.</b> Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa murskaamon 1 MVA- ja rikastamon 2,5 MVA -muuntajilla.....	46
<b>Taulukko 25.</b> Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 2*2 MVA:n -muuntajilla. ....	47
<b>Taulukko 26.</b> Toteutuksen prosentuaalinen hinta 400 V jännitteellä, 400/690 V jännitteisestä suunnitelmasta. ....	49
<b>Kuva 1.</b> Kaivoksen sähköjakelun pääkaavio. ....	14
<b>Kuva 2.</b> Johtimen kuormitettavuus, ampeeria neliömillimetrillä kaapelin poikkipinta-alaan nähden. ....	19
<b>Kuva 3</b> Jännitteenalenema kupari- ja alumiinikaapeleilla 400 V ja 690 V. ....	25
<b>Kuva 4.</b> Momentti ja vastamomentti kierrosnopeuteen nähden. ....	26
<b>Kuva 5.</b> Jännitteenalenema moottorin nimellistehon ja verkon oikosulkutehon suhteen. /12/. ....	27
<b>Kuva 6</b> Kupari- ja alumiinikaapelin nimellisvirta poikkipinta-alaan nähden.....	28
<b>Kuva 7</b> Kupari- ja alumiinikaapelin metallien hinnat 1 km pituisella kaapelilla. ....	29
<b>Kuva 8</b> Neplanilla tehty 400/690 V jakeluverkko. ....	31
<b>Kuva 9.</b> Rikastamon ja murskaamon muuntajat 400 voltin verkossa. ....	33
<b>Kuva 10.</b> Rikastamon muuntaja toteutettuna 2*2 MVA -muuntajilla. ....	34
<b>Kuva 11.</b> Kompensointikondensaattori mitoitettuna CONCENTRATING_PLAN/1:ssä. ....	44

**LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Jännitteenalenemat moottorikäynnistyksissä

**LIITE 2.** Oikosulkuvirrat kompensoidussa verkossa



**SYMBOLIT**

I	virta; A
U	jännite; U
P	teho; W
S	näennäisteho; S
Q	loisteho; var
$\cos\varphi$	tehokerroin
$\eta$	hyötysuhde
R	resistanssi; $\Omega$
X	reaktanssi; $\Omega$

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on tutkia kaivoksen sähkönjakelun optimointia ja samalla selvittää kaivoksen sähköistyksen erityispiirteitä Suomessa. Toimeksiantajana toimii ABB Industry Solutions -yksikkö ja tarkastelukohteeksi on otettu kaivos Silver Resources Oy Sotkamossa.

Sotkamon kaivoksessa pienjännitejakelu on suunniteltu toteutettavaksi 400 V ja 690 V jakelujännitteillä. 400 V jännite tarvitaan joka tapauksessa valaistukselle ja muille yksivaiheisille pienjännitekojeille. Tarkoituksena on tutkia mahdollisuutta toteuttaa koko pienjännitejakelu 400 V jännitteellä. Tässä tutkimuksessa haetaan hyödyt ja haitat yhdelle ja kahdelle jännitetasolle. Tutkitaan myös onko kannattavaa laittaa yhden muuntajan sijaan kaksi muuntajaa ja millä hinnan lisäyksellä voidaan nostaa kaivoksen käytettävyyttä.

## 1.1 ABB Oy

ABB on monikansallinen teknologiayhtiö, jonka keskeisimpiä toimi-aloja ovat automaatio- ja sähkövoimatekniikka. Forbesin maailman suurimmat yhtiöt -listauksessa ABB on sijalla 158. ABB:llä on toimintaa 100 maassa ja henkilökuntaa maailmanlaajuisesti noin 150 000 henkeä. ABB syntyi, kun Asea ja sveitsiläinen Brown Boveri yhdistivät sähkötekniset liiketoimintansa vuonna 1988. Jo kaksi vuotta aikaisemmin Asea oli ostanut Strömbergin, josta myöhemmin tulisi suomalainen tytäryhtiö ABB Oy. Suomen ABB työllistää noin 5500 henkilöä 30 paikkakunnalla. ABB:n kokonaisliikevaihdosta Suomen ABB kattaa noin 7 %.

### 1.1.1 ABB Industry Solutions

ABB Oy Industry Solutions -yksikkö toimittaa energianhallinta-, linjakäyttö-, sähköistys- ja instrumentointiratkaisuja sekä tehdastietojärjestelmiä teollisuusasiakkaille maailmanlaajuisesti. Suomen yksikkö vastaa globaalisti metsäteollisuuden sähköistysratkaisujen sekä energianhallinta-, sähkökäyttö- ja tehdastietojärjestelmien sekä niihin liittyvän osaamisen kehittamisestä ABB:llä. Yksikön

toimipisteet sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa, Oulussa ja Varkaudessa. Yksikön palveluksessa työskentelee Suomessa 230 henkilöä.

## **1.2 Sotkamo Silver Oy**

Sotkamo Silver koostuu Sotkamo Silver AB -emoyhtiöstä ja sen tytäryhtiöstä Sotkamo Silver Oy:stä. Sotkamo Silver on keskittynyt hopea- kulta- ja sinkkiesiintymien hyödyntämiseen pohjoismaissa. Yhtiö on aloittamassa kaivostoimintaa Sotkamon kunnassa Itä-Suomessa. Hankkeelle on tehty lopullinen kannattavuus selvitys ja valmisteilla on hankerahoitus. Sotkamo Silverin pääkonttori sijaitsee Tukholmassa, Ruotsissa. Oulussa on paikallistoimisto ja Sotkamossa kenttätoimisto. /5/

Sotkamo Silverin liikeideana on hyödyntää pohjoismaisia mineraaliesiintymiä ja se pykii tässä johtavaan asemaan Pohjoismaissa. Se ottaa toiminnassaan huomioon yhteiskunnalliset ja ympäristötekijät. /5/

Sotkamon hopeaesintymän löydettiin jo vuonna 1980, tutkimuksia jatkettiin paikallisen paperiyhtiön Kajaani Oy:n ja Outokumpu Oy:n voimin vuoteen 1991 asti, jolloin Outokumpu Oy teki kannattavuustutkimuksen hopeakaivos projektin hyödyntämiseksi. Outokumpu Oy totesi tuolloin kaivoksen kannattamattomaksi hopean hinnan laskun vuoksi. /5/

2005 aikaisempi kaivospiiri päättyi, jolloin Sotkamo Silver sai tutkimusluvan alueelle. Vuonna 2006 Sotkamo Silver haki aiemmin tehtyjä valtauksia hopeakaivosesiintymälle ja sai ne toukokuussa 2007. Sotkamo Silver on jatkanut tutkimusta alueella ja vuonna 2011 valmistui riippumaton arvio, jonka mukaan esiintymän varannot olisivat noin 1,5 miljoonaa tonnia, oletettu kaivoksen käyttöaika on 9-10 vuotta, avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen tuotannoksi on kaavailtu 4000 tonnia rikastetuotantoa. Mineraalien suuren hinnan nousun takia kaivoksesta on tullut taloudellisesti kannattava, hopean hinta on noussut noin 300 % vuodesta 1995. Kaivoslupa myönnettiin huhtikuussa 2011. Hopeakaivosprojektin kehittämiseen on käytetty tähän mennessä noin 15 miljoonaa euroa. Vuoden 2014 aikana

on tarkoitus aloittaa murskaamon ja rikastuslaitoksen rakentaminen ja 2015 aikana aloitetaan kaivostoiminta. /5/

Kaivosalue tulee käsittämään kaikki olennaiset laitokset ja rakennukset, joita tarvitaan kaivostoimintaan. Nämä tulevat olemaan rikastamo, rikasteen varasto, huolto- ja työpaja-alueet, toimistot, pysäköinti, muuntaja-asema ja urakointivarasto. /5/

## **2 KAIVOKSEN SÄHKÖVERKKO**

### **2.1 Erityispiirteet**

SFS-standardin mukaan maakosteutta vastaan eristämätön kaivos tai tunneli on märkä tila ja muut kaivostilat ovat kosteita tiloja. Sähkölaitteiden käyttöolosuhteet kaivoksessa luokitellaan yleensä vaarallisiksi tai erittäin vaarallisiksi./2/

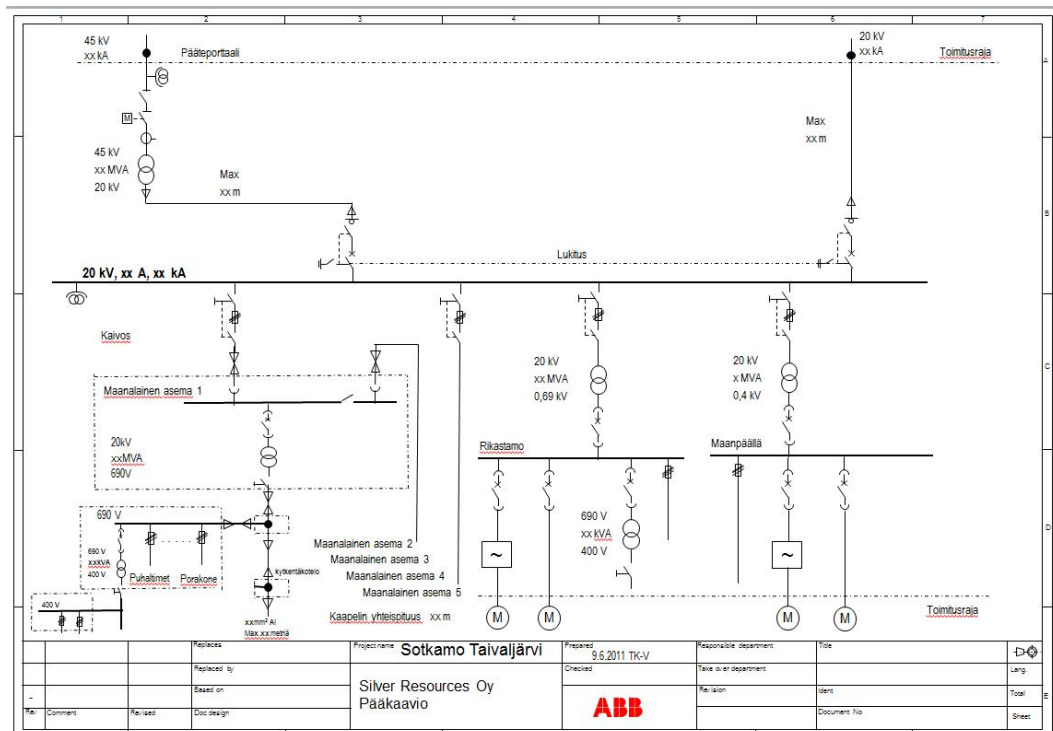
### **2.2 Sähköverkon rakenne**

Maanalaisten kaivosten jakeluverkko on pyrittävä rakentamaan siten, että henkilöturvallisuudelle tärkeiden laitteiden, kuten tuulettimien ja pumppujen sähkönsyöttö tapahtuu kahta eri reittiä. Jakeluverkko tulee jakaa sopiviin osiin, jotka tarvittaessa voidaan tehdä jännitteettömiksi. Maanalaisessa tunnelissa ja kaivoksessa muuntamo sijoitetaan vähintään 25 metrin etäisyydelle kuilusta, ruokapaikoista, korjaamoista ja sekä muista vastaavista kohteista. Muuntamot ja jakokeskukset tulee sijoittaa kallioon louhittuun erilliseen syvennykseen tai muuhun suojaiseen paikkaan./2/

Kaivoksen maanpäällistä osaa voidaan käsitellä, kuten normaalia teollisuusverkon sähköjakelua. Teollisuusverkon erityispiirteinä voidaan pitää suuria oikosulkuvirtoja, tehontarpeen keskittyessä pienelle alueelle teollisuudessa käytetään isoja muuntajia monen pienen muuntajan sijaan. Ison muuntajan hinta siirrettävään tehoon nähden tulee halvemmaksi kuin monta pientä muuntajaa.

Käyttöjakelujärjestelmä voidaan jakaa tuotannon sähköjakeluun, valaistus- ja huoltosähköverkkoon sekä apusähköjärjestelmään. Tuotannossa suurin tehontarve on moottoreilla. Yleisin jännite pienissä ja keskisuurissa teollisuuslaitoksissa on 690 V. Tärkeimmät jännitteen valintaan vaikuttavat tekijät ovat huipputeho, suurimpien moottoreiden teho, alueen laajuus ja jakelumuuntajan oikosulkuteho. Suurimmilla moottoreilla käynnistyksestä aiheutuva jännitteenalenema ei saa vaikuttaa muihin verkon laitteisiin haitallisesti. Valaistus- ja huoltosähköverkon jännitteinä käytetään 400 V. Apusähköjärjestelmään kuuluu ohjaus- ja automaatiojär-

jestelmien sähkönsyöttö. Kuvassa 1 on esitetty Sotkamon kaivoksen suunniteltu sähkönjakelun pääkaavio.



**Kuva 1.** Kaivoksen sähkönjakelun pääkaavio.

Sotkamo Silver Oy:n Sotkamon kaivoksen sähkönjakelu on toteutettu siten, että sähkönsyöttö tapahtuu UPM:n voimalaitokselta Katernasta 10/110 kV:n- muuntajalla jonka jälkeen on 110/45 kV:n 10 MVA:n -muuntajalta, 45 kV:n syöttö kaivoksen päämuuntajalle tapahtuu PIGEON avolinjalla 22 kilometrin päässä olevalle kaivokselle. Kaivoksen päämuuntajana on 45/20kV 10 MVA -muuntaja, josta lähtee syöttö maanpäälliselle avolouhokselle.

Maanalaiselle kaivoksen osalle on suunniteltu liikuteltava konttimuuntaja 20/0,69 kV, jotta sitä voidaan siirtää syvemmälle kaivokseen tarpeen vaatiessa. Konttimuuntajalta syötetään 690 V jännitteellä kaivosporakoneita ja puhaltimia. Konttimuuntajan perässä on myös 690/400 V:n muuntaja valaistukselle ja muille yksi-

vaiheisille koneille. Maanpäälliselle rikastamolle tulee 20/0,69 kV 3,15 MVA-muuntaja, joka toimii myös murskaamon muuntajana, muuntajalta on lähdöt taa-juusmuuttaja käytöille, suorille käytöille ja 690/400 V jännitemuuntajalle. Maanpäällistä sähkönjakelu toteutetaan 20/0,4 kV:n muuntajalla. Maanpäällisille pumppuasemille on omat 20/0,69 kV muuntajansa.

### **2.3 Sähkölaitteisto**

Tunneliin asennettavien sähkölaitteiden on oltava mekaanista rasitusta kestäviä ja korrosiiviseen ympäristöön suunniteltuja. Laitteiden on toimittava luotettavasti jännitteen vaihdellessa 1-10 % nimellisjännitteestä. Enintään 2,3 m:n korkeuteen asennettavissa valaisimissa täytyy olla mekaaninen lisäsuoja./2/

### **2.4 Suositellut jännitetasot**

Yleensä suurin sallittu jännitetaso jakelujännitteellä on 20 kV. Kaivoksen maanalaisessa osassa suurin käyttöjännite on 1000 V ja avolouhoksissa 3000 V. Kiinteiden laitteiden käyttöjännitteeksi sallitaan 6000 V. Turvatekniikan keskuksen luvalla voidaan käyttää suurempia jännitetasoja, mikäli jännitetason nosto ei aiheuta vaaraa henkilöille tai laitteistoille./2/

### **2.5 Johdot ja kaapelit**

Maanalaisessa tunnelissa ja kaivoksessa saa käyttää yleensä vain märkään tilaan sallittuja johtolajeja standardissa SFS 6000-8-52 mainituin seuraavin poikkeuksin. Kaapeleiden rakenteen ja sijainnin täytyy olla sellainen, että kaapeli kestää kosteuden, korroosion, työkoneiden aiheuttamat kolhaisut, räjäytyksistä aiheutuvat paineaallot ja lentävät kivet. Maadoitusjohtimena ja erillisenä suojajohtimena ei saa käyttää alumiinijohdinta. Paremman paloturvallisuuden vuoksi olisi suositeltavaa käyttää HF -kaapeleita, halogen free eli halogeeniton kaapeli. /2/

Yleensä kaapelien vaippa on PVC-muovia, joka on huonosti syttyvää mutta, joka palaessaan muodostaa mm. vetykloridia ja josta ilman kosteuden kanssa muodostuu suolahappoa, joka höyrystyy kuumuudessa. Lisäksi PVC-muovi muodostaa palaessaan paljon mustaa savua. PVC-muovi ei ole itsessään paloa levittävää ma-

teriaalia mutta savun tuotto ja myrkylliset kaasut tekevät siitä vaarallisen tulipalon syttyessä suljetussa tilassa. HF-kaapelit ovat halogeenittomia kaapeleita, jotka eivät palaessaan muodosta mustaa savua tai vaarallisia palokaasuja ja ne myös rajoittavat palamista. Halogeenittomat kaapelit vähentävät henkilövahinkojen riskiä tulipalon sattuessa. Elintärkeät toiminnot esimerkiksi kaivoksen tuulettimien ja poistumisteiden valaistusasennukset on hyvä tehdä FRHF-etuliitteen omaavilla kaapeleilla. Tällöin tulipalon sattuessa kaivoksen tuulettimet ja valaistus pysyvät toimintakykyisenä tulipalon aikana. FRHF tulee sanoista Fire Resistant Halogen Free, joka tarkoittaa palonkestävää halogeenitonta kaapelia. FRHF- kaapeleiden pitää läpäistä standardin EN 60332-3 mukaiset polttokokeet, jossa mineraalieristeisten ja keraamisesti suojattujen kaapeleiden pitää kestää 90 minuuttia maksimissaan + 1000 °C asteen lämpötilaa ja silikonipohjaisten kaapeleiden 30 minuuttia. Suunnitteluvaiheessa pitää muistaa, ettei palonkestäviä kaapeleita sijoiteta vierekkäin palavien kaapeleiden kanssa, vaan kaapelit täytyy erottaa tarpeellisella välimatkalla tai väliseinän avulla, kaapelihyllyjen täytyy myös olla palonkestäviä.

### **2.5.1 Kaapelin mitoitus**

Kaapelin mitoituksessa täytyy ottaa huomioon maanalaisissa kaivoksissa olevan ilman lämpötila. Lämmittämättömissä tiloissa ilma pysyy suhteellisen tasaisena, noin +7 celsiusasteessa aina 400 m:n syvyyteen asti, syvemmälle mennessä ilma lämpiää n. +1 °C/100 m. /2/

Yleisiä kaapelin mitoituksessa huomioon otettavia asioita ovat ympäristön lämpötila ja lämmönjohtokyky, muiden lähietäisyydellä olevien sähkö- ja lämpöjohtojen lämmittävä vaikutus, ilman rajoitettu liike johtokanavassa tai kuilussa. Myös maan lämpöresistiivisyys vaikuttaa maahan haudatuissa kaapeleissa ja se saattaa vaihdella eri vuodenaikoina samallakin kohdalla maaperän kosteuden muuttuessa.

Kaapelin mitoituksessa lähdetään liikkeelle laitteen vaatimasta kuormitusvirrasta, minkä avulla katsotaan suojalaite joko yhtä suurelle tai suuremmalle virralle kuin laitteen kuormitusvirta. Suojalaitteen kuormitusvirran täytyy vastata kaapelin



kuormitusvirtaa. Suojalaitteen kuormitusvirta jaetaan korjauskertoimilla, jotka riippuvat asennusolosuhteista. Asennusolosuhteita vastaavat korjauskertoimet löytyvät SFS6000-5-52-standardista. Viimeisenä selvitetään johtimen poikkipinta-ala, jonka voi selvittää kuormitustaulukosta SFS-standardista kohdasta 6000-5-52.

### 3 JÄNNITTEEN VAIKUTUS SÄHKÖNJAKELUSSA

Jännitteen valinnalla on iso vaikutus tehon siirrossa. Korkeammalla jännitteellä voidaan siirtää suurempia tehoja pienemmillä häviöillä pitemmän matkaa kuin pienemmällä jännitteellä.

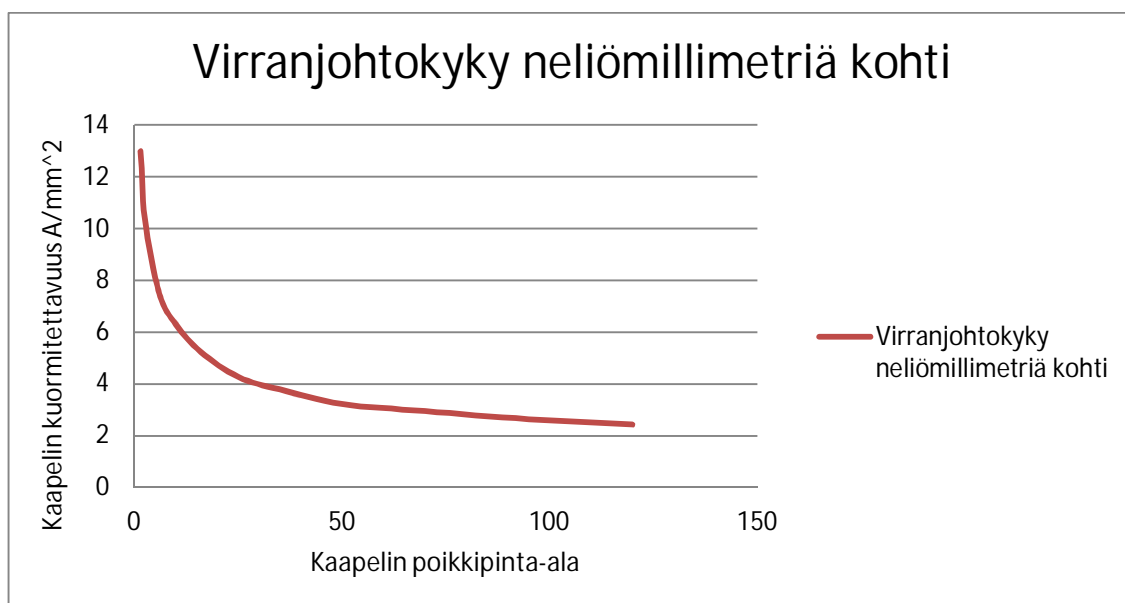
#### 3.1 Jännitteen vaikutus kaapelointikustannuksiin

Tehon pysyessä samana, jännite vaikuttaa lineaarisesti virran suuruuteen, mikä taas vaikuttaa kaapelin poikkipinta-alaan. Kaapelin poikkipinta-ala ei korreloi kuitenkaan suoraan kaapelin virrankestoisuuteen lämpenemän takia. Virta aiheuttaa kaapelin lämpenemisen, josta tulee tehohäviötä. Ohuempi kaapeli jäähtyy paremmin, joten virran kestoisuus neliömillimetrillä on sillä parempi kuin paksulla kaapelilla. Jännitteen tiputtaminen 690 V jännitteestä 400 V jännitteeseen tuplaa kaapelien poikkipinta-alan tarpeen suurilla kuormilla. Pienempi poikkipinta-alaisella kaapelilla on parempi hyötysuhde, kuin suuremmilla, siksi kannattaa harkita suuremman kaapelin korvaamista useammalla pienemmällä kaapelilla.

Taulukossa 1 näkyy pienjännitekaapelin kuormitettavuus asennustavalla E, monijohdinkaapeli ilma-asennuksena. Pienillä kaapeleilla virran tiheys on yli 10 A/mm<sup>2</sup>, 50 mm<sup>2</sup> kaapelin virranjohtokyky on kasvanut vain 51 % 25 mm<sup>2</sup> kaapeliin nähden. 140 mm<sup>2</sup> ja sitä paksummissa kaapeleissa virta neliömillimetrillä pysyy noin 2 A/mm<sup>2</sup> paikkeilla. Tästä johtuen pienempi kaapeli on virrantiheydeltään parempi ja yhden ison kaapelin sijaan saattaa olla parempi laittaa monta pienempää kaapelia.

**Taulukko 1.** Kaapelin virtakestoisuus /1/

kupari	E
1,5	19,5
2,5	26
6	45
10	63
16	84
25	107
35	133
50	162
70	207
95	252
120	292
150	338
185	385
240	455
300	526

**Kuva 2.** Johtimen kuormitettavuus, ampeeria neliömillimetrillä kaapelin poikkipinta-alaan nähden.

### 3.2 Jännitteen vaikutus kaapelin valintaan

Seuraavassa taulukossa on esitettyä moottorin ottama virta sekä alumiini- ja kupari syöttökaapelit 400 V:n ja 690 V:n jännitteellä. Halogeenittoman eli HF-kaapelin mcmk:n ja amcmk:n sähköiset arvot vastaavat taulukon virta-arvoja. Taulukossa 2 on käytetty tehokertoimena arvoa 0,8 ja hyötysuhteena 95 %. Virrat

$$\text{on laskettu kaavalla } I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} \quad (1)$$

**Taulukko 2.** Moottorin verkosta ottama virta ja syöttökaapelit 400 V:n ja 690 V:n jännitteellä.

Moottori teho P/kW	Virta 400V I/A	Kaapeli MCMK mm <sup>2</sup>	Kaapeli AMCMK mm <sup>2</sup>	Virta 690V I/A	Kaapeli MCMK mm <sup>2</sup>	Kaapeli AMCMK mm <sup>2</sup>
1,5	2,8	3*1,5		1,7	3*1,5	
3	5,7	3*1,5		3,3	3*1,5	
7,5	14,2	3*1,5		8,3	3*1,5	
15	28,5	3*2,5		16,5	3*1,5	
22	41,8	3*2,5		24,2	3*2,5	
30	57,0	3*10	3*25	33,0	3*6	
37	70,3	3*16	3*25	40,7	3*6	
45	85,5	3*25	3*35	49,5	3*10	3*25
55	104,5	3*25	3*50	60,6	3*10	3*25
75	142,4	3*50	3*70	82,6	3*16	3*35
90	170,9	3*70	3*95	99,1	3*25	3*35
110	208,9	3*95	3*120	121,1	3*35	3*50
132	250,7	3*120	3*150	145,3	3*50	3*70
160	303,9	3*150	3*240	176,2	3*70	3*95
200	379,8	3*185	3*300	220,2	3*95	3*150

Pienillä tehoilla jännitteellä ei juuri ole vaikutusta, vaan pieninkin saatavilla oleva kaapeli riittää tehon siirtämiseen.

### 3.3 Jännitteen vaikutus suojalaitteiden valintaan

Jännitettä laskettaessa katkaisijan katkaisukyky kasvaa huomattavasti. tavallisella kompaktikatkaisijalla katkaisukyky saattaa olla 100 kA/400 V ja 25 kA/690 V, joten samat suojalaitteet, jotka ovat valittuna 690 V:n jännitteelle, voivat hyvinkin sopia 400 V:n jännitteellä, vaikka oikosulkuvirrat nousevat.

### 3.4 Tehon siirto

Tehon pysyessä samana, kun jännitettä lasketaan, virta kasvaa, mikä lisää tehon siirrossa häviöitä, virtalämpöhäviöinä ja loistehohäviöinä.

### 3.5 Oikosulkulaskelmat

Oikosulkuvirrat kasvavat jännitettä pienennettäessä ja laitteiden täytyy kestää suurempaa oikosulkuvirtaa, joka saattaa nostaa laitteiden hankintahintaa. Myös muuntajien koon kasvattaminen nostaa oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirtaa voidaan rajoittaa jakamalla kulutusta eri keskuksiin, joita erilliset muuntajat syöttävät. Pienjännitteellä myös syöttökaapelin impedanssi saattaa pienentää huomattavasti oikosulkuvirtaa. Pienjännitteellä pidetään muuntajien maksimikokona yleensä 4 MVA/690 V ja 2,5 MVA/400 V, joka johtaa karkeasti noin 50 kA:n oikosulkuvirtaan. /3/

#### 3.5.1 Terminen oikosulkukestoisuus

Relesuojauksella voidaan vaikuttaa oikosulkuvirran kestoon ja siten vaikuttaa oikosulkuvirran ja valokaaren lämpövaikutuksiin laitteessa. Lämpövaikutukset riippuvat oikosulkuvirran suuruudesta ja kestosta. Yleensä terminen oikosulkuvirran arvo ilmoitetaan virran tehollisarvona 1 sekunnin aikana, minkä laite kestää tuhoutumatta. /3/

#### 3.5.2 Dynaaminen oikosulkukestoisuus

Dynaamisen eli hetkellisen oikosulkuvirran voimavaikutus riippuu sysäysoikosulkuvirran suuruudesta. Sysäysoikosulkuvirta aiheuttaa mekaanista rasitusta laitteelle ja se ilmoitetaan laitteessa dynaamisen rajavirran avulla. Dynaamista vaikutusta voidaan vähentää oikosulkuvirtaa pienentämällä. Sulake toimii suurilla oikosulkuvirroilla tehokkaasti huippuarvon rajoittajana. Sulakkeen katkaisukyky on yleensä aina 100 kA:iin saakka. /3/

Moottorilähdöissä käytetään usein aM-sulakkeita. Moottoreiden käynnistysvirran noustessa jopa viisinkertaiseksi normaalikäyttöön nähden gG-sulakkeet saattaisi-

vat keritä palamaan käynnistyksen aikana. AM-sulakkeet rajoittavat oikosulkuvirtaa lähes yhtä hyvin kuin gG-sulakkeet mutta niitä ei voida käyttää ylikuormitusuojana. Moottorilähdöissä käytetään aM-sulaketta oikosulkusuojana ja erillistä ylikuormitussuojausta. /3/

Sulakkeiden katkaisukyky oikosulussa muuttuu jännitteen mukaan, esimerkiksi ABB:n kahvasulakkeet on testattu 500 V jännitteellä taulukossa 3 näkyvillä oikosulkuarvoilla. Taulukoissa on ABB:n aM-kahvasulakkeiden oikosulkukestoisuudet ja nimellisvirrat IEC-kokoluokituksen mukaan.

Taulukosta 4 huomaamme, että pienemmän koon sulakkeilla päästään korkeampaan nimellisvirta- alueeseen 400 V jännitteellä (500 V tulokset voidaan lukea 400 V jännitteelle).

**Taulukko 3.** aM-kahvasulakkeiden oikosulkuvirran katkaisukyky 500 V ja 690 V jännitteillä. /8/

IEC-koko			000...3	4	5
Katkaisukyky	500VAC	kA	120	120	120
	690VAC	kA	80	160	160

**Taulukko 4.** Kahvasulakkeiden koot ja nimellisvirta alueet IEC-kokojen mukaan.  
/8/

IEC-koko		000	00	0	1	2	3	4	5
Nimellisvirta-alue	500V	2...	100	6...	16...	35...	250...	400...	1250...
	AC	100	...	200	315	500	800	1250	1600
	690V		2...		50...	125...	250...	500...	1250...
	AC		160		250	400	500	1000	1600

### 3.6 Jännitteenalenema

Jännitteen pienentyessä mahdolliset siirtomatkat lyhentyvät. Jännitteenalenema johtuu verkon komponenttien impedanssista. Jännitteenalenemana tarkoitetaan yleensä suhteellista jännitteen alenemaa, joka ilmaistaan prosentuaalisena arvona jännitteen syötön ja syötettävän laitteen välillä. Teollisuuslaitoksissa ei vaadita noudatettavaksi yleisiä sähkönjakeluverkon sähkön laatustandardeja. Yleensä pyritään teollisuuslaitoksen omassakin verkossa vähintään samoihin sähkön laadun tavoitteisiin tai häiriöttömän käytön saavuttamiseksi joudutaan noudattamaan korkeampia laatuvaatimuksia. Jännitteen alenemaan vaikuttaa pääosin siirtomatkan pituus, siirrettävän tehon suuruus ja verkon rakenne. Verkon vaiheiden kuormitus tulisi tasapainottaa, jottei verkon epäsymmetria aiheuttaisi johonkin vaiheeseen liian suurta jännitteenalenemaa. Teollisuusverkossa epäsymmetria ei ole suuri ongelma, koska suurimman kuorman verkkoon aiheuttavat kolmivaiheiset moottorit, jotka kuormittavat verkkoa symmetrisesti. /3/

Pienjännitteisessä verkossa jännitteen vaihteluvälinä moottorikeskuksissa pidetään  $U_n \pm 3\%$  ja valaistuskeskuksessa  $\pm 4\%$ , koska lamppujen hyötysuhde ja elinikä on hyvin riippuvainen jännitteestä. Moottorin käynnistyksessä tapahtuvan dynaamisen jännitteen aleneman rajana pidetään yleensä  $10\%$ . Normaalisissa käyttötilanteissa jännitteenalenema voidaan pitää kurissa mitoittamalla kaapelin poikki-

pinta-alat sopivaksi ja kompensoimalla loisteho. Loistehon kompensoinnin merkitys näkyy likimääräisestä jännitteenalenemayhtälöstä:

$$P = \sqrt{3}U_2 I \cos\varphi \rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3}U_2 \cos\varphi} \quad (2)$$

$$\Delta U = RI \cos\varphi + XI \sin\varphi = RI_p + XI_q \quad (3)$$

- $I_p$  = pätövirta
- $I_q$  = loisvirta
- $R$  = resistanssi
- $X$  = reaktanssi
- $\Delta U$  = jännitteen muutos

Koska reaktanssi  $X$  on monin verroin resistanssia  $R$  suurempi, aiheuttaa virran loiskomponentti suuren jännitteenaleneman. /3/

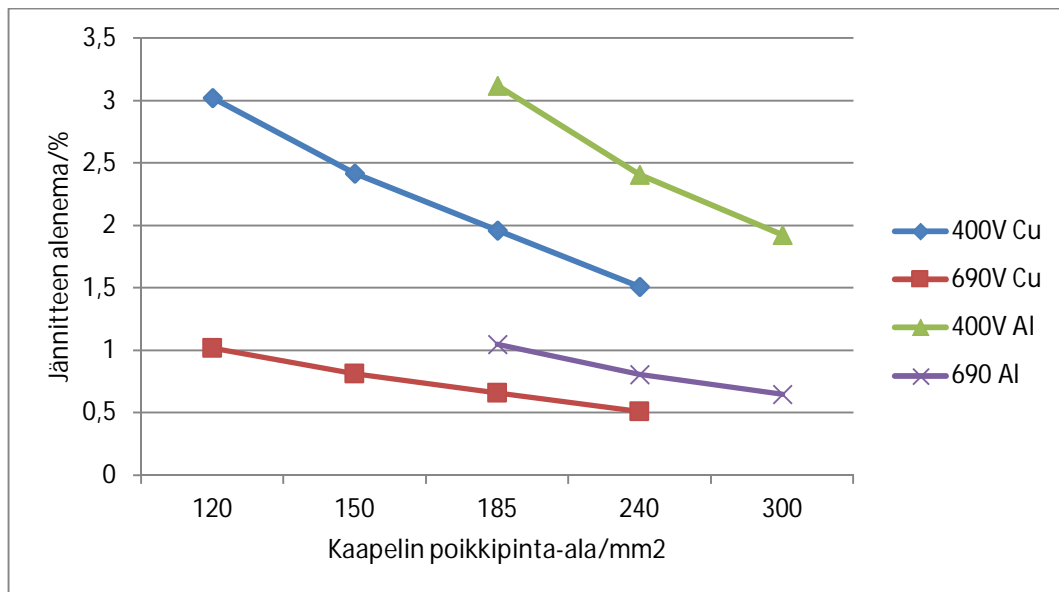
Kuvassa 3 on laskettu jännitteen alenemaa 132 kW kuormalla, 200 metrin pituisillä kaapeleilla. Laskemiseen on käytetty kaavaa:

$$\Delta U = 100 * \frac{\rho * P * s}{A * U^2} \quad (4)$$

- $\Delta U$  = jännitteenalenema (%)
- $A$  = kaapelin poikkipinta-ala ( $\text{mm}^2$ )
- $U$  = jännite (V)
- $\rho$  = johdinaineen resistiivisyys ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )
- $P$  = moottorin pätöteho (W)
- $s$  = johdon maksimi pituus

Pienimmillä johtotyypeillä ollaan jännitteenalenemassa melko maksimirajoilla mutta sitä saadaan tehokkaasti tiputettua kasvattamalla johdon poikkipinta-alaa.

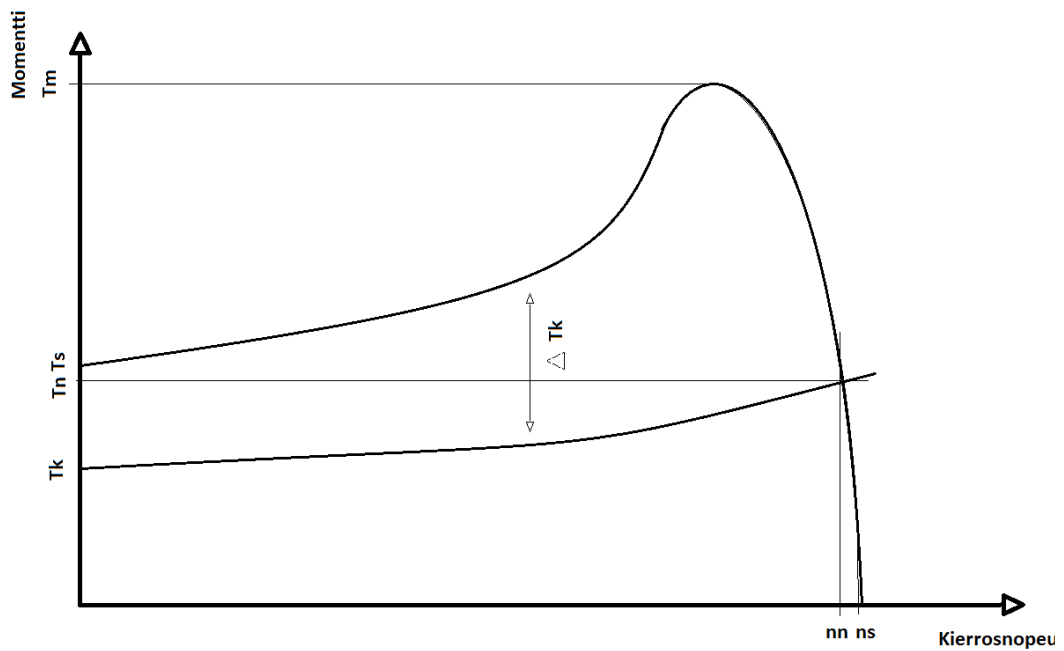




**Kuva 3** Jännitteenalenema kupari- ja alumiinikaapeleilla 400 V ja 690 V.

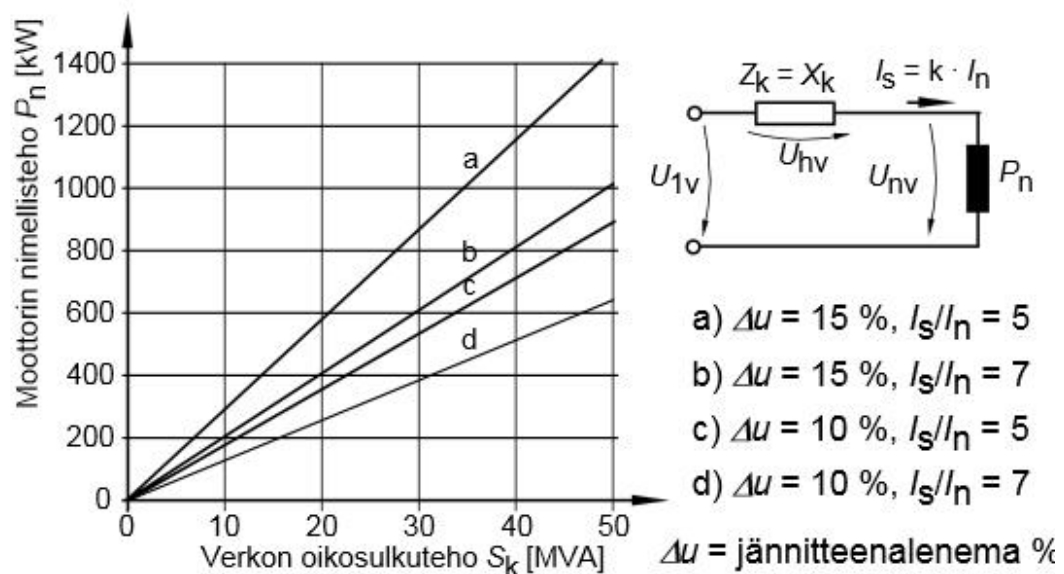
### 3.7 Jännitteen vaikutus momenttiin

Momentti on kääntäen verrannollinen jännitteen neliöön, tämä tulee ottaa huomioon erityisesti moottorin käynnistyksessä. Etenkin suorassa moottorikäynnistyksessä käynnistysvirta on suuri, mikä laskee jännitettä. Jos jännite laskee liikaa, moottorin momentti ei ylitä vastamomenttia ja moottori ei lähde käyntiin.



**Kuva 4.** Momentti ja vastamomentti kierrosnopeuteen nähden.

Kuvassa 4 näkyy  $T_s$  käynnistysmomentti,  $T_k$  vastamomentti eli kuorman aiheuttama momentti, niiden erotus  $\Delta T_k$  on kiihdyttävä momentti ja  $T_m$  on maksimi momentti jonka moottori ottaa kiihdytyksessä. Vastamomentin ja käynnistysmomentin kohdatessa moottori on saavuttanut nimellisnopeutensa,  $n_s$  on synkroninopeus, jonka moottori saavuttaisi ilman jättämää. Virta seuraa käynnistysmomentin käyrää. /12/



**Kuva 5.** Jänniteenalenema moottorin nimellistehon ja verkon oikosulkutehon suhteen. /12/

Jänniteenalenema riippuu verkon oikosulkutehosta ja moottorin oikosulkuvirrasta. Kuvasta 5 näkyy verkon oikosulkuteho verrattuna moottorin maksimi nimellistehoon. Jos verkon oikosulkuteho oletetaan 30 MVA:ksi ja jänniteenalenema halutaan rajoittaa 10 %, käynnistettävän moottorin enimmäisteho olisi viisinkertaisella käynnistysvirralla noin 520 kW ja seitsemänkertaisella käynnistysvirralla noin 400 kW. /12/

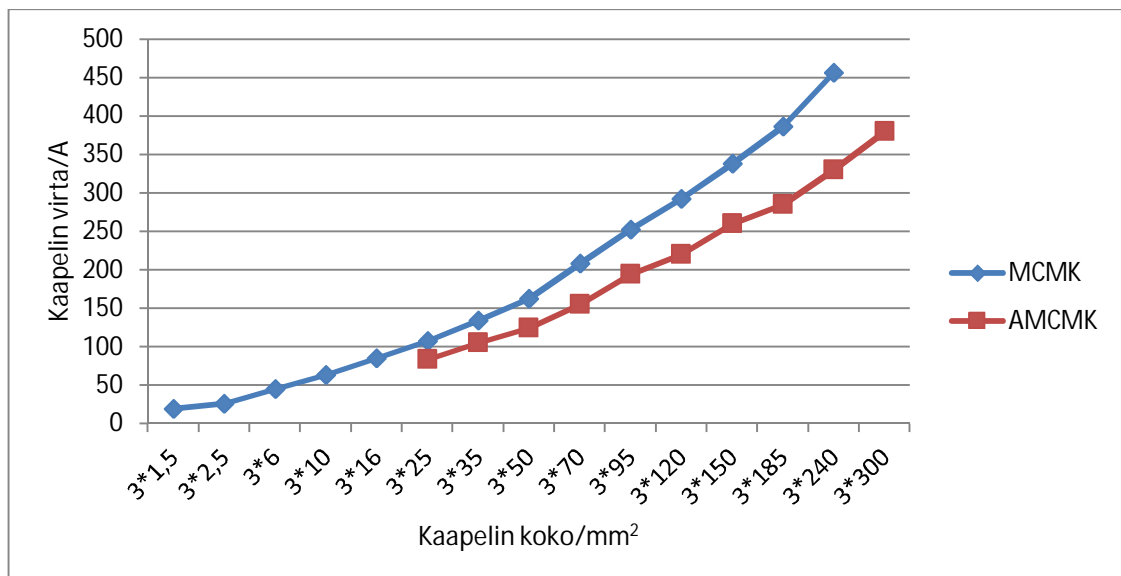
## 4 KUPARI- JA ALUMIINIKAPELEIDEN VERTAILU

### 4.1 Kaapelityypit

Yleisimmät teollisuuden sähköasennuksissa ABB:lla käytetyt kaapelit ovat kuparikaapeli MCMK ja alumiinikaapeli AMCMK, jotka soveltuvat kiinteisiin asennuksiin sisä- ja ulkotiloissa myös maahan laskettuna. Kaapeleita voidaan käyttää myös asennettuna rakenteisiin esimerkiksi suoraan betonivaluun.

### 4.2 Kaapelimateriaalin vaikutus kaapeleiden ominaisuuksiin

Alumiinikaapelilla päästään noin 75 %:in samankokoisen kuparikaapelin nimellisvirrasta. Samaan nimellisvirtaan pääsemiseksi käytetään paksumpaa kaapelia tai useampaa ohuempaa kaapelia. Aivan pienillä virroilla käytetään yleensä vain kuparikaapeleita. Kuvasta 6 nähdään markkinoilla olevien kupari- ja alumiinikaapeleiden nimellisvirrat.

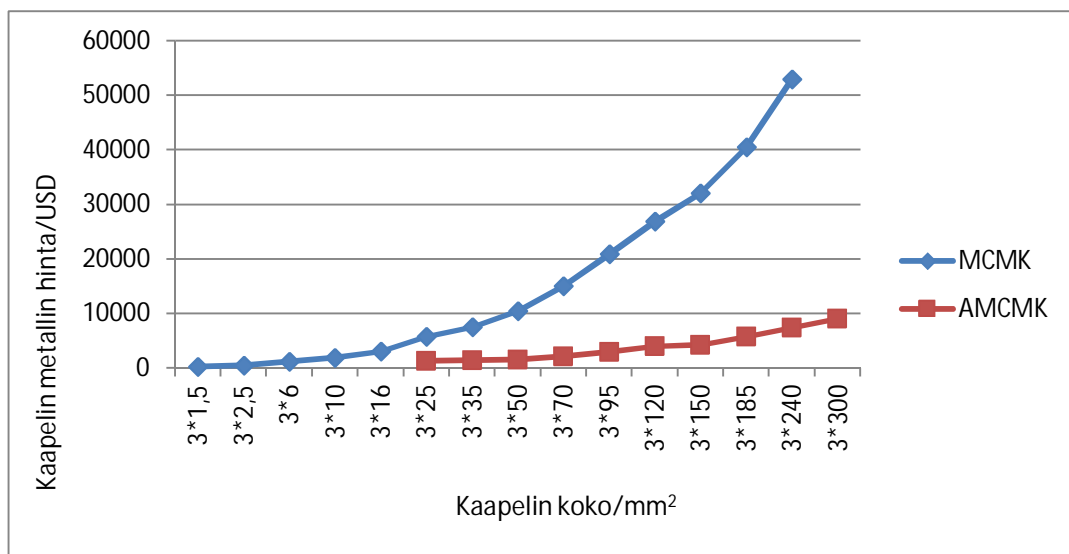


**Kuva 6** Kupari- ja alumiinikaapelin nimellisvirta poikkipinta-alaan nähden.

### 4.3 Kuparin ja alumiinin hintavertailu

Kuparin hinta on moninkertaistunut 2000-luvun aikana, tällä hetkellä kuparin hinta on noin 7200 USD tonnilta ja tulevaisuudessa hinta tulee nousemaan teollisuuden suuren kysynnän vuoksi ja tarjonnan kasvun hidastumisen takia. Alumiinin

hintakehitys on ollut paljon maltillisempaa ja sen hinta on ”vain” kaksinkertaistunut 2000 luvulla. Kuvassa 7 näkyy MCMK ja AMCMK kaapeleiden metallin hinnat. Laskelmiin on otettu vain kaapeliin tarvittavan metallin määrä tämän hetkisen kuparin ja alumiinin maailmanmarkkinahinnan mukaan. MCMK:ssa on hintaan laskettu 3 vaihetta ja PEN kuparista, AMCMK:ssa 3-vaihetta alumiinista ja kuparinen PEN eli yhdistetty suojamaa- ja nollajohdin. Kuten kuvasta 7 näkyy mitä isommasta kaapelista on kyse, sitä isommaksi hintaero kertaantuu.



**Kuva 7** Kupari- ja alumiinikaapelin metallien hinnat 1 km pituisella kaapelilla.

## 5 JÄNNITETASOJEN VERTAILU

### 5.1 Jakeluverkon toteutus 400 voltin jännitteellä

### 5.2 Oikosulkulaskelmat

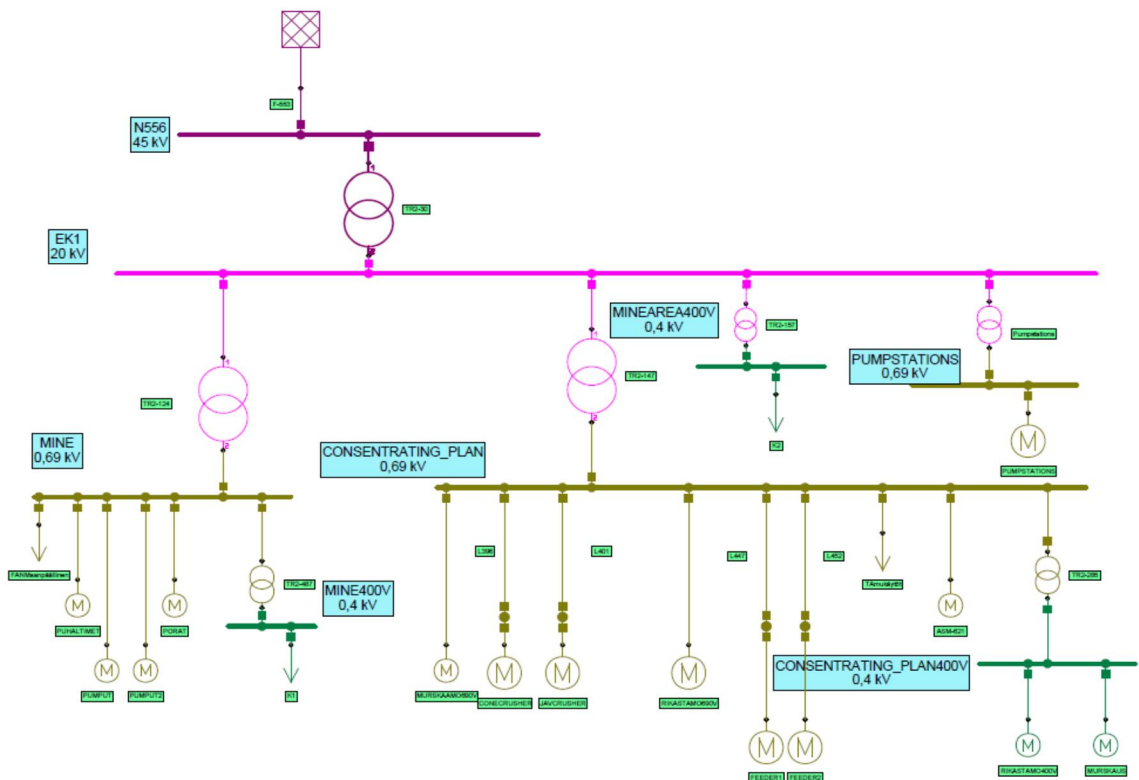
Sähköverkon kaikkien osien on kestettävä oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset vaikutukset. Niiden suuruuden määrittämiseksi täytyy tietää oikosulkuvirtojen suuruus verkon eri osissa.

Oikosulkulaskelmien tarkoituksena on tarkastella verkon oikosulkuvirtojen kasvua laskettaessa jakelujännite 690 V jännitteestä 400 V jännitteeseen. Rajoittavia tekijöitä oikosulkuvirralla ovat muuntajat, kaapelit ja taustaverkko. Taajuusmuuttajilla käytettävät moottorit eivät nosta merkittävästi kokonaisuikosulkuvirtaa ja ne on laskelmissa kuvattu kuormana.

Oikosulkulaskenta toteutetaan NEPLAN-verkostolaskentaohjelmalla. Muuntajat on mitoitettu jo valmiiksi laskettujen, kuormitusluettelosta saatujen maksimikuormitusten mukaan. Muuntajien tiedot on otettu ABB:n TTT-käsikirjasta. Eräisiin isoihin moottoreihin on valittu ABB:n moottorit katalogista ja niihin on mitoitettu kaapelit. Pienemmät moottorit on kuvattuna ekvivalenttimoottorina ja arvot niihin on saatu IEC-standardista. Kaapelit mitoitetaan kuormitettavuuden mukaan, asennuksista johtuva kaapelin korjauskerroin C oletetaan olevan 0,75 (vapaaasti ilmassa), tapauksissa, joissa ei voitu käyttää ABB:n kojevalinta taulukoita. Verkon kuormituksenä pidettiin 80 % maksimikuormasta, joka vastaa teollisuudessa melko hyvin todellista tilannetta.

Kuvasta 8 voidaan nähdä koko Neplanilla mallinnettu 400 voltin ja 690 voltin verkko. Ylimpänä kuvassa näkyy 45 kV:n verkko sekä taustaverkko mihin on laskettuna 20 km avojohto, 45/110 kV:n muuntaja sekä voimalaitos joka sijaitsee Katernassa. Ylimpänä muuntajana kuvassa näkyy kaivoksen päämuuntaja T1 45/20 kV 10 MVA ja sen alapuolella 20 kV:n taso EK1. Vasemmalla näkyy maanalaisen kaivoksen (MINE) 20/0,69 kV 1 MVA:n -konttimuuntaja, seuraava-

na on rikastamon (CONCENTRATING\_PLAN) 20/0,69 kV 3,15 MVA:n muuntaja, kaivosalueen (MINE\_AREA) 20/0,4 kV 0,315 MVA:n -muuntaja sekä pumpuasemille (PUMPSTATIONS) 20/0,69 kV 0,2 MVA:n -muuntaja. Maanalaiseen kaivokseen on kuvattu erikseen suurimmat kuluttajat eli porakoneet ja pumput, sekä pieni 690/400 V muuntaja valaistukselle sekä yksivaiheisille sähkölaitteille. Rikastamolla on erikseen kuvattuna suuret murskaamon sähkömoottorit (JAV-CRUSHING ja CONE-CRUSHING), sekä pitkien kaapeleiden päässä olevat pumput (FEEDER 1 ja FEEDER 2). Rikastamon alapuolinen muuntaja (CONCENTRATING\_PLAN400V) on valaistukselle ja yksivaiheisille sähkölaitteille. Loput sähkön kuluttajat on kuvattuna ekvivalentti moottoreina tai resistiivisinä kuormina.



**Kuva 8** Neplanilla tehty 400/690 V jakeluverkko.

Verkon oikosulkukestoisuutta tarkasteltiin aiheuttamalla mahdollisimman suuria oikosulkuvirtoja eli tekemällä 3-vaiheisia oikosulkuja verkon eri osiin. Vikapaikat

ovat muuntajien alajännitepuolella. Taulukosta 5 nähdään oikosulkuvirrat eri vi-  
kapaikoissa 400/690 voltin verkossa kilo ampeereina.

**Taulukko 5.** Oikosulkuvirrat 400 V ja 690 V verkossa.

Vika paikka	EK1	MINE	MINE400V	CONCENTRATING	CONCENTRATING	MINE	PUMP
				_PLAN	_PLAN400V	AREA	STATIONS
$I_p/kA$	3,75	35,73	2,86	62,55	8,30	19,10	4,64
$I_{th}/kA$	1,75	15,33	1,83	26,13	4,53	9,85	2,47
$I_k/kA$	1,45	11,64	1,78	19,00	3,64	9,49	2,14
$I_k''/kA$	1,92	17,46	1,83	30,38	4,51	9,79	2,68

- $I_k''$  = alkuoikosulkuvirta
- $I_p$  = Sysäysoikosulkuvirta
- $I_k$  = Pysyvä oikosulkuvirta
- $I_{th} = 1$  s Terminen oikosulkukestoisuus

Verkon oikosulkuvirrat pysyvät melko maltillisina, näissä laskelmissa on py-  
rittä siihen, että pysyvä tai terminen oikosulkuvirta ei nousisi yli 50 kA:n tai  
sysäysoikosulkuvirta yli 105 kA:n, koska se nostaa kojeistojen kestovaatimuk-  
sia ja hintaa. Rikastamon muuntajalla syötetään myös murskaamon laitteita ja  
siten se näkyy suhteellisen suurina oikosulkuvirtoina. Sysäysoikosulkuvirran  
suuruus suhteessa pysyvän oikosulkuvirran suuruuteen selittyy suurella mää-  
rällä oikosulkumoottoreita. Oikosulun syntyhetkellä epätahtikoneet, joita on  
verkossa paljon, syöttävät verkkoa hetken, mikä nostaa sysäysoikosulkuvirtaa.

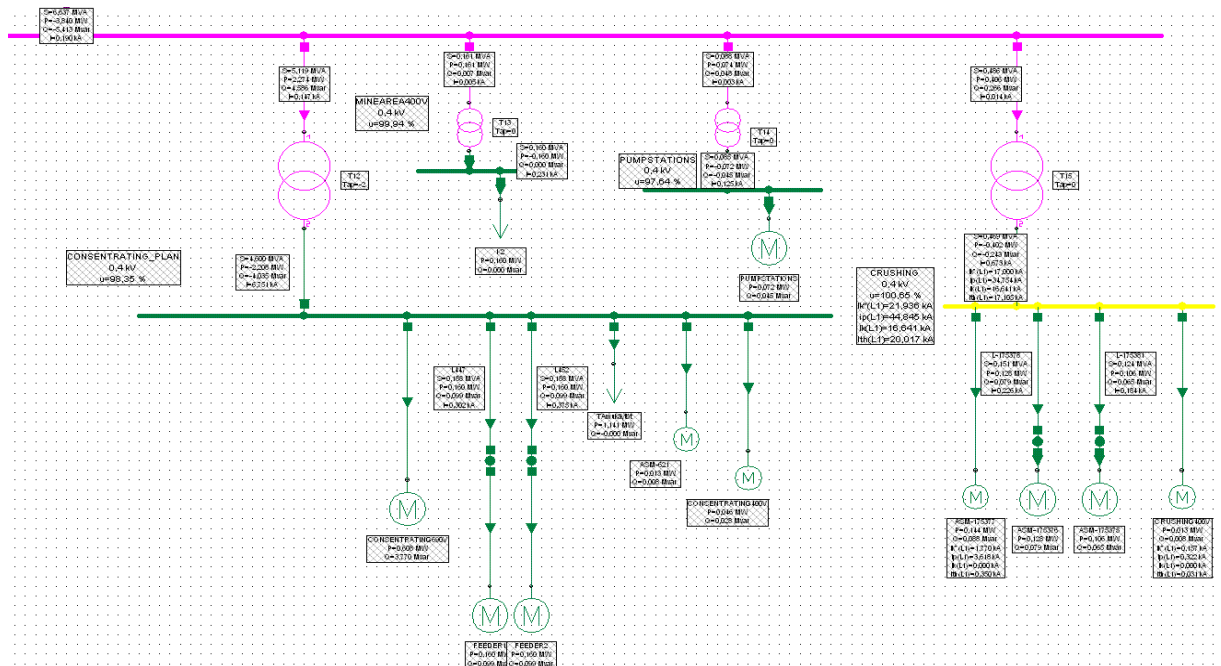
**Taulukko 6** Oikosulkuvirrat 400 voltin jännitteellä.

Vika paikka	EK1	MINE	CONCENTRATING _PLAN	MINEAREA 400V	PUMP STATIONS
$I_p/kA$	3,577	65	109	19,01	7,99
$I_{th}/kA$	1,674	28,07	46,242	9,795	4,25
$I_k/kA$	1,412	21,69	35,257	9,45	3,68
$I_k''/kA$	1,827	31,716	52,55	9,74	4,6

Neplan-mallissa jakeluverkko pelkästään 400 V jännitteellä on toteutettu siten,  
että muuntajat vaihdettiin 20 kV/690V muuntajista 20kV/400V muuntajiin ja yli-  
määräisiksi jääneet 400 V jännitemuuntajat voitiin ottaa pois. Moottorien oletet-



tiin pysyvän samoina kytkentää muuttamalla. Muuten laitoksen oikosulkuvirrat pysyvät hyvällä tasolla mutta rikastamon oikosulkuvirrat nousevat suuriksi muuntaja ollessa 3,15 MVA -muuntaja, kuten taulukosta 6 voidaan nähdä, sysäys-oikosulkuvirta nousee yli tavoitearvon 105 kA. Tähän ratkaisuksi voidaan harkita laitettavaksi rikastamolle ja murskaamolle omat muuntajat tai nostetaan muuntajan impedanssia.

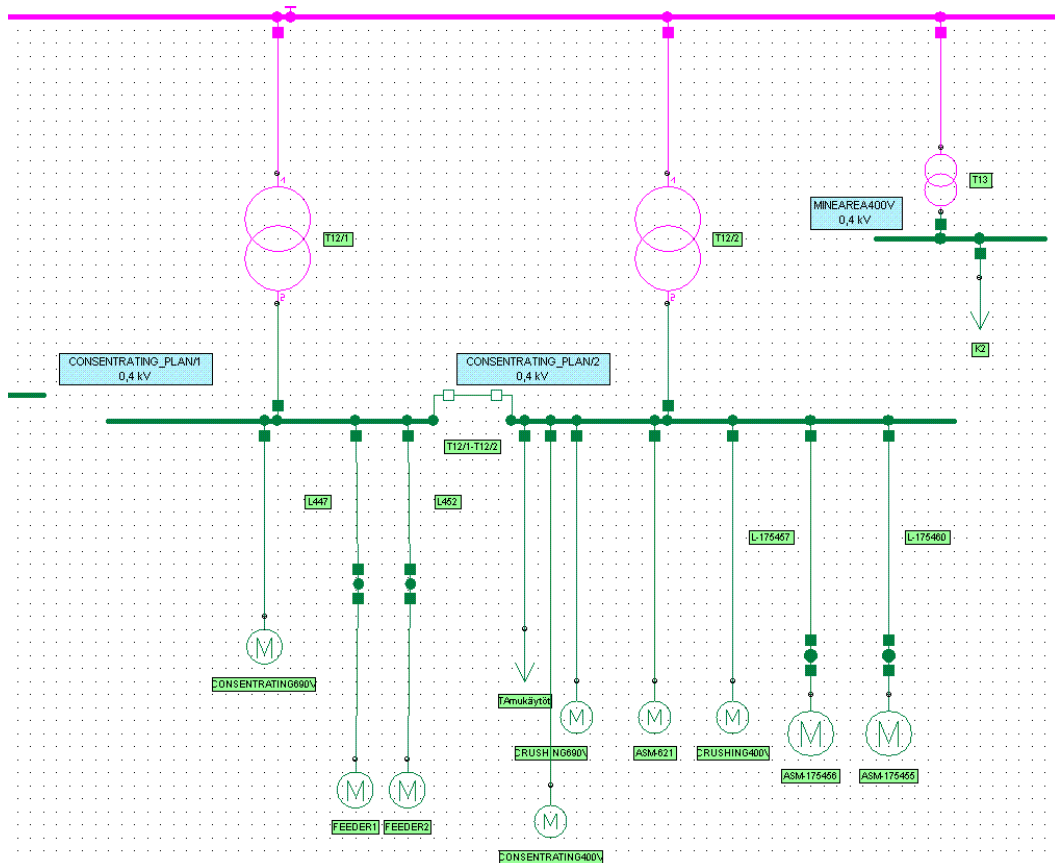


**Kuva 9.** Rikastamon ja murskaamon muuntajat 400 voltin verkossa.

Vaihdettaessa murskaamolle oma 1 MVA -muuntaja ja rikastamolle 2,5 MVA-muuntaja kuvan 9 mukaisella tavalla, saadaan alla olevan taulukon 7 mukaisia tuloksia oikosulkuvirroille. Alkuoikosulkuvirta on rikastamon muuntajassa melko korkea mutta kaikki arvot pysyvät annetuissa rajoissa, kuten taulukosta 7 voidaan nähdä.

**Taulukko 7.** Murskaamon ja rikastamon oikosulkuvirrat 1 ja 2,5 MVA -muuntajilla.

Vikapaikka	CONCENTRATING	CRUSHING
	_PLAN	
$I_p/kA$	99,5	42,41
$I_{th}/kA$	42,52	19,04
$I_k/kA$	34,14	15,41
$I_k''/kA$	47,2	21,05



**Kuva 10.** Rikastamon muuntaja toteutettuna 2\*2 MVA -muuntajilla.

Kun jaetaan rikastamon 3,15MVA -muuntajan kuorma kahdelle 2 MVA -muuntajalle kuvan 10 mukaisesti, saadaan oikosulkuarvot pysymään tavoitelluissa

rajoissa. Arvot nähdään alla olevasta taulukosta 8. Huippuarvot pysyvät korkeana mutta sallituissa rajoissa. Tarkemmassa tarkastelussa kuormia voidaan jakaa muuntajien kesken siten, että oikosulun huippuarvosta ei tule ongelmaa. Kahden muuntajan käyttämisellä lisätään myös käyttövarmuutta. Muuntajien välillä on varayhteys, jolla voidaan syöttää toisen puolen kuormaa muuntajan rikkouduttua tai huoltotöiden ajan, lisäksi reserviin jää muuntajien kapasiteettia tulevaisuuden laajennuksia varten. Rikastamon ja murskaamon kuormia ei voida syöttää täydellä teholla yhdellä muuntajalla, mutta prosessi saadaan pidettyä toiminnassa.

**Taulukko 8.** Oikosulkuvirrat kahdella rikastamon 2MVA -muuntajalla.

Vikapaikka	CONCENTRATING _PLAN/1	CONCENTRATING _PLAN/2
$I_p/kA$	89,47	81,07
$I_{th}/kA$	38,17	35,13
$I_k/kA$	30,2	30,2
$I_k''/kA$	42,66	37,92

Kun vaihdetaan rikastamon muuntaja 2,5 MVA -muuntajaan, oikosulkuvirrat pysyvät sallituissa arvoissa. Pätötehon ollessa 2,6 MW, muuntajan teho ei riitä rikastamon toimiessa maksimiteholla. Oikosulkuvirtojen puolesta tämä ratkaisu olisi toimiva, kuten taulukossa 9 näkyy.

**Taulukko 9.** Oikosulkuvirrat 2,5 MVA -muuntajalla.

	CONCENTRATING _PLAN 2,5 MVA
$I_p/kA$	96,95
$I_{th}/kA$	39,86
$I_k/kA$	29,34
$I_k''/kA$	45,99

### 5.2.1 Yhteenveto

Oikosulkuvirtojen perusteella tämän kokoinen laitos on mahdollista toteuttaa 400/690 V jännitteen jakelulla tai pelkästään 400 V jännitteen jakelulla. Kriittisimmäksi paikaksi osoittautui rikastamo (consentrating plan) suurimman kuorman takia, tämän takia tarkastelussa kiinnitettiin erityishuomiota tähän laitokseen. Muualla kaivosalueella 400 voltin jakelujännite onnistuu hyvin. Rikastamossa 400 V jakelujännitteellä täytyy kuormaa jakaa useammalle muuntajalle, jotta oikosulkuvirrat pysyvät sopivan kokoisina. Useammalla jakelumuuntajalla, jossa rikastamon muuntaja on jaettuna kahdeksi 2 MVA:n -muuntajaksi, saavutetaan parempi käyttövarmuus. Huollon tai vian sattuessa muuntajassa, saadaan prosessi pidettyä käynnissä, vaikkei huipputehoa voida yhdellä muuntajalla tuottaa. Kokeilluista toteutustavoista yksi 3,15 MVA:n -muuntaja 400 V jännitteellä rikastamossa nostaa oikosulkuvirrat liian suuriksi ja 2,5 MVA:n -muuntajalla ei riitä teho maksimikuormalla. Parhaaksi vaihtoehtoiseksi toteutustavaksi oikosulkuvirtojen perusteella voidaan pitää 2\*2MVA:n -muuntajien sijoittamista rikastamolle.

### 5.3 Jännitteenalenematarkastelu

Taulukossa 10 nähdään jännitteenalenematarkastelu 400/690 V jakeluverkolle. Tässä tarkastelussa pyrittiin pääsemään mahdollisimman lähelle 100 % nimellijännitteestä. Todellisuudessa voidaan 20 kV:n puolella nostaa jännitettä joitakin prosentteja yli nimellisen jännitteen ja siten nostaa alapuolisen verkon jännitteet sopivalle tasolle. 45/20 kV:n muuntaja toimii puskurina jännitteen vaihteluille ja pitää käämikytkimellä jännitteen sopivalla tasolla. Ensimmäisessä tilanteessa ei jännitteenalenemaa ole kompensoitu mitenkään. Jännitteet ovat tippuneet vaaditusta  $\pm 3$  % arvosta huomattavasti ja rikastamolla laitteet eivät toimisi luotettavasti jos ollenkaan. Toisessa tilanteessa päämuuntajan käämikytkintä on säädetty asentoon, jossa EK1 kiskon jännite on mahdollisimman lähellä 20 kV:ta eli asentoon -2. Käämikytkimessä on  $\pm 9$  asentoa, millä voidaan säätää jännitettä 1,67 % joka asennossa. Tilanteessa 2 kaivoksen jännitteet nousevat hieman liian korkeiksi ja rikastamolla jännitteet pysyvät liian alhaisina. Kolmannessa tilanteessa jakelu-

muuntajien väliottokytkimet on säädetty mahdollisimman lähelle nimellisjännitettä. Väliottokytkimellisissä muuntajissa on kytkin, jossa on  $\pm 2$  asentoa, sillä voidaan säätää jännitettä 2,5 % joka asennossa. Väliottokytkin säädetään jännitteetömmänä manuaalisesti joten sillä ei voida vaikuttaa verkon hetkellisiin jännitteenmuutoksiin, toisin kuin käämikytkimellä jolla automatiikka säätää jännitettä. Tällä saadaan jännitteet säädettyä haluttuihin rajoihin. Jännitteenalenemaa voi myös vähentää pienentämällä muuntajia turhaa kuormittavaa loistehoa kompensointikondensaattoreilla, jonka tuottama loisteho korvaisi muuntajan läpi kulkevan loistehon. Taulukossa 11 nähdään prosenttiarvot nimellisestä jännitteestä. Taulukon prosenttiarvot ovat nimellisjännitteestä, kun kuorma on 80 % maksimikuormasta normaalikäyttötilanteessa.

**Taulukko 10.** Jännitteet 400/690 voltin verkossa

Tilanne	EK1/ 20kV	MINE/ 690V	MINE400V	CONCENTRATING _PLAN/690V	CONCENTRATING _PLAN400V	MINEARE A 400V	PUMPST ATIONS/ 690V
1	98,88	102,4	101,1	102,87	103,42	100,65	98,37
2	100,65	104,36	103,09	104,83	105,46	102,48	100,24
3	100,61	101,53	100,21	99,35	99,73	99,84	100,2

Tilanteen 3 moottorilähtöjen jännitteenalenemat näkyvät taulukossa 11. Tilanne 4:ssä muuntajan väliottokytkin on aseteltu arvoon -2, että pitkien kaapeleiden päässä olevien Feederien jännitteen alenemat pysyisivät hallinnassa. Feeder 2:n jännitteet pysyvät silti liian alhaisina. Tässä täytyy tutkia voidaanko 5 % jännitteenalenemaa sallia. Jos halutaan pysyä 3 % tavoitearvossa, jännitteenalenemaa täytyy korjata isontamalla kaapelikokoa, miettimällä voidaanko Feederin ja muuntajan etäisyyttä toisistaan lyhentää tai laittaa oma 20 kV /690 voltin muuntaja lähemmäs moottoria.

**Taulukko 11.** Jännitteenalenemat moottorilähdöillä.

Tilanne	CONECRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2
3	97,89	98,25	96,75	92,55
4	100,6	100,95	99,5	95,43

Rikastamon sähköjakelun toteuttaminen 20 kV / 400 V 3,15 MVA -muuntajalla jännitteen prosenttiarvot taulukossa 12. Tilanteet on selitetty ensimmäisessä kapaleessa. Jännitteet saadaan pysymään halutulla tasolla mutta, kuten taulukosta 13

nähdään, pitkien kaapeleiden päässä olevat Feederit kärsivät suuresta jännitteenalenumasta. Ratkaisuksi voidaan harkita oman muuntajan asentamista lähemmäksi Feederien kulutuspiistettä.

**Taulukko 12.** Normaalkäyttötilanteen prosenttiarvot nimellisjännitteestä 400 voltin jakelujännitteellä.

Tilanne	EK1/	MINE/	CONCENTRATING	MINEAREA	PUMPSTATIONS/
	20kV	400 V	_PLAN400 V	400 V	400 V
1	97,45	95,74	96,09	96,65	94,27
2	99,22	98,52	98,88	98,45	96,11
3	99,28	101,33	101,7	101,06	101,5

**Taulukko 13.** Prosenttiarvot moottorilähtöjen nimellisjännitteestä normaalikäytön aikana 400 voltin jakelujännitteellä.

Tilanne	CONECRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2
3	97,31	98,42	93,08	77,43

Taulukossa 14 nähdään prosenttiarvot nimellisjännitteestä yllä mainituissa tilanteissa. Jännitteet saadaan pysymään haluttujen arvojen sisällä. Taulukossa 15 toistuu samat liian suuret jännitteen alenemat Feedereillä.

**Taulukko 14.** Prosenttiarvot nimellisjännitteestä, rikastamo ja murskaamo erillisillä muuntajilla.

Tilanne	EK1/	MINE/	CONCENTRATING	CURUSHING	MINEAREA	PUMPSTATION S/
	20kV	400 V	_PLAN400 V	400V	400 V	400 V
1	97,53	95,83	97,62	97,3	96,74	94,36
2	99,31	97,7	99,49	99,17	98,52	96,19
3	99,12	98,59	99,49	99,17	98,53	98,82

**Taulukko 15.** Moottorilähtöjen prosenttiarvot nimellisjännitteestä, 400 voltin jakelijännitteellä.

Tilanne	CONECRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2
3	94,66	95,8	91,28	74,15

Kun tutkitaan tilannetta, jossa rikastamon muuntaja on jaettu kahdeksi 2 MVA:n -muuntajaksi ja jännitetaso on 400 voltia. Taulukossa 16 näkyvässä tilanteessa 1 jännitteen alenemaa ei ole kompensoitu mitenkään. Tilanteessa 2 päämuuntajan käämikytkin on säädetty asentoon, jossa alajännitepuolella jännite pysyy mahdollisimman lähellä 100 %. Tilanteessa 3 jakelumuuntajien väliottokytkimet on säädetty siten, että jännite pysyy mahdollisimman lähellä nimellisjännitettä. Tilanteessa 3 rikastamon osasto 1 jännitteenalenemat pysyvät liian suurina ja taulukosta 17 näemme, että pitkien kaapeleiden päässä olevien moottoreiden jännitteenalenemat ovat erittäin suuria.

**Taulukko 16.** jännitteen alenemat 400 voltin verkossa 2\*2MVA:n -muuntajilla.

Tilanne	EK1/ 20kV	MINE/400V	CONCENTRATING _PLAN/1/ 400V	CONCENTRATING _PLAN/2 400V	MINEAREA/ 400V	PUMPSTATIONS/ 400V
1	98,25	96,59	99,22	99,26	100	97,7
2	100,04	98,48	101,13	101,13	101,85	99,6
3	100,5	100,3	101,13	101,13	99,27	99,61

**Taulukko 17.** moottorilähtöjen jännitteen alenemat 400 voltin verkossa.

Tilanne	CONECRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2
3	96,72	97,83	91,25	74,11

### 5.3.1 Yhteenveto

Jännitteenalenemien perusteella jakeluverkko voidaan toteuttaa 400/690 voltin tai 400 voltin jakeluverkolla. Ongelmaksi muodostuvat pitkät kaapelivedot 400 voltilla. Otetaan esimerkiksi teholtaan 200 kW:n moottori 240 mm<sup>2</sup> alumiinikaapelil-

la, jonka resistiivisyys on  $0,035 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ,  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja oletetaan sallituksi maksimijännitteenalenemaksi 3 %, saadaan kaavalla

$$\frac{\Delta U A U^2}{\rho P} = s \quad (5)$$

- $\Delta U$  =jännitteenalenema (%)
- $A$  = kaapelin poikkipinta-ala ( $\text{mm}^2$ )
- $U$  = jännite (V)
- $\rho$  = johdinaineen resistiivisyys ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )
- $P$  = moottorin pätöteho (W)
- $s$  = johdon maksimipituus

Saadaan 400 voltilla maksimipituudeksi 165 metriä ja 690 voltilla 490 metriä. 690 voltilla päästään yli puolet pitemmälle samalla kaapelilla. Kaapelin kokoa voidaan kasvattaa tiettyyn pisteeseen asti, jossa vastaan tulevat kaapelin hinta ja moottorin päässä, kuinka iso kaapeli saadaan mahtumaan kytkentäkoteloon.

#### 5.4 Jännitteenaleneman pienentäminen loistehon kompensoinnilla

Sähkömoottorit tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi loistehoa, joka tarvitaan moottoreiden magneettikentän ylläpitämiseen. Kaivoksessa suurimman kuorman aiheuttavat juuri pyörivät sähkömoottorit ja loistehon tarve on suuri. Verkossa syntyvä jännitteenalenema voidaan laskea likimäärin kaavalla

$$\Delta U = R I_p + X I_q \quad (6)$$

- $R$  = koko siirtoverkon resistanssi ( $\Omega$ )
- $X$  = koko siirtoverkon reaktanssi ( $\Omega$ )
- $I_p$  = pätövirta (A)
- $I_q$  = loisvirta (A)



Kompensointi pienentää loisvirran määrää, jolloin yhtälön mukaan pienenee myös jännitteenalenema. /9/

Kompensointitarpeen määrä voidaan selvittää, kun tiedetään kuorman pätöteho, tehokerroin ja hyötysuhde. Suurilla johtimien pituuksilla täytyy impedanssi ottaa huomioon laskuissa, lyhyillä matkoilla johtimista aiheutuvat muutokset ovat niin pieniä, ettei niitä tarvitse ottaa laskuihin mukaan. Ensimmäisen täytyy valita tavoiteltu tehokerroin, yleensä täysin kompensoidulla verkolla käytetään arvoa 0,95. Moottoreiden kompensoinnissa täytyy ottaa huomioon ylikompensointi, kun moottori sammutetaan, muuttuu moottori generaattoriksi ja tämä saattaa aiheuttaa suuria ylijännitteitä verkkoon, jotka vaurioittavat verkon komponentteja. Tarvittava kompensoinnin määrä voidaan tämän jälkeen selvittää seuraavasta yhtälöstä.

$$Q = \frac{P}{\eta} * (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (7)$$

- Q = loisteho (kvar)
- P = pätöteho (kW)
- $\eta$  = kuorman hyötysuhde
- $\varphi_1$  = kuorman tehokerroin ennen kompensointia
- $\varphi_2$  = kuorman tavoiteltu tehokerroin

Otetaan esimerkkitapaukseksi tilanne, jossa missä rikastamon muuntaja on jaettu kahdeksi 2 MVA:n -muuntajaksi. CONCENTRATING\_PLAN/1 jännite on 95,91 % nimellisjännitteestä. Jännitteenalenema saa olla suurimmillaan vaihejännitteestä 3 % eli 6,9 voltia. Muuntajan toisiopuolen virta on 6216 ampeeria ja verkon resistanssi saadaan kaavalla  $\frac{P}{I^2} = R$  kun pätöteho on tiedossa. Kuorma koostuu pelkästään kolmivaiheisista sähkömoottoreista, joten loistehon osuus nimellistehosta on

$$X = \frac{RI_p - \Delta U}{I_q} = \frac{0,0263\Omega * 6216A * \cos 75,76^\circ - 6,9V}{6216A * \sin 75,76^\circ} = 0,005529 \Omega \quad (8)$$

$$Q = X * I^2 = 0,005529\Omega * 6216^2 = 213 \text{ kvar} \quad (8)$$

213 kvar:n loistehon kompensoinnilla päästään 97 % nimellisjännitteestä, käytännössä se tarkoittaa 300 kvar:in kompensointikondensaattorin lisäämistä virtapiiriin. Taulukossa 18 nähdään jännitteenaleneman pienentyminen kompensoinnilla.

Pientämällä muuntajan läpi menevää loistehoa saadaan jännite muuttumaan seuraavalla tavalla

**Taulukko 18.** Jännitteenaleneman kompensointi kondensaattorilla.

Kompensointikondensaattori (kvar)	Jännite (%)
150	96,6
300	97,3

Kun loistehoa tuotetaan paikallisesti, riittää muuntajilla enemmän kapasiteettia pätötehon siirtämiseen.

#### 5.4.1 Kompensointikondensaattorit

Kompensointikondensaattoreilla tuotettu loisteho on taloudellista, koska kondensaattorit tarvitsevat hyvin vähän huoltoa, ovat hintatasoltaan kohtuullisia ja maksavat sähkönsiirtomaksujen pienemisellä itsensä takaisin melko nopeasti. Nykyaikaiset kompensointiparistot ovat usein estokelaparistoja, jotka eivät resonoi rinnan verkon kanssa. Estokelaparistossa kondensaattorin kanssa on kytketty sarjaan kuristin. Estokelaparisto ei resonoi oikein viritettynä verkon yliaaltojen kanssa eikä vahvista jännitteen yliaaltoja. Siten estokelaparisto on turvallinen käyttää yliaaltopitoisessakin verkossa. Estokelaparisto kytketään päälle samaan aikaan kuin kompensoitava laite, tällöin ei ylikompensoinnin vaaraa ole.

Estokelaparisto viritetään normaalisti pienintä yliaaltoa pienemmälle taajuudelle, joka on yleensä 5. Harmoninen yliaalto (250Hz). Tällöin viritystaajuuden alapuolella, kuten perustaajuudella 50 Hz, paristo on kapasitiivinen eli se tuottaa loiste-

hoa. Viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen, joten se ei vahvista yliaaltotaajuuksia. /10//11/

### 5.5 Jännitteenalenemat moottorin käynnistyksessä

Oikosulkumoottorin suorassa käynnistyksessä moottori ottaa jopa 7 -kertaisen virran verrattuna nimellisvirtaan. Se aiheuttaa jännitteenalenemaa muuallakin verkossa, maksimijännitteenalenema saa olla 10 % nimellisjännitteestä. 690 voltin verkolla toteutettuna kaikki jännitteenalenemat pysyvät sallituissa rajoissa, kuten liitteestä 1 voidaan nähdä. 2\*2MVA:n -muuntajilla toteutetussa verkossa kriittiset paikat ovat pitkien kaapeleiden päässä olevat suuret moottorit, joiden käynnistytksen aikaiset jännitteen alenemat näkyvät taulukossa19. Feeder 2 lukuun ottamatta moottorien jännitteen alenemat pysyvät suurin piirtein halutuissa arvoissa, mutta Feeder 2 jännitteen alenema on aivan liian suuri 1 km pituisen kaapelin takia. Kaikissa tilanteissa, joissa vaihdetaan jakelujännite 400 volttiin Feeder 1 ja Feeder 2 jännitteet tippuvat liian alas. Liitteessä 1 nähdään kaikki jännitteenalenemamittaukset moottorikäynnistyksissä. Feeder 2:n käynnistystilanteessa jännitteenalenemat ovat niin suuria että NEPLAN-ohjelma ei enää laske niitä luotettavasti, siksi ne taulukossa on värjätty punaisella.

**Taulukko 19.** Jännitealenemat moottorikäynnistyksissä.

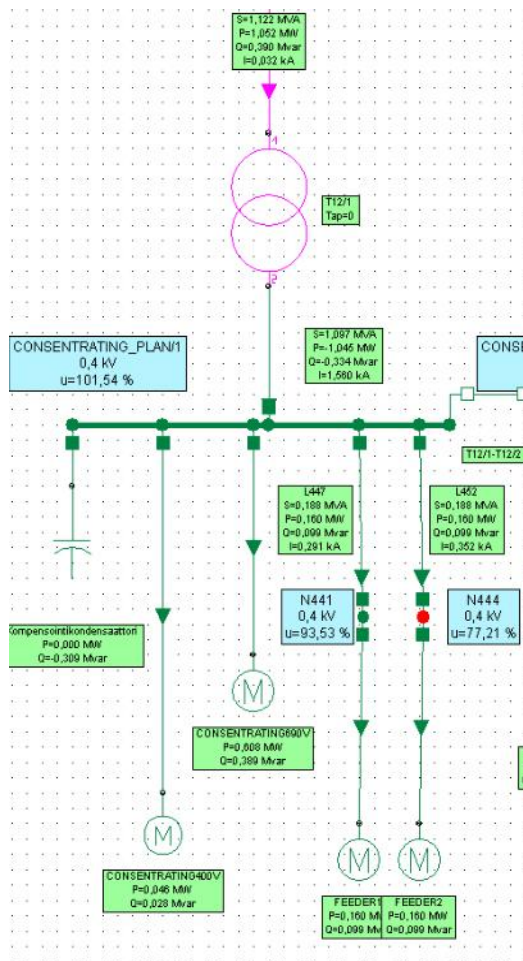
	CO-NECRUSHER	JAV-CRUSHER	FEE-DER1	FEE-DER2
Käynnistettävä moottori				
CO-NECRUSHER	88,7	97,43	88,06	69,54
JAVCRUSHER	97,01	94,86	88,46	70,13
FEEDER1	97,34	98,44	87,88	70,22
FEEDER2	97,52	98,62	89,05	86,26

### 5.6 Kompensoitu verkko

Kompensoitu verkko tarkoittaa sitä, että loisteho on tuotettu paikallisesti eikä sitä tarvitse ottaa jakeluverkosta. Sähkölaitokset perivät loistehomaksua sähköverkosta otetun loistehon mukaan, koska se kuormittaa sähkönjakeluverkkoa pienentäen

kapasiteettia pätötehon siirtoon. Kun loistehoa kompensoidaan, kaapeleiden ja muuntajien kuormitus pienenee ja tehohäviöt pienenevät.

Kolmivaiheisen moottorin loistehon tarve on noin 0,5 – 1 kvar pätöteho kilovattia kohden, riippuen kuormituksesta ja moottorin koosta. Kuvassa 11 näkyy kompensointikondensaattori Neplan -mallissa rikastamon alajännitepuolella.



**Kuva 11.** Kompensointikondensaattori mitoitettuna CONCENTRATING\_PLAN/1:ssä.

Tarkoituksena on mitoittaa loistehonkompensointi eri verkko vaihtoehdoille niin, että  $\cos \varphi$  on noin 0,95 eli pätötehon suhde näennäistehoon on 95 %, jottei verkko olisi ylikompensoitu. Kompensointi on mahdollista toteuttaa laitekohtaisesti tai keskitetysti. Laitekohtaisessa kompensoinnissa jokaiseen laitteeseen asennetaan

erikseen kompensointi. Tässä esimerkissä tarkastelemme keskitettyä kompensointia, jolloin kompensointi tapahtuu jokaisessa ryhmäkeskuksessa erikseen. Taulukko 20 on otettu ST 52.15 kortista loistehon kompensointi pienjänniteverkossa ( $U_n < 1000 \text{ V}$ ), jossa on laskettuna kertoimet kompensoinnille. Esimerkki: Kaivoksen keskuksen pätöteho on 913 kW ja nykyinen tehokerroin on  $\cos \varphi_1 = 0,89$ . Tehokerrointa halutaan nostaa  $\cos \varphi_2 = 0,95$ . Taulukosta saadaan kertoimeksi 0,18, jolloin loistehon tarve on  $Q = 913 \cdot 0,18 \text{ kvar} = 160 \text{ kvar}$ . Kompensointiin voidaan laittaa 150 kvar:n kondensaattori, jolla päästään hyvin lähelle tavoiteltua  $\cos \varphi_2 = 0,95$  arvoa./11/

**Taulukko 20.** Kompensointitarpeen määrittäminen, kun tehokerroin nostetaan  $\cos \varphi_1$ :stä  $\cos \varphi_2$ :een. /12/

$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$							
	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,53	1,60	1,46	1,40	1,35	1,27	1,12	0,98	0,85
0,55	1,52	1,38	1,32	1,27	1,19	1,03	0,90	0,77
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,63	1,23	1,09	1,03	0,98	0,90	0,75	0,61	0,48
0,65	1,17	1,03	0,97	0,92	0,84	0,68	0,55	0,42
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,73	0,94	0,79	0,73	0,69	0,61	0,45	0,32	0,19
0,75	0,88	0,74	0,68	0,63	0,55	0,40	0,26	0,13
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,83	0,67	0,53	0,47	0,42	0,34	0,19	0,05	
0,85	0,62	0,48	0,42	0,37	0,29	0,14		
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,87	0,57	0,42	0,36	0,32	0,24	0,08		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,89	0,51	0,37	0,31	0,26	0,18	0,03		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

### 5.6.1 Loisvirta

Loisteho on virrankulutusta lisäävä. Seuraavassa on taulukoitu muuntajien virrat ilman kompensointia ja kompensoituna. Taulukossa 18 on kunkin muuntajan vir-

rat alajännitepuolelta kompensoituna ja kompensoimattomana. Loisteho tuotetaan paikallisesti, muuntajien läpi menevät virrat laskevat ja näin ollen muuntajia ja kaapeleita kuormitetaan vähemmän. Taulukoissa 21- 24 näkyvät muuntajien virrat kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa sekä kompensointikondensaattoreiden koot.

**Taulukko 21.** Muuntajien virrat kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa 400/690 voltia.

Virrat 400/690V/20kV						
	T1	MINE	CONCENTRATING PLAN	CONCENTRATING PLAN 400 V	MINEAREA 400 V	PUMPSTATIONS
Jännite	20 kV	690 V	690 V	400 V	400 V	690 V
Kompensoimaton verkko	117 A	840 A	2211 A	97 A	231 A	71 A
Kompensoitu verkko	114 A	793 A	2173 A	91 A	231	64 A
Muutosprosentti	3 %	6 %	2 %	6 %	0	10 %
Kompensointikondensaattorin koko	0	150 kvar	40 kvar	15 kvar	0	20 kvar

**Taulukko 22.** Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 3,15 MVA:n -muuntajalla.

Virrat 400V 3,15 MVA					
	T1	MINE	CONCENTRATING PLAN	MINEAREA 400 V	PUMPSTATIONS
Jännite	20 kV	400 V	400 V	400 V	400 V
Kompensoimaton verkko	120 A	1450 A	3902 A	229 A	120 A
Kompensoitu verkko	117 A	1348 A	3856 A	229 A	106 A
Muutosprosentti	0 %	1 %	2 %	0	12 %
Kompensointikondensaattorin koko	0	150 kvar	40 kvar	0	20 kvar

**Taulukko 23** Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 2,5 MVA:n -muuntajalla.

Virrat 400 V 2,5 MVA					
	T1	MINE	CONCENTRATING PLAN	MINEAREA 400 V	PUMPSTATIONS
Jännite	20 kV	400 V	400 V	400 V	400 V
Kompensoimaton verkko	121 A	1480 A	3958	229 A	120 A
Kompensoitu verkko	117 A	1348 A	3856 A	229 A	106 A
Muutosprosentti	3 %	9 %	3 %	0	12 %
Kompensointikondensaattorin koko	0	150 kvar	40 kvar	0	20 kvar

**Taulukko 24.** Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa murskaamon 1 MVA- ja rikastamon 2,5 MVA -muuntajilla.

Virrat 400V 1 MVA + 2,5 MVA						
	T1	MINE	CONCENTRATING PLAN/400V	CRUSHING / 400 V	MINEAREA 400 V	PUMPSTATIONS
Jännite	20 kV	400 V	400 V	400 V	400 v	400 V
Kompensoimaton verkko	120 A	1491 A	3336 A	683 A	234 A	124 A
Kompensoitu verkko	116 A	1388 A	3314 A	629 A	229 A	110 A
Muutosprosentti	3 %	7 %	0 %	8 %	0	12 %
Kompensointikondensaattorin koko	0	150 kvar	0	70 kvar	0	20 kvar

**Taulukko 25.** Muuntajien virrat 400 voltin kompensoimattomassa ja kompensoidussa verkossa rikastamon 2\*2 MVA:n -muuntajilla.

Virrat 400V 2*2MVA						
	T1	MINE	Consentraitinplan/1	Consentraitinplan/2	MINEAREA	PUMPSTATIONS
Jännite	20 kV	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
Kompensoimaton verkko	120 A	1504 A	1790A	2265 A	228 A	125 A
Kompensoitu verkko	113 A	1393 A	1560 A	2239 A	232 A	109 A
Muutosprosentti	6 %	7 %	13 %	0	0	13 %
Kompensointikondensaattorin koko	0	150 kvar	300 kvar	0	0	20 kvar

Oikosulkuvirtoihin kompensoinnilla ei ole merkittävästi vaikutusta, kuten liitteestä 2 voidaan nähdä. Liitteessä 2 on esitettyä oikosulkuvirrat 400 V ja 690 V verkon, sekä 400 V verkon jossa rikastamon muuntaja on toteutettu kahdella 2 MVA:n -muuntajalla. Koska vikapaikkaa syöttää myös oikosulkutilanteessa kompensointikondensaattori ja vikapaikassa vaikuttaa sama oikosulkuteho.

### 5.6.2 Yhteenveto

Kompensoinnilla voidaan jännitteenalenemaa pienentää joitakin prosentteja, mutta tässä tarkastelussa sillä ei ole suurta merkitystä. Kompensoinnilla saadaan pienennettyä muuntajien kuormitusta pienentämällä muuntajan läpi kulkevaa loisvirtaa, tällöin muuntajille jää pätöteholle ylimääräistä reserviä, jos tulevaisuudessa pätötehon tarve kasvaa esimerkiksi kaivoksen laajentamisen yhteydessä. Moottorikohtaisella kompensoinnilla voitaisiin luultavasti saada jännitteenalenemaa pienennettyä enemmän, koska ABB käyttää keskitettyä kompensointia ei tätä vaihtoehtoa tutkittu.

## 6 HINTAVERTAILU

Hintavertailua tehtiin kahden vaihtoehdon välillä, suunnitellun 400/690 V jännitteen verkon ja 400 V jännitteellä kun rikastamon muuntajina on 2\*2 MVA -muuntajat. Vertailusta päätettiin jättää pois pitkät kaapelit (Feeder1 ja Feeder2), jotta saatiin vertailtua kahta toimivaa ratkaisua. Vertailu toteutettiin ABB:n E-Deco ohjelmalla, jolla voidaan laskea annettujen parametrien avulla hinta projektille. Vertailtavat hinnat ovat myyntihintoja, joissa on käytetty tiettyjä kertomia ABB:n ostohintoihin, joista saadaan asiakkaalle tarjottava hinta. Hinnat ovat arvioita tämän hetkisten tietojen perusteella ja projektin edistyessä luvut tarkentuvat. Taulukon 26 arvot ovat prosentiarvoja, siten että 400/690 V jännitteen toteutuksen arvo on 100 %.

Taulukosta 26 voidaan nähdä että, kaapelihyllyillä ei tule eroa hinnoissa vertailtujen vaihtoehtojen välillä. Kaapeleilla 400 V jännitteen vaihtoehdolla, hinta nousee odotetusti noin 20 %, virtojen noustessa kaapelien poikkipinta-alat kasvavat ja hinta siinä mukana. Laskettaessa hintoja, kaapeleiden pituutena pidettiin 75 metriä, koska todellisia pituuksia suurimmasta osasta kaapeleita ei ole vielä tiedossa. Moottorikeskuksissa 400 V jännitteellä hinta yhdellä rikastamon moottorikeskuksella on 104 %, ja kummallekin rikastamon muuntajalle oman moottorikeskuksen laittaminen nostaa hintaa 10 %. Turvakytkinten hinnat ovat noin 88 %, verrattuna 400/690 V jännitteen verkkoon, turvakytkinten osuus kokonaishinnasta on kuitenkin hyvin pieni. Taajuusmuuttajien hinnoissa ei juuri ole eroa onko jännitteenä 400 V vai 690 V, hinta nousee noin 2 % 400 V vaihtoehdolla. Taulukon 26 muuntajien hintaan on laskettu vain rikastamon muuntajat, kahdella 2 MVA:n -muuntajalla hinta nousee 48 %. Kokonaishinta 400 V jännitteellä on 5-13 % kalliimpi kuin 400/690 V jännitteen vaihtoehto. Hinnan nousu selittyy suurimmaksi osaksi sillä, että joudutaan laittamaan kaksi muuntajaa yhden sijaan ja siitä johtuen kaksi moottorikeskusta. Hintaeroa saataisiin pienennettyä lisäämällä laskuihin moottorit, mutta teknisistä ongelmista johtuen tuloksia ei otettu huomioon kokonaishintaa laskettaessa. Moottoreissa 400 V jännitteellä hinnat ovat noin 99 % 400/ 690 V jännitteen vaihtoehdosta, moottorit kattavat merkittävän osan koko projektin hinnasta, moottorien suuren määrän takia. 400 V moottoreiden alhai-



semman hinnan selittää taajuusmuuttajakäytöissä tarvittavat erityisvahvat eristykset 690 V jännitteellä.

**Taulukko 26.** Toteutuksen prosentuaalinen hinta 400 V jännitteellä, 400/690 V jännitteisestä suunnitelmasta.

	Kaapelihyllyt	Kaapelit	Moottorikeskukset	
400V kahdella rikastamon moottorikeskuksella	100 %	122 %	114 %	
400V yhdellä rikastamon moottorikeskuksella	100 %	122 %	104 %	
osuus kokonaishinnasta	7 %	10 %	61 %	
	Turvakytkimet	Taajuusmuuttajat	Muuntajat	Yht
400V kahdella rikastamon moottorikeskuksella	88 %	102 %	148 %	113 %
400V yhdellä rikastamon moottorikeskuksella	88 %	102 %	100 %	105 %
osuus kokonaishinnasta	0,4 %	13 %	6 %	100 %

## 7 YHTEENVETO

Insinööriyössä tutkittiin mahdollisuutta toteuttaa suunnitellun 690/400 voltin jakelujännitteiden sijaan verkko 400 voltilla ja kuinka verkko olisi mahdollista toteuttaa.

Työssä todettiin, että tämän teholuokan kaivos olisi mahdollista toteuttaa 400 voltin jakelujännitteellä, jos etäisyydet eivät kasva liian pitkiksi 400 voltin verkossa. Tämä ongelma voidaan ratkaista jakamalla jakelumuuntajien kuormaa pienempiin osiin ja sijoittamalla muuntajat lähemmäs kulutuspeisteitä, tämä taas nostaa kustannuksia. Tästä työstä saatuja tuloksia voidaan käyttää tulevilla projekteilla, joissa kaivoksen tehontarve on samaa kokoluokkaa.

Huomioon otettavia muuttujia kaivoksen sähköverkkoa suunniteltaessa, on kaivoksen syötön taustaverkko, joka vaikuttaa oikosulkuvirtoihin. Rikastusprosessien erilaisuudesta johtuen, rikastamon tehon tarve saattaa vaihdella kohteesta riippuen. Lisäksi otettava huomioon tapahtuuko kaivostoiminta maan alla vai avolouhoksessa. Maanalaista kaivosta pitää käsitellä eri määräysten ja säädösten perusteella kuin avolouhosta. Rikastamon ja muiden kaivosalueen laitteiden sähkönjakelua voidaan käsitellä normaalina teollisuussähköistykseenä.

Vaikka tässä esimerkissä suurin osa kaivostoiminnasta tapahtuu maan alla, maanalaisten kaivoksen tehon tarve on vain neljäsosa koko kaivosalueen tehon tarpeesta. Maan alaisessa kaivoksessa suurimmat kuluttajat ovat porat ja pumput, avolouhoksen porat toimivat polttomootoreilla ja pumppujen tarve on pienempi, joten ne pienentävät sähköntarvetta avolouhoksella.

Rikastamon sähkönkulutus täytyy tutkia tapauskohtaisesti, mutta voidaan olettaa että murskausprosessin tehontarve pysyy suhteessa samana verrattuna, kuinka monta tonnia halutaan saada murskattua malmia, kohteesta riippumatta.

Kaivokset sijaitsevat usein kaukana sähkönjakelusta, mikä lisää siirtomatkoja ja täten siirtojännitteeksi kannattaa valita korkeampi kuin 45 kV. Tässä tutkimuksessa tilanteessa siirtomatka oli suhteellisen lyhyt: 22 km, ja luvat 45kV:n siirtolinjan

rakentamiselle oli nopeampi saada kuin yli 100 kV:n linjalle, joten tähän ratkaisuun päädyttiin.

Mitä isommasta kaivoksesta on kyse, sitä suurempia säästöjä voidaan saavuttaa kompensoimalla jakeluverkko paikallisesti mahdollisimman lähelle tehokerrointa 1. Tällöin säästetään muuntajien ja siirtoverkon häviökustannuksissa ja verkon siirtokapasiteettia jää pätötehon käytettäväksi.

Hintavertailusta selvisi kuinka hinnat muuttuvat vaihdettaessa jännitetasoa. Muuntajien hinnat kasvavat huomattavasti jos kuormaa joudutaan jakamaan monelle muuntajalle ja useammalle moottorikeskukselle. Kaapelien hinnat nousevat myös paljon mutta kokonaishinnasta niiden osuus on vain joitakin prosentteja. 400 V moottoreiden hieman halvempi hinta ja kaivoksessa niiden suuri määrä saattaa tehdä kaivoksen jännitteenjakelun toteuttamisen hinnaltaan kilpailukykyiseksi.

## LÄHTEET

/12/ ABB Group. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Kymmenes painos. Vaasa: Yk-kös-Offset Oy

/3/ Jokinen, K. 2013, Teollisuuden ja voimalaitoksen sähköjärjestelmät luentomateriaali <https://portal.puv.fi/mod/resource/view.php?id=170728>

/1/ Mäkinen, O. 2011. Sähköverkot. kalvosarja 5  
<https://portal.puv.fi/mod/resource/view.php?id=92606>

/4/ Simola, U. <http://www.taloustaito.fi/fi-fi/s/sijoitukset/nyt-palaa-paljon-rahaa-raaka-aineisiin> Viitattu 20.2.2014

/2/ ST-kortisto. ST 51.78 sähkölaitteet ja asennukset kaivoksissa sekä huolto- ja työtunneleissa. Viitattu 13.2.2014

/6/ Silver pricing hopean hintakehitys <http://silverprice.org/silver-price-history.html> Viitattu 25.2.2014

/5/ Sotkamo Silver projektit lyhyesti <http://www.silver.fi/sivu/fi/projects/> Viitattu 25.2.2014

/7/ <http://severi.sahkoinfo.fi/item/4570?search=51.06> Viitattu 20.3.2014

/10/ Raukola,P. Loistehon kompensointi  
[.http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/5998/Raukola\\_Petri.pdf?sequence=1](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/5998/Raukola_Petri.pdf?sequence=1) Viitattu 25.4.2014

/8/  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/\\$file/1SCC317002C1801.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/$file/1SCC317002C1801.pdf) Viitattu 20.3.2014

/9/ Virtuaali ammattkoulu, kompensointi,  
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134046634756/1134046693839.html> Viitattu 25.4.2014

/11/ <http://severi.sahkoinfo.fi/item/519?search=52.16> Viitattu 25.4.2014

LIITE 1. Jännitteenalenemat moottorikäynnistyksissä.

Prosenttienä nimellisiin jännitteisiin moottorikäynnistyksessä 400V/690V													
	EK/20kV	MNE/400V	MNE/400V	CONCENTRATING_PLAN/400V	CONCENTRATING_PLAN/690V	CONCENTRATING_PLAN/400V	MINEAREA/400V	MINEAREA/690V	PUMPSTATIONS/690V	CONCRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2
Käynnistettävä moottori													
CONCRUSHER	96,56	97,14	95,77	95,77	97,28	97,56	95,76	95,92	93,86	96,15	94,92	90,31	
JAVCRUSHER	96,63	97,21	95,84	97,33	97,62	95,82	95,82	95,98	95,75	94,56	94,67	90,36	
FEEDER1	95,91	96,44	95,05	96,32	96,1	96,32	95,1	95,23	94,49	94,96	88,26	89,03	
FEEDER2	96,31	96,87	95,5	96,95	97,21	97,21	95,51	95,65	95,35	95,82	94,28	82,36	
Prosenttienä nimellisiin jännitteisiin moottorikäynnistyksessä 400V/3,15MVA													
	EK/20kV	MNE/400V	CONCENTRATING_PLAN/400V	MINEAREA/400V	PUMPSTATIONS/690V	CONCRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2				
Käynnistettävä moottori													
CONCRUSHER	93,63	94,99	94,93	95,05	95,24	83,67	91,4	86,24	66,76				
JAVCRUSHER	93,99	95,57	95,86	95,6	95,82	91,19	91,17	87,27	68,36				
FEEDER1	94	95,57	95,93	95,6	95,82	91,26	92,44	87,51	68,47				
FEEDER2	96,31	96,87	97,21	95,51	95,65	95,35	95,82	94,28	82,38				
Prosenttienä nimellisiin jännitteisiin moottorikäynnistyksessä 400V/1-2,5MVA													
	EK/20kV	MNE/400V	CONCENTRATING_PLAN/400V	CRUSHING / 400V	MINEAREA/400V	PUMPSTATIONS/690V	CONCRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2			
Käynnistettävä moottori													
CONCRUSHER	93,71	92,64	93,56	92,31	92,88	92,89	82,95	88,67	84,71	64,31			
JAVCRUSHER	94,13	93,08	94,01	93,65	93,3	93,34	88,85/89,80	85,7	65,12				
FEEDER1	93,93	92,87	93,73	93,48	93,1	93,12	88,67	89,89	82,92	64,62			
FEEDER2	94,22	94,05	95,24	95,83	96,06	90,52	91,72	86,58	86,1				
Prosenttienä nimellisiin jännitteisiin moottorikäynnistyksessä 2MVA													
	EK/20kV	MNE/400V	CONCENTRATING_PLAN/1	CONCENTRATING_PLAN/2	MINEAREA/400V	PUMPSTATIONS/400V	CONCRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2			
Käynnistettävä moottori													
CONCRUSHER	93,6	91,67	93,37	94,01	95,18	92,77	84,08	90,45	84,49	63,96			
JAVCRUSHER	94,13	92,23	93,94	94,9	95,73	93,33	90,17	90,57	85,13	65			
FEEDER1	94,19	92,29	94,06	95,02	95,8	93,4	90,29	91,49	86,99	65,23			
FEEDER2	100,88	101,19	97,47	101,89	100,11	97,82	97,52	98,62	89,05	86,26			
Prosenttienä nimellisiin jännitteisiin moottorikäynnistyksessä 400V/2,5MVA													
	EK/20kV	MNE/400V	CONCENTRATING_PLAN/400V	MINEAREA/400V	PUMPSTATIONS/690V	CONCRUSHER	JAVCRUSHER	FEEDER1	FEEDER2				
Käynnistettävä moottori													
CONCRUSHER	93,33	93,09	93,54	94,91	95,09	83,76	89,95	84,68	64,27				
JAVCRUSHER	93,82	93,61	94,45	95,41	95,62	89,7	90,29	85,7	65,92				
FEEDER1	93,93	93,73	94,67	95,53	95,74	89,92	91,13	87,15	66,31				
FEEDER2	94,22	94,05	95,24	95,83	96,06	90,52	91,72	86,58	86,1				

## LIITE 2. Oikosulkuvirrat kompensoidussa verkossa.

Oikosulkuvirrat 400/690V							
Vika paikka	EK1	MINE	MINE400V	CONCENTRATING	CONCENTRATING	MINE	PUMP
				_PLAN	_PLAN400V	AREA	STATIONS
						400V	
<b>Kompensoimaton verkko</b>							
I <sub>p</sub> /kA	5,44	40,99	2,88	77	8,39	19,73	4,69
I <sub>ii</sub> /kA	2,6	17,56	1,84	31,56	4,57	10,11	2,71
I <sub>ii</sub> /kA	2,14	14,01	1,81	24,53	3,73	9,91	2,18
I <sub>ii</sub> '/kA	2,58	19,5	1,84	35,46	4,56	10,06	2,7
<b>Kompensoitu verkko</b>							
I <sub>p</sub> /kA	5,48	38,457	2,866	72,276	8,361	19,737	2,696
I <sub>ii</sub> /kA	2,627	16,409	1,837	29,496	4,559	10,12	2,705
I <sub>ii</sub> /kA	2,136	12,882	1,795	22,506	3,704	9,901	2,172
I <sub>ii</sub> '/kA	2,609	18,4	1,832	33,428	4,54	10,068	2,696
Oikosulkuvirrat 400V 2*2MVA							
Vika paikka	EK1	MINE	CONCENTRATING	CONCENTRATING	MINEAREA	PUMP	
			_PLAN/1	_PLAN/2	400V	STATIONS	
<b>Kompensoimaton verkko</b>							
I <sub>p</sub> /kA	5,38	70,57	101,22	94,15	19,71	8,07	
I <sub>ii</sub> /kA	2,57	30,28	42,35	42,73	10,1	4,66	
I <sub>ii</sub> /kA	2,14	24,21	35,24	35,24	9,9	3,75	
I <sub>ii</sub> '/kA	2,55	33,68	46,23	42,36	10,05	4,65	
<b>Kompensoitu verkko</b>							
I <sub>p</sub> /kA	5,396	70,609	101,219	94,146	19,71	8,066	
I <sub>ii</sub> /kA	2,583	30,293	42,352	42,732	10,1	4,664	
I <sub>ii</sub> /kA	2,142	24,21	35,236	35,236	9,9	3,748	
I <sub>ii</sub> '/kA	2,565	33,705	46,352	42,355	10,05	4,648	