

**Teemu Vähäkangas**

**VIKAVIRTUALASKENTA-OHJELMAN  
JATKOKEHITTÄMINEN**

**Opinnäytetyö  
KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Huhtikuu 2010**

## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Yksikkö</b> Ylivieskan yksikkö	<b>Aika</b> 15.04.2010	<b>Tekijä/tekijät</b> Teemu Vähäkangas
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkötekniikka		
<b>Työn nimi</b> Vikavirtalaskentaohjelman jatkokehittäminen		
<b>Työn ohjaaja</b> Tuntiopettaja Kyösti Terentjeff ja yliopettaja Jari Halme	<b>Sivumäärä</b> 52 + 4 liitettä	
<b>Työelämäohjaaja</b> Suunnitteluinsinööri Jouni Ylikulju		
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Rautaruukin Raahen terästehtaalle. Tehtaalle oli hankittu vuonna 2005 Neplan vikavirtalaskentaohjelma, jonka avulla tehtaan sähköjakeluverkon vikavirtalaskennat voitiin suorittaa. Tämän työn tarkoituksena oli päivittää ohjelman verkkomalli vastaamaan tehtaan sähköverkon nykytilannetta ja selvittää vikavirtalaskennoissa esiintyvät ongelmat, sekä todeta ohjelman laskemien tulosten luotettavuus.</p> <p>Työ aloitettiin verkkomallin päivityksellä, jossa siihen lisättiin puuttuvat osiot ja tehtiin tarvittavat muutokset. Tämän jälkeen verrattiin ohjelman laskemia tuloksia käsin laskettuihin arvoihin, sekä Vaasan AMK:n tekemiin laskelmiin. Tällä tavoin pystyttiin varmistamaan ohjelman laskemien tulosten luotettavuus. Lisäksi ohjelmalla tehtiin suojauksen selektiivisyystarkasteluja tehtaan kahdelle 10 kV:n kojeistolle. Lopuksi on pohdittu miten ohjelmaa voitaisiin paremmin hyödyntää Raahen tehtaalla, sekä yhteenvetona kerätty loppupäätelmät ohjelmasta.</p>		
<b>Asiasanat</b> Maasulku, oikosulku, selektiivisyys, vikavirtalaskenta		

**ABSTRACT**

<b>CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b>	<b>Date</b> 15.4.2010	<b>Author</b> Teemu Vähäkangas
<b>Degree programme</b> Electrical Engineering		
<b>Name of thesis</b> Further development of residual current calculation program		
<b>Instructor</b> Kyösti Terentjeff and Jari Halme		<b>Pages</b> 52 + 4 appedixes
<b>Supervisor</b> Jouni Ylikulju		
<p>This thesis was made for the Raahe steel factory of Rautaruukki company. The factory had acquired Neplan residual current calculation program in 2005 with which the factory's electricity distribution networks residual current calculations could be made. The objective of this thesis was to update the program's network model to match up with the factory's current situation and to find out problems arising in the residual current calculations and to state the countability of the results calculated by the Neplan program.</p> <p>The work was started by updating the network model in which missing partitions were added and needed changes were made. Calculations made by hand and by the Vaasa University of Applied Sciences were then compared to the calculations made by the Neplan program. This way the countability of the program could be secured. Furthermore the program was used to make protection's selectivity reviews of the factory's two 10 kV switchgears. Finally, consideration was given on how the program could be utilized better in Raahe steel factory and, as a summary, final conclusions of the program were made.</p>		
<b>Key words</b> Earth fault, short circuit, selectivity, residual current calculation		

## **ESIPUHE**

Tämä työ on tehty Rautaruukin Raahen terästehtaalte. Haluan kiittää työelämäohjaajana toiminutta suunnitteluinsinööri Jouni Ylikuljua työhön liittyvistä neuvoista, sekä ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajana toiminutta tuntiopettaja Kyösti Terentjeffiä Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulusta ja kaikkia niitä henkilöitä jotka ovat auttaneet työni onnistumisessa.

Ylivieskassa 14.04.2010

Teemu Vähäkangas

## KÄSITTEEN MÄÄRITTELYT

$C_0$	Maakapasitanssi
EMS	Raahan terästehtaan energianmittausjärjestelmä
GIS	Gas insulated system (kaasueristeinen järjestelmä)
IEC	International electrotechnical commission
$I_{ef}$	Maasulkuvirta
$I_k''$	Alkuoikosulkuvirta
$I_{>}$	Suojareleen ensimmäinen ylivirtaporras
$I_{>>}$	Suojareleen toinen ylivirtaporras
$R_e$	Maadoitusresistanssi
$R_f$	Vikaresistanssi
$S_k$	Oikosulkuteho
$S_n$	Nimellisteho
$U_0$	Nollajännite
$U_v$	Vaihejännite
$X_d''$	Pitkittäisalkureaktanssi
$z_k$	Suhteellinen oikosulkuimpedanssi

SISÄLLYS	
1 JOHDANTO	1
2 SÄHKÖNJAKELUVERKKO	2
2.1 Rautaruukin Raahen terästehtaan jakeluverkko	2
2.2 Verkon maadoitusjärjestelmä	2
3 NEPLAN-OHJELMA	4
3.1 Yleisesittely	4
3.2 Neplanin käyttö Raahen terästehtaalla	5
3.3 Työvaiheiden kulku	5
3.3.1 Verkkomallin päivitys	5
3.3.2 Verkon suojausasetteluiden lisääminen ohjelmaan	6
3.3.3 Kuormitusten lisääminen kojeistoihin	7
3.3.4 EMS-päivitys eri kuormitustilanteille	7
4 TEORIA	8
4.1 Relesuojaus	8
4.2 Oikosulku	8
4.2.1 Laskeminen ominaisoikosulkutehoilla	9
4.3 Maasulku	9
4.3.1 Maadoitusmuuntaja	11
4.4 Tehonjakolaskenta	12
4.5 Suojausasetteluiden määrittely	13
4.6 Selektiivisyys	13
5 LASKENNAT JA TARKASTELUT	15
5.1 Oikosulkulaskennat ominaisoikosulkutehoilla	15
5.1.1 110 kV:n sisäkytkinlaitos (GIS)	17
5.1.2 Päämuuntaja VOM01-piiri	20
5.1.3 Päämuuntaja VOM02-piiri	25
5.1.4 Päämuuntajien VOM03-, VOM04-, VAM01-, VAM02-, VAM03-piirit	27
5.1.5 Johtopäätökset	28
5.2 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen	28
5.2.1 Johtopäätökset	34
5.3 SA 1C suojausasetteluiden määrittely	34
5.4 SA 1C selektiivisyystarkastelut	34
5.4.1 Normaali syöttötilanne	36
5.4.2 Varasyöttöyhteys käytössä	40
5.5 SA 3C selektiivisyystarkastelut	43
5.5.1 Kolmivaiheinen oikosulku	44
5.5.2 Suora maasulku	45
5.5.3 Maasulku 500 Ω:n vikavastuksella	46
5.5.4 Oikosulku 400 V:n kiskostossa	47
6 NEPLANIN HYÖDYNTÄMINEN RAAHEN TEHTAALLA	48
6.1 Ohjelman käyttömahdollisuus	48
6.2 Uusien lisenssien tarve	48
7 YHTEENVETO	50
7.1 Tulosten vertaaminen Vaasan tulosten kanssa	50
7.2 Loppupäätelmät Neplan-ohjelmasta	50
LÄHTEET	52
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Rautaruukki toimittaa metalliin perustuvia komponentteja, järjestelmiä ja kokonaistoimituksia rakentamiseen ja konepajateollisuudelle. Metallituotteissa yhtiöllä on laaja tuote- ja palveluvalikoima. Yhtiöllä on toimintaa 27 maassa ja henkilöstöä 11 700. Liikevaihto vuonna 2009 oli noin 2 miljardia euroa. Yhtiö käyttää markkinointinimeä Ruukki. Raahen terästehtas valmistaa kuumavalssattuja teräslevyjä ja -keloja. (Ruukki 2010).

Raahen terästehtaalte on hankittu vuonna 2005 Neplan-vikavirtalaskentaohjelma, jonka avulla tehtaan sähkönjakeluverkon vikavirtalaskennat voidaan suorittaa. Tehtaan jakeluverkolle on tehty laajennuksia ja uudistuksia sekä erilaisia muutoksia, joita ei ole päivitetty Neplanin verkkomalliin. Tämän opinnäytetyön aiheeksi muodostui vikavirtalaskentaohjelman jatkokehittäminen ja sen ominaisuuksien hyödyntäminen Raahen tehtaan jakeluverkossa.

Opinnäytetyön tavoitteena on saada ohjelman verkkomalli vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellisen tehdasverkon nykytilannetta ja selvittää vikavirtalaskennoissa esiintyvät ongelmat sekä todeta ohjelman laskemien tulosten luotettavuus. Ohjelman avulla saatuja laskentatuloksia verrataan käsin laskettuihin tuloksiin sekä Vaasan AMK:n tekemien simuloitien tuloksiin vikavirtalaskentojen osalta. Verkossa oleville suojarelleille suoritetaan selektiivisyystarkasteluja, joiden avulla pyritään varmistamaan verkon suojausten selektiivinen toiminta.

## **2 SÄHKÖNJAKELUVERKKO**

### **2.1 Rautaruukin Raahen terästehtaan jakeluverkko**

Tehtaan jakeluverkkoa syötetään kahdella 110 kV voimalinjalla Pyhäkoskelta ja Pikkaralasta. Kummankin voimalinjan siirtoteho on noin 115 MVA. Nämä voimalinjat on liitetty tehtaan 110 kV GIS-kojeistoon, joka syöttää seitsemää 110/10 kV päämuuntajaa. Tehtaan sisäisessä sähköjakelussa on siis käytössä 10 kV jännite. Raahen tehtaalla on käytössä kaksi omaa generaattoria, jotka tuottavat sähköä tehdasverkkoon. Generaattoreiden lisäksi sähköä tuottaa viisi tuulivoimalaa. Tuulivoimaloita tullaan rakentamaan neljä lisää ja nämä uudet voimalat ovat mukana tässä työssä tehdyissä tarkasteluissa. Tällä hetkellä generaattorit ja tuulivoimalat kykenevät tuottamaan noin puolet tehtaalla käytettävästä sähköenergiasta ja puuttuva osa joudutaan ostamaan ulkopuoliselta toimijalta.

Raahen terästehtaan keskiteho on noin 130 MW. Suurten sähkötehojen siirtoon vaaditaan hyvä ja luotettava sähköjakelujärjestelmä. Tehdasverkko on varsin laaja kokonaisuus ja se sisältää paljon erilaisia komponentteja. Tehdasverkossa on suuret tehot verrattuna asutusalueen jakeluverkkoon, mutta siirtoetäisyydet ovat vastaavasti paljon lyhyempiä. Tämä tuo haasteita oikosulku- ja maasulkuvirtojen osalta.

### **2.2 Verkon maadoitusjärjestelmä**

110 kV verkosto on maadoitettu Pyhäkoskella ja Pikkaralassa sijaitsevien päämuuntajien tähtipisteisiin kytkettyjen kuristimien kautta. Kuristimilla rajoitetaan maasulkuvirta 1500 A:iin. Tehtaan 10 kV jakeluverkko on ns. erotettu verkko, jossa verkoston tähtipiste on erotettu maasta. Tämän vuoksi yksivaiheinen maasulku ei synnytä suurta virtaa (oikosulkuvirtaa), vaan ainoastaan vähäisen kapasitiivisen maasulkuvirran.

Yksivaiheisen maasulun selville saamiseksi ja selektiivisen maasulkusuojauksen parantamiseksi on osaan verkostoa kytketty maadoitusmuuntajia, joiden tähtipiste on kytketty



maadoitusvastuksen kautta maahan. Näin saadaan verkostossa kulkemaan resistiivinen maasulkuvirta. (Ruukki standardit, 2010.)

### 3 NEPLAN-OHJELMA

#### 3.1 Yleisesittely

Neplan on verkostolaskentaohjelma, joka koostuu erilaisista moduuleista, joista ohjelmaa hankittaessa voi valita mitä ominaisuuksia ohjelmalta halutaan. Ohjelman avulla on mahdollista mallintaa monenlaisia sähköverkkoja sekä suorittaa niille erilaisia tarkasteluja ja laskentoja.

Neplanissa on graafinen käyttöliittymä, minkä ansiosta sähköverkko voidaan mallintaa pääkaaviotyypin muotoon. Käyttäjän kannalta tämä mahdollistaa helpon ja havainnollisen työskentelyn ja laskentatulosten tulkin. Verkon solmupisteiden määrää ei ole rajoitettu ohjelmassa, joten verkko on mahdollista mallintaa aina tarkoitukseen sopivalla tarkkuudella. (ABB 2010.)

Kuviossa 1 on esitetty ne moduulit joita lisenssiin on saatavilla ja Raahen tehtaalla käytössä olevat moduulit on merkitty rastilla.

KUVIO 1. Neplan-lisenssi

## **3.2 Neplanin käyttö Raahan terästehtaalla**

Raahan terästehtaalle on tehty vuonna 2005 opinnäytetyö, jossa on vertailtu muutamia vikavirtalaskentaohjelmia ja niiden eri ominaisuuksia. Näiden vertailujen perusteella Raahan tehtaalle on hankittu Nelpan-ohjelma. Tämän jälkeen ohjelmaan on rakennettu verkkomalli Raahan tehtaan jakeluverkosta. Verkkomallia on käytetty vikavirtalaskennoissa ainoastaan oikosulkuvirtojen laskemiseen. Käytössä olevalla lisenssillä on kuitenkin mahdollista suorittaa oikosulkulaskenta, maasulkulaskenta, tehojakolaskenta, kaapelin mitoitus sekä tehdä erilaisia selektiivisyystarkasteluja. Vikavirtalaskennan avulla on mahdollista määritellä oikosulkuvirtoja ja käyttää saatuja tuloksia apuna sähköverkon suunnittelussa. Ohjelmassa oleva verkkomalli ei ole aiemmin vastannut kaikilta osin tämänhetkistä verkon tilannetta ja sen vuoksi ohjelman käyttö on ollut melko vähäistä.

## **3.3 Työvaiheiden kulku**

### **3.3.1 Verkkomallin päivitys**

Vaasan AMK on tehnyt PSCAD:llä verkkomallin Raahan terästehtaan sähköjakeluverkosta. Tätä verkkomallia on hyödynnetty erilaisten häiriöiden selvityksissä. Ohjelmalla on tehty myös simuloiteja tehdasalueelle rakennettavien uusien tuulimyllyjen vaikutuksista tehtaan sähköverkkoon.

Neplanin käyttöä varten järjestettiin Raahessa kahden päivän mittainen koulutustilaisuus. Koulutuksesta sai paljon hyvää tietoa ohjelman käyttämiseen ja sillä tehtävien laskentojen tarkasteluun.

Ensimmäisenä työvaiheena oli verkkomallin päivittäminen ajan tasalle Neplan-ohjelmaan. Verkkomalli on rakennettu vuonna 2005, eikä siihen sen jälkeen ole tehty kaikkia tarvittavia muutoksia. Todelliseen tehdasverkkoon oli tehty muutoksia ja laajennuksia, jotka piti päivittää verkkomalliin. Verkkomallin päivitys aloitettiin tehdasverkon ylimmästä jänniteportaasta eli 110 kV:n GIS-kojeistosta, joka korvasi aiemmin käytössä olleen 110 kV ulkokytkinlaitoksen. Samalla päivitettiin 110 kV:n kaapeliyhteydet tehtaan sisäisessä jakelu-

verkossa. Seuraavaksi edettiin alemmalle 10 kV jänniteportaalle. Verkon päivitys tapahtui kojeisto kerrallaan verkon pääkaavioita apuna käyttäen.

Ohjelmassa olevaan kaapelikirjastoon lisättiin puuttuvia kaapelityyppejä, joiden tiedot löytyivät kaapelivalmistajien ilmoittamista tiedoista. Kaapelikirjastoon voidaan luoda valmiiksi erilaisia kaapelityyppejä tietoineen, jolloin uusien kaapeliyhteyksien lisääminen on huomattavasti sujuvampaa.

KytKentätilanteet tarkastettiin kaikkien kojeistojen osalta. Tarkastuksissa selvitettiin kojeistoissa olevien katkaisijoiden tilatiedot, eli onko katkaisija kiinni vai auki. Lisäksi selvitettiin kojeistojen erottimien vastaavat tilatiedot. Tällä tavoin saatiin verkkomalli vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellisen verkon tilannetta.

Ohjelmalla tehtäviä laskentoja varten täytyi saada kaikki tarvittavat tiedot verkon eri komponenteille ja laskenta-asetuksissa esiintyneet ongelmat ratkaistua. Tulosten laskeminen on ohjelmalla vaivatonta, mutta kaikkien asetusten saaminen kohdalleen vaatii työtä ja paljon erilaisia selvittelyjä. Suoritettuja laskentoja on käsitelty erikseen tässä työssä.

### **3.3.2 Verkon suojausasetteluiden lisääminen ohjelmaan**

Tehdasverkon yleisimmistä suojureleista luotiin valmiit mallipohjat ohjelman relekirjastoon. Relekirjaston avulla uusien suojureleiden lisääminen verkkoon oli helpompaa ja nopeampaa.

Suojareleet lisättiin päämuuntaja VOM03:n syöttämälle verkon osalle eli jakelukaavion mustalle osalle ja lisäksi SA 1C -kojeistoa syöttävälle verkon osalle (LIITE 1). Uusi suoja-rele lisättiin relekirjastosta haluttuun lähtöön ja sille määriteltiin suojausasettelut, jotka saatiin tehtaan reletietokannasta.

### **3.3.3 Kuormitusten lisääminen kojeistoihin**

Kaikkiin kojeistoihin lisättiin kuormitukset, jotka vastaavat normaalia käyttötilannetta. Kuormitusten tiedot kerättiin tehtaan EMS-järjestelmästä, joka mittaa energiavirtoja tehtaassa jakeluverkossa. Kuormitukset määriteltiin vuotuisten keskitehojen mukaan, jolloin päästiin mahdollisimman lähelle todellisia arvoja. Kuormitusten avulla saatiin ohjelmalla tehtävät tehojakolaskennat vastaamaan mahdollisimman tarkasti todellisen verkon tilannetta käytön aikana.

### **3.3.4 EMS-päivitys eri kuormitustilanteille**

Kojeistokohtaisia kuormituksia määritettäessä heräsi ajatus siitä, että kuormituksia olisi mahdollista muuttaa suoraan EMS-järjestelmästä saatavien mittaustietojen perusteella. Verkkomalliin lisätyistä kuormista kerättiin lista, joka siirrettiin Excel-tauluktoon. Taulukkoon pystyi helposti lisäämään kuormat suoraan EMS-järjestelmästä ja sen jälkeen siirtämään ne takaisin verkkomalliin. Tällä tavoin pystyttiin tarkastelemaan hetkellisiä kuormitustilanteita ja käyttämään saatuja tuloksia apuna suunniteltaessa poikkeavia kytkentätilanteita. Tarkasteluiden avulla voidaan tutkia mahdollisia ylikuormitustilanteita ja verkon ongelmakohtia.

## 4 TEORIA

### 4.1 Relesuojaus

Releet ovat mittalaitteiden kaltaisia laitteita, jotka tarkkailevat verkon sähköisiä suureita ja pystyvät havaitsemaan verkon epänormaalit tilat kuten ylikuormituksen tai eristyksen pettämisen. Releiden asetteluarvojen ylitys tulkitaan epänormaaliksi tilaksi, jolloin rele koskettimiensa välityksellä antaa ohjauksikäskyn tavallisimmin katkaisijalle viallisen osan irrottamiseksi terveestä sähköverkosta. (Mörsky 1992, 13.)

Releet tarkkailevat sähköverkon tilaa ja tarpeen vaatiessa suorittavat kytkentöjä automaattisesti, luotettavasti ja nopeasti. (Mörsky 1992, 13.)

Relesuojaukselta edellytetään seuraavaa:

- Toiminnan on oltava selektiivistä, jotta vian sattuessa mahdollisimman pieni osa verkosta jää pois käytöstä.
- Toiminnan on tapahduttava riittävän nopeasti ja herkästi niin, että vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisiksi sekä verkon stabiilisuuden tulee säilyä kaikissa olosuhteissa.
- Suojauksen tulee kattaa aukottomasti koko suojattava järjestelmä.
- Sen on oltava käyttövarma ja mahdollisimman yksinkertainen.
- Käytettävyyden tulee olla hyvä.
- Suojaus on voitava koestaa käyttöpaikalla.
- Suojauksen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen. (Mörsky 1992, 15.)

### 4.2 Oikosulku

Oikosulku on järjestelmän kahden tai useamman virtajohtimen välinen pieni-impedanssinen eristysvika. Oikosulku on yksivaiheinen, jos eristysvika sattuu yhden äärijohtimen ja nollajohtimen välillä. Oikosulku on monivaiheinen, jos eristysvika sattuu kahden tai useamman äärijohtimen välillä. (Ruppa, 2010.)

Oikosulkusuojausta suunniteltaessa on tärkeä pystyä määrittelemään oikosulkuvirrat eri tilanteissa ja eri osissa verkkoa. Oikosulkuvirran määrittämiseen on olemassa useita erilaisia laskentamenetelmiä. Osa näistä menetelmistä on monimutkaisia ja hankalia laskea, varsinkin laajoilla verkoilla. Kaikissa laskelmissa kiintoisin suure on oikosulkuvirran suuruus; vikavirran vaihekulma ei yleensä ole tärkeä (Lakervi & Partanen 2008, 30).

#### 4.2.1 Laskeminen ominaisoikosulkutehoilla

Oikosulkuvirran laskeminen ominaisoikosulkutehoilla on hyvä menetelmä silloin, kun laskennan tulosten ei tarvitse olla erityisen tarkkoja. Ominaisoikosulkuteho on se teho, joka esiintyisi kyseisen komponentin jälkeen, elleivät muut verkon osat rajoittaisi sitä. Yleensä lasketaan vain alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  ja laskennassa huomioidaan vain reaktanssit. (ABB 2000, 205.)

Laskenta on melko yksinkertaista ja nopeaa, lisäksi saadut tulokset ovat usein riittävän tarkkoja. Tulokset saadaan redusoitua samaan jänniteportaaseen kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella  $\mu$ .

#### 4.3 Maasulku

Maasulku on käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maan kanssa johtavassa yhteydessä olevan osan välinen eristysvika. Kuten oikosulku, maasulkukin voi olla yksitai monivaiheinen. Jos monivaiheisen maasulun eristysviat sattuvat samassa kohdassa järjestelmää, on kyseessä maoikosulku. Jos viat ovat eri kohdissa järjestelmää, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku. (Ruppa, 2010.)

Jos kaikki tähtipisteet ovat maasta eristetyt, sanotaan, että verkko on maasta erotettu. Verkon nollaimpedanssi on hyvin suuri sen muodostuessa vain johtojen maakapasitansseista (c). Tällaisessa verkossa maasulkuvirta on siksi hyvin pieni, eikä se häiritse normaalikäyttöä. Toiselta puolen maasulkua ei voida myöskään helposti mittauksilla todeta. Vian aikana

terveiden vaiheiden jännite maata vastaan nousee likimain pääjännitteen suuruiseksi ja tähtipisteen jännite puolestaan vaihejännitteen suuruiseksi. (Elovaara & Laiho 1990, 84.)

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on joka hetki nolla. Vastaavasti maakapasitanssien kautta kulkeva osa verkon varausvirroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun sattuessa terveiden vaiheiden vaihejännitteet maahan nähden kasvavat. Epäsymmetrian seurauksena varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa varausvirtaa kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. (ABB 2000, 248.)

Kaapeleille on valmiiksi laskettuja taulukoita, joissa kaapelilajeittain on ilmoitettu maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohden. Maasulkuvirran määrittämiseksi tarvitsee tällöin tuntea vain kaapelilaji sekä kaapelin pituus. (ABB 2000, 248.)

Maakapasitanssi  $C_0$  voidaan määrittää laskemalla tai kaapelitietojen avulla. Laskennassa voidaan käyttää kaavaa:

$$C_0 = \frac{I_{ef}}{\sqrt{3}\omega U} \quad (1)$$

jossa

$U$  = verkon pääjännite,

$I_{ef}$  = maasulkuvirta.

Vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee. Vikaresistanssilla maasulkuvirta voidaan laskea resistanssin kautta maadoitetussa verkossa kaavalla:



$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + (R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f + R_e)^2 + (R_f R_e 3\omega C_0)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

jossa  $R_f$  = vikaresistanssi,  
 $R_e$  = maadoitusresistanssi,  
 $U$  = verkon pääjännite,  
 $C_0$  = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi.

Maasulun aikana esiintyy vikapaikassa nollajännite  $U_0$ . Nollajännite on verkon tähtipisteen ja maan välinen jännite. Suorassa maasulussa nollajännite on käytännössä vaihejännitteen suuruinen. Vikaresistanssilla nollajännite muodostuu maasulkuvirran ja maadoitusresistanssin, sekä verkon kapasitanssien rinnankytkennän muodostamien impedanssien tulona. Nollajännite saadaan tällöin lausekkeesta:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_e}\right)^2 + (3\omega C_0)^2}} I_{ef} \quad (3)$$

jossa  $R_e$  = maadoitusresistanssi,  
 $C_0$  = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi,  
 $I_{ef}$  = maasulkuvirta vikavastuksella.

### 4.3.1 Maadoitusmuuntaja

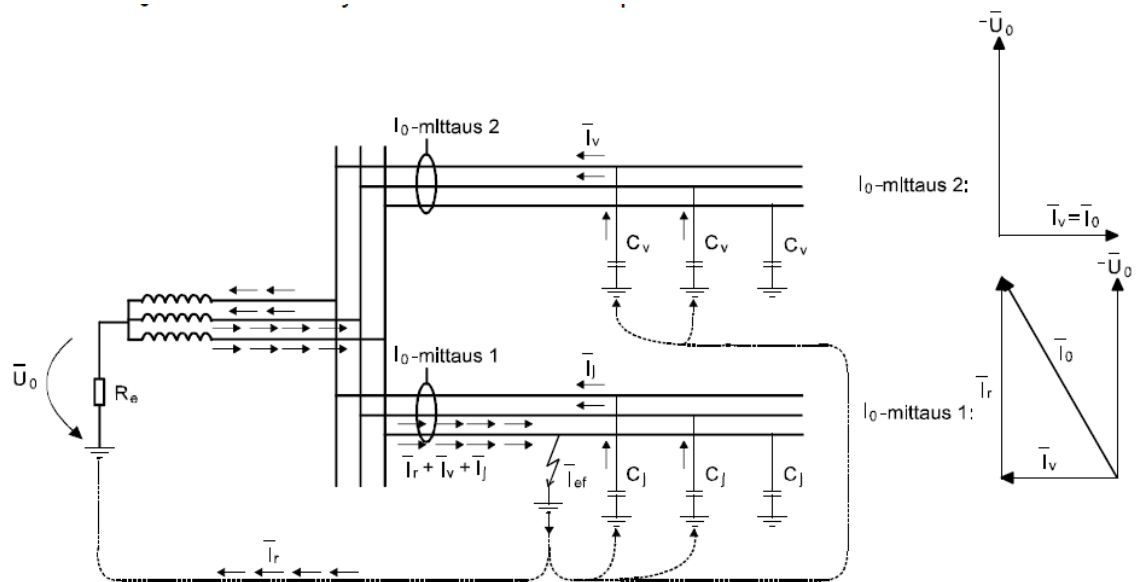
Maadoitusmuuntajan tarkoituksena on kasvattaa maasulkuvirtaa maasta erotetussa verkossa, jolloin maasulun havaitseminen on helpompaa ja maasulkusuojaus saadaan toimimaan varmemmin. Maadoitusmuuntajan tähtipisteen ja maan väliin kytketään vastus  $R_e$ , jonka avulla voidaan lisätä maasulkuvirran suuruutta. Tällöin vikapaikassa kulkee virta, joka muodostuu maadoitusresistanssin ja kaapeleiden maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summasta. Maadoitusmuuntaja pyritään sijoittamaan mahdollisimman ylös verkossa,

jolloin kaikki sen alapuolella olevat suojareleet havaitsevat vikatilanteessa sen syöttämän resistiivisen maasulkuvirran. Maadoitusmuuntajan syöttämä virta voidaan laskea kaavalla:

$$I_e = \frac{U_v}{R_e} \quad (4)$$

jossa  $U_v$  = verkon vaihejännite,

$R_e$  = maadoitusresistanssin suuruus.



KUVIO 2. Maasulkuvirran muodostuminen suurella resistanssilla maadoitetussa verkossa (ABB 2000, 257.)

#### 4.4 Tehonjakolaskenta

Sähköverkon tehonjaon määrittämisen avulla voidaan tarkastella verkon toimintaa käytön aikaisessa kuormitustilanteessa. Tehonjakolaskennalla voidaan esimerkiksi selvittää verkossa mahdollisesti tapahtuvat ylikuormitukset ja tehojen jakaantumiset poikkeavissa kytkentätilanteissa.

#### 4.5 Suojasasetteluiden määrittely

Asetteluarvojen määrittämistä varten tulee tuntea verkon eri osien suurimmat ja pienimmät vikavirtatasot, verkon eri osien ja komponenttien oikosulkukestoisuudet, nimellisvirrat sekä suurimmat kuormitusvirrat. (ABB 2000, 238.)

Oikosulkusuojaus tulee asetella siten, että suojaus toimii luotettavasti pienimmällä suojausalueella esiintyvällä oikosulkuvirralla. Asetteluarvot tulee tarkistaa suurimman kuormitusvirran sekä verkon komponenttien oikosulkukestoisuuksien mukaisesti. Suojaus ei saa toimia suurimmilla kuormitusvirroilla, joita määritettäessä tulee ottaa huomioon muuntajan kytkentävirtasysäykset, moottorien käynnistysvirrat ja muut hetkelliset ylivirtatilanteet, esimerkiksi oikosulun aikaista alijännitetilannetta seuraava jälkitilanne. Asettelut tulee valita toisalta niin, että verkon komponenttien oikosulkukestoisuuksia, esim. muuntajan termistä kestoisuutta läpimenevillä vikavirroilla, ei missään tilanteessa vaaranneta. (ABB 2000, 238.)

#### 4.6 Selektiivisyys

Ylivirtasuojauksen selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että vain lähinnä vikapaikkaa oleva ylivirtasuojaja toimii erottaen mahdollisimman pienen osan verkkoa jännitteettömäksi. Laukeamisen aiheuttava oikosulkuvirta kulkee kaikkien lauennutta suojaa edeltävien sarjassa sijaitsevien oikosulkusuojiin läpi. Mikään lauennutta suojaa edeltävä suoja ei saa lauetta. (Ruppa 2010.)

Selektiivisyyttä tutkitaan normaalisti piirtämällä kaikkien sarjassa sijaitsevien ylivirtasuojien laukaisukäyrät samaan virta-aikakoordinaatistoon. Toiminta on selektiivistä, jos peräkkäisten ylivirtasuojien laukaisukäyrät eivät leikkaa eivätkä sivua toisiaan. Käytännössä varsinkin sulakkeet ovat verraten karkeatoleranssisia laitteita, joten eri käyrien väliin on jätävä riittävä varmuusmarginaali. (Ruppa 2010.)

Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Jos vierekkäiset suoja-alueet osaksi peittävät toisensa, on suojaus aukoton. Suojaus on absoluuttisesti selektiivinen, kun se toimii vain omalla suoja-alueellaan tapahtuvissa vioissa. Aikaan perustuvaa

selektiivisyyttä sanotaan aikaselektiivisyydeksi, ja vastaavasti puhutaan virtaselektiivisyydestä. Suoja-alueita voivat olla esimerkiksi johdot, muuntajat generaattorit ja moottorit. Selektiivisyys on ominaisuus, jonka avulla rele havaitsee vian suoja-alueella mutta ei toimi jos vikaa ei ole tai vika on suoja-alueen ulkopuolella. (Mörsky 1992, 15.)

Suojattaessa säteittäistä jakeluverkkoa vakioaikaylivirtareleillä on peräkkäisten katkaisijoiden releiden hidastuksille varattava riittävä aikaporrastus selektiivisyyden takia. Liian suurten aikaportaiden käyttö hidastaa kuitenkin liiaksi syöttösunnassa olevia katkaisijoita. (Mörsky 1992, 295.)

## 5 LASKENNAT JA TARKASTELOT

### 5.1 Oikosulkulaskennat ominaisoikosulkutehoilla

Ominaisoikosulkutehot ja oikosulkuvirrat lasketaan 110 kV GIS-kojeistolle, sekä päämuuntajien syöttämille 10 kV kojeistoille. Lisäksi lasketaan vastaavat arvot 10 kV VO 1C -kojeiston II-kiskoon, jota syötetään kuristimien kautta VO 1B -kojeistosta. Tämän jälkeen verrataan käsin laskettuja tuloksia Neplanin laskemiin tuloksiin. Käsin laskennassa ei ole huomioitu kiskosiltojen ja kaapeleiden vaikutuksia laskentatuloksiin. Laskennoista on jätetty huomioimatta myös alempana verkossa olevat pienemmät pyörivät sähkökoneet. Näiden vaikutus laskettuihin arvoihin on kuitenkin vähäinen, joten ne on laskennan yksinkertaistamisen vuoksi jätetty huomioimatta.

Generaattoreiden ja moottoreiden ominaisoikosulkuteho  $S_{kp}$  saadaan seuraavasti:

$$S_{kp} = \frac{S_n}{X_d''} \quad (5)$$

jossa  $S_n$  = nimellisteho,  
 $X_d''$  = pitkittäisalkureaktanssi.

Muuntajan ominaisoikosulkuteho  $S_{kpT}$  saadaan kaavalla:

$$S_{kpT} = \frac{S_n}{z_k} \quad (6)$$

jossa  $S_n$  = muuntajan nimellisteho,  
 $z_k$  = suhteellinen oikosulkuimpedanssi.

Oikosulkuteho  $S_k$  saadaan laskettua oikosulkuvirrasta kaavalla:

$$S_k = \sqrt{3} * U_n * I_k'' \quad (7)$$

Rinnan kytkettyjen verkon osien oikosulkutehojen yhdistäminen:

$$S_k = S_{k1} + S_{k2} + \dots + S_{kn} \quad (8)$$

Sarjaan kytkettyjen verkon osien oikosulkutehojen yhdistäminen:

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}} \quad (9)$$

Oikosulkuvirta  $I_k''$  saadaan laskettua ominaisoikosulkutehosta kaavalla:

$$I_k'' = \frac{1,1 * S_k''}{\sqrt{3} U_n} \quad (10)$$

Laskennoissa käytetään IEC60909 standardin mukaista korjauskerrointa 1,1. Kerroin määräytyy eri jänniteportaissa taulukon 1 mukaisesti:

TAULUKKO 1. IEC 60909 mukainen jännitekerroin c (ABB 2000, 198.)

Nimellisjännite	Maksimioikosulkuvirta $C_{max}$	Minimioikosulkuvirta $C_{min}$
pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1.00 1.05	0.95 1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

### 5.1.1 110 kV:n sisäkytkinlaitos (GIS)

Määritetään käsin laskemalla 110 kV GIS-kojeiston ominaisoikosulkuteho ja oikosulkuvirta. Laskennassa huomioidaan ainoastaan suurimpien paikallisten sähkökoneiden vaikutukset. Nämä koneet ovat generaattorit G01 ja G02 sekä moottoripuhallin M2. Kantaverkon tiedot on saatu verkkoyhtiöltä.

Kantaverkon oikosulkuvirta  $I_k'' = 5\text{kA}$

Generaattori G01

Teho = 31.5MVA

$X_d'' = 0.14$

Generaattori G02

Teho = 89MVA

$X_d'' = 0.152$

Moottoripuhallin M2

Teho = 11MW

$X_d'' = 0.23$

Käsin lasketut arvot:

Kantaverkon oikosulkuteho  $S_k''$ :

$$S_k'' = \sqrt{3} * 110kV * 5kA = 952MVA$$

Generaattorin G01 oikosulkuteho ja oikosulkuvirta:

$$S_{kpG} = \frac{31.5MVA}{0.14} = 225MVA$$

$$I_k'' = \frac{1,1 * 225MVA}{\sqrt{3} * 10.5kV} = 13.61kA$$

Redusoidaan saatu oikosulkuvirta 110 kV jänniteportaaseen:

$$I_k'' = \frac{10.5kV}{110kV} * 13.61kA = 1.29kA$$

Generaattorin G02 oikosulkuteho ja oikosulkuvirta:

$$S_{kpG} = \frac{89MVA}{0.152} = 585.50MVA$$

$$I_k'' = \frac{1,1 * 585.53MVA}{\sqrt{3} * 10.5kV} = 35.42kA$$

Redusoidaan 110 kV jänniteportaaseen:

$$I_k'' = \frac{10.5kV}{110kV} * 35.42kA = 3.38kA$$



Moottoripuhaltimen M2 oikosulkuteho ja oikosulkuvirta:

$$S_{kpM} = \frac{11MW}{0.23} = 47.80MW$$

$$I_k'' = \frac{1,1 * 47.8MVA}{\sqrt{3} * 10.5kV} = 2.89kA$$

Redusoidaan 110 kV jänniteportaaseen:

$$I_k' = \frac{10.5kV}{110kV} * 2.89kA = 0.27kA$$

Oikosulkuteho 110 kV kiskossa:

$$952 MVA + 225MVA + 585.50MVA + 47.8MVA = 1810MVA$$

Oikosulkuvirta 110 kV kiskossa:

$$5kA + 1.29kA + 3.38kA + 0.27kA = 9.94kA$$

Neplanin laskemat arvot:

Oikosulkuteho:

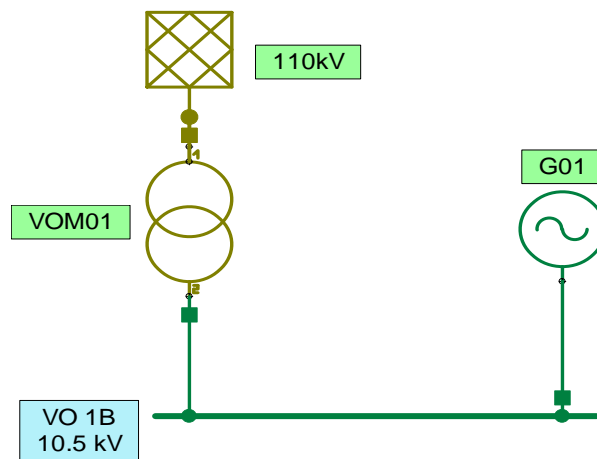
$$S_{kp} = 1722.2MVA$$

Oikosulkuvirta:

$$I_k'' = 9.04kA$$

### 5.1.2 Päämuuntaja VOM01-piiri

Lasketaan ominaisoikosulkuteho ja oikosulkuvirta VO 1B -kojeistolle. Kojeistoa syöttää päämuuntaja VOM01 ja generaattori G01.



KUVIO 3. Tarkasteltava piiri

Tehtaan 110 kV verkon oikosulkuteho  $S_k$  on:

$$S_k = 1810 \text{ MVA}$$

Muuntaja VOM01

Teho = 31.5 MVA

$$z_k = 0.12$$

Generaattori G01

Teho = 31.5 MVA

$$X_d'' = 0.14$$

Käsin lasketut arvot

Muuntajan laskettu oikosulkuteho:

$$S_{kpT} = \frac{31.5MVA}{0.12} = 262.5MVA$$

Laskentapisteestä tarkasteltuna muuntaja ja 11 0kV verkko ovat sarjassa, joten verkosta tuleva oikosulkuteho  $S_{kp}$  on:

$$S_{kp} = \frac{1810MVA * 262.5MVA}{1810MVA + 262.5MVA} = 229.25MVA$$

Generaattorin G1 oikosulkuteho:

$$S_{kpG} = \frac{31.5MVA}{0.14} = 225MVA$$

Oikosulkuteho  $S_k''$  VO 1B -kojeiston kiskolla on siten:

$$S_k'' = S_{kp} + S_{kpG} = 454.25MVA$$

Laskennoissa käytetään IEC60909 standardin mukaista korjauskerrointa 1,1. Tällöin oikosulkutehoksi saadaan:

$$1.1 * 454.25MVA = 499.68MVA$$

Oikosulkutehosta saadaan laskettua oikosulkuvirta kiskolle:

$$I_k'' = \frac{1,1 * 454.25 \text{MVA}}{\sqrt{3} * 10.5 \text{kV}} = 27.47 \text{kA}$$

Neplanin laskemat arvot:

Oikosulkuteho:

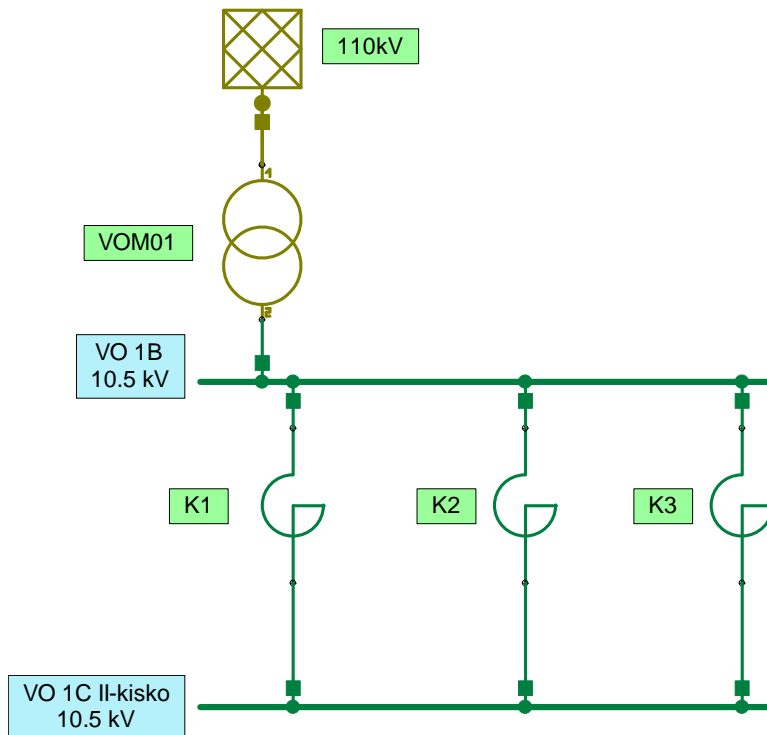
$$S_{kp} = 561.67 \text{MVA}$$

Oikosulkuvirta:

$$I_k'' = 30.88 \text{kA}$$

### 5.1.2.1 VO 1C –kojeisto

Lasketaan ominaisoikosulkuteho ja oikosulkuvirta 10 kV VO 1C -kojeiston II-kiskoille. Kojeistoa syötetään 15 MVA kuristimien K1, K2 ja K3 kautta VO 1B -kojeistosta. VO 1B -kojeistolle on aikaisemmin laskettu kyseiset arvot ja niitä on käytetty apuna seuraavissa laskennoissa.



KUVIO 4. Tarkasteltava piiri

Muuntaja VOM01

Teho = 31.5MVA

$Z_k = 0.12$

Kuristin K1, K2 ja K3

Teho = 15MVA

$Z_k = 0.10$

VO 1B:

Oikosulkuteho  $S_{kp} = 499.68\text{MVA}$

Oikosulkuvirta  $I_k'' = 27.47\text{kA}$

Yhden kuristimen oikosulkuteho:

$$S_{kpK} = \frac{15MVA}{0.10} = 150MVA$$

Laskentapisteestä tarkasteltuna rinnankytketyt kuristimet ovat sarjassa syöttävän kojeiston kanssa, jolloin niiden kautta kulkeva oikosulkuteho  $S_{kp}$  voidaan laskea seuraavasti:

$$S_{kp} = \frac{499.68 * (3 * 150)MVA}{499.68 + 3 * 150MVA} = 236.77MVA$$

Korjauskerroin standardin IEC60909 mukaan:

$$1.1 * 236.77 = 260.45MVA$$

Oikosulkuvirta VO 1C -kojeiston kiskossa:

$$I_k'' = \frac{1.1 * 236.77MVA}{\sqrt{3} * 10.5kV} = 14.32kA$$

Neplanin laskemat arvot:

Oikosulkuteho:

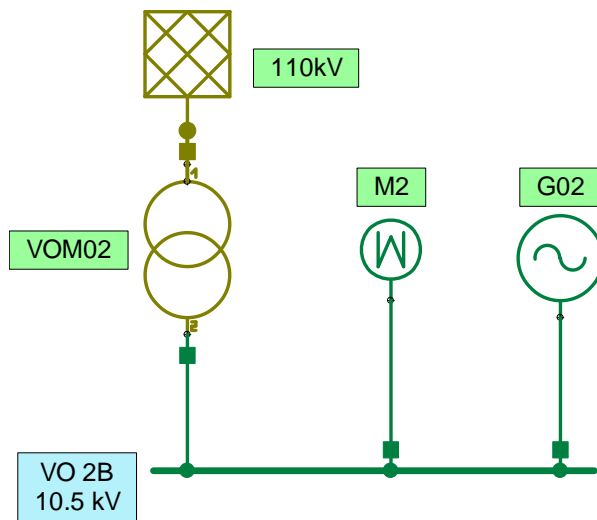
$$S_{kp} = 326.67MVA$$

Oikosulkuvirta:

$$I_k'' = 17.96kA$$

### 5.1.3 Päämuuntaja VOM02-piiri

Lasketaan ominaisoikosulkuteho ja oikosulkuvirta 10 kV VO 2B -kojeistolle. Kojeistoa syöttää päämuuntaja VOM02 ja generaattori G02. Kojeistoon on kytketty myös 11 MW moottoripuhallin M2



KUVIO 5. Tarkasteltava piiri

Muuntaja VOM02

Teho = 80MVA

$Z_k = 0.12$

Generaattori G02

Teho = 89MVA

$X_d'' = 0.152$

Moottoripuhallin M2

Teho = 11MW

$X_d'' = 0.23$

Käsin lasketut arvot:

Muuntajan laskettu oikosulkuteho:

$$S_{kpT} = \frac{80MVA}{0.12} = 666.67MVA$$

Verkon ja muuntajan aiheuttama oikosulkuteho:

$$S_{kp} = \frac{1810MVA * 666.67MVA}{1810MVA + 666.67MVA} = 487.20MVA$$

Generaattorin G02 oikosulkuteho:

$$S_{kpG} = \frac{89MVA}{0.152} = 585.53MVA$$

Moottoripuhaltimen M2 oikosulkuteho:

$$S_{kpM} = \frac{11MW}{0.23} = 47.80MW$$

Oikosulkutehot yhteensä VO 2B -kojeiston kiskossa:

$$S_k'' = S_{kp} + S_{kpG} + S_{kpM} = 1120.55MVA$$

Korjauskerroin standardin IEC60909 mukaan:

$$1.1 * 1120.55MVA = 1232.61MVA$$



Oikosulkuvirta VO 2B -kojeiston kiskolla:

$$I_k'' = \frac{1,1 * 1120,55 MVA}{\sqrt{3} * 10,5 kV} = 67,78 kA$$

Neplanin laskemat arvot:

Oikosulkuteho:

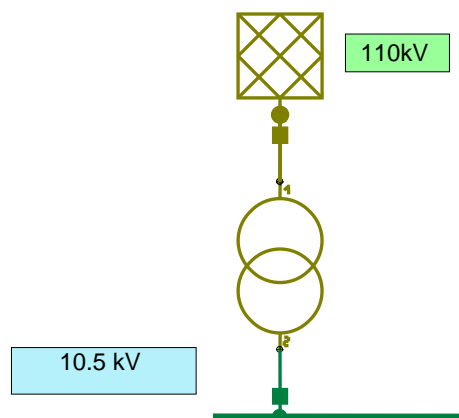
$$S_{kp} = 1415 MVA$$

Oikosulkuvirta:

$$I_k'' = 77,82 kA$$

#### 5.1.4 Päämuuntajien VOM03-, VOM04-, VAM01-, VAM02-, VAM03-piirit

Päämuuntajien syöttämät piirit ovat perusrakenteeltaan samanlaiset, jonka vuoksi niille tehtyjä laskentoja ei ole erikseen käsitelty. Piirien perusrakenne on kuvattu alla olevassa kuviossa.



KUVIO 6. Muuntopiirin rakenne

Alla olevaan taulukkoon on kerättyä muuntopiireille käsin lasketut oikosulkutehot ja oikosulkuvirrat, sekä Neplanin laskemat vastaavat arvot. Arvot on laskettu päämuuntajan syöttämälle 10 kV kojeiston kiskolle.

TAULUKKO 2. Muuntopiirien laskentatulokset

<b>Muunto- piiri</b>	<b>Muunta- jan teho MVA</b>	<b>Laskettu oikosulku- teho MVA</b>	<b>Laskettu oikosulku- virta kA</b>	<b>Neplanin oikosulku- teho MVA</b>	<b>Neplanin oikosulku- virta kA</b>
VOM03	63	447.7	24.6	507.5	27.9
VOM04	25	241.6	13.3	236.5	13.0
VAM01	40	360.4	19.8	433.3	23.8
VAM02	63	447.7	24.6	492.3	27.1
VAM03	63	477.7	24.6	452.1	24.9

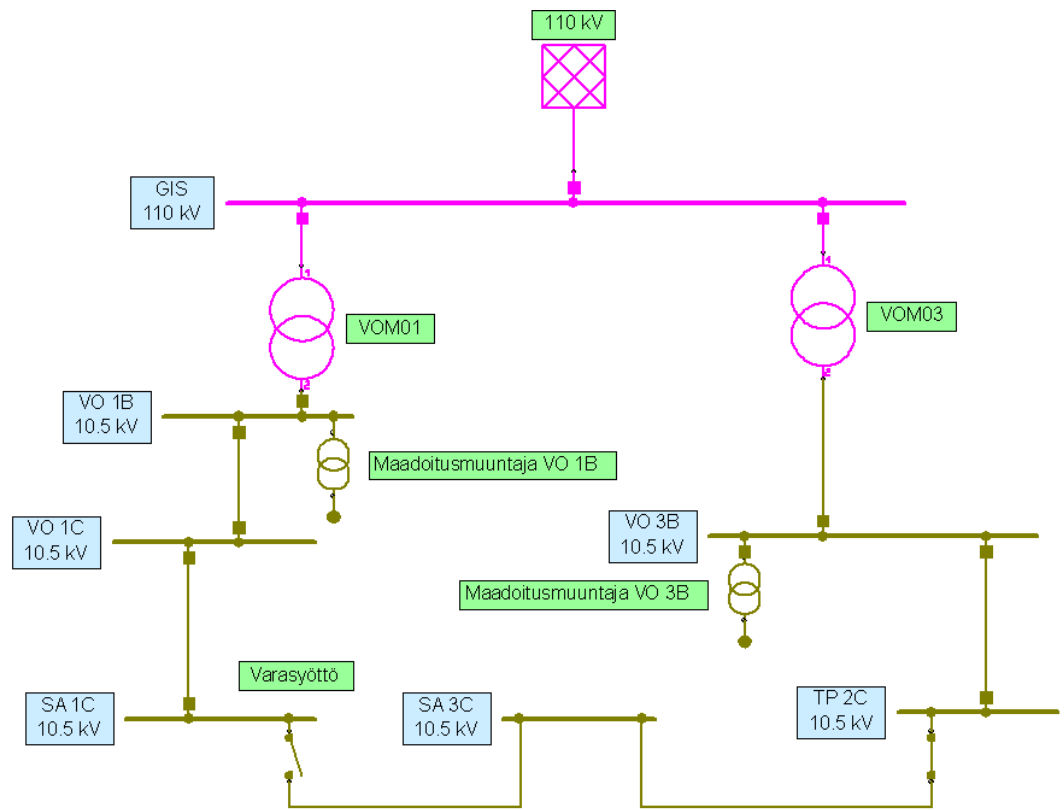
### 5.1.5 Johtopäätökset

Käsin tehtyjen laskentojen avulla pystyttiin tarkistamaan Neplanin laskemien tulosten luotettavuus. Saaduista laskentatuloksista voidaan nähdä, että Neplanin laskemat arvot ovat lähes kaikissa tapauksissa hieman suurempia. Neplanin tulokset ovat kuitenkin hyvin lähellä käsin laskettuja, jolloin niiden luotettavuus voidaan todeta. Tuloksien väliset erot johtuvat enimmäkseen siitä, että käsin laskennassa oli huomioituna ainoastaan verkon suurimmat pyörivät sähkökoneet. Alempana verkossa olevat lukuisat pienemmät pyörivät sähkökoneet on jätetty laskennan yksinkertaistamisen takia huomioimatta.

### 5.2 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen

Raahan terästehtaan 10 kV sähköverkko on maasta erotettu verkko, joka on maadoitettu suurella vastuksella maadoitusmuuntajien tähtipisteiden kautta. Tarkasteltavassa piirissä muuntajan maadoitusvastuksen suuruus on 300  $\Omega$ .

Maasulkulaskennoissa oli tarkoituksena määrittää käsin laskemalla maasulkuvirta  $I_{ef}$  ja nollijännite  $U_0$  suorassa maasulussa, sekä vastaavat arvot  $500 \Omega$ :n vikavastuksella. Tämän jälkeen voitiin verrata saatuja tuloksia Neplan-ohjelman ja Vaasan AMK:n laskemiin tuloksiin. Tarkasteltava piiri oli päämuuntaja VOM03:n syöttämä verkko eli jakelukaavion musta osio. Varasyöttöyhteys oli tarkastelutilanteessa auki.



KUVIO 7. Tarkasteltava piiri

Käsin lasketut maasulkuvirrat koostuvat kaapeleiden, sekä maadoitusmuuntajan aiheuttamista maasulkuvirroista. Kaapeleiden maasulkuvirran määrittämiseksi kerättiin kaapelitiedot ja kaapelipituudet tehtaan kaapelikirjastosta. Kaapelivalmistajan taulukosta saatiin kaapelin maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohden (LIITE 2). Näiden tietojen pohjalta pystyttiin määrittelemään kaapeleiden aiheuttamat maasulkuvirrat.

TAULUKKO 3. Kaapeleiden maasulkuvirrat

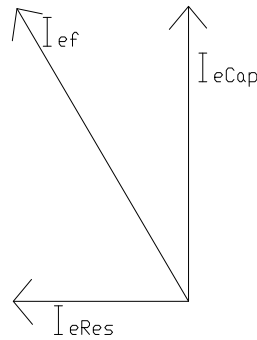
Kojeisto	Kaapeli	Määrä	Pituus m	Maasulkuvirta A
SA 3C	AHXAMK 3*300	1	500	1.3
	AHXAMK 3*300	1	500	1.3
TP 2C	AHXAMK 3*120	1	1100	2
	AHXAMK 3*120	1	995	1.8
	AHXAMK 3*120	1	135	0.25
	AHXAMK 3*120	1	500	0.9
	AHXCMK 3*300	2	2000	10.4
MA 1B	AHXCMK 3*300	3	450	3.5
	AHXAMK 3*240	1	50	0.12
	AHXCMK 3*240	1	260	0.625
	AHXAMK 3*240	1	260	0.625
HL 1B	AHXCMK 3*300	1	324	0.85
	AHXCMK 3*300	3	350	2.73
VO 3B	APYAKMM 3*240	1	350	1.1
Väilyhteys VO 1B-VO 3B	AHXCMK 1*800	2	110	0.9
<b>Yhteensä</b>				<b><u>28.5</u></b>

Suorassa maasulussa maadoitusmuuntajan vaikutus maasulkuvirtaan pystyttiin määrittelemään suoraan ohmin lain avulla, koska tunnettiin maasulkujännite ja maadoitusresistanssin suuruus. Maadoitusmuuntajan virta on tällöin:

$$I_e = \frac{6062 \text{ V}}{300 \Omega} = 20.2 \text{ A}$$

Saadut virta-arvot voidaan yhdistää vektorilaskennan avulla. Kaapeleiden ja maadoitusmuuntajan virtojen kulmaero on 90 astetta, jolloin ne voidaan laskea yhteen seuraavasti:

$$I_{ef} = \sqrt{28.5^2 + 20.2^2} = 34.9 \text{ A}$$



KUVIO 8. Virtavektorilaskenta

Suorassa maasulussa maasulkuvirraksi muodostui 34.9 A ja nollajännite on tällöin vaihejännitteen suuruinen.

Maakapasitanssin suuruus voidaan määrittää laskemalla. Laskenta voidaan suorittaa kun tiedetään maasulkuvirran suuruus, sekä pääjännite. Laskennassa voidaan käyttää kaavaa:

$$C_0 = \frac{28.5 \text{ A}}{\sqrt{3} * \omega * 10500 \text{ V}} = 4.99 * 10^{-6} \mu\text{F}$$

Vikaresistanssilla on pienentävä vaikutus maasulkuvirran suuruuteen. Tarkasteluissa on käytetty 500  $\Omega$  vikavastusta, jolloin maasulkuvirta voidaan määrittellä seuraavasti:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + (300\Omega * 3 * \omega * 4.99 * 10^{-6} \mu\text{F})^2}}{\sqrt{(500\Omega + 300\Omega)^2 + (500\Omega * 300\Omega * 3 * \omega * 4.99 * 10^{-6})^2}} \frac{10500 \text{ V}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{ef} = 9.83 \text{ A}$$

Vikapaikassa esiintyvä nollajännite  $U_0$  voidaan määrittää laskemalla:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{300\Omega}\right)^2 + (3 * \omega * 4.99 * 10^{-6})^2}} * 9.83A$$

$$U_0 = 1705V$$

Alla olevissa taulukoissa on esitetty tarkastelujen tulokset.

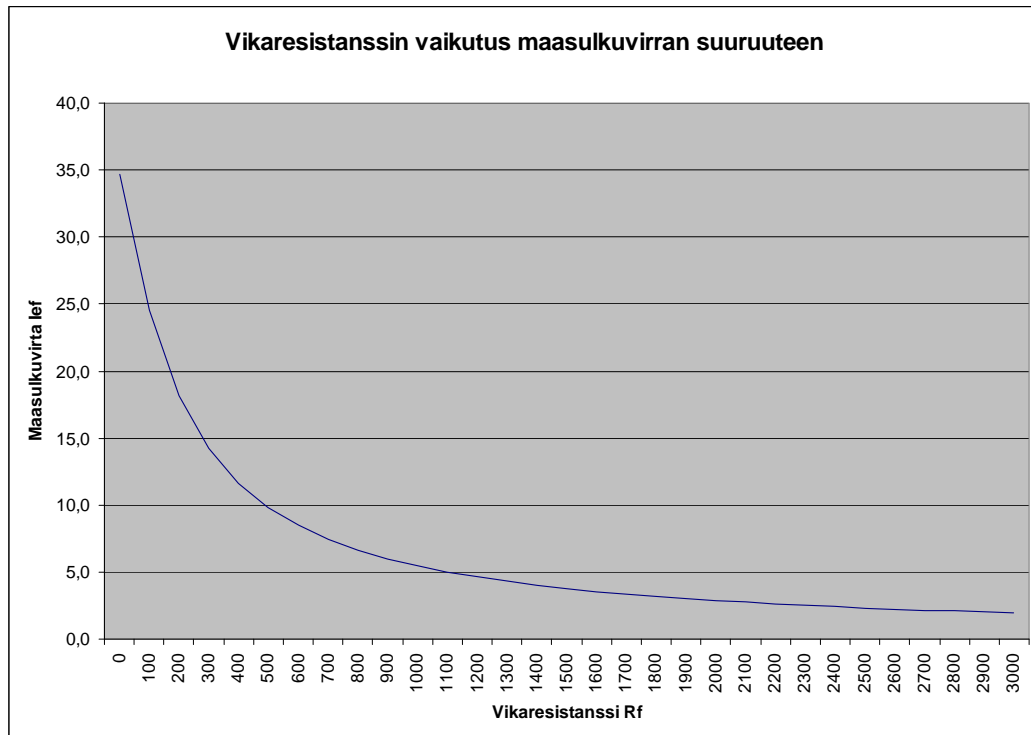
TAULUKKO 4. Suora maasulku

Arvot	Käsin laskennat	Neplanin laskennat	Vaasan laskennat
Maasulkuvirta	28.6 A	31 A	-
Maasulkuvirta maadoitusmuuntajalla	34.9 A	35 A	34.7 A
Nollajännite	6062 V	6668 V	-
Nollajännite maadoitusmuuntajalla	6062 V	6668 V	6180 V

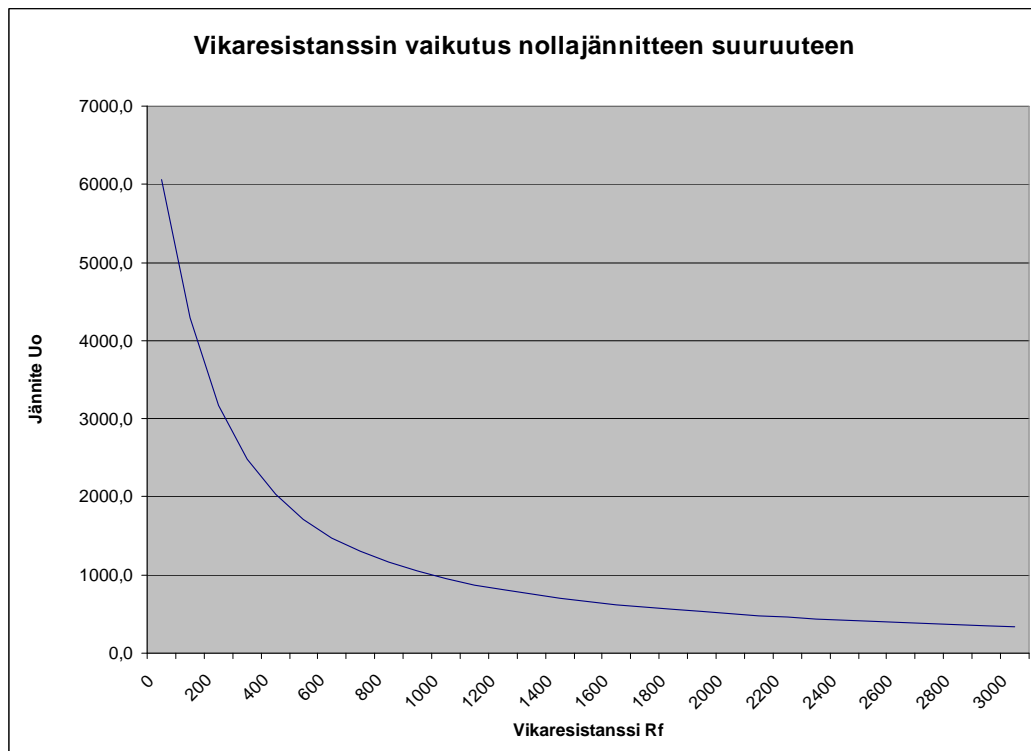
TAULUKKO 5. Maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella

Arvot	Käsin laskennat	Neplanin laskennat	Vaasan laskennat
Maasulkuvirta maadoitusmuuntajalla	9.83 A	11 A	9 A
Nollajännite maadoitusmuuntajalla	1705 V	2030 V	1710 V

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty miten vikaresistanssi vaikuttaa maasulkuvirran ja maasulkujännitteen suuruuteen.



KUVIO 9. Vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirran suuruuteen (Ylikulju.)



KUVIO 10. Vikaresistanssin vaikutus nollajännitteen suuruuteen (Ylikulju.)

### **5.2.1 Johtopäätökset**

Tulokset ovat melko lähellä toisiaan. Vaasan AMK:n laskentojen tulokset ovat lähes identtiset omien laskentojen kanssa, joten ne tukevat omia laskelmia.

Neplanin laskemat arvot ovat kaikissa tarkasteluissa hieman suurempia. Maasulkuvirta suorassa maasulussa ilman maadoitusmuuntajaa poikkeaa eniten käsin laskennan tuloksista. Nämä poikkeamat johtuvat siitä, että Neplan laskee tarkemmilla arvoilla ja käyttää standardin IEC60909 mukaista korjauskerrointa 1.1. Lisäksi käsin laskennan yksinkertaistamisen vuoksi jätettiin huomioimatta erittäin lyhyet kaapeliyhteydet.

### **5.3 SA 1C suojausasetteluiden määrittely**

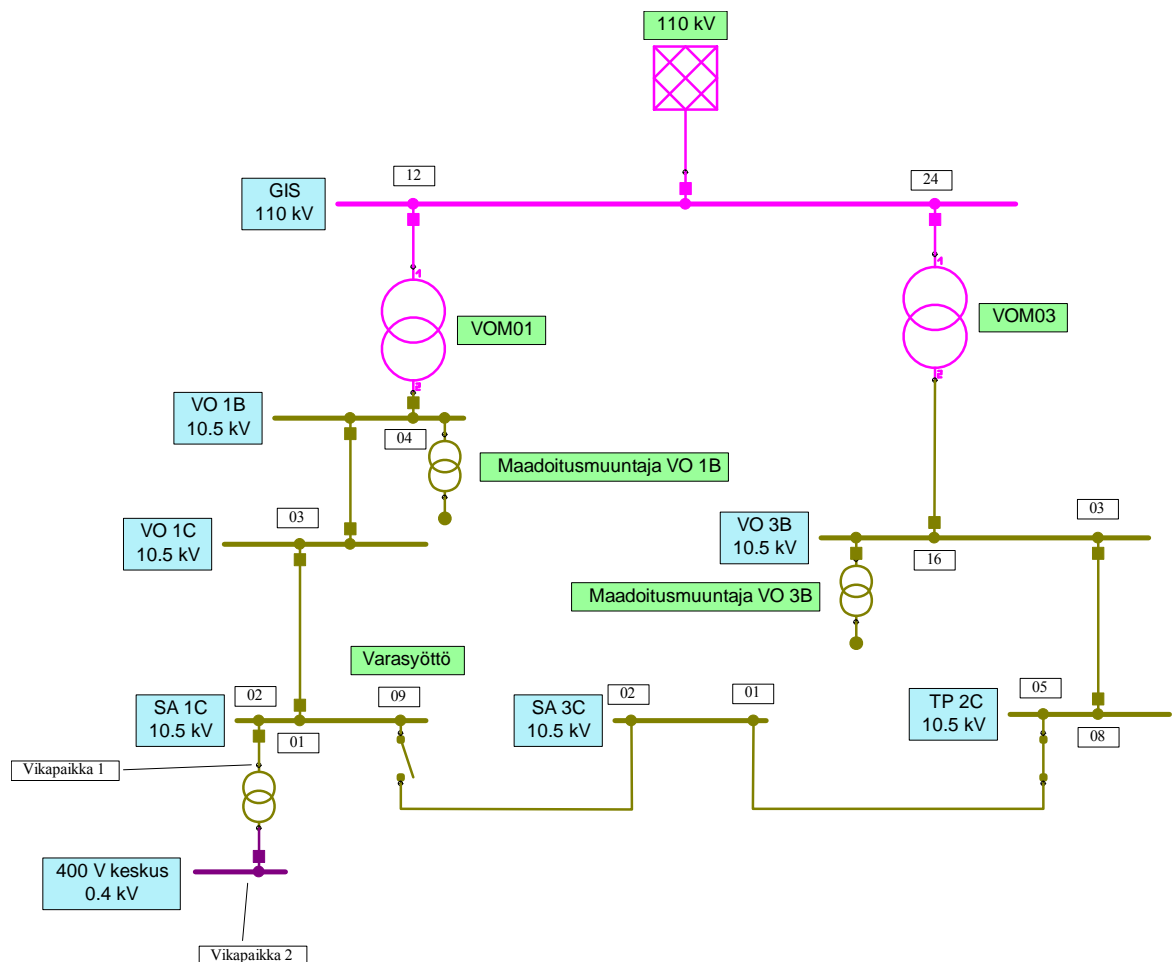
Raahen tehtaalla syväsatamaan tullaan rakentamaan kesällä 2010 uusi 10 kV kojeisto SA 1C. Kojesta on mahdollista syöttää kahdesta eri muuntopiiristä. Normaali syöttö tapahtuu voimalaitoksen VO 1C -kojeistosta ja varasyötön ollessa kytkettynä tapahtuu syöttö sataman SA 3C -kojeistosta. SA 1C -kojeiston alustavien suojausasetteluiden määrittäminen tehtiin tämän opinnäytetyön aikana. Kojestoon liittyvissä vikavirtalaskennoissa käytettiin apuna Neplanin ja saatujen tulosten pohjalta määriteltiin suojausasetteluiden alustavat suojausasettelut. Asettelut tarkentuvat kun kojeistoa päästään rakentamaan ja saadaan tarkempi tieto alajännitepuolelle tulevista sähkökäytöistä. Alustavat suojausasettelut on esitetty liitteessä 3. Kojeston suojausasetteluiden selektiivisyyttä on tarkasteltu normaali- ja varasyötön osalta erikseen tässä työssä.

### **5.4 SA 1C selektiivisyydestä tarkastelut**

Selektiivisyydestä tarkastelut suoritettiin suojausasetteluiden laukaisukäyriä vertaamalla. Neplanin avulla laukaisukäyrien vertaaminen on helppoa, koska kaikki tarkasteltavan piirin käyrät voidaan kerätä samaan kuvaajaan. Laukaisukäyrissä ei ole mukana katkaisijan toiminta-aikaa.



Tarkastelun kohteena oli SA 1C -kojeisto. Vikapaikka oli muuntajan yläjännitepuolella SA 1C -kojeiston lähdössä 02 (KUVIO 11. vikapaikka 1). Tarkasteltavia vikoja oli kolmivaiheinen oikosulku, maasulku ja maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella. Tarkastelut tehtiin normaalisyötöllä VO 1C:ltä, sekä varasyötöllä SA 3C:n kautta. Yhdessä oikosulkutarkastelussa vikapaikka oli SA 1C:n alajännitepuolella eli 400 voltin kiskostossa (KUVIO 11. vikapaikka 2).



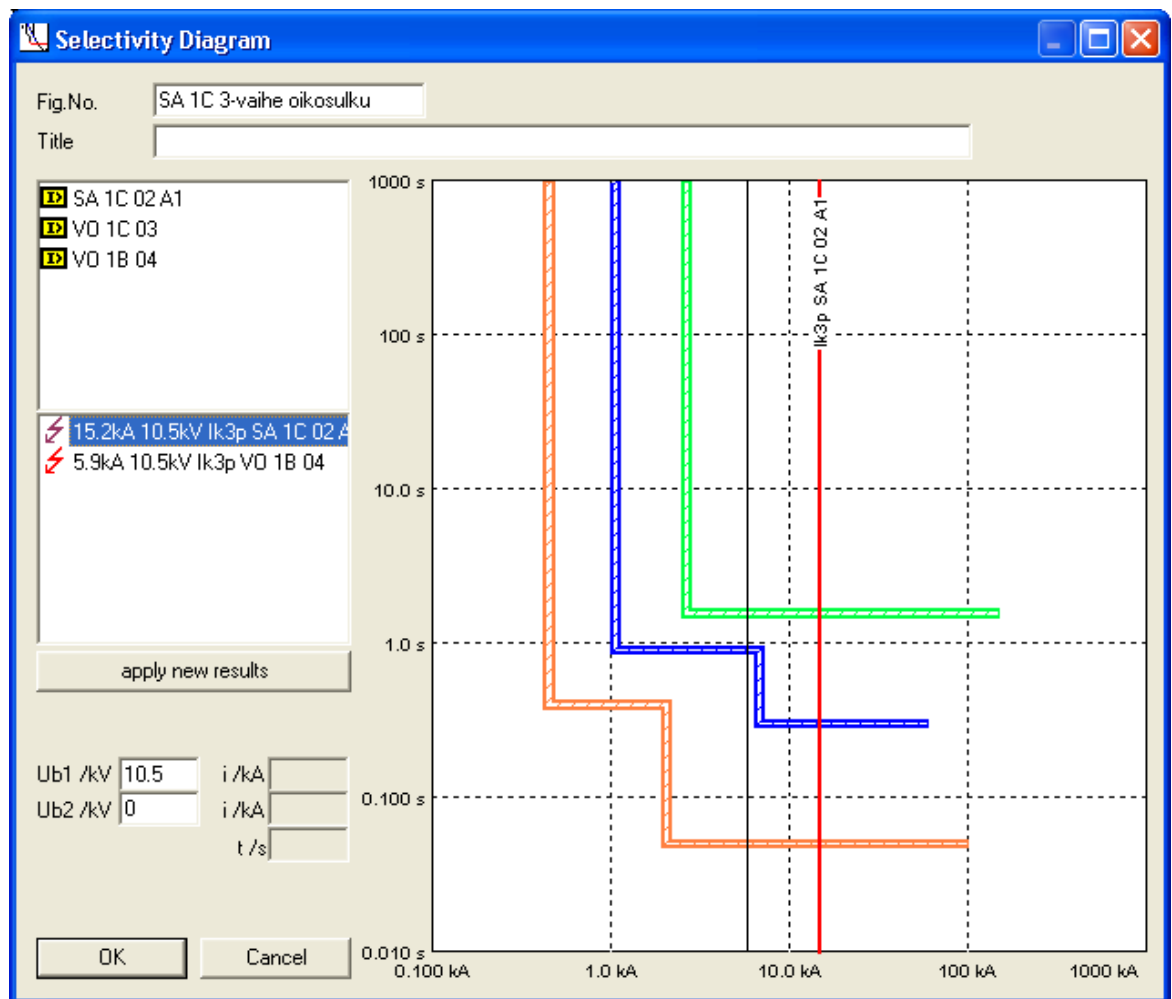
KUVIO 11. Tarkasteltava piiri

Laukaisukäyristä voidaan lukea jokaisen piirissä olevan suojarleen toiminta-aika ja -virta. Kuvaajista näkee myös vikavirran arvon, joka on merkitty punaisella viivalla kuvaajiin. Eri kojeistojen suojarleet on merkitty omilla väreillä kuvaajiin. Värit muuttuvat järjestyksessä: punainen, vihreä, sininen, oranssi, musta, kun edetään alaspäin verkossa. Punainen väri tarkoittaa 110 kV jänniteporrasta.

### 5.4.1 Normaali syöttötilanne

Tarkastellaan ensin vikatilanteet, jossa SA 1C -kojeistoa syötetään normaalilla syötöllä VO 1C -kojeistosta.

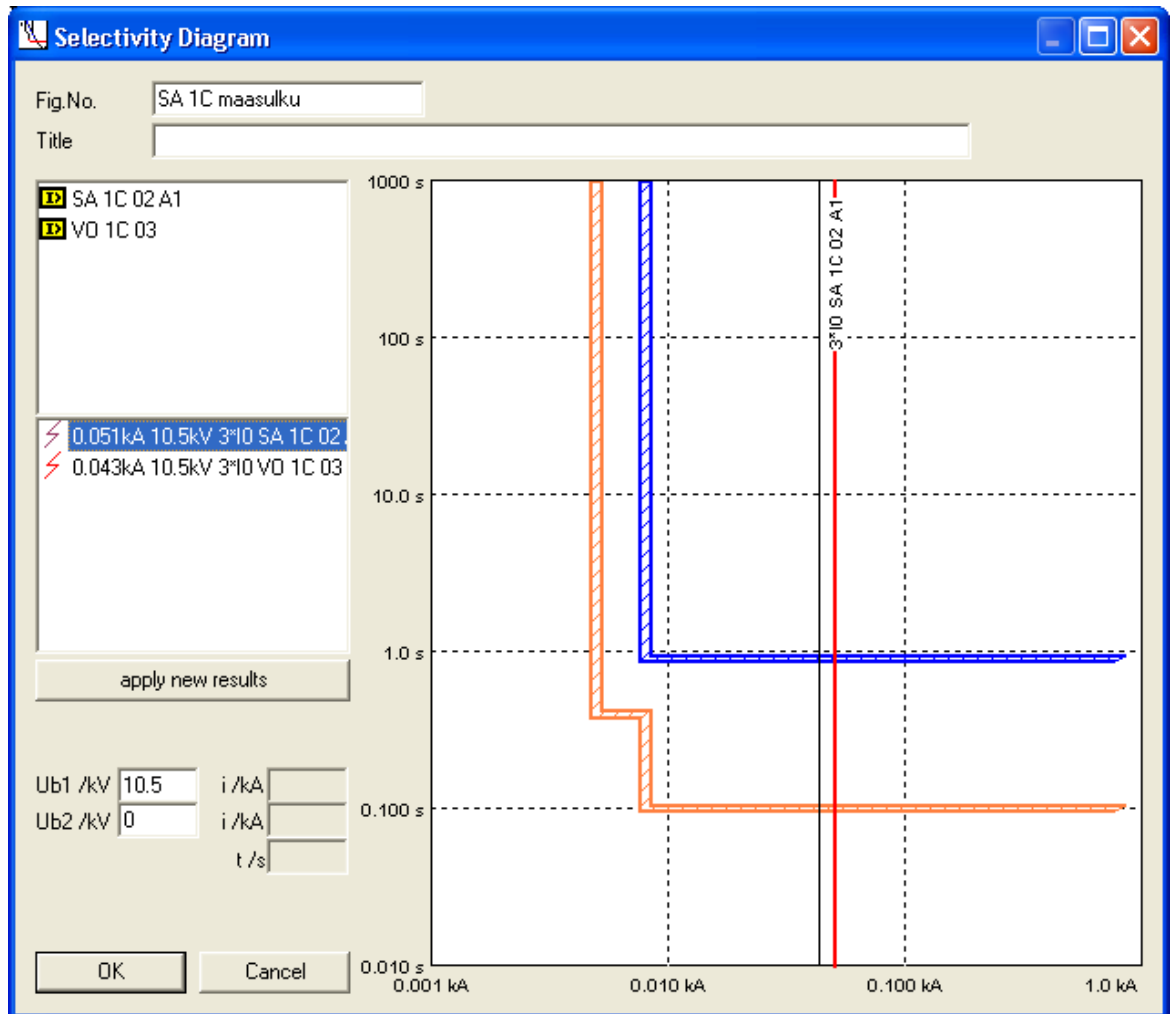
#### 5.4.1.1 Kolmivaiheinen oikosulku



KUVIO 12. Kolmivaiheinen oikosulku normaalissa syöttötilanteessa

Vikapaikan kolmivaiheiseksi oikosulkuvirraksi muodostuu 15.2 kA. Vikavirran havaitsevat kaikki suojarieleet, jotka ovat 10 kV suojauspiirissä. 110 kV suojarieleet ei havaitse tätä vikaa, koska sen asettelut ovat suuremmat kuin vikavirta. Laukaisukäyristä nähdään, että suojaus toimii selektiivisesti, koska käyrät eivät leikkaa toisiaan ja lähimpänä vikapaikkaa oleva suoja toimii ensimmäisenä.

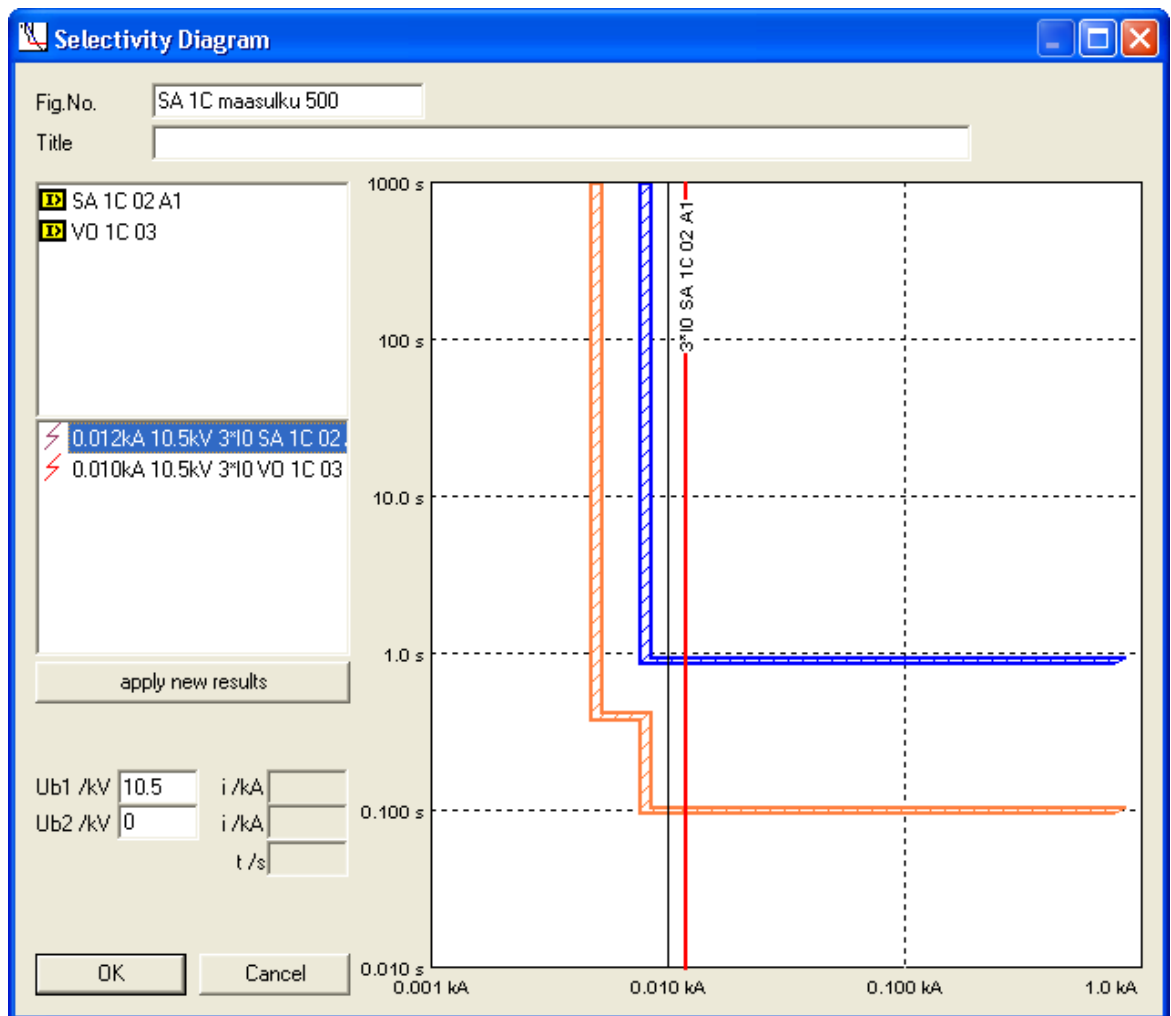
### 5.4.1.2 Suora maasulku



KUVIO 13. Suora maasulku normaalissa syöttötilanteessa

Maasulkuvirraksi muodostui 51 A ja vikapaikan maasulkujännitteeksi 6062 V. Virran havaitsee SA 1C -kojeiston lähdössä 02 oleva suojarele, sekä VO 1C:llä oleva suojarele. Kuvaajasta nähdään, että lähimpänä vikapaikkaa oleva suojarele laukaisee ensimmäisenä, joten maasulkusuojaus toimii selektiivisesti.

### 5.4.1.3 Maasulku 500 $\Omega$ :n vikavastuksella

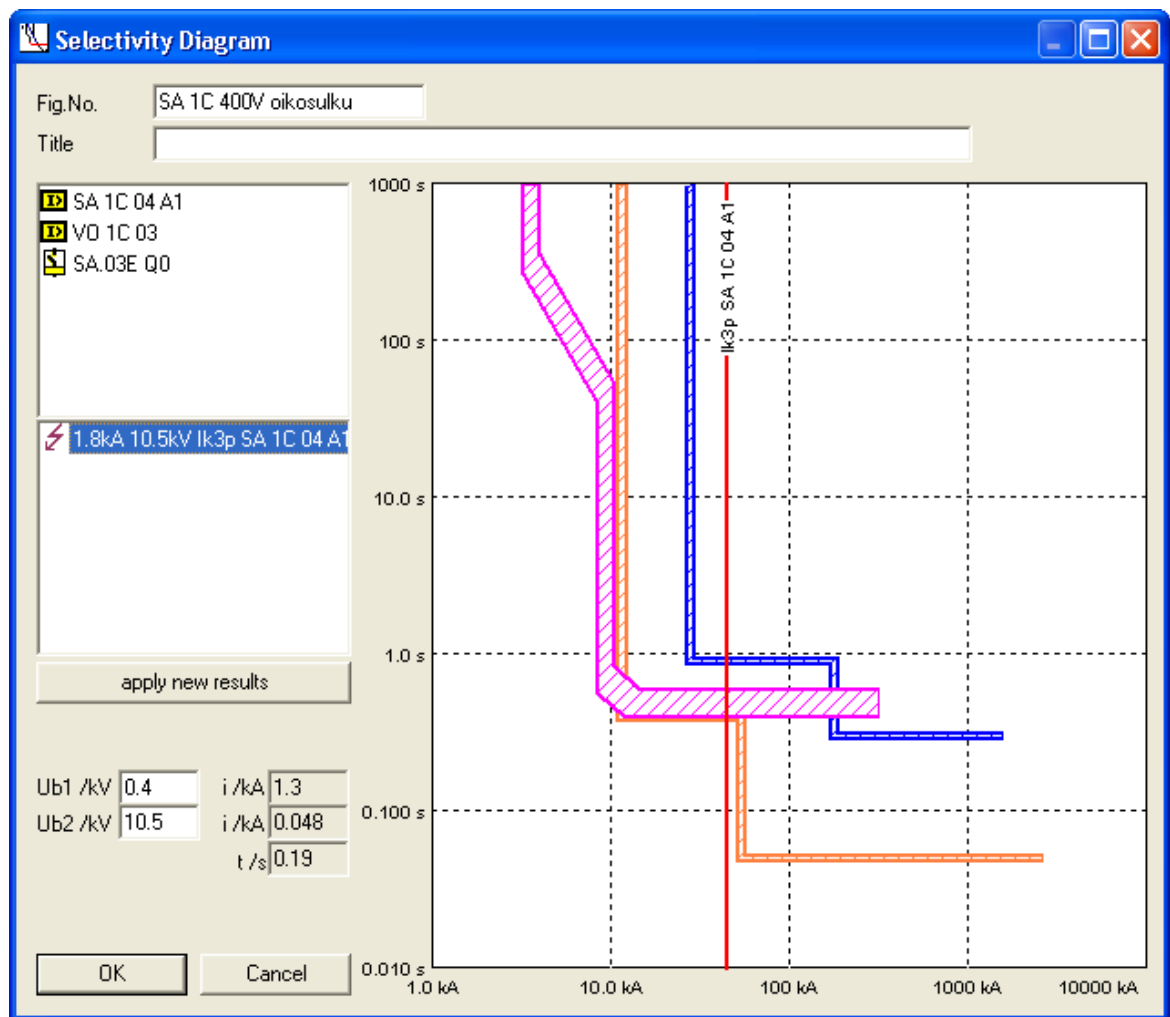


KUVIO 14. Maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella normaalissa syöttötilanteessa

Maasulkuvirraksi 500  $\Omega$ :n vikavastuksella muodostui 12 A ja vikapaikan maasulkujännitteeksi 1404 V. Maasulkuvirta on huomattavasti pienempi verrattuna suoraan maasulkuun. Virran havaitsee SA 1C 02-lähdön suojariele, sekä kojeistoa syöttävän kentän VO 1C 03 suojariele. Suojaus toimii tässäkin tilanteessa selektiivisesti.

#### 5.4.1.4 Oikosulku 400 V:n kiskostossa

Tarkastellaan kolmivaiheista oikosulkuja 400 V:n jänniteportaassa. Keskuksen syötössä on pienjännitekatkaisija Q0, jonka laukaisukäyrä on mukana tarkasteluissa. Pienjännitekatkaisijan laukaisukäyrä on väriltään vaaleanpunainen.



KUVIO 15. Oikosulku 400 V:n kiskostossa

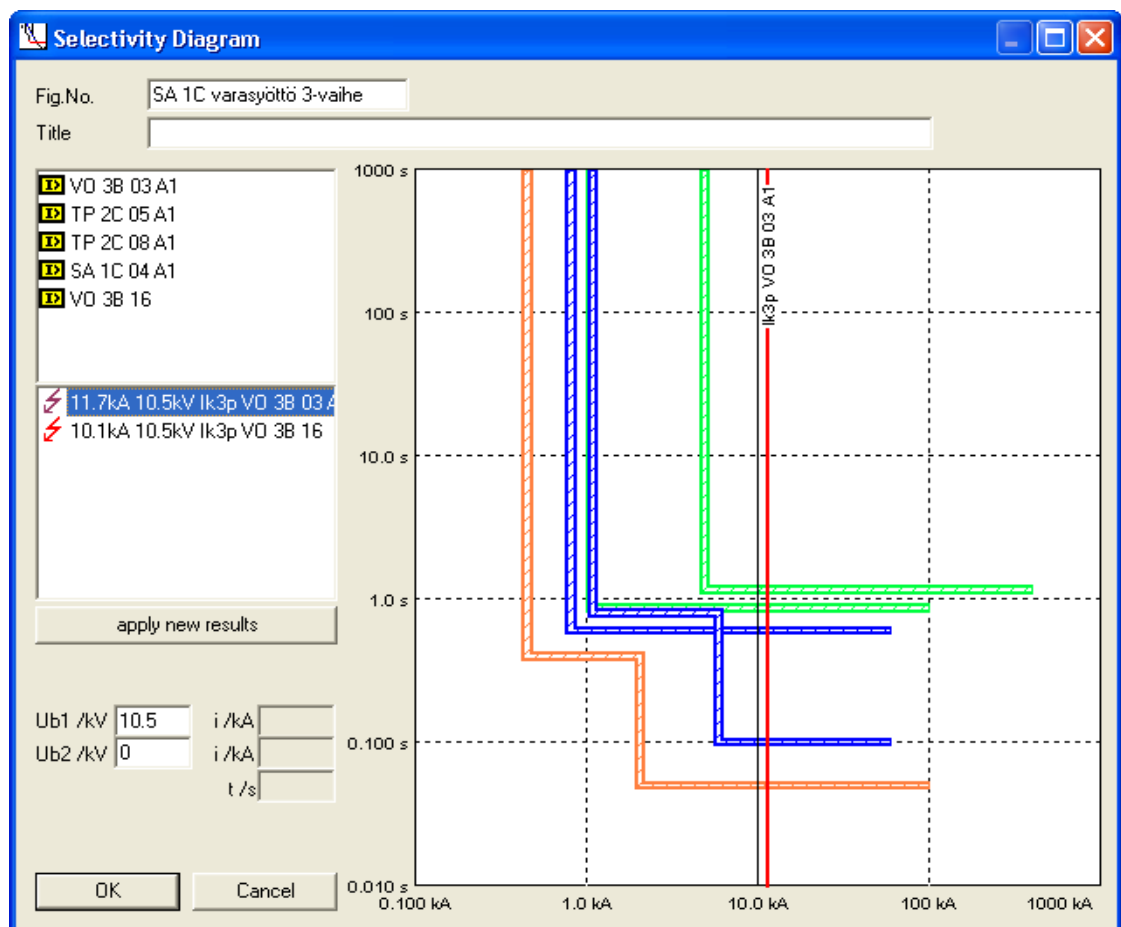
Oikosulkuvirraksi muodostuu 10 kV jänniteportaassa 1.8 kA ja 400 V:n jänniteportaaseen redusoituna tämä virta-arvo on suuruudeltaan 45 kA. Tarkastelussa pienjännitekeskusta syöttävän SA 1C 04-lähdön suojarleen toinen ylivirtaporras ei laukea. Vikavirta olisi suurempi, jos vika olisi muuntajan yläjännitepuolella, tällöin toinen ylivirtaporras toimisi nopeasti. Muuntajasuojana ja pienjännitekatkaisijan varasuojana toimii tässä tilanteessa SA 1C 04 suojarleen ensimmäinen ylivirtaporras. Ylä- ja alajännitepuolen suojarleiden epäselektiivinen toiminta ei vaikuta vikapaikan laajuuteen, koska ne suojaavat samaa pienjännite-

nitekeskusta. Ainoastaan jälkepäin tapatuvasa vikapaikan selvitystyössä voi suojauksen epäselektiivinen toiminta aiheuttaa ongelmia. 10 kV verkossa oikosulkusuojaus toimii selektiivisesti.

## 5.4.2 Varasyöttöyhteys käytössä

Tarkastellaan tilannetta jossa kojeistoa SA 1C syötetään varasyötön kautta SA 3C - kojeistosta. Varasyötön kaapeliyhteys on toteutettu 3\*300 mm<sup>2</sup> alumiinikaapelilla. Kaapeliyhteyden pituus TP 2C:ltä SA 1C:lle on noin kilometri. Varasyötön käytöllä on jonkin verran vaikutusta vikavirtojen suuruuteen, koska syöttö tapahtuu toisesta muuntopiiristä.

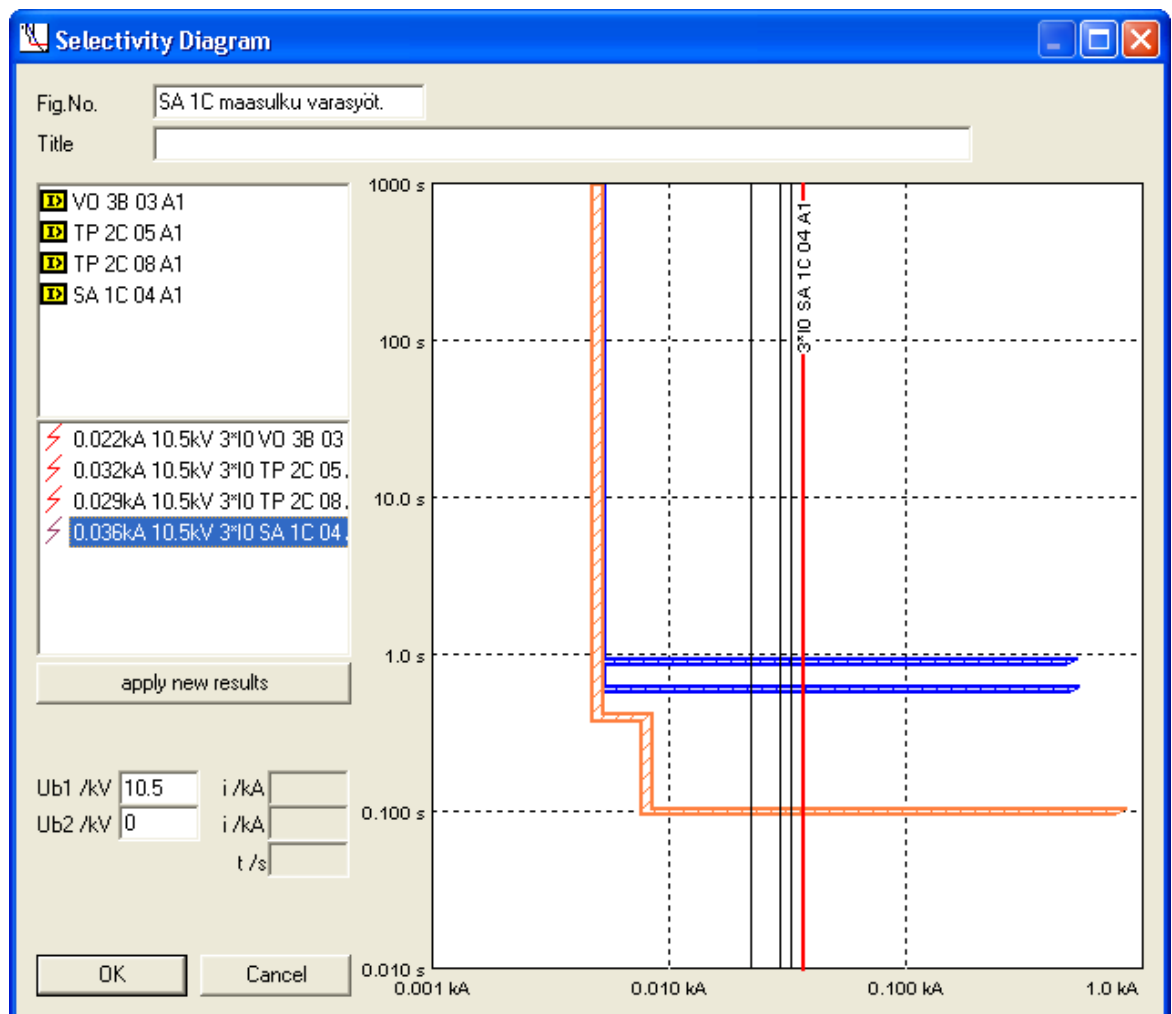
### 5.4.2.1 Kolmivaiheinen oikosulku



KUVIO 16. Kolmivaiheinen oikosulku varasyöttöyhteydellä

Tässä tarkastelussa oikosulkuvirraksi muodostuu 11.7 kA. Vikavirran havaitsee kaikki 10 kV piirissä olevat suojareleet. Tarkastelussa TP 2C 05:sen suojareleen I> -portaan havah- tuminen lukitsee sitä syöttävän kentän suojareleen I>> -portaan eli TP 2C 08, jolloin käyrät eivät leikkaa. TP 2C:n käyrät on esitetty sinisellä värillä kuvaajissa.

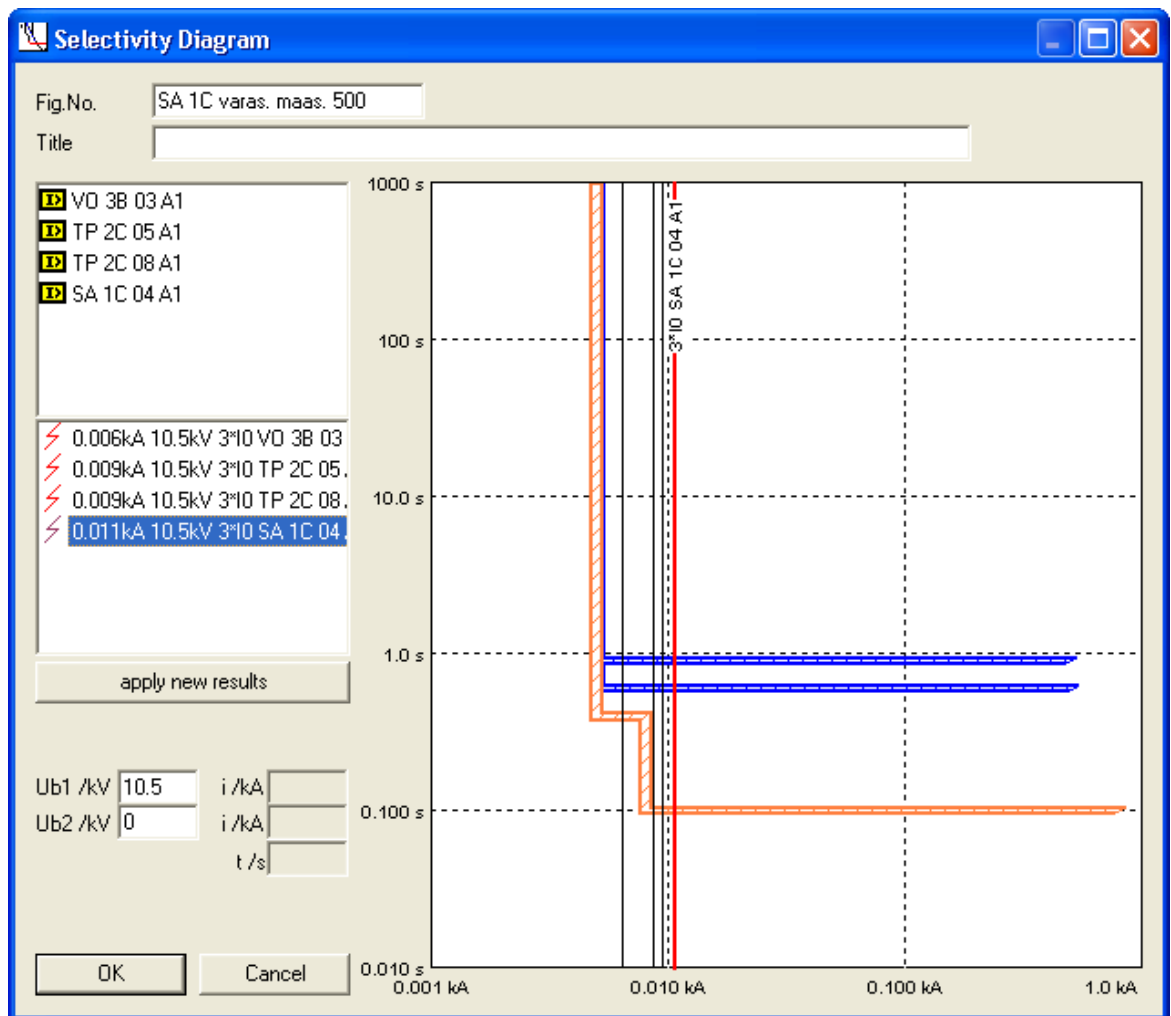
#### 5.4.2.2 Suora maasulku



KUVIO 17. Suora maasulku varasyöttöyhteydellä

Suorassa maasulussa maasulkuvirraksi muodostuu 36 A ja maasulkujännitteeksi 6062 V. Laukaisukäyrästä nähdään kaikkien piirissä olevien suojareleiden toiminta-ajat ja -virrat. Suojareleet on aseteltu lähes samalle virta-arvolle, mutta niissä on aikaporrastusta. Tällä tavoin suojaus saadaan toimimaan aikaselektiivisesti.

### 5.4.2.3 Maasulku 500 $\Omega$ :n vikavastuksella



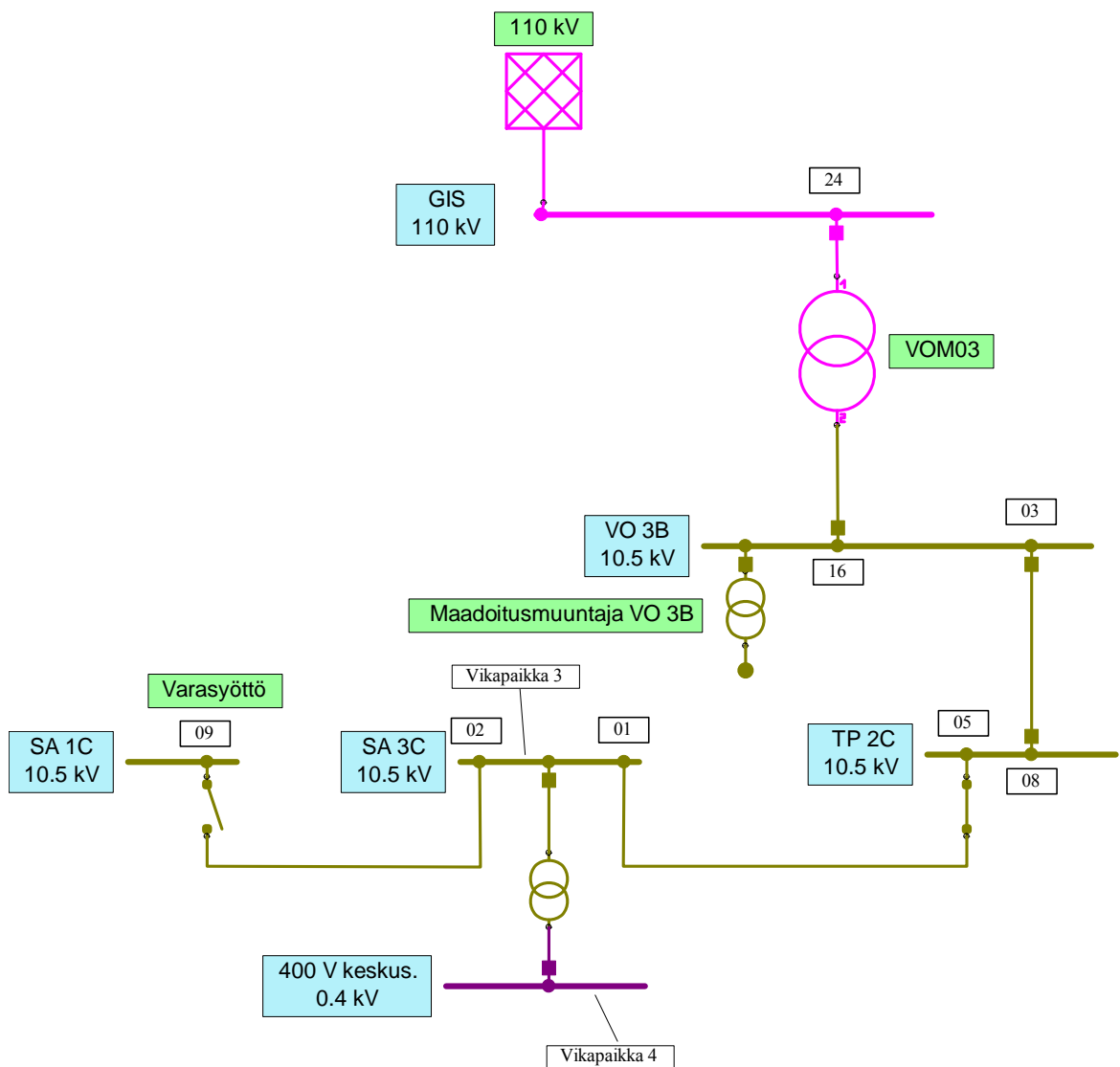
KUVIO 18. Maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella varasyöttötilanteessa

Vikapaikan maasulkuvirraksi 500  $\Omega$ :n vikavastuksella muodostui 11 A ja maasulkujännitteeksi 1708 V, kun varasyöttöyhteys oli käytössä. Virta-arvo on hieman pienempi kuin normaalissa syöttötilanteessa (12 A). SA 1C:n suojarole laukaisee vian ensimmäisenä, jolloin suojaus toimii aikaselektiivisesti.



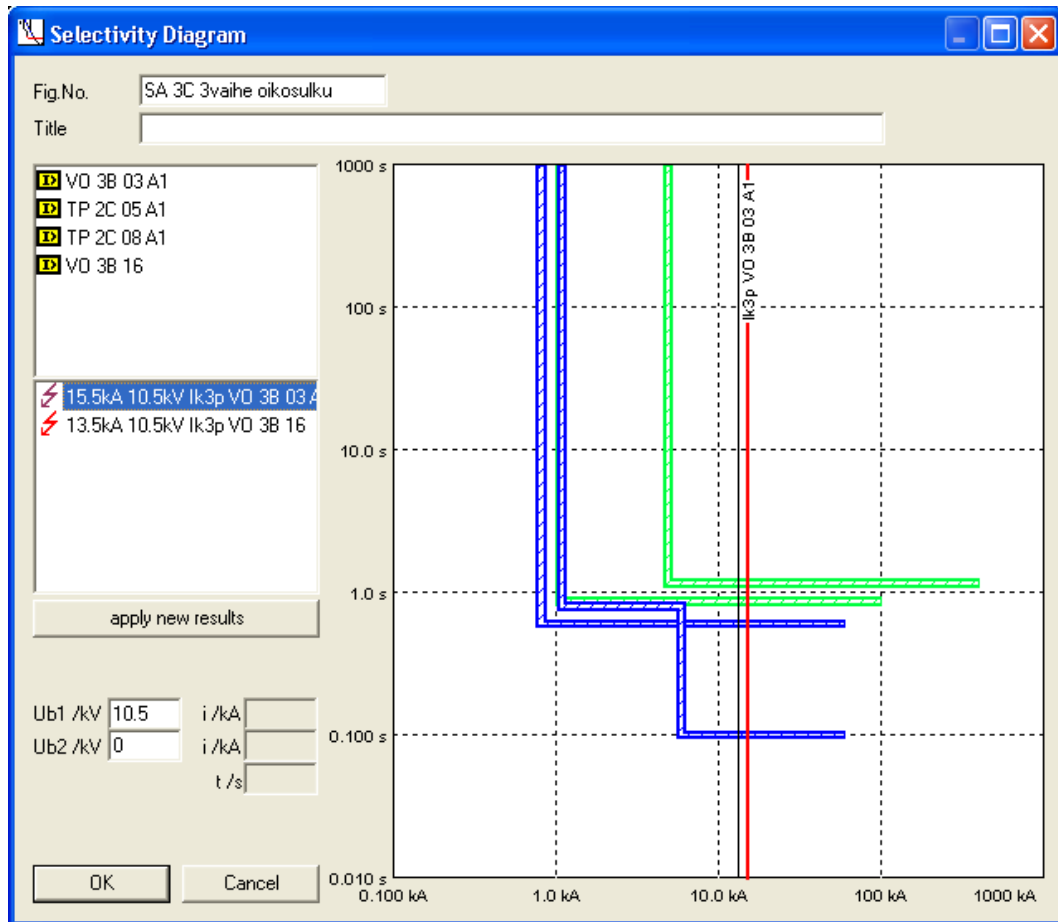
## 5.5 SA 3C selektiivisyystarkastelut

Selektiivisyystarkastelut suoritettiin suoja-areiden laukaisukäyriä vertaamalla. Tarkasteluissa oli mukana kolmivaiheinen oikosulku, suora maasulku ja maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella. Näissä tarkasteluissa vikapaikka oli SA 3C -kojeiston kiskostossa (KUVIO 19. vikapaikka 3). Lisäksi tarkasteltiin kolmivaiheista oikosulkua SA 3C:n syöttävän 400 V:n keskuksen kiskostossa (KUVIO 19. vikapaikka 4). Tähän tarkasteluun saatiin mukaan muuntajaa syöttävän lähdön 10 kV sulake ja pienjännitepuolen katkaisija.



KUVIO 19. Tarkasteltava piiri

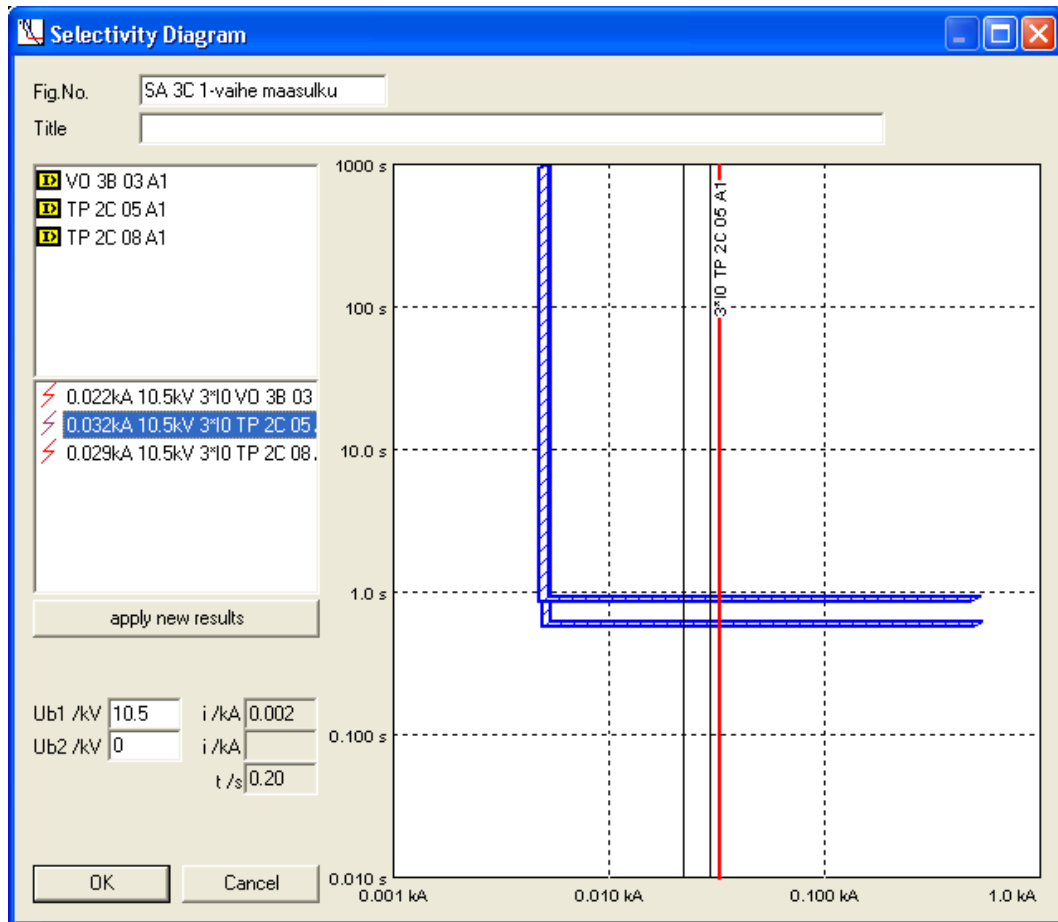
### 5.5.1 Kolmivaiheinen oikosulku



KUVIO 20. Kolmivaiheinen oikosulku

Oikosulkuvirraksi SA 3C -kojeistolla muodostui 15.5 kA. Laukaisukäyristä nähdään, että vikavirran havaitsevat kaikki 10 kV piirissä oleva suojareleet. Tarkastelussa TP 2C 05:sen  $I_D$  -portaan havahtuminen lukitsee sitä syöttävän kentän  $I_{D>>}$  -portaan eli TP 2C 08, jolloin siniset käyrät eivät leikkaa toisiaan. Tarkastelemalla laukaisukäyriä voidaan todeta oikosulkusuojauksen toimivan selektiivisesti.

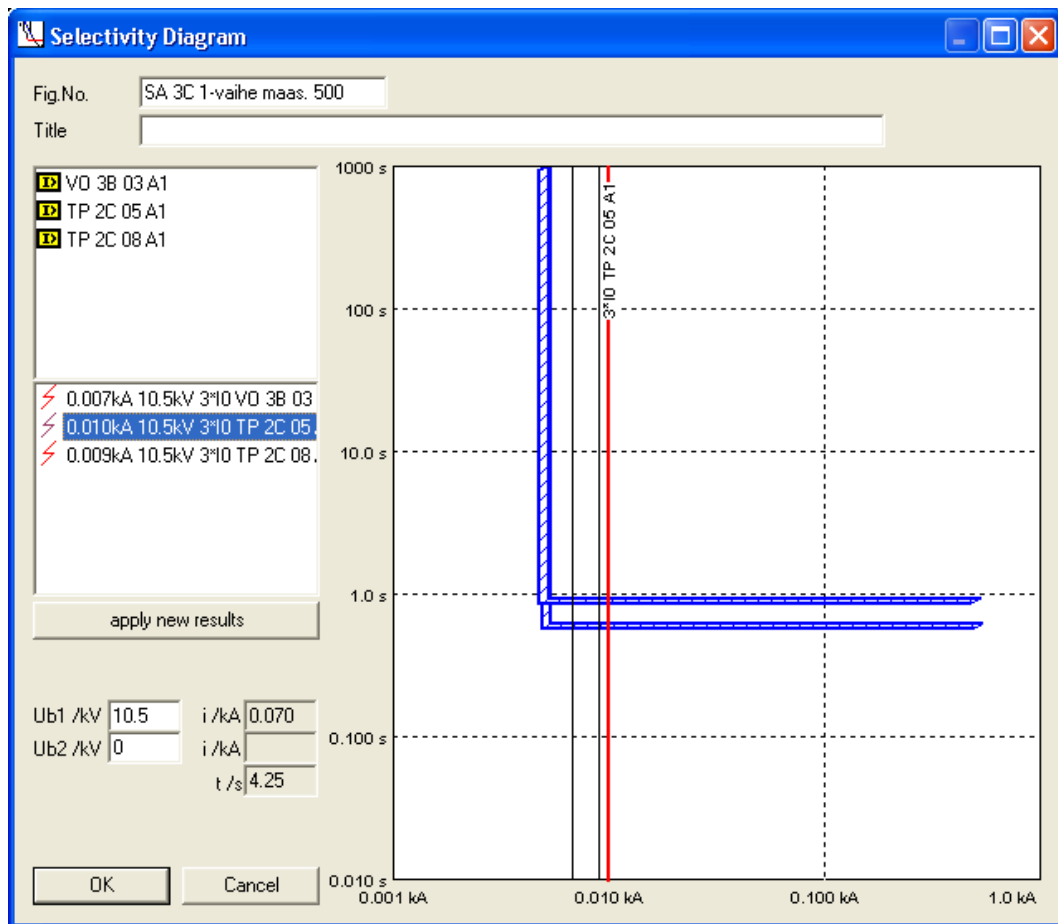
## 5.5.2 Suora maasulku



KUVIO 21. Suora maasulku

Suorassa maasulussa maasulkuvirraksi muodostui 32 A ja maasulkujännitteeksi 6062 V. Maasulkuvirran havaitsevat TP 2C:n ja VO 3B:n suojarieleet. Lähden VO 3B 03 suojarieleellä on samat asetellut kuin TP 2C 08 suojarieleellä. TP 2C 05 suojarieleen virta-asettelu on lähes sama, mutta siinä on 0.3 sekuntia aikaporrastusta.

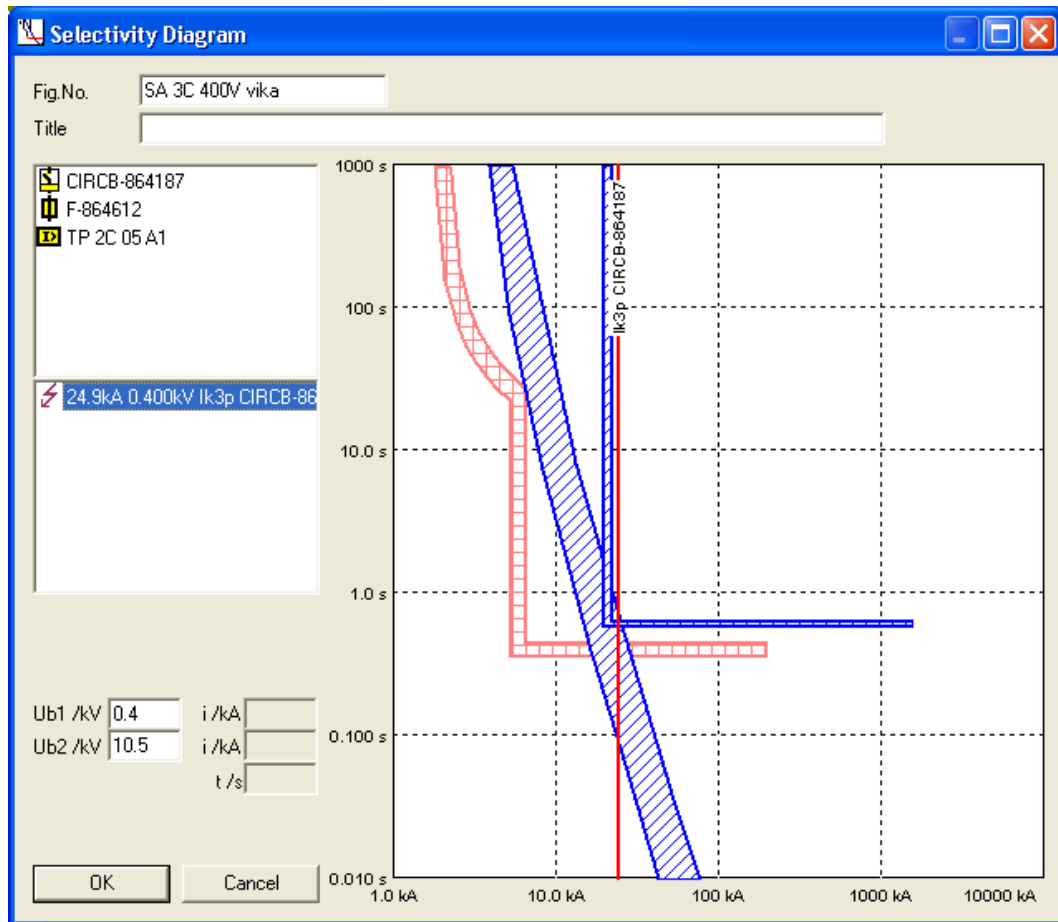
### 5.5.3 Maasulku 500 $\Omega$ :n vikavastuksella



KUVIO 22. Maasulku 500  $\Omega$ :n vikavastuksella

Maasulkuvirraksi muodostui 10 A TP 2C 05 lähdössä. Virta on huomattavasti pienempi kuin suorassa maasulussa. Tarkastelussa maasulkusuojaus toimii aikaselektiivisesti.

### 5.5.4 Oikosulku 400 V:n kiskostossa



KUVIO 23. Vika 400 V:n kiskostossa

Oikosulkuvirraksi muodostui 24.9 A pienjännitepuolella. Neplan osaa redusoida tämän virta-arvon 10 kV jänniteportaaseen, jolloin jänniteporras saadaan mukaan samaan käyrästöön. Virta-arvo jää 10 kV portaassa niin pieneksi, että vain TP 2C 05 -lähdössä oleva suojarile havaitsee tämän vian. Ylempänä verkossa olevat suojarileet on aseteltu suuremmille virta-arvoille. Suojaus toimii katkaisijoiden osalta täysin selektiivisesti, mutta sulake aiheuttaa poikkeamaa. Käyrästöstä nähdään sulakkeen aiheuttama epäselektiivisyys oikosulkusuojauksessa. Tämä asian on osattava ottaa huomioon suojausta suunniteltaessa. Lisäksi sulakkeella on varsin suuri toleranssi verrattuna katkaisijaan, eikä sen toiminta-arvoja voi asetella.

## **6 NEPLANIN HYÖDYNTÄMINEN RAAHEN TEHTAALLA**

### **6.1 Ohjelman käyttömahdollisuus**

Tämän opinnäytetyön jälkeen voidaan Neplania käyttää apuna sähkösuunnittelussa, jossa sen avulla voidaan luotettavasti tehdä erilaisia vikavirtalaskentoja ja vikatarkasteluja, sekä simulointeja tehtaan sähköverkolle.

Voimalaitoksen käyttöhenkilöstö voi hyödyntää tehonjakolaskentaa kytkentäsuunnitelmien teossa. Poikkeavien kytkentätilanteiden suunnittelussa ohjelma antaisi mahdollisuuden tarkastella mahdollisia ongelmakohtia etukäteen. Tällä tavoin voitaisiin parantaa verkon luotettavuutta ja vähentää kytkentätilanteissa esiintyviä ongelmia.

### **6.2 Uusien lisenssien tarve**

Ohjelma vaatii toimiakseen tietokoneen sarjaporttiin liitettävän moduulin, jonka avulla ohjelma tunnistaa käytössä olevan lisenssin. Raahen tehtaalle on ostettu vain yksi lisenssi, jolloin näitä moduuleita on käytössä ainoastaan yksi. Ohjelman käyttö on tähän asti ollut melko vähäistä ja lisenssi on ollut sähkösuunnittelun käytössä. Ohjelman käytön lisääntyessä voisi toisen lisenssin hankkiminen olla perusteltua.

Raahen tehtaalla on käytössä paljon suuria sähkömoottoreita. Moottorikäynnistyksien tarkasteluun vaadittavia oikeuksia ei Neplanin lisenssissä tällä hetkellä ole. ABB:n järjestämässä koulutustilaisuudessa pääsi tutustumaan moottorikäynnistyslenssin tarjoamiin ominaisuuksiin, jotka vaikuttivat varsin lupaavilta. Lisenssin hankkiminen olisikin perusteltua, koska sen avulla olisi mahdollista tarkastella suurten sähkömoottoreiden käynnistyksestä aiheutuvia vaikutuksia tehtaan sähköverkkoon.

Dynaamiseen vikatarkasteluun on ohjelmaan saatavana lisenssi, jonka avulla voidaan tarkemmin tutkia verkon suojausten käyttäytymistä vikatilanteessa. Sen avulla vikatarkasteluihin saataisiin mukaan esimerkiksi katkaisijoiden toiminta-ajat. Lisenssin hankkiminen

saattaisi olla perusteltua, koska sen avulla verkon suojauksen toimintaa vikatilanteessa voitaisiin tutkia tarkemmin etukäteen.

## **7 YHTEENVETO**

### **7.1 Tulosten vertaaminen Vaasan tulosten kanssa**

Vaasan AMK on suorittanut simulointeja Raaheen rakennettavan uuden tuulipuisto TP 2C:n vaikutuksista tehtaan sähkönjakeluverkkoon. Simuloinneissa on määritelty tuulivoimalaverkon oikosulkuvirrat ja maasulkuvirrat. Näitä simulointituloksia on käytetty vertailukohtana Neplanin laskemia tuloksia tarkasteltaessa. Neplanilla saadut laskentatulokset vastasivat melko hyvin Vaasan AMK:n tekemiä laskentoja. Neplan käyttää laskennoissaan hieman suurempia korjauskertoimia, joiden seurauksena sen laskemat tulokset ovat kauttaaltaan hieman suurempia.

### **7.2 Loppupäätelmät Neplan-ohjelmasta**

Tämän opinnäytetyön avulla Neplanin verkkomalli on saatu vastaamaan todellisen sähköverkon nykytilannetta. Työn aikana ohjelman ominaisuuksista otettiin käyttöön maasulku- ja tehonjakolaskenta. Vikavirtalaskennoissa esiintyneet ongelmat saatiin ratkaistua ja ohjelman toiminta saatiin halutulle tasolle.

Neplanin laskemia tuloksia on verrattu käsin laskettuihin tuloksiin ja Vaasan AMK:n tuloksiin, jolloin on pystytty varmistamaan Neplanin tulosten luotettavuus. Päivitetyn verkkomallin avulla on mahdollista tehdä luotettavia simulointeja tehtaan jakeluverkolle.

Työn aikana esiintyneet ongelmat liittyivät suunnattuun maasulkuun. Suojareleiden maasulkusuojaus toimi ainoastaan toisessa suunnassa, jolloin suojarele antoi laukaisukäskyn maasulkuvirran suunnasta riippumatta. Suunnan vaihtuessa ei suojarele havainnut maasulkua kummassakaan maasulkuvirran suunnassa.

Ohjelma vaatii tietokoneelta melko paljon suorituskykyä, jos käsiteltävä verkko on laaja kuten tämän työn tapauksessa. Suunnittelukäytössä olevissa tietokoneissa on usein paljon erilaisia ohjelmia, jotka hidastavat koneen toimintaa. Neplanin käyttö tällaisessa koneessa on varsin hankalaa, koska ohjelman tekemien laskentojen aikana kone saattaa ylikuormit-



tua siihen pisteeseen että ohjelma lakkaa toimimasta. Olisikin hyvä, jos ohjelman käytössä olisi oma tietokone, jolla tehdään pelkästään Neplaniin liittyviä tarkasteluja ja laskentoja.

## LÄHTEET

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa: ABB.

ABB. Verkon suojaus ja mitoitus. Www-dokumentti. Saatavissa: [www02.abb.com/PRES\\_Juha\\_Willman\\_Verkon\\_suojaus\\_ja\\_mitoitus.pdf](http://www02.abb.com/PRES_Juha_Willman_Verkon_suojaus_ja_mitoitus.pdf). Luettu 4.4.2010.

Elovaara, J & Laiho, Y. 1990. Sähkölaitostekniikan perusteet. 2. painos. Hämeenlinna: Karisto Oy

Lakervi, E & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Hakapaino.

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Karisto Oy.

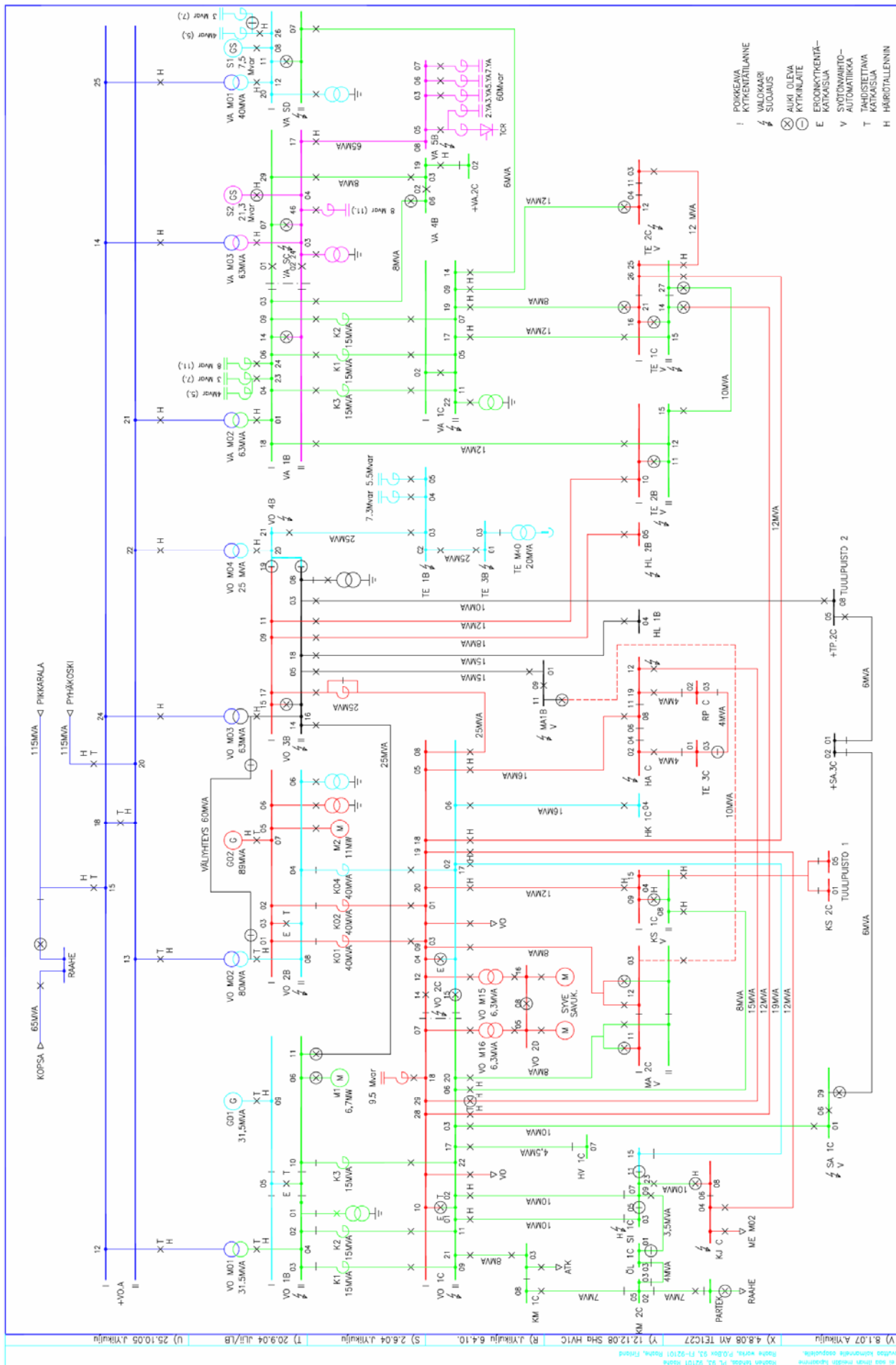
Ruppa, E. Maasulku. Www-dokumentti. Saatavissa: [www.tp.spt.fi/~salabra/er/siirto/maasul.doc](http://www.tp.spt.fi/~salabra/er/siirto/maasul.doc). Luettu 15.3.2010.

Ruppa, E. Selektiivisyys. Www-dokumentti. Saatavissa: [www.tp.spt.fi/~salabra/er/siirto/selektiivisyys.doc](http://www.tp.spt.fi/~salabra/er/siirto/selektiivisyys.doc). Luettu 18.3.2010.

Ruukki standardit. Www-dokumentti. Saatavissa: ruukki inside-verkkosivut. Luettu 9.4.2010.

Ylikulju, J. Vikaresistanssin vaikutukset maasulussa.

Yrityskuvaus. Www-dokumentti. Saatavissa: [www.ruukki.com](http://www.ruukki.com). Luettu 12.3.2010.



Käsitelty	V) 8.1.07 A.Yhkiö	Y) 12.12.08 SHd HV1C	R) Yhkiö/lu 6.4.10.	S) 2.6.04 J.Yhkiö	T) 20.9.04 JLT/LB	U) 25.10.05 J.Yhkiö
TSD ohjeet ja muut tekn. tiedot	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India	Shakti India, Pt. 92, 92101 Raipur, India
Projekti	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside	VO** 241.05, VO**241.03, Ruukki Inside
Arvioitu	6.4.1992	6.4.1992	6.4.1992	6.4.1992	6.4.1992	6.4.1992
Luokka	3448041	3448041	3448041	3448041	3448041	3448041
Ohjelma	AutoCAD R12	AutoCAD R12	AutoCAD R12	AutoCAD R12	AutoCAD R12	AutoCAD R12
Yhteystiedot	4419650_TYÖVERSO	4419650_TYÖVERSO	4419650_TYÖVERSO	4419650_TYÖVERSO	4419650_TYÖVERSO	4419650_TYÖVERSO



Ruukki Production  
Ruukki Oy

VO\*\* 241.05, VO\*\*241.03, Ruukki Inside  
3448041  
AutoCAD R12

Poikki-pinta mm <sup>2</sup>		10 kV voimakaapelit																	
		Paperi-eristeiset PLKVJ		Paperi-eristeiset APAKM		Paperi-eristeiset APYAKMM		PEX-eristeiset HMCМК		PEX-eristeiset AHXCMK		XLPE-eristeiset AHXAMK-W		XLPE-eristeiset AHXCMK-WTC		XLPE-eristeiset AHXCMK			
		maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus	maasulku- virta	kuormitet- tauvus		
		A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)	A/km	A (65°C)		
3x25	0,6	105	0,6	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-		
3x35	0,8	135	0,8	1,4	1,1	130	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	-	-	-	-	-	-		
3x50	0,9		0,9	1,7	1,3		1,3	1,3	1,3	1,3		-	-	-	-	-	-		
3x70	1,0	200	1,0	1,9	1,4	190	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	-	-	-	-	-	-		
3x95	1,1	240	1,1	2,3	1,6	225	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	-	-	-	-	-	-		
3x120	1,2	275	1,2	2,5	1,7	260	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	265	1,8	1,8	1,8	1,8		
3x150	1,3	315	1,3	2,7	1,8	300	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	-	-	-	-	-	-		
3x185	1,4	360	1,4	3,0	1,9	340	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,1	330	2,1	2,1	2,1	2,1		
3x240	1,5		1,5	3,2	2,2	395	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,4	385	2,4	2,4	2,4	2,4		
3x300	1,5		1,5	3,4	2,4	360	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,6	435	2,6	2,6	2,6	2,6		
3x1x35	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3x1x50	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
3x1x70	-		-	-	1,4		1,4		1,4		1,4	-	-	-	-	-	-		
3x1x95	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x120	-	275	-	-	1,8		1,8		1,8		1,8	-	-	-	-	-	-		
3x1x150	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x185	-		-	-	2,1		2,1		2,1		2,1	-	-	-	-	-	-		
3x1x240	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x300	-		-	-	2,6		2,6		2,6		2,6	-	-	-	-	-	-		
3x1x400	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x500	-		-	-	3,3		3,3		3,3		3,3	-	-	-	-	-	-		
3x1x630	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x800	-		-	-	4,1		4,1		4,1		4,1	775		4,1	4,1	4,1	4,1		
3x1x1000	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		
3x1x1200	-		-	-	-		-		-		-	-	-	-	-	-	-		

SA.1C-KOJEISTON JA VO.1C.03 ASETELUT

Vain hälyttävät!

LÄHTÖ	MUUNTAJA	KÄYTTÖ	SUOJARELE	I <sub>b</sub>	t <sub>b</sub>	I <sub>b</sub> >>	t <sub>b</sub> >>	IDir>>>	t <sub>b</sub> >>>	I <sub>0</sub>	t <sub>b</sub>	I <sub>0</sub> Dir	t <sub>b</sub>	U <sub>0</sub>	I <sub>0</sub> Dir>>	t <sub>b</sub> >>	U <sub>0</sub> >>
+SA.1C.01		Syöttö +VO.1C.03	VAMP 257 VAM 4C					7000 A	0,2 s						8 A	0,7 s	1500 V
+SA.1C.02	+SA.M01, 1600 kVA	400V, Satama	VAMP 257	350 A	0,4 s	1700 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.03		Satamanosturi 6	VAMP 257	260 A	0,4 s	680 A	0,05 s	2000 A	0,05 s	1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.04	+SA.M03, 2000 kVA	400V, Satama	VAMP 257	440 A	0,4 s	2100 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.05		Mittaus	VAMP 257														
+SA.1C.06		Pitkitäiskatkaisija	VAMP 257 VAMP 221														
+SA.1C.07		Mittaus	VAMP 257														
+SA.1C.08	+SA.M04, 3150 kVA	690V, Satama	VAMP 257	690 A	0,4 s	2600 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.09		Syöttö +SA.3C.02	VAMP 257 VAM 4C	660 A	0,7 s			7000 A	0,2 s			8 A	0,7 s	1500 V	8 A	0,4 s	1500 V
+SA.1C.10		Vara	VAMP 257	440 A	0,4 s	2100 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.11	+SA.M02, 1600 kVA	400V, Satama	VAMP 257	350 A	0,4 s	1700 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+SA.1C.12		Vara	VAMP 257	440 A	0,4 s	2100 A	0,05 s			1,5 A	30 s	5 A	0,4 s	1000 V	8 A	0,1 s	1500 V
+VO.1C.03		Syöttö +SA.1C.01	VAMP 255	1100 A	0,9 s	7000 A	0,3 s					8 A	0,9 s	1900 V			

TP.2C-KOJEISTON JA VO.3B.03 ASETTELUT

LÄHTÖ	KÄYTTÖ	SUOJARELE	I>	t>	I>>	t>>	dl>	t>	Start of slope	slope	Vain hälyttävää!			I <sub>0</sub> Dir>	t>	U <sub>0</sub> >
											I <sub>0</sub> >	t>	t>			
+TP.2C.01	Mylly 6	VAMP 255	250 A	0,45 s	2500 A	0,05 s						1,5 A	30 s	5 A	0,3 s	20 %
+TP.2C.02	Mylly 7	VAMP 255	250 A	0,45 s	2500 A	0,05 s						1,5 A	30 s	5 A	0,3 s	20 %
+TP.2C.03	Mylly 8	VAMP 255	250 A	0,45 s	2500 A	0,05 s						1,5 A	30 s	5 A	0,3 s	20 %
+TP.2C.04	Mylly 9	VAMP 255	250 A	0,45 s	2500 A	0,05 s						1,5 A	30 s	5 A	0,3 s	20 %
+TP.2C.05	Syöttö +SA.3C	VAMP 255	800 A	0,6 s										5 A	0,6 s	20 %
+TP.2C.06	Mittaus															
+TP.2C.07	Omakäyttömuuntaja															
+TP.2C.08	Syöttö +VO.3B.03	VAMP 259	1100 A	0,8 s	6000 A	0,1 s	30 %	0,1 s	1	30 %				5 A	0,9 s	20 %
+VO.3B.03			Syöttö +TP.2C.08	VAMP 259	1100 A	0,8 s			30 %	0,1 s		1	30 %			5 A