

Iida Anttila

**PAPERITEHTAAN SÄHKÖNJAKELUN MALLINTAMINEN
NEPLAN-OHJELMALLA**

**PAPERITEHTAAN SÄHKÖNJAKELUN MALLINTAMINEN
NEPLAN-OHJELMALLA**

lida Anttila
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma, sähkövoimatekniikka

Tekijä: Iida Anttila

Opinnäytetyön nimi: Paperitehtaan sähkönjakelun mallintaminen Neplan-ohjelmalla

Työn ohjaajat: Heikki Pirttimaa, Pekka Rantala

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi:

Sivumäärä: 40 + 4 liitettä

Kevät 2017

Vikavirtojen hallinta on tärkeää teollisuussähköverkoissa, joissa on tyypillistä suuret oikosulkuvirrat. Vikavirtatarkastelu on syytä tehdä aika ajoin muuttuvassa verkossa, jotta verkon toimivuus ja turvallisuus ovat ajan tasalla.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli alkaa mallintamaan Stora Enson Oulun paperitehtaan sähkönjakelu Neplan-ohjelmalla ja laskea verkon vikavirrat. Työssä käytetty Neplan on moduulipohjainen ohjelmisto, jolla voi mm. mallintaa sähköverkon ja laskea siinä esiintyvät vikavirrat. Oulun sellutehtaan sähköverkko oli mallinnettu jo vuonna 2009 ja tarkoitus oli jatkaa sitä paperitehtaan puolelle. Työn tilaajana toimi Stora Enso Oyj:n tytäryhtiö Efora Oy, joka vastaa tehtaan kunnossapidosta ja projektien suunnitteluista.

Työssä mallinnettiin yksi 10 kV:n kojeisto. Mallinnukseen etsittiin tarvittavat laitetiedot ja sähkökuvien perusteella kuvattiin verkko Neplan-ohjelmalla. Ohjelmalla laskettiin myös verkon vikavirrat. Lisäksi työhön kuului ohjelman käytön opastus projekti-insinööreille.

Opinnäytetyön tuloksina saatiin mallinnuspohja paperitehtaan sähköverkolle, vikavirtalaskut 10 kV:n kojeistolle ja pienjännitekeskuksille sekä ohje mallinnuksen päivitykseen. Tehdystä työstä on sujuva jatkaa verkon mallinnusta eteenpäin. Neplan on toimiva työkalu vikavirtojen tarkasteluun, kunhan mallinnuksen pitää muutosissa ajan tasalla.

Asiasanat: Neplan, teollisuussähköverkko, vikavirrat, oikosulku

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Electrical engineering, Electric power engineering

Author: Iida Anttila

Title of thesis: Modeling Electrical Distribution of Paper Mill Using Neplan-Software

Supervisors: Heikki Pirrtimaa, Pekka Rantala

Term and year when the thesis was submitted: Pages: 40 + 4 appendices
Spring 2017

Knowing the magnitude of short circuit currents in electricity grid is essential, especially in industrial surroundings where short circuit currents are typically very high. To keep the network safe and functional, fault currents should be checked each time there are modifications in the network. This thesis was made for Efora Ltd, Stora Enso PLC's subsidiary in charge of maintenance and engineering in some of Stora Enso's mills in Finland.

The objective of this thesis was to start modeling the electrical distribution of a paper mill and calculate the fault currents using Neplan-software. This thesis is a continuation of an MSc thesis made in 2009. The objective of the thesis was to model one of the five 10 kV switchgears in the paper mill, calculate the fault currents in it and brief the use of Neplan-software for project engineers.

The Neplan-modeling requires knowledge of the machine plates, cable lengths, load values etc. That data was obtained from SAP-system, project engineers and electrical schemas. After modeling the network the software calculated short circuit and earth fault currents and the results were tabulated. This thesis also contains some theory of short circuit and earth fault from various publications which are listed in references.

As a result of this thesis Efora Ltd got a basis for Neplan-modeling which can be developed further in the future. It also provided prevailing information on possible fault currents in the network. With Neplan it is easy to keep protection and structure of the network up-to-date. Since the software will not be in daily use, it might be challenging to keep the know-how existent in the company.

Keywords: Neplan, short circuit, industrial network

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajia Heikki Pirttimaata Eforalta, Pekka Rantaa Oulun ammattikorkeakoulusta ja kirjoitusprosessin ohjauksesta Pirjo Partasta. Kiitos mielenkiintoisesta aiheesta, järjestelyistä ja avusta Jarmo Lapinniemelle.

Lisäksi haluan kiittää Raimo Aniasta, Jussi Anttilaa, Jaakko Hettulaa, Markku Huuskoa, Immo Hämäläistä, Eero Niemelää, Kyösti Nuutista ja Juha Willmania, joilta olen saanut arvokkaita neuvoja ja tietoja työn aikana.

Kiitos perheelle, ystäville ja Tuomolle tuesta koko opiskelujen ajan.

Oulussa 10.4.2017

lida Anttila

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKUSANAT	5
SISÄLLYS	6
MERKIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	9
2 VIKAVIR RAT	10
2.1 Oikosulku	10
2.2 Maasulku	17
3 OIKOSULKUPIIRIN KOMPONENTIT TEOLLISUUSVERKOSSA	19
4 NUOTTASAAREN PAPERITEHDAS	23
4.1 Stora Enson Oulun tehta at	23
4.2 Paperitehta an sähköverkon rakenne ja komponentit	24
5 NEPLAN-OHJELMISTO	27
5.1 Oikosulkulaskenta	27
5.2 Tehonjakolaskenta	29
6 PAPERITEHTAAN SÄHKÖNJAKELUN MALLINNUS	32
6.1 Mallinnus ja laskenta	32
6.2 Tulokset ja johtopäätökset	36
7 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	39
Liite 1: Oikosulkulaskennan tuloksia Neplan-ohjelmassa	
Liite 2: Tehonjakolaskennan tuloksia Neplan-ohjelmassa	
Liite 3: Paperitehta an verkko mallinnettuna Neplan-ohjelmalla	
Liite 4: Lasketut vikavirrat eri kytkentätilanteissa	

MERKIT JA LYHENTEET

α	oikosulun syntyhetki jännitteen nollakohtan jälkeen
AC	alternative current, vaihtovirta/vaihtosähkö
c	jännitekerroin
C_0	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
$\cos\varphi$	tehokerroin
DC	direct current, tasavirta/tasasähkö
i_k	oikosulkuvirta
IEC 60909	International Electrotechnical Commission – standardointiorganisaation julkaisema standardi: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems
I_{ef}	maasulkuvirta
I_k	jatkuvan tilan oikosulkuvirta
I_k'	muutosoikosulkuvirta
I_k''	alkuoikosulkuvirta
I_n	nimellisvirta
I_s	moottorin käynnistysvirta
\dot{I}_s	dynaaminen oikosulkuvirta
I_{th}	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
K	kerroin, joka riippuu oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta
m	tasavirtatekijä
MicroSCADA	ABB:n kehittämä käytönvalvontajärjestelmä
n	vaihtovirtatekijä
ω	kulmataajuus
PEX	ristisilloitettu polyeteeni
PK6	paperikone 6
PK7	paperikone 7
P_{kn}	muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla
φ	jännitteen ja virran välinen vaiheensiirtokulma
R_f	vikaresistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi

SAP-järjestelmä	liiketoimintajärjestelmä
S_n	nimellinäennäisteho
t	aika
t_k	vian kesto aika
U	syöttöjännite
u_k	muuntajan oikosulkujännite prosentteina
U_n	nimellispääjännite
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön virransyöttö
u_r	muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina
X_k	oikosulkureaktanssi
Z	verkon impedanssi
Z_k	oikosulkuimpedanssi
Z_m	epätahtikoneen oikosulkuimpedanssi

1 JOHDANTO

Teollisuuden sähköverkoissa on erittäin tärkeää, että oikosulkuvirrat ovat hallinnassa. Teollisuusverkkojen erityispiirteisiin kuuluvat lyhyet välimatkat ja huomattavan suuret oikosulkuvirrat. Verkon kaikkien osien tulee kestää oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset vaikutukset. Niiltä suojautumisen keskeinen lähtökohta on tietää oikosulkuvirtojen suuruudet eri kytkentätilanteissa verkon eri osissa. (1, s. 1.)

Oikosulkusuojauksessa on hyvä ottaa huomioon tulevaisuuden laajennusmahdollisuudet, mutta verkon osia ei kannata kuitenkaan ylimitoittaa. Vikavirtatarkastelu onkin syytä tehdä aika ajoin muuttuvassa verkossa, jotta verkon toimivuus ja turvallisuus ovat ajan tasalla.

Tässä opinnäytetyössä mallinnetaan Stora Enson Oulun paperitehtaan sähkönjakelua Neplan-ohjelmalla, jolla lasketaan myös vikavirrat. Vikavirtatarkastelu on suoritettu viimeksi vuonna 1996. Stora Enson Oulun sellutehtaan tehdasverkon mallinnus Neplan-ohjelmalla on tehty diplomityönä vuonna 2009 (Salminen, Petri; Tampereen Teknillinen Yliopisto). Tämän työn tavoitteena on jatkaa siitä, mihin diplomityössä jäätin ja aloittaa paperitehtaan sähkönjakelun mallinnus mallintamalla yksi 10 kV:n kojeisto ja laskea siinä esiintyvät vikavirrat. Työn tilaaja on Efora Oy, joka on Stora Enson kunnossapidosta ja projektien suunnitteluista vastaava tytäryhtiö.

2 VIKAVIRRAT

Vika voi olla symmetrinen tai epäsymmetrinen riippuen sen syntytavasta. Symmetrisiä vikoja voi aiheuttaa esimerkiksi muuntajan kolmivaiheinen oikosulku tai suuren tuotantoyksikön verkosta irtoaminen. Salamaniskut ja katkaisijan virheelinen toiminta voivat aiheuttaa epäsymmetrisiä vikoja. Vikavirtoja voi syntyä oikosulusta sekä maasulusta. Virran suuruuteen vaikuttavat oikosulussa olevien vaiheiden määrä, verkon kuormitus- ja kytkentätilanne syntymishetkellä sekä syntymispaikka. (1, s. 7; 2, s. 73 - 74.)

2.1 Oikosulku

Oikosulku eli jännitteisten osien johtava yhteys muun kuin sähkölähteen tai kuormituksen kautta on keskeisimpiä sähkötekniikan käsitteitä. Verkon kaikkien osien tulee kestää oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset (mekaaniset) vaikutukset. Oikosulkukestoisuudella tarkoitetaan laitteiden kestävyys-, suojaus- ja turvallisuuden toteutumista oikosulun sattuessa. Huonosta suunnittelusta mahdollisesti johtuva oikosulkulujuuden ylittyminen tarkoittaa vaurioiden syntymistä muualla kuin vikapaikassa. (3, s. 56; 4: I, s. 4 - 5; 4: II, s. 1.)

Oikosulun aiheuttajana voi olla esimerkiksi eristyksen pettäminen, huollonaikeisten maadoitusten unohtuminen, ylijännitteen aiheuttama valokaari, virheet käytössä, mekaaniset vauriot, laiteviat sekä ilkivalta (1, s. 7; 5, s. 2).

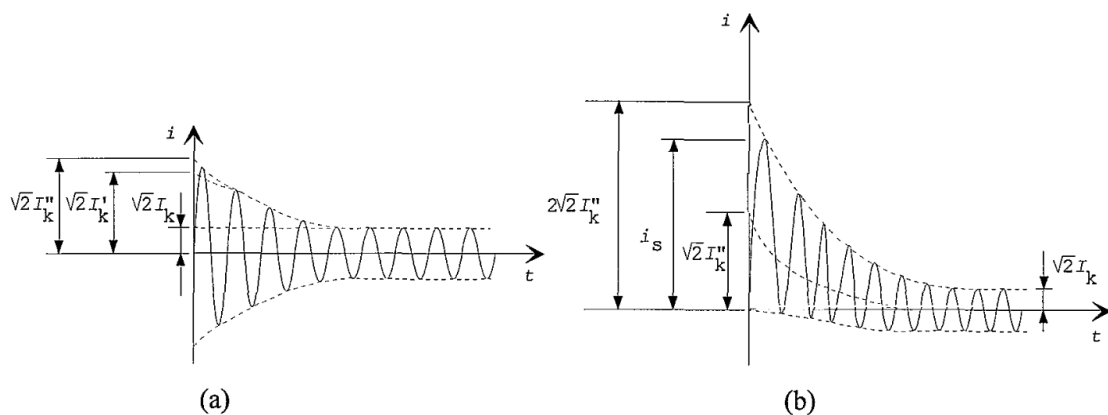
Oikosulun haittoja ovat esimerkiksi käyttökatkot, valokaaret, komponenttien lämpeneminen, vaarajännitteet, paineaallot ja kaasut sekä suurilla jännitteillä verkon epästabiilius. Tärkeintä olisi saada oikosulkuvirta katkaistua mahdollisimman pian, jolloin sen vaikutukset lievenevät ja välttyttäisiin laitevaurioilta. (5, s. 2; 3, s. 167,170.) Oikosulku voi esimerkiksi pahimmillaan aiheuttaa räjähdyksen ja siitä seuraavan tulipalon, jossa syntyy vaarallisia kaasuja. Oikosulkusuojaus on syytä olla kunnossa laitteiston ja ihmisten turvallisuuden sekä käyttövarmuuden kannalta. Suojaus toteutetaan yleensä suojaroleilla ja katkaisijoilla.

Oikosulkujen vaikutuksien lieventämiseksi voi käyttää esimerkiksi seuraavia toimenpiteitä: verkon vahvistaminen tai käyttörajoitukset, säädön suunnittelu, releasetteluiden tarkistukset tai katkaisijoiden valinta. Kahden ensimmäisen vaihtoehdon toteuttaminen ei ole yleensä järkevää tai taloudellista. Sen sijaan kolmella viimeisellä saa huolellisesti tehtynä aikaan mahdollisimman toimivan ratkaisun. (3, s. 166 - 167.)

Verkon oikosulkuvirtoja laskettaessa täytyy tietää verkossa olevat komponentit ja niiden ominaisuudet, kuten oikosulkuimpedanssi, riittävän tarkasti. Verkossa on oikosulkuvirtaa syöttäviä ja rajoittavia komponentteja. Syöttäviä komponentteja ovat syöttävä verkko sekä epätahti- ja tahtikoneet. Muuntajien, kuristimien, johtojen ja kiskojen impedanssit rajoittavat oikosulkuvirtaa. (1, s. 21.)

Oikosulkuvirrat

Oikosulkuvirta voi olla muodoltaan symmetrinen tai epäsymmetrinen. Symmetrisessä oikosulkuvirrassa on pelkästään vaihtovirtakomponentti. Epäsymmetrisessä oikosulkuvirrassa on lisäksi mukana tasavirtakomponentti, jonka suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta oikosulun syntymishetkellä. Kummassakin tapauksessa oikosulkuvirta saa vaimennuttuaan pysyvän arvonsa. Kuvassa 1 näkyy periaate symmetrisen ja epäsymmetrisen oikosulkuvirran käyristä. Kuvassa 1 näkyvät virtojen arvot on selitetty tarkemmin sivulta 13 eteenpäin. (2, s. 73 - 74.)



KUVA 1. Vaimeneva symmetrinen (a) ja epäsymmetrinen (b) oikosulkuvirta (1, s. 4)

Vaihtovirtapiirin oikosulkuvirta on melkein puhdasta induktiivista loisvirtaa, jos oikosulkupiirin impedanssi on pääasiassa induktiivista reaktanssia. Jos kuormitustilannetta ei huomioida, oikosulkuvirta saadaan kaavasta 1. (4: II, s. 2.)

$$i_k = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-\frac{R}{L}t} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad \text{KAAVA 1}$$

missä

U = syöttöjännite

$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ eli verkon impedanssi

$\omega = 2\pi f$

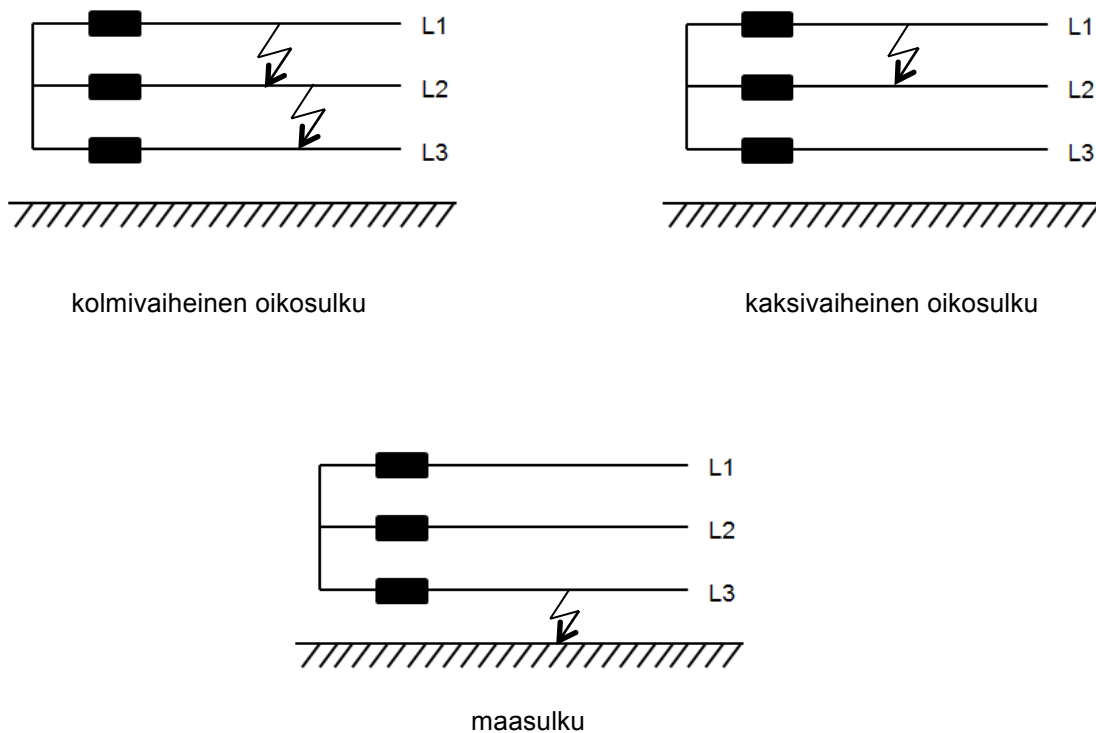
t = aika vian alkamisesta

α = oikosulun syntyhetki jännitteen nollakohdan jälkeen

φ = jännitteen ja virran välinen vaiheensiirtokulma

Kaavassa 1 ensimmäinen termi on oikosulkuvirran vaihtokomponentti, ja se vaihtelee sinimuotoisesti ajan funktiona. Kaavan toinen termi on tasakomponentti, joka vaimenee eksponentiaalisesti aikavakion mukaan. Kuten kaavasta voi päätellä, $\alpha - \varphi$ ollessa 0° tai 180° tasakomponentin suuruudeksi tulee 0 ja oikosulkuvirta on symmetrinen. Suurimmillaan tasakomponentti on oikosulun syntyessä hetkellä, jolloin $\alpha - \varphi = \pm 90^\circ$. Kaavaa 1 voidaan käyttää yksivaiheisen oikosulun laskemiseen kuormittamattomassa tilanteessa. Muissa tilanteissa oikosulkuvirtojen käsin laskemiseen tarvitsee esimerkiksi Théveninin menetelmää, jossa oikosulkupiiristä muodostetaan yksinkertaistettu sijaiskytkentä. (4: II, s. 2.)

Kolmivaiheverkossa suurin mahdollinen oikosulkuvirta syntyy kolmivaiheisesti ilman vastuksia kuvan 2 mukaisesti. Tämän virran suuruus voi olla jopa 10 - 40-kertainen nimellisvirtaan verrattuna. (2, s. 74.) Yleisimmin oikosulut ovat epäsymmetrisiä 1- tai 2-vaiheisia. Yksivaiheinen oikosulku on sama kuin maasulku käyttömaadoitetussa verkossa, ja kaksivaiheinen oikosulku tarkoittaa nimen mukaisesti kahden vaiheen välistä oikosulkua (kuva 2). Käyttömaadoittamattomassa verkossa ei ole yksivaiheista oikosulkua. (5, s. 2; 2, s. 164.)



KUVA 2. Eri vikatilanteet käyttömaadoittamattomassa verkossa

Vaimenevan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin amplitudista (kuva 1) on erotettavissa alkuoikosulkuvirta I_k'' sekä muutosoikosulkuvirta I_k' . Molemmat oikosulkuvirrat vaimenevat omien aikavakioidensa mukaisesti, minkä jälkeen oikosulkuvirta saa pysyvän arvonsa, jatkuvan tilan oikosulkuvirran I_k . Verkon pyörivät tahti- ja epätahtikoneet aiheuttavat oikosulkuvirran muutosilmiöt, kun niiden sisäiset impedanssit kasvavat. (3, s. 168 - 173; 1, s. 11 - 13, 23.)

Alkuoikosulkuvirta on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun syntyhetkellä, eikä sitä käytetä muussa kuin muiden oikosulkuvirtojen määrittämisessä. Alkuoikosulkuvirta I_k'' saadaan kaavasta 2. (1, s. 23; 6, s. 1.)

$$I_k'' = \frac{c \times U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \times U_N}{\sqrt{3} Z_k}$$

KAAVA 2

missä

c = taulukon 1 mukainen kerroin

U_N = syöttävän verkon jännite

Z_k = impedanssi vikapaikasta katsottuna

TAULUKKO 1. Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c (6, s. 2)

Nimellisjännite U_N	Maksimioikosulkuvirta C_{max}	Minimioikosulkuvirta C_{min}
pienjännite 100 V - 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1,00 1,05	0,95 1,00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

Sysäysoikosulkuvirta eli dynaaminen oikosulkuvirta i_s on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo, ja se esiintyy noin yhden puolijakson kuluttua vian alkamisesta (kuva 1, s. 14). Sen mukaan määräytyy laitteiden mekaanisten rakenteiden mitoitus. Standardin IEC 60909 mukaan sysäysoikosulkuvirran suuruuden voi arvioida kaavasta 3. Siinä esiintyvä kerroin κ riippuu oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta (kaava 4). (3, s. 174; 1, s. 23.)

$$i_s = \kappa \times \sqrt{2} \times I_k''$$

KAAVA 3

missä

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 \times e^{\frac{-3R}{X}}$$

KAAVA 4

Ekvivalenttisen termisen oikosulkuvirran I_{th} avulla määritetään verkon komponenttien terminen oikosulkukestoisuus eli se, miten ne kestävät oikosulussa syntyvää lämpöä. I_{th} on alkuoikosulkuvirrasta laskettava yhden sekunnin vastaava tehollinen oikosulkuvirta, joka kehittää saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta (kaava 5). (1, s. 29.)

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n)t_k}$$

KAAVA 5

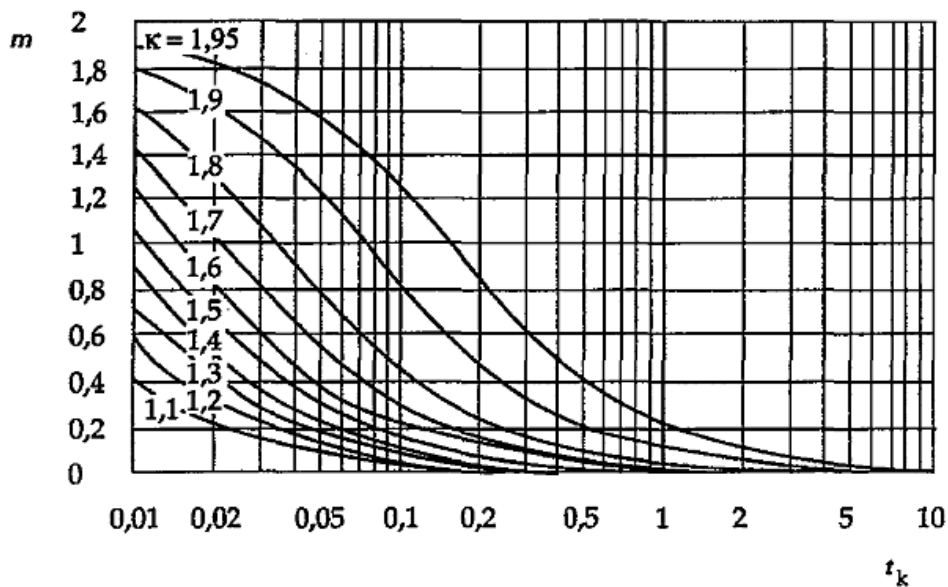
missä

m = tasavirtatekijä

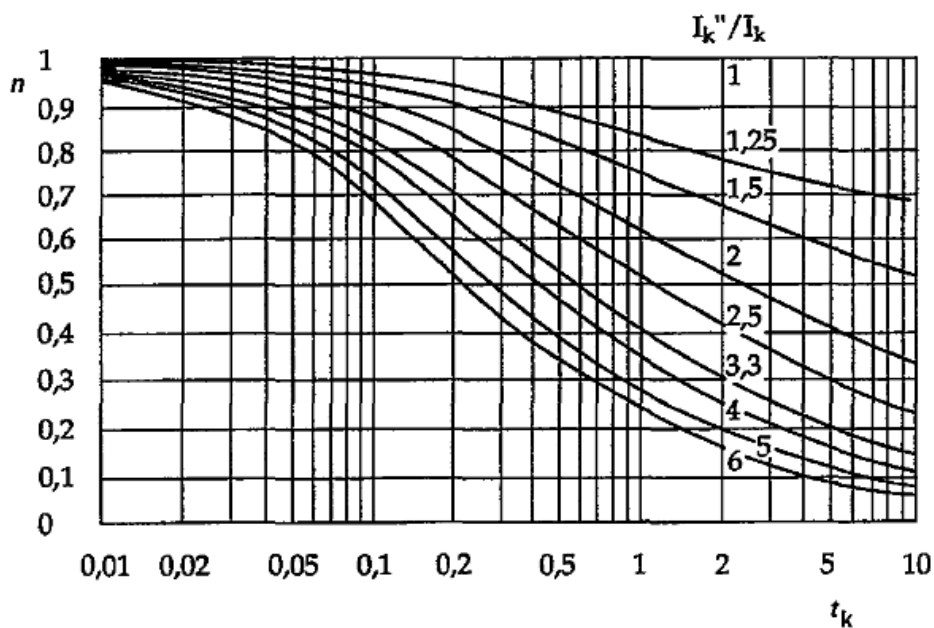
n = vaihtovirtatekijä

t_k = vian kesto aika

Kaavassa 5 esiintyvän tasavirtatekijän m arvo riippuu sysäyskertoimesta ja oikosulun kestoajasta, ja sen voi määrittää kuvasta 3. Vaihtovirtatekijän n arvoon vaikuttaa kuvan 4 mukaisesti I_k''/I_k ja vian kesto aika t_k . (1, s. 29 - 30.)



KUVA 3. Tasavirtatekijä m , riippuen sysäyskertoimesta κ ja vian kestoajasta t_k [s] (1, s. 29 - 30)



KUVA 4. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus alkuoikosulkuvirran ja pysyvän oikosulkuvirran suhteesta I_k''/I_k ja vian kestoajasta t_k [s] (1, s. 29 - 30)

Pääasiassa oikosulusta puhuttaessa käytetään eri oikosulkuvirtojen arvoja, mutta myös oikosulkutehoa (näennäisteho [VA]) käytetään. Oikosulkutehoa käytetään esimerkiksi oikosulkuvirtojen suuruusluokan arvioinnissa tai syöttävän verkon oikosulkuimpedanssin laskemisessa. (1, s. 8.)

2.2 Maasulku

Maasta erotetussa verkossa maasulku tarkoittaa virtajohdon ja maahan johtavan yhteyden välistä pieni-impedanssista yhteyttä. Maasulku voi olla kaksivaiheinen, jolloin kaksivaiheinen oikosulku menee maahan asti. Kaksoismaasulku sen sijaan tarkoittaa verkon kahdessa eri kohdassa ja eri vaiheissa yhtä aikaa sattuvia maasulkuja. (5, s. 3.)

Maasulun vaikutuksesta syntyvien ylijännitteiden suuruudet riippuvat tähtipisteen maadoitustavasta. Erilaisia verkkoja on maadoitustavan mukaan kolme: maasta erotetut, sammutetut sekä maadoitetut. Maasta erotetussa verkossa tähtipiste on kytketty maahan suuren impedanssin kautta. Sammutetun verkon maadoitus on kuristimien eli kelojen välityksellä. Maadoitetuissa verkoissa tähtipiste on suoraan kytketty maahan. Maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa maasulku aiheuttaa haitallista epäsymmetriaa. (2, s. 168; 5, s. 3.)

Maasta erotetussa verkossa normaalitilanteessa verkon vaiheiden jännitteet ovat symmetrisiä maahan nähden eli niiden summa on nolla. Maasulun sattuessa summa poikkeaa nolasta, minkä seurauksesta ylimenevä virta kulkee viikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat johtojen pituus, maakapasitanssi, jännite ja vikavastus. Maasulkuvirta I_{ef} on laskettavissa kaavalla 6. Maasulkuvirran kulku maasta erotetussa verkossa näkyy kuvassa 5 katkoviivalla. (7, s. 1; 8, s. 14.)

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

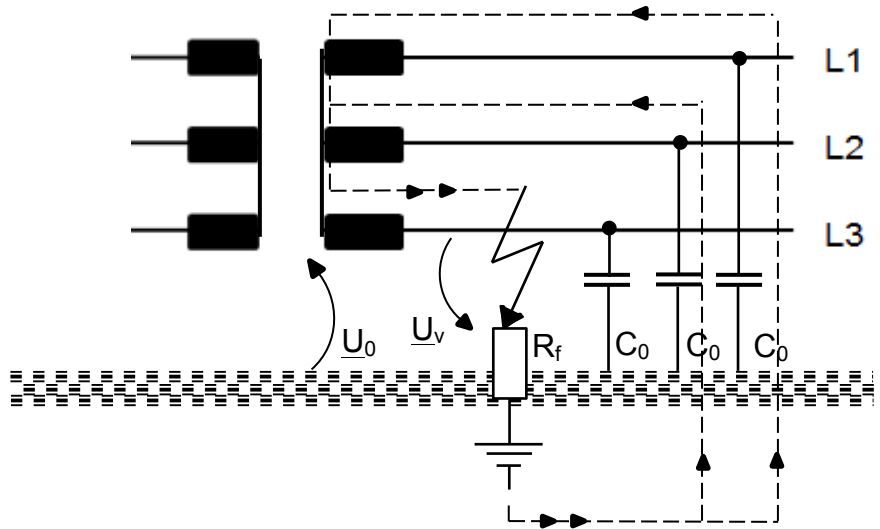
KAAVA 6

missä

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f = vikaresistanssi

U = verkon pääjännite



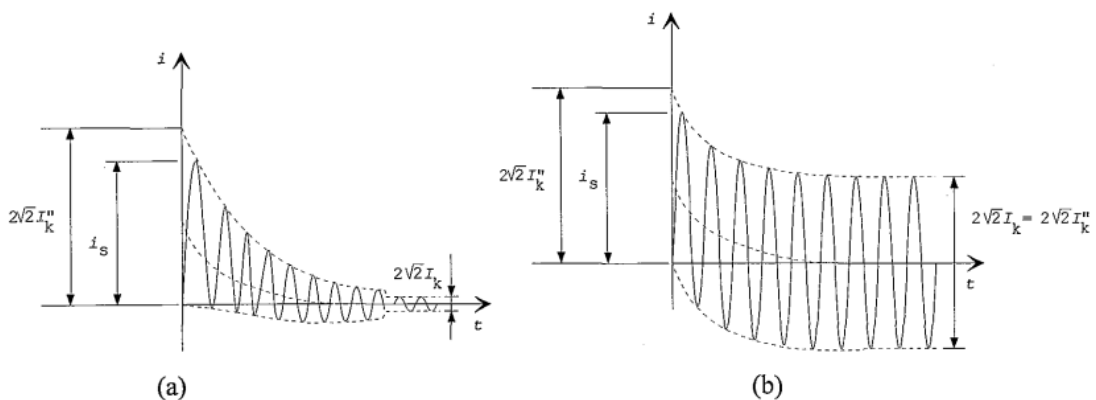
KUVA 5. Maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa (8, s. 14)

Maasulkusuojaus toteutetaan maasta erotetussa verkossa erillisillä maasulkureleillä tai vikavirtasuojakytkimillä, koska oikosulkusuojaus ei toimi yksivaiheisessa maasulussa. (7, s.12.)

3 OIKOSULKUPIIRIN KOMPONENTIT TEOLLISUUSVERKOSSA

Teollisuusverkkojen erityispiirteisiin kuuluu huomattavan suuret oikosulkuvirrat, jotka johtuvat verkon rakenteesta, jännitetasosta ja kuormituksista. Prosessiteollisuudelle tyypilliset piirteet, kuten lukuisat epätahtimoottorit, tahtikoneet ja oma sähköntuotanto kasvattavat osaltaan oikosulkuvirtoja. (1, s. 1.)

Tahtikoneiden eli generaattorien vaikutus oikosulkuvirtaan on merkittävä, ja ne vaikuttavat kolmivaiheiseen alku-, sysäys- ja jatkuvan tilan oikosulkuvirtaan sekä kaksivaiheisiin oikosulkuvirtoihin. Generaattorin etäisyys vikapaikkaan vaikuttaa oikosulkuvirran vaihtokomponentin vaimenemiseen kuvan 6 mukaisesti. Vaihtovirtakomponentti vaimenee nopeammin, jos oikosulku sattuu generaattorin läheisyydessä. Vastaavasti vian tapahtuessa tarpeeksi kaukana generaattorista vaihtovirtakomponentti ei vaimene juuri ollenkaan. (6, s. 6; 1, s. 7.)



KUVA 6. Epäsymmetrisen oikosulkuvirran vaimeneminen, (a) oikosulku lähellä generaattoria ja (b) oikosulku kaukana generaattorista (1, s. 7)

Oikosulkupiirissä olevat epätahtimoottorit syöttävät oikosulkuvirtaa vian alkuehetkestä muutaman puolijakson ajan. Yksittäisen epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi on laskettavissa kaavasta 7. (1, s. 19.)

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n}$$

KAAVA 7

missä

U_n = moottorin nimellispääjännite

I_n = moottorin nimellisvirta

I_s = moottorin käynnistysvirta

S_n = moottorin nimellinäennäisteho

Laskennassa on mahdollista kuvata useampi pienjännitemoottori yhtenä ekvivalenttisenä moottorina käyttäen samaa kaavaa 7. Suurjännitemoottorit on syytä mallintaa kukin erikseen. (6, s. 6.)

Vikavirtalaskujen kannalta muuntajien oikosulkuimpedanssit tulee tietää. Laite-tietojen avulla voidaan kaavojen 8, 9 ja 10 mukaan selvittää kaksikämmimuuntajan oikosulkuimpedanssi, -resistanssi ja -reaktanssi (1, s. 18).

$$Z_k = \frac{u_k U_n^2}{100 S_n}$$

KAAVA 8

$$R_k = \frac{u_r U_n^2}{100 S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2}$$

KAAVA 9

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

KAAVA 10

missä

Z_k = muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_k = muuntajan oikosulkuresistanssi

X_k = muuntajan oikosulkureaktanssi

U_n = muuntajan nimellispääjännite

I_n = muuntajan nimellisvirta

S_n = muuntajan nimellinäennäisteho

P_{kn} = muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

u_k = muuntajan oikosulkujännite prosentteina

u_r = muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina

Sähköverkon tietyt kuormitukset tarvitsevat pätötehon lisäksi myös loistehoa toimiakseen. Näitä kuormituksia ovat esimerkiksi moottorit, purkauslamput ja muuntajat. Loistehoa komponenteille saadaan kompensoimalla. Kuormituksen loistehon tarpeen ilmaisee tehokerroin $\cos \varphi$. Kompensoinnin voi toteuttaa komponentti- tai kojeryhmäkohtaisesti tai keskitetysti. (9, s. 1 - 4.)

Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa mm. seuraavia ongelmia: lisähäviöt verkko-komponenteissa, suojalaitteiden virhetoiminnot ja televerkon häiriöt. Yleisesti yliaallot aiheuttavat verkossa jännitesäröä. Yliaaltoja verkkoon aiheuttavat AC- ja DC-käytöt, UPS-laitteet, purkauslamput ja sähkösuotimet. (9, s. 6 - 9.)

Teollisuusverkoissa keskijännitekaapelipituudet ovat tyypillisesti niin lyhyitä, että vaikutus kokonaisuikosulkuimpedanssiin on vähäinen. Maasulkulaskuissa kaapelit pitää kuitenkin huomioida varsinkin maasta erotetussa verkossa, jossa kaapeleiden maakapasitanssit ovat ainoa vikavirtojen yhteys maahan. Kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot ovat yleensä saatavilla valmistajilta. Kis-

kosten impedanssit ovat verkon oikosulkuimpedanssiin nähden pieniä, joten niitä ei oteta laskennoissa huomioon. Kaapeleiden ja kiskosten on kuitenkin oltava oikosulkukestoisia, koska niihin voi oikosulussa kohdistua mekaanisia ja termisiä rasituksia. (4: IV, s. 1; 1, s. 20 - 21.)

Kuristimia eli keloja käytetään verkossa rajoittamaan vikavirtoja. Laskennassa käytetään samoja kaavoja (8 - 10) kuin kaksikämmimuuntajilla.

Tehdasverkossa on lisäksi muitakin kuormituksia, kuten pienjänniteverkon valaistus ja lämmitys sekä katkaisijat ja erottimet. Niiden vaikutukset kokonaisoikosulkuvirtaan ovat tyypillisesti niin pieniä muuhun verkkoon nähden, ettei niitä huomioida laskuissa.

4 NUOTTASAAREN PAPERITEHDAS

4.1 Stora Enson Oulun tehtaat

Stora Enso Oyj syntyi vuonna 1998 suomalaisen Enso Oyj:n ja ruotsalaisen Stora Kopparbergs Bergslags Aktiebolagin fuusiossa. Yhtiön juuret Suomessa yltävät kauemminkin muun muassa metsänhoito- ja sahatoimintaan. Nykyään Stora Enso toimii maailmanlaajuisesti tuottaen uusiutuvia pakkaus- ja biomateriaaleja sekä puutuotteita ja paperia. Stora Ensolla työskentelee yli 35 maassa noin 26 000 ihmistä ja Suomessa 6 600 vuonna 2016. Vuonna 2015 liikevaihto oli 10,0 miljardia euroa. Stora Enso koostuu viidestä divisioonasta: Consumer Board, Packaging Solutions, Biomaterials, Wood Products ja Paper. Suomessa Stora Ensolla on tuotantolaitoksia 12 paikkakunnalla. (10.)

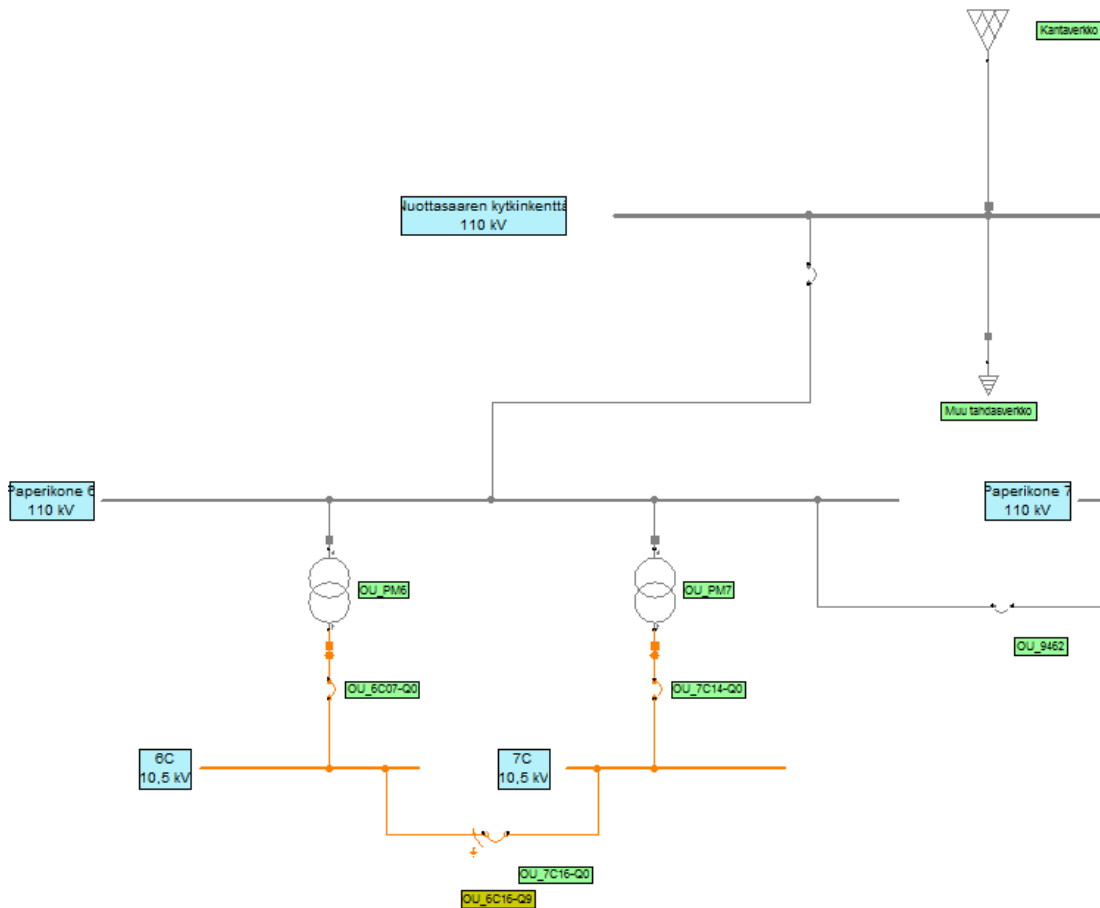
Efora Oy on vuonna 2009 perustettu Stora Enson tytäryhtiö, joka on erikoistunut teollisuuden kunnossapito- ja Engineering-palveluihin. Alun perin Eforan omistivat ABB ja Stora Enso yhdessä, mutta ABB jäi pois vuonna 2013. Efora toimii Suomessa yhdeksällä paikkakunnalla työllistäen noin 920 henkilöä (2016). Vuonna 2015 Eforan liikevaihto oli 204 miljoonaa euroa. (11.)

Oulun Nuottasaarella on Stora Enson sellu- ja paperitehdas. Tehdasalueella on myös kemiantehtaat Arizona Chemical Oy, Eka Chemicals Oy ja Eka Polymer Latex Oy. Paperitehtaalla on kaksi paperikonetta, PK6 ja PK7 sekä arkittamo. Oulun tehtaalla tuotetaan täyspäälystettyä taidepainopaperia happivalkaistusta sellusta. Vuonna 2016 Oulun paperitehtaan tuotantokapasiteetti oli 1,08 miljoonaa tonnia Stora Enson suurimpana paperintuottajana. (10; 12, s. 2.)

4.2 Paperitehtaan sähköverkon rakenne ja komponentit

Nuottasaaren tehdasverkon syöttö tulee Suomen kantaverkon sähköasemilta Leväsuolta ja Pikkaralasta. 110 kV syötetään Stora Enson omistamia avojohtoja pitkin Nuottasaaren kytkinkentälle. Kantaverkko ja tehdasverkko on kytketty keskenään renkaaksi.

110 kV:n kytkinkentältä on maakaapeliyhteydet paperitehtaan neljälle päämuuntajalle, joissa jakelujännitteeksi muutetaan 10 kV. Muun tehdasverkon jakelujännite on 6,3 kV. Päämuuntajilta on yhteydet paperikoneiden 10 kV:n keskuksille. (kuva 7.) Tehdasverkko on kokonaan maasta erotettu, ja normaalisti sitä käytetään säteittäisenä, jotteivät oikosulkuvirrat kasva liian suuriksi. Varayhteyksiä löytyy kuitenkin, joten myös rengasmainen verkon käyttö on periaatteessa mahdollista.

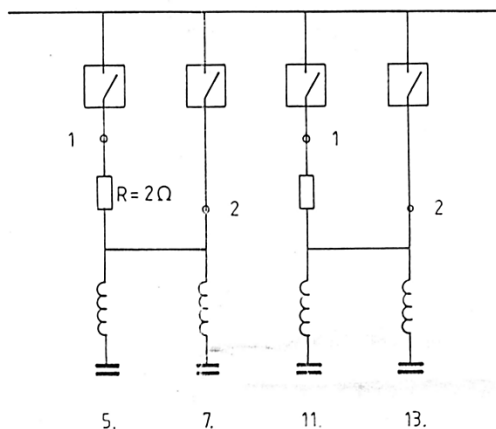


KUVA 7. Paperikone 6:n sähköjakelu mallinnettuna Neplan-ohjelmalla (16)

Sähköverkkoa ohjataan ja hallitaan ABB:n MicroSCADA-käytönvalvontajärjestelmällä. Järjestelmästä näkee mm. verkon tilan reaaliajassa ja hälytykset, ja sillä pystyy myös ohjaamaan esimerkiksi katkaisijoita. (13.)

Tehdasalueella on useita erikokoisia muuntajia. PK6:n kaksi päämuuntajaa ovat tehoiltaan 40 MVA, ja PK7:lla on kaksi 50 MVA:n päämuuntajaa. Kukin päämuuntaja on varustettu käämikytkimellä. Käämikytkimellä muuntajan muutosuhteen säätö on mahdollista myös kuormitettuna. 10 kV:n kojeistot syöttävät lukuisia prosessimuuntajia.

Paperitehtaalla yliaaltojen vaikutusta hallitaan suodattamalla 5., 7., 11. ja 13. yliaaltoa. Suodattimilla kompensoidaan loistehoa ja pienennetään särö halutulle tasolle. Kompensointi ja yliaaltojen suodatus toteutetaan keskitetysti kuvan 8 mukaisilla suodatinkuristimilla, jotka koostuvat suodatinkeloista ja kondensattoriparistoista sekä 2 ohmin purkausvastuksista. (14, s. 8.)



KUVA 8. Suodatinkuristimet eri yliaalloille (14, s. 8)

Suodatinkuristimia ohjataan etänä sellutehtaalta tai MicroSCADA-järjestelmästä. Ne ovat käytännössä koko ajan päällä, koska muuten loistehon ylityksistä ja alituksista siirtoverkkoon jouduttaisiin maksamaan. Lisäksi PK6:lla käytössä olevien suodatinkuristimien tehojen porrastukset ovat suuria, joten niiden kytkennät aiheuttavat isoja jännitevaihteluja verkossa. Oikosulkuvirran

kannalta suodatinkuristimilla ei ole juurikaan merkitystä, mutta ne mallinnettiin Neplan-mallinnukseen osana kojeistoa.

Paperitehtaan verkossa on lukuisia niin pien- kuin suurjännitemoottoreita, jotka syöttävät oikosulkuvirtaa. Kunkin keskuksen pienjännitemoottorit mallinnettiin Neplaniin yhtenä ekvivalenttisena moottorilähtönä. Tahtikoneita PK6:n 10 kV:n kojeistoissa ei ole.

Nuottasaaren tehdasverkossa kuristimia on vain sellutehtaan puolella, joten niitä ei tarvinnut ottaa huomioon tässä työssä. Pienempiä kuristimia on käytössä esimerkiksi paperikoneen valaistuksessa, ja ne vaikuttavat valaistuskuorman tehokertoimeen.

Tässä työssä mallinnettavassa verkon osassa on 10 kV:n jakelussa käytössä AHXAMK-W- eli Wiski-voimakaapeli. Se on alumiinijohtiminen, PEX-muovieristeinen vesitiivis maakaapeli.

Katkaisijat on mallinnettu Neplan-mallinnukseen ideaalisina komponentteina. Niitä avaamalla ja sulkemalla pystytään tarkastelemaan verkkoa eri kytkentätilanteissa, esimerkiksi varasyöttöä käytettäessä. Ohjelman avulla on myös helppo tarkistaa onko kyseiset laitteet mitoitettu oikein oikosulun kannalta.

5 NEPLAN-OHJELMISTO

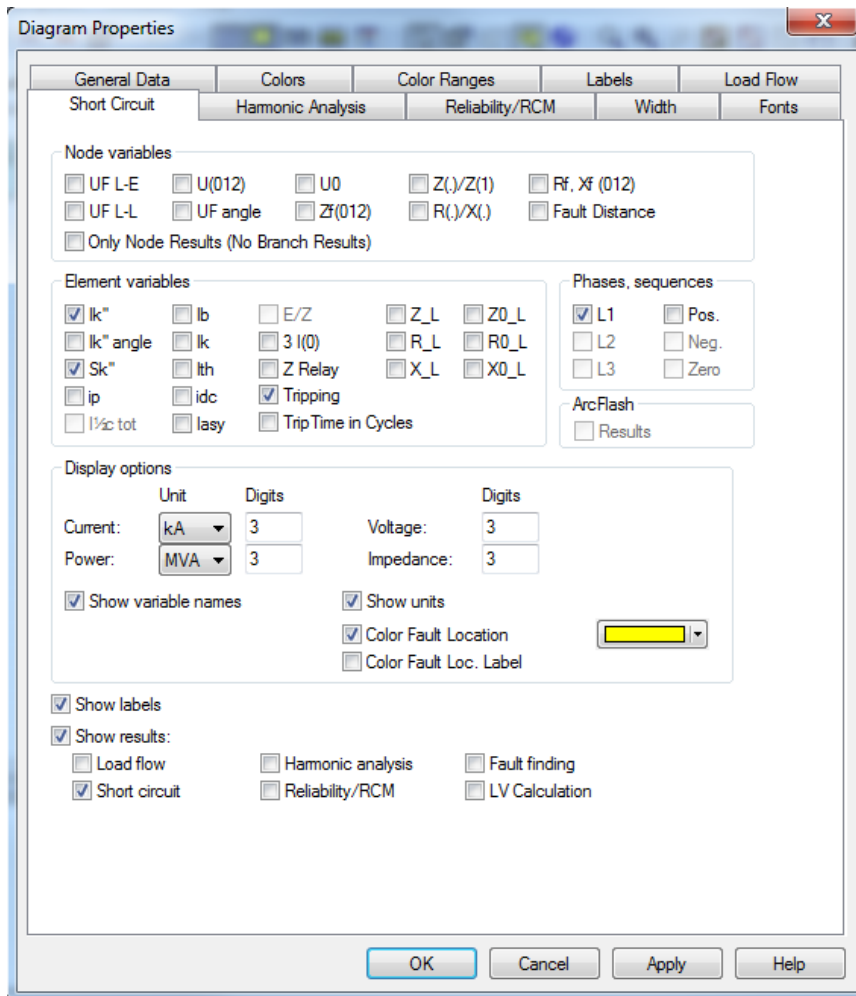
Opinnäytetyössä käytettiin moduulipohjaista Neplan-ohjelmistoa, jolla voi analysoida, suunnitella, optimoida ja simuloida sähköverkoja. Ohjelman on kehittänyt sveitsiläinen BCP Busarello ja sen alkuperäinen nimi on Calpos. Sitten ohjelman nimi on muuttunut Neplaniksi. Suomessa Neplan-ohjelmaa markkinoi ABB Oy. (15.)

Ohjelma toimii lisenssisopimuksien kautta, ja käytössä olevat ominaisuudet määräytyvät hankitun lisenssin mukaan. Työssä oli käytössä Eforan lisenssi versioon 552, joka mahdollistaa ohjelman käytön yhdellä koneella kerrallaan. Serverillä oleva lisenssiavain on Oulun ja Kemin Veitsiluodon toimipisteiden yhteiskäytössä. Lisenssi mahdollistaa maksimissaan 500 solmupisteen sähköverkon mallintamisen sekä tehonjako- ja vikavirtalaskennat. Ohjelmassa on Windows-ohjelmien kaltainen graafinen käyttöliittymä.

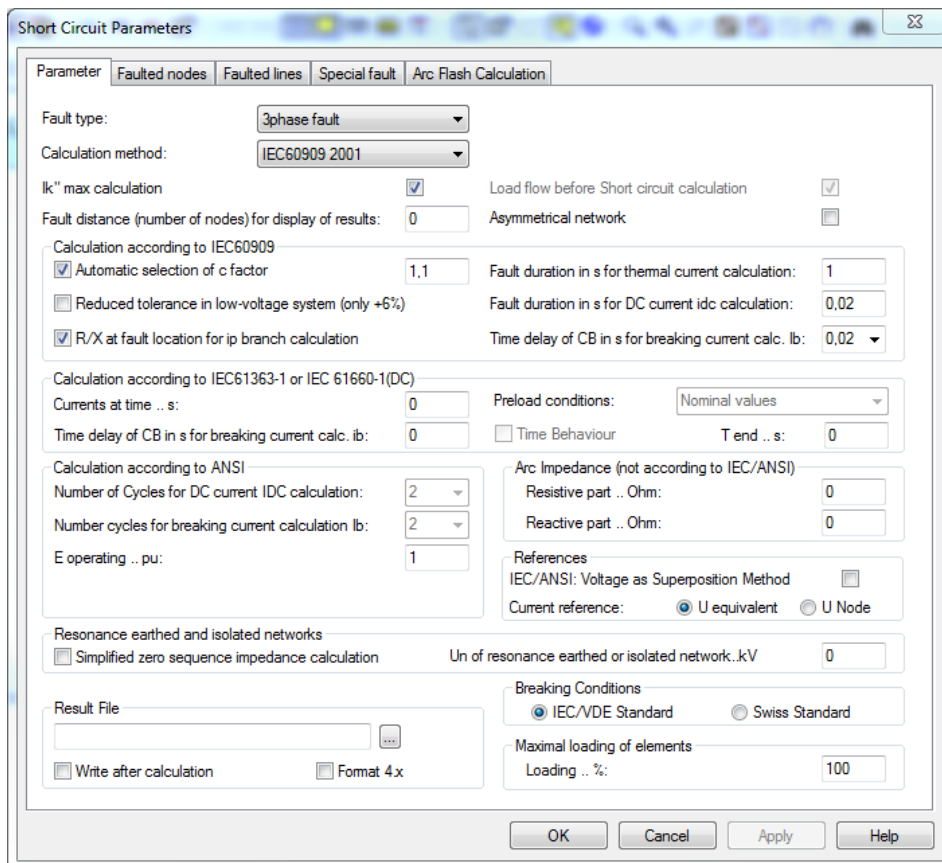
Ohjelmassa on erilaisia laskentamoduuleja, ja asetuksilla pystyy määrittämään niissä käytettävät laskumenetelmät. Tässä opinnäytetyössä käytettiin Short Circuit- eli oikosulku- sekä Load Flow- eli tehonjakolaskentamoduuleja. Sähköverkon mallinnusta varten käytössä oli myös Electrical-moduuli.

5.1 Oikosulkulaskenta

Ohjelman oikosulkumoduulilla voidaan mallintaa eri vikatyyppejä ja laskea niissä esiintyvät virrat. Vikavirrat voidaan laskea kolmi- ja kaksivaiheisessa oikosulussa, maasulussa ja kaksivaiheisessa oikosulussa maasululla. Lisäksi voi itse määritellä erikoisvian. Laskettavat vikapaikat ovat valittavissa verkon eri osista. Valitut tulokset saa halutessaan Diagram Properties -valikosta (kuva 9), ja ne näkyvät mallinnuksessa kuten liitteessä 1. Laskentamenetelmäksi voi valita haluamansa standardin. Tässä työssä käytettiin standardin IEC 60909 vuoden 2001 mukaista menetelmää. Kuvat 9 ja 10 ovat kuvankaappaukset Neplan-ohjelman oikosulkulaskennan laskentatulosten valintaikkunasta sekä parametriikkunasta (16).



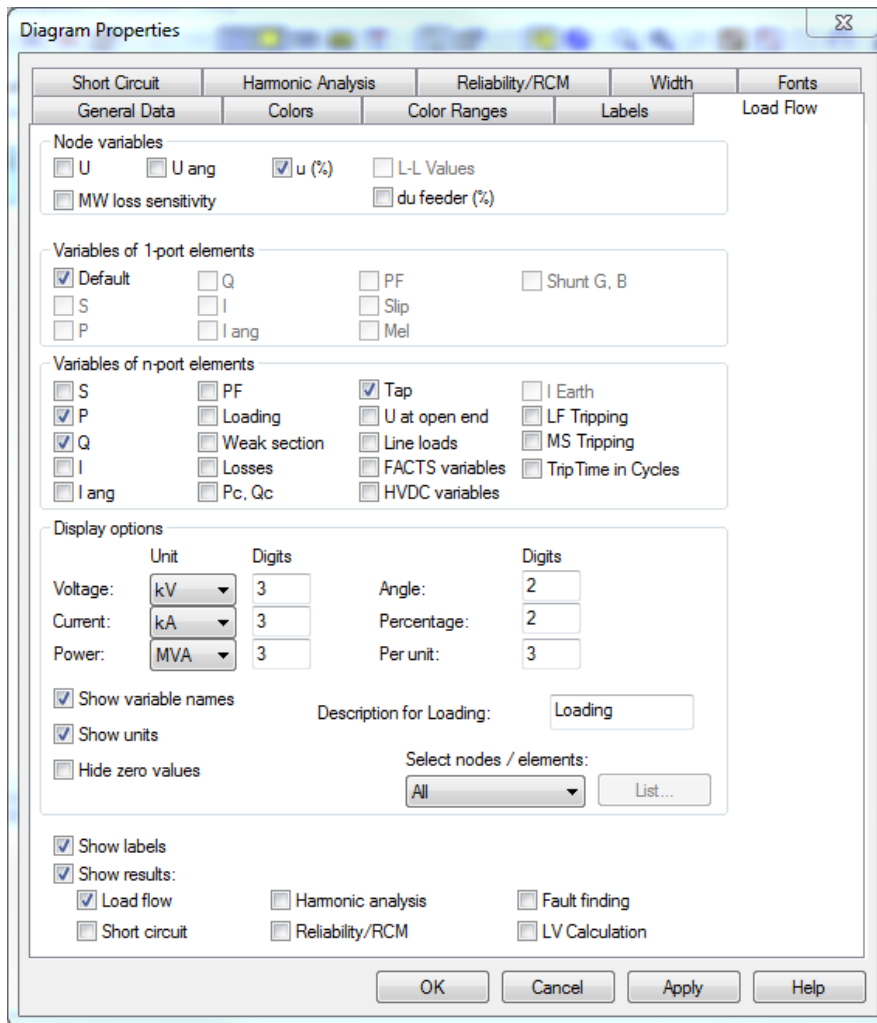
KUVA 9. Laskentatulosten valintaikkuna (16)



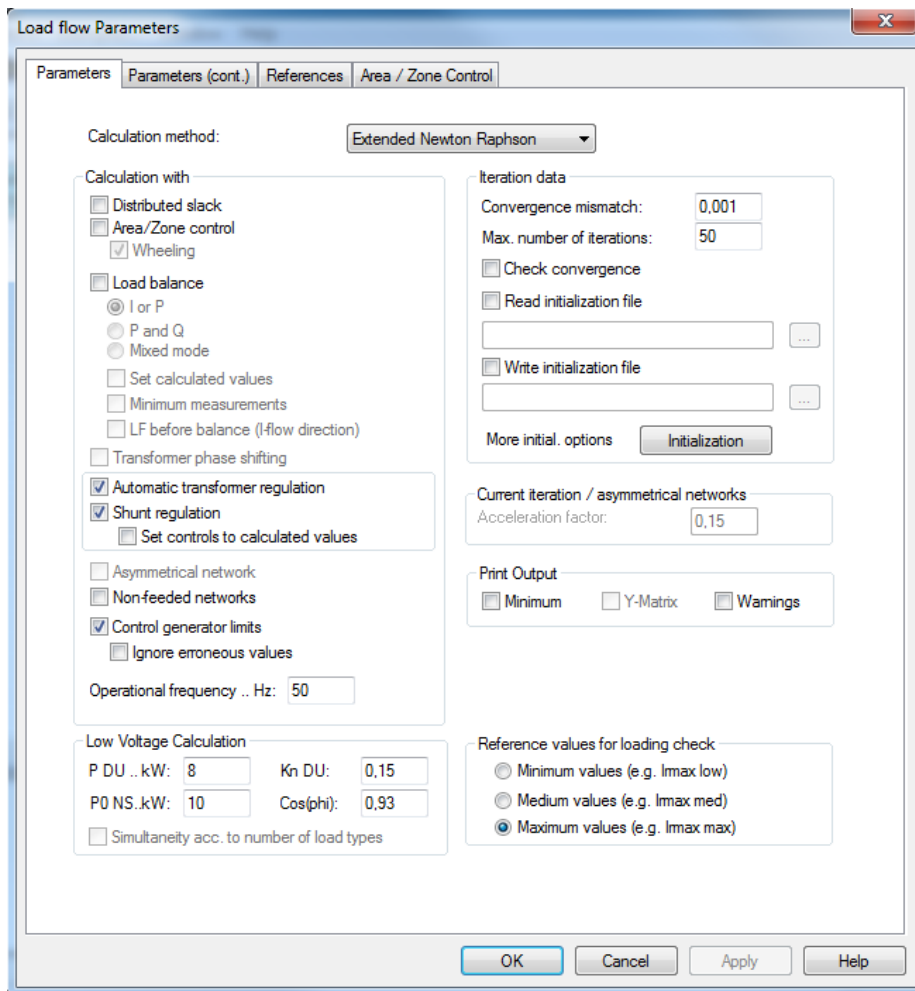
KUVA 10. Oikosulkulaskennan parametrivalikko Neplan-ohjelmassa (16)

5.2 Tehonjakolaskenta

Tehonjakomoduulilla pystyy selvittämään verkon kuormitusten ja tehon jakaantumisen sähköverkon eri osissa. Laskennassa on mahdollista saada selville verkon päto- ja loistehot. Myös tehonjakolaskutulokset saa näkyviin mallinnuskuvaan vikapaikkakohtaisesti (liite 2 ja kuva 11). Käytettäviä laskentamenetelmiä ovat mm. Newton Raphson tai virran iteraatio. Tässä työssä käytettiin tehonjakolaskennassa laajennettua Newton Raphson -menetelmää. Kuvassa 11 on kuvankaappaus tehonjakolaskentatulosten valintaikkunasta, ja kuvassa 12 on kuvankaappaus tehonjakolaskennan parametri-ikkunasta (16).



KUVA 11. Tehonjakolaskentatulosten valintaikkuna (16)

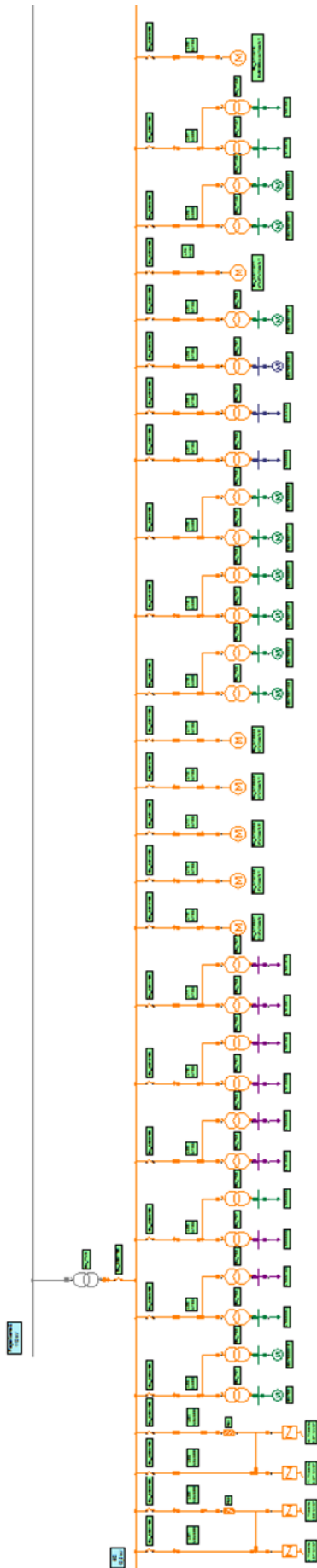


KUVA 12. Neplan-ohjelman tehonjakoparametri-ikkuna (16)

6 PAPERITEHTAAN SÄHKÖNJAKELUN MALLINNUS

6.1 Mallinnus ja laskenta

Tässä opinnytetyössä mallinnettiin Oulun PK6:n 10 kV:n 6C-kojeiston sähkönjakelu Neplan-ohjelmalla (kuva 13). 6C-kojeistoon liittyy 26 lähtöä: 7 suurjännitemoottorilähtöä, 4 suodatinkuristinlähtöä ja 15 prosessimuuntajalähtöä. Suurin osa prosessimuuntajalähdöistä syöttää rinnakkain kahta muuntajaa, ja kaiken kaikkiaan 6C-kojeistoon liittyy 26 prosessimuuntajaa. PK6:n 10 kV:n 6C- ja 7C-kojeistojen välillä on välijännitekatkaisija, joka mahdollistaa kojeistojen syötön molemmilta päämuuntajilta. Työssä mallinnettiin myös 7C-kojeisto pelkistettynä, sillä sen muuntajalla ja kuormalla on vaikutusta 6C:n oikosulkuvirtoihin tilanteissa, joissa välijännitekatkaisija on suljettuna. Tulevaisuudessa 7C-kojeisto mallinnetaan ohjelmalla tarkemmin.



KUVA 13. Neplan-ohjelmalla mallinnettu 6C-kojeisto (16)

Työhön mallinnettiin myös PK7:n 10 kV:n kojeistot 9C, 8C ja 81C, jotta kokonaiskuva paperitehtaan verkosta olisi havainnollisempi (liite 3.) Paperitehtaan verkosta tehtiin oma tiedosto, jossa oli diagrammit pääverkolle sekä kullekin 10 kV:n kojeistolle.

Ennen mallinnuksen aloitusta Efora järjesti Juha Willmanin ABB:ltä pitämään yhden päivän mittaisen koulutuksen ohjelman käyttöön. Koulutuksessa käytiin läpi sähköverkon mallintaminen alusta asti ja muutosten tekeminen valmiiseen mallinnukseen. Lisäksi ohjelman käytön tueksi sai paperiset manuaalit.

Sähköverkon mallinnuksen apuna käytettiin sähkökaavioita ja SAP-järjestelmää. SAP-järjestelmästä sai muuntajien, katkaisijoiden ja suurimpien moottoreiden laitetiedot. Järjestelmään tehdystä rakenneluettelosta selvisi myös muuntajien syöttämät laitteet. Projekti-insinööreiltä ja suunnittelijoilta saatiin osa tiedoista, kuten kaapelityypit ja tiedot suodatinkuristimista. Kuormitustietoja kerättiin sähkökeskusten ylivirtareleista ja MicroSCADA-järjestelmästä. 10 kV:n kaapeleiden pituudet piti arvioida kaapelireittien mukaan. Mallinnettu paperitehtaan verkko näkyy liitteessä 3 ja 6C-kojeisto liitteessä 4 (16).

6C-kojeistossa esiintyvät vikavirrat laskettiin neljässä eri kytkentätilanteessa:

I: Välijännitekatkaisija on auki ja molemmat päämuuntajat syöttävät omia kojeistojaan. Tilanne on ns. normaali tilanne, joka on yleisimmin käytössä.

II: Välijännitekatkaisija on kiinni, ja molemmat muuntajat syöttävät molempia kojeistoja. Tilanne on käytössä vain hetkellisesti tilanteissa, joissa jompikumpi muuntaja ollaan ottamassa pois käytöstä.

III: Välijännitekatkaisija on kiinni ja PM6 pois käytöstä, eli PM7 syöttää molempia kojeistoja.

IV: Välijännitekatkaisija on kiinni ja PM7 pois käytöstä, eli PM6 syöttää molempia kojeistoja.

Oikosulkulaskennalla laskettiin 6C-kojeiston ja sen lähtöjen siihen syöttämät minimi- ja maksimioikosulkuvirrat kolmivaiheisessa oikosulussa ja maasulkuvirrat kaikissa tilanteissa sekä kolmivaiheiset oikosulkuvirrat keskuksissa tilan-

teessa I. Tulokset on esitetty taulukoituna liitteessä 5. Taulukoissa on esitetty minimi- ja maksimitilanteissa alkukoikosulkuvirta I_k'' , dynaaminen oikosulkuvirta i_s , ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} , näennäisalkukoikosulkuteho S_k'' sekä maasulkuvirran suuruus $3 \cdot I_0$.

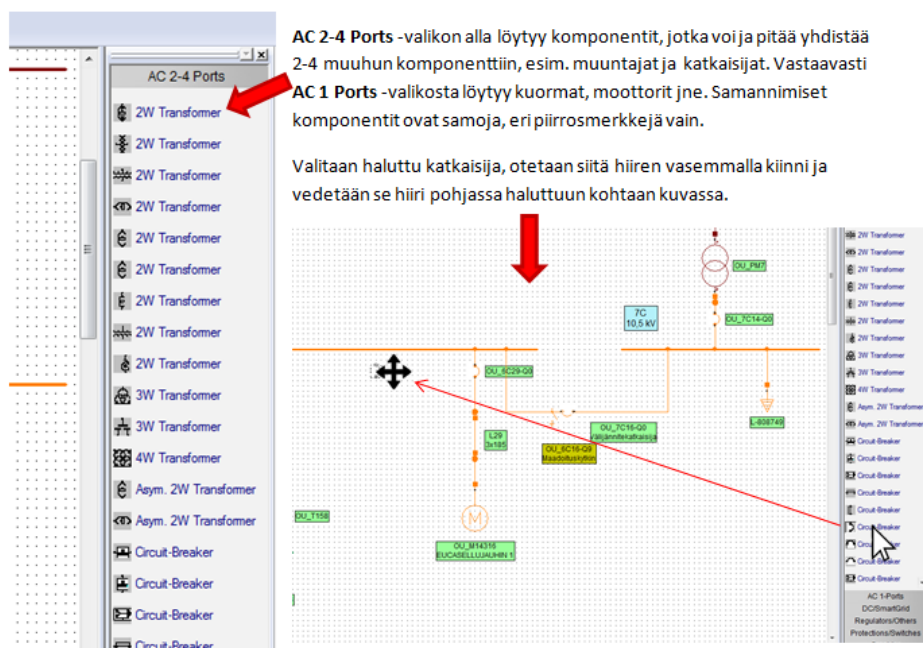
Maksimioikosulkuvirta lasketaan verkon kytkentätilanteessa, jossa on maksimikuormitus. Minimioikosulkuvirran arvo määritetään kytkentätilanteessa, jossa moottorit seisovat ja johtimet altistuvat suurimmalle käyttölämpötilalleen.

(6, s. 9.)

Lisäksi tässä opinnäytetyössä tehtiin Efora Oy:n projekti-insinööreille ohje Neplan-ohjelman käyttöön, missä käydään vaihe-vaiheelta läpi uuden lähdön lisääminen mallinnukseen. Ohjeessa on kuvankaappauksia ohjelmasta ja vaiheita on selkeytetty lisäämällä hiirenosoittimia, nuolia ja ympyröitä kuviin. Jatkossa kaikki muutokset paperitehtaan sähköverkossa tulee lisätä myös Neplan-mallinnukseen ja suorittaa vikavirtatarkastelu, jotta suojaus ja turvallisuus pysyvät ajan tasalla. Ohje tallennettiin pdf-muodossa mallinnuksen yhteyteen. Kuvassa 14 on ote ohjeesta.

Katkaisija

Ensiksi lisätään katkaisija ikkunan oikeassa reunassa olevasta symboli-ikkunasta.



KUVA 14. Ote ohjeesta muutosten tekemiseen Neplan-mallinnuksessa

6.2 Tulokset ja johtopäätökset

Mallinnettu verkko ja lasketut vikavirrat eivät ole aivan todenmukaisia, koska mallinnus tehtiin vain jakelumuuntajien syöttämille pienjännitekeskuksille asti, joissa todellisuudessa on omia alakeskuksia ja enemmän kuormaa. Keskijännitekojeiston oikosulkuvirtoihin alakeskusten kuormilla on niin pieni vaikutus, että mallinnuksen laajuus antaa riittävän tarkkuuden. Neplanilla mallinnettu kuorma on myös hieman ylimitoitettu, koska esimerkiksi kaikki käytöt eivät ole yhtä aikaa kuormitettuna eri ajotilanteissa.

PK6:n 7C-kojeiston sekä PK7:n 10 kV -kojeistojen kuormat mallinnettiin pätö- ja loistehon mukaan tavallisina kuormina, joten ne eivät tässä mallinnuksessa syöttäneet oikosulkuvirtaa. Kuormien tehot olivat hetkellisiä arvoja muutamina eri aikoina otettuna, joten niiden suuruus vaihtelee todellisuudessa. Myös näiden kojeistojen mallinnusta on kuitenkin tarkoitus jatkaa myöhemmin, jolloin tulokset tarkentuvat.

Laskutuloksille ei ollut vertailukohdetta, joten niiden luotettavuuden varmistamiseksi joitain oikosulkuvirtoja laskettiin käsin esimerkiksi muuntajille ja moottorilähdöille. Käsin lasketut oikosulkuvirrat olivat hyvin lähellä ohjelman laskemia virtoja, joten tulokset olivat luotettavia. Myös aiemmin tehty sellutehtaan verkon Neplan-mallinnus antoi suuntaa vikavirtojen suuruusluokkiin.

10 kV:n kojeistojen osalta oikosulkuvirrat ovat sallituissa rajoissa kytkentätilanteissa I, III ja IV. Tilanteessa II oikosulkuvirrat nousevat korkeiksi, koska verkko on silloin rengasmaisen. 6C- ja 7C-kojeistojen yhden sekunnin terminen kestovirta on 40 kA ja dynaaminen kestovirta 100 kA, joten jos kytkentätilanteessa II syntyy oikosulku maksimitilanteessa, kojeistot joutuvat äärirajoilleen (kuva 15.) Kytkentätilanne II on kuitenkin käytössä vain hetkellisesti, kun toista päämuuntajaa ollaan ottamassa pois käytöstä. Kojeistojen oikosulkuvirrat eivät pääse kuitenkaan kasvamaan laskettujen arvojen suuruisiksi, sillä eri suojalaitteet katkaisevat ne alle yhdessä sekunnissa.

TILANNE II		
VIKAPAikka	I_k'' [kA]	i_s [kA]
PK 6	14,243	30,615
6C	41,373	101,519
7C	41,359	101,356

KUVA 15. Ote oikosulkulaskutuloksista

Pienjännitekeskusten yhden sekunnin tehollinen oikosulkuvirta on 40 kA ja dynaaminen oikosulkuvirta on 100 kA, ja lasketut oikosulkuvirrat menevät näiden arvojen yli joissain keskuksissa. Oikosulkuvirran kasvua kuitenkin rajoitetaan rele- ja valokaarisuojauksella sekä katkaisijan nopealla aukiohjauksella, joten maksimioikosulkuvirrat eivät pääse kasvamaan todellisuudessa laskutulosten mukaisiksi.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli aloittaa Stora Enson Oulun paperitehtaan sähkönjakelun mallinnus Neplan-ohjelmalla. Työssä mallinnettiin paperikone 6:n toinen 10 kV:n kojeisto. Mallinnetusta sähköverkosta laskettiin ohjelmalla siinä esiintyvät vikavirrat kolmivaiheisessa oikosulussa ja maasulussa.

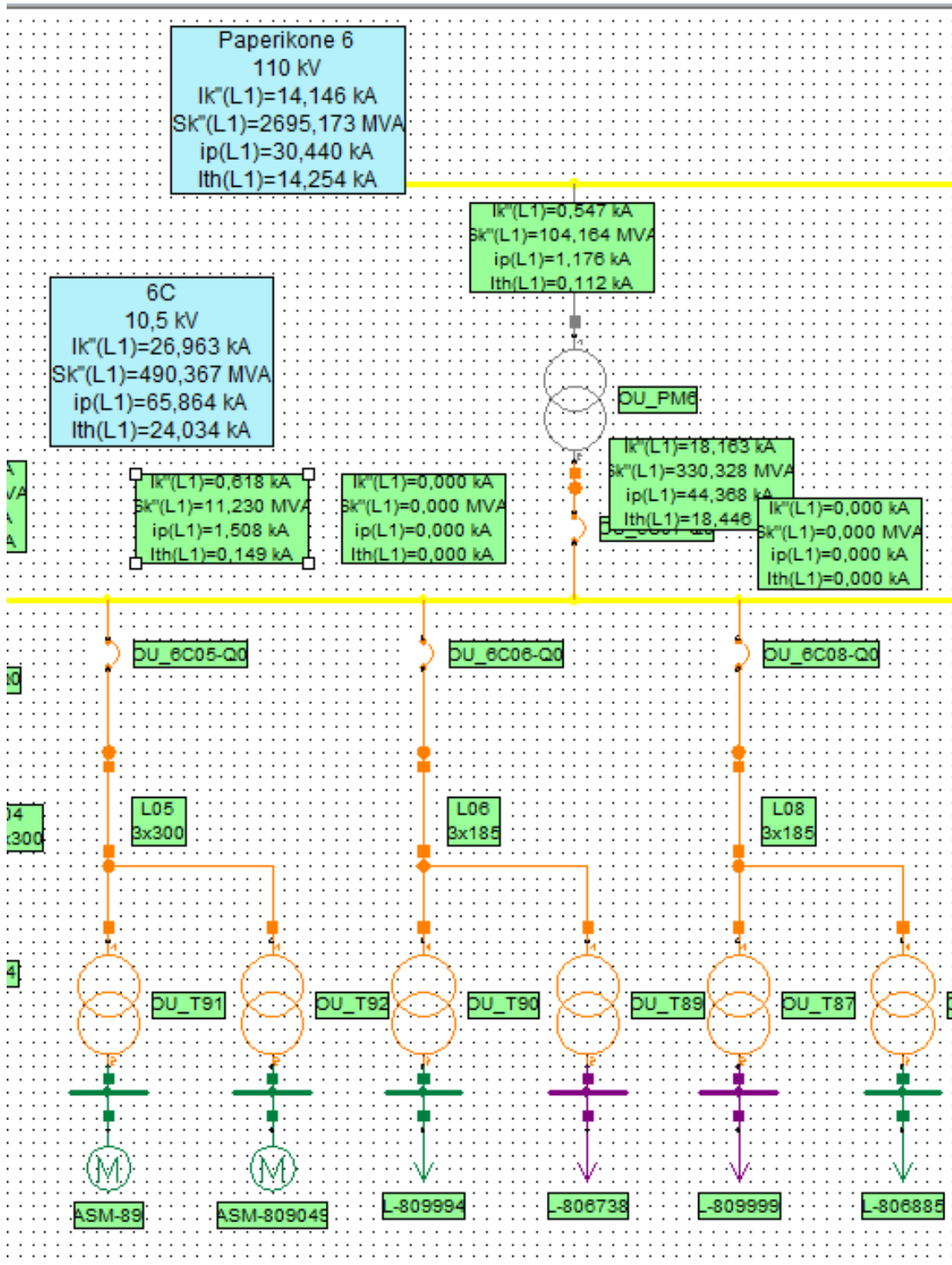
Työssä selvisi oikosulku- ja maasulkuvirrat kyseisessä kojeistossa eri kytkentätilanteissa sekä oikosulkuvirrat 10 kV:n kojeiston pienjännitekeskuksissa. Tulosten luotettavuuden takaamiseksi oikosulkuvirtoja laskettiin joistain verkon osista käsin. Käsin lasketut oikosulkuvirrat olivat hyvin lähellä ohjelman laskemia, joten ne voitiin todeta luotettaviksi. Tulokset eivät ole täysin todenmukaisia, koska verkosta mallinnettiin tässä työssä vain osa paperitehtaan verkosta. Tarkoituksena on myöhemmin mallintaa PK6:n toinen 10 kV:n kojeisto sekä PK7:n kojeistot. Tulevaisuudessa mallinnusta jatkettaessa verkko ja vikavirtalaskut tarkentuvat. Mallinnuksesta saatiin hyvä mallipohja lopun verkon mallinnusta varten. Lisäksi opinnäytetyössä tehtiin Eforan projekti-insinööreille ohje Neplan-ohjelman käyttöön ja sähköverkon muutosten tekemiseen.

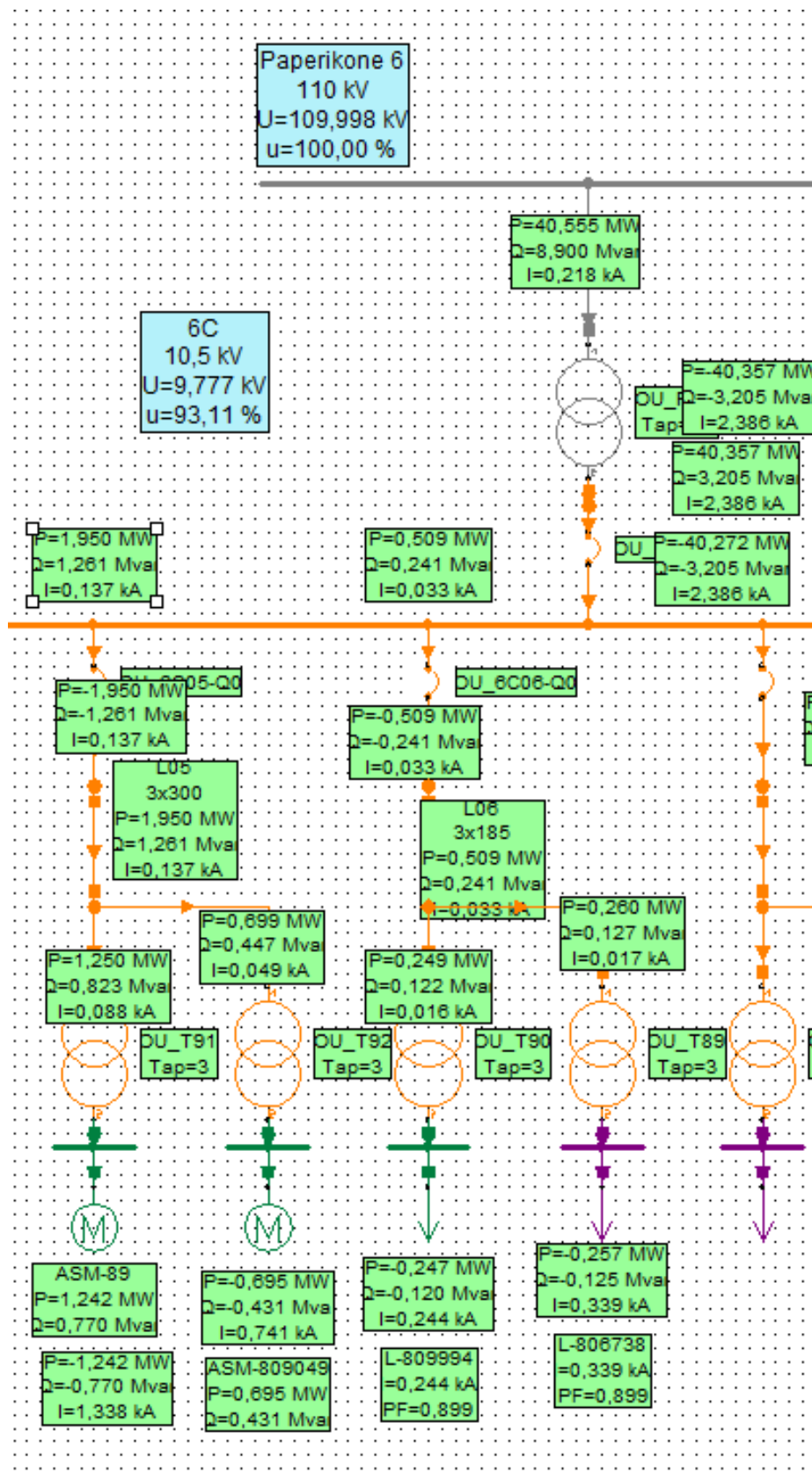
Muutokset verkkoon täytyy jatkossakin lisätä myös Neplan-tiedostoon, jotta verkon suojaus ja turvallisuus pysyvät ajan tasalla. Neplan on toimiva ohjelmisto vikavirtojen tarkasteluun, mutta se on käytössä mallinnusvaiheen jälkeen harvoin, joten osaamistason ylläpitäminen voi tuoda haasteita.

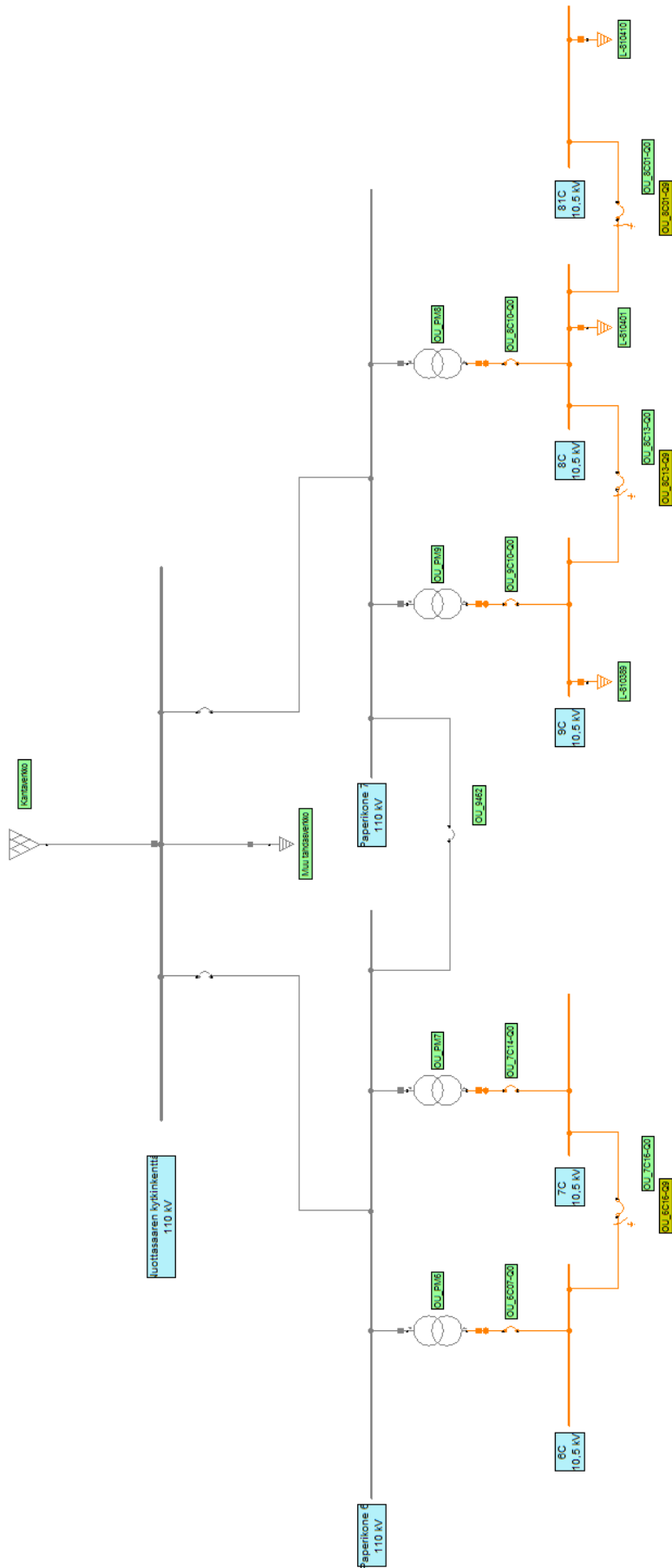
LÄHTEET

1. Huotari, Kari – Partanen, Jarmo 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto. Saatavissa: http://www.uotila.cc/images/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf . Hakupäivä 20.3.2017.
2. Elovaara, Jarmo – Laiho, Yrjö 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.
3. Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot I Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto.
4. Oikosulkukysymykset. 1973. Julkaisu 36–73. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus.
5. Korpinen, Leena. Vikatilanteet. Saatavissa : <http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/vikatilanteet.pdf> . Hakupäivä 26.1.2017.
6. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: 7 Oikosulkusuojaus. 2007. ABB Oy.
7. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: 8 Maasulkusuojaus. 2007. ABB Oy.
8. Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot II Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.
9. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07: 9 Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. 2007. ABB Oy.
10. Tervetuloa Stora Ensoon. 2017. Stora Enso. Saatavissa: <http://www.storaenso.com/lang/finland/about/Pages/default.aspx> . Hakupäivä 31.1.2017.
11. Tietoa Meistä. 2017. Efora. Saatavissa: <http://www.efora.fi> . Hakupäivä 6.2.2017.

12. Capacities by Mill in 2016. 2016. Stora Enso. Saatavissa:
http://assets.storaenso.com/se/com/DownloadCenterDocuments/Capacities_by_mill_2016.pdf . Hakupäivä 31.1.2017.
13. MicroSCADA Pro. 2017. ABB. Saatavissa:
<http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/c125739a0067cb49c12570d6002914ea.aspx> . Hakupäivä 8.3.2017.
14. PK6-linjan 10 kV:n kondensaattorit ja kuristimet. 1991. Efora. Julkaisematon suunnitteludokumentti.
15. Neplan Electricity. 2017. Neplan. Saatavissa:
<http://www.neplan.ch/neplanproduct/en-electricity/> . Hakupäivä 16.2.2017.
16. Neplan V552. Versio 5.5.2.







TILANNE I	max					min			
VIKAPAIKKA	I_k'' [kA]	i_s [kA]	I_{th} [kA]	$S_{K''}$ [MVA]	3^*I_b [A]	I_k'' [kA]	i_s [kA]	$S_{K''}$ [MVA]	3^*I_b [A]
PK 6	14,146	30,44	14,254	2695,173	2507,5	9,95	20,642	1895,654	1827,683
6C	26,963	65,864	24,034	490,367	32,006	16,077	41,494	292,392	25,583
7C	18,244	47,737	18,798	331,797	-	16,077	41,494	292,392	-
5. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
7. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
11. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
13. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
T91 & T92	0,618	1,508	0,149	11,23	2,037	-	-	-	1,853
T90 & T89	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T87 & T88	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T62 & T63	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T64 & T65	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T66 & T67	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
M/K-JAUHIN	0,434	1,061	0,104	7,901	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 1	0,494	1,206	0,119	8,98	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 2	0,643	1,571	0,155	11,694	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 1	0,443	1,082	0,106	8,057	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 2	0,434	1,061	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T55 & T56	1,114	2,722	0,269	20,267	1,358	-	-	-	1,235
T57 & T58	0,667	1,629	0,161	12,128	1,358	-	-	-	1,235
T59 & T60	1,294	3,162	0,312	23,541	1,358	-	-	-	1,235
T95	-	-	-	-	1,075	-	-	-	0,978
T51	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T97	0,132	0,321	0,032	2,393	1,613	-	-	-	1,467
T96	0,844	2,061	0,204	15,345	1,075	-	-	-	0,978
H/LKYJAUHIN	0,434	1,061	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T155 & T156	0,916	2,238	0,221	16,661	1,358	-	-	-	1,235
T157 & T158	-	-	-	-	0,543	-	-	-	0,494
EUCAJAUHIN	0,505	1,235	0,121	9,191	1,505	-	-	-	1,369

TILANNE II	max					min			
VIKAPAIKKA	I_k'' [kA]	i_s [kA]	I_{th} [kA]	$S_{K''}$ [MVA]	3^*I_b [A]	I_k'' [kA]	i_s [kA]	$S_{K''}$ [MVA]	3^*I_b [A]
PK 6	14,243	30,615	14,351	2713,596	2513,219	9,95	20,642	1895,654	1832,042
6C	41,373	101,519	38,6	752,44	28,124	28,231	70,559	513,417	25,571
7C	41,359	101,356	38,583	752,17	28,124	28,231	70,559	513,417	25,571
5. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
7. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
11. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
13. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
T91 & T92	0,618	1,515	0,15	11,23	2,037	-	-	-	1,852
T90 & T89	-	-	-	-	1,612	-	-	-	1,466
T87 & T88	-	-	-	-	1,612	-	-	-	1,466
T62 & T63	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T64 & T65	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T66 & T67	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
M/K-JAUHIN	0,434	1,066	0,106	7,901	1,505	-	-	-	1,368
K-JAUHIN 1	0,494	1,212	0,12	8,98	1,505	-	-	-	1,368
K-JAUHIN 2	0,643	1,578	0,157	11,694	1,505	-	-	-	1,368
M-JAUHIN 1	0,443	1,087	0,108	8,057	1,505	-	-	-	1,368
M-JAUHIN 2	0,434	1,065	0,106	7,897	1,505	-	-	-	1,368
T55 & T56	1,114	2,734	0,271	20,267	1,358	-	-	-	1,234
T57 & T58	0,667	1,636	0,162	12,128	1,358	-	-	-	1,234
T59 & T60	1,294	3,176	0,315	23,541	1,358	-	-	-	1,234
T95	-	-	-	-	1,075	-	-	-	0,977
T51	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T97	0,132	0,323	0,032	2,393	1,612	-	-	-	1,466
T96	0,844	2,07	0,205	15,345	1,075	-	-	-	0,977
H/LKYJAUHIN	0,434	1,065	0,106	7,897	1,505	-	-	-	1,368
T155 & T156	0,916	2,248	0,223	16,661	1,358	-	-	-	1,234
T157 & T158	-	-	-	-	0,543	-	-	-	0,493
EUCAJAUHIN	0,505	1,24	0,123	9,191	1,505	-	-	-	1,368

TILANNE III	max			Maasulku		min			Maasulku
VIKAPAIKKA	I_k'' [kA]	i_s [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	$3 \cdot I_b$ [A]	I_k'' [kA]	i_s [kA]	S_k'' [MVA]	$3 \cdot I_b$ [A]
PK 6	14,146	30,438	14,254	2695,156	2507,479	9,95	20,642	1895,654	1832,042
6C	26,964	65,697	24,025	490,378	28,134	16,075	41,342	292,34	25,571
7C	26,958	65,833	24,03	490,28	28,134	16,077	41,494	292,392	25,571
5. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
7. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
11. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
13. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
T91 & T92	0,618	1,505	0,148	11,23	2,037	-	-	-	1,853
T90 & T89	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T87 & T88	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T62 & T63	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T64 & T65	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T66 & T67	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
MK-JAUHIN	0,434	1,058	0,104	7,901	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 1	0,494	1,203	0,118	8,98	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 2	0,643	1,567	0,154	11,694	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 1	0,443	1,079	0,106	8,057	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 2	0,434	1,058	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T55 & T56	1,114	2,715	0,267	20,267	1,358	-	-	-	1,235
T57 & T58	0,667	1,625	0,16	12,128	1,358	-	-	-	1,235
T59 & T60	1,294	3,154	0,311	23,541	1,358	-	-	-	1,235
T95	-	-	-	-	1,075	-	-	-	0,978
T51	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T97	0,132	0,321	0,032	2,393	1,613	-	-	-	1,467
T96	0,844	2,056	0,203	15,345	1,075	-	-	-	0,978
HYLKYJAUHIN	0,434	1,058	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T155 & T156	0,916	2,232	0,22	16,661	1,358	-	-	-	1,235
T157 & T158	-	-	-	-	0,543	-	-	-	0,494
EUCAJAUHIN	0,505	1,231	0,121	9,191	1,505	-	-	-	1,369

TILANNE IV	max			Maasulku		min			Maasulku
VIKAPAIKKA	I_k'' [kA]	i_s [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	$3 \cdot I_b$ [A]	I_k'' [kA]	i_s [kA]	S_k'' [MVA]	$3 \cdot I_b$ [A]
PK 6	14,146	30,44	14,254	2695,173	2507,479	9,95	20,642	1895,654	1827,683
6C	26,963	65,864	24,034	490,367	28,131	16,077	41,494	292,392	25,583
7C	26,949	65,517	24,008	490,115	28,131	16,075	41,342	292,34	25,583
5. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
7. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
11. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
13. YLIAALTO	-	-	-	-	0,217	-	-	-	0,197
T91 & T92	0,618	1,508	0,149	11,23	2,037	-	-	-	1,853
T90 & T89	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T87 & T88	-	-	-	-	1,613	-	-	-	1,467
T62 & T63	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T64 & T65	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T66 & T67	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
MK-JAUHIN	0,434	1,061	0,104	7,901	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 1	0,494	1,206	0,119	8,98	1,505	-	-	-	1,369
K-JAUHIN 2	0,643	1,571	0,155	11,694	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 1	0,443	1,082	0,106	8,057	1,505	-	-	-	1,369
M-JAUHIN 2	0,434	1,061	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T55 & T56	1,114	2,722	0,269	20,267	1,358	-	-	-	1,235
T57 & T58	0,667	1,629	0,161	12,128	1,358	-	-	-	1,235
T59 & T60	1,294	3,162	0,312	23,541	1,358	-	-	-	1,235
T95	-	-	-	-	1,075	-	-	-	0,978
T51	-	-	-	-	0,43	-	-	-	0,391
T97	0,132	0,321	0,032	2,393	1,613	-	-	-	1,467
T96	0,844	2,061	0,204	15,345	1,075	-	-	-	0,978
HYLKYJAUHIN	0,434	1,061	0,104	7,897	1,505	-	-	-	1,369
T155 & T156	0,916	2,238	0,221	16,661	1,358	-	-	-	1,235
T157 & T158	-	-	-	-	0,543	-	-	-	0,494
EUCAJAUHIN	0,505	1,235	0,121	9,191	1,505	-	-	-	1,369

KESKUKSET	max				min			
	I_k'' [kA]	I_s [kA]	I_{th} [kA]	S_K'' [MVA]	I_k'' [kA]	I_s [kA]	I_{th} [kA]	S_K'' [MVA]
VIKAPAikka								
91G	43,586	103,894	44,16	52,091	32,146	79,611	32,703	38,418
92G	42,536	102,829	43,151	50,835	32,026	79,351	32,583	38,274
90G	41,374	96,56	41,852	49,447	33,889	79,603	34,296	40,501
89H	44,079	107,459	44,756	38,174	36,423	89,142	36,999	31,543
87H	43,753	106,775	44,43	37,891	36,165	88,597	36,741	31,32
88G	35,217	85,426	35,739	42,089	28,971	70,59	29,414	34,623
62H	43,999	107,711	44,696	38,104	36,365	89,545	36,967	31,493
63H	43,739	107,161	44,435	37,879	36,159	89,105	36,761	31,315
64H	43,999	107,711	44,696	38,104	36,365	89,545	36,967	31,493
65H	44,529	108,829	45,226	38,564	36,785	90,44	37,387	31,857
66H	44,395	108,336	45,082	38,447	36,679	90,045	37,272	31,765
67H	44,462	108,476	45,148	38,505	36,732	90,157	37,325	31,811
MÄNTY/KOIJU	25,408	59,244	22,666	462,077	15,438	37,574	15,672	280,763
KOIJU1	25,415	59,272	22,67	462,204	15,438	37,574	15,672	280,763
KOIJU2	25,432	59,342	22,682	462,523	15,438	37,574	15,672	280,763
MÄNTY1	25,409	59,248	22,666	462,095	15,438	37,574	15,672	280,763
MÄNTY2	25,408	59,244	22,666	462,076	15,438	37,574	15,672	280,763
55G	48,949	114,964	44,916	58,499	31,787	78,98	32,353	37,99
56G	48,685	114,259	44,882	58,184	32,145	79,493	32,696	38,417
57G	43,806	105,374	44,418	52,353	32,105	79,67	32,671	38,37
58G	45,077	107,762	45,681	53,872	32,065	79,583	32,631	38,322
59G	49,241	115,49	45,071	58,849	31,709	78,81	32,275	37,896
60G	52,469	121,682	47,273	62,707	32,105	79,67	32,671	38,37
95K	48,11	115,386	48,769	33,332	40,12	96,637	40,685	27,796
51K	48,341	116,483	49,024	33,492	40,308	97,624	40,898	27,926
97K	52,816	124,967	53,479	36,592	41,052	98,872	41,631	28,442
96G	56,122	128,324	49,444	67,072	32,013	79,282	32,567	38,259
HYLKY1	25,408	59,244	22,666	462,076	15,438	37,574	15,672	280,763
155G	40,58	97,044	41,125	48,498	30,291	74,425	30,784	36,201
156G	49,691	114,116	44,628	59,387	30,166	74,132	30,657	36,051
157G	35,917	88,098	36,494	42,925	29,658	73,2	30,158	35,445
158G	35,62	86,933	36,171	42,57	29,424	72,267	29,902	35,166
EUCA	25,416	59,278	22,671	462,228	15,438	37,574	15,672	280,763