

Teollisuuslaitoksen sähköverkon oikosulkulaskelmat

Heikki Roivainen

Teollisuuden ja luonnonvarojen osaamisalan opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

ALKUSANAT

Haluan kiittää sähkökunnossapitoinsinööri Esa Saarasta (Ruukki Metals Oy) opinnäyte-työni aiheesta sekä saamastani palautteesta ja ohjauksesta työni aikana. Kiitokset kuulu-
vat myös diplomi-insinööri Jaakko Etolle (Lapin ammattikorkeakoulu) työni ohjaukses-
ta.

Kemissä 3.5.2014

Heikki Roivainen

TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Teollisuuden ja luonnonvarojen osaamisala

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyön tekijä(t):	Heikki Roivainen
Opinnäytetyön nimi:	Teollisuuslaitoksen sähköverkon oikosulkulaskelmat
Sivuja (joista liitesivuja):	67 (19)
Päiväys:	22.4.2014
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	DI Jaakko Etto Ins. Esa Saaranen
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Ruukki Metals Oy:n Pulkkilan putkitehtaalle ja sen tavoitteena oli selvittää tehdaslaitoksen sähköverkon nykytilanne mitoituksen ja suojauksen suhteen. Tavoitteen saavuttamiseksi laskettiin tehtaan kuuden pääkeskuksen oikosulkuvirrat ja pääkeskuslähtöjen jännitteenalenemat.</p> <p>Vikavirtojen tunteminen verkon eri osissa on tärkeää niin tuotannon, verkon komponenttien mitoittamisen kuin henkilöturvallisuudenkin kannalta. Lisäksi nykyiset standardit edellyttävät, että oikosulkuvirrat tulee olla tiedossa. Opinnäytetyön teoriaosassa selostetaan oikosulkuvirtojen muodostumista ja vaikutuksia sähköverkon komponentteihin.</p> <p>Työssä käytettiin ABB Oy:n DOC2 -ohjelmistoa, jolla piirrettiin uudenlaiset pääkaaviot pääkeskuksista todellisine lähtöineen ja sähköisine arvoineen. Sähköisten arvojen perusteella ohjelmalla laskettiin keskusten kiskostojen oikosulkuvirrat ja lähtöjen jännitteenalenemat.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena syntyivät uudenlaiset sähköiset dokumentaatiot tehtaan pääkeskuksista vikavirtalaskentoinen. Kohdeyrityksen sähköverkon mitoitus ja suojaus tarkasteltiin laskentatulosten perusteella ja jatkossa on paremmat lähtökohdat suunnitella sähköverkon tulevia muutoksia. Vikavirrat olivat odotettua suuruusluokkaa eikä niissä ja niiden perusteella tehdyissä verkostotarkasteluissa ilmennyt mitään ennalta odottamatonta. Opinnäytetyössä saavutettiin sille asetetut tavoitteet ja se valmistui aikataulussa.</p>	
Asiasanat: oikosulkuvirta, jännitteenalenema, teollisuusverkko	

ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Industry and Natural Resources

Degree programme:	Electrical Engineering
Author(s):	Heikki Roivainen
Thesis title:	Short-Circuit Calculations of Industrial Plant
Pages (of which appendixes):	67 (19)
Date:	29 April 2014
Thesis instructor(s):	Jaakko Etto, MSc Esa Saaranen, B.Eng
<p>This bachelor thesis was made for Ruukki Metals Oy Pulkkila tube mill and its aim was to determine the present situation of an industrial plant's electricity grid ratings and protection. To achieve this objective, short-circuit currents of the six main distribution boards and the voltage reductions of its output in the plant were calculated.</p> <p>Knowing the fault currents in the different parts of the network is important for the production, scaling of the network components as well as personnel safety point of view. In addition, present standards require that the short-circuit currents are necessary to know. Theoretical section of the thesis explains the formation of short-circuit currents and the effects of grid components.</p> <p>In the thesis, by using ABB DOC2-software and a new type of main diagrams including the genuine switchboard outputs and its electrical values were drawn. Based on the electrical values the software calculated the switchboards busbars' short-circuit currents and output voltage reductions.</p> <p>New types of electrical documents of the plant's main distribution board with fault current calculation were resulted in this thesis work. The target company's power grid measuring and protection were examined using the calculations results and thus there will be a better position to plan for future changes in the electricity grid. Fault currents were approximately as expected and according to the network analysis studies nothing unexpected was found. This thesis work achieved its objectives and was completed due schedule.</p>	
Asiasanat: short-circuit current, voltage reduction, industry grid	

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	10
2 TEOLLISUUSSÄHKÖVERKKO	11
2.1 Sähkötekniset ominaisuudet	11
2.1.1 Oikosulkuvirrat.....	13
2.1.2 Jännitteenalene mat	14
2.2 Vikojen syytä	14
3 RUUKKI METALS OY PULKKILAN TEHDAS.....	16
3.1 Yleistä.....	16
3.2 Tehtaan sähköverkko.....	17
4 OIKOSULKUVIRTOJEN TEORIAA.....	21
5 SÄHKÖTEKNINEN LASKENTA	24
5.1 Oikosulkuvirtojen laskenta.....	24
5.1.1 Kolmivaiheinen oikosulkuvirta	24
5.1.2 Kaksivaiheinen oikosulkuvirta	25
5.1.3 Yksivaiheinen oikosulkuvirta.....	26
5.1.4 Alkuoikosulkuvirta	27
5.1.5 Terminen oikosulkuvirta	28
5.1.6 Sysäysoikosulkuvirta.....	30
5.1.7 Jatkuvan tilan oikosulkuvirta	31
5.2 Oikosulkupiirin komponenttien impedanssit	31
5.2.1 Syöttävä verkko	31
5.2.2 Muuntajat	33
5.2.3 Epätahtimoottorit.....	34
5.2.4 Kaapelit, johdot ja kiskot	35
5.2.5 Muu verkon kuormitus	36
5.2.6 Vikaimpedanssit.....	36
5.3 Jännitteenalene ma	37

6	YLIVIRTASUOJAUS	38
6.1	Oikosulkusuojaus	38
6.2	Ylikuormitussuojaus.....	38
6.3	Yhdistetty oikosulku- ja ylikuormitussuojaus.....	40
7	YLIVIRTALASKELMAT	41
7.1	Oikosulkuvirrat.....	41
7.2	Jännitteenalennemat	43
8	POHDINTA	47
	LÄHTEET	48
	LIITTEET.....	49

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Muuttujat

c	jännitekerroin
C_i	asennusolosuhteet huomioiva korjauskerroin
E_{ekv}	ekvivalenttinen jännitelähde
f	taajuus
I	virta
I_B	virtapiirin suunnitteluvirta
i_k	oikosulkuvirran hetkellisarvo
I_k	jatkuvan tilan oikosulkuvirta
I_k'	muutosoikosulkuvirta
I_k''	alkuoikosulkuvirta
I_{kmax}''	suurin alkuoikosulkuvirta
I_{kmin}''	pienin alkuoikosulkuvirta
$I_{k3v,sv}''$	syöttävän verkon kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta
I_{k1v}	yksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k2v}	kaksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k3v}	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_n	nimellisvirta
$I_{n,M}$	moottorin nimellisvirta
i_s	sysäysoikosulkuvirta
I_S	moottorin käynnistysvirta
I_{th}	terminen oikosulkuvirta
I_Z	johtimen jatkuva kuormitettavuusvirta
I_{1s}	terminen oikosulkuvirtakestoisuus
I_{1N}	muuntajan ensiövirta
I_2	virta, jolla suojalaite toimii tehokkaasti
I_{2N}	muuntajan toisiovirta
l	pituus
L	induktanssi
L_k	oikosulkupiirin induktanssi
m	tasavirtatekijä
n	vaihtovirtatekijä
P_{kn}	kokonaispäätötehohäviöt nimellisvirralla

P_0	muuntajan tyhjäkäyntihäviöteho
r	tasavirtaresistanssi pituusyksikköä kohti
R	resistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi
$R_{M,r}$	moottoriryhmän resistanssi
R_{sv}	syöttävän verkon resistanssi
R_l	myötäreistanssi
$S_{k,sv}$	syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho
S_n	nimellinäennäisteho
t	aika
t_k	oikosulun kesto aika
\hat{u}	jännitteen huippuarvo
U_h	jännitteenalenema
u_k	suhteellinen oikosulkujännite
U_n	nimellisjännite
$U_{n,M}$	moottorin nimellisjännite
$U_{n,sv}$	syöttävän verkon nimellisjännite
u_r	suhteellinen oikosulkuresistanssi
U_{1N}	muuntajan ensiojännite
U_{2N}	muuntajan toisiojännite
x	reaktanssi pituusyksikköä kohden
X	reaktanssi
X_k	oikosulkureaktanssi
$X_{M,r}$	moottoriryhmän reaktanssi
X_{sv}	syöttävän verkon reaktanssi
X_l	oikosulkupiirin myötäreaktanssi
Z_j	johdon impedanssi
Z_k	oikosulkuimpedanssi
z_k	suhteellinen oikosulkuimpedanssi
Z_M	epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi
$Z_{M,r}$	moottoriryhmän oikosulkuimpedanssi
Z_0	nollaimpedanssi
Z_l	myötäimpedanssi
Z_2	vastaimpedanssi

Symbolit

α	jännitteen vaihekulma
κ	sysäyskerroin
τ	tasavirtakomponentin aikavakio
τ'	vaihtovirtakomponentin aikavakio
τ''	vaihtovirtakomponentin aikavakio
φ	jännitteen ja virran välinen vaihekulma
φ_k	impedanssin vaihekulma
ω	kulmataajuus

Lyhenteet

AHXAMK-W	PEX-eristeinen alumiinijohtiminen keskijännitekaapeli
aM	moottoripiirin suojasulake, jonka katkaisukyky käsittää virran tietyn osa-alueen
APYAKMM	paperieristeinen alumiinijohtiminen keskijännitekaapeli
Dyn	muuntajan kytkentäryhmä
gG	yleiskäyttöinen sulaketyyppi johdon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukseen
MCMK	kuparijohtiminen PVC-eristeinen voimakaapeli
ONAN	luonnollisella öljyn- ja ilmankierrolla tapahtuva jäähdytys
PEN	yhdistetty suoja- ja nollajohdin
PEX	ristisilloitettu polyeteeni
PVC	polyvinyylidloridi
SFS	Suomen Standardoimisliitto SFS ry
SPK	sähköpääkeskus
Yyn	muuntajan kytkentäryhmä

1 JOHDANTO

Teollisuuslaitoksen sähköverkon tilan tunteminen on tärkeää niin tuotannon käyttövarmuuden, henkilöstön kuin laitteistonkin turvallisuuden kannalta. Sähköverkossa voi olla tarkasteltavaa esimerkiksi mitoituksen, suojauksen tai turvallisuuden suhteen. Verkon kunnan selvitys on tärkeässä asemassa suunniteltaessa mahdollista tuotannon lisäämistä ja siitä aiheutuvia muutoksia sähköverkkoon.

Vikavirtojen tunteminen eri verkon osissa on toimivan suojauksen toteuttamisen perusedellytys. Suorittamalla sähkötekniset laskelmat sähköverkon tärkeimmille osille, voidaan sen toimintaa oikeanlaisilla suojausasetteilla parantaa. Lisäksi nykyiset määräykset edellyttävät, että vikavirtojen suuruus tulee olla tiedossa. Mahdollisten epäkohtien korjaaminen parantaa sähköverkon sen osan luotettavuutta ja mahdollistaa verkon tarjoamien resurssien hyödyntämisen suunnitellessa esimerkiksi tuotannon laajentamista.

Tämä opinnäytetyö on tehty Ruukki Metals Oy:n Pulkkilan putkitehtaan sähkökunnossapitoon. Tehdas on osa Rautaruukki-konsernia ja siellä työskentelee noin 80 henkilöä. Työn tavoitteena oli selvittää tehtaan sähköpääkeskusten laskennalliset oikosulkuvirrat sekä pääkeskuslähtöjen jännitteenalenemat ja siinä käytettiin ABB Oy:n DOC2 -ohjelmistoa. Työssä oli tavoitteena tehdä myös uudenlaiset sähköiset dokumentaatiot tehtaan pääkeskuksista lähtöineen.

Oikosulkuvirtalaskelmien perusteella verkon komponenttien oikosulkukestoisuudesta nykytilassa voidaan varmistua. Samoin uudet komponentit pystytään mitoittamaan niin, että niiden oikosulkukestoisuus on riittävä ja oikosulkusuojaus on toimiva. Jännitteenalenemalaskennalla varmistetaan verkon jännitteen pysyminen laitteistolle ja henkilöstölle turvallisissa rajoissa.

Työ rajattiin käsittämään vain tehtaan pääkeskuksia, joita on kuusi kappaletta ja jota jokaista syöttää oma muuntaja. Tehtävän opinnäytetyön pohjalta laitoksen henkilöstöllä on mahdollisuus jatkaa sähköverkon vikavirtojen selvitystä myös alakeskustasolle.

2 TEOLLISUUSSÄHKÖVERKKO

Sähköverkon perusrakenne on verkonsuunnittelun yksi reunaehto. Pienteollisuuden sähköverkko on yleensä rakennettu säteittäiseksi, ja se koostuu liittynästä paikallisen sähköverkkoyhtiön pien- tai keskijännitejakeluverkkoon ja jännitejakelusta oman laitoksen kulutuskohteille. Jakeluverkon liittytäpisteitä voi olla yksi tai useampia riippuen muun muassa laitoksen liittymätehosta. Yksinkertaisin tapa on liittytä pienjännitejakeluverkkoon mutta suuremmilla tehontarpeilla liittytä on toteutettu keskijänniteverkkoon jakelumuuntamon tai -muuntamoiden välityksellä. Jakelumuuntamolta sähköverkko jakautuu säteittäisenä pienjännitetason pääkeskuksille ja niiltä edelleen alakeskuksille ja kulutuskohteille. (Welling 2010, 12.)

Olellisina osina liittytäpisteissä ovat myös mittausjärjestelmät sähköenergian kulutusseurantaa varten, sekä katkaisijat ja erottimet teollisuuden sähköverkon erottamiseksi jakeluverkosta. Verkkoon on mahdollisesti rakennettu myös varasyöttöyhteyksiä, joilla saavutetaan osin silmukoidun verkon etuja huolto- ja häiriötilanteissa. Normaalikäytön aikana varasyöttöyhteydet ovat luonnollisesti auki. Verkon perusrakennetta voidaan tästä huolimatta pitää säteittäisenä. (Welling 2010, 12.)

Silmukoituun verkkoon verrattuna säteittäisen verkon etuja ovat yksinkertaisempi verkon käyttö ja suojausten toteutus. Lisäksi se on helpompi ja taloudellisempi toteuttaa kuin silmukoitu verkko. Häiriöt ja viat säteittäisen verkon tietyssä pisteessä eivät myöskään leviä muualle esimerkiksi toisen jakelumuuntajan syöttämään verkkoon. (Welling 2010, 12.)

Pienjänniteteollisuusverkot ovat yleensä jäykästi maadoitettuja. Mikäli liittytä jakeluverkkoon on toteutettu Dyn- tai Yyn-kytkentäryhmän muuntajan välityksellä, on muuntajan alajännitepuolen tähtipiste maadoitettu. (Huotari & Partanen 1998, 13.)

2.1 Sähkötekniset ominaisuudet

Teollisuuden sähkönjakeluverkot ovat laajuudeltaan pieniä, mutta niissä siirrettävät tehot ovat suuria. Selvästi suurin osa sähköenergiasta käytetään sähkömoottoreiden pyörittämiseen, joten sähkökäyttöjen nimellistehot ja lukumäärät vaikuttavat ratkaisevasti

teollisuuslaitoksen sähköjaketuverkon rakenteeseen ja nimellisjännitteiden valintaan. Moottorikäyttöjen lisäksi teollisuusprosesseihin tarvitaan valaistusta, lämmitystä ja automaatiota varten yleensä 400 V:n pienjännitteinen sähköjaku. (Etto 1998, 3.)

Raskaassa prosessiteollisuudessa liityntä kantaverkkoon tapahtuu tyypillisesti 110 kV:n jännitteellä, pienten laitosten liityntä on sähkölaitoksesta riippuen 10 tai 20 kV. Laitoksen rakentamisajankohdasta ja suurimpien moottoreiden yksikkötehosta riippuen jännitteen jakeluun käytetään 20, 10 tai 6 kV:n jännitettä. 20 kV:n jännite sopii laitoksen keskijännitejakeluun ja se sopii sellaisenaan laitoksen varayhteydeksi paikalliseen sähkölaitokseen. (Etto 1998, 3.)

Moottorijännitteinä ovat laajasti käytössä 10 kV:n ja 6 kV:n jännitteet muutamasta sadasta kW:sta aina yli 10 MW:n moottoritehoihin. Generaattorijännitteinä käytetään yleensä 6 - 10 kV, mikä on suuritehoisten moottoreiden lisäksi vaikuttanut teollisuuslaitoksien jännitevalintoihin. Edellä mainittujen jännitteiden lisäksi moottorijännitteinä käytetään 3 kV, 690 V, 525 V ja 400/230 V. Prosessiteollisuudessa moottorikeskusten jännitteinä käytetään nykyisin 690 V sekä yleisesti pienemmissä laitoksissa ja pienillä moottoritehoilla 400/230 V jännitettä. Tasa- ja vaihtovirtakäytöissä jännite valitaan laitos- ja tapauskohtaisesti ja jakelu- ja moottorijännitteiden valinta onkin tärkeä teknistäbudellinen optimointitehtävä. (Etto 1998, 3.)

Samassa teollisuuslaitoksessa verkon komponentit voivat olla hyvin eri-ikäisiä ja edelleen on käytössä jopa 1950-luvulla rakennettuja kojeistoja. Kuitenkin useimmat kojeistojen lähdoistä on uusittu tämän jälkeen ja osa useaan kertaan. Tavallisesti modernisoinneissa uusitaan releistys, virtamuuntajat, mittaukset ja ohjaukset sekä kaapelointi. Laitosten sähköverkon modernisointi tapahtuu yleensä laitososittain. (Etto 1998, 3.)

Teollisuuden sähköjaketuverkko rajoittuu yleensä suhteellisen pienelle alueelle, jolloin etäisyydet ja kaapelyhteydet jäävät lyhyiksi. Tämän takia verkon oikosulkuvirrat ovat lähestulkoon samansuuruisia joka puolella verkkoa ja tämä aiheuttaakin omat haasteensa vikatilanteiden hallintaan. Tärkeässä osassa onkin vikavirtojen tunteminen sähköverkon eri osissa, jolloin suojaus pystytään mitoittamaan toimivaksi kokonaisuudeksi. Seuraavaksi käydään läpi teollisuuden sähköjaketuverkon ominaisuuksia oikosulkuvirtojen ja jännitteenalennemien osalta. (Welling 2010, 13.)

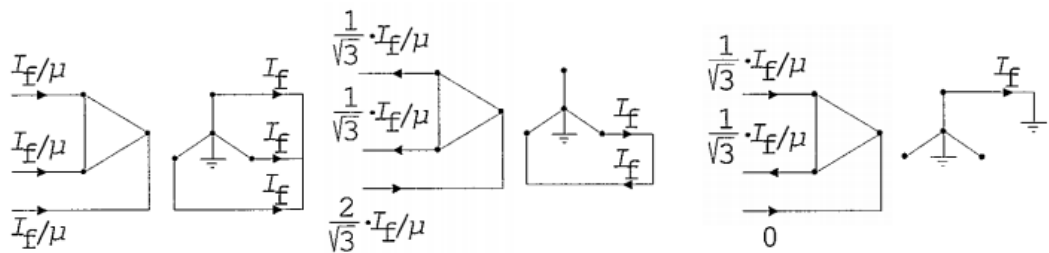
2.1.1 Oikosulkuvirrat

Sähköverkon luotettavan suojauksen ja toimivan rakenteen suunnittelun vuoksi oikosulkuvirtojen määrittäminen on keskeisessä osassa. Oikosulkuvirrat voidaan määrittää verkon eri pisteissä joko laskemalla tai mittaamalla. Määritettäessä virtoja tulee selvittää suurin ja pienin mahdollinen vikapaikassa tapahtuva oikosulkuvirta. Verkon eri komponenttien täytyy kestää suurimman oikosulkuvirran niille aiheuttamat dynaamiset ja termiset rasitukset, mutta toisaalta suojauksen tulee toimia myös pienimpien oikosulkuvirtojen kohdalla. Merkittävin osa vikavirrasta tulee teollisuuslaitosta syöttävästä sähköjakeluverkosta, mikäli laitoksella ei ole omaa sähköntuotantoa. Mitoituksen kannalta oikosulkuvirtojen määrittämisessä on huomioitava myös tulevaisuudessa tapahtuva kehitys. (Huotari & Partanen 1998, 1.)

Maadoitetussa sähköverkossa voi esiintyä niin kolmi-, kaksi- kuin yksivaiheisiakin oikosulkuja. Symmetrinen kolmivaiheinen oikosulku on oikosulkulaskujen perustapaus ja se on virraltaan yleensä myös suurin. Johtuen lyhyemmästä kestoajasta kaksi- ja yksivaiheiset oikosulut ovat virraltaan yleensä kolmivaiheisia pienempiä. Pienimmät oikosulkuvirrat riippuvat vikapaikan sijainnista syöttöpisteeseen nähden. Muuntajan lähellä tapahtuvissa oikosuluissa pienin vikavirta on kaksivaiheisessa oikosulussa, kun taas kauempana verkossa pienimmät virrat syntyvät yksivaiheisessa oikosulussa. Lyhyillä kaapelietäisyyksillä voi yksivaiheinen oikosulkuvirta olla kolmivaiheistakin suurempi. Lähellä generaattoria tapahtuvassa oikosulussa kaksivaiheinen oikosulkuvirta voi kuitenkin olla kolmivaiheistakin suurempi. (Huotari & Partanen 1998, 13; Welling 2010, 13.)

Teollisuudessa käytetään usein käyttövarmuussyistä myös maasta erotettuja jakeluverkkoja, jolloin oikosulkutapaukset rajoittuvat kaksi- ja kolmivaiheisiin oikosulkuihin. (Huotari, Partanen 1998, 10.)

Epäsymmetrisissä vioissa (myös tasavirtakomponentti esiintyy) ja Dyn-kytkentäisen muuntajan tapauksissa täytyy muistaa vikavirtojen muuttuminen muuntajan ensiossa. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta muuntuu suoraan muuntosuhteen mukaisesti jokaisessa vaiheessa kun taas kaksi- ja yksivaiheisissa vikatapauksissa myös ensiön vikavirrat ovat epäsymmetrisiä, mutta eri tavoin kuin toisiossa. Kuva 1 selventää edellä mainittuja tilanteita. (Huotari, Partanen 1998, 3, 14.)



Kuva 1. Dyn-kytkentäisen muuntajan oikosulkuvirrat toisiossa tapahtuvassa kaksi- ja kolmivaiheisessa oikosulussa sekä yksivaiheisessa maasulussa. I_f on vikavirta ja μ muuntosuhde (Huotari & Partanen 1998, 14.)

2.1.2 Jännitteenalennemat

Liian suuri jännitteen lasku voi aiheuttaa muun muassa laitteiden rikkoontumista ja esimerkiksi oikosulkumoottoreilla moottorin kuumentumista ja ylikuormittumista.

Yleensä jännitteenalennemat eivät koidu teollisuuslaitoksissa ongelmaksi, koska verkon kaapeliyhteydet ovat tavallisesti melko lyhyitä ja rakennusvaiheessa usein myös jonkin verran ylimitoitettuja, jolloin myös impedanssit jäävät alhaisiksi. (Welling 2010, 14.)

2.2 Vikojen syitä

Teollisuuden jakeluverkoissa tapahtuvien oikosulkujen syitä voivat olla komponenttien ja kaapeleiden vanheneminen ja yleensä siitä johtuva eristyskyvyn heikentyminen, liittosten lämpeneminen ja löystyminen sekä virhekytkentätilanteet, kuten kiinni hitsautuneen kojeen avaaminen virrallisena. Haastavista ympäristöolosuhteista johtuva oikosulku on myös mahdollinen, varsinkin ulkotiloissa sijaitsevilla laitteistoissa. Lisäksi jonkin eläimen, kuten linnun aikaan saama oikosulku on mahdollinen. (Welling 2010, 14.)

Inhimillisistä virheistä johtuvia vikatapauksia voivat olla mm. työmaadoituksen unohtaminen paikalleen huoltotöiden jälkeen tai jännitettyötä tehdessä jonkin työkalun lipeäminen jännitteeseen kojeistoon. Myös kaivutyöt teollisuusalueella voivat aiheuttaa oikosulkuja maakaapeleiden vaurioituessa.

Toimiva kunnossapitojärjestelmä on avainasemassa suojautumisessa vikoja vastaan. Sähkökeskusten komponenttien ja muuntajien säännöllinen tarkastaminen ja esimerkiksi liitosten kuvaaminen lämpökameralla ennaltaehkäisevät odottamattomia vikatapauksia. Sähkötilat, -keskukset ja kojeistot laitteineen tulee muutoinkin tarkastaa lain edellyttämien määräajoin. Tarkastukset kannattaa tehdä yhtenäisen käytännön mukaisesti ja koko sähkötila kaikkine laitteineen olisi hyvä tarkastaa samalla kertaa. Tarkastusten tehtävänä on varmistaa ja ylläpitää sähkö- ja työturvallisuutta, palosuojelua ja sähkölaitteiden käyttövarmuutta. Tarkastuksissa ajoissa havaittujen vikojen korjaus voidaan suunnitella niin, ettei mahdollisesta sähkönjakelun keskeytyksestä aiheudu tuotannolle odottamattomia pysäytyksiä tai kuluja. (Welling 2010, 14; Etto 1998, 10.)

3 RUUKKI METALS OY PULKKILAN TEHDAS

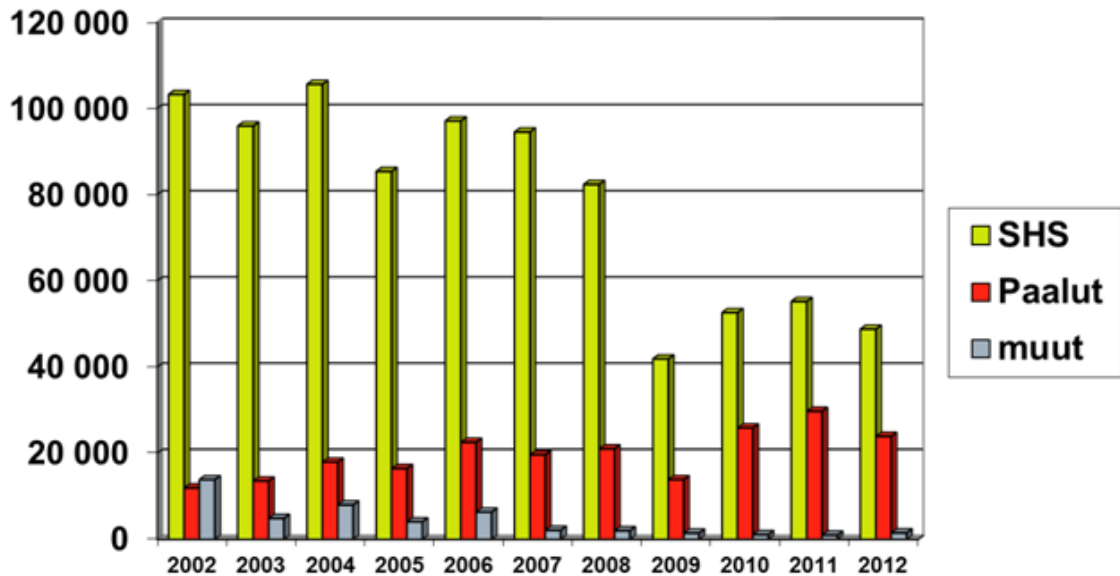
3.1 Yleistä

Pulkkilan putkitehtaalla kuumakoeajot alkoivat vuonna 1981 ja tuotanto kahdessa vuorossa käynnistyi seuraavana vuonna. Tehtaan kolme päätuotetta ovat rakenneputket, putkipaalut ja porapaalut. Rakenneputkia käytetään rakentamiseen, teollisuuteen, voimalinjoihin ja offshore-rakentamiseen. Putkipaaluja käytetään uudisrakennusten ja siltojen perustuksiin. Tehtaalla valmistettavien tuotteiden tarkemmat tiedot nähdään taulukossa 1. Tuotteiden raaka-aineena käytetään Ruukki Metals Oy Raahen terästehtaalla valmistettavia leikattuja rainoja, joita tuodaan keskimäärin 4300 kuorma-autolastillista vuodessa. Valmistuslaatuja ovat muun muassa S355J2H...S550J2H, OPTIM HS 500...700...900 ja RAEX 350...400. (Ruukki Metals Oy 2012.)

Taulukko 1. Tehtaan tuotteiden mitat, paksuudet ja maksimipituudet (Ruukki Metals Oy 2012.)

TUOTTEET	MUOTO	MITTA-ALUE [mm]	PAKSUUS [mm]	MAX. PITUUS [m]
Putkipalkit	Pyöreä	114.3...323.9	3.6...12.5	16 (24)
	Neliö	100x100...300x300	4.0...12.5	18 (24)
	Suorakaide	120x80...400x200	4.0...12.5	18 (24)
Paalut	Pyöreä	114.3...323.9	6.0...12.7	16 (24)
Virtausputket	Pyöreä	139.7...323.9	3.2...12.5	16

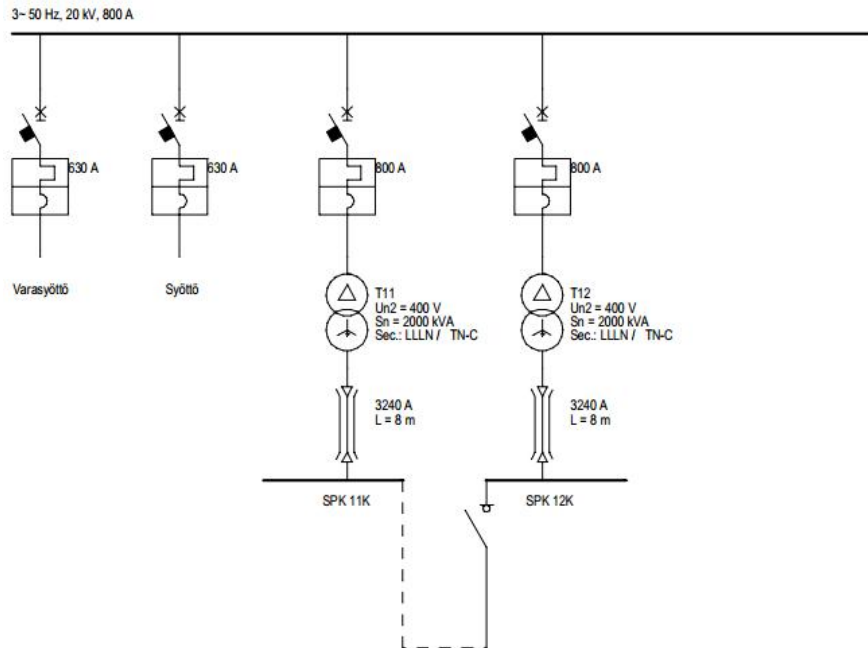
Tehdas käsittää yhden tuotantolinjan, jonka kapasiteetti on 140 000 tonnia vuodessa katkeavassa 3-vuorossa. Tällä hetkellä tuotanto on toiminut jo useamman vuoden katkeavassa 2-vuorossa. Tehtaan tuotantomäärät vuosina 2002 - 2012 näkyvät kuviossa 1.



Kuvio 1. Toteutunut tuotanto vuosina 2002–2012 (Ruukki Metals Oy 2012.)

3.2 Tehtaan sähköverkko

Pulkkilan tehtaan sähköverkko on liitetty yhdestä pisteestä Elenia Oy:n 20 kV:n jakeluverkkoon. Syöttö on toteutettu APYAKMM 3x185 -tyypin maakaapelilla. Lisäksi laitokselle on yksi varasyöttöyhteys kaapelilla AHXAMK-W 3x120. Tehtaalla on oma 20 kV:n kojeisto energiamittauksineen, josta kaikki lähdöt tehtaan omille muuntajille on toteutettu joko AHXAMK-W tai APYAKMM-tyypin keskijännitekaapeleilla. Kaikki muuntajat ovat kaksikämmimuuntajia ja ne ovat keskijännitepuoleltaan rinnankytkettyjä eli 20 kV:n verkko on rakennettu renkaaseen. Kytkentäryhmiltään muuntajat ovat joko Dyn11- tai Yyn0-tyyppisiä, eli niiden pienjännitepuolen tähtipisteet on maadoitettu. Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva osasta 20 kV:n kojeistoa ja kahdesta laitoksen muuntajalähdön toteutuksesta pienjännitepuolen varasyöttöyhteyksineen.



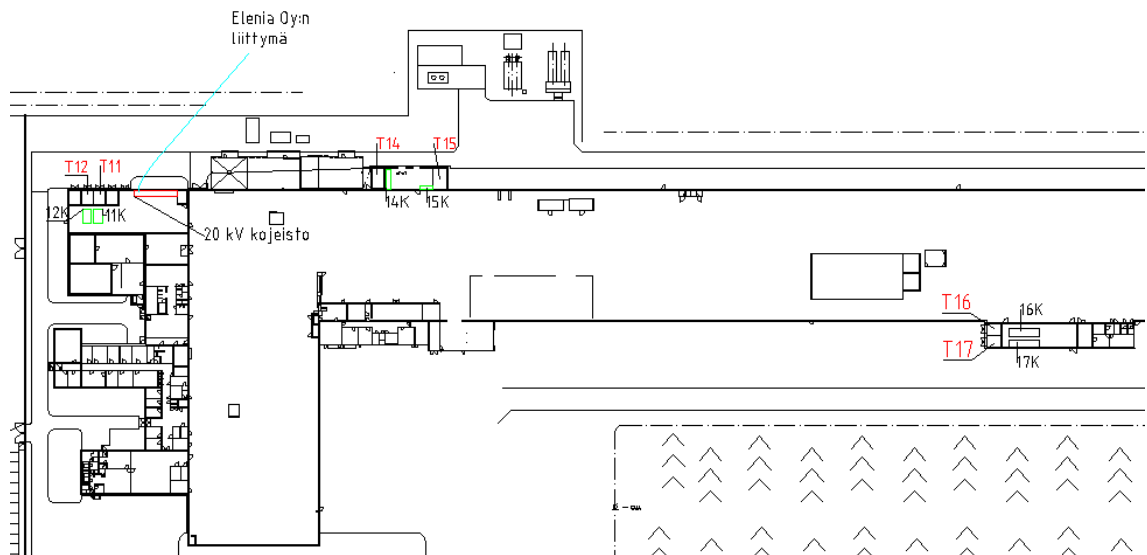
Kuva 2. Periaatekuva 20 kV:n kojeistosta

Sähkönsyöttö laitoksen sisällä on pyritty pitämään loogisena ja prosessikohtaisena: tuotantolinjan ensimmäisiä vaiheita syöttävät muuntajat T11 ja T12 sijaitsevat tuotantoprosessin alkuosan välittömässä läheisyydessä. Vastaavasti hitsausmuuntaja T14 ja normalisoinnin muuntaja T15 sijaitsevat linjan keskivaiheilla lähellä niiden syöttökohteita. Tuotantolinjan loppupäässä sijaitsevat muuntajat T16, joka syöttää loppupään sähkökäyttöjä, ja T17, joka syöttää lähinnä laitoksen valaistuskourmaa. Näin pienjännitepuolen pääkeskuslähtöjen kaapelipituudet on saatu pidettyä suhteellisen lyhyinä.

Muuntajat T11 ja T12 sijaitsevat lähekkäin viereisissä tiloissa ja ne ovat sähköisiltä arvoiltaan lähes identtiset. Molemmat ovat nimellistehoaltaan 2000 kVA ja jännitteeltään 400 V ja ne on valmistettu vuonna 1980. Muuntajilta lähtee 8 metriä pitkä alumiininen kiskosilta pääkeskuksille. Normaalitilassa toinen muuntajista on varalla ja käy tyhjäkäynnillä kun toinen syöttää kumpaakin sähkötila 1:n pääkeskusta 11K ja 12K.

Muuntajat T14 ja T15 sijaitsevat sähkötila 3:n läheisyydessä, jossa niiden syöttämät pääkeskukset 14K ja 15K sijaitsevat. T14 on teholtaan 2000 kVA jännitteenä 400 voltia. Muuntajan valmistusvuosi on 1998 ja sen pääasiallinen syöttökohde on tehtaan 1,6 kVA:n tehoinen hitsauskone. T15 on teholtaan 3500 kVA ja jännitteeltään 690 voltia ja se syöttää hitsausauman normalisointiyksikköä.

Loppupään muuntajat T16 ja T17 ovat teholtaan 2000 kVA ja ne ovat valmistettu vuosina 1980 ja 1994. Molempien muuntajien alajännitepuolen jännite on 400 voltia. T16 syöttää putkilinjan loppupään sähkökäyttöjä ja kiinteistösähköistyksen muuntaja T17 mm. koko tehdasrakennuksen valaistuksia, työpaikkakeskuksia ja konttorisähköistystä. Tehtaan asemapiirros, jossa näkyvät kaikki muuntajat ja pääkeskukset, on esitetty kuvassa 3. Lisäksi tehtaan kaikkien muuntajien kilpiarvot on esitetty liitteessä 3.



Kuva 3. Pulkkilan tehtaan (osa) asemapiirros, mittakaava 1:500

Kaikki muuntajat ovat öljytäytteisiä ja ne ovat jäädytystavaltaan ONAN-tyyppisiä, eli jäädytys tapahtuu luonnollisella öljyn- ja ilmankierrolla. Muuntajista otetaan vuoden välein öljynäytteet, jotka lähetetään ulkopuoliselle yritykselle muuntajien kunnan arvioimiseksi. Muuntajat myös tarkastetaan silmämääräisesti vuosittain.

Sähköverkko on pienjännitepuolen johdinjärjestelmältään TN-C-S lukuun ottamatta muuntajan T15 alajännitepuolta, joka on IT-järjestelmä. Siinä ainoastaan laitteistojen jännitteille alttiit osat on maadoitettu ja maasulun valvonta on toteutettu erityisellä valvontareleellä. Muuntamoilta pääkeskuksille kiskot tai kaapelit ovat nelijohtimisia: kolme vaihejohdinta ja PEN, eli yhdistetty suoja- ja nollajohdin. Pääkeskuksilta eteenpäin verkko on johdinjärjestelmältään TN-S, eli suoja- ja nollajohtimen erotus on toteutettu pääkeskuksilla.

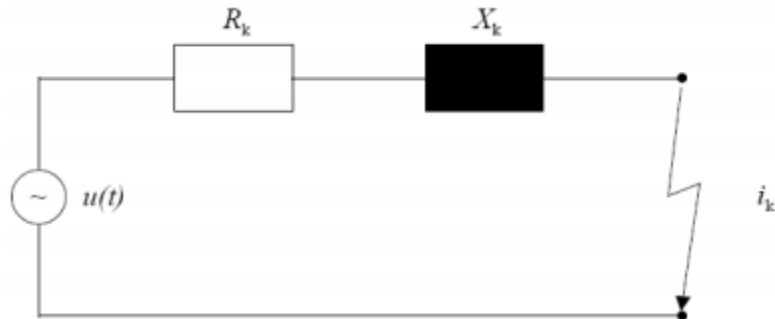
Pulkkilan putkitehtaan sähkönjakeluverkko on puhtaasti säteittäinen eli syöttö jakautuu muuntajilta pääkeskuksille ja niiltä edelleen alakeskuksille ja muille toimilaitteille. Pienjännitepuolella on varasyöttöyhteydet pääkeskusten 11K ja 12K sekä 16K ja 17K

välillä. Lisäksi tärkeimpien laitteistojen sähkönsyöttö on varmennettu sähkökatkojen varalta UPS-laitteistojen avulla.

Tuotantolinjan moottorikäytöt ovat nykyisin pääasiassa taajuusmuuttajakäyttöjä ja taajuusmuuttajat on pyritty asentamaan kuljetin- tai laitteistokohtaisiin ryhmäkeskuksiinsa joko kentälle tai sähkötiloihin.

4 OIKOSULKUVIRTOJEN TEORIAA

Yksivaiheisen oikosulkuvirran käyttäytymistä voidaan havainnollistaa kuvan 4 sijaiskytkennän avulla.



Kuva 4. Oikosulkupiirin yksivaiheinen sijaiskytkentä

Syöttöjännite olkoon $u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha)$. Kuvan 4 piirille voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö. (Huotari & Partanen 1998, 2.)

$$\hat{u} \sin(\omega t + \alpha) = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (1)$$

Tästä saadaan ratkaistua oikosulkuvirta i_k ajan funktiona. (Huotari & Partanen 1998, 2.)

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (2)$$

missä

\hat{u} on sinimuotoisen jännitteen huippuarvo

Z_k on oikosulkupiirin vaiheimpedanssi

ω on kulmataajuus

t on aika oikosulun alkuhetkestä

α on jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä

φ_k on oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma

τ on oikosulkupiirin aikavakio

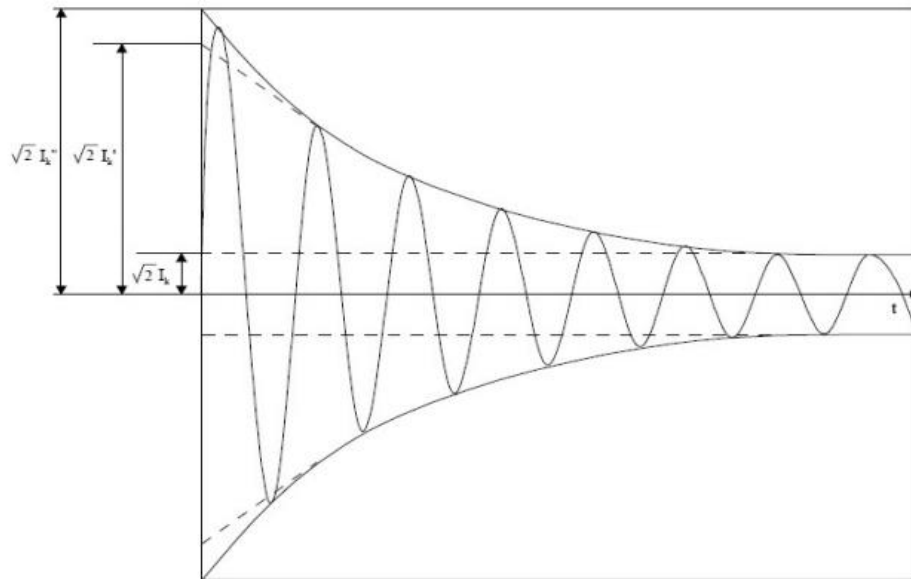
Oikosulkupiirin resistanssin R_k ja reaktanssin X_k avulla voidaan määrittellä vaiheimpedanssi Z_k , vaihekulma φ_k ja aikavakio τ seuraavasti.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (3)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (5)$$

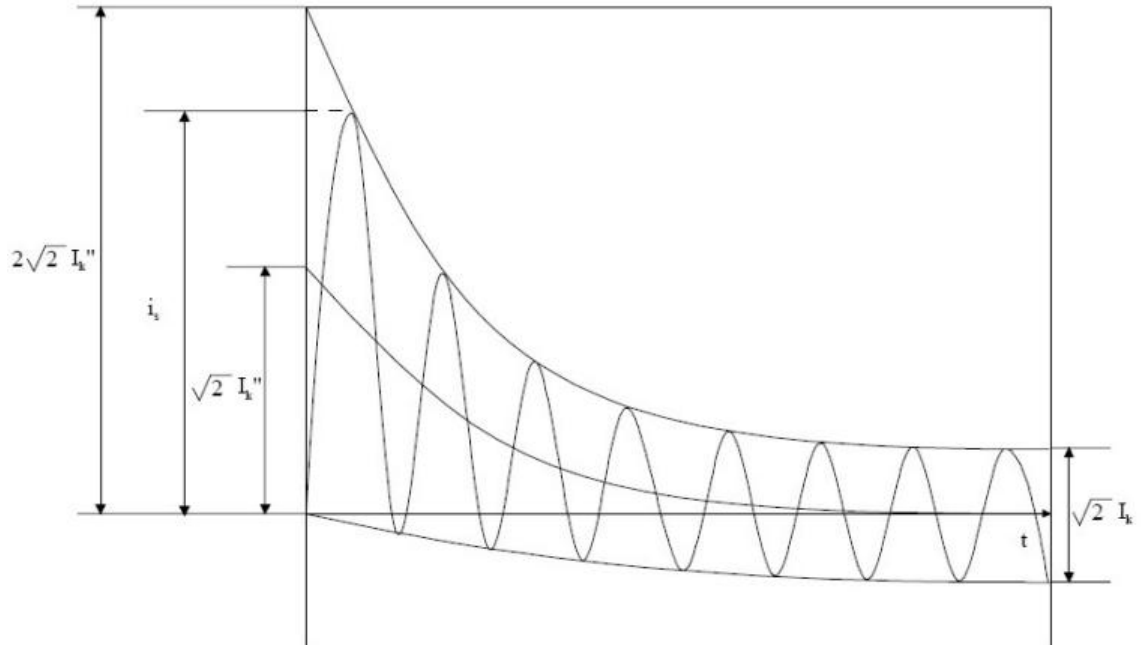
Yhtälön (2) ensimmäinen termi on vaihtovirtakomponentti ja jälkimmäinen tasavirtakomponentti, joka vaimenee aikavakion τ mukaisesti. Tasavirtakomponentti vaikuttaa oikosulun symmetriaan, ja sen suuruus puolestaan riippuu oikosulun syntyhetkestä. Täysin symmetrisessä oikosulussa tasavirtakomponenttia ei esiinny ollenkaan. Tällöin $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° . Tätä havainnollistetaan kuvassa 5. Kolmivaihejärjestelmässä on kuitenkin muistettava, että oikosulkuvirta voi olla symmetrinen vain yhdessä vaiheessa kerrallaan, johtuen vaihevirtojen välisestä vaihesiirrosta. (Huotari & Partanen 1998, 3.)



Kuva 5. Symmetrinen vaimeneva oikosulkuvirta ajan funktiona. I_k'' on alkuoikosulkuvirta, I_k' on muutosoikosulkuvirta ja I_k on pysyvän tilan oikosulkuvirta (Welling 2010, 17.)

Yllä olevassa kuvassa 5 nähdään symmetrisen oikosulkuvirran käyttäytyminen. Virta saa suurimman arvonsa I_k'' oikosulun alussa, josta se vaimenee pysyvän tilan oikosulkuvirraksi I_k .

Kuvassa 6 on esitetty epäsymmetrisen oikosulkuvirran käyttäytyminen. Se koostuu aikavakiolla τ vaimenevasta tasavirtakomponentista sekä eksponentiaalisesti aikavakioilla τ'' ja τ' vaimenevasta vaihtovirtakomponentista.



Kuva 6. Epäsymmetrinen vaimeneva oikosulkuvirta ajan funktiona. I_k'' on alkuoikosulkuvirta, I_k on pysyvän tilan oikosulkuvirta ja i_s on sysäysoikosulkuvirta (Welling 2010, 18.)

Syntyneen oikosulkuvirran huippuarvo on sysäysoikosulkuvirta i_s ja se voi olla 2,5-kertainen alkuoikosulkuvirtaan I_k'' nähden.

Sähköverkon jokaisen komponentit tulee kestää vaurioitumatta oikosulkuvirtojen aiheuttamat dynaamiset ja termiset rasitukset. Dynaamisilla rasituksilla tarkoitetaan oikosulun syntyhetkellä muodostuvia mekaanisia rasituksia ja ne syntyvät sysäysoikosulkuvirrasta i_s ja ovat suurimmillaan noin 10 ms jälkeen oikosulun syntyhetkestä. (Welling 2010, 18.)

Lämpövaikutukset kaapeleissa ja muissa komponenteissa johtuvat termisistä rasituksista. Ne aiheuttavat mm. eristyksen heikkenemistä kaapeleissa.

5 SÄHKÖTEKNINEN LASKENTA

Sähköverkosta selvitetään yleensä oikosulkuvirtojen suuruus verkon eri osissa, mutta verkon toiminnan ja myös sähköturvallisuuden kannalta verkon johtojen ja kaapeleiden jännitteenalenemien tunteminen on myös tärkeässä asemassa. Seuraavaksi esitellään laskentatapoja näiden suureiden laskemiseksi.

5.1 Oikosulkuvirtojen laskenta

Oikosulkuvirran laskeminen suoritetaan symmetristen komponenttien menetelmällä. Vikapaikkaan sijoitetaan ekvivalenttinen jännitelähde E_{ekv} , joka korvaa kaikki vikavirtaa vikapaikkaan syöttävät lähteet. Verkon komponentit kuvataan niille määritellyillä myötä-, vasta- ja nolliimpedansseilla. (Welling 2010, 19.)

Oikosulkuvirtojen laskennassa selvitetään yleensä kolmi-, kaksi- ja yksivaiheisen vikavirran suuruus. Laskentayhtälöissä eri jännitteillä käytettävät jännitekertoimen c arvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c

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

5.1.1 Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

Symmetrinen kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3v} on oikosulkulaskennan perustapaus ja virraltaan yleensä suurin vikavirta. Siinä esiintyy vain myötäimpedansseja eli kolmivai-

heverkon komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. (Huotari & Partanen 1998, 20.)

$$I_{k3v} = \frac{E_{ekv}}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} \quad (6)$$

missä

E_{ekv} on vikapaikkaan sijoitettava ekvivalenttinen jännitelähde

R_1 on oikosulkupiirin myötäresistanssi

X_1 on oikosulkupiirin myötäreaktanssi

c on jännitekerroin, jolla huomioidaan sähkömotoristen voimien ja verkon nimellisjännitteen ero

U_n on vikapaikan nimellisjännite

Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi.

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta on yleensä verkon suurin oikosulkuvirta mutta esimerkiksi pienjännitteisissä teollisuusverkoissa yksivaiheiset oikosulkuvirrat voivat olla kolmivaiheisia jopa hieman suurempia. (Welling 2010, 20.)

5.1.2 Kaksivaiheinen oikosulkuvirta

Esitetään kaksivaiheinen oikosulkuvirta kolmivaiheisen oikosulkuvirran I_{k3v} avulla. (Welling 2010, 20.)

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{1 + Z_2/Z_1} \times I_{k3v} \quad (7)$$

missä

Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi

Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi

Ei-pyörivillä koneilla, johdoilla, muuntajilla sekä epätahtimoottoreilla myötä- ja vastaimpedanssit ovat samansuuruiset ja yleensä pienjänniteverkkojen oikosulut tapahtuvat kaukana generaattorista, jolloin em. impedanssit ovat yhtä suuret. Tämä vaatii kuitenkin seuraavan ehdon toteutumista. (Huotari & Partanen 1998, 11; Welling 2010, 21.)

$$X_k \geq 2X_{sv} \quad (8)$$

missä

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi

X_{sv} on syöttävän verkon reaktanssi

Edellä mainituissa tapauksissa kaava (7) voidaan sieventää muotoon

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{k3v} \quad (9)$$

Myötä- ja vastaimpedanssin ollessa erisuuruisia, saadaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2v} laskettua

$$I_{k2v} = \frac{cU_n}{|Z_1 + Z_2|} \quad (10)$$

Usein eteenkin lyhyillä ja vahvoilla kaapeliyhteyksillä kaksivaiheiset oikosulkuvirrat ovat pienjänniteteollisuusverkossa pienimpiä oikosulkuvirtoja. (Welling 2010, 21.)

5.1.3 Yksivaiheinen oikosulkuvirta

Maadoitetussa teollisuusverkossa yksivaiheinen oikosulku on vaihejohtimen yhteys nollajohtimeen tai maahan ja se voidaan laskea myötä- ja vastaimpedanssien ollessa yhtä suuria seuraavasti.

$$I_{k1v} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_1 + Z_0|} \quad (11)$$

missä

Z_0 on oikosulkupiirin nollaimpedanssi

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan esittää myös kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla.

$$I_{k1v} = \frac{3}{1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{Z_0}{Z_1}} \times I_{k3v} \quad (12)$$

Vasta- ja myötäimpedanssien ollessa yhtä suuria, sievenee kaava (12) muotoon

$$I_{k1v} = \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}} \times I_{k3v} \quad (13)$$

Näitä edellä esitettyjä yksivaiheisen oikosulkuvirran kaavoja voidaan käyttää ratkaistaessa verkon alkuoikosulkuvirtoja käyttämällä niissä piirin komponenttien alkuimpedanssiarvoja. Impedanssien laskemiseksi muun muassa sähköverkostosuositukseen SA2:08 on taulukoitu jakelumuuntajien, johtojen sekä kaapeleiden resistansseja ja reaktansseja. Komponenttien impedanssien laskenta esitetään kappaleessa 5.2.

Laskettaessa pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtaa muodostaa muuntajan oikosulkuimpedanssi selvästi suurimman osan koko piirin impedanssista. Dyn-kytkentäisillä muuntajilla nolliimpedanssi on suurin piirtein myötäimpedanssin suuruinen, jolloin yksivaiheiset oikosulkuvirrat muodostuvat yhtä suuriksi kuin kolmivaiheiset. (Huotari & Partanen 1998, 12.)

Käyttömaadoitetuille pienjänniteverkoilla sekä maasta erotetuille keski- ja pienjänniteverkoille voidaan käyttää taulukon 2 mukaisia arvoja eri impedanssien suhteista.

Taulukko 2. Oikosulkupiirin impedanssisuhteet pien- ja keskijänniteverkoissa. Z_0 , Z_1 ja Z_2 ovat oikosulkupiirin nolla-, myötä- ja vastaimpedanssit. I_k'' on alkuoikosulkuvirta ja I_k on pysyvän tilan oikosulkuvirta (Huotari & Partanen 1998, 13.)

	Maasta erotettu verkko		Käyttömaadoitettu verkko
	Keskijännite 1-20 kV	Pienjännitteinen tai suuriresistanssisesti maadoitettu	Pienjännitteinen Muuntajan kytkentäryhmä Dyn
Z_2/Z_0	<0,01	<0,01	0,25...1
Z_2/Z_1 :			
I_k''	1	1	1
I_k	0,1...1	1	1

5.1.4 Alkuoikosulkuvirta

Alkuoikosulkuvirta on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun syntyhetkellä. Sen arvoa tarvitaan määrittettäessä muita oikosulkusuureita, eikä sitä käytetä sellaisenaan suojauksen tai mitoituksen perusteena. Oikosulkupiirin alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua aiemmin esiteltyjen oikosulkuvirtakaavojen ja kappaleessa 5.2 esitettävien verkon komponenttien impedanssien avulla. (Huotari & Partanen 1998, 23.)

Taustaverkolle ilmoitetaan yleensä joko jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_{k3v} tai alkuoikosulkuvirta I_k'' , jotka oletetaan samansuuruisiksi mikäli tuotantolaitoksella tai sen läheisyydessä ei ole generaattoria. (Welling 2010, 23.)

5.1.5 Terminen oikosulkuvirta

Komponenttien terminen oikosulkukestoisuus mitoitetaan oikosulkuvirran aiheuttaman lämpenemän perusteella. Koska oikosulkuvirta ei ole vakio, lasketaan oikosulkuvirran alkuarvon tehollisarvosta I_k'' se yhden sekunnin pituista oikosulkua vastaava keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta I_{th} tai I_{Is} , joka aiheuttaa komponentissa saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen 1998, 29.)

Terminen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla

$$I_{th} = I_k'' \times \sqrt{(m + n)t_k} \quad (14)$$

missä

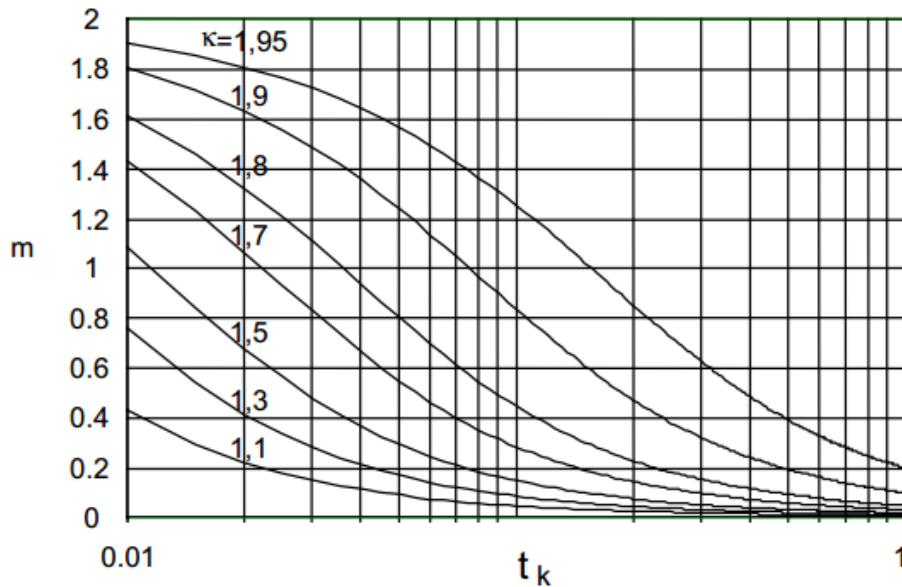
I_k'' on kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta

m on tasavirtatekijä

n on vaihtovirtatekijä

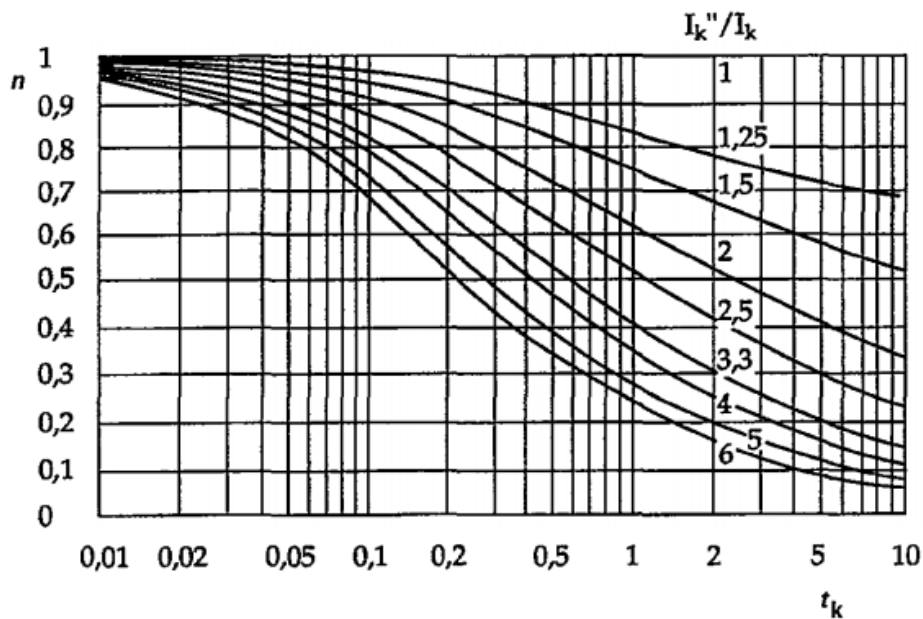
t_k on vian kesto aika

Tasavirtakomponentin vaimeneminen on huomioitu tasavirtatekijällä m , jonka arvo on riippuvainen sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k . Tämä riippuvuus on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Tasavirtatekijän m riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k (ABB Oy 2000, 8; VDE 0102.)

Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen on huomioitu vaihtovirtatekijällä n . Se on riippuvainen oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän tilan virta-arvon suhteesta I_k''/I_k sekä oikosulun kestoajasta t_k kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän tilan suhteesta ja oikosulun kestoajasta (Huotari & Partanen 1998, 30; VDE 0102.)

5.1.6 Sysäysoikosulkuvirta

Sähköverkon komponenteille dynaamisia rasituksia aiheuttavaa virtaa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s ja sitä käytetään osien mekaanisen mitoituksen perusteena. Sillä tarkoitetaan suurinta mahdollista oikosulkuvirran hetkellisarvoa, joka saavutetaan noin 10 ms:n kuluttua oikosulun synnystä. Sysäysoikosulkuvirrasta voidaan käyttää myös nimitystä dynaaminen oikosulkuvirta ja se voidaan laskea kaavalla (Huotari & Partanen 1998, 23.)

$$i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (15)$$

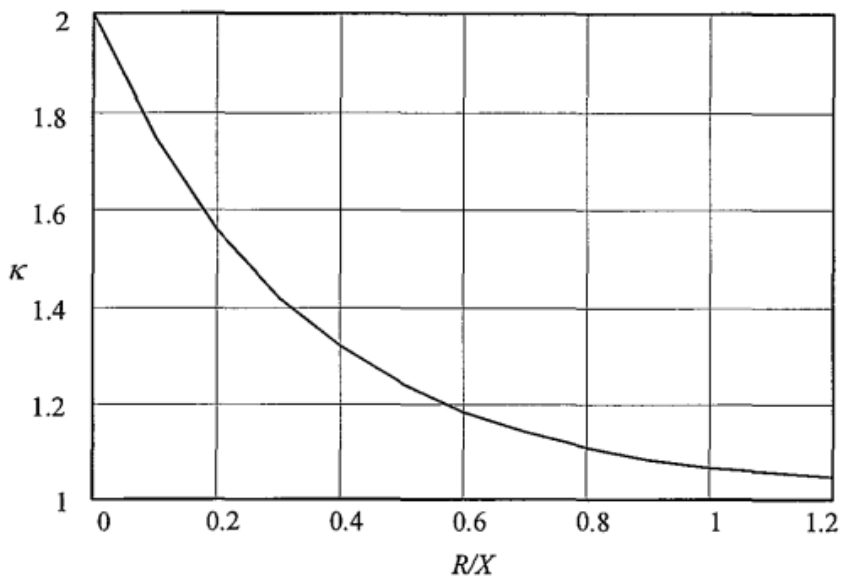
missä

κ on sysäyskerroin

I_k'' on alkuoikosulkuvirta

Sysäyskerroin κ on riippuvainen resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta seuraavalla tavalla tai se voidaan määrittää kuvan 9 perusteella. (Huotari & Partanen 1998, 24.)

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (16)$$



Kuva 9. Sysäyskerroimen κ riippuvuus oikosulkupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta (Huotari & Partanen 1998, 24; VDE 0102.)

Mikäli sysäyskerroimen tarkkaa arvoa ei tunneta, voidaan suurjännitteellä käyttää arvoa $\kappa = 1,80$ ja pienjännitteellä taulukon 3 mukaisia arvoja.

Taulukko 3. Pienjänniteverkon sysäysoikosulkuvirran suhde oikosulkuvirran tehollisarvoon (Huotari & Partanen 1998, 24.)

I_k''/kA	κ	$\cos\varphi$
≤ 10	1,2	0,5
≤ 20	1,4	0,3
≤ 50	1,5	0,25
> 50	1,6	0,2

5.1.7 Jatkuvan tilan oikosulkuvirta

Jatkuvan tilan oikosulkuvirralla I_k tarkoitetaan oikosulkuvirtaa, jossa kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet. Jatkuvan tilan oikosulkuvirralla ei voida kuitenkaan laskea tarkkaa arvoa alkuoikosulkuvirran tapaan, koska se riippuu mm. verkon kytkentätilanteiden muutoksista oikosulun aikana, generaattorien ja muuntajien automaattisesta jännitteensäädöstä sekä tahtikoneiden magnetoititavoista ja -säädöistä. Yleensä jatkuvan tilan oikosulkuvirtaa ei ehditä saavuttaa, koska verkon suojalaitteet ehtivät toimia ennen sitä. (Huotari & Partanen 1998, 25.)

5.2 Oikosulkupiirin komponenttien impedanssit

Seuraavaksi käsitellään oikosulkupiirin komponenttien impedanssien määrittämistä, joka on oikosulkuvirtalaskentojen lähtötekijä.

5.2.1 Syöttävä verkko

Taustaverkon impedanssi Z_{sv} voidaan määrittää, kun tunnetaan joko alkuoikosulkuvirta $I_{k3v,sv}''$ tai näennäinen alkuoikosulkuteho $S_{k,sv}''$. (Huotari & Partanen 1998, 15.)

$$Z_{sv} = \frac{cU_n^2}{S_{k,sv}''} = \frac{cU_{n,sv}}{\sqrt{3}I_{k3v,sv}''} \quad (17)$$

missä

c on taulukon 1 mukainen jännitekerroin

U_n on syöttävän verkon nimellispääjännite

$S_{k,sv}''$ on syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho

$I_{k3v,sv}''$ on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

Jos näennäisalkuoikosulkutehoa $S_{k,sv}''$ ei tunneta, voidaan se laskea. (Welling 2010, 26.)

$$S_{k,sv}'' = \sqrt{3}U_{n,sv} \times I_{k3v,sv}'' \quad (18)$$

Syöttävän verkon jännitteen ollessa alle 35 kV ja reaktanssin X_{sv} ja resistanssin R_{sv} suhde on tuntematon, voidaan niille kirjoittaa. (Huotari & Partanen, 16.)

$$X_{sv} = 0,995Z_{sv} \quad (19)$$

ja

$$R_{sv} = 0,1X_{sv}, \quad (20)$$

joissa

X_{sv} on syöttävän verkon reaktanssi

R_{sv} on syöttävän verkon resistanssi

Määritettäessä pienjänniteverkkojen oikosulkuvirtoja voidaan reaktanssi ja resistanssi redusoida pienjännitepuolelle seuraavasti (Huotari & Partanen, 16.)

$$X_{sv} = \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 \times X_{skj} = \frac{1,1U_{2N}^2}{S_{k,sv}''} \quad (21)$$

ja

$$R_{sv} = 0,1X_{sv}, \quad (22)$$

joissa

U_{1N} on yläjännitepuolen nimellispääjännite

U_{2N} on pienjännitepuolen nimellispääjännite

X_{skj} on keskijännitepuolen reaktanssi

$S_{k,sv}$ on syöttävän verkon näennäisalkuosulkuteho

5.2.2 Muuntajat

Kaksikämmimuuntajan oikosulkusuureet voidaan määrittää sen kilpiarvojen perusteella seuraavasti (Welling 2010, 27.)

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad (23)$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \quad (24)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (25)$$

joissa

Z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi

U_n on muuntajan nimellispääjännite

I_n on muuntajan nimellisvirta

S_n on muuntajan nimellinäennäisteho

P_{kn} on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

u_k on muuntajan suhteellinen oikosulkujännite

$u_r = (100 * P_{kn} / S_n)$ on muuntajan resistanssin aiheuttama suhteellinen oikosulkujännite

Suurilla muuntajilla, lähinnä vain päämuuntajilla, oikosulkuimpedanssi voidaan olettaa olevan puhtaasti reaktiivista koska resistanssin osuus impedanssista on hyvin pieni. Resistanssi on kuitenkin huomioitava sysäysoikosulkuvirtaa i_s tai oikosulkuvirran tasavirtakomponenttia i_{dc} laskettaessa. Mikäli oikosulkupiirissä on kuristimia, käsitellään niitä

laskelmissa kuten muuntajaa, jonka muuntosuhde on yksi. (Huotari & Partanen 1998, 18.)

5.2.3 Epätahtimoottorit

Yleisimpiä prosessiteollisuudessa käytettäviä sähkökoneita ovat epätahtimoottorit ja vaikka niiden yksikkötehot eivät ole kovin suuria huomioidaan ne yleensä laskennoissa suuren lukumääränsä vuoksi. Ne vaikuttavat oikosulkuvirtoihin suurentavasti sekä symmetrisissä että epäsymmetrisissä vioissa. Pääkeskustasolla moottoreiden korottava vaikutus oikosulkuvirtoihin voi olla useiden kiloampeerien luokkaa. (Huotari & Partanen 1998, 19; Welling 2010, 93, 94.)

Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi Z_M voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (Huotari & Partanen 1998, 19.)

$$Z_M = \frac{U_{n,M}}{\sqrt{3}I_s} = \frac{1}{I_s/I_{n,M}} \times \frac{U_{n,M}^2}{S_{n,M}} \quad (26)$$

missä

Z_M on epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi

$U_{n,M}$ on moottorin nimellisjännite

I_s on moottorin käynnistysvirta

$I_{n,M}$ on moottorin nimellisvirta

$S_{n,M}$ on moottorin nimellinäennäisteho

Standardiin IEC 60909 nojaten suoraan kytketyille epätahtimoottoreiden käynnistys- ja nimellisvirran suhteelle voidaan käyttää arvoa $I_s/I_{n,M} = 5$. Moottorien yleensä suuresta lukumäärästä johtuen ne voidaan oikosulkulaskelmissa korvata moottoreista muodostettavan epätahtimoottoriryhmän yhteenlasketulla impedanssilla $Z_{M,r}$. Se voidaan laskea sijoittamalla epätahtimoottoreiden yhteenlaskettu näennäisteho $S_{n,M}$ kaavaan (26). (ABB Oy 2000, 6.)

Pienjännitemoottoriryhmän reaktanssi $X_{M,r}$ ja resistanssi $R_{M,r}$, moottorien syöttökaapeli mukaan lukien, lasketaan impedanssista $Z_{M,r}$ seuraavasti. (ABB Oy 2000, 6.)

$$X_{M,r} = 0,922Z_{M,r} \quad (27)$$

ja

$$R_{M,r} = 0,42X_{M,r} \quad (28)$$

joissa

$X_{M,r}$ on moottoriryhmän reaktanssi

$R_{M,r}$ on moottoriryhmän resistanssi

5.2.4 Kaapelit, johdot ja kiskot

Kaapelit vaikuttavat merkittävästi oikosulkuvirtaan pienentämällä sitä, mikä johtuu niiden suuresta impedanssista. Johdon impedanssi Z_j riippuu kaapelin pituudesta, resistanssista ja reaktanssista, jotka taas johtuvat kaapelin paksuudesta. Teollisuuden sähköverkon kaapeliyhteydet ovat kuitenkin usein suhteellisen lyhyitä, jolloin impedanssitkin jäävät pieniksi. Toisaalta joissain tapauksissa kaapelipituudet voivat kasvaa pitkiksi mikäli kaapeliyhteys ulottuu useisiin alakeskuksiin ja niiltä edelleen kulutuskohteille. Tällöin varsinkin ohuita kaapeleita käytettäessä oikosulkusuojien toimivuus on varmistettava. Ohuilla kaapeleilla resistanssin osuus impedanssista on suurempi, mutta reaktanssin osuus kasvaa poikki-pinta-alan suuretessa. (Welling 2010, 31.)

Kaapeleiden ominaisarvot pituusyksikköä kohden on ilmoitettu kaapelivalmistajien toimesta mutta ne ovat myös esimerkiksi verkostosuosituksissa SA2:08 (pienjännitekaapelit) ja SA5:94 (keskijännitekaapelit). Suositukset on esitetty myös liitteissä 5 ja 6.

Impedanssi Z_j voidaan laskea seuraavasti (Koskinen 1996, 41.)

$$Z_j = (r + jx)l = (r + j2\pi fL)l \quad (29)$$

missä

r on kaapelin tasavirtaresistanssi pituusyksikköä (km) kohti

x on kaapelin tasavirtareaktanssi pituusyksikköä kohti

l on kaapeliyhteyden pituus

f on verkon taajuus

L on kaapelin induktanssi pituusyksikköä kohti

Kiskostot ovat yleisesti pituudeltaan suhteellisen lyhyitä ja niin myös niiden impedanssit jäävät pieniksi verkon muihin komponentteihin verrattuna. Tämän takia kiskojen impedansseja ei yleensä tarvitse huomioida laskelmissa. (Huotari & Partanen 1998, 21.)

5.2.5 Muu verkon kuormitus

Teollisuuden sähköjakoverkkojen kuormitus koostuu edellä mainittujen kuormitusten lisäksi myös vähäisestä määrästä mm. valaistus- ja lämmityskuormia. Niiden vaikutukset oikosulkuvirtaan ovat yleensä pieniä eikä niitä sen vuoksi tarvitse erikseen huomioida laskennoissa. Myöskään loistehon kompensointiin käytettävien rinnakkaiskondensaattoriparistojen vaikutusta ei yleensä tarvitse huomioida pienjänniteverkoissa. Ainoastaan keskijänniteverkoissa rinnakkaiskondensaattoreiden vaikutus tulee tarkistaa. (Huotari & Partanen 1998, 21.)

Taajuusmuuttajilla ja tasasuuntaajilla syötetyillä tasavirtakäytöillä on vaikutusta vaihtovirtapuolen oikosuluissa vain dynaamisiin oikosulkuvirtoihin ja niidenkin tapauksissa vain silloin, kun tasasuuntaajaosa on kaksisuuntainen eli käytettäessä vastarinnankytkettyä tyristorisuuntaajaa. Yleensä ne kuitenkin voidaan jättää huomioimatta, koska niiden osuus verkon kuormituksista on hyvin vähäinen. (Huotari & Partanen 1998, 22.)

5.2.6 Vikaimpedanssit

Pienintä verkossa esiintyvää oikosulkuvirtaa määritettäessä joudutaan huomioimaan myös oikosulkukohdassa esiintyvät vikaimpedanssit. Oikosulkukohtaan jää usein palamaan valokaari, joka eteenkin pienjännitteellä rajoittaa huomattavasti oikosulkuvirtaa. Oikosulkupiiri saattaa myös sulkeutua kaapelihyllyn tai muiden metallisten kappaleiden kautta, jolloin piirin impedanssi edelleen kasvaa. (Huotari & Partanen 1998, 22.)

Vikaimpedanssien matemaattinen laskeminen on erittäin hankalaa, jolloin joudutaan ne huomioimaan oikosulkulaskelmissa erilaisilla likimääräisillä kertoimilla, joilla pienin galvaanisesti esiintyvä oikosulkuvirta kerrotaan. Kertoimina käytetään 0,6:ta pienjännitteellä ja 0,8:aa keskijännitteellä. (Huotari & Partanen 1998, 22.)

5.3 Jännitteenalenema

Standardi SFS 6000 suosittelee suurimmaksi jännitteenalenemaksi 3 % valaistuskuormalle ja muulle kuormalle 5 % liittymispisteestä kulutuskojeelle. Taulukko suositelluista maksimijännitteenalenemista on esitetty liitteessä 7. Hetkellisesti suurempi jännitteenalenema sallitaan kuitenkin moottorin käynnistyessä ja laitteissa, joiden kytkentävirta on kohtalaisen suuri. Kaapelin jännitteenalenema voidaan laskea seuraavasti

$$U_h = \sqrt{3} \times I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \quad (30)$$

missä

U_h on jännitteenalenema

I on johtimen virta

R on johtimen vaihtovirtaresistanssi

X on johtimen vaihtovirtareaktanssi

φ on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma

6 YLIVIRTASUOJAUS

Käsitellään kaapeleiden ja johtimien ylivirtasuojauksista ylikuormitussuojauksen ja oikosulkusuojauksen näkökulmasta. Suojauksen perusteita selvitetään yksittäisille johtimille. Standardissa SFS 6000 on käsitelty tarkemmin ylivirtasuojauksista.

6.1 Oikosulkusuojaus

Johtimen oikosulkusuoja on yleensä sijoitettava kohtaan, jossa johtimen poikkipinta-ala pienenee tai ominaisuudet muuten muuttuvat. Suojan tulee kyetä katkaisemaan jännitesyöttö asennuspaikalla esiintyvään prospektiiviseen oikosulkuvirtaan asti ja suojalaitteen mitoitusvirtakyky ei saa joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta olla pienempi kuin suojalaitteen asennuspaikalla esiintyvä prospektiivinen oikosulkuvirta. Kaikki poikkeustapaukset on esitetty standardissa SFS 6000. Oikosulkusuojan tulee toimia ennen kuin suojattavan johtimen lämpötila saavuttaa sille suurimman sallitun lämpötilan. (SFS 6000-4-43, hakupäivä 30.8.2013.)

6.2 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojat ovat suojalaitteita, joiden toiminta-aika on käänteisesti verrannollinen virtaan ja niiden katkaisukyky voi olla pienempi kuin verkon prospektiivinen oikosulkuvirta suojalaitteen asennuskohdassa. Kaapelin kuormitettavuutta laskettaessa on määritettävä maksimikuormitusvirta, jolla kaapelia voidaan kuormittaa ilman liiallista lämpötilan nousua, josta aiheutuisi vaurioita kaapelin eristykselle, jatkoksille, liitoksille tai ympäristölle. PVC-eristeisille kaapeleilla rajalämpötila on 70 °C ja PEX-eristeisillä 90 °C. Määritellyn kuormitettavuuden perusteella kaapelille valitaan ylikuormitussuoja, kuten gG-typin sulake, ylikuormituslaukaisulla varustettu katkaisija tai releohjattu suojalaite. (SFS 6000-4-43, hakupäivä 30.8.2013; Welling 2010, 35.)

Kuormitettavuuden määrittämisessä on huomioitava kaapelin lämpenemiseen ja asennusympäristöön liittyvät vaikutukset. Tällaisia ovat mm. kaapelin asennustapa, muiden kaapeleiden läheisyys ja asennuksen ympäristöolosuhteet, jotka huomioidaan erilaisilla korjauskertoimilla C_i . Korjauskertoimet löytyvät taulukoituna esimerkiksi standardista

SFS 6000. Mikäli asennusolosuhteet muuttuvat kaapelireitillä tulee kuormitettavuus määrittää epäedullisimman asennusolosuhteen mukaan. (SFS 6000-5-52, hakupäivä 30.8.2013.)

Kaapelin kuormitettavuus lasketaan seuraavalla tavalla. (SFS 6000-5-52, hakupäivä 30.8.2013.)

$$I_Z = I_t \times C_i \times C_{i+1} \times C_{i+2} \dots \quad (31)$$

missä

I_Z on johtimen todellinen kuormitettavuus

I_t on taulukoitu yhden virtapiirin kuormitettavuus standardinmukaisissa asennusolosuhteissa

C_i on asennusolosuhteet huomioiva korjauskerroin

Ylikuormitukselta suojaavalle suojalaitteelle on määritelty seuraavat ehdot. (SFS 6000, 2012.)

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (32)$$

ja

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z, \quad (33)$$

joissa

I_b on virtapiirin suunniteltu virta

I_n on suojalaitteen mitoitusvirta

I_Z on johtimen jatkuva kuormitettavuus

I_2 on virta, jolla suojalaite toimii tehokkaasti

Kaapelin tai johdon kaikki äärijohtimet on varustettava ylivirtasuojalla poikkeuksena standardissa 6000 mainitut erikoistapaukset, kuten esimerkiksi kolmivaihemoottorin tapauksessa, jossa yksittäisen vaiheen poiskytketyminen voi aiheuttaa vaaraa. Tällöin on ryhdyttävä muihin varotoimenpiteisiin ylikuormitussuojauksen järjestämiseksi. Muutoin ylivirtasuojan tulee katkaista virta siitä vaiheesta, jossa ylivirtaa esiintyy. (SFS 6000, 2012.)

Ylikuormitussuoja on sijoitettava sellaiseen paikkaan, jossa johtimen kuormitettavuus muuttuu. Tällaisia ovat esimerkiksi muutokset johtimen poikkipinnassa, johdinlajissa, asennustavassa tai muussa rakenteessa. Teollisuudessa ylikuormitussuojat on sijoitettu yleensä keskitetysti sähkökeskuksiin. (SFS 6000, 2012.)

6.3 Yhdistetty oikosulku- ja ylikuormitussuojaus

Saman suojalaitteen toteuttaessa suojauksen sekä ylikuormitukselta että oikosululta, tulee sen täyttää molempien tapausten erikseen standardin SFS 6000 lukujen 433 ja 434 mukaiset vaatimukset. Suojalaitteen katkaisukyvyyn on oltava vähintään yhtä suuri kuin sen asennuskohdassa esiintyvä prospektiivinen oikosulkuvirta, tällöin suojalaitteen katsotaan suojaavan kuormituspuolen johtimet myös oikosulkuvirralla. Yhdistetty suojaus voidaan toteuttaa ylikuormituslaukaisulla varustetulla katkaisijalla tai gG-tyyppin sulakkein. Moottorilähdöissä suojaus on toteutettu yleensä aM-tyyppin sulakkeilla. (SFS 6000, 2012.)

7 YLIVIRTALASKELMAT

Tehtaan muuntajalähdöille suoritettiin ylivirtalaskelmat oikosulkujen osalta ja laskettiin pääkeskuslähtöjen jännitteenalenemat. Varsinaiset työssä syntyneet uudenlaiset sähkökeskusten pääkaaviot laskentatuloksineen on esitetty liitteessä 8.

7.1 Oikosulkuvirrat

Oikosulkuvirtalaskenta suoritettiin jokaiselle tehtaan pääkeskuksen kiskostolle. Laskennat suoritettiin ABB Oy:n DOC2 -ohjelmistolla, jolla laskettiin alkuoikosulkuvirrat I_k'' kolmi-, kaksi ja yksivaiheisissa oikosuluissa sekä sysäysoikosulkuvirrat kolmivaiheisista oikosulkuvirroista. Ohjelma käyttää laskennoissa oletusasetuksiltaan standardia CEI 11-25, joka on ohjeistus kolmivaiheisten pienjännitteisten vaihtosähköverkkojen (50 Hz tai 60 Hz) oikosulkuvirtojen laskentaan. Liitteessä 1 on esimerkki oikosulkuvirtojen käsin laskemisesta Theveninin menetelmällä. Taulukossa 4 on esitetty oikosulkulaskennan tulokset.

Taulukko 4. DOC2 -ohjelmalla lasketut pääkeskusten maksimioikosulkuvirrat

	I_k'' [kA]			i_s [kA]	Huom.
	3v	2v	1v		
11K	41,9	34,0	41,9	78,3	
12K	39,3	34,0	41,9	78,3	
14K	39,6	34,3	42,3	78,8	
15K	33,2	28,7	-	55,6	IT-järj.
16K	39,5	34,2	42,2	78,5	
17K	39,2	33,9	41,7	77,9	

Tulokset kuvaavat hyvin oikosulkuvirtojen suuruutta teollisuusverkoissa. Oikosulkuvirrat ovat suhteellisen suuria jokaisella pääkeskuksella mutta toisaalta ne pienentyvät merkittävästi pitkillä ja ohuilla kaapeliyhteyksillä. Tuloksista nähdään, että pääkeskuksella tapahtuvissa oikosuluissa yksivaiheiset ovat virraltaan vähintään yhtä suuria kuin kolmivaiheiset vastaavat. Kaksivaiheiset oikosulkuvirrat jäävät jokaisella pääkeskuksella kaikkein pienimmiksi.

Pääkeskukset 11K, 12K, 16K ja 17K ovat Strömbergin MXA H0 -tyypin keskuksia, joiden dynaaminen oikosulkukestoisuus on 105 kA ja terminen 50 kA, joten niiden oikosulkukestoisuus on hyvinkin riittävä.

14K:n ja 15K:n keskukset ovat ABB:n valmistamia MDF -tyyppisiä keskuksia, joiden dynaaminen kestoisuus on 143 kA ja terminen 14K:n osalta 80 kA ja 15K:n 70 kA, joten voidaan todeta keskusten olevan oikosulkukestoisia.

11K:n ja 12K:n muuntajälähdöissä on käytetty Unelec CN3-tyypin 3200A:n ilmakatkaisijoita, jotka ovat dynaamiselta oikosulkukestoisuudeltaan 100 kA ja termiseltä 50 kA. 14K:n syötössä on käytetty Merlin Gerinin M40H1-tyypin katkaisijaa, joka on nimellisvirraltaan 4000 A ja termiseltä kestoisuudeltaan 75 kA. 15K:n syötössä vastaavasti ABB:n SACE E4H/E40 -katkaisijaa, jonka nimellisvirta on samoin 4000 A ja terminen oikosulkukestoisuus 65 kA. Keskuksissa 16K ja 17K on käytetty Unelec CS3 3200 A -tyypin katkaisijaa, jonka terminen kestoisuus on 70 kA. Kaikki katkaisijat ovat oikosulkukestoisuudeltaan riittäviä ja niiden suojausasettelut on tehty sellaisiksi, että ne toimivat oikosulun sattuessa riittävän nopeasti.

7.2 Jännitteenalenemat

Pääkeskuslähdöille laskettiin myös jännitteenalenemat, vaikka niissä ei ennalta odotettu olevan mitään korjattavaa koska kaapelilyhteydet ovat suhteellisen lyhyitä ja tehokerroimien arvot hyviä. Taulukoissa 5, 6 ja 7 on esitetty kaikkien pääkeskuslähdöjen jännitteenalenemat ja liitteessä 2 esimerkki kaapelin jännitteenalenemalaskennasta.

Taulukko 5. Pääkeskuslähdöjen jännitteenalenemat. l on kaapelipituus, U_n on nimellisjännite, I_B on piirin mitoitusvirta, $\cos \phi$ on tehokerroin, U_h on jännitteenalenema voltteina ja prosentteina

Lähtö	l [m]	U_n [V]	I_B [A]	$\cos \phi$	U_h [V]	U_h [%]
11K						
0102	11	400	433	0,95	8,71	2,18
0202	22	400	800	0,90	9,72	2,43
0302	varalla					
0303	70	400	150	0,90	11,72	2,93
0402	90	400	600	0,90	13,88	3,47
0502	10	400	882	0,90	8,92	2,23
12K						
0102	15	400	927	0,90	0,60	0,15
0202	varalla					
0302	18	400	289	0,95	0,64	0,16
0303	18	400	189	0,95	0,64	0,16
0401	varalla					
14K						
0102	11	400	433	0,96	0,60	0,15
0103	11	400	433	0,96	0,60	0,15
0202	20	400	100	0,90	0,96	0,24
0301	26	400	80	0,90	0,00	0,00
0302	varalla					
0304	12	400	722	0,96	0,56	0,14
0305	varalla					
0402	6	400	2350	0,85	0,00	0,00
0404	13	400	577	0,96	0,96	0,24
0501	13	400	289	0,96	0,48	0,12
0502	90	400	43	0,80	3,24	0,81
0503	90	400	43	0,80	3,24	0,81
0504	33	400	50	0,90	1,52	0,38

Taulukko 6. Pääkeskuslähtöjen jännitteenalennemat (jatkoa)

15K	l [m]	U_n [V]	I_B [A]	$\cos \varphi$	U_h [V]	U_h [%]
0301	9	690	251	0,96	9,00	1,30
0302	9	690	251	0,96	9,00	1,30
0303	9	690	251	0,96	9,00	1,30
0401	7	690	1860	0,90	9,45	1,37
0402	13	690	177	0,96	9,14	1,32
16K						
0102	4	400	500,00	0,90	7,76	1,94
0201	varalla	400				
0202	varalla	400				
0203	70	400	200	0,90	10,04	2,51
0302	6	400	700	0,90	7,80	1,95
0402	60	400	100	0,90	10,80	2,27
0403	37	400	100	0,90	8,72	2,18
0404	15	400	100	0,90	8,04	2,01
0405	45	400	100	0,90	8,96	2,24
0502	90	400	120	0,90	10,96	2,74
0503	95	400	120	0,90	10,40	2,60
0504	78	400	150	0,90	10,48	2,62
0505	60	400	200	0,90	10,32	2,58
0802	22	400	48	0,90	10,76	2,69
0803	22	400	48	0,90	10,76	2,69
0804	22	400	32	0,91	9,68	2,42
0805	varalla	400				
0806	50	400	200	0,90	10,60	2,65
0902	20	400	111	0,96	9,72	2,43
0903	20	400	46	0,90	8,44	2,11
0904	20	400	20	0,90	9,64	2,41
0905	85	400	120	0,90	10,76	2,69
0906	90	400	150	0,90	10,96	2,74
1002	varalla	400				
1003	varalla	400				
1102	14	400	433	0,96	7,20	1,80
1103	14	400	433	0,96	7,20	1,80

Taulukko 7. Pääkeskuslähtöjen jännitteenalennemat (jatkoa)

17K	l [m]	U_n [V]	I_B [A]	$\cos \varphi$	U_h [V]	U_h [%]
0401	6	400	40	0,90	6,76	1,69
0402	14	400	50	0,90	8,00	1,99
0403	varalla	400				
0404	90	400	100	0,90	11,00	2,75
0405	90	400	100	0,90	11,00	2,75
0501	100	400	80	0,90	10,52	2,63
0502	43	400	80	0,90	8,28	2,07
0503	7	400	32	0,90	7,04	1,76
0504	190	400	150	0,90	11,64	2,91
0505	75	400	150	0,90	9,04	2,26
0601	120	400	80	0,90	11,28	2,82
0602	150	400	50	0,90	10,28	2,57
0603	130	400	50	0,90	9,76	2,44
0604	90	400	80	0,90	8,16	2,04
0605	85	400	80	0,90	8,08	2,02
0701	35	400	25	0,90	9,32	2,33
0702	45	400	50	0,90	8,08	2,02
0703	140	400	50	0,90	8,80	2,20
0704	220	400	80	0,90	14,64	3,66
0705	170	400	80	0,90	10,76	2,69
0801	100	400	100	0,90	14,08	3,52
0802	145	400	60	0,90	13,08	3,27
0803	200	400	50	0,90	14,08	3,52
0804	50	400	80	0,90	8,44	2,11
0805	220	400	60	0,90	10,72	2,68
0901	190	400	60	0,90	11,80	2,95
0902	200	400	60	0,90	15,56	3,89
0903	45	400	80	0,90	8,24	2,06
0904	160	400	80	0,90	10,60	2,65
0905	135	400	80	0,90	10,64	2,66
1001	varalla	400				
1002	150	400	80	0,90	10,36	2,59
1003	270	400	80	0,90	13,36	3,34
1004	15	400	433	0,96	6,00	1,50
1101	varalla	400				
1102	250	400	200	0,90	12,92	3,23
1103	220	400	50	0,90	14,80	3,70
1104	15	400	289	0,96	6,40	1,60

Standardi SFS 6000 suosittelee suurimmaksi jännitteenalennemaksi 3 % valaistuskormalle ja muulle kuormalle 5 % liittymispisteestä kulutuskojeelle. Toisaalta kun kyseessä

on laitoksen omasta teholähteestä syötetty sähköverkko, sallitaan edellä mainituille kuormille 6 % ja 8 % jännitteenalenemat. Liitteessä 7 on esitetty standardinmukaiset maksimijännitteenalenemat. Laskentatuloksista nähdään, että jännitteenalenemaprosentit ovat valtaosissa lähdöistä alle kolmen prosentin. Ainoastaan muutamissa kiinteistö sähköistyksen muuntajan T17 pitkän kaapelipituuden lähdöissä jännitteenalenema on lähellä neljää prosenttia. Toisaalta kun laskennan kohteena ovat pääkeskustason lähdöt, on jännitteenalenemien syytä ollakin suhteellisen pieniä, koska verkko jatkuu monessa tapauksessa vielä useamman tason alakeskuksille. Tällöin myös jännitteenalenemat syöttöpisteestä lopulliselle kulutuskohteelle kasvaa väistämättä.

8 POHDINTA

Vikavirtojen selvitystyö oli hyvinkin tarpeellinen aihe, koska jo määräykset edellyttävät, että oikosulkuvirrat on oltava määritelty kussakin tarpeellisessa asennuksen pisteessä. Verkon oikosulkuselvitys edellytetään, jotta kosketusjännite- ja oikosulkusuojauksen toteuttaminen olisi mahdollista. Uutta verkonosaa suunniteltaessa ainoa mahdollisuus on oikosulkuvirtojen laskenta.

Tehtaan pääkeskustason suojuuksissa ja jännitteenalennemissa ei havaittu mitään epäkohtia, vaan oikosulku- ja ylivirtasuojana toimivat katkaisijat ovat asetteluiltaan oikeanlaiset.

Opinnäytetyössä sai paljon syventävää tietämystä teollisuuden sähköjakelusta ja sen sähköverkon vikavirroista. Aikaisemmin opinnoissa käytyt asiat tarjosivat hyvän pohjan työn tekemiselle ja laskennalle. Sähkötekniistä dokumentointia edesauttoi lisäksi myös aikaisempi työkokemus sähkökuvien dokumentoinnista ja sähkösuunnittelusta.

Tämän opinnäytetyön pohjalta Ruukki Metals Oy Pulkkilan tehtaan henkilöstöllä on halutessaan mahdollisuus sähköverkon vikavirtojen selvityksen laajentamiseen myös alakeskustasoille. Kohdeyrityksellä on mielestäni syytä laajentaa selvitystyötä koko laitoksen sähköverkkoon, jotta verkon suojuuksien toimivuudesta, ja täten myös turvallisuudesta, voidaan varmistua. Työn tuotoksia voidaan käyttää sellaisenaan myös suunniteltaessa uutta verkonosaa.

LÄHTEET

- ABB Oy, 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita: Luku 7: Oikosulkusuojaus.
- Energiateollisuus ry. Verkostosuositus SA2:08: Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen. Energiateollisuus ry, 2008.
- Energiateollisuus ry. Verkostosuositus SA5:94: Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Energiateollisuus ry, 1994.
- Etto, Jaakko 1998. Prosessisähköistyksen kunnossapito, osa 2. Kunnossapitokoulu, erikoisliite no. 48.
- Huotari, Kari & Partanen, Jarmo 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta.
- IEC 60909, 2001. Short circuit currents in three-phase a.c. systems. Geneve: IEC
- Koskinen, Timo 1996. Teollisuuden sähköverkkojen suunnittelun perusteet. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Ruukki Metals Oy Pulkkilan Works 2012. Pulkkilan tehtaan esittelymateriaali. Sisäinen intranet. Hakupäivä 13.8.2013.
- SFS 6000, 2012: Pienjännitesähköasennukset. Helsinki: SFS. Hakupäivä 30.8.2013. <www.sfs.fi>
- VDE 0102/11.75. Leitsätze für die Berechnung der Kurzschlußströme: Teil 2. Drehstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V.
- Welling, Juho 2010. Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta.

LIITTEET

- Liite 1. Laskentaesimerkki 1: Oikosulkuvirrat
- Liite 2. Laskentaesimerkki 2: Kaapelin jännitteenalenema
- Liite 3. Muuntajien kilpiarvot
- Liite 4. 20/0,4 kV muuntajien resistanssit ja reaktanssit
- Liite 5. Johtojen resistanssit ja reaktanssit.
- Liite 6. 20 kV kaapelien johtotietoja
- Liite 7. Suositellut jännitteenalenemat
- Liite 8. 17K:n uudet pääkaaviot

Oikosulkulaskenta.

Käytetään esimerkkilaskuissa 400V:n kiinteistö sähköistyksen sähköpääkeskusta 17K, jonka kiskostossa oikosulku tapahtuu. Tehtaan 20 kV:n liittymän kolmivaiheinen alku-oikosulkuvirta on 3,1 kA

Kaapeli 20 kV:n kojeistolta muuntajalle T17: 0,2 km APYAKMM 3x185, $R_v = 0,189 \Omega/\text{km}$, $X_v = 0,107 \Omega/\text{km}$

Muuntaja T17: $S_n = 2000 \text{ kVA}$, $U = 20/0,4 \text{ kV}$, Dyn11, $z_k = 5,8 \%$

Impedanssien määrittäminen

Komponenttien impedanssit on laskettu luvussa 5.2 esitetyllä tavalla.

Syöttävä verkko

Ensin on laskettu syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho $S_{k,sv}''$ kaavalla (18)

$$S_{k,sv}'' = \sqrt{3}U_{n,sv} \times I_{k3v,sv}'' = \sqrt{3} \times 20 \text{ kV} \times 3,1 \text{ kA} = 107,4 \text{ MVA}$$

Seuraavaksi on laskettu saadun oikosulkutehon perusteella taustaverkon impedanssi 20 kV:n puolella kaavalla (17). Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään jännitekerroimen c arvona 1,10.

$$Z_{sv} = \frac{cU_n^2}{S_{k,sv}''} = \frac{1,10 \times 20 \text{ kV}^2}{107,4 \text{ MVA}} = 4,1066 \Omega$$

$$X_{sv} = 0,995Z_{sv} = 4,086 \Omega$$

$$R_{sv} = 0,1X_{sv} = 0,409 \Omega$$

$$\rightarrow Z_{sv} = (0,409 + j4,086) \Omega$$

Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään $c_{\min} = 1,0$

$$Z_{sv} = \frac{cU_n^2}{S_{k,sv}''} = \frac{1,0 \times 20 \text{ kV}^2}{107,4 \text{ MVA}} = 3,725 \Omega$$

$$X_{sv} = 3,706 \Omega$$

$$R_{sv} = 0,371 \Omega$$

$$\rightarrow Z_{sv} = (0,371 + j3,706) \Omega$$

Lasketaan kaapelin APYAKMM 3x185 impedanssi kaavalla (29). Arvot kaapelin ominaisresistanssille ja -reaktanssille saadaan verkostosuosituksesta SA5:94, jonka 20 kV kaapeleiden johtotiedot löytyvät myös liitteestä 6.

$$R_j = 0,2 \text{ km} * 0,189 \Omega/\text{km} = 37,8 \text{ m}\Omega$$

$$X_j = 0,2 \text{ km} * 0,107 \Omega/\text{km} = 21,4 \text{ m}\Omega$$

$$Z_j = (37,8 + j21,4) \text{ m}\Omega = 43,44 \text{ m}\Omega$$

Kun summataan taustaverkon impedanssi ja em. kaapelin impedanssi, saadaan kokonaisimpedanssi muuntajalle T17.

$$R_{sv} + R_j = (0,4086 + 0,0378) \Omega = 0,446 \Omega$$

$$X_{sv} + X_j = (4,086 + 0,0214) \Omega = 4,107 \Omega$$

$$\rightarrow Z_{20kV} = 4,132 \Omega$$

Lasketaan kolmivaiheinen oikosulkuvirta muuntajan T17 yläjännitepuolelle kaavalla (6). $c_{max} = 1,10$.

$$I_{k3v} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} = \frac{1,10 \times 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 4,132 \Omega} = 3,074 \text{ kA}$$

Lasketaan nyt edellä mainittuja kaavoja käyttäen vastaavat arvot muuntajan taustaverkollle.

$$S''_{k,sv} = \sqrt{3}U_{n,sv} \times I''_{k3v,sv} = \sqrt{3} \times 20 \text{ kV} \times 3,074 \text{ kA} = 106,48 \text{ MVA}$$

Seuraavaksi voidaan laskea syöttävän verkon impedanssi Z_{sv} muuntajan T17 alajännitepuolelle redusoituna kaavalla (17). Jännitekertoimelle c käytetään suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa arvoa 1,10.

$$Z_{sv} = \frac{cU_n^2}{S_{k,sv}''} \times \left(\frac{0,4kV}{20kV}\right)^2 = \frac{1,10 \times 20 \text{ kV}^2}{106,48 \text{ MVA}} \times \left(\frac{0,4kV}{20kV}\right)^2 = 1,653 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sv} = 1,645 \text{ m}\Omega$$

$$R_{sv} = 0,164 \text{ m}\Omega$$

$$\rightarrow Z_{sv} = (0,164 + j1,645) \text{ m}\Omega$$

Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään $c_{\min} = 1,0$

$$Z_{sv} = \frac{cU_n^2}{S_{k,sv}''} = \frac{1,0 \times 20 \text{ kV}^2}{106,48 \text{ MVA}} \times \left(\frac{0,4kV}{20kV}\right)^2 = 1,503 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sv} = 1,495 \text{ m}\Omega$$

$$R_{sv} = 0,150 \text{ m}\Omega$$

$$\rightarrow Z_{sv} = (0,150 + j1,495) \text{ m}\Omega$$

Muuntaja T17

Muuntajan arvot on laskettu sen kilpiarvoista kaavoilla (23), (24) ja (25). Muuntajien kilpiarvot löytyvät liitteestä 4.

$$u_r = \frac{100 \times P_{kn}}{S_n} = \frac{100 \times 15,4 \text{ kW}}{2000 \text{ kVA}} = 0,77 \%$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,77}{100} \times \frac{(400 \text{ V})^2}{2000 \text{ kVA}} = 0,616 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5,8}{100} \times \frac{(400 \text{ V})^2}{2000 \text{ kVA}} = 4,64 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 4,60 \text{ m}\Omega$$

Verkon myötä- ja vastaimpedanssit kaukana generaattorista tapahtuvassa oikosulussa voidaan olettaa yhtä suuriksi sillä seuraava ehto toteutuu. (Koskinen 1996, 135)

$$X_k \geq 2X_{sv}$$

Muuntajan nolaresistanssi ja –reaktanssiarvot on esitetty liitteessä 5.

$$R_{k0} = 0,8 \text{ m}\Omega$$

$$X_{k0} = 5,2 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k0} = (0,8 + j5,2) \text{ m}\Omega$$

$$|Z_{k0}| = 5,26 \text{ m}\Omega$$

Oikosulku pääkeskuksen 17K kiskostossa

Muuntajan T17 alajännitepuolen lähtö on toteutettu 4 metrin alumiini- sekä 4 metrin kuparikiskostoilla. Lyhyiden ja vahvojen virtakiskojen impedanssit oletetaan laskelmissa olevan lähellä nollaa, joten niitä ei erikseen huomioida.

Suurin oikosulkuvirta

$$R_{sv} + R_k = (0,164 + 0,616) \text{ m}\Omega = 0,78 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sv} + X_k = (1,645 + 4,60) \text{ m}\Omega = 6,245 \text{ m}\Omega$$

$$Z_1 = (0,78 + j6,245) \text{ m}\Omega = 6,294 \angle 82,88^\circ \text{ m}\Omega$$

$$|Z_1| = 6,294 \text{ m}\Omega$$

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta pääkeskuksella 17K ilman moottoreiden vaikutuksia on laskettu kaavalla (6). $c_{max} = 1,0$.

$$I_{k3v} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} = \frac{1,0 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 6,294 \text{ m}\Omega} = 36,69 \text{ kA}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on laskettu kaavalla (9).

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{k3v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 36,69 \text{ kA} = 31,77 \text{ kA}$$

Sekä yksivaiheinen kaavalla (13).

$$I_{k1v} = \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}} \times I_{k3v} = \frac{3}{2 + \left(\frac{5,26 \text{ m}\Omega}{6,294 \text{ m}\Omega}\right)} \times 36,69 \text{ kA} = 38,82 \text{ kA}$$

Laskentatuloksista nähdään, että sähköpääkeskuksella 17K pienin oikosulkuvirta saadaan kaksivaiheisessa oikosulussa ja suurin virta yksivaiheisessa oikosulussa.

Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirta i_s ilman moottoreiden vaikutusta on laskettu kaavoilla (15) ja (16).

$$\frac{R_1}{X_1} = \frac{0,78}{6,245} = 0,125$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-0,375} = 1,69$$

$$i_s = \kappa\sqrt{2}I_k'' = 1,69 \times \sqrt{2} \times 36,69 \text{ kA} = 87,9 \text{ kA}$$

Todellisuudessa huomioitaessa myös moottoreiden vaikutukset sysäysoikosulkuvirta voi olla tätäkin hieman suurempi. (Welling 2010, 95)

Pienin oikosulkuvirta

Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään aiemmin määriteltyjä verkon impedanssiarvoja.

$$R_{sv} + R_k = (0,150 + 0,616) \text{ m}\Omega = 0,766 \text{ m}\Omega$$

$$X_{sv} + X_k = (1,495 + 4,60) \text{ m}\Omega = 6,095 \text{ m}\Omega$$

$$|Z_1| = 6,143 \text{ m}\Omega$$

Laskettaessa pienjännitepuolella kolmivaiheista minimioikosulkuvirtaa käytetään jännittekertoimen arvona $c_{min} = 0,95$.

$$I_{k3v} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} = \frac{0,95 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 6,143 \text{ m}\Omega} = 35,71 \text{ kA}$$

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{k3v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 35,71 \text{ kA} = 30,93 \text{ kA}$$

$$I_{k1v} = \frac{3}{2 + Z_0/Z_1} \times I_{k3v} = \frac{3}{2 + (5,26 \text{ m}\Omega / 6,143 \text{ m}\Omega)} \times 35,71 \text{ kA} = 37,51 \text{ kA}$$

Oikosulkuvirta on siis pienimmillään kaksivaiheisessa oikosulussa $I_{k2v} = 30,93 \text{ kA}$, kun oikosulku tapahtuu pääkeskuksen 17K kiskostossa.

Jännitteenalenevalaskenta

Kaapelin jännitteenalenevalaskenta lasketaan kaavalla (30). Ensin tulee kuitenkin selvittää laskennassa käytettävän kaapelin vaihtovirtaresistanssi ja reaktanssi, jotka löytyvät mm. verkostosuosituksesta SA2:08 ja tämän työn liitteestä 5.

Lasketaan jännitteenalenevalaskenta valaistuskeskuksen 17K lähdölle 17K0501, joka syöttää ryhmäkeskusta 17.20K kaapelilla MCMK 3x75+35, jonka pituus on 100 m.

$$R_j = (0,1 \text{ km} * 0,291 \text{ } \Omega/\text{km}) = 29,1 \text{ m}\Omega$$

$$X_j = (0,1 \text{ km} * 0,075 \text{ } \Omega/\text{km}) = 7,5 \text{ m}\Omega$$

Lähdön kuormitusvirtana I on käytetty 80 A ja $\cos\varphi$ arvona 0,9.

$$\begin{aligned} U_h &= \sqrt{3} \times I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \\ &= \sqrt{3} \times 80 \text{ A}(29,1 \text{ m}\Omega * 0,9 + 7,5 \text{ m}\Omega * \sin(\arccos 0,9)) = 4,08 \text{ V} \end{aligned}$$

Tämä vastaa prosentteina 400 V:n jännitteestä noin 1 prosenttia. Huomioitaessa koko pääkeskuksen 17K kuormitusvirta (n. 2,3 kA), antaa DocWin pääkeskuksen kiskoston jännitteeksi 393,4 V, joten kokonaisjännitteenalenevalaskenta muuntajalta T17 ryhmäkeskukseen 17.20K on $400 \text{ V} - 393,4 \text{ V} + 4,08 \text{ V} = 10,68 \text{ V}$. Tämä on prosentteina 2,67 %.

Liitteen 7 mukainen maksimijännitteenalenevalaskenta pienjänniteasennuksille, joita syötetään yksityisestä teholähteestä, on valaistuskäytölle 6 % ja muulle käytölle 8 %, joten laskettu jännitteenalenevalaskenta on hyvinkin sallituissa rajoissa.

Muuntajien kilpiarvot

Tunnus	S_n [kVA]	Kytk.	U_{1N} [V]		U_{2N} [V]	U_{1N}/U_{2N}	I_{1N} [A]
T11	2000	Dyn11	20 000	$\pm 2 \times 2,5\%$	400	50	57,7
T12	2000	Dyn11	20 000	$\pm 2 \times 2,5\%$	400	50	57,7
T14	2000	Dyn11	20 000	$\pm 2 \times 2,5\%$	400	50	57,74
T15	3500	Yyn0	21 000		710	29,6	96,23
T16	2000	Dyn11	20 000	$\pm 2 \times 2,5\%$	400	50	57,7
T17	2000	Dyn11	20 000	$\pm 2 \times 2,5\%$	400	50	57,74
	I_{2N} [A]	I_{0m} [%]	Z_k [%]	P_{kn} [W]	P_o [W]	Öljy [kg]	Jäähd.
T11	2890	0,5	6,1	16000	2600	1420	ONAN
T12	2890	0,5	6,2	16000	2600	1420	ONAN
T14	2886	0,5	5,9	15366	2196	1020	ONAN
T15	2846	-	6,37	-	-	1950	ONAN
T16	2890	0,6	6,2	16000	2600	1420	ONAN
T17	2886	-	5,8	15366	2196	1020	ONAN

Muuntajien resistanssi- ja reaktanssiarvot (Verkostosuositus SA2:08)

TEHO	R_m		X_m		R_{m0}	X_{m0}
	kVA	%	Ω	%	Ω	Ω
30	3,0	0,160	2,6	0,14	0,070	0,0093
50	2,6	0,083	3,0	0,097	0,087	0,0980
100	2,0	0,031	3,5	0,056	0,033	0,0570
200	1,4	0,011	3,7	0,030	0,012	0,0310
315	1,3	0,0065	4,2	0,021	0,007	0,0220
500	1,1	0,0037	4,4	0,014	0,0041	0,0140
800	0,89	0,0018	4,6	0,0092	0,0021	0,0096
1000	0,92	0,0015	4,9	0,0079	0,0018	0,0083
1250	0,84	0,0011	5,9	0,0076	0,0014	0,0081
1600	0,79	0,0008	5,9	0,0060	0,0011	0,0064
2000	0,73	0,0006	6,0	0,0048	0,0008	0,0052

Johtojen resistanssit ja reaktanssit (Verkostosuositus SA2:08)

JOHTO	R_v (+40 °C) Ω/km	R_0 (+ 40 °C) Ω/km	X_v Ω/km	X_{v0} Ω/km	X_0 Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
Avojohto								
2x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,400	0,000	0,400	1,782	3,411	7,551
4x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,378	0,567	0,396	1,808	3,460	7,657
4x34/6 Al/Fe	0,917	0,917	0,359	0,551	0,377	1,183	2,264	5,012
4x54/9 Al/Fe	0,580	0,580	0,340	0,525	0,358	0,820	1,569	3,473
4x85/14 Al/Fe	0,365	0,365	0,321	0,503	0,337	0,606	1,160	2,566
AMKA								
1x16+25	2,064	1,491	0,090	0,000	0,074	2,101	4,025	8,898
1x25+35	1,297	1,065	0,090	0,000	0,074	1,399	2,677	5,946
3x16+25	2,064	1,491	0,108	0,055	0,074	2,101	4,021	8,902
3x25+35	1,297	1,065	0,106	0,045	0,073	1,404	2,679	5,950
3x35+50	0,938	0,778	0,104	0,045	0,073	1,000	1,914	4,237
3x35+70	0,938	0,533	0,103	0,045	0,072	0,875	1,674	3,706
3x50+70	0,693	0,533	0,101	0,045	0,071	0,730	1,397	3,095
3x70+95	0,479	0,392	0,097	0,045	0,070	0,523	1,000	2,214
3x120+95	0,273	0,392	0,092	0,030	0,078	0,404	0,772	1,707
AMCMK								
3x16+10 Cu	2,064	2,060	0,082	0,082	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10 Cu	1,298	2,060	0,082	0,082	-	1,999	3,803	8,419
3x25+16 Cu	1,298	1,240	0,082	0,082	-	1,503	2,875	6,365
3x35+10 Cu	0,939	2,060	0,082	0,082	-	1,774	3,395	7,514
3x35+16 Cu	0,939	1,240	0,082	0,082	-	1,459	2,455	5,400
3x50+16 Cu	0,694	1,240	0,078	0,078	-	1,144	2,189	4,846
3x70+21 Cu	0,480	0,936	0,075	0,075	-	0,839	1,605	3,551
3x95+29 Cu	0,348	0,691	0,075	0,075	-	0,616	1,179	2,605
3x120+41 Cu	0,276	0,478	0,072	0,072	-	0,449	0,859	1,897
3x150+41 Cu	0,226	0,478	0,072	0,072	-	0,418	0,801	1,767
3x185+57 Cu	0,181	0,345	0,072	0,072	-	0,315	0,603	1,330
3x240+72 Cu	0,140	0,275	0,072	0,072	-	0,248	0,474	1,050
3x300+88 Cu	0,114	0,225	0,069	0,069	-	0,204	0,390	0,864
AURA								
3x50+29 Cu	0,694	0,691	0,078	0,078	-	0,820	1,568	3,472
3x95+57 Cu	0,348	0,345	0,075	0,075	-	0,414	0,795	1,750
3x150+88 Cu	0,226	0,225	0,072	0,072	-	0,268	0,513	1,137
APAKM								
3x35+35	0,941	0,941	0,072	0,072	-	1,114	2,131	4,717
3x70+70	0,479	0,479	0,066	0,066	-	0,568	1,086	2,405
3x120+120	0,278	0,278	0,062	0,062	-	0,331	0,633	1,401
3x185+185	0,183	0,183	0,060	0,060	-	0,214	0,420	0,929
AXCMK								
3x16+10	2,064	2,060	0,078	0,078	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10	1,298	2,060	0,076	0,076	-	1,999	3,803	8,419
3x35+10	0,939	2,060	0,075	0,075	-	1,774	3,394	7,514
3x70+21	0,480	0,936	0,072	0,072	-	0,838	1,694	3,551

JOHTO	R_v (+40 °C) Ω/km	R_0 (+ 40 °C) Ω/km	X_v Ω/km	X_{v0} Ω/km	X_0 Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
3x120+41	0,276	0,478	0,069	0,069	0,001	0,448	0,858	1,899
3x185+57	0,181	0,345	0,069	0,069	0,001	0,314	0,602	1,332
3x300+88	0,114	0,225	0,069	0,069	0,001	0,204	0,390	0,864
AXMK								
4x16 S	2,064	2,064	0,091	0,091	0,091	2,970	4,675	10,35
4x25 S	1,298	1,298	0,088	0,088	0,088	1,537	2,942	6,514
4x35 S	0,939	0,939	0,088	0,088	0,088	1,115	2,134	4,725
4x50 S	0,694	0,694	0,087	0,087	0,087	0,826	1,581	3,499
4x70 S	0,480	0,480	0,085	0,085	0,085	0,576	1,103	2,442
4x95 S	0,348	0,348	0,084	0,084	0,084	0,428	0,819	1,813
4x120 S	0,276	0,276	0,082	0,082	0,082	0,342	0,654	1,447
4x150 S	0,226	0,226	0,082	0,082	0,082	0,278	0,533	1,181
4x185 S	0,181	0,181	0,082	0,082	0,082	0,236	0,452	1,000
4x240 S	0,140	0,140	0,079	0,079	0,079	0,191	0,366	0,810
4x300 S	0,114	0,114	0,079	0,079	0,079	0,166	0,318	0,703
MCMK								
3x2,5+2,5	7,992	7,992	0,115	0,115	-	8,999	17,221	-
3x6+6	3,322	3,322	0,115	0,115	-	3,867	7,401	16,381
3x10+10	1,974	1,974	0,110	0,110	-	2,307	4,415	9,774
3x16+16	1,240	1,240	0,088	0,088	-	1,467	2,808	6,216
3x25+16	0,786	1,240	0,082	0,082	-	1,198	2,293	5,077
3x35+16	0,566	1,240	0,077	0,077	-	1,069	2,046	4,531
3x50+25	0,419	0,786	0,076	0,076	-	0,719	1,375	3,045
3x70+35	0,291	0,566	0,075	0,075	-	0,509	0,975	2,158
3x95+50	0,211	0,419	0,074	0,074	-	0,397	0,759	1,681
3x120+70	0,168	0,291	0,074	0,074	-	0,275	0,527	1,167
3x150+70	0,138	0,291	0,073	0,073	-	0,255	0,488	1,080
3x185+95	0,112	0,211	0,072	0,072	-	0,195	0,373	0,827
3x240+120	0,087	0,168	0,072	0,072	-	0,157	0,301	0,666
MMJ								
2x6	3,322	3,322	-	-	-	3,867	7,415	16,381
2x10	1,974	1,974	-	-	-	2,307	4,415	9,774
4x6	3,322	3,322	0,115	0,115	0,115	3,867	7,401	16,381
4x10	1,974	1,974	0,110	0,110	0,110	2,307	4,415	9,774
4x16	1,240	1,240	0,088	0,088	0,088	1,467	2,808	6,216
PLKVJ								
3x10+10	1,950	1,950	0,110	0,110	0,110	2,213	4,424	9,784
3x16+16	1,230	1,230	0,105	0,105	0,105	1,464	2,803	6,184
3x25+16	0,787	1,230	0,094	0,094	0,094	1,200	2,297	5,074
3x35+16	0,568	1,230	0,094	0,094	0,094	1,071	2,050	4,528
3x50+25	0,420	0,787	0,088	0,088	0,088	0,721	1,380	3,055
3x70+35	0,292	0,568	0,088	0,088	0,088	0,519	0,993	2,199
3x95+50	0,212	0,420	0,085	0,085	0,085	0,387	0,741	1,639
3x120+70	0,169	0,292	0,085	0,085	0,085	0,291	0,556	1,231

20 kV kaapelien johtotietoja (Verkostusuositus SA5:94)

Johtolin	Vaiheresistanssi R _v Ω/km		Vaihe- reaktanssi X _v Ω/km	Maakaape- litanssi C _m μF/km	Käyttökä- peitanssi C _k μF/km	Suurin sallittu kuormitusvirta I _n A		Suurin sallittu olokoskuväri I _k kA		Jäähdytys- aikaväli t min	Määräku- virta I _s A
	+20 °C 1) +40 °C 2)	inassa 3)				inassa 4)	T1-säiliöt	T2-säiliöt			
AHMCNK 3x70	0,444	0,480	0,116	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	35	2,1
AHMCNK 3x120	0,254	0,274	0,107	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	35	2,4
AHMCNK 3x185	0,165	0,178	0,097	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	80	2,7
AHMCNK 3x300	0,103	0,111	0,091	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	105	3,2
AHMDMK 3x70	0,446	0,482	0,127	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	30	2,1
AHMDMK 3x120	0,256	0,277	0,111	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	50	2,4
AHMDMK 3x185	0,169	0,183	0,100	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	75	2,7
AHMDMK 3x300	0,105	0,113	0,101	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	100	3,2
AHXAMK-W 3x70	0,446	0,482	0,138	0,18	0,18	235	200	5,7	5,7	42	2,1
AHXAMK-W 3x120	0,256	0,277	0,129	0,23	0,23	325	265	9,8	11,4	47	2,6
AHXAMK-W 3x185	0,169	0,183	0,119	0,25	0,26	425	330	15	17,5	53	3,0
AHXAMK-W 3x240 + 70	0,130	0,140	0,116	0,30	0,30	510	375	19,4	22,6	60	3,4
AHXAMK-W 3x300	0,106	0,115	0,113	0,32	0,32	585	435	24,2	28,2	65	3,7
AHXCNK 3x1x70	0,456	0,493	0,190	0,18	0,18	255	215	5,7	6,7	25	2,1
AHXCNK 3x1x120	0,266	0,287	0,180	0,23	0,23	350	280	9,8	11,4	30	2,6
AHXCNK 3x1x185	0,184	0,199	0,172	0,26	0,26	440	350	15	17,5	35	3,0
AHXCNK 3x1x300	0,120	0,130	0,163	0,32	0,32	580	440	24,2	28,2	44	3,7
AHXCNK 3x1x500	0,088	0,095	0,157	0,39	0,39	755	550	40,3	47	55	4,5
AHXCNK 3x1x800	0,073	0,079	0,164	0,49	0,49	950	650	63,9	74,4	67	5,6
AHXCNK 3x70	0,445	0,482	0,132	0,18	0,18	190	175	5,7	6,7	45	2,1
AHXCNK 3x120	0,255	0,277	0,121	0,23	0,23	265	230	9,8	11,4	65	2,6
AHXCNK 3x185	0,169	0,183	0,114	0,26	0,26	340	290	15	17,5	84	3,0
AHXCNK 3x300	0,106	0,115	0,107	0,32	0,32	460	380	24,2	28,2	90	3,7
APYAKMM 3x25	1,21	1,31	0,145	0,20	0,20	85	94	2,3	2,5	18	2,3
APYAKMM 3x35	0,876	0,947	0,138	0,22	0,22	105	115	3,3	3,7	20	2,5
APYAKMM 3x50	0,649	0,701	0,131	0,25	0,25	125	140	4,6	5,25	25	2,9
APYAKMM 3x70	0,451	0,487	0,124	0,29	0,29	155	170	6,5	7,3	30	3,3
APYAKMM 3x95	0,329	0,356	0,118	0,32	0,32	190	205	8,7	9,9	40	3,7
APYAKMM 3x120	0,262	0,283	0,115	0,35	0,35	210	225	11	12,5	50	4,0
APYAKMM 3x150	0,215	0,233	0,111	0,38	0,38	240	255	13,7	15,6	60	4,3
APYAKMM 3x185	0,175	0,189	0,107	0,41	0,41	270	290	16,9	19,2	65	4,7
APYAKMM 3x240	0,138	0,149	0,104	0,45	0,45	315	335	21,9	24,8	80	5,1
APYAKMM 3x300	0,114	0,123	0,101	0,49	0,49	360	375	27,3	31	90	5,6

Johdin	Välhesiirtenssi		Vähe- reaktanssi Xv Ω/ km	Maska- sitanssi Cm μf/km	Käyttökä- sitanssi Ck μf/km	Suurin sallittu luomitusvä- ri		Suurin sallittu 1 s oksoosivä- ri		Jäähymis- aika vä- ri min	Massa- v- ri le A 5)
	+20 °C 1)	+40 °C 2)				in A	Ik kA	Ik kA	T2-tilinaiset		
HMCMK 3x25	0,728	0,785	0,135	0,14	0,14	140	145	2,95	2,95	18	1,6
HMCMK 3x35	0,525	0,566	0,129	0,15	0,15	165	175	4,1	4,1	20	1,7
HMCMK 3x50	0,388	0,418	0,119	0,17	0,17	205	215	5,8	5,8	25	1,9
HMCMK 3x70	0,269	0,290	0,116	0,18	0,18	250	260	8,1	8,1	28	2,1
HMCMK 3x95	0,194	0,209	0,110	0,20	0,20	295	310	11	11	33	2,3
HMCMK 3x120	0,155	0,167	0,107	0,21	0,21	340	350	13,8	13,8	35	2,4
HMCMK 3x150	0,126	0,136	0,101	0,23	0,23	390	400	17,2	17,2	40	2,6
HMCMK 3x185	0,102	0,110	0,097	0,24	0,24	435	440	21,2	21,2	45	2,7
HMCMK 3x240	0,078	0,084	0,094	0,26	0,26	515	510	27,4	27,4	48	3,0
HPLKVJ 3x25	0,732	0,790	0,148	0,19	0,19	105	120	3,6	4,6	20	2,2
HPLKVJ 3x35	0,529	0,571	0,138	0,21	0,21	135	150	5	5,6	25	2,4
HPLKVJ 3x50	0,392	0,423	0,129	0,23	0,23	160	175	7,1	8,6	35	2,6
HPLKVJ 3x70	0,274	0,296	0,123	0,26	0,26	200	220	9,8	11,1	45	3,0
HPLKVJ 3x95	0,199	0,215	0,116	0,29	0,29	240	260	13,3	15	55	3,3
HPLKVJ 3x120	0,160	0,173	0,112	0,32	0,32	275	300	16,8	19	70	3,7
HPLKVJ 3x150	0,131	0,141	0,107	0,34	0,34	315	335	20,9	23,7	80	3,9
HPLKVJ 3x185	0,107	0,115	0,104	0,37	0,37	360	380	25,8	29,1	85	4,2
HPLKVJ 3x240	0,084	0,091	0,101	0,41	0,41	415	440	33,3	37,7	90	4,7
HPLKVJ 3x300	0,070	0,076	0,098	0,45	0,45	470	495	41,6	47,1	100	5,1
HXCMK 3x1x35	0,537	0,579	0,204	0,15	0,15	215	185	4,4	5,1	20	1,7
HXCMK 3x25	0,527	0,568	0,150	0,15	0,15	165	140	4,4	5,1	35	1,7
HXCMK 3x185	0,104	0,112	0,116	0,28	0,28	435	360	22,9	26,7	70	3,0
PYLKVJ 3x25	0,732	0,790	0,157	0,19	0,19	105	120	3,6	4	20	2,2
PYLKVJ 3x35	0,530	0,572	0,149	0,21	0,21	135	150	5	5,6	25	2,4
PYLKVJ 3x50	0,393	0,424	0,140	0,23	0,23	160	175	7,1	8	35	2,6
PYLKVJ 3x70	0,275	0,297	0,132	0,26	0,26	200	220	9,8	11,1	45	3,0
PYLKVJ 3x95	0,201	0,217	0,127	0,29	0,29	240	260	13,3	15	55	3,3
PYLKVJ 3x120	0,162	0,175	0,123	0,32	0,32	275	300	16,8	19	70	3,7
PYLKVJ 3x150	0,134	0,145	0,119	0,34	0,34	315	335	20,9	23,7	80	3,9
PYLKVJ 3x185	0,110	0,119	0,116	0,37	0,37	360	380	25,8	29,1	85	4,2
PYLKVJ 3x240	0,089	0,096	0,113	0,41	0,41	415	440	33,3	37,7	90	4,7
PYLKVJ 3x300	0,076	0,082	0,110	0,45	0,45	475	495	41,6	47,1	100	5,1

Suositellut jänniteenalenemat (SFS 6000, 2012)

Asennuksen tyyppi	Valaistus %	Muu käyttö %
A – Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B – Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä teholähteestä*	6	8
<p>* Suositellaan, että niin pitkälle kuin mahdollista ryhmäjohtojen jänniteenalenema ei ylitä asennustypille A annettuja arvoja.</p> <p>Kun asennuksen pääjohdot ovat pitempiä kuin 100 m, näitä jänniteenalenemia voidaan kasvattaa 0,005 % johdon 100 m ylittävän pituuden metriä kohti. Ilman tätä lisäystä se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.</p> <p>Jänniteenalenema määritellään sähkölaitteen tehontarpeen mukaan käyttäen soveltuvin osin tasoituskertoimia, tai käyttäen piirien suunniteltuja virtoja.</p>		

