

**TEOLLISUUSVERKKOJEN
OIKOSULKUVIRTOJEN LASKEMINEN**

Kari Huotari, Jarmo Partanen

1998

ISBN 951-764-282-2

ISSN 1455-8513

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

UDK 621.316.1:621.316.925

**TEOLLISUUSVERKKOJEN OIKOSULKUVIRTOJEN
LASKEMINEN**

Kari Huotari

Jarmo Partanen

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu

1998

ISBN 951-764-282-2

ISSN 1455-8513

Opetusmoniste 3

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
Sähkötekniikan osasto, Sähkötekniikan laitos

Kari Huotari, Jarmo Partanen

Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen

LTKK, Sähkötekniikan osasto, joulukuu 1998

Opetusmoniste 3

ISBN 951-764-282-2

ISSN 1455-8513

UDK 621.316.1:621.316.925

Hakusanat: Teollisuusverkko, oikosulkuvirta

Tässä opetusmonisteessa käsitellään oikosulkuvirran sekä oikosulkusuojauksessa ja laitteiden mitoituksessa tarvittavien oikosulkusuureiden laskemista käytännön tarpeiden vaatimassa laajuudessa. Erityistä huomiota on kiinnitetty teollisuusverkon oikosulkukysymyksiin. Opetusmonisteessa on esitetty erään teollisuusverkon oikosulkusuojien asetteluperiaatteita sekä laskentaesimerkki oikosulkuvirtojen laskemisesta.

Lappeenrannassa 14.12.1998

Kari Huotari, Jarmo Partanen

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

F	vikapaikka
G	generaattori
$I_{>>}$	ylivirtareleen pikalaukaisun virta-asettelu
$I_{>}$	ylivirtareleen aikalaukaisun virta-asettelu
I_m	pienjännitepääkeskuksen pääkatkaisijan pikalaukaisun virta-asettelu
I_r	pienjännitepääkeskuksen pääkatkaisijan aikalaukaisun virta-asettelu
K	kytkin
M	muuntaja
T	muuntaja
$t_{>>}$	ylivirtareleen pikalaukaisun aika-asettelu
$t_{>}$	ylivirtareleen aikalaukaisun aika-asettelu
c	sähkömotorististen voimien ja verkon nimellisjännitteen eron huomioiva kerroin
$\cos \varphi$	sinimuotoisen sähkön tehokerroin
E''	alkutilan sähkömotorinen voima
E'	muutostilan sähkömotorinen voima
E	pysyvän tilan sähkömotorinen voima
I	virta
I_a	katkaisuvirta
i_{dc}	oikosulkuvirran tasavirtakomponentti
I_k, i_k	pysyvän tilan oikosulkuvirta, oikosulkuvirta yleensä
P'_k	alkuoikosulkuvirta
P_k	muutosoikosulkuvirta
P_{kpjmin}	pienjännitepuolen pienin hetkellinen oikosulkuvirta
P_{kpjmax}	pienjännitepuolen suurin hetkellinen oikosulkuvirta
P_{ksjmin}	suurjännitepuolen pienin hetkellinen oikosulkuvirta
I_n	nimellisvirta
i_s	sysäysoikosulkuvirta
I_{th}	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
L	induktanssi
l	kaapelin pituus
m	moottorin nimellispätöteho napaparia kohti, tasavirtatekijä
n	vaihtovirtatekijä
p	napapariluku, suuntaajan pulssiluku
P_{kn}	muuntajan kuormitushäviöteho nimellisvirralla
P_n	nimellinen pätöteho
q	epätahtimoottorin katkaisukerroin
R	resistanssi
r	kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohti
S	syöttävä verkko
S''_k	alkuoikosulkuteho

S_n	nimellinen näennäisteho
t	aika
t_k	oikosulun kesto aika
$t_{\min}$	katkaisuviive
u	jännite
u_k	suhteellinen oikosulkujännite
U_n	nimellisjännite
U_{nv}	nimellinen vaihejännite
u_r	suhteellinen oikosulkuresistanssi
X	reaktanssi
x	kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti, suhteellinen reaktanssi
X''_d	pitkittäinen alkureaktanssi
X'_d	pitkittäinen muutosreaktanssi
Z	impedanssi
Z_t	Theveninin impedanssi
Z_0	nollaimpedanssi
Z_1	myötäimpedanssi
Z_2	vastaimpedanssi
$\hat{u}$	jännitteen huippuarvo
α	jännitteen vaihekulma
ω	kulmataajuus
φ	vaihekulma
τ	aikavakio
κ	sysäyskerroin
τ''	alkuaikavakio
τ'	muutosaikavakio
τ''_{d0}	tyhjäkäyntitilan alkuaikavakio
τ'_{d0}	tyhjäkäyntitilan muutosaikavakio
μ	tahtikoneen katkaisukerroin, virtamuuntajan muuntosuhde
$\lambda_{\max}$	kerroin, joka määrittelee tahtikoneen maksimimagnetoinnin
$\lambda_{\min}$	kerroin, joka määrittelee tahtikoneen minimimagnetoinnin

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	i
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	ii
SISÄLLYSLUETTELO	iv
 1 JOHDANTO	 1
2 OIKOSULKUVIRRRAN TEOREETTINEN TARKASTELU	2
2.1 Oikosulkuvirran luonne /1/, /3/, /9/	2
2.2 Oikosulkuvirran vaimeneminen /1/, /4/, /8/, /9/	4
2.2.1 Tasavirtakomponentin vaimeneminen.....	4
2.2.2 Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen	5
3 OIKOSULKUVIRRRAN LASKEMINEN /1/, /9/	8
3.1 Theveninin menetelmä.....	8
3.2 Vikatapaukset /3/, /9/	9
3.3 Eri vikatapauksen oikosulkuvirtojen vertailu /9/.....	10
4 OIKOSULKUPIIRIN KOMPONENTTIEN IMPEDANSSIT /1/, /3/, /6/, /9/	15
4.1 Syöttävä verkko	15
4.2 Tahtikoneet	17
4.3 Kaksikämmimuuntajat ja kuristimet	18
4.4 Epätahtimoottorit	19
4.5 Kaapelit, johdot ja kiskot.....	20
4.6 Verkon muu kuormitus	21
4.7 Vikaimpedanssit	22
5 SÄHKÖVERKON OIKOSULKUSUOJAUKSESSA JA MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT OIKOSULKUSUUREET /1/, /2/, /9/	23
5.1 Alkuoikosulkuvirta I_k	23
5.2 Sysäysoikosulkuvirta i_s	23
5.3 Pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k	25
5.4 Katkaisuvirta I_a	26
5.5 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}	29
6 OIKOSULKUSUOJAUS	31
6.1 Releasettelut.....	31
6.1.1 Aikalaukaisu	31
6.1.2 Pikalaukaisu.....	32
6.1.3 Oikosulkumoottorin käynnistysvirtasysäys	32
6.1.4 Muuntajan kytkentävirtasysäys	33
6.2 Esimerkkejä oikosulkusuojien releasetteluista	34
6.2.1 Jakelumuuntajat ja pienjännitepääkeskukset	34
6.2.2 Alakytinlaitokset ja niiden syöttöjohdot.....	38
6.2.3 Ulkoverkon liityntäpiste ja generaattori	41
LÄHDELUETTELO	45
 LIITE 1, Esimerkkilaskelma	

1 JOHDANTO

Oikosulkuvirtojen hallinnalla on keskeinen merkitys erityisesti teollisuuden sähkönjakeluverkoissa, joissa etäisyydet ovat lyhyitä ja oikosulkuvirrat kaikkialla suuria. Teollisuuslaitosten jakeluverkkoihin on yleensä liitetty suuria muuntajia, omia generaattoreita ja paljon muita pyöriviä sähkömoottoreita, minkä takia oikosulkuvirrat pyrkivät kasvamaan suuriksi. Toisaalta oikosulkuvirtojen olisi oltava mahdollisimman pieniä turvallisen toiminnan takaamiseksi ja vaurioiden välttämiseksi.

Sähkönjakeluverkon kaikkien osien on kestävä oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset (mekaaniset) vaikutukset. Niiden määrittämistä ja oikosulkusuojausten suunnittelua varten on tunnettava oikosulkuvirtojen suuruus verkon eri osissa. Suojauksen kannalta on tärkeää tuntea oikosulkuvirtojen suuruus nykyhetkellä erilaisissa syöttötilanteissa.. Mitoituksen kannalta on oikosulkuvirtojen määrittämisessä otettava huomioon tulevaisuudessa tapahtuva kehitys /1/.

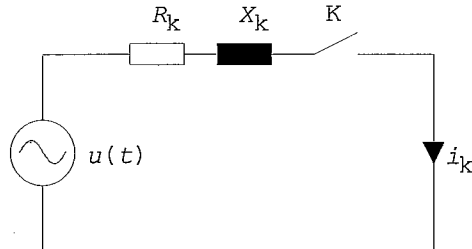
Oikosulkujen aiheuttajana saattaa olla eristyksen vanheneminen ja mekaaninen haurastuminen, korjaus- ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä asetettujen maadoitusten unohtuminen paikalleen, ylijännitteen aiheuttama valokaari eristysvälin ylitse, mekaaninen vaurio, virheelliset käyttötoimenpiteet (virheellinen tahdistus tai kuormitusvirran katkaiseminen erottimella) ja ilkivalta /2/.

Seuraavassa esitetään oikosulun ja oikosulkulaskennan perusteoriaa sekä esimerkkejä säteettäisen teollisuusverkon oikosulkuvirtojen laskemisesta ja oikosulkusuojiin asetteluarvojen määrittämisestä.

2 OIKOSULKUVIRRAN TEOREETTINEN TARKASTELU

2.1 Oikosulkuvirran luonne /1/, /3/, /9/

Tarkastellaan oikosulkuvirran syntymistä kuvan 2.1 mukaisen yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Kytkimen K sulkeutuminen vastaa oikosulkua kyseisessä kohdassa.



Kuva 2.1 Oikosulkupiirin yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa ei ole kuormitusta.

Syöttöjännite olkoon $u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi)$. Tällöin kuvan 2.1 piirille voidaan kirjoittaa differentiaaliyhtälö /1/

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.1)$$

Yhtälöstä 2.1 saadaan oikosulkuvirraksi ratkaistua /1/

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (2.2)$$

jossa

$\hat{u}$ 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 vaiheimpedanssi Z_k , vaihekulma φ_k ja aikavakio τ määritellään oikosulkupiirin resistanssin R_k ja reaktanssin X_k avulla seuraavasti [3/

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (2.3)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (2.4)$$

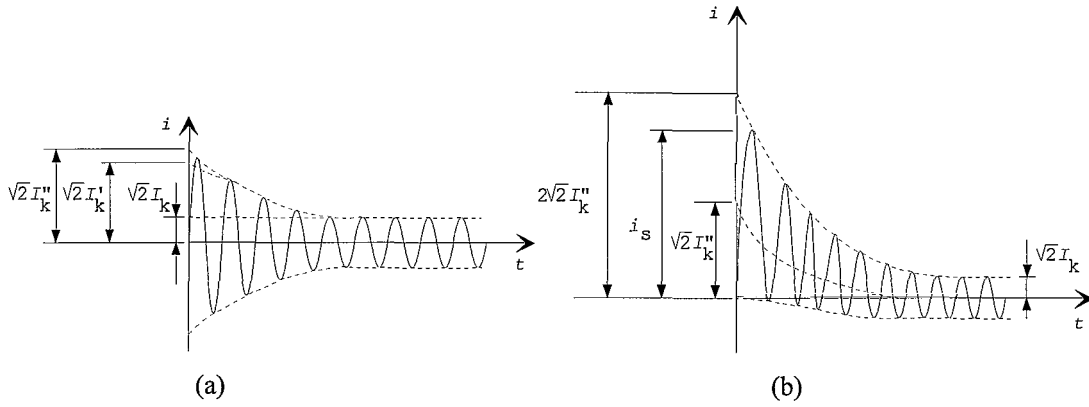
$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (2.5)$$

Yhtälön (2.2) ensimmäinen termi on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti. Jälkimmäinen termi on oikosulkuvirran tasavirtakomponentti, joka vaimenee aikavakioilla τ . Tasavirtakomponentti pakottaa oikosulkuvirran hetkellisarvon alkutilanteessa vikaa edeltäneen virran suuruiseksi. Koska kuvassa 2.1 ei ole kuormitusta, vikaa edeltänyt virta on nolla. Näin ollen tasa- ja vaihtovirtakomponentit ovat alussa yhtäsuuria, mutta vastakkaismerkkisiä.

Oikosulun syntyhetkellä on suuri vaikutus tasavirtakomponentin suuruuteen. Kun oikosulku tapahtuu hetkellä, jolloin $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° , ei tasavirtakomponenttia esiinny ollenkaan. Tällöin oikosulkuvirta on täysin symmetrinen, kuva 2.2a. Kolmi-vaihejärjestelmässä on muistettava, että oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan.

Kytettäessä muulla hetkellä on oikosulkuvirta tasavirtakomponentin takia epäsymmetrinen. Kun kytkentä tapahtuu hetkellä, jolloin $\alpha - \varphi_k = \pm 90^\circ$, on tasavirtakomponentilla suurin mahdollinen alkuarvo ja oikosulkuvirta on tällöin mahdollisimman epäsymmetrinen, kuva 2.2b.

Oikosulkuvirta saavuttaa suurimman huippuarvonsa noin 10 ms kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Tätä suurinta huippuarvoa sanotaan sysäys-oikosulkuvirraksi i_s . Kuten kuvasta 2.2 havaitaan, on oikosulun syntyhetkellä suuri vaikutus sysäys-oikosulkuvirran suuruuteen.



Kuva 2.2 Tahtigeneraattorin syöttämä oikosulkuvirta eri oikosulun syntyhetkillä: (a) symmetrinen oikosulkuvirta; (b) epäsymmetrinen oikosulkuvirta. Kuvassa 2.2 I_k'' on alkuoikosulkuvirta, I_k' on muutosoikosulkuvirta, I_k on jatkuvan tilan oikosulkuvirta ja i_s on oikosulkuvirran huippuarvo eli syysäysoikosulkuvirta.

Kolmivaiheisten oikosulkuvirtojen muodostumista ei tässä tarkastella. Todettakoon vain, että symmetrinen kolmivaihejärjestelmä voidaan jakaa kolmeen kuvitteelliseen yksivaiheiseen piiriin. Tällöin eri vaiheiden oikosulkuvirrat voidaan esittää yhtälöillä /3/

$$i_{Rk}(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right] \quad (2.6)$$

$$i_{Sk}(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha + 240^\circ - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha + 240^\circ - \varphi_k) \right] \quad (2.7)$$

$$i_{Tk}(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi_k) \right] \quad (2.8)$$

joissa merkinnät samat kuin yhtälössä (2.2).

2.2 Oikosulkuvirran vaimeneminen /1/, /4/, /8/, /9/

2.2.1 Tasavirtakomponentin vaimeneminen

Oikosulkuvirran tasavirtakomponentti vaimenee verkon rakenteesta riippuvan tasavirta-aikavakion τ mukaan. Oletetaan kuvan 2.1 tapauksessa impedanssin Z_k muodostuvan tahtikoneen ja verkon muiden komponenttien summasta. Tällöin tasavirta-aikavakio voidaan esittää muodossa /9/

$$\tau = \frac{X_d'' + X_n}{\omega(R_d + R_n)} \quad (2.9)$$

jossa

X_d'' on generaattorin alkureaktanssi

X_n on generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi

R_d on generaattorin resistanssi

R_n on generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi

ω on kulmataajuus

2.2.2 Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen

Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti vaimenee myös, mikäli tahti- tai epätahtikoneiden syöttämä oikosulkuvirta muodostaa merkittävän osan kokonaisuikosulkuvirrasta. Vaimeneminen johtuu koneiden sisäisen impedanssin kasvamisesta oikosulun kestoaikana.

Oletetaan edelleen kuvan 2.1 sijaiskytkennän impedanssin Z_k muodostuvan tahtikoneen ja verkon muiden komponenttien summasta. Tällöin oikosulkuvirta voidaan esittää muodossa /9/

$$i(t) = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + I_k'' e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (2.10)$$

jossa

I_k'' on alkuoikosulkuvirta

I_k' on muutosoikosulkuvirta

I_k on jatkuvan tilan oikosulkuvirta

τ'' on oikosulkuvirran alkuaikavakio

τ' on oikosulkuvirran muutosaikavakio

Yhtälön (2.10) oikosulkuvirroilla I_k'' , I_k' ja I_k tarkoitetaan, kuvan 2.2 mukaisesti, niiden oikosulun alkuhetkeen ekstrapoloituja tehollisarvoja. Niiden arvot voidaan laskea yhtälöillä /9/

$$I_k'' = \frac{E''}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d'' + X_n)^2}} \quad (2.11)$$

$$I_k' = \frac{E'}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d' + X_n)^2}} \quad (2.12)$$

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d + X_n)^2}} \quad (2.13)$$

joissa

E'' on generaattorin alkutilan sähkömotorinen voima

E' on generaattorin muutostilan sähkömotorinen voima

E on generaattorin pysyvän tilan sähkömotorinen voima

X_d'' on generaattorin alkureaktanssi

X_d' on generaattorin muutosreaktanssi

X_d on generaattorin pysyvän tilan reaktanssi

R_d on generaattorin resistanssi

R_n on generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi

X_n on generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi

Generaattorin sähkömotoristen voimien $\underline{E''}$, $\underline{E'}$ ja $\underline{E}$ suuruudet riippuvat generaattorin kuormitusvirran suuruudesta juuri ennen oikosulun syntyä seuraavien yhtälöiden mukaisesti /3/

$$\underline{E''} = \underline{U}_{ng} + jX_d'' \underline{I} \quad (2.14)$$

$$\underline{E'} = \underline{U}_{ng} + jX_d' \underline{I} \quad (2.15)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_{ng} + jX_d \underline{I} \quad (2.16)$$

joissa

$\underline{U}_{ng}$ on tahtikoneen nimellinen vaihejännite

$\underline{I}$ on tahtikoneen kuormitusvirta ennen oikosulkua

Tyhjäkäynnissä olevalle generaattorille pätee /9/

$$E'' = E' = E = \frac{U_{ng}}{\sqrt{3}} \quad (2.17)$$

Oikosulkuvirran vaihtokomponentin aikavakiot määritellään seuraavasti /3/

$$\tau'' = \frac{X_d'' + X_n}{X_d' + X_n} \tau_{d0}'' \quad (2.18)$$

$$\tau' = \frac{X_d' + X_n}{X_d + X_n} \tau_{d0}' \quad (2.19)$$

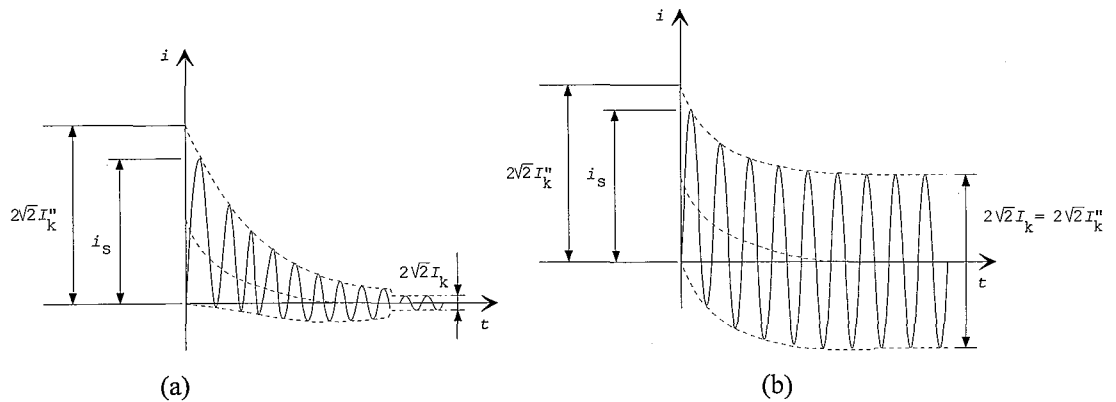
joissa

τ_{d0}'' on tyhjäkäyntitilan alkuaikavakio

τ_{d0}' on tyhjäkäyntitilan muutosaikavakio

Kun generaattorin ja vikapaikan välinen impedanssi tulee suureksi generaattorin impedanssiin verrattuna, ei generaattorin impedanssin muuttumisella oikosulun aikana ole sanottavaa merkitystä virtapiirin kokonaisimpedanssin kannalta. Tällöin yhtälöiden (2.11)-(2.13) perusteella tulevat oikosulkuvirrat I_k'' , I_k' ja I_k yhtäsuuriksi eli oikosulkuvirran vaihtokomponentti ei vaimene.

Oikosulun sattuessa lähellä generaattoria, vaimenee oikosulkuvirran vaihtokomponentti eksponentiaalisesti aikavakioilla τ'' ja τ' kohti pysyvän tilan arvoja. Kuvassa 2.3 on esitetty vikapaikan vaikutus epäsymmetriseen oikosulkuvirtaan.



Kuva 2.3 Epäsymmetrinen oikosulkuvirta: (a) oikosulku lähellä generaattoria; (b) oikosulku kaukana generaattorista.

3 OIKOSULKUVIRRAN LASKEMINEN /1/, /9/

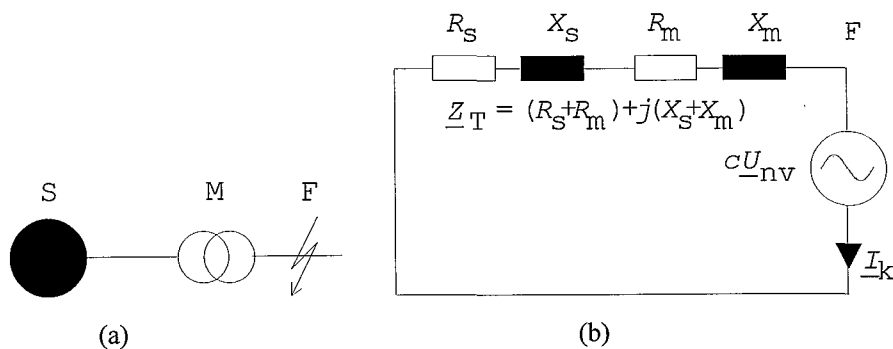
Laskettaessa likimääräistä kolmivaiheverkon kolmivaiheista oikosulkuvirtaa on ominaisoikosulkutehoon perustuva menetelmä helppokäyttöisin. Tämä menetelmä sopii hyvin säteittäisten verkkojen oikosulkutehojen käsinlaskentaan ja oikosulkuvirtojen suuruusluokka-arviointiin. Mikäli halutaan laskea oikosulkuvirrat tarkemmin ja saada selville myös vaihekulmat, on käytettävä Theveninin menetelmää.

Seuraavassa esitellään Theveninin menetelmän periaate. Ominaisoikosulkutehoon perustuvaa menetelmää ei tässä käsitellä, vaan sen osalta viitataan vain lähteeseen /5/, jossa sitä on esitelty.

3.1 Theveninin menetelmä

Theveninin menetelmä soveltuu hyvin teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen määrittämiseen, koska teollisuussähköverkkojen oikosulkutapauksissa muodostuu vikapaikassa kulkeva virta useiden eri oikosulkulähteiden syöttämien oikosulkuvirtojen summana. Tällöin Theveninin teoreeman nojalla voidaan kaikkien oikosulkulähteiden sähkömotoriset voimat korvata yhdellä ainoalla sähkömotorisella voimalla, joka sijoitetaan vikapaikkaan.

Tarkastellaan tilannetta kuvan 3.1 mukaisen yksinkertaisen verkon avulla.



Kuva 3.1 Theveninin menetelmän periaate oikosulkulaskennassa: (a) tarkasteltava piiri. Kolmivaiheinen vastukseton oikosulku pisteessä F; (b) tilannetta vastaava yksivaiheinen sijaiskytkentä. S on syöttävä verkko, R_S syöttävän verkon oikosulkuresistanssi, X_S syöttävän verkon oikosulkureaktanssi, M muuntaja, R_m muuntajan oikosulkuresistanssi ja X_m muuntajan oikosulkureaktanssi. $\underline{Z}_T$ on edellisistä muodostettu Theveninin impedanssi.

Kuvassa 3.1a esitettyssä verkossa tapahtuu vastukseton kolmivaiheinen oikosulku pisteessä F. Tilannetta vastaavan sijaiskytkennän (kuva 3.1b) perusteella voidaan oikosulkuvirta määrittellä seuraavasti /9/

$$\underline{I}_k = \frac{c \underline{U}_{nv}}{\underline{Z}_T} \quad (3.1)$$

jossa

$\underline{U}_{nv}$ on verkon nimellisvaihejännite

$\underline{Z}_T$ on Theveninin jännitelähteen navoista mitattu impedanssi vikapaikan jännitetasoon redusoituna

c on jännitekerroin, jolla otetaan huomioon sähkömotoristen voimien ja verkon nimellisjännitteen ero (taulukko 3.1)

Theveninin impedanssia $\underline{Z}_T$ laskettaessa kaikki vikavirtaa syöttävät lähteet sekä verkon muut komponentit korvataan oikosulkuimpedansseillaan.

Vikapaikkaan sijoitettavan jännitteen $\underline{U}_{nv}$ kerroin c saadaan taulukosta 3.1 /6/.

Taulukko 3.1 Jännitekerroin c standardin VDE 0102 mukaan.

Nimellisjännite $\underline{U}_n$	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{maks}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite 100 V - 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

3.2 Vikatapaukset /3/, /9/

Kolmivaiheinen eli symmetrinen oikosulku on oikosulkulaskujen perustapaus, koska tällöin esiintyy vain myötäimpedansseja eli kolmivaiheverkon komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. Sen sijaan epäsymmetrisiä oikosulkutapauksia laskettaessa joudutaan verkon eri osille muodostamaan myös niiden vasta- ja nollaimpedanssit.

Seuraavissa kohdissa ei käsitellä epäsymmetristen vikatapausten teoreettista laskentaa, vaan tyydytään antamaan eri vikatapausten valmiit laskentayhtälöt. Asiaa on perusteellisesti käsitelty esimerkiksi lähteessä /3/.

Kolmi-, kaksi- ja yksivaiheiset oikosulkuvirrat voidaan laskea yhtälöillä /3/

$$I_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_1} \quad (3.2)$$

$$I_{k2} = \frac{cU_N}{Z_1 + Z_2} \quad (3.3)$$

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3.4)$$

joissa

c on taulukon 3.1 mukainen jännitekerroin

U_N on vikapaikan nimellispääjännite

Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi

Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi

Z_0 on oikosulkupiirin nollaimpedanssi

3.3 Eri vikatapausten oikosulkuvirtojen vertailu /9/

Yleensä ei ole tarpeen laskea kaikkien vikatapausten oikosulkuvirtoja. Verkon ja kytkinlaitteiden mitoituksen tarkistamiseksi riittää, kun tunnetaan suurimmat verkossa esiintyvät oikosulkuvirrat. Toisaalta oikosulkusuojauksen toiminnan varmistamiseksi on tunnettava pienimmät verkon oikosulkuvirrat.

Teollisuussähköverkot ovat yleensä mm. käyttövarmuussyistä maasta erotettuja, jolloin verkon oikosulkutapaukset rajoittuvat kaksi- ja kolmivaiheisiin oikosulkuihin. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} voidaan esittää kolmivaiheisen oikosulkuvirran I_{k3} avulla seuraavasti /9/

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} \cdot I_{k3} \quad (3.5)$$

jossa

Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi

Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi

Jotta kaksivaiheinen oikosulkuvirta olisi suurempi kuin kolmivaiheinen, täytyy seuraavan ehdon olla voimassa: $Z_2 < 0,73 \cdot Z_1$. Tämä edellyttää, etteivät impedanssien vaihekulmat poikkea enempää kuin 15° toisistaan.

Vastaimpedanssit ja myötäimpedanssit ovat yhtäsuuret muuntajilla, johdoilla ja ei pyörivillä kojeilla. Myös epätahtimoottoreilla ne ovat samansuuruiset. Sen sijaan tahtikoneilla vastaimpedanssit eroavat myötäimpedansseista.

Tahtikoneen vastaimpedanssi on oikosulun alkuhetkillä tahtikoneen myötäimpedanssin suuruinen, jolloin koko oikosulkupiirin myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtäsuuret. Tahtikoneen myötäreaktanssi kasvaa kuitenkin oikosulun kestoaikana saavuttaen lopulta tahtireaktanssin arvon. Tällöin tahtikoneen vastaimpedanssin suhde myötäimpedanssiin on suuruusluokkaa 0,1...0,15. Näin ollen kaksivaiheinen pysyvän tilan oikosulkuvirta voi lähellä tahtikonetta tapahtuvassa oikosulussa olla jopa 1,4-kertainen kolmivaiheiseen oikosulkuvirtaan verrattuna /1/.

Käytännössä kaksivaiheinen oikosulkuvirta on aina kolmivaiheista oikosulkuvirtaa pienempi. Tämä johtuu siitä, että tavallisesti oikosulku ei kestä niin kauan, jotta pysyvän tilan arvo saavutettaisiin.

Sähköverkoissa, joissa tähtipisteet on maadoitettu, voi esiintyä myös yksivaiheisia oikosulkuja. Tähän ryhmään kuuluvat ainakin 380 V valaistusverkot ja osa suurjännitteisistä moottorikeskuksista. Yksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k1} voidaan esittää kolmivaiheisen oikosulkuvirran I_{k3} avulla seuraavasti /9/

$$I_{k1} = \frac{3}{1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1}} \cdot I_{k3} \quad (3.6)$$

jossa

$\underline{Z}_1$ on oikosulkupiirin myötäimpedanssi

$\underline{Z}_2$ on oikosulkupiirin vastaimpedanssi

$\underline{Z}_0$ on oikosulkupiirin nollaimpedanssi

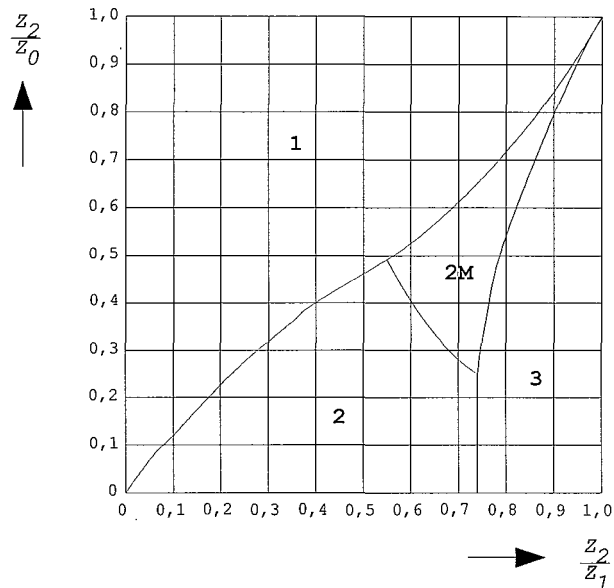
Kun kyseessä on kaukana generaattorista tapahtuva oikosulku, kuten kaikki pienjänniteverkkojen oikosulut, on oikosulkupiirin vastaimpedanssi $\underline{Z}_2$ myötäimpedanssin $\underline{Z}_1$ suuruinen. Tällöin yhtälö (3.6) sievenee muotoon /9/

$$I_{k1} = \frac{3}{2 + \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1}} \cdot I_{k3} \quad (3.7)$$

Pienjännitepääkeskuksen oikosulkuvirtaa laskettaessa muodostaa muuntajan oikosulkuimpedanssi selvästi suurimman osan koko oikosulkupiirin impedanssista. Kun Dyn-kytkentäisillä muuntajilla on nollaimpedanssi suurinpiirtein myötäimpedanssin suuruinen, muodostuvat yksivaiheiset oikosulkuvirrat yhtäsuuriksi kuin kolmivaiheiset.

Kuvassa 3.2 on esitetty standardin VDE 0102 mukainen diagrammi. Diagrammin avulla voidaan määrittää vikatapaukset, joissa esiintyvät suurimmat oikosulkuvirrat.

Maasta erotetuille keski- ja pienjänniteverkoille sekä käyttömaadoitetuille pienjänniteverkoille voidaan käyttää taulukon 3.2 mukaisia arvioita eri impedanssien suhteista /9/.



Kuva 3.2 Vikatapaukset, joissa esiintyy suurin oikosulkuvirta oikosulkupiirin impedanssisuhteiden funktiona. Z_0 , Z_1 ja Z_2 ovat oikosulkupiirin nolla-, myötä- ja vastaimpedanssit. Käyrästön edellytyksenä on, ettei impedanssien vaihekulmien ero ole yli 15° . 1 yksivaiheinen oikosulku, 2 kaksivaiheinen oikosulku, 2M kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella ja 3 kolmivaiheinen oikosulku.

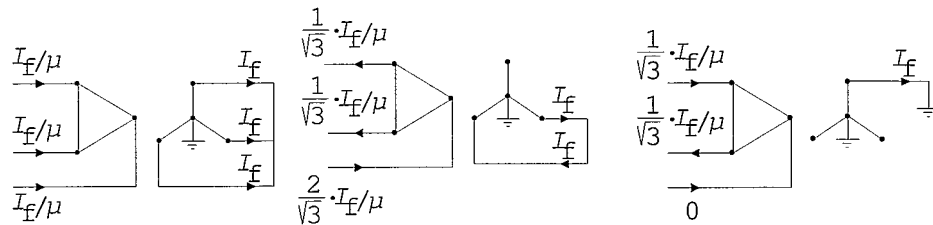
Taulukko 3.2 Oikosulkupiirin impedanssisuhteet keski- ja pienjänniteverkoissa. Z_0 , Z_1 ja Z_2 ovat oikosulkupiirin nolla-, myötä- ja vastaimpedanssit. I_k'' on alkuoikosulkuvirta ja I_k pysyvän tilan oikosulkuvirta.

	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

Kuten kuvasta 3.2 voidaan havaita, saadaan taulukon 3.2 impedanssisuhteilla suurimmat oikosulkuvirrat kolmivaiheisissa oikosuluissa lukuunottamatta lähellä generaattoria sattuvia oikosulkuja, joissa kaksivaiheinen pysyvän tilan oikosulkuvirta voi olla vieläkin suurempi.

Pienimmät oikosulkuvirrat saadaan maasta erotetuissa verkoissa kaksivaiheisissa oikosuluissa. Käyttömaadoitetuissa pienjänniteverkoissa pienimmät oikosulkuvirrat saadaan joko kaksi- tai yksivaiheisissa oikosuluissa riippuen vikapaikan sijainnista syöttöpisteeseen nähden. Lähellä muuntajaa sattuvissa oikosuluissa saadaan pienimmät vikavirrat kaksivaiheisissa oikosuluissa, kun taas kauempana itse verkossa ovat yksivaiheiset oikosulkuvirrat pienimmät.

Epäsymmetristen vikojen ja Dyn-kytkentäisen muuntajan yhteydessä on muistettava vikavirtojen muuttuminen muuntajan ensiössä. Kolmivaiheinen vikavirta muuntuu suoraan muuntajan muuntosuhteen mukaisesti kaikissa vaiheissa. Kaksi- ja yksivaiheisissa vioissa myös ensiön vikavirrat ovat epäsymmetrisiä, mutta eri lailla kuin toisiossa. Tätä havainnollistaa kuva 3.3 /2/.



Kuva 3.3 Dyn-kytkentäisen muuntajan oikosulkuvirrat toisioson kolmi- ja kaksivaiheisessa oikosulussa sekä yksivaiheisessa maasulussa. I_f on vikavirta, μ on muuntajan muuntosuhde.

4 OIKOSULKUPIIRIN KOMPONENTTIEN IMPEDANSSIT /1/, /3/, /6/, /9/

Laskettaessa sähköverkon oikosulkuvirtoja Theveninin menetelmällä täytyy oikosulkupiirin eri komponentit kuvata riittävän tarkkoilla matemaattisilla malleilla.

Oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja ovat syöttävä verkko, tahtikoneet ja epätahtimoottorit. Suurin osa oikosulkuvirrasta tulee verkon ja generaattoreiden syöttämänä, mutta myös tahti- ja epätahtimoottoreiden syöttämä oikosulkuvirta tulee ottaa huomioon erityisesti sysäysoikosulkuvirtaa määritettäessä.

Oikosulkuvirtaa rajoittavat piirin komponenttien impedanssit, joita ovat muuntajat, kuristimet, johdot, kaapelit ja kiskot. Näistä muuntajat ja kuristimet ovat tärkeimpiä.

Seuraavassa käsitellään verkon eri komponenttien kuvaamista matemaattisesti. Kuvaamista käsittelevä luku perustuu VDE standardiin 0102. Liitteen 1 kohdassa 1 on esitetty tähän kappaleeseen perustuva laskelma tehdasverkon komponenttien oikosulkuimpedanssien määrittämisestä. Koska epäsymmetrisiä oikosulkutapauksia ei käsitellä tässä yhteydessä, tarkoittaa jäljempänä mainittu impedanssi aina myötäimpedanssia ja oikosulkuvirta symmetristä kolmivaiheista oikosulkuvirtaa.

4.1 Syöttävä verkko

Syöttävästä verkosta tunnetaan yleensä joko alkuoikosulkuvirta I_{kv}'' tai näennäinen alkuoikosulkuteho S_{kv}'' . Tällöin syöttävän verkon impedanssi Z_{kv} saadaan seuraavasti

/6/

$$Z_{kv} = \frac{c U_n^2}{S_{kv}''} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} I_{kv}''} \quad (4.1)$$

jossa

U_n on syöttävän verkon nimellispääjännite

S_{kv}'' on syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho

I_{kv}'' on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

c on taulukon 3.1 mukainen jännitekerroin

Syöttävän verkon ollessa nimellispääjännitteeltään yli 35 kV avojohtoverkko voidaan verkkosyötön impedanssin ajatella koostuvan pelkästä reaktanssiosasta eli $\underline{Z}_{kv} = jX_{kv}$. Jos resistanssia ei tunneta voidaan impedanssi jakaa resistassi- ja reaktanssiosaan seuraavasti /6/

$$R_{kv} = 0,1X_{kv} \text{ ja } X_{kv} = 0,995Z_{kv} \quad (4.2)$$

jossa

R_{kv} on syöttävän verkon resistanssi

X_{kv} on syöttävän verkon reaktanssi

Pienjänniteverkkojen oikosulkuvirtoja laskettaessa syöttävän verkon pienjännitepuolelle redusoitu reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä /1/

$$X_{kv} = \frac{1,1U_n^2}{S_{kv}''} \quad (4.3)$$

ja resistanssi

$$R_{kv} = 0,1X_{kv} \quad (4.4)$$

joissa

R_{kv} on syöttävän verkon resistanssi

X_{kv} on syöttävän verkon reaktanssi

U_n on pienjännitepuolen nimellispääjännite

S_{kv}'' on syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho

Mikäli oikosulku tapahtuu lähellä muuntajaa, syöttävä verkko voidaan jättää huomiotta pienjänniteverkon oikosulkuvirtaa laskettaessa, jos syöttävän verkon näennäisen alkuoikosulkutehon S_{kv}'' ja muuntajan nimellistehon S_n välillä toteutuu epäyhtälö $S_{kv}'' > 400S_n$ /1/.

4.2 Tahtikoneet

Tahtikoneiden reaktanssit voidaan määrittää yhtälöllä /3/

$$X = \frac{x}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.5)$$

jossa

x on alku-, muutos- tai tahtireaktanssi prosentteina

U_n on tahtikoneen nimellispääjännite

S_n on tahtikoneen nimellinäennäisteho

Tahtikoneen reaktanssit, resistanssit ja aikavakiot saadaan yleensä valmistajalta. Mikäli valmistajan arvot puuttuvat, voidaan arvoina käyttää esimerkiksi lähteestä /5/ saatavia arvoja.

Sysäysoikosulkuvirtaa laskettaessa käytetään taulukon 4.1 mukaisia fiktiivisiä generaattorin resistanssiarvoja R_d , jotka ottavat huomioon oikosulkuvirran vaimenemisen ensimmäisen puolijakson aikana.

Taulukko 4.1 Tahtikoneiden fiktiiviset resistanssiarvot /6/.

Nimellisjännite/kV	Nimellisteho/MVA	R_d/X_d''
>1	≥100	0,05
>1	<100	0,07
≤1	kaikki	0,15

Kun alku - ja sysäysoikosulkuvirta lasketaan käyttäen ekvivalenttista jännitelähdettä cU_{nv} yhtälön (3.1) mukaisesti, on tahtikoneen resistanssi ja reaktanssi kerrottava kertoimella K_G , joka määritellään seuraavasti /6/

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nGM}} \cdot \frac{c_{maks}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nGM}} \quad (4.5a)$$

jossa

c_{maks} on taulukon 3.1 mukainen jännitekerroin

U_n on verkon nimellispääjännite

U_{nGM} on generaattorin tai moottorin nimellispääjännite

x_d'' on tahtigeneraattorin tai -moottorin suhteellinen alkureaktanssi

φ_{nGM} on generaattorin tai moottorin nimellisvirran ja -jännitteen välinen kulma

4.3 Kaksikämmimuuntajat ja kuristimet

Kaksikämmimuuntajien oikosulkusuureet voidaan määrittää kilpiarvojen perusteella seuraavasti /6/

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.6)$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \quad (4.7)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (4.8)$$

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 oikosulkujännite prosentteina

u_r on muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina

Suurilla muuntajilla oikosulkuimpedanssi voidaan korvata oikosulkureaktanssilla, koska resistanssin osuus impedanssissa on niin pieni. Resistanssi on kuitenkin otettava huomioon sysäysoikosulkuvirtaa i_s tai oikosulkuvirran tasavirtakomponenttia i_{dc} laskettaessa. Kuristinta käsitellään laskelmissa kuten muuntajaa, jonka muuntosuhde on yksi.

Kolmikääsimuuntajien impedanssien laskentaa ei tässä käsitellä. Laskentayhtälöt on esitetty esim. lähteessä /6/.

4.4 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottorit ovat selvästi yleisimpiä teollisuuslaitoksissa käytössä olevista sähkökoneista. Käytettävien moottoreiden yksikkökoot eivät ole kovin suuria, mutta suuren lukumääränsä takia ne on otettava huomioon laskelmissa. Epätahtimoottorit vaikuttavat suurentavasti oikosulkuvirtaan symmetrisissä vioissa alkuoikosulku-, sy-
säysoikosulku- ja katkaisuvirtaan sekä epäsymmetrisissä vioissa myös pysyvän tilan oikosulkuvirtaan. Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi Z_m voidaan laskea seuraavasti /6/

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.9)$$

jossa

U_n on moottorin nimellispääjännite

I_n on moottorin nimellisvirta

I_s on moottorin käynnistysvirta

S_n on moottorin nimellinäennäisteho

Oikosulkuimpedanssi Z_m voidaan jakaa resistanssiksi ja reaktanssiksi taulukon 4.2 avulla.

Taulukko 4.2 Epätahtimoottoreiden R_m/X_m ja X_m/Z_m suhteita. U_n on moottorin nimellispääjännite, P_n on moottorin nimellispäätöteho ja p on moottorin napaparluku.

U_n/kV	$P_n/p/\text{MW}$	R_m/X_m	X_m/Z_m
≥ 1	≥ 1	0,10	0,995
≥ 1	< 1	0,15	0,989
< 1	kaikki	0,42	0,922

Suurjännitemoottorit otetaan yleensä laskelmissa aina huomioon. Jos verkkoon on liitetty vain muutamia suurjännitemoottoreita, mallinnetaan ne kukin erikseen. Pienjännitemoottoreita ei niiden suuren lukumäärän takia kannata mallintaa jokaista erik-

seen, vaan niistä on kätevä muodostaa muuntajakohtaiset ekvivalenttimoottorit. Ekvivalenttimoottoreiden oikosulkuimpedanssit lasketaan yhtälöllä (4.9). Jos moottorit on kytketty vialliseen verkkoon muuntajan välityksellä, ei moottoreita tai moottoriryhmiä tarvitse ottaa laskelmissa huomioon, mikäli seuraava epäyhtälö on voimassa /6/

$$\frac{\sum P_{nm}}{\sum S_{nt}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \sum S_{nt}}{S_k''} - 0,3 \right|} \quad (4.10)$$

jossa

c on taulukon 3.1 mukainen jännitekerroin

$\sum P_{nm}$ on moottoreiden yhteenlaskettu nimellinen pätöteho

$\sum S_{nt}$ on moottoreita syöttävien muuntajien yhteenlaskettu nimellinen näennäisteho

S_k'' on alkuoikosulkuteho pisteessä, jossa tapahtuvaa oikosulkua tutkitaan (ilman kyseistä moottoriryhmää)

4.5 Kaapelit, johdot ja kiskot

Teollisuuden keskijänniteverkoissa kaapelipituudet ovat niin lyhyitä, että niiden vaikutus oikosulkupiirin impedanssiin on vähäinen. Tarvittaessa kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan valmistajien luetteloista. Arvot on yleensä ilmoitettu pituusyksikköä kohti, jolloin kaapelin impedanssi $\underline{Z}_j$ saadaan yhtälöllä /6/

$$\underline{Z}_j = (r + jx)l \quad (4.11)$$

jossa

r on kaapelin tasavirtaresistanssi (+20°C) pituusyksikköä kohti

x on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l on kaapeliyhteyden pituus

Lämpötilan ja virran ahdon vaikutus resistanssiin voidaan tarvittaessa ottaa huomioon yhtälöllä /7/

$$R = [1 + \alpha_{20}(\nu - 20^\circ \text{C})](R_{20} + \Delta R) \quad (4.12)$$

jossa

α_{20} on resistanssin lämpötilakerroin

ν on lämpötila, jossa resistanssi halutaan laskea

R_{20} on tasavirtaresistanssi $+20^\circ \text{C}$:ssa

ΔR on lisäresistanssi, joka ottaa huomioon virran ahdon aiheuttamat lisähäviöt

Avojohtojen impedanssin reaktanssi riippuu johdon rakenteesta ja ne on laskettava tapauskohtaisesti. Muutoin impedanssi lasketaan kuten kaapeleille.

Kiskostot vaihtelevat huomattavasti sekä rakenteeltaan että johdinmateriaaliltaan. Yleisesti ne ovat pituudeltaan kuitenkin suhteellisen lyhyitä ja näin myös niiden impedanssit ovat pieniä suhteessa muihin oikosulkupiirin impedansseihin. Tämän takia kiskojen impedanssiarvoja ei tarvitse ottaa huomioon laskelmissa.

4.6 Verkon muu kuormitus

Teollisuussähköverkkojen kuormitus koostuu pyörivien koneiden lisäksi myös vähäisestä määrästä valaistus- ja lämmityskuormia. Näiden kuormitusten vaikutus oikosulkuvirtaan on yleensä pieni, eikä niitä sen vuoksi oteta huomioon oikosulkuvirtoja laskettaessa.

Loistehon kompensointiin käytettyjen rinnakkaiskondensaattoriparistojen purkausvirtaa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon oikosulkulaskelmissa. Rinnakkaiskondensaattoreiden vaikutus oikosulkuvirtaan tulee tarkistaa ainoastaan keskijänniteverkoissa käytettäessä keskitettyä loistehon kompensointia.

Tasasuuntaajilla syötetyillä tasavirtakäytöillä ja taajuusmuuttajilla on vaikutusta vaihtovirtapuolen oikosuluissa vain sysäysoikosulkuvirtoihin ja niihinkin vain silloin, kun tasasuuntaajaosa on kaksisuuntainen eli käytetään vastarinnankytkettyä tyristorisuuntaajaa. Yleensä näiden käyttöjen osuus verkon kuormituksista on niin vähäinen, että ne voidaan jättää huomioon ottamatta.

4.7 Vikaimpedanssit

Määritettäessä pienintä verkossa esiintyvää oikosulkuvirtaa joudutaan ottamaan huomioon myös oikosulkukohdassa esiintyvät vikaimpedanssit. Useimmiten oikosulkukohtaan jää palamaan valokaari, joka varsinkin pienjännitteellä rajoittaa oikosulkuvirtaa huomattavasti. Lisäksi oikosulkupiiri saattaa sulkeutua kaapelihyllyn tai muiden metallikappaleiden kautta, jolloin oikosulkupiirin impedanssi edelleen kasvaa. Koska vikaimpedanssien matemaattinen laskeminen on erittäin hankalaa, otetaan ne huomioon oikosulkulaskelmissa erilaisilla kertoimilla, joilla kerrotaan pienin galvaanisesti esiintyvä verkon oikosulkuvirta. Sopivat kertoimet ovat 0,6 pienjännitteellä ja 0,8 keskijännitteellä /9/.

5 SÄHKÖVERKON OIKOSULKUSUOJAUKSESSA JA MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT OIKOSULKUSUUREET /1/, /2/, /9/

Seuraavaksi käsitellään sähköverkon komponenttien mitoittamisessa ja oikosulkusuojauksen suunnittelussa tarvittavia oikosulkusuureita. Liitteen 1 kohdassa 2 on esitetty tähän kappaleeseen pohjautuva oikosulkulaskelma. Johtimien lämpötilana on laskelmissa käytetty 50 °C.

5.1 Alkuoikosulkuvirta I_k''

Alkuoikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa oikosulun syntyhetkellä. Alkuoikosulkuvirran arvoa ei sellaisenaan käytetä suojauksen ja mitoituksen perusteena, vaan sitä tarvitaan määrittäessä muita oikosulkusuureita.

Alkuoikosulkuvirta voidaan laskea kappaleen 3 mukaisesti käyttämällä oikosulkupiirin komponenttien impedansseille niiden alkuimpedanssiarvoja.

5.2 Sysäysoikosulkuvirta i_s

Sysäysoikosulkuvirta tarkoittaa suurinta mahdollista oikosulkuvirran hetkellisarvoa, joka saavutetaan noin 10 ms kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Sysäysoikosulkuvirtaa käytetään laitteiden mekaanisen mitoituksen perusteena. Sysäysoikosulkuvirrasta käytetään usein myös nimitystä dynaaminen oikosulkuvirta ja se voidaan laskea yhtälöllä /6/

$$i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (5.1)$$

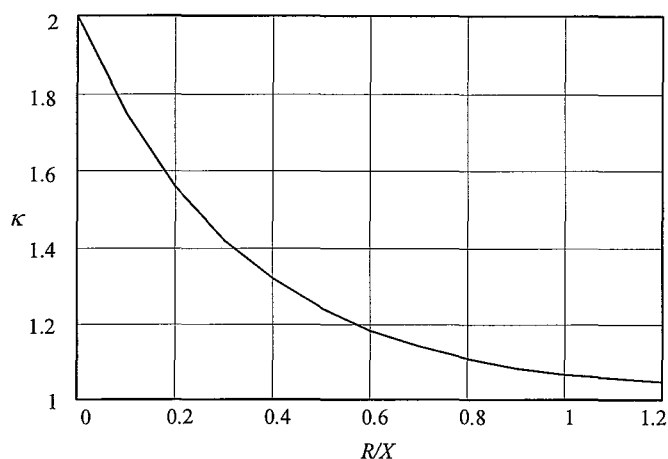
jossa

I_k'' on alkuoikosulkuvirran tehollisarvo

κ on sysäyskerroin

Sysäyskerroin riippuu oikosulkupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta ja se voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä tai määrittää kuvasta 5.1.

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (5.2)$$



Kuva 5.1 Sysäysoikosulkuvirran sysäyskerroimen κ riippuvuus oikosulkuvirtapiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta.

Suurjännitteellä, mikäli tarkkaa arvoa ei tunneta, voidaan käyttää sysäyskerroimen arvona $\kappa = 1,8$ ja pienjännitteen ollessa kyseessä saadaan sysäyskerroimelle arvot taulukosta 5.1.

Taulukko 5.1 Pienjänniteverkon sysäysoikosulkuvirran suhde oikosulkuvirran tehollisarvoon.

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

Jos oikosulkuvirtaa syöttäviä lähteitä on useita ja ne ovat toisistaan riippumattomia, saadaan vikakohdan kokonaissysäysoikosulkuvirta eri lähteiden sysäysoikosulkuvirtojen summana yhtälöllä /6/

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} + \dots + i_{sn} \quad (5.3)$$

jossa

i_s on kokonaissysäysoikosulkuvirta vikakohdassa

$i_{s1}, i_{s2}, \dots, i_{sn}$ ovat eri lähteiden aiheuttamat sysäysoikosulkuvirrat

5.3 Pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k

Pysyvän tilan oikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirtaa, jossa kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet. Pysyvän tilan oikosulkuvirralla ei voida laskea mitään tarkkaa arvoa alkuoikosulkuvirran tapaan, sillä se riippuu mm. tahtikoneiden magnetointitavasta ja -säädöistä, generaattoreiden ja muuntajien automaattisesta jännitteensäädöstä sekä verkon kytkentätilanteiden muutoksista oikosulun aikana. Yleensä riittää suurimman mahdollisen pysyvän tilan oikosulkuvirran tunteminen, jotta verkon oikosulkukestoisuus voidaan tarkistaa. Pienintä mahdollista pysyvän tilan oikosulkuvirtaa ei ole aivan välttämätöntä tuntea, sillä yleensä verkon oikosulkusuojat ehtivät toimia ennenkuin oikosulkuvirran pysyvän tilan arvo saavutetaan.

Tahtikoneille suurin mahdollinen pysyvän tilan oikosulkuvirta I_{kmax} voidaan laskea seuraavasti /6/

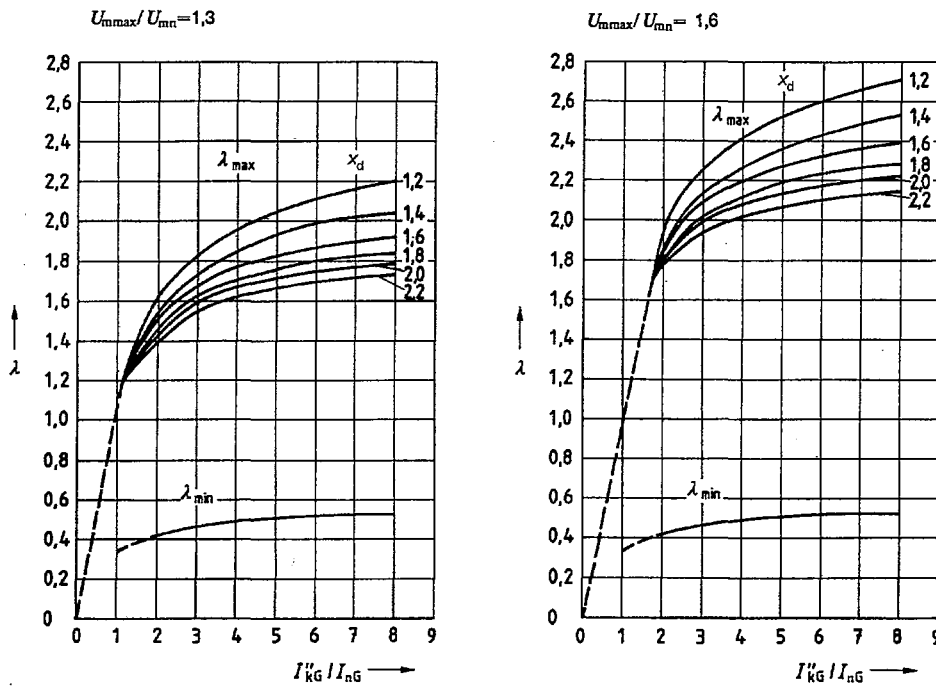
$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_n \quad (5.4)$$

jossa

λ_{max} on suurinta mahdollista magnetointia vastaava kerroin

I_n on koneen nimellisvirta

Kerroin λ_{max} saadaan turbogeneraattorille kuvan 5.2 käyrästä. Vasemmanpuoleisen kuvan käyrät pätevät tapaukseen, jossa generaattorin suurin mahdollinen magnetointijännite on 1,3-kertainen nimelliseen verrattuna. Oikeanpuoleisen kuvan käyrissä suurin mahdollinen magnetointijännite on 1,6-kertainen nimelliseen verrattuna. Kuvaa 5.2 voidaan soveltaa myös umpinapatahtimoottoreille. Avonapakoneille on olemassa omat käyränsä.



Kuva 5.2 Kertoimen $\lambda_{\max}$ määrittäminen umpinapakoneelle. $U_{m\max}/U_{mn}$ on suurimman mahdollisen magnetointijännitteen suhde nimellismagnetointijännitteeseen, x_d on tahtireaktanssin kyllästyneen tilan arvo ja I''_{KG}/I_{NG} on generaattorin syöttämän alkuoikosulkuvirran suhde nimellisvirtaan.

Oikosulkumoottoreilla ei ole vaikutusta pysyvän tilan 3-vaiheiseen oikosulkuvirtaan. Syöttävän verkon pysyvän tilan oikosulkuvirta oletetaan syöttävän verkon alkuoikosulkuvirran suuruiseksi /6/.

5.4 Katkaisuvirta I_a

Katkaisuvirralla tarkoitetaan sitä oikosulkuvirran vaihtokomponentin tehollisarvoa, joka virralla on katkaisijan koskettimien avautuessa. Katkaisukertoimella μ otetaan huomioon oikosulkuvirran vaimeneminen katkaisuviiveen $t_{\min}$ aikana.

Tahtikoneille katkaisuvirta voidaan laskea yhtälöllä /6/

$$I_a = \mu I_k'' \quad (5.5)$$

jossa

μ on katkaisukerroin

Kertoimen μ arvo voidaan määrittää kuvasta 5.3 tai se voidaan laskea yhtälöistä /6/

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (5.6)$$

$$\mu = 0,71 + 0,516e^{-0,30 \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{\min} = 0,05 \text{ s} \quad (5.7)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{\min} = 0,10 \text{ s} \quad (5.8)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I''_{kG}}{I_{nG}}}, \text{ kun } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s} \quad (5.9)$$

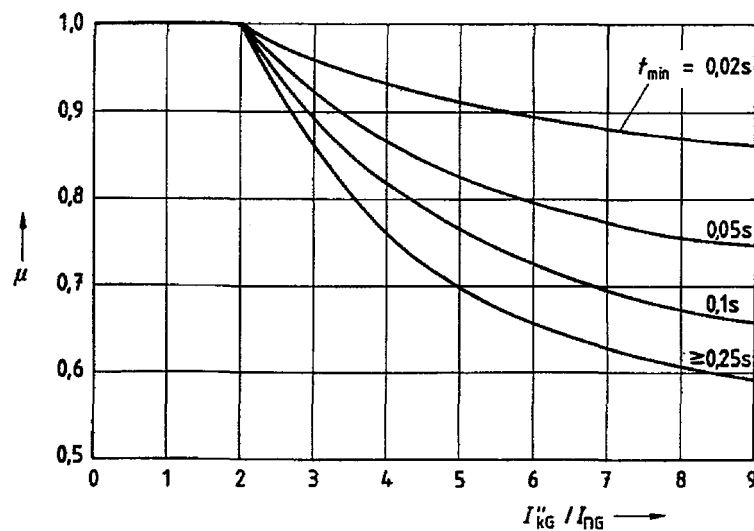
joissa

I''_{kG} on tahtigeneraattorin tai -moottorin syöttämä alkuoikosulkuvirta

I_{nG} on tahtigeneraattorin tai -moottorin nimellisvirta

$t_{\min}$ on katkaisuviive

Jos suhde $I''_{kG}/I_{nG} \leq 2$, niin $\mu = 1$ kaikilla katkaisuviiveen arvoilla.



Kuva 5.3 Katkaisukertoimen μ riippuvuus katkaisuviiveestä $t_{\min}$ ja suhteesta I''_{kG}/I_{nG} . I''_{kG} on tahtimoottorin tai -generaattorin syöttämä alkuoikosulkuvirta ja I_{nG} tahtimoottorin tai -generaattorin nimellisvirta.

Epätahtimoottoreille katkaisuvirta saadaan yhtälöstä /6/

$$I_a = \mu q I''_k \quad (5.10)$$

jossa katkaisukertoimen μ arvo saadaan kuvasta 5.3 tai yhtälöistä (5.6-5.9).

Kertoimen q arvot saadaan kuvasta 5.4 tai yhtälöistä /6/

$$q = 1,03 + 0,12 \ln m, \text{ kun } t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (5.11)$$

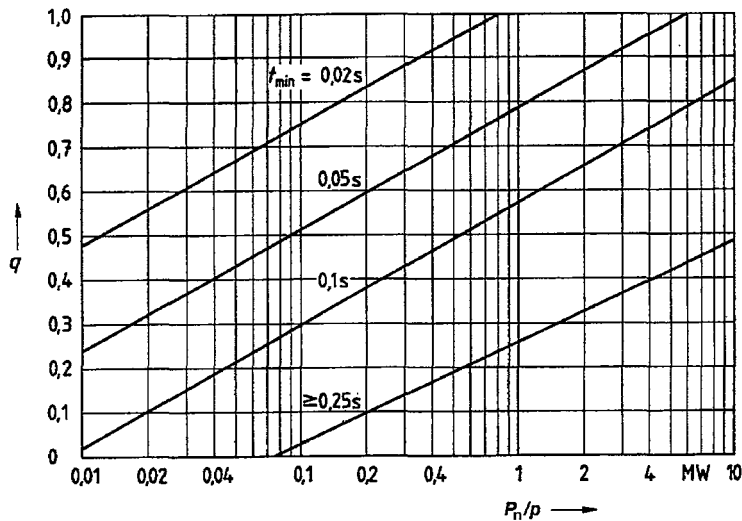
$$q = 0,79 + 0,12 \ln m, \text{ kun } t_{\min} = 0,05 \text{ s} \quad (5.12)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln m, \text{ kun } t_{\min} = 0,10 \text{ s} \quad (5.13)$$

$$q = 0,26 + 0,12 \ln m, \text{ kun } t_{\min} = 0,25 \text{ s} \quad (5.14)$$

joissa m on moottorin nimellispätöteho napaparia kohti.

Jos kertoimelle q saadaan laskemalla suurempia arvoja kuin yksi, niin siinä tapauksessa oletetaan, että $q = 1$.



Kuva 5.4 Epätahtimoottorin syöttämän katkaisuvirran kerroin q . P_n moottorin nimellisteho, p napapariluku ja $t_{\min}$ katkaisuviive.

Jos oikosulkuvirtaa syöttäviä lähteitä on useita, saadaan vikakohdan katkaisuoikosulkuvirta laskettua yhtälöllä /6/

$$I_a = \mu_k I_k'' \quad (5.15)$$

jossa

$$\mu_k = \frac{\sum U_{Ni} \mu_i I_{ki}''}{U_N I_k''}$$

U_{Ni} on oikosulkulähteen i nimellisjännite

μ_i on oikosulkulähteen i katkaisukerroin

I_{ki}'' on oikosulkulähteen i syöttämä alkuoikosulkuvirta

I_k'' on vikapaikan alkuoikosulkuvirta

U_N on vikapaikan nimelliskäyttöjännite

110 kV verkon syöttämä oikosulkuvirta ei juurikaan vaimene päämuuntajien takaisissa keskijänniteverkon oikosuluissa. Syöttävän verkon katkaisuoikosulkuvirta voidaan näin ollen olettaa alkuoikosulkuvirran suuruiseksi.

5.5 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}

Verkon komponenttien terminen oikosulkukestoisuus mitoitetaan oikosulkuvirran aiheuttaman lämpenemän perusteella. Koska oikosulkuvirta yleensä muuttuu oikosulun kestoajana, lasketaan oikosulkuvirran alkuarvon tehollisarvosta I_k'' se yhden sekunnin pituista oikosulkua vastaava keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta I_{th} (I_{1s}), joka kehittää johtimessa saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta.

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta lasketaan yhtälöstä /9/

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m+n)t_k} \quad (5.16)$$

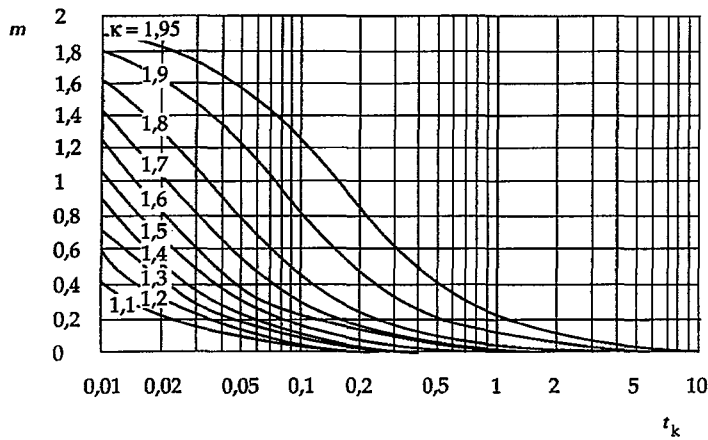
jossa

m on tasavirtatekijä

n on vaihtovirtatekijä

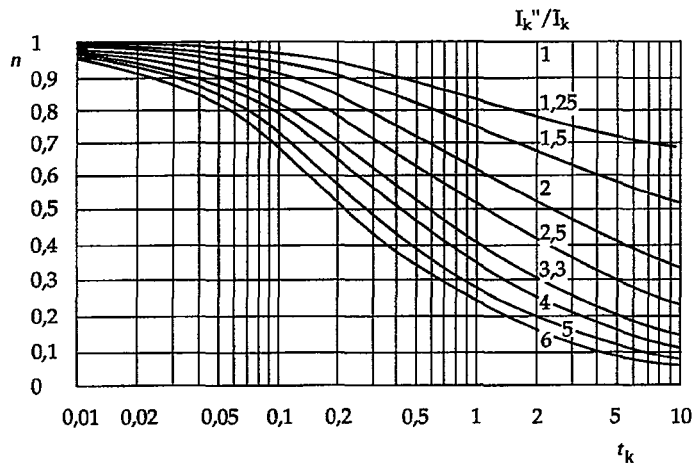
t_k on vian kesto aika

Tasavirtatekijällä m otetaan huomioon oikosulkuvirran tasakomponentin vaimeneminen. Sen arvo riippuu sysäyskertoimesta ja oikosulun kestoajasta kuvan 5.5 mukaisesti.



Kuva 5.5 Tasavirtatekijän m riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k .

Vaihtovirtatekijällä otetaan huomioon oikosulkuvirran vaihtokomponentin vaimeneminen. Sen arvo riippuu oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta I_k''/I_k ja oikosulun kestoajasta t_k kuvan 5.6 mukaisesti.



Kuva 5.6 Vaihtovirtatekijän n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta I_k''/I_k ja oikosulun kestoajasta t_k .

Useita oikosulkulähteitä sisältävässä verkossa vikapaikan ekvivalenttinen yhden sekunnin oikosulkuvirta saadaan laskemalla yhteen eri oikosulkulähteiden syöttämät ekvivalenttiset yhden sekunnin oikosulkuvirrat (vektorisumma) kuitenkin siten, että oikosulkulähteiden nimellisjännitteiden eroaminen vikapaikan nimelliskäyttöjännitteestä on otettava huomioon tietyn suuruusilla painotuskertoimilla. Moottoreiden painotuskertoimelle voidaan käyttää arvoa 0,95 ja syöttävälle verkolle sekä generaattoreille arvoa 1,0.

6 OIKOSULKUSUOJAUS

6.1 Releasettelut

Säteittäisen keskijännitejakeluverkon selektiivinen oikosulkusuojaus on periaatteessa mahdollista toteuttaa vakioaikaylivirtareleiden avulla. Kun johdot ovat tarpeeksi pitkiä, jolloin vikavirta riippuu voimakkaasti oikosulun paikasta, voidaan käyttää virtaselektiivisyyttä. Virtaselektiivisyyteen perustuvissa suojauksissa on suojauksen toiminta aina varmistettava erillisellä varasuojauksella, jossa releenä käytetään esimerkiksi ylivirtareleitä. Lyhyillä johdoilla, kuten teollisuusalueilla, on vikavirta lähes yhtä suuri joka paikassa. Tällöin selektiivisyys on saavutettavissa suojareleiden erilaisilla toimintahidastuksilla. Tätä kutsutaan aikaselektiivisyydeksi.

6.1.1 Aikalaukaisu

Releiden rajoitetun toimintatarkkuuden vuoksi on peräkkäisten releiden aikaporrastus oltava riittävä. Tyypillinen porrasaika mekaanisilla releillä on 0,5 s, staattisilla releillä noin 0,3 s ja numeerisilla releillä noin 0,15 s. Tehon syöttösuunnassa viimeisen katkaisijan aikahidastuksen on oltava vähintään 0,3 s, jolloin eliminoidaan kuormitusten synnyttämien lyhytaikaisten virtapiikkien aiheuttamat virhelaukaisut /11/.

Aikaselektiivisessä suojauksessa on pyrittävä selviämään mahdollisimman vähillä aikaportilla, jottei syöttöpisteen läheisyydessä laukaisuajat ja samalla myös termiset rasitukset kasva liian suuriksi. Aikaportaiden säästämiseksi ja siksi, että välttyään mahdollisilta yhtäaikaisilta laukaisuilta, pidetään jakoaseman syötön katkaisijan laukaisu lukittuna. Samoin voidaan päämuuntajan ylä- ja alajännitepuolen aikahidastuksena käyttää tarvittaessa samaa aikahidastusta. Mikäli joudutaan käyttämään useita aikaportaita, tulisi lähellä syöttöpistettä olevat verkonosat varustaa nopealle ensisijaissuojalle ja käyttää aikaselektiivistä suojausta varasuojana /2/.

Releen havahtumisvirta on aseteltava siten, että se on suurempi kuin johdon suurin kuormitusvirta, mutta kuitenkin johdon pienintä oikosulkuvirtaa pienempi. Johtolähtöjen virta-asetukseksi sopii noin kaksinkertainen suurin kuormitusvirta. Tarvitta-

essa voidaan käyttää suurempiakin arvoja, mutta virta-asetus ei saa olla niin suuri, että rele ei havahdu johdon lopussa tai ennen seuraavaa katkaisijaa tapahtuvassa oikosulussa /11/.

6.1.2 Pikalaukaisu

Muuntajan yläjännitepuolella voidaan käyttää pikalaukaisua siten, että sen vaikutusalue ei ulotu alajännitepuolelle. Toisena vaihtoehtona voidaan yläjännitepuolen pikalaukaisun virta-asetuksena käyttää alajännitepuolen pikalaukaisun virta-arvoa vastaavaa virtaa. Tällöin yläjännitepuolen pikalaukaisua on hidastettava 0,3 sekuntia. Jos samassa jänniteportaassa joudutaan käyttämään useita peräkkäisiä pikalaukaisuja, on niiden aikahidastus asetettava syöttöpisteeseen päin kasvavaksi /10/, /11/.

Mekaanisten releiden tasakomponenttiherkkyys tuo oman vaikeutensa suojauksen suunnitteluun. Tasakomponentti on satunnaissuure ja yleensä nopeasti vaimeneva, mutta se saattaa aiheuttaa hetkellisten ylivirta- ja ylivirta-aikareleiden momenttilaukaisun, vaikka vaihtokomponentin tehollisarvo on alle asetellun toiminta-arvon. Jos releen tasavirtaherkkyys on suuri, tulee muuntajan yläjännitepuolen releen momenttilaukaisun virta-asetuksen olla kaksinkertainen alajännitepuolen suurinta symmetristä oikosulkuvirtaa vastaavan virran tehollisarvoon verrattuna, jolloin välttyään aiheettomilta käyttökeskeytyksiltä.

6.1.3 Oikosulkumoottorin käynnistysvirtasysäys

Suoraan verkkoon käynnistettävien oikosulkumoottoreiden käynnistyshetkellä otettava virta on moninkertainen moottorin nimellisvirtaan verrattuna. Tämä virtasysäys saattaa aiheuttaa moottorin ja syöttävän verkon suojalaitteiden virheellisen toiminnan, jos sitä ei suojien asettelussa ole asianmukaisesti otettu huomioon. Käynnistysvirta on melkein puhdasta loisivirtaa $\cos\varphi$ - arvon ollessa välillä 0,2...0,5. Käynnistysvirran kesto aika riippuu moottorin kuormituksesta. Sen sijaan käynnistysvirran suuruus ei ole kuormituksesta riippuva.

Syöttävän verkon ja moottorin omien suojauslaitteiden aiheuton toiminta käynnistyskellällä on estettävä sopivin releasetuksin. Suositellaan, että tehon syöttösuunnassa viimeisen katkaisijan aikahidastuksena käytetään 0,3 sekuntia. Tämän tarkoituksena on eliminoida käynnistysvirtasysäysten aiheuttamat virhelaukaisut. Kuitenkin raskas-käynnisteisillä moottoreilla tämä aikahidastus saattaa olla liian lyhyt, minkä takia aikahidastusten asetteluarvot on aina mietittävä tapauskohtaisesti.

6.1.4 Muuntajan kytkentävirtasysäys

Epätahtimoottorin käynnistystä muistuttava tilanne on tyhjäkäyvän muuntajan kytkentä jännitteeseen verkkoon. Muuntajan magnetoimisvirta saavuttaa staattisen tilan arvon vasta muutosilmiön vaimennettua. Virtasysäyksen suuruuteen vaikuttaa hyvin monta tekijää: kytkentähetken vaihekulma, käämikytkimen asento, rautasydämen remanenssi, muuntajan ja verkon rakenne. Virran vaimeneminen riippuu muuntajan reaktanssi-resistanssisuhteesta. Taulukoon 6.1 on kerätty joitakin muuntajan kytkentäsysäysvirran keskimääräisiä arvoja /10/.

Taulukko 6.1 Mitattuja muuntajan kytkentäsysäysvirran arvoja.

Muuntajateho MVA	Kytettäessä syöttö yläjännitekäämiin	Kytettäessä syöttö alajännitekäämiin	Aika, jossa virta pienenee puoleen /s
1	$7I_N$	$12I_N$	0,1...0,2
5	$5I_N$	$9I_N$	0,2...0,5
10	$4I_N$	$8I_N$	0,5...1,0
50	$3,5I_N$	$7,5I_N$	1,2...7,2

Jo verkossa olevaan muuntajaankin voi syntyä kytkentäsysäysvirta, kun toinen muuntaja kytketään sen rinnalle. Tämän aiheuttaa kytkettävässä muuntajassa kulkeva tasavirta, joka kulkee kytkennän jälkeen myös verkossa olleeseen muuntajaan kylästä sen rautasydämen.

Kytettäessä virta ei normaalisti saa ylivirtareleen pikalaukaisuporrasta vaan hidastetun laukaisun toimimaan. Kuten taulukosta 6.1 nähdään, saattaa virran vaimenemisaika olla hyvinkin pitkä. Tämä on syytä ottaa huomioon ylivirtareleiden asette-

luarvoja määrättäessä. Taulukossa 6.2 on esitetty eräs näkemys muuntajan syötön ylivirtareleen minimiasetuksista kytkentävirran kannalta /9/.

Taulukko 6.2 Muuntajan syötön ylivirtareleen vähimmäisasetukset kytkentävirran kannalta. Jännite 6 kV.

Muuntajan teho /MVA	Hetkellislaukaisu/A		Aikahidastettu laukaisu 0,3 s/A	
	Elektroninen rele	Mekaaninen rele	Elektroninen rele	Mekaaninen rele
0,5	217	367	34	67
0,7	284	500	67	117
1	400	700	134	217
2	767	1334	370	634
20	6584	11400	5534	9584

6.2 Esimerkkejä oikosulkusuojien releasetteluista

Seuraavassa esitetään muutamien esimerkkien avulla, miten teollisuusverkon oikosulkusuojien releasetteluita voidaan tehdä liitteen 1 kuvan 1 mukaisessa verkossa. Verkon oikosulkusuojien asetteluarvoja määritettäessä on pyrittävä noudattamaan seuraavia yleisiä periaatteita:

- sarjassa olevien oikosulkusuojien tulee olla selektiivisiä
- oikosulkusuojien tulee sallia hetkelliset ylikuormitukset
- sähkölaitteiden kuormitettavuutta sekä oikosulkukestoisuutta ei ylitetä
- vikakohta erotetaan mahdollisimman nopeasti
- pääsuojan lisäksi tulee havahtua ainakin yksi varasuoja

6.2.1 Jakelumuuntajat ja pienjännitepääkeskukset

Jakelumuuntajien suojauksessa käytetään yleensä vakioaikaylivirtarelettä, jonka pikalaukaisun virta-asettelu valitaan siten, ettei rele havahdu suurimmallakaan alajännitepuolen oikosulkuvirralla. Samalla on kuitenkin huomioitava, että rele varmasti havahtuu pienimmällä yläjännitepuolen oikosulkuvirralla. Lisäksi hetkellisen laukaisun asetteluissa on pyrittävä ottamaan huomioon muuntajan kytkentävirtasysäyksen asettamat vaatimukset.

Aikahidastetun laukaisun virta-asetteluissa sallitaan muuntajille yleensä kaksinkertainen kuormitus nimellisvirtaan verrattuna. Aikahidastusten aika-asettelu valitaan monesti verkosta saatujen käyttökokemusten perusteella. Myös aikahidastetun laukaisun asetteluissa on pyrittävä ottamaan huomioon muuntajan kytkentävirtasysäys.

Pienjännitepääkeskusten pääkatkaisijoiden oikosulkulaukaisimen on toimittava hidastuksetta, koska se on selektiivisyysportaassa ensimmäisenä suurjänniteverkosta päin katsottuna. Asettelyjen periaatteena on, että oikosulkulaukaisimen tulee havaita pienin 400 V pääkeskuksen kiskostossa esiintyvä oikosulkuvirta. Asetteluissa on pyrittävä ottamaan huomioon suurimpien moottoreiden käynnistysvirtasysäys, joka ei saa laukaista pj-pääkeskuksen pääkatkaisijaa. Ylikuormituslaukaisimen asetteluksi valitaan pienjännitepääkeskuksen nimellisvirta.

Seuraavassa esitetään laskentaesimerkki jakelumuuntajalähdön ja 400 V pääkeskuksen pääkatkaisijan releasetteluiden määrittämisestä.

PK 3 lähtö 3/PK 9

Lähtötietoina tarvitaan seuraavia arvoja:

- muuntaja $S_n=2000$ kVA, $I_n/I_{2n}=192,5/2887$ A
- ylivirtarele (numeerinen), asettelualue: $I>>0,5-20 \cdot I_n$ ja ∞ , $I>0,5-2,5 \cdot I_n$,
 $t>>0,04-100$ s, $t>0,05-100$ s
- pienjännitekeskuksen kompaktikatkaisija $I_n=3200$ A, asettelualue: $I>>1,5-10 \cdot I_n$,
 $I>0,8-1,0 \cdot I_n$
- pienjännitepääkeskuksen nimellisvirta $I_n=3000$ A
- suurjännitepuolen virtamuuntaja 200/5 A
- suurin pienjännitepuolen muutosoikosulkuvirta $I'_{k_{pjmaks}}=44,66$ kA
- pienin pienjännitepuolen muutosoikosulkuvirta $I'_{k_{pjmin}}=18,98$ kA
- pienin suurjännitepuolen muutosoikosulkuvirta $I'_{k_{sjmin}}=3,87$ kA

Pienjännitepuolen suurimman ja pienimmän samoin kuin suurjännitepuolen pienimmän muutosoikosulkuvirran laskentaperiaate on esitetty liitteen 1 kohdassa 2.

Jakelumuuntajan ylivirtareleen asettelut:

Jakelumuuntajan yläjännitepuolen ylivirtareleen hetkellislaukaisu ei saa havahtua suurimmallakaan pienjännitepuolen oikosulkuvirralla $I'_{k\text{ pjmaks}}=44,66$ kA, mutta sen on suojattava pienimmältä yläjännitepuolen oikosululta $I'_{k\text{ sjmin}}=3,87$ kA. Tällöin tulee hetkellislaukaisun suhteelliseksi virta-asetteluksi valita:

Redusoidaan suurin pienjännitepuolen oikosulkuvirta yläjännitepuolelle ja otetaan virtamuuntajan muuntosuhde huomioon. Tällöin saadaan

$$44660 \cdot \frac{0,4}{6} \cdot \frac{1}{200A} = 14,9$$

Kun otetaan huomioon releen asettelu- ja toimintatarkkuus sekä laskentatarkkuus, voidaan lopulliseksi hetkellisen laukaisun virta-asetteluarvoksi valita

$$I >> 14,9 \cdot 1,2 = 17,8$$

Hetkellisen laukaisun aikahidastus asetellaan lähdön termisen oikosulkukestoisuuden perusteella niin, että suojaus toimii selektiivisesti lähtöjen PK 3/20 (generaattori) ja PK 3/21 (ulkoverkko) suojiin nähden. Lähdössä käytettävä kaapeli on tyypiltään AHXAMK-W 3x185 mm², jonka suurin sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta on $I_{IS}=17,5$ kA. Liitteen 1 kohdan 2 laskelman mukaan pääkytkinlaitoksen ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta 0,3 s katkaisuviiveellä on 15,7 kA, joten hetkellislaukaisun aika-asetteluarvoksi voidaan valita 0,3 s tai hieman pidempi aika. Valitaan hetkellislaukaisun aika-asetteluarvoksi $t >>$ esimerkiksi

$$t=0,35 \text{ s}$$

Aikahidastetun laukaisun on toimittava ensisijaisesti muuntajan pienjännitepuolen vioissa ja toissijaisesti muuntajan perässä olevan 400 V pääkeskuksen kompaktikatkaisijan varasuojana, jolloin sopivat asettelut ovat:

Sallitaan muuntajalle kaksinkertainen kuormitus nimellisvirtaan verrattuna. Tällöin aikahidastetun laukaisun asetteluarvoksi saadaan

$$\frac{2 \cdot 192,5A}{200A} = 1,93 \Rightarrow I > 1,9$$

Taulukon 6.2 mukaan aikahidastukseksi voidaan valita 0,3 s tai hieman tätä suurempi arvo. Valitaan aikahidastukseksi $t >$ esimerkiksi

$$t=0,4 \text{ s}$$

Pienjännitepuolen kompaktikatkaisijan asettelut:

400 V pääkeskuksen kompaktikatkaisijan pikalaukaisun on havaittava pienin pienjännitepuolen oikosulkuvirta $I'_{k \text{ pmin}} = 18,98 \text{ kA}$. Tämän perusteella valitaan pikalaukaisun asetteluarvoksi

$$\frac{18980 \text{ A}}{3200 \text{ A}} = 5,93 \Rightarrow I \gg 5,5$$

Ylikuormituslaukaisimen asetteluksi valitaan pienjännitepääkeskuksen nimellisvirta eli

$$\frac{3000 \text{ A}}{3200 \text{ A}} = 0,94 \Rightarrow I > 0,9$$

Kompaktikatkaisijan asetteluarvoja määritettäessä on muistettava, ettei suurimman pj-pääkeskukseen kytketyn moottorin käynnistysvirtasysäys laukaise kompaktikatkaisijaa.

Taulukkoon 6.3 on koottu PK 3 lähdön 3 ja PK 9 kompaktikatkaisijan edellä määritetyt releasettelut.

Taulukko 6.3 PK 3 lähdön 3 ja PK 9 rele- ja katkaisija-asettelut

	Suojareleen asetteluarvot			
	$I_{>>}$	$I_{>}$	$t_{>>}$	$t_{>}$
400 V kompakti-katkaisija	$5,5 \cdot I_n$	$0,9 \cdot I_n$	-	-
PK3/3 ylivirtarele	$17,8 \cdot I_n$	$1,9 \cdot I_n$	0,35 s	1,0 s

6.2.2 Alakytkinlaitokset ja niiden syöttöjohdot

Alakytkinlaitosten PK 10, PK 12 ja PK 13 kiskostojen suojina toimivat kiskoston syöttöpisteiden katkaisijat ja niiden ylivirtareleet. Selektiivisyysvaatimusten mukaisesti kiskostosuojalta edellytetään, että se ei saa toimia kiskoston ulkopuolisissa vioissa. Mikäli kiskoston suojana toimiva rele kuitenkin havahtuu kiskoston ulkopuolisissa vioissa, on huolehdittava siitä, että vikapaikkaa lähinnä oleva katkaisija avautuu ennen kiskoston pääkatkaisijaa. Tarkastellaan seuraavaksi yhden esimerkin avulla, miten alakytkinlaitoksen ja sitä syöttävän lähdön releasettelut voidaan määrittää. Otetaan tarkastelun kohteeksi esimerkkiverkon kojeisto PK 10.

Lähtötiedot:

PK 3 lähtö 2

- ylivirtarele (numeerinen), asettelualue: $I_{>>} > 0,5 \cdot I_n$ ja ∞ , $I_{>} > 0,5 \cdot I_n$, $t_{>>} > 0,04$ -100 s, $t_{>} > 0,05$ -100 s
- virtamuuntaja 400/5 A

PK 10 lähtö 2

- kojeiston nimellisvirta $I_n = 1600$ A
- ylivirtarele (staattinen), asettelualue: $I_{>>} > 3 \cdot I_n$ ja ∞ , $I_{>} > 0,5 \cdot I_n$, $t_{>>} > 0,2$ -1,2s; 1-6 s; 5-30s
- virtamuuntaja 300/5
- pienin PK 10 kiskostossa esiintyvä oikosulkuvirta $I'_{k\text{ PK10}} = 3,94$ kA
- suurin kojeistossa esiintyvä kuormitusvirta on n. 230 A
- suurin kojeistossa esiintyvä kuormitusvirta on n. 180 A (suurin oikosulkumoottori ei kytkettynä)
- suurimman kojeistoon liitetyn oikosulkumoottorin käynnistysvirta n. 440 A

PK 10 syötön tulopään ylivirtareleen hetkellislaukaisun tulee havahtua pienimmästä kiskostossa esiintyvistä oikosulkuvirrasta. Se ei kuitenkaan saa havahtua, mikäli vika on jollakin johtolähdöllä tai havahtuessaan pääkatkaisijan olisi toimittava selektiivisesti johtolähtöjen katkaisijoiden kanssa. PK 10:n releissä ei ole mahdollisuutta hetkellislaukaisun hidastukseen, joten selektiivisyysvaatimus voidaan toteuttaa asettamalla syötön tulopään ylivirtareleen hetkellislaukaisu asentoon ∞ . Tällöin kiskoston suojana oikosulussa toimii syöttöjohdon lähtöpään (PK 3:n puoleinen) ylivirtarele, jossa on mahdollisuus pikalaukaisun hidastukseen.

Syöttöjohdon lähtöpään ylivirtareleen hetkellislaukaisun virta-asettelu saadaan pienimmän PK 10 kiskostossa esiintyvän oikosulkuvirran perusteella. Kun otetaan vielä huomioon releen asettelu- ja toimintatarkkuus sekä laskentatarkkuus, saadaan virta-asetteluarvoksi

$$\frac{3940\text{A}}{400\text{A}} = 9,85 \Rightarrow I \gg 9,0$$

Syöttöjohdon lähtöpään releen pikalaukaisun aikahidastuksen arvo valitaan siten, että vian sattuessa jollakin PK 10:n johtolähdöllä viallisen johtolähdön pikalaukaisu toimii ensimmäisenä. Koska alakytkinlaitoksen releiden pikalaukaisut toimivat hidastuksetta, voidaan syöttöjohdon lähtöpään ylivirtareleen pikalaukaisun aikahidastuksen arvoksi kohdan 6.1.1 mukaisesti valita

$$t=0,3 \text{ s}$$

PK 10 syötön tulopään ylivirtareleen aikahidastettu laukaisu ei saa toimia käynnistettäessä suurinta kiskostoon kytkettyä oikosulkumoottoria. Virta-asettelu valitaan suurimman moottorin käynnitysvirran ja kiskostossa esiintyvän suurimman kuormitusvirran perusteella. Virta-asetteluarvoksi saadaan siis

$$\frac{180 \text{ A} + 440 \text{ A}}{300 \text{ A}} = 2,07 \Rightarrow I > 2,5$$

Aikahidastus on asetettava yhden aikaportaan (0,3 s) verran suuremmaksi kuin muuntajalähtöjen ylivirtareiden aikahidastus (1,0 s), jolloin saadaan

$$t = 1,3 \text{ s}$$

Tällä varmistetaan, että kytkinlaitoksen pääkatkaisija ja muuntajalähtöjen katkaisijat toimivat selektiivisesti suurimmalla pienjännitepuolen oikosulkuvirralla.

PK 3:n puoleisen ylivirtareleen ylikuormitussuojan virta-asetteluperiaatteena voidaan käyttää samaa kuin PK 10:n puoleisen ylivirtareleen asettelussa. Sopiva virta-asetteluarvo on

$$\frac{180 + 440A}{400A} = 1,55 \Rightarrow I > 1,9$$

ja aikahidastukseksi

$$t=1,3 \text{ s}$$

Taulukkoon 6.4 on koottu kaapeliyhteyden PK 3/PK 10 ylivirtasuojien edellä määritetyt asetteluarvot.

Taulukko 6.4 Pääkytkinlaitoksen PK 3 ja voimalaitoksen omakäytön PK 10 välisen yhdysjohdon ylivirtareiden asetteluarvot.

	Suojaraleen asetteluarvot			
	$I >>$	$I >$	$t >>$	$t >$
PK 3/2 ylivirtarele	$9,0 \cdot I_n$	$1,9 \cdot I_n$	0,3 s	1,3 s
PK 10/2 ylivirtarele	∞	$2,5 \cdot I_n$	-	1,3 s

6.2.3 Ulkoverkon liityntäpiste ja generaattori

Vian sattuessa pääkytkinlaitoksessa on generaattori erotettava heti kiskostosta. Sama pätee tietysti ulkoverkon suhteen. Normaalisti pääkytkinlaitokset suojataan valokaarioikosulkuja vastaan erillisillä valokaari- ja virtareleillä. Mikäli valokaarirele ha-
vahtuu ja virta on riittävän suuri, avautuvat generaattorin ja ulkoverkon liityntäpisteiden katkaisijat välittömästi.

Ulkoverkon liityntäpisteen katkaisija

Ulkoverkon liityntäpisteen ylivirtareleen täytyy havaita pääkytkinlaitoksessa tapahtuvassa oikosulussa pienin ulkoverkon syöttämä oikosulkuvirta. Se ei kuitenkaan saa laukaista katkaisijaa nopeissa ulkopuolisen verkon vioissa. Toisaalta, mikäli ulkoverkossa syntyy vikatilanne, olisi pääkytkinlaitoksen liityntäpisteen katkaisijan avaututtava ennen generaattorin katkaisijaa.

Lähtötiedot:

- päämuuntajan nimellisvirta $I_{1n}/I_{2n} = 100,4/1833\text{ A}$
- ylivirtarele (numeerinen), asettelualue: $I > 0,5-20 \cdot I_n$ ja ∞ , $I > 0,5-2,5 \cdot I_n$,
 $t > 0,04-100\text{ s}$, $t > 0,05-100\text{ s}$
- virtamuuntaja 2000/5 A
- pienin ulkoverkon syöttämä oikosulkuvirta $I'_{k_{uvmin}} = 14,5 \cdot 0,8 = 11,6\text{ kA}$
- ostettava tehon määrä voi häiriötilanteessa olla noin 12,1 MVA eli virtana:

$$I = \frac{12,1\text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 6\text{ kV}} = 1165\text{ A}$$

- sähköpuhallinkoneen käynnistysvirtasysäys on n. 1200 A

Ylivirtareleen hetkellislaukaisun asetteluarvo voidaan määrittää pienimmän ulkoverkon syöttämän oikosulkuvirran perusteella. Kun otetaan vielä huomioon laskennan ja releen epätarkkuudet, saadaan pikalaukaisun virta-asetteluksi:

$$\frac{11600\text{A}}{2000\text{A}} = 5,8 \Rightarrow I \gg 5,3$$

Aikahidastus valitaan pisimmän käytössä olevan PK 3:n johtolähdön pikalaukaisun aikahidastuksen perusteella. Jos pisin aikahidastus PK 3:n johtolähdöllä on 0,35 s, on hetkellislaukaisun aikahidastukseksi valittava porrasajan pidempi aika. Kun otetaan huomioon kohdassa 6.1.1 suositeltavat porrasajat numeerisille releille, saadaan aikahidastukseksi

$$t = 0,5 \text{ s}$$

Kiskoston oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa vain riittävän lyhyillä laukaisuaajoilla. 0,5 s hidastusaika on kiskoston kannalta vaarallisen pitkä, minkä takia tässä tapauksessa valokaarireleen käyttö kiskostosuojana on perusteltua. Toinen mahdollisuus suojauksen nopeuttamiseksi on lukitusten käyttö. Siis generaattorilähdön ja ulkoverkon liityntäpisteen pikalaukaisujen toiminta lukitaan, mikäli jonkin muun johtolähdön ylivirtareleen aikalaukaisu on havahtuneena. Tällöin kiskostoon tehoa syöttävien lähtöjen ylivirtareleiden hidastusaikoja voidaan lyhentää 0,5 sekunnista esimerkiksi 0,2 sekuntiin.

Aikahidastetun laukaisun virta-asetteluna voidaan käyttää noin kaksi kertaa muuntajan nimellisvirtaa vastaavaa arvoa ja aika-asetteluna samaa arvoa kuin 110 kV aseman ylivirtareleessä. Aikahidastetun laukaisun asetteluarvot 110 kV asemalla ovat 200 A ja 1,7 s. Näin ollen virta-asetteluarvoksi saadaan

$$\frac{2 \cdot 1833\text{A}}{2000\text{A}} = 1,83 \Rightarrow I > 1,9$$

ja aikahidastukseksi

$$t = 1,7 \text{ s}$$

Taulukoon 6.5 on koottu edellä määritetyt ulkoverkon liityntäpisteen ylivirtareleen asetteluarvot.

Taulukko 6.5 Ulkoverkon liityntäpisteen ylivirtareleen asetteluarvot.

	Suojareleen asettelut			
	$I >>$	$I >$	$t >>$	$t >$
PK3/21 ylivirtarele	$5,3 \cdot I_n$	$1,9 \cdot I_n$	0,5 s	1,7 s

Generaattorin katkaisija

Generaattori ei saa laueta ulkoverkon lyhytaikaisissa vioissa. Ylivirtareleen pikalaukaisua hidastamalla voidaan turhilta laukaisuilta välttyä ulkoverkon nopeasti ohi menevissä vioissa.

Generaattorin johtosuojan ylivirtareleen hetkellislaukaisun on havaittava pienin PK 3 kiskostossa esiintyvä oikosulkuvirta. Hetkellislaukaisun tulee olla kuitenkin selektiivinen vian ollessa jossakin muualla kuin PK 3 kiskostossa. Lisäksi on vielä huomattava, ettei generaattorin oma suoja toimi epäselektiivisesti johtolähtöjen suojien kanssa.

Lähtötiedot:

- generaattori: $S_n = 13,75 \text{ MVA}$, $I_n = 1260 \text{ A}$
- virtamuuntaja 1200/5 A
- ylivirtarele, asettelualue: $I >> 0,5-20 \cdot I_n$ ja ∞ , $I > 0,5-2,5 \cdot I_n$, $t >> 0,04-100 \text{ s}$, $t > 0,05-100 \text{ s}$
- pienin PK 3 kiskostossa esiintyvä oikosulkuvirta $I_{k \text{ PK3min}}' = 3,97 \text{ kA}$
- generaattorin oman suojan asetteluarvot: $I >> 2,0 \cdot I_n$, $I > 1,6 \cdot I_n$, $t >> 1,2 \text{ s}$, $t > 2,0 \text{ s}$

Hetkellislaukaisun virta-asetteluarvo saadaan pienimmän PK 3 kiskostossa esiintyvän oikosulkuvirran perusteella. Kun otetaan vielä huomioon laskennan ja releen epätarkkuudet, saadaan pikalaukaisun virta-asetteluksi:

$$\frac{3970\text{A}}{1200\text{A}} = 3,31 \Rightarrow I >> 3,0$$

Aikahidastuksen arvoksi voidaan valita sama kuin ulkoverkon liityntäpisteen ylivirtareleen pikalaukaisussa. Eli

$$t = 0,5 \text{ s}$$

Jos generaattorille sallitaan puolitoistakertainen kuormitusvirta nimellisvirtaan verrattuna, saadaan ylikuormitussuojan asetteluarvoiksi:

$$\frac{1,5 \cdot 1260\text{A}}{1200\text{A}} = 1,58 \Rightarrow I > 1,6$$

ja aikahidastukseksi

$$t = 2,0 \text{ s}$$

Taulukoon 6.6 on koottu generaattorin johtosuojan ylivirtareleen asetteluarvot.

Taulukko 6.6 Generaattorin johtosuojan ylivirtareleen nykyiset ja uudet asetteluarvot.

	Suoja-releen asetteluarvot			
	$I >>$	$I >$	$t >>$	$t >$
PK3/20 ylivirtarele	$3,0 \cdot I_n$	1,6 s	0,5 s	2,0 s

LÄHDELUETTELO

- /1/ Ylöstalo, Tapani. Oikosulkuvirtojen laskeminen. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Helsinki: INSKO, 1973. Julkaisu 36-73 II. 34 s.
- /2/ AEL kurssi 11.2. - 12.2.1997. Oikosulku sähköverkossa.
- /3/ Roeper, Richard. Short-circuit Currents in Three-phase Systems. Second edition. Berliini: Siemens AG, John Wiley & Sons, 1985. 167 s. ISBN 0 471 90707 3 (Wiley).
- /4/ Koskenvirta, Ari. Oikosulkusuojauksen kehittäminen sellu- ja kartonkitehtaan sähköverkossa. Diplomityö. LTKK, energiatekniikan osasto, 1992.
- /5/ ABB Strömberg. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Seitsemäs painos. Vaasa: Vaasa Oy, 1986. 480 s. ISBN 951 99366 0 2.
- /6/ VDE 0102/11.71, 11.75, Leitsätze für die Berechnung der Kurzschlußströme: Teil 1. Drehstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, Teil 2. Drehstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V.
- /7/ Voimakaapelien valinta ja asennus. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Helsinki: INSKO, 1977. Julkaisu 98-77. 290 s. 951 793 006 2.
- /8/ Alatalo, Pentti. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Oy Nokia Ab Kaapelitehdas. Espoo: Oy Kodaprint Ab, 1975. 167 s. 951 990727 0.
- /9/ Teollisuuden sähköverkot II: oiko- ja maasulkusuojaus. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus (INSKO). Helsinki: INSKO, 1985. Julkaisu 131-85. 951 794 650 3.

- /10/ Mörsky, Jorma. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Karisto Oy, 1992. 459 s.
ISBN 951 672 143 5.
- /11/ Keskijänniteverkon relesuojauksen käytön yleiset suunnitteluohjeet.
Tuotenumero 1051. Sähköenergialiitto ry. Helsinki: SLY-palvelu Oy, 1989.
14 s. ISSN 0786 7905.

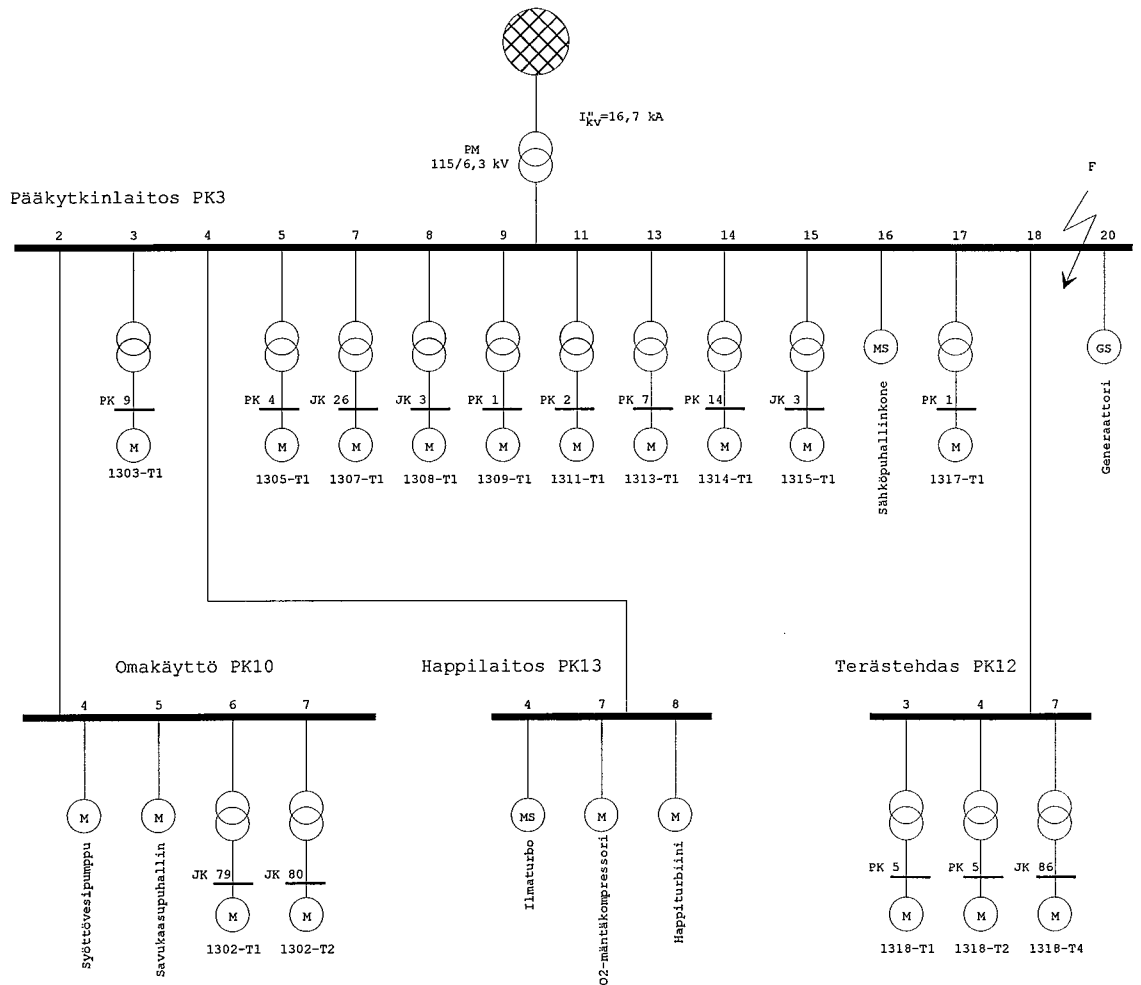
LIITELUETTELO

LIITE 1 Esimerkkilaskelma

ESIMERKKILASKELMA

1 Verkon komponenttien impedanssit

Kuvassa 1 on esitetty laskennan kohteena oleva säteittäinen teollisuusverkko.



Kuva 1 Teollisuuslaitoksen suurjännitejakoverkko.

Jakelumuuntajien syöttämät moottoriryhmät

Jakelumuuntajien syöttämistä pienjännitemoottoreista muodostetaan ekvivalenttimoottorit, joiden impedanssit lasketaan 6 kV jännitetasolla kohdan 4.4 mukaisesti yhtälöllä (4.9). Ekvivalenttimoottoreiden käynnistys- ja nimellisvirran suhteena laskennassa on käytetty arvoa 6.

Esimerkiksi PK 3:n muuntajan 1303-T1 ekvivalenttimoottorin impedanssiksi, reaktanssiksi ja resistanssiksi saadaan

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{6} \cdot \frac{6000^2 \text{ V}^2}{400 \cdot 10^3 \text{ VA}} = 15 \, \Omega$$

$$X_m = 0,922 \cdot Z_m = 0,922 \cdot 15 \, \Omega = 13,83 \, \Omega$$

$$R_m = 0,42 \cdot X_m = 0,42 \cdot 13,83 \, \Omega = 5,8 \, \Omega$$

Taulukkoon 1 on koottu tehtaan ekvivalenttimoottoreiden tehot ja oikosulkusuureet.

Taulukko 1 Tehtaan ekvivalenttimoottorit.

Osasto/muuntaja	S_{ekv}/VA	Z_{km}/Ω	R_{km}/Ω	X_{km}/Ω
Voimalaitos PK3				
1303-T1	400	15,0	5,8	13,8
1305-T1	200	30,0	11,6	27,7
1307-T1	160	37,5	14,5	34,6
1308-T1	100	60,0	23,2	55,3
1309-T1	200	30,0	11,6	27,7
1311-T1	500	12,0	4,7	11,1
1313-T1	800	7,5	2,9	6,9
1314-T1	100	60,0	23,2	55,3
1315-T1	200	30,0	11,6	27,7
1317-T1	700	8,6	3,3	7,9
Voimalaitos PK10				
1302-T1	100	60,0	23,2	55,3
1302-T2	100	60,0	23,2	55,3
Terästehdas PK12				
1318-T1	400	15,0	5,8	13,8
1318-T2	400	15,0	5,8	13,8
1318-T4	200	30,0	11,6	27,7

Jakelumuuntajat

Jakelumuuntajien oikosulkusuureet lasketaan 6 kV tasolla kohdan 4.3 mukaisesti yhtälöllä (4.6)-(4.8).

Esimerkiksi PK 3:n jakelumuuntajan 1303-T1 oikosulkusuureiksi saadaan

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{5,9}{100} \cdot \frac{6000^2 \text{ V}^2}{2 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 1,06 \Omega$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,75}{100} \cdot \frac{6000^2 \text{ V}^2}{2 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 0,14 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{(1,06 \Omega)^2 - (0,14 \Omega)^2} = 1,05 \Omega$$

Taulukossa 2 on esitetty oikosulkulaskennassa tarvittavien jakelumuuntajien nimellisarvot ja oikosulkusuureet.

Taulukko 2 Jakelumuuntajien arvot.

Sijainti/tunnus	U_{1N}/U_{2N} kV/kV	S_N kVA	u_r %	u_k %	R_k Ω	X_k Ω	Z_k Ω
Voimalaitos PK3							
1303-T1	6/0,4	2000	0,75	5,9	0,14	1,05	1,06
1305-T1	6/0,4	800	1,03	5,1	0,46	2,25	2,30
1307-T1	6/0,4	500	1,46	5,3	1,05	3,64	3,79
1308-T1	6/0,4	1000	1,09	6,0	0,39	2,13	2,16
1309-T1	6/0,4	1000	1,11	6,0	0,40	2,12	2,16
1311-T1	6/0,4	2000	0,76	5,7	0,14	1,02	1,03
1313-T1	6/0,4	2000	0,86	6,3	0,16	1,12	1,13
1314-T1	6/0,4	500	1,46	5,5	1,05	3,78	3,92
1315-T1	6/0,4	1000	1,14	5,8	0,41	2,04	2,08
1317-T1	6/0,4	1000	1,10	6,0	0,40	2,11	2,15
1321-T1	115/6,3	2000	0,50	10,0	0,01	0,20	0,20
Voimalaitos PK10							
1302-T1	6/0,4	500	0,77	5,6	0,55	3,96	4,00
1302-T2	6/0,4	500	1,19	5,8	0,86	4,09	4,18
Terästehdas PK12							
1318-T1	6/0,4	2000	0,89	6,1	0,16	1,09	1,10
1318-T2	6/0,4	2000	0,88	6,2	0,16	1,10	1,12
1318-T4	6/0,4	700	1,27	5,7	0,65	2,86	2,93

Syöttävä verkko

Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta päämuuntajan toisiopuolella on $I_{kv}'' = 16700 \text{ A}$, joten syöttävän verkon impedanssiksi kohdan 4.1 mukaisesti yhtälöllä (4.1) saadaan

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} = \frac{1,1 \cdot 6000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 16700 \text{ A}} = 0,2282 \text{ } \Omega$$

Saatuun impedanssin arvoon sisältyy myös päämuuntajan impedanssi.

Kun tämä jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi kohdan 4.1 yhtälön (4.2) mukaisesti, saadaan

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} = 0,1 \cdot 0,2270 \text{ } \Omega = 0,02270 \text{ } \Omega$$

$$X_{kv} = j0,995 \cdot Z_{kv} = j0,995 \cdot 0,2282 \text{ } \Omega = j0,2270 \text{ } \Omega$$

Kun syöttävän verkon impedanssiin lisätään syöttökaapelin (PK 3 syöttö) impedanssi (taulukko 3), saadaan syöttävän verkon kokonaisimpedanssi pääkytkinlaitokseen asti.

Tätä impedanssia merkitään jatkossa Z_{sv} ja sen arvoksi saadaan

$$\begin{aligned} Z_{sv} &= (0,001 + j0,002) \text{ } \Omega + (0,0227 + j0,227) \text{ } \Omega \\ &= (0,0237 + j0,2290) \text{ } \Omega = 0,2302 \angle 84,08^\circ \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Kaapelit

Kaapeleiden impedanssi lasketaan kohdassa 4.5 esitetyllä tavalla yhtälöllä (4.11)

$$Z_j = (r + jx)l$$

Lämpötilan ja virran ahdon vaikutus otetaan huomioon yhtälöllä (4.12)

$$R = [1 + \alpha_{20} (\nu - 20^\circ \text{ C})] (R_{20} + \Delta R)$$

Esimerkkinä lasketaan terästehtaan kojeiston PK 12 syöttökaapelin impedanssi.

Kaapeli: APYAKMM 2x(3x240 mm²), pituus $l = 260$ m.

Johtimen tasavirtaresistanssiksi pituusyksikköä kohti on $r_{j20} = 0,125 \Omega/\text{km} /5/$.

Resistanssin lämpötilakerroin alumiinille on $\alpha_{20\text{Al}} = 0,00403/^{\circ}\text{C}$ ja ko. kaapelityypin lisäresistanssi on $\Delta R = 0,0095 \Omega /8/$. Kun johtimen lämpötilaksi arvioidaan 50°C , saadaan yhtälöllä (4.12) vaihtovirtaresistanssiksi pituusyksikköä kohti

$$r_{j50} = (0,125 + 0,0095) \cdot (1 + 0,00403 \cdot (50 - 20)) \Omega/\text{km} = 0,1508 \Omega/\text{km}$$

Kaapelin induktanssiksi saadaan /7/ $330 \cdot 10^{-6} \text{ H/km}$, jolloin reaktanssiksi pituusyksikköä kohti saadaan

$$x_j = 2\pi \cdot 50 \text{ 1/s} \cdot 330 \cdot 10^{-6} \text{ H/km} = 0,1037 \Omega/\text{km}$$

Kun otetaan huomioon, että kaapeleita on kaksi rinnakkain ja yhteyden pituus on $0,26 \text{ km}$, saadaan impedanssiksi

$$\underline{Z}_j = 0,5 \cdot (0,1508 + j0,1037) \Omega/\text{km} \cdot 0,26 \text{ km} = (0,0196 + j0,01348) \Omega = 0,02379 \angle 34,51^{\circ} \Omega$$

Taulukossa 3 on esitetty kuvan 1 jakeluverkon kaapeleiden impedanssit sijaintipaikkansa jännitetasolla.

Taulukko 3 Kaapeleiden impedanssit. PK 3 lähdön 7 resistanssiin ja reaktanssiin on laskettu sekä kaapelin että avojohdon arvot.

Kohde/kaapelilaji	Pituus m	R mΩ	X mΩ
PK 10			
Syöttö: APYAKMM 2x(3x240 mm ²)	35	7,82	5,4
Lähtö 4: AHMDMK 3x120 mm ²	50	14,2	4,6
Lähtö 5: AHMDMK 3x120 mm ²	80	22,8	7,3
Lähtö 6: AHMDMK 3x120 mm ²	50	14,2	4,6
Lähtö 7: AHMDMK 3x120 mm ²	50	14,2	4,6
PK 3			
Syöttö: AHXCMK 3x3x(1x800 mm ²)	40	1,0	2,0
Lähtö 3: AHXAMK-W 3x185 mm ²	150	28,2	16,5
Lähtö 5: AHXAMK-W 3x185 mm ²	400	75,2	44,0
Lähtö 7: PLKVJ 3x50 mm ² /Raven	500/3500	1471	1306
Lähtö 8: PLKVJ 3x70 mm ²	120	36,4	12,1
Lähtö 9: PLKVJ 3x50 mm ²	620	271	66,2
Lähtö 11: PLKVJ 3x95 mm ²	60	13,2	5,8
Lähtö 13: MCMK 3x70 mm ²	80	24,1	6,0
Lähtö 14: PLKVJ 3x120 mm ²	440	77,8	41,5
Lähtö 15: MCMK 3x50 mm ²	140	68,1	10,8
Lähtö 16: AHXCMKM 3x300 mm ²	120	15,5	19,6
Lähtö 17: AHMDMK 3x120 mm ²	620	177	56,5
Lähtö 20: AHXAMK-W 2x(3x300 mm ²)	90	10,5	9,3
PK 12			
Syöttö: APYAKMM 2x(3x240 mm ²)	260	19,6	13,5
Lähtö 3: MCMK 3x95 mm ²	20	4,4	1,5
Lähtö 4: MCMK 3x95 mm ²	25	5,6	1,9
Lähtö 7: APYAKMM 3x240 mm ²	160	24,1	16,6
PK 13			
Syöttö: APYAKMM 2x(3x150 mm ²) ja APYAKMM 2x(3x240 mm ²)	260 260	 34,7	 20,6
Lähtö 4: HMC MK 2x(3x95 mm ²)	20	2,2	0,7
Lähtö 7: HMC MK 3x120 mm ²	20	3,5	1,8
<u>Lähtö 8: HMC MK 3x120 mm²</u>	<u>20</u>	<u>3,5</u>	<u>1,8</u>

Generaattori ja suurjännitemottorit

Suurjännitetahtimoottoreiden reaktanssit on laskettu kohdan 4.2 mukaisesti yhtälöllä (4.5) ja resistanssit taulukon 4.1 perusteella. Suurjännitetahtimoottoreiden impedanssia laskettaessa ei ole otettu huomioon yhtälöä (4.5a). Suurjännite-epätahtimoottoreiden impedanssit on laskettu kohdan 4.4 mukaisesti yhtälöllä (4.9).

Esimerkkinä lasketaan generaattorin (tahtikone) ja PK 10:n syöttövesipumpun M2 (epätahtikone) reaktanssi ja resistanssi.

G1:

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10,6}{100} \cdot \frac{6300^2 \text{ V}^2}{13,75 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 0,306 \Omega$$

$$R_d = 0,07 \cdot X_d'' = 0,07 \cdot 0,306 \Omega = 0,0214 \Omega$$

M2:

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{5,6} \cdot \frac{6000^2 \text{ V}^2}{\frac{315 \cdot 10^3}{0,87} \text{ VA}} = 17,76 \Omega$$

$$X_m = 0,989 \cdot Z_m = 0,989 \cdot 17,76 \Omega = 17,56 \Omega$$

$$R_m = 0,15 \cdot X_m = 0,15 \cdot 17,56 \Omega = 2,63 \Omega$$

Taulukkoon 4 on koottu suurjännitemoottoreiden oikosulkusuureiden laskennassa tarvittavat tiedot sekä laskennan tulokset.

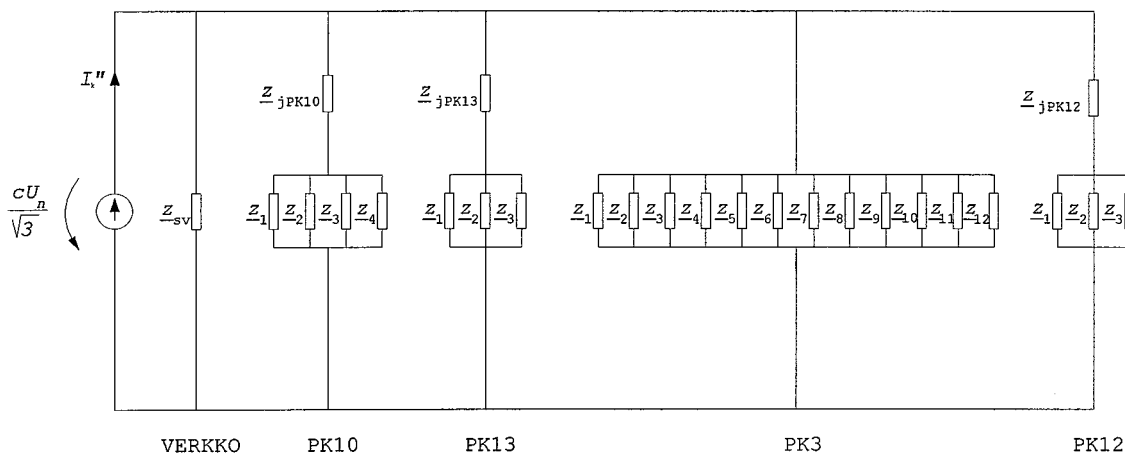
Taulukko 4 Suurjännitemoottoreiden sähkötekniisiä arvoja sekä oikosulkusuureet.

Sijainti/ moottori	U_n kV	S_n MVA	P_n MW	$\cos \varphi$	I_s/I_n	x_d''	n_n min^{-1}	R Ω	X Ω
PK 3									
G1	6,3	13,75	-		-	0,106	3000	0,0214	0,306
M1	6,3	3,0	-		-	0,29	1500	0,269	3,84
PK 10									
M2	6,0	-	0,315	0,87	5,6	-	2970	2,63	17,56
M3	6,0	-	0,350	0,82	5,6	-	970	2,23	14,90
PK 13									
M6	6,0	-	0,33	0,87	6,0	-	2970	2,35	15,64
M5	6,0	-	0,54	0,81	4,7	-	475	1,70	11,36
M4	6,0	3,3	-		-	0,29	1500	0,219	3,13

2 Verkon mitoituksessa ja suojauksessa tarvittavien oikosulkusuureiden laskenta

Seuraavassa esitellään oikosulkusuureiden I_k'' , i_s , I_a , I_{th} , P_{ksjmin} , P_{kpjmax} ja P_{kpjmin} laskeminen pääkytkinlaitoksessa PK 3 tapahtuvassa kolmivaiheisessa oikosulussa.

Oikosulkuvirtojen laskemista varten muodostetaan kuvan 1 esittämästä jakeluverkosta Theveninin menetelmän mukainen sijaiskytkentä, joka on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Yksivaiheinen sijaiskytkentä pääkytkinlaitoksessa PK 3 tapahtuvassa kolmivaiheisessa oikosulussa.

Sijaiskytkennän ekvivalenttimootteita koskevat impedanssit ($Z_1 \dots Z_n$) sisältävät oikosulkuvirtaa syöttävän haaran jakelumuuntajien ja kaapeleiden impedanssit. Nämä saadaan yhdistämällä edellä esitettyjen taulukkojen 1, 2 ja 3 ko. haaran impedanssit. Suurjännitemootteita koskevat impedanssit sisältävät syöttökaapeleiden impedanssit. Näin lasketut sijaiskytkennän impedanssi-arvot on koottu taulukoon 5.

Esimerkkinä lasketaan PK 10:n jakelumuuntajan 1302-T1 ekvivalenttimoottorin impedanssi Z_3 .

Ekvivalenttimoottori (taulukko 1): $R_m = 23,2 \, \Omega$, $X_m = 55,3 \, \Omega$

Jakelumuuntaja (taulukko 2): $R_m = 0,55 \, \Omega$, $X_m = 3,96 \, \Omega$

Kaapeli (taulukko 3): $R_m = 0,0142 \, \Omega$, $X_m = 0,0046 \, \Omega$

Yhteensä: $R_3 = 23,8 \, \Omega$, $X_3 = 59,3 \, \Omega$, $Z_3 = 63,9 \angle 68,1^\circ \, \Omega$

Taulukko 5 Sijaiskytkennän impedanssit.

Sijainti/ merkintä	Z_i Ω	Kulma $^\circ$	R_i Ω	X_i Ω
Verkko				
Z_{sv}	0,2302	84,08	0,0237	0,2290
PK 3				
Z_1	16,05	68,16	5,97	14,90
Z_2	32,32	67,91	12,15	29,95
Z_3	43,04	66,67	17,04	39,52
Z_4	62,14	67,62	23,66	57,46
Z_5	32,28	67,63	12,29	29,85
Z_6	13,00	68,35	4,80	13,05
Z_7	8,62	69,03	3,08	8,04
Z_8	63,96	67,61	24,36	59,14
Z_9	32,08	67,85	12,10	29,71
Z_{10}	3,87	85,79	0,28	3,86
Z_{11}	10,80	68,87	3,89	10,07
Z_{12}	0,317	84,22	0,0319	0,3153
PK 10				
Z_{jPK10}	0,0095	34,53	0,0078	0,0054
Z_1	17,76	81,43	2,65	17,56
Z_2	15,07	81,39	2,26	14,90
Z_3	63,88	68,13	23,79	59,28
Z_4	64,11	67,92	24,10	59,41
PK 12				
Z_{jPK12}	0,027	29,54	0,024	0,013
Z_1	16,07	68,18	5,97	14,92
Z_2	16,09	68,21	5,97	14,94
Z_3	39,92	68,07	12,29	30,53
PK 13				
Z_{jPK13}	0,040	30,74	0,035	0,021
Z_1	3,14	85,96	0,221	3,13
Z_2	11,49	81,45	1,707	11,36
Z_3	15,82	81,46	2,35	15,65

Alkuoikosulkuvirta I_k'' ja sysäysoikosulkuvirta i_s

Sijaiskytkentää sieventämällä saadaan Theveninin impedanssiksi laskettua $\underline{Z}_T = 0,111 \angle 82,95^\circ$. Tämän jälkeen voidaan alkuoikosulkuvirta laskea kohdan 3.1 mukaisesti yhtälöllä (3.1)

$$\underline{I}_k'' = \frac{c \underline{U}_{nv}}{\underline{Z}_T} = \frac{1,1 \cdot 6000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,111 \Omega} \angle -82,95^\circ = 34,28 \angle -82,95^\circ \text{ kA}$$

Sysäys- ja katkaisuoikosulkuvirran laskemista varten on saatu alkuoikosulkuvirta jaettava ko. virtaa syöttäville eri lähteille. Oikosulkuvirtojen jakautuminen saadaan selville sijaiskytkennän impedanssien avulla. Esimerkiksi syöttävän verkon osuus I_{ksv}'' alkuoikosulkuvirrasta on

$$\underline{I}_{ksv}'' = \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_{sv}} \cdot \underline{I}_k'' = \frac{0,111 \angle 82,95^\circ \Omega}{0,2302 \angle 84,08^\circ \Omega} \cdot 34,28 \angle -82,95^\circ \text{ kA} = 16,55 \angle -84,08^\circ \text{ kA}$$

Eri lähteiden sysäysoikosulkuvirrat lasketaan kohdan 5.2 mukaisesti yhtälöllä (5.1).

Esimerkiksi syöttävän verkon sysäyskertoimeksi κ_{sv} (kuva 5.1) saadaan

$$\frac{R_{sv}}{X_{sv}} = 0,1 \Rightarrow \kappa_{sv} = 1,75$$

ja sysäysoikosulkuvirraksi

$$i_{ssv} = \kappa_{sv} \sqrt{2} I_{ksv}'' = 1,74 \cdot \sqrt{2} \cdot 16,55 \text{ kA} = 40,68 \text{ kA}$$

Taulukossa 6 on esitetty alku- ja sysäysoikosulkuvirtojen arvot eri syöttäville lähteille jaettuna. Taulukossa on esitetty myös vikapaikan sysäysoikosulkuvirta, joka saadaan kohdan 5.2 mukaisesti laskemalla yhteen eri haarojen syöttämät sysäysoikosulkuvirrat.

Taulukko 6 Tehdasverkon alku- ja sysäysoikosulkuvirrat, kun oikosulku tapahtuu pääkytkinlaitoksessa PK 3. Suluissa on lähdettä kuvaava sijaiskytkennän impedanssi.

Oikosulkuvirtaa syöttävä lähde	I'_k kA	Kulma °	κ	i_s kA
Verkko	16,55	-84,08	1,74	40,68
PK 3				
1303-T1 (Z_1)	0,237	-68,16	1,31	0,441
1305-T1 (Z_2)	0,118	-67,91	1,31	0,218
1307-T1 (Z_3)	0,089	-66,67	1,28	0,159
1308-T1 (Z_4)	0,061	-67,62	1,30	0,113
1309-T1 (Z_5)	0,118	-67,63	1,31	0,218
1311-T1 (Z_6)	0,293	-68,35	1,32	0,546
1313-T1 (Z_7)	0,442	-69,03	1,33	0,832
1314-T1 (Z_8)	0,060	-67,61	1,30	0,110
1315-T1 (Z_9)	0,119	-67,85	1,31	0,220
1317-T1 (Z_{11})	0,353	-68,87	1,33	0,663
M1 (Z_{10})	0,985	-85,79	1,81	2,516
G1 (Z_{12})	12,02	-84,22	1,74	29,65
PK 10				
M2 (Z_1)	0,214	-81,37	1,64	0,498
M3 (Z_2)	0,253	-81,33	1,64	0,587
1302-T1 (Z_3)	0,060	-68,07	1,31	0,111
1302-T2 (Z_4)	0,060	-67,86	1,31	0,110
PK 12				
1318-T1 (Z_1)	0,236	-68,03	1,31	0,439
1318-T2 (Z_2)	0,236	-68,05	1,32	0,439
1318-T4 (Z_3)	0,115	-67,92	1,31	0,214
PK 13				
M4 (Z_1)	1,200	-85,09	1,81	3,076
M5 (Z_2)	0,329	-80,98	1,64	0,766
M6 (Z_3)	0,239	-80,98	1,64	0,557
Yhteensä vika- paikalla	34,28	-82,95		83,07

Katkaisuoikosulkuvirta I_a

Vikapaikan katkaisuoikosulkuvirta koostuu eri oikosulkulähteiden syöttämistä katkaisuvirroista. Katkaisuvirta lasketaan kohdan 5.4 mukaisesti yhtälöillä (5.5) ja (5.10). Katkaisuviiveen arvona käytetään 0,25 s.

Esimerkkinä lasketaan generaattorin G1 syöttämän katkaisuvirran arvo. Katkaisukertoimen μ_G arvoksi yhtälöllä (5.9) saadaan

$$\frac{I_{kG}''}{I_{nG}} = \frac{12025 \text{ A}}{1260 \text{ A}} = 9,54 \Rightarrow \mu_G = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I_{kG}''}{I_{nG}}} = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \cdot 9,54} = 0,59$$

ja katkaisuvirraksi

$$I_{aG} = \mu_G I_{kG}'' = 0,59 \cdot 12025 \text{ A} = 7035 \text{ A}$$

Taulukossa 7 on esitetty moottoreiden syöttämät katkaisuvirrat sekä niiden laskemisessa tarvittavat lähtötiedot.

Taulukko 7 Moottoreiden syöttämä katkaisuoikosulkuvirta katkaisuviiveen arvolla $t_{\min} = 0,25 \text{ s}$.

Kohde	m	I_{km}''/A	I_{nm}/A	I_{km}''/I_{nm}	μ	q	I_a/A
PK 3							
Sähköpuhallinkone	-	985	284	3,47	0,81	-	800
Generaattori	-	12025	1260	9,54	0,59	-	7035
PK 10							
Syöttövesipumppu	0,315	214	37	5,79	0,66	0,14	21
Savukaasupuhallin	0,117	253	44	5,74	0,67	0,05	8
PK 13							
O ₂ -turbo	-	1200	331	3,62	0,80	-	956
O ₂ -kompressori	0,09	328	69	4,75	0,71	0,02	5
O ₂ -turbiini	0,33	238	39	6,11	0,65	0,15	23

Vikapaikan katkaisuoikosulkuvirta koostuu useiden eri lähteiden syöttämistä katkaisuoikosulkuvirroista. Kun otetaan huomioon, että 110 kV verkon syöttämä oikosulkuvirta ei vaimene, saadaan vikapaikan katkaisuoikosulkuvirraksi kohdan 5.4 mukaisesti yhtälöllä (5.15)

$$I_a = \mu_k I_k'' + I_{ksv}'' = 0,27 \cdot 34,28 \text{ kA} + 16,55 \text{ kA} = 25,8 \text{ kA}$$

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta lasketaan kohdassa 5.5 esitetyllä tavalla yhtälöllä (5.16)

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

Tasavirtatekijä riippuu oikosulkupiirin sysäyskertoimesta κ ja oikosulun kestoajasta t_k . Tasavirtatekijä m voidaan lukea kuvasta 5.5. Vaihtovirtatekijä n riippuu oikosulun kestoajan lisäksi myös alkuoikosulkuvirran I_k'' ja pysyvän oikosulkuvirran I_k suhteesta. Pysyvän tilan oikosulkuvirta voidaan määrittää kohdan 5.3 mukaisesti yhtälön (5.4) ja kuvan 5.2 avulla, minkä jälkeen vaihtovirtatekijä luetaan kuvasta 5.6. Syöttävän verkon oikosulkuvirta ei vaimene, joten vaihtovirtatekijä $n_{sv} = 1,0$.

Epätahtimoottoreiden syöttämä oikosulkuvirta vaimenee nopeasti, joten sillä ei ole merkitystä termiseen ekvivalenttiseen oikosulkuvirtaan.

Esimerkkinä lasketaan generaattorin G1 syöttämä ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta 0,3 s katkaisuaajalla.

Sysäyskertoimeksi κ_G (taulukosta 6) saadaan

$$\kappa_G = 1,74$$

ja kuvasta 5.5 tasavirtatekijäksi ($t_k = 0,3$ s) m_G

$$m_G = 0,1$$

Kerroin $\lambda_{\max}$ saadaan kuvasta 5.2. Oletetaan, että $U_{\max}/U_{\min} = 1,3$ ja $x_{dG} = 1,95$, jolloin kertoimeksi $\lambda_{\max G}$ saadaan

$$\frac{I_{kG}''}{I_{nG}} = \frac{12025 \text{ A}}{1260 \text{ A}} = 9,54 \Rightarrow \lambda_{\max G} = 1,9$$

Generaattorin suurimmaksi pysyvän tilan oikosulkuvirraksi $I_{k\max G}$ saadaan yhtälöllä (5.4)

$$I_{k\max G} = \lambda_{\max G} I_{nG} = 1,9 \cdot 1260 \text{ A} = 2394 \text{ A} \Rightarrow \frac{I_{kG}''}{I_{k\max G}} = \frac{12025 \text{ A}}{2394 \text{ A}} = 5,02$$

ja kuvasta 5.6 vaihtovirtatekijäksi ($t_k = 0,3$ s) n_G

$$n_G = 0,48$$

Generaattorin ekvivalenttiseksi termiseksi oikosulkuvirraksi saadaan yhtälöllä (5.16) siis

$$I_{thG} = I_{kG}'' \sqrt{(m_G + n_G)t_k} = 12025 \text{ A} \cdot \sqrt{(0,1 + 0,48) \cdot 0,3} = 5016 \text{ A}$$

Vikapaikan ekvivalenttinen oikosulkuvirta saadaan laskemalla yhteen eri oikosulkulähteiden syöttämät ekvivalenttiset oikosulkuvirrat. Taulukossa 8 on esitetty eri lähteiden syöttämät ekvivalenttiset oikosulkuvirrat ja vikapaikan ekvivalenttinen oikosulkuvirta.

Taulukko 8 Eri oikosulkulähteiden syöttämät ekvivalenttiset oikosulkuvirrat katkaisuviiveen arvolla 0,3 s.

Kohde	κ	$\lambda_{\max}$	$I_k''/I_{k\max}$	m	n	I_{th}/kA
Generaattori	1,74	1,9	5,0	0,10	0,48	5,02
Sähkö.puh.kone	1,81	2,1	1,7	0,14	0,85	0,54
O ₂ -turbo	1,81	2,1	1,8	0,14	0,82	0,64
Syöttävä verkko	1,74	-	1,0	0,10	1,00	9,51
Yhteensä	-	-	-	-	-	15,71

Oikosulkuvirtojen I_{ksjmin} , I_{kpjmax} ja I_{kpjmin} laskeminen

Oikosulkusuojien virta-asetteluarvojen määrittämistä varten lasketaan suurjännitepuolen pienimmät I_{ksjmin} ja pienjännitepuolen suurimmat I_{kpjmax} muutostilan oikosulkuvirrat. Lisäksi on tunnettava pienimmät 400 V pääkeskuksissa esiintyvät muutostilan oikosulkuvirrat I_{kpjmin} . Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa oletetaan verkon olevan saarikäytössä ja kuormittamaton. Generaattorin reaktanssin arvona käytetään muutostilan arvoa. Suurinta pienjännitepuolen muutosoikosulkuvirtaa laskettaessa pienjännitemoottoreita ei tarvitse ottaa huomioon.

Seuraavassa lasketaan jakelumuuntajan 1303-T1/PK 9 suojauksen suunnittelussa tarvittavat oikosulkuvirrat.

Pienin suurjännitepuolen muutosoikosulkuvirta esiintyy kolmivaiheisessa oikosulussa kappaleen 3.3 mukaisesti. Oikosulkupiirin impedanssi muodostuu generaattorin ja sen kaapelin impedanssin sekä jakelumuuntajan 1303-T1 syöttökaapelin impedanssin sarjakytkenästä. Kokonaisimpedanssiksi saadaan $Z'_{kok} = 0,7163 \Omega$. Kun otetaan huomioon jännitteen kerroin c_{min} kappaleen 3.1 ja oikosulkukohdan vikaimpedanssi kappaleen 4.7 mukaisesti, saadaan pienimmäksi suurjännitepuolen muutosoikosulkuvirraksi yhtälöllä (3.1)

$$I'_{ksjmin} = \frac{c_{min} U_{nv}}{Z'_{kok}} = \frac{1,0 \cdot 6000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,7163 \Omega} \cdot 0,8 = 3869 \text{ A}$$

Suurinta pienjännitepuolen oikosulkuvirtaa laskettaessa tarkistetaan ensin, pitääkö syöttävä verkko ottaa huomioon. Syöttävän verkon näennäiseksi alkuoikosulkutehoksi saadaan

$$S_{kv}'' = 1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 34275 A = 391,8 MVA$$

Jakelumuuntajan 1303-T1 nimellinäennäisteho on $S_n = 2 MVA$. Kohdan 4.1 mukaan syöttävä verkko pitää ottaa huomioon, jos $S_{kv}'' < 400 \cdot S_n$. Tässä tapauksessa $400 \cdot S_n = 800 MVA$, joten syöttävä verkko on otettava huomioon. Syöttävän verkon resistanssi R_{kv} ja reaktanssi X_{kv} voidaan laskea kohdan 4.1 mukaisesti yhtälöillä (4.3) ja (4.4).

$$X_{kv} = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_{kv}''} = \frac{1,1 \cdot 400^2 V^2}{391,8 \cdot 10^6 VA} = 4,492 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} = 0,1 \cdot 4,492 \cdot 10^{-4} \Omega = 4,492 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Pienjännitepuolen suurinta oikosulkuvirtaa rajoittaa syöttävän verkon oikosulkuimpedanssin lisäksi myös muuntajan oikosulkuimpedanssi, joka saadaan taulukosta 2. Kun nämä impedanssit lasketaan yhteen, saadaan oikosulkuvirtaa rajoittavaksi kokonaisimpedanssiksi $5,171 \cdot 10^{-3} \Omega$. Kun otetaan huomioon kolmivaiheinen vika ja kertoimen c_{max} arvo kappaleen 3.1 mukaisesti, saadaan pienjännitepuolen suurimmaksi oikosulkuvirran arvoksi yhtälöllä (3.1)

$$I_{kpjmax}' = \frac{1,0 \cdot 400 V}{\sqrt{3} \cdot 5,171 \cdot 10^{-3} \Omega} = 44,66 kA$$

Ensiöpuolelle redusoituna arvoksi saadaan 2977 A.

Pienin pienjännitepuolen pääkeskuksen oikosulkuvirta esiintyy kohdan 3.3 mukaan kaksivaiheisessa oikosulussa, mikä otetaan huomioon kertoimella $\sqrt{3}/2$. Tässä tapauksessa oikosulkuvirtaa rajoittaa muuntajan ja syöttävän verkon oikosulkuimpedanssin lisäksi myös muuntajan alajännitepuolen ja pienjännitepääkeskuksen välisen kaapelin impedanssi. Valokaaren ja muiden vikakohdan impedanssien vaikutus otetaan

huomioon kertoimella 0,6 kohdan 4.7 mukaisesti. Jos tehdasverkon muuntajien alajännitepuolen ja pienjännitepääkeskusten väliset yhteydet oletetaan vahvoiksi ja lyhyiksi, voidaan niiden impedanssit jättää laskelmissa huomiotta. Jännitteen kertomina käytetään kappaleen 3.1 mukaan $c_{\min} = 0,95$. Syöttävän verkon resistanssi ja reaktanssi lasketaan kuten suurimman pienjännitepuolen oikosulkuvirran tapauksessa ottaen huomioon, että syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho saarikäytössä on 137 MVA (oikosulkuvirtaa syöttää ainoastaan generaattori, $I_{kG}'' = 12025$ A).

Jakelumuuntajan 1303-T1 syöttämän pienjännitepääkeskuksen PK 9 pienimmäksi oikosulkuvirraksi edellisen perusteella saadaan yhtälöllä (3.1)

$$I'_{kpjmin} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 6,006 \cdot 10^{-3} \Omega} \cdot 0,6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 18,98 \text{ kA}$$

Kun tämä virta redusoidaan ensiöpuolelle, täytyy ottaa huomioon epäsymmetristen vikavirtojen muuntuminen Dyn-kytketyssä muuntajassa kohdan 3.3 mukaisesti. Muuntajan muuntosuhteen lisäksi toision vikavirta on kerrottava luvulla $1/\sqrt{3}$, jolloin pienimmäksi PK 9:n oikosulkuvirraksi suurjännitepuolelta katsottuna saadaan 731 A.