

## 7. OIKOSULKUSUOJAUS

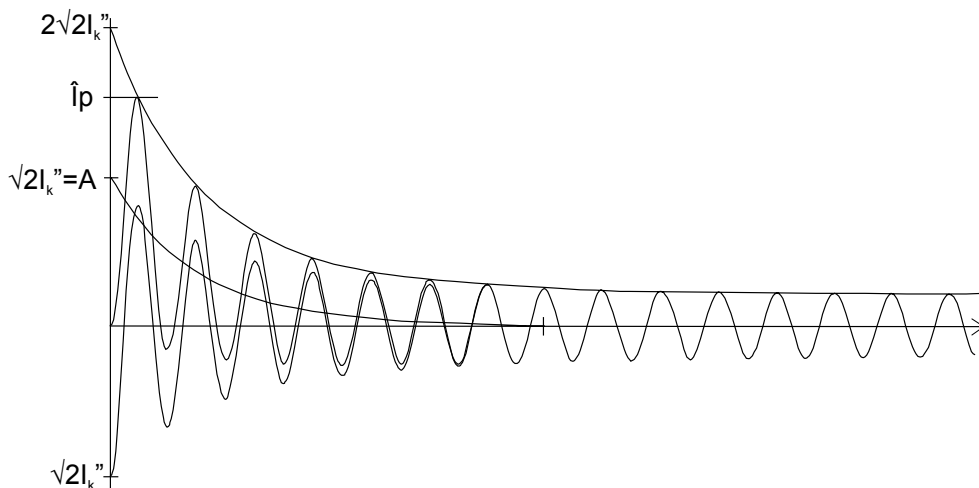
### 7.1. Yleistä

Verkon laitteiden mitoittamisessa, oikosulkusuojausten suunnittelussa ja turvallisen käytön suunnittelussa on tunnettava oikosulkuvirrat eri tilanteissa ja eri osissa verkkoa. Verkon komponenttien on kestävä oikosulun aikaiset dynaamiset ja termiset rasitukset. Vakaa jännite ja siten hyvä sähkön laatu edellyttää riittävän suurta

Oikosulkuvirrassa (kuva 7.2a) on vaimeneva tasavirtakomponentti ( $A$ ), jonka suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirin  $R/X$ -suhteesta, ja vaihtovirtakomponentti, jossa voi myös olla vaimeneva osa. Alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Se vastaa generaattoreiden reaktansseja vian syntyhetkellä. Vian aikana reaktanssit kasvavat ja virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon  $I_k$ . Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, kun otetaan huomioon myös tasavirtakomponentti, on ns. sysäyoikosulkuvirta  $i_p$ . Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla  $I_{th}$  on sama virtateitä lämmittävä vaikutus, kuin oikosulkuvirralla. Useissa yhteyksissä käytettyä muutostilan oikosulkuvirtaa  $I_k'$  IEC-standardit eivät käytä. Katkaisuvirta  $I_b$  on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo katkaisijan aloittaessa katkaisun.

### 7.2. Oikosulkuvirran laskeminen

Kolmivaihejärjestelmän oikosulkuvirran laskemista ja vaikutuksia käsitellään standardeissa IEC-60909, 60909-1, 60909-2, 60781, 60865-1 ja 60865-2.



KUVA 7.2a. Oikosulkuvirran käyrämuoto.

#### 7.2.1. Oikosulkuvirran laskeminen Theveninin menetelmällä

Theveninin menetelmän yksivaiheisessa sijaiskytkennässä komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ns. ekvivalenttisella jännitelähteellä  $c U_n$ , jossa  $U_n$  on vikapaikan käyttöjännite vika hetkellä ja  $c$  taulukon 7.2a mukainen kerroin.

Oikosulkuvirta saadaan yhtälöstä:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_k}, \quad (1)$$

jossa  $c$  = taulukon 7.2a mukainen kerroin,  
 $U_n$  = syöttävän verkon jännite,  
 $Z_k$  = impedanssi vikapaikasta katsottuna.

Taulukko 7.2a. IEC 60909- mukainen jännitekerroin c.

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

## Vikatyytit

Yksi- ja kaksivaiheisissa vioissa sijaiskytkentä muodostetaan myötä-, vasta- ja nollakomponenttiverkkojen avulla. Vikatyyppi määrää komponenttiverkkojen keskinäisen kytkeytymisen.

Komponenttien impedanssit kytkeytyvät myötä- ja vastaverkkoihin samalla tavalla. Nollaverkon kytkeytyminen riippuu muuntajan kytkentäryhmästä. Tähtipisteiden ja maan väliset impedanssit ja vikaimpedanssi kytkeytyvät nollaverkkoon kolminkertaisina. Ekvivalenttinen jännitelähde sijoitetaan ainoastaan myötäverkkoon.

Johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla, vasta- ja myötäimpedanssit ovat yhtä suuria. Pyörivillä koneilla myötä- ja vastareaktanssit voivat erota toisistaan. Nollaimpedanssit eroavat myötäimpedansseista kaikilla verkon komponenteilla.

Kolmevaiheisessa oikosulussa oikosulkuimpedanssi muodostuu myötäimpedansseista ja kolmevaiheinen oikosulkuvirta saadaan yhtälöstä

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_1} \quad , \quad (2)$$

jossa  $c$  = taulukon 7.2a mukainen kerroin,  
 $U_n$  = syöttävän verkon jännite ja  
 $Z_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi.

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta ilman maakosketusta saadaan yhtälöstä

$$I''_{k2} = \frac{c U_n}{|\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2|} \quad , \quad (3)$$

jossa  $c$  = taulukon 7.2a mukainen kerroin,  
 $U_n$  = syöttävän verkon jännite,  
 $\bar{Z}_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi ja  
 $\bar{Z}_2$  = vastakomponenttiverkon impedanssi.

Kaukana generaattoreista  $Z_1 \sim Z_2$  ja yhtälö (3) saa muodon

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{2 |\bar{Z}_1|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} \sim 0,87 \cdot I_{k3} \quad . \quad (4)$$

Vaiheiden L2 ja L3 oikosulkuvirta kaksivaiheisessa oikosulussa maakosketuksella lasketaan yhtälöillä

$$I''_{k2EL2} = c U_n \frac{\left| 1 + \bar{a}^{-2} + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1} \right|}{\left| \bar{Z}_1 + 2\bar{Z}_2 \right|} \quad \text{ja} \quad (4)$$

$$I''_{k2EL3} = c U_n \frac{\left| 1 + \bar{a} + \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1} \right|}{\left| \bar{Z}_1 + 2\bar{Z}_2 \right|}, \quad (5)$$

joissa  $\bar{a} = 1 \angle 120^\circ$ ,  
 $\bar{a}^2 = 1 \angle 240^\circ$ ,  
 $\bar{a}$  ja  $\bar{a}^2$  ovat yksikkövektoreita, joilla käännetään vaihekulmaa,  
 $\bar{Z}_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi,  
 $\bar{Z}_2$  = vastakomponenttiverkon impedanssi ja  
 $\bar{Z}_0$  = nollakomponenttiverkon impedanssi.

Vikapaikan virta lasketaan yhtälöstä:

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{\left| \bar{Z}_1 + 2\bar{Z}_2 \right|}, \quad (6)$$

jossa  $\bar{Z}_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi ja  
 $\bar{Z}_0$  = nollakomponenttiverkon impedanssi.

Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan yhtälöstä:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{\left| \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 \right|}, \quad (7)$$

jossa  $\bar{Z}_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi,  
 $\bar{Z}_2$  = vastakomponenttiverkon impedanssi ja  
 $\bar{Z}_0$  = nollakomponenttiverkon impedanssi.

Kaukana generaattoreista tapahtuvissa oikosuluissa ( $Z_1 \sim Z_2$ ) oikosulkuvirta saadaan yhtälöstä:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{\left| 2\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \right|}, \quad (7a)$$

jossa  $\bar{Z}_1$  = myötäkomponenttiverkon impedanssi ja  
 $\bar{Z}_0$  = nollakomponenttiverkon impedanssi.

Suurin oikosulkuvirta riippuu  $Z_1/Z_0$  ja  $Z_2/Z_1$  suhteista. Yleensä kolmevaiheinen oikosulkuvirta on suurin. Lähellä maadoitettua muuntajan tähtipistettä voi yksivaiheinen oikosulkuvirta olla suurin.

## 7.2.2. Oikosulkupiirin komponentit.

### Verkkosyöttö

Verkkosyötölle oikosulkuimpedanssi saadaan oikosulkutehosta tai -virrasta yhtälöstä:

$$Z_Q'' = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{kQ}''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad , \quad (8)$$

jossa  $c$  = taulukon 7.2a mukainen kerroin,  
 $U_n$  = syöttävän verkon jännite,  
 $S_{kQ}''$  = alkuoikosulkuteho ja  
 $I_{kQ}''$  = alkuoikosulkuvirta.

Yleensä pätee  $Z_1 = Z_2$  ja  $I_k'' = I_b = I_k$  ja yli 35 kV:n jännitteellä  $Z_Q \approx X_Q$ . Muulloin  $R_Q \approx 0,1 \cdot X_Q$ .

### Muuntaja

Kaksikämmimuuntajan oikosulkuimpedanssi, -resistanssi ja -reaktanssi saadaan kilpiarvoista yhtälöillä:

$$Z_T = \frac{u_{kr} U_{rT}^2}{100\% S_{rT}} \quad , \quad (9)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr} U_{rT}^2}{100\% S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} \quad , \quad (10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad , \quad (11)$$

joissa  $u_{kr}$  = oikosulkujännite,  
 $U_{rT}$  = nimellisjännite,  
 $S_{rT}$  = nimellisteho,  
 $R_T$  = nimellinen resistanssi,  
 $P_{krT}$  = kuormitushäviöt,  
 $I_{rT}$  = nimellisvirta ja  
 $u_{Rr}$  = resistiivinen oikosulkujännite.

Muuntajalla on  $Z_1 = Z_2$ .

Muuntajan nollaimpedanssi riippuu käämien kytkennästä (kolmio, tähti, hakatähti), tähtipisteiden käsittelystä (maadoitettu, maadoittamaton) ja magneettipiirin rakenteesta (1-vaihemuuntaja, 3-pylväs-, 5-pylväsmuuntaja). Viisipylväsmuuntajalla, jonka toinen käämi on kolmiossa, maadoitetun tähtipisteen puolen nollaimpedanssi on noin  $1 \cdot Z_k$ . Kolmepylväsmuuntajalla vastaava on  $(0,7 \dots) 0,9 (\dots 1) \cdot Z_k$ . Kolmepylväsmuuntajilla, joiden toinen käämi on maadoittamaton tähti tai hakatähti, maadoitetun tähtipisteen puolella nollaimpedanssi on  $(3 \dots) 4 \dots 5 (\dots 10) \cdot Z_k$ . Viisipylväsmuuntajalla se on  $10 \dots 100 \cdot Z_k$ . Maadoitetun hakatähden puolella nollaimpedanssi on  $0,1 \dots 0,15 \cdot Z_k$ . Kolmiokäämin puolella nol-laverkko on avoin.

## Kuristin

Sarjakuristimen oikosulkuimpedanssi saadaan yhtälöstä

$$Z_R = \frac{\Delta u_N}{100\%} \frac{U_{rR}}{\sqrt{3}I_{rR}} = \frac{\Delta u_N}{100\%} \frac{U_{rR}^2}{S_{rR}}, \quad (12)$$

joissa  $\Delta u_N$  = on nimellinen jännitteenalenema,  
 $U_{rR}$  = nimellisyännite,  
 $S_{rR}$  = nimellisteho ja  
 $I_{rR}$  = nimellisvirta.

Kuristimella  $Z_1 = Z_2$ .

## Johdot ja kiskot

Kaapeleiden resistanssit ja reaktanssit saadaan valmistajalta. Avojohtojen ja kaapeleiden resistanssit voidaan laskea myös yhtälöstä (13).

$$R_L = \frac{\rho}{q_n} \cdot L \quad [\Omega],$$

joissa  $R_L$  = johtimen resistanssi, (13)  
 $\rho$  = johtimen ominaisresistanssi,  
 = 1/54  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  kuparijohtimille,  
 = 1/34  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  alumiinijohtimille,  
 = 1/31  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  alumiiniseoksille,  
 $q_n$  = johtimen pinta-ala [ $\text{mm}^2$ ] ja  
 $L$  = johtimen pituus [m].

Avojohtojen reaktanssi saadaan yhtälöstä

$$X_L = 0,0628 \left( \frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \cdot L \quad [\Omega], \quad (14)$$

joissa  $d$  = johtimien välinen geometrinen keskietäisyys

$$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L2L3} d_{L3L1}} \quad [\text{mm}],$$

$r$  = yksittäisen johtimen säde tai johdinnipulle  $r = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$  [mm],

joissa

$R$  = johdinnipun säde.

$n$  = nippujohdon osajohtimien lukumäärä ja

$L$  = johtimen pituus [km].

Kiskostoille voidaan yleensä käyttää reaktanssina 0,15 m $\Omega$ /m. Johdoilla  $Z_1 = Z_2$ . Nol-laimpedanssit joudutaan yleensä mittaamaan.

## Tahti- ja epätahtikoneet

Tahtikoneen alkureaktanssi saadaan yhtälöstä:

$$X_G'' = \frac{x_d''}{100\%} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}, \quad (15)$$

joissa  $x_d''$  = alkureaktanssi,  
 $U_{rG}$  = nimellisyännite ja  
 $S_{rG}$  = nimellisteho.

Generaattorin impedanssi lasketaan yhtälöstä

$$\bar{Z}_{G,K} = K_G \bar{Z}_G \quad (16)$$

IEC 60909 mukainen korjauskerroin  $K_G$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (17)$$

jossa  $c_{max}$  = taulukon 7.2a mukainen kerroin,  
 $U_n$  = käyttöjännite,  
 $U_{rG}$  = generaattorin nimellisjännite,  
 $x_d''$  = generaattorin suhteellinen alkureaktanssi,  
 $\varphi_{rG}$  =  $I_{rG}$  ja  $U_{rG}$  välinen vaihe-ero.

Generaattorin ja muuntajan muodostaman yksikön impedanssi lasketaan yhtälöstä

$$\bar{Z}_{G, PSU} = K_{G, PSU} \bar{Z}_G \quad (18)$$

IEC 60909 mukainen korjauskerroin  $K_{PSU}$

$$K_{PSU} = \frac{U_{nQ}^2 U_{rTLV}^2}{U_{rG}^2 U_{rTLH}^2} \frac{c_{max}}{1 + (x_d'' - x_T) \sin \varphi_{rG}}, \quad (19)$$

jossa  $U_{nQ}$  = liityntäpisteen käyttöjännite,  
 $U_{rG}$  = generaattorin nimellisjännite,  
 $U_{rTLV}$  = muuntajan alajännitepuolen nimellisjännite,  
 $U_{rTLH}$  = muuntajan yläjännitepuolen nimellisjännite,  
 $c_{max}$  = taulukon 7.1 mukainen kerroin,  
 $x_d''$  = generaattorin suhteellinen alkureaktanssi,  
 $x_T$  = muuntajan suhteellinen reaktanssi ja  
 $\varphi_{rG}$  =  $I_{rG}$  ja  $U_{rG}$  välinen vaihe-ero.

Umpinapakoneilla  $x_2 = x_d''$  ja avonapakoneilla  $x_2 = 0,5 \cdot (x_d'' + x_q'')$ .

Tahtimoottorit otetaan huomioon laskettaessa kolmevaiheista alku-, sysäys- ja katkaisuvirtaa ja kaksivaiheisia oikosulkuvirtoja.

Epätahtimoottorit otetaan huomioon laskettaessa kolmevaiheista alku-, sysäys- ja katkaisuvirtaa ja kaksivaiheisia oikosulkuvirtoja. Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi saadaan yhtälöstä:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}} \sqrt{3} I_{rM}} \frac{U_{rM}}{S_{rM}} = \frac{1}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}, \quad (20)$$

jossa  $I_{LR}$  = lukitun roottorin virta ( $\hat{=}$  käynnistysvirta),  
 $I_{rM}$  = moottorin nimellisvirta,  
 $U_{rM}$  = moottorin nimellisjännite ja  
 $S_{rM}$  = moottorin nimellistäeho.

$R_M/X_M = 0,1$  ja  $X_M = 0,995 Z_M$  suurjännitemoottoreille, teho napaparilukua kohden on  $\geq 1$  MW.

$R_M/X_M = 0,15$  ja  $X_M = 0,989 Z_M$  suurjännitemoottoreille, teho napaparilukua kohden on  $> 1$  MW.

$R_M/X_M = 0,42$  ja  $X_M = 0,922 Z_M$  pienjännitemoottoriryhmille kytkentäkaapeleineen.

Pienjännitemoottoreilla on merkitystä erityisesti teollisuusverkoissa. Tällöin suurempia ryhmiä voidaan kuvata ekvivalenttisella moottorilla, jonka teho on koko moottoriryhmän summanimellisteho ja  $I_{LR} = 5$ .

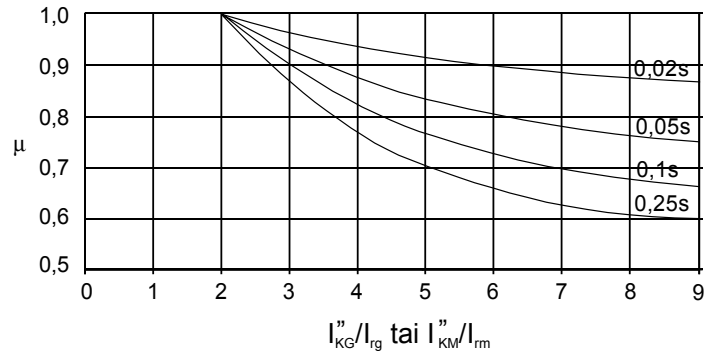
Epätahtimoottorille  $Z_1 = Z_2$ .

### Katkaisuvirta

Tahtikoneen katkaisuvirta saadaan yhtälöllä

$$I_b = \mu I_k'' \quad , \quad (21)$$

jossa  $\mu$  = kerroin kuvasta (7.2b).

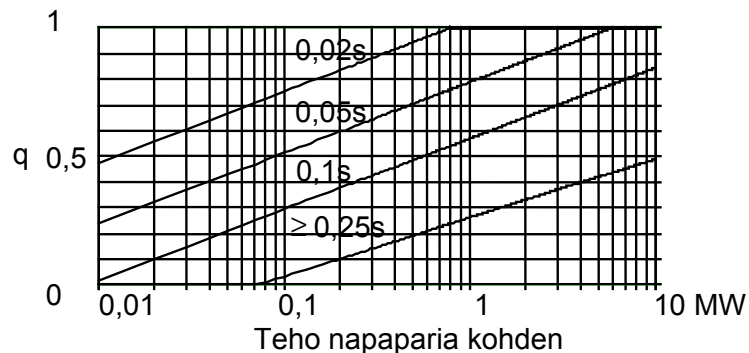


KUVA 7.2b. Kerroin  $\mu$  katkaisuvirran laskemiseksi.

Epätahtimoottorin katkaisuvirta lasketaan yhtälöstä

$$I_b = \mu q I_k'' \quad , \quad (22)$$

jossa  $\mu$  = kerroin kuvasta (7.2b) ja  
 $q$  = kerroin kuvasta (7.2c).



KUVA 7.2c. Kerroin  $q$  epätahtimoottorin katkaisuvirran laskemiseksi.

### Jatkuvuustilan oikosulkuvirta

Tahtigeneraattori voi syöttää oikosulkuvirtaa myös jatkuvuustilassa. Sen tarkka laskenta on kuitenkin vaikeaa. Magnetoinnin säätäjä yrittää ylläpitää napajännitettä lisäämällä magnetointijännitettä ja samalla kasvattaa oikosulkuvirtaa. Toisaalta oikosulussa magnetointilaite voi menettää syöttöjännitteensä, jolloin  $I_k = 0$ .

IEC 60909 mukaan, jos generaattorin rinnalla on muita oikosulkuvirtaa syöttäviä lähteitä, generaattori putoaa tahdistasta ja sen syöttämä oikosulkuvirta on  $I_k = I_b$ . IEC 60909:ssä on esitetty yksinään verkkoa syöttävän generaattorin jatkuvuustilan oikosulkuvirran laskeminen. Jos magnetoinnin tehonsaanti on varmistettu compound-virtamuuntajilla, saadaan oikosulkuvirran suuruus generaattorin valmistajalta.

### Sysäysoikosulkuvirta

Säteettävissä verkoissa sysäysoikosulkuvirta  $i_p$  lasketaan yhtälöstä

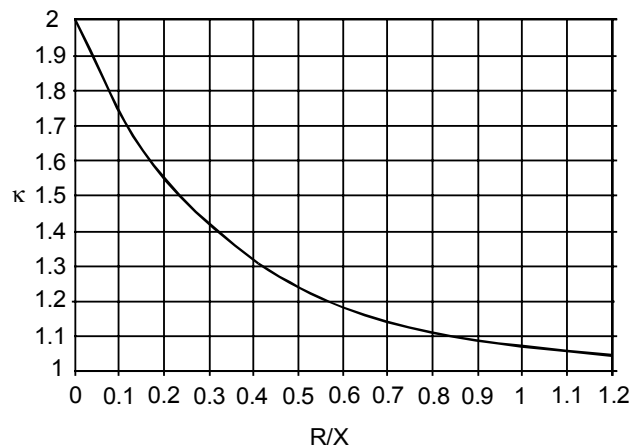
$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad , \quad (23)$$

jossa  $\kappa$  = sysäyskerroin, joka saadaan kuvasta 7.2d piirin  $R/X$  suhteen funktiona.

Suurjänniteverkossa  $\kappa$  on yleensä alle 1,8 ( $R/X < 0.1$ ) ja pienjänniteverkoissa yleensä alle 1,44.

Koska silmukoidussa verkossa on useita aikavakioita, lasketaan  $\kappa$ , jollain seuraavista menetelmistä:

1. Valitaan  $\kappa$  eri haarojen pienimmän  $R/X$  suhteen mukaan. Vain sellaiset haarat, jotka yhdessä johtavat 80 % oikosulkuvirrasta huomioidaan. Pienjänniteverkossa käytetään kuitenkin maks.  $\kappa = 1,8$ .
2.  $\kappa = 1,15 \kappa_b$ , jossa  $\kappa_b$  on silmukoidusta verkosta laskemalla saatua  $R/X$ - suhdetta vastaava kerroin. Pienjänniteverkossa  $1,15 \kappa_b$  on maks. 1,8 ja keskijänniteverkossa maks. 2,0.
3. Ekvivalenttisen 20 Hz:n menetelmää on kuvattu IEC 60909 9.1.3.2 (Method C).

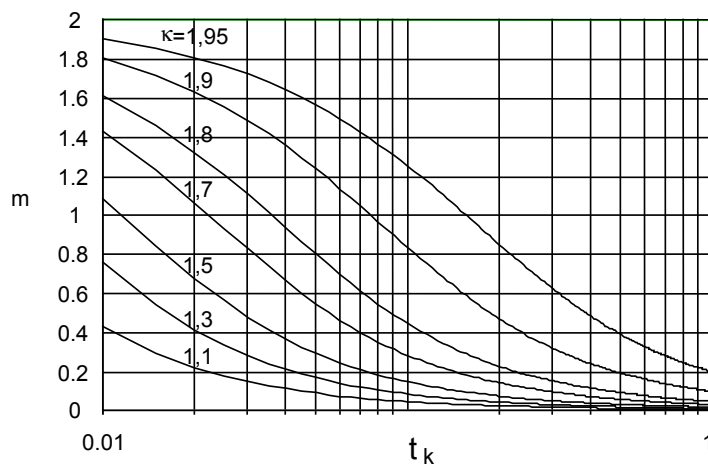


KUVA 7.2d. Sysäyskertoimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin  $R/X$ - suhteesta.

### Terminen oikosulkuvirta.

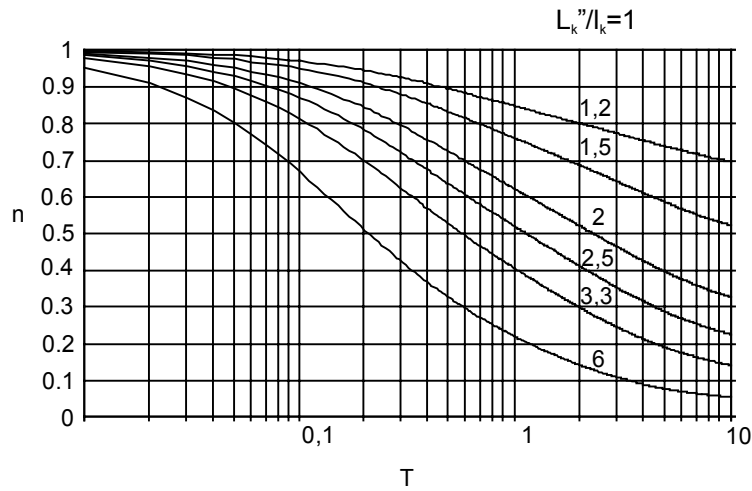
Ekvivalenttinen termien oikosulkuvirta  $I_{th}$  lasketaan kaavalla (24), jossa kerroin  $m$  kuvaa vaimenevan vaihtovirtakomponentin ja saadaan kuvasta (7.2e) ja kerroin  $n$  vaimenevan tasavirtakomponentin vaikutusta ja saadaan kuvasta (7.2f).

$$I_{th} = I_k \sqrt{m+n} \quad (24)$$



KUVA 7.2e. Tasavirtatekijän  $m$  riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta ja oikosulun kestoajasta.





KUVA 7.2f. Vaihtovirtatekijän  $n$  riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän arvon suhteesta  $I_k''/I_k$ .

Virtapiirin laitteet kestävät oikosulun termisesti, mikäli on voimassa epäyhtälö

$$I_{th} \leq I_{thn}, \text{ kun } t \geq t_N \text{ tai} \quad (25)$$

$$I_{th} \leq I_{thn} \sqrt{\frac{t_N}{t}}, \text{ kun } t \leq t_N, \quad (26)$$

joissa  $I_{thn}$  = laitteen nimellinen terminen oikosulkukestoisuus ja  
 $t_N$  = laitteen nimellistä termistä oikosulkukestoisuutta vastaava aika.

Yleensä laitteiden terminen kestoisuus ilmoitetaan 1s arvona, mutta myös muita arvoja käytetään.

### Maksimioikosulkuvirta

Maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa valitaan verkon kytkentätilanne vastaamaan maksimioikosulkuvirtaa. Jännitekerroin  $c$  valitaan kyseisen jänniteportaan maksimia vastaavaksi.

### Minimioikosulkuvirta

Minimioikosulkuvirtaa laskettaessa valitaan verkon kytkentätilanne vastaamaan minimiä. Jännitekerroin  $c$  valitaan kyseisen jänniteportaan maksimia vastaavaksi. Minimioikosulkuvirtaa laskettaessa lisäksi oletetaan moottorit seisoviksi ja johtimille käytetään suurinta käyttölämpötilaa vastaava resistanssia.

### 7.2.3. Oikosulkuvirran laskeminen ominaisoikosulkutehoilla

Ns. ominaisoikosulkutehojen avulla voidaan nopeasti ja helposti määrittellä likimääräisesti oikosulkuvirtoja. Oikosulkuteho on laskennallinen käsite, jossa täysi oikosulkuvirta ja nimellijännite vaikuttavat samanaikaisesti. Ominaisoikosulkuteho on se oikosulkuteho, joka esiintyisi ko. komponentin jälkeen, elleivät muut virtapiirin osat rajoittaisi sitä. Yleensä lasketaan alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  ja laskennassa huomioidaan vain reaktanssit. Tästä seuraava epätarkkuus tuo varmuutta. Resistanssien huomioimatta jättämisestä seuraa se, että sysäyskerrointa ei saada tarkasti. Sen suuruus voidaan arvioida tärkeimpien komponenttien  $R/X$ -suhteista.

Muuntajan ja generaattorin oikosulkuteho saadaan yhtälöistä

$$S_{kp} = \frac{U_n^2}{Z_k}, \quad (27)$$

$$S_{kp} = \frac{S_n}{z_k} \sim \frac{S_n}{z_d}, \quad (28)$$

jossa  $S_{kp}$  = ominaisoikosulkuteho,  
 $U_n$  = laskettavan komponentin nimellispääjännite (johdolla pääjännite normaalikäytössä),  
 $Z_k$  = laskettavan komponentin oikosulkuimpedanssi ohmeina vaihetta kohti,  
 $S_n$  = laskettavan komponentin nimellisteho ja  
 $z_k$  = oikosulkuimpedanssin suhteellinen arvo,  
 (generaattorilla tahtireaktanssin  $Z_d$  suhteellinen lukuarvo).

Rinnan kytkettyjen ominaisoikosulkutehojen kokonaisoikosulkuteho saadaan komponenttien ominaisoikosulkutehosta yhtälöstä

$$S_k = S_{k1} + S_{k2} + S_{k3} + \dots + S_{kn} \quad (29)$$

Sarjaan kytkettyjen ominaisoikosulkutehojen kokonaisoikosulkuteho saadaan komponenttien ominaisoikosulkutehosta yhtälöstä

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \frac{1}{S_{k3}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}} \quad (30)$$

Oikosulkuvirta saadaan ominaisoikosulkutehosta yhtälöstä

$$I_k = \frac{1,1 \cdot S_k}{\sqrt{3} U_n} \quad (31)$$

### 7.3. Oikosulkuvirran rajoittaminen

Nollapistekatkaisuun perustuvat katkaisijat eivät pysty pienentämään oikosulkuvirran dynaamista huippua. Nopealla relesuojauksella oikosulun kestoa voidaan lyhentää ja siten pienentää termistä rasitusta ja valokaaren vaikutusaikaa. Sulakkeilla ja pienjännitteillä (<1000 V) oikosulkuvirtaa rajoittavilla katkaisijoilla voidaan rajoittaa myös oikosulkuvirran huippuarvoa.

Oikosulkukestoisuuden kasvattaminen nostaa käytettävien komponenttien hintoja. Eri jännitetasoilla on omat oikosulkuvirtatasot, joille saakka kestoisuuden kasvattaminen on kustannusmielessä mielekäästä. Kestoisuuksien valinnassa on ennakoitava tuleva oikosulkuvirtojen kasvu.

#### 7.3.1. Verkon komponenttien ja rakenteen valinta

Oikosulkuvirtaa pienentää muuntajien ja generaattoreiden suhteellisen oikosulkuimpedanssin kasvattaminen ja nimellistehon pienentäminen sekä rinnakkaisten syöttöjen välttäminen ja jännitetason nostaminen. Kun nimellistehoja pienennetään jakaantuu verkko yleensä pienempiin osiin, jolloin komponenttikustannukset ja usein myös häviöt kasvavat. Jännitetason noston etuna on komponenttien määrän pysyminen samana ja verkon jäykkyudesta saatavan hyödyn säilyminen. Häviöt usein jopa pienenevät.

### 7.3.2. Sulake

Pienillä nimellisvirroilla sulakkeilla on erittäin hyvä oikosulkuvirran rajoituskyky. Niiden käyttö rajoittuu kuitenkin yleensä pienjännitteelle. Keski-jännitteellä sulakkeita voidaan käyttää jakelumuuntajien ja moottoreiden suojaamiseen.

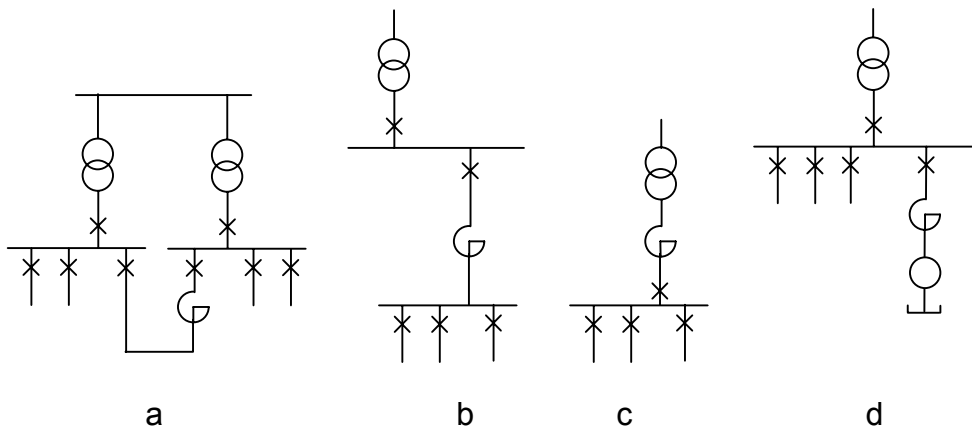
### 7.3.3. Kuristin

Sarjakuristimella verkon oikosulkuimpedanssia kasvatettaessa tarvittava reaktanssi lasketaan yhtälöstä 32.

$$X_x = U_n^2 \left( \frac{1}{S_{k2}} - \frac{1}{S_{k1}} \right), \quad (32)$$

jossa  $U_n$  = on verkon nimellisjännite,  
 $S_n$  = kuristimen nimellisteho,  
 $S_{k1}$  = oikosulkuteho ennen kuristinta ja  
 $S_{k2}$  = oikosulkuteho kuristimen jälkeen.

Kuristin on erittäin yksinkertainen ja luotettava komponentti. Se aiheuttaa kuitenkin lisähäviöitä. Sen kyky rajoittaa oikosulkuvirtaa on rajallinen.



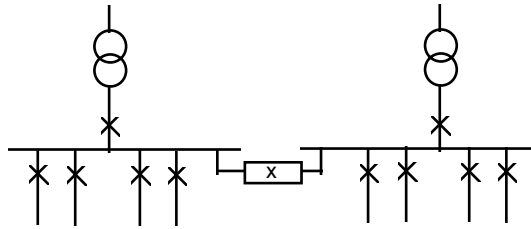
KUVA 7.3a. Tyypillisiä kuristimen käyttötapoja.

Käyttötavalla a kuristimen läpi siirrettävä virta, häviöt ja jännitteenalenemat voidaan pitää pieninä. Käyttötavalla b suojataan alakojeistoa, jolla on pääkojeistoa alhaisempi kestoisuus. Käyttötavalla c kompensoidaan syöttävän verkon kasvanutta oikosulkutehoa. Kuristin voi olla myös muuntajan yläjännitepuolella. Vaihtoehto d on harvinainen.

### 7.3.4. $I_s$ -rajoitin

$I_s$ -rajoitin ( $I_s$ -limiter,  $I_s$ -begränzer) muodostuu päävirtatiehen, jonka kautta kuormitusvirta kulkee, sijoitetuista räjähdyspanoksella toimivista erittäin nopeista kytkimistä, ja niiden rinnalla olevista sulakkeista. Virran nousunopeuden  $di/dt$  ollessa suuri, päävirtatie avataan noin 0,1 ms:ssa. Avausväliin syntyvän valokaaren takia virta kommutoituu sulakkeelle ja valokaari sammuu. Sulake palaa virtaa voimakkaasti rajoittaen.

$I_s$ -rajoitinta voitaisiin periaatteessa käyttää samoissa kohdissa verkkoa kuin kuristinta, mutta tyypillisin paikka sille on olla jakamassa verkkoa osiin. Tällöin sen läpi kulkevaa oikosulkuvirtaa ei tarvitse ottaa huomioon oikosulkuvirtaa kasvattavana. Relesuojaus toimii laukaisun jälkeen itsenäisesti.

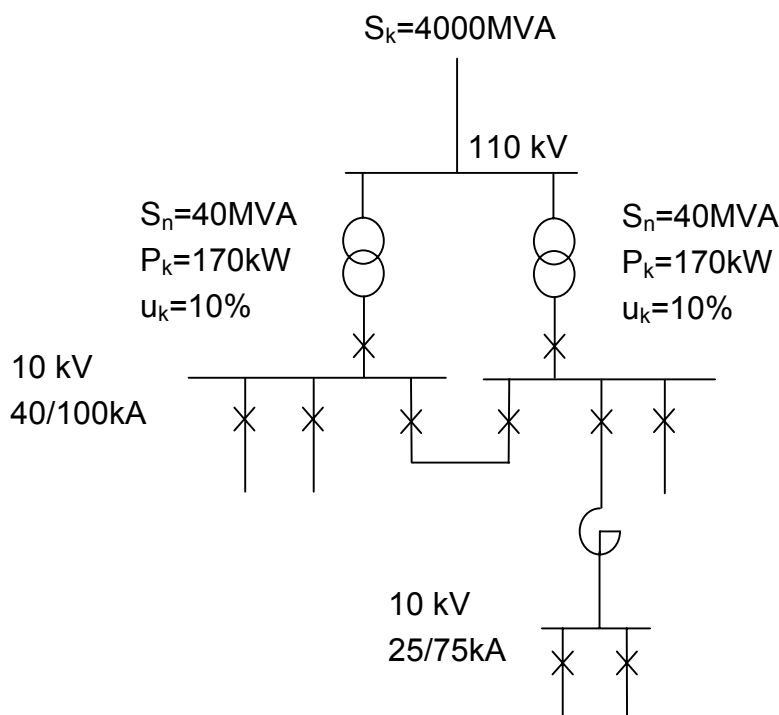


KUVA 7.3b.  $I_s$ -rajoitin jakamassa verkkoa osiin.

$I_s$ -rajoitin ei aiheuta häviöitä eikä jännitteen alenemaa ja verkon jäykkyydestä saadaan täysi hyöty.  $I_s$ -rajoitin muodostaa epäselektiivisyyskohdan oikosulkusuojauksessa.

### 7.3.5. Esimerkki

Tutkitaan vaihtoehtoja, jossa 110 kV yhdistyy keskijänniteverkkoon yhdellä tai kahdella päämuuntajalla. Pääkojeistojen oikosulkuvirta lasketaan Theveninin menetelmällä ja ominaisoikosulkutehoilla. Alakojeiston pienen kestoisuuden vuoksi sen suojana on kuristin, jonka reaktanssi määritetään.



KUVA 7.3c. Keskijänniteverkko, johon ei liity generaattoreita tai moottoreita.

#### Oikosulkuvirta 10 kV:n oikosulussa

Syöttävän verkon impedanssi 10 kV:n tasolle redusoituna

Jos kojeistojen välinen yhteys on auki

$$Z''_Q = X''_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S_{kQ}} \frac{1}{t^2} = \frac{c U_{nQ}^2}{\sqrt{3} I_{kQ}^2} \frac{1}{t^2} = \frac{1,1 \cdot (110 \text{ kV})^2}{4000 \text{ MVA}} \frac{1}{\left(\frac{110 \text{ kV}}{10 \text{ kV}}\right)^2} = 0,0275 \text{ } \Omega$$

Muuntajan impedanssi

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{10}{100\%} \frac{(10 \text{ kV})^2}{40 \text{ MVA}} = 0,25 \text{ } \Omega$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = \frac{170 \text{ kW} \cdot (10 \text{ kV})^2}{(40 \text{ MVA})^2} = 0,0106 \ \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,25\Omega^2 - 0,0106\Omega^2} = 0,2498 \ \Omega$$

$$Z_k = Z_Q + Z_T = X_Q + R_T + X_T = j0,0275\Omega + 0,0106\Omega + j0,2498\Omega = (0,0106 + j0,2773) \ \Omega$$

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} \sqrt{0,0106^2 + 0,2773^2}} = 22,9 \ \text{kA}$$

Dynaaminen oikosulkuvirta lasketaan  $R/X = 0,0106/0,2773 = 0,038$

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 22,9 \ \text{kA} = 61,5 \ \text{kA}, \text{ jossa kerroin } \kappa \text{ saatu kuvasta 7.2d.}$$

Terminen oikosulkuvirta  $I_{th}$ .

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} = 22,9 \sqrt{0,095+1} = 23,9 \ \text{kA},$$

jossa m ja n saadaan käyrästöistä 7.2e ja 7.2f.

Kojeiston rasitukset ovat siten dynaaminen 61,5 kA ja terminen 23,9 kA. Kojeisto kestää sen.

Jos kojeistojen välinen yhteys on kiinni

$$Z_k = Z_Q + Z_T = X_Q + \frac{Z_{T1} \cdot Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} = j0,275\Omega + 0,0053\Omega + j0,1245\Omega = (0,0053 + j0,152) \ \Omega$$

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} \sqrt{0,0053^2 + 0,152^2}} = 41,8 \ \text{kA}$$

Dynaaminen oikosulkuvirta lasketaan  $R/X = 0,0053 / 0,152 = 0,035$

$$i_p = 1,9 \sqrt{2} \cdot 41,8 \ \text{kA} = 112 \ \text{kA}.$$

Terminen oikosulkuvirta

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} = 41,8 \sqrt{0,095+1} \ \text{kA} = 43,7 \ \text{kA}, \text{ jossa m ja n saadaan käyrästöistä 7.2e ja 7.2f.}$$

Kojeiston rasitukset ovat siten dynaaminen 112 kA ja terminen 43,7 kA, jotka ylittävät kojeiston mitoitusarvon.

**Oikosulkuvirran laskeminen ominaisoikosulkutehoilla.**

$$S_{T1}'' = \frac{S_n}{z_k} = \frac{40 \text{ MVA}}{0,1} = 400 \ \text{MVA}$$

Jos on vain yksi muuntaja

$$S_k'' = \frac{4000 \cdot 400}{4000 + 400} = 363 \ \text{MVA}$$

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot 363 \ \text{MVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \ \text{kV}} = 23 \ \text{kA}$$

Jos muuntajat ovat rinnakkain niin

$$S''_{T1+T2} = S''_{T1} + S''_{T2}$$

$$S''_k = \frac{4000 \cdot 800}{4000 + 800} = 667 \text{ MVA}$$

$$I''_k = \frac{1,1 \cdot 667 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = 42,4 \text{ kA}$$

Koska laskenta on tehty ainoastaan reaktansseja käyttäen, ei  $R/X$ - suhdetta ole laskettu eikä siten myöskään saada tarkkaa sysäskertoimen arvoa. Yleisesti kuitenkin käytetään keskijännitteellä arvoa 1,8, joka edellisen tarkan laskennan perusteella tiedetään hieman liian pieneksi. Koska oikosulkutehoilla laskeminen on tarkoitettukin likimääräiseksi laskenaksi, tämä sallittakoon.

Muuntajien ollessa erillään

$$i_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 23 \text{ kA} = 58 \text{ kA}.$$

Muuntajien ollessa rinnan

$$i_p = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 42,4 \text{ kA} = 107 \text{ kA}.$$

### Oikosulkuvirran rajoittaminen pääkojeistolla

Kestoisuus täyttyy, jos muuntajat ovat erillään. Koska rinnan käyvillä muuntajilla kestoisuus ylittyy vain vähän, kestoisuus saavutettaisiin varsin pienellä nimellistehon pienentämisellä tai oikosulkujännitteen kasvattamisella. Muita mahdollisia keinoja olisi kiskojen yhdistykselle lisättävä kuristin tai  $I_s$ - rajoitin.

### Alakojeistolla

Pääkojeiston tasolla oikosulkuteho on 667 MVA. Alakojeiston kestoisuus 25 kA vastaa 433 MVA. Tarvittava kuristin, jos rajoitetaan oikosulkuteho 400 MVA:iin, on

$$X_k = U_n^2 \left( \frac{1}{S_{k2}} - \frac{1}{S_{k1}} \right) = 10^2 \cdot \text{kV}^2 \left( \frac{1}{400 \text{ MVA}} - \frac{1}{800 \text{ MVA}} \right) = 0,1 \ \Omega.$$

## 7.4. Varokkeet

### 7.4.1. Sulakkeellinen suojaus

Tässä yhteydessä keskitytään vain pienjännitekahvasulakkeisiin. Kahvasulakkeita käytetään pienjänniteverkon suojaukseen niiden edullisuuden, turvallisuuden, selektiivisyyden ja hyvän virranrajoituskyvyn vuoksi. Kahvasulakkeiden pääosat ovat runkolieriö, sulakehiekka ja toimivana osana sulakeliуска tai lanka, jonka rakenteen ja mitoituksen avulla voidaan säädellä sulakkeen toimintaominaisuuksia. Sulakehiekkan tehtävänä on sitoa valokaassa syntyvä energia.

### Kahvasulakkeiden nimellisvirrat

Taulukko 7.4a. Varokealustojen ja kahvasulakkeiden suurimmat sallitut nimellisvirrat IEC 60269-2-1 mukaan.

Koko	Alusta	gG		aM	
		AC 400 V ja 500 V	AC 690 V	AC 400 V ja 500 V	AC 690 V
	$I_n/A$	$I_n/A$	$I_n/A$	$I_n/A$	$I_n/A$
00	160	100/160	100	160	160
0	160	160	100	160	100
1	250	250	200	250	250
2	400	400	315	400	400
3	630	630	500	630	630
4	1000	1000	800	1000	1000
4a	1250	1250	1000	1250	1250

### Kahvasulakkeiden toimintaa kuvaavien kirjaintunnusten merkitys:

Ensimmäinen kirjain ilmaisee katkaisualueen:

- g = koko alueen kattava katkaisukyky, sekä oikosulku- että ylikuormitussuojaksi soveltuva sulake
- a = osa-alueen kattava katkaisukyky, vain oikosulkusuojaksi soveltuva sulake

Toinen kirjain ilmaisee käyttökohteen:

- G = johdon suojaukseen tarkoitettu sulake
- M = moottorin suojaukseen tarkoitettu sulake

- gG = yleiskäyttöön tarkoitettu sulake, johdon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus
- aM = moottoripiirin suojaus sulake, jonka katkaisukyky käsittää virran tietyn osa-alueen
- gM = moottoripiirin suojaus sulake, jonka katkaisukyky käsittää koko virta-alueen

## Kahvasulakkeiden toiminta-aika ( gG )

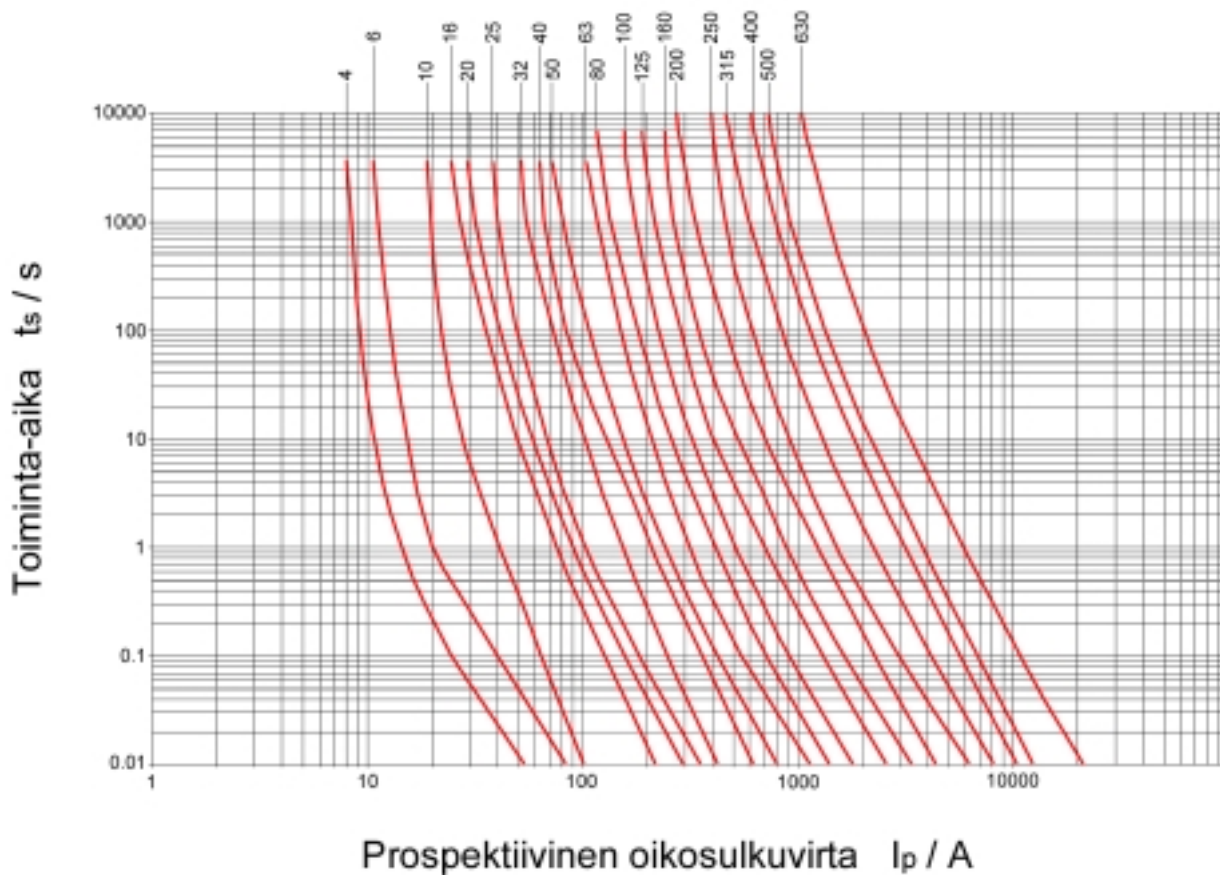
Taulukko 7.4b. IEC 60269-1 standardin mukaiset raja -ajat ja -virrat .

Sulake $I_n/A$	$I_{nf}$	$I_f$	t/h
$I_n \leq 4$	$1,5 \times I_n$	$2,1 \times I_n$	1
$4 < I_n < 16$	$1,5 \times I_n$	$1,9 \times I_n$	1
$16 \leq I_n \leq 63$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	1
$63 < I_n \leq 160$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	2
$160 < I_n \leq 400$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	3
$400 < I_n$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	4

$I_n$  = sulakkeen nimellisvirta

$I_{nf}$  = kestorajavirta; sulake ei saa toimia ajassa  $t$

$I_f$  = sulamisrajavirta; sulakkeen tulee toimia ajassa  $t$



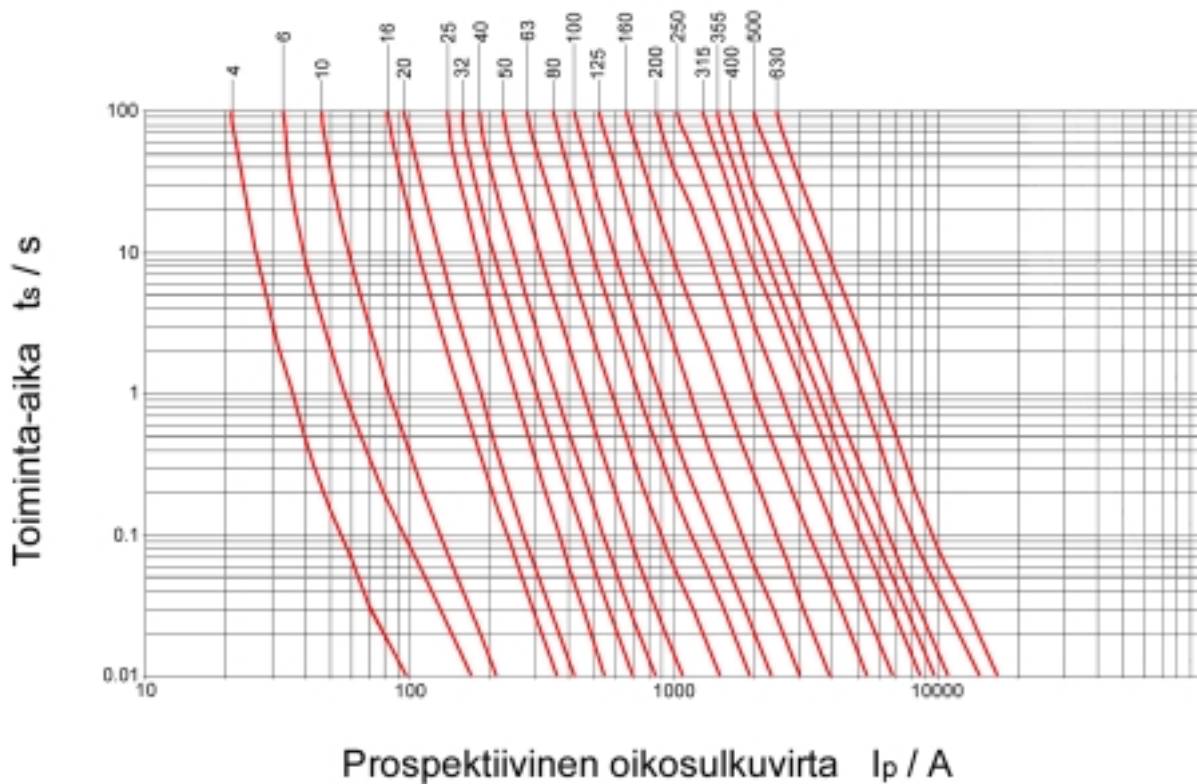
KUVA 7.4a. OFAA - kahvasulakkeiden toiminta-ajat ( gG ) .



## Kahvasulakkeiden toiminta-aika ( aM )

Taulukko 7.4c. IEC 60269-2 standardin mukaiset virta-aikaominaisuuksien raja .

	$4 I_n$	$6,3 I_n$	$8 I_n$	$10 I_n$	$12,5 I_n$	$19 I_n$
Suurin toiminta - aika $t_{max}$	-	60 s	-	-	0,5 s	0,1 s
Pienin sulamisai- ka $t_{min}$	60 s	-	0,5 s	0,2 s	-	-



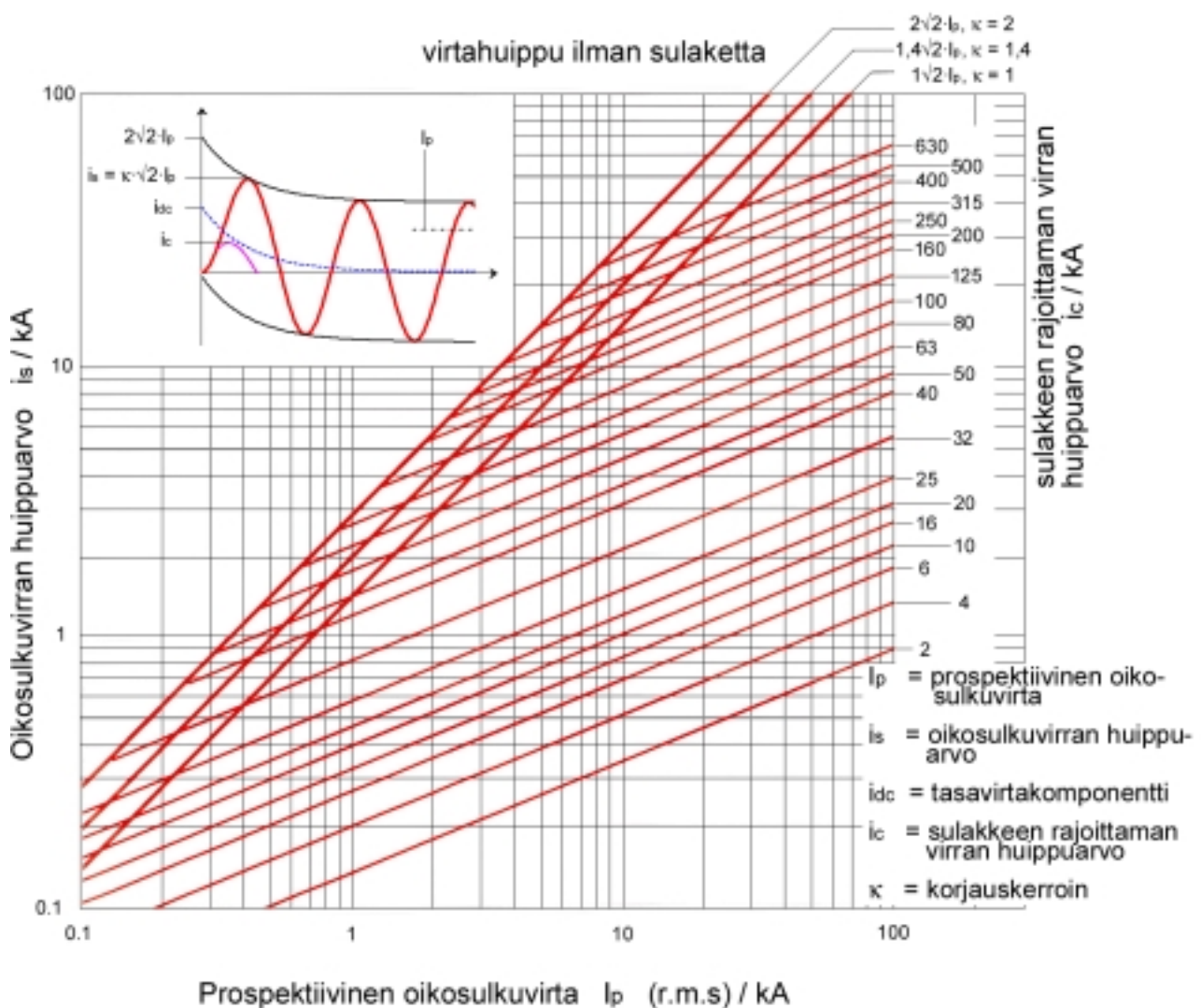
KUVA 7.4b. OFAM - kahvasulakkeiden toiminta-ajat ( aM ).

### 7.4.2. Kahvasulakkeiden virranrajoitus

Sulakkeiden virranrajoitusominaisuuksilla tarkoitetaan sulakkeiden kykyä rajoittaa oikosulkuvirran kasvua, joka esiintyy katkaisutilanteessa ennen oikosulun poistamista. Sulakkeilla oleva erinomainen virranrajoituskyky perustuu sulakkeen sisällä syntyvään valokaariresistanssin nopeaan kasvuun. Virranrajoituskäyristä voidaan lukea suurin virtahuippu, jonka sulake päästää läpi tietyllä prospektiivisen virran arvolla.

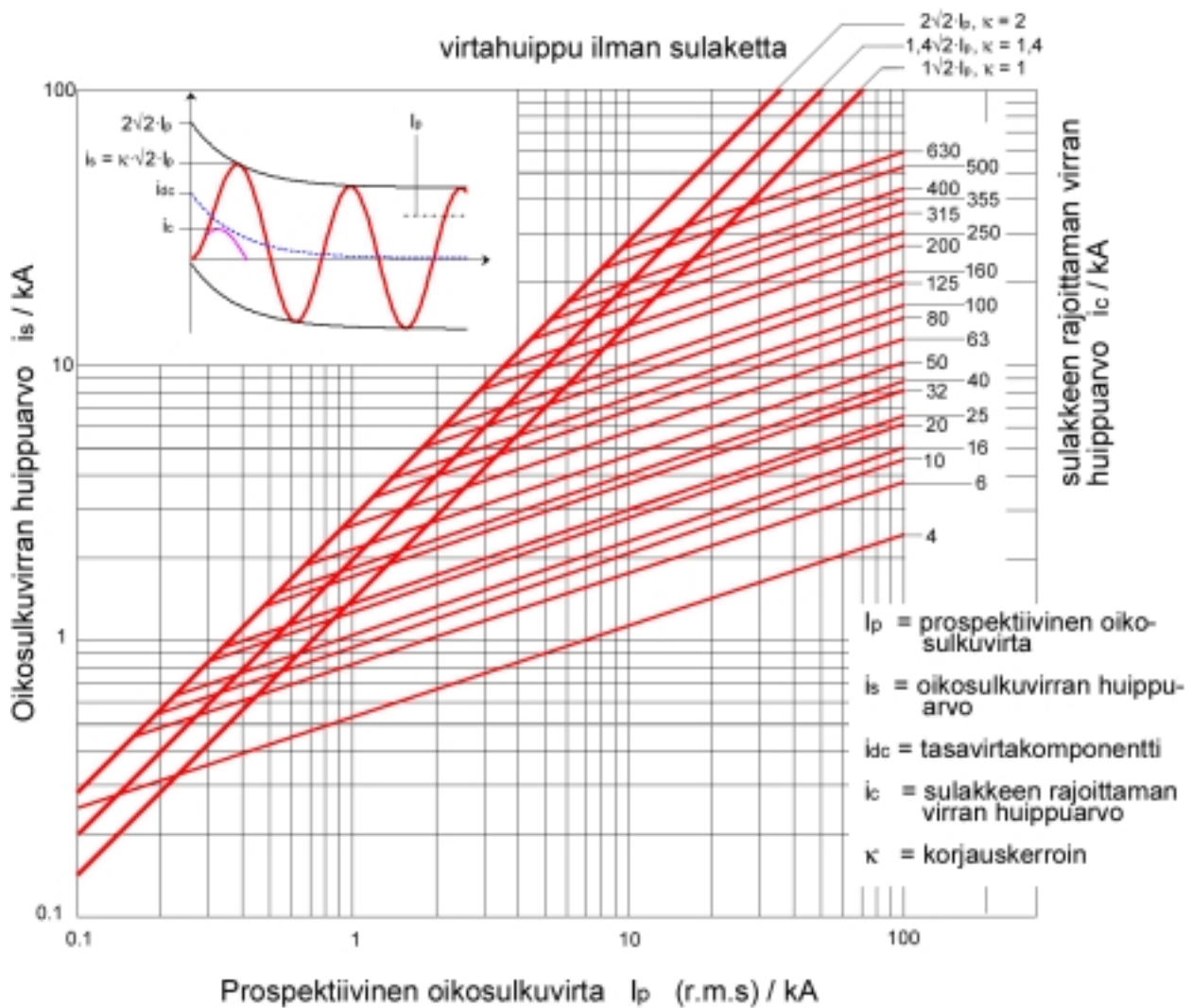


KUVA 7.4c. Kahvasulakkeen rakenne ja toiminta oikosulussa .



KUVA 7.4d. OFAA - kahvasulakkeiden virranrajoitus ( gG ).

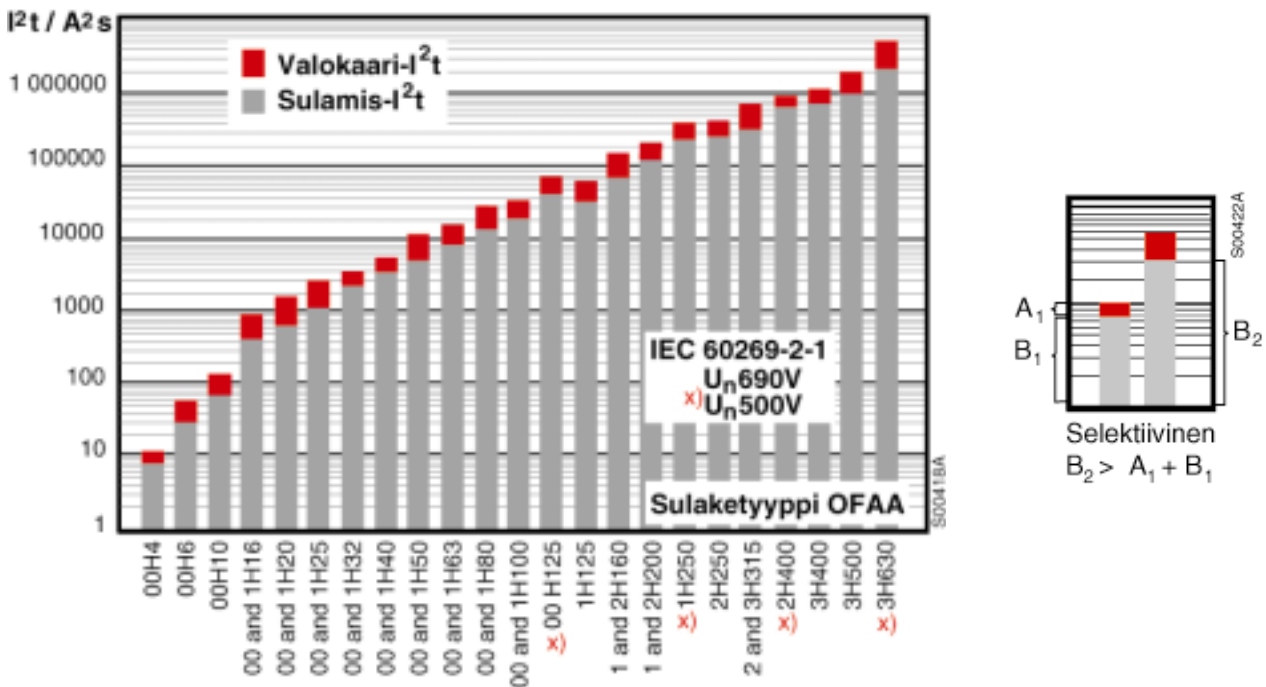
Esim.  $I_p = 22$  kA. Sulakkeen 315 A ( gG ) läpimenevä suurin virtahuippu on 21 kA. Ilman sulaketta olisi  $i_s = 45$  kA. Sulakkeen ansiosta oikosulkuvoimat ovat  $\approx 20$  % siitä arvosta, johon ne nousisivat ilman sulaketta.



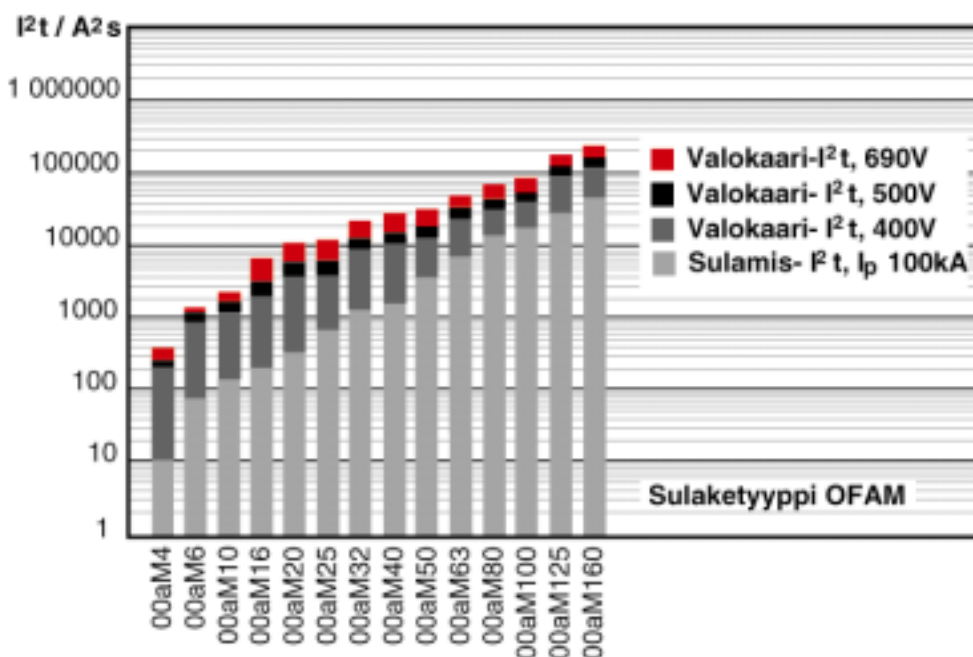
KUVA 7.4e. OFAM - kahvasulakkeiden virranrajoitus ( aM ).

### 7.4.3. Selektiivisyys

Selektiivisyys, jolla tarkoitetaan vian rajoittamista pienelle alueelle verkossa, jolloin muu osa verkkoa toimii normaalisti, voidaan tarkastaa  $I^2t$  -taulukoista. Pienemmän sulakkeen kokonais-  $I^2t$  -arvon on oltava pienempi kuin suuremman sulakkeen sulamis-  $I^2t$  -arvo. Sulamisajoista, jotka ovat 0,1s lyhempiä, esitetään  $I^2t$  -arvoja. Sulakkeiden virranrajoitusominaisuudet selventävät hyvin läpipääsevän virran huippuarvoja, kun tarkastellaan  $I^2t$  -arvoja saadaan käsitys sulakkeen läpipäästämästä energiasta.



KUVA 7.4f. OFAA - kahvasulakkeiden  $I^2t$  -arvot ( gG ) ja selektiivisyys .



KUVA 7.4g. OFAM - kahvasulakkeiden  $I^2t$  -arvot ( aM ).