

8. MAASULKUSUOJAUS

8.1. Yleistä

Maasulku on StM:ssä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Kaksoismaasulku on kyseessä silloin, kun verkon kahdessa eri vaiheessa ja eri kohdissa verkkoa esiintyy samanaikaisesti eristysvika.

Käyttömaadoitetussa verkossa maasulku on luonteeltaan yksivaiheisen oikosulun kaltainen ja vikavirran suuruus voidaan laskea, kun tunnetaan verkon impedanssit, ks. kohta 7.2. oikosulkuvirran laskeminen. Verkon oikosulkusuojaajat toimivat tällöin myös maasulussa, mikäli vikaresistanssi maasulkukohdassa ei ole liian suuri.

Maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa täytyy tuntea koko galvaanisesti yhteenkytetty verkko, jotta maasulkuvirrat ja nollajännitteet voidaan määrittää. Sen sijaan verkon impedansseilla ei tässä tarkastelussa ole käytännön merkitystä.

8.2. Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen

8.2.1. Maasta erotettu verkko

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on joka hetki nolla. Vastaavasti maakapasitanssien kautta kulkeva osa verkon varausvirroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun sattuessa terveiden vaiheiden vaihejännitteet maahan nähden kasvavat. Epäsymmetrian seurauksena varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa varausvirtaa kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran, kuva 8.2b.

Maasulkuvirran itseisarvon suuruus suorassa (vikaresistanssittomassa) maasulussa voidaan laskea lausekkeesta:

$$I_e = \sqrt{3} \omega C_0 U, \text{ missä} \quad (1)$$

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi,

U = verkon pääjännite ja

ω = $2 \pi f$.

Kaapeleille on valmiiksi laskettuja taulukoita, joissa kaapelilajeittain on ilmoitettu maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohden, taulukko 8.2a. Maasulkuvirran määrittämiseksi tarvitsee tällöin tuntea vain kaapelilaji sekä kaapelin pituus.

Avojohtoverkoille maasulkuvirta voidaan riittävän tarkasti laskea lausekkeesta:

$$I_e \approx \frac{U \cdot \ell}{300} \quad [A], \text{ missä} \quad (2)$$

U = verkon pääjännite [kV] ja

ℓ = galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus [km].

Vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee ja pienentynyt arvo saadaan lausekkeesta:

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

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi,

R_f = vikaresistanssi ja

U = verkon pääjännite.

Lauseke (3) voidaan esittää myös muodossa:

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} I_e R_f}{U} \right)^2}}, \quad (4)$$

joka on käyttökelpoinen silloin, kun tunnetaan maasulkuvirta suorassa maasulussa.

Taulukko 8.2a. PAS- ja riippukierrejohtojen maasulkuvirtoja [A/km], 50 Hz.

Poikki- pinta	20 kV PAS- ja riippukierrejohdot			
	PAS	SAMKA	SAXKA	AHMCMKK
mm ²				
3x16	-	-	-	1,3
3x25	-	-	-	1,5
3x35	0,054 *)	-	-	1,6
3x50	0,054 *)	-	-	1,9
3x70	0,054 *)	2,3	2,0	2,0
3x95	0,054 *)	-	-	2,2
3x120	0,054 *)	2,7	2,4	
3x150	0,054 *)	-	-	
3x185	0,054 *)	3,3	2,8	

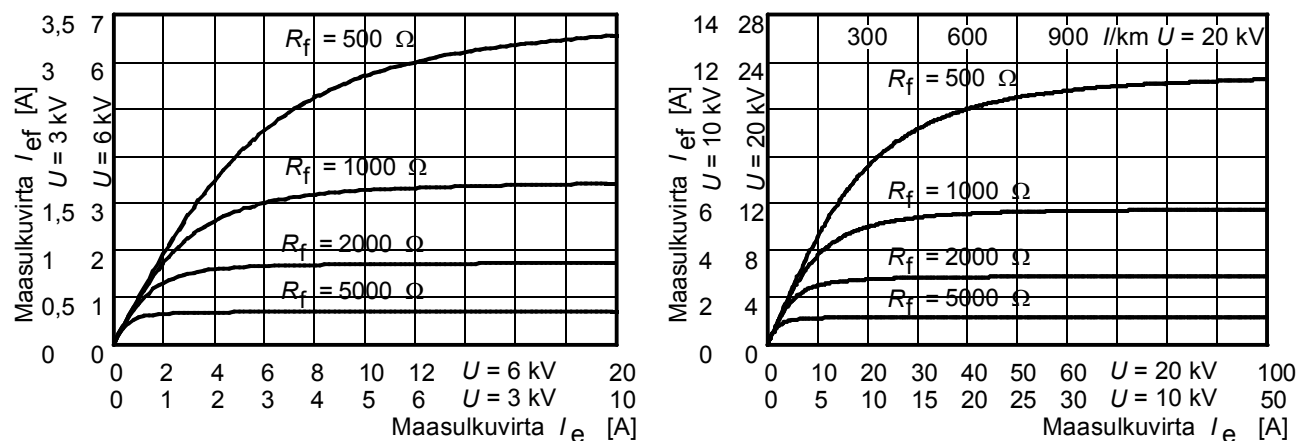
*) riippuu orsirakenteesta, arvo tarkistettava tapauskohtaisesti orsirakenteen mukaan

Taulukossa 8.2b on esitetty erityyppisten 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja.

Taulukko 8.2b. 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja [A/km], 50 Hz.

Poikki-pinta	10 kV voimakaapelit					15 kV voima-kaapelit	20 kV voimakaapelit				30 kV voima-kaapelit
mm ²	Paperi-eristeiset PLKVJ APAKM APLKPJJ	Paperi-eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APLKPJJ APYAKMM	PEX-eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE-eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WTC AHXCMK	XLPE-eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K	XLPE-eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K	Paperi-eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APYAKMM	PEX-eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE-eristeiset AHXAMK-W AHXAMK- WP AHXCMK- WTC AHXCMK HXCMK	XLPE-eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K	XLPE-eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTL/K AX-, FXPL/K AX-, FXBTL/K
3x25	0,6	1,3	1,0	-	-	-	2,1	1,6	1,5	-	-
3x35	0,8	1,4	1,1	-	-	-	2,3	1,7	-	-	-
3x50	0,9	1,7	1,3	-	1,3	1,6	2,5	1,9	-	1,7	2,1
3x70	1,0	1,9	1,4	-	1,4	1,7	2,8	2,0	2,0	2,0	2,4
3x95	1,1	2,3	1,6	-	1,6	2,0	3,2	2,2	2,3	2,3	2,6
3x120	1,2	2,5	1,7	1,8	1,8	2,2	3,5	2,3	2,4	2,5	2,8
3x150	1,3	2,7	1,8	-	2,0	2,4	3,7	2,5	2,6	2,7	3,1
3x185	1,4	3,0	1,9	2,1	2,2	2,5	4,0	2,6	2,8	2,9	3,3
3x240	1,5	3,2	2,2	2,4	2,4	2,9	4,5	2,9	3,2	3,2	3,6
3x300	1,5	3,4	2,4	2,6	2,7	3,1	4,9	3,1	3,5	3,5	3,9
3x1x35	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
3x1x50	-	-	-	-	1,3	1,6	-	-	-	1,7	2,1
3x1x70	-	-	1,4	-	1,4	1,7	-	2,0	-	2,0	2,4
3x1x95	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	2,6
3x1x120	-	-	1,8	-	1,8	2,2	-	2,5	-	2,5	2,8
3x1x150	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	3,1
3x1x185	-	-	2,1	-	2,2	2,5	-	2,8	-	2,9	3,3
3x1x240	-	-	-	-	-	2,9	-	-	-	-	3,6
3x1x300	-	-	2,6	-	2,7	3,1	-	3,5	3,6	3,5	3,9
3x1x400	-	-	-	-	2,9	3,5	-	-	-	3,9	4,2
3x1x500	-	-	3,3	-	3,3	3,9	-	4,2	4,4	4,4	4,7
3x1x630	-	-	-	-	3,7	4,4	-	-	-	4,8	5,2
3x1x800	-	-	4,1	4,1	4,1	4,8	-	5,3	5,4	5,3	5,9
3x1x1000	-	-	-	-	4,6	5,3	-	-	-	6,0	6,5
3x1x1200	-	-	-	-	5,0	5,7	-	-	-	6,4	7,0

Kuvassa 8.2a on käyränä esitetty vikaresistanssin maasulkuvirtaa pienentävä vaikutus muutamilla vikaresistanssin arvoilla. Kuvaan 8.2a on merkitty myös 20 kV avojohtoverkkoa vastaava maasulkuvirta verkon pituuden funktiona. Kuvien käyriä laskettaessa on verkon jännitteenä käytetty nimellisjännitettä.



KUVA 8.2a. Vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirran suuruuteen 3 ja 6 kV sekä 10 ja 20 kV verkoissa.

Edellä olevien lausekkeiden avulla laskettu virta on vikapaikassa, viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirta ei sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta, kuva 8.2b. Vaihevirtojen summavirraksi eli taustaverkon syöttämäksi maasulkuvirraksi saadaan siten:

$$\Sigma I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_{ef} \quad (5)$$

C_{0j} = suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

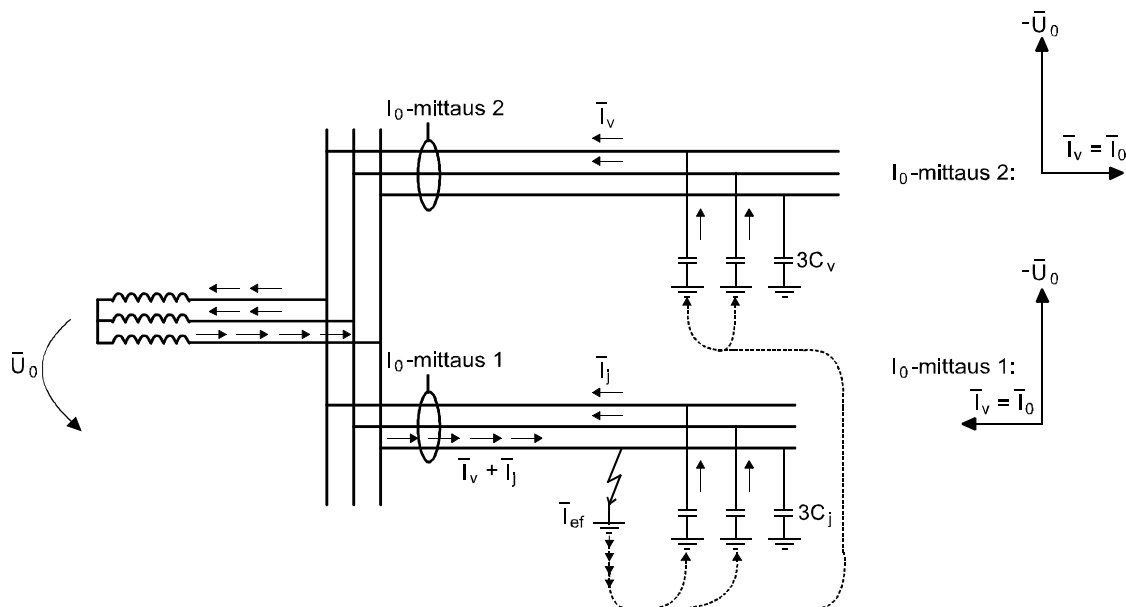
Mikäli kullekin johdolle on laskettu johdon itsensä syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa, voidaan taustaverkon syöttämä maasulkuvirta laskea lausekkeesta:

$$\Sigma I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_{ef} \quad (6)$$

I_e = verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa

I_{ej} = johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa

I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta



KUVA 8.2b. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa. Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin.

Maasulkuvirran aiheuttaman jännite-epäsymmetrian vaikutuksesta myös verkon tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista, eli syntyy ns. nollajännite. Tämä jännite on sama, jonka maasulkuvirta saa aikaan kulkiessaan maakapasitanssien kautta. Nollajännite saadaan lausekkeesta:

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C_0} I_{ef} \quad (7)$$

Lausekkeiden (3) ja (4) avulla lauseke (7) saadaan muotoon:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (8)$$

tai muotoon:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} I_e R_f}{U} \right)^2}} \quad (9)$$

I_e = tarkasteluhetkellä koko galvaanisesti yhteenkytketyn verkon maasulkuvirta suorassa maasulussa

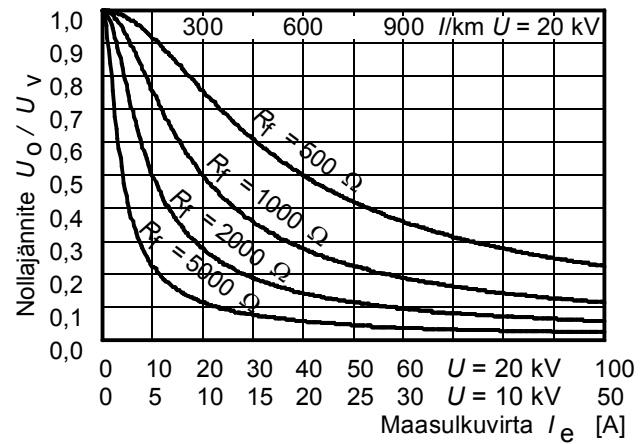
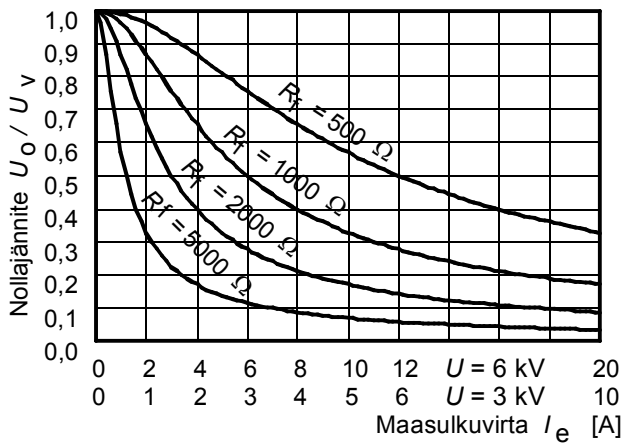
R_f = vikaresistanssi

U = verkon pääjännite

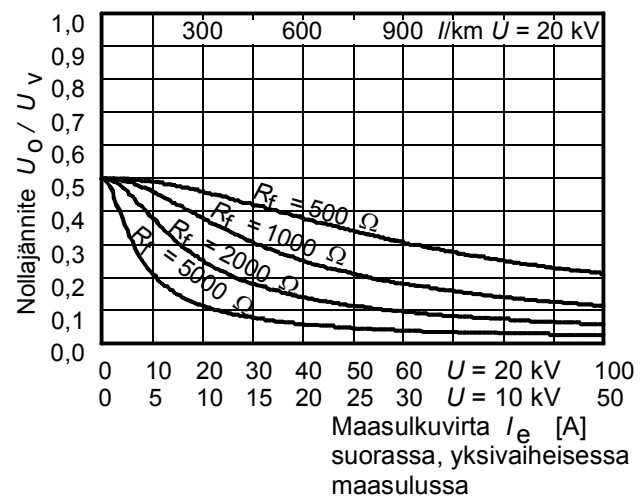
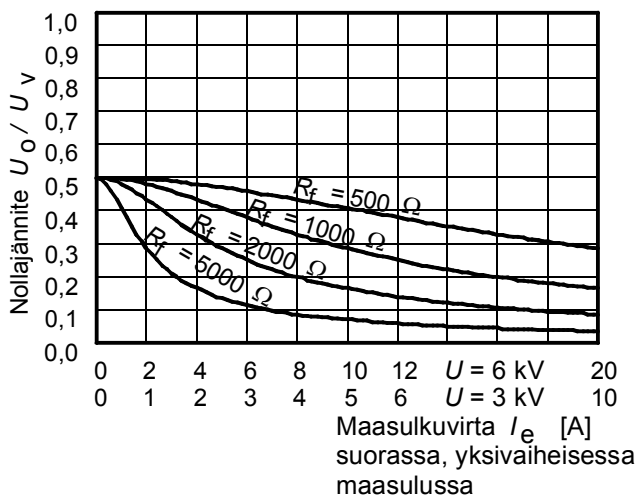
U_v = verkon vaihejännite

Kuvassa 8.2c on valmiiksi laskettu nollajännitteen suuruus muutamilla vikaresistanssin arvoilla maasulkuvirran I_e funktiona.

Suorassa maasulussa nollajännite on vaihejännitteen suuruinen.



KUVA 8.2c. Vikaresistanssin vaikutus nollajännitteen suuruuteen 3 ja 6 kV sekä 10 ja 20 kV verkoissa.



KUVA 8.2d. Nollajännite kaksoismaasulussa 3 ja 6 kV sekä 10 ja 20 kV verkoissa. Kummassakin vikapaikassa vikaresistanssi on yhtä suuri.

Kaksoismaasulussa nollajännite on pienimmillään silloin, kun molemmat vikaresistanssit ovat yhtä suuret. Nollajännite voidaan tällöin laskea lausekkeesta:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{(R_f 3 \omega C_0)^2 + 4}} \quad (10)$$

tai lausekkeesta:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_f I_e \sqrt{3}}{U}\right)^2 + 4}} \quad (11)$$

R_f = viallisten vaiheiden vikaresistanssi

C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi

I_e = verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa yksivaiheisessa maasulussa

U = verkon pääjännite

Suurilla vikaresistanssin arvoilla nollijännite lähestyy yksivaiheisen maasulun nollijännitettä. Maasulussa olevan lähdön vaihevirtojen summavirta on laskettavissa lausekkeista (5) ja (6), jos kumpikin maasulku esiintyy samassa lähdössä. Tämä virta ei sisällä vaiheiden välistä vikavirtaa. Kun maasulut ovat eri lähdöissä, on summavirrassa mukana myös vaiheiden välinen vikavirta.

8.2.2. Kompensoitu verkko

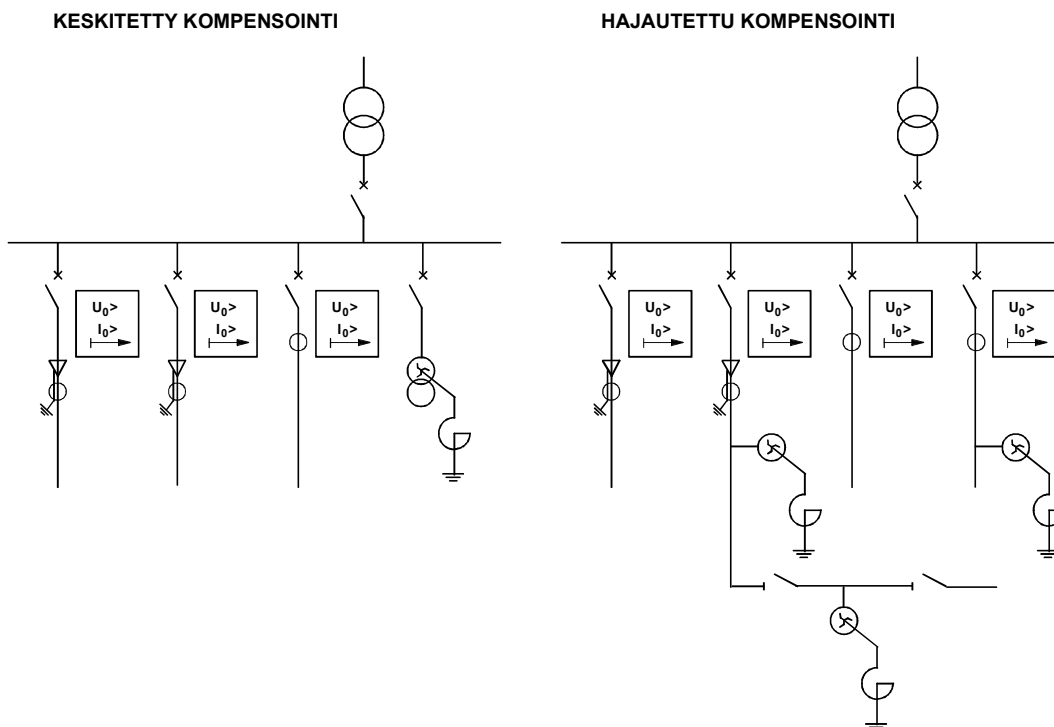
Kompensoidussa verkossa verkon kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan verkon tähtipisteeseen kytketyn kuristimen avulla. Keskijänniteverkoissa on vain harvoin muuntajan tähtipiste käytettävissä. Tämän vuoksi joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. Taloudellisimmin tämä voidaan toteuttaa Z-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla, jonka tähtipisteeseen kompensointikuristin liitetään. Tällöin kompensointi on toteutettu keskitetysti, kuva 8.2e. Kompensointi voidaan toteuttaa myös hajautetusti, jolloin riittävä määrä kompensointikuristimia sijoitetaan verkkoon johtojen varsille, kuva 8.2e. Johdon varrella sijaitseva kuristin mitoitetaan kyseisen johdon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaisesti. Tyypillisesti hajautetun kompensoinnin yhteydessä vain osa verkon maasulkuvirrasta kompensoidaan siten, että yksittäiset johdot eivät missään tilanteessa tule ylikompensoiduiksi.

Kompensoinnin määrää kuvataan ns. kompensointasteella K , lauseke 12. Jos K :n arvo on yksi tai lähellä sitä, on verkko täysin kompensoitu eli sammutettu. Verkko on ylikompensoitu K :n ollessa suurempi kuin yksi, ja vastaavasti alikompensoitu K :n ollessa pienempi kuin yksi.

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (12)$$

I_C = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa



KUVA 8.2e. Kompensoinnin toteuttamistavat.

Täysin kompensoidussa verkossa kulkee vikapaikan kautta vain ns. jäännösvirta, joka muodostuu kuristimen ja verkon häviöistä sekä mahdollisen kuristimen toisiovastuksen aiheuttamasta pätövirrasta sekä yliaalloista, kuva 8.2f. Kuvan 8.2f. sijaiskytkentään on piirretty nä-

kyviin myös verkon vuotohäviöitä vastaavat resistanssit, jotka laskelmissa on otettava huomioon.

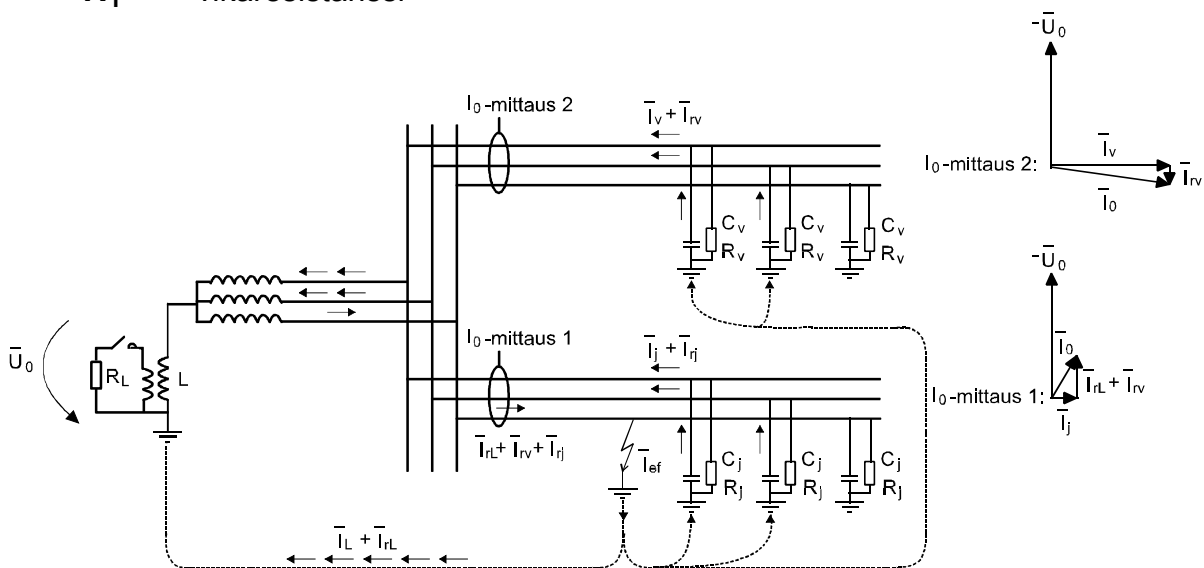
Vikapaikan virta saadaan lausekkeesta:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

ωL = kompensointikuristimen reaktanssi

R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi

R_f = vikaresistanssi



KUVA 8.2f. Maasulkuvirran muodostuminen täysin kompensoidussa eli sammutetussa verkossa, jossa $|\bar{I}_v + \bar{I}_j| = |\bar{I}_L|$ (R_j ja R_v = verkon vuotohäviöitä vastaava resistanssi). Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin.

Täysin kompensoidussa verkossa lauseke sievenee muotoon:

$$I_{ef} = \frac{1}{R_0 + R_f} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

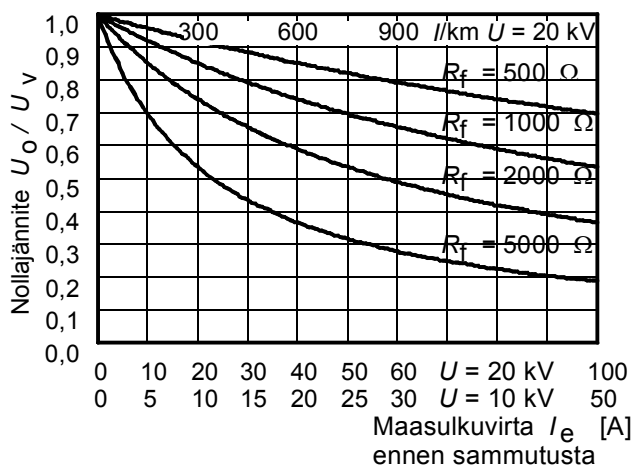
Nollajännite on maasulkuvirran sekä verkon maakapasitanssien, kuristimen induktanssin ja häviöresistanssien rinnankytkennän muodostaman impedanssin tulo. Nollajännite saadaan lausekkeesta:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0} \right)^2 + \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2}} I_{ef} \quad (15)$$

Täysin kompensoidussa verkossa lauseke sievenee muotoon:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{R_0}{R_0 + R_f} \quad (16)$$

Kuvassa 8.2g on esitetty nollajännitteen suuruus 20 kV avojohtoverkon pituuden funktiona. Verkon häviöresistanssin itseisarvo on oletettu kymmenen kertaa suuremmaksi kuin verkon kapasitiivisen reaktanssin itseisarvo.



KUVA 8.2g. Vikaresistanssin vaikutus nollajännitteen suuruuteen täysin kompensoidussa 20 kV avojohtoverkossa.

Lähtöjen suojauksen toimintaa tarkasteltaessa on usein tarpeen määrittää vaihevirtojen summanvirran sisältämä pätökomponentti. Tämän pätökomponentin suuruus voidaan laskea likimääräisesti käyttämällä lauseketta (17), josta saadaan siis vikapaikan virran pätökomponentti.

$$I_{efp} = \frac{1}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

Edellä olevien lausekkeiden avulla laskettu virta on vikapaikassa viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summanvirran suuruuteen ja vaihekulmaan vaikuttaa lisäksi johdon omien maakapasitanssien ja vuotöhäviöresistanssien kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta. Vaihevirtojen summanvirran suuruus voidaan laskea lausekkeesta (18) sekä vaihekulma negatiivisena otettuun nollajännitteeseen ($-\bar{U}_0$) nähden lausekkeesta (19). Lausekkeet (18) ja (19) ovat hyödyllisiä erityisesti osittain kompensoidun verkon tapauksessa.

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{((1-K)I_e - I_{ej})^2 + (I_r - I_{rj})^2}}{\sqrt{((1-K)I_e)^2 + I_r^2}} I_{ef} \quad (18)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{(1-K)I_e - I_{ej}}{I_r - I_{rj}}\right), \text{ MISSÄ} \quad (19)$$

I_e = verkon kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa,
 I_{ej} = johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa,

- K = kompensointiaste,
 I_r = kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa,
 I_{rj} = lähdön häviöiden aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa ja
 I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

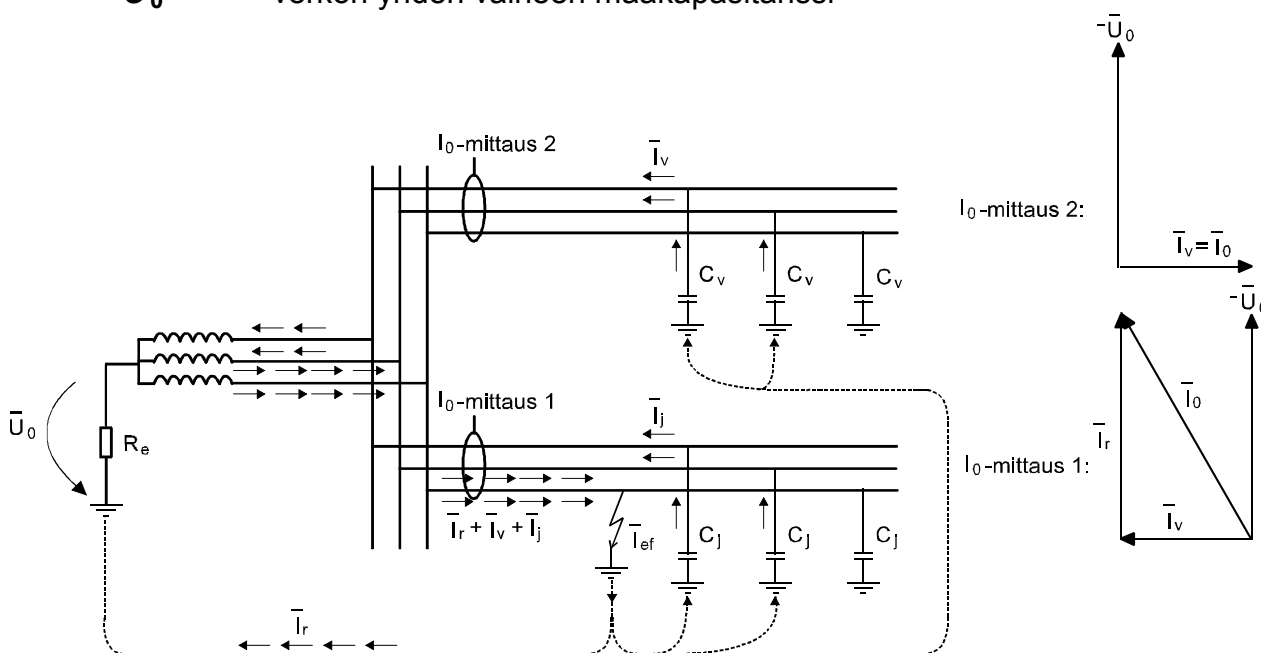
8.2.3. Suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko

Tähtipisteeseen kytketyn resistanssin avulla kasvatetaan maasulkuvirtaa ja toisaalta pienennetään kytkentä- ja katkaisutilanteissa syntyviä ylijännitteitä samoin kuin katkeilevan maasulun synnyttämiä ylijännitteitä. Vikapaikassa kulkee virta, joka muodostuu maadoitusresistanssin ja verkon maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summasta, kuva 8.2h.

Vikapaikan virta voidaan laskea lausekkeesta:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + (R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f + R_e)^2 + (R_f R_e 3\omega C_0)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

- R_e = maadoitusresistanssi
 R_f = vikaresistanssi
 C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi



KUVA 8.2h. Maasulkuvirran muodostuminen suurella resistanssilla maadoitetussa verkossa, jossa maadoitusresistanssi on pienempi tai yhtäsuuri kuin maakapasitanssien muodostaman reaktanssin itseisarvo. Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin.

Jos maakapasitanssi on pieni, eli maakapasitanssien muodostaman reaktanssin arvo on suuri suhteessa maadoitusresistanssiin, voidaan maasulkuvirta käytännössä laskea lausekkeesta:

$$I_{ef} = \frac{1}{R_e + R_f} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Nollajännite on maasulkuvirran ja maadoitusresistanssin ja verkon kapasitanssien rinnankytkennän muodostaman impedanssin tulo. Nollajännite saadaan lausekkeesta:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_e}\right)^2 + (3\omega C_0)^2}} I_{ef} \quad (22)$$

Jos maakapasitanssien muodostama reaktanssi on suuri suhteessa maadoitusresistanssiin, voidaan käytännössä soveltaa lauseketta:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{R_e}{R_e + R_f} \quad (23)$$

Edellä olevien lausekkeiden avulla laskettu virta on vikapaikassa, viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirran suuruuteen ja vaihekulmaan vaikuttaa lisäksi johdon omien maakapasitanssien kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta. Vaihevirtojen summavirran suuruus voidaan arvioida lausekkeesta (24) sekä vaihekulma negatiivisena otettuun nollajännitteeseen ($-U_0$) nähden lausekkeesta (25).

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{(I_e - I_{ej})^2 + I_r^2}}{\sqrt{I_e^2 + I_r^2}} I_{ef} \quad (24)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{I_e - I_{ej}}{I_r}\right), \text{ missä} \quad (25)$$

- I_e = verkon kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa,
- I_{ej} = johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa,
- I_r = maadoitusresistanssia vastaava pätövirta suorassa maasulussa ja
- I_{ef} = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

8.3. Maasulkusuojauksen toteutus

8.3.1. Toteutuksen periaatteet

Maasulun hälytys- tai erotuslaitteen on toimittava äärijohtimesta suojamaadoitettuun osaan tapahtuvassa maasulussa, sekä lisäksi yli 1000 V järjestelmän muussa äärijohtimen maasulussa, jossa vikaresistanssi on enintään 500 Ω , jos maasulku voi tapahtua muuhun kuin suojamaadoitettuun kohteeseen kuten ilmajohdossa. On kuitenkin suositeltavaa, että maasulun hälytys- tai erotuslaite toimii vielä mainitun rajan yli niin suureen vikaresistanssiin saakka kuin teknisesti käy kohtuudella päinsä (StM 8 § 3).

Yksivaiheisen maasulun suojamaadoitettuun osaan aiheuttama maadoitusjännite ei saa yli 1000 V kytkinlaitoksessa eikä paikassa, missä ihmisiä usein oleskelee tai liikkuu, aiheuttaa vaarallista kosketusjännitettä (StM 10 § 2). Kosketusjännite on tavallisesti vain osa maadoi-

tusjännitteestä. Sähköturvallisuusmääräyksissä on ilmoitettu maadoitusjännitteen enimmäisarvot erikseen laukaisevalle ja hälyttävälle suojaukselle.

Näiden arvojen perusteella määräytyy myös suojaukselta vaadittava toimintanopeus. Tämän vuoksi maasulkusuojausta suunniteltaessa täytyy olla tiedossa myös maadoitusresistanssin suuruus.

Enintään 1000 V järjestelmän kosketusjännitesuojauksesta on määrätty, että sähkölaitos on rakennettava sellaiseksi, että vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen eristysvian tai muun syyn johdosta riittävästi estetään (StM 9 § 1).

Kaksoismaasulku on kytkettävä itsetoimivasti ja nopeasti pois (StM 8 § 4).

Käyttömaadoitetussa yli 1000 V verkossa maasulkuvirta on suorassa maasulussa riittävän suuri havahduttamaan oikosulkusuojauksen. Vikaresistanssin ollessa 500 Ω on maasulkuvirta 110 kV verkossa n. 120 A. Jos nimellisvirta on suuri, ei oikosulkusuojaus kykene toimimaan näin pienellä virralla. Tällöin oikosulkusuojausta on täydennettävä nollavirtaa mittaavalla maasulkusuojauksella.

Käytettäessä enintään 1000 V järjestelmässä erillistä suojamaadoitusta varustetaan verkko vaarallisten kosketusjännitteiden estämiseksi äärijohtimien ja nollajohtimen summavirran vaikutuksesta toimivalla vikavirtasuojakytkimellä tai vastaavalla relesuojalla (StM 9 § 6). Ellei oikosulkusuojaus toimi nollatessa pienjänniteverkossa riittävän nopeasti, täydennetään oikosulkusuojausta äärijohtimien summavirran tai nollajohtimen virran vaikutuksesta toimivalla asemasuojakytkimellä.

Maasta erotetussa, kompensoidussa tai suuren resistanssin kautta maadoitetussa verkossa ei oikosulkusuojaus kykene toimimaan yksivaiheisessa maasulussa. Tämän vuoksi verkko varustetaan erillisillä maasulkureleillä tai vikavirtasuojakytkimillä.

8.3.2. Maasulkuvirran ja nollajännitteen mittaaminen

Maasulkuvirta voidaan mitata vaihevirtamuuntajien summakytkenän, kaapelivirtamuuntajan tai vaihevirtasensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla.

Summakytkentä muodostetaan kytkemällä eri vaiheiden virtamuuntajien toisiot rinnan. Summakytkennän tarkkuuteen vaikuttaa ensisijaisesti virtamuuntajien samanlaisuus. Samasta valmistuserästä valitut virtamuuntajat ovat normaalisti niin samanlaisia, että summakytkennän tarkkuus voidaan olettaa samaksi kuin yksittäisten virtamuuntajien tarkkuusluokka. Summakytkennässä erotettavissa olevan maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat virtamuuntajien muuntosuhde sekä kuormitusvirran aiheuttama näennäinen nollavirta, jonka vaihekulma voi olla täysin mielivaltainen. Näennäinen nollavirta voi hetkellisesti kasvaa huomattavastikin, esim. kytkentävirtasysäysten aikana virtamuuntajien eriaikaisen kyllästymisen vuoksi, mikä suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon. Summakytkentä soveltuu tapauksiin, joissa maasulkuvirta on suuri tai kuormitusvirta pieni.

Vaihevirtasensoreita käytettäessä releen mittausalgoritmi laskee maasulkuvirran sensorien mittaamista vaihevirroista. Mittaustarkkuuteen vaikuttavat käytettyjen sensorien samanlaisuus sekä numeerisessa laskennassa syntyvät epätarkkuudet, jotka kuormitusvirtojen kulkiessa aiheuttavat näennäistä nollavirtaa. Laskennallisen summamittauksen käyttö soveltuukin yleensä samanlaisiin tapauksiin kuten vaihevirtamuuntajien summakytkenäkin. Sensoreiden etuna on lineaarisuus, joten ne eivät kyllästy esim. kytkentävirtasysäysten yhteydessä. Tällöin näennäistä nollavirtaa esiintyy vähemmän kuin summakytkenää käytettäessä, joten suojauksen stabiilisuus on helpompi saavuttaa.

Kaapelivirtamuuntajan avulla voidaan mitata hyvin pieniäkin maasulkuvirtoja (< 0,5 A) riippumatta nimellisvirtojen suuruudesta. Tämän vuoksi kaapelivirtamuuntajaa on syytä käyttää

aina, kun se on mahdollista. Kaapelivirtamuuntajan kuormitettavuus ei ole suuri, mutta pienitaakkaisten numeeristen suojareleiden yhteydessä tämä ei muodosta ongelmaa.

Nollajännite voidaan mitata jännitemuuntajan avokolmiokäämityksestä tai verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiosista. Avokolmiojännite muodostuu vaiheiden ja maan välisten jännitteiden summasta. Jonkun kytkentätilanteen seurauksena jännitemuuntajan induktanssi ja verkon maakapasitanssi saattavat muodostaa resonanssiipiirin. Useimmiten tämä ns. kippivärähtely (ferroresonanssi) voidaan torjua avokolmiokäämitykseen liitetyn kuormitusvastuksen avulla. Sopivan resistanssin suuruuteen vaikuttavat kytkentätilanne ja käytetty jännitemuuntaja.

Nollajännite voidaan mitata myös jännitesensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla. Releen mittausalgoritmi laskee nollajännitteen vaihekohtaisten sensorien mittaamista vaihejännitteistä. Etuna on lineaarisuus ja mittamuuntajien kippivärähtelyriskin poistuminen.

Pienjänniteverkossa nollajännitteen mittaukseen voidaan käyttää myös vastuksien avulla muodostettua keinotekoista tähtipistettä.

8.3.3. Yleishälytys

Syntyipä maasulku missä osassa verkkoa tahansa, ilmenee se aina nollajännitteenä. Yleishälytys voidaan siis toteuttaa nollajännitettä valvovan ylijännitereleen avulla. Nollajännitteen avulla voidaan todeta suhteellisen suuriresistanssiset viat laajoissakin verkoissa. Esim. 600 km laajassa maasta erotetussa avojohtoverkossa voidaan 5 % asettelulla tavoittaa viat, joiden vikaresistanssi on 5000 Ω.

Kaapeliverkossa kaapelien suuren maakapasitanssin vuoksi nollajännite pienenee nopeasti verkon laajentuessa, mutta toisaalta kaapeliverkot ovat hyvin symmetrisiä: terveessä tilassa nollajännite saattaa olla vain prosenttien osia. Esim. 3 % asettelulla voidaan löytää 5000 Ω vika-resistanssinen maasulku n. 20 km laajassa kaapeliverkossa (kaapelina APYAKMM 3x185 mm², 20 kV).

Sammutetussa verkossa terveen tilan nollajännite on huomattavasti suurempi kuin maasta erotetussa verkossa, mutta vastaavasti maasulussa syntyvä nollajännite on myös suurempi. Esim. edellä mainittua avojohtoverkon 5 % asettelua maasta erotetussa verkossa vastaa 35 % asettelu sammutetussa verkossa, jos oletetaan, että pätkökomponentin osuus on 10 % maasulkuvirrasta.

Yleishälytys on riittävä vain suppeissa verkoissa, joissa vikapaikka on helposti löydettävissä. Yleishälytys soveltuu käytettäväksi myös varasuojana ilmaisemaan suuriresistanssisia vikoja. Haluttaessa helpottaa vikapaikan hakua tai käytettäessä laukaisevaa suojausta varustetaan verkko selektiivisellä suojuksella.

8.3.4. Maasta erotetun säteittäisverkon selektiivinen suojaus

Selektiivinen suojaus edellyttää johtokohtaista releistystä. Maasta erotetussa verkossa selektiivinen suojaus voidaan toteuttaa nollavirtaa mittaavien releiden, kuvat 8.3a ja 8.3b tai nollajännitettä ja nollavirtaa mittaavien suuntareleiden avulla, kuva 8.3d ja 8.3e.

Nollajännitettä mittaavan ylijännitereleen tehtäväksi jää tällöin toimia aseman suojana sekä lähtöjen suojien varasuojana, kuva 8.3c.

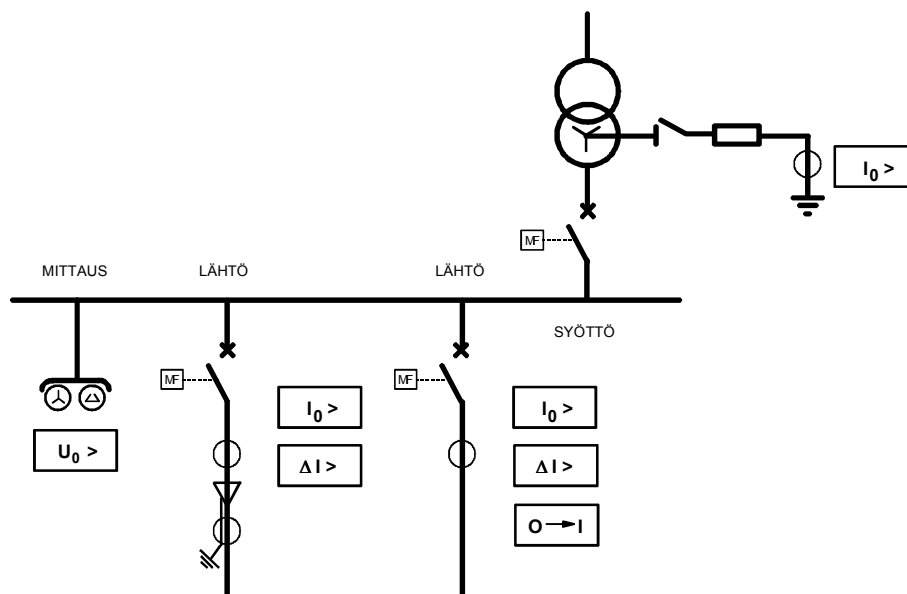
Suuntaamattoman suojan toiminta perustuu terveiden lähtöjen maakapasitanssien kautta palaavan maasulkuvirran mittaamiseen. Tämä on se virta, joka voidaan laskea lausekkeen (5) avulla. Jos vika on muualla verkossa, mittaa ko. suoja nytkin virtaa, joka tällä kertaa muodostuu suojattavan lähdön omien maakapasitanssien kautta palaavasta maasulkuvirrasta. Koska toiminta perustuu pelkästään virran suuruuteen, on suojattavan lähdön syöttämän maasulkuvirran oltava riittävästi pienempi kuin muun verkon syöttämä maasulkuvirta.

Suuntaamattoman suojauksen selektiivisyys on suuresti riippuvainen kytkentätilanteesta ja vikaresistanssin suuruudesta. Tämän vuoksi se soveltuu lähinnä kaapeliverkkoihin, joissa suuri resistanssisten vikojen synty on epätodennäköistä. Lisäksi on edullista, että suojattava verkko muodostuu useista, likimain samanpituisista lähdoista. Myös jos on kyseessä johdonhaarakatkaisija tai ala-asema, jonka syöttävällä puolella on runsaasti verkkoa, voidaan suuntaamattonta suojausta käyttää ilman, että kytkentätilanteen muutos vaarantaisi suojauksen selektiivisyyttä.

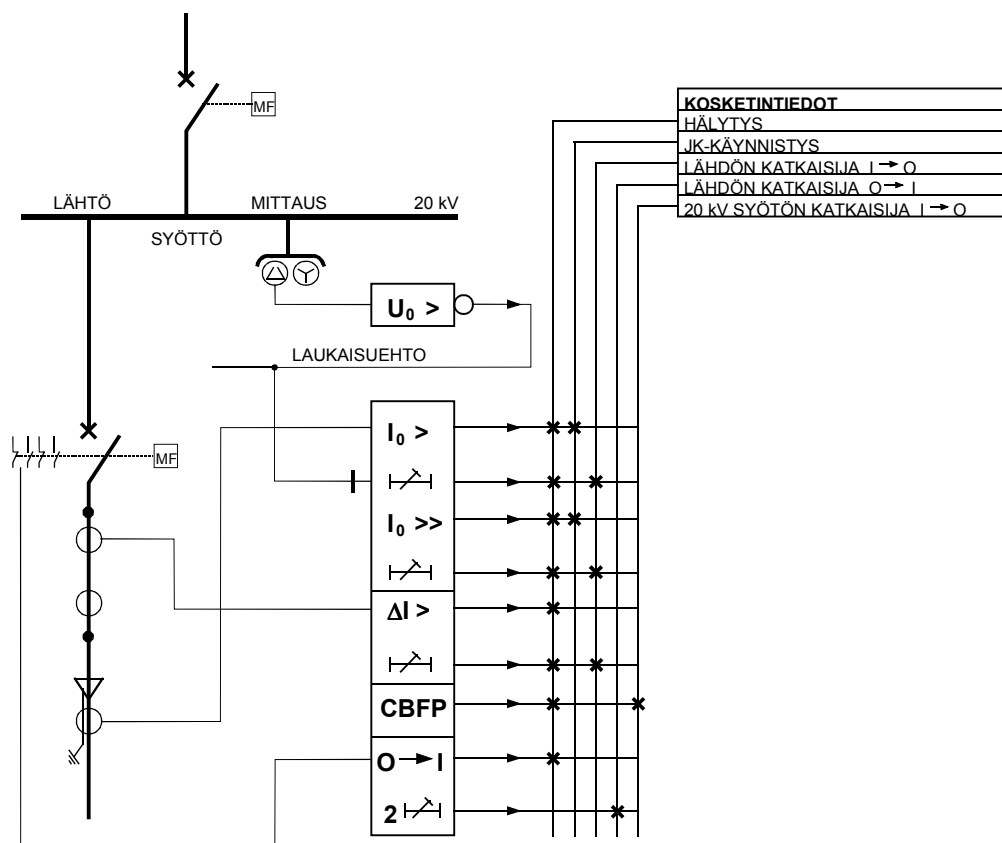
Pyrittäessä herkkään suuntaamattomaan suojaukseen suositellaan nollavirtareleen toiminnan varmistamista nollajännitereleeltä tulevalla lukituksella, joka poistuu nollajännitereleen havahduessa, kuva 8.3b. Näin varmistetaan, että esim. mittaustavasta tai häiriöistä johtuva näennäinen nollavirta ei aiheuta suojauksen tarpeetonta toimintaa.

Suunnatun suojauksen toiminta perustuu maasulkuvirran loiskikomponentin suuruuteen ja suuntaan tai vaihtoehtoisesti ns. kulmamittauseriaatteeseen. Jälkimmäisessä tapauksessa suojaus toimii, kun nollavirran ja -jännitteen suuruudet ylittävät asetteluarvot ja nollavirran vaihekulma nollajännitteeseen nähden on asetellulla toimintasektorilla. Suunnattua suojausta voidaan täydentää pelkästään nollavirran suuruuteen perustuvalla suuntaamattomalla suojauksella. Kaksoismaasulkutilanteissa suuntaamattomalla suojalla nopeutetaan ja varmistetaan suojauksen toiminta varsinkin silloin, kun vikavirran suuruus jää vikaresistanssin vaikutuksesta pienemmäksi kuin ylivirtasuojien virta-asettelut. Lisäksi sopivalla asettelulla suuntaamaton suoja saadaan toimimaan ainoastaan kaksoismaasulkutilanteissa, jolloin saadaan selvä indikaatio vikatyypistä.

Suojausta voidaan täydentää myös vaihekatkossuojalla ($\Delta I >$), joka mahdollistaa suojauksen toiminnan myös maasuluissa, jotka syntyvät johtimen katketessa ja pudotessa maahan. Mikäli maa on huonosti johtavaa tai johdin putoaa maahan kuorman puolelta, voi maasulkuvirta jäädä niin pieneksi, ettei varsinainen maasulkusuoja havahdu. Mikäli käytössä on lisäksi katkaisijavikasuoja (CBFP=Circuit Breaker Failure Protection), voidaan laukaisu ohjata viiveajan jälkeen syötön katkaisijalle, ellei lähdön katkaisija jostain syystä aukea vikatilanteessa.



KUVA 8.3a. Maasta erotetun tai suurella resistanssilla maadoitetun verkon maasulkusuojauksen toiminnot. Pääkaavioesitys.

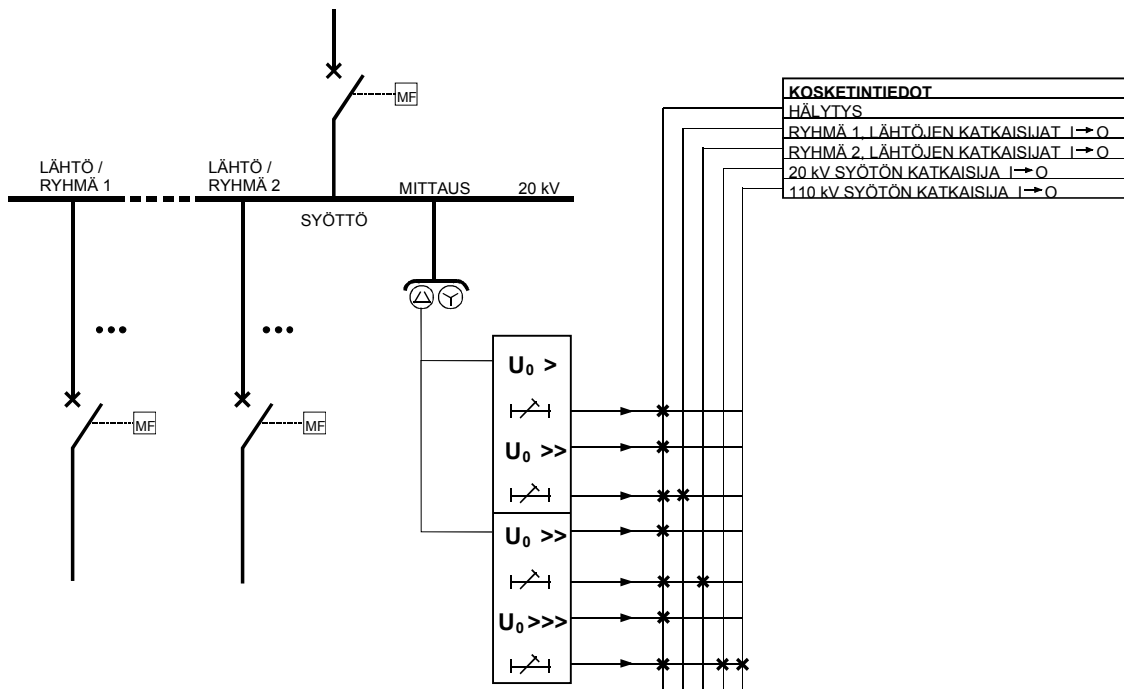


KUVA 8.3b. Lähdön maasulkusuojauksen yleiskaavio (maasta erotettu tai resistanssilla maadoitettu verkko).

Suunnattua suojausta on syytä käyttää silloin, kun kytkentätilanne vaihtelee suuresti ja halutaan suojauksen toimivan myös suurilla vikaresistanssin arvoilla. Tällöin suojauksen selektiivisyys ei ole riippuvainen kulloinkin kytkettynä olevien johtojen pituudesta eikä lukumäärästä.

Käyttämällä lähdöissä kaksi- tai useampiportaista suojausta voidaan suojukselle asetettu herkkyysvaatimus toteuttaa alimmalla portaalla ja vastaavasti toimintanopeusvaatimus ylemmillä portailla. Tällöin suurella vikaresistanssilla tapahtuvasta viasta tai alkavasta maasulusta saadaan alimmalta portaalta hälytys. Kun vikavirta kasvaa niin suureksi, että sallittu maadoitusjännitteen arvo ylittyy tai muut laukaisukriteerit täyttyvät, saadaan ylemmiltä portailta laukaisu vaadittujen toiminta-aikojen mukaisesti.

Lisäksi käyttämällä kaksi- tai useampiportaista nollajännitesuojaa, jonka ylemmät portaat laukaisevat ja alin hälyttää, voidaan toteuttaa selektiivinen syöttöhaaran ja kiskoston suojaus sekä lähtöjen varasuojaus. Lisäportaiden avulla voidaan varalaukaisu toteuttaa useammassa aikaportaassa, jotta häiriö rajoittuisi mahdollisimman pienelle alueelle. Ensin laukaistaan vähemmän tärkeät lähdöt ja sen jälkeen muut lähdöt, mikäli nollajännite ei sitä ennen häviä. Mikäli vika ei vielä poistunut, laukaistaan päämuuntajan yläpuolen katkaisija. Tällöin on ilmeistä, että vika on syöttöhaarassa tai kiskostossa.



KUVA 8.3c. Aseman maasulkusuojauksen yleiskaavio. 110 kV:n syötön katkaisijaa ei ole merkitty kuvaan näkyviin.

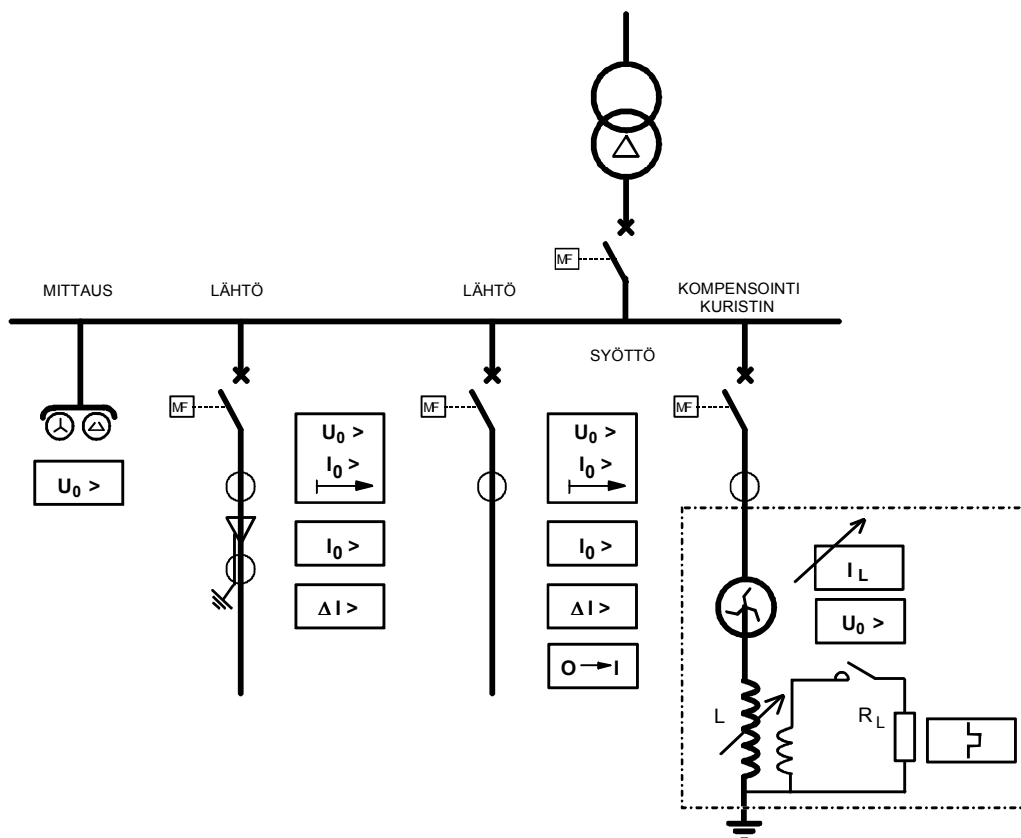
8.3.5. Kompensoidun säteittäisverkon selektiivinen suojaus

Vikapaikassa kulkevaa maasulkuvirtaa voidaan huomattavasti pienentää kytkemällä verkon tähtipisteeseen kuristin. Mikäli kuristimen induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri kuin maakaapitanssien muodostama kapasitiivinen reaktanssi, kulkee vikapaikan kautta ainoastaan häviöiden synnyttämä ns. jäännösvirta. Käytännössä tämä virta on normaalisti niin pieni, että valokaarimaasulut sammuvat itsestään. Vikapaikan virran pienentyessä pienenee myös maasulussa esiintyvä maadoitusjännite. Kompensoinnin ansiosta riittää usein hälyttäväkin suojaus.

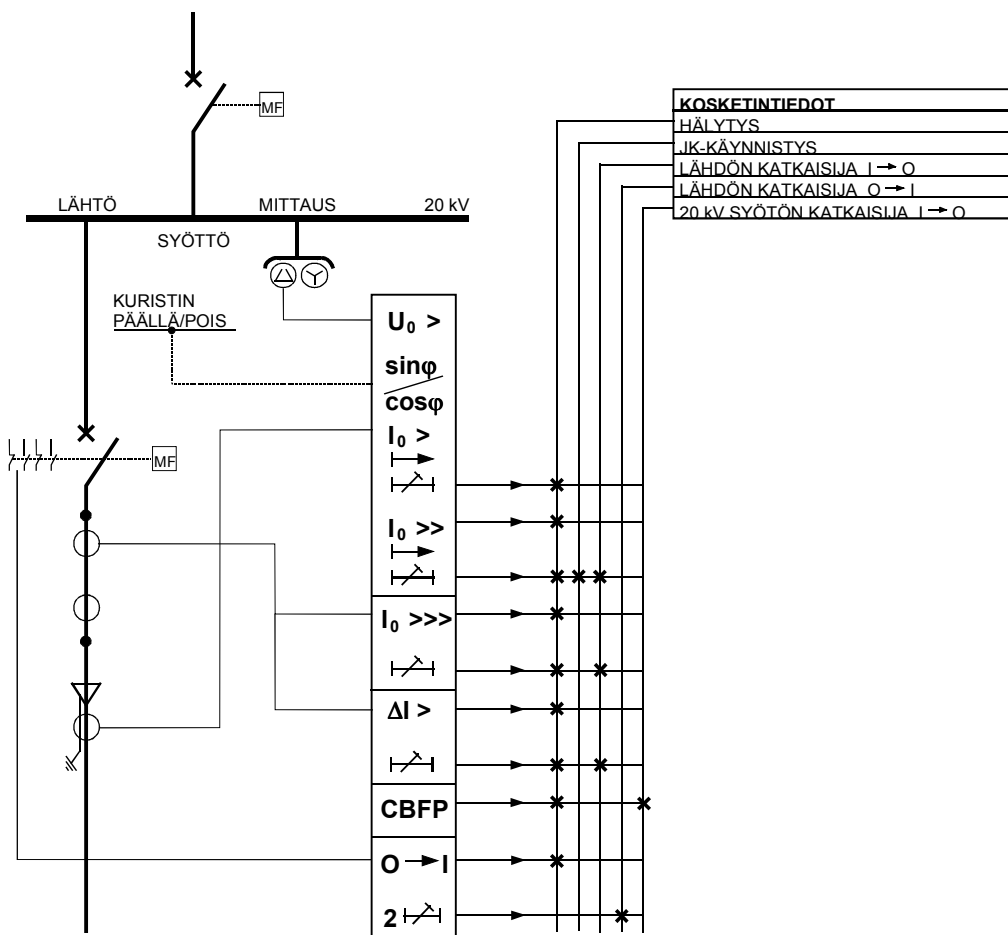
Kompensoidussa verkossa suojaus toteutetaan suunnatuilla suojoilla, joiden toiminta perustuu maasulkuvirran päätökomponentin suuruuteen ja suuntaan tai vaihtoehtoisesti ns. kulmamittausperiaatteeseen. Jälkimmäisessä tapauksessa suojaus toimii, kun nollavirran ja -jännitteen suuruudet ylittävät asetteluarvot ja nollavirran vaihekulma nollajännitteeseen nähden on asetellulla toimintasektorilla. Toiminta on aivan vastaavanlainen kuin maasta erotetussa verkossa, jossa suojausten toiminta perustuu kapasitiivisen virran suuruuteen ja suuntaan, kuvat 8.3d ja 8.3e.

Jos kompensoitu verkko on suppea, saattaa maasulkuvirran päätökomponentti jäädä niin pieneksi, että maasulkuvirran suuntaa ei voida luotettavasti määrittää. Varsinkin jos nollavirran mittauksessa käytetään summakytkentää tai laskennallista summamittausa, täytyy päätökomponenttia kasvattaa kytkemällä kompensointikuristimen rinnalle maasulkuvirran päätökomponenttia kasvattava toisioavustus.

Valitsemalla automaattisella kulmanvaihdolla varustetut suojat toimii suojaus myös silloin, kun kompensointikuristin on kytketty pois. Toinen vaihtoehto on käyttää ns. laajalla toimintasektorilla varustettua kulmamittausperiaatteella toimivaa relettä.



KUVA 8.3d. Kompensoidun tai maasta erotetun verkon maasulkusuojausten toiminnot. Pääkaavioesitys.



KUVA 8.3e. Lähdön maasulkusuojausten yleiskaavio (kompensoitu tai maasta erotettu verkko).

8.3.6. Suuren resistanssin kautta maadoitetun säteittäisverkon selektiivinen suojaus

Maasulkuvirtaa joudutaan keinotekoisesti kasvattamaan, mikäli maasulkuvirta on niin pieni, että sitä ei voida luotettavasti mitata. Eräs tapa kasvattaa maasulkuvirtaa on kytkeä suuriresistanssinen vastus verkon tähtipisteeseen. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat tällöin lähinnä vain maadoitus- ja vikaresistanssin suuruudet. Esim. verkon kytkentätilanteen vaikutus jää hyvin vähäiseksi. Maadoitusvastus myös vaimentaa katkeilevissa maasuluissa syntyviä ylijännitteitä. Enintään 1000 V järjestelmässä suuriresistanssista maadoitusta käyttäen selektiivinen maasulkusuojaus on helppo toteuttaa.

Suojaus voidaan yleensä toteuttaa nollavirtaa mittaavilla ylivirtareleillä, kuva 8.3a. Mikäli näin saavutettava herkkyys ei ole riittävä, voidaan käyttää kompensoidun verkon tapaan suunnattuja suoja. Suunnattu suoja saattaa erityisesti tulla kyseeseen silloin, kun suojattavalla alueella on paljon galvaanisesti yhteenkytkettyä verkkoa, esim. pääkojeiston ja alakojeiston välisen johdon suojaus.

Pienjänniteverkossa vikapaikan hakemiseen voidaan käyttää myös pihtiampeerimittaria: maadoitusresistanssia pienennetään hetkittäin, jolloin viallisessa johdossa maasulkuvirran lisäys näkyy mittariosoituksen heilahduksena.

8.3.7. Tehollisesti tai pienellä impedanssilla maadoitetun säteittäisverkon suojaus

Pienellä resistanssilla tai reaktanssilla maadoitetussa verkossa maasulkuvirran suuruusluokka on tyypillisesti lähtöjen nimellisvirroista aina useisiin satoihin jopa muutamiin tuhansiin ampeereihin saakka. Tehollisesti maadoitetussa verkossa maasulkuvirrat ovat oikosulkuvirtojen suuruusluokkaa. Tällaisissa verkoissa ylivirtasuojat toimivat jo maasuluissakin, mikäli vikavirtaa on riittävästi. Ylivirtasuojauksen herkkyys on usein kuitenkin riittämätön kattamaan viat, joissa on mukana vikaresistanssia tai jotka tapahtuvat esim. muuntajien tai koneiden käämeissä. Galvaanisesti yhteenkytketyn verkon laajuudella ei ole käytännön vaikutusta maasulkuvirran määrään ja suojaus voidaan toteuttaa yksinkertaisesti nollavirtaa mittaavilla ylivirtasuojilla, jotka toimivat joko käänteis- tai vakioaikaisina. Käänteisaikaisuudella verkon kestoisuus tulee optimaalisesti hyödynnettyä sekä saavutetaan hyvä ja luotettava selektiivisyys syötön ja lähtöjen välillä, varsinkin jos maasulkuvirtaa vialliseen lähtöön syöttäviä haaroja on useampia. Selektiivisyyden saavuttaminen myöskin varokkeiden kanssa on helppoa käyttämällä käänteisaikaista suojausta.

Mikäli suhteellisen suuriresistanssisten vikojen syntyminen tällaisissa verkoissa on mahdollista, voidaan suojausta täydentää lähtökohtaisella ja/tai verkkokohtaisella herkällä maasulkusuojuksella (SEF=Sensitive Earth Fault). Lähtökohtaisen SEF-suojan toiminta perustuu joko herkkään suuntaamattomaan suojaukseen tai tavalliseen suunnattuun suojaukseen. Verkon SEF-suoja mittaa nollavirtaa maadoitushaarasta. SEF-suojan maksimiherkkyys on tyypillisesti muutaman prosentin luokkaa lähtöjen nimellisvirroista tai 5-10 A ensiövirtana. Toiminta-aika on pitkäkö, jotta aikaselektiivisyys lähdön varsinaisen suojan sekä verkon muiden suojiensa kanssa toteutuu riittävässä määrin.

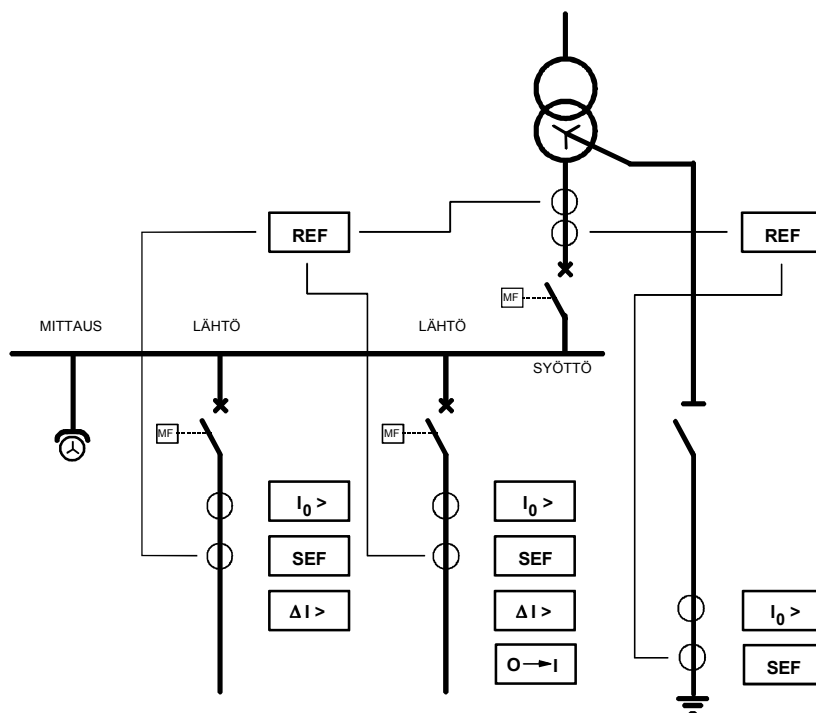
Lisäksi, mikäli lähtöjen kuormitukset ovat riittävän symmetrisiä, voidaan suojausta täydentää maasta erotettujen ja kompensoitujen verkkojen tapaan vaihekatkossuojilla. Katkaisijoiden toiminta varmistetaan niinkään katkaisijavikasuojilla.

Muuntajan, syöttöhaaran ja kiskoston suojaus voidaan toteuttaa erovirtasuojauksella (REF=Restricted Earth Fault), jolloin toimintanopeus saadaan mahdollisimman hyväksi. Kiskoston suojaukseen voidaan lisäksi käyttää lukittavaa nollavirtasuojaa, jossa lähdön suoja lukitsee syötön suojan vian ollessa lähdössä. Mikäli vika on kiskostossa ei lukituksia tule ja syötön suoja voi toimia mahdollisimman lyhyen toimintaviiveen mukaisesti. Kiskosto voidaan suojata myöskin pelkästään nollavirtaa syöttö- tai maadoitushaarasta mittaavalla nollavir-

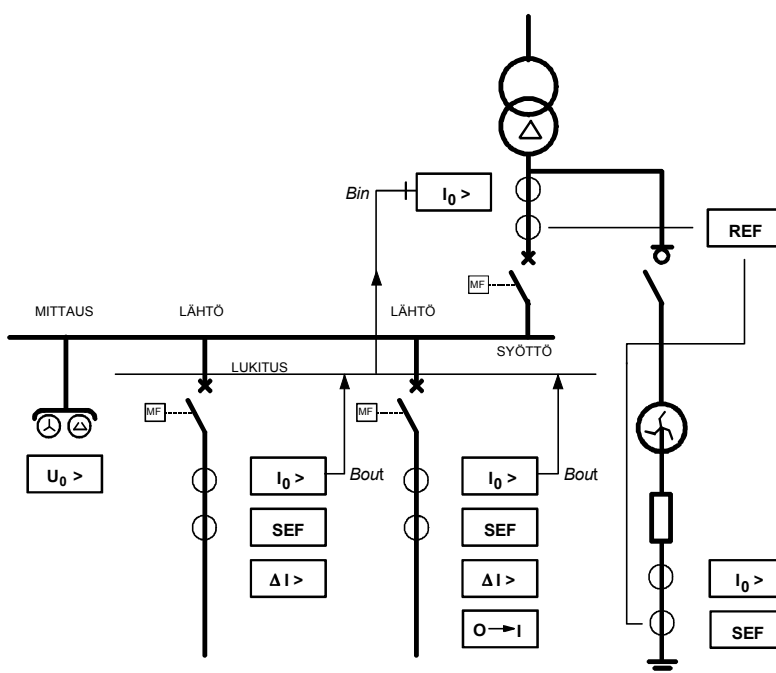
tasuojalla, joka toimii aikaselektiivisesti lähtöjen suoien kanssa. Tällöin toimintanopeus ei ole kuitenkaan kovinkaan hyvä.

Varasuojaus toteutetaan maadoitushaarasta nollavirtaa mittaavalla nollavirtasuojalla ja/tai nollajännitesuojalla, jotka toimivat selektiivisesti muiden suoien kanssa.

Tehollisesti tai pienellä resistanssilla maadoitettujen verkkojen maasulkusuojausten toimintoja on esitetty kuvissa 8.3f ja 8.3g.



KUVA 8.3f. Tehollisesti maadoitetun verkon maasulkusuojausten toiminnot. Pääkaavioesitys.



KUVA 8.3g. Pienellä resistanssilla maadoitetun verkon maasulkusuojausten toiminnot. Pääkaavioesitys. B_{out} = ulostuleva havahtumissignaali, B_{in} = sisäänmenevä havahtumissignaali, joka lukitsee ko. suojausportaan toiminnan.

8.3.8. Silmukkaverkon selektiivinen suojaus

Maasta erotetussa tai sammutetussa silmukkaverkossa selektiivistä suojausta ei voida saavuttaa pelkkien suuntareleiden avulla. Suuntareleet tosin ilmaisevat, mihin suuntaan maasulkuvirta kulkee, mutta viallista johto-osuutta ne eivät pysty tunnistamaan. Eräs keino on tällöin jakaa verkko sopivasta kohdasta säteittäisiin osiin, jolloin suuntareleet kykenevät toimimaan selektiivisesti. Toinen tapa on käyttää suuntavertosuojia, jotka viestiyhteyden avulla suorittavat vertailua johdon päiden releiden välillä. Jos kummankin pään rele osoittaa vian olevan johdolla, seuraa laukaisu. Mikäli verkko on osittain kompensoitu tai resistanssin kautta maadoitettu, tulee kyseeseen myös nollavirtaan perustuva erovirtasuojaus.

Tehollisesti tai pienellä impedanssilla maadoitetussa silmukkaverkossa selektiivinen suojaus voidaan yleensä toteuttaa suunnatuilla suojilla, jolloin selektiivisyys perustuu sekä maasulkuvirran suuntaan että toiminta-aikaan. Mikäli käytetään distanssi-, erovirta- tai suuntavertosuojausta, lyhenee suojauksen toiminta-aika oleellisesti ja selektiivisyyden toteuttaminen on helppoa.

8.4. Esimerkkejä maasulkusuojauksen asettelusta

Esimerkki 1

On suunniteltava maasulkusuojaus 10 kV kytkinlaitokselle, jossa on viisi kaapelilähtöä, joiden pituudet ovat 300 m, 500 m, 600 m, 700 m ja 1 km. Kaapelien laji on APYAKMM 3x120 mm². Suojauksen tulee toimia selektiivisesti, vaikka pisin lähtö on kytketty pois. Hälytyksen tulee toimia 3000 Ω vikaresistanssiin saakka.

Ratkaisu

Laaditaan taulukko, johon merkitään kunkin kaapelin maakapasitanssien kautta kulkevien maasulkuvirtojen suuruus suorassa maasulussa. Kyseiselle kaapelille maasulkuvirta on 2,5 A/km. Kertomalla tämä arvo kaapelin pituudella, saadaan kunkin kaapelin "syöttämät" maasulkuvirrat.

Lähtö n:o	Pituus [m]	I_{ej} [A]	ΣI_{vmin} [A]
1	300	0,75	4,10
2	500	1,25	3,65
3	600	1,50	3,40
4	700	1,75	3,20
5	1000	2,50	4,30
	Σ 3100	Σ 7,75	

Taulukko 8.4a. Lähtöjen "syöttämät" maasulkuvirrat I_{ej} sekä pienimmät virrat ΣI_{vmin} , jolla ko. lähdön releen tulee toimia.

Maasulkuvirtojen summa on 5,25 A, kun pisin lähtö ei ole kytkettynä. Valitaan pienimmäksi vikaresistanssin arvoksi 500 Ω, jolla suojauksen vielä tulee toimia. Lausekkeesta (4) voidaan laskea, että 500 Ω vaikutuksesta virta pienenee arvoon 4,80 A. Lausekkeen (6) avulla laskeaan pienimmät lähtöjen syöttöpäässä mitattavissa olevat virrat ΣI_{vmin} , joilla suojauksen tulee toimia.

Maasulkuvirtojen summa on 7,75 A, kun myös pisin johto on kytkettynä. Vikaresistanssin (500 Ω) vaikutuksesta virta pienenee arvoon 6,40 A ja releen minimitoimintavirraksi saadaan 4,30 A.

Virtoja laskettaessa verkon jännite on oletettu nimellisjännitteen suuruiseksi. Normaalisti verkon jännite voi vaihdella $\pm 5\%$. Tästä syystä ja lisäksi laskenta- ja mittaustarkkuus huomioonottaen releen toimintaan vaadittava minimivirta tulisi olla noin 20 % suurempi kuin lähdön itsensä syöttämä maasulkuvirta, jotta virtaselektiivisyys täytyisi.

Tässä esimerkissä virtaselektiivisyyden ehto täyttyy ja suojaukseen voidaan käyttää pelkästään nollavirtaa mittaavia releitä. Hälytykseen käytetään nollajännitettä mittaavaa jännitereklettä. Lausekkeesta (9) saadaan $3000\ \Omega$ ja $7,75\ \text{A}$ vastaavaksi asetteluksi 24 %.

Toimiiko suojaus, kun pisimmässä lähdössä sattuu maasulku ja kaksi lähtöä on kytketty pois, releen asettele on $3,0\ \text{A}$?

Kun kaksi lyhintä johtoa on kytkettynä pois, on kahden muun lähdön syöttämä maasulkuvirta $3,25\ \text{A}$, joka ylittää releasettelun. Suojaus toimii, mikäli vikaresistanssia ei ole. Mutta mikäli jotkut muut kaksi lähtöä ovat kytkettyinä pois, jää maasulkuvirta pienemmäksi kuin releasettelu.

Esimerkki 2

Maasta erotetun 20 kV aseman lähtöjen maasulkusuojaus on suunniteltu toteutettavaksi kuvan 8.3e funktioilla. Määritetään suunnatun ja suuntaamattoman suojan asetteluarvot lähdölle, jonka tuottama maasulkuvirta on $10\ \text{A}$. Asemaan kuuluu myös 10 muuta lähtöä, joiden tuottama maasulkuvirta on yhteensä $50\ \text{A}$. Suppeimmassa verkkotilanteessa, jossa osaa kulluttajista syötetään toiselta asemalta, on verkon maasulkuvirta enää $30\ \text{A}$. Lähdön varrella jakelumuuntamoiden suojamaadoitus on yhdistetty alajännitepuolen käyttömaadoituksen kanssa maadoitusresistanssin ollessa $10\ \Omega$. Suojauksen on toimittava selektiivisesti sekä StM:n vaatimusten mukaisesti mainituissa kytkentätilanteissa. Herkkyyksivaatimuksena on havaita maasulut $3000\ \Omega$ vikaresistanssiin asti. Tämä tarkoittaa, että maasulusta $3000\ \Omega$ vikaresistanssiin asti on saatava selektiivinen hälytys (johtosuojat) sekä yleishälytys (nollajännitesuoja).

Yhteenvedo tarkastelun tuloksista on esitetty kuvan 8.4a selektiivisyys- ja asettelukaaviossa.

Ratkaisu

Suunnatun suojan asettelut

Turvallisuusmääräysten mukaisesti (StM §10) muuntamalla, jossa maadoitukset on yhdistetty, on maadoitusjännitteen suurin sallittu jatkuvan tilan arvo $100\ \text{V}$. Mikäli tämä ylittyy, on maasulku kytkettävä pois vähintään ajassa:

$$t = \left(\frac{500\ \text{V}}{R_m I_e} \right)^2 \quad [\text{s}] \quad (26)$$

$$R_m = \text{maadoitusresistanssi} \quad [\Omega]$$

$$I_e = \text{maasulkuvirta} \quad [\text{A}]$$

Suojauksen on siis toimittava laukaisevana vähintään ajassa t , mikäli maasulkuvirta ylittää arvon $100\ \text{V} / 10\ \Omega = 10\ \text{A}$. Pienemmillä maasulkuvirroilla suojaus voi toimia hälyttävänä.

Täytetään toimintanopeusvaatimus suunnatun suojan ylemmällä portaalla. Lausekkeen (26) mukaan verkon suurimmalla maasulkuvirralla maasulku on kytkettävä pois vähintään ajassa $(500\ \text{V} / (10\ \Omega * 60\ \text{A}))^2\ \text{s} = 0,7\ \text{s}$. Releen asettelussa on otettava huomioon vielä katkaisijan toimintaviive, joten asettele on oltava pienempi tai yhtäsuuri kuin $t - t_k$, jossa t_k on katkaisi-

jan toiminta-aika. Näin toimintaviiveeksi voidaan valita esim. 0,5 s, jolloin marginaalia jää vielä 0,1 s.

Virta-asettelujen kannalta on pahin tilanne, kun verkkotilanne on suppein. Tällöin maasulkuvirta on pienin mahdollinen, joten suojalta vaaditaan suurinta herkkyyttä. Määritetään asettelu siis tässä tilanteessa. Käyttämällä lauseketta (6) saadaan virta-asetteluksi $10 A * (30 - 10) A / 30 A = 6,7 A$. Laajimmassa verkkotilanteessa asettelu vastaa maasulkuvirtaa $60 A / (60 - 10) A * 6,7 A = 8,0 A$. Edelleen lausekkeen (4) avulla voidaan arvioida, että valittu virta-asettelu vastaa noin 1100 - 1500 Ω vikaresistanssia riippuen verkkotilanteesta.

Herkkyyksivaatimus toteutetaan suunnatun suojan alemmalla portaalla, jolta saadaan selektiivinen hälytys. Suppeimmassa verkkotilanteessa 3000 Ω vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee edelleen noin 3,8 A:iin, joka voidaan laskea lausekkeesta (4). StM:n mukaisesti tämä porras voi toimia hälyttävänä. Tällöin toimintaviiveeksi voidaan valita esim. 2 s, jotta ohimenevät viat eivät aiheuta turhia hälytyksiä. Virta-asetteluksi saadaan lauseketta (6) käyttäen $3,8 A * (30 - 10) A / 30 A = 2,5 A$. Laajimmassa verkkotilanteessa porras toimii $60 A / (60 - 10) A * 2,5 A = 3,0 A$ maasulkuvirralla.

Suunnatun suojan nollajännite-ehdon kannalta on pahin tilanne, kun verkko on laajin mahdollinen ja vikaresistanssi herkkyyksivaatimuksen mukainen 3000 Ω . Tällöin nollajännite on pienin. Suojan alemman portaalla virta-asettelu vastaa noin 3,0 A maasulkuvirtaa, joka edelleen vastaa noin 6 % nollajännitettä. Tämä nollajännite voidaan laskea lausekkeesta (9). Valitaan nollajännite-ehdoksi 5 %.

Suuntaamattoman suojan asettelut

Virta-asettelun tulisi olla suurempi kuin taustaverkon syöttämä suurin maasulkuvirta. Näin suojaus toimii ainoastaan kaksoismaasulussa maasulkuvirran oikosulkukomponentilla, jolloin saadaan myös selvä indikaatio vikatyypistä. Tämä on erityisen tärkeää, jotta kaksoismaasulussa ei esimerkiksi käynnistetä jälleenkytkentöjä. Koska kaksoismaasulussa maahan kulkeva virta voi olla huomattavasti yksivaiheisen maasulun vikavirtaa suurempi, tulisi toimintaviive valita mahdollisimman lyhyeksi. Valitaan tämän perusteella toimintaviiveeksi 0,05 s (minimiasettelu). Virta-asettelun on oltava riittävästi suurempi kuin taustaverkon syöttämä suurin maasulkuvirta eli 50 A, jolloin voidaan valita esim. 60 A.

Esimerkki 3

Määritetään esimerkin 2 asemalle nollajännitesuojan asetteluarvot. Suojaus on suunniteltu toteutettavaksi neljällä U_0 -portaalla, kuva 8.3c, joten kaksi kaksiportaista U_0 -yksikköä tarvitaan (merkitty U_{01} ja U_{02}). Portaiden tehtävänä on toimia kiskoston ja muuntajan alajännitepuolen suojana sekä lähtöjen varasuojana. Koska osa portaista toimii laukaisevana, on niiden ja lähtöjen suojien väliseen selektiivisyyteen kiinnitettävä huomiota.

Ratkaisu

1. portaalla ($U_0 > U_{01}$) asettelut

Herkkyyksivaatimuksena on saada yleishälytys 3000 Ω maasuluista. Toteutetaan tämä yleishälytystoiminto nollajännitesuojan alimmalla portaalla. Kuten edellä todettiin, on laajimmassa verkkotilanteessa 3000 Ω vikaresistanssia vastaava nollajännite vain noin 6 %, jonka perusteella asetteluiksi voidaan valita esim. 5 % ja 3 s. Suppeimmassa verkkotilanteessa tämä porras toimii vielä vikaresistanssin arvolla 7500 Ω , joten portaalla toiminta ei ole enää herkkyyden suhteen selektiivistä lähdön suojan alemman virtaportaalla kanssa, mutta koska porras toimii hälyttävänä, ei tästä ole haittaa.

2. portaan ($U_0 \gg U_{01}$) asettelut

Mikäli maasulkuvirta on suurempi kuin 10 A, on suojauksen toimittava laukaisevana. Varasuojauksen kannalta myös nollajänniteportaan tulisi täyttää tämä vaatimus niin hyvin kuin mahdollista, jotta sen toiminta lähtöjen varasuojana on riittävän herkkää ja nopeaa. Kun maasulkuvirta on 10 A, on vastaava nollajännite noin 17 % kaikkien lähtöjen ollessa kytkettynä. Suppeimmassa verkkotilanteessa maasulkuvirran suuruus on ainostaan 30 A. Tällöin 10 A maasulkuvirta vastaa jo 33 % nollajännitettä. Jotta portaan toiminta olisi herkkyyden suhteen selektiivinen lähdön suojan ylemmän (laukaisevan) virtaportaan kanssa, tulee tämän perusteella jänniteasetteluksi valita esim. 35 %. Herkkyyden kannalta 35 % asettelulla löydetään maasulut, joissa vikaresistanssi on korkeintaan noin 550 Ω laajimmassa verkkotilanteessa, joten suojan herkkyys aseman suojana ja myös lähtöjen varasuojana voidaan katsoa olevan riittävä. Näin myöskin kaksoismaasulkutilanteissa varasuojauksen toiminta on riittävän herkkää, vaikka vikaresistanssit vikapaikoissa olisivat yhtä suuretkin.

Toimintaviive on syytä valita riittävästi pitemmäksi kuin lähtöjen suojien pisin toiminta-aika, koska nollajännite ei heti häviä viallisen lähdön laukeamisen jälkeen, vaan sen vaimentuminen kestää jonkin aikaa. Käyttämällä 0,5 s porrasaikaa, saadaan portaan toimintaviiveeksi 1 s. Selektiivisyyskaaviosta nähdään, että varasuojauksen osalta StM:n mukainen toimintanopeusvaatimus ei aivan täyty suurimmilla maasulkuvirroilla. Tämän korjaamiseksi tulisi nopeuttaa sekä lähtö- että nollajännitesuojan toimintaa suurilla maasulkuvirroilla ottamalla käyttöön lisää portaita tai sitten pienentää maasulkuvirtaa kompensoinnilla, ks. esimerkit 4 ja 5.

Toimiessaan $U_0 \gg U_{01}$ -porras laukaisee osan aseman lähdöistä irti, mikäli lähtöjen suojat eivät jostain syystä ole toimineet.

3. portaan ($U_0 > U_{02}$) asettelut

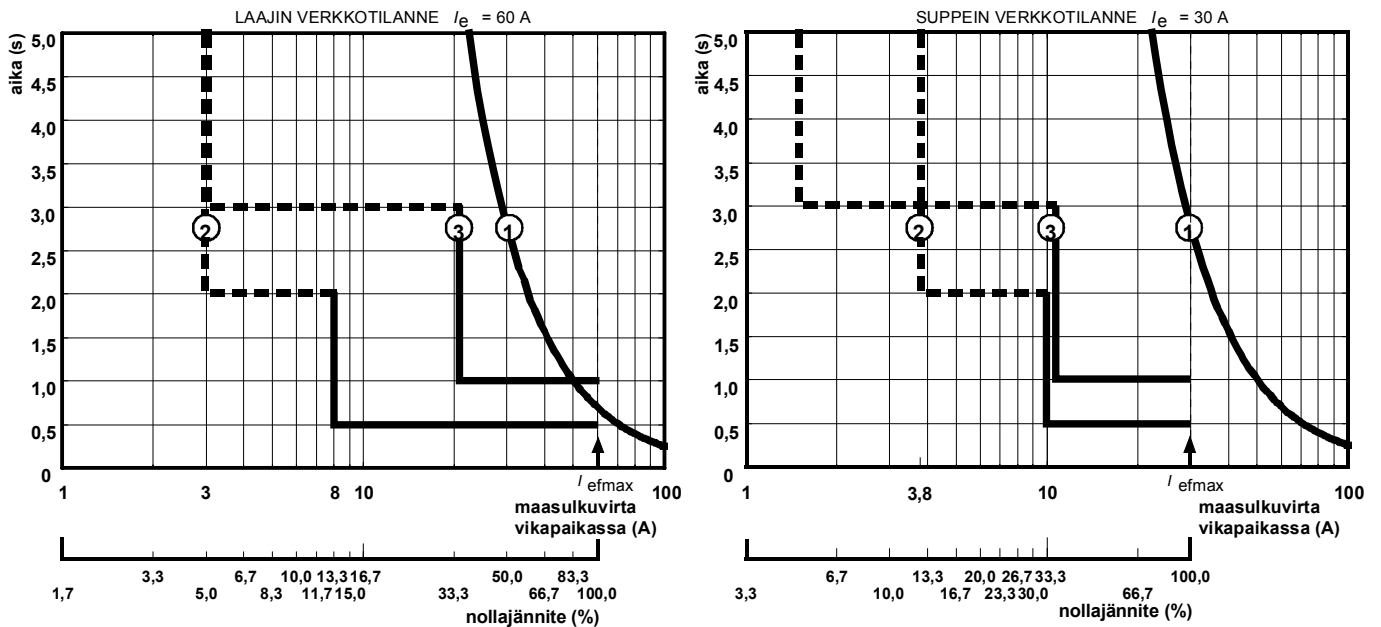
Toimiessaan tämä porras laukaisee loput aseman lähdöistä irti, mikäli vika ei ole poistunut 2. nollajänniteportaan toimittua. Asettelu tehdään edellä mainittujen kriteerien perusteella. Jänniteasetteluksi voidaan valita esim. 35 % ja toimintaviiveeksi em. porrasaikaa käyttäen 1,5 s.

4. portaan ($U_0 \gg U_{02}$) asettelut

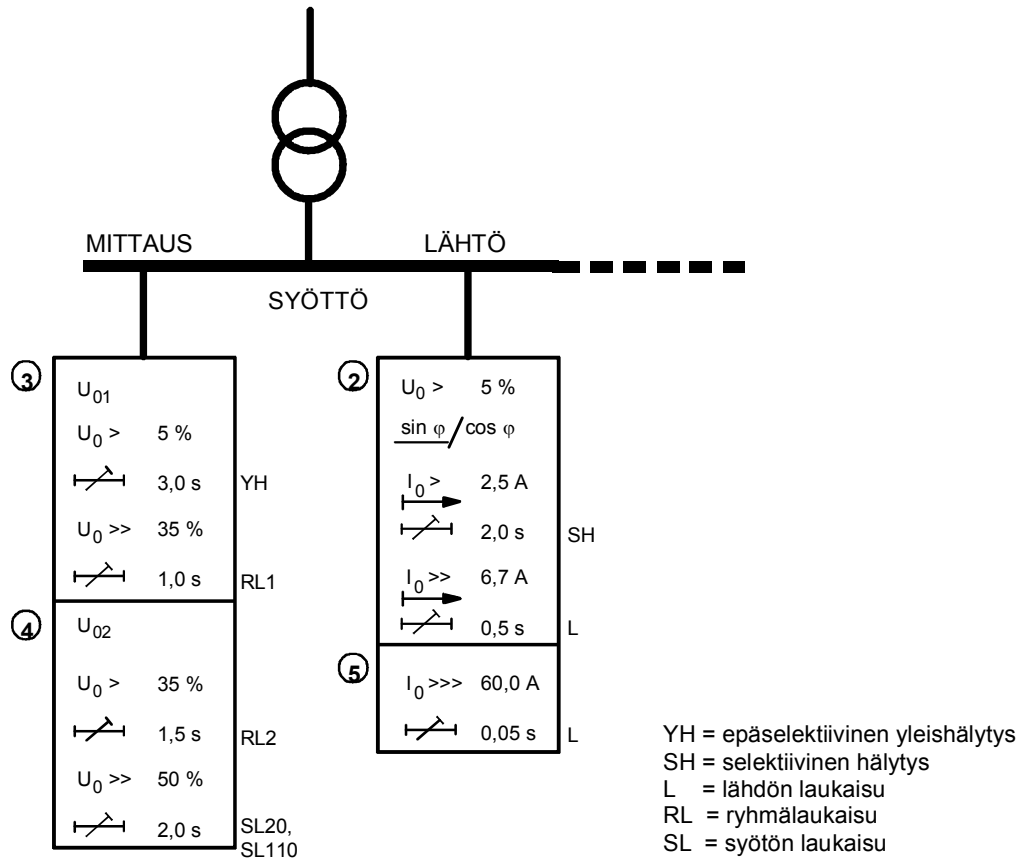
Mikäli vika ei ole poistunut 3. nollajänniteportaan toimittua, laukaisee 4. nollajänniteporras sekä 20 kV että 110 kV katkaisijat. Tällöin on ilmeistä, että vika on joko kiskostossa tai syöttöhaarassa. Koska tällöin galvaaninen verkko koostuu ainoastaan kiskostosta ja syöttöhaarasta, on nollajännitesuojan toiminta herkimmillään. Tällöin esim. 500 Ω maasulku asemalla aiheuttaa jo varsin suuren nollajännitteen. Tämän perusteella asetteluiksi voidaan valita esim. 50 % ja 2 s.

Selektiivisyys- ja asettelukaavio

Yhteenvedo esimerkkien 2 ja 3 suojauksen asettelusta on esitetty kuvan 8.4a selektiivisyys- ja asettelukaaviossa. Kaikki virta-arvot ovat ensiöpuolen arvoja. Jännitearvot on ilmoitettu prosentteina maksiminollajännitteestä eli vaihejännitteen nimellisarvosta.



① = Suojauksen StM:n mukainen toimintanopeusvaatimus



④ = Varasuojauksen toisessa vaiheessa toimivat nollajänniteportaat (ei esiinny selektiivisyyskaaviossa)

⑤ = Kaksoismaasulkutilanteessa toimiva suuntaamaton nollavirtaporras (ei esiinny selektiivisyyskaaviossa)

KUVA 8.4a. Esimerkkien 2 ja 3 suojauksen selektiivisyys- ja asettelukaavio.

Hälyttävät suojausportaat on merkitty katkoviivalla selektiivisyyskaavioon. Suurilla maasulkuvirroilla laajimmassa verkkotilanteessa varasuojauksen toimintanopeusvaatimus ei aivan täyty, joten suojauksen toiminnan nopeuttaminen lisäportaiden avulla olisi perusteltua.

Esimerkki 4

Esimerkin 2 aseman syöttämän verkon maasulkuvirta tulee kasvamaan 100 A:iin verkon laajentumisen ja kaapeloinnin takia. Suppeimmassa verkkotilanteessa maasulkuvirta on 70 A, kun osaa kuluttajia syötetään toiselta asemalta. Oletetaan lisäksi, että verkon vuotohäviöresistanssin itseisarvo on 20-kertainen verkon kapasitiiviseen reaktanssiin nähden. Suojaukselle asetetut vaatimukset ovat samat kuin edellä.

Ratkaisu

Selvästi nähdään, että suojauksen toimintanopeusvaatimus, lauseke (26), on vaikea täyttää, mikäli verkko pidetään edelleen maasta erotettuna. Ratkaisuna tähän on kompensointikuristin käyttö. Määritetään suojauksen asetteluarvot esimerkin 2 lähdölle, kun verkon tähtipisteeseen on liitetty kompensointikuristin.

Kompensointikuristin on varustettu automaattisella säädöllä, joka pitää kompensointiasteena 0,85, eli verkko on alikompensoitu riippumatta kytkentätilanteesta. Lisäksi kuristimessa on 10 A toisiovastus, jonka nollajänniterele kytkee kuristimen rinnalle vikatilanteessa 0,3 sekunnin viiveajan jälkeen. Vastus on lisäksi varustettu termisellä ylikuormitussuojalla.

Yhteenvedo tarkastelun tuloksista on esitetty kuvan 8.4c selektiivisyys- ja asettelukaaviossa.

Toisiovastuksen kytkeytyminen

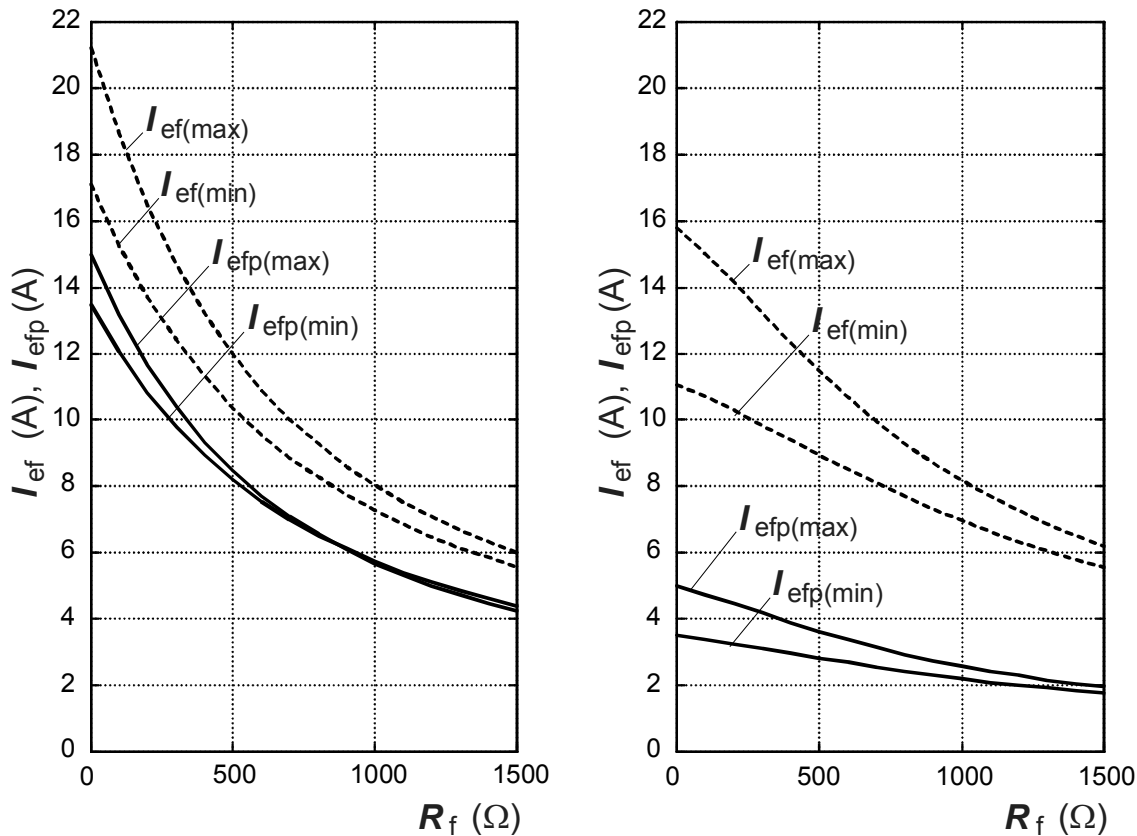
Kytkeytymisjännitettä määritettäessä on otettava huomioon, että verkon terveen tilan aikainen nollajännite saattaa verkon epäsymmetrisyyden vuoksi olla huomattavan korkea. Seuraavassa tarkastelussa oletetaan, että tämä jännite on aina pienempi kuin 5 %.

Nollajänniteportaan toiminta kytkee 10 A toisiovastuksen kuristimen rinnalle. Kytkeytymisjännite määritetään laajimmassa verkkotilanteessa, jossa nollajännite on pienin. Tässä tilanteessa 3000Ω vikaresistanssia vastaava nollajännite on noin 22 %, jota pienemmäksi asettelu tulee valita ja joka voidaan laskea yhtälöistä (13) ja (15). On lisäksi huomattava, että käytännössä verkon luonnollinen epäsymmetria voi jossain määrin laskea tai nostaa laskennallisesti saatuja nollajännitearvoja. Valitaan toisiovastuksen kytkeväksi jänniteasetteluksi esim. 20 %. Toisiovastuksen kytkeytyminen kasvattaa jonkin verran maasulkuvirtaa sekä pienentää nollajännitettä, mikä suojien asetteluja määritettäessä on otettava huomioon. Vastusta ohjaavassa nollajänniteportaassa on lisäksi 10 % hystereesi. Vastus kytkeytyy pois, kun nollajännite laskee alle 10 %:n tai mikäli vastuksen terminen tila ylittää laukaisurajan. Vastuksen jälleenkytkentä sallitaan, mikäli vastuksen terminen kapasiteetti ei ole vaarassa ylittyä.

Suunnatun suojan asettelut

Edellä mainitun mukaisesti suojauksen on toimittava laukaisevana, mikäli maasulkuvirta ylittää arvon $100 \text{ V} / 10 \Omega = 10 \text{ A}$. Pienemmillä maasulkuvirroilla suojaus voi toimia hälyttävänä.

Täytetään toimintanopeusvaatimus ylemmällä portaalla. Käytetään lausekkeitä (13) ja (17) maasulkuvirran ja sen sisältämän päätökomponentin laskemiseen. Kuvaan 8.4b on laskettu virta-arvot muutamalla vikaresistanssin arvolla sekä laajimmassa että suppeimmassa verkkotilanteessa.



KUVA 8.4b. Esimerkkiverkon maasulkuvirtojen suuruudet vikaresistanssin funktiona. Oikealla virta-arvot, kun toisiovastus on kytketty pois.

Kuvasta 8.4b nähdään, että maasulkuvirran ollessa 10 A on päätökomponentin suuruus 7-8 A riippuen verkkotilanteesta, kun toisiovastus on kytkettynä. Tämän perusteella voidaan virta-asetteluksi valita 7 A. Kuvasta 8.4b nähdään lisäksi, että valittu virta-asettelu vastaa noin 700 Ω vikaresistanssia.

Verkon suurimmaksi maasulkuvirraksi saadaan noin 21 A, kun toisiovastus on kytkettynä, kuva 8.4b. Lausekkeen (26) mukaan maasulku on tällöin kytkettävä pois vähintään ajassa $(500 \text{ V} / (10 \text{ } \Omega \cdot 21 \text{ A}))^2 \text{ s} = 5,7 \text{ s}$. Jotta verkkoa ei kuitenkaan kohtuuttomasti rasitettaisi suorissa maasulkutilanteissa, joiden aikainen nollajännite on suurin, valitaan toimintaviiveksi esim. 1 s. Tällöin suojauksen pisimmäksi toiminta-ajaksi tulee noin 1,5 s, kun otetaan huomioon myös toisiovastuksen kytkentäviive ja katkaisijan toiminta-aika. Näin valokaarimaasuluille jää runsaasti aikaa sammua itsestään aiheuttamatta reletointoja. Myöskin kaksoismaasulkujen ja oikosulkujen syntymisriski jää pieneksi.

Herkkyysvaatimus toteutetaan suunnatun suojan alemmalla portaalla, jolta saadaan selektiivinen hälytys. Suppeimmassa verkkotilanteessa 3000 Ω vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee edelleen noin 3,2 A:iin, lauseke (13), sekä laajimmassa verkkotilanteessa vastaavasti 3,4 A:iin, lauseke (13). StM:n mukaisesti tämä porras voi toimia hälyttävänä. Tällöin toimintaviiveeksi voidaan valita esim. 3 s, jotta ohimenevät viat eivät aiheuta turhia hälytyksiä. Päätökomponenteiksi saadaan lausekkeen (17) mukaisesti 2,6 A (suppein) ja 2,4 A (laajin). Valitaan virta-asetteluksi siis 2,4 A. Kuvasta 8.4b nähdään, että tällä asetellulla porras kykenee havahtumaan myös tilanteissa, joissa toisiovastus on kytketty pois, ellei vikaresistanssi ole liian suuri.

Suunnatun suojan nollajännite-ehdon kannalta on pahin tilanne, kun verkko on laajin mahdollinen ja vikaresistanssi herkkyyksivaatimuksen mukainen 3000 Ω . Tällöin nollajännite on pienin. Suojan alemman portaalla virta-asettelu vastaa noin 3,4 A maasulkuvirtaa, joka edelleen vastaa 16 %:n laskennallista nollajännitettä, kun toisiovastus on kytkettynä. Tämä voidaan laskea

lausekkeesta (15). Nollajännite-ehto tulee valita pienemmäksi kuin 16 %, ja kun vielä otetaan huomioon toisiovastuksen kytketymisjännite ja nollajännitteen pienentyminen vastuksen kytketymisen jälkeen, voidaan asetteluksi valita esim. 10 %.

Suuntaamattoman suojan asettelut

Virta-asettelua määritettäessä tulee laskea suurin releen mittaama nollavirta maasulussa, jota suuremmaksi virta-asettelu sitten valitaan. Kuten edellä todettiin, saadaan suojaus toimimaan ainoastaan kaksoismaasukutilanteissa, jolloin saadaan myös selvä indikaatio vikatyypistä. Tämä on erityisen tärkeää, jotta kaksoismaasulussa ei käynnistetä jälleenkytkentöjä. Koska kaksoismaasulussa maahan kulkeva virta voi olla huomattavastikin yksivaiheisen maasulun vikavirtaa suurempi, tulisi toimintaviive valita mahdollisimman lyhyeksi, joten valitaan 0,05 s (minimiasettelu). Virta-asettelun on oltava riittävästi suurempi kuin tarkasteltavan lähdön tuottama maasulkuvirta, kun vika on muualla verkossa (10 A), ja myöskin suurempi kuin releen mittaama suurin maasulkuvirta, kun vika on tarkasteltavassa lähdössä. Tämän perusteella asetteluksi voidaan valita esim. 30 A. On huomattava, että ko. asettelulla porras pystyy toimimaan myös yksivaiheisessa maasulussa, kun kompensointikuristin on kytketty pois.

Esimerkki 5

Määritetään esimerkin 4 asemalle nollajännitesuojan asetteluarvot. Suojaus on suunniteltu toteutettavaksi kahdella U_0 -portaalla. Portaiden tehtävänä on toimia kiskoston ja muuntajan alajännitepuolen suojana sekä lähtöjen varasuojana. Koska osa portaista toimii laukaisevana, on niiden ja lähtöjen suojien väliseen selektiivisyyteen kiinnitettävä huomiota.

Ratkaisu

Asettelujen määrittäminen tapahtuu samojen periaatteiden mukaisesti kuten maasta erotetussa verkossa (ks. esimerkki 3). Nollajännitteet lasketaan lausekkeesta (15).

1. portaan ($U_0 >$) asettelut

Herkkyysvaatimus: yleishälytys 3000Ω maasuluista.

Laskennallinen nollajännite, laajin verkkotilanne: 16 % (toisiovastus kytkettynä)

Laskennallinen nollajännite, suppein verkkotilanne: 19 % (toisiovastus kytkettynä)

Asettelu tulee valita pienemmäksi kuin 16 %, ja kun vielä otetaan huomioon toisiovastuksen kytketymisjännite ja nollajännitteen pienentyminen kytketymisen jälkeen, voidaan asetteluksi valita esim. 10 % ja 4,5 s.

Mikäli toisiovastus on kytketty irti, ovat vastaavat laskennalliset nollajännitteet 22 % (laajin) ja 30 % (suppein).

Toimiessaan $U_0 >$ -porras antaa siis epäselektiivisen yleishälytyksen.

2. portaan ($U_0 >>$) asettelut

Toimintanopeusvaatimus: ≥ 10 A vikapaikan maasulkuvirralla laukaiseva

Laskennallinen nollajännite, laajin verkkotilanne: 47 % (toisiovastus kytkettynä)

Laskennallinen nollajännite, suppein verkkotilanne: 58 % (toisiovastus kytkettynä)

Mikäli toisiovastus on kytketty irti, ovat vastaavat laskennalliset nollajännitteet 63 % (laajin) ja 90 % (suppein).

Jotta portaan toiminta olisi selektiivistä lähdön suojan ylemmän (laukaisevan) portaan kanssa, pitäisi jänniteasetteluksi valita siis noin 60 %. Lisäksi portaan laukaisu tulee sallia ainoastaan silloin, kun toisiovastus on kytkettynä tai kun kuristin on kytketty pois. Herkkyyden kannalta 60 % asettelulla löydetään maasulut, joissa vikaresistanssi on korkeintaan noin 400Ω laajimassa verkkotilanteessa. Valitsemalla asetteluksi esim. 55 % ja 2,5 s havahtuu suoja vielä

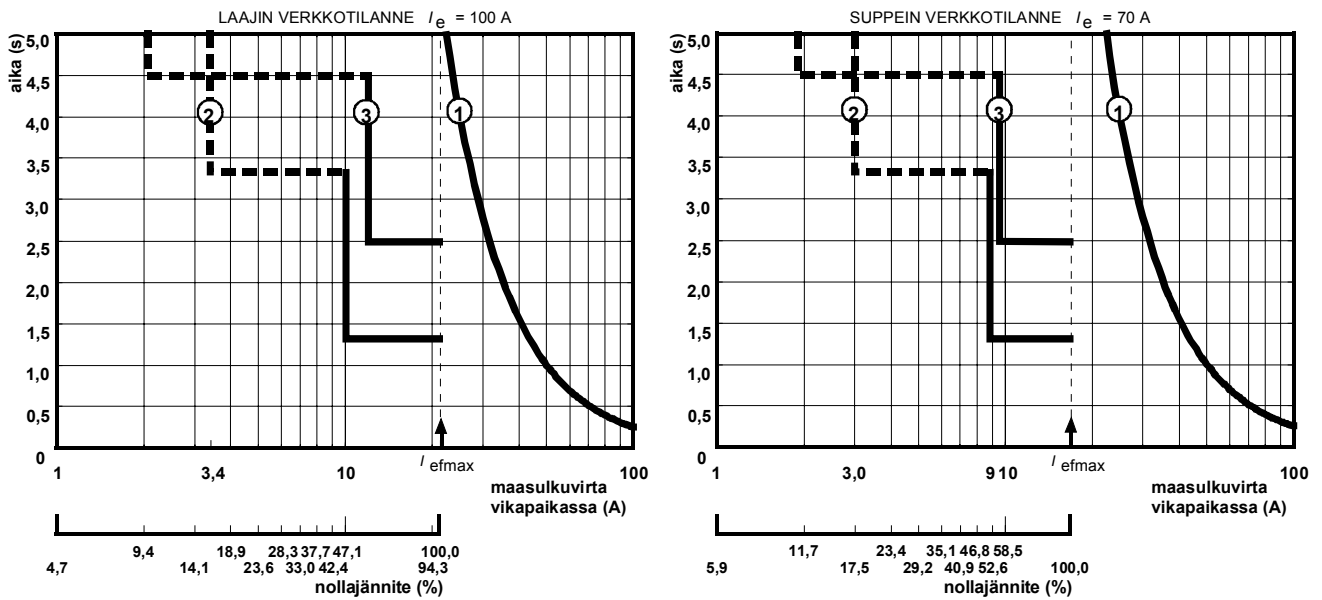
500 Ω maasuluissa, joten suojan herkkyyden aseman suojana ja myös lähtöjen varasuojana voidaan katsoa olevan riittävä.

Kaksoismaasulkutilanteissa varasuojauksen herkkyys on selvästi riittämätön, mikäli vikaresistanssit ovat yhtäsuuret. Nollajännitteeseen perustuvan varasuojan tarpeellisuutta kaksoismaasuluissa vähentää lähtökohtaisen kaksoismaasulkusuojan käyttö, jonka ansiosta suojaus saadaan jo varsin hyvin varmistettua, koska suojauksen toimimattomuus edellyttäisi jo kummankin vikaantuneen lähdön suojauksen toimimattomuutta. Mikäli jostain syystä vain toisen vikaantuneen lähdön suoja toimii, palautuu vika yksivaiheiseksi maasuluksi. Tämän jälkeen varasuojaus toimii mikäli vikaresistanssi ei ole liian suuri.

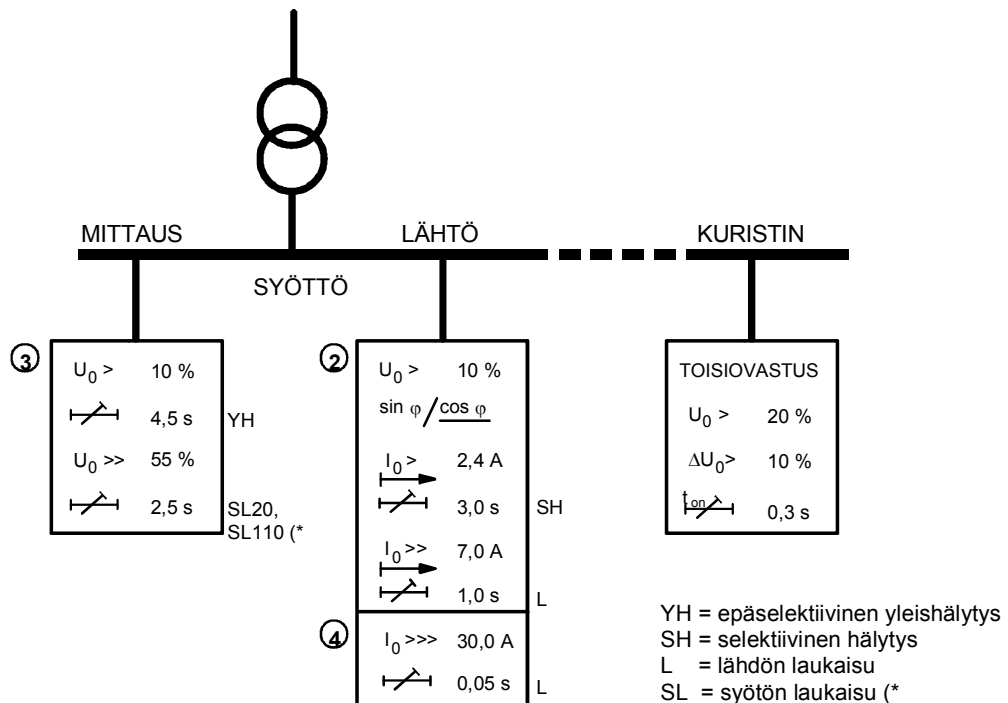
Toimiessaan porras laukaisee 20 kV ja 110 kV syöttöjen katkaisijat. Porrasajaksi nollajännitesuojan ja lähtöjen suojien välille valittiin vähintään sekunti, koska kompensoidussa verkossa nollajännite vaimentuu vian poistumisen jälkeen suhteellisen hitaasti. Näin varmistetaan suojien selektiivinen toiminta.

Selektiivisyys- ja asettelukaavio

Yhteenveto esimerkkien 4 ja 5 suojauksen asettelusta on esitetty kuvan 8.4c selektiivisyys- ja asettelukaaviossa. Lähdön suojan toiminta-aikoihin on laskettu mukaan myöskin lisävarustuksen kytkentäviive. Kaikki virta-arvot ovat ensiöpuolen arvoja. Jännitearvot on ilmoitettu prosenteina maksiminollajännitteestä eli vaihejännitteen nimellisarvosta.



① = Suojauksen StM:n mukainen toimintanopeusvaatimus



④ = Kaksoismaasulkutilanteessa toimiva suuntaamaton nollavirtaporras (ei esiinny selektiivisyyskaaviossa)

*) Syötön laukaisu sallittu toisiovastuksen ollessa kytkettynä tai kuristimen ollessa poiskytkettynä

KUVA 8.4c. Esimerkkien 4 ja 5 suojauksen selektiivisyys- ja asettelukaavio. Hälyttävät suojausportaat on merkitty katkoviivalla selektiivisyyskaavioon.