

Oikosulkuvirran aiheuttamat vaikutukset kiskostossa

Niko-Matias Ojalehto

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

OJALEHTO, NIKO-MATIAS:
Oikosulkuvirtojen vaikutukset kiskostossa

Opinnäytetyö 64 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Toukokuu 2019

Tämä opinnäytetyö voidaan jakaa kahteen asiakokonaisuuteen. Nämä asiakokonaisuudet ovat oikosulkuvirta ja oikosulkuvirran aiheuttamat vaikutukset kiskostossa.

Sähköverkon oikosulkuvirtojen luonnetta tutkittiin muutosilmionä, jolloin itse oikosulkuvirta voi olla epäsymmetrinen. Myös symmetrinen sähköverkko voi muuttua epäsymmetriseksi yksi- tai kaksivaiheisen oikosulun seurauksena, joten tämän vuoksi epäsymmetrisiä vikoja tutkittiin symmetrisiä komponentteja hyödyntäen.

Oikosulkuvirtojen aiheuttamia vaikutuksia kiskostoon tutkittiin standardin IEC 60865-1 mukaisesti. Aluksi siis lasketaan oikosulkuvirran aiheuttamat voimavaikutukset ja lopuksi tutkitaan, kestävätkö kiskorakenteet nämä voimavaikutukset.

Työn lopussa tutkittiin, kuinka eri sähkökeskusstandardit määrittävät oikosulukestoisuuden ja miten se voidaan todentaa eli tyyppikoestaa. Tärkeimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että keskeinen teoria oikosulkuvirran vaikutuksista kiskostossa on saatu selvitettyä standardin IEC 60865-1 mukaisesti.

Asiasanat: oikosulkuvirta, kiskosto, mekaaninen voima, terminen vaikutus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

OJALEHTO, NIKO-MATIAS
Effects of short circuit currents in rigid busbars

Bachelor's thesis 64 pages, appendices 3 pages
May 2019

This thesis is divided into two issues. These issues are short circuit current and effects of short circuit currents on busbars.

Short circuit currents of electric network were researched as a transient perspective, when short circuit current can be unsymmetrical. Symmetrical electric network can also transmit into unsymmetrical because of single phase or phase to phase faults. Unsymmetrical faults were studied by using symmetrical components.

Effects of short circuit currents on busbars were studied according standard IEC 60865-1. Mechanical effects of short circuit currents are calculated, and busbar structures withstanding these effects are also calculated.

The result of this thesis was a document of how different switchgear standard defines short circuit withstand and how it can be type tested. The most important result is that the essential theory of the effects of short circuit currents on busbars has been examined in accordance with IEC 60865-1.

Key words: short circuit current, busbar, mechanical force, thermal effect

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖVERKON VIKATAPAUKSET	7
2.1	Oikosulku	7
2.1.1	Sysäysoikosulkuvirta	12
2.1.2	Alkuoikosulkuvirta	12
2.1.3	Muutostilanoikosulkuvirta	13
2.1.4	Pysyvän tilan oikosulkuvirta	14
2.1.5	Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta	14
2.2	Epäsymmetrinen oikosulku	16
2.2.1	Symmetriset komponentit	16
2.2.2	Vikojen tarkastelu symmetrisillä komponenteilla	20
3	OIKOSULKUVIRRRAN LASKENTA	25
3.1	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta	26
3.2	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta	26
3.3	Yksivaiheinen oikosulkuvirta	27
4	OIKOSULKUVIRTOJEN VAIKUTUKSET	28
4.1	Mekaaniset voimavaikutukset	28
4.1.1	Mekaanisten voimien laskenta jäykässä kiskostossa	29
4.1.2	Jäykän kiskon ominaistaajuus	32
4.1.3	Mekaanisten voimien vaikutus jäykässä kiskostossa	34
4.2	Termiset vaikutukset	42
4.2.1	Kiskojen lämpenemän laskenta	44
5	OIKOSULKUKESTOISUUS	45
5.1	UTU sähkökeskusten kiskostoja	45
5.2	Oikosulkukestoisuuden vaatimukset	48
5.2.1	Pienjännitekeskukset	48
5.2.2	Keskijännitekojeistot	49
5.2.3	Puistomuuntamot	52
5.3	Oikosulkukestoisuuden määrittäminen	54
5.3.1	Pienjännitekeskukset	54
5.3.2	Keskijännitekojeistot	57
5.3.3	Puistomuuntamot	59
6	POHDINTA	60
	LÄHTEET	61
	LIITTEET	62
	Liite 1. Minimi- ja maksimioikosulkuvirrat keskuksen kiskostossa	62

LYHENTEET JA TERMIT

\underline{a}	Vaiheenkääntö operaattori
a_m	Tehollinen etäisyys vaihekiskojen välillä
a_s	Kahden osakiskon välinen tehollinen etäisyys
c	Jännitekerroin
f	Taajuus
F_m	Kiskoon kohdistuva maksimivoima
l	Tukipisteiden välinen etäisyys
I_k	Oikosulkuvirta
I_{th}	Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
\underline{U}_0	Nollajärjestelmän symmetrinen jännitekomponentti
\underline{U}_1	Myötäjärjestelmän symmetrinen jännitekomponentti
\underline{U}_2	Vastajärjestelmän symmetrinen jännitekomponentti
$R_{p0,2}$	Myötöraja
σ	Kiskoon kohdistuva rasitus
ω	Kulmataajuus

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tutkia sähköverkon oikosulkuvirtoja teoreettisesti, sekä käsitellä oikosulkuvirtojen standardinmukaista laskentaa. Oikosulkuvirtojen teoriaa tarkastellaan muutosilmiönä, jolloin itse oikosulkuvirta on aika-akselin suhteen epäsymmetrinen. Tämän lisäksi tarkastellaan verkkoa, joka itsessään voi olla yksi- tai kaksivaiheisen oikosulun johdosta epäsymmetrinen. Tätä epäsymmetristä verkkoa mallinnetaan symmetrisiä komponentteja käyttäen.

Toisena tärkeänä asiakokonaisuutena käsitellään oikosulkuvirtojen aiheuttamia voimia, sekä niiden vaikutuksia jäykässä kiskostossa. Kiskoston mekaanisilla vaikutuksilla tarkoitetaan virtakiskoon sekä tukieristimiin kohdistuvilla rasituksia. Oikosulun vaikutuksia tarkastellaan myöskin termisen kestoisuuden kannalta, eli kiskomateriaali ei saa myöskään lämmetä oikosulun vaikutuksesta yli sallitun lämpenemän, joka kuitenkin on hetkellisesti oikosulkutilanteessa normaalia kuormitustilannetta suurempi. Tämän lisäksi tutkitaan kiskoston ominaistuuksia, jotta voidaan välttää kiskoston mahdollinen resonanssitilanne kuormitusvirralla.

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii UTU Oy, joka on sähköalan kehittyvä perheyhtiö. UTU toimittaa sähkötuotteita rakentamisen, sähköenergian siirron ja teollisuuden tarpeisiin. Näitä tuotteita ovat muun muassa vakio- ja erikoiskeskukset, keskijännitekojeistot, sekä puistomuuntamot.

2 SÄHKÖVERKON VIKATAPAUKSET

Sähköverkossa esiintyy ei toivottuja vikoja, jotka aiheuttavat mekaanisia ja termisiä rasituksia kiskostossa. Näitä vikoja ovat kolmi-, kaksi- ja yksivaiheiset oikosulut. Vikojen vaikutusten ajalliseen keston ja sitä kautta myöskin kiskostoon kohdistuvien rasitusten vaikutusaika on riippuvainen sähköverkon vikojen poiskytkentäajoista. Poiskytkentäaikaan kuuluu suojausfunktion havahtumis- ja laukaisuajat, sekä myöskin itse katkaisijan toiminta-aika. Poiskytkentäajoilla on vaikutusta lähinnä kiskoston termiseen oikosulkukestoisuuteen.

2.1 Oikosulku

Oikosulku on suljettu virtapiiri, joka voi muodostua eristysvian tai ulkoisen kosketuksen vaikutuksesta. Virtapiiri voi sulkeutua joko suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi muodostua joko kolmen vaihejohtimen välille, jolloin kyseessä on kolmivaiheinen oikosulku tai kahden vaihejohtimen välille, jolloin taas kyseessä on kaksivaiheinen oikosulku. Eristysvika voi syntyä myös vaihejohtimen ja maan potentiaalivälille. Tällöin maasulun vikavirran suuruus riippuu muun muassa vikapaikan vikaresistanssin R_f lisäksi siitä, onko verkon tähtipiste maadoitettu. (Lakervi & Partanen 2008, 28)

Verkon eristys voi perustua kiinteään eristeeseen, ilmaväliin tai näiden yhdistelmään. Oikosulkuun johtava eristyksen heikkeneminen voi edetä hitaasti, jos esimerkiksi kiinteän tukieristimen pinta likaantuu. Eristimen pinnalla oleva lika ja ilmankosteus voivat yhdessä johtaa vuotovirtoja, jotka voivat lopulta saada aikaan oikosulun eristeen pinnan yli. Tämän lisäksi verkon eristystaso voidaan menettää myös äkillisesti. Tällainen tilanne on usein ilmaeristeisillä rakenteilla. Tästä hyvinä esimerkkeinä ovat avojohdoille kaatuvat puut ja pylväsmuuntamoiden päälle laskeutuneet eläimet. Tällöin vika voi alkaa joko maasulkuna, joka johtaa lopulta vaiheiden väliseksi oikosuluksi tai suoraan eri vaiheiden kytkeytymisenä yhteen. (Salminen 2009, 3)

Oikosulku voi syntyä verkossa myös ylijännitteen seurauksena. Ylijännitteet jaetaan neljään eri kategoriaan niiden muodostamien muotojen perusteella.

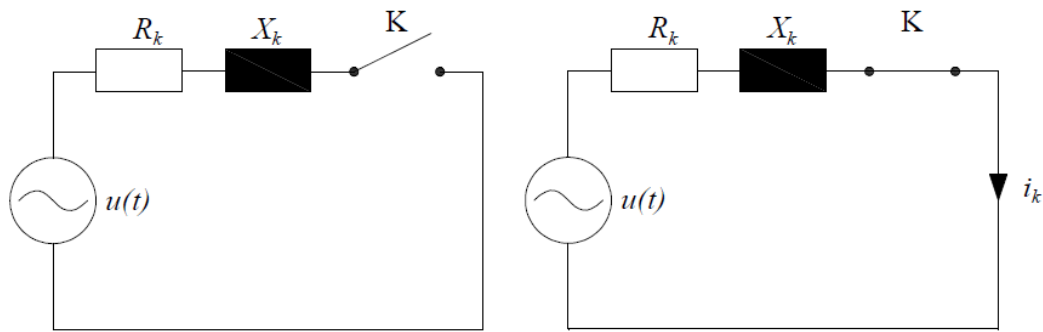
- pienitaajuiset ylijännitteet
- loivat transienttiylijännitteet
- jyrkät transienttiylijännitteet
- erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

Verkossa tavallisimmin esiintyviä ylijännitteitä ovat jyrkät transienttiylijännitteet ja niitä aiheuttavat joko suorat- tai epäsuorat salamaniskut. Ylijännite voi syntyä salamaniskusta kolmella tavalla, joko indusoitumalla, takaiskun kautta salaman osuessa johtimen lähellä olevaan maadoitettuun osaan tai suoralla iskulla johtimeen. Näin syntyneet ylijännitteet etenevät verkossa syöksyaaltona ylittäen verkon eristeiden jännitelujuuksia ja muodostaen lopulta joko yli- tai läpilyönnin. Pienitaajuisia ylijännitteitä muodostavat useimmiten yksivaiheiset maasulut. Maasulun syntyessä terveiden vaiheiden vaihejännitteet voivat nousta pääjännitteen suuruiseksi ja rikkoa piirin jännitelujuuden. (Salminen 2009, 3-4)

Myös virheelliset kytkennät voivat muodostaa oikosulkuja. Ne ovat useimmiten seurauksena huolimattomuudesta tai ajattelemattomuuden vuoksi tehdystä kytkentötoimenpiteestä. Esimerkiksi silloin, jos jännitteet kytketään keskukseen, joka on vielä työmaadoitettu. (Salminen 2009, 4)

Sähköverkon viat saavat aikaan normaalista poikkeavia jännitteitä U ja virtoja I , mitkä yhdessä määräävät usein komponenttien ja koko järjestelmän mitoituksen. Vika syntyy verkossa muutosilmiönä, joka vaimenee oikosulkupiirin aikavakion τ mukaisesti. Muutostilan jälkeen verkossa on staattinen tila. (Elovaara & Haarla 2011a, 168)

Oikosulkuvirran syntymistä ja muutosilmiötä voidaan tarkastella kuvan 1 mukaisella yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jossa kytkimen K sulkeminen vastaa oikosulkuja.



KUVA 1. Vasemmalla on kuormittamattoman kolmivaiheverkon sijaiskytkentä ja oikealla puolella on oikosuljetun verkon sijaiskytkentä. (Salminen)

Kyseistä piiriä syöttää vakiotaajuudella f sinimuotoisesti vaihteleva lähdejännite $u(t)$, jonka kuormana ovat resistanssi R_k ja reaktanssi X_k . Syöttöjännite voidaan esittää yhtälön 1 mukaisesti

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

ja piirille voidaan johtaa differentiaaliyhtälö yhtälön 2 mukaisesti

$$R_k I_k + L_k \frac{dI_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

jossa R_k on oikosulkuresistanssi, I_k on oikosulkuvirta, L_k on oikosulkupiirin induktanssi, \hat{u} on sinimuotoisen jännitteen huippuarvo, ω on kulmataajuus, t on aika oikosulun alkuhetkestä ja α on jännitteen vaihekulma oikosulun alkuhetkellä. (Salminen 2009, 12)

Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista oikosulkuvirta yhtälön 3 mukaisesti

$$I_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left(\sin(\omega t + \alpha + \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right), \quad (3)$$

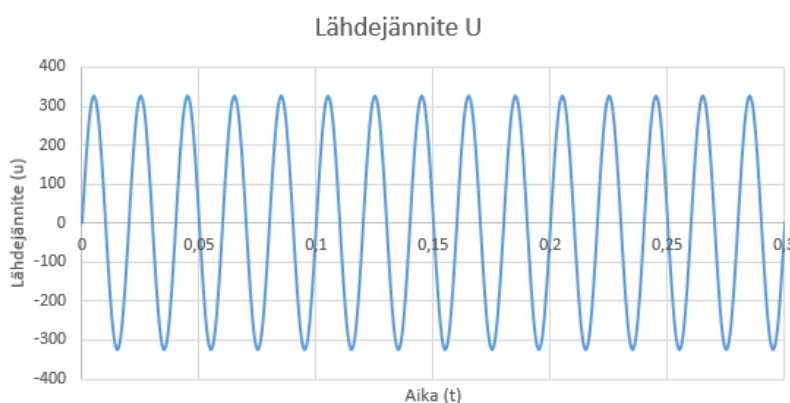
jossa Z_k on oikosulkupiirin impedanssi, φ_k on oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma, yhtälön ensimmäinen termi on oikosulkuvirran jatkuvan tilan vaihtovirtakomponentti ja jälkimmäinen termi on oikosulkuvirran tasavirtakomponentti, joka

vaimenee oman aikavakionsa τ mukaisesti. Tasavirtakomponentti pakottaa oikosulkuvirran hetkellisarvon amplitudin vastaamaan ennen oikosulkuja vallinneen kuormitusvirran amplitudia. (Salminen 2009, 12)

Tasavirtakomponentin suuruuteen vaikuttaa vahvasti oikosulkuvirran syntyhetki. Jos oikosulku syntyy hetkellä, joka täyttää ehdot $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° , ei tasavirtakomponenttia esiinny lainkaan. Kyseessä on siis täysin symmetrinen oikosulkuvirta. Kolmivaihejärjestelmässä kuitenkin vain yhdessä vaiheessa kerrallaan voi oikosulkuvirta olla symmetrinen johtuen vaihejännitteiden keskinäisestä 120° vaihesiirrosta. (Salminen 2009, 13)

Oikosulun sattuessa jollain muulla ajan hetkellä, on oikosulkuvirta epäsymmetrinen esiintyvän tasavirtakomponentin vaikutuksesta. Tasavirtakomponentilla on suurin mahdollinen alkuarvo silloin, kun ehto $\alpha - \varphi_k = \pm 90^\circ$ täyttyy ja tällöin oikosulkuvirta on myöskin mahdollisimman epäsymmetrinen ja saavuttaa suurimman arvonsa. (Salminen 2009, 13)

Kuvassa 2 on esitetty edellä olevaa sijaiskytkentää syöttävä lähdejännite u ajan funktiona.



KUVA 2. Oikosulkupiirin sijaiskytkentää syöttävä lähdejännite ajan funktiona

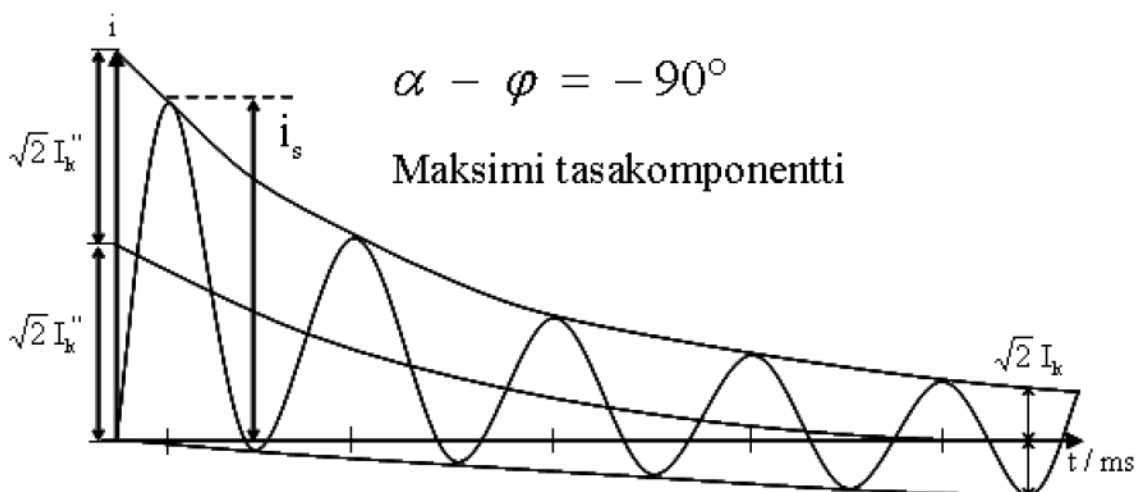
Kuvassa 3 esitetty oikosulku on syntynyt ajanhetkellä, jolloin tasavirtakomponentin alkuarvo on mahdollisimman suuri.



KUVA 3. Oikosulkupiirin virta ajan funktiona

Reaalimaailman vaihtovirtaverkoissa myöskin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti muuttuu ajan funktiona. Tämä muutos näkyy erityisesti lähellä voimalaitoksia tapahtuvissa oikosuluissa. Vaihtovirtakomponentin amplitudista voidaan erottaa alkuoikosulkuvirta I_k'' ja muutosoikosulkuvirta I_k' . Nämä muutokset vaimenevat omien aikavakioittensa T'' ja T' mukaisesti. Alku- ja muutosoikosulkuvirtojen, sekä tasavirtakomponentin vaimenemisten jälkeen oikosulkuvirralla jää jatkuvan tilan arvo, eli pysyvä arvo. (Elovaara & Haarla 2011a, 171)

Kuvassa 4 on esitetty epäsymmetrisen oikosulkuvirran vaiheet oikosulkuvirran syntyhetkestä eteenpäin ajan funktiona.



KUVA 4. Oikosulkuvirran vaiheet ajan funktiona. (Salminen)

2.1.1 Sysäysoikosulkuvirta

Sysäysoikosulkuvirta i_s on suurin mahdollinen oikosulkuvirran huippuarvo, joka esiintyy noin yhden puolijakson kuluttua vian alkamisesta. Huippuarvo voidaan laskea yhtälön 4 mukaisesti

$$i_s = k \times \sqrt{2} \times I_k'' , \quad (4)$$

jossa k on kerroin, johon vaikuttaa tarkasteltavan verkon resistanssi R ja reaktanssi X . Kertoimen teoreettinen maksimi on 2, joka saavutetaan silloin, kun verkon reaktanssi lähenee kohti ääretöntä. Tämä on esitetty matemaattisesti yhtälössä 5

$$k \approx 1,02 + 0,98 \times e^{-\frac{R}{3X}} , \quad (5)$$

jossa R on oikosulkupiirin resistanssi ja X on oikosulkupiirin reaktanssi. (Elovaara & Haarla 2011a, 174)

Laitteiden ja asennusten tulee mekaanisesti kestää sysäysoikosulkuvirran aiheuttamat rasitukset. Toisin sanoen näiden dynaamisen kesto­virran I_{dyn} on oltava yhtä suuri tai suurempi kuin suurin mahdollinen sysäysoikosulkuvirta i_s . (Hirvonen 2010, 11)

2.1.2 Alkuoikosulkuvirta

Oikosulkuvirran muutosilmiöt johtuvat verkon pyörivistä koneista. Pyörivien koneiden, erityisesti tahtikoneiden, käämityksiin indusoituu virtoja, jotka hidastavat käämivoiden muuttumista suljetuissa roottorikämmityksissä. Alkuoikosulkuvirta I_k'' johtuu siitä, että tahtikoneen alkureaktanssi X_d'' on oikosulun alkuhetkellä pieni. Tämä suurenee kuitenkin kohti tahtireaktanssia X_d , joten alkuoikosulkuvirta kulkee oikosulkupiirissä vain oikosulun alkuvaiheessa. Fysikaalinen selitys reaktanssimuutokseen on se, että alkutilassa vian vaikutuksesta äkillisesti muuttuvan

staattorivirran indusoimat ylimääräiset magneettivuokomponentit eivät pääsekään Lenzin lain mukaisesti tunkeutumaan roottorissa oleviin magnetoimis- ja vaimennuskäämeihin, vaan ne sulkeutuvatkin osaksi myös ilmaa. Ilmassa kulkeva magneettivuo taas kohtaa pienen permeanssin, eli magneettisen johtavuuden Λ yhtälön 6 mukaisesti

$$\Lambda = \frac{\mu \times A}{l}, \quad (6)$$

jossa Λ on permeanssi, μ on tyhjiön permeabiliteetti, A on magneettiipiirin poikkipinta-ala ja l magneettiipiirin pituus. (Elovaara & Haarla 2011a, 171-172)

Alkuoikosulkuvirta ilmoittaa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvon oikosulun alkuhetkellä ja tätä virta-arvoa käytetään muiden oikosulkusuureiden määrittämiseen. Tämän lisäksi alkuoikosulkuvirta antaa hyvän kuvan verkon toiminnasta oikosulussa ja eri tekijöiden vaikutuksista. (Salminen 2009, 19)

2.1.3 Muutostilanoikosulkuvirta

Oikosulun syntyhetken jälkeistä vaihtovirran tehollisarvoa kutsutaan muutostilan oikosulkuvirraksi I_k' . Muutostilan oikosulkuvirta vaimenee voimakkaasti jatkuvan tilan arvoon, mikäli virta on epäsymmetrinen. Nopean vaimenemisen vuoksi muutostilan oikosulkuvirralla ei voida antaa yksiselitteistä arvoa ja siksi sitä ei juuri käytetä verkon mitoituksessa. On kuitenkin hyvä huomata, että sähköverkon suojaus toimii useasti muutostilan oikosulkuvirran aikana ja tällöin tätä virtaa kutsutaan katkaisuhetken virraksi muutostilan oikosulkuvirran asemasta. Vian tapahtuessa kaukana tahtikoneista ovat alku-, muutos- ja jatkuvan tilan oikosulkuvirrat amplitudiltaan yhtä suuret. (Salminen 2009, 22)

Muutostilan oikosulun aikana tahtigeneraattorin vaimennuskäämeihin indusoituneet virrat ovat jo ehtineet vaimentua pois, mutta magnetoimiskäämeissä vaikuttaa edelleen magnetoimisvirran muutoskomponentti. Tästä johtuu, että magneettivuon kulkutiellä on jo enemmän rautaa, jonka permeanssi on ilmaa suurempi ja

täten reaktanssi on jo alkanut kasvaa. Tätä reaktanssia kutsutaan muutostilan reaktanssiksi X_d' . (Elovaara & Haarla 2011a, 172)

2.1.4 Pysyvän tilan oikosulkuvirta

Kaikkien muutosilmiöiden vaimentumisten jälkeen saavutetaan pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k . Tämän määrittäminen ei kuitenkaan ole niin yksiselitteistä, joten sen laskennallinen arvo jääkin näin ollen usein epätarkaksi. Toisin sanoen laskennan vuoksi onkin tehtävä tiettyjä oletuksia verkon tilasta. Pysyvän tilan oikosulkuvirtaan vaikuttavat tahtikoneiden magnetoimistapa ja -säätö, tehomuuntajien ja generaattoreiden automaattiset jännitteensäädöt, sekä verkon kytkentätilojen muutokset oikosulun aikana. (Salminen 2009, 22-23)

Pysyvän tilan oikosulkuvirran aikana tahtigeneraattorin magnetoimisvirran muutoskomponentit ovat vaimentuneet pois ja staattorin ja roottorin välinen magneettivuon kulkutie, sekä koneen reaktanssi ovat palautuneet takaisin normaaleiksi. Tätä reaktanssia kutsutaan tahtireaktanssiksi X_d . (Elovaara & Haarla 2011a, 172)

2.1.5 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta

Oikosulkuvirran tehollisarvolla, jolla on sama kesto aika ja terminen vaikutus kuin todellisella oikosulkuvirralla, jolla voi olla ajan funktiona vaimeneva tasa- ja vaihtokomponentti, kutsutaan ekvivalenttiseksi termiseksi oikosulkuvirraksi I_{th} . Kyseinen oikosulkuvirta voidaan esittää yhtälön 7 mukaisesti

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k, \quad (7)$$

jossa i on oikosulkuvirran hetkellisarvo, I_{th} on ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta, T_k on oikosulkuvirran kesto aika, m on oikosulkuvirran tasakomponentin ja n on vaihtokomponentin lämpövaikutuksen huomioiva kerroin. Tästä voidaan ratkaista kaava muotoon, joka on esitetty yhtälössä 8

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (8)$$

Mikäli oikosulku tapahtuu kaukana generaattorista ja vian kestoaika ylittää 0,5 s, laskelmissa voidaan olettaa, että $m + n = 1$, jolloin $I_{th} = I_k''$. (Hirvonen 2010, 11)

Laitteet ja asennukset kestävät oikosulkuvirran termiset vaikutukset silloin, kun niiden nimellinen terminen oikosulkuvirtakestoisuus on yhtä suuri tai suurempi kuin laskettu ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta. Tämä voidaan ilmaista myös epäyhtälön 9 mukaisesti

$$I_{thr} \geq I_{th} \sqrt{\frac{T_k}{T_{kr}}}, \quad (9)$$

jossa I_{thr} on laitteen tai asennuksen nimellinen terminen oikosulkukestoisuus ja T_{kr} on tätä vastaava nimellinen kestoaika. Nimellinen kestoaika on 1,0 s IEC-standardeissa. (Hirvonen 2010, 12)

Standardissa IEC 62271-1 nimellisen sysäysoikosulkuvirran ja nimellisen terminen oikosulkuvirran suhde on 2,5 kun verkon taajuus on 50 Hz. Tämän määrittämyksen taustalla on oletus, että tasavirtakomponentin aikavakio on 45 ms. (IEC 62271-1, 40)

Toisaalta pienjännitekeskuksia koskevassa standardissa SFS 61439-1 esitetään, että oikosulkuvirran muodostaman sähködynaamisen rasituksen määrittämiseksi huippuvirran arvo saadaan kertomalla oikosulkuvirran tehollisarvo kertoimella n . Kertoimen n ja vastaavan tehokertoimen arvot ovat esitetty taulukossa 1. (SFS 61439-1, 94)

TAULUKKO 1. Oikosulkuvirran tehollisarvon ja huippuarvon väliset kertoimet.
(SFS 61439-1)

Oikosulkuvirran tehollisarvo kA	$\cos \phi$	n
$I \leq 5$	0,7	1,5
$5 < I \leq 10$	0,5	1,7
$10 < I \leq 20$	0,3	2
$20 < I \leq 50$	0,25	2,1
$50 < I$	0,2	2,2

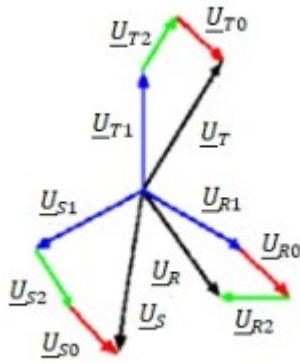
^a Taulukon arvot pätevät useimpiin sovelluksiin. Erityisissä paikoissa, esim. muuntajan tai generaattorin läheisyydessä, voi tehokerroin saada pienempiä arvoja, jolloin prospektiivisen virran huippuarvo voi tulla rajoittavaksi arvoksi oikosulkuvirran tehollisarvon sijasta.

2.2 Epäsymmetrinen oikosulku

Tyypillisimmät epäsymmetriset viat ovat 1-vaiheinen oikosulku, eli maasulku ja kaksivaiheinen oikosulku. Tällaisten vikojen aikana eri vaiheiden jännitteet ja virrat eivät ole keskenään symmetrisiä. Tämän vuoksi verkosta ei voida käyttää tavallista yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan jokaista vaihetta on tarkasteltava erikseen. Tämä lisää ratkaistavien jännite- ja virtayhtälöiden lukumäärää kolminkertaiseksi. Epäsymmetrisien tilanteiden käsittely tulee kuitenkin helpommaksi, jos vaihesuureita ei valita ratkaistaviksi muuttujiksi, vaan ne lasketaankin symmetrisillä komponenteilla. (Elovaara & Haarla 2011a, 177)

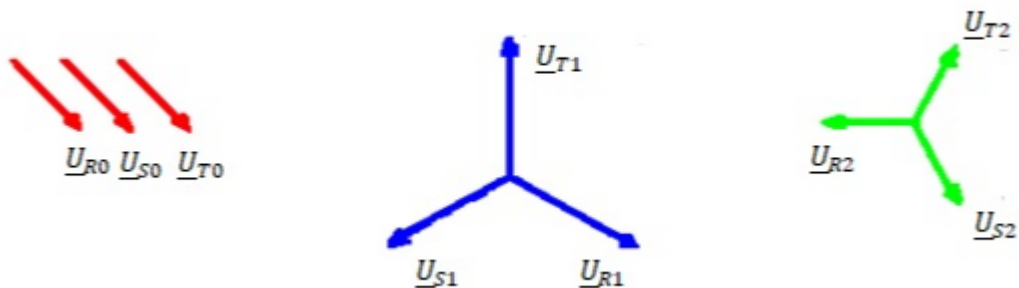
2.2.1 Symmetriset komponentit

Epäsymmetrinen kolmivaihejännite voidaan ilmaista kolmella symmetrisellä kolmivaihekomponentilla, joiden ilmoittamiseen riittää vain yksi osoitin kustakin järjestelmästä. Kuvassa 5 on esitetty epäsymmetrinen kolmivaihejännite, jossa epäsymmetriset jännitteet ovat \underline{U}_R , \underline{U}_S ja \underline{U}_T . (Elovaara & Haarla 2011a, 177-178)



KUVA 5. Epäsymmetrinen kolmivaihejännite (Korpinen, muokattu)

Symmetristen komponenttien osoittimet ovat samanlaisia pyöriviä osoittimia kuin vaihesuureidenkin osoittimet. Eli nämä osoittimet pyörivät samaan suuntaan vaihesuureiden osoittimien kanssa. Kuvassa 6 on esitetty epäsymmetristä kolmivaihejännitettä vastaavat symmetriset komponentit. (Elovaara & Haarla 2011a, 177-178)



KUVA 6. Epäsymmetriset komponentit (Korpinen, muokattu)

Epäsymmetriset komponentit koostuvat nollajärjestelmästä, myötäjärjestelmästä ja vastajärjestelmästä. Myötäjärjestelmä on normaali kolmivaihejärjestelmä, jossa vaihejärjestys on R-S-T, joka voidaan myös tutummin ilmaista L1-L2-L3. Merkitsemällä 120° vaiheenkääntöoperaatiota symbolilla $\underline{a} = 1 \angle 120^\circ$ ja pidettäessä vaiheen L1 jännitettä perusosoittimena, eli referenssiosoittimena, saadaan myötäjärjestelmän eri vaiheiden jännitteiksi yhtälön 10 mukaisesti

$$\begin{aligned}\underline{U}_{R1} &= \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{S1} &= \underline{a}^2 \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{T1} &= \underline{a} \underline{U}_1,\end{aligned}\tag{10}$$

jossa $\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ja $\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$. Normaali symmetriaehdon täyttävä kolmivaihejärjestelmä sisältää siis vain myötäjärjestelmän. (Elovaara & Haarla 2011a, 178)

Vastajärjestelmä on myöskin symmetrinen kolmivaihejärjestelmä, jonka osoittimet pyörivät samaan suuntaan myötäjärjestelmän kanssa, mutta nyt vaihejärjestys on käänteinen, eli R-T-S, joka voidaan myös ilmaista L1-L3-L2. Vastajärjestelmän jännitteet voidaan esittää yhtälön 11 mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011a, 178-179)

$$\begin{aligned}\underline{U}_{R2} &= \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{S2} &= \underline{a}^2 \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{T2} &= \underline{a} \underline{U}_2\end{aligned}\tag{11}$$

Nollajärjestelmässä eri vaiheiden samaa ominaisuutta kuvaavat vaihekohtaiset osoittimet ovat samansuuntaiset ja amplitudiltaan yhtä suuret. Nollajärjestelmän osoittimet pyörivät kulmataajuuden mukaisesti samaan suuntaan kuin myötäjärjestelmän osoittimet. Nollajärjestelmä voidaan esittää yhtälön 12 mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011a, 179)

$$\underline{U}_{R0} = \underline{U}_{S0} = \underline{U}_{T0} = \underline{U}_0\tag{12}$$

Epäsymmetriset jännitteet saadaan laskemalla yhteen kaikki kolme osajärjestelmän asianomaista vaiheen komponenttia. Nämä laskut ovat esitetty yhtälössä 13

$$\begin{aligned}\underline{U}_R &= \underline{U}_{R0} + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2} \\ \underline{U}_S &= \underline{U}_{S0} + \underline{U}_{S1} + \underline{U}_{S2} \\ \underline{U}_T &= \underline{U}_{T0} + \underline{U}_{T1} + \underline{U}_{T2},\end{aligned}\tag{13}$$

jossa \underline{U}_R on vaiheen L1 epäsymmetrinen jännite, \underline{U}_S on vaiheen L2 epäsymmetrinen jännite \underline{U}_T on vaiheen L3 epäsymmetrinen jännite. (Elovaara & Haarla 2011a, 179)

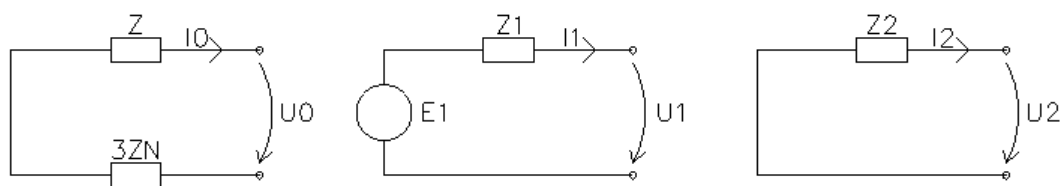
Edellä mainittujen yhtälöiden ja yhtälöryhmien sisältö voidaan esittää lyhyemmin matriisiyhtälönä, jossa tarvitaan vain R-vaiheen jännitteen symmetrisiä komponentteja \underline{U}_{R0} , \underline{U}_{R1} ja \underline{U}_{R2} . Yhtälössä 14 on esitetty kyseinen matriisiyhtälö. (Elovaara & Haarla 2011a, 179)

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{R0} \\ \underline{U}_{R1} \\ \underline{U}_{R2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Tiettyjen epäsymmetristen jännitteiden \underline{U}_R , \underline{U}_S ja \underline{U}_T vastaavat symmetriset komponentit \underline{U}_0 , \underline{U}_1 ja \underline{U}_2 voidaan kääntäen ratkaista matriisiyhtälön 15 mukaisesti. Virtojen komponenteille on yhtä lailla voimassa vastaavat yhtälöt. (Elovaara & Haarla 2011a, 179)

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{R0} \\ \underline{U}_{R1} \\ \underline{U}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} \quad (15)$$

Jokaisen järjestelmän generoima virtakomponentti kohtaa verkon omat impedanssinsa. Myötäkomponentti kohtaa myötäimpedanssit, vastakomponentti kohtaa vastaimpedanssit ja nollakomponentti nollaimpedanssit. Verkon topologiasta ja komponenteista riippuen impedanssit voivat olla osittain samoja ja osittain erilaisia. Nämä verkot ovat esitetty kuvassa 7. (Elovaara & Haarla 2011a, 180)



KUVA 7. Symmetristen komponenttien sijaiskytkennät (Voipio)

Sijaiskytkentöjen jännite- virtakomponenttien väliset yhteydet voidaan kirjoittaa, jos tunnetaan johdon impedanssit komponenteille \underline{Z}_0 , \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , sekä nollajohtimen impedanssi \underline{Z}_N . Symmetrinen jännitelähde edustaa myötäkomponenttia, eli $\underline{E}_1 = \underline{E}$. Sen sijaan vastakomponentille ja nollakomponentille ei ole omia jännitelähteitä. Toisin sanoin $\underline{E}_2 = 0$ ja $\underline{E}_0 = 0$. Nämä asiat huomioiden voidaan kirjoittaa yhtälöt 16-18.

$$\underline{U}_0 = -(\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_N)\underline{I}_0 \quad (16)$$

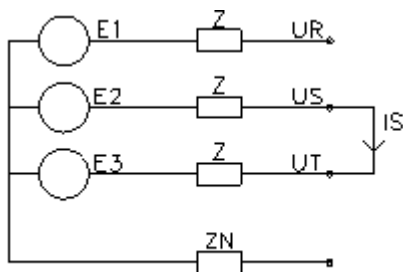
$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 - \underline{Z}_1\underline{I}_1 \quad (17)$$

$$\underline{U}_2 = -\underline{Z}_2\underline{I}_2, \quad (18)$$

jossa \underline{U}_0 on nollajärjestelmän symmetrinen komponentti, \underline{Z}_0 on nollajärjestelmän impedanssi, \underline{Z}_N on nollajohdon impedanssi, \underline{I}_0 on nollajärjestelmän virtakomponentti, \underline{U}_1 on myötäjärjestelmän symmetrinen komponentti, \underline{E}_1 on symmetriaehdon toteuttava jännitelähde, \underline{Z}_1 on myötäjärjestelmän impedanssi, \underline{I}_1 on myötäjärjestelmän virtakomponentti, \underline{U}_2 on vastajärjestelmän symmetrinen komponentti, \underline{Z}_2 on vastajärjestelmän impedanssi ja \underline{I}_2 on vastajärjestelmän virtakomponentti. (Voipio 2002, 284-285)

2.2.2 Vikojen tarkastelu symmetrisillä komponenteilla

Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vikatilanne. Vikatilanne on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Kaksivaiheinen oikosulku (Voipio)

Tässä järjestelmää syöttävät jännitteet ovat symmetriset, mutta vaiheet R ja S ovat joutuneet keskenään oikosulkuun. Tällöin vikakohtan tilanne voidaan hahmottaa yhtälöillä 19-21

$$\underline{U}_S = \underline{U}_T, \quad (19)$$

jossa \underline{U}_S on vaiheen L2 vaihejännite ja \underline{U}_T on vaiheen L3 vaihejännite,

$$\underline{I}_S = -\underline{I}_T, \quad (20)$$

jossa \underline{I}_S on vaiheen L2 vaihevirta ja \underline{I}_T on vaiheen L3 vaihevirta ja

$$\underline{I}_R = 0, \quad (21)$$

jossa \underline{I}_R on vaiheen L1 vaihevirta. (Voipio 2002, 286-287)

Nämä yhtälöt voidaan esittää yhtälöiden 10 ja 11 mukaisesti, jolloin saadaan muodostettua yhtälöt 19-21

$$\underline{U}_0 + \underline{a}^2 \underline{U}_1 + \underline{a} \underline{U}_2 = \underline{U}_0 + \underline{a} \underline{U}_1 + \underline{a}^2 \underline{U}_2 \quad (19)$$

$$\underline{I}_0 + \underline{a}^2 \underline{I}_1 + \underline{a} \underline{I}_2 = -\underline{I}_0 - \underline{a} \underline{I}_1 - \underline{a}^2 \underline{I}_2 \quad (20)$$

$$\underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 0 \quad (21)$$

Ensimmäisestä yhtälöstä supistuu pois \underline{U}_0 ja se voidaan saattaa muotoon

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2. \quad (19)$$

Toinen yhtälö voidaan taas saattaa muotoon

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2. \quad (20)$$

Kolmannesta yhtälöstä saadaan muodostettua

$$\underline{I}_0 = 0. \quad (21)$$

Kun saadut ratkaisut sijoitetaan yhtälöihin 16-18 ja niistä saadut lausekkeet sijoitetaan edelleen vikakohtaan jänniteyhtälöön 19 ja ratkaistaan se myötäjärjestelmän virran \underline{I}_1 suhteen, niin saadaan yhtälö 22

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (22)$$

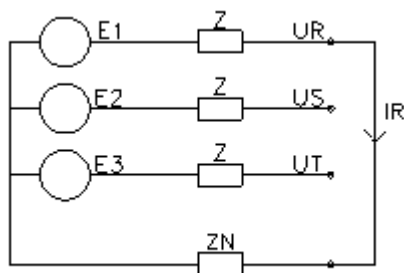
josta voidaan ratkaista myötäjärjestelmän virtakomponentti \underline{I}_1 . (Voipio 2002, 286-287)

Kaksivaiheisen oikosulun vikavirta \underline{I}_f voidaan laskea matriisiyhtälön 13 perusteella, kun vain se mielletään virtakomponenttien yhtälöksi ja todetaan kuvan 8 perusteella, että $\underline{I}_f = \underline{I}_S$. Näin ollen kaksivaiheisen oikosulun vikavirta voidaan laskea yhtälön 23 perusteella

$$\underline{I}_f = -j \frac{\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (23)$$

jossa \underline{I}_f on vikavirta, \underline{E} on piirin vaihejännite, \underline{Z}_1 on piirin myötäimpedanssi ja \underline{Z}_2 on piirin vastaimpedanssi. (Voipio 2002, 287)

Yksivaiheinen oikosulku on myöskin epäsymmetrinen vikatilanne. Tämä vikatilanne on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Yksivaiheinen oikosulku (Voipio)

Tässä järjestelmää syöttävät jännitteet ovat myöskin symmetriset, mutta vaihe R on joutunut oikosulkuun nollajohtimen kautta. Tämän vuoksi vikapaikan jännite on epäsymmetrinen ja sitä kautta myöskin virta on epäsymmetrinen. Vikakohtan tilanne voidaan hahmottaa yhtälöillä 24-26

$$\underline{U}_R = 0, \quad (24)$$

jossa \underline{U}_R on vaiheen L1 vaihejännite,

$$\underline{I}_S = 0, \quad (25)$$

jossa \underline{I}_S on vaiheen L2 vaihevirta ja

$$\underline{I}_T = 0, \quad (26)$$

jossa \underline{I}_T on vaiheen L3 vaihevirta. (Voipio 2002, 284-285)

Nämä yhtälöt voidaan esittää yhtälöiden 10 ja 11 mukaisesti, jolloin saadaan muodostettua yhtälöt 27-29

$$\underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = 0 \quad (27)$$

$$\underline{I}_0 + \underline{a}^2 \underline{I}_1 + \underline{a} \underline{I}_2 = 0 \quad (28)$$

$$\underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 0 \quad (29)$$

Kun virtayhtälöiden saadut ratkaisut sijoitetaan yhtälöihin 16-18 ja niistä saadut lausekkeet sijoitetaan edelleen vikakohtan jänniteyhtälöön 27 ja ratkaistaan se nollajärjestelmän virran \underline{I}_0 suhteen, niin saadaan yhtälö 30

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_N + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (30)$$

josta voidaan ratkaista nollajärjestelmän virtakomponentti \underline{I}_0 . (Voipio 2002, 285)

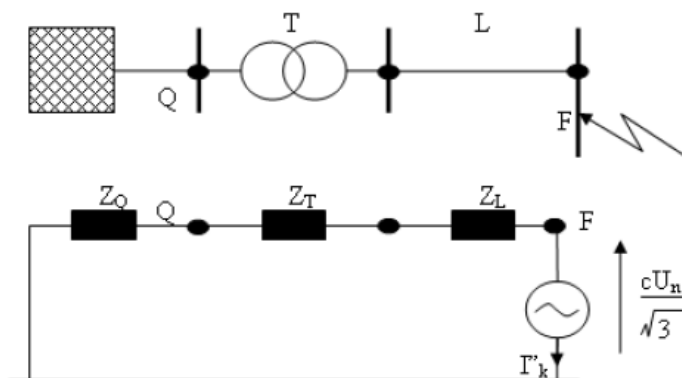
Yksivaiheinen oikosulun vikavirta \underline{I}_f voidaan laskea matriisiyhtälön 14 perusteella, kun vain se mielletään virtakomponenttien yhtälöksi ja todetaan kuvan 9 perusteella, että $\underline{I}_f = \underline{I}_R$. Näin ollen yksivaiheisen oikosulun vikavirta voidaan laskea yhtälön 31 perusteella

$$\underline{I}_f = \frac{3\underline{E}_1}{\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_N + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (31)$$

jossa \underline{I}_f on vikavirta, \underline{E} on piirin vaihejännite, \underline{Z}_0 on piirin nollaimpedanssi, \underline{Z}_N on nollajohdon impedanssi, \underline{Z}_1 on piirin myötäimpedanssi ja \underline{Z}_2 on piirin vastaimpedanssi. (Voipio 2002, 285)

3 OIKOSULKUVIRRRAN LASKENTA

Oikosulkuvirtojen laskenta voidaan suorittaa Theveninin menetelmän perusteella. Tällöin oikosulkua syöttävän verkon kaikki sähkömotoriset voimat voidaan korvata yhdellä ainoalla sähkömotorisella lähteellä, eli Theveninin lähteellä, joka sijoitetaan vikapaikkaan. Lähteen kanssa kytketään sarjaan Theveninin impedanssi Z_T , joka koostuu oikosulkupiirin resistanssien ja reaktanssien summasta. Näiden summa voidaan laskea esimerkiksi kompleksitasossa, jolloin resistanssia R kuvataan kompleksitason reaaliosana $\{Re\}$ ja reaktanssia X imaginaariosana $\{Im\}$. Näin ollen voidaan laskea vikapaikan vikavirta siten, että laskennasta saadaan myöskin selville vikavirtojen vaihekulmat. Kuvassa 10 on esitetty Theveninin menetelmän peruseriaate oikosulkulaskennassa. (Salminen 2009, 33)



KUVA 10. Theveninin menetelmän peruseriaate oikosulkulaskennassa. Tilanteessa oikosulkupiiriä syöttää jäykkä verkko pisteeseen Q ja vika ilmenee pisteessä F. Sijaiskytkennässä Z_Q , Z_T ja Z_L ovat verkon komponenttien oikosulkuimpedanssit. (Salminen)

Laskettaessa minimi- ja maksimioikosulkuvirtoja, tulee jännitekerrointa c muuttaa sen mukaisesti. Tällä otetaan siis huomioon verkon aikaansaamista muutoksista johtuvia eroja nimellisjännitteen ja verkon sähkömotorisen voimien välillä. Standardin IEC 60909 mukaiset arvot ovat esitetty taulukossa 2. (Salminen 2009, 34)

TAULUKKO 2. Jännitekerroin c standardin IEC 60909 mukaan. (Salminen 2009)

Nimellisjännite U_n	Jännitekerroin c	
	maksimi oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{max}	minimi oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite 100V-1000V		
a) 230V/400V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1kV-35kV	1,10	1,00
Suurjännite 35kV-230kV	1,10	1,00

Esimerkiksi laskettaessa keskijännitteen maksimioikosulkuvirtaa, niin tulee kertoimen c numeerisena arvona käyttää 1,1 ja vastaavasti keskijännitteen minimioikosulkuvirtaa laskettaessa tulee käyttää kerrointa 1.

3.1 Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vikatilanne, jonka vikavirta voidaan laskea yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Tässä sijaiskytkennässä verkko on mallinnettu myötäimpedansseilla. Komponentin myötäimpedanssi on siis tavallinen impedanssi, joka saadaan yleensä selville laitevalmistajan laitekilvestä. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöstä 32

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1}, \quad (32)$$

jossa I''_{k3} on kolmivaiheisen oikosulkuvirran tehollisarvo, c on jännitekerroin, U_n on järjestelmän pääjännite, R_1 on oikosulkuimpedanssin resistiivinen osuus, X_1 on oikosulkuimpedanssin reaktiivinen osuus ja Z_1 on oikosulkuimpedanssi, eli järjestelmän myötäimpedanssi. (Salminen 2009, 35)

3.2 Kaksivaiheinen oikosulkuvirta

Kaksivaiheista oikosulkuvirtaa laskettaessa tulee laskennassa ottaa huomioon myöskin verkon vastaimpedanssi. Kyseessä on siis samanlainen laskenta kuin

kolmivaiheisessa oikosulussa, mutta nyt huomioidaan verkon vasta- ja myötäimpedanssit. Jos vikapaikkaan ei liity pyöriviä koneita, laskennassa voidaan käyttää verkon myötäimpedanssia kaksinkertaisena. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöstä 33

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_1 + Z_2|} = \frac{cU_n}{2|Z_1|}, \quad (33)$$

jossa I''_{k2} on kaksivaiheisen oikosulkuvirran tehollisarvo ja Z_2 on verkon vastaimpedanssi. (Salminen 2009, 37)

3.3 Yksivaiheinen oikosulkuvirta

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea, kun tiedetään verkon myötä-, vasta- ja nollaimpedanssit. Tämän laskenta voidaan esittää yhtälössä 34

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad (34)$$

jossa I''_{k1} on yksivaiheisen oikosulkuvirran tehollisarvo ja Z_0 on verkon nollaimpedanssi. (Salminen 2009, 38)

Liitteessä 1 on esitetty esimerkkilaskema minimi- ja maksimioikosulkuvirroista keskuksen kiskostossa. Esimerkkitilanteessa keskusta syöttää 800 kVA:n jakelumuuntaja. Muuntajan ja keskuksen välinen kaapelointi on oletettu toteutettavan 2 X AXMK 4x300 S kaapelilla. Maksimioikosulkuvirrat ovat laskettu 20 °C lämpötilassa ja minimioikosulkuvirrat ovat laskettu 70 °C lämpötilassa ottaen huomioon resistiivisyyden lämpötilariippuvuus.

4 OIKOSULKUVIRTOJEN VAIKUTUKSET

Oikosulkuvoimilla tarkoitetaan mekaanisia voimia, jotka aiheutuvat oikosulkuvirroista. Nämä voimat kohdistuvat virtaa kuljettaviin osiin, kuten kiskostoihin ja niiden tukirakenteisiin, kuten tukieristimiin. Nämä mekaaniset oikosulkuvoimat, oikosulkuvirran aiheuttamat termiset lämpenemiset ja valokaaren voimat määräävät rakenteen oikosulkulujuuden. (Elovaara & Haarla 2011b, 86)

Suurjännitestandardin SFS 6001 mukaan oikosulun mekaaniset vaikutukset voidaan laskea standardin IEC-60865-1 mukaisilla menetelmillä. (SFS 6001, 32)

4.1 Mekaaniset voimavaikutukset

Oikosulkuvirran mekaaniset voimavaikutukset pohjautuvat Amperen lakiin ja Lorentzin voimaan. Tämä voima kohdistuu kohtisuoraan johtimia vastaan. Kahden yhdensuuntaisen johtimen hetkellisarvojen i_1 ja i_2 ollessa erisuuntaisia, voimat pyrkivät työntämään johtimia kauemmas toisistaan ja jos virrat ovat samansuuntaiset, syntyy johtimien välille vetovoima. (Elovaara & Haarla 2011)

Yhdensuuntaisiin johtimiin pituusyksikköä kohti kohdistuva voima voidaan laskea yhtälöstä 35

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a}, \quad (35)$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, i_1 ja i_2 ovat johtimien virtojen hetkellisarvot, l on tukieristimien keskilinjojen välinen etäisyys ja a on johtimien keskilinjojen välinen etäisyys. (IEC 60865-1, 12)

4.1.1 Mekaanisten voimien laskenta jäykässä kiskostossa

Kiskoston tuennasta riippuen sama oikosulkuvirta voi aiheuttaa erilaisia vaikutuksia eri kiskostoissa. Esimerkiksi lähellä kiskoston ominaistaajuutta värähtelevät voimat voivat vahvistaa kiskostoon kohdistuvia rasituksia ja voimia. (IEC 60865-1, 13)

Jäykkien kiskojen oikosulkuvoimia laskettaessa oletetaan, että kiskojen välinen etäisyys pysyy muuttumattomana koko oikosulun ajan. Tästä oletuksesta seuraa, että mekaanisia vaikutuksia koskevat yhtälöt ovat lineaarisia ja kokonaisvaikutuksia laskettaessa voidaan käyttää niin sanottua superpositiomenetelmää, eli osavaikutukset voidaan summata yhteen. Fysikaaliseksi malliksi laskennassa voidaan käyttää taivutettua palkkia. (Hirvonen 2010, 18)

Tiedettäessä kolmivaiheisen oikosulun huippuarvo, eli niin sanottu sysäys-oikosulkuvirran amplitudi, voidaan samassa tasossa oleville kiskoille laskea maksimivoima F_{m3} , joka kohdistuu keskimmäiseen kiskoon. Voima voidaan laskea yhtälöstä 36

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m}, \quad (36)$$

jossa i_p on kolmivaiheisen oikosulkuvirran huippuarvo, l on tukieristimien maksimi keskilinjaetäisyys ja a_m on pääjohtimien niin sanottu tehollinen etäisyys. (IEC 60865-1, 13)

Samaan tapaan voidaan laskea kaksivaiheisen oikosulun aiheuttama maksimivoima F_{m2} . Tämä laskenta on esitetty yhtälössä 37

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m}, \quad (37)$$

jossa i_{p2} on kaksivaiheisen oikosulkuvirran huippuarvo. Lisäksi on hyvä huomata, että edellä esitettyjä yhtälöitä 36 ja 37 voidaan käyttää silloin, kun vaihevirratt kulkavat kokonaisuudessaan yksiä virtateitä pitkin. (IEC 60865-1, 13)

Oikosulkuvirtapiirin myötä- ja vastaimpedanssien ollessa yhtä suuret, voidaan kaksi- ja kolmivaiheinen oikosulkuvirran välinen suhde esittää yhtälöllä 38

$$\frac{i_{p3}}{i_{p2}} = \frac{2}{\sqrt{3}}, \quad (38)$$

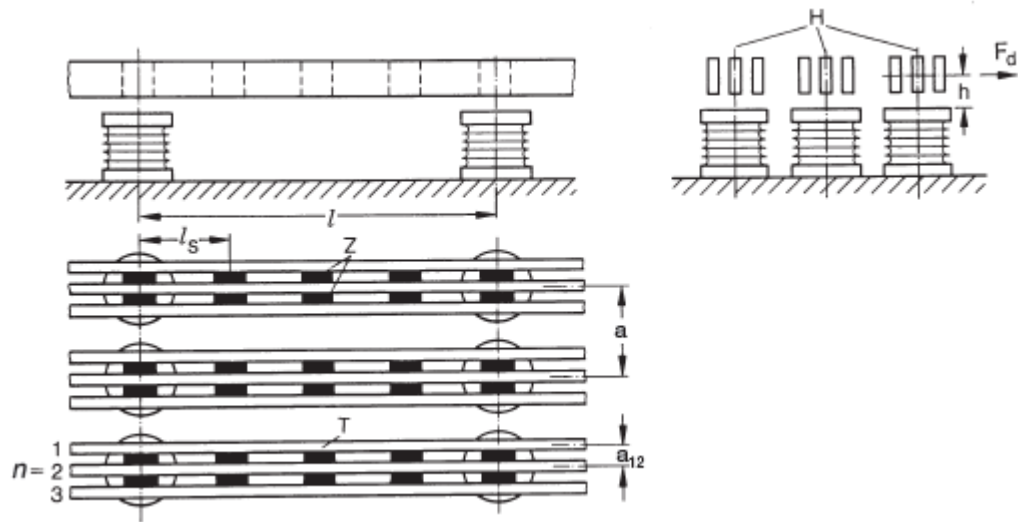
ja oikosulkuvoimien ollessa suoraan verrannollisia oikosulkuvirtojen suuruuteen, aiheuttaa kolmivaiheinen oikosulkuvirta noin 15 % suuremman voimat kaksivaiheiseen oikosulkuun nähden. Kaukana generaattoreissa tapahtuvissa vioissa tämä olettaus pitää hyvin paikkansa. (Hirvonen 2010, 17)

Vaihekiskon koostuessa useammasta samansuuntaisesta osakiskosta, aiheuttaa siinä kulkeva oikosulkuvirta suurimman voiman laitimmaiseen osakiskoon. Tämä voima voidaan laskea yhtälöllä 39

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s}, \quad (39)$$

jossa n on osakiskojen lukumäärä, l_s on pisin kahden perättäisin kiinnityspisteen välinen etäisyys, a_s kahden osakiskon tehollinen etäisyys ja i_p on joko kaksi- tai kolmivaiheisen oikosulkuvirran huippuarvo. (IEC 60865-1, 14)

Kiskosto voi siis koostua pääkiskoista tai useista osakiskojen muodostamista vaihekiskoista. Kuvassa 11 on esitetty kolmivaiheinen kokoojakiskosto, jonka vaihekiskot koostuvat kolmesta osakiskosta.



KUVA 11. Esimerkki kokoojakiskosto, jossa H on pääkiskot, T on osakiskot, Z on yhdysiteet, l on tukieristimien välinen etäisyys, l_s on tukieristimen ja yhdysiteen välinen etäisyys, a on vaihekiskojen keskilinjojen välinen etäisyys, a_{12} on osakiskojen välinen keskilinjaetäisyys ja mahdollisen taivuttavan voiman suunta on suunnassa F_d . (ABB)

Kiskoihin kohdistuvat voimat riippuvat niiden keskinäisestä geometrisesta sijoittelusta, sekä niiden poikkileikkauksien muodoista. Tämän vuoksi standardi IEC 60865-1 määrittää kiskojen ja osakiskojen välisen tehollisen etäisyyden a_m , joka taas mahdollistaa näiden seikkojen huomioimisen laskennassa. Jos kiskojen poikkileikkausprofiili on ympyränmuotoinen, yhtälö 40 on voimassa

$$a_m = a. \quad (40)$$

Kiskojen poikkileikkausprofiilin ollessa suorakulmainen, on vuorostaan yhtälö 41 voimassa

$$a_m = \frac{a}{k_{1s}}, \quad (41)$$

jossa k_{1s} on standardin IEC 60865-1 määrittämä kerroin, joka ottaa huomioon kiskon poikkileikkauksen dimensiot. (IEC 60865-1, 14)

Kiskoston koostuessa ympyränmuotoisista osakiskoista, voidaan kiskojen tehollinen etäisyys laskea yhtälöstä 42

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}}, \quad (42)$$

jossa a_{1n} on jokaisen osakiskon etäisyys laitimmaisesta osakiskosta. Jos taas kiskosto koostuu suorakulmaisista osakiskoista, kiskojen tehollinen etäisyys voidaan laskea yhtälöstä 43

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}}, \quad (43)$$

jossa k_{1n} on kerroin, joka ottaa huomioon kiskon poikkileikkausprofiilin. (IEC 60865-1, 14)

4.1.2 Jäykän kiskon ominaistaajuus

Jäykät kiskot saattavat alkaa värähdellä ja tämä värähtely lisää kiskon ja sen tukirakenteiden rasituksia. Lisäksi tämä tapahtuma saattaa aiheuttaa väsymis- ja ääni-ilmiöitä. Kyseessä oleva värähtely onkin otettava kiskostojen mitoituksessa huomioon. Vaikka kolmivaiheisessa oikosulussa suurin voima kohdistuukin kohti keskimmäistä vaihetta, ei se kuitenkaan välttämättä tarkoita sitä, että siihen kohdistuva mekaaninen kokonaisrasitus olisi suurin, kun värähtelyn vaikutus otetaan huomioon. Värähtelevä oikosulkuvoima sisältää sekä verkon taajuudella, että verkon toisella harmonisella taajuudella värähtelevät komponentit. Kiskojärjestelmän ominaistaajuuden ollessa jompikumpi tai hyvin lähellä jompaakumpaa taajuutta, syntyy mekaaninen resonanssi, jonka vaikutuksesta kiskojärjestelmää kohdistuvat mekaaniset rasitukset kasvavat. (Hirvonen 2010, 19)

Kiskolle, joka koostuu vain pääkiskoista, voidaan ominaistaajuus taivutuksessa laskea yhtälöstä 44

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_m}{m'_m}}, \quad (44)$$

γ on kiskon tuennan huomioiva kerroin, l on kiskon tukipisteiden välinen etäisyys, E on kiskon kimmokerroin, J_m on kiskon aksiaalinen pintamomentti ja m on kiskon massa pituusyksikköä kohden. Mikäli yhtämittäisessä kiskossa on enemmän kuin kolme tukieristintä, antaa yhtälö hieman todellista taajuutta korkeamman taajuuden, mutta standardi suosittelee silti kyseisen yhtälön käyttämistä. (IEC 60865-1, 23)

Poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen muotoisen kappaleen aksiaalisen pintamomentin, eli jäyhyysmomentin laskentaan vaikuttaa se, mistä suunnasta taivutettava voima vaikuttaa kappaleeseen. Mikäli taivutettava voima vaikuttaa kohtisuoraan y-akselin suuntaan, voidaan jäyhyysmomentti laskea yhtälöstä 45

$$J_m = \frac{1}{12}bd^3, \quad (45)$$

jossa b on kappaleen paksuus ja d on kappaleen leveys, joka on kohtisuorassa taivutettavaa voimaa vastaan. Voiman suunnan vaihtuessa vaihtuu myöskin kuuti-oon korotettava kappaleen sivu. (ABB, TTT)

Kiskoston koostuessa suorakaiteen muotoisista osakiskoista, voidaan kyseisen järjestelmän ominaistajuus laskea yhtälöstä 46

$$f_{cm} = e \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}}, \quad (46)$$

jossa e on osakiskojen yhdyssiteiden huomioiva kerroin. Mikäli tukieristimien välillä ei ole yhdyssiteitä, saa kerroin numeeriseksi arvoksi yksi, muussa tapauksessa tulee arvo tulkita standardista. (IEC 60865-1, 23)

Osakiskon rasitusta laskettaessa voidaan käyttää hyväksi ominaistajuutta. Tällöin kyseinen ominaistajuus voidaan laskea yhtälöstä 47

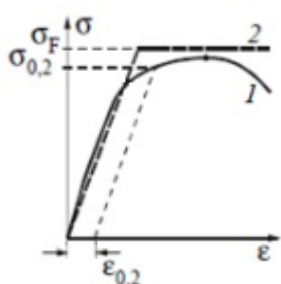
$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}}. \quad (47)$$

(IEC 60865-1, 23)

4.1.3 Mekaanisten voimien vaikutus jäykässä kiskostossa

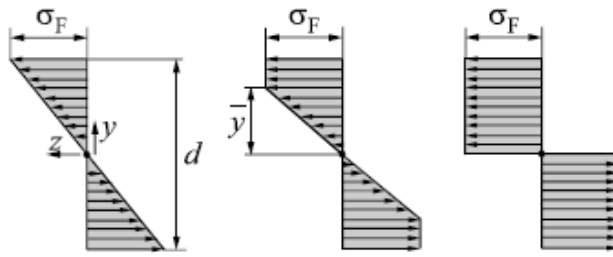
Kiskosto- ja tukijärjestelmällä on useita ominaistuuksia ja värähtelevät oikosulkuvoimat vaikuttavat tähän monimutkaiseen ja elastiseen rakenteeseen. Kiskoston ominaistajuuden ollessa lähellä 100 Hz taajuutta, kiskostossa syntyy ääni-ilmiöitä, jotka saattavat olla yksitaajuisuutensa vuoksi häiritseviä normaali-käyttötilanteessakin. Tämän lisäksi oikosulkuvoimat voivat aiheuttaa metallin väsymisilmiöitä. Värähtelyn lähestyessä resonanssitaajuutta, kasvaa kiskostoon kohdistuva rasitus. Rasituksen kasvaessa kiskomateriaalin myötörajan $\sigma_{0,2}$ yläpuolelle, muuttuu kiskomateriaali plastiseksi. Tämän jälkeen siis materiaaliin syntyy palautumattomia muodonmuutoksia. Tämä pysyvä muodonmuutos aiheuttaa kuitenkin sen, ettei ominaistajuus vaikuta suoranaisesti itse kiskon oikosulkulujuuteen, vaan jäykkien tukirakenteiden rasitukseen. Materiaalia hyödynnetäänkin taloudellisemmin, jos rasituksen sallitaan aiheuttavan aineessa plastisia muutoksia. (Elovaara & Haarla 2011b, 91)

Materiaalin käyttäytymistä jännityksessä on esitetty kuvassa 12. Kuvasta huomataan, että murtokäyrä koostuu kahdesta eri osa-alueesta. Elastisella alueella murtokäyrä on lineaarinen ja materiaalin myötörajan ylittymisen jälkeen murtokäyrä muuttuu epälineaariseksi. Lineaarisen alueen suoran kulmakerrointa voidaan kutsua myös materiaalin kimmokertoimeksi E . (CIGRE, 2002, 13)



KUVA 12. Materiaalin murtokäyrä. Alumiinille ja kuparille soveltuu käyrä 1 ja ideaaliselle elastinen-plastinen muutokselle soveltuu käyrä 2. (CIGRE, muokattu)

Rasitus jakautuu kiskostolle tasaisemmin myötörajan ylittymisen jälkeen. Kyseistä ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 13.



KUVA 13. Rasituksen jakautuminen kiskostossa. Vasemmalla on elastisen alueen rasitus, keskimmaisessä tilanteessa rasitus on esitetty myötörajan ylittymisen jälkeen ja oikealla rasitus on kokonaisuudessaan plastisella alueella. (CIGRE, 13)

Tukirakenteiden ja virtakiskojen mitoitusta oikosulkuvoimia vastaan käsitellään standardissa IEC 60865-1. Tämän standardin mukaisessa laskentamenetelmässä määritetään johdinrasituksen suurin mahdollinen arvo ottaen huomioon johdinmateriaalin mekaanisen lujuuden ja tämän lisäksi lasketaan tukirakenteisiin kohdistuvat voimat. Tätä laskentamenettelyä on yksinkertaistettu käytännön tarkasteluihin sopivaksi ja yksinkertaistuksista johtuvat virheet ovat eliminoitu turvakertoimien avulla. Kyseessä oleva menettely on kaksiosainen:

1. Aluksi lasketaan suurin oikosulkuvirran aiheuttama voima F_m , jonka oletetaan olevan staattinen voima.
2. Lopuksi lasketaan rakenteen dynaaminen vaste, eli käyttäytyminen tämän aikariippuvaisen rasituksen vaikuttaessa. Nämä laskut suoritetaan kertoimien V avulla. (Elovaara & Haarla 2011b, 92)

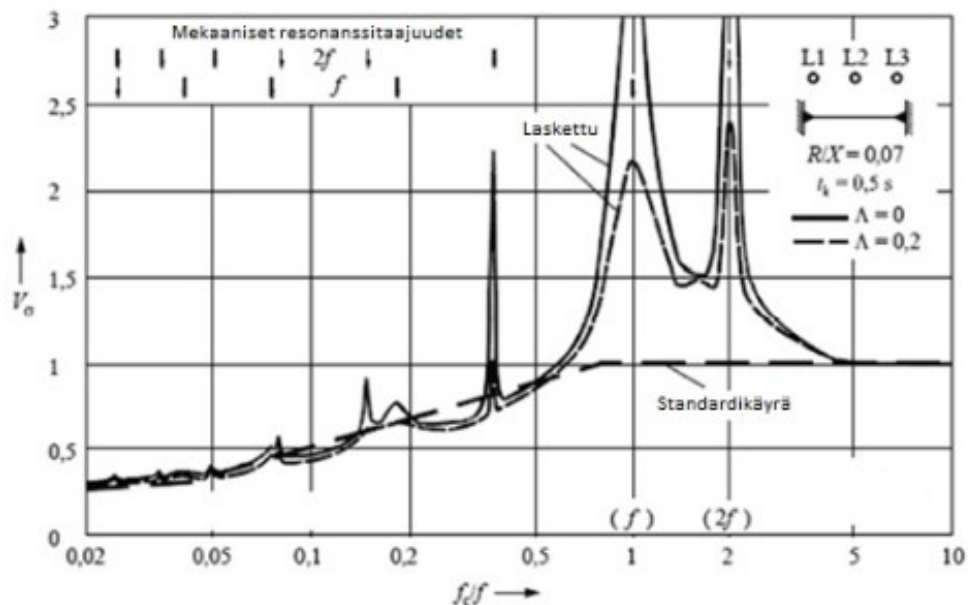
Dynaamiset kertoimet V ovat erilaiset tukirakenteille ja johdinrasituksille. Mitoitus on silloin kelvollinen, jos suurimpia sallittuja rasituksia ei ylitetä. Näiden kertoimien määrittämisessä kokeellisilla toimilla on ollut keskeinen merkitys. (Elovaara & Haarla 2011b, 92)

Laskettaessa jäykkään kiskostoon kohdistuvia voimia tehdään oletus, että kiskot ovat kiinnitetty siten, että pitkittäisillä voimilla ei ole merkitystä. Tämän oletuksen johdosta kiskoon kohdistuvat voimat ovat taivuttavia voimia. Kiskoa taivuttava rasitus voidaan laskea yhtälöllä 48

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{r m} \beta \frac{F_m l}{8 W_m}, \quad (48)$$

jossa F_m on joko kolmivaiheisen- tai kaksivaiheisen oikosulun generoima voima-vaikutus, W_m on päävirtakiskon taivutusvastus, jonka laskennassa täytyy ottaa huomioon taivuttavien voimien suunnat, V on kerroin, joka ottaa huomioon kiskoston dynaamisia ominaisuuksia ja β ottaa huomioon tukieristimien asetelman. (IEC 60865-1, 16)

Kertoimella $V_{\sigma m}$ otetaan siis huomioon laskettavan kiskoston ominaistajuuudesta johtuvat lisärasitukset, jotka kohdistuvat laitimmaisien vaiheiden kiskoihin. Tämä vaikutus on esitetty kuvassa 14 kiskoston ominaistajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona. (Hautaniemi, 2014, 77)



KUVA 14. Kertoimen V_{σ} määrittäminen uloimmille vaiheille kiskoston ominaistajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen kolmivaiheisessa oikosulussa. (CIGRE, muokattu)

Kerroin β voidaan ilmaista myöskin kiskon taivutusmomenttien M_{pl} ja M_{el} suhdelukuna. Tämän lisäksi kerroin voidaan esittää myös matemaattisesti yhtälön 49 mukaisesti

$$\beta = \frac{M_{pl,max}}{M_{el,max}}, \quad (49)$$

jossa $M_{pl,max}$ on plastinen maksimitaivutusmomentti ja $M_{el,max}$ on kimmoteorian mukainen maksimimomentti. (CIGRE, 2002, 13)

Oikosulkuvoimia laskettaessa perusoletuksena on, että kisko mallinnetaan yksiaukkoisena vapaasti tuettuna palkkina, jolloin kerroin β saa arvoksi 1,0. Jos taas palkki tuetaan jäykästi molemmista päistään, johdinrasitus pienenee ja kerroin β saa tällöin arvoksi 0,5. Selittävänä tekijänä tälle ilmiölle on, että tukieristimellä, eli tukipisteellä saavutetaan plastinen taivutusmomentti M_{pl} ennen kimmoteorian mukaista taivutusmomenttia M_{el} ja näin ollen taivutusmomentti jää pienemmäksi. Kuvassa 15 on esitetty päistään vapaasti tuettu kisko ja kuvassa 16 oleva kisko on molemmista päistään jäykästi tuettu. (Hautaniemi, 2014, 75)



KUVA 15. Vapaasti päistään tuettu kisko. (CIGRE)



KUVA 16. Molemmista päistään jäykästi tuettu kisko. (CIGRE)

Kappaleen taivutusvastukseen vaikuttaa kappaleen poikkileikkauksen muoto ja dimensiot. Tämän vuoksi kappaleen taivutusvastukseen vaikuttaa myöskin se, mistä suunnasta taivuttava voima vaikuttaa kappaleeseen. Kuvassa 17 on esitetty kappaleeseen kohdistuvien voimien mahdollisia suuntia.



KUVA 17. Suorakulmaisen kappaleen taivutusvastukseen vaikuttavien voimien suunnat. (ABB)

Yhtälössä 50 on esitetty taivutusvastuksen laskenta suorakulmaiseen kappaleeseen voiman vaikuttaessa kohtisuoraan kuvan 17 y-akselia kohti

$$W_{Fy} = \frac{1}{6} b d^2, \quad (50)$$

jossa b on kappaleen paksuus ja d on kappaleen leveys, joka on kohtisuorassa taivuttavaa voimaa vastaan. Voiman suunnan vaihtuessa vaihtuu myöskin neliöön korotettava kappaleen sivu. (ABB, TTT)

Kiskoston koostuessa useista osakiskoista, voidaan osakiskojen aiheuttamat taivutusrasitukset laskea yhtälöstä 51

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{rs} \beta \frac{F_s l_s}{16 W_s}, \quad (51)$$

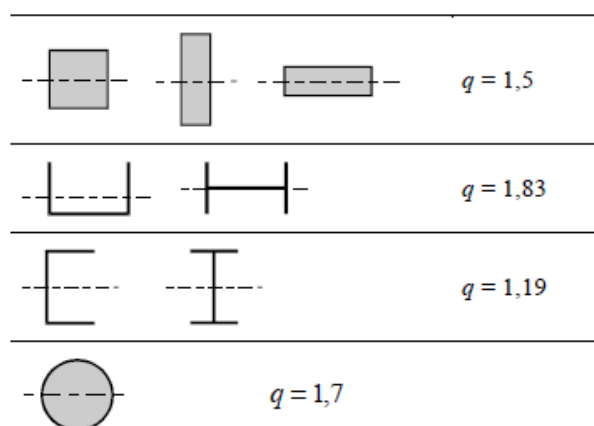
jossa F_s on osakiskon aiheuttama voima ja l_s on pisin kahden perättäisen yhdysiteen tai yhdysiteen ja viereisen tukieristimen välinen etäisyys. (IEC 60865-1, 17)

Kiskon mekaaninen kestävyys riippuu johdinmateriaalin taivutusvastuksesta. Jos rasitus kohdistuu kohtisuoraan kuvan 17 x-akselia kohti, niin tällöin se ei ole riippuvainen osakiskoista koostuvissa kiskostoissa yhdistyspalojen lukumäärästä. Näin ollen kiskon taivutusvastus on summa osakiskojen taivutusvastuksista ja vaihekiskojen välillä plastisuuskerroin q saa numeeriseksi arvoksi suorakulmaisilla kappaleilla 1,5 ja U ja I -poikkileikkauksen omaavissa kappaleissa taas arvon 1, 19. Taivuttavan voiman kohdistuessa kohtisuoraan kuvan 16 y-akselia kohti ja

tukieristimien välillä on korkeintaan yksi yhdyspala, voidaan osakiskoista koostuvassa järjestelmässä laskea taivutusvastus osakiskojen taivutusvastusten summana ja plastisuuskerroin vaihekiskojen välillä saa suorakulmaisen kappaleen tapauksessa arvon 1,5. U ja I -poikkileikkauksen omaavissa kappaleissa plastisuuskertoimeksi muodostuu 1,83.(IEC 60865-1, 17)

Plastisuuskerroin q ottaa siis huomioon rasituksen jakautumisen kappaleessa, kun kappaleessa alkaa tapahtua plastisia muutoksia oikosulkuvoiman vaikutuksesta. (CIGRE, 2002, 13)

Eri poikkileikkauksien omaavat plastisuuskertoimet q ovat esitetty kuvassa 18.



KUVA 18. Standardin IEC 60865-1 mukaiset plastisuuskertoimet q eri poikkileikkauksille. (CIGRE)

Yksittäisen kiskon oletetaan kestävän oikosulun mekaaniset voimat silloin, kun epäyhtälö 52 on voimassa

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y, \quad (52)$$

jossa $q_{m,d}$ on kiskoon kohdistuva taivutusrasitus, q on plastisuuskerroin ja f_y on materiaalin myötöraja. (IEC 60865-1, 16)

Kuten jo aiemmin todettiin, sallii IEC 60865-1 mukainen plastisuuskerroin q materiaalin myötörajan ylittymisen, tosin myötörajan ylittyminen on harvinaista, mutta mikäli näin käy, syntyy kiskoon pysyviä muodonmuutoksia. Kiskon pysyvät

muodonmuutokset muuttavat ominaistaajuutta ja lisäävät vaimennusta. (Elovaara & Haarla 2011b, 91)

Vaihekiskon koostuessa kahdesta tai useammasta osakiskosta, lasketaan vaihekiskoon kohdistuva kokonaistaivutusvastus yhtälöllä 53

$$\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d}, \quad (53)$$

jossa $\sigma_{m,d}$ on kiskoon kohdistuva rasitus ja $\sigma_{s,d}$ on osakiskoon kohdistuva rasitus. Näin ollen kiskon oletetaan kestävän kokonaisrasitus, jos epäyhtälö 54 on voimassa

$$\sigma_{tot,d} \leq qf_y. \quad (54)$$

Standardin IEC 60865-1 mukaan tulee varmistua myös siitä, että oikosulkuvoimien vaikutuksesta osakiskojen väliset etäisyydet eivät saa pienentyä liikaa. Tämä vaatimus otetaan huomioon epäyhtälöllä 55

$$\sigma_{s,d} \leq f_y. \quad (55)$$

Tämän lisäksi kiskojen pysyvät muodonmuutokset eivät saa pienentää standardin mukaisia jännitetasoista riippuvia minimietäisyyksiä eri potentiaalien välillä. (IEC 60865-1, 17)

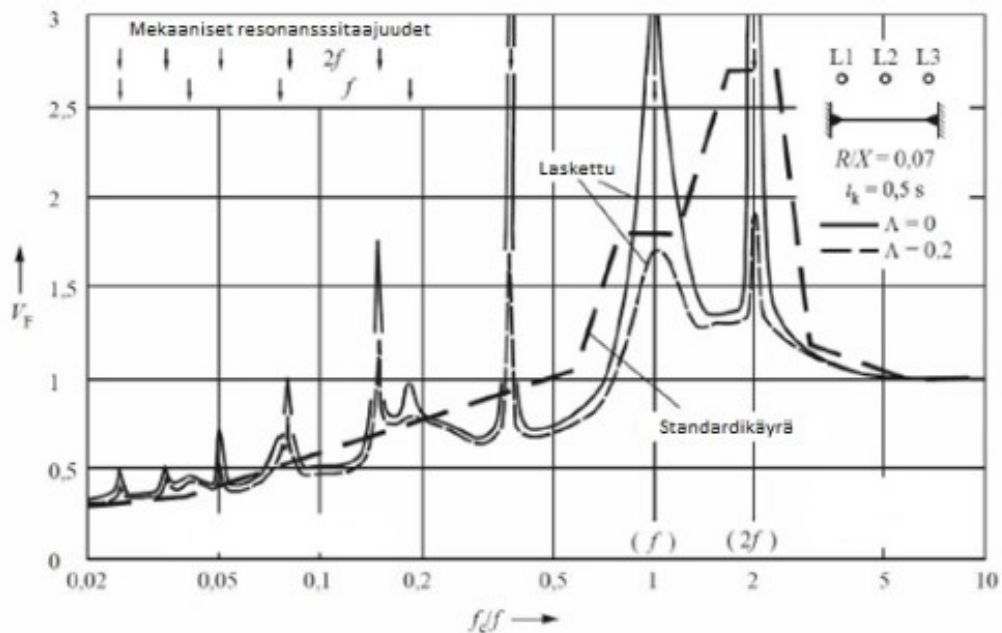
Oikosulkuvirtojen aiheuttamat voimat vaikuttavat kiskojen lisäksi myös tukieristimiin. Tukieristimiin kohdistuva ekvivalenttinen voima voidaan laskea yhtälöstä 56

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m, \quad (56)$$

jossa $F_{r,d}$ on tukieristimeen kohdistuva ekvivalenttinen taivuttava voima, V_F on kiskon ominaisvärähtelyn huomioiva kerroin, V_{rm} on kolmivaiheisen jälleenkytkennän huomioiva kerroin, α on kiskon tuennan vaikutuksen huomioiva kerroin ja F_m on oikosulkuvirran aiheuttama maksimivoima. (IEC 60865-1, 21)

Tukieristimien voidaan olettaa kestävän oikosulkuvirran aiheuttamien voimien vaikutukset, jos ne eivät ylitä valmistajien antamia tukieristimien lujuusarvoja. Lujuusarvoja vertaillaan tulee kuitenkin ottaa huomioon myös mahdollinen voimien vaikutuspisteiden ero. Tämä voidaan tehdä siten, että lasketaan molempien voimien aiheuttamat momentit esimerkiksi tukieristimien juureen ja vertailemalla näitä keskenään. (Hirvonen 2010, 23)

Kertoimella V_F otetaan siis huomioon laskettavan kiskoston ominaistaajuudesta johtuvat lisärasitukset, jotka kohdistuvat laitimmaisien vaiheiden tukieristimiin. Tämä vaikutus on esitetty kuvassa 19 kiskoston ominaistaajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen funktiona. Kerroin huomioidaan siis samaan tapaan kuin kiskostoon kohdistuvan rasituksen huomioiva kerroin. (Hautaniemi, 2014, 78)



KUVA 19. Kertoimen V_F määrittäminen uloimpien vaiheiden tukieristimien rasitukseen kiskoston ominaistaajuuden f_c ja verkon taajuuden f suhteen kolmivaiheisessa oikosulussa. (CIGRE, muokattu)

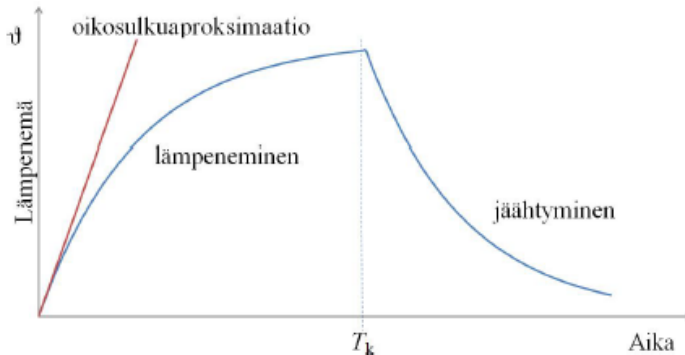
4.2 Termiset vaikutukset

Edellä käsiteltujen mekaanisten voimavaikutusten lisäksi laitteiden ja asennusten tulee kestää myös oikosulun termiset vaikutukset. Oikosulkuvirta aiheuttaa oikosulkupiirissä johtimien, liittimien ja laitteiden lämpenemistä. Tästä oikosulun generoimasta lämpötilan noususta, eli lämpenemästä, osa siirtyy ympäristöön säteilemällä tai johtumalla. Tästä esimerkkinä lämmön siirtyminen tukieristimiin. Lämpeneminen taas alentaa eristimien eristyskykyä ja materiaalien myötörajaa. Mikäli lämpenemä ylittää sallitun kestoisuuden, voi lopputuloksena olla laitteen rikkoutuminen. Kyseinen asia pitää siis myös ottaa huomioon laitteita mitoitettaessa. (Hirvonen 2010, 30)

Johtavaa osaa lämmittävän häviötehon ja pinnalta pois johtuvan tehon avulla voidaan johtaa johtimen lämpenemisfunktio. Näiden tehojen erotus siirtyy johdinmassaan nostaan sen lämpötilaa. Johdinta jäähdyttävä teho, eli poisjohtuva teho on verrannollinen johtimen ulkopinnan alaan ja sen lämpenemään. Jos johtimen kuormitusta nostetaan askelmaisesti, kuten esimerkiksi kuormitusten kytkettäessä päälle, johtimen lämpenemä kohoaa vaimenevaa eksponenttikäyrää noudattaen, kunnes systeemin tasapainotila saavutetaan. Tasapainotilassa johtimessa syntyvä ja johtimesta poistuva teho ovat yhtä suuret. Tämän lämpenemän suuruus ja käyttäytyminen ajan funktiona riippuvat johtavien osien geometriasta, massasta m , resistanssista R , ominaislämpökapasiteetista c ja pinnan lämmönsiirtymiskertoimesta h . Mikäli johtimen kuormitus poistuu saman askeleen verran, esimerkiksi kuormituksen pois kytkennän jälkeen, jäähtyy johdin ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälön ratkaisun mukaisesti lopulta alkuperäiseen lämpötilaan, jolloin systeemi on uudessa tasapainotilassa. Lämpenemisen ja jäähtymisen aikavakio τ riippuu johdintyyppistä ja on sitä pidempi, mitä massiivisemmasta johtimesta on kysymys. Lämpenemällä tarkoitetaan johtimen lämpötilan ja sitä ympäröivän ympäristön lämpötilojen erotusta. (Lakervi & Partanen 2008, 35-36)

Kuormitusvirtojen lisäksi oikosulkuvirrat aiheuttavat järjestelmissä termisiä lämpenemiä. Oikosulkuvirran kesto on kuitenkin pieni ja toisaalta taas sen amplitudi suuri verrattuna kuormitusvirtaan. Edellä mainitusta seuraa, että oikosulkuvirran

generoimaa lämpenemää voidaan mallintaa lineaarisella approksimaatiolla. Kuvassa 20 on esitetty johtimen lämpenemä sekä oikosulkuapproksimaatio. (Lakervi & Partanen 2008, 35-36)



KUVA 20. Johtimen lämpenemä ajan funktiona sekä oikosulkuapproksimaatio. (Hirvonen)

Oikosulkuvirran generoima lämpenemä ϑ on lähes suoraan verrannollinen vikavirran neliöön ja vikavirran kestoaikaan ja vikavirran neliöön. Tämä on esitetty matemaattisesti yhtälössä 57

$$\vartheta \approx \frac{I^2 R}{mc} t \approx I^2 t, \quad (57)$$

jossa t on oikosulun kesto-aika. Tämän avulla voidaan laskea oikosulkuvirta I_2 , joka aiheuttaisi saman suuruisen lämpenemän ajassa t_2 , kuin oikosulkuvirta I_1 ajassa t_1 . Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi tilanteissa, joissa tiedetään johtimen valmistajan ilmoittaman suurin mahdollinen sallittu yhden sekunnin oikosulkuvirta ja halutaankin tietää, onko kyseinen johdin oikosulkukesto-automattisen poiskytkennän toiminta-ajalla. Tämä on esitetty yhtälössä 58. (Lakervi & Partanen 2008, 37)

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}. \quad (58)$$

4.2.1 Kiskojen lämpenemän laskenta

Nykyisin paljaille kupari- ja alumiinijohtimille sallitaan loppulämpötilaksi 200 °C, sekä alumiiniseokselle 170 °C. Tämä tarkoittaa, että kiskojen lämpötilat saavat hetkellisesti nousta oikosulun aikana korkeammaksi, kuin normaali kuormitustilanne sallisi. (ABB, TTT)

Kiskojen lämpenemää laskettaessa on ensin selvitettävä ekvivalenttinen oikosulkuvirta, joka lämmittää kiskoa. Jos oikosulun kesto on alle 5 s, voidaan olettaa, ettei lämmön haihtumista ehdi tapahtua, eli kaikki lämpö jää kiskon sisälle. Kyseessä on siis adiabaattinen lämpeneminen. (Hirvonen, 2010, 30)

Oikosulkuvirran generoima lämpenemä ϑ voidaan siis laskea yhtälöllä 57 ja tämä saatu lämpenemä tulee lisätä kuormituksesta johtuvaan lämpenemään. Lopullinen lämpenemä yhdessä ympäristön lämpötilan kanssa ei saa ylittää materiaalille annettua korkeinta sallittua lämpötilaa.

5 OIKOSULKUKESTOISUUS

Pienjännitestandardi SFS 61439-1 määrittelee kiskon pieni-impedanssiseksi joh-timeksi, johon voidaan liittää erikseen useita sähköisiä piirejä. Kiskosto on siis osa niin sanottua pääpiiriä, joka on tarkoitettu sähköenergian siirtoon. Kiskosto voi koostua pää- ja haarakiskoista. Pääkiskoon voidaan kytkeä yksi tai useampia haarakiskoja, sekä syöttö- ja lähtöyksiköitä. (SFS 61439-1, 30)

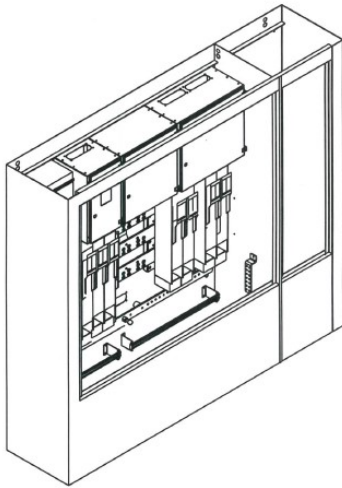
5.1 UTU sähkökeskuksien kiskostoja

UTU:n sähkökeskuksissa voidaan käyttää kiskomateriaalina kuparia *Cu* ja alumiiniseosta *AlMgSi-T6*. Kiskomateriaali valitaan usein vaaditun kuormitettavuuden mukaisesti. Tämä tarkoittaa siis sitä, että useimmiten nimellisvirraltaan pienempivirtaiset kokonaisuudet voidaan toteuttaa alumiiniseoskiskoilla ja isompivirtaiset taas kuparikiskoilla. Taulukossa 3 on esitetty UTU:n sähkökeskuksissa käytettyjen kiskomateriaalien fysikaalisia ominaisuuksia.

TAULUKKO 3. UTU:n sähkökeskuksissa käytettyjen kiskomateriaalien fysikaaliset ominaisuudet.

Suure	Kupari (<i>Cu</i>)	Alumiiniseos (<i>AlMgSi-T6</i>)
Tiheys (kg/m ³)	8900	2700
Myötölujuus Rp0,2 (N/mm ²)	60	140
Murtolujuus (N/mm ²)	230	170
Kimmokerroin	118000	70000
Resistiivisyys (Ωm)	0,01724	0,031348
ominaislämpökapasiteetti (J/Kkg)	385	897

UTU:n valmistaman puistomuuntamon UM-24L 400 V PJ-kiskosto (pienjännite) koostuu vaakasuoraan asennettavista kuparikiskoista, jotka ovat kiinnitetty tukieristimien avulla seinämään. Kuvassa 21 on esitetty kyseisen puistomuuntamon PJ-tila.



KUVA 21. Puistomuuntamon PJ-tila (UTU)

PJ-tilan kiskostoon liitetään jonovarokkeita. Nämä jonovarokelähdöt syöttävät pienjänniteverkkoa toimien myös puistomuuntamosta lähtevien pienjännitekaapelien oikosulkusuojina. Pienjänniteverkon ylikuormitussuojat voivat sijaita myös kaapelien toisessa päässä.

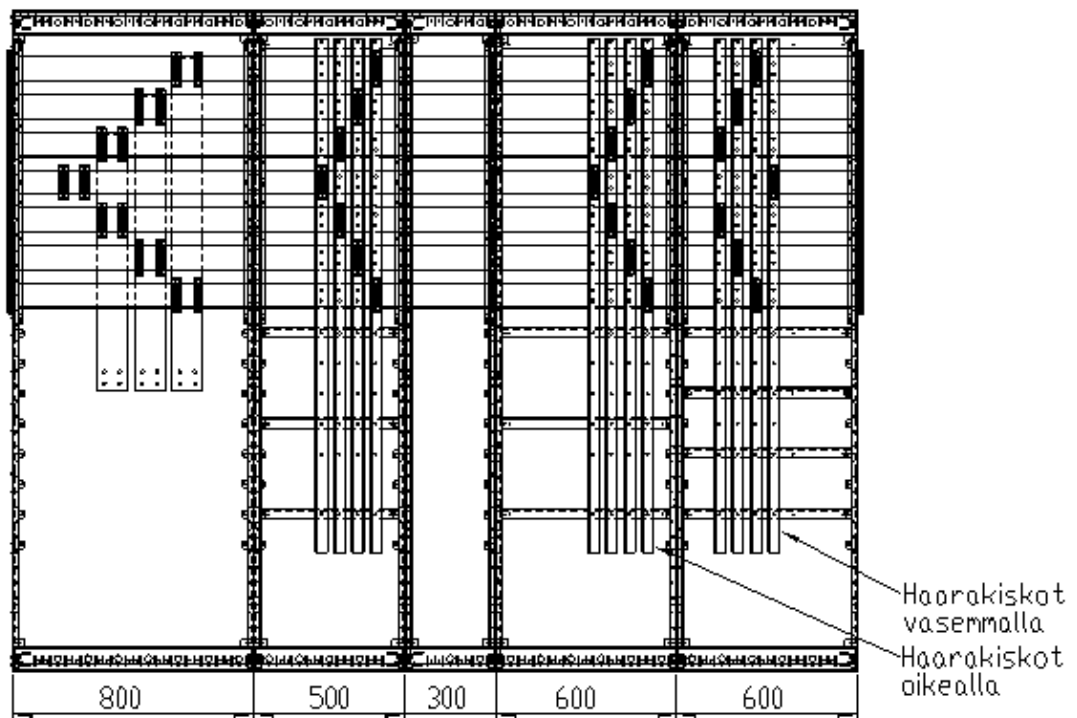
Itse kiskosto on esitetty kuvassa 22 ympyröidyllä alueella. Tähän kiskostoon voidaan liittää jonovarokelähtiä, jotka puolestaan syöttävät 400 V verkkoa.



KUVA 22. Puistomuuntamon 400 V kiskosto. (UTU, muokattu)

UTU N400 teollisuuskeskus on kehitetty teollisuuden ja voimalaitosten vaativiin käyttöolosuhteisiin. Teollisuuskeskusta on saatavilla nimellisvirraltaan aina 4000 A asti. Keskuksen kokoojakiskot ovat sijoitettu omaan koteloituun tilaansa ja ovat asennettu vaakasuuntaan. Kiskoston tukieristiminä toimivat niin sanotut tukilaitpat, joiden läpi kisko kulkee kentät toisistaan erottavien väliseinien läpi mentäessä

Teollisuuskeskuksen kokooja- ja haarakiskot on esitetty kuvassa 23. Vasemmanpuoleisessa 800 mm leveään kenttään on mahdollista liittää syöttökatkaisija tarvittavine ohjauksineen. Lähtökenttiä, kuten esimerkiksi kytkinvarokelähtöjä, on mahdollista sijoittaa 400 mm, 500 mm ja 600 mm leveisiin kenttiin. Keskimääräinen 300 mm leveä kenttä on niin sanottu kaapelikenttä, josta voi kaapeloida lähtö- ja ohjauskaapeleita keskuksen.



KUVA 23. N400 teollisuuskeskuksen kokooja- ja haarakiskot. (UTU)

5.2 Oikosulkukestoisuuden vaatimukset

5.2.1 Pienjännitekeskukset

Pienjännitekeskusten, kuten myös niiden kiskostojen tulee kestää mitoitusarvojen mukaisten oikosulkuvirtojen aiheuttamat termiset ja dynaamiset vaikutukset. Oikosulkuvirtojen aiheuttamia rasituksia voidaan tarvittaessa pienentää käyttämällä virtaa rajoittavia laitteita kuten induktansseja tai virtaa rajoittavia sulakkeita. (SFS 61439-1, 92)

Keskukselle, jossa oikosulkusuoja on sijoitettu syöttöliittimiin, annetaan prospektiivisen oikosulkuvirran suurin sallittu arvo syöttöyksikön liittimissä. Tämä kyseinen arvo ei saa ylittää keskuksen mitoitusarvoja. Standardin SFS 61439-1 mukaan oikosulkukestoisuuden mitoituksessa tulee huomioida mitoituskestovirran huippuarvo I_{pk} , jonka pitää olla yhtä suuri tai suurempi kuin syöttöjärjestelmän prospektiivisen oikosulkuvirran huippuarvo. Myös lyhytaikainen mitoituskestovirta I_{cw} vaikuttaa oikosulkukestoisuuteen ja I_{cw} arvon on oltava yhtä suuri tai suurempi kuin oikosulkuvirran prospektiivinen tehollisarvo. Jos oikosulkukestoisuutta määritettäessä käytetään ehdollista mitoitusoikosulkuvirtaa I_{cc} , tulee tällöin I_{cc} arvon olla yhtä suuri tai suurempi kuin keskusta suojaavan oikosulkusuojan toiminta-ajan rajoittaman prospektiivisen oikosulkuvirran tehollisarvo. (SFS 61439-1, 56)

Keskukselle, jossa oikosulkusuojaus ei ole sen syöttöliittimissä, ilmoitetaan oikosulkukestävyys joko lyhytkestoisen mitoitusvirran I_{cw} mukaan kestoaikoineen ja mitoituskestovirran huippuarvon I_{pk} mukaan tai vaihtoehtoisesti käyttäen ehdollista mitoituskestovirtaa I_{cc} . (SFS 61439-1, 92)

Ehdollista mitoituskestovirtaa käytettäessä tulee keskusvalmistajan tällöin ilmoittaa sähkökeskusta suojaavan sulakkeen tai kompaktikatkaisijan tekniset tiedot.

5.2.2 Keskijännitekojeistot

Keskijännitekojeiston oikosulkukestoisuuden mitoitusarvot ovat määritetty standardissa IEC 62271-200. Tämän mukaan standardin IEC 62271-1 määritelmä nimelliselle oikosulkukestoisuudelle I_k on se, että nimellinen oikosulkukestoisuus on oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka kojeiston tulee kestää määritellyn ajan määrätyissä olosuhteissa. Standardinmukainen nimellisoikosulkuvirrankestoisuus tulisi määrittää seuraavasta sarjasta

$$1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8,$$

sekä näiden kymmenpotensseista. Tämän lisäksi Standardi IEC 62271-200 laajentaa vaatimuksen koskemaan kaikkia pääpiirissä olevia sarjaan kytkettyjä komponentteja. (IEC 62271-200, 16)

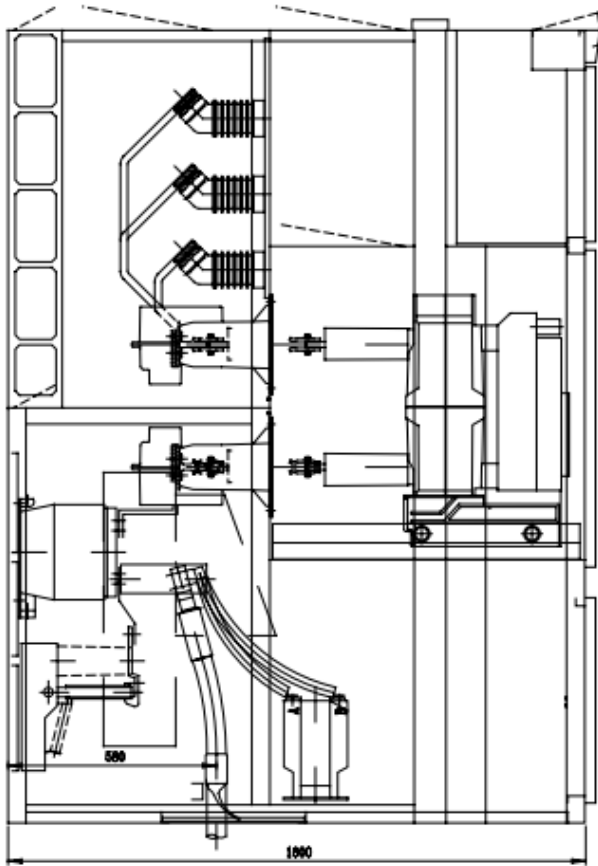
Keskijännitekojeiston nimellinen oikosulkukestoisuus maasulussa I_{ke} , on maadoituspiirin oikosulkukestoisuus, jonka arvo voi poiketa pääpiirien oikosulkukestoisuudesta. (IEC 62271-200, 16-17)

Kojeiston nimellinen oikosulkuvirran huippuarvon kestoisuus I_p on virran ensimmäisellä jaksolla esiintyvä nimellisen oikosulkuvirtakestoisuuden huippuarvo, joka esiintyy ensimmäisen puolijakson aikana. Standardin mukaan tämä huippuarvo määritellään 50 Hz verkossa nimellisestä oikosulkukestovirrasta kertoimella 2,5 ja 60 Hz verkossa kertoimella 2,6. Voidaan siis todeta, että oikosulkuvirran huippuarvo on riippuvainen verkon nimellistaajuudesta. Oikosulunkestoisuudelle tulee myös määrittää aika, jonka ajan kojeisto on oikosulkukestoinen. IEC 62271-1 standardin mukainen aika oikosulkukestoisuudelle on 1 s. Tosin tarpeen tullen muitakin aika-arvoja voidaan hyödyntää. Tällöin suositeltuja arvoja ovat 0,5 s, 2 s ja 3 s. Tämän lisäksi standardi IEC 62271-200 laajentaa vaatimukset koskemaan kaikkia pääpiirissä olevia sarjaan kytkettyjä komponentteja. (IEC 62271-1, 41; IEC 62271-200, 17)

Nykyisin sähköjakeluverkossa käytetään ilma- tai SF_6 -eristeisiä koteloituja kojeistoja ja kytkinlaitoksia. Tehdasvalmisteiset sisälle asennettavat 1-52 kV vaih-

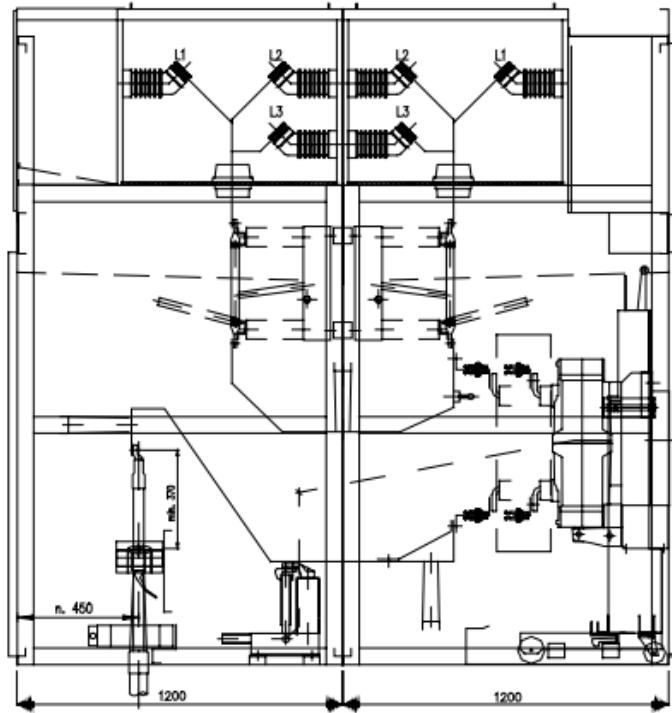
tojännitekojeistoja koskee standardi IEC 62271-200. Nämä kojeistot ovat suunniteltu käytettäväksi normaaleissa sisäasennusolosuhteissa. Tällä tarkoitetaan, että maksimilämpötila käyttöpaikalla on +40 °C. Käyttölämpötilan minimiarvolle on taas kolme eri luokkaa -5, -15 tai -25 °C. Tämän lisäksi kojeistojen käyttöpaikalle annetaan vaatimukset myöskin suhteelliselle ilmankosteudelle. (Elovaara & Haarla 2011b, 120)

Kojeistotyypit jaetaan ulkokuoren materiaalin perusteella eristysainekuorisiin ja metallikuorisiin kojeistoihin. Näistä metallikuoriset kojeistot ovat eniten käytössä olevia kojeistoja. Edelleen metallikuoriset kojeistot jaetaan kojeiston sisäisen toteutuksen ja osastoinnin mukaan kolmeen alalajiin: metallikoteloidut-, tilakoteloidut- ja kennokoteloidut kojeistot. Metallikoteloidussa ja tilakoteloidussa kojeistossa kokoojakiskot, katkaisija ja kunkin lähdön kojeet ovat omissa tiloissaan, mutta erona näissä on se, että metallikoteloidussa kojeistossa tilojen välinen osastointi on toteutettu maadoitetulla metallilla ja tilakoteloidussa kojeistossa tilojen välinen osastointi on kokonaisuudessaan tai osittain eristysainetta. Kuvassa 24 on esitetty poikkileikkauskuva metallikoteloidusta kojeistosta. (Elovaara & Haarla 2011b, 120-121)



KUVA 24. Metallikoteloitu UTU MC24 kojeisto. Kyseisessä rakenteessa kokoojakiskosto on omana osastonaan. Rakenne on lisäksi kaikilta osin lämpökuvattavissa sekä paineenpurkauskanavisto on integroitu kojeistorakenteeseen. (UTU)

Muun tyyppiset kojeistot ovat kennokoteloituja kojeistoja. Kennokoteloituissa kojeistoissa kokoojakiskot, katkaisija, mittamuuntajat ja kaapelipäätteet sijaitsevat samassa tilassa, mutta kennojen välissä on kuitenkin väliseinät. Itse kokoojakiskotila voi olla joko koteloimaton tai koteloitu ja kiskosto voi olla rakennettu tukieristimien varaan ja kennojen välillä voi olla läpivientieristimet. Kuvassa 25 on esitetty poikkileikkauskuva kennokoteloitusta kaksoiskiskokojeistosta. (Elovaara & Haarla 2011b, 122)



KUVA 25. Kennokoteloitu UTU C24 kojeisto. Kojektorakenne on kaikilta osin lämpökuvattavissa ja rakenteeseen on integroitu paineenpurkausjärjestelmä. Kyseinen kojeisto voi olla joko yksikisko-, kaksoiskisko- tai duplex-kojeisto. (UTU)

Henkilöturvallisuuden kannalta metallikoteloitu kojeisto on turvallisempi vaihtoehto kuin kennokoteloitu kojeisto. (Elovaara & Haarla 2011b, 122)

5.2.3 Puistomuuntamot

Puistomuuntamon perusidea on se, että sen sisään asennettu jakelumuuntaja syöttää pienjänniteverkkoa muuntaen keskijännitteen yleensä 400 V:n tasolle. Puistomuuntamon kustannukset ja koko riippuvat voimakkaasti muuntamotyypistä. Yleisesti taajamia syöttävät isotehoiset jakelumuuntajat ovat isomman tehonsa ja ympäristövaatimusten vuoksi kalliimpia kuin haja-asutusalueelle soveltuvat muuntamot. Pienjänniteverkon vikavirta- ja ylikuormitussuojaus toteutetaan myöskin puistomuuntamolla. (Lakervi & Partanen 2008, 157)

Puistomuuntamon oikosulkukestoisuuden mitoitussarvot ovat määritetty standardissa IEC 62271-202. Tällöin standardin IEC 62271-1 vaatimukset eivät ole suoraan soveltuvia valmiiseen puistomuuntamoasennukseen. Standardin IEC

62271-202 mukaan puistomuuntamon nimellinen oikosulkukestoisuus I_k ja I_{ke} ovat oikosulkuvirran tehollisarvot, jotka puistomuuntamon korkeajännitekojeiston ja ohjauslaitteiden, korkeajännitevirtateiden ja maadoituspiirien tulee kestää määritellyn ajan määrätyissä olosuhteissa. Tämä määritelmä on sama kuin IEC 62271-1 kohta 4.5 muutamalla lisäyksellä. Lisäykset vaativat nimellisen oikosulkukestoisuuden I_k määrittämisen myöskin korkeajännitekojeistolle, sekä syöttökaapelille ja nimellinen oikosulkukestoisuus maasulussa I_{ke} tulee määrittää korkeajännitteen maadoituspiirille. Näiden lisäksi pienjännitepuolen keskuksen ja kaapelointien tulee täyttää standardin SFS 61439-1 kohdan 5.3.4 vaatimukset. (IEC 62271-202, 19-20)

Standardin IEC 62271-1 kohdan 4.6 vaatimukset eivät ole suoraan voimassa puistomuuntamoasennuksien nimellisoikosulkuvirran huippuarvon osalta. Korkeajännitekojeiston, ohjauslaitteiden, korkeajännitevirtateiden ja maadoituspiirien osalta standardin IEC 62271-1 kohdan 4.6 vaatimukset ovat voimassa muutamalla lisäyksellä. Lisäykset vaativat nimellisoikosulkuvirran huippuarvon kestoisuuden määrittämisen kaikille pääpiirissä oleville sarjaan kytketyille komponenteille. Nimellisoikosulkuvirran huippuarvon kestoisuus tulee myöskin määrittää maadoituspiirille, tosin tämä arvo voi poiketa pääpiirille määritellystä arvosta. Näiden lisäksi pienjännitepuolen keskuksien ja kaapelointien tulee täyttää standardin SFS 61439-1 kohdan 5.3.3 vaatimukset. (IEC 62271-202, 20)

Puistomuuntamon oikosulkukestoisuuksien kestoajojen standardin mukaisista vaatimuksista standardissa IEC 62271-202 sanotaan pääpiirteittäin siten, että korkeajännitepuolen ajat määrittävät standardin IEC 62271-1 kohta 4.7 sillä laajennuksella, että niiden tulee huomioida myös virtatiet. Vastaavat määräykset pienjännitepuolelle tulee vastaavasti täyttää standardin SFS 64139-1 kohdan 5.3.4 mukaiset vaatimukset ja ne koskevat myös pienjännitepuolen virtateitä. (IEC 62271-202, 20-21)

5.3 Oikosulkukestoisuuden määrittäminen

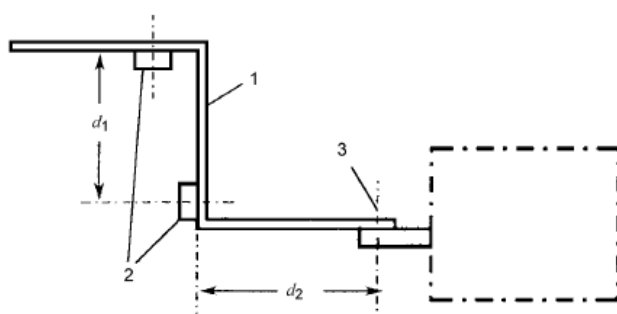
Edellä todettiin, että sähkökeskuksille, kojeistoille ja puistomuuntamoille tulee määrittää oikosulkukestoisuudet, jotka tulee myöskin näkyä näiden arvokilvissä. Tämän vuoksi standardit määrittävät sen, kuinka oikosulkukestoisuudet tulee kullekin keskustyypille määrittää.

5.3.1 Pienjännitekeskukset

Pienjännitekeskuksia koskevassa standardissa SFS 61439-1 määritetään tavat, joilla keskusten rakenteet voidaan todentaa oikosulkukestoisiksi. Kyseinen todentaminen voidaan tehdä joko vertaamalla referenssirakenteeseen tai testaamalla. Mikäli keskusjärjestelmä sisältää useita rakennevaihtoehtoja, tulee kaikkein vaativin rakenne testata. Kuitenkin keskuksille, joiden lyhytaikainen mitoitusvirta tai ehdollinen oikosulkuvirta ei ylitä 10 kA tehollisarvona ja jotka on suojattu virtaa rajoittavilla laitteilla, joiden rajoittama oikosulkuvirran huippuarvo syöttöpiirin liittimissä ei ylitä 17 kA ei tarvitse määrittää oikosulunkestoisuutta. Tällöin riittää, että keskuksen liitântäarvoissa on maininta näistä arvoista. Tällöin keskusta ei saa liittää verkkoon, jossa voi esiintyä suurempia oikosulkuvirtoja. (SFS 61439-1, 130)

Mikäli oikosulkukestoisuus tehdään todentamalla referenssirakenteeseen, tällöin verrataan todennettavaa keskusta jo testattuun rakenteeseen. Vertaus voidaan tehdä joko laskemalla tai käyttäen standardinmukaista tarkistuslistaa. Ei testattua kiskorakennetta voidaan verrata testattuun kiskorakenteeseen laskemalla. Tällöin ei-testatun kiskorakenteen oikosulkukestoisuus johdetaan testatusta rakenteesta soveltaen standardin IEC 60851-1 mukaisia laskelmia kumpaankin rakenteeseen. Ei-testatun rakenteen oikosulkukestoisuus katsotaan todennetuksi, jos laskelmat osoittavat, että ei-testatun rakenteen ei tarvitse kestää suurempia mekaanisia ja termisiä rasituksia kuin verrattavan testatun rakenteen. (SFS 61439-1, 130-132)

Standardia IEC 60851-1 käytetään ainoastaan suoriin kiskorakenteisiin. Tarpeen tullen kulmilla varustettuja kiskoja voidaan käsitellä sarjana suorita kiskoja, joiden kulmat ovat tuetut. Kyseinen periaate on esitetty kuvassa 26.



KUVA 26. Kulmilla varustetun kiskon periaatteellinen käsittely laskennassa. (SFS 61439-1)

Kuvassa 27 on esitetty taulukko, jonka mukaan voidaan verrata ei-testattua kiskorakennetta jo testattuun kiskorakenteeseen. Jos joku tarkistuslistassa määritetty tekijä ei täytä tarkistuslistassa olevia vaatimuksia ja merkitään ”ei”, pitää kyseinen kohta todentaa joko laskemalla tai testaamalla standardinmukaisesti. SFS 61439-1, 130)

Kohta Nro.	Tarkasteltavat vaatimukset	KYLLÄ	EI
1	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen kunkin piirin oikosulun kestävyys arvo pienempi tai yhtä suuri kuin referenssirakenteella?		
2	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen kiskoja ja liitosten poikkipinta-ala suurempi tai yhtä suuri kuin referenssirakenteella?		
3	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen kiskoja ja liitosten keskiviivojen välinen etäisyys suurempi tai yhtä suuri kuin referenssirakenteella?		
4	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen kiskoja tukien tyyppi, muoto ja materiaali samanlainen ja niiden keskiviivojen välinen etäisyys toistaan koko kiskon pituudella sama tai pienempi kuin referenssirakenteella? Onko kiskokannattimien tukirakenteet samaa rakennetta ja mekaanisesti yhtä lujia?		
5	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen jokaisen piirin johtimien materiaalit ja materiaalien ominaisuudet samoja kuin referenssirakenteella?		
6	Ovatko jokaisen vertailtavan keskuksen jokaisen piirin oikosulkusuojat samanlaiset, so. sama rakenne ^a , samat tai paremmat rajoitusominaisuudet (I^2t , I_{pk}) valmistajan tietoihin perustuen ja sama järjestely kuin referenssirakenteella?		
7	Onko jokaisen vertailtavan keskuksen suojaamattomien virtapiirien suojaamattomien jännitteisten johtimien pituus, kohdan 8.6.4 mukaisesti lyhyempi tai yhtä pitkä kuin referenssirakenteella?		
8	Jos vertailtava keskus sisältää kotelon, onko referenssirakenne testattu kotelon kanssa?		
9	Onko vertailtavan keskuksen kotelon rakenne ja tyyppi samoja ja onko sillä vähintään samat mitat kuin vertailurakenteella?		
10	Onko vertailtavan keskuksen kunkin piirin kotelon rakenne ja tyyppi samoja ja onko sillä vähintään samat mitat kuin vertailurakenteella?		
"Kyllä" kaikkiin vaatimuksiin – ei tarvita lisätodentamista.			
"Ei" johonkin vaatimukseen – vaaditaan lisätodentamista.			
^a Oikosulkusuojat, jotka ovat saman valmistajan, mutta eri sarjaa, voidaan pitää samanlaisena jos laitevalmistaja ilmoittaa suorituskykyarvojen olevan samoja tai parempia kaikissa olennaisissa suhteissa esim. katkaisukyky ja rajoitusominaisuudet (I^2t , I_{pk}) ja kriittiset etäisyydet, verrattuna todentamisessa käytettyihin.			

KUVA 27. Standardin SFS 61439-1 mukainen tarkistuslista ei-testatun rakenteen vertaamiseen testattuun rakenteeseen. (SFS 61439-1)

Oikosulkukestoisuuden todentaminen testaamalla tapahtuu siten, että testattava rakenne ja osat on asennettava normaalia käyttöä vastaavalla tavalla ja yhden toimintayksikön testaaminen riittää, jos muut toimintayksiköt ovat rakennettu vastaavalla tavalla. (SFS 61439-1, 132)

Jos testipiirissä käytetään sulakkeita, on valittava sulakkeet, joiden rajoittama virta on suurin ja tarvittaessa on käytettävä keskuksen valmistajan ilmoittamia sulaketyyppejä. Keskuksen testauksessa tarvittavilla oikosulkukytkennoillä ja syöttöjohtimilla on oltava riittävä oikosulkukestoisuus ja ne on järjestettävä siten, ettei niiden toimesta aiheudu lisärasituksia keskukseseen. Jos toisin ei sovita, keskukseseen syötetään oikosulkuvirtaa syöttöyksikön liittimiin ja kolmivaiheiset keskuksat kytketään kolmivaiheisesti. (SFS 61439-1, 132)

Keskuksen pääpiirit tulee testata suurimmilla termisillä ja dynaamisilla rasituksilla, jotka voivat aiheutua oikosulkuvirroista mitoitusarvoon asti. Keskuksat, joissa on pääkiskot, eli kokoojakiskot, sisältävät keskuksat tulee testata, jotta voidaan osoittaa pääkiskojen ja syöttöpiirin oikosulkukestoisuus. Jos kiskoja on tarkoitus jatkaa, tulee testissä olla mukana vähintään yksi jatkoliitos. Testissä oikosulku tulee sijoittaa kiskostoon siten, että testissä mukana olevien pääkiskojen pituus on $(2 \pm 0,4)$ m. Mitoituskeston ja sen huippuarvon todentamiseksi tätä etäisyyttä voidaan kasvattaa ja testaus suoritetaan millä tahansa sopivalla jännitteellä sillä ehdolla, että testivirta on mitoitusarvon suuruinen. Keskusrakenteen ollessa sellainen, että testattavan kiskorakenteen pituus on alle 1,6 m, eikä keskuksen kiskostoa ole tarkoitettu jatkettavaksi, kiskojen koko pituus tulee testata siten, että oikosulku muodostetaan kiskojen päihin. Jos kiskojärjestelmä koostuu tämän lisäksi erilaisista osista, kuten poikkipinnan, kiskojen keskiviivojen etäisyyksien, tukien tyyppin ja lukumäärän pituusyksikköä kohti, tulee kukin osa testata samanaikaisesti tai erikseen. Mikäli kiskot testataan samanaikaisesti, tulee tällöinkin testivirran olla mitoitusvirran suuruinen. (SFS 61439-1, 134)

5.3.2 Keskijännitekojeistot

Keskijännitekojeiston oikosulkukestoisuuden standardinmukaiseen todentamiseen käytetään keskijännitestandardin yleistä osaa IEC 62271-1 sekä kojeistoja koskevaa laajennusosaa IEC 62271-200.

Standardin yleisessä osassa todetaan, että pääpiirit ja soveltuvin osin myöskin maadoituspiirit tulee testata oikosulkukestoisiksi. Oikosulkukestoisuus tulee todentaa sekä nimellisoikosulkukestoisuusvirralla sekä oikosulkuvirran huippuarvolla. Testi tulee tehdä kojeiston nimellistaajuudella tai enintään ± 10 Hz poikkeamalla. Kojeisto tulee asentaa testin ajaksi omalle alustalleen ja kytkinlaitteiden tulee olla johtavassa tilassa. Testauksen aikana ei myöskään saa tapahtua kytkinlaitteiden avautumisia. Testi toteutetaan joko kolmi- tai yksivaiheisena. Mikäli testattava kojeisto on kolmivaiheinen ja testaus suoritetaan yksivaiheisena, tulee tällöin kaksi vierekkäistä vaihetta kytkeä sarjaan testin ajaksi. Testikaapelit tulee kytkeä siten, etteivät ne aiheuta turhia lisärasituksia kojeistoon. Tämän lisäksi kojeistovalmistaja määrittää testikaapelin lähimmät tuentapisteen kojeistoon nähden. (IEC 62271-1, 71-72)

Testivirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvon tulee olla sama kuin kojeiston nimellisoikosulkuvirtakestoisuuden ja virran huippuarvo kolmivaiheisen kojeiston uloimmissa vaiheissa taas ei saa olla alle 5 % kojeiston nimellisoikosulkuvirtakestoisuuden huippuarvosta. Toisaalta kyseinen huippuarvo ei saa myöskään olla yli 5 % nimellisarvosta. Kolmivaihekojeistoissa testivirran tulee myöskin jakautua tasaisesti, eikä yhdenkään vaiheen virta saa alittaa 10 % virtojen keskiarvosta. (IEC 62271-1, 72)

Testivirran I_t kestoajan t_t tulee olla sama kuin kojeistolle tyypitetty oikosulkukestoisuus aika t_k . Jos testin $I_t^2 \times t$ arvoa ei pystytä muuten todentamaan, tulee se silloin määrittää oskillogrammin avulla käyttäen standardin IEC 62271-1 liitteen B menetelmää. (IEC 62271-1, 72)

Kojeiston tulee kestää oikosulkuvirran tehollis- ja huippuarvo ilman mekaanisia vaurioita ja virtateiden liitosten avautumisia. Oikosulkukokeessa ei ole myöskään

annettu maksimilämpötilalle arvoa virtateille tai niiden viereisille osille. Olisi kuitenkin suotavaa, että kyseisiin osiin ei syntyisi vaurioita. Jotta oikosulkukestoisuuskoetta voidaan katsoa standardinmukaisesti onnistuneeksi, ei kojeistossa eikä ohjauskotelossa saa näkyä merkityksellistä heikkenemistä. Kojeston tulee myös pystyä toimimaan ja kestämään nimellisvirran vaikutukset normaalisti. Jännitelujuuksien tulee säilyä normaalina ja mikäli liittimille on annettu virran katkaisutai kytkentäarvot, niiden pitää olla voimassa myöskin oikosulkukokeen jälkeen. Nämä vaatimukset voidaan todeta täytetyksi, jos pääpiirin kytkin saadaan avattua heti kokeen jälkeen ja liitokset aukeavat ensimmäisellä yrityksellä. Pääpiirien ylimenovastukset eivät saa kasvaa suuremmaksi. Jos ylimenovastus nousee kuitenkin 20 %, eikä aistinvaraisesti pystytä todentamaan liitosten toimivuutta, ylimääräinen lämpenemäkoetta tulisi tällöin järjestää. (IEC 62271-1, 72)

Metallikoteloituja kojeistoja koskeva standardi IEC 62271-200 laajentaa oikosulkukestoisuuskoetta koskemaan kojeiston pääpiiriä ja tämän vuoksi oikosulkukestoisuuskoeteeseen tulee lisää vaatimuksia. Kojeston pääpiirit tulee testata oikosulkukestoiksi olosuhteissa, joissa ne normaalisti muutenkin olisivat. Kokeen aikana pääpiiriin tulee kytkeä kaikki komponentit, jotka voivat vaikuttaa oikosulkukestoisuuteen mutta apupiiriliitännöjen ei kuitenkaan tarvitse olla kytkettyinä. Näitä liitännöjä ovat muun muassa jännitemuuntajat, ylijännitesuojat ja jännitteenilmaisimet. Oikosulkukokeen tulee kattaa kaikki vaiheet. Kokeen aikana virtamuuntajat ja laukaisupiirit tulee olla asennettuina, mutta laukaisun tapahtuminen tulee kuitenkin estää. Laitteet, jotka eivät rajoita oikosulkuvirtaa, voidaan koestaa millä tahansa sopivalla jännitteellä, kun taas ne laitteet, jotka rajoittavat oikosulkuvirtaa, tulee koestaa kojeiston nimellisjännitteellä. Oikosulkukoe tulee tehdä myös kojeiston maadoituspiirille. (IEC 62271-200, 37)

Oikosulkukestoisuuskoetta tulee suorittaa siten, kojeistolla on epäedullisimmat olosuhteet kestää oikosulku. Tämä tarkoittaa sitä, että oikosulkukokeen oikosulku-piirissä tulee olla pisin tukematon väli kiskostoa. Testikaapelit eivät kuitenkaan saa aiheuttaa tarpeetonta lisärasitusta kojeistolle. (IEC 62271-200, 38)

5.3.3 Puistomuuntamot

Standardi IEC 62271-202 määrittää kuinka puistomuuntamoiden oikosulkukestoisuus tulee todentaa. Koska korkeajännitekojeisto, muuntaja ja pienjännitekeskukset ovat jo standardinmukaisesti tyyppitestatut, koskee tämä lisäys vain korkea- ja pienjännite virtateitä. Tosin tyyppitestattuja korkea- ja pienjännite virtateitä ei tarvitse testata, jos asennusolosuhteet eivät vaikuta niiden oikosulkulujuuteen alentavasti. Tyyppitestaamattomat korkeajännitevirtatiet tulee testata standardin IEC 62271-1 mukaisesti. Tämän lisäksi standardi IEC 62271-202 laajentaa testauksen vaatimuksia. Oikosulkuvirta tulee syöttää siten, että koko korkeajännitepuoli tulee testattua ja kaikkien kytkinlaitteiden tulee olla toiminta-asennossa. Testivirta voidaan syöttää korkeajännitekojeistosta. Mikäli korkeajännitepuoli on suojattu virtaa rajoittavilla laitteilla, tulee testi tällöin suorittaa nimellisjännitteellä. Maadoituspiiri tulee myös testata. Tyyppitestattuja komponentteja ei tarvitse erikseen testata. Eikä runkoliitoksia ja ovien saranoitakaan tarvitse erikseen testata, mikäli ne voidaan muutoin todentaa riittävän johtaviksi. Pienjännitepuolen tyyppitestaamattomat virtatiet tulee testata standardin SFS 61439-1 mukaisesti. Oikosulkuvirtaa syötetään siten, että koko pienjännitepuoli tulee testattua aina muuntajan napoihin asti ja kaikkien kytkinlaitteiden tulee tällöinkin olla toiminta-asennossa. (IEC 62271-202, 43)

6 POHDINTA

Opinnäytetyön keskeinen tavoite oli tehdä laaja selvitys oikosulun synnystä ja oikosulkuvirran ominaispiirteistä. Tämän lisäksi epäsymmetristen vikojen, kuten yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkuvirtojen mallintamisen helpottamiseksi esiteltiin tähän soveltuvien symmetristen komponenttien käyttöä laskennassa.

Oikosulkuvirtojen aiheuttamien voimien suuruuksia ja näiden vaikutuksia jäykkään kiskoon tutkittiin standardin IEC 60865-1 mukaisesti. Standardin mukaan voidaan tarkastella, että kykeneekö jokin tietty kiskojärjestelmä kestämään oikosulun vaikutukset. Nämä tarkastelut voidaan suorittaa standardinmukaisilla testauksilla tai tilanteesta riippuen myöskin laskennallisesti.

Tässä työssä selvitettiin myöskin sitä, miten pienjännitekeskusten standardi SFS 61439, keskijännitekojeistojen standardi IEC 62271-200, sekä puistomuuntamoita koskeva standardi IEC 62271-202 määrittävät kyseisten rakenteiden oikosulkukestoisuudet ja kuinka ne voidaan standardin mukaisesti tyyppitestata.

LÄHTEET

ABB, 2011, Switchgear manual 12 th edition, Germany

ABB,2000, TTT-Käsikirja, Vaasa ABB

CIGRE, Technical Brochure No. 105 Mechanical effects of short circuit currents in oper air substation 2002

Elovaara J. & Haarla L. 2011a, Sähköverkko 1. Helsinki. Otatieto.

Elovaara J. & Haarla L. 2011b, Sähköverkko 2. Helsinki. Otatieto.

Hautaniemi O. Sähkönsiirtoon tarkoitettujen rakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Rakennustekniikan koulutusohjelma, Diplomityö

Hirvonen R. 2010, Sähköaseman ensiöpuolen suunnittelussa käytettävien laskentamenetelmien kehittäminen. Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, Aalto-yliopisto, Diplomityö.

Huotari K. & Partanen J. 1998, Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Opetusmoniste.

IEC 60865-1 Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods. Edition 3.0 2011

SFS-EN 61439 Pienjännitekeskukset Osa 1: Yleiset vaatimukset. 2013.

IEC 62271-1 High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications. Edition 1.0 2007

IEC 62271-200 High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV Edition 1.0 2007

IEC 62271-202 High-voltage switchgear and controlgear - Part 202: High-voltage/low-voltage prefabricated substations. Edition 1.0 2007

Lakervi E. & Partanen J. 2008, Sähkönjakelutekniikka. Helsinki. Otatieto.

Salminen P. 2009, Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut, Sähkötekniikan koulutusohjelma, Tampereen teknillinen yliopisto, Diplomityö.

Voipio E. 2002, Virtapiirit ja verkot, Helsinki. Otatieto.

LIITTEET

Liite 1. Minimi- ja maksimioikosulkuvirrat keskuksen kiskostossa

1(3)

Muuntajan tiedot

Ensiöjännite U_1	20500	[V]
Toisiojännite U_2	410	[V]
Nimellisteho S_n	800000	[VA]
Kuormitushäviöt P_k	8400	[W]
Suhteellinen oikosulkuimpedanssi z_k	0,06	
Nollaresistanssi R_{m0}	0,0021	[Ω]
Nollareaktanssi X_{m0}	0,0096	[Ω]

Keskusta syöttää 2 x AXMK 4x300 S

Kaapelin tiedot

Vaihejohtimen resistanssi (20 °C) pituusyksikköä kohden R_j	0,114	[Ω /km]
Nollajohtimen resistanssi (20 °C) pituusyksikköä kohden R_0	0,114	[Ω /km]
Vaihejohtimen reaktanssi pituusyksikköä kohden X_j	0,079	[Ω /km]
Vaihejohtimen nollareaktanssi pituusyksikköä kohden X_{j0}	0,079	[Ω /km]
Nollajohtimen reaktanssi pituusyksikköä kohden X_0	0,079	[Ω /km]
Kaapelin pituus l	100	[m]

Muuntajan nimellisimpedanssi toisiosta katsottuna

$$Z_n = \frac{U^2}{S_n} = \frac{(410 \text{ V})^2}{800\,000 \text{ VA}} = 0,2101 \Omega$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi

$$r_k = \frac{P_k}{S_n} = \frac{8400 \text{ W}}{800\,000 \text{ VA}} = 0,0105$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{0,06^2 - 0,0105^2} = 0,059$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi

$$R_k = r_k \times Z_n = 0,0105 \times 0,2101 \Omega = 0,002206 \Omega$$

2(3)

Muuntajan oikosulkureaktanssi

$$X_k = x_k \times Z_n = 0,059 \times 0,2101 \Omega = 0,012396 \Omega$$

Muuntajana oikosulkuimpedanssi

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{(0,002206 \Omega)^2 + (0,012396 \Omega)^2} = 0,012591 \Omega$$

Kaapelin resistanssi (20 °C)

$$R_j = 0,1 \text{ km} \times 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}} = 0,0114 \Omega$$

Rinnan kytkettyjen kaapelin resistanssi (20 °C)

$$R = \frac{0,0114 \Omega}{2} = 0,0057 \Omega$$

Rinnan kytkettyjen kaapelien reaktanssi

$$X = \frac{0,0079 \Omega}{2} = 0,00395 \Omega$$

Rinnan kytkettyjen kaapelien nolhareaktanssi

$$X_0 = \frac{0,079 \Omega}{1002} = 0,00395 \Omega$$

Rinnan kytkettyjen kaapelien resistanssi (70 °C)

$$R = (1 + \alpha_{20}(v - 20 \text{ °C}))R_{20} = \left(1 + 0,004 \frac{1}{\text{°C}}(70 \text{ °C} - 20 \text{ °C})\right) \times 0,0057 \Omega$$

$$= 0,00684 \Omega$$

Kolmivaiheinen maksimioikosulkuvirta keskuksen kiskostossa

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times \sqrt{0,007906^2 + 0,016346^2}} = 12,72 \text{ kA}$$

Kolmivaiheinen minimioikosulkuvirta keskuksen kiskostossa

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{0,95 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times \sqrt{0,009046^2 + 0,016346^2}} = 14,08 \text{ kA}$$

Kaksivaiheinen maksimioikosulkuvirta olettaen, myötä- ja vastaimpedanssit yhtä suuriksi

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{2\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1 \times 400 \text{ V}}{2 \times \sqrt{0,007906^2 + 0,016346^2}} = 11,01 \text{ kA}$$

Kaksivaiheinen minimioikosulkuvirta olettaen, myötä- ja vastaimpedanssit yhtä suuriksi

3(3)

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{2\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{0,95 \times 400 \text{ V}}{2 \times \sqrt{0,009046^2 + 0,016346^2}} = 10,71 \text{ kA}$$

Yksivaiheinen maksimioikosulkuvirta

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

joka voidaan esittää myös muodossa

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3(R_j + R_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + (2X_j + X_{v0} + 3X_0))^2}}$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \times 1 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{(2 \times 0,002206 + 0,0021 + 3(0,0057 + 0,0057))^2 + (2 \times 0,012396 + 0,0096 + (2 \times 0,00395 + 0,00395 + 3 \times 0,00395))^2}}$$

$$= 9,77 \text{ kA}$$

Yksivaiheinen minimoikosulkuvirta

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \times 0,95 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{(2 \times 0,002206 + 0,0021 + 3(0,009046 + 0,009046))^2 + (2 \times 0,0124 + 0,0096 + (2 \times 0,00199 + 0,0026 + 3 \times 0,0019))^2}}$$

$$= 7,83 \text{ kA}$$