



KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS

Rami Kaunola

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan
suuntautumisvaihtoehto
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

KAUNOLA, RAMI
Keskijänniteverkon suojaus

Opinnäytetyö 30 sivua
Toukokuu 2014

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin keskijänniteverkon suojausta, niin oiko- kuin maasulku-tilanteissa. Opinnäytetyö on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun opinnäytetyöpajassa. Opinnäytetyössä perehdyttiin keskijänniteverkon suojaukseen ja erityisesti releiden käyttämiseen suojauksessa.

Työn alussa käsiteltiin suojauksen teoriaa, jonka pohjalta keskijänniteverkon suojaus toteutetaan. Teoriaosuudessa käytiin läpi mitä lakeja ja standardeja tulee noudattaa suojausta toteutettaessa. Suojauksen toteutuksessa käsiteltiin selektiivisyyttä, jälleenkytkentäsekvenssejä ja Suomessa yleisesti käytettyjä suojareleitä. Opinnäytetyössä esitellään myös yhden laitetoimittajan releen tuote-esittelyn.

Oiko- ja maasulkusuojausten toteuttamisen osuudessa tarkasteltiin verkon sähkötekniisten tietojen laskentaa ja releiden asetteluissa huomioon otettavia seikkoja. Oikosulkusuojausten on toimittava selektiivisesti ja nopeasti, jotta ihmisille, eläimille ja laitteistolle aiheutuva vaara poistetaan mahdollisimman nopeasti. Suomessa huonot maadoitusolosuhteet tuovat mukanaan maasulun aikana esiintyviä vaarallisia kosketus- ja askeljänniteongelmia. Kosketus- ja askeljännitteitä voidaan pienentää paremmalla maadoituksella, laukaisuajan laskemisella tai pienentämällä maasulkuvirtaa. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää käyttämällä sammutettua verkkoa.

Oikein aseteltu suojaus vähentää ihmisille, eläimille ja aineistolle aiheutuvaa vaaraa sekä parantaa sähkönjakelun laatua ja toimintavarmuutta. Suomessa keskijänniteverkoissa erityispiirteitä ovat muuntajan tähtipistemaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen sekä säteittäisen verkon käyttäminen. Tähtipistemaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen tekee maasulkuviasta oikosulusta poikkeavan vian. Kun käytetään säteittäistä verkkoa, voidaan oikosulkusuojausten selektiivisyys toteuttaa yksinkertaisemmin.

ABSTRACT

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

KAUNOLA, RAMI:
Medium Voltage Grid Protection

Bachelor's thesis 30 pages
May 2014

The purpose was to study short circuit and earth fault problems in medium voltage distribution networks. This thesis was made for Tampere University of Applied Sciences. The aim of the thesis was to get acquainted with the protection system and protection settings in a medium voltage grid. The study especially concentrates on relay protection.

First the theory of the protection was discussed, which is necessary to know when setting up medium voltage grid protection. Laws and standards that have to be followed when setting up protection were reviewed. Setting up protection part covered non-unit protection, automatic reclosing equipment and commonly used protective relays in Finland. The thesis also includes one relay representation of one product manufacturer.

Electrical variables of medium voltage distribution grid and the issues which have to be considered when setting up short circuit and earth-fault protection for grid were also studied. Short circuit protection has to operate fast and be selective that faults do not harm people, animals or cause equipment fails. Finland's poor earthing conditions cause dangerous step and touch voltages during earth faults. Step and touch voltages can be lowered by improving earthing, lowering tripping time or lowering earth-fault current. Earth fault current can be lowered by using resonant earthed neutral system.

Correctly installed protection system decreases the hazard to people, animals, equipment and improves stability and quality of distribution. Special features of Finland's medium voltage distribution are lack of star point earthing and neutral wire of transformer. Because of this earth fault is different from short circuit fault.

Key words: medium voltage, relay protection

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SUOJUKSEN PERUSTEET	7
2.1	Suojalaitteet	7
2.2	Vikaantunut verkonosa	8
2.3	Selektiivisyys	9
2.4	Jälleenkytkentäsekvenssit	10
2.5	Ylivirtarele	11
2.6	Distanssirele.....	13
2.7	Differentiaalirele	15
2.8	Nollavirtareleet ja suunnatut maasulkureleet.....	15
3	OIKOSULKUSUOJAUS	17
3.1	Alkuoikosulkuvirta ja jatkuvuustilan oikosulkuvirta.....	18
3.2	Releiden asettelut	18
3.3	Käsin laskenta	19
4	MAASULKUSUOJAUS.....	22
4.1	Kosketusjännitteet maasulun aikana	22
4.2	Maasta erotettu verkko.....	23
4.3	Sammutettu verkko	25
4.4	Maasulkusuojauksen toteuttaminen	26
5	VAMP 50 LAITE-ESITTELY	27
5.1	Käyttjäystävällisyys	27
5.2	laajennettavuus.....	28
5.3	Suojaustoiminnot	28
6	LOPPUSANAT	29
	LÄHTEET.....	30

LYHENTEET JA TERMIT

AJK	aikajälleenkytkentä
C	kapasitanssi
I	virta
L	induktanssi
PJK	pikajälleenkytkentä
R	resistanssi
t	aika
U	jännite
X	reaktanssi
Z	impedanssi

Alaindeksit

0	alkuhetki, tyhjäkäynti
f, F	vika
j	johdin
k	oikosulku, kuormitus
m	maadoitus, muuntaja
max	maksimi, suurin sallittu
n	nimellinen
tp	kosketus
v	vaihe

1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkoituksena perehtyä keskijänniteverkon oikosulku- ja maasulkusuojamiseen. Työn teoria osuudessa käydään läpi suojauksen perusteita, Suomessa käytettyjen verkkojärjestelmien erityispiirteitä, vian aikaisia vaaratilanteita ja haittoja, selektiivisyyttä, jälleenkytkentäsekvenssejä ja suomessa yleisimmin käytettyjä suojareleitä.

Oikosulkusuojauksen toteutuksen osalta tutkitaan oikein toteutetun suojauksen periaatteita ja hyötyjä. Työssä tutkitaan mitä asioita suojattavasta verkosta tulee tietää, jotta relesuojauksen voidaan toteuttaa. Hyvin toteutetulla oikosulkusuojauksella estetään henkilövahingot, johtojen ja laitteiden ylikuumentumiset ja sähköjakelun häiriöt ja keskeytykset.

Suomen keskijänniteverkossa on erityispiirteinä maasta erotetun- ja sammutetun verkon käyttäminen, tämä johtuu suomen maaperän huonoista maadoitusolosuhteista. Nämä erityispiirteet tekevät maasulusta luonteeltaan eriävän vian oikosulkuvirrasta ja vaikeuttavat hieman maasulkusuojauksen toteuttamista. Maasulun aikana esiintyy vaarallisia askel- ja kosketusjännitteitä, jotka ovat hengenvaarallisia ihmisille ja eläimille.

2 SUOJAUKSEN PERUSTEET

Suomessa keskijänniteverkon suojukselle asetetut vaatimukset löytyvät sähköturvallisuusstandardeista mm. SFS 6001. Sähköyhtiöiden on täytettävä nämä standardit. Suojuksella ja siihen liittyvällä automaatiolla voidaan myös huomattavasti parantaa sähkönjakelun luotettavuutta. Suomessa keskijänniteverkon erityispiirteinä ovat säteittäinen syöttötapa sekä tähtipistemaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen. Säteittäisen verkon käyttö yksinkertaistaa selektiivisen suojuksen toteuttamista. Tähtipistemaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen tekee maasulun luonteeltaan oikosulusta poikkeavan vian, jolloin sen tunnistaminen ja paikantaminen vaatii omat tekniikkansa. (Lakervi & Partanen 2008, 176)

2.1 Suojalaitteet

Verkon laitteita suojaa kokonaisuutena mittamuuntajat, suojareleet ja katkaisijat. Standardin SFS-IEC 60050-448 mukaan suojausjärjestelmä sisältää suojauslaitteet, mittamuuntajat, johdotuksen, laukaisupiirin, teholähteet, tiedonsiirtojärjestelmän ja jälleenkytkentä automatiikan. Standardin mukaan katkaisijat eivät ole osa suojausjärjestelmää. Tiedonsiirto aseman laitteiden välillä hoidetaan johtimilla tai valokuidulla, ajoittain eri asemilla sijaitsevat releet on myös yhdistetty toisiinsa tiedonsiirtojärjestelmällä. Suojuksen toimivuuden kannalta ja vikaantuneen osan erottamiseksi yhteistoiminta laitteiden välillä on tärkeää. (Elovaara & Haarla 2011, 335. SFS-IEC 60050-448)

Suojuksen tehtävä on havaita viat tai epänormaalit olosuhteet verkkojärjestelmässä, jotta viat voidaan korjata tai epänormaalit olosuhteet palauttaa normaaleiksi. Suojarele on osa suojareleistystä ja suojausjärjestelmää. (Elovaara & Haarla 2011, 335-336)

Oikosulku- tai maasulkuvian ilmennyttyä vikaantunut verkon osa on erotettava muusta järjestelmästä, jotta ei aiheudu vaaraa hengelle, terveydelle ja omaisuudelle tai oikosulkuvirran aiheuttamia laiterikkoontumisia. Sähköturvallisuuslain 410/1996 toisen luvun viidennen pykälän mukaan sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava, sekä käytettävä ja huollettava niin, että:

1. niistä ei aiheudu vaaraa kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle;
2. niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä; sekä

3. niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. (Elovaara & Haarla 2011, 336)

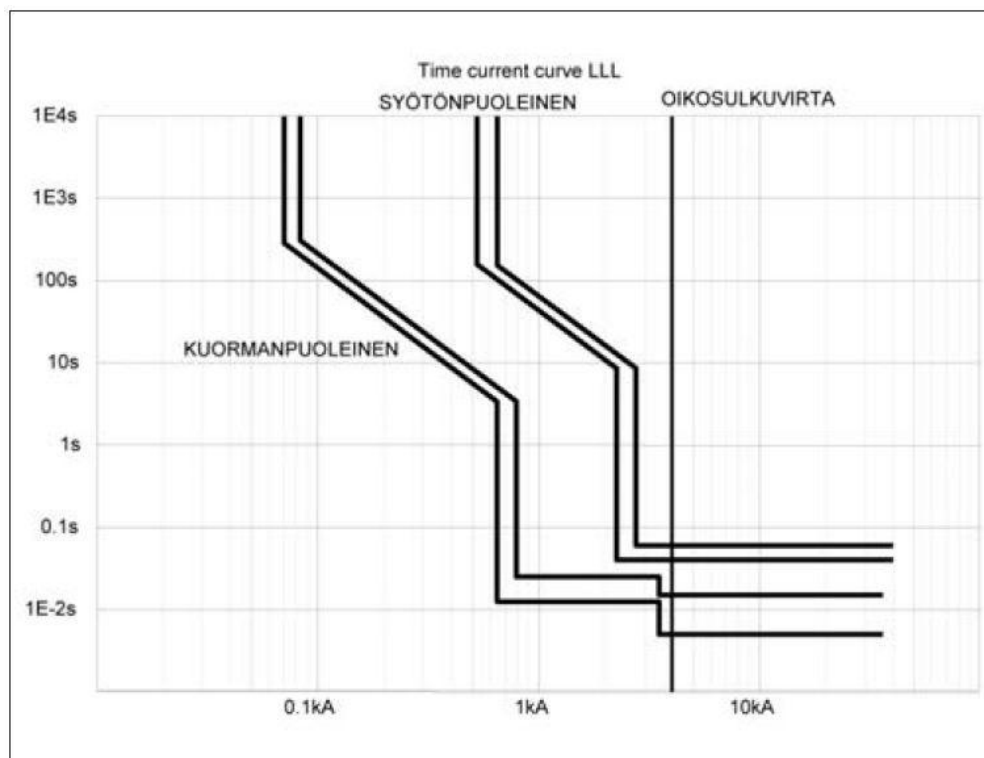
2.2 Vikaantunut verkonosa

Suojauksen irrotettua verkon vikaantunut osa, muun verkon osalta tehonsiirto voi jatkua. Vikavirrat oiko- ja maasulkuvioissa ovat usein suuria, jolloin vikaantunut osa on irrotettava verkosta nopeasti. Vikaantunut verkon osa voi aiheuttaa vaaraa ihmisille ja eläimille, sekä hajottaa laitteistoja tai vahingoittaa omaisuutta. Verkon suojaaminen releillä edesauttaa verkon jännitteen laatua ja taloudellisuutta. Laatuun vaikuttavat jännitekuoppien kesto ja johtojen nopea käytönpalautus. Käytönpalautus voidaan toteuttaa jälleenkytkentäreleistyksellä. Taloudelliset menetykset vähenevät, kun viallinen verkon osa irrotetaan mahdollisimman nopeasti ja näin turvataan verkon mahdollisimman laaja käyttö. Syitä miksi viallinen osa on irrotettava muusta verkosta:

- Vikavirran lämpövaikutukset ihmisille ja eläimille tai laitteistoille, sekä tulipalovaara. Erityisesti valokaaren paine- ja lämpövaikutukset ovat hengenvaarallisia.
- Maasulun aikainen maassa kulkevan virran vaarallisuus ihmisille ja eläimille. Suomessa maan ominaisvastus on suuri, mikä aiheuttaa vikapaikan läheisyydessä laajalle alueelle suuren askel- ja kosketusjännitteen.
- Sähköaseman vaaralliseksi nouseva potentiaali maasulun aikana.
- 400kV:n verkossa pitkään jatkunut vika voi aiheuttaa stabiiliuden menetyksen. Generaattorin nopeus kasvaa oikosulun ollessa lähellä sitä, koska jännitekuoppien takia verkon siirtokyky on pienempi. Vian jatkuessa pitkään generaattori ei todennäköisesti pysty palautumaan tahtikäyttöön, jolloin tapahtuu verkosta puutoaminen. Verkko romahtaa useiden generaattorien tiputtua verkosta.
- Pitkään jatkuneet jännitekuopat voivat aiheuttaa tehtaiden prosessien alasajon.
- Maasulkuvirta voi indusoida häiriöjännitettä muihin virtapiireihin. (Elovaara & Haarla 2011, 336-337)

2.3 Selektiivisyys

Selektiivisyys voidaan toteuttaa helpoiten käyttäen aikaselektiivisyyttä. Käytännössä tämä toteutetaan porrastamalla suojauksen toiminta-aikoja (Kuvio 1), jolloin vikaa lähimpänä oleva rele toimii ensin. Aikaselektiivinen suojaus voidaan toteuttaa vakio- tai käänteisaikaisilla ylivirtareleillä. Vakioaikaisella releellä toimintanopeus ei ole riippuvainen mitatun virran suuruudesta, toisin kuin käänteisaikareleellä toiminta on sitä nopeampaa mitä suurempi vikavirta on. (ABB TTT 2000, 7.5.1)

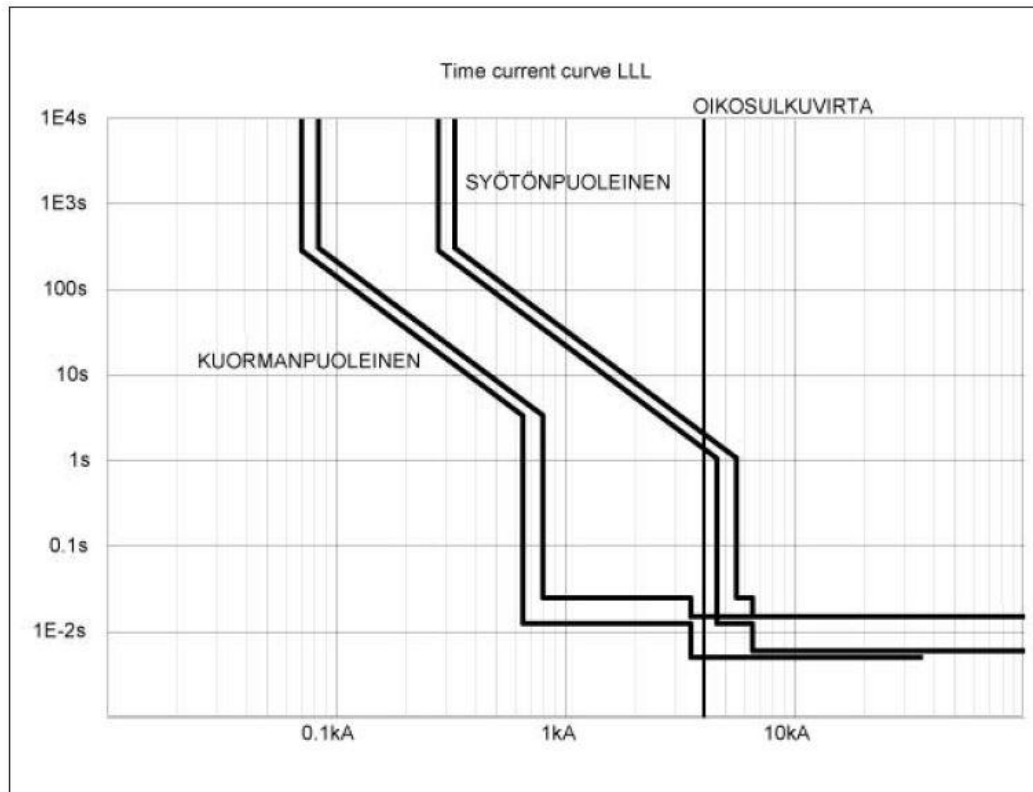


KUVIO 1. Aikaselektiivinenkäyrästä (ST-kortti 53.45)

Nykyaikaisilla prosessipohjaisilla releillä aika-asettelun ero täytyy olla vähintään 150ms. Vastaavasti vanhemmilla elektronisilla releillä eron on oltava 300ms ja mekaanisilla releillä vähintään 500ms. Edellä mainitut ajat koostuvat asetetusta hidastusajasta, releen havahtumisajasta ja katkaisijan toiminta-ajasta. (Iakervi & Partanen 2008, 177, 180-182)

Useiden suojiin sarjakytkennässä aikaselektiivinen suojaus voi olla vaikea toteuttaa, sillä käytettävissä oleva aika loppuu kesken. Tässä tapauksessa selektiivinen suojaus voidaan toteuttaa myös virtaselektiivisyydellä, jolloin hyödynnetään vikavirran suuruuden vaihtelua verkon eri pisteissä. Vikavirta on suurempi lähempänä syöttöä ja kaukana

syötöstä vikavirta jää pieneksi. Virtaselektiivisyys saavutetaan asettelemalla syötön puoleinen katkaisija riittävän epäherkäksi (Kuvio 2). (ST-kortit 53.14, 12 ja 53.45, 2-3)



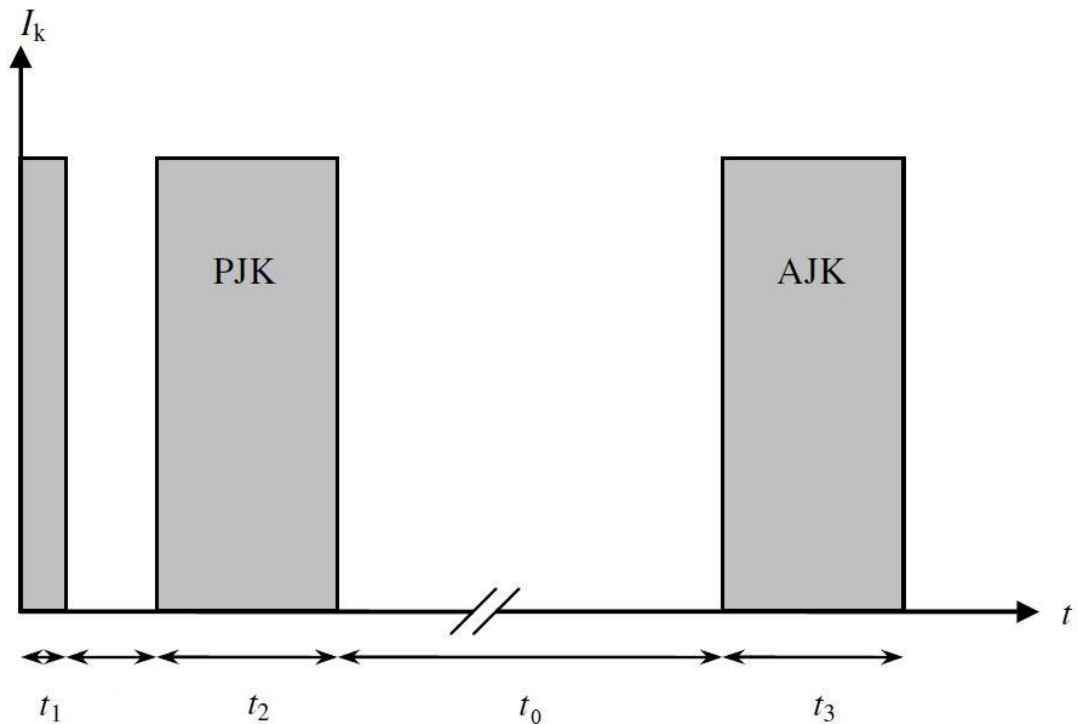
KUVIO 2. Virtaselektiivisyyskäyrästä (ST-kortti 53.45)

2.4 Jälleenkytkentäsekvenssit

Keskijänniteverkossa automaattisia jälleenkytkentöjä tehdään vain avojohtovikojen jälkeen. Jos jokin muu komponentti laukaistaan releen toimesta, katkaisijoita ei ohjata kiinni automaattisesti. Muut komponentit kytetään verkkoon vasta kun on todettu niiden olevan ehjiä. Maakaapeleilla pikajälleenkytkentää ei tehdä pidempien jäähtymisai- kavakioiden takia. PJK:n yleisin syy on salaman aiheuttamat valokaariviat, jolloin käytönpalautus avojohtoverkoissa on nopeampaa jälleenkytkentäautomaatiikalla. Ennen PJK:ää tarvitaan lyhyt jännitteetön aika, koska valokaaren loputtua ionisoituneen ilman jännitelujuus ei välttämättä ole riittävä. (Elovaara & Haarla 2011, 371)

Oikosulkukestoisuutta tarkasteltaessa on otettava huomioon mahdollisen pikajälleenkytkennän vaikutus. Kuviossa 3 esitetty jälleenkytkentäsekvenssin toiminta. Johtimia lämmittävä aika on tällöin PJK:ää edeltävän ja sen jälkeisen oikosulkujen kestojen

summa, joka koostuu asetetusta hidastusajasta sekä katkaisijan ja releen toiminta-ajasta. Ekvivalenttinen oikosulun vaikutusaika voidaan laskea yhtälöllä 1. (Lakervi & partanen 2008, 177)



KUVIO 3. Jälleenkytkentäsekvenssi (Simonen, M.)

$$t = (t_1 + t_2) \cdot e^{-\frac{t_0}{\tau}} + t_3 \quad (1)$$

,jossa

t on oikosulun ekvivalenttinen vaikutusaika

t_1 on PJK:ää edeltävän oikosulkuvirran kesto aika

t_2 on PJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kesto aika

t_0 on aikajälleenkytkentää edeltävä jännitteetön aika

t_3 on AJK:n jälkeisen oikosulun kesto aika

τ on johtimen jäähtymisaikavakio

2.5 Ylivirtarele

Ylivirtarele toimii, kun virta ylittää sille asetetun arvon. Rele ei ole paras vaihtoehto silmukoidun verkon suojaukseen, sillä se ei havaitse virran suuntaa. Silmukoidussa verkossa vikavirta voi tulla useasta suunnasta. Silmukoidussa verkossa ylivirtarelettä voi-

daan käyttää varasuojana, mutta vakioaikareleellä vastaan tulee selektiivisyys ongelmia ja käänteisaikareleellä laukaisujat voivat venyä liian pitkiksi. Suunnattu ylivirtarele havaitsee myös vikavirran suunnan mittaamalla virran ja jännitteen välistä kulmaa. Relettä käytetään silmukoidussa verkossa. (Elovaara & Haarla 2011, 346; Koivunen 2010, 11)

Vakioaikaylivirtarele havahtuu virran mittausravon ylittäessä asetteluarvon ja toimii asetutun havahtumisajan tullessa täyteen. Rele palautuu, kun virta alittaa asetteluarvon riittävästi jos releen asetellut sallivat sen. Vakioaikaylivirtarelettä voidaan käyttää säteittäisjohdon, muuntajan, reaktorin, kondensaattorin ja generaattorin suojauksessa. (Elovaara & Haarla 2011, 346)

Käänteisaikaylivirtareleen toimintahidastus on virtaan nähden käänteinen, jolloin suuri- virtaiset viat laukeavat nopeammin. Relettä voidaan käyttää myös silmukoiduissa verkoissa. Käänteisvaikutuksen jyrkkyys voidaan määrittää standardikäyriltä. IEC-standardin 60255-3 käyrien (KUVIO 4) mukainen laukaisuaika t_{TRIP} voidaan laskea yhtälöllä 2. (Elovaara & Haarla 2011, 346)

$$t_{TRIP} = \frac{A \cdot k}{\left(\frac{I}{I>}\right)^p} \quad (2)$$

,jossa

I on verkon vikavirta

$I>$ on releelle asetettu havahtumisvirta

A on käänteisaikareleen parametri

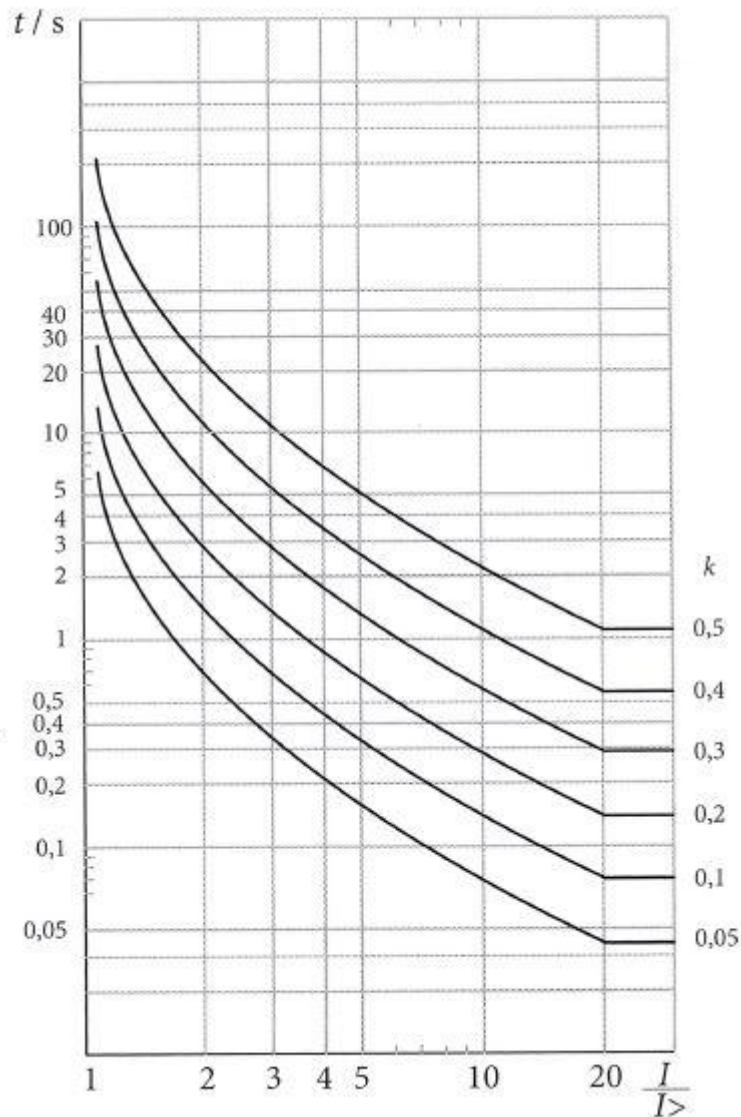
p on käänteisaikareleen parametri

k aikakerroin

Käänteisaikareleen parametrit löytyvät taulukosta 1 ja aikakerroin kuviosta 4. Parametrit vaikuttavat käyrän jyrkkyyteen ja aikakerroin laukaisuaikaan.

TAULUKKO 1. IEC-standardin 60255 mukaiset käännteisaikareleiden parametrit A ja p eri jyrkkyyksille

Käyrän jyrkkyys	A	p
Normal	0,14	0,02
very inverse	13,5	1
extremely inverse	80	2
long time inverse	120	1

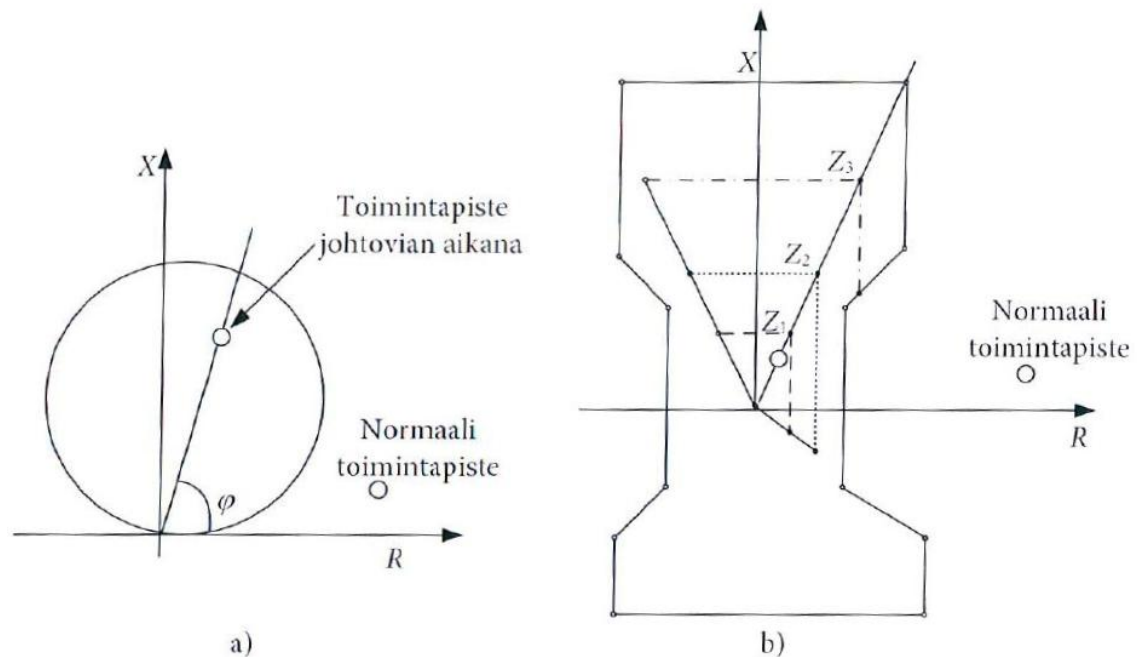


KUVIO 4. Very Inverse standardikäyrä. (Elovaara & Haarla 2011, 347)

2.6 Distanssirele

Distanssirelettä käytetään silmukoidussa verkossa, koska se pystyy havaitsemaan vian suunnan. Silmukoidussa verkossa vikavirta voi tulla useasta suunnasta ja pienin vikavir-

ta on suurempi kuin suurin kuormitusvirta. Ohessa kuvio Distanssireleen toimintaperiaatteesta (Kuvio 5). (Elovaara & Haarla 2011, 348)



KUVIO 5. Distanssireleen toimintaperiaate, kun asettelukuvio on a) ympyrä b) monikulmio. (Elovaara & Haarla 2011, 350)

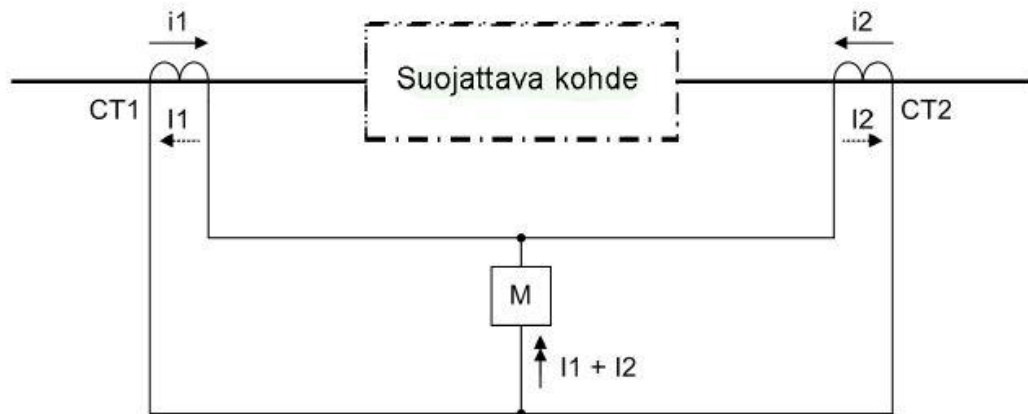
Vasemmalla kuviossa a) ympyräkuvion on releen ensimmäinen vyöhyke. Oikealla kuviossa b) monikulmion muotoisessa asettelukuviossa on kolme laukaisevaa vyöhykettä (Z_1, Z_2, Z_3) ja uloimpana havahtumisvyöhyke. Normaalisessa käyttötilanteessa johdolla kulkee pätötehoa, jolloin toimintapiste on vyöhykkeen ulkopuolella ja lähellä R-akselia. Mitä suurempi teho johdolla kulkee, sitä lähempänä toimintapiste on origoa. (Elovaara & Haarla 2011, 350)

Distanssirele laskee impedanssia johdon virran ja johdon alkupään jännitteen avulla. Mittaustiedot releelle tulevat virta- ja jännitemuuntajilta. Vian suunnan rele päättelee virran ja jännitteen vaihesiirtokulman avulla. Vian ollessa releen edessä, virta on noin 90 astetta jännitettä jäljessä, sillä vikavirta on induktiivista loisivirtaa. Vian takana oleminen tarkoittaa vian olevan samalta sähköasemalta lähtevällä toisella johdolla, tässä tapauksessa virta on 90 astetta jännitettä edellä. Distanssireleiden toimintaan vaadittava virran minimiarvo eli virtaherkkyys on mikroprosessorireleillä 10 prosentti ja sähkömekaanisilla releillä 50 prosenttia releen nimellisvirrasta. Jos vikavirta on pienempi kuin releen virtaherkkyys, rele ei havaitse vikaa. Vika jää myös huomaamatta vikaresistans-

sin ollessa liian suuri, jolloin distanssirele ei pysty erottamaan resistiivistä vikavirtaa normaalista kuormitusvirrasta. (Elovaara & Haarla 2011, 349)

2.7 Differentiaalirele

Differentiaali rele mittaa suojattavaan kohteeseen tulevien ja lähtevien virtojen erotusta. Rele toimii kun virtojen erotus on suurempi kuin asetusarvo. Suojausalueen ollessa terveessä tilassa virrat menevät suojausalueen läpi, joten virtojen summa on nolla. Vian ollessa päällä summa ei ole nolla ja virta ei mene suojausalueen läpi, jolloin ulkopuolelta tulevat vikavirrat tulevat suojausalueelle. Differentiaalirele pystyy suojaamaan virtamuuntajiensa mittauspisteiden välisen alueen, eikä se pysty toimimaan mittausalueensa ulkopuolella. Toiminta-aika differentiaalireleellä on noin 30 ms ja releen kanssa ei käytetä hidastusta. Differentiaalisuojauksen periaatekuvasta (Kuvio 6), nähdään kuinka differentiaali rele M laskee virtamuuntajiensa CT1 ja CT2 toisiovirtoja I_1 ja I_2 . Jos releen laskema erovirta eroaa nollasta, suojattavalla kohteella on vika. (Elovaara & Haarla 2011, 355)



KUVIO 6. Differentiaalisuojauksen periaatekuva. (Leino, A. 3)

2.8 Nollavirtareleet ja suunnatut maasulkureleet

Nollavirtarele kytketään muuntajan toisiokäämeihin ja mittaa vaihevirtojen summavirtaa. Rele toimii maasulussa, mutta ei tunnista vikavirran suuntaa. Asettelut eroavat sen mukaan onko kyseessä herkkä nollavirtarele vai karkea nollavirtarele. Herkällä nollavir-

tareleen hidastus on suuri ja virta-asettelu pieni. Karkean nollavirtareleen asetteluihin tarvitaan vikavirtalaskelmia ja hidastus on lyhyt ja virta-asettelu pieni. (Elovaara & Haarla 2011, 353-354)

Suunnattu maasulkurele on nollavirtarele, joka havaitsee myös vikavirran suunnan nollavirran ja nollajännitteen välisestä vaihekulmasta. Vikaresistanssittomassa maasulussa virta on suuri ja nollajännite pieni, tällöin suunnattu maasulkurele ei havaitse vian suuntaa ja parempi ratkaisu on käyttää nollavirtarelettä. (Elovaara & Haarla 2011, 354)

3 OIKOSULKUSUOJAUS

Oikosulku voi syntyä virtapiiriin eristysvian tai ulkoisen kosketuksen takia. Piiri voi sulkeutua suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi tapahtua kahden tai kolmen vaihejohtimen tai vaihejohtimen ja maan välille. Oikosulun vikavirta on tyypillisesti kuormitusvirtaa suurempi. Oikosulkuviat voivat aiheuttaa henkilövahinkoja, johtojen ja laitteiden ylikuumentumista sekä häiriöitä tai keskeytyksiä sähkönjakelussa. Edellä mainituista syistä virtapiiriin vikaantunut osa kytketään irti sähkönsyötöstä rele- tai sulakesuojauksella. (Lakervi & Partanen 2008, 28)

3-vaiheinen oikosulku on eniten verkkoa rasittava vika, joka on kytkettävä mahdollisimman nopeasti pois. Oikosulkuvirta voi saavuttaa 30...40-kertaisen virran nimellisvirtaan nähden. Suuresta virrasta johtuen oikosulkuvirta voi vioittaa johtimia ja kojeita. (Aura & Tonteri 1993, 159)

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruus voidaan laskea yhtälöllä (3), kun tiedetään vikapaikan vaihejännite ja verkon kokonaisimpedanssi. Tulosten avulla voidaan mitoitaa ja arvioida laitteiden mekaanista kestoisuutta, katkaisijoiden katkaisukykyä sekä oikosulkuvirran johdoille ja laitteille aiheuttamia lämpötilamuutoksia. (Lakervi & Partanen 2008, 29)

$$I_f = \frac{U_v}{Z_f + Z_i} \quad (3)$$

,jossa

I_f on vikavirta

Z_f on vikaimpedanssi

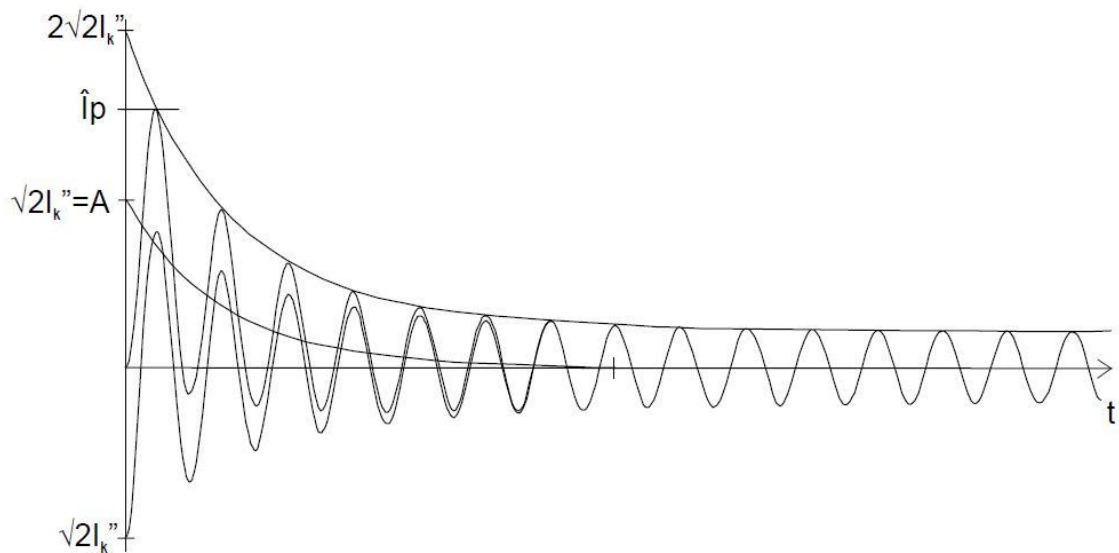
U_v on vikakohtan vaihejännite ennen vikaa

Z_i on verkon impedanssi vikakohtassa

Suojana oikosulkuja vastaan voidaan käyttää ylivirta-, differentiaali- ja distanssireleitä. Ylivirtarelettä voidaan käyttää, jos pienin vikavirta on suurempi kuin suurin kuormitusvirta. Silmukoidussa verkossa vikavirrat tulevat eri suunnista, jolloin ylivirtarele ei ole paras vaihtoehto, sillä se ei havaitse virran suuntaa. Silmukoituun verkkoon distanssirele on paras vaihtoehto, sillä se havaitsee myös vikavirran suunnan ja etäisyyden. (Elovaara & Haarla 2011, 340)

3.1 Alkuoikosulkuvirta ja jatkuvuustilan oikosulkuvirta

Alkuoikosulkuvirran suuruus koostuu symmetrisestä alkuoikosulkuvirrasta I'_k ja vaimenevasta tasavirtakomponentista A . Alkuoikosulkuvirta on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Vian jatkuessa reaktanssit kasvavat ja oikosulkuvirta vaimenee jatkuvuustilan arvoon I_k . Sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p on oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, kun mukana on myös tasavirtakomponentti. Tasavirtakomponentin suuruus riippuu piirin R/X-suhteesta ja oikosulun syntyhetkestä. Kuviossa 6 oikosulkuvirran käyrämuoto. (ABB TTT 2000, 7.1)



KUVIO 7. Oikosulkuvirran käyrämuoto (ABB TTT 2000, 7.2)

3.2 Releiden asettelut

Releiden asetteluja varten on tiedettävä verkon eri osien suurimmat ja pienimmät vikavirtatasot, verkon eri osien ja komponenttien oikosulkukestoisuudet, nimellisvirrat ja suurimmat kuormitusvirrat. (ABB TTT 2000, 7.6.1)

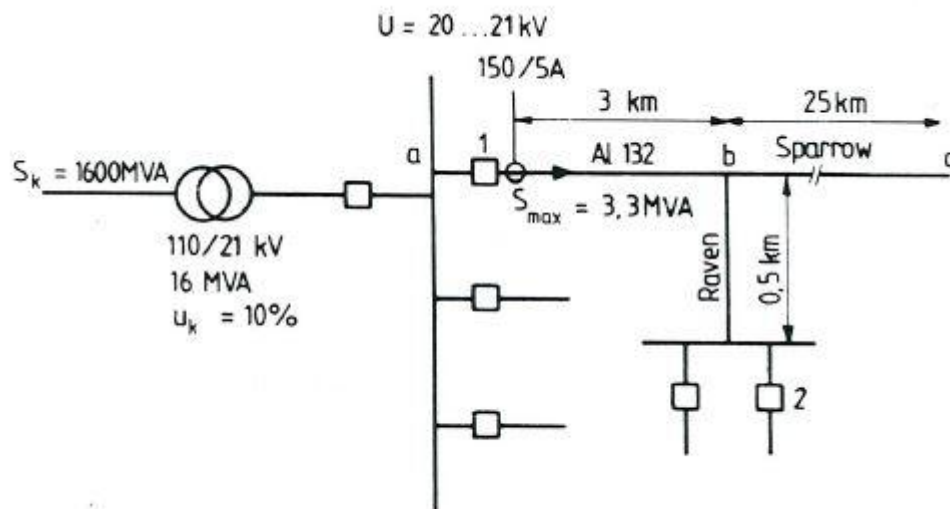
Suojaus oikosulkua varten on asetettava niin, että suojaus toimii pienimmällä esiintyvällä oikosulkuvirralla. Pienintä vikavirtaa laskettaessa tulee ottaa huomioon kaikki vikavirtaa pienentävät tekijät, kuten kytkentätilanteet, verkkojännite ja vikatyypit. Asetteluarvoissa tulee ottaa myös huomioon verkon suurin kuormitusvirta ja verkon komponent-

tien oikosulkukestoisuudet. Suojaus ei saa toimia suurimmalla kuormitusvirralla eikä kytkentävirtasysäyksistä, moottorien käynnistysvirroista tai hetkellisistä ylivirtatilanteista. Releiden asetteluarvot on myös valittava niin, ettei verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet ylitä. (ABB TTT 2000, 7.6.1)

3.3 Käsin laskenta

Oikosulkusuojauksen mitoituksessa on otettava huomioon seuraavat asiat:

- Suurin kuormitusvirta, koska suojalaite ei saa toimia suurimmalla kuormitusvirralla
- Pienin mahdollinen oikosulkuvirta, koska suojalaitteen on toimittava vähintään tällä virralla
- Johtimen terminen kestävyys. Suurin ekvivalenttinen oikosulkuvirta ei saa ylittää suurinta sallittua yhden sekunnin oikosulkuvirtaa (Lakervi & Partanen 2008, 180-181)



KUVIO 8. Esimerkkiverkko (Lakervi 1996, 45)

Suurin kuormitusvirta I_{max} voidaan laskea yhtälöllä (4).

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{3,3}{\sqrt{3} \cdot 20} \text{ kA} = 0,10 \text{ kA} \quad (4)$$

,jossa

S_{\max} on verkon suurin kuormitus näennäisteho

U on keskijänniteverkon jännite

Vikapaikan impedanssi muodostuu 110kV:n verkon vaikutuksesta, muuntajan osuudesta sekä johtimen impedanssista. Johtimen impedanssiin vaikuttavat johtimen materiaali, pituus ja poikkipinta.

110kv:n verkon vaikutus vikaimpedanssiin voidaan laskea yhtälöllä (5).

$$X_k = \frac{U_n^2}{S_k} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = \frac{110^2}{1600} \left(\frac{21}{110} \right)^2 \Omega = 0,27\Omega \quad (5)$$

$$R_k \approx 0$$

,jossa

X_k on syöttävän 110kv:n verkon vaikutus vikaimpedanssiin

U_n on syöttävän 110kV:n verkon nimellisjännite

U_2 on syöttävän 100kv:n verkon jännite

U_1 on keskijänniteverkon jännite

S_k on muuntajan oikosulkuteho

muuntajan vaikutus vikaimpedanssiin voidaan laskea yhtälöllä (6).

$$X_m = u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,1 \cdot \frac{21^2}{16} = 2,75\Omega \quad (6)$$

$$R_m \approx 0$$

,jossa

u_k on suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)

U_n on keskijänniteverkon nimellisjännite

S_n on muuntajan nimellinen näennäisteho

Kokonaisoikosulkuimpedanssin muodostuu siis 110kV:n verkon vaikutuksesta, muuntajan vaikutuksesta ja johtimen impedanssista. Esimerkissä oikosulkuimpedanssi pisteessä a. Piste a on kiskostossa, jolloin johtimen impedanssi Z_j on nolla. Kokonaisoikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä (7).

$$Z_k = X_k + X_m + Z_j \quad (7)$$

$$Z_a = 0 + j(0,27 + 2,75 + 0) = 3,02\Omega$$

,jossa

Z_k on vikapaikan impedanssi

Z_j on johdon impedanssi

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (8). Esimerkissä kolmivaiheinen oikosulku pisteessä a.

$$I_{k_{3v}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (8)$$

$$I_{k_a} = \frac{21}{\sqrt{3} \cdot 3,02} \text{ kA} = 4,0 \text{ kA}$$

Pienin mahdollinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (9). Pienin mahdollinen oikosulku on kaksivaiheinen, joka saadaan kertomalla kolmivaiheinen oikosulku kertoimella $\sqrt{3}/2$.

$$I_{k_{2v}} = \sqrt{3}/2 \cdot I_{k_{3v}} \quad (9)$$

,jossa

$I_{k_{2v}}$ on kaksivaiheinen oikosulkuvirta

$I_{k_{3v}}$ on kolmivaiheinen oikosulkuvirta

4 MAASULKUSUOJAUS

"Maasulku on vian aiheuttama johtava yhteys päävirtapiiriin vaihejohtimen ja maan tai maadoitetun osan välillä. Johtava yhteys voi syntyä myös valokaaren kautta. Kahden tai useamman vaihejohtimen maasulkuja saman järjestelmän eri kohdissa kutsutaan kaksois- tai moninkertaisiksi maasuluiksi." (SFS 6001+A1+A2, 17)

Käyttömaadoitetussa verkossa maasulku on yksivaiheisen oikosulun kaltainen. Tässä tapauksessa vikavirta voidaan laskea, kun tiedossa on verkon impedanssit. Mikäli vikaresistanssi maasulkukohdassa ei ole liian suuri, verkon oikosulkusuojat toimivat myös maasulussa. (ABB TTT 2000, 8.1)

Maasulkusuojana voidaan käyttää nollavirtaa mittaamaan asetettua ylivirtarelettä. Nollavirtareleen toiminta perustuu virran suuruuteen, jolloin se laukaisee sekä releen edessä että takana olevat viat eli se ei ole suuntaherkkä. Suojana voidaan käyttää myös maasulkuvirran suunnan havaitsevia distanssireleitä tai suunnattuja maasulkureleitä. Distanssirelettä ei voida käyttää ainoana maasulkusuojana, koska se pystyy havaitsemaan maasulut noin 20 Ohmin vikaresistanssiin saakka. Suomessa maasulut on pystyttävä laukaamaan 500 Ohmin vikaresistanssiin saakka. (Elovaara & Haarla 2011, 340-341)

4.1 Kosketusjännitteet maasulun aikana

Maasulku aiheutuu usein vaihejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitettuun osaan, tällöin syntyvän kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta ja suojamaadoituksen resistanssista. SFS 6001 -standardi määrittelee sallitut kosketusjännitteen U_{tp} arvot, joihin vaikuttaa vian kesto aika t_F (Taulukko 2). Arvoa määriteltäessä on otettu huomioon kehon kautta kulkeva virta, vian kesto aika sekä kehon kokonaisimpedanssiin vaikuttava virran kulkutie kehossa. Vaatimuksiin päästään parantamalla maadoituksia, laukaisuaikaa lyhentämällä tai maasulkuvirtaa pienentämällä. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää sammutuskuristimella tai jakamalla galvaanisesti verkkoa osiin. (Lakervi & Partanen 2008, 182-183)

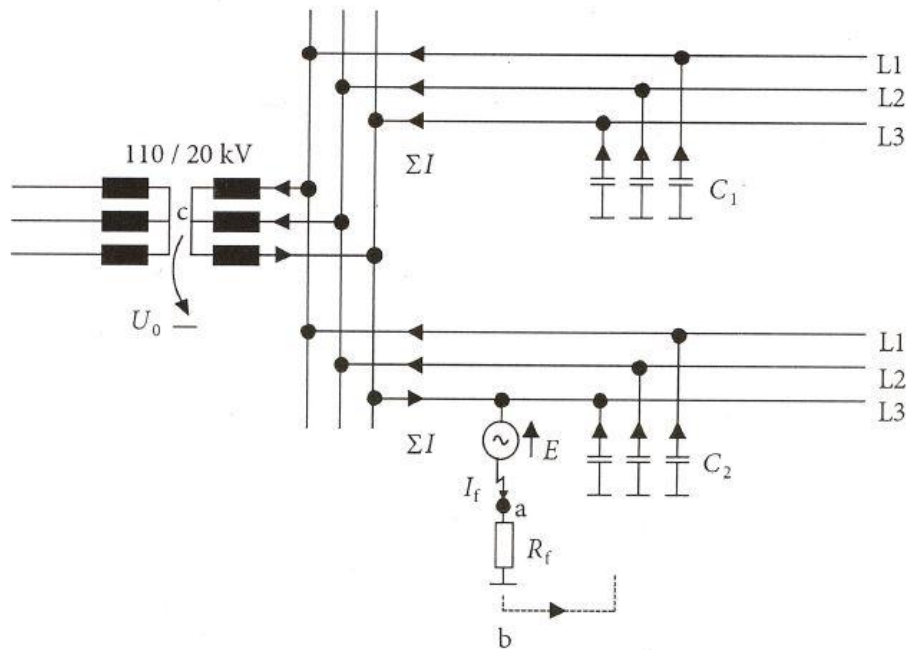
TAULUKKO 2. SFS 6001 -standardin määrittelemät sallitut kosketusjännitteet (SFS 6001)

Vian kestoaika t_F (s)	Sallittu kosketusjännite U_{tp} (V)
10	80
1,1	100
0,72	125
0,64	150
0,49	220
0,39	300
0,29	400
0,20	500
0,14	600
0,08	700
0,04	800

4.2 Maasta erotettu verkko

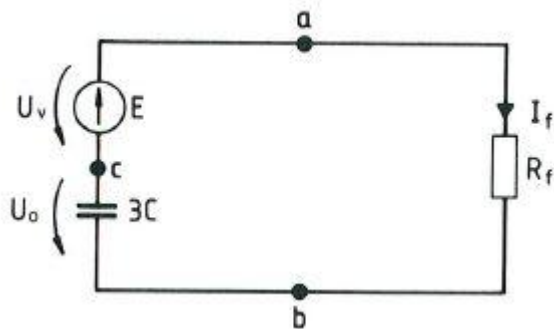
Suomen olosuhteissa yleisimpänä maadoitustapana käytetään tähtipisteestään maasta erotettua verkkoa tai sen erityismuotoa, ns. sammutettua verkkoa. Sammutetussa verkossa tähtipisteeseen kytkentään verkon johtojen reaktanssia vastaava reaktanssi. Huonoista maadoitusolosuhteista syntyvät kosketusjänniteongelmat ovat Suomessa oleellisin syy maasta erotetun verkon (Kuvio 9) käyttöön keskijänniteverkossa. (Lakervi & Partanen 2008, 182)

Verkon ollessa terveessä tilassa, verkon vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä, jolloin jännitteiden summa on joka hetkellä nolla. Myös verkon maakapasitanssien kautta kulkeva osa varausvirroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun aikana terveiden vaiheiden vaihejännitteet kasvavat maahan nähden. Tästä syntyvä epäsymmetrinen tilanne aiheuttaa varausvirtoihin poikkeamaa nollasta ja osa varausvirrasta kulkee vikapaikan kautta maahan, jolloin syntyy maasulkuvirta. (ABB TTT 2000, 8.2.1)



KUVIO 9. Maasta erotettu verkko (Lakervi & Partanen 2008, 183)

Maasta erotetun verkon Theveninin menetelmällä muodostettu sijaiskytkentä on kuvion 10 mukainen. Maasta erotetun verkon maasulkuvirran arvo saadaan laskettua sijaiskytkennän avulla yhtälöllä (10) ja tähtipiste- eli nollajännite yhtälöllä (11). (Lakervi & Partanen 2008, 184)



KUVIO 10. Maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi 1996, 51)

$$I_f = \frac{j3\omega C}{1+j3\omega CR_f} \cdot \underline{U}_V \quad (10)$$

,jossa

I_f on maasulkuvirta

C on verkon maakapasitanssi vaihetta kohden

R_f on vikaresistanssi

\underline{U}_V on vaihejännite

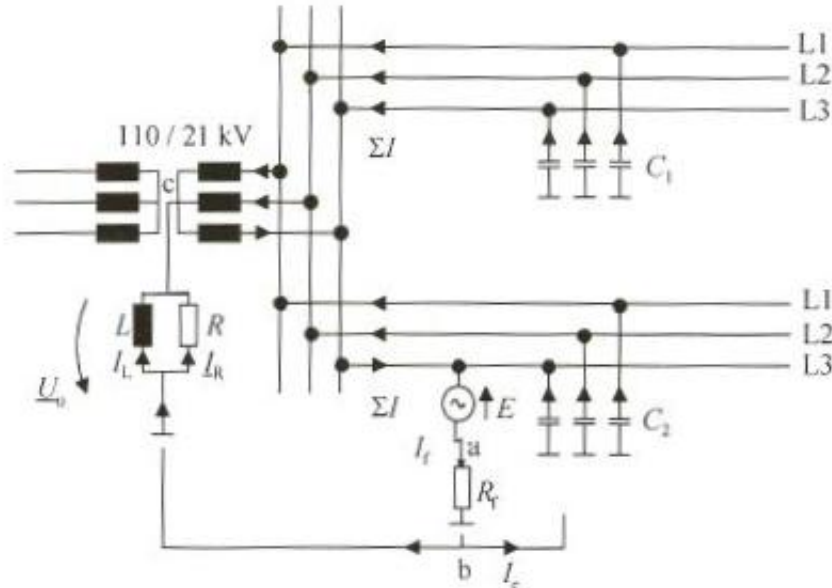
$$\underline{U}_0 = \frac{-1}{1+j3\omega CR_f} \cdot (\underline{U}_V) \quad (11)$$

,jossa

\underline{U}_0 on tähtipiste- eli nollajännite

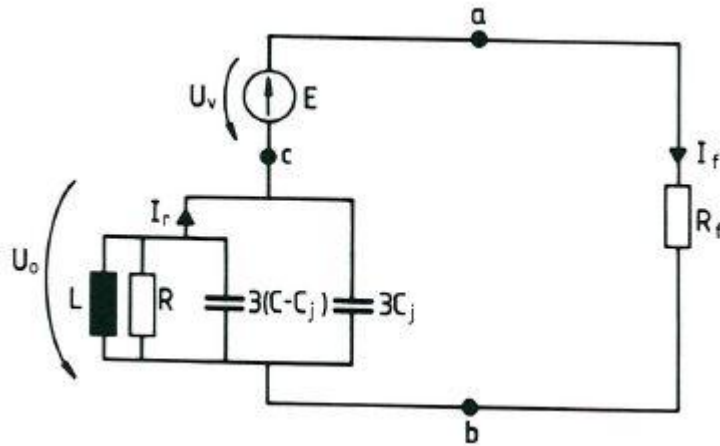
4.3 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa (Kuvio 11) maakapasitanssien aiheuttama kapasitiivinen maasulkuvirta pyritään kumoamaan käyttämällä kompensointikuristimia verkossa. Kela asennetaan aina vastuksen kanssa rinnan muuntajan tähtipisteen ja maan välille. Sammutuskuristinta käytettäessä maasulkuvirran kulma kääntyy 90° kuristimen induktiivisista ominaisuuksista johtuen. Sammutetussa verkossa maasulkuvirta on yleensä niin pieni, että valokaari sammuu itsestään ilman jälleenkytkentöjä, jolloin verkon sammutuksella voidaan vähentää jälleenkytkentöjen lukumääriä. (Simonen, M. 24)



KUVIO 11. Sammutettu verkko (Lakervi & Partanen 2008, 185)

Sammutetun verkon Theveninin menetelmällä muodostettu sijaiskytkentä on kuvion 12 mukainen. Sammutetun verkon maasulkuvirta voidaan laskea sijaiskytkennästä yhtälöllä (12). (Lakervi 1996, 49)



KUVIO 12. Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi 1996, 54)

$$I_f = \frac{\underline{U}_V}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (12)$$

,jossa

R on sammutuskuristimen rinnalla olevan vastuksen arvo

L on sammutuskuristimen arvo

4.4 Maasulkusuojauksen toteuttaminen

Maasulun yleishälytys toteutetaan yleensä nollajännitettä valvovalla ylijännitereleellä. Nollajännite voidaan mitata muuntajan tähtipisteen ja maan väliltä. Nollajännitereleen asetusarvo pitää asetella mahdollisimman pieneksi, jotta mahdollisimmat suuriresistanssiset maasulut havaittaisiin. Maasta erotetussa verkossa nollajännitereleet voidaan yleensä asettaa erittäin herkiksi. Kompensoidussa verkossa suojaus asetellaan epäherkemmäksi terveen verkon suurehkon nollajännitteen johdosta. Useimmiten suuren vikaresistanssin kautta kulkeva maasulku aiheuttaa kompensoidussa verkossa suuremman nollajännitteen kuin maasta erotetussa verkossa. Releistystä suunniteltaessa on otettava huomioon maasulkuvirran suuruus, verkon maadoitustapa, varasyöttöjen vaikutus maasulkuvirtaan, suojaustapa, mittamuuntajien muuntosuhteet, suojausportaiden lukumäärä ja mahdollinen rengaskäyttö. (Mörsky 1992, 328,335)

5 VAMP 50 LAITE-ESITTELY

Vamp 50 ylivirta- ja maasulkurelettä voidaan käyttää teollisuuden ja sähkölaitosten pien- ja keskijännitejärjestelmien suojaukseen tai varasuojaukseen. Rajoittamalla suojausominaisuuksia on saatu aikaan kustannustehokas ja käyttäjäystävällinen ratkaisu relesuojauksen toteuttamiseen. Releen ominaisuuksia voidaan täydentää integroitavilla lisämoduuleilla, kuten valokaarianturilla, digitaalisilla sisään- ja ulostuloilla sekä erilaisilla kommunikaatioliitännöillä.(VAMP 2009, 3)

5.1 Käyttäjäystävällisyys

Vampin tuotekehityksen keskeisenä painoalueena on alusta lähtien ollut käyttäjäystävällisyys. Releessä on monikielinen käyttöliittymä, suuri näyttö ja käyttäjäkohtaisesti valittavat LED-merkkivalot ja painikkeet (Kuvio 13). Laitteen etupaneelissa on USB-liittymä, jotta releen asetellut voidaan hoitaa helposti käyttökohteessa VAMPSET ohjelmointi työkalulla. Releessä on kolme käyttötasoa, jotka ovat käyttäjä-, operaattori- ja konfigurointitaso. Käyttötasot ovat suojattu salasanoilla, jotta estetään tahaton käyttö. Käyttäjätasolla on vain mahdollista lukea mittaustietoja ja parametreja. Operaattoritasolla voidaan vaihtaa suojausasetteluja ja konfigurointitasoa tarvitaan käyttöönoton aikana. (VAMP 2009, 3; VAMP 2010, 19)



KUVIO 13. VAMP 50-suojarele ja käyttäjäkohtaisesti valittavat LED-merkkivalot ja painikkeet. (VAMP 2009,3)

5.2 Laajennettavuus

Releen ominaisuuksia voidaan laajentaa lisämoduuleilla, joille releessä on kaksi laajennuspaikkaa. Lisämoduuli vaihtoehdot ovat tiedonsiirto-, valokaarianturi- tai DI/DO-kortti. Rele tukee RS 232-, RS 484-, kuituoptiikka- ja ethernet-liityntöjä, joihin rele mukautuu automaattisesti.



KUVIO 14. VAMP 50 suojarleen lisämoduulipaikka (VAMP 2009, 3)

5.3 Suojaustoiminnot

Releen yhdessä sovelluksessa voi olla noin 30 suojausporrasta ja jokaisella suojausportilla on kaksi asetusryhmää. Asetusryhmä voidaan vaihtaa manuaalisesti ja jonkin tulon tai lähdön avulla. (VAMP 2010, 44-45)

VAMP 50-relettä voidaan käyttää ylivirta-, virtaepäsymmetrian-, termisen ylikuormituksen- ja maasulkusuojana. Ylivirtasuojauksessa on käytössä kolme porrasta: I>, I>>, I>>>. Ensimmäinen porras I> voidaan ohjelmoida toimimaan joko vakioaikaisesti tai käänteisaikaisesti. Portaat I>> ja I>>> toimivat vakioajallisesti. Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa joko suunnattuna tai suuntaamattomana. Suunnatussa suojassa portaita on kaksi ja suuntaamattomassa neljä tai kuusi. (VAMP 2010, 49, 66, 71)

6 LOPPUSANAT

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä keskijänniteverkon suojaukseen ja erityisesti relesuojaustekniikkaan. Työssä käytiin läpi asioita, jotka tulee ottaa huomioon oikosulku- ja maasulkusuojausta toteuttaessa. Verkon tyyppi ja ominaisuudet vaikuttavat rele-tyypin valintaan. Työssä perehdyttiin melko kattavasti Suomessa käytettyihin suojarele-tyyppeihin.

Oikein toteutettu suojaus parantaa sähkönjakelun luotettavuutta, taloudellisuutta ja mahdollisimman laajaa toimintaa. Maasulun aikaisia kosketusjännitteitä voidaan pienentää verkon sammutuksella, releen laukaisuaikaa pienentämällä tai maadoituksia parantamalla. Suomen maaperän huonot maadoitusolosuhteet ovat suurin syy maasta erotetun verkon käyttöön. Hyvin toteutetulla suojaukselle taataan myös verkon mahdollisimman laaja käyttö, jolloin vikaantunut verkon osa pystytään rajaamaan tarkasti.

Tulevaisuutta ajatellen ja miettien tulevia työtehtäviä, työn aihe oli mielenkiintoinen ja hyödyllinen. Työn aikana selvisi mitä asioita tulee ottaa huomioon ja kuinka suojausta ryhdytään toteuttamaan. Työn aiheen rajaus onnistui hyvin, jolloin työn laajuus pysyi sopivana. Ainoana lisänä työssä olisi voinut olla käytännössä tutustuminen suojareleeseen.

LÄHTEET

ABB.2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku7: oikosulkusuojaus. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt.

ABB.2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku8: maasulkusuojaus. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt.

Aura, L, Tonteri J.T. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto.

Koivunen, T. 2010. Tuulipuiston sähköverkon suojaus. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

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

Lakervi, E. 1996. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Helsinki: Otatieto.

Leino, Ari. Tehomuuntajan differentiaalisuojauksen suojaus. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. Projektityö.

Mörsky, Jorma. 1992. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Otatieto.

SFS 6001 + A1 + A2. 2009 3. painos

SFS-IEC 60050-448-standardi. 2002.

ST- kortisto, ST- kortti 53.45. 2004. Sulakkeeton suojaus.

Simonen, M. 2006. Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

VAMP. 2009 versio 2. VAMP 50 tuote-esite. Luettu 22.5.2014. <http://www-fi.vamp.fi/Brochures/English/VB50.EN008.pdf>

VAMP. 2010 versio 7. Suojareleen käyttö- ja konfigurointiohje. Luettu 24.5.2014. <http://www-fi.vamp.fi/Manuals/Finnish/VM50.FI007.pdf>

