



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

TEOLLISUUDEN KESKIJÄNNITEVERKON VIKA- JA SUOJAUSTARKASTELU

TEKIJÄ: Anna Putkonen

| | |
|--|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma | |
| Työn tekijä Anna Putkonen | |
| Työn nimi Teollisuuden keskijänniteverkon vika- ja suojaustarkastelu | |
| Päiväys 24.4.2016 | Sivumäärä/Liitteet 83/3 |
| Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) UPM-Kymmene Oy, Savonlinna, sähkö- ja automaatiopäällikkö Kari Käyhkö | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön aiheena oli tutustua teollisuuden keskijänniteverkon rakenteeseen, primäärikomponentteihin, vika- ja häiriötilanteisiin, vikavirtojen laskentaan ja vikasuojauksen suunnitteluun. Työn tilaajana toimi UPM-Kymmene Oy. Työ on rajattu koskemaan lähinnä sellaisia teollisuuslaitoksia, jotka liittyvät keskijännitejakeluverkkoon ja joilla ei ole omaa sähköntuotantoa. Työn päätavoitteena oli saada aikaan aihetta koskevaa kirjallisuutta ja standardeja kokoava raportti, jonka sisältöä voidaan jatkossa käyttää sovellusoppaana ja koulutusmateriaalina. Tavoitteena oli myös saada käyttökokemuksia PowerFactory-ohjelmistosta.</p> <p>Työn käytännön osuutena eräälle toimeksiantajan keskijänniteverkolle tehtiin niin sanottu case-tarkastelu, jossa käytiin läpi verkon rakenne ja komponentit, tehtiin vikavirtalaskenta ja suunniteltiin yhdelle lähdölle oiko- ja maasulkusuojaus. Standardin IEC 60909 mukaiseen oikosulkuvirtojen laskentaan ja oikosulkusuojauksen suunnitteluun käytettiin PowerFactory-ohjelmistoa, joka osoittautui hyväksi työkaluksi kyseiseen tarkoitukseen. Maasulkuvirrat ja -jännitteet laskettiin käsin alan kirjallisuudessa esitettyillä laskentamenetelmillä, sillä PowerFactory-ohjelmistosta ei löydetty ominaisuuksia, jolla laskenta olisi voitu tehdä.</p> <p>Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin ja case-tarkastelussa saatujen tulosten perusteella voidaan tulevaisuudessa tarkistaa koko verkon oiko- ja maasulkusuojausasettelut ja ottaa uudet asettelut käyttöön.</p> | |
| Avainsanat: teollisuusverkko, oikosulkusuojaus, maasulkusuojaus | |
| | |

| | | | |
|--|---------------|------------------|------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering | | | |
| Author Anna Putkonen | | | |
| Title of Thesis Industrial Medium Voltage Network Fault and Protection Analysis | | | |
| Date | 24 April 2016 | Pages/Appendices | 83/3 |
| Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer | | | |
| Client Organisation /Partners UPM-Kymmene Oy, Savonlinna, Mr. Kari Käyhkö, Electrical and Automation Manager | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The subject of this thesis was to study the structure, primary components, fault and disturbance situations, fault current calculations and fault protection planning of the industrial medium voltage distribution system. The thesis was commissioned by UPM-Kymmene Ltd. The thesis was limited to those industrial plants which are connected to the medium voltage distribution network and they have no electricity production of their own. The main objective of the thesis was to draw up a report that gathers the related literature and standards and the content of which can be used in future as an application guide and training material. Another aim was to get user experiences of the PowerFactory software.</p> <p>As a practical part of this thesis, a so call Case-review was done to a plant of the client organisation where the structure and components of the network were reviewed, the fault current calculation was made and the short-circuit and earth fault protection for one output was designed. The PowerFactory software was used for the short circuit current calculations and protection planning as required by IEC 60909. This software turned out to be a good tool for that purpose. The earth fault currents and voltages were calculated by hand with the calculation methods presented in the literature of the field because no features were found in PowerFactory software that could have been used for this.</p> <p>The objectives set for the thesis were achieved and on the basis of the results of the Case-review it will be possible to check the short circuit and earth fault protection settings as well as to introduce new settings of the whole network in future.</p> | | | |
| <p>Keywords</p> <p>Industrial network, short circuit protection, earth fault protection</p> | | | |
| | | | |

ESIPUHE

Tämä on UPM-Kymmene Oy:lle tekemäni opinnäytetyö. Työn aihetta ehdotti minulle keväällä 2015 UPM vaneriliiketoiminnan keskitetyn kunnossapidon sähkö- ja automaatiopäällikkö Kari Käyhkö. Hän ja Savonia ammattikorkeakoulun yliopettaja Juhani Rouvali toimivat tämän työn ohjaajina. Heille kuuluu suurin kiitos mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta sekä hyvästä ohjauksesta ja neuvoista. Erityiskiitos kuuluu perheelleni, avopuolisolleni Matille ja pojalleni Laurille, kärsivällisyydestä ja tuesta pitkään kestäneen kirjoitusprosessin aikana.

Kuopiossa 24.4.2016

Anna Putkonen

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 2 | TEOLLISUUDEN KESKIJÄNNITEVERKKO | 8 |
| 2.1 | Sähköverkon rakenne ja jännitetasot | 9 |
| 2.2 | Tähtipisteen maadoitus..... | 11 |
| 2.3 | Jakelumuuntajat | 12 |
| 2.4 | Kojeistot..... | 14 |
| 2.5 | Katkaisijat ja erottimet | 16 |
| 2.6 | Voimakaapelit | 18 |
| 3 | SÄHKÖVERKON VIKA- JA HÄIRIÖTILANTEITA | 22 |
| 3.1 | Oikosulku | 23 |
| 3.1.1 | Oikosulkuvirran teoreettinen tarkastelu..... | 23 |
| 3.1.2 | Kolmivaiheinen oikosulku | 28 |
| 3.1.3 | Kaksivaiheinen oikosulku | 29 |
| 3.2 | Oikosulkuvirtalaskenta | 30 |
| 3.2.1 | Laskentamenetelmä..... | 30 |
| 3.2.2 | Oikosulkupiirin komponenttien impedanssien laskenta | 34 |
| 3.2.3 | Oikosulkusuureet..... | 37 |
| 3.2.4 | Esimerkkilaskelma | 39 |
| 3.2.5 | Oikosulkuvirtalaskenta PowerFactory -ohjelmistolla..... | 42 |
| 3.3 | Maasulku..... | 43 |
| 3.3.1 | Maasulkuilmiö maasta erotetussa verkossa | 44 |
| 3.3.2 | Maasulkuilmiö sammutetussa verkossa | 48 |
| 3.4 | Ylikuormitus | 50 |
| 3.5 | Yli- ja alijännite..... | 51 |
| 3.6 | Vika- ja häiriötilanteiden ennaltaehkäisy | 52 |
| 4 | SUOJAUKSEN SUUNNITTELU | 53 |
| 4.1 | Oikosulkusuojaus | 53 |
| 4.1.1 | Jakelumuuntajaa syöttävän keskijännitelähdön oikosulkusuojaus | 55 |
| 4.2 | Maasulkusuojaus..... | 57 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.1 | Turvallisuusvaatimukset | 58 |
| 4.2.2 | Selektiivisen maasulkusuojauksen toteutus | 61 |
| 4.3 | Yli- ja alijännitesuojaus | 63 |
| 4.4 | Valokaarisuojaus | 63 |
| 5 | CASE-TARKASTELU | 64 |
| 5.1 | Verkon rakenne | 64 |
| 5.2 | Oikosulkuvirtalaskenta | 65 |
| 5.2.1 | Kohdeverkon mallintaminen oikosulkuvirtojen laskentaa varten | 66 |
| 5.2.2 | Laskentatulokset | 66 |
| 5.2.3 | Esimerkki lähdön K11 ylivirtasuojauksen asetteluista | 68 |
| 5.3 | Maasulkuvirtalaskelmat | 71 |
| 5.3.1 | Esimerkki lähdön K11 maasulkusuojauksen asetteluista | 71 |
| 6 | POHDINTA | 76 |
| | LÄHTEET | 79 |
| | LIITE 1: CASE-VERKON OIKOSULKUVIRTALASKENNASSA KÄYTETYT SÄHKÖTEKNISET TIEDOT .. | 81 |
| | LIITE 2: SCHNEIDER ELECTRICIN MICROLOGIC 5.0 A LAUKAISUKÄYRÄ | 82 |
| | LIITE 3: CASE-VERKON PÄÄKAAVIO | 83 |

1 JOHDANTO

Teollisuuden sähköjakelun luotettavuus, käyttövarmuus, taloudellisuus ja turvallisuus ovat teollisuuslaitoksille elintärkeitä, sillä kaikki tuotantoprosessit vaativat sähköä toimiakseen.

Sähköjakelun häiriöistä ja vioista aiheutuu lähes poikkeuksetta kustannuksia, mutta pahimmillaan ne voivat aiheuttaa myös riskejä henkilöturvallisuuteen. Tämän takia teollisuuden käyttöhenkilökunnan täytyy tuntea verkon rakenne, komponenttien sähkötekniset ominaisuudet, vika- ja häiriötilanteet ja vikavirtasuojauksen periaatteet.

Teollisuuden vikavirtalaskenta teetetään usein ulkopuolisella yrityksellä, mutta tehtaan sähköverkon käytöstä vastuussa olevien henkilöiden tulisi osata laskennan perusteet, jotta valmiit laskelmat osattaisiin tarkastaa. Lisäksi tulee tuntea verkon komponenttien vaikutus vikavirtojen ja -jännitteiden tasoon, jotta verkon muutostilanteissa osattaisiin arvioida, tarvitseeko laskenta suorittaa uudestaan ja vaativatko muutokset esimerkiksi vikasuojausasetteluiden päivittämistä tai muiden verkon komponenttien uudelleen mitoittamista. Omien verkostolaskentaohjelmistojen hankkimista kannattaa myös harkita, etenkin suurissa yrityksissä, joilla on useita tehdaskiinteistöjä. Hankinnalla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä, kun kalliita laskentoja ei tarvitse teettää ulkopuolisilla.

Tämä työ on tehty UPM-Kymmene Oyj:lle, joka on kansainvälinen bio- ja metsäteollisuusyhtiö. Yhtiöllä on tuotantoa 13 maassa ja työntekijöitä on noin 19 600. Liikevaihto on 10,1 miljardia euroa. Yhtiö muodostuu kuudesta liiketoiminta-alueesta, joiden valmistamia tuotteita ovat paperi, sellu, vaneri, sahatavara, biopolttoaineet, -komposiitit ja kemikaalit, tarramateriaalit ja sähköenergia. (UPM, 2016). Työn tarkoitus on saada aikaan yrityksen sähkökäytöstä vastaaville henkilöille soveltamisopas, johon on koottu teollisuuden sähköjakeluverkon rakennetta ja ominaisuuksia, vika- ja häiriötilanteita ja niiltä suojautumista koskevaa teoriaa ja standardeja. Jakeluverkon rakenteesta ja primäärikomponenteista on pyritty tuomaan esiin ne ominaisuudet, jotka vaikuttavat vikavirtalaskentaan ja vikakestoisuuteen. Työn lopussa on esitelty erälle toimeksiantajan tehtäville case-tarkastelu, jossa käydään yksityiskohtaisesti läpi verkon oiko- ja maasulkuvikalaskenta ja suunnitellaan yhden keskijännitelähdön vikasuojaus. Oikosulkuvirtojen laskennassa on käytetty saksalaista PowerFactory-ohjelmistoa.

2 TEOLLISUUDEN KESKIJÄNNITEVERKKO

Teollisuuden sähköjakelujärjestelmän tehtävä on siirtää sähkövoimansiirtojärjestelmän kautta tuleva tai oman voimalaitoksen tuottama sähkö tuotantoprosessin käyttöön (Lakervi & Partanen, 2009). Teollisuudessa sähköjakeluun käytetään tyypillisesti keskijänniteverkkoa (10 – 45 kV), joka yhdistää eri laitososat säteittäisellä kaapeliverkolla. Järjestelmältä vaaditaan käyttövarmuutta, henkilö- ja omaisuusturvallisuutta, ylläpidettävyyttä sekä taloudellisuutta. (Eronen, 2013)

Teollisuuslaitokset pyrkivät mahdollisimman tehokkaaseen ja taloudelliseen toimintaan, mikä on lisännyt prosessien automaatiota. Automatisoitujen prosessien lisääntyminen on johtanut siihen, että sähkönsiirrolla on yhä suurempi vaikutus tuotantoon. Häiriöt ja viat sähköjakelussa voivat aiheuttaa laitteiden rikkoutumista, sähköjakelun keskeytymisen tai vaaratilanteita. Laiterikkojen korjaaminen ja prosessin uudelleen käynnistäminen saattavat kestää useita tunteja tai jopa vuorokausia. Taloudelliset menetykset kasvavat tuotantohäiriön pitkittyessä suuriksi, sillä tuotanto pysähtyy ja siihen voi prosessista riippuen tulla laatuhäiriöitä. (Eronen, 2013) (Etto, 1998)

Teollisuuden sähköjakelujärjestelmä rakennetaan vastaamaan tuotantoprosessin tarpeita. Sähköjakelujärjestelmän osuus uuden teollisuuslaitoksen hankintakustannuksista on usein pieni, vain noin 5 – 15 %. Järjestelmän tavoite on tarjota tuotantoon vaadittava energia, ja sitä pidetään usein toissijaisena järjestelmänä. Järjestelmän laitteita uusitaankin lähinnä vain tuotannon korvaus- ja laajennusinvestointien tai vikaantumisen yhteydessä. Tällöinkin uudistus voi koskea vain osaa sähköjakeluverkosta. Teollisuuslaitosten sähköjakeluverkko onkin usein sekoitus uutta ja vanhaa jakelutekniikkaa. (Eronen, 2013)

Teollisuuden sähköjakeluverkot ovat laajuudeltaan pieniä, mutta niiden kautta siirrettävän sähkötehon määrä on suuri. Suurimman osan sähköenergiasta käyttävät moottorit minkä takia sähkökäyttöjen nimellistehoja ja lukumäärää käytetään sähköverkon rakenteen sekä mitoituksen perusteena. Sähköenergiaa teollisuuslaitoksissa moottorien lisäksi tarvitaan prosessiautomaatioon, valaistukseen, lämmitykseen, kunnossapitoon sekä sosiaali- ruokailu- ja toimistotiloihin. (Etto, 1998)

Teollisuuslaitosten vahva syöttävä verkko, oma sähköntuotanto, suuret tahtimoottorit ja lukuisat oikosulkumoottorit aiheuttavat sen, että oikosulkuvirrat teollisuuden sähköverkoissa ovat suuret. Kojeistojen, komponenttien ja kaapeleiden täytyy kestää oikosuluista aiheutuvat sähköiset ja mekaaniset rasitukset. Oikosulkuvirtoja voidaan joutua rajoittamaan kytkentätilaa muuttamalla, sarjakuristimen avulla tai suojauksen toiminta-aikoja lyhentämällä. (Eronen, 2013)

2.1 Sähköverkon rakenne ja jännitetasot

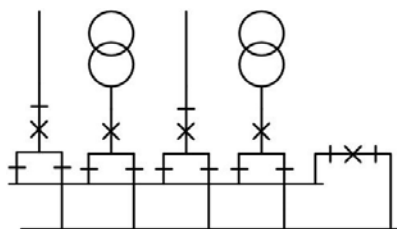
Sähköverkkojen rakentamisessa on käytössä kolme perustyyppiä: säteittäinen, rengas- ja silmukoituverkko. Rakenteen valintaan vaikuttavat teknis-taloudelliset näkökohdat, kuten investoinnin kalleus, käytön taloudellisuus ja luotettavuus, varasyöttöjen mahdollisuus sekä myös verkon suojaukseen liittyvät näkökohdat. (ABB, 2000)

Teollisuuden keski- ja pienjänniteverkoissa käytetään tyypillisesti säteittäistä verkkorakennetta, jonka avulla saavutetaan selkeä yleisrakenne, käytön ja suojauksen yksinkertaisuus sekä pienemmät oikosulkuvirrat. Varasyöttöyhteyksiä rakentamalla voidaan parantaa verkon käyttövarmuutta erilaisissa vika- ja huoltotilanteissa. (Etto, 1998)

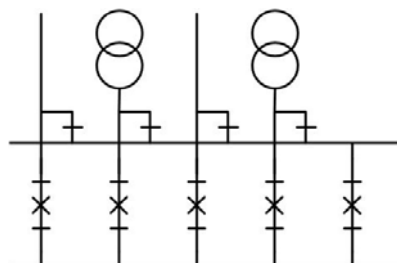
Raskas prosessiteollisuus, jonka tehontarve on yli 10 MW liittyy yleensä 110 kV jännitteellä yleiseen sähköverkkoon. Pienemmät teollisuuslaitokset liittyvät verkkoon 10 tai 20 kV jännitteellä. Jakelujännitteenä käytetään 10, 20 tai 6 kV jännitettä sen mukaan milloin laitos on rakennettu ja kuinka suuria yksikkötehoisia moottoreita on käytössä. Jos kyseessä on vanhahko teollisuuslaitos, voi jakelujännitteitä olla useita esimerkiksi 20 ja 6 kV.

Kun teollisuuslaitos liittyy 110 kV jännitteeseen, tarvitaan yksi tai useampi päämuuntaja teollisuuslaitoksen suuruuden mukaan. Päämuuntajat syöttävät keskijännitejakeluverkkoa, jonka jännite on 20, 10 tai 6 kV. Jos teollisuuslaitoksella on oma voimalaitos, sen generaattori liitetään keskijänniteverkkoon tai jos kyseessä on suuritehoinen generaattori (yli 50 MVA), se voidaan liittää blokkimuuntajalla suoraan 110 kV verkkoon. (Etto, 1998). Päämuuntajalta keskijännitesyöttö tuodaan kaapelilla kytkinaseman keskijännitekojeistolle. Jos teollisuuslaitos liittyy 10 tai 20 kV jännitteeseen, tuodaan verkkoyhtiön syöttö kaapelilla yhdestä tai useammasta muuntopiiristä tehtaan kytkinasemalle. Kytkinasemalta keskijännitejakelu jatkuu kaapeleilla eri laitosien jakelumuuntajille, joiden toisiojännitteet riippuvat niiden perässä olevasta kuormituksesta. Jakelumuuntaja syöttää yhtä tai useampaa pääkeskusta. Jakelumuuntajan pienjännitesyöttö pääkeskukselle tehdään yleensä kiskosillan avulla ja pääkeskuksen pääkatkaisija on tyypillisesti kompaktikatkaisija.

Jos teollisuuslaitoksessa on suurjännitemoottoreita tai generaattoreita, ne liitetään jakelujännitteen mukaan joko samaan kojeistoon jakelumuuntajien kanssa tai omaan erillisen tehomuuntajan kautta syötettyyn kojeistoon. Jos jakelujännite on 20 kV, suurjännitemoottoreilla on yleensä oma 20/6 kV tehomuuntaja. Jos jakelujännite on 10 tai 6 kV, voidaan suurjännitemoottori kytkeä samaan kojeistoon jakelumuuntajien kanssa. (Etto, 1998). Silloin kun teollisuuslaitoksessa on omaa sähkötuotantoa ja suuria moottoreita, käytetään kuristimia oikosulkuvirtojen rajoittamiseksi. Yliaaltojen suodatusta keskijännitteellä joudutaan käyttämään, jos kuormituksessa on paljon yliaaltolähteitä kuten elektroniikkaa, taajuusmuuttajakäyttöjä ja ohjattuja tasavirtakäyttöjä. Loisivirran kompensointi toteutetaan yleensä pienjännitepuolella. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva suuren teollisuuslaitoksen sähkönjakelusta.



KUVA 3. Kaksikiskojärjestelmä (ABB, 2000)



KUVA 4. Kisko- apukiskojärjestelmä (ABB, 2000)

2.2 Tähtipisteen maadoitus

Verkon tähtipiste voi olla maasta erotettu, sammutettu tai maadoitettu. Verkko on maasta erottu silloin, kun yhtään verkon tähtipistettä ei ole yhdistetty maahan suoraan tai impedanssin välityksellä. Suomessa suurin osa keskijänniteverkosta on maasta erotettu. Syynä maasta erotetun verkon käyttöön on huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuva kosketusjänniteongelma.

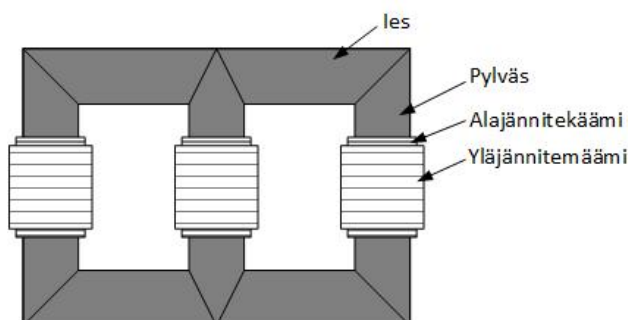
Verkkoa sanotaan sammutetuksi silloin, kun tähtipisteen ja maan väliin on laitettu kuristin. Sammutuksen tarkoitus on kompensoida verkon maakapasitanssien aiheuttama maasulkuvirta ja näin saada maasulku sammumaan itsestään. Verkon sammutus voidaan toteuttaa keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä ratkaisussa on yksi sammutuslaitteisto, joka sijaitsee sähköasemalla. Keskijänniteverkkoa syöttävän muuntajan toisio on tyypillisesti kolmiokytkentäinen, jolloin tähtipistekela varten tarvitaan erillinen maadoitusmuuntaja. Keskitetyssä sammutuksessa sammutuslaitteiston tulee olla säädettävissä, sillä verkostopituus voi vaihdella käyttötilantenteen mukaan. Sääto voidaan toteuttaa käsin ohjattavalla väliottokytkimellä (jännitteettömänä), käsi- tai moottoriohjatulla käämikytkimellä (jännitteisenä) tai muuttamalla rautasydämen ilmaväliä (jännitteisenä). Jälkimmäisellä säädöllä saadaan aikaan portaaton sääto, joka toimii kauko-ohjauksella tai viritysautomaatiikalla. Hajautetussa järjestelmässä eri johtolähdöillä on omat kiinteät sammutuskuristimet. Säädettäviä sammutuskeloja ei tarvita, sillä kela irttaa verkosta samalla kun johtolähtökin. Sammutettua maadoitustapaa käytetään myös keskijänniteverkossa Suomessa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011) (Isomäki, 2010) (Mörsky, 1992)

Maadoitetussa verkossa suurin osa generaattorien ja muuntajien tähtipisteistä on kytketty suoraan maahan tai virtaa rajoittavan impedanssin kautta. Tätä maadoitustapaa käytetään pienjänniteverkoissa, sillä se lisää sähköön käytön turvallisuutta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

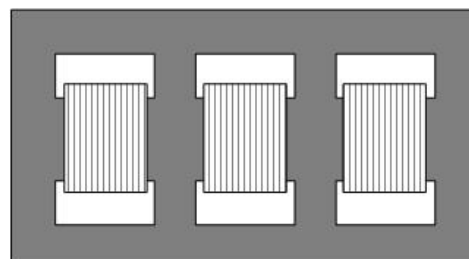
2.3 Jakelumuuntajat

Teollisuudessa käytettävät jakelumuuntajat ovat kolmivaiheisia tehomuuntajia. Tehomuuntaja on staattinen laite, jonka tehtäviä teollisuuden sähköjakelujärjestelmässä ovat muuntaa jännite voimansiirron ja jakelun kannalta edulliseen arvoon, eri jänniteportaiden galvaaninen erottaminen toisistaan sekä oikosulkuvirtojen rajoittaminen. Muuntaja muuntaa ja säätää jännitteitä ja virtoja kahden tai useamman käämityksen välillä sähkömagneettisen induktion avulla. Muuntaja myös muuttaa jännitteen vaihekulmaa jonka suuruus riippuu muuntajan käämien kytkennästä. (Korpinen, 2007) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Muuntajan aktiivisia osia ovat käämitykset ja rautasydän ja passiivisia mm. tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet. Kolmivaihemuuntajassa on jokaista vaihetta kohti kaksi käämistä joita kutsutaan ylä- ja alajännitekäämeiksi. Käämimateriaalina on joko alumiini tai kupari. Sydänrakenteen perusteella muuntajat voidaan jakaa sydän- ja vaippamuuntajiin. Rautasydän valmistetaan tavallisimmin 0,23 – 0,35 mm:n paksuista kidesuunnatuista sydänlevyistä. Rautasydän muodostaa magneettipiirin, jonka osia ovat ikeet ja pylväät. Käämitykset sijoitetaan sylinterimäisesti pylväiden ympärille niin että saman vaiheen ylä- ja alajännitekäämit ovat usein samalla pylväällä. (Korpinen, 2007) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011). Kuvat 5 ja 6 esittävät kolmivaiheisten muuntajien sydänrakenteiden periaatteita.



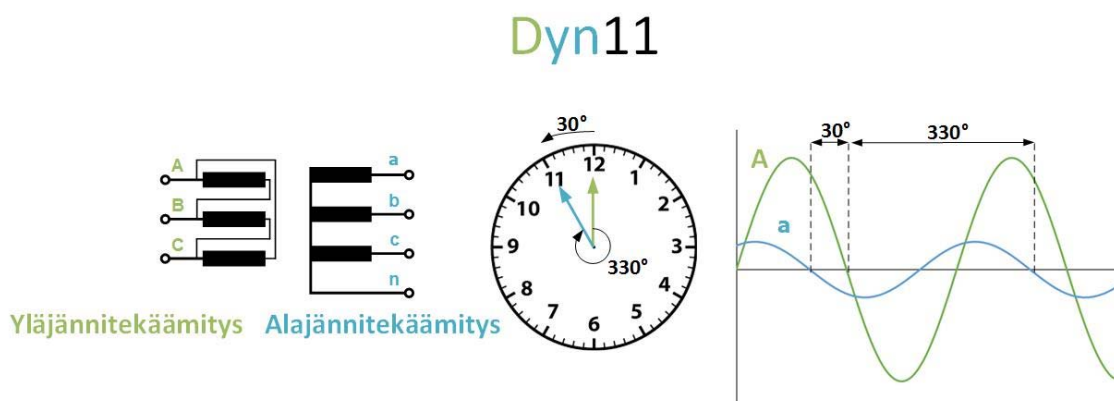
KUVA 5. Kolmivaiheisen sydänmuuntajan rakenne. Kunkin vaiheen käämit on laitettu sisäkkäin pylvään ympärille. (Korpinen, 2007)



KUVA 6. "Perinteisen" kolmivaiheisen vaippamuuntajan rakenne. Käämit ovat makaavassa asennossa ja eri jänniteportaan käämivyyhdet vuorottelevat toistensa kanssa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Kolmivaihemuuntajan käämit voidaan kytkeä tähden (Y,y), kolmioon (D,d) tai hakatähden (Z,z). Iso kirjain ilmoittaa suurimman jänniteportaan ja pieni kirjain alemman jänniteportaan kytkennän. Jos tähti- tai hakatähtikytkentäisen käämityksen nollapiste on tuotu muuntajan kannelle, se ilmaistaan kirjaimella N ja n välittömästi ko. käämityksen kirjainsymbolin jälkeen. Ylä- ja alajännitekäämien välinen vaihesiirto ilmaistaan tunnusluvulla, joka on muodostettu 12-tuntisen kellontaulun tuntinumeroista. Kellontaulun yksi tunti vastaa 30°:n vaihe-eroa. Tunnusluvun perusteella tiedetään, montako astetta alajänniteportaan tietyn vaiheen jännite on jäljessä yläjänniteportaan saman vaiheen jännitettä. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu,

järjestelmät ja laitteet, 2011). Kuva 7 esittää tyypillisesti jakelumuuntajana käytetyn Dyn11 kytkentäisen muuntajan kirjainsymbolien ja tunnusluvun periaatteita.



KUVA 7. Dyn11 kytkentäisen muuntajan käämitysten kytkennät, kellotaulun lukuarvo 11 ja sitä vastaavat yhden vaiheen ylä- ja alajänniteportaankäyrät. Alajännite on 30° edellä yläjännitettä.

Y-kytkentää käytetään tyypillisesti suurille jännitteille ja pienille virroille. D-kytkentää on taloudellisin vaihtoehto silloin kun jännite on pieni ja virrat ovat suuria. Y-kytkentää käytetään myös silloin kun tarvitaan tähtipiste maadoittamista tai vinokuormittamista varten. Muuntajan kytkentä vaikuttaa oleellisesti siihen kuinka paljon vino- eli vaiheen ja maan välistä kuormitusta muuntaja kestä. Dyn-, Yzn- tai Dzn-kytkentäisiä muuntajia voidaan vinokuormittaa 100 %, mutta Yyn-kytkentäisiä vain noin 10 %. Muuntajan kytkentä vaikuttaa myös siihen, voidaanko eri muuntajia käyttää rinnan. (ABB, 2000) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Muuntajan käämeissä ja rautasydämessä syntyy häviöitä, jotka jaetaan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Tyhjäkäyntihäviöt (P_0) ovat rautahäviöitä, jotka perustuvat hystereesi-ilmiöön ja pyörrevirtoihin. Kuormitushäviöt (P_k) johtuvat käämien resistiivisyydestä sekä johtimien virranahto ilmiöstä. Häviöt aiheuttavat muuntajan lämpenemistä ja sitä varten muuntajissa on jäähdytys. Jakelumuuntajat voidaan jakaa jäähdytystavan mukaan öljy- tai ilmajäähdytettyihin muuntajiin. Öljyjäähdytteisten muuntajien käämit ja rautasydän ovat upotettuina öljytäytteeseen säiliöön, jossa syntyvä lämpö siirtyy öljyn ja säiliön seinämien kautta ilmaan. Ko. muuntajien öljysäiliö voi olla hermeettinen eli kaasutiivis tai paisuntasäiliöllinen. Kuiva- eli valuhartsieristeisetmuuntajat ovat ilmajäähdytteisiä muuntajia. (Engström, 2012) Öljyeristeiset muuntajat ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvä, mutta etenkin teollisuudessa niiden käyttö voi olla rajoitettua tai ne vaativat erityisiä palosuojajärjestelyjä. Tällöin kuivamuuntaja on hyvä vaihtoehto sen pienen palokuorman ja itsesammuvuuden ansiosta. (ABB, 2000)

Teollisuuslaitoksissa voi olla prosessista riippuen suurikin määrä taajuusmuuttaja-, tasasuuntaaja- ja syklokäyttöjä. Nämä verkon epälineaariset osat vääristävät sinikäyrän, jolloin muuntajan häviöt kasvavat ja kuormitettavuus alenee. Jotta muuntajan ylikuormittumiselta välttyttäisiin, täytyy verkkoon valita sellainen jakelumuuntaja, jonka mitoituksessa on otettu huomioon yliaaltojen vaikutus. (ABB, 2000)

2.4 Kojeistot

Kojeistolla tarkoitetaan rakennekokonaisuutta, joka sisältää tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Rakennusta tai tilaa jossa keskijännitekojeisto sijaitsee, kutsutaan kytkinlaitokseksi. Teollisuuden keskijännitekojeistot ovat kyseisen laitoksen rakentamisajankohdan mukaista tekniikkaa. Aikaisemmin keskijänniteverkoissa yleisiä ratkaisuja ovat olleet avorakenteiset sisäkojeistot. Ne toteutettiin tavallisesti kennoasennuksena, jossa kojeryhmät erotettiin toisistaan väliseinien avulla. Nykyään avoimien kojeistorakenteiden tilalle ovat tulleet tehdasvalmisteiset ilma- tai SF₆-eristeiset koteloidut kojeistot. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Tehdasvalmisteisia, sisälle asennettavia vaihtojännitekojeistoja (nimellisjännitteet 1 – 52 kV ja taajuudet 60 Hz saakka) sekä kojeistossa käytettäviä kojeita koskevat standardit ovat:

- IEC 62271-1 (60694) kojeistot ja kytkinlaitteet
- IEC 62271-200 (60298) AC metallikuorinen kojeisto 1 - 52 kV
- IEC 60529 kotelointiluokka
- IEC 62271-100 katkaisija
- IEC 60470 kontaktori
- IEC 60282-1 sulake
- IEC 62271-102 (60129) maadoituskytkin
- IEC 60044-1 virtamuuntaja
- IEC 60044-2 jännitemuuntaja. (Järvi, 2011)

Suluissa on vanha standardi. Kaikkien uusien keskijännitekojeistojen, jotka on asennettu 2.2.2007 jälkeen, täytyy täyttää standardin IEC 62271-200 vaatimukset.

Kojeistot on suunniteltu käytettäväksi ns. normaaleissa sisäasennusolosuhteissa:

- Maksimilämpötila ei saa olla yli 40 °C ja 24 tunnin keskiarvo ei saa ylittää 35 °C:tta.
- Käyttölämpötilan minimiarvolle on kolme eri luokkaa: -5, -15 tai -25 °C.
- Suhteellisen kosteus: 24 h:n keskiarvo alle 95 % ja kuukauden keskiarvo alle 90 %.
- Ilman puhtaus: ei juuri pölyä, savua, syövyttäviä kaasuja, höyryjä tai suoloja.
- Sijoitus enintään 1 000 m merenpinnan yläpuolelle. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Nykyiset prosessiteollisuudessa käytettävät keskijännitekojeistot ovat ilma- tai SF₆-eristeisiä ja rakenteeltaan metallikuorisia (metal-enclosed). Aikaisemmin tehdasvalmisteisia, sisälle asennettavia 1- 52 kV metallikuorisia vaihtojännitekojeistoja, koski standardi IEC 60298, jonka mukaan ko. kojeistot jaettiin kojeiston sisäisen osastoinnin ja sen toteutuksen perusteella kolmeen alalajiin:

- metallikoteloidut (metal-clad)
 - kokoojakiskot, katkaisija ja kunkin lähdön kojeet omissa tiloissaan
 - tilojen välinen osastointi toteutettu maadoitetulla metallilla
- tilakoteloidut (compartmented)

- muuten sama kuin metallikoteloitu, mutta tilojen välinen osastointi osittain tai kokonaan eristysainetta
- kennokoteloidut (cubicle)
 - kennojen väliseinät on, mutta ei kennon sisäisiä väliseiniä → kokoojakiskot, katkaisija, mittamuuntajat ja kaapelipäätteet sijaitsevat samassa tilassa
 - henkilöturvallisuuden kannalta huonompi kuin metallikoteloitu (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Standardin IEC 60298 on korvannut standardi IEC 62271-200, jonka päämuutoksia ovat:

- Laitteiden luokitus tehdään käyttö- ja henkilöturvallisuuden näkökulmasta. Luokituksen tunnus on LSC (Loss of Service Continuity). Luokituksen perusteet on selvitetty taulukossa 1.
- Tilojen välisten osastointien toteutus on ilmaistu tunnuksilla
 - PM (partition metallic), joka tarkoittaa että sulkulevyt (shutterit) ovat metallisia ja osastointi on toteutettu metallilla ja
 - PI (partition non metallic), joka tarkoittaa että, osastointi on eristeainetta. Esimerkiksi vanha "metal-clad" on uuden standardin mukaan luokka LSC 2B-PM.
- Valokaariluokitus on erilainen. Luokituksen tunnus on IAC (Internal Arc Classes). Esimerkiksi merkintä IAC A FLR tarkoittaa "accessibility class A for the front, lateral and rear sides", ja se on tarkoitettu vapaasti sähkötilassa seisoville kojeistoille. Merkintä IAC A FL on tarkoitettu seinää vasten asennettaville kojeistoille.
- Käyttäjän pääsy eri kojeiston osiin on määritelty pääsymahdollisuuksien mukaan, joita ovat:
 - pääsy valvottu lukituksin tai ohjaustoimenpitein (interlock-controlled accessible compartments)
 - pääsy työkaluin (tool-based accessible compartments)
 - ei pääsyä, esimerkiksi kaasueristeisissä keskuksissa (Järvi, 2011) (Siemens, 2012)

TAULUKKO 1. Sisälle asennettavien 1- 52 kV metallikuoristen vaihtojännitekojeistojen LSC-luokitus. (Siemens, 2012)

| Käyttökatkoskategoriat | | Jos yksi avattavissa oleva osasto (esim. katkaisijatila) on avattuna | Rakenne |
|------------------------|--------|--|---|
| LSC 1 | | Muiden kennon osien tulee olla jännitteettöminä | Kennojen välillä ei ole osastointia |
| LSC 2 | LSC 2A | Muut kennon osat voivat olla käytössä (jännitteisinä) | Kennojen, katkaisija- ja kokoojakiskotilan välillä osastointi |
| | LSC 2B | Kaikki muut kojeiston osat ja kaapelitila voivat olla käytössä (jännitteisinä) | Kennojen, katkaisija-, kokoojakisko- ja kaapelitilan välillä osastointi |

Kojeistot voidaan jakaa kalustustavan mukaan ulosvedettävillä kojeilla- tai kiinteällä kalustuksella varustettuihin kojeistoin. Ensimmäisestä käytetään nimitystä vaunukojeisto ja siinä kennon

kytkinlaite (katkaisija, erotin, kuormanerotin tai kontaktori) on sijoitettu liikuteltavaan vaunuun, jota siirtämällä saadaan aikaan virtapiiriin luotettava avausväli. Tämä ilmaväli korvaa katkaisijaa ympäröivät erottimet. Kojeistoissa käytetään mekaanisia ja sähköisiä lukituksia, joilla käyttäjän virhetoiminnot voidaan ehkäistä. Lukituksia, joita vaunukatkaisijakojeistossa täytyy vähintään olla:

- Vaunussa olevan kytkinlaitteen siirto voidaan suorittaa vain sen ollessa auki asennossa.
- Kytkinlaitetta voidaan ohjata vain kun vaunu on käyttö-, erotus-, maadoitus- tai koestusasennossa.
- Kytkinlaitteen kiinniohjaus on estetty, mikäli apupiirejä ei ole kytketty. (ABB, 2000)

Nykyaikainen kojeistojen rakenneratkaisu on ns. kasettikojeisto, jossa kytkinlaitteet ovat vaunujen sijaan kaseteissa. Kasetti voidaan vaihtaa tai ottaa huoltoon siirtovaunun avulla. Turvallisuutta ja käytettävyyttä on edelleen parannettu vaunukojeistoihin verrattuna. Kytkeä toimenpiteitä ei voida suorittaa, jos kojeiston ovi on auki. Erillisiä työskentelysuojia ei tarvita, sillä katkaisijakasettia poistettaessa, kokoojakisko- ja kaapelitilojen eteen tulevat automaattisesti sulkulevyt. Jokaisesta kojetilasta on omat purkausluukut, joista valokaaripaine ohjataan purkauksenaan ja sitä kautta ulos kytkinlaitoksesta. Työmaadoittamista varten oleva maadoituserotin on kytkentäkykyinen eli pystyy sulkeutumaan vaurioitta mitoitusvirrallaan. Katkaisijoina kasettikojeistoissa käytetään tyhjö- tai SF₆-eriteisiä katkaisijoita. Valmistajilla on saatavilla kojeistoihin erilaisia ohjauksen, suojauksen ja valvonnan toisilaitteita. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

2.5 Katkaisijat ja erottimet

Tyypillisiä kytkinlaitteita teollisuuden keskijännitejakeluverkossa ovat katkaisijat ja erottimet, joiden tehtävänä on muuttaa tarvittaessa verkon topologiaa, erottaa viallinen verkoston osa nopeasti ja luotettavasti irti verkosta vahinkojen ja vaarojen välttämiseksi ja toimia tarvittaessa erotuskohtana verkoston eri osien välillä. Erotin vaaditaan lakisääteisesti ja sen tarkoitus on muodostaa näkyvä ja jännitelujuudeltaan riittävä avausväli esimerkiksi katkaisijahuollon ajaksi. Erottimen avausvälin tulee olla näkyvä tai se on varustettava luotettavalla mekaanisella asennonosoituksella. Erottimia ei ole tarkoitettu kuormitetun virtapiiriin avaamiseen ja sulkemiseen, mutta käytännössä niillä voidaan erottaa lyhyt kiskosto tai johto tai katkaista muuntajan tyhjäkäyntivirta. Erottimia käytetään paikoissa, jossa verkko halutaan jakaa osiin, erottamaan huoltoa tai vaihtoa vaativa laite (esim. katkaisija), keskeyttämättömän käytön mahdollistavina ohituserottimina tai maadoituserottimina. Nykyään käytetään paljon vaunu- tai kasettikatkaisijoita, joissa avausväli syntyy siirtämällä katkaisijaa eikä erillisiä erottimia tarvita. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Katkaisijoita käytetään virtapiiriin avaamiseen ja sulkemiseen ja ne voivat toimia sekä käsin ohjattuna että automaattisesti. Tavallisesti automaattinen avaustoiminto liittyy verkon vikatilanteisiin (esim. oikosulku tai maasulku), jolloin avautumiskäskyn katkaisijalle antaa samaan virtapiiriin mittamuuntajien avulla kytketty rele. Katkaisijan on pystyttävä avaamaan ja sulkemaan

oikosulkupiirin virta, joka on moninkertainen mitoitusvirtaan verrattuna. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Valokaari on olennainen osa katkaisutapahtumassa. Kun katkaisijan koskettimet alkavat avautua, virta ei ala heti katkeamaan vaan valokaari pitää virtapiiriä suljettuna. Virta on tällöin suuri ja valokaaren johtavuus hyvä. Kun koskettimet ovat tarpeeksi etäällä toisistaan, virta alkaa pienentyä ja valokaaren vastus kasvaa. Jos virran nollakohdassa valokaarta jäähdytetään tehokkaasti, sen resistanssi kasvaa hyvin nopeasti. Valokaari muuttuu siis katkaisutapahtuman aikana johteesta eristeeksi. Tätä valokaaren olotilan muutosta käytetään ehkäisemään liian nopeasta virran katkeamisesta aiheutuvaa ylijännitevaaraa. Katkaisua helpottaa kun valokaarta pidennetään (koskettimien sopiva muotoilu), jaetaan osiin, jäähdytetään ja katkaisu tehdään vaihtovirran luonnollisessa nollakohdassa. Näiden seikkojen lisäksi, virran katkaisua voidaan helpottaa valitsemalla valokaarta ympäröivä väliaine sellaiseksi, että se edesauttaa valokaaren sammumista. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Siihen minkälaisia rasituksia katkaisijaan kohdistuu katkaisun aikana, vaikuttavat katkaistavan virran suuruus ja vaihesiirto sekä ns. palaavan jännitteen ominaisuudet. Palaavalla jännitteellä tarkoitetaan katkaisijan koskettimien välistä jännitettä valokaaren sammumisen jälkeen. Palaava jännite koostuu kahdesta osasta: verkkotaajuisesta ja transienttisesta osasta ja sen jyrkkyyteen ja amplitudiin vaikuttavat verkko ja katkaisutilanne. Tyypillisesti induktiivisen ja kapasitiivisen virran katkaisu on vaikeampaa kuin resistiivisen. Palaavan jännitteen seurauksena valokaari voi syttyä uudelleen. Verkon ominaisuudet ja erilaiset katkaisutilanteet täytyy tuntea, jotta katkaisija voidaan valita kestämaan vahingoittumatta palaavaan jännitteen rasitukset. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Katkaisijat voidaan jakaa katkaisijakammiossa käytettävän väliaineen perusteella kuuteen ryhmään: ilmakatkaisijat, öljykatkaisijat, vähäöljykatkaisijat, paineilmakatkaisijat, SF₆-katkaisijat ja tyhjiökatkaisijat. Näistä neljän ensimmäisen pääasiallinen valmistuskausi on jo päättynyt, mutta niitä voi olla vielä käytössä. 1970- ja 1980-lukujen jälkeen SF₆- ja tyhjiökatkaisijat ovat syrjäyttäneet lähes täysin muut katkaisijalajit ja ne molemmat sopivat hyvin keskijännitekatkaisijoiksi. SF₆-katkaisijan etuja ovat: sopii lähes kaikkiin katkaisutilanteisiin, pystyy katkaisemaan mitoitusvirtansa huollotta tuhansia kertoja, pitkä huoltoväli, jälleen syttymättömyys ja sysäysvirtakestoisuus. Ongelmia voivat aiheuttaa mm. valokaaren aiheuttamat myrkylliset ja kosteuden kanssa korroosiota aiheuttavat yhdisteet katkaisukammiossa sekä kaasun nesteytyminen alhaisissa lämpötiloissa. SF₆-kaasu luokitellaan kasvihuonekaasuksi ja tästä syystä katkaisijan kaasutiiveyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tyhjiökatkaisija on rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin muut katkaisijatyypit ja se soveltuu myös lähes kaikkiin katkaisutilanteisiin. Tyhjiökatkaisija ei vaadi huoltoa: ainoastaan mekaaninen ohjain tarvitsee voitelua määrävälein (noin kerran 10 vuodessa). (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Katkaisijoiden tulee täyttää kansainväliset IEC-standardit (esim. IEC 62271-100 ja 62271-1). Standardit on laadittu niin, että ne kattavat laajan sovellusalueen. Käyttötarkoitus ja käyttöympäristö

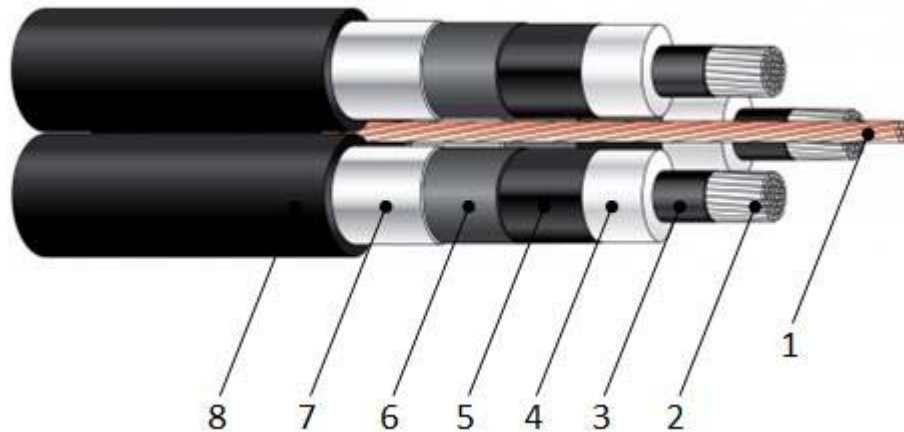
voivat edellyttää katkaisijalta kuitenkin sellaisia erityisominaisuuksia, jotka valintaa tehdessä täytyy ottaa huomioon. Tärkeimmät katkaisijan valintaan vaikuttavat ominaisuudet ovat:

- mitoitusvirta (tulee olla tarpeeksi suuri, sillä katkaisijoilla ei ole ylikuormitettavuutta)
- terminen kestovirta I_{th} (=suurin oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka katkaisija kestää määrääjän, yleensä 1 tai 3 sekuntia)
- oikosulkuvirran huippuarvo i_p (=oikosulkuvirran huippuarvo, joka kuvaa katkaisijan mekaanista kestoisuutta sysäysoikosulkuvirran voimavaikutuksia vastaan)
- mitoitusjännite (oltava vähintään yhtä suuri kuin verkon suurin käyttöjännite)
- oikosulun katkaisukyky (=suurin virta-arvo, jonka katkaisija pystyy mitoitusjännitteellään kolmivaiheisessa napaoikosulussa katkaisemaan)
- oikosulun sulkemiskyky (=suurin epäsymmetrisen virran huippuarvo, jonka katkaisija pystyy mitoitusjännitteellään vaurioitumatta kytkemään)
- vaihtosähkön taajuus (Suomessa 50 Hz)
- eristystasot
- palaavan jännitteen mitoitusarvot (palaavan jännitteen käyttötaajuuden osan suuruus ilmoitetaan usein suhteellisarvona, josta käytetään nimitystä avauskerroin k , avauskerroin on IEC:n mukaan maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa 1,7)
- nimellinen toimintasykli (arvo kuvaa minkälaisesta avautumis- ja sulkeutumissequenssistä katkaisija selviää, tärkeää ottaa huomioon jos käytetään jälleen kytkentöjä tai muita usein toistuvia katkaisijatoimintoja)
- katkaisukyvyt erityistilanteissa
- apu- ja ohjauspiirien mitoitusjännitteet ja -taajuudet. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

2.6 Voimakaapelit

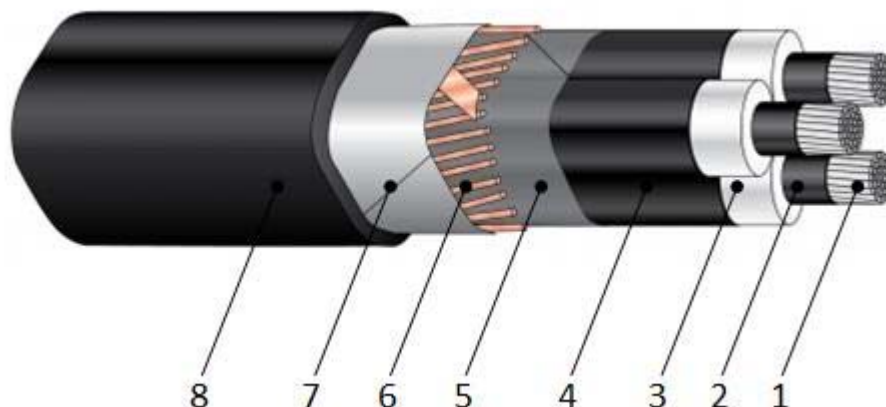
Teollisuuden keskijännitejakelussa käytetään voimakaapeleita, sillä ne vievät vähemmän tilaa kuin avojohdot ja lisäksi ovat turvallisempia ja käyttövarmempia. Teollisuudelle on tyypillistä että kuormavirrat ovat suuria ja johtopituudet ovat lyhyitä. Suuri tehonsiirto aiheuttaa sen, että kaapeleiden poikkipinnat ovat suuria. (Eronen, 2013) Kaapelit asennetaan maahan tai kiinteästi hyllylle ulos tai sisään. Keskijännitekaapeleita valmistetaan 10 – 30 kV jännitteille ja ne ovat rakenteeltaan joko yksi- tai kolmijohtimisia tai kerrattuja kolmijohtimisia. Yksijohdinkaapelien tyypilliset poikkipinnat ovat 300 ja 800 mm² ja kolmijohdinkaapeleiden 70 – 300 mm². (Reka Kaapeli Oy, 2016).

Kuvassa 8 on esitelty kerratun kolmijohdinkaapelin AHXAMK-W rakenneosat. Kaapeli sopii hyvin maa-asennukseen, sillä se on sekä pitkäikäinen että poikittaissuunnassa vesitiivis. Kuva 9 esittää ns. teollisuuskaapelia AHXCMK-WTC, jonka rakenne poikkeaa AHXAMK-W kaapelista siten, että siinä johtimilla on yhteiset kosketussuojat ja vaippa. Rakenteensa ansiosta kaapeli sopii paremmin pinta-asennukseen, sillä se kestää paremmin oikosulun aiheuttamia dynaamisia vaikutuksia. Lisäksi kyseinen kaapeli sopii sisäasennukseen, sillä se on nippuna itsesammuttava ja paloa levittämätön. (Simonen, 2009)



KUVA 8. Keskijännitekaapeli AHXAMK-W 20 kV, jossa kolme vaipattua vaihejohtinta on kerrattu keskusköyden ympärille. Valmistajana suomalainen Reka Kaapeli. Kaapelin rakenneosat sekä kirjaintunnukset ovat:

1. Keskusköysi, pyöreä kupariköysi
2. Johdin, vesitiivis pyöreä alumiiniköysi (A)
3. Johdinsuoja, puolijohtava muovi (H)
4. Eristys, PEX-muovi (X), antaa jännitekestoisuutta sekä siirtää lämpöhäviöt pois kaapelista
5. Hohtosuoja, puolijohtava muovi, yhdessä johdinsuojan kanssa rajaa johtimen aiheuttaman sähkökentän kahden sylinteripinnan väliin
6. Vesitiivistys, puolijohtava nauha, paisuu veden vaikutuksesta ja muodostaa esteen veden pitkittäiselle etenemiselle
7. Kosketussuoja, alumiini-muovilaminaatti (A), toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana ja turvallisuuslaitteena sekä vesitiivistyksenä poikittaissuunnassa
8. Vaihevaippa, musta säänkestävä PE-muovi (M) (Reka Kaapeli Oy, 2016) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)



KUVA 9. Keskijännitekaapeli AHXCMK-WTC 20 kV ns. "teollisuus viski". Valmistajana suomalainen Reka Kaapeli. Rakennneosat ovat

1. Johdin, vesitiivis pyöreä alumiiniköysi (A)
2. Johdinsuoja, puolijohtava muovi (H)
3. Eristys, PEX-muovi (X)
4. Hohtosuoja, puolijohtava muovi
5. Vyönauhoitus, puolijohtava muovi
6. Kosketussuoja, kerros kuparilankoja ja kuparinauhasidos, toimii varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana ja turvallisuuslaitteena (C)
7. Erotuskerros, muovinauhoitus
8. Vaihevaippa, musta säänkestävä PVC-muovi (M)

Kaapelityypin ja johdinpoikkipinta-alan valintaan vaikuttavat monet tekijät. Kaapelin kuormitettavuuden tulee olla riittävä ja siinä on otettava huomioon myös kuormituksen kasvuennuste. Kuormitettavuuteen vaikuttavat mm. kaapelin rakenne ja asennustapa, ympäristön lämpötila (ulko- vai sisäasennus), muiden lämpöä tuottavien johtojen läheisyys ja maahan upotettavien kaapelien tapauksessa maan lämpöresistiivisyys ja asennussyvyys. Kaapelien maksimikuormitettavuudet selvitetään kaapelivalmistajien kuormitustaulukoiden avulla. Jos asennusolosuhteet poikkeavat standardiolosuhteista, täytyy käyttää sopivia korjauskertoimia. Jatkuvan kuormavirran lisäksi kaapelin tulee kestää verkon oikosulkuvirran termiset- sekä dynaamiset vaikutukset. Kaapelin terminen oikosulkukestoisuus ilmoitetaan suurimpana sallittuna 1 sekunnin virta-arvona ja kaapelin terminen kestoisuus vikatilanteessa voidaan laskea sen perusteella yhtälöllä (1).

$$I_{thr} = \frac{I_{th1s}}{\sqrt{t_k}} \quad (1)$$

jossa

I_{thr} = oikosulkuvirran arvo, jonka kaapeli kestää ajan t verran (kA)

I_{th1s} = terminen yhden sekunnin virta-arvo (kA)

t_k = oikosulun kesto aika (s), jossa huomioitava suojareleen ja katkaisijan toiminta-aika

Oikosulkuvirran dynaamiset voimavaikutukset tulee ottaa huomioon kaapelien asennustekniikassa ja kaapelivarusteissa (mm. päätteet, jatkot ja kiinnikkeet) (Prysmian Group, 2013).

Sähkötekniisten ominaisuuksien lisäksi kaapelilta vaaditaan taloudellisuutta. Kaapelin hankinta ja asennuskustannusten tulee olla kohtuulliset. Kustannuksiin voidaan vaikuttaa valitsemalla jokin ns. suosituimmuuskaapeleista, joilla tarkoitetaan kaapelivalmistajien muutamia poikkepinnoiltaan yleisimpiä ja jatkuvasti saatavissa olevia kaapelityyppejä. Kaapelin taloudellisuuteen vaikuttavat myös vuotuiset kunnossapitokustannukset sekä häviökustannukset, jotka täytyy arvioida valintaa tehtäessä. (ABB, 2000)

Vesitiiviyyden merkitys on suuri kaapelin jännitelujuuden kannalta. Veden pääseminen kaapelin eristykseen, synnyttää sähkökentän vaikutuksesta kanavia, joita kutsutaan vesipuiksi. Riittävän suureksi kasvanut vesipuu aiheuttaa eristeessä läpilyönnin. Vettä voi päästä kaapeliin usealla tavalla. Kaapelin katketessa tai ulkovaipan vaurioituttua, vesi voi edetä kaapelin sisällä hyvinkin nopeasti. Vaikka kaapelin vauriot tämän jälkeen korjattaisiinkin, sisälle päässyt vesi alkaa pikkuhiljaa synnyttää vesipuita. Vesi voi päästä kaapelin rakenteisiin myös ehjän ulkovaipan läpi diffuusion avulla. Ulkovaipan materiaali vaikuttaa läpikäsyyn oleellisesti: PE-muovien läpi vesi pääsee hitaasti kun taas PVC-muoveista suhteellisen nopeasti (pahimmillaan muutamassa kuukaudessa). Veden haittavaikutuksilta voidaan välttyä valitsemalla kaapeli, jossa veden pääsy on estetty (esim. AHXAMK-W). Lisäksi varastoinnissa tulee huolehtia, että kaapelin päät on hyvin suljettu. (Prysmian Group, 2013)

3 SÄHKÖVERKON VIKA- JA HÄIRIÖTILANTEITA

Teollisuuslaitokset pyrkivät mahdollisimman tehokkaaseen ja taloudelliseen toimintaan, mikä on lisännyt prosessien automaatiota. Automatisoitujen prosessien lisääntyminen on johtanut siihen, että sähkönsiirrolla on yhä suurempi vaikutus tuotantoon. Häiriöt ja viat sähkönjakelussa voivat aiheuttaa laitteiden rikkoutumista, sähkönjakelun keskeytymisen tai vaaratilanteita. Laiterikkojen korjaaminen ja prosessin uudelleen käynnistäminen saattavat kestää useita tunteja tai jopa vuorokausia. Taloudelliset menetykset kasvavat tuotantohäiriön pitkittyessä suuriksi, sillä tuotanto pysähtyy ja siihen voi prosessista riippuen tulla laatuhäiriöitä. (Eronen, 2013) (Etto, 1998)

Sähköverkossa tapahtuvia tavallisimpia vikatilanteita ovat oiko- ja maasulut ja joskus myös katkokset. Oikosulut ovat vaiheiden välisiä vikoja ilman maakosketusta, kun taas maasuluissa vikavirtapiiriin kuuluu aina myös maa. Vikatilanteet aiheuttavat sähköverkkoon erityyppisiä ja erisuuruisia vikavirtoja ja -jänniteitä, jotka voivat puolestaan johtaa henkilö- ja laitevaurioihin ja sähkönjakelun keskeytyksiin. Kaikki viat eivät johda käyttökeskeytyksiin, esimerkiksi silloin kun vika poistuu itsestään ennen kuin verkon suojalaitteisto ehtii tehdä katkaisun. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

Sähköverkon vika saattaa johtaa häiriöön, mikä voi aiheuttaa suunnittele mattoman käyttökeskeytyksen. Vikojen lisäksi häiriöitä verkkoon aiheuttavat hitaat- ja nopeat jännitteenmuutokset, jonkin verkko-osan tai laitteen ylikuormittuminen ja inhimilliset erehdykset kuten kytkentävirhe tai reletestaajan tekemä aiheeton katkaisijan laukaisu. Suojalaitteiden epäselektiivinen toiminta aiheuttaa sen, että käyttökeskeytys ulottuu laajempaan osaan verkkoa kuin mitä vika edellyttäisi. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Viat voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Symmetrinen vika tarkoittaa sitä, että vian pääasialliset vaikutukset kohdistuvat kaikkiin vaiheisiin samanlaisina. Tyypillisin symmetrinen vika on kolmivaiheinen oikosulku. Epäsymmetristen vikojen vaikutukset ovat erilaiset eri vaiheissa. 1- tai 2-vaiheiset maasulut ovat esimerkkejä epäsymmetrisistä vioista. Epäsymmetriset viat voivat olla myös yhdistelmävikoja kuten kaksois- tai kolmoismaasulku, joissa useita maasulkuja on samanaikaisesti eri puolilla verkkoa. 1-vaiheinen katkos, minkä voi synnyttää esimerkiksi katkaisijan tai sulakkeen epätäydellinen toiminta, on myös verkon epäsymmetrinen vika. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, 2011).

Vikojen aiheuttajia ovat esimerkiksi

- salamaniskusta tai jostakin verkon sisäisestä syystä johtuvat ylijännitteet
- laitteiden mekaanisista vioista johtuvat laitteiden toimintahäiriöt tai virhetoiminnot
- jonkin verkkokomponentin eristyskyvyn aleneminen

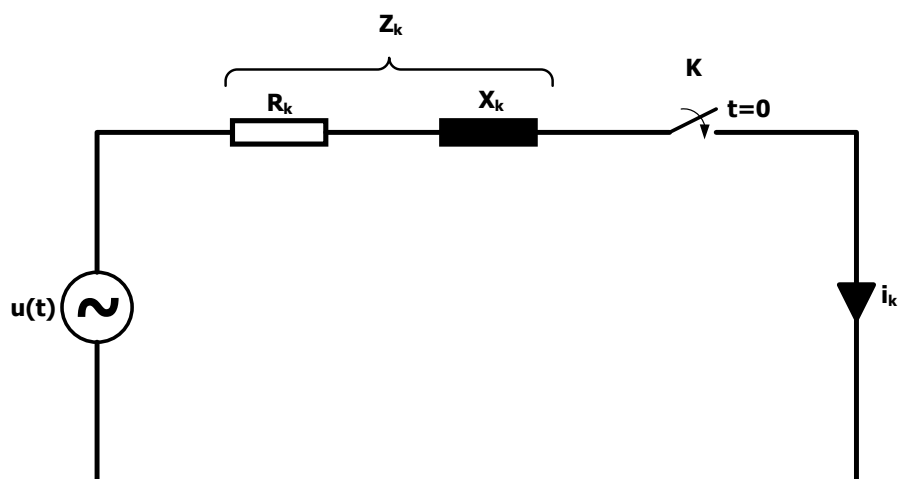
- virheelliset käyttö- ja kytkentätoimenpiteet kuten kuormitusvirran katkaiseminen erottimella ja korjaus- ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä asennettujen maadoitusten paikalleen unohtuminen
- ilkivalta (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011) (Huotari & Partanen, 1998).

3.1 Oikosulku

Kun virtapiirin johtavat osat joutuvat keskenään kosketukseen suoraan, valokaaren tai vikaimpedanssin kautta, tapahtuu virtapiirissä oikosulku. Virta oikosulussa on suuri, usein 10 – 40 kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna, ja vikapaikan jännite on pieni. Oikosulku voi olla 2- tai 3-vaiheinen tai 1-vaiheinen jos virtapiiriin kuuluu nollajohdin. Suurin oikosulkuvirta syntyy kolmivaihejärjestelmässä vastuksettomasta 3-vaiheisesta oikosulusta. Generaattorit syöttävät verkkoon vikavirtaa. Virta on sitä pienempi, mitä kauempana vikapaikka on generaattoreista, sillä sähköverkon johtojen ja muuntajien impedanssit rajoittavat oikosulkuvirtaa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011).

3.1.1 Oikosulkuvirran teoreettinen tarkastelu

Vika synnyttää verkossa muutosilmiön, joka vaimenee pois oman aikavakionsa mukaisesti. Oikosulkuvirran käyttäytymistä voidaan tarkastella kuvan 10 mukaisen sijaiskytkennän avulla.



KUVA 10. Virran muutosilmiön tarkasteluun sopiva yksivaiheinen sijaiskytkentä ilman kuormitusta.

Piirissä $u(t)$ on verkon ideaalinen, vakiotaajuinen sinimuotoisesti vaihteleva jännitelähde, jolle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

missä $\hat{u}(t)$ on sinimuotoisen jännitteen huippuarvo, ω on kulmataajuus, t on kulunut aika oikosulun syntyhetkestä lähtien ja α on jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun syntyhetkellä. Piirissä, jossa ei ole vikavastusta jännitehäviön muodostavat verkon

oikosulkuresistanssi R_k ja oikosulkureaktanssi ja kun kytkin K suljetaan ajanhetkellä $t = 0$ voidaan yhtälö (2) johtaa muotoon

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

jossa R_k on oikosulkuresistanssi, L_k oikosulkuinduktanssi ja i_k oikosulkuvirta.

Kun ratkaistaan yhtälöstä (3) oikosulkuvirta i_k ajan hetkellä t saadaan oikosulkuvirralla yhtälö

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right], \quad (4)$$

jossa Z_k on oikosulkupiirin vaiheimpedanssi, φ_k on impedanssin vaihekulma ja τ piirin aikavakio.

Nämä voidaan esittää piirin resistanssin ja reaktanssin avulla yhtälöillä (5), (6) ja (7).

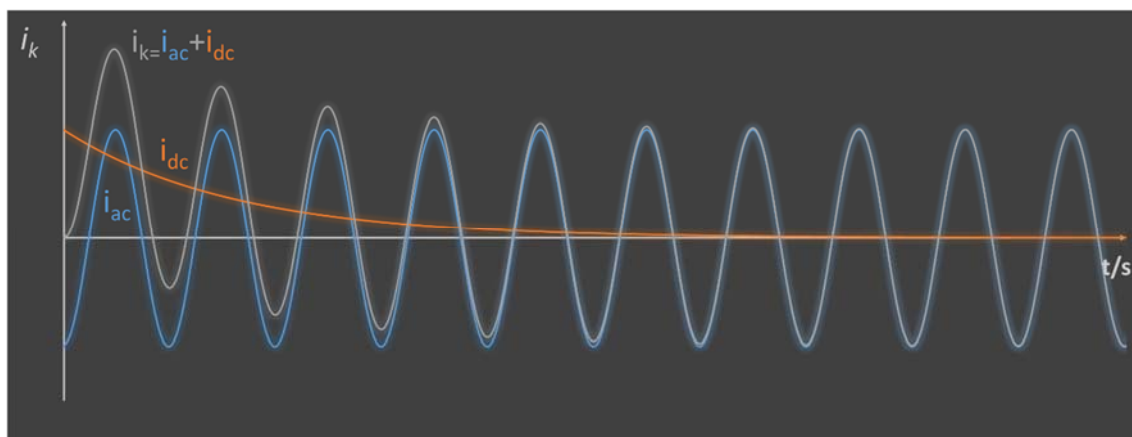
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (5)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{X_k}{R_k}\right) \quad (6)$$

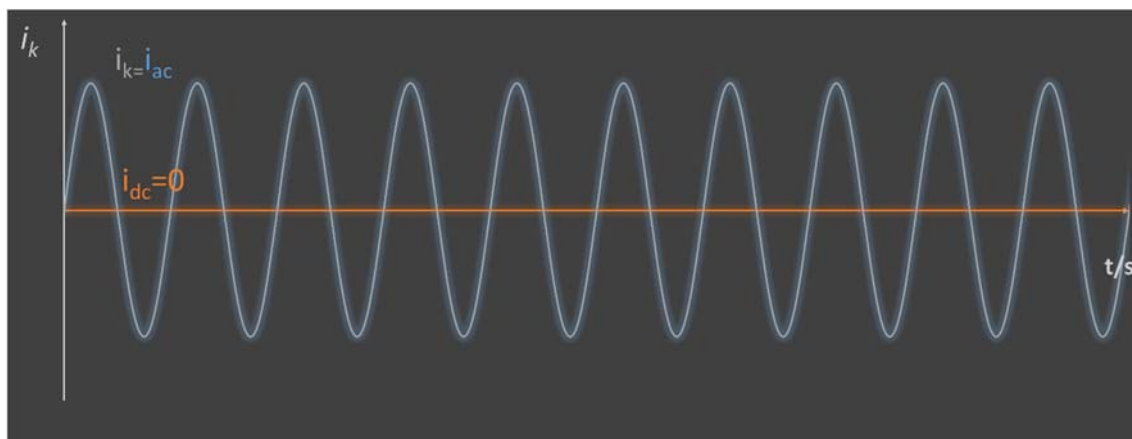
$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \quad (7)$$

Oikosulkuvirran voidaan olettaa olevan puhdasta loisivirtaa, sillä oikosulkupiirin impedanssi on pääasiassa induktiivinen. Yhtälöstä (4) nähdään, että oikosulkuvirta muodostuu kahdesta sinimuotoisesta komponentista. Ensimmäinen, $\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$, on symmetrinen

siniaaltokomponentti i_{ac} ja toinen, $-e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k)$, on tasavirtakomponentti i_{dc} , joka vaimenee aikavakionsa τ mukaisesti. Tasavirtakomponentin suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta oikosulun syntyhetkellä ja vaimenemisnopeus piirin reaktanssin ja resistanssin suhteesta yhtälön (7) mukaisesti. Tasavirtakomponentti on suurimmillaan silloin kun $\alpha - \varphi_k = \pm 90^\circ$. Jos oikosulku tapahtuu hetkellä jolloin $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° , ei tasavirtakomponenttia esiinny ollenkaan ja oikosulkuvirta on symmetrinen. Jos oikosulkuvirran tasavirtakomponentti saa nolasta poikkeavan arvon, on oikosulkuvirta epäsymmetrinen. Alla on esitetty oikosulkuvirran muodostuminen tasa- ja vaihtovirtakomponenteista tilanteissa, joissa oikosulkuvirta on epäsymmetrisin (kuva 11) ja täysin symmetrinen (kuva 12). (Eronen, 2013)



KUVA 11. Epäsymmetrinen oikosulkuvirta i_k ja sen tasa- ja vaihtovirtakomponentit



KUVA 12. Symmetrinen oikosulkuvirta i_k ja sen tasa- ja vaihtovirtakomponentit.

Tasavirtakomponentin arvo on nolla ja oikosulkuvirta muodostuvat vain sen vaihtovirtakomponentista.

Yllä olevissa kuvissa on kuvattu yhden vaiheen oikosulkuvirta. Kolmivaihejärjestelmässä vaiheet ovat 120 asteen vaihesiirrossa keskenään, joten jos yhden vaiheen oikosulkuvirta on symmetrinen, ovat kahden muun vaiheen oikosulkuvirrat epäsymmetrisiä. Toisin sanoen kolmivaihejärjestelmässä on ainakin kahdessa vaiheessa aina tasakomponentti. (Eronen, 2013) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

Yllä kuvatussa tilanteessa oletetaan, että verkon vastus ja induktanssi pysyvät ajan suhteen vakiona, mutta käytännön vaihtosähköverkossa tasavirtakomponentin lisäksi myös vaihtovirtakomponentti muuttuu ajan mukana. Vaihtovirtaosa muuttuu sitä enemmän, mitä lähempänä voimalaitosta vika tapahtuu. Generaattoreina käytettävien tahtikoneiden reaktanssi on muutoksen alkuhetkinä pieni, mutta suurenee vähitellen kohti tahtireaktanssia. Lähellä generaattoria tapahtuvien vikojen vaihtovirtaosan amplitudissa erotetaan alkuoikosulkuvirta I_k'' ja muutosoikosulkuvirta I_k' , jotka vaimenevat omien aikavakioittensa τ'' ja τ' mukaisesti. Jatkuvan tilan arvon oikosulkuvirta saavuttaa, kun alku- ja muutosoikosulkuvirrat sekä tasavirtakomponentti ovat vaimentuneet pois. Lähellä generaattoria tapahtuvalle oikosulkuvirralla voidaan kirjoittaa yhtälö (8), jossa on huomioitu

muuttuvien reaktanssien vaikutus. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} \quad (8)$$

jossa

I_k'' = alkuoikosulkuvirta

I_k' = muutosoikosulkuvirta

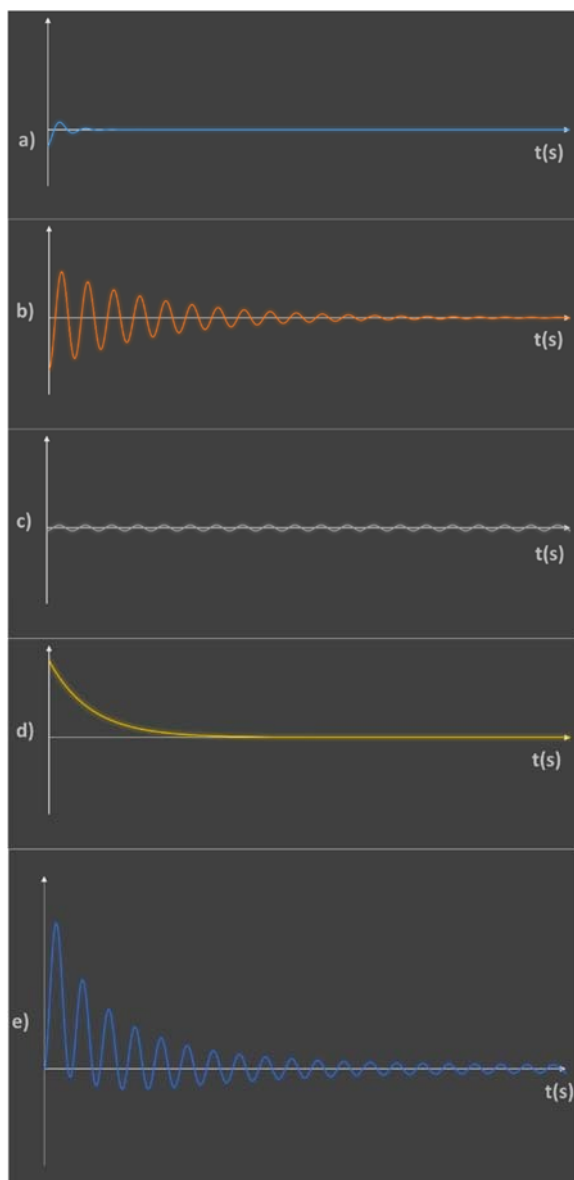
I_k = jatkuvan tilan oikosulkuvirta

τ'' = oikosulkuvirran alkuaikavakio

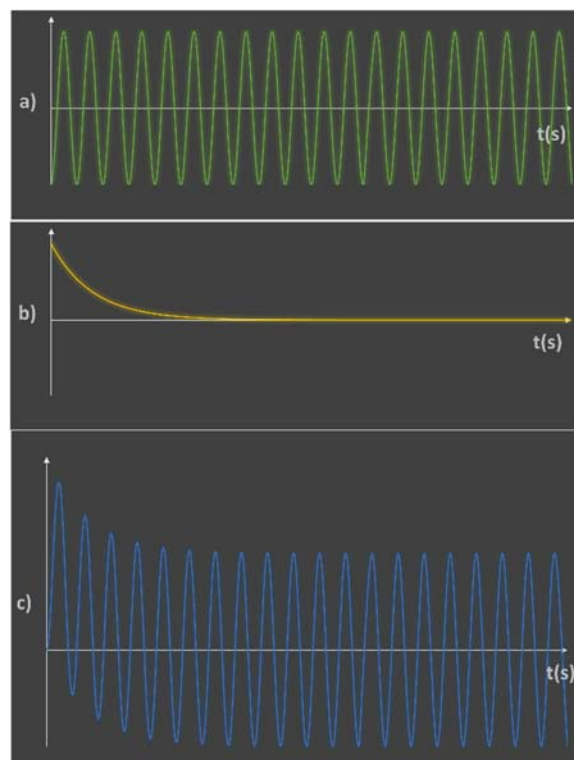
τ' = oikosulkuvirran muutosaikavakio.

(Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

Yhtälön (8) perusteella, lähellä generaattoria tapahtuvan oikosulun vaihtovirtakomponentti vaimenee eksponentiaalisesti aikavakioilla τ'' ja τ' kohti jatkuvan tilan arvoa. Jos generaattorin ja vikapaikan välinen impedanssi on selvästi suurempi verrattuna generaattorin impedanssiin, ei generaattorin muuttuvalla impedanssilla ole enää suurta vaikutusta kokonaisuikosulkuvirtaan. Tällöin vaihtovirtaosa ei vaimene. Kuvissa 13 ja 14 on esitetty oikosulkuvirran komponentit lähellä ja kaukana generaattorista tapahtuvissa vioissa. (Huotari & Partanen, 1998)

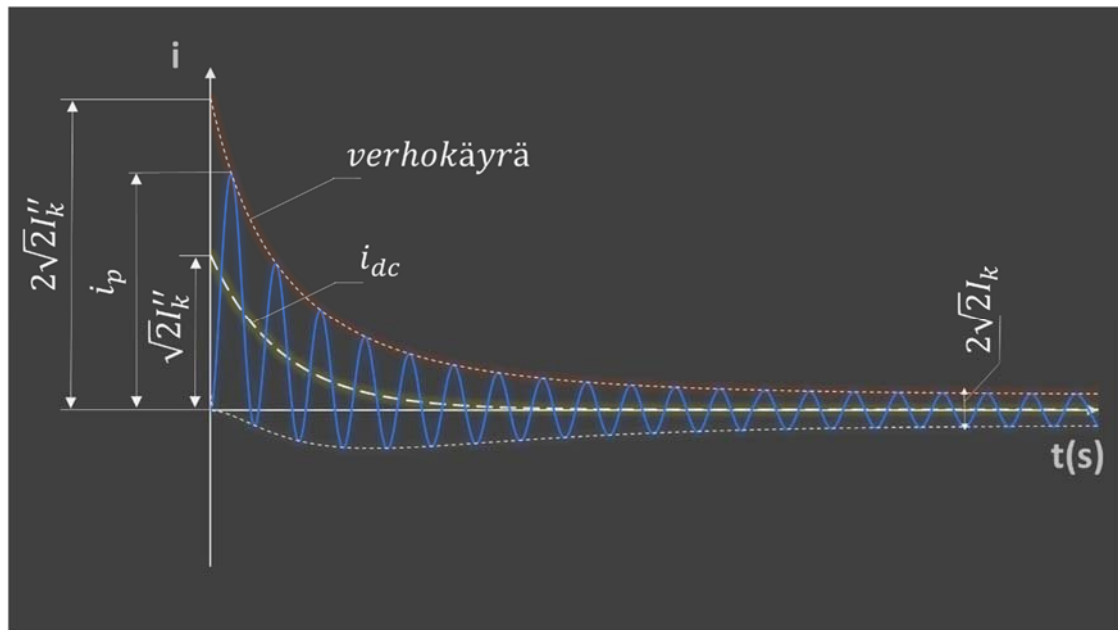


KUVA 13. e) epäsymmetrinen oikosulkuvirta kun vika tapahtuu lähellä generaattoria, a) – b) vaimenevat vaihtovirtakomponentit, c) vaimentumaton vaihtovirtakomponentti ja d) tasavirtakomponentti

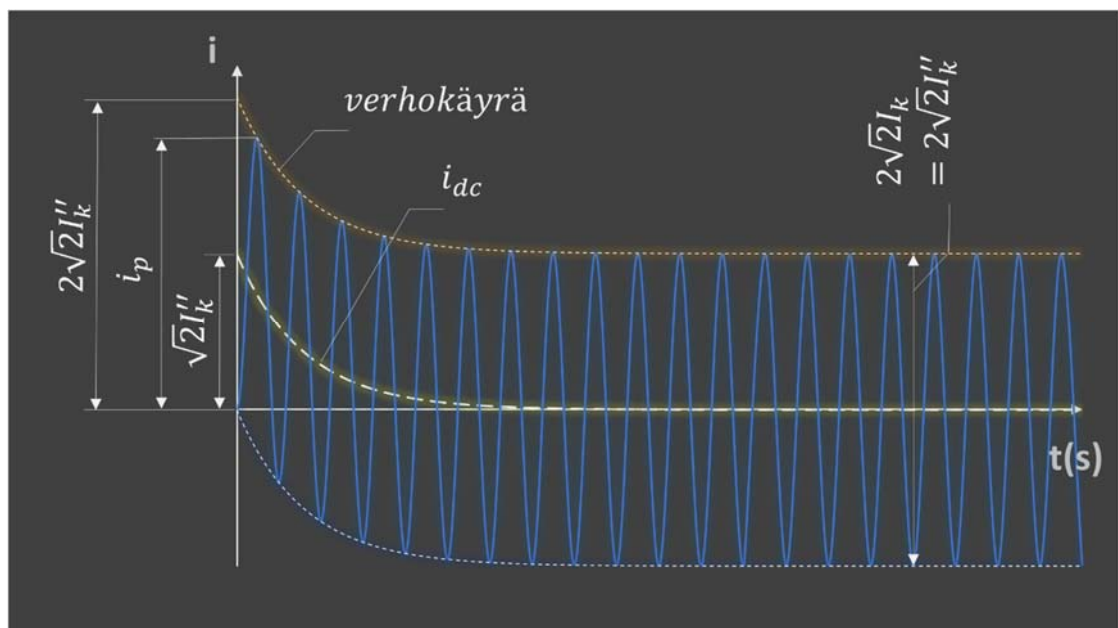


KUVA 14. c) epäsymmetrinen oikosulkuvirta, kun vika tapahtuu kaukana generaattorista, a) vaimentumaton vaihtovirtakomponentti ja b) tasavirtakomponentti.

Oikosulkuvirta saavuttaa suurimman arvonsa noin 10 ms:n kuluttua vian syntymisestä. Tätä arvoa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_p . Kuvisa 15 ja 16 on esitetty oikosulkuvirtaan liittyvät suuret ja käyrämuodot lähellä ja kaukana generaattoria tapahtuvissa vioissa.



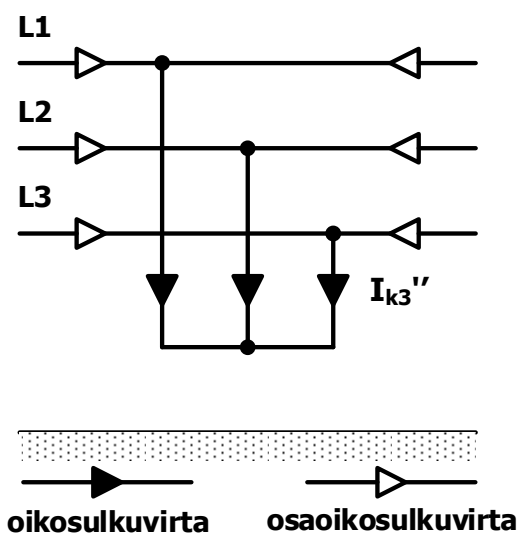
KUVA 15. Lähellä generaattoria tapahtuvan oikosulkuvirran käyrämuoto, jossa I''_k on alkuoikosulkuvirta, i_p on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo eli sysäysoikosulkuvirta, I_k on jatkuvan tilan arvo ja i_{dc} on virran tasakomponentti.



KUVA 16. Kaukana generaattorista tapahtuvan oikosulkuvirran käyrämuoto

3.1.2 Kolmivaiheinen oikosulku

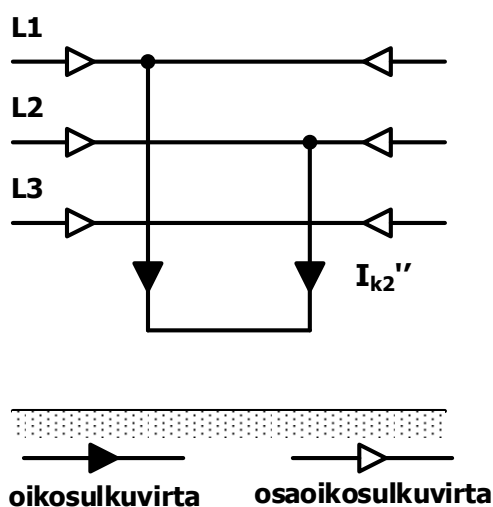
Suurin oikosulkuvirta syntyy kolmivaihejärjestelmässä vastuksettomasta kolmivaiheisesta oikosulusta. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, eli vian vaikutukset kohdistuvat kaikkiin vaiheisiin samanlaisina. Tästä syystä kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskennassa voidaan käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää. Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki kolme vaihetta kytkeytyvät yhteen, jolloin vikapaikan jännite on nolla ja kaikki vaiheet syöttävät symmetrisesti oikosulkuvirtaa I''_{k3} . Kuva 17 havainnollistaa tilannetta. (Eronen, 2013)



KUVA 17. Kolmivaiheinen oikosulku, jossa I_{k3}'' on kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta. Virtojen suunnat on valittu mielivaltaisesti. (SFS-EN 60909-0, 2001)

3.1.3 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisessa viassa kaksi vaihetta kytkeytyy yhteen, jonka seurauksena niiden jännitteet ovat nollia. Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika, eli vian aikana eri vaiheiden jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä. Tämän takia kaksivaiheisen oikosulun laskennassa ei voida käyttää yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan kutakin vaihetta on tarkasteltava erikseen. Laskentaan voidaan soveltaa symmetristen komponenttien menetelmää. Kaksivaiheisessa viassa syntyvä oikosulkuvirta on lähes poikkeuksetta pienempi kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Kuva 18 havainnollistaa kaksivaiheista vikaa. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, 2011) (Eronen, 2013)



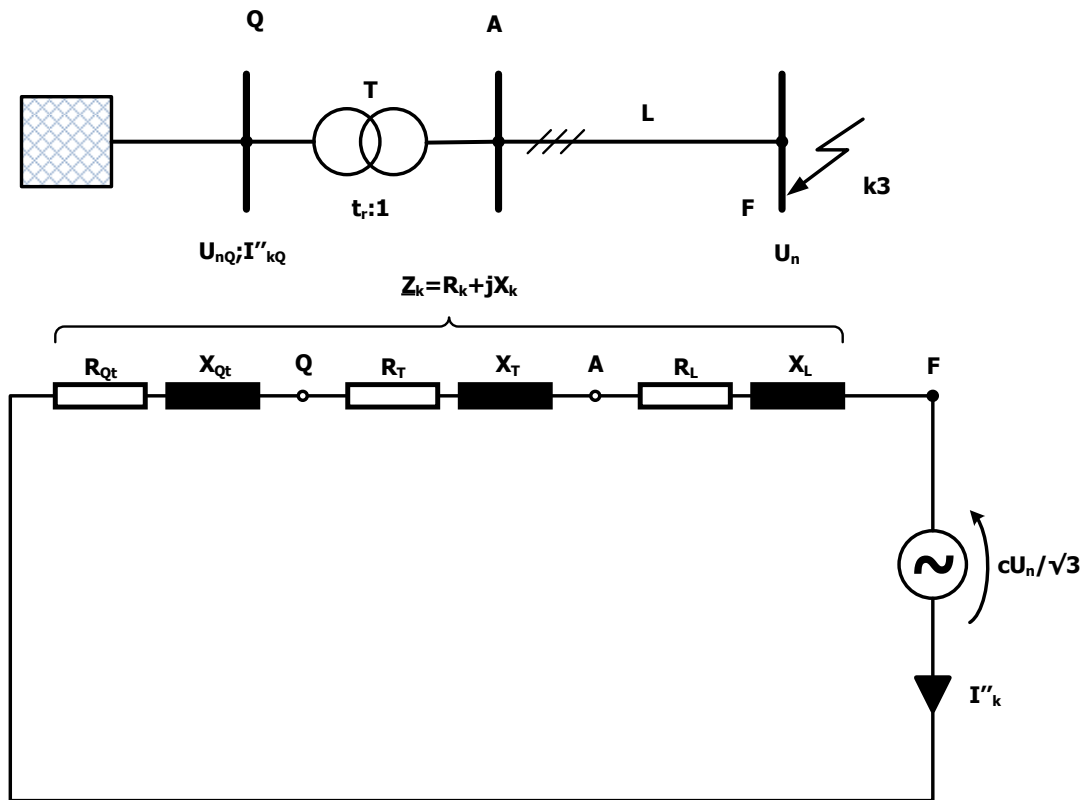
KUVA 18. Kaksivaiheinen oikosulku vaiheiden L1 ja L2 välillä ja kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta I_{k2}'' . Virtojen suunnat on valittu mielivaltaisesti. (SFS-EN 60909-0, 2001)

3.2 Oikosulkuvirtalaskenta

Oikosulkuvirrat lasketaan eurooppalaisen standardin EN 60909-0: 2001 "Short-circuit in three phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents (IEC 60909-0:2001)" mukaan. Kyseinen standardi on vahvistettu suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi. Standardi soveltuu pien- ja suurjännitejärjestelmien, käyttötaajuudeltaan on 50 Hz tai 60 Hz, symmetristen ja epäsymmetristen oikosulkuvirtojen laskentaan. Standardi ei käsittele maasta erotettujen tai sammutettujen verkkojen maasulkuvirtojen laskentaa. Standardin laskentamenelmä antaa riittävän tarkan laskentatuloksen verkon oikosulkuvirroista. Verkon oikosulkuvirrat voidaan käsin laskennan sijaan määrittää myös erilaisilla laskentaohjelmistoilla tai mittaamalla verkkoanalysaattorilla. (SFS-EN 60909-0, 2001)

3.2.1 Laskentamenetelmä

Oikosulkuvirran laskenta perustuu yksivaiheiseen sijaiskytkentään, jossa kaikki vikavirtaa syöttävät lähteet ja muut komponentit korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ekvivalenttisella jännitelähteellä. (Huotari & Partanen, 1998). Kuva 19 esittää yksivaiheisen sijaiskytkennän muodostamista.



KUVA 19. Ylempi kuva esittää tarkasteltavaa piiriä, missä Q on syöttävän verkon liittymispiste, U_{nQ} on syöttävän verkon nimellinen jännite, I''_{kQ} on syöttävän verkon oikosulkuvirta, T on muuntaja, t_r on muuntajan muuntosuhde, A on johdon liittymispiste, L on johto, F on vikapaikka, U_n on vikapaikan nimellinen jännite ja $k3$ on kolmivaiheinen vastukseton oikosulku. Alempi kuva on ekvivalenttinen virtapiiri, joka vastaa ylemmää tilannetta. Siinä R_{Qt} on syöttävän verkon redusoitu oikosulkuresistanssi, X_{Qt} on syöttävän verkon redusoitu oikosulkureaktanssi, R_T on muuntajan oikosulkuresistanssi, X_T on muuntajan oikosulkureaktanssi, R_L on johdon oikosulkuresistanssi, X_L on johdon oikosulkureaktanssi, Z_k on edellisistä muodostettu oikosulkuimpedanssi, $cU_n/\sqrt{3}$ on ekvivalenttinen jännitelähde ja I''_k oikosulkuvirta. (SFS-EN 60909-0, 2001)

Kuvan 19 perusteella oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (9).

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (9)$$

jossa

c = taulukon 2 mukainen jännitekerroin

U_n = vikapaikan nimellinen pääjännite

Z_k = impedanssi vikapaikasta katsottuna

TAULUKKO 2. Jännitekertoimet c_{max} ja c_{min} jännitetason mukaan (SFS-EN 60909-0, 2001)

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

Epäsymmetristen vikojen käsittelyssä standardi IEC 60909 käyttää symmetristen komponenttien menetelmää. Menetelmä perustuu siihen, että epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä voidaan esittää kolmella symmetrisellä osajärjestelmällä eli symmetrisellä komponentilla. Jokaisen vaiheen virta voidaan ilmaista summaamalla kolme virran symmetristä komponenttia:

- myötäjärjestelmän komponentti $\underline{I}_{(1)}$;
- vastajärjestelmän komponentti $\underline{I}_{(2)}$;
- nollajärjestelmän komponentti $\underline{I}_{(0)}$.

Jos pidetään L1 vaiheen virtaa perusosoittimena, voidaan eri vaiheiden virrat ilmaista yhtälöiden (10), (11) ja (12) avulla.

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (10)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (11)$$

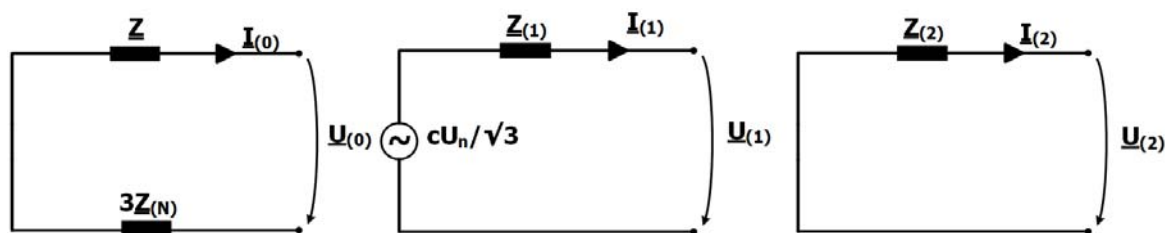
$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (12)$$

jossa

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}$$

Kukin virtakomponentti kohtaa verkossa omat impedanssinsa eli myötä-, vasta- ja nollaimpedanssin ($\underline{Z}_{(1)}$, $\underline{Z}_{(2)}$, $\underline{Z}_{(0)}$). Symmetristen komponenttien avulla voidaan muodostaa toisistaan riippumattomat myötä-, vasta- ja nollaverkot.



KUVA 20. Nolla-, myötä- ja vastaverkko. Nollaverkossa $\underline{Z}_{(N)}$ on tähtipisteen ja maan välinen impedanssi ja \underline{Z} on verkon vaiheimpedanssi.

Nollaverkon impedanssi $\underline{Z}_{(0)}$ on muotoa, jossa verkon vaiheimpedanssin kanssa sarjaan kytkeytyy tähtipisteen ja maan välinen impedanssi kolminkertaisena eli $\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z} + 3\underline{Z}_{(N)}$. Jos vikaan liittyy vikaresistanssia, myös se kytkeytyy nollaverkkoon kolminkertaisena ($3\underline{Z}_f$). (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

Komponenttiverkkojen impedanssit tunnetaan ja ilmoitetaan laite- ja komponenttikohtaisesti. Vasta- ja myötäimpedanssit ovat yhtä suuria ei-pyörivillä kojeilla kuten johdoilla, muuntajilla ja kuristimilla. Myös epätahtimoottoreilla vasta- ja myötäimpedanssit ovat samansuuruiset. Tahtikoneillakin myötä- ja vastaimpedanssit ovat yhtä suuria oikosulun alkuhetkillä. Tahtikoneen myötäimpedanssi kuitenkin kasvaa oikosulun kestäessä ja saavuttaa lopulta tahtireaktanssin arvon. (Huotari & Partanen, 1998)

Nollaimpedanssit poikkeavat yleensä selvästi myötä- ja vastaimpedansseista kaikilla verkon komponenteilla. Pyörivien koneiden ja muuntajien nollaimpedansseihin vaikuttavat magneettipiirin rakenne, käämien kytkentä ja tähtipisteen käsittely. Nollakomponenttivirta voi esiintyä vain jos sillä on kulkureitti muita kuin vaihejohtimia pitkin. Nollavirralla ei ole kulkutietä jos tähti- eli Y-kytkentäisen käämin tähtipistettä ei ole kytketty maahan. Myös kolmio- eli D-kytkentäinen käämi katkaisee nollavirran kulkutien nollaverkon ja käämityksen välillä. Muuntajan nollaimpedanssin suuruuteen vaikuttaa oleellisesti sen magnetoimisnollaimpedanssi, jonka suuruus taas riippuu magneettipiirin rakenteesta. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011)

Vikatyyppi määrää sen kuinka komponenttiverkot kytkeytyvät keskenään. Laskuissa oletetaan, että syöttölähteen jännitteet ovat symmetrisiä, jolloin vain myötäverkossa on jännitelähde. Verkot kytkeytyvät toisiinsa vikakohdan navoista. Verkoista muodostetaan yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa jännitelähde on vikavaiheen jännite vikapaikassa juuri ennen vikaa ja komponenttiverkkojen impedanssit ovat vikapaikan navoista nähtyjä impedansseja. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011).

Yksi- ja kaksivaiheisissa vioissa sijaiskytkentä muodostetaan myötä-, vasta-, ja nollaverkkojen avulla. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen vika, jolloin oikosulkuimpedanssi muodostuu verkon

myötäimpedanssista. Kaksivaiheinen oikosulussa ilman maakosketusta oikosulkuimpedanssi muodostuu myötä- ja vastaimpedansseista. (ABB, 2000)

3.2.2 Oikosulkupiirin komponenttien impedanssien laskenta

Sähköverkon oikosulkuvirtojen laskentaa varten täytyy tuntea eri verkkokomponenttien impedanssien arvot. IEC 60909 standardi käsittelee seuraavien verkkokomponenttien oikosulkuimpedanssien laskennan:

- syöttävä verkko
- muuntajat (kaksi- ja kolmikäämimuuntaja)
- avojohdot ja kaapelit
- oikosulkuvirtaa rajoittava kuristin
- tahtikoneet (generaattorit ja moottorit)
- voimalaitos (generaattorin ja muuntajan muodostama yksikkö)
- epätahtimoottorit
- tasasuuntaajat, kondensaattorit ja muu eipyörivä kuormitus. (SFS-EN 60909-0, 2001)

Oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja ovat syöttävä verkko, tahtikoneet ja epätahtimoottorit, ja oikosulkuvirtaa rajoittavia komponentteja ovat muuntajat, kuristimet, johdot ja kaapelit. Suurimman osan oikosulkuvirrasta syöttävät taustaverkko ja generaattorit, mutta myös tahti- ja epätahtimoottoreiden syöttämä oikosulkuvirta tulee ottaa huomioon. (Huotari & Partanen, 1998)

Tässä työssä tarkastelu keskittyy pienen teollisuuslaitoksen keskijänniteverkkoon, johon ei liity generaattoreita eikä suurjännitemoottoreita. Tämän takia komponenttien impedanssien laskenta esitetään vain syöttävän verkon, kaksikäämimuuntajan, kaapeleiden ja pienjännitteisten epätahtimoottorien osalta.

Syöttävä verkko

Verkkosyötön oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä (13).

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \quad (13)$$

jossa

c = taulukon 2 mukainen kerroin

U_{nQ} = syöttävän verkon jännite

I''_{kQ} = syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta (arvo saadaan jakeluverkkoyhtiöltä)

Muuntajan yläjännitepuolelta alajännitepuolelle redusoitu syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöiden (14) ja (15) avulla.

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \frac{1}{t_r^2} \quad (14)$$

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \quad (15)$$

jossa

U_{rTHV} = muuntajan yläjännitepuolen jännite

U_{rTLV} = muuntajan alajännitepuolen jännite

Silloin kun syöttävän verkon jännite on yli 35 kV ja sitä syöttää avojohtolinja, voidaan olettaa että, $\underline{Z}_Q = 0 + jX_Q$ eli impedanssi on puhtaasti induktiivista. Muussa tapauksessa, jos oikeaa syöttävän verkon resistanssin R_Q arvoa ei tunneta, voidaan käyttää $R_Q = 0,1 X_Q$ missä $X_Q = 0,995 Z_Q$. (SFS-EN 60909-0, 2001)

Kaksikäsimuuntaja

Kaksikäsimuuntajan oikosulkuimpedanssi, -resistanssi ja -reaktanssi lasketaan kilpiarvoista yhtälöiden (16), (17) ja (18) avulla.

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \% S_{rT}} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (16)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \% S_{rT}} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (17)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (18)$$

jossa

U_{rT} = nimellisjännite

I_{rT} = nimellisvirta

S_{rT} = nimellinäennäisteho

P_{krT} = kokonaispätötehohäviöt

u_{kr} = oikosulkujännite

u_{Rr} = resistiivinen oikosulkujännite

Kaapelit

Kaapeleiden resistanssi- ja reaktanssiarvot saadaan valmistajalta. Ne ilmoitetaan pituusyksikköä kohden jolloin oikosulkuimpedanssi, -resistanssi ja -reaktanssi voidaan laskea yhtälöiden (19), (20) ja (21) avulla.

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (19)$$

$$R_L = rl \quad (20)$$

$$X_L = xl \quad (21)$$

jossa

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

x = kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l = kaapelin pituus

Kiskojen vaikutus oikosulkuvirtaan on niin pieni, että ne voidaan jättää huomiotta. (Huotari & Partanen, 1998)

Epätahtimoottorit

Teollisuuden kuormitus koostuu tyypillisesti suuresta määrästä epätahtimoottoreita, jotka eivät ole välttämättä yksikkötehoiltaan suuria mutta joiden yksikkömäärä on niin suuri, että ne täytyy ottaa huomioon oikosulkuvirtoja laskettaessa. Epätahtimoottorit suurentavat symmetristä alkuoikosulkuvirtaa I_k'' , sysäysoikosulkuvirtaa i_p , symmetristä katkaisuoikosulkuvirtaa I_b ja lisäksi epäsymmetrisissä vioissa jatkuvan tilan oikosulkuvirtaan I_k .

Epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälön (22) avulla.

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (22)$$

jossa

U_{rM} = moottorin nimellijännite

I_{rM} = moottorin nimellisvirta

S_{rM} = moottorin nimellinäennaisteho

I_{LR} = lukitun roottorin virta eli moottorin käynnistysvirta

Oikosulkuimpedanssi voidaan jakaa pienjännitemoottoreilla resistanssiksi ja reaktanssiksi niin että $R_M/X_M = 0,42$ ja $X_M = 0,922 Z_M$. Tässä on otettu huomioon myös syöttökaapeliin vaikutus.

Suuri yksikkömäärä pienjännitemoottoreita voidaan kuvata yhdellä ekvivalenttisella moottorilla, jossa S_{rM} on kaikkien moottoreiden yhteenlaskettu näennäisteho ja $I_{LR}/I_{rM} = 0,5$.

Muu kuormitus

Epätahtimoottoreiden lisäksi teollisuudessa on paljon taajuusmuuttajia, jotka täytyy ottaa huomioon vain, jos tasasuuntaajaosa on kaksisuuntainen eli käytetään vastarinnankytkettyä

tyristorisuuntaajaa. Tällaisten käyttöjen osuus kokonaiskuormituksesta on yleensä niin vähäinen, ettei niitä tarvitse ottaa huomioon. (Huotari & Partanen, 1998)

Rinnakkaiskondensaattorit voidaan jättää huomioimatta, paitsi jos käytetään keskitettyä kompensointia keskijännitteellä, jolloin niiden vaikutus oikosulkuvirtaan tulee tarkistaa. Muuta pyörivää kuormitusta, kuten valaistusta ja lämmitystä, ei oteta huomioon oikosulkuvirtalaskuissa. (Huotari & Partanen, 1998)

Vikaimpedanssit

IEC 60909 ei määrittele vikaimpedanssia, mutta verkon suojausta suunniteltaessa niiden vaikutus on syytä ottaa huomioon. Vikaimpedanssien tarkka matemaattinen laskenta on vaikeaa, joten sen sijaan käytetään kertoimia, joilla galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pienin oikosulkuvirta kerrotaan. Sopivat kertoimet ovat keskijännitteellä 0,8 ja pienjännitteellä 0,6. (Huotari & Partanen, 1998)

3.2.3 Oikosulkusuureet

Seuraavaksi käsitellään oikosulkusuureita, joita tarvitaan teollisuuden säteittäisen keskijänniteverkon mitoituksessa ja suojauksen suunnittelussa. Suurimmat verkossa esiintyvät oikosulkuvirrat määrittävät verkon komponenttien mitoituksen. Ylivirtasuojaus suunnitellaan toimimaan pienimmillä esiintyvillä oikosulkuvirran arvoilla. (Huotari & Partanen, 1998)

Teollisuuden keskijänniteverkot ovat tyypillisesti maasta erotettuja, jolloin oikosulkuvirrat rajoittuvat kaksi- ja kolmevaiheisiin oikosulkuihin. Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa suurimman oikosulkuvirran ja kaksivaiheinen pienimmän. Ainoastaan lähellä generaattoria tapahtuvissa vioissa, voi kaksivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo olla suurempi (jopa 1,4-kertainen) kolmivaiheiseen oikosulkuvirtaan verrattuna. Tämä johtuu tahtikoneen muuttuvista reaktansseista. Suojaus kuitenkin toimii yleensä ennen kuin jatkuvan tilan arvo saavutetaan. (Huotari & Partanen, 1998)

Laskettaessa maksimioikosulkuvirtoja

- käytetään taulukon 2 mukaista c_{max} -arvoa,
- verkon kytkentätilanne valitaan vastaamaan maksimioikosulkuvirtaa, eli kaikki vikavirtaa syöttävät verkon komponentit tulee olla kytkettynä vikapaikkaan,
- käytetään syöttävän verkon impedanssin \underline{Z}_Q minimiarvoa, joka johtaa maksimioikosulkuvirran arvoon,
- otetaan huomioon moottorien vaikutus ja
- käytetään kaapeleiden resistanssiarvoa R_L 20 °C lämpötilassa.

Laskettaessa minimioikosulkuvirtoja

- käytetään taulukon 2 mukaista c_{min} -arvoa,
- verkon kytkentätilanne valitaan vastaamaan minimioikosulkuvirtaa
- moottoreiden vaikutusta ei oteta huomioon

- käytetään kaapeleiden suurinta käyttölämpötilaa vastaavaa resistanssiarvoa. (SFS-EN 60909-0, 2001)

Alkuoikosulkuvirta I_k''

Alkuoikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa oikosulun syntyhetkellä. Kyseistä arvoa ei suoraan käytetä suojauksen tai mitoituksen perusteena vaan sen avulla lasketaan muita oikosulkuvirtasuureita.

Alkuoikosulkuvirta lasketaan luvun 3.2.1 yhtälön (9) avulla.

Kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta I_{k2}''

Kaksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika, mutta alkuoikosulkuvirtaa laskettaessa kaikkien verkon komponenttien myötä- ja vastaimpedanssit ovat lähes yhtä suuria. Kaksivaiheinen alkuoikosulkuvirta lasketaan yhtälön (23) avulla

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' \quad (23)$$

Myötä- ja vastaimpedanssit poikkeavat toisistaan vain oikosulun muutos- ja jatkuvan tilan aikana silloin kun oikosulku tapahtuu lähellä generaattoria. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä tällaisten tilanteiden laskentaa.

Sysäysoikosulkuvirta i_p

Sysäysoikosulkuvirta on oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo, joka esiintyy noin 10 ms:n kuluttua oikosulun alkuhetkestä ja se määrää laitteiden mekaanisten rakenteiden mitoituksen.

Sysäysoikosulkuvirran arvo riippuu siitä, missä kohtaa jännitteen siniaalto vika tapahtuu. Laskuissa kuitenkin oletetaan, että vika tapahtuu jännitteen nollakohdassa, jolloin sysäysoikosulkuvirta saavuttaa suurimman arvonsa. Aikaisemmin suureesta on käytetty saksalaisen VDE-standardin mukaista tunnusta i_s ja nimitystä dynaaminen kestovirta i_{dyn} .

Sysäysoikosulkuvirta lasketaan yhtälön (24) avulla. Sysäyskerroin κ riippuu oikosulkupiirin resistanssin R ja reaktanssin X suhteesta ja se lasketaan yhtälön (25) avulla.

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (24)$$

$$\kappa = 1,02 + e^{-3R/X} \quad (25)$$

Katkaisuvirta I_b

Katkaisuvirralla tarkoitetaan sitä oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa, joka virralla on katkaisijan koskettimien avausliikkeen alkaessa. Tällä otetaan huomioon oikosulkuvirran vaimeneminen alkuarvostaan. Katkaisuvirta on tarpeen määrittää erikseen generaattoreiden, moottorien ja niiden katkaisijoiden tapauksessa. Kaukana generaattoreista ja moottoreista tapahtuvissa oikosuluissa $I_b = I_k''$. (Huotari & Partanen, 1998) (SFS-EN 60909-0, 2001) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}

Kojeiden lyhytaikainen terminen virtakestoisuus määritetään termisen kestovirran I_{thr} perusteella. Se on suurin oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka koje kestää määrääjän (yleensä 1 tai 3 s), ilman että koje lämpenee liikaa. Verkon I_{th} -arvo lasketaan alkuoikosulkuvirran I_k'' -arvosta siten että oikosulkuvirran vaimeneminen otetaan huomioon.

Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta lasketaan yhtälön (26) avulla.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (26)$$

jossa

m = tasavirtamuuttuja

n = vaihtovirtamuuttuja

Kaukana generaattoreista voidaan käyttää $n = 1$ ja ja jos oikosuluvirran kesto aika on yli 0,5 sekuntia, voidaan käyttää $n + m = 1$. (SFS-EN 60909-0, 2001)

Verkon komponentit kestävät oikosulun termisesti jos alla oleva epäyhtälöpari toteutuu

$$\begin{aligned} I_{th} &\leq I_{thr}, \text{ kun } t_k < t_r \text{ tai} \\ I_{th} &\leq I_{thr} \sqrt{\frac{t_R}{t_k}} \text{ kun } t_k \geq t_R \end{aligned} \quad (27)$$

jossa

I_{thr} = laitteen nimellinen terminen oikosulkukestoisuus

t_R = arvoa I_{thr} vastaava aika

t_k = oikosulkuvirran kesto aika (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

3.2.4 Esimerkkilaskelma

Esimerkkinä lasketaan teollisuuden keskijänniteverkon pääkiskon maksimioikosulkuvirrat.

Jakeluverkkoyhtiö on ilmoittanut kolmivaiheinen oikosulkuvirran I_k'' olevan päämuuntajan T1 10 kV

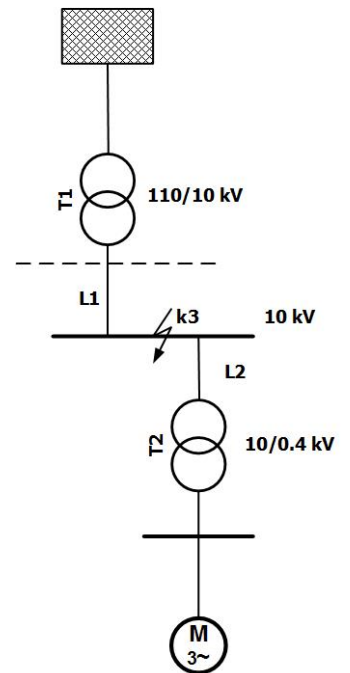
puolella 8 kA. Jakelumuuntaja T2 on 80 % kuormassa ja kuormituksesta 80 % on suoria moottorikäyttöjä.

Näin ekvivalenttisen moottorin M näennäistehoksi tulee $S_{rM} = (0,8 \cdot 2000 \text{ kVA}) \cdot 0,8 = 1280 \text{ kVA}$.

Ensin lasketaan verkkokomponenttien oikosulkuimpedanssit. Syöttävän verkon impedanssi täytyy laskea kertoimella c_{min} , jotta se vastaa maksimioikosulkuvirran arvoa. Jakelumuuntajan T2 ja ekvivalenttisen moottorin M impedanssit on laskettu 10 kV tasolle. Kaapeleiden resistanssi ja reaktanssiarvot vastaavat 20 °C lämpötilaa. Komponenttien parametrit ja impedanssien arvot on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Esimerkkiverkon komponenttien parametrit ja lasketut impedanssien, resistanssien ja reaktanssien arvot.

| | |
|--------------------------------------|--|
| Syöttävä verkko | $I''_{kQ} = 8 \text{ kA}$ $Z_{Qmin} = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} = \frac{1,0 \cdot 10 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 8 \text{ kA}} \approx 0,7217 \Omega$ $R_Q = 0,1 X_Q = 0,1 \cdot 0,7181 \Omega = 0,0718 \Omega$ $X_Q = 0,995 Z_Q = 0,995 \cdot 0,7217 \Omega = 0,7181 \Omega$ |
| Kaapeli L1 AHXCMK-WTC 3x240/35 | $l = 0,2 \text{ km}$ $r = 0,125 \Omega/\text{km}$ $x = 0,140 \Omega/\text{km}$ $R_{L1} = 0,025 \Omega$ $X_{L1} = 0,028 \Omega$ |
| Muuntaja T2 | $u_{kr} = 6 \%$ $S_{rT} = 2000 \text{ kVA}$ $U_{rT} = 10 \text{ kV}$ $P_{krT} = 16 \text{ kW}$ $Z_{T2} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6 \%}{100 \%} \cdot \frac{(10000 \text{ V})^2}{2 \cdot 10^6 \text{ VA}} = 3 \Omega$ $R_{T2} = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$ $= \frac{16000 \text{ W} \cdot (10000 \text{ V})^2}{(2 \cdot 10^6 \text{ VA})^2} = 0,4 \Omega$ $X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2} = \sqrt{(3 \Omega)^2 - (0,4 \Omega)^2} = 2,973 \Omega$ |
| Kaapeli L2 AHXCMK-WTC 3x120/35 | $l = 0,3 \text{ km}$ $r = 0,253 \Omega/\text{km}$ $x = 0,154 \Omega/\text{km}$ $R_{L2} = 0,0759 \Omega$ $X_{L2} = 0,0462 \Omega$ |
| Ekvivalenttinen moottori M | $Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM} \sqrt{3}} \frac{U_{rM}}{S_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{(10 \text{ kV})^2}{1280 \text{ kVA}}$ $= 15,625 \Omega$ $R_M/X_M = 0,42 \Rightarrow R_M = 0,42 \cdot 14,406 \Omega = 6,051 \Omega$ $X_M = 0,922 Z_M = 0,922 \cdot 15,625 \Omega = 14,406 \Omega$ |



Kun verkon komponenttien resistanssit ja reaktanssit on laskettu, muodostetaan niistä yksivaiheinen sijaiskytkentä (kuva 21) ja lasketaan sen oikosulkuimpedanssi \underline{Z}_k .

Sijaiskytkennän haaran P1 oikosulkuimpedanssi

on:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{kP1} &= (R_Q + R_{L1}) + j(X_Q + X_{L1}) \\ &= 0,0968 \Omega + j0,7461\end{aligned}$$

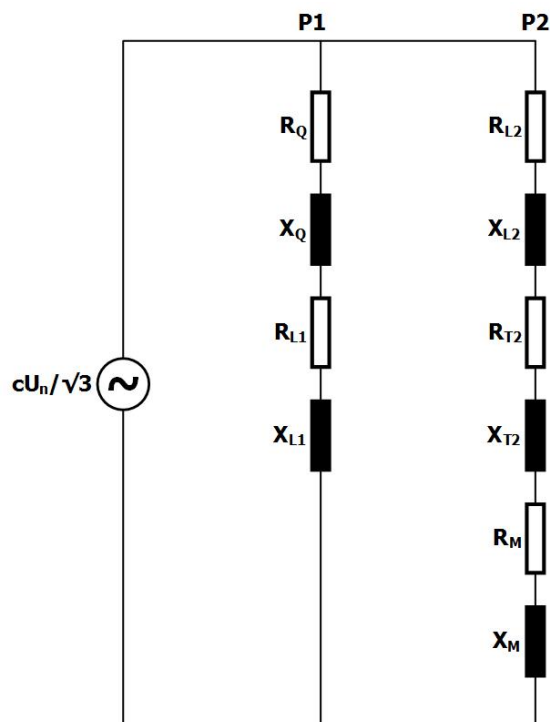
Sijaiskytkennän haaran P2 oikosulkuimpedanssi

on:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{kP2} &= (R_{L2} + R_{T2} + R_M) + j(X_{L2} + X_{T2} + X_M) \\ &= 6,5269 \Omega + j17,4252 \Omega\end{aligned}$$

Sijaiskytkennän oikosulkuimpedanssi on:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{kP1} \parallel \underline{Z}_{kP2} = 0,0954 \Omega + j0,7155 \Omega$$



KUVA 21. Esimerkkiverkon oikosulkupiirin sijaiskytkentä.

Kun oikosulkupiirin impedanssi on laskettu, voidaan laskea maksimialkukoiskuvirta.

$$I''_{kmax} = \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{c_{max} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{1,1 \cdot 10000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,0954 \Omega)^2 + (0,7155 \Omega)^2}} = 8,798 \text{ kA}$$

Sysäysoikosulkuvirta i_p lasketaan

$$R/X = \frac{0,0954}{0,7155} = 0,1333$$

$$\kappa = 1,02 + e^{-3R/X} = 1,02 + e^{-3 \cdot 0,1333} = 1,690$$

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_{kmax} = 1,69 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,798 \text{ kA} = 21,027 \text{ kA}$$

Ekvivalenttinen terminen yhden sekunnin oikosulkuvirta I_{th1s} lasketaan

$$I_{th1s} = I''_k \sqrt{(m+n)} = 8,798 \text{ kA} \cdot \sqrt{0,05 + 1} = 9,015 \text{ kA}$$

Katkaisuvirta I_b on

$$I_b = I''_k = 8,798 \text{ kA}$$

Keskijännitekojeiston kojeiston i_p -arvo tulee olla suurempi kuin 21 kA, jotta kojeiston virtakiskot ja kojeet kestävät sysäysoikosulkuvirran aiheuttamat mekaaniset rasitukset ilman muodonmuutoksia tai eristevaurioita. Lisäksi tulee tarkistaa, että kojeisto sekä kaapelit kestävät oikosulun termiset vaikutukset toteamalla, että yhtälö (27) toteutuu. Katkaisijan katkaisukykyyn tulee olla suurempi kuin 8,798 kA.

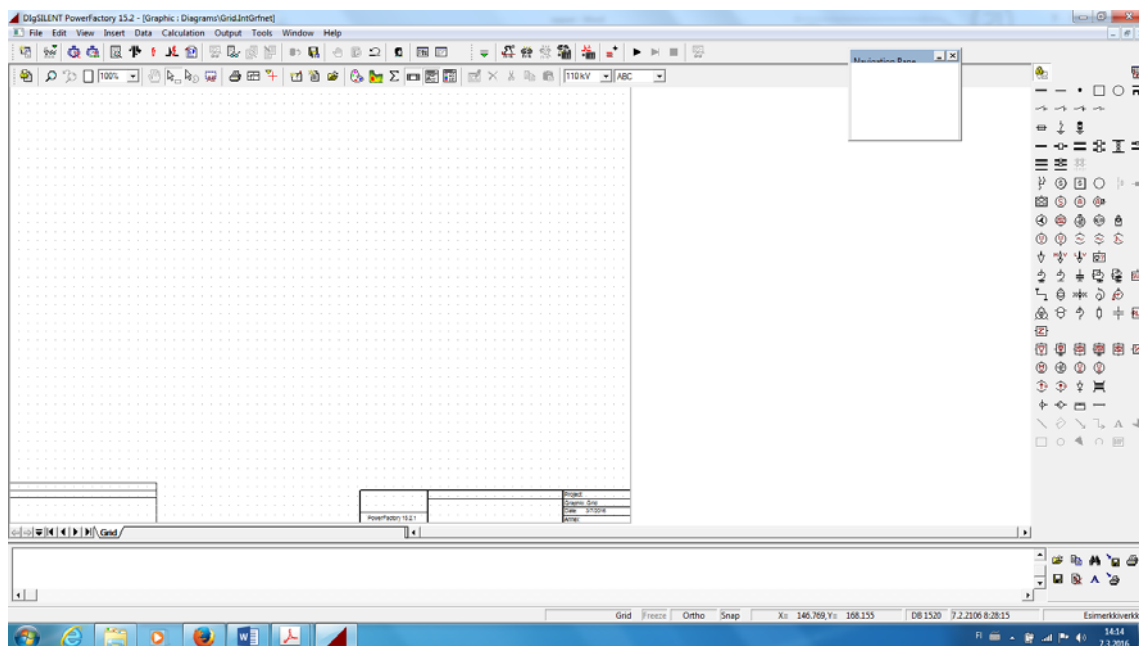
3.2.5 Oikosulkuvirtalaskenta PowerFactory -ohjelmistolla

Tässä opinnäytetyössä mallinnetaan erään UPM:n vaneritehtaan keskijännitejakeluverkko saksalaisen ohjelmistoyrityksen DlgSILENT GmbH ohjelmistolla PowerFactory 15.2. Ohjelmistolla voidaan tehdä teollisuuden jakelu- ja voimalaitosverkkojen vikavirta-, häiriö- ja tehonjakolaskentaa sekä suojaustarkasteluja. Ohjelmisto on luotettava ja laajasti käytössä. (DlgSILENT GmbH, 2016)

Tässä työssä PowerFactory -ohjelmistolla tehdään oikosulkuvirtalaskelmat. Ohjelmisto laskee oikosulkuvirrat IEC 60909 standardin mukaan. Maasulkuvirtojen laskentaan ohjelmistoa ei käytetty, sillä mallinnettava verkko on maasta erotettu ja IEC 60909 standardi ei käsittele kyseisen verkon maasulkuvirtojen laskentaa.

Verkon rakentaminen PowerFactory -ohjelmaan aloitetaan luomalla projekti. Ohjelmisto muodostaa projektista oman hierarkkisen tietokannan. Tietokanta päivittyy sitä mukaa kun verkkoa rakennetaan. Verkko rakennetaan valmiista komponenttimalleista, joiden datalehdellä määritetään komponentin nimi ja tyyppi sekä muita sähköiseen mallintamiseen tarvittavia tietoja. Komponentin tyyppi voidaan valita ohjelmiston yhteisestä kirjastosta tai projektikirjastosta. Projektikirjastoon voi luoda omia projektikohtaisia komponentteja jos sopivia ei löydy ohjelmiston omasta kirjastosta. Sähköaseman piirtämistä on helpotettu valmiilla kiskostojärjestelmillä, jotka pitävät sisällään kokoojakiskon sekä katkaisijat.

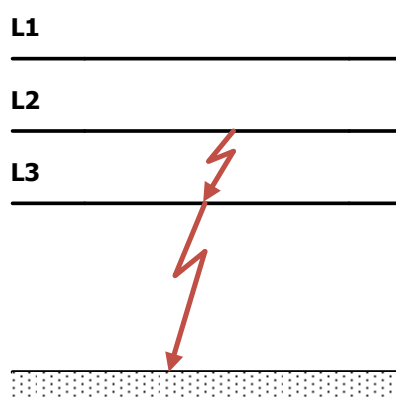
Kuva 22 esittää projektin pääikkunaa, jossa näkyvät yläreunassa työkalurivi, keskellä piirustusalue, oikealla valmiit objektit ja alhaalla kommentti-ikkuna. Verkon rakentaminen ohjelmaan tehdään pääkaavion perusteella. Piirtäminen aloitetaan kiskoja ja liittospisteiden piirtämisellä minkä jälkeen lisätään syöttävä verkko, muuntajat ja kaapelit. Vikavirtalaskentaa varten lisätään verkkoon myös epätahtimoottorit. Kun kaikki verkon komponentit on lisätty, määritetään jokaisen datalehdelle komponentin nimi, tyyppi sekä muut sähköiseen mallintamiseen vaadittavat tiedot. Verkon rakentamisen jälkeen, sille voidaan suorittaa vikavirtalaskenta. Ennen laskentaa määritetään laskentamenetelmä, vikatyyppi, vian kesto-aika, mahdollinen vikaimpedanssi ja vikapaikka. Laskentatulokset näkyvät laatikoissa piirustusikkunassa sekä kommenttiruudussa, josta ne voidaan tulostaa PDF-tiedostoksi. Erilaisia laskenta skenaarioita on helppo muodostaa, sillä katkaisijat voidaan määritellä kiinni- tai auki-asentoon ja komponentteja voidaan irtikytkä laskennan ajaksi. Eri skenaariot tallentuvat tietokantaan ja näkyvät projektin hierarkiassa. Verkkoon voidaan lisätä myös mittamuuntajia ja suojauslaitteita. Mittamuuntajille määritetään muuntosuhde ja ne liitetään suojausalueeseen. Suojausalueen tyyppi voidaan valita ohjelmiston kirjastossa olevia valmiita rele-malleja tai muodostaa releen toiminnot valmiista toimintaloista. Kun releeseen on määritelty suojausasettelut, ne saadaan näkymään erillisessä virta-aikakaaviossa, josta voidaan tarkastella suojauksen toiminta-ehdojen toteutumista ja selektiivisyyttä.



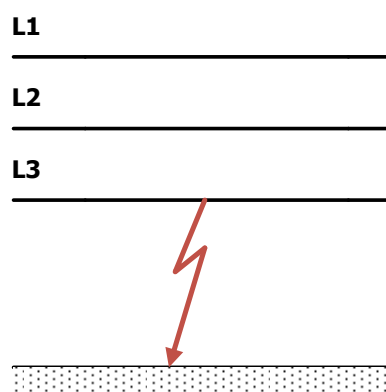
KUVA 22. PowerFactoryn pääikkuna

3.3 Maasulku

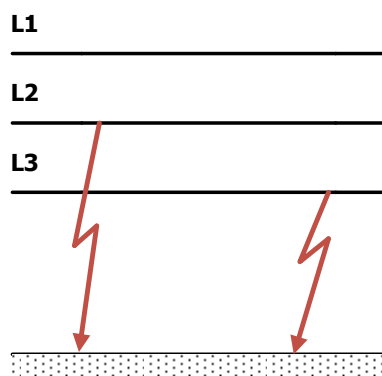
Maasulku on eristysvika, joka syntyy käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maan kanssa yhteydessä olevan osan välille. Maasulku voi olla yksi- tai monivaiheinen. Yksivaiheinen maasulku syntyy, kun vaihejohdin joutuu suoraan tai vikaimpedanssin kautta yhteyteen maan kanssa ja monivaiheinen oikosulku kun maan kanssa yhteyteen joutuu kaksi tai kolme vaihejohdinta. Jos monivaiheisen maasulun eristysviat tapahtuvat samassa vikapaikassa, on kyseessä maaosulku. Jos viat ovat eri kohdissa järjestelmää, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku. Kuvat 23 – 26 esittävät erilaisia maasulkutilanteita.



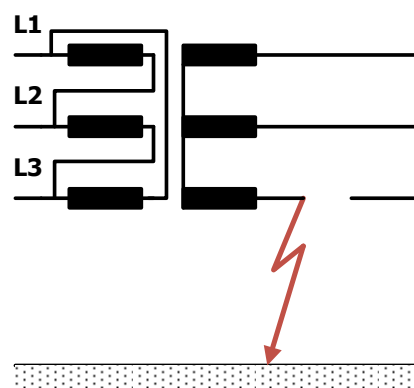
KUVA 23. Kaksivaiheinen maaosulku



KUVA 24. Yksivaiheinen maasulku



KUVA 25. Kaksoismaasulku



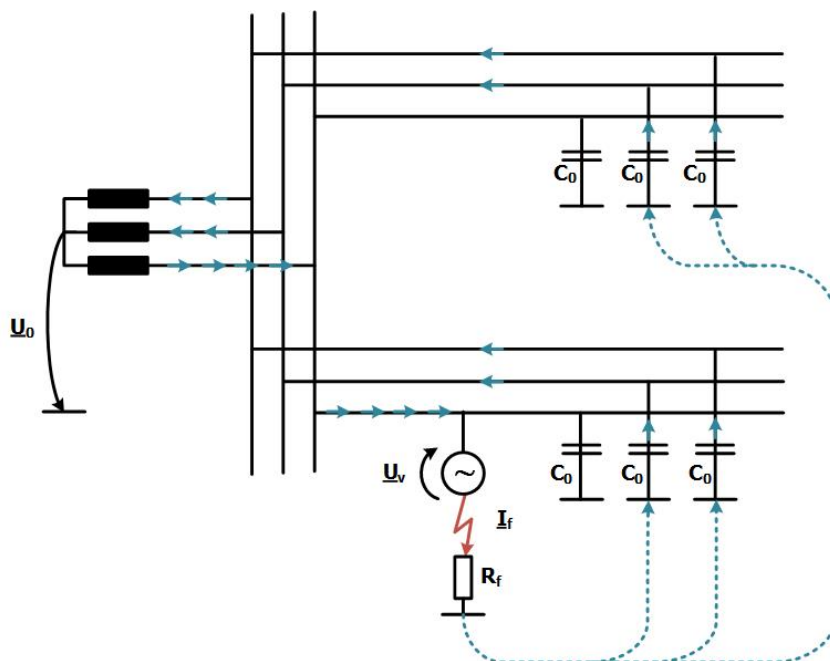
KUVA 26. Johdinkatkeama ja yksivaiheinen maasulku kuorman puolella

Maasulku aiheutuu usein vaihejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitettuun osaan. Maasulusta aiheutuu maasulkuvirta, jolla tarkoitetaan vikapaikan kautta maahan tai maadoitus- tai suojajohtimeen kulkevaa virtaa. Toisin kuin oikosulkuvirran tapauksessa, vikapaikan ja verkon syöttöpisteen välinen etäisyys ei juurikaan vaikuta maasulkuvirran suuruuteen. Maasulkuvirran suuruus riippuu vikaimpedanssista, galvaanisesti yhteen kytketyn verkon laajuudesta sekä tähtipisteen maadoituksesta. Maasulun aikana muuttuvat myös vaiheiden ja maan välisten jännitteiden suuruudet sekä verkon tähtipisteen potentiaali maahan nähden. (Lakervi & Partanen, 2009) (Maasulku, 2005)

Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään maasta erotettua tai sammutettua verkkoa.

3.3.1 Maasulkuilmiö maasta erotetussa verkossa

Silloin kun verkko on terveessä tilassa, vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä ja niiden summa on nolla. Myös vaihejohtimien maakapasitanssien C_0 kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla. Kun verkossa tapahtuu yksivaiheinen maasulku, pienenee viallisen vaiheen jännite ja varausvirta kun taas terveiden vaiheiden jännitteet maata vastaan sekä niiden vaurausvirrat kasvavat. Epäsymmetrian seurauksena varausvirtojen summa ei ole enää nolla ja tämä osa varausvirrasta muodostaa maasulkuvirran. Maasulkuvirta kulkee vikapaikasta maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta muuntajien ja generaattorien käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. Viallisen vaiheen maakapasitanssien kautta ei kulje varausvirtaa, sillä sen jännite on nolla. Maasulkuvirran suuruus ei riipu vikapaikasta. Maasulkuvirta- ja jännitelaskuissa ei oteta huomioon johtojen ja muuntajien impedansseja, sillä ne ovat maakapasitansseihin nähden hyvin pieniä. (Lakervi & Partanen, 2009) (Mörsky, 1992) (ABB, 2000)



KUVA 27. Maasulkuvirran I_f ja nollajännitteen U_0 muodostuminen maasta erotetussa verkossa. C_0 on vaiheen maakapasitanssi, R_f vikaresistanssi ja U_v viallisen vaiheen jännite ennen vikaa vastakkaismerkkisenä.

Maasulkuvirran I_e itseisarvo suorassa maasulussa saadaan yhtälöstä

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (28)$$

jossa

C_0 = verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

U = verkon pääjännite

$\omega = 2\pi f$

Avojohtojen likiarvoinen maasulkuvirta voidaan laskea yhtälöstä

$$I_e = \frac{U \cdot l}{300} \quad (29)$$

jossa

U = verkon pääjännite (kV)

l = galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus (km)

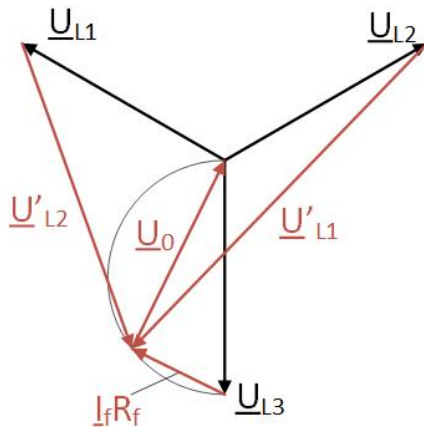
Maasulkuvirran I_f itseisarvo pienenee, kun vikaan liittyy vikaresistanssia R_f . Vikavastuksen oletetaan olevan puhtaasti resistiivistä, sillä maasulku tapahtuu usein valokaaren kautta, jonka impedanssi on resistiivinen. Maasulkuvirran I_f itseisarvo voidaan laskea yhtälöstä (30).

$$I_f = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} U \quad (30)$$

Keskijännitekaapelien valmistajat ilmoittavat usein kaapelien maasulkuvirran pituusyksikköä kohden (A/km) suorassa maasulussa. Tällöin maasulkuvirta I_f voidaan laskea suoraan yhtälöstä (31).

$$I_f = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} \quad (31)$$

Maasulkuvirta aiheuttaa jännite-epäsymmetrian, jonka vaikutuksesta verkon tähtipiste ei ole enää maan kanssa samassa potentiaalissa. Tätä muuttuneen tähtipisteen jännitettä maata vasten kutsutaan nollajännitteeksi U_0 . Silloin kun vikaan ei liity vikaresistanssia R_f , nollajännite on vaihejännitteen U_v suuruinen. Terveiden vaiheiden jännite maata vasten on suurimmillaan (noin 1,05 kertaa pääjännite) silloin, kun vikaresistanssi on noin 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista. (ABB, 2000) (Mörsky, 1992). KUVA 28 esittää jännitteiden muodostumista maasulun aikana.



KUVA 28. Jännitteiden osoittimet maasta erotetun verkon yksivaiheisessa maasulussa. (Lakervi & Partanen, 2009)

Nollajännitteen itseisarvo saadaan yhtälöllä (32).

$$U_0 = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (32)$$

Jos tunnetaan maasulkuvirta I_e suorassa maasulussa, voidaan nollajännite laskea yhtälöllä (33).

$$U_0 = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} \quad (33)$$

Maasulkuvirta muodostuu viallisen johtolähdön lisäksi myös muilla galvaanisesti yhteen kytketyillä terveillä lähdöillä. Edellä esitetyt yhtälöt antavat vikapaikassa viallisesta vaiheesta maahan kulkevan maasulkuvirran arvon. Tätä maasulkuvirran arvoa ei voida kuitenkaan käytännössä mitata, vaan maasulkuvian havaitsemiseen käytetään jokaisen johtolähdön syöttöpäähän sijoitettavaa summavirtamuuntajaa. Maasulkuvirta on jokaisella johtolähdöllä terveissä vaiheissa saman vaiheinen. Tämän takia terveen johtolähdön syöttöpäästä mitattava summavirta ΣI_t on yhtä suuri kuin johdon oman maakapasitanssin kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta. Maasulussa olevan johdon syöttöpäässä mitattava summavirta ΣI_v ei sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta eli se on yhtä suuri kuin terveiden johtolähtöjen tuottama maasulkuvirta yhteensä. Terveillä lähdöillä maasulkuvirran suunta on johdolta sähköasemalla päin ja viallisen johdon maasulkuvirta asemalta vikapaikkaan päin. Maasulussa olevan johtolähdön summavirta ΣI_v ja terveiden johtolähtöjen summavirta ΣI_t voidaan laskea yhtälöiden (34) ja (35) avulla.

$$\Sigma I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_f \quad (34)$$

jossa

C_0 = koko verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

C_{0j} = viallisen johdon yhden vaiheen maakapasitanssi

I_f = vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta

$$\Sigma I_t = \frac{C_{0i}}{C_0} I_f \quad (35)$$

jossa

C_{0i} = terveen johdon yhden vaiheen maakapasitanssi

Vastaavasti jos tunnetaan jokaisen johtolähdön syöttämä maasulkuvirta I_e suorassa maasulussa, voidaan summavirratt ΣI_v ja ΣI_t laskea yhtälöiden (36) ja (37) avulla.

$$\Sigma I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_f \quad (36)$$

jossa

I_e = koko verkon maasulkuvirta suorassa maasulussa

I_{ej} = viallisen johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa

$$\Sigma I_t = \frac{I_{ei}}{I_e} I_f \quad (37)$$

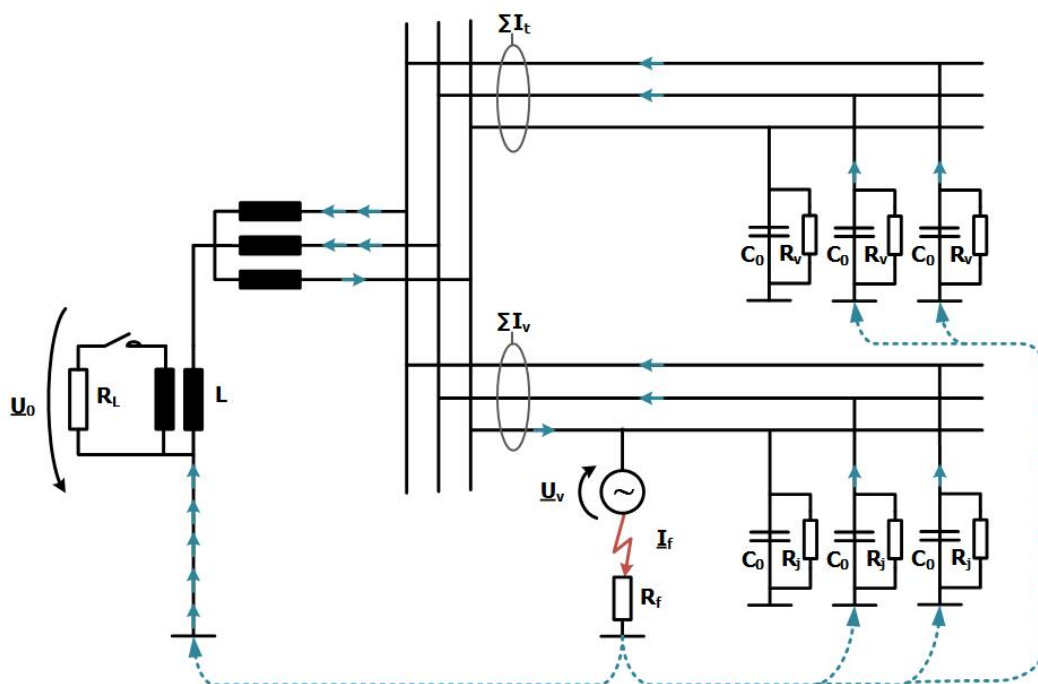
jossa

I_{ei} = terveen johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa

3.3.2 Maasulkuilmiö sammutetussa verkossa

Keskijänniteverkko voi olla myös sammutettu, eli verkon tähtipisteeseen on kytketty maakapasitanssit kompensoiva summutuskuristin. Sammutuskuristimet viritetään niin, että niiden induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri tai lähes yhtä suuri kuin verkon maakapasitanssien reaktanssi. Näin verkon aiheuttama kapasitiivinen maasulkuvirta kompensoituu, sillä kelan läpi nollajännitteen vaikutuksesta kulkeva induktiivinen virta ja johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva kapasitiivinen virta ovat keskenään vastakkaissuuntaisia. Maasulkuvirran arvoksi jää vain noin 5 – 10 % vastaavan maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta. Käytännössä verkkoa ei käytetä täysin kompensoituna, sillä terveen tilan nollajännite saavuttaa tällöin resonanssihuippunsa. Verkkoa käytetään tyypillisesti hieman alikompensoituna eli kuristimen induktiivinen reaktanssi on suurempi kuin verkon maakapasitanssien reaktanssi. (Mörsky, 1992) (Isomäki, 2010)

Yksivaiheisessa maasulussa suurin osa vikavirrasta kulkee sammutuskuristimen kautta. Maasulkukohdan kautta kulkee vain kuristimen ali- tai ylikompensoinnista johtuva jäännöslöisvirta, verkon ja kuristimen tehohäviöitä vastaava pätövirta sekä yliaallot. Yliaallot, joista viides yliaalto on merkittävin, aiheutuvat kuristimen kyllästymisestä nollajännitteen vaikutuksesta. (Mörsky, 1992)



KUVA 29. Kompensoidun verkon yksivaiheinen maasulku, missä R_L on kuristimen rinnalle mahdollisesti kytkettävän lisävastuksen resistanssi, L on kuristimen induktanssi ja R_j ja R_v ovat verkon häviöitä vastaavat resistanssit.

Kompensoidun verkon maasulkuvirran I_f eli jäännösvirran sekä nollajännitteen U_0 itseisarvot voidaan laskea yhtälöiden (38) ja (39) avulla.

$$I_f = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (39)$$

jossa

R_0 = kompensointikuristimen rinnalle kytkettävä häviöresistanssi, jonka suuruuteen vaikuttavat verkon johtimien resistanssit, verkon resistiiviset vuotovirrat, maadoituskuristimen resistanssi, nollavirran maassa kohtaama resistanssi ja kompensointilaitteiston lisävastuksen resistanssi
 ωL = kompensointikuristimen reaktanssi
 R_f = vikareistanssi

Verkon ollessa täysin kompensoitu, pätee yhtälö (40).

$$3\omega C_0 = \frac{1}{\omega L} \quad (40)$$

Täysin kompensoidussa verkossa maasulkuvirran ja nollajännitteen yhtälöt sievenevät muotoon:

$$I_f = \frac{1}{R_0 + R_f} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (41)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (42)$$

Verkon häviöresistanssin laskeminen on hankalaa, joten sen tarkka arvo selvitetään yleensä mittaamalla.

Kompensoidussa verkossa esiintyy terveessäkin tilassa nollajännite, joka johtuu vaiheiden maakapasitanssien epäsymmetriasta. Tämä on harvoin ongelma teollisuuden kaapeliverkoissa, joissa epäsymmetria on pientä. Nollajännitteen nousu voi tulla ongelmaksi vuorottelemattomissa ajojohtoverkoissa, sillä se voi aiheuttaa virhetoimintoja relesuojauksessa. (Mörsky, 1992)

Kompensoidun verkon etuna on maasulkuvalokaaren sammuminen pienemmillä virroilla maasta erotettuun verkkoon verrattuna. Tämä johtuu siitä, että palaava jännite kasvaa hyvin hitaasti. (Mörsky, 1992)

3.4 Ylikuormitus

Pitkään vaikuttava kuormitusvirta ja oikosulkuvirta aiheuttavat sähkönjakelujärjestelmän johdoissa ja muuntajissa häviöitä. Häviöt muuntuvat lämpöenergiaksi, mikä nostaa johdon tai laitteen lämpötilaa ympäristön lämpötilasta. Tämä voi johtaa siihen, että johdon tai muuntajan terminen kuormitettavuus ylitetään. Liian suuri lämpötila voi aiheuttaa laitteen tai kaapelin eristyksen pettämisen ja myös johdinmetallin ominaisuuksien huonontumisen ja jopa sen sulamisen. (Lakervi & Partanen, 2009)

Valmistajat määrittelevät johdoille ja kaapeleille suurimmat sallitut jatkuvan kuormitusvirran ja 1 s:n oikosulkuvirran arvot. Nämä arvot määräytyvät sen perusteella mitkä ovat johtojen ja kaapelien suurimmat sallitut jatkuvan tilan lämpötilat (yleensä +80 °C) ja hetkelliset lämpötilat (tyypillisesti +160 – 180 °C). Oikosulun aikana sallitaan suurempi lämpötila, sillä vaikka oikosulkuvirta on suuri, sen kesto aika on vain muutamia satoja millisekunteja. (Lakervi & Partanen, 2009)

Tehomuuntajia voidaan tietyin ehdoin ylikuormittaa. IEC-standardin mukaan muuntajat mitoitetaan niin, että mitoituskuormalla ajo +20 °C:n ympäristölämpötilassa on normaalia käyttöä, joka ei johda eristeiden ennen aikaiseen vanhenemiseen. Muuntajan lämpenemiskokeen (IEC 70076-3) avulla voidaan muuntajalle kuitenkin laatia ylikuormitettavuustaulukko. Taulukosta nähdään mikä on muuntajan jatkuvan tilan kuormitettavuus ympäristölämpötilan perusteella sekä hetkellinen ylikuormitettavuus kestoajan perusteella. Jos muuntaja on ulkotilassa ja ulkolämpötila on selvästi alle mitoituslämpötilan, voidaan muuntajaa ylikuormittaa. Toisaalta sallittu kuormitusvirta on pienempi, jos muuntaja sijaitsee sisätiloissa, jossa ympäröivän ilman lämpötila on suurempi. Standardeissa määritetään suurimmat sallitut lämpötila-arvot muuntajassa käytettyjen eristeiden mukaan. Karkea raja muuntajaöljyn ylälämpötilalle on +95 °C:n ja käämin lämpötilan ylärajana voidaan pitää +130 °C:tta. Kuormitusvirran kasvaessa täytyy ottaa huomioon, että käämit saavuttavat lämpötilan ylärajan nopeammin kuin muuntajaöljy. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011) (Lakervi & Partanen, 2009)

Tavanomaisia suurempia kuormitusvirtoja voi esiintyä esimerkiksi vakavien häiriötilanteiden aikaisissa poikkeuksellisissa verkon kytkentätilanteissa. Sähköverkossa olevien tehonkulutus- tai tuotantojärjestelmien vikaantuminen voi myös aiheuttaa kuormitusvirtojen kasvua. Esimerkiksi pätötehon kulutus vois kasvaa merkittävästi jos joku lämmitysjärjestelmä (esim. kaukolämpö tai teollisuuden prosessilämpö) vikaantuu ja se joudutaan korvaamaan vara sähkölämmityksellä. Myös loistehon kompensoinnin vikaantuessa teollisuudessa, joudutaan tarvittava loisteho siirtää muualta sähköverkosta, joka lisää kuormitusvirtaa. Terminen kuormitettavuus voidaan myös ylittää ympäristöolosuhteiden, kuten kohonneen lämpötilan tai likaantumisen, ikääntymisen ja asennusvirheiden vuoksi. (Lakervi & Partanen, 2009).

Sähköverkon komponentit voivat myös ylikuormittua tilanteessa, jossa suojalaitteet eivät vian tai mitoitusvirheen takia katkaise ylivirtaa riittävän nopeasti. Yksi ylikuormitukseen johtava tekijä voi olla myös suojalaitteen vajaanapainen toiminta. Näin voi käydä jos Dyn-kytketyn jakelumuuntajan yläjännitepuolella käytetään suojalaitteena sulakkeita ja oikosulku pienjännitepuolella polttaa vain yhden vaiheen sulakkeen ennen kuin muiden vaiheiden sulakkeet ehtivät palaa. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa osittainen oikosulkuvirta on liian pieni polttamaan kahden muun vaiheen sulakkeita ja oikosulkuvirta ei katkea. Osittainen oikosulkuvirta pienjännitepuolella voi tässä tapauksessa rikkoa sähkölaitteita. (SFS-EN 60909-0, 2001)

3.5 Yli- ja alijännite

Kokemusten mukaan liian kauan vaikuttavat yli- ja alijännitteet muuttavat laitteiden käyttöominaisuuksia ja/tai vaurioittavat niitä. Sähkölaitteet valmistetaan yleensä tietylle mitoitusjännitteelle. Sähkölaitteiden ja jakelujärjestelmien jännitetoleranssien suuruudesta päättävät yleensä laitevalmistajat ja verkkoyhtiöt yhdessä. Normaali-tilanteessa, eli kun ei ole vikaa tai jännitekatkoa, jännitteen tulisi olla $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä. Sähköverkon jännitetasoa säädetään muuntajien käänikytkimillä, väliottokytkimillä, kondensaattoreilla, reaktoreilla ja erilaisilla tehoelektroniikkaa sisältävillä nopeilla jännitteensäätäjillä. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, 2011). Näillä laitteilla ei kuitenkaan voida varmistua siitä, että jännite pysyisi sallituissa rajoissa myös vika- ja häiriötilanteissa, sillä ne eivät ole tarpeeksi nopeita eikä niiden säätöalue ole riittävä. Tämän takia jakeluverkko suojataan yli- ja alijännitteiden varalta. (Mörsky, 1992).

Sähköverkossa esiintyvät ylijännitteet voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: transienttilyijännitteet ja pientaajuiset ylijännitteet. Transienttilyijännitteet ovat voimakkaasti vaimenevia ja lyhytaikaisia, enintään millisekunteja kestäviä, ylijännitteitä. Pientaajuiset ylijännitteet ovat taas jaksollisia vaimenemattomia tai heikosti vaimenevia ylijännitteitä, joiden kesto aika saattaa olla melko pitkä. Transienttilyijännitteet voidaan edelleen jakaa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttilyijännitteisiin. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011).

Ukkosen synnyttämä salamapurkaus on yleisin jyrkkien transienttilyijännitteiden aiheuttaja. Salamaniskut voivat osua avojohtoon joko suoraan tai sen välittömään läheisyyteen (indusoituneet ylijännitteet). Jyrkät transienttilyijännitteet ovat vaarallisia eristyksille ja voivat aiheuttaa ylilyönnin ja maasulun johdolla. Loivat transienttilyijännitteet aiheutuvat useimmiten verkon tilanmuutoksista eli vikojen syntymisestä sekä kytkentätoimenpiteistä eli katkaisija- ja erotintoiminnoista. Pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttavia tekijöitä ovat: maasulut, kuorman äkillinen poiskytkeminen, Ferranti-ilmiö (johdon kapasitiivisen virran aiheuttama jännitteen nousu johdossa), resonanssi ja epälineaaristen verkkokomponenttien vaikutukset. Erittäin jyrkät transienttilyijännitteet johtuvat yleisimmin SF₆-kaasulla eristettyjen erottimien toiminnoista. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011).

Suhteellisen suuret ja äkilliset kuormituksen muutokset aiheuttavat nopeita jännitteenmuutoksia. Kuormituksen muutoksia voivat aiheuttaa valssilaitokset ja pistehitsauskoneet, käämikytkimien asentomuutokset tai moottorien käynnistykset ja valokaariuunit. Nopeat jännitteenmuutokset aiheuttavat esimerkiksi elektroniikkalaitteiden häiriötoimintoja ja välkyntää eli ihmisen silmää häiritsevää valon kirkkauden muuttumista. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2011).

Verkon oikosulun seurauksen verkon vikapaikan jännite putoaa lähes nolleen. Oikosulku aiheuttaa verkkoon jännitekuopan, jonka suuruus riippuu tarkastelupisteen ja vikapaikan välisestä etäisyydestä ja kesto aika riippuu viallisen verkon osan oikosulkusuojauksen toiminta-ajasta. Standardin SFS-EN 50160 mukaan jännitekuoppa on tapahtuma, jossa jakelujännite äkillisesti alenee välille 1...90 % nimellijännitteestä ja palautuu lyhyen ajan kuluttua. Jos jakeluverkon päämuuntajan toisiokäämissä on useita lähtöjä ja yhteen niistä tulee kolmivaiheinen oikosulku, näkyy jännitekuoppa myös terveissä lähdoissa. Jännitekuoppa on sitä suurempi mitä lähempänä sähköasemaa vika tapahtuu. Tehtaiden prosessit eivät kestä pitkää jännitekuoppaa, vaan ne irtoavat verkosta. (Lakervi & Partanen, 2009)

3.6 Vika- ja häiriötilanteiden ennaltaehkäisy

Vika- ja häiriötilanteet voivat aiheuttaa verkkoon käyttökeskeytyksiä, ylikuormitustilanteita, henkilö- ja laitevaurioita sekä huonoa sähkön laatua. Riittävän nopealla, herkällä ja selektiivisellä suojauksella voidaan minimoida vioista aiheutuvia haittoja. Jotta suojaus voitaisiin suunnitella oikein, täytyy verkon mahdolliset vika- ja häiriötilanteet tuntea ja vikavirtojen tasot laskea. Laitevaurioita ja suunniteltua pidempiä käyttökeskeytyksiä voidaan ehkäistä verkon suunnitteluvaiheessa mitoittamalla verkon laitteet niin, että ne kestävät termisesti kuormitus- ja oikosulkuvirran sekä ympäristöolosuhteet. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Myös verkon johtojen ja laitteiden kunnonvalvonnalla ja huollolla voidaan merkittävästi ehkäistä vika- ja häiriötilanteiden syntyä sekä löytää piileviä vikoja. Etenkin verkon primäärikomponenttien, eli muuntajien, katkaisijoiden, kojeistojen, kaapeleiden ja suojalaitteiden kuntoa tulee valvoa ja niille tulee tehdä määräaikaishuollot. (Mörsky, 1992)

Käyttökeskeytyksien aiheuttamia haittoja voidaan ehkäistä rakentamalla diesel- tai paristovarmennettu varasyöttöverkko. Teollisuudessa varasyöttöverkkoihin kytketään kytkinlaitoksen ohjaus- ja suojalaitteet sekä tärkeimmät prosessi- ja automaatiojärjestelmät. (Etto, 1998)

4 SUOJAUKSEN SUUNNITTELU

Teollisuuden keskijänniteverkon suojaus toteutetaan suojarleiden, mittamuuntajien ja katkaisijan muodostamalla kokonaisuudella. Jokainen kytkinlaitoksen kenno on releistetty. Suojauksen tarkoitus on havaita sähköverkon vika- ja häiriötilanteet ja irtikytkä vikaantunut verkon osa. Näin ehkäistään johdoille ja laitteilla aiheutuvia vaurioita sekä estetään vaaratilanteiden syntyminen. Teollisuuden keskijänniteverkot ovat tyypillisesti toteutettu säteittäisiksi, jolloin selektiivisen suojauksen suunnittelu helpottuu. Maasulkusuojauksen toteuttaminen maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa vaatii kuitenkin erityistekniikkansa, sillä se poikkeaa luonteeltaan merkittävästi oikosulkuvuodesta. (Lakervi & Partanen, 2009)

Hyvän suojausjärjestelmän ominaisuuksia ovat selektiivisyys, nopeus, luotettavuus ja herkkyys. Selektiivisyys tarkoittaa, että vain vikaantunut verkon osa poiskytketään vian aikana. Näin saadaan sähkökatko rajattua mahdollisimman pienelle verkon osalle. Suojauksen on toimittava nopeasti, jotta vikavirran aiheuttamat vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisiksi. Rele ei saa toimia, jos sen vaikutusalueella ei ole vikaa, mutta sen täytyy toimia luotettavasti ja varmasti silloin kun vika on sen suojausalueella. Suojauksen täytyy kattaa koko suojattava järjestelmä aukottomasti ja jokainen verkon osa tulee kuulua kahteen eri suojausalueeseen. Kahdennus voidaan toteuttaa niin, että varasuojana toimii edeltävän releen hidastettu porras. Lisäksi relesuojauksen täytyy olla riittävä herkkä, niin että ne laukaisevat kaikissa halutuissa käyttötilanteissa, silloinkin kun vikavirrat ovat pienentyneet normaaliin käyttötilanteeseen verrattuna. (Mörsky, 1992) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

4.1 Oikosulkusuojaus

Suojausjärjestelmältä vaaditaan myös, että se on yksinkertainen. Säteittäisessä teollisuusverkossa tämä onnistuu käyttämällä aikaselektiivistä suojausta, jossa selektiivisyys toteutetaan toiminta-aikoja porrastamalla niin, että lähimpänä vikakohtaa oleva rele ehtii toimia ensin. Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan ylivirtareleillä, joka toimii kun virta ylittää sille asetellun arvon. Ylivirtarele voi toimia vakio- tai käänteisaikaisena. Vakioaikaylivirtarele havahtuu, kun mittausvirta ylittää releen asetteluarvon ja toimii (lähettää laukaisukäskyn katkaisijalle) kun se on ollut havahtuneena asetteluajan. Käänteisaikaylivirtarele toiminta-aika on käänteinen virtaan nähden eli se toimii sitä nopeammin mitä suurempi vikavirta on. Käänteisaikasuojaus soveltuu sellaisen säteittäisen verkon suojaukseen, jossa kytkentätilanteen muutokset eivät juurikaan vaikuta oikosulkuvirtojen suuruuteen tai silloin kun johdon oikosulkuvirtojen erot alku- ja loppupään välillä ovat suuria. (ABB, 2000) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

IEC 60255-3 määrittelee neljä käänteisaikakäyrästä: normal, very inverse, extremaly inverse ja long time inverse. Käyrien käänteisaikahidasteinen laukaisuaika t_{TRIP} lasketaan yhtälön (43) avulla.

$$t_{TRIP} = \frac{A \cdot k}{\left(\frac{I}{I_{>}}\right)^p - 1} \quad (43)$$

jossa

I = verkon vikavirta

$I_{>}$ = releelle aseteltu havahtumisvirta

A, p = kertoimia, jotka määräytyvät sen perusteella mitä käänteisaikakäyrästä käytetään

k = aseteltu aikakerroin

TAULUKKO 4. IEC 60255-3 mukaisten jyrkkyyssäyrien parametrit A ja p.

| Käyrän jyrkkyys | A | p |
|--------------------------|----------|----------|
| <i>Normal</i> | 0,14 | 0,02 |
| <i>Very Inverse</i> | 13,5 | 1 |
| <i>Extremely Inverse</i> | 80 | 2 |
| <i>Long Time Inverse</i> | 120 | 1 |

Peräkkäisten releiden aikaporrastus tulee olla riittävä, jotta selektiivisuus toteutuu. Porrasaikaan vaikuttaa reletyyppi: mekaanisilla releillä aikaporrastus tulee olla 0,5 sekuntia, staattisilla 0,3 ja numeerisilla eli ohjelmoitavilla releillä 0,15. Liian suuria porrasaikoja täytyy välttää, sillä se hidastaa liikaa syöttösuunnassa olevia katkaisijoita. Nykyaikaisissa releissä on vähintään kaksi aikaporrasta, joista alempi ($I_{>}$) porrastus voidaan valita vakioaika- tai käänteisaikahidasteiseksi ja ylempi porrastus ($I_{>>}$) toimii aina vakioaikahidasteisesti. Ylempien portaiden tarkoitus on nopeuttaa releen toimintaa suurilla vikavirroilla. (Eronen, 2013) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Ylivirtareleiden toimintaa voidaan nopeuttaa käyttämällä lukitussuojausta. Lukitussuojauksella voidaan toteuttaa esimerkiksi keskijännitekiskoston nopea oikosulkusuojaus siten että, lähtökatkaisijan ylivirtaporrastus lukitsee syöttökatkaisijan ylivirtaportaan. Tällöin vian ollessa lähdössä, sekä syöttö- että lähtökatkaisijat havahtuvat, mutta lähtökatkaisija antaa lukituskäskyn syöttökatkaisijalle, jolloin sen toiminta estyy. Näin lähtökatkaisija hoitaa vian poiskytkemisen ja vika saadaan rajattua vain vialliseen lähtöön. Toisaalta, jos vika tapahtuu kiskossa, ei lähdön katkaisija havahdu, eikä lukituskäskyä tule syöttökatkaisijalle jolloin syöttökatkaisija hoitaa vian poiskytkemisen. Tässä tapauksessa lukituksen avulla saadaan nopeutettua kiskostovian poiskytkemistä verrattuna tilanteeseen, jossa suojaus olisi toteutettu aikaselektiivisyyden perusteella. Käytännön sovelluksissa kuitenkin lukittavan portaan toiminta-aikaa hidastetaan, jotta varmistetaan selektiivisyyden toteutuminen. Tyypillisesti toimintaviive on noin 100 ms. (ABB, 2000)

Suojauksen selektiivisyystarkasteluun käytetään virta- aikakaaviota. Siinä esitetään kaikkien sarjaan kytkettyjen suojien toimintakäyrät ja niiden lisäksi muut suojauksen toimintaan ja suunnitteluun vaikuttavat tekijät kuten suojien vaikutusalueella esiintyvät suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirrat, moottorien suurimmat käynnistysvirrat, muuntajien kytkentävirrat, verkon komponenttien nimellisvirrat ja oikosulkukestoisuudet ja suurimmat kuormitusvirrat. (ABB, 2000)

Nykyaikaisissa numeerisissa eli ohjelmoitavissa releissä on paljon ominaisuuksia, joilla voidaan helpottaa suojauksen suunnittelua ja lisätä suojauksen käyttövarmuutta. Prosessoritekniikkaa hyödyntäviin releisiin voidaan määritellä loogisia toimintoja, joiden avulla voidaan estää virhetoimintoja ja parantaa suojauksen tasoa. Esimerkkinä ohjelmoitavasta toiminnosta on muuntajan kytkentätilanteen tunnistaminen, jolla voidaan estää suojan toimiminen kun muuntajaa kytketään verkkoon. Toiminta perustuu siihen, että kytkentätilanteessa pikalaukaisun toiminta-arvo automaattisesti kaksinkertaistuu ja kytkentätilanteen loputtua palaa asetteluarvoonsa. Releissä on myös sarjaliikenneportti, jonka kautta rele voidaan liittää ylempään automaatiojärjestelmään valokuidulla. Näin releestä voidaan siirtää mittaustietoja, häiriörekisteritietoja, releen asetteluarvotietoja ja katkaisijan tilatietoja. Sarjaväylän kautta releelle päin voidaan siirtää esimerkiksi katkaisijan auki- ja kiinniohjauksia, suojausasettelujen muutoksia ja kaukokuittauksia. (Mörsky, 1992)

Ohjelmoitaviin releisiin on mahdollista tehdä myös ns. tausta-asettelut, jotka on suunniteltu normaalista käyttötilanteesta poikkeaviin kytkentätilanteisiin esimerkiksi vian jälkeisiin varasyöttötilanteisiin. Tausta-asettelut voidaan ottaa käyttöön automaattisesti ulkoisella ohjauksella tai manuaalisesti releen etupaneelista tai etänä. Näin normaalia käyttötilannetta vastaavien suojausasettelujen suunnittelussa ei tarvitse ottaa huomioon varasyöttöyhteyksien vaikutusta. (Mörsky, 1992)

4.1.1 Jakelumuuntajaa syöttävän keskijännitelähdön oikosulkusuojaus

Tässä työssä keskitytään sellaisen teollisuuden keskijänniteverkon käsittelyyn, jossa kaikki keskijännitelähdöt syöttävät jakelumuuntajia. Keskijännitteeseen ei ole liitetty generaattoreita tai moottoreita. Tästä syystä tarkastellaan vain jakelumuuntajan lähtökatkaisijan suojausasettelujen periaatteita.

Keskijännitelähdön rele toimii ensisijaisesti muuntajaa syöttävän kaapelin sekä muuntajan ensiöpuolen oikosulkusuojana, mutta lisäksi pienjännitepuolen pääkatkaisijan varasuojana. Lisäksi sillä voidaan toteuttaa nopea ylikuormitussuojaus. Selektiivisyys keskijännite- ja pienjännitesuojan toiminnassa ei ole erityisen tärkeää, jos jakelumuuntaja syöttää vain yhtä pääkeskusta, mutta jos lähtö syöttää kahta pääkeskusta, tulee selektiivisyyteen kiinnittää huomiota. Jos vika tapahtuu jommassakummassa pääkeskuksessa, ei keskijännitesuoja saa toimia nopeammin kuin pääkeskuksen katkaisija. (Eronen, 2013)

Suojauksen virta- ja aika-asettelujen suunnittelussa tulee ottaa huomioon:

- suojan vaikutusalueen suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirrat
- muuntajan kytkentävirtasysäys, joka voidaan arvioida esimerkiksi taulukon 5 avulla
- varasuojauksen toteutuminen
- selektiivisyyden toteutuminen
- verkon komponenttien oikosulkukestoisuuksien alittuminen (Eronen, 2013)

TAULUKKO 5. Mitattuja muuntajan kytkentäsysäysvirran arvoja. (Mörsky, 1992)

| <i>Muuntajateho (MVA)</i> | <i>Syöttö yläjännitekäämiin</i> | <i>Syöttö alajännitekäämiin</i> | <i>Virran puoliintumisaika (s)</i> |
|--------------------------------------|--|--|---|
| 1 | $7 \times I_N$ | $12 \times I_N$ | 0,1 ... 0,2 |
| 5 | $5 \times I_N$ | $9 \times I_N$ | 0,2 ... 0,5 |
| 10 | $4 \times I_N$ | $8 \times I_N$ | 0,5 ... 1,0 |
| 50 | $3,5 \times I_N$ | $7,5 \times I_N$ | 1,2 ... 7,2 |

Jakelumuuntajan suojaus voidaan toteuttaa kaksiporraisella vakioaikaylivirtareleellä. Ylempi virtaporras toimii muuntajan ensipuolen vioissa ja alempi porrassuojauksella muuntajan toisiopuolen vioissa sekä pienjännitepääkeskuksen katkaisijan varasuojana. (Eronen, 2013). Alemman portaan virta- ja aika-asetteluissa noudatetaan seuraavia periaatteita:

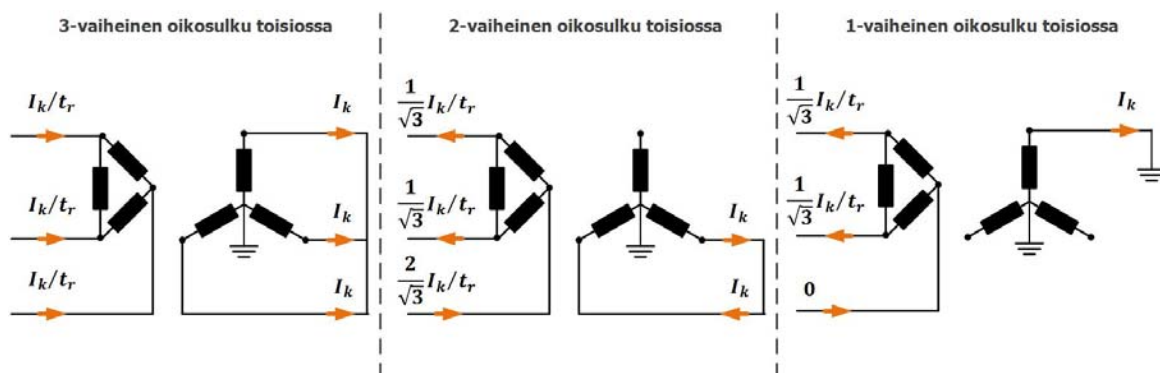
- Virta-asettelu $I >$ on maksimissaan kaksinkertainen muuntajan nimellisvirtaan nähden.
- Virta-asettelun tulee olla pienempi kuin pienin toisiopuolen oikosulkuvirta.
- Aika-asettelu $t >$ valitaan yleensä käyttökokemusten perusteella ja huomioiden muuntajan kytkentävirran puoliintumisaika.

Ylemmän portaan virta- ja aika-asetteluissa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Ylivirtaporrassuojauksella ei saa havahtua suurimmalla pienjännitepuolen oikosulkuvirralla, mutta täytyy olla pienempi kuin pienin muuntajan yläjännitepuolen oikosulkuvirta.
- Toiminta-aika $t >$ valitaan lähdön kaapelin termisen oikosulkuvirtakestoisuuden perusteella.
- Toiminta-aika tulee olla mahdollisimman lyhyt, jotta syöttökatkaisijan toiminta-aika ei tule liian pitkäksi.

Kun halutaan varmistua releen toimivan oikealla tavalla, tehdään releiden asetellut seuraavilla periaatteilla: kun halutaan releen laukaisevan, kerrotaan virta-asetteluarvo luvulla 1,2 ja kun halutaan ettei rele varmasti lähetä laukaisukäskyä, kerrotaan releelle aseteltava virta luvulla 0,8. Näin otetaan huomioon verkon tilan vaihtelut, vikavirran vaihtelut sekä mittauksen virheet. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Dyn-kytkentäisen muuntajan toisiopuolen epäsymmetrisissä oikosuluissa eivät vikavirrat muodostu samalla tavalla kuin symmetrisissä vioissa. Kolmivaiheinen vikavirta voidaan redusoida suoraan muuntajan muuntosuhteen perusteella, mutta 2- ja 1-vaiheisten vikojen redusoinnissa täytyy ottaa huomioon myös kuvan 30 mukaiset kertoimet.



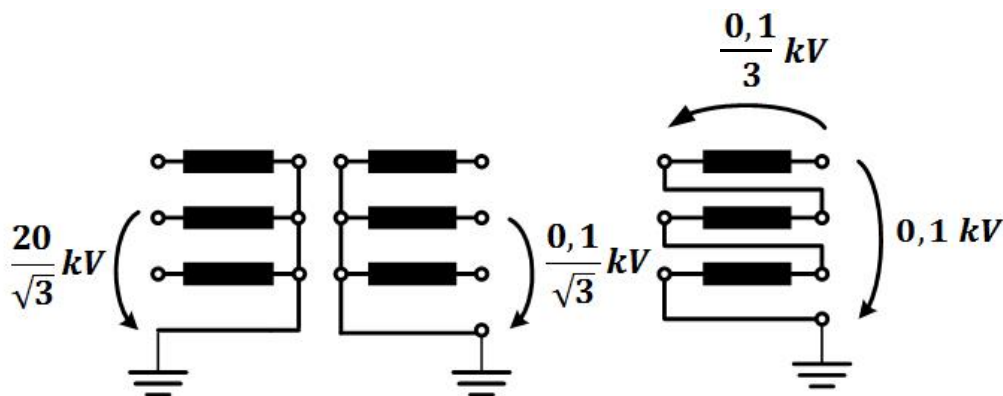
KUVA 30. Dyn-kytkentäisen muuntajan virtojen muodostuminen kolme-, kaksi- ja yksivaiheisissa toision oikosulkutilanteissa. I_k on oikosulkuvirta ja t_r on muuntajan muuntosuhde. (Huotari & Partanen, 1998)

4.2 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojausta ei voida keskijänniteverkossa toteuttaa oikosulkusuojausten tapaan ylivirtareleillä, sillä maasulkuvirrat ovat pieniä verkon tähtipisteen maasta erottamisen tai sammutuksen takia. Maasulkusuojausten vikakriteereinä käytetään ylivirran sijaan muita sähköisiä ilmiöitä, kuten perustaajuisen tähtipiste- tai vaihejännitteen muutosta, perustaajuisesta summavirtaa, virran ja jännitteen yliaaltoja tai suurtaajuisia muutosvirtoja. Muutosvirrat syntyvät maasulun alkuhetkinä, kun viallisen vaiheen kapasitanssit purkautuvat ja terveiden vaiheiden kapasitanssit varautuvat jatkuvuustilan jännitteeseen. Yliaaltoja syntyy muuntajien kyllästymisen seurauksena ja merkittävin on viides yliaalto. Yliaaltoihin perustuva suojaus toimii selektiivisesti sekä maasta erotetussa että kompensoidussa verkossa, mutta niillä saavutetaan merkittäviä etuja etenkin kompensoidussa verkossa, jossa yliaaltojen osuus jäännösvirrasta on erittäin suuri. Tyypillinen teollisuusverkon maasulkusuojaus toteutetaan maasulun seurauksena tapahtuvaan nollajännitteen nousuun sekä nollavirran suuruuteen ja/tai suuntaan perustuvalla suojauksella. (ABB, 2000) (Mörsky, 1992)

Maasulkusuojausten toteuttamista varten tarvitaan summavirran- ja nollajännitteenmittaus. Summavirtaa mitataan lähtökohtaisesti tyypillisesti kaapelivirtamuuntajalla, jonka etuna on pienten virtojen mittaustarkkuus sekä aiheeton toimimattomuus suurilla oikosulkuvirroilla ja kytkentä- ja käynnistysvirroilla. Kaapelivirtamuuntajan muuntosuhde valitaan maasulkuvirtojen perusteella ja muuntosuhteen tulisi olla vähintään 30/1 A ja suuntareleitä käytettäessä 70/1 A tai suurempi. Kaapelivirtamuuntajien kuormitettavuus ei ole suuri, mutta ongelmia ei synny käytettäessä pienitaakkaista numeerisia releitä ja lyhyitä mittajohtimia. Kaapelivirtamuuntajien asennuksessa on huomioitava, että jos kaapelin metallinen vaippa tai suojajohtin viedään kaapelivirtamuuntajan läpi, täytyy kaapelipääteestä, metallivaipasta tai suojajohtimesta viedä maadoitusjohtin muuntajan aukon kautta maadoituskiskoon. Näin varmistetaan, että kaapelin metallivaipassa tai suojajohtimessa kulkeva vikavirta pääsee vääristämään mittaustulosta ja aiheuttamaan maasulkureleiden virhetointoja. (Mörsky, 1992)

Koko verkon vaihejännitteet ja nollajännite mitataan jännitemuuntajalla, jossa on vaihekäämien lisäksi tertiäärikäämit, jotka kytketään sarjaan eli avoimeen kolmioon. Jännitteen mittaukselle on kytkinaseman kojeistossa oma kenno, jossa on ylivirta- ja oikosulkusuojaus (tyypillisesti kahvasulakkeet). Jännitemuuntajan muuntosuhde mitoitetaan yleensä niin, että avokolmikäämissä on 100 V:n jännite, kun verkossa on suora maasulku. Alla on esitetty kuva jännitemuuntajasta. (Mörsky, 1992)



KUVA 31. Jännitemuuntaja, jossa vaihekäämien lisäksi on avokolmiokäämitys nollajännitteen mittausta varten. Jotta avokolmiossa olisi 0,1 kV jännite, täytyy 20 kV verkossa olla yksivaiheinen suora maasulku. Muuntajan muuntosuhde merkitään $\frac{20}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{3} \text{ kV}$. (Mörsky, 1992)

Summavirran ja nollajännitteen mittaukseen on edellä mainittujen lisäksi muitakin mittaustapoja kuten vaihevirran ja -jännitteen mittaus sensoreilla, jolloin releen mittausalgoritmi laskee halutut suureet. Summavirran mittaukseen voidaan käyttää myös virtamuuntajien summakytkentää ja nollajännitteen mittaukseen tähtipisteen ja maan väliin kytkettävää yksivaihemuuntajaa. (ABB, 2000)

4.2.1 Turvallisuusvaatimukset

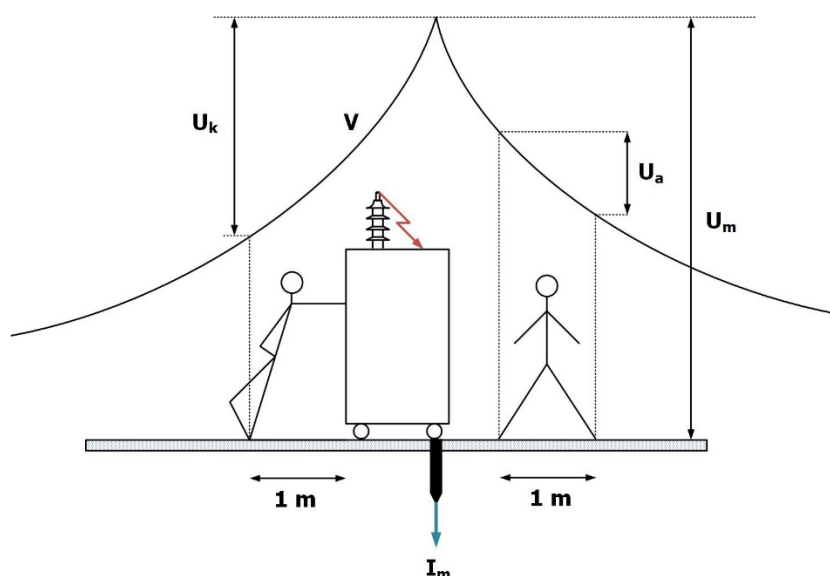
Maasulkusuojauksen tulee toteuttaa standardin SFS 6001 vaatimukset. Standardin mukaan kaikki yli 1000 V:n asennukset on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka kytkevät pois vaarallisen maasulun tai ilmaisevat maasulun. Suojaukseen käytettävä laite valitaan sen perusteella, mikä on asennuksen tähtipisteen maadoitustapa. (SFS-Käsikirja 601, 2015)

Maasulkuvirta I_f synnyttää maadoitusresistanssissa R_m maadoitusjännitteen U_m , joka lasketaan yhtälön (44) avulla.

$$U_m = I_f \cdot R_m$$

(44)

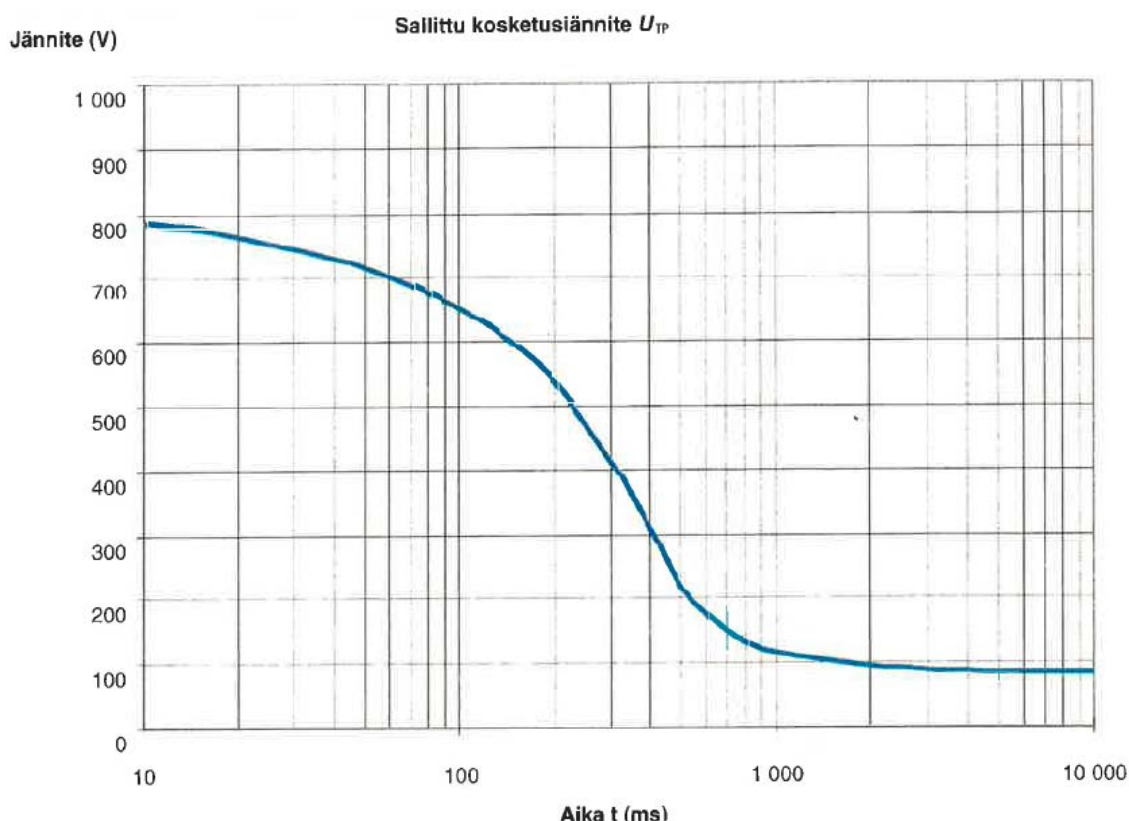
Maadoitusjännite aiheuttaa kosketusjännitteen U_{TP} , millä tarkoitetaan sitä osaa maadoitusjännitteestä, jonka vikavirta saa aikaan kulkiessa kehon kautta kädestä jalkoihin. Maasulkuvirta synnyttää ympäristöönsä potentiaalienten, jonka vaikutuksesta muodostuu kahden jalan samaan aikaan koskettamien pisteiden välille askeljännite U_a . Kuva 32 esittää maadoituselektrodin ympärille muodostuvaa potentiaalijakaumaa sekä kosketus- ja askeljännitteen syntymistapoja. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011) Maasulkutilanteen on tässä tapauksessa aiheuttanut kipinävälisuojaan toimiminen salamaniskun aiheuttaman ylijännitteen vaikutuksesta (Lakervi & Partanen, 2009).



KUVA 32. Maan pinnan potentiaali V , maadoitusjännite U_m , kosketusjännite U_k ja askeljännite U_a . (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2011)

Kosketus- ja askeljännitteet voivat olla ihmisille tai eläimille hengenvaarallisia, jos ne ovat liian suuria. Standardi SFS 6001 määrittelee sallitut kosketusjännitteet U_{TP} erilaisille asennuksille. Tavoitettassolla maadoitusjännite U_m saa olla kaksinkertainen verrattuna kosketusjännitteen U_{TP} arvoon. Jos $2 \times U_{TP}$ arvoa ei voida teknisistä tai taloudellisista syistä saavuttaa, voidaan käyttää $4 \times U_{TP}$ tai $5 \times U_{TP}$ jos standardissa esitetyt erityisvaatimukset täytetään. (SFS-Käsikirja 601, 2015)

Sähköiskun vaarallisuus riippuu kosketusjännitteen suuruuden lisäksi sen kestoajasta. Standardi SFS 6001 määrittelee suurimmat kosketusjännitteen arvot vian kestoajan perusteella kuvassa 33 olevalla käyrällä. Käyrää laskettaessa on oletettu, että kosketusjännite syntyy ihmiskehon yli paljaasta kädestä paljaaseen käteen tai paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin eikä siinä ole otettu huomioon mahdollisia lisäresistansseja. (SFS-Käsikirja 601, 2015)



KUVA 33. Sallittu kosketusjännite. (SFS-Käsikirja 601, 2015)

Standardin SFS 6001 mukaan kosketus- ja askeljännitevaatimukset täyttyvät, jos asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Tyypillisesti teollisuusalueet, joissa on lähellä toisiaan useita muuntamoja, rakennetaan laajaksi maadoitusjärjestelmäksi. Järjestelmä tehdään liittämällä useat lähellä toisiaan olevat maadoitusjärjestelmät verkkomaisesti yhteen sekä yhdistämällä eri jännitetasojen maadoitusverkot useasta eri kohdasta. Järjestelmä rakennetaan niin laajaksi ja tiheäksi, ettei alueella esiinny vaarallisia kosketusjännitteitä. (SFS-Käsikirja 601, 2015)

Yleensä maasulku kytketään pois automaattisesti, mutta standardissa SFS 6001 on määritelty ehdot hälyttävälle tai käsin tapahtuvalle poiskytkennälle. Ehdot ovat:

”Ensimmäisistä maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, kun verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys on tarvetta siirtää eteukäteen laadittujen ohjeiden mukaisesti sopivampaan ajankohtaan.

Hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:

- *Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään.*
- *Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan verkon käyttöä valvovan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa*

ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pitempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.

- *Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla muualla kuin laajassa maadoitusverkossa korkeintaan pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen kuitenkin korkeintaan 150 V.*
- *Kaksoismaasulkutilanteessa pitää maasulut kytkeä pois.*
- *Televerkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.”*

4.2.2 Selektiivisen maasulkusuojauksen toteutus

Maasulkusuojauksen toteutukseen vaikuttaa verkon tähtipisteen maadoitus. Tässä työssä käsitellään selektiivistä maasulkusuojausta maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa.

Maasta erotettu verkko

Kun halutaan maasta erotetun verkon maasulkusuojauksen toimivan selektiivisesti, toteutetaan suojaus lähtökohtaisilla nollavirtareleillä tai nollavirtaa ja nollajännitettä mittaavilla suuntareleillä. Pelkät nollajännitettä mittaavat ylijännitereleet laukaisevat vain syöttökatkaisijat tai toimivat hälyttävänä. Etenkin kaapeliverkoissa, joissa on avojohto-osuuksia, täytyy nollajännitteen havahtumisarvo asetella mahdollisimman pieneksi, sillä niissä voi tapahtua suuresistanssisia maasulkuvikoja. Mitä suurempi vikaresistanssi on, sitä pienempi on nollajännite. Asettelen alarajan määrittämisessä tulee kuitenkin huomioida releen herkkyys sekä myös verkon terveen tilan nollajännite. Terveen tilan nollajännitettä voivat nostaa esimerkiksi johtojen eri vaiheiden maakapasitanssien epäsymmetria (vuorottelemattomat avojohdot). Pelkästään kaapeleilla toteutetun verkon terveen tilan nollajännite voi olla hyvinkin pieni.

Suuntaamattoman nollavirtareleen toiminta perustuu verkon terveiden lähtöjen maakapasitanssien kautta palaavan maasulkuvirran mittaamiseen. Viallisen lähdön maasulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (36). Jos vika tapahtuu muualla verkossa, rele mittaa vain kyseisen johtolähdön omien maakapasitanssien kautta asemalle päin palaavan osan maasulkuvirrasta. Terveen johtolähdön maasulkuvirta lasketaan yhtälöllä (38). Suojauksen selektiivisen toiminnan ehtona on, että suojattavan lähdön syöttämä maasulkuvirta on tarpeeksi pieni suhteessa muun verkon syöttämään maasulkuvirtaan. Suuntaamaton suojaus toimii hyvin myös tilanteessa, jossa kytkinlaitoksen syöttävällä puolella on runsaasti maasulkuvirtaa syöttävää verkkoa. Suuntaamattoman suojauksen herkkyyttä voidaan parantaa lisäämällä suojan toimintaehdoksi nollajännitereleen havahtuminen. (ABB, 2000)

Jos suuntaamattomalla suojauksella ei voida toteuttaa selektiivisyyttä, käytetään nollavirran suuntareleitä. Suuntareleiden toiminta perustuu loiskomponentin suuruuteen ja suuntaan tai vaihekulmamittaukseen. Jos toiminta perustuu loiskomponentin suuruuteen ja suuntaan puhutaan

$I_{0\sin}$ -karakteristikasta ja jos toiminta perustuu vaihekulmamittaukseen puhutaan kulmakarakteristikasta. (Isomäki, 2010)

Releen toimintaehdot kun käytössä on $I_{0\sin}$ -karakteristika:

- summaavirran loiskomponentti ylittää asetteluarvon (rele laskee summaavirran loiskomponentin nollajännitevektorille)
- nollajännite ylittää asetteluarvon
- summaavirtavektori on toiminta-alueella

Releen toimintaehdot kun käytössä on kulmakarakteristika:

- nollavirta ylittää asetteluarvon
- nollajännite ylittää asetteluarvon
- nollavirran ja nollajännitteen välinen kulma on alueella $\varphi_0 - \Delta\varphi < \varphi \leq \varphi_0 + \Delta\varphi$ missä $\varphi_0 = 90^\circ$ (Isomäki, 2010) (Mörsky, 1992)

Käytettäessä kumpaa tahansa, suuntaamatonta tai suunnattua suojausta, toteutetaan suojaus usein vähintään kaksiporraisesti. Alemmalla portaalla toteutetaan haluttu herkkyyksivaatimus ja ylemmällä portaalla turvallisuusmääräykset. Alempi porras voidaan määritellä hälyttäväksi ja mitoitetaan toimivaksi suurella vikaresistanssilla. Ylempi porras mitoitetaan toimimaan silloin, kun sallitut maadoitusjännitteen arvot ylittyvät ja toiminta-aika valitaan turvallisuusmääräysten mukaisesti. Myös nollajännitesuojissa käytetään useampi portaista hälytystä jolloin alempi porras antaa virtareleille nollajännitetiedon ja toimivat lähtöjen virtareleiden varasuojina. Ylemmät nollajänniteportaat toimivat syöttöhaaran ja kiskoston suojina ja antavat laukaisukäskyn syöttökatkaisijalle. (ABB, 2000)

Kompensoitu verkko

Kompensoidussa verkossa maasulkuvirrat ovat usein huomattavasti pienempiä kuin maasta erotetussa verkossa. Turvallisuusmääräykset toteutuvat pienten maasulkuvirtojen ansiosta ja usein kompensoidussa verkossa riittää hälyttävä maasulkusuojaus. (ABB, 2000)

Kosketusjännitevaatimusten täyttyminen tulee kuitenkin aina tarkastaa, sillä vaikka maasulkuvirta olisi vain muutamia ampeereita, voi suuri maadoitusresistanssi nostaa maadoitusjännitteen yli sallittujen rajojen.

Kompensoidun verkon suojaus toteutetaan suuntareleillä. Niiden toiminta perustuu maasulkuvirran pätökomponentin suuruuteen ja suuntaan tai vaihekulmamittaukseen. Suojaus voidaan toteuttaa samoilla maasulun suuntareleillä kuin maasta erotetunkin verkon tapauksessa, mutta toimintaehdot valitaan erilaisiksi. Kompensoidun verkon tapauksessa käytetään $I_{0\cos}$ -karakteristikaa tai jos käytetään kulmakarakteristikaa, valitaan φ_0 -arvoksi 0° . (ABB, 2000)

Suppeissa kompensoiduissa verkoissa, maasulkuvirran pätökomponentti voi olla niin pieni, ettei sen suuntaa voida luotettavasti määrittää. Tällöin voidaan kompensointikuristimen rinnalle kytkeä toisiovastus, joka kasvattaa maasulkuvirran pätökomponentin arvoa ja maasulkusuojaus saadaan toimivaksi. (ABB, 2000)

Kompensoidun verkon suojauksessa tulee ottaa huomioon myös tilanne, jolloin kompensointikuristin on jostain syystä pois käytöstä. Maasulkusuojauksen toimiminen on tässä tilanteessa erityisen tärkeää, sillä maasulkuvirrat ja sitä kautta kosketusjännitteet voivat nousta vaarallisen korkeiksi. Tilanteeseen voidaan varautua valitsemalla automaattisella kulmavaihdolla varustetut releet tai käyttää ns. laajalla kulmanmittausperiaatteella toimivia releitä. (ABB, 2000)

4.3 Yli- ja alijännitesuojaus

Teollisuuden keskijännitekojeisto varustetaan yli- ja alijännitereleelle, sillä pitkään vaikuttavat yli- tai alijännitteet aiheuttavat verkon komponenteille sekä kulutuskojeille vaurioita. Yli- ja alijännitteiden aiheuttajia on kuvattu kohdassa 3.5. Normaalisti verkon jännite voi vaihdella $\pm 10\%$. Jos halutaan välttää sähkölaitteiden todennäköisiltä ja laajamittaisilta vaurioilta, rajoitetaan ylijännitteet arvoon 110 - 120 % ja alijännitteet 85 - 95 % ja asetellaan suojauksen toiminta-ajaksi 0 – 50 sekuntia. Suojauksen asettelut voisivat esimerkiksi olla $\pm 20\%$ ja toiminta-aika 5 sekuntia. Suojaus toteutetaan jänniteaikareleellä ja se antaa laukaisukäskyn aseman syöttökatkaisijalle. (Mörsky, 1992)

4.4 Valokaarisuojaus

Teollisuuden keskijännitekojeistoissa käytetään valokaarisuojausta, sillä oikosulkuvirrat ovat usein suuria. Perusoikosulkusuojauksella saavutetaan turvallisuusvaatimukset, mutta sillä ei voida suojautua valokaarioikosulun aiheuttamilta henkilö- ja laitteistovaurioilta. Valokaarisuojauksen avulla voidaan rajoittaa valokaaresta purkautuvaa energiaa huomattavasti. (Tikkanen, 2015)

Valokaarioikosulku syntyy kun eristys pettää ylijännitteen vaikutuksesta ja jännite lyö ionisoituneen ilman läpi ja sytyttää valokaaren. Syttyessään valokaari aiheuttaa korkeita lämpötiloja (jopa 20 000 °C), voimakkaan paineaallon ja myrkyllisiä metallihöyryjä. Normaali katkaisijalla toteutettu oikosulkusuojaus ei välttämättä ehdi suojata valokaaren vaikutuksilta, sillä ensimmäinen paineisku syntyy jo 5 – 10 millisekunnissa. (Tikkanen, 2015)

Valokaarioikosulun tunnistaminen perustuu virtaan ja/tai valoon. Valokaarisuojan avulla saadaan valokaarioikosulun kesto aika rajattua alle 10 millisekuntiin. Valokaarisuojan virta-asettelu valitaan pienimmän mahdollisen oikosulkuvirran perusteella. Valokaarisuojauksella voidaan oleellisesti parantaa kojeiston henkilö- ja laiteturvallisuutta. (Tikkanen, 2015)

5 CASE-TARKASTELU

Case-tarkastelu tehtiin eräälle UPM:n vaneritehtaalle, jossa tehdään pinnoitetutuja ja pinnoittamattomia vanereita rakentamiseen, kuljetusväline- ja huonekaluteollisuuteen. Tehdas on aloittanut tuotannon vuonna 1990, joten sähköjakeluverkossa on tältäkin aikakaudelta peräisin olevaa tekniikkaa.

Tehtaan keskijännitejakelua modernisoitiin vuosien 2013 – 2014 aikana. Keskijännitekojeisto ja johdotukset uusittiin.

5.1 Verkon rakenne

Tehdas liittyy paikallisen sähköjakeluyhtiön maasta erotettuun 10 kV verkkoon. 10 kV syöttöjä tulee tehtaan kytkinlaitokseen kaksi kappaletta kahdelta eri päämuuntajalta. Päämuuntajat ovat kolmikäämimuuntajia, joiden toiset toisiokäämit syöttävät tehdasta. Päämuuntajien tehot ovat 12,5 MVA ja kytkentäryhmä YNd11d11. Jakeluverkko yhtiö on ilmoittanut, että sähköaseman 10 kV puolelle maksimi oikosulkuvirran arvoksi 7,81 kA, minimioikosulkuvirran arvoksi 5,13 kA ja maasulkuvirraksi arvoksi 10 A.

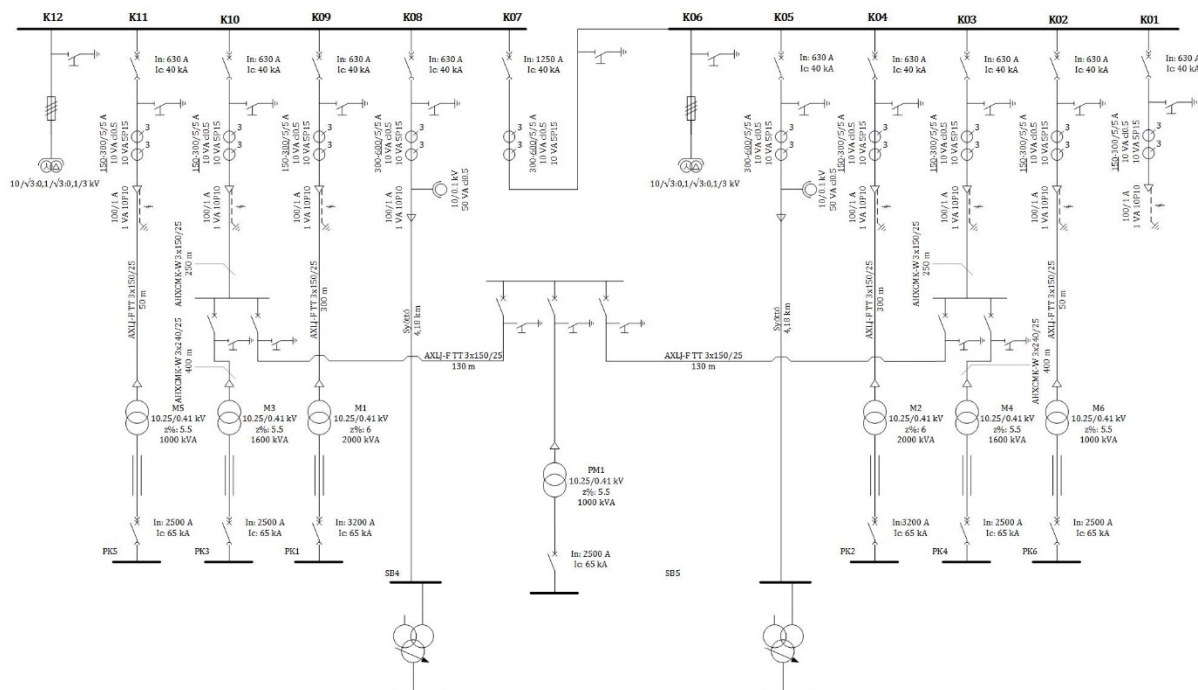
Tehtaalle tulevat keskijännitesyötöt on toteutettu ilmajohdoilla sekä kaapeleilla ja niiden pituus on 4,18 km.

Tehtaan keskijännite kytkinaseman kiskostojärjestelmä on yksikiskojärjestelmä pitkittäiskatkaisijalla. Kojeistossa on yhteensä 12 metallikoteloitua kennoa: kaksi jännitteenmittauskennoa, kolme jakelumuuntajien lähtökatkaisijakennoa, kaksi syöttökatkaisijakennoa, yksi pitkittäiskatkaisijakenno sekä kaksi varalla olevaa lähtökatkaisijakennoa. Kojeisto on ABB Strömbergin CMH 12 -tyyppiä ja varustettu Siemensin 3AH-tyypin tyhjökatkaisijoilla. Kojeiston oikosulkukestoisuus on 40/100 kA ja katkaisijoiden katkaisukyky 40 kA.

Jakelumuuntajia tehtaalla on kuusi kappaletta ja niiden tehot ovat 1000 kVA, 1600 kVA tai 2000 kVA. Lisäksi tehtaalle on lisätty yksi puistomuuntaja, jonka teho on 1600 kVA. Puistomuuntajan syöttö on otettu rinnakkaissyöttönä kahdelta eri jakelumuuntajalta. Jakelumuuntajien syötöt ovat toteutettu AXLJ-F 3x150/25 tai AHXCMK-W 3x150/25 kaapeleilla ja niiden pituudet ovat 50 – 300 metriä. Jakelumuuntajat ja puistomuuntaja syöttävät jokainen omaa 400 V pienjännitepääkeskusta, joiden pääkatkaisijat ovat kompaktikatkaisijoita. Muuntajien ja pääkeskuksien väli on toteutettu kiskosillalla.

Oiko- ja maasulkusuojana on syöttö- ja lähtökentissä ABB REF 615 -suojareleet, joiden toimintoja ovat mm. kolme ylivirtaporrasta, kolme suuntaamatonta maasulkuvirtaporrasta, kaksi suunnattua maasulkuvirtaporrasta, yli- ja alijännitesuojat ja käynnistysvirran tunnistus. Maasulkuvirran mittausta varten on jokaisessa muuntajalähdössä kaapelivirtamuuntajat. Nollajännitettä mitataan kentissä K01 ja K012 olevilla avokolmiojännitemuuntajilla. Jokaisessa muuntajalähdössä on myös kaksisydäminen

virtamuuntaja, jonka toinen sydän on tarkoitettu mittaukseen ja toinen suojaukseen. Yli- ja alijännitesuojausta varten on syöttökentissä K08 ja K05 jännitemuuntajat. Tehtaan pääkaavio on esitetty kuvassa 34 ja lisäksi liitteessä 3.



KUVA 34. Tehtaan pääkaavio.

5.2 Oikosulkuvirtalaskenta

Verkon mitoitus ja suojauksen suunnittelua varten täytyy tuntea verkon mini- ja maksimioikosulkuvirtojen arvot. Case-verkolle nämä laskelmat tehtiin seuraavilla periaatteilla:

Maksimioikosulkuvirrat:

- Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta on I''_{kmax} on 7,81 kA.
- Vika on kolmivaiheinen oikosulku.
- Tehdasta syötetään kahdella muuntajalla kiskojen SB4 ja SB5 kautta ja pitkittäiskatkaisija on auki.
- Käytetään IEC 60909:n mukaista jännitekerrointa c_{max} .
- Lämpötila on 20 °C.
- Vikaimpedanssi on 0 Ω.
- Epätahtimoottorien vaikutus huomioidaan.

Minimioikosulkuvirrat:

- Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta on I''_{kmin} on 5,1 kA.
- Vika on kaksivaiheinen oikosulku.
- Tehdasta syötetään yhdellä muuntajalla kiskon SB4 kautta ja pitkittäiskatkaisija on kiinni.
- Käytetään IEC 60909:n mukaista jännitekerrointa c_{min} .
- Lämpötila on 65 °C.
- Vikaimpedanssi on 0 Ω.
- Epätahtimoottorien vaikutusta ei huomioida.

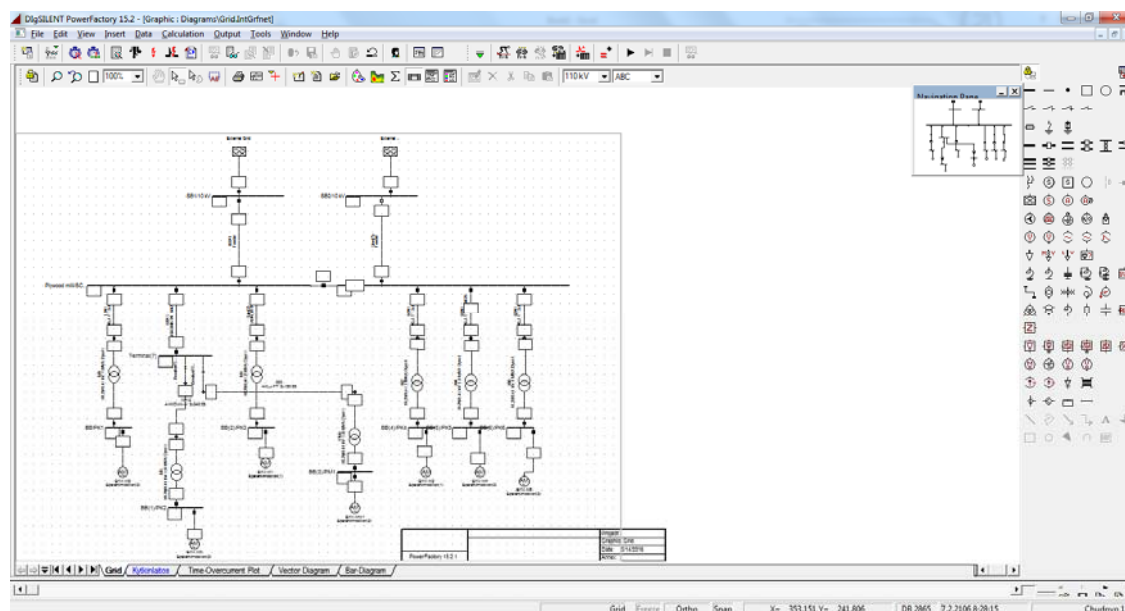
Oikosulkuvirtalaskentoja tehtiin yhteensä 4 kappaletta:

- Minimioikosulkuvirrat kun vikapaikaksi on määritelty kaikki kiskot
- Maksimioikosulkuvirrat kun vikapaikaksi on määritelty kaikki kiskot
- Minimioikosulkuvirrat kun vika tapahtuu pienjännitepääkeskuksessa PK5
- Maksimioikosulkuvirrat kun vika tapahtuu pienjännitepääkeskuksessa PK5

Laskennoista kaksi viimeistä tehtiin lähdön K11 suojauksen suunnittelua varten.

5.2.1 Kohdeverkon mallintaminen oikosulkuvirtojen laskentaa varten

Luvussa 5.1 kuvattu verkko piirrettiin PowerFactory-ohjelmaan pääkaavion ja muiden verkosta saatavilla olevien sähkötekniisten tietojen perusteella. Verkon pääkomponentteja ovat syöttävä verkko, kiskojärjestelmät, johdot, kytkinlaitteet, muuntajat ja pienjännitepuolen epätahtimoottorit. Ohjelmassa on suoraan yksikiskojärjestelmä pitkittäiskatkaisijalla joten sitä käytettiin. Järjestelmässä on valmiina katkaisijat, joten niitä ei tarvinnut erikseen piirtää. Muuntaja- ja johtotyytit määriteltiin itse, sillä sopivia tyyppejä ei löytynyt ohjelman omasta kirjastosta. Pienjännitepuolen ekvivalenttiset moottoriryhmät tehtiin käyttämällä epätahtimoottoriobjektia ja määrittelemällä sen tehoksi kaikkien kuormana olevien epätahtimoottorien yhteenlaskettu teho ja käyttämällä standardin mukaista I_{LR}/I_{RM} arvoa 5. Ekvivalenttisten moottoriryhmien yhteenlaskettu teho on arvioitu niin, että jakelumuuntaja on 80 % kuormassa ja tästä 80 % on suoria epätahtimoottorikäyttöjä. Verkon oikosulkuvirtalaskentaa varten tarvittavat sähkötekniiset tiedot ovat esitetty liitteessä 1. Kuva 35 esittää valmiiksi rakennettua verkkoa PowerFactoryssa.



KUVA 35. Valmis tehdasverkko PowerFactoryssa.

5.2.2 Laskentatulokset

PowerFactoryn oikosulkuvirtalaskennoista saatiin taulukon 6 mukaiset laskentatulokset. Tuloksista arvoja I''_{kmax} , i_p ja I_{th1s} käytetään verkon mitoitukseen ja arvoja I''_{k2min} , I''_{kmax} ja I''_{k2min} käytetään

lähdön K11 (keskijännitelähtö, joka syöttää jakelumuuntajan M5 kautta keskusta PK5) oikosulkusuojauksen suunnittelussa.

TAULUKKO 6. PowerFactoryn oikosulkuvirtalaskentatulokset case-verkosta.

| Kisko | Tunnus | I''_{kmax} (kA) | i_p (kA) | I_{th1s} (kA) | I''_{k2min} (kA) | I''_{kmax} (kA) * | I''_{k2min} (kA) * |
|--------------------------------------|--------|----------------------|---------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Sähköasema 10 kV | SB4 | 9,503 | 22,366 | 9,62 | 4,223 | - | - |
| Sähköasema 10 kV | SB5 | 9,503 | 22,366 | 9,62 | 4,443 | - | - |
| Tehtaan keskijännite kytkinlaitos | SC1 | 6,468 | 12,037 | 5,94 | 1,712 | 0,924 | 0,328 |
| Tehtaan keskijännite kytkinlaitos | SC2 | 6,468 | 12,037 | 5,94 | 1,712 | | - |
| Pienjännitepääkeskus | PK1 | 43,699 | 95,567 | 39,25 | 20,792 | | - |
| Pienjännitepääkeskus | PK2 | 43,699 | 95,567 | 39,25 | 20,792 | | - |
| Pienjännitepääkeskus | PK3 | 42,095 | 91,736 | 36,97 | 19,107 | | - |
| Pienjännitepääkeskus | PK4 | 42,616 | 93,271 | 37,48 | 19,336 | | - |
| Pienjännitepääkeskus | PK5 | 27,914 | 61,492 | 24,51 | 14,215 | 27,914 | 14,215 |
| Pienjännitepääkeskus | PK6 | 27,914 | 61,492 | 24,51 | 14,215 | | - |
| Puistomuuntamo | PM1 | 42,471 | 92,729 | 37,33 | 19,262 | | - |

* vika tapahtuu keskuksessa PK5

Tarkastetaan jakelumuuntajien syöttökaapeli oikosulkukestävyys. Kaapelit ovat tyyppiltään AXLJ-F TT 3x150/25 ja niiden I_{th1s} arvo on 15,6 kA. Kaapelit siis kestävät termisesti suurimman esiintyvän oikosulkuvirran (6,5 kA) lämpövaikutukset.

Keskijännitekojeisto on tyyppiä ABB/Strömberg CMH 12 ja niiden I_{th1s} arvo on 40 kA ja dynaaminen kestopvirta (i_{dyn}) on 100 kA. Kojeisto kestää siis hyvin oikosulkuvirran rasisitukset. Kojeisto on selvästi ylirajoitettu suhteessa oikosulkuvirran arvoihin, mutta kojeiston valinnassa on otettu huomioon mahdolliset tulevaisuuden laajentumistarpeet.

Kojeisto on varustettu Siemens 3AH-tyhjökatkaisijoilla, joiden katkaisukyky on 40 kA. Myös katkaisijat kestävät oikosulkuvirran rasisitukset ja pystyvät katkaisemaan suurimmat esiintyvät oikosulkuvirrat.

Pienjännitepääkeskuksen katkaisija on Schneider Electricin NW25H1. Sen katkaisukyky on 65 kA, joten se pystyy katkaisemaan suurimman pienjännitepuolen oikosulkuvirran (27,9 kA).

5.2.3 Esimerkki lähdön K11 ylivirtasuojauksen asetteluista

Suunnitellaan case-verkon lähdölle K11 oikosulkusuojaus. Suojaus suunnitellaan luvussa 4.1.1 esitettyjen periaatteiden mukaisesti ja lisäksi otetaan huomioon kohteen erityisvaatimukset. Kohteen erityisvaatimus on, että keskijännitekatkaisijalla halutaan toteuttaa myös ylikuormitussuojauksen varasuojaus.

Lähtö K11 syöttää jakelumuuntajaa M5, jonka teho on 1000 kVA. Muuntajan ensiön nimellisvirta on 57,7 A ja toision 1443 A. Oikosulkusuojana on ABB:n REF 615 rele. Pienjännitepääkeskuksen kompaktikatkaisijan ohjausyksikkö on Schneiderin Micrologic 5.0 A.

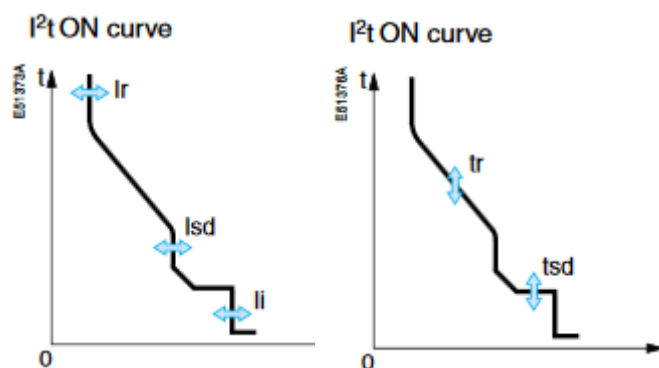
Tarkastellaan ensin laukaisukäyriä, jotka case-verkon pienjännitekatkaisijalle ja keskijännitereleelle on aseteltu.

Keskijännitekatkaisijan asettelut ovat:

| | | | | |
|----------|--------|-----------------------|-----|-------|
| – $I >$ | 58,5 A | IEC Extremely Inverse | k | 1.0 |
| – $I >>$ | 600 A | IEC Definite Time | t | 0,1 s |

Pienjännitekatkaisijan asettelut ovat:

| | | |
|------------|----------------------|---------|
| – I_N | 2500 A | |
| – I_r | $0,6 \times I_N$ | 1500 A |
| – t_r | 2 s @ $6 \times I_r$ | |
| – I_{sd} | $4 \times I_r$ | 6000 A |
| – t_{sd} | 0,1 s | |
| – I^2t | ON | |
| – I_i | $6 \times I_N$ | 15000 A |

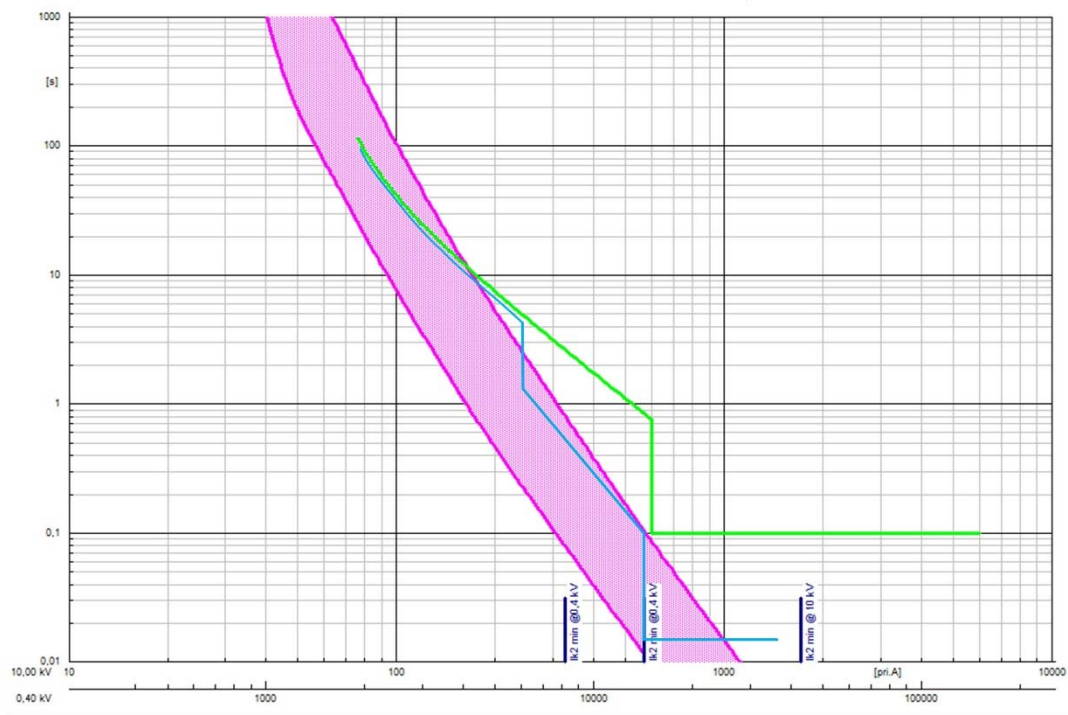


KUVA 36. Micrologic 5.0 A virta- ja aika-asettelut

Asettelut on esitetty kuvassa 37 olevassa virta-aikakaaviossa. Kaavio piirrettiin PowerFactory ohjelmalla, jossa oli valmiit mallit keskijännitereleelle ja 630 A sulakkeelle. Pienjännitekatkaisijalle ei ollut saatavissa sopivaa mallia, joten sen toimintakäyrä piirrettiin manuaalisesti kuvaan liitteessä 2 olevan laukaisukäyrän perusteella.

Tarkastellaan selektiivisyyttä kuvan 37 perusteella. Kuvassa on esitetty pienjännitekatkaisijan (sininen viiva) ja keskijännitereleen (vihreä viiva) laukaisukäyrät ja lisäksi tumman sinisellä viivalla vasemmalta oikealle ovat pienin 400 V kaksivaiheinen oikosulkuvirta redusoituna 10 kV puolelle (huomioitu Dyn-kytkentäisen muuntajan vaikutus, ks. kuva 30), 400 V pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta, joka näkyy 400 V puolella ja pienin 10 kV kaksivaiheinen oikosulkuvirta. Kuvan perusteella nähdään, että pienjännitekatkaisija ei toimi selektiivisesti 630 A sulakkeen kanssa. Jos haluttaisiin varmistaa selektiivinen toiminta, täytyisi pienjännitekatkaisijan virta-asetteluja suurentaa. Asetteluja ei voida kuitenkaan suurentaa, sillä katkaisija ei havahtuisi pienimpään kaksivaiheiseen

oikosulkuvirtaan riittävän nopeasti. Pienjännitekatkaisijan I_i asettelua tulisi pienentää, jos haluttaisiin varmistua hetkellislaukaisun toimivan pienimmillään kaksivaiheisella oikosulkuvirralla. Keskijännitereleen $I>$ porras on aseteltu toimimaan nopeana ylikuormitusuojana. $I>$ portaan pitäisi toimia pienjännitekatkaisijan varaoikosukusuojana, mutta se havahtuu pienimpään 400 V kaksivaiheiseen oikosulkuvirtaa vasta noin 2,5 sekunnissa. Keskijännitereleen $I>>$ porras toimii 0,1 sekunnin aikahidastuksella kaikilla 10 kV oikosulkuvirroilla.



KUVA 37. Keskijännitereleen (vihreä) ja pienjännitekatkaisijan (sininen) asettelut aika-virtakaaviossa. Punaisella näkyy 630 A sulakkeen sulamiskäyrä.

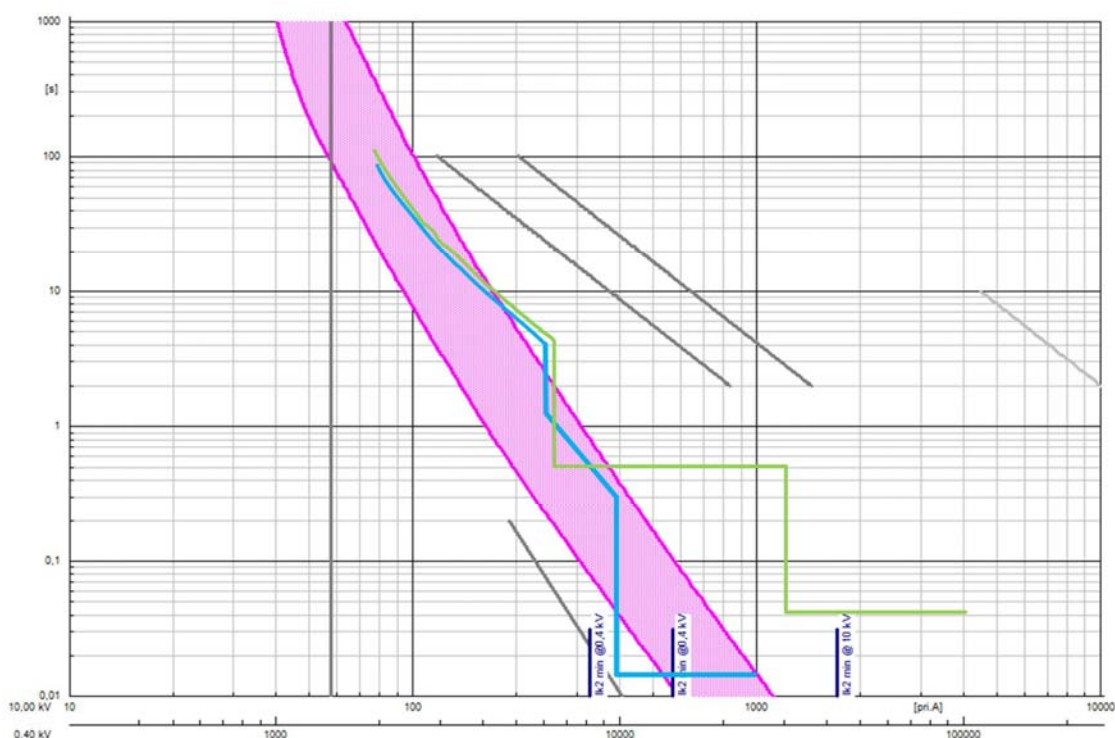
Suunnitellaan korjausehdotus laukaisukäyrille. Pienjännitekatkaisijassa muutetaan hetkellislaukaisun virta arvo 10000 A:iin, sillä halutaan varmistua, että suoja toimii viivettä pienimmällä kaksivaiheisella oikosulkuvirralla (14,215 A).

Keskijännitekatkaisijalle suunnitellaan 3-portainen suojaus, jolloin saavutetaan hyvä selektiivisyys pienjännitekatkaisijan kanssa. Valitaan portaani $I>>>$ asettelu, jonka täytyy olla pienempi kuin pienin oikosulkuvirta ensiosässä (1712 A) ja suurempi kuin suurin toision oikosulkuvirta (924 A). Otetaan huomioon varmuuskerroin $0,8 \times 1,712 \text{ kA} = 1,3696 \text{ kA} \rightarrow$ sopiva virta-asettelu 1350 A. Aika-asettelu on releen minimaiaika eli 0,04 s.

Portaan $I>>>$ asettelu valitaan pienemmäksi kuin toisiopuolen pienin oikosulkuvirta (328 A) ja suuremmaksi kuin pienjännitekatkaisijan I_{sd} -asettelu, joka on redusoituna ensiosaan $\frac{0,4 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \cdot 6000 \text{ A} = 240 \text{ A}$. Otetaan huomioon varmuuskerroin $0,8 \times 328 \text{ A} = 262,4 \text{ A} \rightarrow$ sopiva virta-asettelu on 260 A. Aika-asetteluksi valitaan mahdollisimman pieneksi, mutta kuitenkin sen verran suureksi, ette selektiivisyys pienjännitekatkaisijan kanssa säilyisi mahdollisimman hyvänä. Valitaan aika-asetteluksi 0,5 s.

I> portaan asettelut pidetään entisellään, jolloin keskijännitekatkaisija muodostaa varaylikuormitussuojauksen pienjännitekatkaisijalle.

Laukaisukäyrien korjausedotukset on esitetty virta-aikakaaviossa kuvassa 38. Kuvaan on lisätty 1000 kVA muuntajan kytkentäsäysvirta (taulukko 5), nimellisvirta ja vaurioitumiskäyrät IEEE ja ANSI standardien mukaan ja AXLJ F TT 3x150/25 kaapelin oikosulkuvirtakestoisuus. Kuvan perusteella muuntajan kytkentäsäysvirta ei aiheuta turhia laukaisuja ja suojaustaso riittää turvaamaan muuntajan toimintakyvyn. Kaapeli AXLJ F TT 3x150/25 kestää oikosulkuvirran termiset vaikutukset.



KUVA 38. Korjausedotus pienjännitekatkaisijan (sininen viiva) ja keskijännitekatkaisijan (vihreä viiva) laukaisukäyriin. Lisäksi 1000 kVA muuntajan kytkentäsäysvirta, nimellisvirta ja vaurioitumiskäyrät IEEE ja ANSI standardien mukaan (tumman harmaa viiva) ja AXLJ F TT 3x150/25 kaapelin oikosulkuvirtakestoisuus (vaalean harmaa viiva).

Taulukkoon 7 on koottu ylivirtasuojan nykyiset asettelut ja korjausedotus. Taulukossa xI_N tarkoittaa kerrointa, joka releeseen asetellaan. Kerroin määräytyy virtamuuntajan ensiövirran perusteella (esim. $150 \text{ A} / 58,5 \text{ A} = 0,39$).

TAULUKKO 7. K11 ylivirtasuojan nykyiset asettelut sekä korjausehdotus.

| | Virtamuuntajan muuntosuhde | I> | | | I>> | | I>>> | |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-----|--------------|----------|-----------------|----------|
| | | xI_N/I (A) | Käyrän tyyppi | k | xI_N/I (A) | t (s) | xI_N/I (A) | t (s) |
| Nykyinen asettelu | 150/5 A | 0,39/58,5 | IEC-EI | 1,0 | 4,0/600 | 0,1 | - | - |
| Korjausehdotus | 150/5 A | 0,39/58,5 | IEC-EI | 1,0 | 1,73/259,5 | 0,5 | 9,0/1350 | 0,04 |

5.3 Maasulkuvirtalaskelmat

Case-verkko on maasta erotettu ja jakeluverkkoyhtiö on ilmoittanut, että maasulkuvirta sähköasemalla on 10 A. Tämä virta summautuu tehtaan oman verkon maasulkuvirtaan. Taulukkoon 8 on laskettu maasulkuvirrat suorassa maasulussa ja verkon ollessa laajimmillaan. Laskelmien mukaan verkon suurin maasulkuvirta I_e on 14,16 A.

TAULUKKO 8. Case-verkon maasulkuvirrat johtolähdöittäin.

| Tunnus | Tyyppi | C_0 (μF/km) | Pituus (km) | I_e (A) |
|------------------------|------------------------|---------------|-------------|--------------|
| Taustaverkko | | | | 10 |
| Syöttö 08W1 | | | | |
| Osuus 1 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,29 | 0,3 | 0,473 |
| Osuus 2 | Ilmajohto (ACSR 85/14) | - | 2,5 | 0,083 |
| Osuus 3 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,29 | 0,13 | 0,205 |
| Osuus 4 | Ilmajohto (ACSR 85/14) | - | 1 | 0,033 |
| Osuus 5 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,29 | 0,25 | 0,395 |
| 11W1 | AXLJ-F TT 3x150/25 | 0,24 | 0,05 | 0,065 |
| 10W1 | AHXCMK-WTC 3x150/35 | 0,23 | 0,25 | 0,313 |
| 10W2 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,29 | 0,4 | 0,631 |
| 10W3 | AXLJ-F TT 3x150/25 | 0,24 | 0,13 | 0,170 |
| 09W1 | AXLJ-F TT 3x150/25 | 0,24 | 0,3 | 0,392 |
| 04W1 | AXLJ-F TT 3x150/25 | 0,24 | 0,3 | 0,392 |
| 03W1 | AHXCMK-WTC 3x150/35 | 0,23 | 0,25 | 0,313 |
| 03W2 | AHXCMK-WTC 3x240/34 | 0,29 | 0,4 | 0,631 |
| 02W1 | AXLJ-F TT 3x150/25 | 0,24 | 0,05 | 0,065 |
| Yhteensä | | | | 14,16 |

5.3.1 Esimerkki lähdön K11 maasulkusuojauksen asetteluista

Tässä työssä tehdään esimerkki maasulkusuojauksen asettelut case-verkon keskijännitelähdölle K11, joka syöttää 1000 kVA muuntajaa. Maasulkusuojina REF 615 releet, jolla voidaan toteuttaa suunnattu tai suuntaamaton maasulkusuojaus. Case-verkko on maasta erotettu ja se kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään. Standardin SFS 6001 mukaan järjestelmän kuuluessa laajaan

maadoitusjärjestelmään, sallittujen kosketusjänniteiden arvot katsotaan toteutuvan. Suojaukselle ei siis ole turvalisusmääräysten mukaisia toiminta-aikavaatimuksia.

Normaali verkon käyttötilanne on, että kaikki keskijännitelähdöt ovat kytkettynä ja molempia kiskonpuolikkaita syötetään omilla muuntajilla. Tämä tarkoittaa sitä, että normaalisti lähdön K11 kaapelin kanssa on galvaanisesti yhteen kytkettynä syöttökaapeli 08W1 ja lähtöjen K10 ja K09 kaapelit. Suppeimmaksi käyttötilanteeksi määritetään, että pisin kaapelilähtö, eli lähtö K10 on pois käytöstä. Lasketaan suora maasulkuvirta kyseisessä kytkentätilanteessa (08W1, 11W1 ja 09W1 ovat kytkettynä) taulukovirtojen perusteella. Saadaan maasulkuvirran arvoksi 11,647 A.

Suojauksen herkkyyysvaatimukseksi asetetaan, että se laukaisee kaikki maasulut 1000 Ω vikaresistanssiin saakka. Lisäksi halutaan, että 3000 Ω vioista saadaan hälytys.

Toteutetaan hälytys releen ensimmäisellä virtaportaalla. Lasketaan vikaresistanssin seurauksen pienentynyt maasulkuvirta yhtälöllä (31).

$$I_{f3000} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}} = \frac{11,647 \text{ A}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 11,647 \text{ A}}{10000 \text{ V}} \cdot 3000 \Omega\right)^2}} \approx 1,9 \text{ A}$$

Lasketaan viallisen lähdön K11 mittaama summavirta yhtälöllä (36).

$$\Sigma I_{K10} = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_f = \frac{11,647 \text{ A} - 0,065 \text{ A}}{11,647 \text{ A}} \cdot 1,9 \text{ A} \approx 1,89 \text{ A}$$

Valitaan releen ensimmäisen portaan virta-asetteluksi 1,8 A.

Suojaus voidaan toteuttaa suuntaamattomana, sillä terveiden johtolähtöjen mittaama maasulkuvirta on huomattavasti pienempi kuin viallisen johtolähdön. Lasketaan lähtöjen mitaamat summavirrat tilanteesta, että verkkoon on kytkettynä lähdöt K11 ja K10 ja maasulkuvika tapahtuu lähdössä K10. Suorassa maasulussa kytkentätilanteen maasulkuvirta on 12,67 A. Ensin lasketaan 3000 Ω vikaresistanssilla pienentynyt maasulkuvirta

$$I_{f3000} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}} = \frac{12,67 \text{ A}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 12,67 \text{ A}}{10000 \text{ V}} \cdot 3000 \Omega\right)^2}} \approx 1,9 \text{ A}$$

Lähtöjen K10 ja K11 mitaamat summavirrat

$$\Sigma I_{K10} = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_f = \frac{12,67 \text{ A} - 1,114 \text{ A}}{12,67 \text{ A}} \cdot 1,9 \text{ A} \approx 1,73 \text{ A}$$

$$\Sigma I_{K11} = \frac{I_{ei}}{I_e} I_f = \frac{0,065 \text{ A}}{12,67 \text{ A}} \cdot 1,9 \text{ A} \approx 0,0097 \text{ A}$$

Nähdään, että K11 mittaama summavirta on huomattavasti pienempi kuin valittu virta-asettelu $I_0>$. K11 lähdön maasulkuoja ei siis toimi epäselektiivisesti lähdössä K10 tapahtuvissa vioissa, vaikka suojaus on toteutettu suuntaamattomana. Suuntaamaton suojaus voidaan REF 615 releessä toteuttaa niin, että valitaan konfiguraatioksi suunnattu maasulkusuojaus (Directional earth-fault eli $I_0>->$), mutta valitaan sen suuntamoodiksi (directional mode) suuntaamaton (non-directional). Näin voidaan suojaus muutettua helposti suunnatuksi jos verkon laajuus oleellisesti muuttuu.

Valitaan ensimmäisen portaan toiminta-ajaksi 2 sekuntia, jolloin ohimenevät viat eivät aiheuta turhia hälytyksiä.

Valitaan vielä ensimmäisen portaan nollajännite-ehto. Nollajännite on pienimmillään silloin kun verkko on laajin mahdollinen ja vikaresistanssi on 3000Ω . Lasketaan nollajännite yhtälöllä (33).

$$U_0 = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}} = \frac{10000 V/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 14,16 A}{10000} \cdot 3000 \Omega\right)^2}} \approx 777,53 V$$

Nollajännite syötetään releelle prosenttiarvona suhteessa vaihejännitteeseen eli

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{777,53 V}{10000/\sqrt{3}} \times 100 \% = 13,467 \%$$

Valitaan nollajännite-ehdoksi 12 %.

Laukaiseva suojaus toteutetaan nollavirtaportaalla $I_0>->$. Suojauksen täytyy laukaista kaikki 1000Ω viat. Lasketaan vikavirta 1000Ω vikavastuksella.

$$I_{f1000} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}} = \frac{11,647 A}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 11,647 A}{10000 V} \cdot 1000 \Omega\right)^2}} \approx 5,17 A$$

Lähdön K11 summavirta lasketaan yhtälöllä (36).

$$\Sigma I_{K10} = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_f = \frac{11,647 A - 0,065 A}{11,647 A} \cdot 5,17 A \approx 5,14 A$$

Valitaan ylemmän virtaportaan asetteluksi 5 A. Suojaus toteutetaan $I_0>->$ portaalla suuntaamattomana valitsemalla toimintamoodiksi non-directional. Toiminta-aika saisi turvallisuusmääräysten mukaan olla 12,47 s. Valitaan toiminta-ajaksi kuitenkin 1 s, sillä vikaa ei haluta turhaan pitkittää.

Valitaan vielä $I_0>->$ portaan nollajännite-ehto. Lasketaan nollajännite vikaresistanssin ollessa 1000Ω ja verkon ollessa laajin mahdollinen yhtälöllä (33).

$$U_0 = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} = \frac{10000 V/\sqrt{3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 14,16 A}{10000} \cdot 1000 \Omega\right)^2}} \approx 2179,81 V$$

Nollajännite syötetään releelle prosenttisarvona suhteessa vaihejännitteeseen eli

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{2179,81 V}{10000/\sqrt{3}} \times 100 \% = 37,76 \%$$

Valitaan nollajännite-ehdoksi 30 %.

Täydennetään suojausta toimimaan nopeasti kaksoismaasulkutilanteessa maasulkureleen suuntaamattomalla virtaportilla $I_{0>>}$. Valitaan virta-asetteluksi huomattavasti suurempi arvo kuin verkon suurin maasulkuvirta. Suurin esiintyvä maasulkuvirta on 14,16 A joten valitaan virta-asetteluksi 50 A. Toiminta-aika valitaan mahdollisimman lyhyeksi eli käytetään releen minimiaika-asettelua. Se on REF 615 releessä ylemmällä virtaportilla 0,04 sekuntia.

Lisätään suojaukseen hidastetut nollajänniteportaat $U_{0>}$ ja $U_{0>>}$ nollavirtaportaiden $I_{0>->}$ ja $I_{0>>->}$ varasuojiksi. Valitaan nollajänniteportaiden $U_{0>}$ ja $U_{0>>}$ toimintajännitteiksi samat arvot kuin virtaportaiden $I_{0>->}$ ja $I_{0>>->}$ toimintajännitteet. Hidastetaan nollajänniteportaiden toiminta-aikaa suhteessa nollavirtaportaisiin. Valitaan toiminta-aikahidastukseksi 30 sekuntia ja 5 sekuntia.

Yhteenveto REF 615 asetteluista (kun maadoitusresistanssi 10 Ω):

- $I_{0>->}$ Toimintavirta: 1,8 A
Suuntamoodi: non-directional
Toiminta-aikahidastus: 2 s
Toimintajännite: 12 %
➔ Hälytys
- $I_{0>>->}$ Toimintavirta: 5 A
Suuntamoodi: non-directional
Toiminta-aikahidastus: 1 s
Toimintajännite: 30 %
➔ Laukaisukäsky K11 katkaisijalle
- $I_{0>>}$ Toimintavirta: 50 A
Toiminta-aikahidastus: 0,04 s
➔ Laukaisukäsky K11 katkaisijalle
- $U_{0>}$ Toimintajännite: 12 %
Toiminta-aikahidastus: 30 s
➔ Hälytys
- $U_{0>>}$ Toimintajännite: 30 %
Toiminta-aikahidastus: 5 s
➔ Laukaisukäsky K11 katkaisijalle

Lähdön K11 nykyinen maasulkusuojaus on toteutettu hälyttävänä portaalla $I_0>->$, jonka virta-asettelu on 5 A ja jännite-asettelu 0,05. Laukaisevan portaalla $I_0>>$ virta-asettelu on 100 A. Yllä esitettyjen laskelmien perusteella, nykyisillä asetteluilla maasulkusuojaus antaa hälytyksen 1000 Ω vikaresistanssiin saakka ja laukaisee kaksoismaasulkuviat. Virta-asettelujen nykyiset asettelut ja edellä lasketut korjausehdotukset on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Case-verkon maasulkusuojausasettelut. KVM on lyhenne kaapelivirtamuuntajasta.

| | KVM | $I_0>->$ Non-directional | | | $I_0>>->$ Non-directional | | | $I_0>>$ | | $U_0>$ | | $U_0>>$ | |
|---------------------------|-------------|-----------------------------|--------|-------|------------------------------|--------|-------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|
| | | xI_N/I (A) | xU_N | t (s) | xI_N/I (A) | xU_N | t (s) | xI_N/I (A) | t (s) | xU_N | t (s) | xU_N | t (s) |
| Korjausehdotus | 100/ 1 A | 0,018/ 1,8 | 0,12 | 2,0 | 0,05/5 | 0,3 | 1,0 | 0,5/ 50 | 0,04 | 0,12 | 30 | 0,3 | 5 |
| Nykyiset asettelut | 100/ 1 A | 0,05/5 | 0,05 | 2,5 | | | | 1,0/ 100 | 0,04 | 0,12 | 30 | | |

6 POHDINTA

Tämän työn tavoitteena oli saada aikaan raportti, joka sisältää teollisuuden keskijännitejakeluverkon rakennetta, komponentteja ja vika- ja häiriötilanteita koskevaa teoriaa ja vikasuojauksen toteuttamisen periaatteet. Lisäksi tehtiin case-tarkastelu eräälle toimeksiantajan tehtaalte, jotta saataisiin konkreettinen esimerkki teorian soveltamisesta. Case-tarkastelun yhteydessä syntyi myös korjausehdotuksia kyseisen sähköverkon oiko- ja maasulkusuojausasetteluihin.

Case-verkon oikosulkuvirtojen laskemiseen ja selektiivisyyskäyrästöjen piirtoon käytettiin saksalaista PowerFactory ohjelmistoa. Ohjelmisto osoittautui erittäin käyttökelpoiseksi oikosulkuvirtojen laskennassa ja suojauksen suunnittelussa. Ohjelmistolla voidaan suorittaa laskelmia erilaisissa kytkentä- ja vikatilanteissa ja verkon mitoituksen ja suojauksen suunnittelun kannalta vaadittavat oikosulkusuureet saadaan nopeasti ja luotettavasti. Virta-aikakaavion piirto-ominaisuus helpottaa suojauksen selektiivisyyden tarkastamista, kun samassa suojausketjussa on useita suojalaitteita eri jännitetasoilla. Etenkin käänteisaikatoimintojen hahmottaminen helpottui huomattavasti. Ongelmaksi virta-aikakaavion piirrosta tuli kuitenkin se, että tarvittavia relemalleja eli ABB:n REF 615 ja Schneiderin Electricin Micrologic 5.0 A ei löytynyt ohjelmiston kirjastosta. REF 615:n toimintakäyrän piirtämiseen käytettiin ABB:n SPAJ 142C relemallia, mutta siinä ylivirtaportaita oli vain kaksi. Kolmas ylivirtaporras piirrettiin käsin piirto-ohjelmalla. Pienjännitekatkaisijan Micrologic 5.0 A toimintakäyrä piirrettiin kokonaisuudessaan käsin ohjekirjasta löytyvän toimintakäyrän perusteella.

Oikosulkuvirrat ovat tyypillisesi suuria teollisuuslaitoksissa, sillä ne sijaitsevat lähellä voimalaitosta ja tehtaalla voi olla omia generaattoreita. Myös kuormana olevat epätahtimoottorit lisäävät oikosulkuvirtaa. Oikosulkusuojauksen suunnittelu helpottuu suurten oikosulkuvirtojen ansiosta, sillä oikosulkutilanne on helppo erottaa normaalista kuormitustilanteesta. Työn case-verkon tarkastelun yhteydessä kuitenkin selvisi, että oikosulkuvirtojen taso voi olla selektiivisen ylivirtasuojauksen kannalta myös liian pieni. Pienjännitelähtöjen suojauksessa käytetään tyypillisesti sulakkeita. Pienjännitekatkaisijan toimintakäyrän tulisi olla lähdöissä käytettävän sulakkeen sulamiskäyrän ulkopuolella, jotta välttyttäisiin tilanteelta, jossa pienjännitelähdössä tapahtuva vika laukaisee koko keskuksen sähköttömäksi. Katkaisija tulee kuitenkin asettaa havaitsemaan keskuksen pienimmän esiintyvän oikosulkuvirran. Jos kyseinen oikosulkuvirta on sulakkeen toiminta-alueella tai sitä pienempi, on sulakkeen ja katkaisijan välistä selektiivistä suojausta mahdotonta toteuttaa.

Ajatellaan tilannetta, jossa tehtaalla on tuotantoseisokki ja pienjännitekeskukseen tehdään kytkentätöitä. Pienjännitekeskus halutaan pitää jännitteisenä, sillä siitä saavat sähkönsä sellaiset prosessinosat, joita ei voida pysäyttää (esim. liima-aineen kiertopumput, joiden pysähtyminen voisi johtaa siihen putkistojen tukkiutumisen). Huoltotöiden yhteydessä työkalu putoaa pienjännitekeskuksen kiskon kahden vaiheen väliin ja aiheuttaa kaksivaiheisen oikosulun. Nykyisillä pienjännitekatkaisijan asetteluilla viiveetön porras ei havahdu, sillä sen virta-asettelu on 15 kA ja oikosulkuvirtalaskelmien perusteella pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta on 14,2 kA (ilman vikavastusta). Katkaisijan toiminta-aika tässä tilanteessa on yli 0,1 s. Tässä ajassa oikosulkuvirta ehtii todennäköisesti aiheuttaa laite- ja henkilövahinkoja. Jos ajatusta viedään vielä pidemmälle, eli

ajatellaan, että pienjännitekatkaisija on ollut niin vähällä käytöllä, että sen mekaaniset osat ovat jumiutuneet ja katkaisija ei suoritakaan laukaisua. Seuraava suoja on keskijännitelähdön rele, jonka $I > >$ portaan virta-asettelu on 600 A. Dyn-kytkentäisen jakelumuuntajan vaikutuksesta keskijännitelähdön mittaama virta on 328 A, johon havahtuu vasta releen käänteisaikahidasteinen $I >$ porras. Porras antaa laukaisukäskyn kyseisellä virralla vasta noin kolmessa sekunnissa. Ennen kuin keskijännitekatkaisija ehtii tehdä laukaisun, on oikosulkuvirta ehtinyt aiheuttaa vieläkin suuremmat ja vakavammat vauriot.

Esimerkkiasettelut keskijännitelähdölle on toteutettu yllä esitetyn pohdiskelun perusteella. Toiminta ei kuitenkaan näillä asetteluilla toteuta selektiivisen suojauksen periaatteita. Ratkaisu selektiivisyyden saavuttamiselle olisi sulakesuojauksen korvaaminen kompaktikatksijalla, johon voitaisiin asetella pienemmät toimintavirrat. Lisäksi valokaarisuojauksen asentaminen pienjännitekeskukseen parantaisi oleellisesti sen laite- ja henkilöturvallisuutta.

Työssä tehdyn oikosulkuvirtalaskentaesimerkin perusteella voidaan todeta, että laajan verkon oikosulkuvirtojen standardin mukainen käsin laskenta vaatii paljon välivaiheita ja huolellisuutta. Laskentaohjelmiston käytöllä vältetään huolimattomuusvirheiltä ja sillä on vaivattomampi suorittaa laskelmia erilaisissa kytkentätilanteissa. Ohjelmiston käyttäjällä on kuitenkin vastuu siitä, että verkon kuvaus on mahdollisimman tarkka ja kaikkien komponenttien sähkötekniset tiedot on syötetty oikein.

PowerFactory ohjelmistoa ei käytetty tässä työssä maasulkuvirtojen laskentaan. Ohjelmistolla voidaan laskea jokaisen galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssien aiheuttamat maasulkuvirrat, jos verkossa käytetyille johdoille on määritetty niiden tuottama maasulkuvirta suorassa maasulussa (A/km). Tämä tieto ei kuitenkaan riitä maasulkusuojauksen suunnitteluun, jossa täytyy laskea mm. vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta, terveiden ja viallisten lähtöjen mittaamat summavirrat ja nollajännitteet. Maasulkuvikojen mallintaminen tehtiinkin käsin laskennalla, alan kirjallisuuden perusteella, sillä PowerFactory ohjelmistosta ei ainakaan tässä yhteydessä löydetty ominaisuuksia, joilla se olisi voitu tehdä.

Keskijännitelähdön maasulkusuojauksen suunnittelussa tuli ongelmaksi standardin SFS 6001 soveltaminen. Case-verkko kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään ja standardi ei vaadi maadoitusresistanssin mittaamista kyseisessä verkossa. Maadoitusresistanssi on kuitenkin tiedettävä, jotta maasulkusuojaus voitaisiin suunnitella turvallisuusvaatimusten mukaiseksi. Esimerkkilaskelmat tehtiin maadoitusresistanssin arvoilla 1 Ω ja 10 Ω . Laskelmien perusteella 10 Ω vikavastuksella suojausta ei voida toteuttaa hälyttävänä. Maadoitusjännitteen arvoksi laskettiin 141,6 V ja standardin SFS 6001 liitteen Y mukaan raja-arvo hälyttävälle suojaukselle on 100 V. Mielestäni suojaus tulisi toteuttaa laukaisevana, sillä ei ole konkreettisia mittaustuloksia siitä, että maadoitusresistanssi olisi jokaisessa verkon osassa alle 1 Ω . Lisäksi ei ole riittävää tietoa siitä, täytyvätkö hälyttävällä suojaukselle standardissa 6001 olevat ehdot eli esimerkiksi meneekö hälytys käyttöä valvovan henkilön tietoon ja pystytäänkö välittömiin toimenpiteisiin ryhtymään kaikissa tilanteissa ja jokaiseen vuorokauden aikaan.

Teollisuuslaitoksen maasulkuvirtojen suuruus riippuu oman verkon laajuuden lisäksi siitä, liittykö galvaanisesti yhteen kytkettyyn verkossa muutakin keskijänniteverkkoa ja mikä on verkon tähtipisteen käsittelytapa. Jos teollisuuslaitos on ainut liittyjä sitä syöttävän päämuuntajan käämiin, maasulkuvirta syntyy ainoastaan omista johdoista. Johtojen pituudet pyritään pitämään mahdollisimman lyhyinä, jotta energiahäviöt pysyisivät mahdollisimman pieninä. Omien johtojen aiheuttama maasulkuvirta voi olla vain muutamia ampeereita. Tässä tilanteessa vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen on epätodennäköistä, mutta maasulkuvikojen tunnistaminen ja paikantaminen on hankalaa. Maanalaisten kaapeleiden maasulkuviat voivat jäädä havaitsematta ja vaikka ne eivät aiheutakaan turvallisuusriskiä, ne voivat ennen pitkää johtaa kaapelin eristeen vaurioitumiseen, oikosulkuun ja ennakoimattomaan käyttökeskeytykseen. Jos taas teollisuusverkon kanssa samassa käämissä on muutakin jakeluverkkoa, voivat maasulkuvirrat olla satoja ampeereita. Tällöin maasulkuvirrat on helpompi tunnistaa, mutta turvallisuusvaatimusten täyttymiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Suomessa keskijänniteverkkojen sammutus on yleistymässä. Sammutetun verkon maasulkusuojausta ei voida toteuttaa samoilla periaatteilla kuin maasta erotetun verkon. Tämä täytyy ottaa huomioon silloin, kun verkon maasulkureleitä valitaan.

Työssä esitetty maasulkusuojaus esimerkki on toteutettu nollajännitteeseen ja summavirtaa mittaamiseen perustuvalla suojauksella, mutta maasulkuvian tunnistamiseen voitaisiin käyttää muitakin maasulun aikaisia sähköisiä ilmiöitä. Nykyaikaisilla releillä voitaisiin maasulkusuojaus toteuttaa esim. yliaaltoihin tai transientteihin perustuvilla mittaumenetelmillä. Näiden menetelmien hyödyntäminen teollisuusverkkojen maasulkusuojauksessa voisi olla hyvä jatkotutkimuskohde.

Työn tavoitteena oli tehdä yrityksen sähkökäytöstä vastaaville henkilöille soveltamisopas, johon on koottu teollisuuden sähkönjakeluverkon rakennetta ja ominaisuuksia, vika- ja häiriötilanteita ja niiltä suojautumista koskevaa teoriaa ja standardeja. Vaikka päätavoitteena ei ollut case-verkon täydellinen suojauksien ja mitoituksen tarkastaminen, niin työssä esitetyn teorian, laskentatulosten, esimerkkien ja pohdinnan perusteella voidaan kaikkien suojien toiminta tulevaisuudessa tarkastaa. Lisäksi työn sisältöä voidaan käyttää sähkökunnossapidon ja käyttöhenkilökunnan kouluttamiseen.

LÄHTEET

- ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa: Ykkös-Offset Oy.
- DIGSILENT GMBH. 2016. PowerFactory. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: <http://www.digsilent.de/index.php/products-powerfactory.html>
- ELOVAARA, Jarmo ja HAARLA, Liisa. 2011. Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto.
- . 2011. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.
- ELOVAARA, Jarmo ja LAIHO, Yrjö. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Vantaa: Otakustantamo.
- ENGSTRÖM, Joakim. 2012. Taajuusmuuttajien vaikutus muuntajan kuormitettavuuteen. Arcada-ammattikorkeakoulu. Informaatio- ja mediatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/47278/Engstrom_Joakim.pdf?sequence=1
- ERONEN, Pekka. 2013. Tehtaan keskijännitejakelun selektiivisyydestä tarkastelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22239/Eronen.pdf?sequence=1>
- ETTO, Jaakko. 1998. Prosessisähköistyksen kunnossapito, osa 2. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: http://www.momenthits.fi/ESV5230/kunnossapito_2.pdf
- HUOTARI, Kari ja PARTANEN, Jarmo. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opintomoniste 3. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: <http://docplayer.fi/2241051-Teollisuusverkkojen-oikosulkuvirtojen-laskeminen.html>
- ISOMÄKI, Rami Kalevi. 2010. Sammutetun keskijänniteverkon kompensointilaitteiston lisävastuksen ohjaus. Vaasan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16790/Isomaki_Rami.pdf
- JÄRVI, Sven-Erik. 2011. Keskijännitekojeistojen valinta. ABB. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb254.nsf/0/966fb288e547ee39c1257162004c02fe/\\$file/PRES_Sven_Erik_Jarvi_Keskijannitekoj_valinta.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb254.nsf/0/966fb288e547ee39c1257162004c02fe/$file/PRES_Sven_Erik_Jarvi_Keskijannitekoj_valinta.pdf)
- KORPINEN, Leena. 2007. Muuntajat ja sähkölaitteet. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf
- LAKERVI, Erkki ja PARTANEN, Jarmo. 2009. Sähkönjakelutekniikka. 2. painos. Helsinki : Otatieto.
- MAASULKU. 2005. Satakunnan ammattikorkeakoulu. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: salabra.tp.samk.fi/er/siirto/maasul.doc
- MÖRSKY, Jorma. 1992. Relesuojaustekniikka. 2. painos. Hämeenlinna : Otatieto, 1992.
- PRYSMIAN GROUP. Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/ti/downloads/Energia_teollisuus_talonrakennuskaapelit.pdf
- REKA KAAPELI. Keskijännitekaapelit. *AHXAMK-W 20 kV*. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa: <http://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv>
- RISSANEN, Risto. 2010. Teollisuuden sähköasennukset ja verkot. Opintomateriaali. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu.

SFS-Käsikirja 601. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 60909-0. 2001. Short-circuit currentts in three phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents (IEC 60909-0:2001). Vahvistettu 2001-11-12. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto

SIEMENS. 2012. Keskijännitekojeistot, Ilmaeristeinen vs. SF6-teknologia. Seminaari keskijänniteverkon suunnittelijoille. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa:

http://www.siemens.fi/pool/cc/events/keskijannitesuunnittelijat2012/02_keskijannitekojeistot_ilmaeristeinen_vs_sf6-teknologia.pdf

SIMONEN, Vesa-Matti. 2009. Keskijännitekaapeli terminen kuormitettavuus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkövoimatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa:

https://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Simonen_Vesa_Matti_julk.pdf

TIKKANEN, Juho. 2015. Valokaarisuojauksen opetuslaitteisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. *Opinnäytetyö*. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95884/Tikkanen_Juho.pdf?sequence=1

UPM. 2016. *UPM Biofore-yhtiö*. [Viitattu 2016-04-01.] Saatavissa:

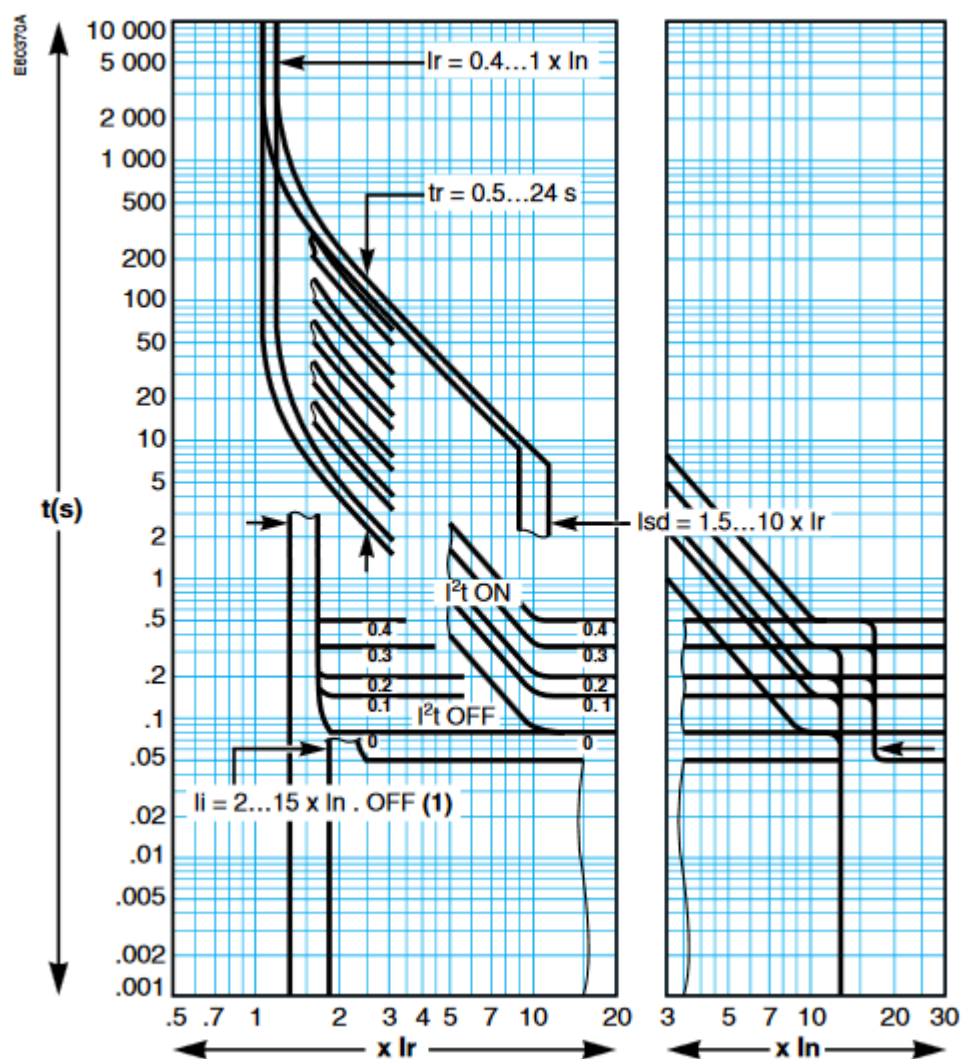
<http://www.upm.fi/UPM/Pages/default.aspx>

LIITE 1: CASE-VERKON OIKOSULKUVIRTALASKENNASSA KÄYTETYT SÄHKÖTEKNISET TIEDOT

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------|------|---------|---------|--------|--|--|
| Syöttävä verkko | | Ik"max 7,81 kA | Ik"min 5,13 kA | | | | | | | |
| Johdot | Tunnus | | | | | | | | | |
| | Syöttö 08W1 ja OSW1 | | | | | | | | | |
| | | Osuus 1 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,125 | 0,14 | 0,3 | 0,0375 | 0,042 | | |
| | | Osuus 2 | Ilmajohitto (ACSR 85/14) | 0,34 | 0,35 | 2,5 | 0,85 | 0,875 | | |
| | | Osuus 3 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,125 | 0,14 | 0,13 | 0,01625 | 0,0182 | | |
| | | Osuus 4 | Ilmajohitto (ACSR 85/14) | 0,34 | 0,35 | 1 | 0,34 | 0,35 | | |
| | | Osuus 5 | AHXCMK-WTC 3x240/35 | 0,125 | 0,14 | 0,25 | 0,03125 | 0,035 | | |
| | | Yhteensä | | | | 4,18 | 1,275 | 1,3202 | | |
| | 11W1 | | AXL-F TT 3x150/25 | 0,206 | 0,1 | 0,05 | 0,0103 | 0,005 | | |
| | 10W1 | | AHXCMK-W 3x150/25 | 0,206 | 0,1 | 0,25 | 0,0515 | 0,025 | | |
| | 10W2 | | AHXCMK-W 3x240/35 | 0,125 | 0,14 | 0,4 | 0,05 | 0,056 | | |
| | 09W1 | | AXL-F TT 3x150/25 | 0,206 | 0,1 | 0,3 | 0,0618 | 0,03 | | |
| | 04W1 | | AXL-F TT 3x150/26 | 0,206 | 0,1 | 0,3 | 0,0618 | 0,03 | | |
| | 03W1 | | AHXCMK-W 3x150/25 | 0,206 | 0,1 | 0,25 | 0,0515 | 0,025 | | |
| | 03W2 | | AHXCMK-W 3x240/35 | 0,125 | 0,14 | 0,4 | 0,05 | 0,056 | | |
| | 02W1 | | AXL-F TT 3x150/26 | 0,206 | 0,1 | 0,05 | 0,0103 | 0,005 | | |
| Muuntajat | Tunnus | Muuntosuhde (kV/kV) | Teho (kVA) | Kytkentäryhmä | z% | Pk (kW) | | | | |
| | M1 | 10,25/0,41 | 2000 Dyn11 | 2000 Dyn11 | 6 | 16 | | | | |
| | M2 | 10,25/0,42 | 2000 Dyn11 | 2000 Dyn11 | 6 | 16 | | | | |
| | M3 | 10,25/0,43 | 1600 Dyn11 | 1600 Dyn11 | 5,5 | 14,1 | | | | |
| | M4 | 10,25/0,44 | 1600 Dyn11 | 1600 Dyn11 | 5,5 | 14,1 | | | | |
| | M5 | 10,25/0,45 | 1000 Dyn11 | 1000 Dyn11 | 5,5 | 10,2 | | | | |
| | M6 | 10,25/0,46 | 1000 Dyn11 | 1000 Dyn11 | 5,5 | 10,2 | | | | |
| | PM1 | 10,25/0,47 | 1600 Dyn11 | 1600 Dyn11 | 5,5 | 14,1 | | | | |
| Ekvivalentiset moottoriryhmät | Tunnus | Ilr/IlrM | S (kVA) | | | | | | | |
| | ERK/M1 | U (0,4) | 5 | 1280 | | | | | | |
| | ERK/M2 | U (0,4) | 5 | 1280 | | | | | | |
| | ERK/M3 | U (0,4) | 5 | 1024 | | | | | | |
| | ERK/M4 | U (0,4) | 5 | 1024 | | | | | | |
| | ERK/M5 | U (0,4) | 5 | 640 | | | | | | |
| | ERK/M6 | U (0,4) | 5 | 640 | | | | | | |

LIITE 2: SCHNEIDER ELECTRICIN MICROLOGIC 5.0 A LAUKAISUKÄYRÄ

Long-time, short-time and instantaneous protection (Micrologic 5.0 A, 6.0 A and 7.0 A)



LIITE 3: CASE-VERKON PÄÄKAAVIO

