

Eero Kangasmaa

LASKENTATYÖKALU KESKIJÄNNITEVERKON
SUOJAUSASETTELUIJEN LASKENNAN TUEKSI

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2012

LASKENTATYÖKALU KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUSASETTELUIEN LASKENNAN TUEKSI

Kangasmaa, Eero
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2012
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 48
Liitteitä: 3

Asiasanat: oikosulkuvirta, maasulkuvirta, kompensointi, häviölaskenta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa laskentatyökalu Sähköastek Oy:lle, jota voidaan käyttää laskelmien tukena, kun suunnitellaan keskijänniteverkon suoja-releasetteluja ja suojamaadoituksia. Tavoitteena oli saada selville oikosulkuvirtojen arvoja 110/20kV sähköasemilla ja keskijänniteverkoissa, sekä maasulkuvirtojen ja -jännitteiden arvoja sekä maasta erotetussa verkossa, että kompensoidussa verkossa. Yhtenä osiona oli myös häviölaskentaosuus, jolla pyrittiin selvittämään taloudellisten kaapelipoikkipintojen suuruuksia.

Työtä tehtäessä tutustuttiin kattavasti sähköverkosto kirjallisuuteen ja internet-lähteisiin, joiden pohjalta tuotettiin Microsoft Excel ohjelmalla toteutettu yleispätevä keskijänniteverkon vikavirtojen laskentaohjelma.

CALCULATION TOOL TO SUPPORT CALCULATION IN POWERGRID FAULT CONDITIONS

Kangasmaa, Eero

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in electrical engineering

April 2013

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 48

Appendices: 3

Keywords: short circuit current, earth fault current, compensation, energy loss calculation

The purpose of this thesis was to produce a calculation tool for Sähköastek Oy, which could be used to support protection relay and protective grounding calculations. Target was to calculate earth fault current values at 110/20kV power stations and at 20kV distribution networks and also earth fault current values in ungrounded networks and resonantly grounded networks. Another target was to produce calculations for cost-effective cable cross-section sizes.

Electrical networking literature and internet sources were explored comprehensively during the work process and as a result, a universal medium voltage network fault current calculation program was produced by using Microsoft Excel.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Opinnäytetyön kuvaus	6
1.2	Opinnäytetyön tilaajayritys	6
2	SÄHKÖASEMAT.....	7
2.1	Sähköasemat yleisesti	7
2.2	Sähköaseman suunnittelu	8
3	SÄHKÖASEMAN RAKENNE	9
3.1	Kojeistot ja niiden rakenteet	9
3.1.1	Avokojelistot	10
3.1.2	Koteloidut kojeistot	10
3.1.3	SF6-kojeistot	11
3.2	Laitteistot ja laitteet.....	13
3.2.1	Kiskojärjestelmät.....	13
3.2.2	Katkaisijat ja kytkimet.....	15
3.2.3	Eroittimet	15
3.2.4	Mittamuuntajat	16
3.2.5	Muuntajat	16
4	SÄHKÖVERKKOJEN VIAT	17
4.1	Yleistä	17
4.2	Oikosulku.....	17
4.3	Maasulku.....	18
5	VERKON MAADOITUSTAVAT.....	19
5.1	Maasta erotettu verkko.....	19
5.2	Resistanssin kautta maadoitettu verkko	20
5.3	Kompensoitu verkko	20
5.3.1	Kompensointikuristin	20
5.3.2	Lisävastus	21
6	VIKOJEN LASKENTA	22
6.1	Oikosulkuvirtojen laskenta	22
6.2	Theveninin impedanssin laskenta	24
6.3	Maasulkuvirtojen laskenta maasta erotetussa keskijänniteverkossa.....	25
6.4	Maasulkuvirtojen laskenta kompensoidussa verkossa.....	27
6.4.1	Lisävastus	29
7	SÄHKÖASEMAN SUOJAUS.....	29
7.1	Yleistä	29

7.2	Selektiivisyys	30
7.3	Suojareleiden toiminta ja rakenne.....	30
7.4	Suojarelelajit	31
7.4.1	Ylivirtareleet	31
7.4.2	Ali- ja ylijännitereleet.....	32
7.4.3	Nollavirtareleet	32
7.4.4	Taajuusreleet	33
7.4.5	Tehoreleet	33
7.4.6	Differentiaalireleet.....	33
7.4.7	Impedanssireleet	34
7.5	Johtojen ja muuntajien suojaus	34
7.5.1	Johtojen suojaus.....	34
7.5.2	Muuntajan suojaus.....	35
8	KAPELEIDEN MITOITUS JA HÄVIÖLASKENTA.....	36
8.1	Johtojen mitoitus.....	36
8.1.1	Sopivan poikkipinta-alan valinta.....	36
8.2	Häviölaskenta.....	37
8.2.1	Tehohäviöt	37
8.2.2	Energiahäviöt	38
9	LASKENTATYÖKALU.....	39
9.1	Tavoitteet	39
9.2	Laskentatyökalun osiot	39
9.2.1	Oikosulkuvirtalaskenta	40
9.2.2	Maasulkuvirtavirtalaskenta.....	42
9.2.3	Häviölaskenta	46
10	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön kuvaus

Opinnäytetyön päätavoitteena on tuottaa Microsoft Excelillä toteutettu laskentatyökalu ja selventää laskennan taustalla olevaa teoriaa ja sen toteutusta. Laskentatyökalu tarkoituksena on olla keskijänniteverkon suojausasettelujen määrittelyn ja taloudellisten kaapelipoikkipintojen valintojen tukena sähköasemasuunnittelussa. Tästä syystä laskelmissa keskitytäänkin lähinnä keskijänniteverkkoa koskevaan laskentaan.

Työkalun on tarkoitus tulostaa oikosulkuvirtojen, maasulkuvirtojen sekä verkon nol-lajännitteiden arvoja, kun kyseessä on maasta erotettu verkko tai kompensoitu verkko ja kun huomioon otetaan myös erilaiset vikavastukset sekä kompensoidussa verkossa lisävastuksen päällä olo. Omana osionaan on myös häviölaskenta, jonka tarkoituksena on tukea kaapeleiden taloudellisten poikkipinta-alojen valintaa. Työn alkupuolella esittelen sähköasemia ja niiden suunnittelua sekä rakennetta yleisellä tasolla.

1.2 Opinnäytetyön tilaajayritys

Työn tilaaja, Sähköastek Oy on sähkösuunnittelutoimisto, jonka erikoisosaamista on sähköasemasuunnittelu. Yhtiö on perustettu vuonna 2008 ja sen omistaa kokonaisuudessaan Esa Paukkunen. Yhtiön asiakkaisiin kuuluu energialaitoksia, verkkoyhtiöitä, teollisuusyrityksiä ja urakoitsijoita. Yritys työllistää tällä hetkellä omistajan ja kaksi suunnittelijaa sekä teknisen avustajan. Lisäksi käytössä on alihankintaverkosto.

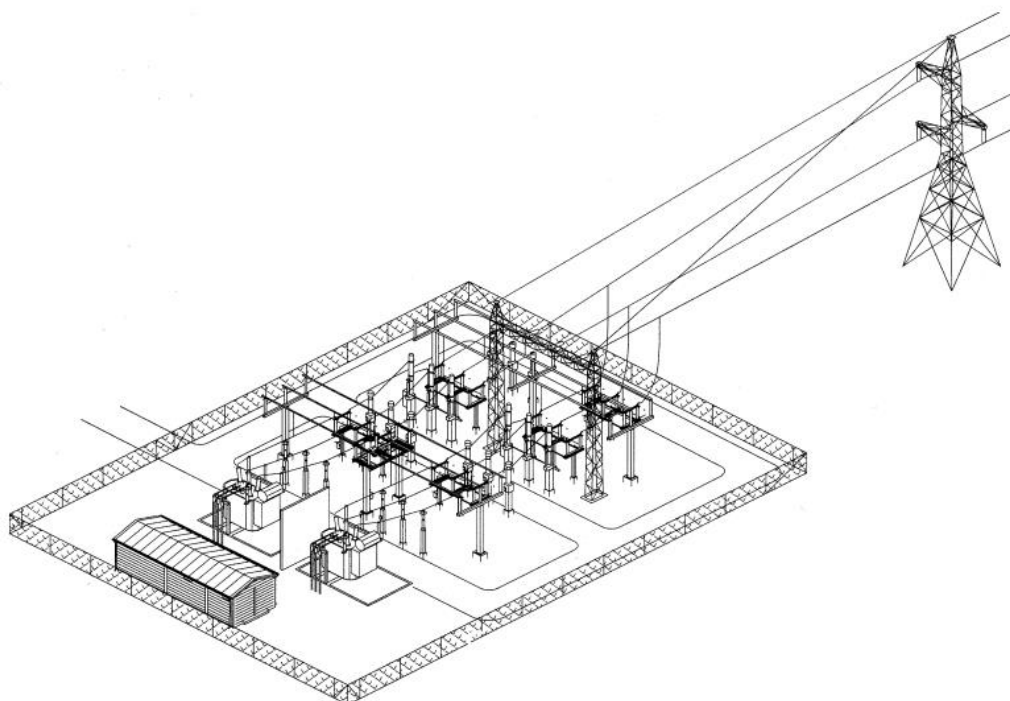
Sähköastek Oy tarjoaa suunnittelu-, asiantuntija- ja dokumentointipalveluja sekä konsultointia ja valvontaa.

Asiantuntijapalveluihin kuuluvat esisuunnitelmat, laitteiden teknisten vaatimusten määrittelyt, vaara- ja häiriöjänniteselvitykset, oikosulkuvoimalaskennat sekä hankinta-asiakirjat ja toimitusvalvonta. Suunnittelupalveluihin kuuluvat muun muassa ensiöpiirisuunnitelmat, suojaus- ja ohjauspiirien suunnittelu, maadoitussuunnitelmat sekä AC-/DC-järjestelmien suunnitelmat. Dokumentointipalveluihin kuuluvat sähköasemien dokumenttien päivitys ja ajantasaistaminen, dokumenttien päivittäminen ja

muuttaminen sähköiseen muotoon ja tiedostomuunnokset sekä sähköasemien dokumentointi valokuvin.

2 SÄHKÖASEMAT

2.1 Sähköasemat yleisesti



KUVA 1. Kahden muuntajan ulkokytkinlaitos johdon päässä. (Abb Oy 2000c, 11.)

Sähköverkon tärkein yksittäinen osa on sähköasema. Sähköenergiaa siirrettäessä on tehtävä monenlaisia kytkennällisiä toimenpiteitä, kun virtapiirejä erotetaan ja kytetään toisiinsa energianjakelun turvaamiseksi. Toimenpiteet suoritetaan erinäisiin käyttötarkoituksiin ja olosuhteisiin soveltuvilla kytkinlaitteilla, jotka sijoitetaan tarkoituksen mukaisesti sähköasemille tai kojeistoihin.

Sähköaseman tehtävä määrää sen rakenteen. Kytkinasemia ja -laitoksia käytetään muodostamaan sähköverkkoon solmukohtia, joiden rakenne riippuu solmukohdan tärkeydestä verkon kannalta. Jos sähköasemalla on tarkoitus toteuttaa jännitteen

muuntaminen esim. suurjänniteverkosta jakeluverkkoon, on asemalla oltava tarkoitukseen soveltuva muuntaja, tällöin puhutaan muuntoasemasta. Sähköasemilla sijaitsevat myös suurin osa verkon suojaeleistyksestä ja muusta sähkötoimituksen laadun takaavasta automaatiosta. (Aura & Tonteri 1993, 330; Lakervi & Partanen 2008, 119.)

2.2 Sähköaseman suunnittelu

Sähköaseman suunnittelussa tärkeintä on valita mahdollisimman asianmukainen sijainti ja rakenne asemalle. Aseman sijoituksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon taloudelliset sekä ympäristötekijät. Sijoituksessa on otettava huomioon mm. kuormituksen suhde sijaintiin, ympäristöolosuhteet sekä se, että Suomen maaperän ominaisvastukset ovat yleensä suuria. Aseman rakenne määräytyy ensisijaisesti kytkinaseman tehon, jännitteiden ja ympäröivien verkkojen ominaisuuksien perusteella.

Suunnittelun tuloksena syntyy sähköaseman pääkaavio, jonka perusteella voidaan toteuttaa sähköaseman sisäisiä, yksityiskohtaisempia suunnitelmia. Pääkaavio sisältää tietoa kiskojärjestelmistä, kytkennöistä, suojaeleistyksestä sekä komponenttien sijoittelusta sekä mitoittamisesta. Kaikkia nimellisjännitteeltään yli 1kV:n sähköasennusten suunnittelua ja toteutusta koskevat vaatimukset on annettu SFS-6001 standardissa. Se koskee uusien asennusten ohella myös vanhoihin asennuksiin tehtäviä muutos- ja korjaustöitä, sen vaatimukset eivät kuitenkaan ole taannehtivia. Standardissa käsitellään mm. jännitteisten osien vähimmäisetäisyyksiä, erilaisia turvatoimenpiteitä, maadoitusjärjestelmiä sekä apu- ja ohjausjärjestelmien vaatimuksia. (Aura & Tonteri 1993, 330-332; Elovaara & Haarla 2011b, 76-77.)

3 SÄHKÖASEMAN RAKENNE

3.1 Kojeistot ja niiden rakenteet

Kojeisto on kokonaisuus, joka sisältää sähköasemalla tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Sähköasemat voidaan jaotella pien-, keski-, ja suurjännitekojeistoihin.

Pienjännitekeskuksen nimellisjännite on alle 1000V. Keskuksina käytetään nykyään lähes poikkeuksetta kennokeskuksia, joilla saadaan parannettua keskuksien läheisyydessä työskentelevien turvallisuutta ja helpotettua huoltoja. Tällaisiin kennokeskuksiin voidaan asentaa joko kiinteä, ulosotettava tai ulosvedettävä kalustus.

Kansainvälisten normien täyttämiseksi sekä kustannussyistä keskijännitteiset keskukset valmistetaan tehtaissa sarjavalmisteinä. Keskukset ovat ilmaeristeisiä tai kaasueristeisiä. Käyttötarkoituksesta riippuen keskusten tyypit vaihtelevat 20kV pylväsmuuntamoista järeämpiin vaunukatkaisijakojeistoihin ja kiinteisiin kuormanerotimiin.

Kojeistot voidaan jaotella sisä- tai ulkotiloihin soveltuviksi ja ne voivat olla avorakenteisia tai koteloituja. Avorakenteisten keskusten käyttö on vähentynyt turvallisuuden parantamiseksi. Kojeistojen eristeenä voidaan käyttää ilman sijasta myös kaasua, tavallisimmin SF₆-kaasua joka on hyvin eristävä kaasu. SF₆-kaasua käytettäessä voidaan saavuttaa merkittäviä tilansäästöjä verrattuna ilmaeristeisiin kojeistoihin, mutta niiden hintaa nostaa yleensä tarve lämmitetyille asennustiloille.

Kojeistotyyppiä valittaessa ja suunniteltaessa tulee ottaa huomioon tulevien huoltojen tilantarve ja toteutettavuus, käytön turvallisuus, lain asettamat etäisyysvaatimukset ja eri osastojen oikosulkukestoisuus. Valintaa tehtäessä on myös laskettava tulevat nimellisvirrat ja mahdollisimman taloudelliset toteutustavat. (Aura & Tonteri 1993, 341, 344, 348; Elovaara & Haarla 2011b, 117-120.)

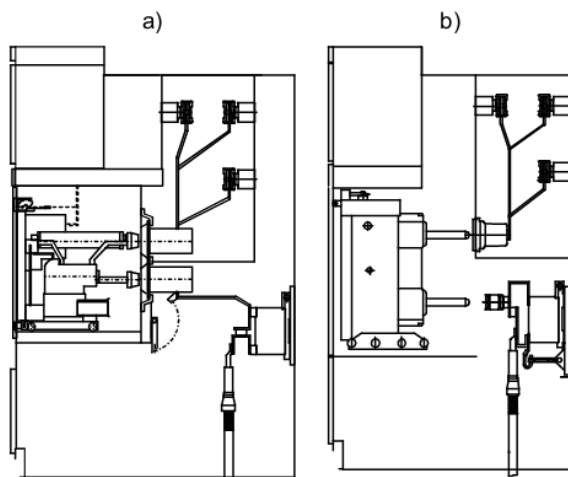
3.1.1 Avokojeistot

Avorakenteiset kojeistot ovat nimensä mukaisesti ulkotiloihin rakennettuja ilmaeristeisiä kojeistoja. Tällaisten pien- ja keskijännitteisten kojeistojen rakentaminen on vähentynyt, koska ne vaativat verraten paljon tilaa ja niitä ei täten ole kannattavaa rakentaa, jos edullista tilaa ei ole saatavilla, vaikka avokojeistojen rakennuskustannukset ovatkin huomattavasti halvemmat kuin koteloiduilla kojeistoilla. Keskijänniteportaan kojeistoja ei käytännössä enää rakenneta avorakenteisina, vaan kehitys on kohti tehdastekoisia, kennorakenteisia, joskus myös SF6 eristeisiä kojeistoja. Avorakenteisia kojeistoja ei yleensä ole taloudellista käyttää alle 123kV nimellisjännitteillä. Tiheästi asutetuilla alueilla myös suurjännitteisiä kytkinlaitoksia rakennetaan usein sisäkytkinlaitoksiksi maisemahaittojen ja tilantarpeen minimoimiseksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 119-120.)

3.1.2 Koteloidut kojeistot

Avorakenteisia sisäkojeistoja ei käytännössä enää rakenneta, sillä taloudellisempaa on käyttää joko ilma- tai SF6-eristettyjä koteloituja kojeistoja. Tällaiset kojeistot jaetaan ulkokuorensa materiaalin mukaan joko metallikuorisiin tai yleisemmin käytössä oleviin eristysainekuorisiin.

Metallikuoriset kojeistot luokitellaan kotelointityyppien mukaan metallikoteloituihin, kennokoteloituihin ja tilakoteloituihin kojeistoihin. Metall- ja tilakoteloiduissa kojeistoissa komponentit on osastoitu kennojen sisällä eri tiloihin, jolloin ne ovat eristyksissä toisistaan. Kennokoteloiduissa kojeistoissa komponentit taas ovat samassa tilassa ja vain kennojen välissä on eristävät seinät.



KUVA 2. Esimerkkejä kennosovitteista. a) Metallikoteloitu katkaisijakenno. b) Kennokoteloitu katkaisijakenno. (Abb Oy 2000c, 24.)

Kojeistot voidaan myös jakaa ulosvedettäviin eli vaunukojeistoihin tai kiinteän kalustuksen omaaviin kojeistoihin.

Vaunukojeistot kehitettiin nopeuttamaan katkaisijahuoltoja ja vähentämään erottimista aiheutuvia vikoja. Huollon aikana katkaisija voidaan vetää ulos kennosta jolloin syntyy ilmapäli ja erillisiä erottimia ei tarvita. Nykyään vaunukatkaisijat ovat pääosin metalliosastoituja ja katkaisijoina käytetään joko tyhjiö- tai SF₆-katkaisijoita. Turvallisuutta ovat tulleet lisäämään oikosulkukestoiset katkaisijavaunun asentoon lukitut maadoituserottimet ja erilliset ovet joiden kiinni ollessa voidaan suorittaa kaikki tarvittavat ohjaustoimenpiteet.

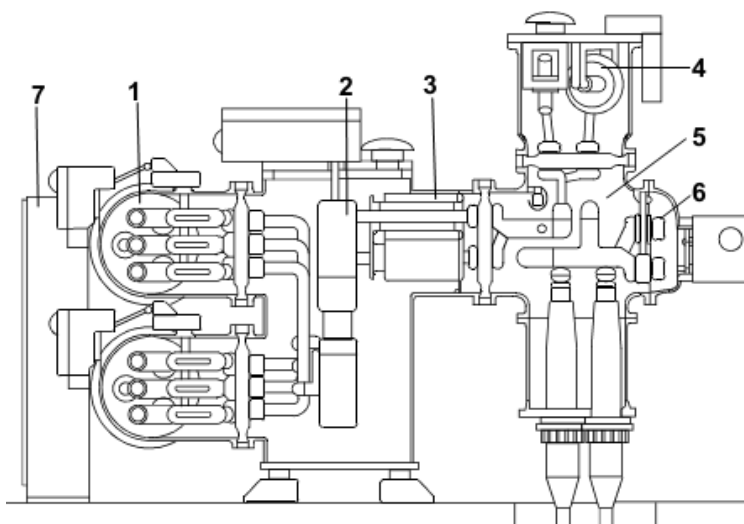
Uusimpia rakenneratkaisuja ovat kasettkojeistot, jotka parantavat turvallisuutta entisestään. Kasettkojeistot on suunniteltu niin, että ovien on oltava suljettu, jotta mitään kytkentätoimenpiteitä voidaan tehdä. Kun kasetti vedetään ulos kennosta, automaattiset sulkulevyt sulkeutuvat ja muita suojia ei tarvita huoltojen aikana. Kasettkojeistoissa on myös valokaaripaineen purkauskanavat joka kojetilassa.

(Elovaara & Haarla 2011b, 120-125.)

3.1.3 SF₆-kojeistot

SF₆-kaasueristeisiä kojeistoja käytetään yleisesti 12-1100kV jännitealueella ja 12,5-100kA mitoitusvirroilla. Kaasueristetyt kytkinlaitokset vaativat huomattavasti vä-

hemmän asennustilaa kuin ilmaeristeiset avokytkinlaitokset ja viimeisen vuosikymmenen aikana kojeistojen tilantarve on edelleen pienentynyt katkaisijateknologian ja erotinsuunnittelun teknisen kehityksen ansiosta. Erot eivät kuitenkaan ole yhtä merkittävät keskijännitteillä kuin suurjännitteillä. SF6-eristettyjä kojeistoja käytetään usein avorakenteisten sisä- ja ulkokytkinlaitteistojen laajennuksissa ja saneerauksissa.



KUVA 3. SF6-GIS kytkinkentän leikkauskuva, kaksoiskiskojärjestelmä kaapelilähtö. 1) kokoojakisko yhdistelmäerottimella, 2) katkaisija, 3) virtamuuntaja, 4) jännitemuuntaja, 5) lähdön yhdistelmäerotin kaapelipääteellä, 6) maadoituskytkin, 7) ohjauskaappi (Abb Oy 2000c, 8.)

SF6-kojeiston jännitelujuus heikkenee nopeasti, jos kaasun lämpötila tippuu ja kaasu nesteytyy. Tästä aiheutuu varsinkin talvikäytössä lämmityskuluja. Ilmankosteutta on myös valvottava, sillä kosteus pienentää myös jännitelujuutta. Suurin merkitys jännitelujuuteen on kuitenkin kaasun paineella, joka on suurjännitekojeistoissa yleensä 0,3-0,6 MPa ja keskijännitteillä 0,12-0,15 MPa. Kojeistojen korkean kotelointiluokan ansiosta pöly, suola tai esim. pieneliöt eivät pääse kojeistoihin. Täysin kosketus- ja valokaarisuojattu rakenne tuo mukanaan myös hyvän henkilöturvallisuuden. Kojeiston rakenne antaa hyvät kaapelointimahdollisuudet, mikä taas mahdollistaa helpot koestukset vikatilanteissa.

Korkeiden käyttöturvallisuusvaatimusten takia eristekaasun painetta valvotaan yleensä erillisillä laitteistoilla, vaikka kaasuvuodot ovat yleensä vain prosentin luokkaa vuodessa. (Elovaara & Haarla 2011b, 120, 128-129; Aura & Tonteri 1993, 356-358)

3.2 Laitteistot ja laitteet

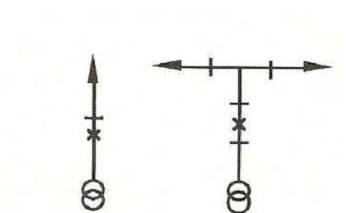
Sähköaseman toiminnan kannalta tärkeitä toimenpiteitä varten asemalla on oltava oikein mitoitettut laitteet, jotka kestävät vaaraa aiheuttamatta virtapiirien suurimmat mahdolliset virrat. Tällaisia laitteistoja ja laitteita ovat esim. erilaiset kokoojakiskojärjestelmät, kytkinlaitteet ja muuntajat. (Aura & Tonteri 1993, 253)

3.2.1 Kiskojärjestelmät

Kytkeinlaitoksissa käytetään erilaisia kokoojakiskojärjestelmiä, joilla energia jaetaan tilanteesta riippuen. Kokoojakisko on pääkisko, jos siihen liityntä tapahtuu katkaisijalla. Apukiskosta puhutaan, kun liityntä tapahtuu vain erottimella.

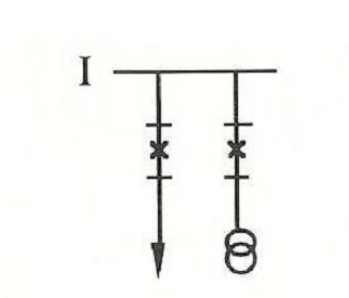
Tavallisimmin käytössä olevat kiskojärjestelmät ovat:

- Kiskoton järjestelmä



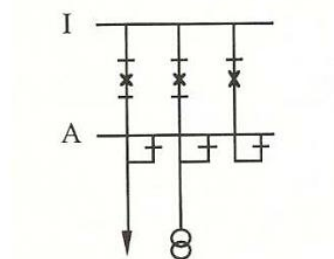
Kuva 4. Kiskotonjärjestelmä (Aura & Tonteri 1993, 332).

- Yksikiskojärjestelmä



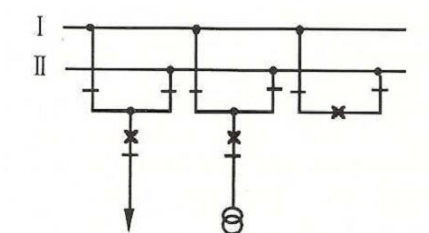
KUVA 5. Yksikiskojärjestelmä (Aura & Tonteri 1993,333).

- Kisko-apukiskojärjestelmä



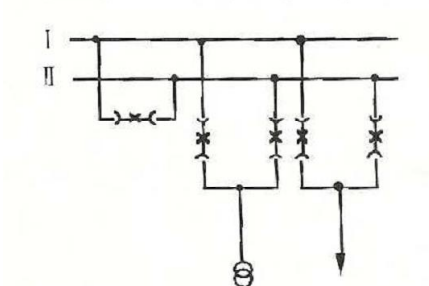
KUVA 6. Kisko-apukiskojärjestelmä (Aura & Tonteri 1993, 333).

- Kaksoiskiskojärjestelmä



KUVA 7. Kaksoiskiskojärjestelmä (Aura & Tonteri 1993, 334).

- Kaksoiskatkaisijajärjestelmä



KUVA 8. Kaksoiskatkaisijajärjestelmä (duplex) (Aura & Tonteri 1993, 335).

Nämä järjestelmät soveltuvat suur- ja keskijännitteisille keskuksille. Pienjännitteisissä keskuksissa käytetään myös samoihin periaatteisiin perustuvia järjestelmiä.

Järjestelmää valittaessa tulee ottaa huomioon asemaan nyt ja tulevaisuudessa liitettävät johdot ja laitteistojen lukumäärät, aseman tärkeys verkon toiminnan kannalta, haluttu käyttövarmuus sekä toteutuksen yksinkertaisuus. Tärkeää on myös huomioida rakennus- ja investointikustannukset sekä käytön ja huollon aiheuttamat kustannukset.

Kustannukset riippuvat lähinnä käytettävistä kiskomateriaaleista, joista yleisimmät ovat kupari, alumiini ja teräs. Kuparia ei ole taloudellista käyttää 110kV tai suurem-

milla jännitteillä. Avoimissa ulkokojeistoissa on käytetty yleisesti köysiprofiilisia kiskoja, mutta nykyään lähes kaikki kiskostot rakennetaan putkikiskostoiksi. Putkikiskot ovat taloudellisempia, niiden oikosulkuvirrat ovat helpommin hallittavissa ja ne vievät köysikiskoja vähemmän tilaa. Kiskojen valmistusmateriaali valitaan tapauskohtaisesti, alle 110kV jännitteellä materiaali on yleensä kupari. Koteloiduissa kojeistoissa alumiini on yleensä taloudellisin vaihtoehto. Kiskojen poikkipinnat valitaan yleensä normaalin kuormitusvirran suuruuden perusteella. (Aura & Tonteri 1993, 332-339; Elovaara & Haarla 2011b, 102, 115-116)

3.2.2 Katkaisijat ja kytkimet

Kytkinlaitteilla muutetaan tarvittaessa sähköenergian kulkua verkossa ja erotetaan viallisia verkoston osia. Yleisimpiä kytkinlaitteita ovat katkaisijat, kytkimet ja erottimet.

Katkaisijat voivat olla automaattisia tai käsiohjattuja. Niiden on oltava mitoitettu niin, että ne pystyvät vioittumatta ja mahdollisimman vähän muulle verkolle häiriötä aiheuttaen katkaisemaan tai kytkemään virtapiirin verkkoon suurimman mahdollisen oikosulkuvirran hetkellä. Katkaisijan avautumista ohjaa yleensä mittamuuntajien avulla kytketty rele joka reagoi ylivirtaan.

Kytkimellä on pystyttävä kytkemään ja katkaisemaan turvallisesti vain piirin kuormitusvirta, eli sillä ei ole oikosulkupiirin kytkemis-, ja katkaisuominaisuuksia. Kytkimet eivät ole varustettuja ylivirran automaattisella katkaisulla kuten useimmat katkaisijat. (Aura & Tonteri 1993, 254; Elovaara & Haarla 2011b, 161-163.)

3.2.3 Erottimet

Erottimen tehtävä on erottaa tietty virtapiiri muusta laitoksesta turvallisesti ja näkyvästi esim. katkaisijahuoltojen aikana. Sähköturvallisuusmääräysten pykälät 15.23 ja 50 edellyttävät että:

- erotin muodostaa luotettavan näkyvän avausvälin tai siinä on oltava luotettava mekaaninen asennonosoitin

- erottimen avausvälin jännitelujuuden on oltava suurempi kuin muun ympäröivän eristyksen
- erotin on voitava luotettavasti lukita auki- tai kiinniasentoon.

Jännitteistä virtapiiriä ei tule avata tai kytkeä erottimen avulla ellei kyseessä ole tällaiseen tarkoitukseen tarkoitettu kuormaerotin, joka suoriutuu myös joistain katkaisijan tehtävistä. Erottimen on kuitenkin normaalisti kiinni olleessaan pystyttävä johtamaan kuormitus- ja oikosulkuvirrat. (Aura & Tonteri 1993, 254)

3.2.4 Mittamuuntajat

Sähköasemilla käytetään virran ja jännitteen mittaamiseen mittamuuntajia, jotka mahdollistavat mittauspiirin galvaanisen erottamisen päävirtapiiristä sekä mitta-alueen muuttamisen. Mittamuuntajia käyttämällä mittauspiirin mittarit saadaan suojattua ylikuormituksilta ja mittarit sekä releet voidaan tarvittaessa sijoittaa pitkällekin mittauskohteesta.

Mittamuuntajilla mittauksia tehdessä on otettava huomioon muuntajan ominaisuuksista aiheutuvat virheet. Virtamuuntajan toisiokäämi on lähes oikosuljettu ja jännitemuuntajilla toisiokäämi on lähes tyhjäkäynnissä. Näistä seikoista johtuu esim. virtamuuntajan virtavirhe, joka aiheutuu magnetointivirrasta. Jännitemuuntajan jännitevirheen taas aiheuttaa muuntajan jännitteen alenema. Valmistaja ilmoittaa tältä syystä mittamuuntajille virherajat, joita tulee noudattaa. (Aura & Tonteri 1993, 297-298; Elovaara & Haarla 2011b, 198.)

3.2.5 Muuntajat

Muuntaja on sähkölaite, joka muuntaa jännitteitä ja virtoja kahden tai useamman käämityksen välillä. Sähköaseman suurin investointi on yleensä muuntaja. Tyypillisesti päämuuntajien nimellistehot ovat 10-40 MVA. Teho vaikuttaa oikosulkuvirtojen suuruuteen. Nimellistehon ollessa suuri, impedanssi on pieni ja täten oikosulkuvirta on suuri. Päämuuntajaa suojataan yleensä ylivirtareleellä ja differentiaalireleellä, jonka tarkoitus on tunnistaa mahdolliset oiko-, maa-, käämi-, ja kierrossulut.

Suurmuuntajien käämit valmistetaan tavallisesti kuparista, mutta pienemmissä muuntajissa voidaan käyttää myös alumiinia. Muuntajissa käytetään usein eristeenä ja jäähdytysväliaineena muuntajaöljyä, jolloin sen alla on oltava öljykuoppa ja keräyssäiliö mahdollisten vuotojen varalta. (Lakervi & Partanen 2008. 121; Elovaara & Haarla 2011b, 141.)

4 SÄHKÖVERKKOJEN VIAT

4.1 Yleistä

Sähköverkkojen vikoihin on varauduttava ennakkoon, jotta voidaan taata katkeamaton virransyöttö ja jotta verkkoon kytketyille laitteille tai sitä käyttäville ihmisille ei aiheutuisi vahinkoa. Sähköverkoissa esiintyvät viat saattavat pahimmillaan vaarantaa ihmishenkiä.

Vikojen tyypillisiä aiheuttajia ovat ilmastolliset tai kytkentäylijännitteet, ylikuormat, laitteiden toimintahäiriöt ja inhimilliset erehdykset. Vian ollessa 3-vaiheinen, puhutaan symmetrisestä viasta. Tällöin vika ilmenee järjestelmän kaikissa vaiheissa samanlaisena. 2- tai 1-vaiheiset viat ovat epäsymmetrisiä ja ilmenevät vaiheissa erilaisina. Yleisimmät viat ovat joko oiko- tai maasulkuja. Toimenpiteitä vikojen seurauksien lieventämiseksi ovat esim. säädön suunnittelu, releasettelujen tarkistukset sekä katkaisijoiden oikeaoppinen valinta. Kalliimpia ja epäkäytännöllisempiä vaihtoehtoja ovat myös verkon vahvistaminen ja siihen kohdistuvat käyttörajoitukset. (Aura & Tonteri 1993, 159-162; Elovaara & Haarla 2011a, 166-167.)

4.2 Oikosulku

Oikosulku on verkossa tapahtuva pieni-impedanssinen eristysvika joka voi olla yksi tai monivaiheinen. Alle 1000V verkoissa oikosulkuvirta on lähes puhtaasti induktiivista loismvirtaa johtuen mm. syöttävien muuntajien oikosulkuimpedanssin reaktiivisuudesta. Oikosulkuihin on sähköturvallisuusmääräysten mukaan varauduttava ver-

konosuunnitteluvaiheessa sellaisella suojausautomaatiikalla, joka kytkee vikatapauksissa virran pois automaattisesti ennen kuin laitteistoille koituu vahinkoa tai verkon stabiilius kärsii.

Verkon kannalta pahin vikatapaus on 3-vaiheinen oikosulku, sillä se synnyttää suurimman vikavirran kolmivaihejärjestelmässä. Virta saattaa nousta 10-40 kertaa verkon nimellisen kuormitusvirran suuruiseksi. Tyypillisin 3-vaiheinen oikosulku on ukkosen aiheuttama maaosulku.

2-vaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika, joka saattaa aiheutua esim. tuulen heiluttaessa ilmajohtimia toisiaan vasten. Epäsymmetrisiä vikoja laskettaessa kutakin vaihetta on tarkasteltava erikseen eli ei voida käyttää tavanomaista 1-vaiheista sijaiskytkentää.

Verkon suunnitteluvaiheessa on ratkaistava oikosulkuvirran suuruus sähköverkon jokaisessa pisteessä sekä oikosulkuvirtaa vastaava oikosulkuvirran suurin sallittu kesto aika. Verkkoon kytketyille laitteille ilmoitetaan aina suurimpien sallittujen virtojen sallitut kestoajat, joiden perusteella tarvittavat suojaukset osataan mitoittaa. Oikosulkuvirtoja laskettaessa oletetaan verkon yleensä olevan tyhjäkäynnissä. (Niemi- nen 2012; Elovaara & Haarla 2011a, 170, 177.)

4.3 Maasulku

Käyttömaadoittamattoman johtimen ja maan tai maan kanssa yhteydessä olevan osan välistä eristysvikaa kutsutaan maasuluksi ja oikosulun tavoin se voi olla yksi- tai monivaiheinen. Maasulkuvirta on se virta, joka kulkee vikakohdan kautta maahan maadoitusjohtimeen ja sen suuruus riippuu pääosin vikaimpedanssin suuruudesta sekä vian vaikutusalueella olevan verkon laajuudesta.

Maasulkuvirta voi aiheuttaa jopa hengenvaarallisen tilanteen ja tulipalovaaran maasulkukohdassa. Ylijännitevaara on myös mahdollinen maasulkuvirran aiheuttaman valokaaren takia. (Niemi- nen 2012.)

5 VERKON MAADOITUSTAVAT

Maasulun ominaisuudet riippuvat suurelta osin verkon maadoitustavasta. Verkon tähtipisteiden ja maan välinen potentiaali sekä vaiheiden ja maan väliset jännitteet muuttuvat epäsymmetristen vikojen aikana. Tämä aiheuttaa ylijännitteitä, joiden suuruus riippuu verkon tähtipisteiden maadoitustavasta.

Käyttömaadoitetun verkon maasulku vastaa luonteeltaan yksivaiheista oikosulkua ja vikavirran suuruus voidaan laskea, kun verkon impedanssit tunnetaan. Verkon oikosulkusuojat toimivat tällöin myös maasulkusuojina, mikäli vikaresistanssin arvo maasulkukohdassa ei ole liian suuri.

Maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa on tunnettava koko yhteen kytketyn verkon tiedot, jotta maasulkuvirrat ja nollajännitteet saadaan selvitettyä. Verkon impedansseilla ei tässä tarkastelussa ole käytännössä merkitystä. (Abb Oy 2000b, 1.)

Suomessa 110kV:n verkko on maadoitettu n. 120Ω kuristimen avulla tiettyjen muuntajien tähtipisteissä. Tällainen maadoitus perustuu siihen että maasulkuvirran suuruus saadaan sopivaksi jolloin distanssirele toimii sekä oiko- että maasuluilla. (Elovaara & Haarla 2011b)

20kV:n keskijänniteverkot ovat taas useimmiten maasta erotettuja tai kompensoituja. Maasta erotetun järjestelmän etu maasulkutilanteissa on se, että maasulkuvirrat eivät nouse kovin suuriksi, jolloin voidaan käyttää hälyttävää suojausta eli verkkoa ei ole välttämättä kytkettävä jännitteettömäksi. Tällöin tulee olla mahdollista olettaa, että mahdolliset valokaarimaasulut sammuvat itsestään ja että kosketusjännitteet eivät kasva vaarallisen suuriksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 338; Elovaara & Haarla 2011a, 209-212)

5.1 Maasta erotettu verkko

Jos verkon yhtään tähtipistettä ei ole yhdistetty maahan suorasti tai maadoitusimpedanssin kautta, puhutaan maasta erotetusta verkosta. Tällaisessa verkossa maasulkuvirran suuruus on pienempi kuin kuormitusvirta, johtuen suuresta nollaimpedanssista

joka muodostuu vain johtojen maakapasitansseista. Maasulun havaitsemista ja paikantamista vaikeuttaa se, että terveen vaiheen kapasitiivinen virta saattaa olla maasulkutilanteessa suurempi kuin viallisessa vaiheessa.

Maasta erotetussa verkossa viallisten laitteiden ja maan välinen jännite on pieni, mikä parantaa turvallisuutta. (Saha & Izykowski 2010, 61-63)

5.2 Resistanssin kautta maadoitettu verkko

Resistanssin kautta maadoitetussa verkossa useimmat generaattorien ja muuntajien tähtipisteet on yhdistetty maahan joko suoraan tai vastuksen kautta. Resistanssin kautta maadoitetut verkot voidaan jakaa pienen tai suuren resistanssin kautta maadoitettuihin verkkoihin. Pienen resistanssin tapauksessa vikavirtojen suuruudet ovat satojen ampeerien luokkaa ja suurilla resistansseilla kymmeniä ampeereja. Suuren resistanssin maadoitus huonontaa yleensä suojareleiden selektiivisyyttä ja vaikeuttaa vikapaikan etsintää. (Saha & Izykowski 2010, 61-63)

5.3 Kompensoitu verkko

Sammutetusta verkosta puhutaan kun verkko on kokonaan kompensoitu. Verkon tähtipisteen ja maan väliin on tällöin laitettu säädettävä kuristin, jonka induktanssi on mitoitettu siten, että kuristimen induktiivinen reaktanssi vastaa täysin verkon kapasitiivista reaktanssia, jolloin johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta kumoutuu ja maasulku sammuu.

5.3.1 Kompensointikuristin

Kompensointikuristimen on alun perin kehittänyt W. Petersen, vuonna 1916 ja tästä syystä sitä kutsutaan usein myös Petersenin kelaksi. Kuristimen tärkein tehtävä on rajoittaa maasulkuvirta niin pieneksi, että maasulun aiheuttamien valokaarien sammuttamiseksi ei tarvittaisi pikajälleenkytkentää. Kuristimien rakenne ja sen nimel-

lisäarvot vaihtelevat käyttökohteen mukaisesti. Erään kuristimen rakenne ja tekniset tiedot selviävät liitteestä 1 ja 2.

5.3.2 Lisävastus

Jos kuristimen induktanssi vastaa täysin verkon kapasitanssia, eli viritys on resonanssissa, resistiivinen vikavirta saattaa olla liian pieni selektiivisen relesuojauksen toiminnan kannalta. Tällöin käytetään kuristimen rinnalle kytkettävää lisävastusta, jolla virran luonnollista pätökomponenttia saadaan kasvatettua. Jotta Sähköturvallisuusmääräysten mukainen suojaus saavutetaan, on maasulkuvirran oltava vähintään 5-10 A.

Lisävastus voi olla joko kokoajan päällä oleva tai tarvittaessa kytkettävä. Jos vastus on kytkettynä kokoajan, on se kytkettävä pois päältä maasulun sattuessa jotta valo-kaarella on paremmat itsestään sammumismahdollisuudet. Vastus kytketään normaalisti kompensointikuristimen apukäämitykseen, jonka nimellisjännite on yleensä 500 V. (Liite 3.) (Saha & Izykowski 2010, 63; Taimisto 1993, 26-28)

Käytännössä kompensoidut verkot ovat Suomessa kuitenkin vain osittain kompensoituja (noin 80-95%). Kompensoinnin määrää kuvataan ns. kompensointiasteella K .

$$K = \frac{I_L}{I_C}$$

jossa, I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa

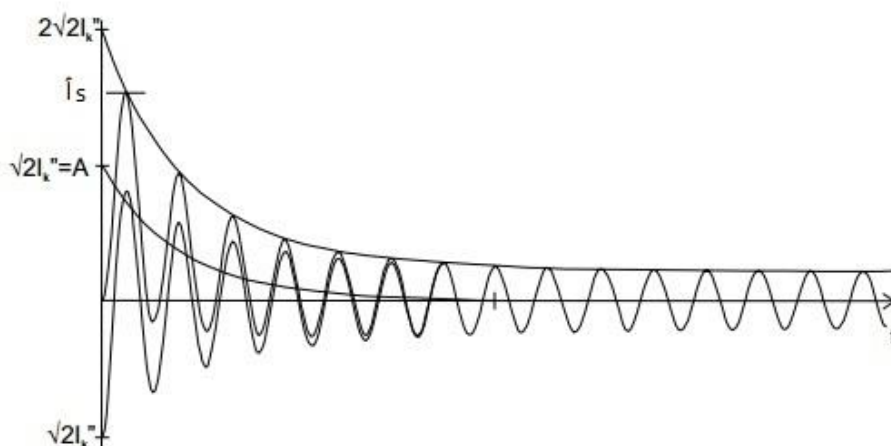
I_C = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

K :n arvon ollessa yksi tai lähellä sitä, on verkko täysin kompensoitu eli sammutettu. Verkko on ylikompensoitu K :n ollessa suurempi kuin yksi ja alikompensoitu K :n ollessa pienempi kuin yksi. (Abb Oy 2000b, 7)

6 VIKOJEN LASKENTA

6.1 Oikosulkuvirtojen laskenta

Jotta oikosulkuvirta voidaan laskea halutussa verkon pisteessä, pitää tietää vikapainan jännite ja siitä näkyvä verkon impedanssi. Jakeluverkon oikosulkulaskelmissa tärkeitä erillisarvoja ovat oikosulkuvirran alkutilan I_k'' , muutostilan I_k' ja jatkuvan tilan I_k arvot. Lyhyillä, alle 0,5s laukaisuaajoilla tärkein arvo on muutostilan arvo ja pidemmillä laukaisuaajoilla jatkuvan tilan arvo. (Lakervi & Partanen 2008, 28.)



KUVA 9. Oikosulkuvirran käyrämuoto. (Abb Oy 2000a, 1.)

Oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo i_s (Kuva 1.) eli sysäysoikosulkuvirta voidaan IEC 60909 mukaan laskea kaavalla:

$$i_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

Jossa $\kappa \approx 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}}$

Jos oikosulkupiirin resistanssia R ja reaktanssia X ei tunneta, voidaan κ :n arvoksi yleensä sijoittaa 1,8.

Sysäysoikosulkuvirtaa laskettaessa oletetaan, että oikosulku on syntynyt samalla hetkellä, kun tasakomponentti saa suurimman arvonsa. (Elovaara & Haarla 2011a, 174.)

Oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo I_k voidaan laskea yksivaiheisen sijaiskytkennän kautta Thevenin menetelmällä:

$$I_k = \frac{U_V}{Z_f + Z_i}$$

, jossa U_V = vikakohdan vaihejännite ennen vikaa
 Z_f = vikaimpedanssi
 Z_i = verkon impedanssi vikakohdasta tarkasteltuna (Thevenin impedanssi) (Elovaara & Haarla 2011a, 175.)

Oikosulkuvirran alkutilan tehollisarvo I_k'' arvoa laskettaessa on otettava huomioon tahtikoneiden alku- sekä muutosreaktanssit:

$$I_k'' = \frac{U_V}{Z_f + Z_k''}$$

, jossa Z_k'' = verkon impedanssin alkuarvo

Alkutilaa seuraa muutostila, jonka virtaa laskettaessa on otettava huomioon tahtikoneiden muutosreaktanssit. Tällöin muutosoikosulkuvirta I_k' saadaan yhtälöstä:

$$I_k' = \frac{U_V}{Z_f + Z_k'}$$

, jossa Z_k' = verkon impedanssin muutostilan arvo

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran suurin mahdollinen alkutilan arvo I_{k3}'' saadaan laskettua kaavalla:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

, jossa U_n = verkon pääjännite
 c = jännitekerroin
 Z_k = impedanssi vikapaikasta tarkasteltuna

Maksimi- ja minimioikosulkuvirtaa laskettaessa jännitekertoimen arvo määräytyy taulukossa 1 esitetyllä tavalla.

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

Taulukko 1. IEC 60909- mukainen jännitekerroin c. (Abb Oy 2000a, 2.)

Impedanssin Z_k laskennassa tulee ottaa huomioon syöttävän verkon, muuntajan ja johtimien impedanssit. Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa vikaimpedanssi oletetaan yleensä nolllaksi. (Abb Oy 2000a, 2.)

Kaksivaiheinen oikosulkuvirran suurin mahdollinen alkutilan arvo ilman maako-
tusta saadaan yhtälöstä:

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3}$$

(Abb Oy 2000a, 2.)

6.2 Theveninin impedanssin laskenta

Keskijännitteisen säteittäisverkon kokonaisimpedanssia laskettaessa on syöttävän verkon ja vikaimpedanssin lisäksi tärkeää ottaa huomioon muuntajan ja sitä syöttävän suurjänniteverkon vaikutus impedanssin suuruuteen. Muuntajan vaikutus kokonaisimpedanssiin voidaan laskea kilpiarvojen avulla kaavalla:

$$Z_k = z_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

, jossa z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

U_n = verkon nimellisjännite

S_n = muuntajan nimellisteho

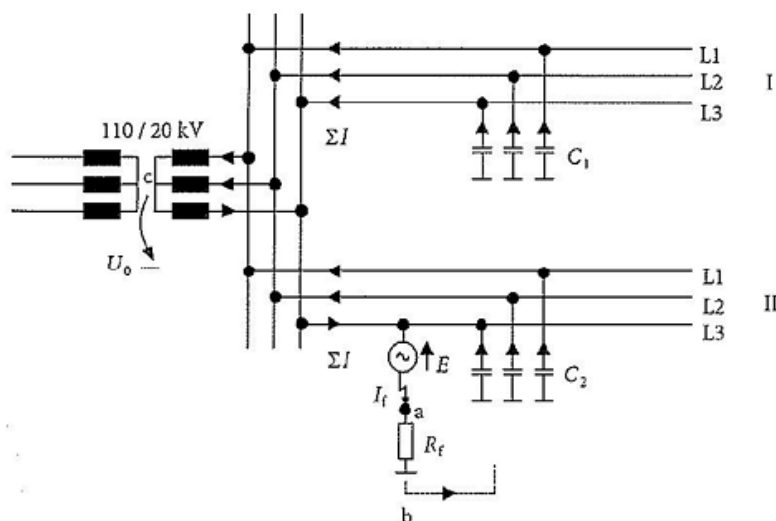
Suurjänniteverkon vaikutus ($R_k \approx 0$) keskijänniteverkon oikosulkuimpedanssiin voidaan laskea kaavalla:

$$X_k = \frac{U_n^2}{S_k} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$$

, jossa U_n = verkon nimellisjännite
 S_k = muuntajan nimellisoikosulkuteho
 U_1 = muuntajan ensiöjännite
 U_2 = muuntajan toisiojännite

(Lakervi & Partanen 2008, 179.)

6.3 Maasulkuvirtojen laskenta maasta erotetussa keskijänniteverkossa



KUVA 10. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku. (Lakervi & Partanen 2008, 183.)

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta kulkee vikapaikasta maahan, johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta päämuuntajalle ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan (kuva 10). Maasulkuvirtaa laskettaessa johtimien ja muuntajakäämien impedanssit voidaan olettaa nolllaksi, sillä nii-

den suuruus on erittäin pieni verrattuna vaihejohtimien maakapasitansseihin. Tällöin Theveninin sijaiskytkentä muodostuu kuvan 11 kaltaiseksi. (Lakervi & Partanen 2008, 183-184.)

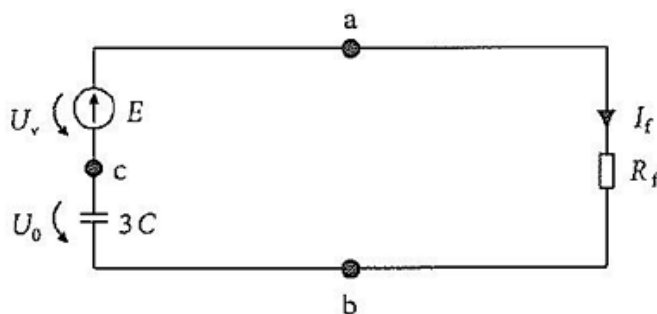
Maasulkuvirran itseisarvon suuruus vikaresistanssittomassa maasulussa saadaan kaavasta:

$$I_{f0} = \sqrt{3}\omega C_0 U$$

, jossa C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi

$$\omega = 2\pi f$$

U = verkon pääjännite



KUVA 11. Maasulkupiirin sijaiskytkentä. (Lakervi & Partanen 2008, 184.)

Maasulkuvirran suuruus I_f voidaan laskea Theveninin menetelmän mukaisesti kaavalla:

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

Kaava voidaan kirjoittaa myös muodossa, joka on hyödyllinen sellaisissa tilanteissa, joissa tunnetaan maasulkuvirta suorassa maasulussa:

$$I_f = \frac{I_{f0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_{f0}}{U} R_f\right)^2}}$$

Maasulkuvirran vaikutuksesta myös verkon tähtipisteeseen syntyy maan potentiaalista eroava tähtipiste- eli nollajännite. Nollajännite U_0 saadaan laskettua kaavalla:

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

Tämäkin kaava voidaan kirjoittaa toisessa muodossa:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\sqrt{3}I_{f0}}{U}R_f)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$$

, joissa R_f = vikaresistanssi

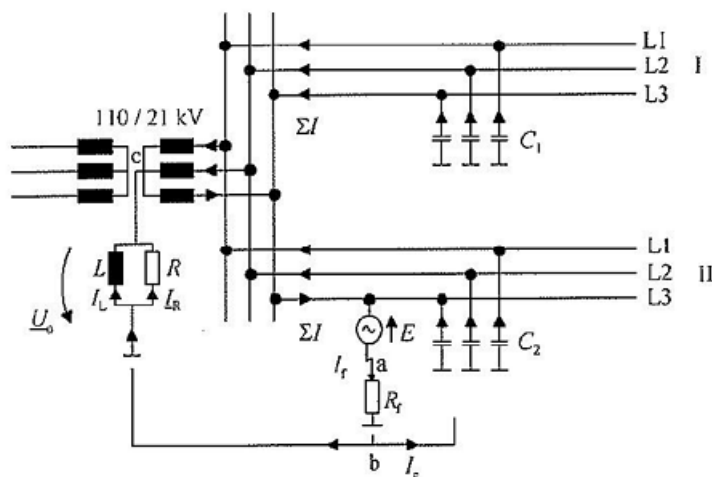
C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi

$$\omega = 2\pi f$$

U = verkon pääjännite

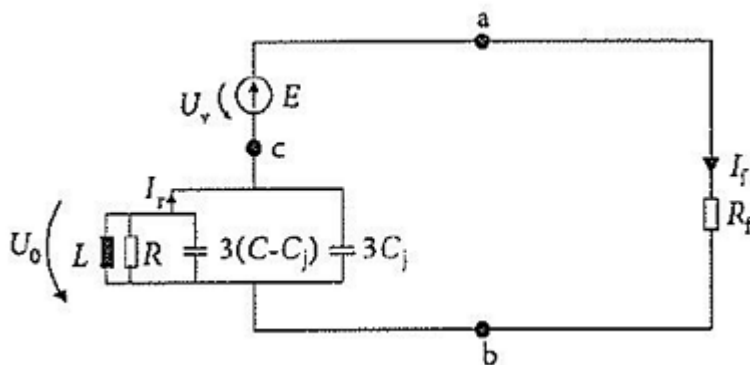
(Abb Oy 2000b, 1-5.)

6.4 Maasulkuvirtojen laskenta kompensoidussa verkossa



KUVA 12. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku. (Lakervi & Partanen 2008, 185.)

Kompensoidun verkon tapauksessa maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta on hieman monimutkaisempaa. Tällöin sijaiskytkentä muodostuu kuvan 13 kaltaiseksi.



KUVA 13. Maasulkupiirin sijaiskytkentä. (Lakervi & Partanen 2008, 185.)

Kompensoidun verkon maasulkuvirran I_f itseisarvo saadaan lasketuksi kaavalla:

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

Nollajännite muodostuu maasulkuvirran ja impedanssin tulona. Impedanssi muodostuu verkon maakapasitanssien, kuristimen induktanssin ja häviöresistanssien rinnankytkennästä. Nollajännite saadaan laskettua kaavalla:

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

, jossa ωL = kompensointikuristimen reaktanssi
 C_0 = yhden vaiheen maakapasitanssi
 R_0 = kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi
 R_f = vikaresistanssi
 U = verkon pääjännite

Täysin kompensoidun verkon tapauksissa kaavat sievenevät muotoihin:

$$I_f = \frac{1}{R_f + R_0} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}$$

(Abb Oy 2000b, 7-9.)

6.4.1 Lisävastus

Jotta selektiivinen suojaus toteutuisi, on kompensointikuristimen rinnalle mahdollisesti kytkettävä lisävastus, joka kasvattaa virran pätökomponentin suuruutta. Lisävastuksen nimellisjännite on usein 500V. Laskentoja suoritettaessa, lisävastuksen resistanssin arvo tulee redusoida sopivaan jänniteportaaseen.

7 SÄHKÖASEMAN SUOJAUS

7.1 Yleistä

Sähköjärjestelmien suojauksella ja häiriövalvonnalla pyritään takaamaan katkeamaton sähkönsaanti sekä nykyaikaisen sähkön laadun vaatimukset täyttävä palvelu. Tämä on ennen kaikkea tärkeää erilaisille laitoksille ja teollisuudelle, joille sähkönsaannin katkeaminen tai pitkäaikaisten jännitekuoppien aiheuttamat verkosta irtoamiset saattavat aiheuttaa pahoja vaaratilanteita ja suuria taloudellisia vahinkoja. Vikavirran lämpövaikutukset saattavat aiheuttaa tulipaloja ja erityisesti valokaarien aiheuttamat paine- ja lämpövaikutukset saattavat aiheuttaa hengenvaaraa. Maasulkuvirrat aiheuttavat Suomen maaperän suuren ominaisvastuksen takia vikapaikan läheisyyteen vaarallisia askel- ja kosketusjännitteitä.

Sähköverkon vikatilanteissa häiriöt tapahtuvat yleensä niin nopeasti että suojausjärjestelmän on kyettävä omatoimisesti ja nopeasti suorittamaan tarvittavat toimenpiteet verkon ja sen komponenttien suojaamiseksi. Suojauksen on toimittava selektiivisesti,

eli niin, että mahdollisimman pieni osa verkosta kytkeytyy pois käytöstä vikatilanteen sattuessa. Suojauksen on oltava kuitenkin yksinkertainen ja käyttövarma ja sen on toimittava mahdollisimman nopeasti vahinkojen minimoimiseksi. Järjestelmä on suunniteltava niin, että se voidaan koestaa käytön aikana ilman tarpeettomia keskeytyksiä.

Sähköturvallisuusmääräykset asettavat tiettyjä minimivaatimuksia suojauksen varmistamiseksi, mutta tärkeintä on kuitenkin varmistaa suojareleiden ja katkaisijoiden apusähköjärjestelmien luotettavuus ja mahdollisten vikojen ilmaisu. (Aura & Tonteri 1993, 167-168; Elovaara & Haarla 2011b, 336-337.)

7.2 Selektiivisyys

Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että kaikki verkon osat on suojattu jollain suoja-releellä ja vian sattuessa vikaantunut verkon osa saadaan erotettua muusta verkosta minimoiden verkon käyttäjille aiheutuvat haitat. Selektiivisyys saadaan toteutettua jakamalla verkko eri suoja-alueisiin, jotka saadaan tarvittaessa erotettua muusta verkosta katkaisijoiden avulla. Tällöin ne suojat eivät toimi, jotka eivät ole vian vaikutusalueella. Suojaus toteutetaan tilanteesta riippuen joko aika- tai virtaporrastuksella. Releiden asettelut tulee tehdä niin, että ne laukaisevat kaikilla mahdollisilla vikavirroilla. Suojauksen luotettavuuden kannalta on tärkeää, että rele toimii, jos sen suojausalueella on vika ja vastaavasti sen ei tule laukaista katkaisijaa, jos vika ei ole sen suojausalueella. Jos rele jostain syystä ei toimi niin kuin sen pitäisi, tulee varasuojan laukaista vika pois, jottei suurempaa osaa verkosta joudu jännitteettömäksi. Varasuojana käytetään yleensä hidastettua porrasta ensimmäisestä releestä. (Aura & Tonteri 1993, 167; Elovaara & Haarla 2011b, 342-344.)

7.3 Suojareleiden toiminta ja rakenne

Releet ovat laitteita, jotka tarkkailevat erilaisia suureita virtapiirissä. Jos releen tarkkaileman suureen arvo kohtaa sille asetetun toiminta-arvon, niin se havahtuu, toimii ja lopulta kytkee antaen kytkentävirikkeen. Releillä on niille ominaiset toiminta-ajat, jolla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu havahtumisen ja kytkemisen välillä.

Releen rakenne koostuu normaalisti havahtumiselimestä, mittaelimestä ja aikaelimestä. Ne voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan sähkömekaanisiin, staattisiin ja digitaalisiin suojareleisiin.

Sähkömekaaniset releet ovat hyvin pitkäikäisiä ja käyttövarmoja ja niitä on yhä käytössä vanhemmilla sähköasemilla, vaikka niiden valmistus on lähes lopetettu.

Sähkömekaanisia releitä korvataan staattisilla releillä tarvittaessa. Staattiset releet sisältävät puolijohdekomponentteja sekä mikropiirejä, jotka kykenevät monipuoliseen tiedonkäsittelyyn, jolloin voidaan toteuttaa monimutkaisempia toimenpiteitä kuin sähkömekaanisilla releillä. Staattiset releet ovat nopeampia, tarkempia, pienempiä sekä kestäviä. Niiden huonoina puolina voidaan mainita ylijänniteherkkyys ja sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttamat haitalliset vaikutukset. Staattiset releet tarvitsevat myös jatkuvan apuvirran toimiakseen.

Yhä useammat releet sisältävät myös mikroprosessoreita, jotka mahdollistavat esim. laitosvalvontaintegroinnin ja useamman suojauksen toteutuksen samalla releellä. Tällaiset digitaaliset releet kykenevät entistä monimutkaisempiin suojaustoimintoihin ja antavat suuren määrän erilaisia asettelumahdollisuuksia. Releiden monimutkaisuudesta johtuen digitaalisilla releillä tapahtuu enemmän virhelaukaisuja kuin muilla reletyypeillä. Digitaaliset releet sisältävät usein erilaisia lisätoimintoja ja integroitua vikadiagnostiikkaa, joka vähentää niiden koestustarvetta. (Aura & Tonteri 1993, 168-170; Elovaara & Haarla 2011b, 344-345.)

7.4 Suojarelelajit

7.4.1 Ylivirtareleet

Ylivirtareleen mittaama suure on mittauspaikan kautta kulkeva virta. Niitä käytetään ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksessa. Ne liitetään suojattavaan virtapiiriin joko suoraan tai tavallisemmin virtamuuntajan avulla, jotta ne eivät vioittuisi vian sattuessa. Releeseen voidaan asettaa haluttu havahtumisvirta sekä laukaisuaika. Relettä voidaan käyttää säteisjohdolla sillä edellytyksellä, että pienin mahdollinen vikavirta on

suurinta mahdollista kuormitusvirtaa suurempi. Ylivirtareleillä voidaan suojata esim. johtoja, muuntajia, kondensaattoreita ja generaattoreita. Niiden hidastamaton toiminta-aika voi olla jopa alle 30 ms. (Aura & Tonteri 1993, 170; Elovaara & Haarla 2011b, 346.)

7.4.2 Ali- ja ylijännitereleet

Jännitereleet mittaavat verkon jännitteen ylittymistä tai alittumista. Alijännitereleellä voidaan valvoa sekä vaihto- että tasasähköverkkojen jännitetasoa tai esim. suojata moottoreita alijännitteen aiheuttamilta pysähtymisiltä. Alijännitereleillä toteutetaan esim. 400kV:n asemilla valmiuskytkentä, joka jännitteen hävitessä kytkee reaktorit verkkoon ja avaa muuntajan 110kV:n katkaisijat. Tämä nopeuttaa käytön palautusta mahdollisten suurhäiriöiden jälkeen.

Ylijännitereleitä käytetään maasulun nollajännitereleinä ja voimalaitosten tahti-generaattoreiden suojauksessa. (Aura & Tonteri 1993, 171; Elovaara & Haarla 2011b, 360.)

7.4.3 Nollavirtareleet

Nollavirtarele on ylivirtarele, jonka tarkoitus on toimia maasulussa. Se mittaa vaihevirtojen summavirtaa ja sen toiminta-aika on sama kuin normaalilla ylivirtareleellä. Johdonsuojina käytettävät nollavirtareleet voivat olla joko herkkiä tai karkeita. Herkkien releiden virta-asettelu on pieni ja hidastus suuri. Karkeilla releillä hidastus on lyhyt ja virta-asettelun määrää vikavirtalaskelmat, mutta se on aina suurempi kuin herkällä releellä. Suomessa yleisesti käytettävä asettelu herkälle releelle on sellainen, että rele havahtuu, jos tapahtuu maasulku, jonka vikaresistanssi on vähintään 500Ω.

Nollavirtareleitä käytetään maasulkusuojina myös muuntajien suojauksessa ja samalla ne toimivat varasuojina muulle verkolle. Tähän tarkoitukseen ne sopivat usein paremmin kuin differentiaalireleet. (Elovaara & Haarla 2011b, 354.)

7.4.4 Taajuusreleet

Taajuusreleet havahtuvat, jos verkon taajuus nousee tai laskee asetetusta nimellisarvosta. Niitä käytetään lähinnä tehonvajaussuojauksissa laitoksilla, joilla on omaa sähköntuotantoa ja johdonvarsigeneraattoreiden irrottamiseen verkosta, kun johdolla on vika. (Aura & Tonteri 1993, 171; Elovaara & Haarla 2011b, 357.)

7.4.5 Tehoreleet

Tehoreleet mittaavat joko pätö-, lois- tai ns. sekatehon suuruutta ja virtaussuuntaa. Suuntareleestä puhutaan, jos relettä käytetään vain ilmaisemaan tehon virtaussuuntaa. (Aura & Tonteri 1993, 172)

7.4.6 Differentiaalireleet

Differentiaalirele vertaa virtapiirin eri kohdissa kulkevaa virtaa. Niitä voidaan käyttää pitkittäis- tai poikittaissuojina eli joko suojaamaan yhtä kohdetta mittaamalla virtaa sen molemmilta puolilta tai kahden tai useamman rinnakkaisen kohteen suojana mittaamalla kohteiden keskinäisiä virtoja. Differentiaalireleiden välille tarvitaan luonnollisesti viestiyhteys. Se voidaan toteuttaa omalla yhteydellä tai tarvittaessa käyttäen yleistä viestiverkkoa.

Releet kytketään mittauksen kohteena olevaan piiriin virtamuuntajien avulla. Releillä voidaan suojata siis vain niiden virtamuuntajien välinen alue, joiden virtoja releillä vertaillaan. Kun relettä varten valitaan sopivaa virtamuuntajaa, on otettava huomioon suurien muuntajien tai pyörivien koneiden aiheuttamat kytkentäryhmien aiheuttamat kulmaerot, tyhjäkäyntivirrat ja kytkentävirtasysäykset, jotta voidaan ehkäistä releen tarpeeton havahtuminen. Suurilla kuormitusvirroilla nämä virheenaiheuttajatkin suurenevät.

Differentiaalireleitä käytetään tavallisesti muuntajien yksinkertaisten kiskojärjestelmien suojaamiseen. (Aura & Tonteri 1993, 172-173; Elovaara & Haarla 2011b, 354-355.)

7.4.7 Impedanssireleet

Tärkein impedanssirele on distanssirele eli etäisyysrele. Distanssireleitä käytetään usein silmukoidussa verkossa, jotta saadaan toteutettua selektiivinen suojaus, joka ei ylivirtareleillä onnistu. Sillä pyritään myös selvittämään etäisyys vikapaikkaan impedanssimittauksen avulla. Impedanssireleet siis mittaavat releen ja vikapaikan välistä impedanssia. Releen suojaus perustuu tietynlaisiin vyöhykkeisiin, joilla kullakin on tietty ulottuma ja aikahidastus. Jos tavoitteena on nopea selektiivinen laukaisu, on distanssireleet yhdistettävä toisiinsa yhteystoiminnoilla, jolloin releet voivat lähettää toisilleen tarvittavat laukaisukäskyt. (Aura & Tonteri 1993, 174; Elovaara & Haarla 2011b, 348.)

7.5 Johtojen ja muuntajien suojaus

7.5.1 Johtojen suojaus

Johdot tulee suojata oikosulkujen ja maasulkujen varalta. Avojohtoille ei yleensä tarvita erillistä ylikuormitussuojaa, koska generaattoreiden, muuntajien ja kuormituskojeiden ylikuormasuojat toimivat myös johtojen suojina. Johdot myös ylimitoitetaan lämpenemisen suhteen.

Yli 90 % sähköverkon vioista on ohimeneviä vikoja, avojohtoilla viat ovat usein valokaarioikosulkuja, jotka häviävät, jos vikapaikka tehdään hetkellisesti jännitteettömäksi. Tästä syystä verkko kannattaa varustaa pikajälleenkytkentälaitteistolla, jolla saadaan toteutettua 0,2-0,4 sekunnin jännitteetön aika. Jos pikajälleenkytkentä jostain syystä epäonnistuu, suoritetaan yleensä aikajälleenkytkentä 0,5-3 minuutin kuluessa. Jälleenkytkennöillä saadaan selvitettyä noin 75 % verkon häiriöistä.

Johtojen oikosulkuvirta on suurin sähköaseman läheisyydessä tapahtuvissa oikosuluissa. Tällaisten oikosulkujen vaikutusten ehkäisemiseksi on syytä käyttää pikalaukaisua. Jotta pikalaukaisu ei haittaisi selektiivisyyttä, tulisi sen virran asetteluarvon olla selvästi kuormitusvirtaa suurempi, mutta sen vaikutusalue ei saisi ylettyä seuraavan katkaisijan yli. Tällöin selektiivisyys tulee useimmiten toteuttaa aikapor-

rastusperiaatteella, koska virtaporrastuksen käyttö saattaa johtaa useampien katkaisijoiden aukeamiseen. Oikosulkusuojauksessa käytetään verkkotyypistä riippuen sekä normaaleja että suunnattuja ylivirta-aikareleitä, distanssireleitä ja differentiaalireleitä. Oikosulkusuojauksen lisäksi on käytettävä nopeasti toimivaa varasuojasta pääsuojauksen toimimattomuuden varalta.

Maasulkusuojauksen toteutus riippuu verkon maadoitustavasta. Esimerkiksi 110 kV verkossa käytetään suunnattuja maasulkureleitä jotka mittaavat jännitettä ja virtaa ja selvittävät vian suunnan niiden kulmaeron perusteella. Laukaisuaikojen porrastaminen ja vian suunnan havaitseminen mahdollistavat maasulkusuojauksen selektiivisyyden. (Aura & Tonteri 1993, 176-181; Elovaara & Haarla 2011b, 368.)

7.5.2 Muuntajan suojaus

Muuntajien suojaustapa ja laatu riippuu pääosin muuntajan nimellistehosta. Suuret ja kalliit verkkomuuntajat ja generaattoreiden muuntajat suojataan useammin erillisellä relesuojauksella, pienemmät muuntajat suojataan oikosuluilta yleensä vain sulakkeiden avulla. Muuntaja on suojattava sekä sen sisäisiä että ulkopuolisia oikosulkuja vastaan. Maasulkusuojauksen toteutus riippuu järjestelmän maadoituksesta, jäykästi maadoitetussa järjestelmässä ei tarvita muuta kuin ylivirtasuojaus.

Muuntajan pääsuojareleenä käytetään differentiaalireleitä ja varasuojina ylivirtareleitä, joiden tehtävänä on toimia kisko- ja johto-oikosuluissa. Nollavirtareleitä käytetään aina, kun muuntajan tähtipiste on maadoitettu. Se toimii muuntajan varasuojana ja osallistuu myös johto- ja kiskosuojaukseen.

Muuntaja voidaan suojata muihinkin kuin sähköisiin muutoksiin reagoivilla suojareleillä. Tällaiset releet voivat mitata esim. muuntajaöljyn kaasuuntumista, virtausta tai lämpötilaa. Vian seurauksena öljystä kehittynyt kaasu kerääntyy Buchholz-releeseen. Jos vika on lievä ja kaasua kehittyy vähän, rele antaa pelkän hälytyksen, suuri kaasumäärä johtaa laukaisuun. Virtausreleet reagoivat valokaaren aiheuttamaan öljyn liikkeeseen. Jos öljyn lämpötilaa mittaava rele antaa hälytyksen, tulee muuntajan

kuormitusta vähentää. Rele laukaisee jos sille asetettu lämpötilan yläraja ylittyy. (Aura & Tonteri 1993, 184; Elovaara & Haarla 2011b, 378-380.)

8 KAAPELEIDEN MITOITUS JA HÄVIÖLASKENTA

8.1 Johtojen mitoitus

Jakelujohtojen taloudellisessa mitoituksessa keskeisintä on valita oikea poikkipinta-ala, materiaali ja rakenne. Johdot tulee mitoittaa mahdollisimman taloudellisesti mutta kuitenkin niin, että niille asetetut jännite, virta ja muut vaatimukset täyttyvät. Taloudellisuudella ei siis tarkoiteta välttämättä mahdollisimman halpaa ratkaisua, vaan sellaista ratkaisua, josta koituu pienimmät vuotuiset kustannukset. Teho- ja energiahäviöiden huomioon ottaminen lisää mitoituksen tarkkuutta, sillä ne aiheuttavat kustannuksia koko johdon pitoaikana. (Aura & Tonteri 1993, 81)

8.1.1 Sopivan poikkipinta-alan valinta

Siirtojohtoa valittaessa tavoitteena on valita taloudellisin vaihtoehto käytettävissä olevien poikkipinta-alojen joukosta. Tällöin pyritään selvittämään se rajateho, jota suuremmilla tehoilla on häviösäästöjen takia taloudellisempaa käyttää kalliimpaa, mutta suuremman poikkipinta-alan omaavaa johtoa. Seuraavasta epäyhtälöstä voidaan johtaa toinen epäyhtälö, jolla tämä rajateho saadaan selvitettyä.

$$K_{hA1} - K_{hA2} > K_{IA2} - K_{IA1}$$

, jossa

- K_{hA1} = pienemmän poikkipinnan häviökustannusten nykyarvo
- K_{hA2} = suuremman poikkipinnan häviökustannusten nykyarvo
- K_{IA1} = pienemmän poikkipinnan investointikustannus
- K_{IA2} = suuremman poikkipinnan investointikustannus

Tästä voidaan siis johtaa epäyhtälö rajateholle, jonka suuruinen johdon näennäistehon tulee vähintään olla ensimmäisenä vuonna, jotta suuremman poikkipinnan käyttö olisi järkevää:

$$S_1 \geq U \sqrt{\frac{k_{IA2} - k_{IA1}}{\kappa c_h (r_{A1} - r_{A2})}}$$

, jossa k_{IA1}, k_{IA2} = vertailtavien johdinpoikkipintojen investointikustannukset €/km

r_{A1}, r_{A2} = vertailtavien johdinpoikkipintojen resistanssit Ω/km

c_h = häviöiden hinta €/kW,a

κ = häviöiden kapitalisointikerroin

8.2 Häviölaskenta

8.2.1 Tehohäviöt

Johtojen ja muuntajien tehohäviöt vaikuttavat rakentamiskustannusten ohella suuresti sähkönjakelun taloudellisuuteen. Häviölaskennassa yksi keskeisimmistä suureista on kuormitusvirran suuruus, sillä se on tiedettävä, jotta häviötehot ja energiahäviöt voidaan laskea. Kolmivaiheisen johdon kuormitushäviö P_h voidaan laskea kaavalla

$$P_h = 3 \cdot I^2 \cdot R$$

, jossa I = kuormitusvirta

R = johdon resistanssi

Muuntajan häviöitä laskettaessa lähtöarvoina käytetään muuntajan kilpiarvoissa ilmoitettuja arvoja. Kuormitushäviö P_k , kuorman ollessa S , saadaan laskettua nimelliskuormitushäviön P_{kN} ja nimellistehon S_n avulla kaavalla

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \cdot P_{kN}$$

Muuntajassa häviöitä aiheuttavat myös pyörrevirta- ja hystereesihäviöt, jotka johtuvat magneettivuon vaihtelusta muuntajan rautasydämessä. Näitä häviöitä sanotaan muuntajan tyhjäkäyntihäviöiksi P_0 , joka saadaan laskettua kaavalla

$$P_0 = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \cdot P_{0N}$$

, jossa U = muuntajan jännite
 U_n = muuntajan nimellisjännite
 P_{0N} = Nimellistyhjäkäyntihäviö (Lakervi & Partanen 2008, 33-34.)

8.2.2 Energiahäviöt

Energiahäviöiden laskennassa tärkeää on määrittää johdossa tai muuntajassa syntyvä häviöteho haluttuna ajanhetkenä. Käytännössä häviöteho vaihtelee ajallisesti kuormituksen mukaan. Vuodessa syntyvät energiahäviöt W_h voidaan laskea kaavalla

$$W_h = \int_0^T P_h(t) dt \approx P_{hmax} t_h$$

Häviöenergian määrän tarkka määrittäminen on vaikeaa, koska häviöteho tulisi käytännössä määrittää vuoden jokaisella hetkellä ja laskea kaikki nämä häviöenergiat yhteen. Likiarvoisissa laskuissa voidaan käyttää kuvitteellista häviöiden huipunkäyttöaika t_h . Mitä suurempi johdon kuormitus on vuoden aikana, sitä pienempi on häviöiden huipunkäyttöaika. Keskijänniteverkossa t_h arvot ovat 2000-2500 h/a. (Lakervi & Partanen 2008, 34-35.)

9 LASKENTATYÖKALU

9.1 Tavoitteet

Tavoitteena oli tuottaa Microsoft Excel –ohjelmalla toteutettu laskentatyökalu, joka toimisi tukena keskijänniteverkon releasetteluiden valinnassa. Laskentapohjan tuli olla yksinkertainen, selkeä ja helposti sisäistettävä. Laskentapohjan avulla haluttiin saada selville keskijänniteverkon oikosulku- ja maasulkuarvoja sekä häviölaskennan arvoja.

9.2 Laskentatyökalun osiot

Microsoft Excel ohjelmalla toteutettu laskentapohja on jaettu neljälle eri välilehdelle:

- Oikosulkuvirrat
- Maasta erotettu verkko
- Kompensoitu verkko
- Häviölaskenta

Jokaisessa osiossa laskentapohjaan syötetään tiedossa olevat lähtöarvot, joiden perusteella työkalu laskee siihen syötettyjen kaavojen avulla erinäisiä tuloksia.

9.2.1 Oikosulkuvirtalaskenta

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Sähköastek Oy																	
2	Oikosulkuvirrat																	
3	Syötä avot hammasin ruuaukij																	
4																		
5	Lähtöarvot																	
6	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [A]																	
7	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [C]																	
8	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [A]																	
9	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [C]																	
10	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [A]																	
11	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [C]																	
12	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [A]																	
13	TIDV 3-vaiheen oikosulkuvirta maksimilanteessa [C]																	
14	Muuntajan tiedot																	
15	Muuntajan S ₁ [MVA]																	
16	Muuntajan U ₁ [V]																	
17	Muuntajan U ₂ [V]																	
18	Muuntajan U ₃ [V]																	
19	Muuntajan U ₄ [V]																	
20	Muuntajan U ₅ [V]																	
21	Muuntajan U ₆ [V]																	
22	Muuntajan U ₇ [V]																	
23	Muuntajan U ₈ [V]																	
24	Muuntajan U ₉ [V]																	
25	Muuntajan U ₁₀ [V]																	
26	Muuntajan U ₁₁ [V]																	
27	Muuntajan U ₁₂ [V]																	
28	Muuntajan U ₁₃ [V]																	
29	Muuntajan U ₁₄ [V]																	
30	Muuntajan U ₁₅ [V]																	
31	Muuntajan U ₁₆ [V]																	
32	Muuntajan U ₁₇ [V]																	
33	Muuntajan U ₁₈ [V]																	
34	Muuntajan U ₁₉ [V]																	
35	Muuntajan U ₂₀ [V]																	
36	Muuntajan U ₂₁ [V]																	
37	Muuntajan U ₂₂ [V]																	
38	Muuntajan U ₂₃ [V]																	
39	Muuntajan U ₂₄ [V]																	
40	Muuntajan U ₂₅ [V]																	
41	Muuntajan U ₂₆ [V]																	
42	Muuntajan U ₂₇ [V]																	
43	Muuntajan U ₂₈ [V]																	
44	Muuntajan U ₂₉ [V]																	
45	Muuntajan U ₃₀ [V]																	
46	Muuntajan U ₃₁ [V]																	
47	Muuntajan U ₃₂ [V]																	
48	Muuntajan U ₃₃ [V]																	
49	Muuntajan U ₃₄ [V]																	
50	Muuntajan U ₃₅ [V]																	
51	Muuntajan U ₃₆ [V]																	
52	Muuntajan U ₃₇ [V]																	

Kuva 14. Oikosulkuvirtalaskentaosio.

Oikosulkuvirta-välilehdelle lähtöarvoiksi syötetään 110 kV kantaverkon oikosulkuvirta, resistanssi ja reaktanssi. Arvot syötetään sekä verkon maksimi- että minimitalanteessa. Lähtöarvoiksi syötetään myös käytettävän muuntajan tiedot.

Tuloksena saadaan muuntajan ja 20 kV verkon impedanssi- ja oikosulkuvirta-arvoja sekä erinäisiä väliarvoja. Arvot lasketaan sekä maksimi että minimi tilanteissa. Jos syötetään myös jakelujohtimien arvoja, saadaan tuloksina oikosulkuvirtojen suuruudet myös niiden päissä.

Tuloksina saadaan lähtöjen maasulkuvirrat, taustaverkon syöttämät maasulkuvirrat, maasulkuprosentit sekä erinäisiä jännite-arvoja. Tulosten perusteella piirretään myös kuvaajat joista selviävät maasulkuvirran sekä maasulkujännitteen riippuvuus vika-resistanssin suuruudesta.

Kompensoidun verkon laskennassa lähtöarvoiksi syötetään lisäksi verkon kompensointiaste, verkon luonnollisen pätökomponentin suuruus sekä käytettävän kuristimen ja mahdollisen lisävastuksen tiedot.

Tuloksina saadaan maasta erotetun verkon tulosten lisäksi verkon ja kuristimen reaktanssi arvoja sekä muita väliarvoja. Tulokset saadaan, sekä ilman lisävastuksen kytkentää, että sen kanssa ja tuloksista piirretään vastaavat kuvaajat kuin maasta erotetun verkon laskennassa.

Kahta eri johdinvaihtoehtoa voidaan myös vertailla keskenään erillisellä rajatehomenetelmään perustuvalla laskennalla.

10 YHTEENVETO

Laskentatyökalun toteuttamisessa vaativinta oli kompensoidun verkon maasulkulaskelmien toteutus ja erityisesti lisävastuksen ja alikompensoinnin aiheuttamien virta-arvojen laskenta ja se veikin suurimman osan työn parissa vietetystä ajasta. Loppujen lopuksi laskenta saatiin kuitenkin toimimaan tyydyttävästi ja järkevästi, tästä kuuluu kiitos myös tilaajayrityksen yhteyshenkilölle Esa Paukkuselle.

Toivon, että työkalusta olisi mahdollisimman paljon hyötyä yrityksen tulevaisuudessa yhä enemmän yleistyvien maasulkuvirtojen kompensointilaskentaan ja sähköasemasuunnitteluun.

Tulevaisuudessa laskentatyökalua voisi vielä kehittää jotta laskentatarkkuutta saataisiin paremmaksi tietyissä osioissa. Laskentaa olisi myös mahdollista laajentaa muilla sähköasemasuunnittelulaskelmilla.

LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo; Helsinki; Juva: WSOY.

Nieminen E. 2012. Sähkön siirtotekniikka -kurssin luentomateriaali. Satakunnan ammattikorkeakoulussa järjestetty kurssi keväällä 2012.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 1, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon hallinta. Helsinki: Otatieto

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto

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

Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. 2000a. Vaasa: Abb Oy. Viitattu 10.2.2013.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/07_1_Oikosulkusuojaus%20ja%20osulakkeet.pdf

Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. 2000b. Vaasa: Abb Oy. Viitattu 10.2.2013.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf

Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. 2000c. Vaasa: Abb Oy. Viitattu 10.2.2013.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/13_S%84hk%94asemat-kojaistot-muuntamot.pdf

Saha, M. & Izykowski, J. 2010. Fault location on power networks. New York: Springer

Taimisto, S. 1993. Maasulkuvirtojen kompensointi keskijänniteverkossa. Sähkö&Tele 66, 26-28.

Title Installation & Maintenance Manual for Oil Insulated Appliances			Page 3/4	TRENCH
Document No IMM-206.01.0526.001	Rev 0	Author VP2-GRG	Released VP-Po	Date 10.05.2006

Technical data

rated power	1270 kVAr
rated voltage	20/ $\sqrt{3}$ kV
rated current	110 A
current regulating range	11-110 A
rated frequency	50 Hz
highest voltage for equipment	24kV
insulation level	LI125AC50 - LI75AC28
duty	short time 2h
power auxiliary winding	500V; 126A; short time 90 sec
voltage measuring winding	100 V; 1 A; continuous
current transformer	---
standards	IEC 60289
year of manufacture	2006
class of temperature	A
max. ambient temperature	+ 40°C
type of cooling	ONAN
total mass	2075 kg
oil mass	550 kg
oil type	Uninhibited oil
PCB-content	not detectable according to DIN 51527
application	outdoor
load resistor	500V; 126A; 90 sec.
Motor drive unit	motor
	control voltage
	heating
	3*400 V; 50Hz
	110 V; DC
	230 V; 50 Hz

Factory settings of temperatur control devices:

settings in °C for	KB		DB	
	contact 1	contact 2	contact 1	contact 2
thermometer with 2 contacts	120	135	110	115
thermometer with 1 contact	135	-	115	-
heat monitoring relay with 1 contact	135	-	115	-

