

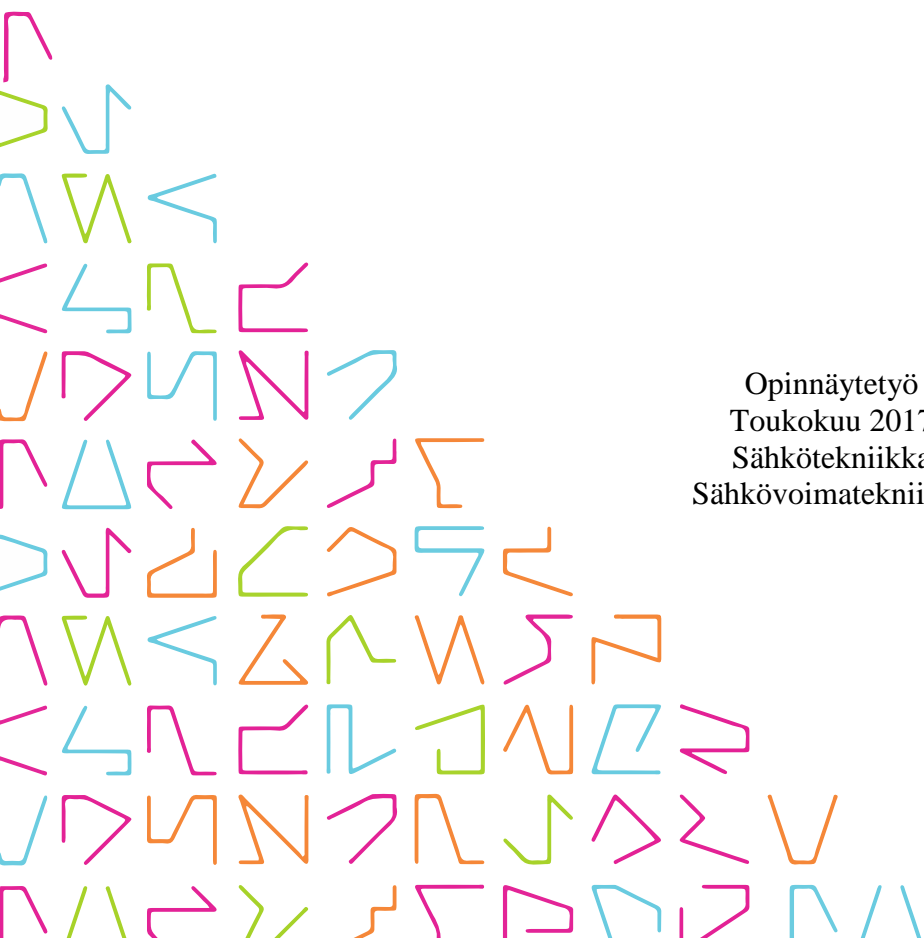


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SÄHKÖASEMAN YLIVIRTA- JA MAASULKUSUOJAUSASETTELUIJEN MÄÄRITYS

Arttu Kuusisto

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

KUUSISTO, ARTTU:

Sähköaseman ylivirta- ja maasulkusuojausasettelujen määrittäminen

Opinnäytetyö 47 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Toukokuu 2017

Toimeksiantajana opinnäytetyössä toimi Sähkölandia Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa laskentatyökalu keskijänniteverkon suojareleasettelujen määrittämiseksi. Tavoitteena oli määrittää ylivirta- ja maasulkusuojausasetteluarvot sähköaseman suoja-releille. Työkalun oli tarkoitus pystyä laskemaan eri vikatilanteissa esiintyvät vikavirrat ja -jännitteet. Laskennan tuli toimia niin sammutetussa kuin maasta erotetussa verkossa.

Työ koostui julkisesta osuudesta ja salassa pidettävästä osuudesta. Julkisessa osuudessa keskityttiin kertomaan yleisesti sähköasemista ja keskijänniteverkon suojauksesta. Lisäksi käsiteltiin suojausasetteluihin liittyvä keskeinen teoria menemättä kuitenkaan tarkempiin yksityiskohtiin. Materiaalina käytettiin kirjallisuutta, SFS-standardeja sekä internetistä löytyviä tietoja.

Sähkölandia Oy on luokitellut työn lopussa olevan liitteen 1 salassa pidettäväksi materiaaliksi. Liite sisältää esittelyn toteutuneesta yleispätevästä keskijänniteverkon vikavirtojen laskentaohjelmasta sekä sen rinnalle tuotetusta suojareleasettelujen määrittämisohjeesta. Laskenta ja siihen liittyvä teoria perustuvat voimassa oleviin standardeihin. Tuotettu laskentaohjelma on tarkoitettu vain Sähkölandia Oy:n käyttöön.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

KUUSISTO, ARTTU:

Substation's overcurrent and earth fault protection settings

Bachelor's thesis 47 pages, appendices 8 pages
May 2017

This thesis was commissioned by Sähkölandia Oy. The purpose of this thesis was to develop a calculation tool, which could be used to support protection relay calculations, for Sähkölandia Oy. The aim was to calculate overcurrent and earth fault current values at substations for protection relays. Calculation tool should calculate fault current and voltage values in ungrounded networks and resonantly grounded networks.

The document produced consists of public part and confidential part. In the public part the substations and distribution protection functions were generally discussed. In addition, the protection relay theories, which are needed when you calculate protection settings were introduced. The material was gathered from literature, SFS-standards and from the internet.

The appendix is categorized as confidential material by Sähkölandia Oy. it consists of the produced universal distribution networks fault calculation program and the protection relay settings instructions, which are made for only in place by Sähkölandia Oy. The calculation and theories are based on the standards.

Key words: substation, distribution network, overcurrent, earth fault

1. SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖASEMA JA SEN RAKENNE	7
2.1	Sähköaseman kojeistot.....	7
2.1.1	Avokojeistot	7
2.1.2	Koteloidut kojeistot.....	8
2.1.3	SF ₆ -kojeistot.....	8
2.2	Sähköaseman laitteistot ja laitteet.....	9
2.2.1	Kokoojakiskojärjestelmät.....	9
2.2.2	Katkaisijat	13
2.2.3	Erottimet.....	13
2.2.4	Mittamuuntajat	14
2.2.5	Tehomuuntajat.....	14
3	SÄHKÖVERKON SUOJAUS	16
3.1	Suojareleiden rakenne ja toiminta.....	16
3.2	Yleisimmät reletyypit	18
3.2.1	Virtareleet.....	18
3.2.2	Ali- ja ylijänniterele	20
3.2.3	Taajuusrele	20
3.2.4	Distanssirele	20
3.2.5	Differentiaalirele	21
3.2.6	Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele.....	21
3.3	Selektiivisyys	22
3.4	Jälleenkytkentäsekvenssit	23
4	SÄHKÖVERKON VIAT JA NIIDEN LASKENTA.....	25
4.1	Oikosulku.....	25
4.2	Impedanssin määrittäminen	28
4.3	Maasulku.....	29
4.3.1	Maasulkuvirtojen laskenta maasta erotetussa verkossa	31
4.3.2	Maasulkuvirtojen laskenta kompensoidussa verkossa.....	34
5	LASKENTAOHJELMA	37
6	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET	40
	Liite 1. Laskentatyökalu ja suojarelasettelujen määrittämisohje.....	40

LYHENTEET JA TERMIT

A	Ampeeri, virran yksikkö
AJK	aikajälleenkytkentä
C	kapasitanssi
C_0	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
C_{0j}	johdon yhden vaiheen maakapasitanssi
c	jännitekerroin
I_e, I_{ef}	maasulkuvirta
I_k	oikosulkuvirta
PJK	pikajälleenkytkentä
R_f	vikaresistanssi
s	sekunti
SF_6	rikkiheksafluoridi, eristyskaasu
S_k	oikosulkuteho
S_n	nimellisteho
t	aika
U	verkon pääjännite
U_e	maadoitusjännite
U_n	verkon vaihejännite
U_s	askeljännite
U_t	kosketusjännite
U_{Tp}	sallittu kosketusjännitteen arvo
U_0	nollajännite
V	Voltti, jännitteen yksikkö
X	reaktanssi
Z	impedanssi
Z_f	vikaimpedanssi
Z_k	verkon impedanssi
τ	jäähtymisaikavakio
ω	kulmataajuus
ωL	kompensointikelan reaktanssi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin kevään 2017 aikana Sähkölandia Oy:lle. Työn tavoitteena oli perehtyä sähköasemien relesuojaukseen ja tuottaa suojareleasettelujen laskentatyökalu yrityksen käyttöön. Laskentatyökalun tarkoituksena on olla keskijänniteverkon suojausasettelujen määrittelyn tukena sähköasema- ja sähköverkkosuunnittelussa.

Laskentatyökalun on tarkoitus laskea oikosulkuvirtojen, maasulkuvirtojen ja nollajännitteiden arvoja keskijänniteverkossa, joista määritellään suojuksille asetteluarvot. Työkalun tulee toimia sekä maasta erotetussa, että kompensoidussa verkossa. Laskennassa tulee huomioida suojukselle asetetut vaatimukset, jotka löytyvät standardista SFS 6001.

Työn alussa esitellään keskijänniteverkon sähköasemien rakennetta ja toimintaa. Sähköasemien esittelyn jälkeen käsitellään vikasuojauksista yleisesti siihen liittyvine laitteineen. Lisäksi lopussa käsitellään vikatilanteisiin liittyvää laskentaa.

Työn lopussa on liite, joka sisältää tuotetun laskentatyökalun. Kyseistä työkalua ei kuitenkaan julkaista yleiseen levitykseen, koska Sähkölandia Oy on määritellyt sen salassa pidettäväksi materiaaliksi.

Työn tilaaja, Sähkölandia Oy, on nuori ja laadukas sähköalan palveluyritys. Sähkölandia Oy on täysin kotimainen ja käyttää töissään kotimaista erittäin ammattitaitoista työvoimaa. Yritys toimii valtakunnallisesti ja sen päätoimipiste sijaitsee Lempäälässä. Yrityksen pääasiallinen toimiala on sähköasemaurakointit ja -palvelut verkkoyhtiöille ja teollisuusyrityksille.

Sähkölandian sähköasemayksikkö toteuttaa sähköasemaprojekteja kokonaisuutena alusta loppuun niin uudis- että saneerauskohteissa. Yksikkö pitää sisällään kaikki sähköasema erikoistyö osa-alueet, eli kaikki osaaminen löytyy saman katon alta. Lisäksi yritys palvelee sähkölaitos ja teollisuus asiakkaita yksittäisillä sähköasema palveluilla. Yhtiöllä on myös omaa laitevalmistusta ja maahantuontia sähköasemilla käytettäviä laitteita varten.

2 SÄHKÖASEMA JA SEN RAKENNE

2.1 Sähköaseman kojeistot

Sähköasema on sellainen sähköverkon kohta, jossa voidaan suorittaa kytkentöjä, muuntaa jännitettä tai keskittää tai jakaa sähköenergian siirtoa eri johdoille. Sähköaseman tärkeimpiä laitteita ovat muuntajat, katkaisijat, erottimet ja mittamuuntajat. Lisäksi suojaustaroituksissa käytetään mittamuuntajien kautta suur- ja keskijänniteverkkoon liittyviä suojaareleita ja pien- ja keskijänniteverkoissa varokkeita. (Elovaara & Laiho 2001)

Kojeistolla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka sisältää sähköasemalla tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Kojektorakenteet voidaan nimellisjännitteen mukaan jakaa suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin. Alle 1000 V kojeistoa kutsutaan usein jakokeskukseksi. (Elovaara & Haarla 2011b)

Kojeistot voidaan jakaa sisä- tai ulkotiloihin soveltuviksi ja ne voivat olla avorakenteisia tai koteloituja. Eristeenä voidaan ilman sijaan käyttää myös kaasua, joka tavallisimmin on SF₆ -kaasua. SF₆ -kaasu on hyvä eriste ja sen avulla voidaan saavuttaa merkittäviä tilansäästöjä verrattuna ilmaeristeisiin kojeistoihin. (Aura & Tonteri 1993)

Kojeistoa suunniteltaessa tulee huomioida tulevien huoltojen vaatima tila, käytön turvallisuus, standardien mukaiset etäisyysvaatimukset ja toteutuksen taloudellisuus. (Elovaara & Haarla 2011b)

2.1.1 Avokojeistot

Avorakenteinen ulkokojeisto tarkoittaa ulkotiloihin rakennettua ilmaeristeistä kojeistoa. Tällaisia kojeistoja käytetään pääsääntöisesti 110 kV:n ja sitä suuremmilla jännitteillä, kun edullista tilaa on riittävästi käytettävissä. Tiheästi asutuilla seuduilla maapohjan kallias hinta vie avokojeistojen halvempien rakennuskustannuksien hyödyn. Siksi kaupunkialueilla ja teollisuuskeskuksissa joudutaan rakentamaan sisäkytkinlaitoksia myös suurjänniteportaassa. Ulkokytkinlaitoksen aiheuttamia maisemahaittoja voidaan vähentää

välttämällä rakentamista aukeille paikoille tai ammattitaitoisilla sähköaseman suunnittelu ratkaisulla. (Elovaara & Haarla 2011b)

2.1.2 Koteloidut kojeistot

Avorakenteisia sisäkojeistoja ei käytännössä enää rakenneta, vaan niiden tilalle ovat tulleet ilma- tai SF₆-eristeiset koteloidut kojeistot ja kytkinlaitokset. Yleisimmin käytetään ilmaeristeisiä kojeistoja, jotka jaotellaan ulkokuorensa mukaan metallikuorisiin, kennokoteloituihin, metallikoteloituihin ja tilakoteloituihin rakenteisiin. (Aura & Tonteri 1993)

Kojeistot voidaan myös jakaa ulosvedettäviin vaunukojeistoihin tai kiinteisiin kojeistoihin. Vaunukojeistot kehitettiin 1970-luvulla nopeuttamaan huoltoja ja vähentämään erottimista aiheutuvia vikoja. Katkaisijan ulosvedossa syntyvä ilmaväli korvaa erilliset erottimet. Uusin rakenneratkaisu on kasettikojeisto, joka estää käyttötoimenpiteet oven ollessa auki. Kasetin alla olevaa tilaa voidaan hyödyntää kalustukseen. Lisäksi jokaisella kasettikojeistossa on valokaaripaineen purkauskanava. (Elovaara & Haarla 2011b)

2.1.3 SF₆-kojeistot

Tilankäytön muodostuessa yhä merkittävämmäksi kriteeriksi kytkinlaitosten valinnassa ovat SF₆-eristeiset kojeistot nousseet yhä kilpailukykyisemmiksi. SF₆ ratkaisuja käytetään jännitealueella 12 - 800 kV nimellisvirtojen ollessa 630 - 8000 A. (Elovaara & Laiho 2001)

Kaasueristetyt kytkinlaitokset vaativat huomattavasti vähemmän asennustilaa verrattuna ilmaeristeisiin avokytkinlaitoksiin. Viimeisien vuosikymmenien aikana kojeistojen tilantarve on edelleen pienentynyt katkaisijateknologian ja erotinsuunnittelun kehityksen ansiosta. Erot ovat merkittävimmät suurjännitteellä, SF₆-eristettyjä kojeistoja käytetään usein avorakenteisien laitoksien laajennuksissa ja saneerauksissa. (Elovaara & Haarla 2011b)

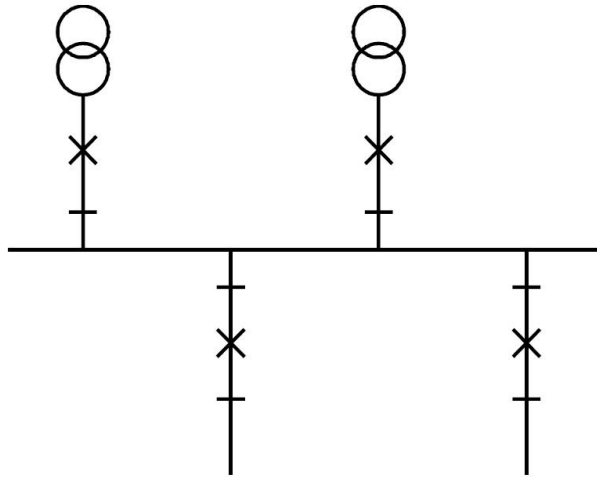
2.2 Sähköaseman laitteistot ja laitteet

2.2.1 Kokoojakiskojärjestelmät

Sähköaseman kokoojakiskojen tehtävänä on jakaa energia mahdollisimman tarkoituksenmukaisella tavalla. Kokoojakiskoa nimitetään pääkiskoksi, kun siihen liitytään katkaisijalla. Liittymisen tapahtuessa pelkästään erottimella, kutsutaan sitä apukiskoksi. Kokoojakiskojärjestelmän valinta kuuluu sähköaseman yleissuunnitteluun ja sillä on erittäin suuri merkitys sähköaseman käytettävyyteen, käyttövarmuuteen ja rakennuskustannuksiin. (Elovaara & Laiho 2001)

Suomessa yleisesti käytettyjä kiskoratkaisuja ovat yksikisko-, apukisko-, kaksoiskisko-, kaksoiskisko-apukisko- ja duplex-järjestelmät. Maailmalla on siirtoverkoissa yleisessä käytössä edellisten lisäksi 1½-katkaisija- ja rengaskiskojärjestelmiä, joita ei Suomessa juurikaan ole sovellettu. Yksinkertaisilla yhden muuntajan pääte- ja johdonvariasemilla ei kokoojakiskojärjestelmää yläjännitepuolella välttämättä tarvita vaan kiskon korvaa sähköasemaa syöttävä johto. (Elovaara & Laiho 2001)

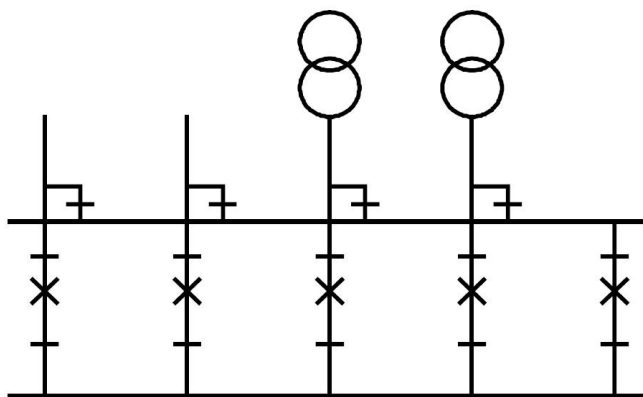
Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva yksikiskojärjestelmästä. Tässä järjestelmässä kaikki johdot ja muuntajat liittyvät samaan pääkiskoon. Yksikiskojärjestelmä on varsinaisista kokoojakiskojärjestelmistä yksinkertaisin ja käyttövarmuudeltaan heikoin. Huolloltaan ja käytettävyydeltään järjestelmä on rajoittunut, sillä esimerkiksi katkaisijahuolto vaatii kyseiselle johdolle keskeytyksen. Lisäksi kiskon huoltaminen tai kiskovika aiheuttaa koko aseman tekemisen jännitteettömäksi. (Elovaara & Haarla 2011b)



KUVA 1. Yksikiskojärjestelmä (ABB 2000)

Yksikiskojärjestelmän joustavuutta voidaan jonkin verran lisätä jakamalla kiskosto osiin pitkittäiskatkaisijalla tai erottimella. Järjestelmä on käyttökelpoinen esimerkiksi yhden muuntajan kautta syötetyssä 20 kV rengasmaisessa jakeluverkossa, jolloin katkaisijoiden huollosta ja korjauksesta aiheutuvat keskeytykset voidaan välttää. (Elovaara & Laiho 2001)

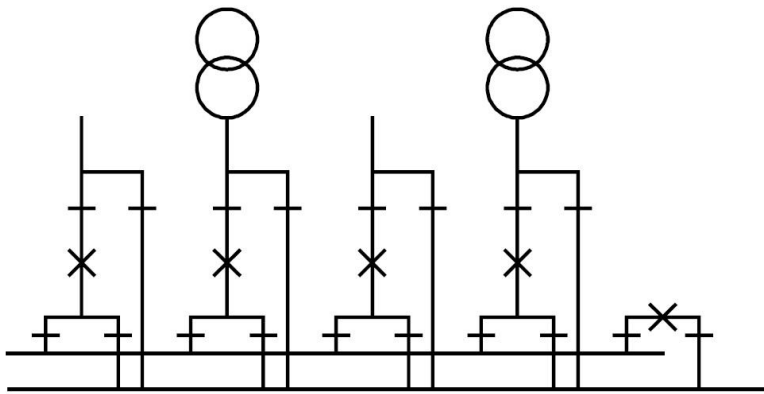
Kisko-apukiskojärjestelmässä (kuva 2) kaikki johdot ja muuntajat liittyvät samaan pääkiskoon, mutta niin sanotun kiskokatkaisijan avulla voidaan korvata jokin toinen katkaisija esimerkiksi huollon ajaksi. Yksikiskojärjestelmään verrattuna kisko-apukiskojärjestelmässä on kiskoston huollot ja kytkinlaitoksen muutostyöt helpompi suorittaa. Lisäksi ohikytkentätilanteissa suojaus säilyy selektiivisenä. (Elovaara & Haarla 2011b)



KUVA 2. Kisko apukiskojärjestelmä (ABB 2000)

Vaikka apukisko mahdollistaa sähköaseman huomattavasti joustavamman käytön, ei se paranna käyttövarmuutta kiskoviassa. Pääkiskossa oleva vika aiheuttaa keskeytyksen kaikille asemalta lähteville johdoille. Yksittäisen laitteen kuten katkaisijan hajotessa järjestelmä kuitenkin mahdollistaa käytön jatkumisen kytkentöjen suorittamisen jälkeen. Järjestelmää voidaan käyttää kaikilla jännitetasoilla. (Elovaara & Haarla 2011b)

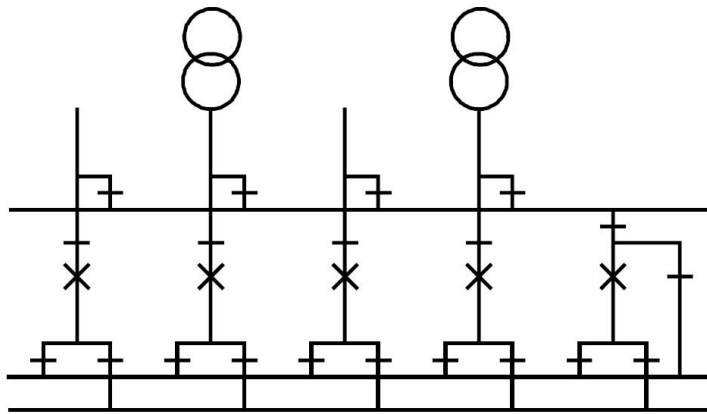
Kuvan 3 kaksoiskiskojärjestelmällä voidaan käytön aikana ryhmitellä johtoja ja muuntajia sekä muuttaa ryhmittelyjä. Syinä kuormien jakamiseen eri kiskoille voivat olla esimerkiksi oikosulkutehojen rajoittaminen, nykivän kuorman pitäminen erillään muusta kuormituksesta tai käyttövarmuuden lisääminen ukkoskautena. (Elovaara & Haarla 2011b)



KUVA 3. Kaksoiskiskojärjestelmä (ABB 2000)

Lisäksi kaksoiskiskojärjestelmä mahdollistaa huolto ja korjaustöiden tekemisen jännitteettömänä ilman käyttökeskeytystä. Järjestelmä on tyypillinen jakeluasemilla ja teollisuuskojeistoissa. (Elovaara & Laiho 2001)

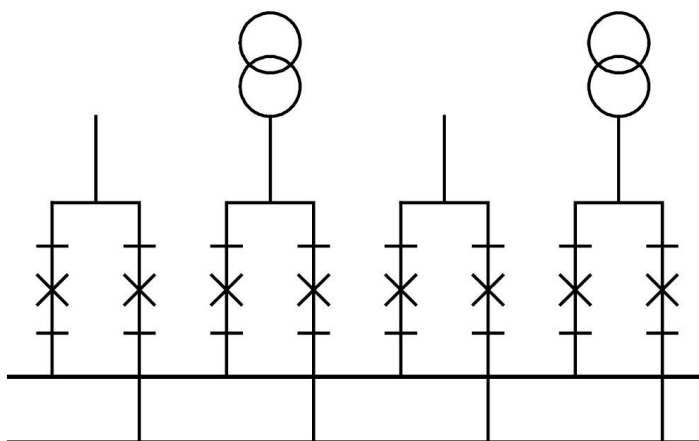
Kuvassa 4 on esitetty kaksoiskisko-apukiskojärjestelmän periaatekuva. Järjestelmässä on kaksi pääkiskoa, joihin liitytään omilla kiskoerottimilla sekä yhteisellä katkaisijalla. Kaksoiskisko-apukiskojärjestelmän edut ovat samat kuin kaksoiskiskojärjestelmän, mutta apukiskon ansiosta se tarjoaa monipuolisempia kytkentävaihtoehtoja. Kiskoista kaksi voidaan tehdä samanaikaisesti jännitteettömiksi, lähtöjä voidaan kytkeä yhteen tai kahta lähtöä voidaan syöttää yhdellä katkaisijalla. (Elovaara & Laiho 2001)



KUVA 4. Kaksoiskisko-apukiskojärjestelmä (ABB 2000)

Järjestelmä on suhteellisen kallis laitteiden suuren lukumäärän vuoksi, joten sitä käytetään pääasiassa vain tärkeillä 110 kV:n sähköasemilla. Aikaisemmin kaksoiskisko-apukiskojärjestelmiä on rakennettu paljon myös 400 kV:n asemille, mutta viime aikoina näitä on korvattu duplex-järjestelmillä paremman käyttövarmuuden vuoksi. (Elovaara & Haarla 2011b)

Kaksoiskatkaisija- eli duplex-järjestelmässä on kaksi pääkiskoa, joihin molempiin liitetään katkaisijalla. Järjestelmä on käyttövarmuudeltaan erittäin hyvä jopa kiskovikojen ja virheohjausten suhteen. Kiskovian seurauksena ainoastaan vioittuneeseen kiskoon liittyvät katkaisijat laukaistaan. Duplex-järjestelmän yksinkertaistettu periaatekuva on esitetty kuvassa 5. (Aura & Tonteri 1993)



KUVA 5. Duplex (ABB 2000)

Järjestelmän heikkoutena on kallis hinta, joka johtuu katkaisijoiden ja mittamuuntajien noin kaksinkertaisesta määrästä verrattuna kaksoiskisko-apukiskojärjestelmään. Kantaverkossa järjestelmän kannattavimpia kohteita ovat pienet mutta tärkeät muuntoasemat sekä voimalaitosasemat. Jakeluverkossa duplex on kilpailukykyisempi kuin kantaverkossa, sillä vaunukatkaisijaa käytettäessä ei tarvita kisko- eikä johtoerottimia. Duplex-järjestelmiä käytetäänkin varsin yleisesti keskijännitteellä teollisuudessa ja suurissa jakelukojeistoissa. (Elovaara & Haarla 2011b)

2.2.2 Katkaisijat

Katkaisijoita käytetään virtapiirin avaamiseen ja sulkemiseen joko käsi- tai automaattiohjauksella. Tavanomaisin automaattisesti tapahtuva katkaisijan toiminta on avautuminen ylivirran vaikutuksesta. Avautumiskäsky tulee releeltä, joka on kytketty virtapiiriin mittamuuntajia apuna käyttäen. Myös sulkeutuminen voi olla automaattista. Katkaisija pysyy vaurioitumatta sekä avaamaan että sulkemaan oikosulkupiiriin, jossa virta on tyypillisesti moninkertainen katkaisijan mitoitusvirtaan nähden. (Elovaara & Haarla 2011b)

Katkaisukammiossa käytettävän väliaineen perusteella katkaisijat voidaan jakaa ilmakatkaisijoihin, vähäöljykatkaisijoihin, paineilmakatkaisijoihin, SF₆-katkaisijoihin ja tyhjiökatkaisijoihin. (Elovaara & Laiho 2001)

Edellä esitetty järjestys kuvaa myös katkaisijoiden kehitysvaiheita, joka on ollut sidoksissa verkkojen siirtojännitteiden ja kuormitusvirtojen kasvuun. Kaikkia edellä mainittuja katkaisijatyyppejä tavataan vielä verkossa. Katkaisijatekniikassa koettu murros on kuitenkin johtanut SF₆- ja tyhjiökatkaisijoiden voimakkaaseen yleistymiseen. Suurilla jännitteillä SF₆ on lähes syrjäyttänyt muut katkaisijalajit, mutta keskijännitteellä tyhjiökatkaisijat ovat käytetty vaihtoehto. (Elovaara & Haarla 2011b)

2.2.3 Erottimet

Eroin on kytkinlaite, jonka tehtävä on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiiriin ja muun laitoksen välille sekä tehdä laitoksen osa jännitteettömäksi turvallista

työskentelyä varten. Avausvälin on oltava erittäin luotettava, jonka takia SFS-standardissa vaaditaan, että avausväli on näkyvässä tai erotin on varustettava yksiselitteisellä asennonosoittimella. (Elovaara & Laiho 2001; SFS 6001)

Erottimelta ei vaadita virran katkaisu- eikä sulkeutumiskykyä, mutta kiinni-asennossa se kykenee johtamaan kuormitus- ja oikosulkuvirran. Erottimen käyttölaite ei saa toimia tuulen, värinän, iskun tai tahattoman koskettamisen kautta ja se on voitava lukita auki- ja kiinniasentoon epäasiallista käyttöä vastaan. Lukitseminen voidaan tehdä esimerkiksi sähköisesti lukitusmagneetilla (ABB 2000; SFS 6001)

2.2.4 Mittamuuntajat

Mittamuuntajia käytetään sähköasemilla virran ja jännitteen mittaamiseen. Mittamuuntajat mahdollistavat mittauspiirin galvaanisen erotuksen suurjännitteisestä päävirtapiiristä ja mitta-alueen muuttamisen. Lisäksi mittamuuntajat suojelevat mittareita ylikuormituksilta ja sallivat mittareiden ja releiden sijoittamisen etäälle varsinaisesta mittauspaikasta. (Elovaara & Haarla 2011b)

Mittamuuntajien on toistettava mahdollisimman virheettömästi mitaamansa jännite tai virta nimellialueellaan. Muuntajien ominaisuuksista johtuvat virheet tulee huomioida mittauksia tehdessä. Virtamuuntajilla pääasiallisen virheen aiheuttaa magnetointivirta, jonka suuruus on riippuvainen muuntajan magnetoitumisasteesta. Jännitemuuntajilla pääasiallisen virheen aiheuttaa muuntajan jännitteen-alenema. (Elovaara & Haarla 2011b; Aura & Tonteri 1993)

2.2.5 Tehomuuntajat

Muuntaja on sähkölaite, joka muuntaa ja usein myös säätää jännitteitä ja virtoja kahden tai useamman käämityksen välillä sähkömagneettisen induktion avulla. Tyypillisesti päämuuntajan nimellisteho on 10 - 40 MVA. Tavanomainen päämuuntajan normaalitilanteen kuormitusaste on 60 – 80 %.

Muuntaja on sähköaseman kallein yksittäinen komponentti, jonka takia sillä on monipuolinen suojaus. Pääsuojina toimivat ylivirta- ja differentiaalirele. Lisäksi suurien muuntajien käämien kuumimmat pisteet varustetaan lämpötila-antureilla, sillä liian suuret lämpötilat nopeuttavat eristyksien vanhenemista. (Elovaara & Haarla 2011b; Lakervi & Partanen 2008)

3 SÄHKÖVERKON SUOJAUS

Sähköverkon suojauksella ja valvonnalla pyritään takaamaan sähkön käyttäjälle katkeamaton sähkönsaanti ja vaatimukset täyttävä sähkön laatu. Tämä on erityisen tärkeää yleisiä tarpeita palveleville laitoksille ja teollisuudelle, joille häiriöt sähköjärjestelmässä voivat aiheuttaa suuria taloudellisia vahinkoja ja vaaratilanteita. Suomessa keskijänniteverkon suojaukselle asetetut vaatimukset löytyvät sähköturvallisuusstandardista SFS 6001. (Aura & Tonteri 1993, SFS 6001)

Suurin osa sähköverkon suojalaitteista on keskitetty sähköasemalle. Verkon suojauksesta huolehtii mittamuuntajien, suojareleiden ja katkaisijoiden muodostama kokonaisuus. Tiedonsiirto sähköaseman laitteiden välillä hoidetaan johtimilla tai väyläteknikalla. Kauempana toisistaan sijaitsevat laitteet liitetään toisiinsa ja kaukovalvontaan tiedonsiirtoyhteyttä käyttäen. (Elovaara & Haarla 2011b)

Sähköverkon suojauksen tulee kattaa koko järjestelmä ja toimia riittävän nopeasti verkon ja sen komponenttien suojaamiseksi. Suojauksen on toimittava selektiivisesti, jotta mahdollisimman pieni verkon osa kytkeytyy pois käytöstä vikatilanteessa. Suojauksen on oltava kuitenkin yksinkertainen ja luotettava. Lisäksi se on voitava koestaa käytön aikana ilman tarpeettomia keskeytyksiä sähkönjakeluun. (Aura & Tonteri 1993)

3.1 Suojareleiden rakenne ja toiminta

Suojareleiden toiminta perustuu muutosten tarkkailuun virtapiirissä. Kun releen tarkkailema suure ylittää toiminta-arvon, rele havahtuu. Asetellun ajan kuluttua havahtumisesta rele toimii ja antaa kytkentävirikkeen. Havahtumisesta kytkemiseen kuluvaa aikaa kutsutaan releen toiminta-ajaksi. (Mörsky 1993)

Päävirtapiireihin suoraan kytkettyjä releitä kutsutaan ensiö- eli primäärireleiksi. Mittamuuntajien kautta kytketyt releet ovat toisio- eli sekundäärireleitä. Rele koostuu havahtumiselimestä, mittaelimestä ja aikaelimestä. Usein lisäksi tarvitaan suuntaelin, jos esimerkiksi tehon virtaussuunta on tunnettava. Nykyään releet ovat käytännössä toisioreleitä. (Elovaara & Laiho 2001)

Suojareleen valintaan liittyviä tärkeitä seikkoja ovat esimerkiksi käämin tehonkulutus ja nimellisvirta, koskettimien lukumäärä ja toimintatapa, koskettimien sulkeutumisen- ja avautumiskyky, väylätekniikka, terminen kuormitettavuus, toiminta-arvo, palautumis-arvo ja palautumissuhde. (Aura & Tonteri 1993)

Erilaisia suojareleitä on markkinoilla suuri määrä. Releet voidaan käytettävän tekniikan perusteella jakaa sähkömekaanisiin-, staattisiin- ja mikroprosessori- eli digireleisiin. Käytännössä digireleet ovat syrjäyttäneet muut reletyypit.

Vanhimmat suojareleet ovat sähkömekaanisia ja niissä on liikkuvia osia. Niiden toiminta perustuu magneettikentän muutosten tarkkailuun, joka aiheuttaa liikkeen releessä. Sähkömekaaniset releet ovat kookkaita, epätarkkoja ja niitä pitää säännöllisesti koestaa mekaniikan jäykistymisen estämiseksi. Sähkömekaanisten releitä ei enää valmisteta eikä asenneta uusiin kohteisiin. Kestävyyden ja luotettavuuden vuoksi niitä on yhä käytössä vanhoissa laitoksissa ja ne poistetaan yleensä vasta uusittaessa sähköasemaa. (Elovaara & Haarla 2011; Aura & Tonteri 1993)

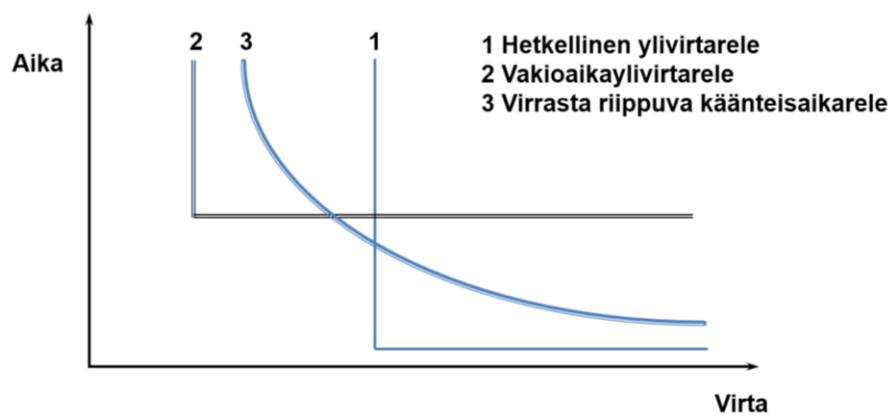
Staattiset eli elektroniset suojareleet tulivat markkinoille 1960-luvulla. Releissä käytetään sekä yksittäisiä puolijohdekomponentteja että mikropiirejä sisältäviä kytkentöjä, eikä niissä ole liikkuvia osia. Staattisilla releillä pystytään toteuttamaan entistä vaativampia suojaustoimenpiteitä, jotka olisivat mahdottomia toteuttaa sähkömekaanisilla releillä. Lisäksi ne ovat nopeampia ja huomattavasti tarkempia sekä tarvitsevat paljon vähemmän tilaa kuin vastaavat mekaaniset releet. Yksivaiheinen mekaaninen ylivirtarele vie saman tilan kuin kolmivaiheinen staattinen rele. (Mörsky 1993)

Mikroprosessori- eli digitaalireleet tulivat markkinoille 1980-luvun lopulla. Niiden suojaustoiminnot ovat muihin releisiin verrattuna monipuolisempia ja niissä voi olla runsaasti erilaisia asettelumahdollisuuksia. Releissä ei ole kuluvia mekaanisia osia ja niissä on integroituna itsevalvontaa, joka vähentää koestuksen tarvetta. Digitaalisten releiden hinnan ja nopeuden välillä on usein vahva korrelaatio. Nopeimmat digitaaliset distanssireleet antavat laukaisukäskyn 10 ms:n kuluttua vian alkamisesta. (Elovaara & Haarla 2011b)

3.2 Yleisimmät reletyypit

3.2.1 Virtareleet

Ylivirtareleitä käytetään ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksessa. Niiden toiminta perustuu virran muutoksen seurantaan, eli asetellun virta-arvon ylittyessä rele toimii. Virtareleet jaetaan hetkellis- vakioaika-, käänteisaika ja lämpöreleisiin. Releiden toimintakäyrät virran funktiona löytyvät kuvasta 6. (Mörsky 1993)



KUVA 6. Ylivirtareleiden toiminta-aikoja virran funktiona (ABB 1998)

Hetkellinen ylivirtarele havahtuu lähes välittömästi virran ylittäessä sille asetellun toiminta-arvon. Hetkelliseen ylivirtareleeseen lisättäessä aikarele, saadaan vakioaikaylivirtarele. Releen toiminta-aikaa voidaan asettaa aikareleestä. (Mörsky 1993)

Käänteisaikaylivirtareleen toimintahidastus on virtaan nähden käänteinen, eli rele toimii nopeammin suurivirtaisilla kuin pienivirtaisilla vioilla. Käänteisvaikutuksen jyrkkyys riippuu valitusta IEC-standardin 60255-3 käyrästä. Käyrien käänteisaikahidasteinen laukaisuaika t_{TRIP} voidaan laskea kaavalla 1. (Elovaara & Haarla 2011b)

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

, jossa

I on verkon vikavirta

$I >$ on releelle aseteltu havahtumisvirta

A on käänteisaikareleen parametri

p on käänteisaikareleen parametri

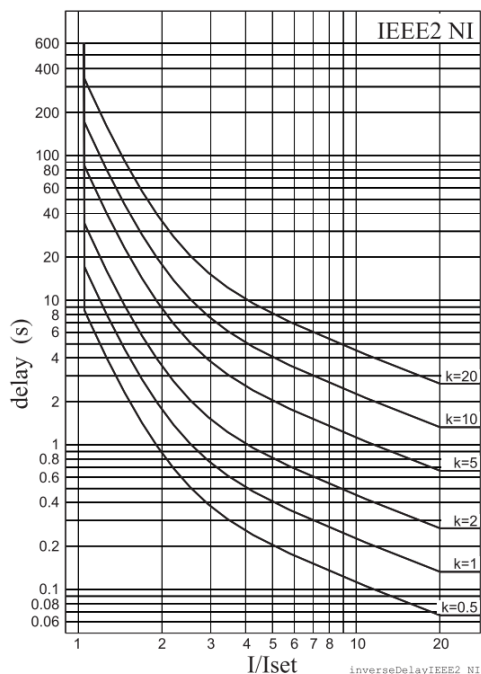
k on aikakerroin

Käänteisaikareleen parametrit A ja p löytyvät taulukosta 1. Niiden suuruus riippuu siitä, kuinka jyrkkä käyrä suojaukselle halutaan.

TAULUKKO 1. IEC-Standardin 60255 mukaiset parametrit A ja p

Käyrän jyrkkyys	A	p
NORMAL	0,14	0,02
VERY INVERSE	13,5	1
EXTREMELY INVERSE	80	2
LONG TIME INVERSE	120	1

Kuvassa 7 on esitetty IEC-standardin mukaiset normal inverse aika-virtakäyrät.



KUVA 7. VAMP 255 -releen käänteisaikaominaiskäyrästä normal inverse (VAMP 2016)

3.2.2 Ali- ja ylijänniterele

Alijänniterele toimii, kun seurattavan piirin jännite alittaa releen asetusarvon. Alijännitereleitä käytetään esimerkiksi suurten moottorien yhteydessä erottamaan moottori verkosta, kun sitä uhkaa pysähtyminen alentuneen jännitteen takia. Alijännitereleet eivät saa toimia liian nopeasti, etteivät ne aiheuttaisi tarpeettomia käyttökeskeytyksien lyhytaikaisien jännitevaihteluiden vaikutuksesta sähköaseman kiskosuojauksessa. (Mörsky 1993)

Ylijänniterele toimii jännitteen ylittäessä asetusarvon. Niitä käytetään varsinkin tahti-generaattorien suojana vaarallisten jännitteennousujen varalle sekä maasulkusuojauksessa nollajännitereleinä. (Elovaara & Laiho 2001)

3.2.3 Taajuusrele

Taajuusreleet havahtuvat verkon taajuuden kasvaessa tai pienentyessä nimellisarvosta. Teollisuudessa taajuusreleitä käytetään tahtimoottorien ja toissijaisten kuormitusten automaattiseen erottamiseen, kun verkon taajuus laskee. Kantaverkossa alitaajuusreleiden tärkeä sovellutus on valtakunnallisessa tehonvajaussuojauksessa. (Mörsky 1993)

Tehonvajaussuojauksessa ennalta valittua kuormaa irrotetaan verkosta, kun taajuus laskee alle asetellun arvon. Kuormien irtikytkentä ei saa tapahtua tehoheilahteluissa, verkkojen ollessa epätahdissa tai alijännitetilanteissa. Taajuuden palaututtua takaisin normaaliarvoonsa, voidaan kuormia kytkeä takaisin verkkoon. (Mörsky 1993)

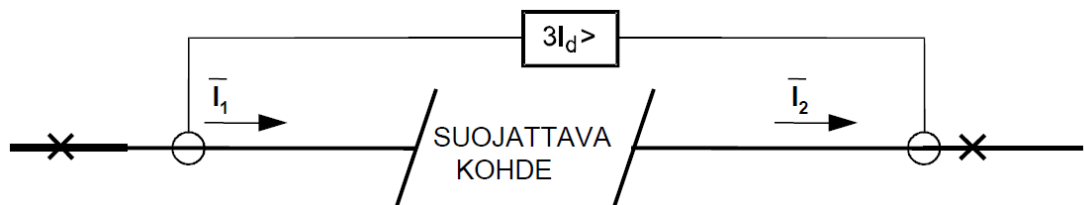
3.2.4 Distanssirele

Distanssirele mittaa nimensä mukaisesti etäisyyttä vikapaikkaan. Rele laskee sijoituspaikan ja vikapaikan välisen impedanssin suojattavassa johdossa esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla. Mittaustiedot tulevat virta- ja jännitemuuntajilta. Rele toimii, kun impedanssin arvo alittaa asetelluarvon. Impedanssin arvo on sitä pienempi, mitä lähempänä vika on johdon alkupäätä. (Elovaara & Haarla 2011)

Distanssirelettä käytetään silmukoidussa verkossa, koska se pystyy havaitsemaan virran suunnan. Vian suunnan rele päättelee jännitteen ja virran vaihesiirtokulman avulla. Silmukoidussa verkossa pienin vikavirta on yleensä kuormitusvirtaa suurempi ja vikavirta voi tulla mistä suunnasta tahansa. Tällöin selektiivistä suojausta ei voida toteuttaa ylivirtareille. (Elovaara & Haarla 2011)

3.2.5 Differentiaalirele

Differentiaalirele eli erovirtarele toimii, kun suojattavan kohteen tulevien ja lähtevien virtojen erotus on releen asetteluarvoa suurempi. Virran mittausta tapahtuu kohteen tulo- ja lähtöpuolella olevilla virtamuuntajilla. Terveessä tilassa virrat kulkevat suojausalueen läpi, jolloin virtojen summa on nolla. Vian ollessa päällä virta ei mene suojattavan alueen läpi ja ulkopuolelta tulevat vikavirrat tulevat alueelle. Tällöin releen mitattavien virtojen summa ei ole nolla ja rele toimii. Rele pystyy suojaamaan vain alueen, jonka virtoja vertaillaan, eikä se pysty toimimaan muiden alueiden varasuojana distanssireleen tapaisesti. Differentiaalisuojauksen periaate selviää kuvassa 8. (Elovaara & Haarla 2011)



KUVA 8. Differentiaalireleen toimintaperiaate (ABB 2000)

Differentiaalirele on muuntajan tärkein suojarle, sillä se voi havaita sellaiset oikosulut, maasulut, käämisulut ja kierrossulut, jotka aiheuttavat virtamuuntajiin tarpeeksi suuren erovirran. Relettä voidaan myös käyttää yksinkertaisten kiskojärjestelmien suojauksessa. Differentiaalireleen toiminta-aika on noin 30 ms, eikä siinä käytetä hidastusta. (Elovaara & Haarla 2011b)

3.2.6 Nollavirtarele ja suunnattu maasulkurele

Nollavirtarele on ylivirtarele, jonka tarkoitus on toimia maasulussa. Se mittaa virtamuuntajien toisiokäämeistä vaihevirtojen summavirtaa ja sen toiminta-aika ilman hidastusta on

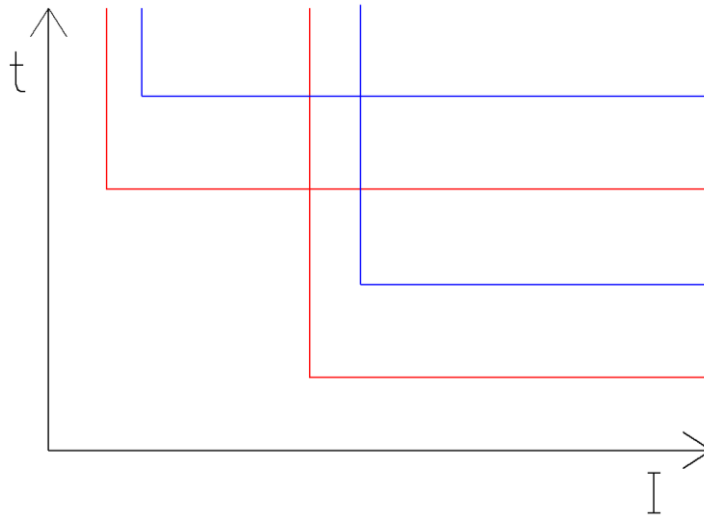
sama kuin normaalilla ylivirtareleellä. Johdonsuojina käytettävät nollavirtareleet voivat olla joko herkkiä tai karkeita, eivätkä ne tunnista vikavirran suuntaa. Herkän releen virta-asettelu on pieni ja hidastus suuri. Karkean releen asettelut määritellään vikalaskelmien avulla ja niissä käytetään lyhyttä hidastusta. Nykyaikaisissa prosessorireleissä on kaksi porrasta, joten nämä toiminnot voivat sisältyä samaan laitteeseen. (Elovaara & Haarla 2011b)

Suunnattu maasulkurele on nollavirtarele, joka vikavirran lisäksi mittaa myös vian suunnan käyttämällä hyväksi nollavirran ja nollajännitteen välistä vaihekulmaa. Suuntareleiden suurena etuna nollavirtareleisiin verrattuna on niiden asettelujen riippumattomuus johtojen pituuksista varsin laajalle alueelle. Tästä syystä suojaus säilyttää selektiivisyytensä ilman asettelujen muutoksia myös esimerkiksi kytkettäessä varasyöttö. Suuntareleiden oikean toiminnan ehtona on, että virtamuuntajista katsottuna verkon puolella on tarpeeksi maakapasitanssia releen havahtumiskynnyksen ylittävän nollavirran aikaansaamiseksi. (Mörsky 1993)

Suunnatun maasulkusuojauksen asettelut tehdään aina sen mukaan, minkälainen kohde on suojattavana. Johtolähdön suojaus voidaan toteuttaa kaksiportaisesti niin, että alemman toimintaportaan havahtuminen toimii ainoastaan hälyttävänä ja ylemmän toimintaportaan havahtuminen laukaisevana toimintona. Asetteluihin vaikuttaa oleellisesti myös herkkyysvaatimus, eli minkä suuruiset vikaresistanssit halutaan havaita. Virta-asettelujen kannalta haastavin tilanne syntyy, kun verkkotilanne on suppein mahdollinen ja herkkyysvaatimus suuri. Tällaisessa tilanteessa maasulkuvirta on pienin mahdollinen. (ABB 2000)

3.3 Selektiivisyys

Aikahidastuksen avulla varmistetaan suojareleiden selektiivinen toiminta. Nykyaikaisilla releillä minimi aikaeron on oltava vähintään 150 ms, elektronisilla releillä 300 ms ja mekaanisilla releillä 500 ms. Kuvassa 9 on esitetty suojareleiden selektiivisen asettelu periaate. (Lakervi & Partanen 2008)



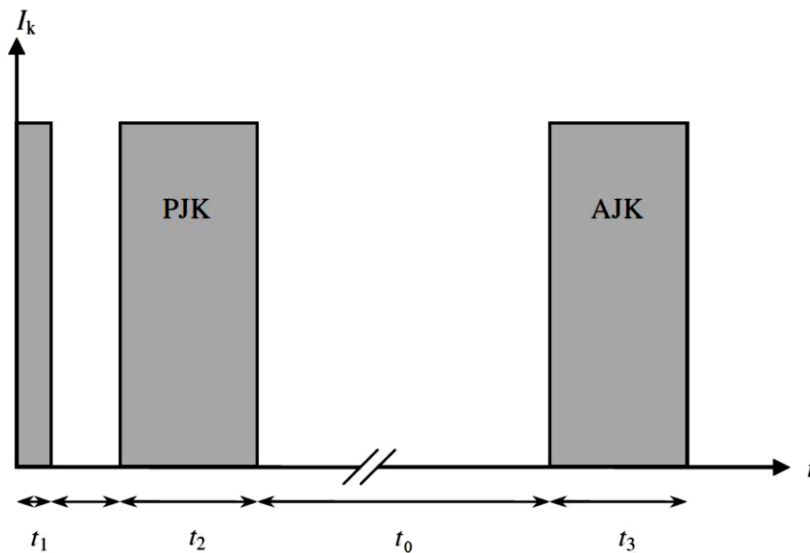
KUVA 9. Suojareleiden selektiivisen asettelun periaate

Punainen toimintakäyrä kuvaa maastokatkaisijan asettelua ja sininen toimintakäyrä kuvaa johtolähdön alkupään katkaisijan asettelua. Suojauksen selektiivisyys toteutuu, sillä maastokatkaisija toimii kaikilla vikavirran arvoilla ennen johtolähdön alkupään katkaisijaa.

3.4 Jälleenkytkentäsekvenssit

Keskijänniteverkon suojauksessa käytetään automaattisia jälleenkytkentöjä avojohtoviojen jälkeen, sillä suurin osa avojohtovioista on ohimeneviä eli vika yleensä poistuu lyhyen jännitteettömän ajan kuluttua. Jännitteettömän ajan aikana esimerkiksi salaman aiheuttama valokaari ehtii sammua ja ilmavälin jännitekestoisuus palautuu riittäväksi, jolloin johdolle voidaan palauttaa jännite melko nopeasti. (Elovaara & Haarla 2011b)

Jälleenkytkentä tarkoittaa katkaisijan automaattista kiinnikykentää suojareleen tekemän aukiohjauksen jälkeen. Suomessa avojohtoverkoissa käytetään yleisesti pika- ja aikajälleenkytkentää. Kuvassa 10 on esitetty periaatteellinen kuva jälleenkytkennöistä. (Elovaara & Haarla 2011b)



KUVA 10. Jälleenkytkentäsekvenssi (Simonen 2006)

Ennen pikajälleenkytkentää (PJK) tarvitaan lyhyt jännitteetön aika, koska ionisoituneen ilman jännitelujuus ei välttämättä ole riittävä. Jännitteettömän ajan pituus riippuu verkon jännitetasosta ja se on tyypillisesti 0,3 - 0,7 sekuntia. Epäonnistuneen pikajälleenkytkennän jälkeen suoritetaan aikajälleenkytkentä (AJK). Jälleenkytkentöjen välinen aika on tyypillisesti 30 - 60 sekuntia. Jos vika ei aikajälleenkytkennän jälkeen ole poistunut, seuraa lopullinen laukaisu ja vika todetaan pysyväksi. (Elovaara & Haarla 2011b; Network protection and automation guide 2011)

4 SÄHKÖVERKON VIAT JA NIIDEN LASKENTA

4.1 Oikosulku

Oikosulku voi syntyä jakeluverkon virtapiiriin eristysvian tai ulkoisen kosketuksen takia. Virtapiiri voi sulkeutua suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi olla kaksi- tai kolmivaiheinen, tai se voi sattua vaihejohtimen ja maan välille. Oikosulkuvirta on tyypillisesti kuormitusvirtaa suurempi. Viat voivat aiheuttaa johtojen ja laitteiden liiallista lämpenemistä, häiriöitä sähkönjakeluun ja pahimmassa tapauksessa henkilövahinkoja. Näiden syiden vuoksi vioittunut virtapiirin osa kytetään irti järjestelmästä rele- tai sulakesuojauksella. (Lakervi & Partanen 2008)

Suurimman vikavirran kolmivaihejärjestelmässä aiheuttaa yleensä 3-vaiheinen oikosulku. Oikosulkuvirta on usein 10 – 40 -kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan nähden. Suojausautomaatiikan on toimittava tarpeeksi nopeasti, etteivät laitteet vaurioituisi. Verkon vikojen nopea laukaisu on tarpeen myös voimajärjestelmän stabiiliuden kannalta. (Elovaara & Haarla 2011a)

Kolmivaiheinen vikaimpedanssiton oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 2, kun tunnetaan verkon vaihejännite vikakohdassa ennen vikaa ja verkon impedanssi. Jos vikaimpedanssi ei ole nolla, käytetään kaavaa 3. (ABB 2000)

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (2)$$

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_k + Z_f)} \quad (3)$$

, jossa

c on taulukon 1 mukainen jännitekerroin

U_n on vikakohdan vaihejännite ennen vikaa

Z_k on verkon impedanssi vikakohdasta laskettuna

Z_f on vikaimpedanssi

Kaavoissa 2 ja 3 käytetty jännitekerroin c on peräisin IEC 60909-0 standardista. Kertoimen arvot on esitetty taulukossa 2. Laskettaessa oikosulkuvirran minimi- ja maksimiarvoa käytetään eri jännitekertoimen arvoja.

TAULUKKO 2. IEC 60909-0 mukainen jännitekerroin (ABB 2000)

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta C_{max}	Minimioikosulkuvirta 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

Verkon impedanssin Z_k laskennassa tulee huomioida syöttävän verkon, muuntajan ja johtimien impedanssit. Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa oletetaan vikaimpedanssi yleensä nolllaksi. (ABB 2000)

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3} voidaan määrittää myös kaavalla 4, kun tiedetään verkon ominaisoikosulkuteho S_k . (ABB 2000)

$$I_{k3} = \frac{c \cdot S_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (4)$$

, jossa

c on jännitekerroin

S_k on ominaisoikosulkuteho

U_n on vikakohdan vaihejännite

Kahden vaihejohtimen välisen eli kaksivaiheisen oikosulun aiheuttama oikosulkuvirta I_{k2} saadaan laskettua kaavalla 5. (ABB 2000)

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3} \quad (5)$$

, jossa

I_{k2} on kaksivaiheinen oikosulkuvirta

I_{k3} on kolmivaiheinen oikosulkuvirta

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

Suojaus tulee asetella niin, että suojaus toimii luetettavasti pienimmällä suojausalueella esiintyvällä oikosulkuvirralla. Pienintä vikavirtaa laskettaessa tulee huomioida kaikki vikavirtaa pienentävät tekijät, kuten kytkentätilanteet, verkkojännite ja vikatyypit. Asetteluarvoissa tulee myös huomioida verkon suurin kuormitusvirta ja verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet. Suojaus ei saa toimia verkon suurimmalla kuormitusvirralla, kytkentävirtasykäyksistä, moottorien käynnistysvirroista tai hetkellisistä ylivirtatilanteista. Releiden asetteluarvot on valittava niin, ettei verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet ylity. (ABB 2000)

Oikosulkukestoisuutta tarkastellessa on huomioitava mahdollisen pikajälleenkytkennän vaikutus. Johtimia lämmittävä aika on pikajälleenkytkentää edeltävän ja sen jälkeisen oikosulkujen kestojen summa. Ekvivalentin vaikutusajan saa laskettua kaavalla 6. (Lakervi & Partanen 2008)

$$t = t_1 * e^{-\frac{t_0}{\tau}} + t_2 \quad (6)$$

, jossa

t on oikosulun kestoaika ennen ajk:n jännitteetöntä aikaa

t_0 on ajk:n jännitteetön aika

τ on johtimen jäähtymisvakio

t_2 on ajk:n jälkeinen oikosulun kestoaika

Kun oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika tiedetään, voidaan kyseisen vaikutusajan mukainen oikosulkukestoisuus laskea kaavalla 7. (Lakervi & Partanen 2008)

$$I_{kt} = \frac{I_k}{\sqrt{t/s}} \quad (7)$$

, jossa

t on oikosulun kesto aika

I_k on johtimen 1 s oikosulkuvirta

4.2 Impedanssin määrittäminen

Keskijänniteverkon kokonaisimpedanssia laskettaessa on syöttävän verkon ja vikaimpedanssin lisäksi tärkeää huomioida muuntajan ja sitä syöttävän suurjänniteverkon vaikutus impedanssin suuruuteen. Muuntajan vaikutus verkon kokonaisimpedanssiin voidaan laskea muuntajan kilpiarvojen avulla kaavalla 8.

$$Z_k = z_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (8)$$

, jossa

z_k on muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

U_n on verkon nimellisjännite

S_n on muuntajan nimellisteho

Suurjänniteverkon vaikutus keskijänniteverkon oikosulkuimpedanssiin voidaan laskea kaavalla 9. (Lakervi & Partanen 2008)

$$X_k = \frac{U_n^2}{S_k} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (9)$$

, jossa

U_n on verkon nimellisjännite

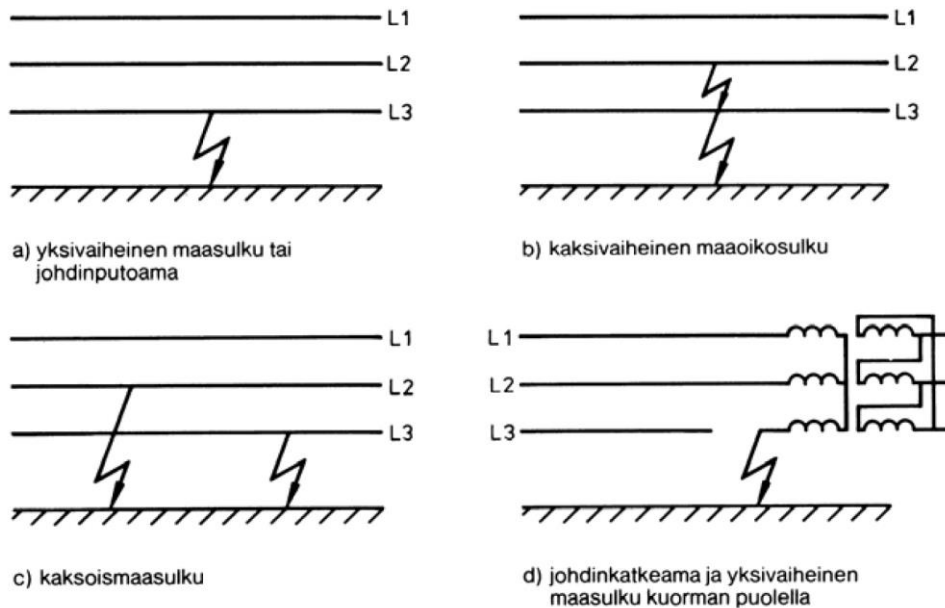
S_k on verkon oikosulkuteho

U_1 on muuntajan ensiöjännite

U_2 on muuntajan toisiojännite

4.3 Maasulku

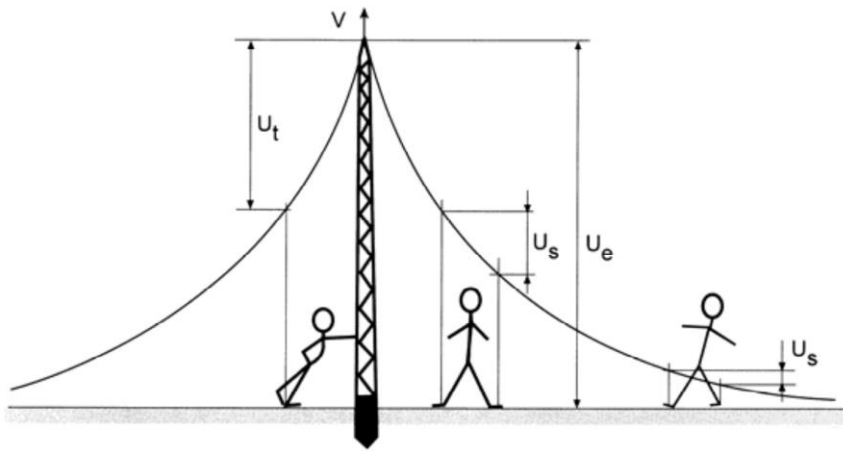
Maasululla tarkoitetaan vikaa, joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin pienentymisestä alle määrätyn raja-arvon. Maasulkuviat voidaan jakaa neljään ryhmään, jotka on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Maasulkutilanteet (Partanen 2011)

Maasulku voi olla yksi- tai monivaiheinen. Yleisin maasulkutilanne on yhden vaihejohtimen ja maapotentiaalin välille muodostuva yksivaiheinen maasulku. Kaksois- tai monivaiheisessa maasulussa kahdella tai useammalla vaihejohtimella on maahan nähden eristysvika verkon eri kohdissa. Mikäli monivaiheinen maasulku sattuu samaan verkon kohtaan siten, että virtajohtimien välille syntyy johtava yhteys ja osa vikavirrasta kulkee maan kautta, kutsutaan sitä maaikosuluksi. (Lakervi & Partanen 2008)

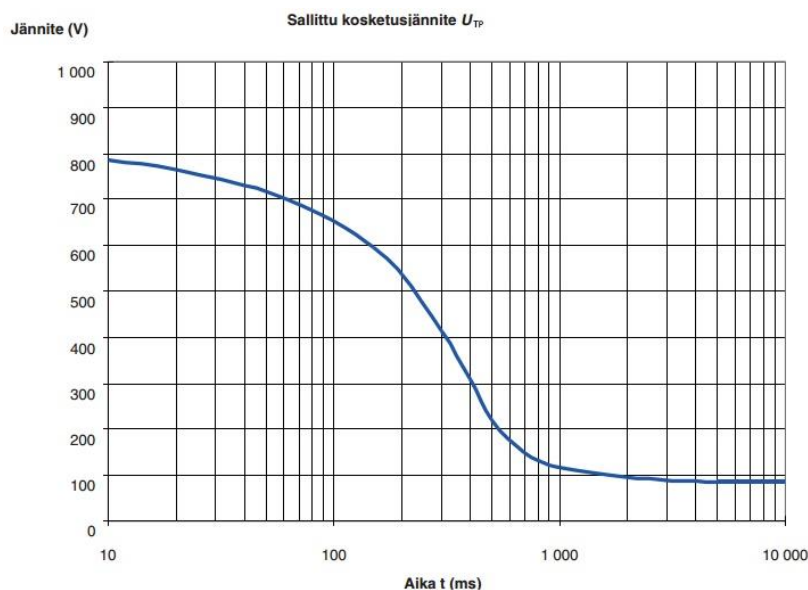
Terveessä tilassa olevan verkon vaihejännitteet ovat symmetrisiä maahan nähden, eli niiden summa on nolla. Maasulkutilanteessa verkon kaikkien vaiheiden jännitteet ja tähtipisteen ja maan välinen jännite muuttuvat. Epäsymmetriasta huolimatta voidaan verkon käyttöä jatkaa, jos on varmistuttu siitä, että maasulkupaikka ei aiheuta vaaraa hengelle tai omaisuudelle. Maasulkuvirrat ovat yleensä kuormitusvirtaa pienempiä, mutta ne aiheuttavat vaarallisia kosketusjännitteitä, joiden syntyminen selviää kuvasta 12. (Elovaara & Haarla 2011a)



KUVA 12. Kosketusjännitteen syntyminen. (Partanen 2011)

Maasulku aiheuttaa vikakohtaa ympäröivän maanpinnan potentiaalin V kohoamisen. Vian seurauksena vikavirta kulkee jonkin suuruisen maadoitusresistanssin läpi, johon syntyy maadoitusjännite U_e . Maadoitusjännite on vikapaikan ja äärettömän kaukana olevan todellisen maapotentiaalin välinen jännite. Kosketusjännite U_t on kosketeltavissa oleva osa maadoitusjännitteestä. Askeljännite U_s tarkoittaa puolestaan jalkojen välille syntyvää kehoon vaikuttavaa jännitettä. (Partanen 2011)

Maasulkusuojauksella pyritään estämään vaaralliset kosketusjännitteet verkon vikatilanteissa. Standardi SFS 6001 määrittelee sallitut kosketusjännitteiden U_{Tp} arvot erilaisille asennuksille. Kuvassa 13 on esitetty Sallitut kosketusjännitteen arvot virran kestoajan funktiona. (SFS 6001)



KUVA 13. Sallittu kosketusjännite virran kestoajan funktiona (SFS 6001)

Käyrä esittää jännitteen arvoa, joka voi esiintyä ihmiskehon yli paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin. Mikäli virran kestoaika on huomattavasti pidempi kuin 10 s, voidaan sallittuna kosketusjännitteen arvona käyttää 80 V. Maadoitusjännite U_e ei kuitenkaan saa ylittää yhtälön 10 mukaisia arvoja. (SFS 6001; Lakervi & Partanen 2008)

$$U_e \leq k \cdot U_{TP} \quad (10)$$

, jossa

U_e on maadoitusjännite

k on maadoituskerroin

U_{TP} on sallittu kosketusjännitteen arvo

Kerroin k määritetään riippuen maadoitusten rakenteesta ja toteutuksesta. Tavoitetasoisessa keskijänniteverkossa käytetään kerrointa 2. Jos teknisten tai taloudellisten seikkojen vuoksi ei tavoitetasoa voida saavuttaa, käytetään kerrointa 4. Ehtoina suuremman arvon käyttämiselle ovat huonot maadoitusolosuhteet, muuntamolle tehtävä potentiaalinhojaus tai jokaisen pienjännitejohtohaaran maadoittaminen pituudesta riippumatta. (Lakervi & Partanen 2008)

Maadoitusjännitteen U_e suuruus määräytyy maasulkuvirrasta I_e ja maadoitusresistanssin R_e suuruuden mukaan kaavalla 11.

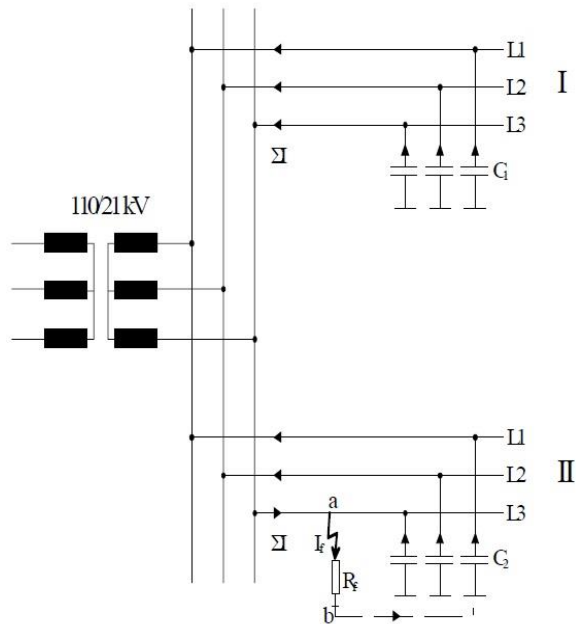
$$U_e = I_e \cdot R_e \quad (11)$$

Standardin vaatimukset voidaan täyttää maadoituksia parantamalla, lyhentämällä maasulkusuojauksen toiminta-aikaa tai pienentämällä maasulkuvirtaa. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää jakamalla verkkoa galvaanisesti pienempiin osiin useammalle eri päämuuntajalle tai käyttämällä maasulkuvirran kompensointia. (Lakervi & Partanen 2008)

4.3.1 Maasulkuvirtojen laskenta maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetulla verkolla tarkoitetaan järjestelmää, jonka tähtipistettä ei ole maadoitettu. Kuva 14 esittää yksivaiheista maasulkutilannetta maasta erotetussa verkossa. Maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta maahan johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien

impedanssien kautta muuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. (Lakervi & Partanen 2008)



KUVA 14. Maasulku maasta erotetussa verkossa (Partanen 2011)

Maasulkuvirtaa laskettaessa johtimien ja muuntajakäämien impedanssit voidaan olettaa nolliksi, sillä niiden suuruus on vaihejohtimien maakapasitansseihin nähden hyvin pieni. Laskentakaavoina on käytetty ABB TTT -käsikirjan kaavoja. (ABB 2000; Lakervi & Partanen 2008)

Maasulkuvirta I_e voidaan vikaresistanssittomassa tilanteessa laskea kaavalla 12.

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (12)$$

, jossa

U on verkon pääjännite

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

ω on kulmataajuus

Maasulun tapahtuessa vikaresistanssin R_f kautta, pienentyy maasulkuvirta vikapaikan resistanssin kasvaessa. Maasulkuvirran I_{ef} arvo saadaan tällöin laskettua kaavalla 13.

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1 + (\sqrt{3}\omega C_0 R_f)^2}} \cdot U \quad (13)$$

, jossa

U on verkon pääjännite

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

ω on kulmataajuus

R_f on vikaresistanssi

Tunnettaessa maasulkuvirta suorassa maasulussa, voidaan edellinen kaava johtaa kaavan 14 muotoon.

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U} R_f\right)^2}} \quad (14)$$

Maasulku aiheuttaa nollapisteen ja maan välille jännite-eron. Tätä jännitettä kutsutaan nollajännitteeksi U_0 ja se voidaan laskea kaavalla 15.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\sqrt{3}\omega C_0 R_f)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

, jossa

R_f on vikaresistanssi

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

ω on kulmataajuus

U on verkon pääjännite

Edellä esitetyillä kaavoilla saadaan laskettua viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirta ei sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta. Taustaverkon syöttämä maasulkuvirta eli summavirta saadaan laskettua kaavalla 16.

$$U_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} \cdot I_{ef} \quad (16)$$

, jossa

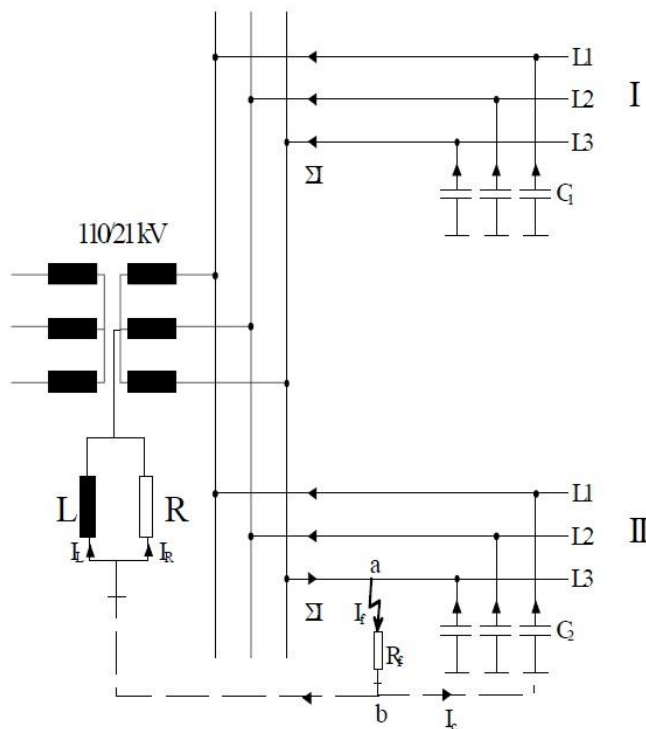
C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

C_{0j} on suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi

I_{ef} on johdon vikaresistanssista vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta

4.3.2 Maasulkuvirtojen laskenta kompensoidussa verkossa

Kuva 15 esittää yksivaiheista maasulkutilannetta kompensoidussa verkossa. Kompensoidussa verkossa on tähtipisteeseen kytketty maakapasitanssit kompensoiva reaktori, jota kutsutaan sammutuskuristimeksi. Sammutuskuristimen avulla saadaan maasulkuvirtaa pienennetyksi ja vikapaikkaan palaavaa jännitettä loivennettua. (Elovaara & Haarla 2011)



KUVA 15. Maasulku kompensoidussa verkossa. (Partanen 2011)

Maasulkuvirta voidaan tässä tapauksessa laskea kaavalla 17.

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

, jossa

U on verkon pääjännite

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikaresistanssi

R_0 on kompensointikelan ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kelan toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu resistanssi

ωL on kompensointikelan reaktanssi

Nollajännite muodostuu maasulkuvirran, verkon maakapasitanssien, kelan induktanssin ja häviöresistanssien rinnankytkennän impedanssien tulosta. Kompensoidussa verkossa nollajännite saadaan laskettua kaavalla 18.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \cdot I_{ef} \quad (18)$$

, jossa

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

R_f on vikaresistanssi

R_0 on kompensointikelan ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kelan toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu resistanssi

ωL on kompensointikelan reaktanssi

Täysin kompensoidussa verkossa kaavat sievenevät muotoihin 19 ja 20

$$I_{ef} = \frac{1}{R_f + R_0} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \cdot I_{ef} \quad (20)$$

Käytännössä kompensoidut verkot ovat Suomessa vain osittain kompensoituja. Kompensoinnin määrää kuvataan ns. kompensointiasteella K , joka voidaan laskea kaavalla 21

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (21)$$

, jossa

I_L on kuristimen virta suorassa maasulussa

I_C on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

Kompensointiasteen kertoimen ollessa yksi tai lähellä sitä, on verkko täysin kompensoitu eli sammutettu. Ylikompensoidussa verkossa K :n arvo on suurempi kuin yksi ja alikompensoidussa pienempi kuin yksi. Käytännössä Suomen kompensoiduissa verkoissa kompensointiaste on noin 80 – 95 %. (ABB 2000)

5 LASKENTAOHJELMA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Sähkölandia Oy:n käyttöön helppokäyttöinen laskentatyökalu, joka toimisi keskijänniteverkon suojareleasettelujen määrityksen tukena. Laskentatyökalulla haluttiin määrittää keskijänniteverkon ylivirta- ja maasulkuasetteluarvot sähköaseman suojareleille.

Laskentapohja on jaettu kolmelle eri välilehdelle. Ensimmäisellä välilehdellä on ylivirtalaskenta, toisella välilehdellä maasulkulaskenta maasta erotetussa verkossa ja viimeisellä välilehdellä on maasulkulaskenta sammutetussa verkossa. Johtojen ja kaapeleiden maakapasitanssiarvoina käytettiin SA 5:94 -verkostosuosituksista saatavia arvoja. (Verkostosuositus SA 5:94 1994)

Jokaisessa osiossa syötetään laskentapohjaan tiedossa olevat lähtöarvot, joiden perusteella työkalu laskee erinäisiä tuloksia. Ylivirtalaskennassa tarvittavia tietoja ovat syöttävän 110 kV verkon tiedot, päämuuntajan tiedot sekä jokaisen 20 kV lähdön tiedot. Laskentatuloksena saadaan oikosulkuvirran minimi- ja maksimiarvot sähköaseman kiskotossa ja 20 kV lähtöjen päissä. Saatuja tuloksia voidaan käyttää suojauksen ylivirta-asettelujen määritykseen.

Maasta erotetun verkon maasulkulaskennassa tarvittavia lähtöarvoja ovat syöttävän 110 kV verkon tiedot sekä jokaisen 20 kV lähdön tiedot. Laskentatuloksena saadaan maasulkuvirran, nollajännitteen sekä maadoitusjännitteen arvoja. Laskentaa voidaan tehdä eri vika- ja maadoitusresistanssin arvoilla.

Sammutetussa verkossa tarvitaan edellisen kappaleen tietojen lisäksi verkon kompensointiaste. Laskentatuloksena saadaan maasulkuvirran, nollajännitteen ja maadoitusjännitteen arvoja. Myös tässä osiossa voidaan laskentaa tehdä eri vika- ja maadoitusresistanssin arvoilla.

Kuvat toteutuneesta laskentatyökalusta löytyvät liitteistä 1. Työkalun kansilehdelle saadaan yksilöityä mitä sähköasemaa laskenta koskee ja kuka laskennan on suorittanut. Myös laskettavan verkon topologia selviää kansilehdeltä. Liitteet on poistettu opinnäytetyön julkisesta osuudesta salassapitosopimukseen vedoten.

6 POHDINTA

Opinnäytetyössä rakennettiin Sähkölandia Oy:n sähköasemaosastolle laskentatyökalu, jonka avulla voidaan määrittää keskijänniteverkon suojarleasetteluja. Työkalulla pystytään laskemaan eri vikatilanteissa esiintyviä vikavirtoja ja -jännitteitä niin sammutetussa kuin maasta erotetussa verkossa. Lisäksi laskentaohjelman rinnalle tuotettiin ohjeistus suojarleasettelujen määrittämiseksi.

Työn alussa käsitellään sähköasemaa ja keskijänniteverkon suojausta yleisellä tasolla. Lisäksi opinnäytetyössä on selitetty sähköverkoissa esiintyviä vikoja ja niiden taustalla olevaan laskentaan liittyvää teoriaa. Työn lopussa on kerrottu pinnallisesti toteutuneesta laskentatyökalusta. Itse laskentatyökalu ja suojarleiden asetteluohjeet ovat liitteessä 1. Edellä mainitut on tarkoitettu ainoastaan Sähkölandia Oy:n käyttöön. Työkalun toteuttamisessa vaativinta oli sammutetun verkon maasulkulaskelmien toteutus. Lopulta laskenta saatiin senkin osalta toimimaan järkevästi.

Työ oli varsin mielenkiintoinen projekti, sillä se liittyi läheisesti koulutukseeni. Laajan aiheen vuoksi aikaa kului paljon erilaisten asioiden selvittämiseen ja käsitteisiin perehtymiseen. Tämän ansiosta sain hyvän kokonaiskuvan sähköjakelujärjestelmän toiminnasta. Toivon, että toteutuneesta työkalusta olisi mahdollisimman paljon hyötyä sähköasemasuunnittelussa.

Laskentatyökalua voisi tulevaisuudessa vielä kehittää esimerkiksi ulkoasun ja käyttöohjeiden parantelulla. Lisäksi laskentaa olisi mahdollista laajentaa muihin sähköaseman suunnitteluun liittyviin laskelmiin, kuten häviö- ja varavoimalaskentaan.

LÄHTEET

ABB Oy. 1998. Sähköasema-automaatio ja suojarleet luentomateriaali

ABB Oy. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt

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

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

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

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto

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

Mörsky, J. 1993. Relesuojaustekniikka. Hämeenlinna: Otatieto

Network Protection & Automation Guide. 2011. Alstom

Partanen, J. 2011. Sähkönjakelutekniikka luentomateriaali.

SFS 6001. Suurjännitesähköasennukset.

Simonen, M. 2006. Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet. Diplomityö.

Vamp Oy. 2016. VAMP 255 User manual.

VERKOSTOSUOSITUS SA 5:94 1994. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.

LIITTEET

Liite 1. Laskentatyökalu ja suojareleasettelujen määrittämisohje

(8 sivua, poistettu salassapitosopimuksen vuoksi)