

Miikka Pihlaja

KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS VAKKA-SUOMEN VOIMA
OY:N VERKOSSA

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2016

KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS VAKKA-SUOMEN VOIMA OY:N VERKOSSA

Pihlaja, Miikka
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Marraskuu 2016
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 101
Liitteitä:

Asiasanat: keskijänniteverkko, oikosulku, maasulku, relesuojaus, maadoitustapa, suojareleasettelu, suojauskaavio

Tämän opinnäytetyö tarkoituksena oli tutkia keskijänniteverkon oiko- ja maasulkusuojausta. Työssä perehdyttiin edellä mainittujen vikailmiöiden teorioihin, relesuojaukseen ja relesuojauksen asetteluihin sekä niiden mitoittamisperiaatteisiin. Vikailmiöiden teoriaosuudessa perehdyttiin niiden erilaisiin muotoihin, erityispiirteisiin, aiheuttajiin ja havainnointitekniikoihin erilaisilla tavoilla. Osuudessa käsiteltiin lyhyesti myös verkon erilaisia maadoitustapoja. Relesuojauksen teoriaosuudessa käsiteltiin yleisimmät suojareletyypit, joita käytetään keskijänniteverkon oiko- ja maasulkusuojauksessa. Osuudessa käsiteltiin myös suojareleasetteluihin liittyvää teoriaa sekä niiden mitoittamisperiaatteita.

Opinnäytetyön tilaaja tarvitsi keskijänniteverkkonsa lähtöjen suojareleasetteluiden tarkistuksen. Verkkoa kehitetään ja laajennetaan jatkuvasti, mistä syystä verkko muuttuu fyysisesti. Tämän seurauksena suojareleasetteluita pitää jatkuvasti päivittää vastaamaan nykypäivän standardivaatimuksia. Työn tarkoituksena oli korjata tarkastuksen aikana mahdollisesti havaittuja virheitä ja puutteita keskijänniteverkon suojareleasetteluissa. Lisäksi luotiin suojauskaavio Microsoft Excel ohjelmalla, jonka tarkoitus oli helpottaa releasettelujen esitystä, tarkistusta ja mitoitusta.

MEDIUM VOLTAGE POWER GRID PROTECTION IN VAKKA-SUOMEN VOIMA OY GRID

Pihlaja, Miikka

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

November 2016

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 101

Appendices:

Keywords: medium voltage power grid, short circuit, earth fault, relay protection, grounding habit, relay protection adjustment, protection chart

The purpose of this thesis was to investigate short circuit- and earth fault protection in medium voltage power grid. In the work, the theory of above-mentioned fault phenomena, relay protection and adjustment of them were familiarized. In theory part of fault phenomena, the different forms-, special characteristics-, causes- and observation techniques of them were familiarized. In this part there was also short brief of different grid grounding habits. In theory part of relay protection, the most common relay types which are used in medium voltage power grid for short circuit- and earth fault protection were familiarized. In this part there was also brief of relay protection adjustments.

The orderer of this thesis needed investigation of their medium voltage power grid relay protection adjustments. The grid is constantly being developed and expanded which is the cause for grid being changed physically. As result of this the relay protection adjustments needs to be continuously updated to meet present-day standard demands. The purpose of this work was to readjust false adjustments of grid relay protection. Along with everything else, protection chart was created with Microsoft Excel. Purpose of this chart was to ease presenting, checking and adjusting relay protection parameters.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	VSV-KONSERNI	8
2.1	Vakka-Suomen Voima Oy	8
2.2	VSV-Energia Oy	8
2.3	VERTEK Oy	9
2.4	Suunnittelutoimisto Enertel Oy.....	9
2.5	Lännen Omavoima Oy	9
2.6	Satavakka Oy	9
3	OIKOSULKU.....	10
3.1	Yleistä	10
3.2	Oikosulkutyypit.....	11
3.2.1	2-vaiheinen oikosulku	11
3.2.2	3-vaiheinen oikosulku	12
3.3	Oikosulkujen aiheuttamat voimat	13
3.3.1	Terminen rasitus	14
3.3.2	Dynaaminen rasitus	14
3.4	Oikosulkuvirran luonne	15
3.5	Oikosulkuvirtojen rajoittaminen	17
3.6	Oikosulkuvirran tilat	17
4	MAASULKU	19
4.1	Yleistä	19
4.2	Maadoitus.....	21
4.3	Maadoitusjännite.....	24
4.4	Maasulkuvirta ja nollajännite.....	28
4.4.1	Maasta erotettu verkko	30
4.4.2	Sammutettu verkko.....	32
4.5	Maasulkutyypit	35
4.5.1	Yksivaiheinen maasulku.....	35
4.5.2	Kaksi- ja kolmivaiheinen maaosulku	35
4.5.3	Kaksois- tai kolmoismaasulku.....	36
4.5.4	Maasulku ja johdinkatkos.....	37
4.5.5	Katkeileva maasulku	39
4.6	Maasta erotettu verkko.....	39
4.7	Sammutettu verkko	42
5	KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS.....	47
5.1	Suojareleistys	47

5.1.1	Ylivirtarele	50
5.1.2	Nollavirtarele	51
5.1.3	Nollajänniterele	52
5.1.4	Suunnattu maasulkurele.....	52
5.1.5	Distanssirele	52
5.1.6	Differentiaalirele.....	53
5.2	Suojalaitteet.....	54
5.2.1	Mittamuuntaja	54
5.2.2	Katkaisija	54
5.2.3	Apuenergialähde.....	54
5.2.4	Hälytys- ja raportointikeskus.....	55
5.2.5	Tiedonsiirto	55
5.3	Selektiivisyys	55
5.4	Jälleenkytkentäsekvenssit	57
6	OIKOSULKUSUOJAUS	59
6.1.1	Säteittäisen verkon oikosulkusuojaus.....	61
6.1.2	Silmukoidun verkon oikosulkusuojaus.....	62
6.1.3	Suojausportaiden määrittäminen.....	63
6.1.4	Laukaisuvirtojen määrittäminen	64
6.1.5	Laukaisuaikojen määrittäminen.....	68
6.1.6	Jälleenkytkentöjen määrittäminen	69
6.1.7	Jännitteettömien aikojen määrittäminen	70
7	MAASULKUSUOJAUS.....	71
7.1	Yleishälytys.....	73
7.2	Maasulkusuojaus maasta erotetussa verkossa.....	76
7.2.1	Suojausportaiden määrittäminen.....	79
7.2.2	Laukaisukriteerien määrittäminen	81
7.2.3	Laukaisuaikojen määrittäminen	83
7.2.4	Jälleenkytkentöjen määrittäminen	84
7.2.5	Tausta-asettelut.....	85
7.2.6	Nollavirtasuojaus.....	85
7.2.7	Erovirtasuojaus	87
7.2.8	Jännitteettömien aikojen määrittäminen	88
7.3	Maasulkusuojaus sammutetussa verkossa	88
7.3.1	Laukaisukriteerien määrittäminen	90
7.3.2	Laukaisuaikojen määrittäminen	91
8	SUOJAUSKAAVIO.....	93
8.1	Kuvaus	93

8.2	Oikosulkusuojaus.....	93
8.3	Maasulkusuojaus.....	95
9	YHTEENVETO	97
	LÄHTEET.....	101

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan keskijänniteverkon suojausta. Opinnäytetyö tehdään Vakka-Suomen Voima Oy:n tilaamana sekä myös heidän jakeluverkossaan. Työssä perehdytään keskijänniteverkon suojaukseen ja sitä koskevien suojareleiden asettelu-parametreihin. Työhön kuuluu sekä oiko- että maasulkuun liittyvien teorioiden opiskelu, keskijänniteverkon suojaukseen liittyvän teorian opiskelu, verkon suojauskaavion luominen Microsoft Excelillä sekä verkon ylivirta- ja maasulkusuojausasettelujen tarkastelu.

Aluksi käsitellään oiko- ja maasulkuilmiöiden teorialaajia. Teoriaosuuden aikana tutkitaan myös näihin ilmiöihin kohdistuvia standardeja ja lakeja sekä niiden esittämiä vaatimuksia. Ilmiöiden teorian käsittelyn jälkeen perehdytään keskijänniteverkon suojaukseen sekä siihen liittyvään suojareleistykseen. Viimeisessä teoriaosuudessa määritetään releasettelujen mitoittamisperiaatteet. Seuraavaksi luodaan Microsoft Excel ohjelmalla keskijänniteverkon suojauskaavio. Kaavion tarkoituksena on helpottaa releasettelujen esitystä, tarkistusta sekä mitoitusta. Työn viimeisenä osana tutkitaan Vakka-Suomen Voima Oy:n verkon keskijännitelähtöjen suojareleasetteluja oiko- ja maasulun osalta sekä tarkistetaan niiden oikeellisuus. Tutkittavat asetellut oikosulun osalta ovat ylivirrat, toiminta-ajat, jälleenkytkennät ja selektiivisyys. Maasulun osalta tutkitaan suojareleasetteluja sekä sammutetussa että maasta erotetussa verkossa. Tutkittavat asetellut maasulun osalta ovat nollajännitteet, nollavirrat, toiminta-ajat, jälleenkytkennät ja selektiivisyys. Laskennat suoritetaan pääasiassa Trimble NIS ohjelmistosta löytyvillä laskentaohjelmilla. Kaikkien tarkasteltavien suojareleasetteluiden standardi- ja lakivaatimusten vastaavuus tarkistetaan työtä tehdessä.

Hyvin toteutetulla keskijänniteverkon oiko- ja maasulkusuojausella voidaan estää viikatilanteiden aiheuttamia vaaroja ja haittoja. Näitä ovat esim. henkilö- ja eläinvahingot, johtojen ja laitteiden ylikuumentumiset sekä sähkönjakelun häiriöt ja keskeytykset.

2 VSV-KONSERNI

2.1 Vakka-Suomen Voima Oy

Konsernin emoyhtiö on Vakka-Suomen Voima Oy, joka hoitaa sähköjakelua toimialueellaan. VSV Oy:n sähköverkko ulottuu yhdeksän kunnan alueelle ja sen kokonaispituus on lähes 4000 kilometriä. VSV Oy:n toimenkuvaan kuuluu sähköverkon suunnittelu, rakentaminen, kunnossapito, kehittäminen, uusien sähkökäyttäjien liittäminen verkkoon ja sähköenergian mittaus. VSV Oy vastaa sähkönsiirrosta ja sähköverkkoon liittyvistä palveluista alueen noin 25000 asiakkaalleen. VSV Oy:n päätavoitteena on laadukas ja häiriötön sähköjakelu. Toimitusvarmuutta pyritään parantamaan saneeraamalla sähköverkkoa entistä säävarmemmaksi maakaapeloinnilla. Kunnossapito toteutetaan suunnitelmallisesti tarkastuksien, raivauksien ja huoltojen avulla. Sähkönsiirto toimittaminen asiakkaille alkoi Uudessakaupungissa yli 100 vuotta sitten. Toimintansa laadun takaamiseksi Vakka-Suomen Voima Oy:llä on käytössään ISO-9001 standardin mukainen sertifioitu laatuvarmistusjärjestelmä. (VSV Oy:n vuosikertomus 2015)

2.2 VSV-Energia Oy

VSV-Energia Oy on kokonaan VSV:n omistama tytäryhtiö, joka syntyi kun kaukolämpöyhtiö VS Lämpö Oy ja sähköntuotantoyhtiö VSV-Energiapalvelu Oy sulautuivat yhdeksi yhtiöksi 1.1.2015. VSV-Energia vastaa Uudenkaupungin kaukolämmön tuottamisesta sekä konsernin sähköntuotanto-osuuksista ja sähköntuotantoon liittyvästä kehittämisestä. Yhtiöllä on juuri valmistunut lämpölaite Uudessakaupungissa joka käyttää energianlähteenään kotimaista puupolttoainetta. Puupolttoaine korvaa poltettavan öljyn lähes kokonaan. VSV-Energia omistaa sähköntuotanto-osuuksia vesivoimalaitoksesta, tuulivoimaloista sekä kotimaisia polttoaineita polttavista voimalaitoksista. Yhtiö on myös mukana Fennovoima Oy:n ydinvoimahankkeessa sekä muutamassa tuulivoimahankkeessa. (Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut 2016)

2.3 VERTEK Oy

VERTEK Oy on Vakka-Suomen Voima Oy:n ja Rauman Energia Oy:n omistama yritys. VERTEK on koko Suomen alueella toimiva sähkö- ja televerkkojen rakentaja. VERTEK omistaa kokonaan tytäryhtiönsä Rauman Sähköpalvelu Oy:n. (Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut 2016)

2.4 Suunnittelutoimisto Enertel Oy

Suunnittelutoimisto Enertel Oy on pääosin Vakka-Suomen Voima Oy:n omistama yritys. Enertel on sähköenergian jakelu- ja käyttöjärjestelmiä sekä sähkötekniisiä tieto- ja turvajärjestelmiä sekä näihin läheisesti liittyviä suunnittelu palveluita tuottava yritys. (Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut 2016)

2.5 Lännen Omavoima Oy

Lännen Omavoima Oy on Vakka-Suomen Voima Oy:n ja Rauman Energia Oy:n puoliksi omistama sähkön hankinta- ja myyntiyhtiö. Yhtiö aloitti toimintansa 1.1.2009. (Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut 2016)

2.6 Satavakka Oy

Satavakka Oy on Vakka-Suomen Voima Oy:n ja Rauman Energia Oy:n puoliksi omistama yhteistyöyritys joka huolehtii alueverkkotoiminnasta. Satavakka omistaa 87 km 110 kV:n alueverkkoa Uudenkaupugin, Laitilan ja Rauman välisellä alueella. SAVA hankkii ja ylläpitää myös omistajayrityksien tietojärjestelmiä. (Satavakka Oy:n www-sivut 2016)

3 OIKOSULKU

3.1 Yleistä

Oikosulku on yksi sähköverkon yleisimmistä vioista. Oikosulut ovat vaiheiden välisiä vikoja ilman maakosketusta, kun taas maasuluissa vikavirtapiiriin kuuluu aina myös maajohdin. Oikosulun aiheuttajia ovat esimerkiksi:

- ylijännitteet, jotka johtuvat salamaniskuista tai verkon sisäisistä syistä
- laitteiden toimintahäiriöt tai virhetoiminnat, mitkä johtuvat enimmäkseen laitteiden mekaanisista vioista
- jonkin verkkokomponentin eristyskyvyn aleneminen esimerkiksi ulkoisen eristyksen likaantumisen vuoksi
- inhimilliset erehdykset, joita ovat esim. kytkentävirheet, mitä voi tapahtua laitteiston- tai laitteistojen kytkennän- tai käyttöönoton yhteydessä

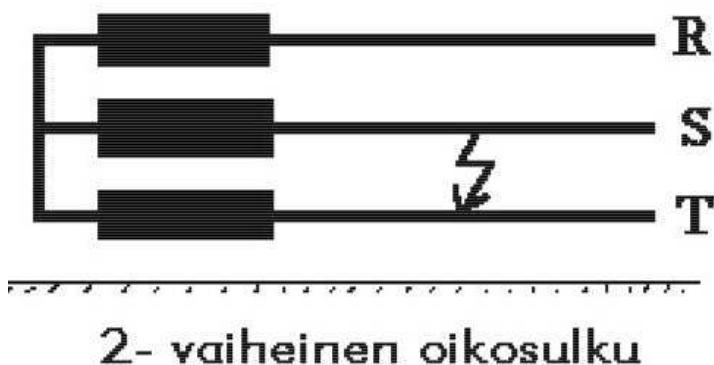
Oikosulku saattaa johtaa häiriöön, mikä voi ilmetä sähkönjakelun täydellisenä tai osittaisena katkeamisena. Täydellinen katkeaminen on mahdollista säteittäisessä verkossa, mutta N-1-kriteerin mukaan mitoitettussa silmukkaverkossa sähkönsiirto asiakkaille ei katkea. Silmukkaverkon suojaus on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempaa verrattuna säteittäisverkkoon ja siitä johtuen sen käyttö on harvinaista. Sähköverkko pyritään rakentamaan silmukkamaisesti, mutta silmukkayhteydet pidetään auki erottimilla ja niitä käytetään pääasiassa varasyöttöyhteyksinä verkon vika-, saneeraus- ja muita erikoistilanteita varten. (Elovaara & Haarla 2011a, 166)

Vaikka oikosulku ei olekaan ilmiönä aivan jokapäiväinen, on sen esiintymiseen laitteiston mitoituksessa aina varauduttava. Sähköturvallisuusmääräykset vaativat laitteiston mitoittamista siten, että sen komponentit kestävät oikosulkuvirtojen termiset ja dynaamiset vaikutukset. Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät sähkölaitteiston varustamista sellaisilla laitteilla, jotka kytkyvät oikosulkuvirran itsetoimivasti ja nopeasti pois ennen vahinkojen syntymistä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016).

3.2 Oikosulkutyypit

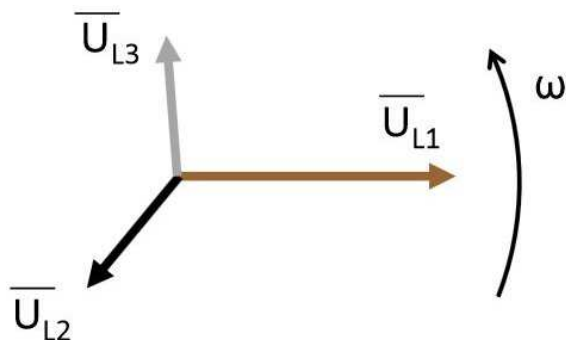
3.2.1 2-vaiheinen oikosulku

2-vaiheinen oikosulku tapahtuu tilanteessa, jossa kahden vaihejohtimen välinen eristys on riittämätön ja tapahtuu läpilyönti. 2-vaiheisen oikosulun kytkentä on esitetty kuvassa 1. (Elovaara & Haarla 2011a, 166 – 167)



Kuva 1. Periaatekuva 2-vaiheisestä oikosulusta. (Leena Korpisen www-sivut 2016)

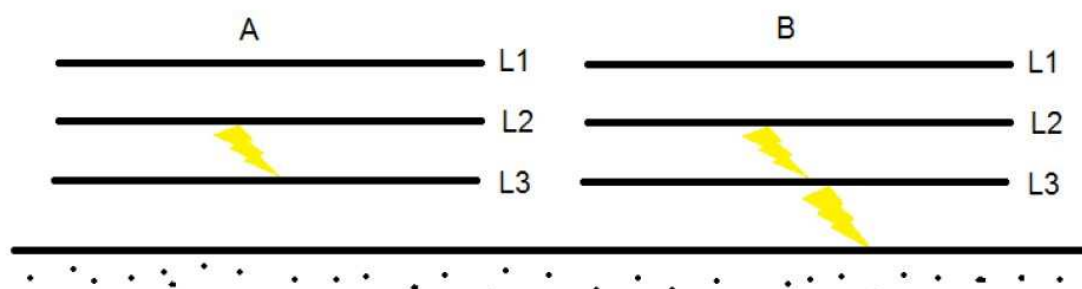
2-vaiheinen oikosulku on sähköverkossa esiintyvä epäsymmetrinen vika, mikä tarkoittaa, että vian pääasialliset vaikutukset näkyvät erilailla eri vaiheissa. Vian näkyminen erilailla eri vaiheissa tarkoittaa, että vian aikana eri vaiheiden jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä. Verkossa esiintyvää epäsymmetriaa on esitetty kuvassa 2. Todellinen potentiaalien jakautuminen on kuitenkin huomattavasti rajumpi 2-vaiheisessa oikosulussa. (Elovaara & Haarla 2011a, 166 - 167)



Kuva 2. Periaatekuva 3-vaihejärjestelmän jännitteiden epäsymmetriasta. (Oulun ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Vian näkyminen erilaisilla eri vaiheissa pätee vain verkoissa joissa ei ole mukana nol-lajohdinta. Vian aikana 3-vaiheosoitinpiirroksen kaikkien kolmen vaiheen jännitevektorien yhteenlaskun tuloksena saadaan laskettua tähtipisteessä ilmenevä potentiaali. Epäsymmetristen vikojen laskennassa verkosta ei voida käyttää tavanomaista yksivaiheista sijaiskytkentää, koska 1-vaiheisen sijaiskytkennän käyttäminen edellyttää symmetristä verkkoa. Epäsymmetristä vikaa voidaan kuitenkin analysoida tarkastelemalla kutakin vaihetta erikseen. Tämä tapa on kuitenkin hyvin työläs, koska ratkaistavien virta- ja jänniteyhtälöiden lukumäärä kolminkertaistuu. (Elovaara & Haarla 2011a, 177; Leena Korpisen www-sivut 2016)

Erikseen mainittakoon, että 2-vaiheiseen oikosulkuun saattaa liittyä myös kosketus maahan. Tällöin em. vikatilannetta kutsutaan 2-vaiheiseksi maaosulukuksi. Ilmiöiden eroa on havainnoillistettu kuvassa 3.

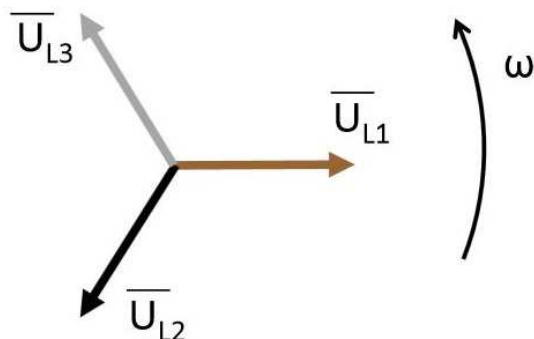


Kuva 3. Periaatekuva oiko- ja maaosulun erosta. A kuvassa 2-vaiheinen oikosulku ja B kuvassa 2-vaiheinen maaosulku, jossa maakosketus mukana.

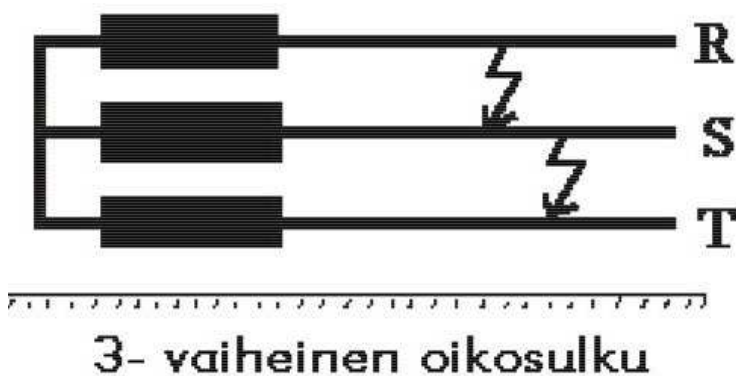
3.2.2 3-vaiheinen oikosulku

3-vaiheinen oikosulku on sähköverkossa esiintyvä symmetrinen vika, mikä tarkoittaa, että vian pääasialliset vaikutukset kohdistuvat kaikkiin vaiheisiin samanlaisina. Vastukseton 3-vaiheinen oikosulku on suurivirtaisin 3-vaihejärjestelmän vika. 3-vaiheisen oikosulun vikavirta on suuruudeltaan usein 10 - 40 kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna. Suojausautomaatiikan on katkaistava se tarpeeksi nopeasti, jotteivät laitteet vaurioituisi. Oikosulkuvirta ei juuri koskaan ehdikään saavuttamaan staattisen tilan arvoa. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi johdon tai muuntajan kolmivaiheinen oikosulku. Edellä mainitut muutokset vaikuttavat huomattavasti verkon tehonjakoon ja

jännitetasoon. Symmetristen vikojen analysoimisessa voidaan käyttää yksivaiheista si-
jaiskytkentää tai erillistä tehonjakolaskentaan tarkoitettua ohjelmistoa. (Elovaara &
Haarla 2011a, 166 - 170; Leena Korpisen www-sivut 2016)



Kuva 4. Terveen 3-vaihejärjestelmän jännitevektorit. (Oulun ammattikorkeakoulun
www-sivut 2016)



Kuva 5. 3-vaiheisen oikosulun periaatekuva jossa kaikkien vaihejohtimien riittämätön
eristys aiheuttaa oikosulkutilanteen. (Leena Korpisen www-sivut 2016)

3.3 Oikosulkujen aiheuttamat voimat

Oikosulkuvoimat ovat oikosulkuvirtojen aiheuttamia mekaanisia voimia, jotka koh-
distuvat virtaa kuljettaviin osiin ja niiden tukirakenteisiin. Ne määräävät yhdessä oi-
kosulkuvirran aiheuttaman lämpenemisen ja oikosulkuvalokaaren vaikutusten kanssa
rakenteen oikosulkulujuuden. (Elovaara & Haarla 2011b, 86)

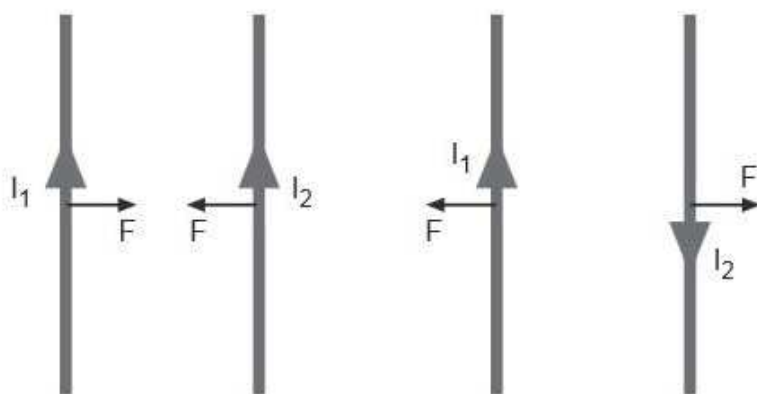
3.3.1 Terminen rasitus

Kojeen tai laitteen läpi kulkeva virta saa aikaan tehohäviön, joka nostaa laitteen lämpötilaa. Termisellä kestävyydellä tarkoitetaan laitteen lyhytaikaista virtakestoisuutta. Se tarkoittaa sitä suurinta oikosulkuvirran arvoa, jonka laite vioittumatta kestää 1 sekunnin ajan. Terminen virtakestoisuus todetaan termisessä oikosulkukokeessa. Tämä koe osoittaa ovatko laitteet, virtajohtimet ja niiden liitokset termisesti oikosulkukestoisia. Termisiä rasituksia laskettaessa lähtökohta on se, ettei lämpöä ehdi oikosulun aikana poistua oikosulun kohteena olevasta laitteesta juuri lainkaan, vaan kaikki syntynyt häviölämpöenergia kuumentaa laitetta. Laitteen terminen kestoisuus määrittyy pääasiassa fyysisen rakenteen ja materiaalin mukaan. (Aura & Tonteri 1993, 237; Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

3.3.2 Dynaaminen rasitus

Liikkuva varaus aiheuttaa ympärilleen aina magneettikentän. Siksi virrallisen johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä, jonka voimakkuus ja suunta ovat riippuvaisia johtimen virran suuruudesta ja suunnasta. Kahden vierekkäisen virrallisen johtimen välillä vaikuttavat magneettikenttien aiheuttamat voimat. Näitä kutsutaan dynaamisiksi rasituksiksi. Dynaamisella rasituksella tarkoitetaan oikosulkuvoimien johtimiin kehittämien magneettikenttien aiheuttamaa vääntöä, vetoa tai puristusta. Johtimet vetävät toisiaan puoleensa, kun virrat kulkevat yhdensuuntaisissa johtimissa samaan suuntaan, mutta työntävät toisiaan, kun virrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Keski-jännitepuolen oikosulun aikana sähköaseman keskijänniterakenteissa kulkevat virrat ovat hyvin suuria ja niiden kiskojen ja johtimien ympärille kehittämät magneettikentät hyvin voimakkaita. Kehittyvän voiman suuruus riippuu suurelta osin virtaa kuljettavien johtimien tai kiskojen välisistä etäisyyksistä. Koska sähköasemat pyritään kuitenkin rakentamaan suhteellisen pienikokoisiksi, on rakenteita valittaessa huomioitava tarkkaan rakenteiden mekaaninen lujuus. Virtakiskojen ja tukirakenteiden mitoitusta oikosulkuvoimia vastaan on käsitelty tarkemmin IEC-standardissa 60865-1. (Ahoranta 1998, 230 - 258; Elovaara & Haarla 2011b, 86)

Oikosulkuvoimat aiheuttavat köysikiskostoissa köysien voimakasta heiluntaa, jonka vuoksi vaiheiden pienin sallittu ilmaväli voi vaarantua. Kaksivaiheisessa oikosulussa kulkee kahdessa vaiheessa vastakkainen oikosulkuvirta, jolloin voima kohdistuu kahteen vialliseen vaiheeseen. Kolmivaiheisessa oikosulussa voimien tarkastelu on vaikeampaa, mutta suurin voima kohdistuu keskimmäiseen vaiheeseen. Koska kolmivaiheinen oikosulkuvirta on yleensä suurempi kuin kaksivaiheinen, on myös sen aiheuttama rasitus suurempi. Tästä syystä kaksivaiheiset oikosulut voidaan sivuuttaa laskelmissa. Kuitenkin erikoistapauksessa, jossa kaksivaiheinen oikosulku tapahtuu hyvin lähellä tahtigeneraattoreita, voi kaksivaiheinen oikosulkuvirta olla kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suurempi. (Elovaara & Haarla 2011b, 86, 88, ja 96)

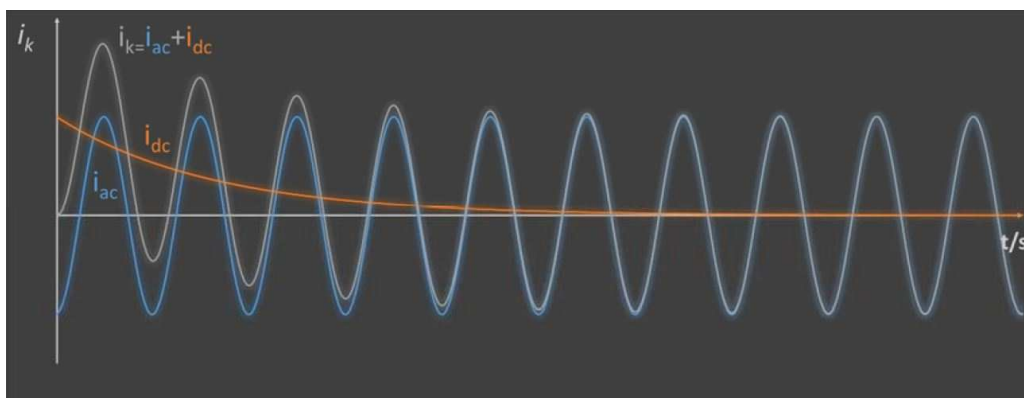


Kuva 6. Periaatekuva dynaamisen rasituksen voimavaikutuksista. Vasemmalla johtimien virrat ovat samansuuntaiset, jolloin johtimet vetävät toisiaan puoleensa. Oikealla virrat ovat erisuuntaiset, jolloin johtimet hylkivät toisiaan. Kuvassa esiintyvää voimaa kutsutaan Lorentz-voimaksi. (Jyväskylän yliopiston www-sivut 2016)

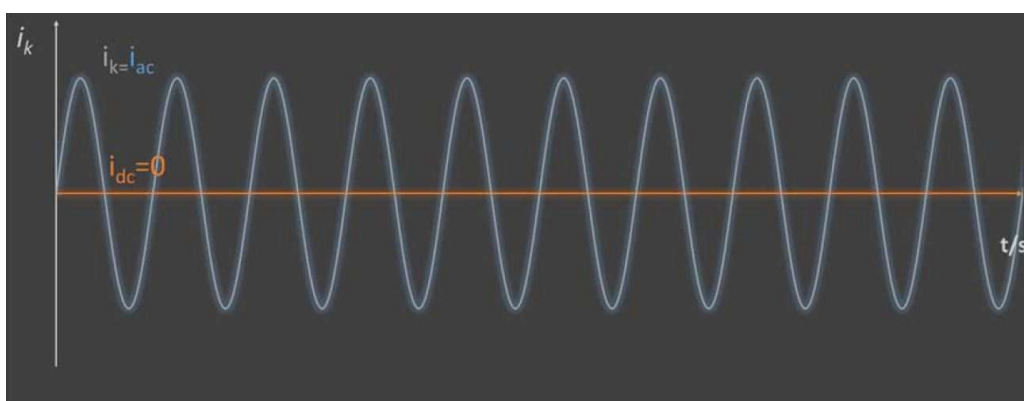
3.4 Oikosulkuvirran luonne

Oikosulkupiirin impedanssi koostuu pääasiassa syöttävien muuntajien tai generaattorien käämityksistä, siirtotien johtimista sekä itse vikaimpedanssista. Tästä johtuen oikosulkupiirin impedanssi on pääasiassa induktiivinen, joten virta on lähes puhdasta induktiivista loisvirtaa. Oikosulkuvirta sisältää vaihtovirtakomponentin ohella myös tasavirtakomponentin I_{dc} . Tasavirtakomponentin suuruus riippuu jännitteen hetkellis-arvosta oikosulun syntyhetkellä ja vaimenemisnopeus piirin reaktanssin ja resistanssin suhteesta. Virran tasakomponentti on suurin, jos oikosulku syntyy hetkellä, jolloin

virta on huippuarvossaan. Mikäli tasavirtakomponentti $I_{dc} = 0$, puhutaan symmetrisestä oikosulkuvirrasta. On kuitenkin huomioitava, että normaalissa symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä syntyvässä kolmivaiheisessa oikosulussa vain yhden vaiheen tasakomponentti voi olla nolla, joten tasakomponentti syntyy vähintään kahden vaiheen oikosulkuvirtaan. Tasakomponentti voi olla vaihtovirtapiirissä haitallinen, koska se voi esimagnetoida mittamuuntajia huonontaen niiden tarkkuusominaisuuksia. Oikosulkuvirta summautuu piirin kuormitusvirtaan, mutta koska oikosulkuvirta on huomattavasti suurempi kuin kuormitusvirta, oletetaan oikosulkulaskuissa monesti verkon olevan tyhjäkäynnissä. (Elovaara & Haarla 2011a, 171; Aura & Tonteri 1993, 159; Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)



Kuva 7. Epäsymmetrisen 1-vaiheisen oikosulkuvirran käyrämuoto jossa oikosulkuvirta I_k ja sen vaihto- ja tasavirtakomponentit I_{ac} ja I_{dc} . (Putkonen 2016, 25)



Kuva 8. Symmetrisen 1-vaiheisen oikosulkuvirran käyrämuoto I_k . Symmetrisessä oikosulkuvirrassa tasavirtakomponentti $I_{dc} = 0$, joten oikosulkuvirta muodostuu vain sen vaihtovirtakomponentista. (Putkonen 2016, 25)

Kuvat 7 ja 8 ovat 1-vaiheisia esityksiä. Kuvien tilanteessa oletetaan, että verkon vastus ja impedanssi pysyvät ajan suhteen vakioina, mutta käytännön vaihtosähköverkossa lisäksi myös vaihtovirtakomponentti muuttuu ajan mukana. Vaihtovirtaosa muuttuu sitä enemmän, mitä lähempänä voimalaitosta vika tapahtuu. Vaihtovirtaosan muuttuminen johtuu generaattorien oikosulun aikana muuttuvista reaktansseista. Generaattorien reaktanssi on oikosulun alkuhetkinä pieni, mutta suurenee vähitellen kohti tahti-reaktanssia. (Elovaara & Haarla 2011a, 171 -172)

3.5 Oikosulkuvirtojen rajoittaminen

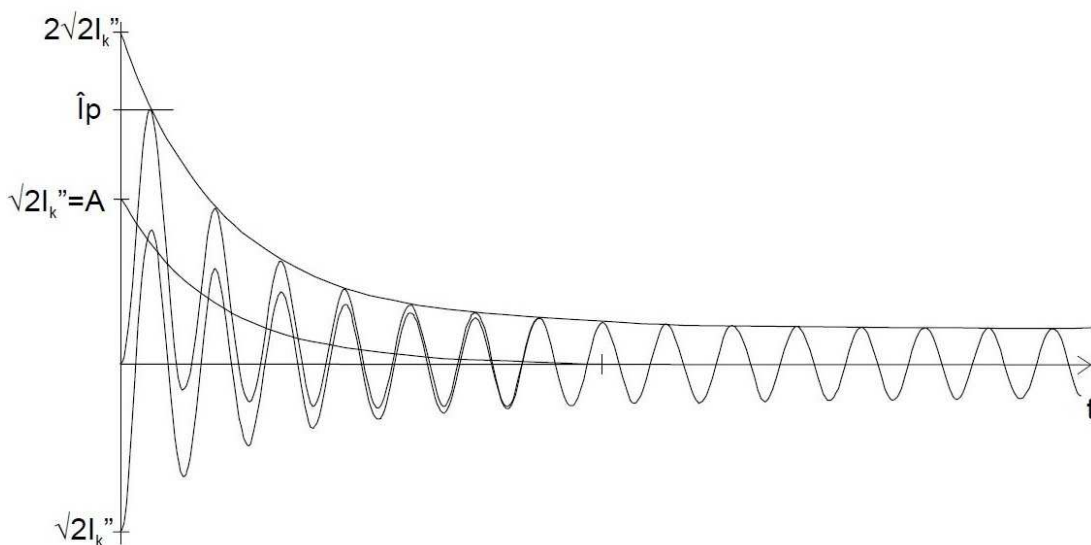
Nykyiset sähkölaitostekniikan komponentit kestävät jopa 50 kA oikosulkuvirtoja 1 sekunnin ajan ja 100 kA sysäysoikosulkuvirtoja. Jos oikosulkuvirrat kasvavat tätä rajaa suuremmiksi tai laitos on vanha ja oikosulkukestoisuudeltaan heikko, voidaan oikosulkuvirtoja joutua rajoittamaan erilaisilla toimenpiteillä. Tärkein tapa oikosulkuvirtojen rajoittamisessa on rajoittaa samaa verkkoa syöttävien muuntajien kokonaistehoä. Oikosulkuvirtojen kurissa pysymisen kannalta on galvaanisesti yhteen kytkettyä verkkoa syöttävä suurin mahdollinen muuntajateho likimain 160 MVA 20 kV verkossa. Jos esim. suuri teollisuuslaitos tarvitsee enemmän tehoa, on käyttö jaettava useamman galvaanisesti toisistaan erotetun verkon kesken. Oikosulkuvirtaa voidaan tarpeen tullen rajoittaa suurentamalla päämuuntajien oikosulkuimpedanssia. Tällöin kuitenkin muuntajan sisäinen jännitehäviö kasvaa ja se on taloudellisesti kannattamaton vaihtoehto. Erikoistapauksissa oikosulkuvirtoja voidaan joutua rajoittamaan sarjakuristimien avulla. Nämä ovat ilmaeristeisiä, yleensä betoniin tai epoksihartsiin valettuja kolmi-vaihekuristimia. Ne sijoitetaan sen laitoksen osan syöttöpiiriin, jonka oikosulkukestoisuus ilman kuristimia olisi riittämätön. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

3.6 Oikosulkuvirran tilat

Oikosulkuvirralla on kolme erilaista tilaa jotka ovat:

- I_k'' joka tarkoittaa alkuoikosulkuvirtaa
- I_k' joka tarkoittaa muutosoikosulkuvirtaa
- I_k joka tarkoittaa jatkuvan eli staattisen tilan oikosulkuvirtaa

Oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo on sysäysoikosulkuvirta I_p joka esiintyy 1. puolijakson kuluttua. Laitteistot pitää mitoittaa kestämään sysäysoikosulkuvirran aiheuttamat dynaamiset rasitteet. Oikosulkuvirta on suurin alkutilassa. Keski-jänniteverkossa oikosulkuvirran suuruus määräytyy syöttävän muuntajan oikosulkuimpedanssista sekä verkon johtimien impedanssista mikä määräytyy etäisyyden mukaan. Oikosulkuvirtaa laskettaessa suurissa muuntajissa, voidaan oikosulkuimpedanssi korvata muuntajan oikosulkureaktanssilla, koska resistiivisen osan merkitys on huomattavan pieni. Vian jatkuessa muuntajan ja verkon reaktanssit kasvavat ja oikosulkuvirta vaimenee jatkuvaa tilaa kohti, jonka jälkeen se jää vakioarvoonsa, mikä määrittyy vikavirtapiirin ominaisuuksien mukaan. Edellä mainittujen oikosulkuvirta-arvojen laskeminen tehdään periaatteessa normaalin tehovirtauksen laskentaohjelmalla. Komponenttien impedanssiarvoiksi on tällöin sijoitettava eri muutostiloja vastaavat arvot. Nämä arvot saadaan yleensä aina laitetoimittajalta tarkemmissa laitekohtaisissa spesifikaatioissa. (Aura & Tonteri, 1993, 74 – 75; ABB TTT-käsikirja 7.1 2000 - 07, 1)



Kuva 9. Missä I_k'' alkuoikosulkuvirta on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. I_p on sysäysoikosulkuvirta ja A on vaimeneva tasavirtakomponentti. Vian aikana reaktanssit kasvavat ja virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon I_k . (ABB TTT-käsikirja 7.1 2000 - 07, 1)

4 MAASULKU

4.1 Yleistä

Maasulut ovat jakeluverkkojen yleisin keskeytysten aiheuttaja. Energiaviraston jakeluverkkoyhtiöille esittämät vaatimukset sähkön toimitusvarmuuden parantamisesta sekä häiriölle herkkien laitteiden jatkuvasti kasvava määrä, asettavat jakeluverkkoyhtiöille haasteita, joihin on vastattu korvaamalla ilmajohtoverkkoa maakaapeliverkolla. Maakaapelointiasteen kasvaminen aiheuttaa maasulkuvirtojen kasvamisen. Maasulkuvirtojen kasvaessa on otettava huomioon, että sähköturvallisuusstandardien asettamat rajat kosketusjännitteille eivät ylity. Maasulkuvirtojen suuruuteen voidaan vaikuttaa verkon kytkentämuutoksilla ja erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla. (Rouhiainen 2008, 11)

Maasulku on sähköturvallisuusmääräyksissä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Maasulku poikkeaa ilmiönä olennaisesti oikosulusta silloin, kun tähtipistettä ei ole maadoitettu. Verkkoon tulee tällöin haitallinen epäsymmetria, mutta ei kovin suurta vikavirtaa. Kuten oikosulku, maasulkukin voi olla yksi- tai monivaiheinen. Jos monivaiheisen maasulun eristysviat sattuvat samassa kohdassa järjestelmää, on kyseessä maaosulku. Jos viat ovat eri kohdissa järjestelmää, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

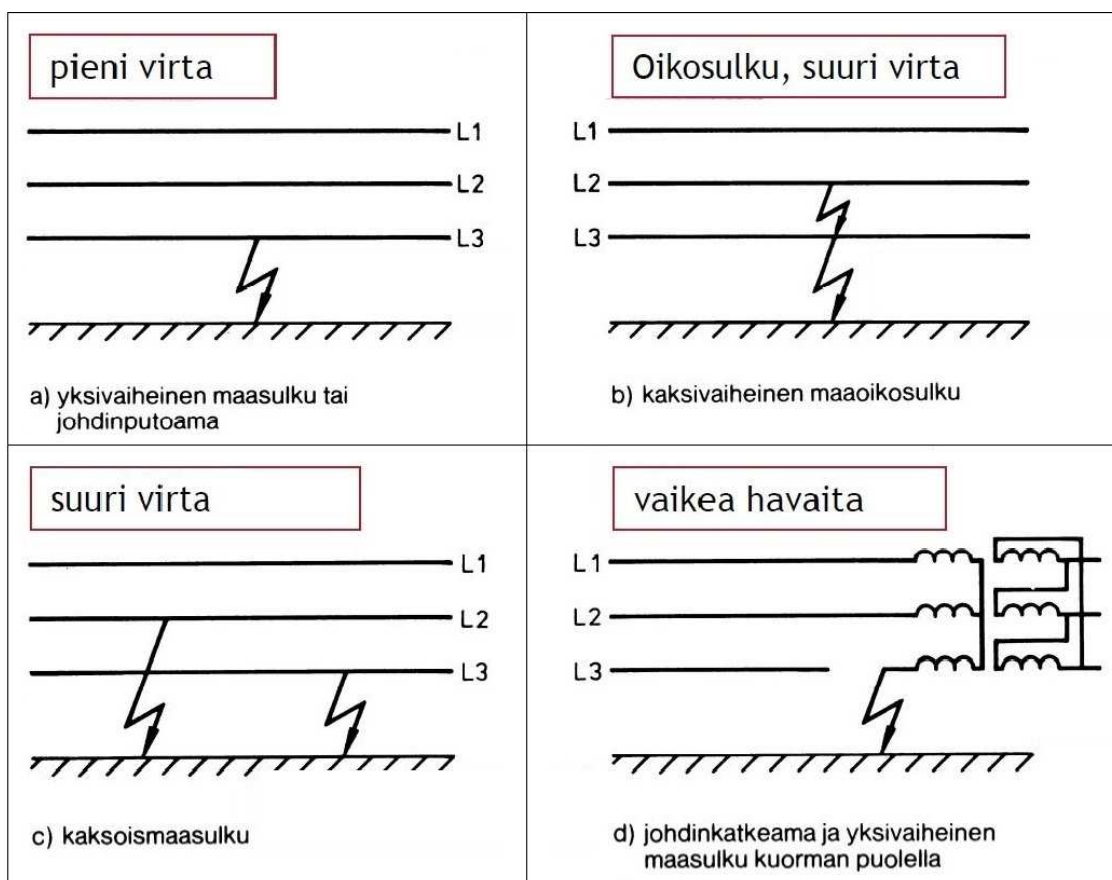
Maasulkuvirralla tarkoitetaan vikapaikan kautta maahan tai maadoitus- tai suojajohtimeen maasulkutapauksessa menevää virtaa. Oikosulkuvirran suuruus riippuu suuresti vikapaikan ja verkon syöttöpisteen välisestä etäisyydestä. Maasulkuvirta sen sijaan on em. etäisyydestä lähes riippumaton. Maasulkuvirran suuruuden määrää käytännössä vikaimpedanssi sekä maasulussa olevan verkon laajuus.

Maasulkuvirta aiheuttaa:

- Hengenvaaraa maasulkukohtaan
- Tulipalon vaaraa maasulkuvirran lämpövaikutuksen takia
- Ylijännitevaaraa maasulkuvalokaaren vaikutuksesta

Käyttömaadoitetussa verkossa maasulku on luonteeltaan yksivaiheisen oikosulun kaltainen ja vikavirran suuruus voidaan laskea, kun tunnetaan verkon impedanssit. Verkon oikosulkusuojat toimivat tällöin myös maasulussa, mikäli vikaresistanssi maasulussa ei ole liian suuri. (ABB TTT-käsikirja 8.1 2000 - 07, 1)

Maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa täytyy tuntea koko galvaanisesti yhteen kytketty verkko, jotta maasulkuvirrat ja nollajännitteet voidaan määrittää. Sen sijaan verkon impedansseilla ei tässä tarkastelussa ole käytännön merkitystä. (ABB TTT-käsikirja 8.1 2000 - 07, 1)



Kuva 10. Periaatekuvia erilaisista maasulkutapauksista. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

4.2 Maadoitus

Maadoituksen tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiirin kohta maahan mahdollisimman tehokkaasti maassa olevan metallisen kappaleen eli maadoituselektrodin välityksellä. Tehokkuuden mittana käytetään yleensä maadoitusresistanssia, jolla tarkoitetaan potentiaalin ja elektrodin kautta maahan kulkevan virran osamäärää. Oikein tehdyillä maadoituksilla myös maan potentiaali sähkönkäyttäjän läheisyydessä nousee maadoitusjännitteen mukaiseen arvoon, eikä vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny. (Elovaara & Haarla 2011b, 427; Lakervi & Partanen 2008, 199)

Maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoittamisessa virtapiirin osa (esim. pienjännitejärjestelmän nollapiste) yhdistetään maahan suoraan tai pienen impedanssin kautta. Käyttömaadoituksen tehtävänä on pitää virtajohtimien jännite maan suhteen sellaisena, ettei se aiheuta vaaratilanteita tai vaurioita. Käyttömaadoituksen toisena tehtävänä on pitää jännite-epäsymmetria ja maavirta niin pieninä, että heikkovirtalaitoksille (esim. puhelinjohdoille) aiheutuvat häiriöt jäävät mahdollisimman vähäisiksi. Suojamaadoittamisessa taas maadoitukseen yhdistetään virtapiiriin kuulumaton jännitteelle altis osa (esim. sähkölaitteen metallinen runko). Suojamaadoituksen tehtävänä on estää vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen kosketeltavaan, eristysvian tai muun syyn vuoksi jännitteelliseksi muuttuvaan osaan (ns. jännitteelle altis osa). Tämän vuoksi kansainvälisissä standardeissa ja kansallisissa määräyksissä annetaan enimmäisarvot sallituille kosketusjännitteille. (Elovaara & Haarla 2011b, 427)

Voimansiirtoverkkojen ja tietoliikenneyhteyksien laajentuessa lisääntyy maadoituksen merkitys niiden häiriöttömän toiminnan takaajana jatkuvasti. Samalla moitteettomien maadoitusten rakentaminen on entisestään vaikeutunut, sillä oikosulku-, maasulku- ja muut häiriövirrat ovat voimansiirron kehittyessä kasvaneet huomattavasti. Lisäksi maadoitusten rakentamista haittaa merkittävästi Suomen korkea impedanssinen maaperä, joka johtaa sähköä huonosti. Suomen maaperän huonoa johtavuutta on kuvattu taulukossa 1. Teknisten syiden lisäksi mahdollisimman alhaisia maadoitusvastusarvoja puoltavat myös standardien esittämät turvallisuusvaatimukset, sillä vain riittävän matalilla arvoilla voidaan estää vaarallisten maadoitus- ja kosketusjännitteiden syntyminen. (Elovaara & Haarla 2011b, 427)

Aine	Keskimäärin	Tavallisimmat vaihteluvälit
	Ωm	Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2000	1000...3000
Moreenisora	3000	1000...10000
Harjusora	15000	3000...30000
Graniittikallio	20000	10000...50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10000	2000...100000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Taulukko 1. Maaperän, betonin ja veden ominaisresistansseja. (SFS 601 2015, 152)

Maadoituksen päätoiminen tarkoitus on:

- estää vaarallisten jännitteiden siirtymistä järjestelmästä toiseen
- estää vaarallisten vuotovirtojen, kipinöiden ja valokaarien syntyminen
- luoda toimintaedellytykset maasulku- ja kosketusjännitesuojaukselle
- redusoida häiriöitä

(Elovaara & Haarla 2011b, 427)

Maadoitusjärjestelmän mitoituksen olennaiset tekijät ovat:

- vikavirran suuruus
- vian kesto aika
- maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet

(SFS 601 2015, 91)

Maadoitusjärjestelmää koskevat vaatimukset:

- Maadoitusjärjestelmän, sen komponenttien ja potentiaalintasausjohtimien on kyettävä jakamaan ja purkamaan vikavirta ylittämättä varasuojauksen toiminta-aikaan perustuvia termisiä ja mekaanisia suunnitteluraja-arvoja.
- Maadoitusjärjestelmän on pysyttävä toimintakuntoisena koko asennuksen odotettavissa olevan eliniän. Korroosion ja mekaanisten rasitusten vaikutukset tulee riittävässä määrin ottaa huomioon.
- Maadoitusjärjestelmän tulee olla riittävän suorituskykyinen estämään laiteviat, jotka aiheutuvat maadoitusjännitteen noususta, maadoitusjärjestelmässä esiintyvistä potentiaalieroista ja suurista hajavirroista osissa, joita ei ole tarkoitettu vikavirran kulkuteiksi.
- Maadoitusjärjestelmä tulee suunnitella siten, että suojareleiden ja katkaisijoiden normaalien toiminta-aikoina askel- ja kosketusjännitteet sekä siirtyvät potentiaalit pysyvät sallituissa jänniterajoissa.

(SFS 601 2015, 92)

Maasulun merkitys ja sen aikana kulkeva maasulkuvirta riippuu oleellisesti siitä, kuinka verkon tähtipiste on maadoitettu. Keski-jänniteverkot jakautuvat kahteen ryhmään – tehollisesti ja ei tehollisesti maadoitettuihin verkkoihin. Tehollisesti maadoitetut verkot ovat pienen impedanssin kautta maadoitettuja verkkoja, joissa maasulut aiheuttavat oikosulkua lähentelevän vikavirran. Ei tehollisesti maadoitettuihin kuuluvat maasta erotetut, kompensoidut, induktanssin tai resistanssin sekä niiden yhdistelmien kautta maadoitetut verkot. Maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa 1-vaiheisen maasulun vikavirralla ei ole pieni-impedanssista kulkureittiä, joka oikosulkisi vikapiiriin. Tästä syystä em. verkoissa suuri-impedanssiset maasulut ovat nykytekniikallakin vaikeita havaita, koska maasulkuvirta ja tähtipistejännite ovat hyvin pieniä. Verkon maadoitustapa määrittelee käytettävien suojauksien tyyppin ja suojareleasettelut, koska maasulkuvirrat ja nollajännitteet ovat suuresti riippuvaisia maadoitustavasta. Suomessa keski-jänniteverkot ovat joko maasta erotettuja tai sammutettuja eli kompensoituja verkkoja. Verkon maadoitustapa pitää aina suunnitella tapauskohtaisesti. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016; Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

4.3 Maadoitusjännite

Maasulkuvirran mennessä maahan, kohtaa se aina jonkin suuruisen maadoitusresistanssin R_e . Maasulkuvirta synnyttää maadoitusresistanssissa jännitehäviön U_e , jota kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Tämän seurauksena nousee maasulkupaikan maaperän potentiaalienttä. Maahan muodostuvaa potentiaalienttää kutsutaan muotonsa vuoksi potentiaalisuppiloksi. Tämän kentän vaikutuksesta kahden jaloilla kosketeltavan kohdan välillä esiintyy askeljännite. Jos ihminen tai eläin joutuu kosketukseen maasulun vikapiirin kanssa, vaikuttaa häneen kosketusjännite U_{tp} , joka on korkeintaan maadoitusjännitteen U_e suuruinen. Vikatilanteessa noussut maan potentiaali voi esiintyä myös lähes kokonaisuudessaan kosketusjännitteenä vikapaikasta kaukana olevassa maadoitetun järjestelmän laitteen ulkokuoressa, jos järjestelmän maadoitusjohdin ulottuu vikapaikan potentiaalienttän alueelle. Potentiaali voi siirtyä galvaanisesti kaapeli-vaippoja, metallisia johtoputkia tms. pitkin, aiheuttaen vaarallisia kosketusjännitteitä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016; Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Jos jakelumuuntamolla sattuu keskijänniteverkon maasulku, leviää maadoitusjännite pienjännitemuuntopiiriin maadoitetun PEN -johtimen välityksellä. Suomessa normaali käytäntö on käyttää yhteistä maadoituselektrodia jakelumuuntamoilla sekä suurjännite- että pienjännitepuolen maadoitukseen, jolloin maadoitusjännite leviää koko muuntopiiriin. Muuntopiiriin liittymäkohtaiset, johtohaarakohtaiset ym. pienjännite-maadoitukset pienentävät esiintyviä kosketus- ja askeljännitteitä. Jos jakelumuuntamo on puisto- tai talomuuntamo, johon sekä suurjännite- että pienjännitesyötöt tulevat maakaapeleilla, on asennusteknisistä syistä johtuen pakko käyttää yhteistä maadoituselektrodia. Pylväsmuuntamolla voidaan periaatteessa käyttää myös erillisiä maadoituselektrodeja suurjännitepuolen ja pienjännitepuolen maadoittamiseen. Elektrodeja pidetään erillisinä vain, mikäli niiden pienin etäisyys maassa on vähintään 20m. Aikaisemmin käytettiin pylväsmuuntamoilla melko yleisesti erillisiä maadoituselektrodeja. Vikatilastot kuitenkin osoittivat, että tällä tavalla maadoitettu muuntaja rikkoutui paljon useammin ukkosylijännitteiden seurauksena kuin sellaisen pylväsmuuntamon muuntaja, jossa käytettiin yhteistä maadoituselektrodia. Periaatteessa valinta erillisten elektrodien ja yhteisen elektrodin välillä jätetään sähköverkon haltijalle. Standardi

SFS 6001 suosittelee kuitenkin ensisijaisena vaihtoehtona yhteistä maadoituselektrodiä. Tämä on myös muodostunut vakiintuneeksi käytännöksi suomalaisissa jakeluverkkoyhtiöissä menneinä vuosikymmeninä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Kosketus- ja askeljännite aiheuttavat maasulkukohdan läheisyydessä hengenvaaraa, mikäli ne ovat liian suuria. Niiden selvittäminen laskemalla on kuitenkin hyvin hankalaa. Sen sijaan maadoitusjännite on helposti laskettavissa. Uusi suurjännitestandardi SFS 6001, joka pohjautuu IEC-standardeihin, lähtee kuitenkin sallitusta kosketus- ja askeljännitteen arvosta. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Maadoitusjännite:
$$U_e = I_e * R_e$$

Suurin sallittu maadoitusresistanssi:
$$R_{e,max} = \frac{U_e}{I_e * \sqrt{t_0}}$$

Jossa U_e on maadoitusjännite, I_e on maasulkuvirta ja t_0 on laukaisuaika.

Maadoitusjännitteen suurin sallittu arvo:
$$U_{emax} \leq k * U_{tp} [V]$$

Jossa k on asennuksen mukaan määräytyvä kerroin ja U_{tp} on sallittu kosketusjännite.

Ryhmä	Pienjännitepuolen maadoitus	Sallittu maadoitusjännite
1UTP	Jakelumuuntamot maadoitettu	U_{tp}
2UTP	Useita maadoituksia pj-puolella	$2 * U_{tp}$
4UTP	Jokainen pj-puolen haara maadoitettu	$4 * U_{tp}$
5UTP	Jokainen pj-puolen asiakaspiste maadoitettu	$5 * U_{tp}$

Taulukko 2. SFS 601 standardin mukaiset maadoitusryhmät. Taulukon avulla saadaan laskettua suurimmat sallitut maadoitusresistanssit. (SFS 601 2015, 102 - 103, 149 - 151)

Kertoimen k sallittu arvo on Suomessa yleensä korkeintaan 2. Tavoitetasolla kerroin k saa arvon 2. Kun teknisten ja taloudellisten seikkojen takia ei voida saavuttaa tavoitetasoa, voidaan käyttää arvoa $k = 4$. Ehdot arvon $k = 4$ sallitulle käyttämiselle ovat

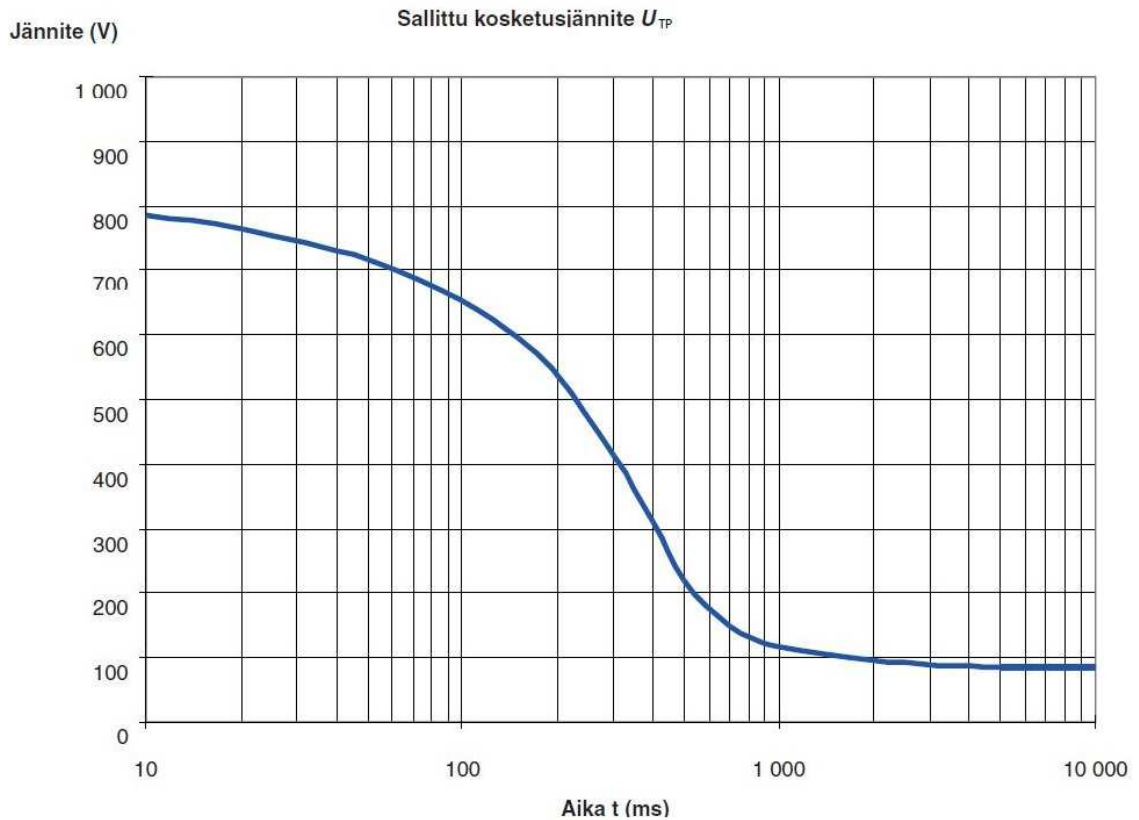
huonot maadoitusolosuhteet, muuntamolle tehtävä potentiaaliohjaus ja jokaisen pienjännitejohtohaaran maadoitus sen pituudesta riippumatta. Mikäli koko muuntopiirin alue on huonosti johtavaa, esim. kalliota tai soraa, voidaan käyttää arvoa $k = 5$. Tällöin muuntamolle on tehtävä potentiaalintasaus ja jokaisella liittymällä pitää olla maadoitus, joka suositellaan yhdistettäväksi rakennuksen pääpotentiaalintasausjärjestelmään. (Lakervi & Partanen 2008, 189)

Kerroin k on olennainen tekijä pisimmän sallitun maasulun laukaisuajan määrittämisessä. Em. voidaan todeta kertoimen k perustuvan pääasiassa maaperän johtavuuteen ja maadoitukseen muuntopiirin alueella. Maaperän johtavuuden ollessa hyvä, voidaan käyttää arvoa 2 ja sen ollessa huono, pitää maadoituksia ja potentiaaliohjauksia parantaa tai rakentaa lisää. Mikäli maadoituksia ja potentiaaliohjauksia ei saada järkevästi parannettua, pitää käyttää suurempaa k :n arvoa. Maadoituksia koskevat vaatimukset on esitetty tarkemmin SFS-käsikirja 601:ssä.

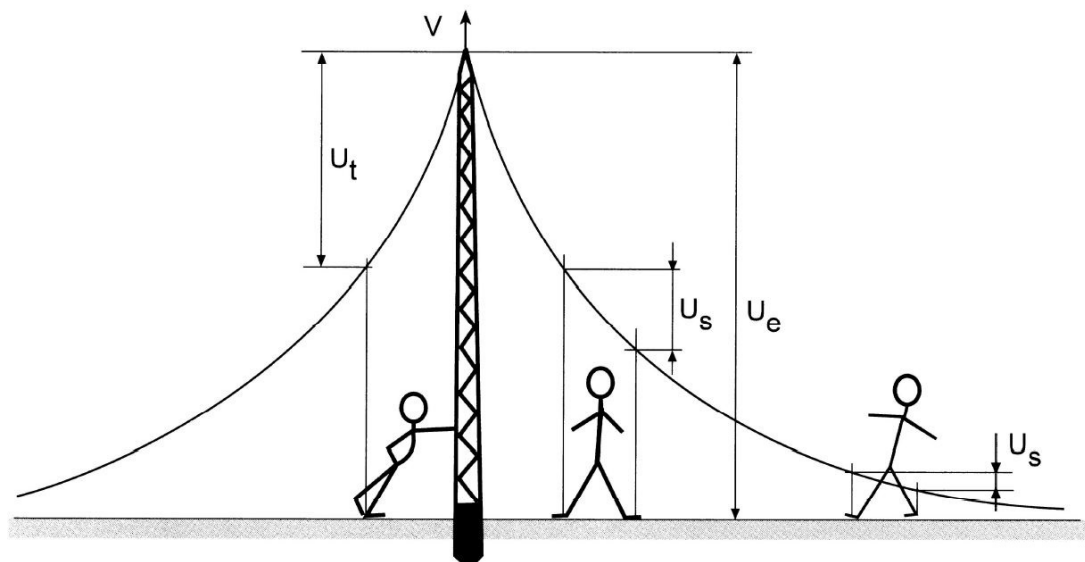
Sähköiskun vaarallisuus riippuu kosketusjännitteen lisäksi sähköiskuvirran kestoajasta. Mitä lyhyempi on virran kesto-aika, sitä vähäisempi on virran aiheuttama hengenvaara. Kosketus- ja askeljännitteelle voidaan sallia sitä suurempia arvoja riskitason pysyessä ennallaan, mitä lyhyemmän aikaa maasulku kestää. Sallitut kosketus- ja askeljännitteet annetaan standardissa SFS 601 vian kestoajan funktiona sekä taulukkona että käyränä:

Vian kesto-aika t (s)	Sallittu kosketusjännite U_{Tp} (V)
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Taulukko 3. Suurimmat sallitut kosketusjännitteen arvot vian kestoajan mukaan. (SFS 601 2015, 111)



Kuva 11. Suurimmat sallitut kosketusjännitteen arvot vian kestoajan funktiona. (SFS 601 2015, 101)

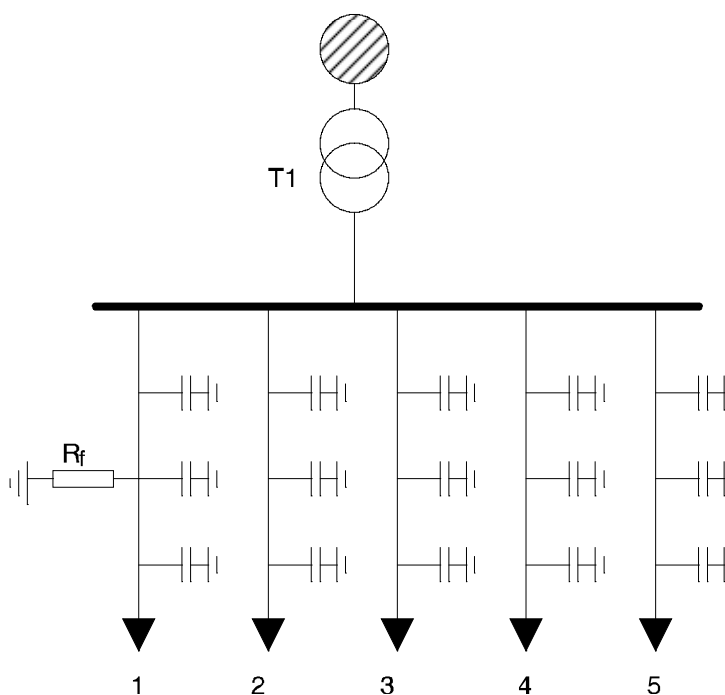


Kuva 12. Maasulun vikapaikan nousseesta potentiaalista aiheutuvia vaarallisia jännitteitä. U_e on maasulkujännite, U_t on kosketusjännite ja U_s on askeljännite. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Kuvassa 12 esitetyjä vaarallisia kosketusjännitteitä ilmenee esimerkiksi käsiohjattavilla erottimilla. Niitä voidaan turvallisesti välttää rakentamalla erottimelle potentiaalinojauselektrodi. Hyvin toteutettu pylväsmaadoitus pienentää maasulun aikaista maadoitusvastusta ja sen avulla maasulkuvirran aiheuttama pylvään potentiaali ei nouse liian suureksi sekä potentiaali pienenee pylvään lähistöllä loivasti. Potentiaalinojauselektrodin päätoiminen tarkoitus erottimilla onkin käyttäjän suojaaminen.

4.4 Maasulkuvirta ja nollajännite

Jokainen maasulussa olevan verkon osa osallistuu maasulkuvirran kehittämiseen omaa maakapasitanssiosuuttaan vastaavalla määrällä. Maasulkuvirta muodostuu kaikilla, myös terveillä johtolähdöillä kohti sähköaseman kiskoja. Kiskoissa kaikkien terveiden johtolähtöjen kehittävät maasulkuvirrat summautuvat. Summavirta virtaa maasulussa olevalle johtolähdölle ja vikakohdasta maahan. Paluupiiri maasta muodostuu johtojen maakapasitanssien kautta. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)



Kuva 13. Periaatekuva johtojen ja kaapelien kehittämistä maakapasitansseista muuntajan perään kytketyn kiskon johto- tai kaapelilähdöissä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Maasulkuvirta on jokaisella johtolähdöllä terveissä vaiheissa samanvaiheinen. Tästä johtuu, että kun mitataan kunkin johtolähdön alusta vaihevirtojen summa, on tämä yhtä suuri, kuin ko. johtolähdön kehittämä osuus maasulkuvirrasta. Maasulussa olevan johtolähdön summavirta puolestaan on yhtä suuri, kuin kaikkien terveiden johtolähtöjen tuottamien maasulkuvirtojen summa. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Maasulkuvirran suuruus riippuu galvaanisesti yhteen kytketyn verkon johtopituudesta ja johtolajin maakapasitanssista. Alla olevat kaavat ovat likiarvokaavoja yhteen kytketyn verkon 100 % maasulkuvirran laskemiseksi. Kaavoista voidaan myös nähdä maakaapelin kehittävän likiarvoisesti noin 60-kertaa suuremman maasulkuvirran. Tämä johtuu johtimien välisistä pienistä etäisyyksistä. Maasulkuvirran suuruutta voidaan myös arvioida käyttämällä ilmajohdoille arvoa 0,067 A/km ja maakaapeleille 2,7 – 4 A/km riippuen kaapelityypistä. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Maasulkuvirta avojohdolla:
$$I_e = \frac{U \times l}{\frac{kV \times km}{300}} \times A$$

Maasulkuvirta maakaapelilla:
$$I_e = \frac{U \times l}{\frac{kV \times km}{5}} \times A$$

Kun tiedetään johdon vaihekapasitanssi tiettyä pituutta kohti, voidaan laskea myös tarkka arvo johdon kehittämästä maasulkuvirrasta. Seuraavaa kaavaa voidaan käyttää kun vikaresistanssi on nolla. Tällainen tapaus voi esimerkiksi olla, kun johdin on suorassa kosketuksessa maaperään ja sitä kutsutaan 100 % maasuluksi. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

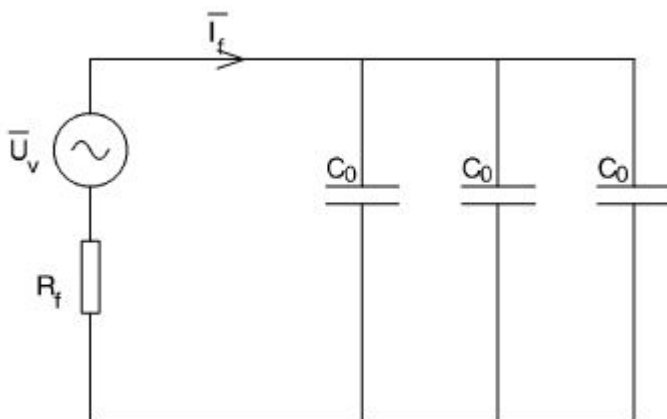
Maasulkuvirta vaihekapasitanssilla:
$$I_e = U_v * 3\omega C_0$$

Missä C_0 , on verkon maakapasitanssi per vaihe.

Sekä ilmajohtojen ja maakaapelien maakapasitanssien suuruus riippuvat pääasiassa yhtenäisen verkon kokonaispituudesta ja johtimien etäisyyksistä toisiinsa. Johtimien halkaisija, ja ripustuskorkeus vaikuttavat kapasitanssiin suhteellisen vähän.

4.4.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetussa verkossa vikapiiriin kuuluu yleensä suuri resistanssi. Jos maasulkupiirissä on resistanssia, pitää kaavassa ottaa se huomioon. Yleensä resistiivisen osuuden muodostaa ilmassa sattuva valokaari, jonka impedanssi on resistiivinen. Tällainen tilanne voi myös olla, kun puu kaatuu linjan päälle ja siitä muodostuu osa vikapiiriä. Tilanteessa jossa vikapiiriin kuuluu resistiivinen komponentti, pitää maasulkuvirran laskentaan käyttää kaavaa, jossa jännitteen jakajana toimii impedanssi.



Kuva 14. Maasta erotetun verkon maasulkuvikapiirin Theveninin sijaiskytkentä, jossa johtojen ja muuntajien impedanssit on pienuutensa takia merkitty nollassi.

Esimerkki maasulkuvirran ja nolajännitteen laskennasta maasta erotetussa verkossa:

Keskijänniteverkon kokonaismaasulkuvirta vastuksettomassa maasulussa on 45 A. Maasulkuvirran laskemiseksi 1000Ω vikavastuksen kautta sattuvassa maasulussa, on ensin laskettava verkon kapasitiivinen reaktanssi. Se saadaan vastuksettoman maasulkuvirran avulla seuraavasti:

$$\text{Kapasitiivinen reaktanssi: } X_c = \frac{U_v}{I_e} = \frac{20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{45 \text{ A}} = 257 \Omega$$

Tämä kytkeytyy sarjaan 1000Ω vikavastuksen kanssa. Jotta voidaan laskea maasulkuvirta tässä vikapiirissä, pitää laskea piirin impedanssi:

Vikapiirin impedanssi: $Z_f = \sqrt{X_c^2 + R_f^2} = \sqrt{257^2 + 1000^2} \Omega = 1030 \Omega$

Maasulkuvirta 1000Ω vikavastuksella on siis:

Maasulkuvirta: $I_{e1000\Omega} = \frac{U_v}{Z_f} = \frac{20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{1030 \Omega} = 11,2 \text{ A}$

Maasulun sattuessa, nollajännite saa nollasta poikkeavan arvon. Jännitteen aiheuttaa verkon maakapasitanssien muodostamassa kapasitiivisessa reaktanssissa kulkeva maasulkuvirta, joka aiheuttaa kapasitiivisen jännitehäviön. Kun tiedetään maasulkuvirran suuruus vikavastuksen kautta, voidaan siitä laskea sen aiheuttaman epäsymmetrian kehittämä nollajännite:

Nollajännite: $U_0 = I_e \times X_c = 11,2 \text{ A} \times 257 \Omega = 2,88 \text{ kV}$

Vastukseton maasulku on 100 % maasulku. Vastuksettomassa maasulussa nollajännite on verkon vaihejännitteen suuruinen. Suhdetta ρ kutsutaan maasulkuprosentiksi. Maasulkuprosentti voidaan laskea nollajännitteen ja vaihejännitteen, maasulkuvirran ja 100 % maasulkuvirran sekä kapasitiivisen reaktanssin ja impedanssin suhteista. Maasulkuprosentin laskenta:

Jännitteillä: $\rho = \frac{U_0}{U_v} \times 100 \% = \frac{2,88 \text{ kV}}{20 \text{ kV} / \sqrt{3}} \times 100 \% = 24,9 \%$

Virroilla: $\rho = \frac{I_e}{I_{e100\%}} \times 100 \% = \frac{11,2 \text{ A}}{45 \text{ A}} \times 100 \% = 24,9 \%$

Vastuksilla: $\rho = \frac{X_c}{Z_f} \times 100 \% = \frac{257 \Omega}{1030 \Omega} \times 100 \% = 24,9 \%$

Maasulun ilmaisuun käytetään yleensä verkon tähtipisteen ja maan välistä jännitettä ilmaisevaa jännitemuuntajaa. Tavallisesti sen muuntosuhde valitaan siten, että sen toisiojännite 100 % maasulussa on 100V. Tällöin toisiojännite voltteina antaa suoraan maasulkuprosentin.

Suoria kaavoja maasulkuvirran ja nollajännitteen laskentaan:

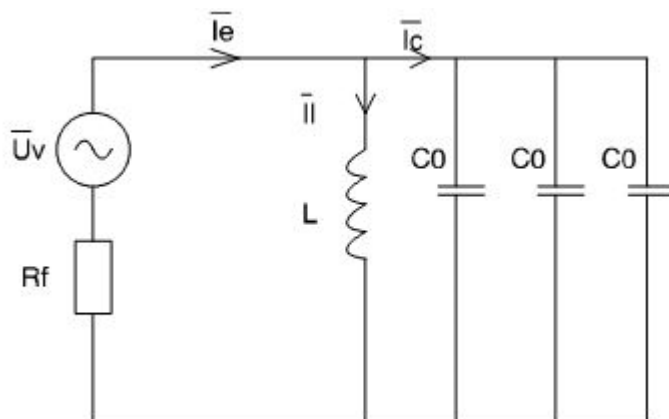
$$\text{Maasulkuvirta: } I_e = \frac{1}{\sqrt{R_f^2 + \left(\frac{1}{3\omega C_0}\right)^2}} \times U_v$$

$$\text{Nollajännite: } U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \times U_v$$

Em. kaavoista voidaan nähdä, että maasulkuvirta ja nollajännite pienenevät resistanssin ja kapasitiivisen reaktanssin kasvaessa, koska ne esiintyvät jakajassa kerrannaisina. Vikavastuksen kasvaessa – kasvaa vikapiirin impedanssi ja sekä maasulkuvirta että nollajännite laskevat. Kapasitiivisen reaktanssin arvo määrittyy verkon koon mukaan. Ilmajohdon kapasitiivinen reaktanssi on noin 60 kertainen kaapeliin nähden. Nollajännite on maasulkuvirran ja kapasitiivisen reaktanssin tulo. Suuren vikaresistanssin kautta tapahtuvat viat ovat erittäin vaikeita havaita, koska maasulkutilanteiden rele-suojaus perustuu pääosin perustajuisen nollavirran sekä nollajännitteen ja niiden välisen vaihekulman ja summavirtojen mittauksiin. Maasulun havainnointi kriteereinä voidaan käyttää myös suurtaajuisien muutosvirtojen mittausta sekä virran ja jännitteen yliaaltomittausta, mutta näiden käyttö on kuitenkin suhteellisen harvinaista. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016; Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

4.4.2 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa on verkon tähtipisteen ja maan välille kytketty rautasydäminen kuristin, joka viritetään resonanssiin verkon kapasitiivisen reaktanssin kanssa. Kuristimen induktiivinen loisvirta ja verkon kapasitiivinen loisvirta kumoavat toisensa ja kokonaismaasulkuvirta pienenee murto-osaan alkuarvostaan.



Kuva 15. Sammutetun verkon maasulkuvikapiirin Theveninin sijaiskytkentä, jossa johtojen ja muuntajien impedanssit on pienuutensa takia merkitty nolllaksi.

Piirissä olevan rinnakkaisresonanssiipiirin reaktanssi on seuraava:

$$j\vec{X} = \frac{j\omega L}{1 - 3\omega^2 LC_0}$$

Koko piirin impedanssi on:

$$Z = \sqrt{R_f^2 + \left[\frac{\omega L}{1 - 3\omega^2 LC_0} \right]^2} = \sqrt{R_f^2 + \left[\frac{L}{3C_0 \left(\frac{1}{3\omega C_0} - \omega L \right)} \right]^2}$$

Maasulkuvirran suuruus on täten:

$$I_e = \frac{U}{Z} = \frac{U / \sqrt{3}}{\sqrt{\left[\frac{L}{3C_0 \left(\frac{1}{3\omega C_0} - \omega L \right)} \right]^2 + R_f^2}}$$

Jos $X_l = X_c$, niin $I_e = 0$. Käytännössä virtaa ei kuitenkaan saada täysin nolllaksi mm. kuristimen rautahäviöiden takia, vaan jäljelle jää n. 5...15 % jäännösvirta sammuttamattoman verkon maasulkuvirtaan verrattuna.

Esimerkki sammutuskuristimen induktanssin ja sen läpi kulkevan tehon laskentaan:

Keskijänniteverkon kokonaismaasulkuvirta vastuksettomassa maasulussa on 45 A. Lasketaan verkkoon tarvittavan sammutuskuristimen induktanssi ja näennäisteho:

$$\text{Kapasitiivinen reaktanssi: } X_c = \frac{U_v}{I_e} = \frac{20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{45 \text{ A}} = 257 \Omega$$

Sammutuskuristimen induktiivisen reaktanssin on oltava yhtä suuri, eli:

$$X_l = X_c \rightarrow L = \frac{257 \Omega}{2\pi \times 50 \text{ Hz}} = 0,818 \text{ H}$$

100 % maasulussa kuristimen virta on 45 A ja sen napoihin vaikuttaa verkon vaihejännite U_v . Kuristimen teho on siis:

$$S_n = U_v I_e = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \times 45 \text{ A} = 520 \text{ kVA}$$

Suoria kaavoja maasulkuvirran ja nollajännitteen laskentaan:

$$\text{Maasulkuvirta: } I_e = \frac{\sqrt{1 + R^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R)^2 + R_f^2 R^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \times U_v$$

$$\text{Nollajännite: } U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \times I_e$$

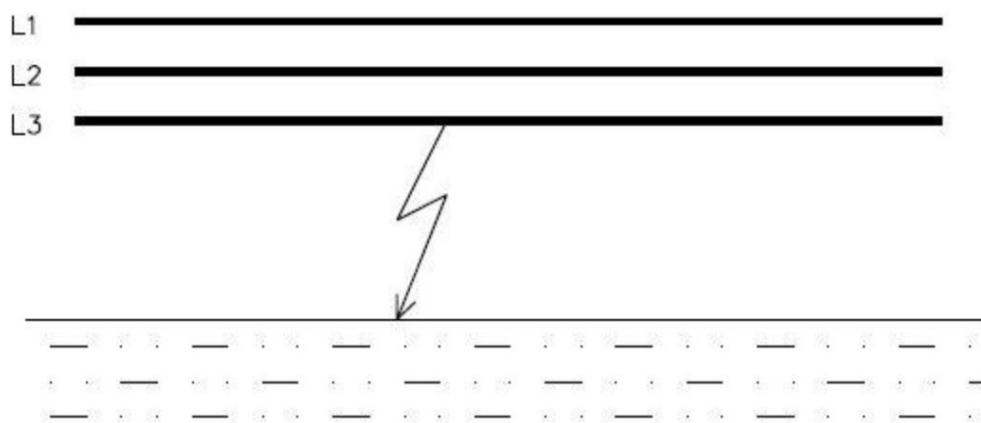
Missä R, on kuristimen rinnalle kytkettävän lisävastuksen resistanssi.

(Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

4.5 Maasulkutyypit

4.5.1 Yksivaiheinen maasulku

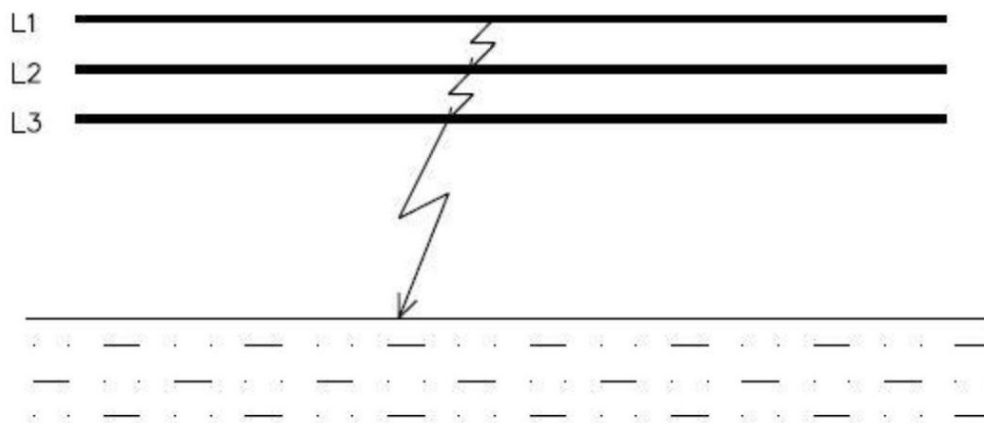
Yksivaiheisessa maasulussa verkon yksi vaihejohdin on galvaanisessa yhteydessä maahan suoraan tai vikavastuksen välityksellä.



Kuva 16. Yksivaiheisen maasulun periaatekuva.

4.5.2 Kaksi- ja kolmivaiheinen maaosulku

Kaksi- tai kolmivaiheisessa maaosulussa verkon kaksi tai kolme vaihetta on keskenään oikosulussa. Oikosulun lisäksi vaiheet ovat myös galvaanisessa yhteydessä maahan suoraan tai vikavastuksen välityksellä.



Kuva 17. Kaksi- tai kolmivaiheisen maaosulun periaatekuva.

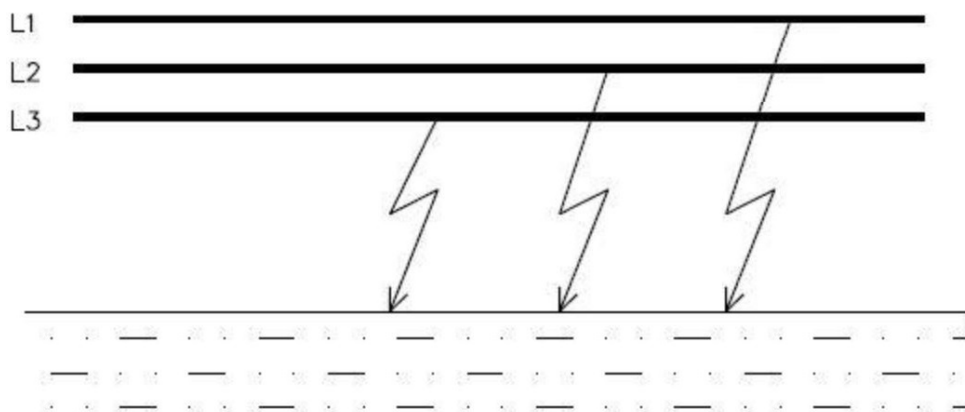
4.5.3 Kaksois- tai kolmoismaasulku

Kaksoismaasulku on kaksivaiheinen oikosulun kaltainen vikatilanne ja siksi se on aina kytkettävä itsetoimivasti ja nopeasti pois. Kaksoismaasulussa kaksi vaihejohtinta joutuu erikseen maayhteyteen suoraan tai vikavastuksen välityksellä. Kaksoismaasulun aiheuttaa joskus yksivaiheisen maasulun aiheuttamat ylijännitteet. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Yksivaiheisen maasulun alkutransientin aikana saattaa vaihejännitteen suurin hetkelisarvo olla moninkertainen verrattuna jännitteen suurimpaan arvoon ennen maasulua. Kaksoismaasulku syntyykin tavallisesti sen seurauksena niin, että ensimmäisen maasulun syntyessä, kahden muun vaiheen jännitteet nousevat, eikä jokin eriste enää kestäkään syntynyttä jännitteen nousua. Useimmissa tilanteissa 1-vaiheisen maasulun aiheuttamat ylijännitteet aiheuttavat läpilyönnin kaapelipäätteen tai muuntajan kannella sijaitsevan viallisen venttiilisuojan lävitse. Tällöin syntyy uusi vika uuteen paikkaan. Tällainen vika on vaarallinen, sillä siihen liittyy suuria maassa kulkevia virtoja, ilman että voitaisiin tietää, millaista kulkureittiä pitkin virta lopulta palaa takaisin syöttölähteeseen. (Elovaara & Haarla 2011b, 324; Mörsky 1992, 306)

Vikavirta on yleensä suuri ja suuruusluokka voi olla pahimmillaan oikosulkuvirran tasoinen. Vikavirta on tällaisessa tapauksessa vaikeasti laskettavissa, koska se kulkee maassa muun muassa hyvin johtavia kanavia (vesijohtoputket, telekaapeleiden vaipat ym.) pitkin. Etenkin jos maaperän johtavuus on huono (esim. kalliomaasto), vikavirrat voivat aiheuttaa suuria vahinkoja kulkiessaan kaapeleiden vaipoissa. (Lakervi & Partanen 2008, 182)

Kaksoismaasulun laukaisu tapahtuu yleensä oikosulkusuojauksen toimesta vikavirran ollessa riittävä sen toimintaan. Kaksoismaasulkuja ja niiden haittoja voidaan vähentää maasulkusuojauksen nopealla ja varmalla toiminnalla sekä pitämällä verkossa olevat ylijännitesuojat kunnossa. (Lakervi & Partanen 2008, 182)



Kuva 18. Kaksois- tai kolmoismaasulun periaatekuva.

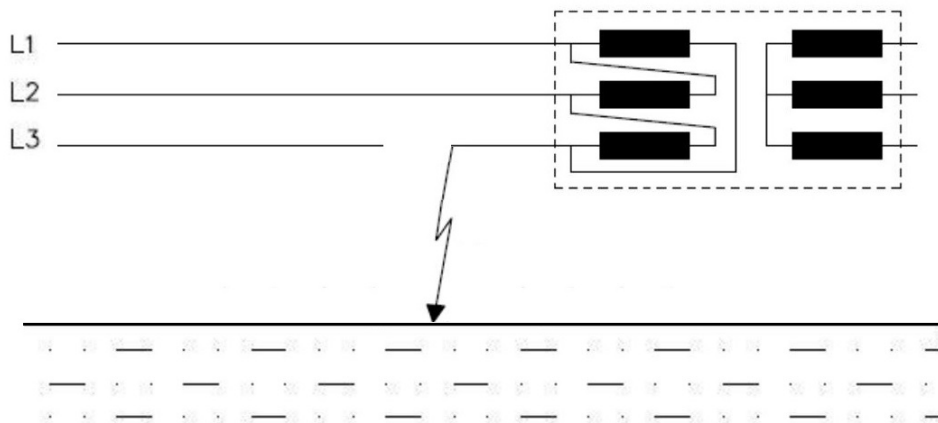
4.5.4 Maasulku ja johdinkatkos

Vaihejohtimen katkeaminen on jo sinänsä vikatapaus, mutta avojohtoverkossa siihen liittyy lähes poikkeuksetta vielä yksivaiheinen maasulku. Jos ainoastaan katkenneen johtimen syöttävän verkon puoleinen pää putoaa maahan, on tilanne maasulun kannalta sama kuin pelkässä yksivaiheisessa maasulussa. Jos sen sijaan katkenneen johtimen kuormituksen puoleinen pää putoaa maahan ja syötön puoleinen pää jää maasta erotetuksi, pienenevät maasulkuvirta ja nollajännite kuormituksen edustaman suuren impedanssin takia aivan ratkaisevasti.

Nollajännitteen laskentakaava kuormituksen puoleisen pään maasulussa on:

$$U_0 = \frac{1}{2 + j3\omega C_0(3Z + 2R_f)} \times U_v$$

Missä Z , on kuormitusta vastaava impedanssi. Jos katkoksen takana on vain yksi kuormittamaton jakelumuuntaja, on Z muuntajan tyhjäkäynti-impedanssi.



Kuva 19. Periaatekuva yksivaiheisesta maasulusta jossa kuormanpuoleinen johdin joutunut kosketukseen maan kanssa.

R_f	P = 100 kW		P = 0 kW	
	Kaapeliverkko ($U_0/U_V = 2\%$)	Avojohtoverkko ($U_0/U_V = 5\%$)	Kaapeliverkko ($U_0/U_V = 2\%$)	Avojohtoverkko ($U_0/U_V = 5\%$)
0 Ω	12 km	280 km		
500 Ω	11 km	260 km		
1000 Ω	10 km	240 km	0,17 km	4 km
3000 Ω	8 km	200 km		

Taulukko 4. Johtoverkon maksimipituus suhteellisilla 2 % ja 5 % nollajännitteillä johdinkatkeamassa, kun maasulku on kuormituksen puolella. (Mörsky 1992, 313)

Taulukosta 4 nähdään kuorman puoleisen maasulun havaitsemisen vaikeus. Tilanne vaikeutuu entuudestaan, jos vian jälkeen ei ole kuormitusta tai verkon johtopituus kasvaa, koska vikaimpedanssi on tällöin todella suuri. Vikaimpedanssin ollessa suuri, ovat maasulkuvirta ja nollajännite pieniä. Lisäksi suojauksen kannalta on vaikeaa kapasitiivisen maasulkuvirran muuttuminen induktiiviseksi, koska tässä tapauksessa se kiertää jakelumuuntajien yläjännitekäämien kautta. (Mörsky 1992, 313)

Useimmiten johtimen katkeamisen sähkönjakeluverkoissa aiheuttaa:

- myrskyn tai lumikuorman linjan päälle katkaisema tai kaatama puu
- jääkuorman katkaisema johdin tai pylväsrakenne
- kiven painauma roudan aikana
- jatkoksen vioittuminen

4.5.5 Katkeileva maasulku

Ilmajohdon katkeilevan maasulun voi aiheuttaa esimerkiksi ylijännitesuojan tai muuntajan alkava vika tai suojakipinäväliin tarttunut oksa. Katkeilevat maasulut heikentävät asiakkaan kokeman sähkön laatua ja saattavat johtaa kaksoismaasulkuun. (Salo 2006, 17)

Maasulkusuojauksen kannalta katkeilevat maasulut ovat ongelmallisia, koska katkeaminen on usein niin nopeaa, ettei releelle aseteltu aikaviive ehdi ylittyä, eikä suojaus toimia. Katkeilevien maasulkujen esiintyminen puoltaa näin osaltaan lyhyiden laukaisuaikojen käyttöä. Toisaalta, myös erityisen pitkällä laukaisuajalla voidaan pyrkiä polttamaan katkeilevat maasulut pysyviksi vioiksi. Katkeilevien maasulkujen indikointiin voidaan käyttää uusien reletyyppien keräämiä häiriötallenteita tai maasulkuvirran huippuarvon mittausta. (Salo 2006, 17)

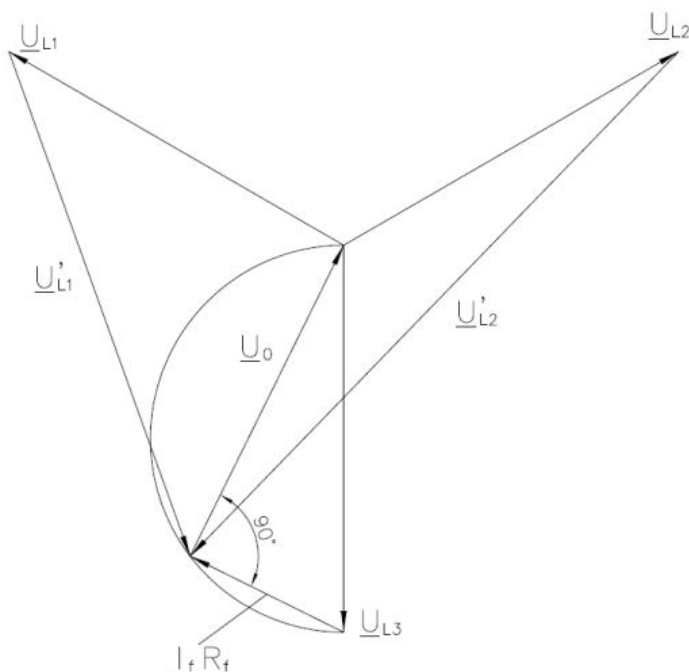
4.6 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetussa verkossa tähtipisteet ovat maasta eristettyjä ja verkon nollaimpendanssi on hyvin suuri sen muodostuessa vain johtojen maakapasitansseista. Vikavirran ainoa kulkureitti on siis vikaresistanssin kautta maaperään ja sieltä galvaanisesti yhteen liitetyn sähköverkon johtimien ja maaperän välisten maakapasitanssien kautta kohti muuntajan tähtipistettä. Maasta erotetun verkon maasulkuvirrat ovat suuruudeltaan 1 – 200 A, joten ne ovat erittäin pieniä. Huolimatta pienestä virrasta – aiheuttaa maasulkuvirta vikapaikkojen läheisyyteen vaarallisia kosketusjännitteitä. Vikaresistanssin ollessa suuri, aiheutuu siitä suuri potentiaali vikapaikalle, mutta vain pieni maasulkuvirta, koska suuri vikaresistanssi rajoittaa maasulkuvirran kulkua. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Terveessä tilassa vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä ja niiden summa on nolla. Verkon maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat symmetrisiä ja niidenkin summa on nolla. Jonkin vaiheen joutuessa maakosketukseen vikaresistanssin kautta, pienentyy viallisen vaiheen jännite maahan nähden. Tämä aiheuttaa verkkoon epäsym-

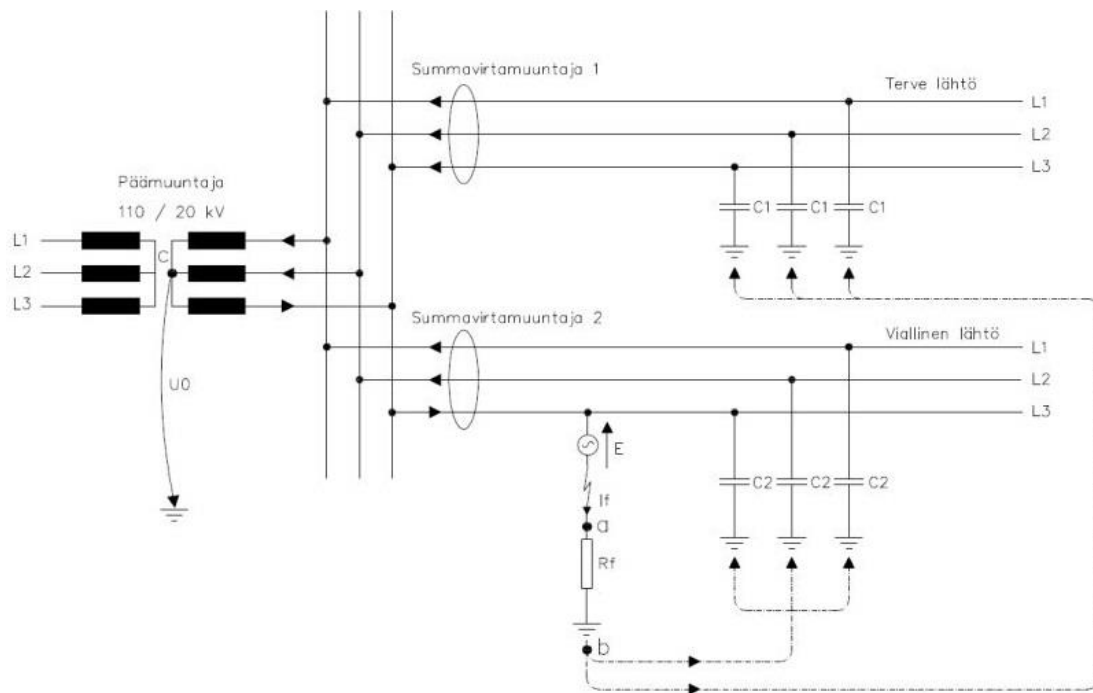
metrian, jonka seurauksena terveiden vaiheiden jännitteet maata vastaan kasvavat. Tapauksessa, jossa vikaresistanssin arvo on nolla, putoaa viallisen vaiheen jännite nol- laan ja muiden vaiheiden jännite maahan nähden nousee likimain järjestelmän pääjän- nitteen suuruiseksi sekä tähtipisteen potentiaali vaihejännitteen suuruiseksi. Maasulun aikana terveen vaiheen jännite voi nousta 1,05 kertaiseksi pääjännitteeseen nähden. Tällainen tilanne voidaan saavuttaa, kun vikaresistanssi on noin 37 % maakapasitans- sien summaa vastaavasta impedanssista. (Mörsky 1992, 292 - 301)

Maasta erotetun verkon maasulkuvian aikana järjestelmän tähtipiste siirtyy, koska vir- ran paluujohdinta ei ole ja maasulkuvirta palaa tällöin terveiden vaiheiden kautta. Täht- tipisteen siirtymästä aiheutuu ns. nollajännite U_0 , joka muodostuu maan ja tähtipisteen välille. Vianaikainen tähtipisteen potentiaali määrittyy vikavastuksen mukaan. Mitä suurempi vikavastus on, sitä pienempi on nollajännite. Vikavastus aiheuttaa maasul- kupiirissä jännitehäviön, minkä seurauksena myös maasulkuvirta pienenee. (Aura & Tonteri 1993, 163)



Kuva 20. 1-vaiheisen maasulkuvian jänniteosoitinpiirros maasta erotetussa verkossa. U_0 on tähtipisteen ja maan välinen jännite eli maasulkujännite ja $I_f R_f$ on maan ja viäl- lisen vaiheen välinen jännite. Nollajänniteosoitin piirtää osoitindiagrammissa vikare- sistanssin funktiona puoliympyrän kaaren. Kuvasta nähdään myös että nollajännitteen ja maasulkuvirran välinen vaihesiirtokulma on 90° .

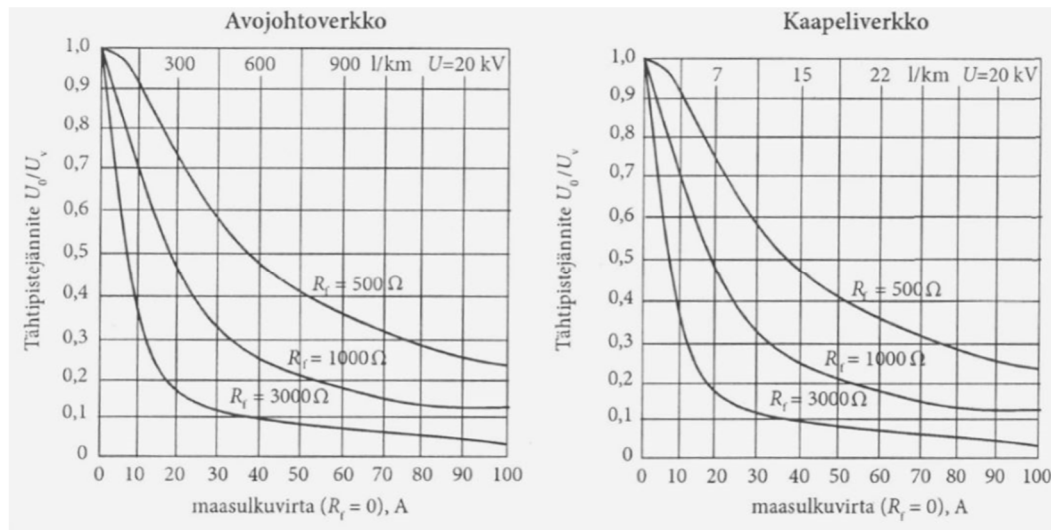
Vian aikana vaiheiden väliset jännitteet pysyvät ennallaan, eivätkä kuormitukset häiriinny ennen katkaisijan avautumista. Katkaisijan tulee kuitenkin poistaa maasulku turvallisuussyistä sähköturvallisuusmääräysten mukaisesti. Maasta erotetussa verkossa maasulun aikana tapahtuvat potentiaalitasojen muutokset pitää ottaa huomioon kyseisessä verkossa käytettävien laitteiden eristysmitoituksessa. (Mörsky 1992, 298 - 299)



Kuva 21. 1-vaiheisen maasulkuvian periaatekuva maasta erotetussa verkossa. Vaiheen L3 kautta tapahtuneen maasulun vikavirta kulkee mahdollisen vikaresistanssin kautta maaperään. Maaperässä virta kulkee vikaantuneen lähdön terveisiin vaiheisiin sekä myös kohti taustaverkon terveitä lähtöjä. Vikavirta jatkaa johdoissa kulkuaan kohti muuntajan tähtipistettä ja sitä kautta takaisin vikaantuneelle johto-osalle. (Lakervi & Partanen, 183)

Johtimien ja muuntajakäämien impedanssit (muutamia ohmeja) ovat vaihejohtimien maakapasitansseihin C (satoja tai tuhansia ohmeja) nähden hyvin pieniä, ja ne voidaan olettaa nolaksi maasulkulaskelmissa. Näin ollen vikapiirin laskennassa sähkön kulua vastustaviksi komponenteiksi lasketaan vain vaiheiden maakapasitanssit sekä mahdollinen vikaresistanssi. (Lakervi & Partanen 2008, 183 – 184)

Maasulkuvirta kasvaa verkon kokonaispituuden kasvaessa. Tähtipistejännite puolestaan pienentyy vikaresistanssin kautta tapahtuvassa maasulussa verkon pituuden kasvaessa. Kuvassa 20. on esitetty tähtipistejännite erilaisilla vikaresistanssin arvoilla verkon laajuuden funktiona. (Lakervi & Partanen 2008, 186 – 187)



Kuva 22. Tähtipistejännite maasta erotetussa verkossa verkon laajuuden funktiona, vaaka-akselilla alareunassa on maasulkuvirta (A) suorassa maasulussa ja ylälaidassa verkon kokonaispituus. (Lakervi & Partanen 2008, 187)

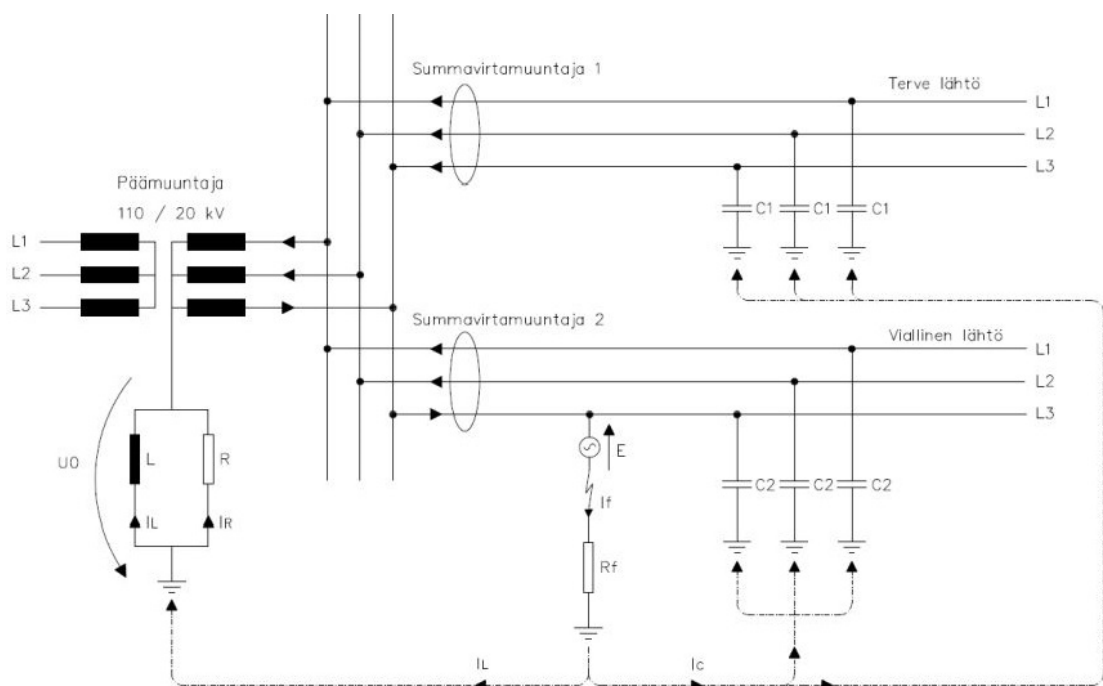
4.7 Sammutettu verkko

Kuten aikaisemmasta voidaan todeta, maadoitusten on oltava sitä parempia ja kalliimpia, mitä suurempi on verkon maasulkuvirta. Verkon laajetessa maasulkuvirta kasvaa. Tällöin maadoituksia joudutaan parantamaan vaadittujen maadoitusjännitearvojen saavuttamiseksi. Toinen tapa maadoitusjännitteen pienentämiseen on verkon maasulkuvirran pienentäminen sammutuskuristimen avulla. Valittu tapa on lähinnä taloudellinen kysymys. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Sammutuskuristin on verkon tähtipisteen ja maan välille kytketty rautasydäminen kuristin, joka viritetään lähes resonanssiin verkon maakapasitanssien kanssa. Viritys tapahtuu automaattisäädöllä tilannekohtaisesti. Kuristimen induktiivinen loisvirta ja

maakapasitanssien kapasitiivinen loisvirta kumoavat toisensa ja kokonaismaasulkuvirta pienenee murto-osaan alkuperäisestä arvostaan. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Sammutuskuristin tai -muuntaja pienentää maasulkuvirtaa, josta syystä valokaarimaasulku sammuu. Pysyvissä maasuluissa on maasulkuvirran pienenemisestä etuna maadoituskustannusten aleneminen ja mahdollisuus jatkaa verkon käyttöä maasulun aikana. Maasulussa kuormittuu muuntajan tähtipisteeseen kytketty sammutuskuristin enintään verkon 100 % maasulkuvirtaa vastaavalla virralla. Tämä virta on otettava huomioon sekä sammutuskuristimen ja muuntajan mitoituksessa että myös sammutuskuristimen maadoituksen mitoituksessa. Maadoitusmuuntajan nimellisteho mitoiteetaan vähintään samaksi kuin sammutuskelan nimellisteho. Kuristimen induktanssi on syytä mitoittaa huomattavasti yli verkon kapasitanssien, jotta uutta verkkoa rakennettaessa siitä ei tulisi riittämätön kapasitanssien kasvaessa. (Timonen 1967, 744)



Kuva 23. 1-vaiheisen maasulkuvian periaatekuva sammutetussa verkossa. Vaiheen L3 kautta tapahtuneen maasulun vikavirta kulkee mahdollisen vikaresistanssin kautta maaperään. Tähtipisteen ja maan väliin kytketty sammutuskuristin saa potentiaalinviritystä ja virtityy likimain resonanssiin verkon kanssa. Maaperässä jäännösvirta kulkee kohti sekä sammutuskuristinta että viallisen lähdön terveitä vaiheita ja rinnakkaisia lähtöjä.

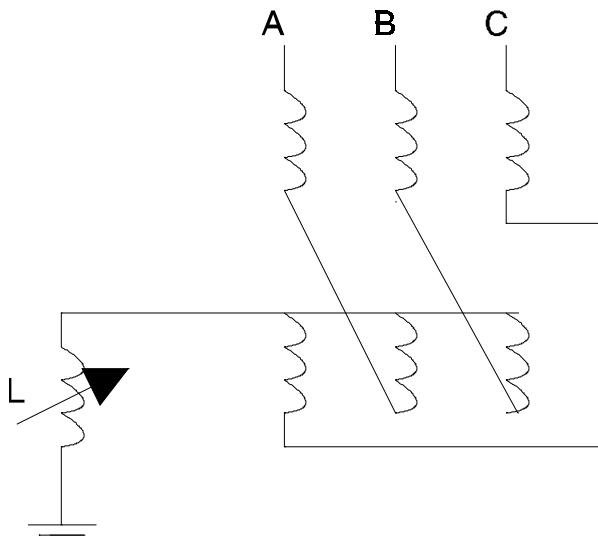
Vikavirta jatkaa johdoissa kulkuaan kohti muuntajan tähtipistettä ja sitä kautta takaisin vikaantuneelle johto-osalle. (Lakervi & Partanen, 183)

Maasulkuvirta ei maasulkukohdassa kompensoidu täydellisesti tehohäviöiden ja epätarkan virityksen vuoksi. Epätarkka viritys johtuu jakeluverkon ja sammutuskuristimen häviöistä. Jännösvirta on noin 5 – 15 % maasulkuvirrasta. Jännösvirran vaikutus on kuitenkin otettava huomioon maadoitusjännitettä määritettäessä. Toisaalta kuristinta ei kuitenkaan edes pyritä virittämään 100 % kompensointiin. Jos kuristin viritetään 100 % kompensointiin, ovat kuristimen induktanssi ja verkon kapasitanssi yhtä suuret, jonka seurauksena nollajännite saavuttaa resonanssihuippunsa. Verkkoa käytetäänkin yleensä hieman alikompensoituna. (Mörsky 1992, 314; Timonen 1967, 744)

Useimmiten keskijänniteverkoissa ei ole tähtipistettä suoraan käytettävissä. Tällöin sellainen muodostetaan keinotekoisesti ZN -kytkentäisen erikoismuuntajan avulla. Maadoitusmuuntaja varustetaan hyvin yleisesti omakäyttökäämillä. Tällä tavalla voidaan välttää omakäyttömuuntajan hankintaa. Sähköasemalla säästetään myös yksi lähtökenno maadoitusmuuntajan omakäyttökäämin ansiosta. Muuntajan tähtipisteen ja kuristimen väliin sijoitetaan erotin. Erottimen avulla kuristinta voidaan huoltaa ilman, että sähköasemalta katkeaa omakäyttöjännite. Tällöin erottimen asennosta tulee tulla apukosketintieto suuntareille. Sammutuskuristimen ollessa kytkettynä verkkoon, mittaa rele maasulkuvirran pätoikomponenttia joka koostuu käytännössä verkon häviöistä sekä kuristimen omista pätohäviöistä. Virran pätoikomponentti on näissä tilanteissa hyvin pieni ja siitä syystä kuristimen rinnalle kytketäänkin usein erillinen lisävastus jolla lisätään maasulun pätoikomponenttia releiden havahtumisen vuoksi. Vastuksen ohjausta tässä opinnäytetyössä on käsitelty tarkemmin seuraavalla sivulla. Kun jakeluverkko on maasta erotettu, mittaa rele maasulkuvirran loiskomponenttia. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

$$\text{Maasulkuvirran pätoikomponentti: } I_0 = \frac{U_0}{Z_f} \times \cos \varphi$$

$$\text{Maasulkuvirran loiskomponentti: } I_0 = \frac{U_0}{Z_f} \times \sin \varphi$$



Kuva 24. ZN -kytkentäinen maadoitusmuuntaja. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Sammutuskuristimen lisävastuksen ohjausperiaatteita:

1. Vastus on kytkettynä verkkoon koko ajan. Terveen tilan nolajännite pysyy paremmin hallinnassa, joka vähentää U_0 -varasuojauksen virheellisiä laukaisuja. Tämä kuitenkin häiritsee kompensointia, koska sen tarkoitus on, että valokaari sammuu itsestään ja vältytään jälleenkytkennöiltä. Mikäli vastusta pidetään päällä kokoajan, saavuttaa pätövirta aina suuremman arvon ja katkaisijatoiminnot ovat todennäköisempiä.
2. Vastus on poiskytkettynä verkon terveessä tilassa ja kytetään päälle viiveellä maasulun syntyessä. Täten annetaan maasulkuvalokaarelle mahdollisuus sammua itsestään. Tämä ohjausperiaate perustuu kompensoinnin varsinaiseen ideaan. Vastuksen ollessa poiskytkettynä terveen tilan aikana, saattaa nolajännite nousta melko korkealle riippuen verkon kompensointiasteesta ja kapasitanssiepäsymmetriasta.
3. Vastus on kytkettynä verkkoon kokoajan, lukuun ottamatta maasulun alku hetkeä. Tässä ohjausperiaatteessa on yhdistetty edellisten ohjausten periaatteiden edut: pienennetään terveen tilan nolajännitettä, mutta annetaan maasulkuvirrälle mahdollisuus sammua itsestään maasulun syntyhetkellä. Tällä ohjaustavalla vastuksesta saadaan kaikki hyöty irti. (Isomäki 2010, 30)

Maasulkuvirran kompensoimisella saavutettavia etuja:

- Maasulkujen aiheuttamien lyhytaikaisten jakelukeskeytysten (esimerkiksi pjk) lukumäärä alenee 70...90 %, koska tavallisimmat viat ovat valokaarivikoja, jotka poistuvat kompensoinnilla. Myös kokonaiskeskeytysaika lyhenee.
- Katkaisijatoimintojen lukumäärä pienenee olennaisesti, jolloin erityisesti katkaisijoiden mekaanisten osien kuluminen ja huollon tarve vähenevät.
- Kompensoinnin suojausvaikutus ulottuu suojattavan verkon kaikkiin osiin kytkinlaitokset mukaan luettuina.
- Käytettäessä verkkoa maasulussa on tehonkulutus vikapaikassa pienempi, jolloin kuumenemisen ja palamisen vaikutukset vikakohdassa vähenevät.
- Suojakipinävälien käyttö tehostuu, koska elektrodiväli voi olla jonkin verran lyhyempi valokaaren sammussa itsestään. Suojakipinävälien lyhentäminen vähentää kalliimpien ylijännitesuojien käytön tarvetta, koska kipinävälien suojausominaisuudet paranevat.
- Maasulkuvalokaaren sammuttua palaava jännite kasvaa suhteellisen hitaasti, joten maasulku sammuu paremmin kuin samalla virralla maasta erotetussa verkossa.
- Maasulkuvirtojen aiheuttamat laite-, johdin- ja eristinvauriot jäävät vähäisiksi, ja huollontarve vähenee, koska maasulkuvirran vaikutusaika on lyhyt valokaaren sammussa.
- Kompensoidussa verkossa verkon epäsymmetria (esimerkiksi vaiheen katkeaminen) voidaan useimmiten ilmaista herkästi, koska kompensointikuristin ja verkon maakapasitanssit synnyttävät resonanssin käyttötaajuudella.
- Kompensoiminen vähentää eräissä tapauksissa yksivaiheisten vikojen muuttamista oikosuluiksi, koska terveiden vaiheiden eristysten ylijänniterasitus lyhenee.
- Maasulkukohdan läheisyydessä (esimerkiksi johdon jännevioissa) esiintyvä vaarajännite on pienempi kuin maasta erotetussa verkossa.

(Mörsky 1992, 321- 322)

5 KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUS

5.1 Suojareleistys

Suomessa voimassa olevat sähköturvallisuusstandardit sisältävät joukon yleisiä suo-
jaukselle asetettuja vaatimuksia, jotka sähköyhtiön on täytettävä. Minimivaatimuksia
tehokkaammalla suojauksella sekä siihen liittyvällä automaatiolla voidaan usein pal-
jonkin parantaa sähkönjakelun luotettavuutta. Keskijänniteverkon erikoispiirteitä ovat
säteittäinen syöttötapa sekä tähtipistemaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen. Sä-
teittäinen syöttötapa yksinkertaistaa selektiivisen suojauksen toteuttamista. Tähtipis-
temaadoituksen ja nollajohtimen puuttuminen sen sijaan tekee maasulusta luonteeltaan
oikosulusta poikkeavan vian, jonka tunnistaminen vaatii oman tekniikkansa. Keski-
jänniteverkkoja syöttävien sähköasemien kaikki kennot ovat releistettyjä. Sen sijaan
itse keskijänniteverkossa välikatkaisijoita tai kytkemöitä on vähän. Yleensä Suomen
oloissa suojaus on yksi- tai kaksiportainen niin katkaisijoissa kuin havahtumisajoissa.
Pienjänniteverkkojen suojaus toteutetaan yhä varokkeilla ja vikavirtasuojakytkimillä.
(Lakervi & Partanen 2008, 176)

Releet ovat mittalaitteiden kaltaisia laitteita, jotka tarkkailevat verkon sähköisiä suu-
reita ja pystyvät havaitsemaan verkon epänormaalit tilat kuten ylikuormituksen tai
eristyksen pettämisen. Releiden asetteluarvojen ylitys tulkitaan epänormaaliksi tilaksi,
jolloin rele koskettimien välityksellä antaa ohjauksikäskyn tavallisimmin katkaisijalle
viallisen osan irrottamiseksi terveestä sähköverkosta. Sähköjärjestelmien laajentuessa
ja sähkön merkityksen muutenkin kasvaessa on relesuojaustekniikasta tullut yhtä tär-
keämpi osa sähkölaitostekniikkaa. (Mörsky 1992, 13)

Releet liittyvät verkon primäärikomponentteihin yleensä mittamuuntajien välityksellä.
Aikaisemmin oli tavallista käyttää myös primäärireleitä eli laukaisijoita, mutta kehitys
on kulkenut niiden ohitse, vaikka jakeluverkosta saattaa niitä löytyä vielä tulevaisuu-
dessakin. Mittamuuntajia käytetään luonnollisesti myös varsinaisiin mittaustehtäviin.
(Mörsky 1992, 13)

Sähköverkossa tapahtuvia vikatilanteita, kuten oikosulkuja, maasulkuja, ylikuormituksia, yli- ja alijännitteitä sekä johdinkatkoksia varten voimalaitokset, sähköasemat ja kytkinlaitokset varustetaan suojalaitteilla, joista osan muodostavat releet. Releet tarkkailevat sähköverkon tilaa ja tarpeen vaatiessa suorittavat kytkentöjä automaattisesti, luotettavasti ja nopeasti. (Mörsky 1992, 15)

Relesuojaukselta edellytetään seuraavia asioita:

- Toiminnan on oltava selektiivistä, jotta vian sattuessa mahdollisimman pieni osa verkosta jää pois käytöstä.
- Toiminnan on tapahduttava riittävän nopeasti ja herkästi niin, että vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisiksi sekä verkon stabiilisuuden tulee säilyä kaikissa olosuhteissa.
- Suojauksen tulee kattaa aukottomasti koko suojattava järjestelmä.
- Suojauksen on oltava käyttövarma ja mahdollisimman yksinkertainen.
- Käytettävyyden tulee olla hyvä.
- Suojaus on voitava koestaa käyttöpaikalla.
- Suojauksen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen.

(Mörsky 1992, 15)

Rele määritellään Kansainvälisen Sähköteknillisen Komission relesanastossa seuraavasti: Rele on sähkövirtapiirissä tapahtuneen muutoksen vaikutuksesta toimiva laite, jonka tehtävä on halutun seurausmuutoksen aiheuttaminen ohjausta tai merkinantoa varten samassa tai toisessa sähkövirtapiirissä. Asentoa, jossa relesuojan osat ovat normaalissa käyttötilassa, sanotaan niiden lepoasennoksi. On huomattava, että releen koskettimet piirretään siihen asentoon, missä ne ovat ennen releen kytkemistä, joten piirustukset eivät välttämättä osoita lepoasentoa. Rele havahtuu ja lähtee käymään, kun releen tarkkailema suure ohittaa releeseen asetellun havahtumisarvon. Käytyään rele toimii antaen sen toimintavirikkeen, jonka antaminen on sen tehtävänä. Havahtumisen ja toiminnan välinen aika on toiminta-aika. Havahtumisarvo on releen mittaaman suureen se arvo, jolla rele havahtuu, ja palautumisarvo se releen mittaaman suureen arvo, jolla rele siirtyy käyntitilasta lepotilaan. Rele on hidastettu, jos havahtumisen ja toimintavirikkeen antamisen välistä aikaa on pidennetty. (Timonen 1967, 744 – 745)

Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Jos vierekkäiset suoja-alueet osaksi peittävät toisensa, on suojaus aukoton. Suoja on absoluuttisesti selektiivinen, kun se toimii vain omalla suoja-alueellaan tapahtuvissa vioissa. Aikaan perustuvaa selektiivisyyttä sanotaan aikaselektiivisyydeksi, ja vastaavasti puhutaan virtaselektiivisyydestä. Suoja-alueita voivat esimerkiksi olla johdot, muuntajat, generaattorit ja moottorit. (Mörsky 1992, 15)

Relesuojauksen päätehtävä on vikojen havaitseminen ja vika-alueen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi. Eräät releet, kuten ylikuormitusreleet, epäsymmetriareleet ja muuntajan kaasusuoja pyrkivät ennakoimaan mahdollisen vian syntymisen. Relesuojauksen kehitys kulkee vikojen ennakoivaan torjumiseen. Varsinaisen suojauksen vikaantumisen varalta suojausta täydennetään usein varasuojauksella. Toisarvoiset kohteet saattavat jäädä vaille varasuojaukselta. (Mörsky 1992, 16)

Suojareleiden mittauselimissä käytetään samoja periaatteita kuin mittareissakin, nimitään sähkömagneettista, sähködynaamista, ferrodynaamista, induktio- ja lämpöperiaatetta. Staattisissa releissä on transistoroidut mittauselimet. (Timonen 1967, 746)

Releet voidaan jakaa mitattavan suureen perusteella seitsemään ryhmään. Ne ovat: ylivirta-, ali- ja ylijännite-, taajuus-, suunta- ja teho-, epäsymmetria-, verto- eli differentiaali- sekä distanssireleet. (Leena Korpisen www-sivut 2016)

Erikseen mainittakoon, että tänä päivänä yksittäisten suojareleiden käyttö on hyvin harvinaista. Nykyisin sähköaseman lähtöjen suojaus toteutetaan pääasiassa lähtökohtaisilla kennoterminaaleilla, jotka sisältävät lukuisia erilaisia suojaustoimintoja ohjelmistollisesti. Kennoterminaaliin voidaan parametroida ja asetella todella monipuoliset suojausasetukset sen suojaamalle lähdölle hyvin yksityiskohtaisesti. Kennoterminaalit ovat pääasiassa lähtökohtaisia, koska lähtöjen suojausasettelut ovat täysin tapauskohtaisia ja riippuvaisia kyseisen lähdön johtopituuksista, -lajeista ja -tyypeistä.

5.1.1 Ylivirtarele

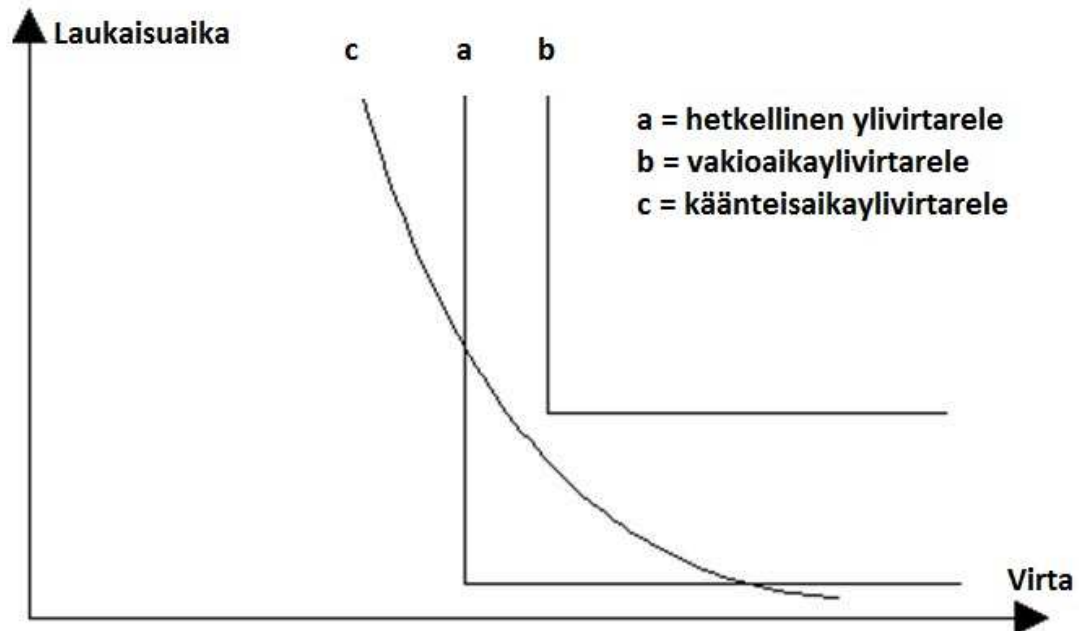
Ylivirtarelettä käytetään nimensä mukaisesti ylikuormitus ja oikosulku- sekä maasulkusuojana kun se asetetaan mittamaan nollavirtaa eli vaiheiden summavirtaa. Sitä voidaan käyttää hetkellisylivirta-, vakioaikaylivirta- ja käänteisaikaylivirtareleenä. Ylivirtarelettä voidaan käyttää, kun pienikin vikavirta on suurempi kuin suurin sallittu kuormitusvirta. Ylivirtarele ei havaitse virran suuntaa, joten se ei ole paras suoja silmukoidussa verkossa, jossa vikavirtaa voi tulla eri suunnista. (Elovaara & Haarla 2011b, 340)

Hetkellinen ylivirtarele eli momenttirele toimii lähes hidastuksetta, kun sen läpi kulkeva virta ylittää releeseen asetellun havahtumisarvon. Sähkömagneettisissa ja induktioreleissä on jonkin verran mekaanista hitautta. Staattiset releet saadaan toimimaan hidastuksetta. Sitä käytetään ns. lähioikosulkusuojana. (Timonen 1967, 746 - 748)

Vakioaikaylivirtarele on hetkellisen ylivirtareleen ja aikareleen yhdistelmä. Vakioaikaylivirtarelettä käytetään pienivirtaisten oikosulkujen ja ylikuormitusten suojaukseen. Toiminta-aika ei riipu ylivirran suuruudesta. Vakioaikaylivirtareleessä voidaan asettaa virta, jolla havahtuminen tapahtuu, sekä havahtumisesta laukaisuun kuluva aika. Tämän lisäksi voidaan asettaa virta-arvo, jonka ylitys aiheuttaa hetkellisen laukaisun (momentti- eli pikalaukaisu). Häiriöiden jälkiselvittelyssä on eduksi, jos aikareleet sisältävät osoittimen (laahausosoitin), joka jää osoittamaan, kuinka kauan rele on havahtumisensa jälkeen käynyt. (Aura & Tonteri 1993, 170; Timonen 1967, 746)

Sähköasemien läheisten kaapelien suojaukseen pitää käyttää vakioaikaylivirtareleiden viiveetöntä pikalaukaisua tai käänteisylivirta-aikarelettä. Kuvasta 23. voidaan havaita käänteisylivirta-aikareleen ominaiskäyrän muistuttavan sulakkeen ominaiskäyrää. Kyseinen rele siis toimii sitä nopeammin, mitä suurempi vikavirta on. Nopean ylivirtareleen korkea virta-asettelu estää epäselektiivisen laukaisun alempien suojausportaiden kanssa (virtaepäselektiivisyys). (Mörsky 1992, 295 - 296)

Ellei kolmivaihejärjestelmän tähtipistettä ole maadoitettu, merkitsevät ainoastaan kahden tai kolmen vaiheen väliset eristysviat oikosulkua. Riittää, kun ylivirtasuojat asetetaan kahteen vaiheeseen. Tärkeisiin paikkoihin sijoitetaan kuitenkin releet kaikkiin vaiheisiin, jolloin yksi rele on varalla. (Timonen 1967, 748)



Kuva 25. Ylivirtareiden ominaiskäyriä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

5.1.2 Nollavirtarele

Nollavirtarelettä käytetään verkon epäsymmetrian havaitsemiseen. Nollavirtarele on summavirtarele, jonka lukema poikkeaa nolasta, kun verkossa on epäsymmetriaa. Se on virtamuuntajien toisiokäämeihin kytketty ylivirtarele, joka mittaa vaihevirtojen summaa ja toimii maasuluissa. Rele saa mittaustiedon summavirta- tai kaapelivirtamuuntajalta. Nollavirtarele ei tunnista virran suuntaa. (Elovaara & Haarla 2011b, 340; Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Nollavirtareleitä käytetään myös muuntajan maasulkusuojina. Siinä ne toimivat varasuojana muun verkon vioissa. Nollavirtareleellä voidaan laukaista myös tähtipisteen lähellä olevat viat. Näitä vikoja on vaikea havaita differentiaalireleellä, koska niiden aiheuttama epäsymmetria on pieni. (Elovaara & Haarla 2011b, 354)

5.1.3 Nollajänniterele

Nollajänniterele on tähtipisteen ja maan välistä jännitettä mittaava rele, jonka lukema poikkeaa nollasta, kun verkossa on epäsymmetriaa. Nollajännitereleen lukema poikkeaa nollasta myös yleensä terveessä tilassa, joka johtuu verkon maakapasitanssien epäsymmetriasta. Avojohtoverkossa poikkeama nollasta on suurempi kuin kaapeliverkossa, joka johtuu avojohtoverkon suuremmasta epäsymmetriasta. Avojohtoverkossa terveen tilan nollajännite voi olla jopa 5 % luokkaa, kun taas kaapeliverkossa se on 0...2 % vaihejännitteestä. (Mörsky 1992, 328)

5.1.4 Suunnattu maasulkurele

Suunta- ja tehoreleillä mitataan jännitteen tai virran hetkellisarvoja tai niistä johdettuja tehoja. Suuntareleen tehtävä on tehon virtaussuunnan ilmaiseminen. Silmukoitujen verkkojen ylivirta- ja oikosulkusuojauksessa käytetään suunnattua ylivirtarelettä. Generaattorin ja sitä pyörittävän voimakoneen suojana käytetään takatehorelettä. Sillä estetään generaattorin toimiminen moottorina. Keskijänniteverkon maasulkusuojaus on Suomessa toteutettu pääasiassa maasulun suuntareleillä. (Leena Korpisen [www-sivut 2016](#))

Maasulun suuntareleet mittaavat joko nollajännitteen ja summavirran muodostaman nollatehon (lois- tai pätöteho) suuntaa tai nykyään suoraan summavirtaa, vaihekulmaa ja nollajännitettä. Summavirtaa sekä virran suuntaa mittaavat suojat toimivat selektiivisesti maasta erotetussa verkossa riippumatta suojattavan johdon pituudesta. Virran suunta saadaan nollajännitteen ja summavirran välisen vaihekulman avulla. (Mörsky 1992, 327)

5.1.5 Distanssirele

Distanssireleet mittaavat sijoituspaikkansa ja vikapaikan välistä impedanssia sijoituspaikassa esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla. Distanssirele pystyy impedanssimittauksen perusteella määrittämään etäisyyden vikapaikkaan. Distanssirele porrastaa

toiminta-aikansa tämän arvon perusteella sitä lyhyemmäksi, mitä lähempänä oikosulkukohta on. Rele toimii kun mitattava impedanssi alittaa asetteluarvon. Releen mitaama impedanssi on sitä pienempi, mitä lähempänä vikapaikka on. Distanssirelettä käytetään pääasiassa silmukoiduissa verkoissa. Suomessa distanssireleitä käytetään siirtoverkon oiko- ja maasulkusuojina. (Leena Korpisen www-sivut 2016)

Distanssirele havaitsee virran suunnan ja etäisyyden, joten sitä voidaan käyttää myös silmukoiduissa verkoissa. Distanssireleellä toteutetun suojauksen etuna differentiaalireleeseen nähden verrattuna on toimiminen selektiivisesti myös ilman viestiyhteyttä. (Elovaara & Haarla 2011b, 340)

5.1.6 Differentiaalirele

Vertoreleet vertaavat verkon eri osissa kulkevia virtoja tai tehoja. Niillä voidaan suojata muuntajia, generaattoreita, johtoja tai kiskoja. Vertailukohteenä voi olla esim. itseisarvot, vaihekulmat tai mitattavien virtojen sunnat. Tunnetuin vertorele on differentiaalirele. Sen toiminta perustuu mitattujen virtojen vertailuun. (Leena Korpisen www-sivut 2016)

Vertosuojat ovat herkkiä ja nopeita oikosulku- ja maasulkusuojia. Vertosuojaa voidaan käyttää maasulkusuojana vain maadoitetuissa järjestelmissä. Pitkittäisvertosuojan eli differentiaalireleen toiminta perustuu kahden peräkkäisen mittauskohdan välillä syntyvään erovirtaan. Erovirta kulkee releen kautta aiheuttaen havahtumisen. Suojauskohteenä voi olla generaattori, muuntaja, johto tai näiden yhdistelmä. Poikittaisvertosuojaa käytetään mm. rinnakkaisten johtojen virranjaon valvontaan. Jotta herkkyyttä voitaisiin käyttää hyväksi virhelaukaisujen lisääntymättä, käytetään vakavoitua vertosuojaa eli stabiloitua differentiaalisuojaa tai salparele-estoa. Vakavoitu vertorele eli prosenttidifferentiaalirele ei toimi erovirran tietyllä absoluuttisella arvolla, vaan vasta kun erovirta on saavuttanut tietyn suhteellisen arvon suojauskohteen läpi kulkevaan virtaan verrattuna. (Timonen 1967, 749 - 750)

5.2 Suojalaitteet

Releet eivät yksin pysty suoriutumaan suojaustehtävistä, vaan ne tarvitsevat avukseen muitakin komponentteja. Tällaisia ovat mittamuuntajat, katkaisijat, apuenergialähteet, hälytys- ja raportointikeskukset sekä mittaus-, laukaisu- ja tiedonsiirtoyhteydet. (Mörsky 1992, 16)

5.2.1 Mittamuuntaja

Mittamuuntajat, joita ovat virta- ja jännitemuuntajat, muuntavat sähköverkon primäärisuureet, virran ja jännitteen, releille sopivaan muotoon. Releet ovat mittarien kaltaisia instrumentteja, jotka on varustettu kytkentäelimillä ja standardoitu tietyille virroille ja jännitteille. Hyvinkin suurista ja erilaisista sähköverkon primäärisuureista huolimatta tullaan toimeen harvoilla ja pienikokoisilla releillä mittamuuntajien ansiosta. Lisäksi releet voidaan sijoittaa etäällekin suojattavasta kohteesta. (Mörsky 1992, 16)

5.2.2 Katkaisija

Katkaisija on sähköverkon primääripiirin osa, jolle releet antavat sulku- ja avauskomentimensa välityksellä toimintaohjeita. Katkaisija kykenee suorittamaan kaikki tarvittavat kytkentätoimenpiteet asianomaisessa kohdassa sähköverkkoa. Releen tehtävä on ohjata apuenergialähteestä saatava apujännite katkaisijan auki- tai kiinnikytkentäkelalle oikea-aikaisesti. (Mörsky 1992, 16)

5.2.3 Apuenergialähde

Apuenergialähde, yleensä tasasuuntaajalla syötetty akusto, tarvitaan tyydyttämään sähköverkon vikatilanteidenkin aikana tiettyjen laitteiden tarvitsema jännite, mm. katkaisijoiden ohjaaminen auki ja kiinni. Apuenergialähde on keskeinen osa ns. apusähköjärjestelmää, jonka tärkein tehtävä on täydentää relesuojauksen muodostama kokonaisuus sähkön tarpeen osalta. (Mörsky 1992, 17)

5.2.4 Hälytys- ja raportointikeskus

Hälytys- ja raportointikeskuksia tarvitaan, jotta vikatilanteista saataisiin mahdollisimman nopeasti ja luotettavasti oikea kuva. Releitä on usein suuriakin määriä tarkasteltavassa kohteessa eripuolille sijoitettuina, jolloin releiden toimintatietojen keskitetty kerääminen on tarpeellista. Tapahtumien jälkianalyysissä selkeästä ja oikea-aikaisesta raportoinnista saattaa olla suurta hyötyä. (Mörsky 1992, 17)

5.2.5 Tiedonsiirto

Relesuojauksen muodostamassa kokonaisuudessa tarvitaan luonnollisesti komponenttien välisiä johdotuksia. Johdotukset eivät nykyään rajoitu tietyn rajatun alueen, esimerkiksi voimalaitoksen tai sähköaseman virtojen ja jännitteiden siirtoon, vaan käsitävät ko. alueen relesuojasta palvelevia tietojensiirtoyhteyksiä ja vieläpä eri alueiden välisiä mittaus- ja kytkentätietoja siirtäviä tietoliikenneyhteyksiä. (Mörsky 1992, 17)

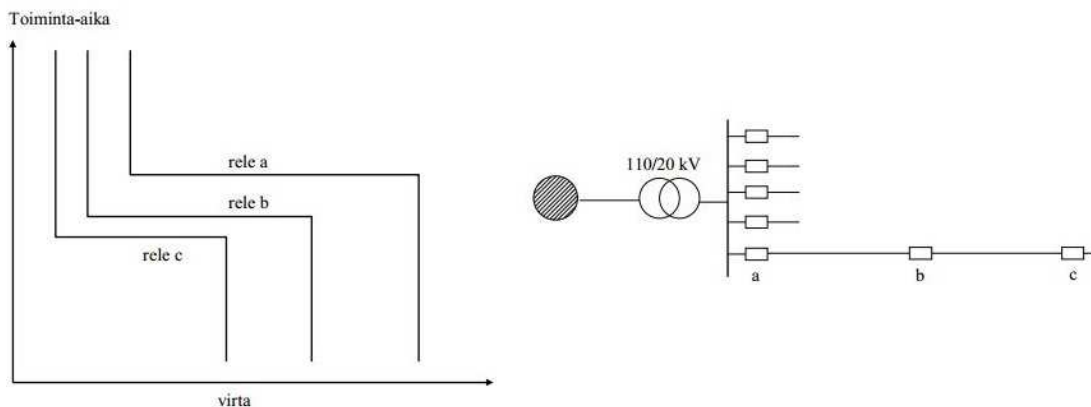
5.3 Selektiivisyys

Selektiivisyys on ominaisuus, jonka avulla rele havaitsee vian suoja-alueella, muttei toimi, jos vikaa ei ole tai vika on suoja-alueen ulkopuolella. (Mörsky 1992, 15 - 16)

Tässä opinnäytetyössä perehdytään selektiivisyyden osalta aika- ja virtaselektiivisyys- ja lukitussuojaukseen. Muita erilaisia selektiivisyyden toteutustapoja ovat:

- suuntaselektiivinen suojaus
- impedanssiselektiivinen suojaus

Selektiivisyys voidaan toteuttaa perättäisten suojausten aikaporrastuksella siten, että viimeisin eli lähimpänä vikaa oleva suojaus – toimii aina ensimmäisenä mahdollisen vian ilmetessä. Tätä kutsutaan aikaselektiiviseksi suojaukseksi.



Kuva 26. Selektiivisyyden toteutus aikaporrastuksella. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Selektiivisyyden toteutumisen kannalta peräkkäin olevilla katkaisijoilla tulee aikaporrastus toteuttaa 200 ms väleillä jotta alempi suojausporras ehtii varmasti laukaisemaan katkaisijan ennemmin ylempää porrasta. 200 ms aikaporrastusta voidaan käyttää nykyaikaisilla mikroprosessoripohjaisilla releillä. Vanhemmilla elektronisilla releillä aikaeron tulee olla vähintään 300 ms. Mekaanisilla releillä selektiivisen toiminnan ehtona on vähintään 500 ms aikaporrastus. (Lakervi & Partanen 2008, 182)

Selektiivisyys voidaan myös toteuttaa erilaisilla lukituksilla. Tätä kutsutaan lukitus-suojaukseksi. Lukitussuojauksen tarkoituksena on nopeuttaa suojauksen toimintaa. Peruseriaatteena on käyttää suojausketjussa peräkkäisten suojienvälisiä lukituksia hyväksi, jotta irtikytkentä tapahtuisi vain alueelle, jossa vika sijaitsee. Tällaiselle lukitussuojaukselle on tarvetta esimerkiksi tilanteessa, jossa vika on lähdössä ja sekä lähdön että syötön ylivirtasuojat havahtuvat. Lukitussuojaus toimii tässä tilanteessa niin, että viallisen lähdön suoja lukitsee syötön puoleisen suojan lukittavan portaan toiminnan ja laukaisee katkaisijan lähdölle asetellussa ajassa. Parhaiten lukitussuoja soveltuu käytettäväksi säteittäisverkoissa, joissa oikosulkuvirrat ovat huomattavasti suurempia kuin kuormitusvirrat. Tällöin virta-asettelun löytäminen lukituksen antavalle ylivirta-portaalle on yleensä helppoa. On myös varmistuttava siitä, että lukituksen antava porras ei havahdu suojausalueella tapahtuvassa viassa, mikäli vikavirtasyöttöä on mahdollista tulla myös kyseisestä lähdöstä (takasyöttö). Tällöin lukituksen antavan portaan virta-asettelu on valittava riittävästi suuremmaksi kuin takasyötön vikavirta tai on käytettävä suuntarelettä lukitussignaalin muodostamiseen. (ABB TTT-käsikirja 7.5.5 2000 - 07, 32)

Jotta lukitussuojauksen selektiivisyys toteutuu luotettavasti, on lukittavan ylivirtaportaan toimintaa hidastettava. Tämä asetettava toimintaviive riippuu käytettävien suojarelaytyyppien ominaisuuksista, virtamuuntajien toistokyvystä sekä lukituskanavan toteuttamistavasta. Tarvittavaa toimintaviivettä voidaan arvioida ottamalla huomioon seuraavat asiat:

- lukituksen antavan suojausportaan havahtumisaika, joka sisältää sekä havahtumisviiveen että lähtöreleen toimintaviiveen
- lukittavan suojan sisäänmenopiirien vasteaika
- lukittavan suojausportaan retardaatio- eli pyörtöaika

Laskemalla em. ajat yhteen saadaan lyhin mahdollinen aika lukittavalle ylivirtaportalle. Tyypillisesti tämä aika on luokkaa 100 ms, mikäli lukituspiirissä ei käytetä apureleitä. (ABB TTT-käsikirja 7.5.5 2000 - 07, 32)

5.4 Jälleenkytkentäsekvenssit

Suurin osa avojohtoverkon maasuluista ja valokaarioikosuluista (n. 80 %) sammuu itsestään, kun verkko kytketään hetkeksi jännitteettömäksi. Jännitteettömän väliajan on oltava niin pitkä, että valokaarta ylläpitävä ilman ionisaatio ehtii hävitä ja ilman sähkölujuus palautua. Ionisaation häviämisaajat ovat eri jännitteillä likimain seuraavat:

23 kV	0,07 s
46 kV	0,08 s
115 kV	0,14 s
230 kV	0,30 s

Taulukko 5. Ionisaation häviämisaikoja eri jännitetasoilla.

Kun katkaisija avataan n. 0,2...0,7s ajaksi, valokaarivika on useimmiten mennyt ohi haittaa aiheuttamatta.

Avojohtojen maasulkusuojaukseen liitetään normaalisti ns. pikajälleenkytkentärele, joka suojarelayiden havaitessa vian ja ohjatessa katkaisijan auki, ohjaa katkaisijan jälleen kiinni tuon 0,2...0,7s jännitteettömän väliajan jälkeen. Jos vika on hävinnyt, katkaisija jää kiinni. Jos vika on jäljellä, suojarelayet ohjaavat katkaisijan uudelleen auki.

Pikajälleenkytkentää käytetään säännöllisesti avojohtoverkkojen maasulkusuojauksen ja joskus myös niiden oikosulkusuojauksen yhteydessä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Pikajälleenkytkentää täydennetään usein ns. aikajälleenkytkennällä. Tietyt ohimenevät viat, kuten johtimiin lentänyt risu, eivät häviä pikajälleenkytkennän aikana. Aikajälleenkytkentää käytettäessä ajk-rele ohjaa katkaisijan uudelleen kiinni n. 30...120s kuluttua epäonnistuneesta pikajälleenkytkennästä. Jos vika on hävinnyt (risu palanut poikki ja pudonnut), katkaisija jää kiinni. Jos vika on edelleen jäljellä, katkaisija avautuu ja tällä kertaa lopullisesti. Vasta tässä vaiheessa sähkölaitoksen valvomoon menee ilmoitus pysyvistä viasta. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Jälleenkytkennät edustavat vanhinta, jo vuosikymmeniä käytössä ollutta sähkölaitosautomaatiota. Kaapelilähtöjen yhteydessä jälleenkytkentöjä ei yleensä käytetä, koska kaapeliverkon viat ovat lähes aina pysyviä vikoja (kaivinkone tms.). Pikajälleenkytkentää käytetään yleisesti myös kantaverkon johdoilla, joilla sen käyttö lisää myös voimaloiden rinnankäytön stabiilisuutta. Aikajälleenkytkentää ei voida käyttää johdoilla, joiden kautta tapahtuu generaattoreiden rinnankäyntiä, koska ajk:n pitkä jännitteetön väliaika ehtisi saattaa generaattorit epätahtiin. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Jälleenkytkennät muodostavat tietyn ongelman yrityksille, jotka käyttävät modernia tietotekniikkaa toiminnoissaan. Useimmat atk-laitteet sekoavat jo 0,5s pituisen jännitekatkoksen sattuessa, ellei niiden sähkönsaantia ole varmistettu keskeytymättömän sähkönsyötön laitteilla. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

Toisaalta jälleenkytkennät ovat välttämättömiä sähkönjakelun keskeytyskustannusten optimoinnin kannalta. Ilman niitä vuotuiset keskeytysajat olisivat paljon nykyistä pidempiä. (Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut 2016)

6 OIKOSULKUSUOJAUS

VSV Oy:llä ei ole käytössään yhtenäisiä suojausperiaatteita ylivirtasuojauksen asetteluvarvoille. Tässä kappaleessa keskitytäänkin yhtenäisten ylivirtasuojauksen asetteluiden määrittämiseen VSV Oy:n verkossa. Tällä hetkellä ylivirtasuojausasettelut vaihtelevat huomattavasti riippuen suojattavasta lähdöstä. Yhtenäisten suojausperiaatteiden käyttäminen vähentävää huomattavasti releasetteluiden luomisesta ja muutoksista aiheutuvaa taakkaa sekä tasapainottaa verkon toimintaa häiriöiden suhteen.

Oikosulkusuojauksen tavoitteena on ehkäistä oikosulkuvirran johdoille ja laitteille aiheuttamat mekaaniset ja lämpenemisvauriot sekä erottaa vioittunut johto-osa verkosta. Toisena tavoitteena on taata järjestelmän turvallisuus myös vikatilanteissa sekä käyttäjille että ulkopuolisille. Tarkoitukseen käytetään Suomessa vakioaikaylivirtarelettä. Rele sisältää usein isolla virralla hetkellislaukaisun aikaansaavan toiminnon. Samat releet toimivat myös ylivirtasuojina. (Lakervi & Partanen 2008, 176)

Avojohtoverkossa ylikuormitus on harvinainen johtimien hyvän lämmönluovutuksen takia. Tällöin havahtumisvirran asetteluvarvo on valittava siten, että rele toimii noin kaksinkertaisella kuormitusvirralla, mutta myös johtoverkon loppupäässä tapahtuvassa kaksivaiheisessa oikosulussa. Kaapeliverkossa havahtumisen pitää tapahtua viimeistään kuormitettavuuden tullessa vastaan. Jos kuormittumista seurataan valvotun kaukomittauksen avulla, suurempikin virran asetteluvarvo tulee kysymykseen. Oikosulkuvirralla suojauksen tulee tällöinkin havahtua. (Lakervi & Partanen 2008, 176)

Oikosulkuvika tai oikosulkuilmiön sisältämä maasulku, eli maa-oikosulku aiheuttaa verkkoon jännitekuopan, joka näkyy kaikilla sähköaseman terveillä johtolähdöillä. Jännitekuopassa asiakkaan kokema jakelujännite laskee hetkellisesti välille 1...90 % nimellisjännitteestä. Jännitekuopan syvyys riippuu oikosulkuvirran suuruudesta. Tämä tarkoittaa, että mitä lähempänä sähköasemaa oikosulku tapahtuu, sitä syvempi on syntävä jännitekuoppa. Mitä pidempi on oikosulkuvian vaikutusaika, sitä pidempi on myös jännitekuoppa. Parin sekunnin kymmenyksen mittainen jännitekuoppa voi aiheuttaa teollisuusprosesseille merkittävää haittaa verrattuna sekunnin mittaiseen totaaliseen katkoon. Tästä syystä jännitekuopat tulisi poistaa jälleenkytkennöillä mahdolli-

simman nopeasti. Hetkellislaukaisulla voidaan varmistaa, etteivät sähköaseman läheisten johto-osien oikosulkukestoisuudet ylity. Samalla myös syvien jännitekuoppien kestoajat jäävät lyhyiksi. Sähköaseman pääkatkaisijassa käytetään myös hetkellislaukaisua suojaamaan kiskostoa mahdollisissa kiskosto-oikosuluissa. Pääkatkaisijan hetkellislaukaisu toimisi myös keskijännitelähdöillä tapahtuvissa oikosuluissa, ellei lähdön suojareleen havahtuminen estäisi pääkatkaisijan hetkellislaukaisua. Tällaisella luokituksella saavutetaan suojauksen selektiivisyys myös kaikissa nopeissa laukaisuissa. Hetkellislaukaisun toimiminen edellyttää virtamuuntajilta hyvää toistokykyä myös suurilla virroilla. Kytkevävirtasysäykset saattavat aikaansaada releistyksen tarpeettomastikin toimimaan, jollei asiaan ole kiinnitetty huomiota. (Lakervi & Partanen 2008, 176 – 177; Salo 2006, 20 - 21)

Toisinaan johdoilla on katkaisijoita muuallakin kuin syöttävän sähköaseman kenoissa. Tällaisen ns. välikatkaisijan toimiminen takanaan sattuvassa oikosulussa toteutetaan ylivirtareleiden aikaselektiivisyydellä eli asettamalla välikatkaisijaan lyhyempi laukaisu-aika kuin kennon katkaisijaan. (Lakervi & Partanen 2008, 177)

Oikosulkukestoisuutta tarkistettaessa on otettava huomioon mahdollisen pikajälleenkytkennän vaikutus. Johtimia lämmittäväksi ajaksi tulee tällöin pikajälleenkytkentää edeltävän ja sen jälkeisten oikosulkujen kestojen summa eli releen aseteltujen hidastusaikojen summa lisättynä kunkin katkaisutoiminnon releen havahtumis- ja katkaisijan toiminta-ajoilla. Pikajälleenkytkentä on hyödyllinen ohimenevien valokaarivikojen selvittämisessä. Maakaapelivioissa ei yleensä käytetä pikajälleenkytkentää, koska viat ovat useimmiten pysyviä. Myös aikajälleenkytkennällä on lämpenemää tuntuvasti lisäävä vaikutus. On huomattava, että lämpenemävaurioita voidaan aiheuttaa myös kauko-ohjauksella, kytkemällä oikosulussa oleva johto lyhyen jäähtymisajan jälkeen. Ajk:n jännitteettömänä aikana tapahtuva jäähtyminen otetaan huomioon laskemalla nk. oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika yhtälöstä t . (Lakervi & Partanen 2008, 177)

$$t = t_1 \times e^{\frac{-t_0}{\tau}} + t_2$$

jossa:

t_1 on oikosulun kesto-aika ennen ajk:n jännitteetöntä aikaa, eli releen aseteltujen hidastusaikojen summa lisättynä releen havatumis- ja katkaisijan toiminta-aikojen summalla

t_0 on ajk:n jännitteetön aika

τ on johtimen jäähtymisaikavakio

t_2 on ajk:n jälkeinen oikosulun kesto-aika

(Lakervi & Partanen 2008, 177)

Johtojen oikosulkusuojana voidaan käyttää:

- ylivirta-aikareleitä
- suunnattuja ylivirta-aikareleitä
- verto- eli differentiaalireleitä
- etäisyys- eli distanssireleitä

(Aura & Tonteri 1993. 176)

Oikosulkusuojauksen mitoituksessa pitää tietää seuraavia arvoja:

- suurin 3-vaiheinen oikosulkuvirta
 - terminen ja dynaaminen mitoitus
 - kytkinlaitteiden katkaisukyky
 - suojauksen selektiivisyys
- pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta
 - relesetelut
 - suojauksen selektiivisyys

6.1.1 Säteittäisen verkon oikosulkusuojaus

Säteittäisen jakeluverkon oikosulkusuojaus toteutetaan yleensä vakioaikaylivirtareleillä. Käytettäessä vakioaikaylivirtareleitä on peräkkäisten katkaisijoiden releiden hidastuksille varattava riittävä aikaporrastus selektiivisyyden takia. Liian suurten aika-

portaiden käyttö hidastaa kuitenkin liiaksi syöttösuunnassa olevia katkaisijoita. Porastusta laskettaessa on otettava huomioon releen toiminta-ajan lisäksi katkaisijan toiminta-aika ja valokaariaika sekä suojalaitteiden toiminta-ajan lisäksi aikojen hajonnasta johtuva varmuusaika. Samassa jännitetasossa tyydytään tavallisesti enintään kolmiportaiseen suojaukseen. Ylivirtareleillä on ongelmia selektiivisyyden saavuttamisen kanssa. Säteittäisen jakeluverkon nopea oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa myös käänteisaikahidasteisilla ylivirtareleillä, joiden toimintahidastus pienenee virran kasvassa, tai joko vakioaika- tai käänteisaikahidasteisilla ylivirtasuuntareleillä. (Mörsky 1992, 296)

6.1.2 Silmukoidun verkon oikosulkusuojaus

Silmukoidussa jakeluverkossa oikosulkusuojaus toteutetaan distanssi- ja apuyhteysvertoreleillä. Varsinkin kaupunkiverkoissa, joissa sähköasemien välinen etäisyys on lyhyt ja verkkoa käytetään silmukoituna, käytetään ensisijaisina suojareleinä pitkittäisiä vertosuojaia, joissa verrataan johdon eri päissä mitattuja virtoja keskenään. Vertoreleillä on lisäksi nolla- ja ylivirtakäynnistysreleet, jotka varmistavat niiden oikean toiminnan. Silmukoidun jakeluverkon runkojohtojen varasuojauksia toteutetaan distanssireleillä. Distanssireleen käyttö pääsuojana silmukoidussa jakeluverkossa on mahdotonta, koska jännitteen pienuuden ja virran suuruuden tähden impedanssin mittaaminen on liian epätarkkaa. (Mörsky 1992, 296 - 297)

Johdoilla, joiden varrelle liittyy kuormituksia, ei voida käyttää normaalia vertorelettä. Tällöin pitää käyttää suuntavertosuojaa, jonka periaate soveltuu oikosulkusuojien lisäksi maasulkusuojiin. Oikosulkusuojoissa mitataan vaihevirtoja ja vaihe- tai pääjännitteitä, maasulkusuojoissa nollavirtoja ja -jännitteitä. Suuntavertosuojan toimintaa varmistetaan tavallisesti liittämällä siihen vielä käynnistysreleet, jotka edellyttävät, että vikavirta on tarpeeksi suuri. Käynnistysrelettä voidaan käyttää myös epäselektiiviseen varalaukaisuun aikareleen avulla. Silmukoidun verkon oikosulkusuojaukseen ei tässä opinnäytetyössä perehdytä paremmin, koska työn tilaajalla ei ole silmukkaverkkoa käytössä muuten kuin varasyöttöyhteyksiä varten. (Mörsky 1992, 297 – 298)

6.1.3 Suojausportaiden määrittäminen

Kuten aikaisemmin todettiin – käytetään säteittäisverkon oikosulkusuojaukseen suojausportaita. Käytettävissä olevien suojausportaiden lukumäärä riippuu reletyypistä. Vanhemmista reletyypeistä näitä löytyy yleensä kaksi. Uudemmista reletyypeistä löytyy myös kolmas ylivirtaporras, jota kannattaa hyödyntää jos sellainen mahdollisuus on olemassa. (Salo 2006, 38)

Alimman suojaustason, eli johtolähtöjen kohdalla ensimmäistä suojausportasta tarvitaan ylivirtasuojauksen perusportaksi. Ensimmäisen ylivirtaportaan tehtävä on havaita pieninkin johtolähdöllä esiintyvä oikosulkuvirta. Suojaus pitää kuitenkin asettaa niin, että kuormitusvirta tai kytkentävirtasysäykset eivät saa relettä toimimaan. Ensimmäisen suojausportaan tulee täyttää kyseiset ehdot myös korvaustilanteissa. (Salo 2006, 38)

Ylivirtasuojauksen toista suojausportasta käytetään laukaisemaan nopeasti pois suurvirtaiset, lähellä sähköasemaa tapahtuvat oikosulut. Kytkentävirtasysäysten asettamisrajoissa suojausportas kannattaa kuitenkin asettaa ulottumaan mahdollisimman kauas johtolähdölle, jolloin parhaassa tapauksessa koko johtolähdölle saadaan oikosulkukestoisuutta parantava ja jännitekuoppahaittoja lieventävä nopea laukaisuporras. Valtaosa oikosulkuvikojen laukaisuista tapahtuu siis juuri toisen suojausportaan toimesta. (Salo 2006, 38)

Johtolähdöillä, joilla kolmannen ylivirtasuojausportaan käyttö on mahdollista, voidaan kolmatta portasta käyttää vain lähdön alkuosalle ulottuvana suojausvyöhykkeenä, joka laukaisee entistä nopeammin pois vikavirroiltaan suurimmat oikosulut ja niiden aiheuttamat syvimmat jännitekuopat. Tämänkin portaan kohdalla tulee huolehtia, ettei suojaus toimi kytkentävirtasysäysten vaikutuksesta. (Salo 2006, 38)

20 kV syöttökennon suojausportaan ylivirtasuojauksella on kolme tehtävää. Tässä kohdassa ylivirtasuojauksessa tarvitaan kahta suojausportasta, joista ensimmäinen toimii johtolähtöjen varasuojana ja päämuuntajan ylikuormitussuojana, kun taas toinen portas suojaa kiskostoa oikosuluilta. (Salo 2006, 38)

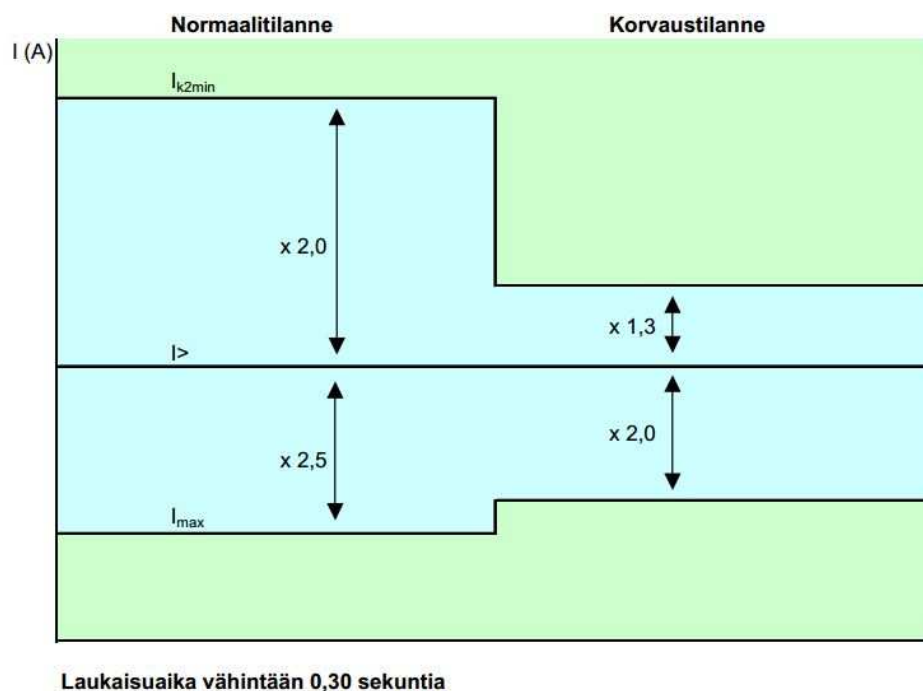
6.1.4 Laukaisuvirtojen määrittäminen

Ylivirtareleasettelun arvo määrää verkon oikosulkukestoisuusarvojen kanssa releelle aseteltavan aikaviiveen maksimiarvon. Johtolähdön pituuden kasvaessa lähdön pienin oikosulkuvirta pienenee ja kuormitusvirta tyypillisesti kasvaa. Tällöin kapenee myös väli, johon releen laukaisuvirta on aseteltava. Ylivirtasuojauksen laukaisuaikojen asetelua rajoittaa myös jakelumuuntajien magnetoimisvirroista aiheutuva kytkentävirtasysäys, joka syntyy kun jännitteetön johtolähtö kytketään verkkoon. Syntyvän kytkentävirrän suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten muuntajien koko ja lukumäärä, kytkentähetken vaihekulma sekä rautasydämen remanenssivuo. Suurimmillaan jakelumuuntajan tuottama kytkentävirta voi olla noin 8...12-kertainen muuntajan nimellivirtaan nähden. Kytkentävirta vaimenee puoleen arvoon noin 0.05...0.3 sekunnissa ja jatkuvuustilan arvoon noin yhdessä sekunnissa. Ylivirtasuojauksen osalta on tärkeää, ettei kytkentävirtasysäys saa suojausta toimimaan. (Salo 2006, 5)

Ylivirtasuojauksen asetteluille ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa tapaa. Sen sijaan suosituksia löytyy kirjallisuuslähteistä joitakin. Ensimmäiselle ylivirtaportaalta suositellaan vähintään 2 kertaa suurempaa asettelua suurimpaan kuormitusvirtaan nähden. Sen sijaan suositeltua asetteluarvoa ensimmäiselle portaalta suhteessa pienimpään esiintyvään oikosulkuvirtaan ei kirjallisuuslähteissä ole. Toisaalta ensimmäisen portaan pitää kuitenkin toimia myös pienimmällä mahdollisella esiintyvällä kaksivaiheisella oikosulkuvirralla, joten asetteluarvon tulee olla sitä pienempi. Toiselle ylivirtaportaalta suositellaan muutaman kiloampeerin asetteluarvoa. Tässä opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään Vattenfall Verkkoy:n (nykyisin Elenia Oy) käyttämän ylivirtasuojausasettelujen menettelyohjeen rajaehdot. Rajaehdot vastasivat likimain kirjallisuuslähteistä löytyviä suosituksia. (Lakervi & Partanen 2008, 176)

Johtolähdön 1. suojausporras

Vattenfall Verkkoy:n rajaehdoissa suositellaan ensimmäisen ylivirtaportaan I_D laukaisuvirraksi vähintään $2.5 \times I_{\max}$ ja enintään $0.5 \times I_{k2\min}$. Korvaustilanteessa portaan I_D asetelut tulisivat olla vähintään $2 \times I_{\max}$ ja enintään $0.77 \times I_{k2\min}$. Rajaehdot on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Ylivirtasuojauksen laukaisuvirran $I >$ rajaehdot. (Salo 2006, 40)

Rajaehdot ovat hyvin uskottavia, sillä pienin asetteluarvo riittää 0,3 sekunnin laukaisujaksolla hyvin niin, että kytkentävirtasysäykset eivät ehdi aiheuttamaan katkaisijan virheellistä avautumista. Suurin asetteluarvo taas ottaa huomioon mahdollisen virheen pienimmän kaksivaiheisen oikosulkuvirran laskennassa sekä antaa sille mahdollisuuden olla vielä 50 % pienempi kuin mitä järjestelmä esittää. Oikosulkuvirran poikkeama järjestelmän esittämästä arvosta voi johtua esim. todellisen reaktanssin ja resistanssin poikkeamasta laskennallisiin nähden. Tämä voi johtua siitä, että järjestelmään syötetyt johtopituudet eivät ole tarkkoja sekä myös vikapiiriin kuuluvasta ylimääräisestä vika-resistanssista.

Releasetteluita ei välttämättä saada kaikilla korvaustilanteilla mahtumaan rajaehtojesisään. Tällaiset tilanteet ovat tapauskohtaisia ja niissä arvot pitää määrittää erikseen, mutta kuitenkin niin että verkon käyttö on vakaata ja suojauksen toimivuus riittävää.

Mikäli ylivirtasuojauksessa siirrytään alle 0,3 sekunnin laukaisuaikoihin, kytkentävirtasysäyksen vaikutus kasvaa ja tällöin laukaisuvirran 2,5-kertainen arvo kuormitusvirtaan nähden ei välttämättä enää riitä. Riittämättömyys tulee vastaan varsinkin taajama- ja teollisuuslähdeillä, joiden kytkentävirrät ovat huomattavasti suurempia johtuen suurista jakelumuuntajista. Ongelmia voi syntyä myös korvaustilanteissa. Jotta voitaisiin

käyttää esimerkiksi 0.15 sekunnin laukaisuaikaa koko johtolähdölle ulottuvalla suojausportaalla, pitäisi arvion mukaan käyttää 5...7 kertaista kuormitusvirran arvoa, kun kyseessä on taajama- tai teollisuuslähtö. Korvaustilanteessa tämä arvo kasvaisi lähes jokaisessa tapauksessa ylitse pienimmän johtolähdöllä esiintyvän oikosulkuvirran. Tästä syystä alle 0.3 sekunnin laukaisuaikojen käyttäminen ensimmäisellä suojausportaalla ei yleensä ole mahdollista. (Salo 2006, 39 - 40)

Johtolähdön 2. suojausporras

Johtolähdön ylivirtasuojauksen toisen suojausportaan kohdalla asetelua ei rajoita pienin esiintyvä oikosulkuvirta. Sen sijaan kytkentävirtasysäyksen tuoma rajoitus kasvaa, koska laukaisuaika on tällä portaalla on lyhyempi. I>> tulee asetella rajaehdojen puitteissa niin pieneksi, että toinen suojausporras kattaa mahdollisimman suuren osan johtolähdöstä. (Salo 2006, 41)

Johtolähdön 3. suojausporras

Johtolähdöillä joissa on mahdollista käyttää kolmiportaista ylivirtasuojausta, asetellaan kolmas porras ulottumaan vain johtolähdön alkuosalle, hyvin lyhyellä laukaisuajalla. I>>> tulee olla vähintään 2 kA luokkaa. Kyseinen raja-arvo jättää pelivaraa laukaisuvirran aseteluun, mutta on samalla riittävän korkea, jotta kytkentävirtasysäykset eivät aiheuta katkaisijan virheellistä avautumista lyhyilläkin laukaisuajoilla. Joissakin uusissa releissä on olemassa kaksinkertaistamislogiikka-toiminto, joka kaksinkertaistaa laukaisuvirran asetteluarvon kytkentähetken ajaksi. Toimintoa kannattaa käyttää virheellisten katkaisijatoimien välttämiseksi. (Salo 2006, 41)

Jos rajaehdot mahdollistavat, tulee kolmannen suojausportaan asetteluarvo määritellä niin, että suojausalue ulottuu mielellään johtolähdön alkupäässä sijaitsevalle solmupisteelle. Tällainen voi olla esimerkiksi kaukokäytettävä erotin. Tämä järjestely tukee vian paikannusta. Jos suojausalueen rajausta tehdään kaksivaiheisen oikosulkuvirran mukaan, saattaa suojausporras havahtua myös rajapisteen jälkeen tapahtuvissa vioissa. Jos rajausta tehdään kolmivaiheisen oikosulkuvirran mukaan, ei suojausporras välttämättä havaitse kaikkia vikoja ennen rajapistettä. (Salo 2006, 41)

20 kV syötön 1. suojausporras

20 kV syöttökennon ensimmäinen porras toimii johtolähtöjen varasuojana sekä päämuuntajan ylikuormitussuojana. Johtolähtöjen varasuojauksen kannalta 20 kV syötön ylivirtasuojauksen ensimmäisen suojausportaan laukaisuvirta tulisi asetella mahdollisimman pieneksi, jotta myös 20 kV syötön taso ulottuisi mahdollisimman kauas johtolähdöille ja havaitsisi pienetkin oikosulkuvirrat johtolähtöjen oman suojauksen petäessä. 20 kV syötön tasolla vaikuttava kuormitusvirta on kuitenkin hyvin suuri sen muodostuessa johtolähtöjen summavirrasta. Varasuojauksen toimivuuden kannalta tulee ongelmia, koska se ei saa toimia kuormitusvirralla, ellei kyseessä ole muuntajalle vaarallinen ylikuormitus. Ongelmia tulee mm. tilanteissa joissa lähdoillä esiintyvä oikosulkuvirta on pieni ja lähdon oma suoja pettää. 20 kV syötön ensimmäisen suojausportaan laukaisuvirta tulee kuitenkin asetella vähintään päämuuntajan sallittua ylikuormitusta vastaavaksi. Asettelemalla laukaisuvirta vastaamaan täsmälleen päämuuntajan sallitun ylikuormituksen mukaan, saavutetaan mahdollisimman laaja varausalue, mutta myös päämuuntajan suojaus toteutuu. (Salo 2006, 42)

20 kV syötön 2. suojausporras

20 kV syöttökennon toisen suojausportaan tulee havaita kaikki 20 kV kiskossa tapahtuvat oikosulut. Laukaisuvirran $I_{>>}$ tulee olla pienempi kuin pienimmän mahdollisen kiskossa esiintyvän oikosulkuvirran I_{k2min} . Toisaalta $I_{>>}$ pitää olla suurempi kuin johtolähtöjen ylivirtasuojauksessa käytettävien laukaisuvirtojen, jotta 20 kV syötön katkaisija ei missään tapauksessa avaudu ennen lähdon katkaisijaa, kun kyseessä on lähdon vika. ABB Oy:n TTT-käsikirjan esimerkeissä käytetään peräkkäisten suojaustasojen laukaisuvirtojen välillä noin 20 % virhemarginaalia, jolla otetaan huomioon toiminta- ja mittausepä-tarkkuudet sekä varmistetaan selektiivinen toiminta. Tällöin syöttökennon toisen suojausportaan laukaisuvirran tulee olla vähintään 1.2 x suurimman johtolähtöjen ylivirtasuojauksessa esiintyvän laukaisuvirran suuruinen, ja pienimmän 20 kV kiskossa esiintyvän oikosulkuvirran I_{k2min} tulee olla 1.2 x $I_{>>}$. (Salo 2006, 43)

6.1.5 Laukaisuaikojen määrittäminen

Oikosulkuvian aikaisen valokaaren itsestään sammumisen todennäköisyys laukaisujan pidentämisellä, ei juuri kasva. Sen sijaan maasulkutapauksissa itsestään sammumisen todennäköisyys kasvaa, ja niiden yhteydessä laukaisu- eli polttoajan pidentämisestä on hyötyä. Oikosulkuvirrat ovat virroiltaan moninkertaisia verrattuna maasulkuvirtoihin ja niiden sammuminen on harvinaista. Oikosulkujen laukaisuaikojen määrittämisessä pitää lähteä liikkeelle virta-asetteluiden suuruuksista, releistyksen toiminta-ajoista, oikosulkukestoisuuksista ja näiden perusteella määrittää laukaisuaika. Lyhyiden laukaisuaikojen käyttö oikosulkutilanteissa on suositeltavaa, jotta oikosulkukestoisuudet eivät ylitä. Lyhyiden laukaisuaikojen käyttö ei myöskään nosta jällekytkentämääriä. Lyhyiden laukaisuaikojen käyttäminen myös pienentää asiakkaille näkyviä jännitekuoppia. Vaikka pitkillä laukaisuajoilla onnistuttaisiin sammuttamaan joitakin oikosulkuja, olisivat jännitekuopista aiheutuvat haitat niistä saavutettua hyötyä paljon suuremmat. (Salo 2006, 44 – 45)

Johtolähtöjen suojausportaat

Johtolähdön ylivirtaportaiden laukaisuaikojen tavoitearvot ovat 0.3 s ensimmäisellä, 0.15 s toisella ja 0.1 s kolmannella suojausportaalla. Nämä laukaisuajat ovat kuitenkin vain tavoitearvoja, joiden toteuttamisen mahdollisuus riippuu pitkälti käytetyistä reletyypeistä. Jos näitä aikoja ei pystytä käyttämään, on tyydyttävä lähimpään mahdolliseen arvoon ja huomioitava sen vaikutukset kytkentävirtasysäyksen ja selektiivisyyden osalta. VSV Oy:n verkossa tavoiteajoista pitää tapauskohtaisesti poiketa, varsinkin johtolähdöillä joissa on käytetty Swan-ilmajohtoa, sen pienen poikkipinta-alan vuoksi. (Salo 2006, 46)

20 kV syöttökennon laukaisuaikoja määritettäessä tulee ottaa suojaustasojen välinen aikaselektiivisyys huomioon. Vanhat sähkömekaaniset releet vaativat noin 0.5 s sekunnin, elektroniset 0.3 s ja numeeriset 0.15 s aikaporrastuksen suojaustasojen välille. Mikäli suojaustasoilla käytetään lukitussuojausta, voidaan ylemmällä eli lukitulla tasolla käyttää minimissään 0.15 sekunnin laukaisuaikaa. (Salo 2006, 46)

20 kV syötön suojausportaat

20 kV syötön ensimmäisellä suojausportaalla laukaisuaika tulee asetella noin yhden sekunnin tasolle, huolimatta siitä mitä releytyyppiä käytetään. Tämän portaan tarkoitus on suojata muuntajaa ylikuormitukselta sekä myös toimia johtolähtöjen varasuojana, joten mahdollisimman lyhyestä laukaisuajasta ei saavuteta merkittävää etua. Myöskään syötön tasolla vaikuttavat kytkentävirtasysäykset eivät tällä arvolla aiheuta ongelmia, eikä virhelaukaisuja pääse tapahtumaan. (Salo 2006, 47)

20 kV syötön toisella suojausportaan tehtävä on suojata kiskostoa oikosuluilta, joten lyhyiden laukaisuaikojen ja lukitusten käyttäminen on perusteltua. Kiskostossa esiintyvät viat ovat hyvin suurivirtaisia ja aiheuttavat tästä syystä huomattavaa vahinkoa ja vaaratilanteita. Laukaisuaika tulee asetella numeerisilla releillä noin 0.2 s ja vanhoilla releillä noin 0.6 s tasolle. 0.2 sekunnin laukaisuajan käytössä saattaa kuitenkin ilmetä ongelmia kytkentävirtasysäysten kanssa, joten sen kohdalla tulee suorittaa tapauskohtaista arviointia. (Salo 2006, 47)

6.1.6 Jälleenkytkentöjen määrittäminen

Jälleenkytkennöillä saadaan tehokkaasti poistettua vikoja, mutta niistä aiheutuu myös kiistattomasti haittaa varsinkin teollisuudelle. Lähdeillä joissa sijaitsee paljon teollisuutta, kannattaakin ainakin harkita niiden jättämistä kokonaan pois. Tämä kannattaa kuitenkin tehdä varauksella koska niiden jättämisestä kokonaan pois – on havaittu asiakkaiden kokemien pitkien keskeytyksien määrän kasvavan huomattavasti. Lähdeillä joissa ei sijaitse teollisuutta ja missä esiintyvät vikavirrat eivät ole suuria, kannattaa jälleenkytkentöjä ehdottomasti käyttää, koska ne selvittävät lähes 90 % keskijänniteverkon vioista. (Salo 2006, 48)

Jälleenkytkentöjä kannattaa käyttää johtolähdön ensimmäisellä ja toisella suojausportaalla. Varsinkin avojohtolähdeillä esiintyy paljon valokaarivikoja, joiden poistuminen jälleenkytkennöillä on hyvin todennäköistä. (Salo 2006, 49)

Kolmannella suojausportaalla jälleenkytkentöjen käyttö on poikkeavaa ensimmäisiin nähden. Kolmannen portaan toimiessa vikavirrat ovat suuria ja niistä aiheutuu huomattava jännitekuoppa terveille lähdöille. Jos vikaantunut johtolähtö jälleenkytketään ja vika ei ole poistunut, aiheutuu uusi jännitekuoppa. Lisäksi näin suurilla vikavirroilla jälleenkytkennät rasittavat huomattavasti sekä johtimia että katkaisutyön tekeviä katkaisijoita. Mikäli kolmannen suojausportaan suoja-alueella on maakaapelia, laskee todennäköisyys vian poistamiseen jälleenkytkennällä merkittävästi, sillä valokaarivikoja esiintyy vain ilmajohtoverkoissa. Näillä perusteluilla voidaan todeta, että tällä portaalla ei ole järkevää käyttää jälleenkytkentöjä. Myöskään 20 kV syötön suojaustasolla, jossa suojausportaat suojaavat päämuuntajaa ylikuormalta ja kiskostoa oikosuluilta, ei jälleenkytkentöjä tarvita. Jälleenkytkentöjen laukaisuaikojen t_2 ja t_3 , tulee olla samanpituisia kuin kyseisen suojausportaan alkuperäisen laukaisujan t_1 . (Salo 2006, 49)

6.1.7 Jännitteettömien aikojen määrittäminen

Pjk:n jännitteetön aika asetellaan tavallisesti välille 0.2...0.5 s, jotta ilman ionisaatio ehtii poistua ja mahdollinen valokaarivika sammua. Pjk:n asettelulle löytyy useita suosituksia välillä 0.2...0.6 sekuntia. Toimitusvarmuuden kannalta peruslähtökohta on, että mitä lyhyempi katko, sitä parempi on sähkön laatu asiakkaalla. Uusimmat tietokoneet voivat jopa kestää pjk:n häiriintymättä jos jännitteetön aika on riittävän lyhyt. Kuitenkin teollisuusprosessien tapauksessa lyhyempi katko voi olla huomattavasti haitallisempi kuin pidempi. Yleisesti ottaen lyhyttä jännitteetöntä aikaa voidaan pitää parempana, varsinkin kun herkkien teollisuusprosessien kohdalla ei ole tarkoitus käyttää pikajälleenkytkentää lainkaan. VSV Oy:n käyttöhenkilöstön suositus pjk:n asettelulle on 0.3 s. (Salo 2006, 63)

Ajk:n jännitteetömän ajan pituus tulee määrittellä siten, että lähdöllä jossa oikosulku tapahtuu, ehtivät johtimet jäähtymään riittävästi oikosulkuvirran aiheuttaman lämpenemisen jälkeen. VSV Oy:n käyttöhenkilöstö suosittelee ajk:n pituudeksi 30...120 s ja se pitää asetella tapauskohtaisesti.

7 MAASULKUSUOJAUS

VSV Oy:llä ei ole käytössään yhtenäisiä suojausperiaatteita maasulkusuojauksen asetteluarvoille. Tässä kappaleessa keskitytäänkin yhtenäisten maasulkusuojauksen aseteluiden määrittämiseen VSV Oy:n verkossa. Tällä hetkellä maasulkusuojausasettelut vaihtelevat sähköasemittain huomattavasti. Yhtenäisten suojausperiaatteiden käyttäminen vähentävää huomattavasti releasetteluiden luomisesta ja muutoksista aiheutuva taakkaa sekä tasapainottaa verkon toimintaa häiriöiden suhteen.

Maasulkusuojaus toteutetaan siihen tarkoitettulla suojareleistyksellä. Suojareleistys tarkkailee verkon epäsymmetriaa, joka ilmenee nollavirtana ja tähtipistejännitteenä. Kun suojareleistykselle asetetut raja-arvot ylittyvät, antaa rele avauskäskyn katkaisijalle. Katkaisija avautuu ja mahdollinen maasulkuvalokaari sammuu. Katkaisija voi olla koko lähdön erottava tai jokaiselle vaiheelle omansa. Suojaus voidaan toteuttaa myös viallisen vaiheen maadoituksella.

Verkkopituuden tai kaapeloinnin lisääntyessä verkon vaihemaakapasitanssien kasvu nostaa nollavirtaa mutta pienentää nollajännitettä. Relearvojen asettelua rajoittaa releiden rajallinen herkkyys ja mahdollisesta vaihejohdinten epäsymmetriasta aiheutuva U_0 , joka esiintyy myös verkon terveessä käyttötilanteessa. Sammutetussa verkossa terveen tilan nollajännite on huomattavasti suurempi kuin maasta erotetussa verkossa. (Salo 2006, 10)

Mikäli maasulun vikavastus on erittäin suuri – esimerkiksi johtimiin nojaavan puun tai johdinkatkeaman aiheuttama, voidaan vikaa yrittää indikoida puhtaasti nollajännitettä seuraamalla. Tällöin maasulkuvirran suuntaa ei kuitenkaan voida määrittää, ja viallinen lähtö joudutaan etsimään esimerkiksi kokeilukytkentöjen avulla. Nollajännitteen seurannalla saavutettava herkkyys on 10...30 k Ω , mutta sekään ei usein riitä kaatuneiden puiden ja johdinkatkeamien tapauksissa, joissa vikavastuksen arvo vaihtelee noin viidestä kilo-ohmista useisiin megaohmeihin. (Salo 2006, 10)

Keskijänniteverkon maasuluista suurin osa on valokaarimaasulkuja. Valokaarimaasululla on maasulkuvirran suuruudesta sekä vikakohdan yli palaavan jännitteen nou-

sunopeudesta ja huippuarvosta riippuen taipumus sammua joskus itsestään, jos samumiselle annetaan riittävästi aikaa. Tämä houkuttelee pidentämään maasulkusuo-
jauksen laukaisuaikoja. Laukaisuajan pidentämistä rajoittaa kuitenkin SFS 6001 stan-
dardin esittämä kosketusjännitevaatimus. Rajoitusta voidaan välttää parantamalla
maadoituksia tai käyttämällä maasulun sammutusta. Toisaalta laukaisuaikaa ei saa pi-
dentää liikaa, koska yksivaiheinen maasulku voi tällöin muuttua kaksoismaasuluksi
terveiden vaiheiden kasvaneiden jännitteiden läpilyönnillä. (Salo 2006, 11)

Kaksoismaasulkusuo-
jauksen toimivuuden takaamiseksi on käytettävä suunnatun maa-
sulkusuo-
jauksen lisäksi suuntaamatonta maasulkusuo-
jausta. Lähtökohtaisesti kaksois-
maasulkusuo-
jauksessa toimivat lähtöjen suunnatut maasulkureleet. Vikojen ollessa eri
johtolähdöillä ja vikavastuksen ollessa riittävän pieni – toimivat suo-
jauksena ylivirta-
releet. Suuntaamaton maasulkusuo-
jaus toteutetaan yksinomaan nollavirtaa mittaa-
malla ja suo-
jaus antaa laukaisukäskyn, kun I_0 -arvo pysyy ylittyneenä asetellun aika-
viiveen yli. (Salo 2006, 15)

Kuorman puoleisen johdinkatkeaman havaitseminen tavallisella maasulkusuo-
jauksella on hankalaa korkean vikaimpedanssin vuoksi. Vaikka kuorman puoleisen johdin-
katkeaman havaitseminen normaalilla nollajännitteen seurantaan perustuvalla maasul-
kusuo-
jauksella on vaikeaa, on se kuitenkin mahdollista, mikäli kuormituksen edus-
tama impedanssi ei kasva liian suureksi. Myös syötön puoleisen maasulun havaitsemi-
nen on vaikeaa tilanteissa, joissa käytetään päällystettyä PAS-johtoa, koska vikavastus
on yleensä erittäin suuri. Normaalien maasulkusuo-
jauksen lisäksi johdinkatkeamien ha-
vaitsemiseen voidaan käyttää erovirta mittausta. Erovirtamittaus vertailee suurimman
ja pienimmän vaihevirtan eroa ja toimii asetteluarvon ja aikaviiveen ylittyessä. (Salo
2006, 16)

Suo-
jauksen toimivuuden kannalta kiinnostavimpia ovat pienimmät esiintyvät:

- nollavirratt (suuri vikaresistanssi, vähän verkkoa)
- tähtipistejännitteet (suuri vikaresistanssi, paljon verkkoa)

Maadoitusjännitevaatimusten kannalta tärkeitä ovat:

- suurin maasulkuvirta (maadoitusten mitoitus)
- maasulun kesto-aika (aikoja ei summata jälleenkytkennöissä)

Pienimmät esiintyvät maasulkuvirrat määrittävät releasetteluiden herkkyyden ja suurimmat maasulkuvirrat maadoitusresistanssien kanssa pisimmän maasulun kestoajan. Maasulun itsestään sammumisen ja vian paikannuksen kannalta maasulun kestoajan tulisi olla mahdollisimman pitkä. Viat, jotka eivät sammu itsestään – pyritään poistamaan jälleenkytkentöjen avulla. Pikajälleenkytkennässä viallinen johto erotetaan jännitteettömäksi niin pitkäksi aikaa, että valokaaren aikaansaama ilman ionisoituminen ehtii hävitä. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Maasulkusuojasuunnittelun yhteydessä on tehtävä useita erilaisia maasulkuvirtalaskelmia. On haettava tilanteita, joissa verkko on mahdollisimman laaja (varasyöttötilanteet) ja on myös haettava tilanteita, joissa verkko on mahdollisimman pieni (kaksi lähtöä, joista toinen mahdollisimman lyhyt). Maasulun kestoajan asettelussa on nykyaikaisilla releillä mahdollisuus käyttää porrastusta. Suurivirtaiset (ei vikaresistanssia) ja suuria maadoitusjännitteitä aiheuttavat maasulut voidaan poistaa nopeasti. Pienemmillä maasulkuvirroille voidaan käyttää hitaampaa laukaisua tavoitteena, että maasulku joko sammuu tai muuttuu valokaaren leviämisen myötä oikosuluksi. Maasulun muuttuminen oikosuluksi parantaa huomattavasti mahdollisuuksia automaattiseen vian paikannukseen. (Lakervi & Partanen, 194)

Suojausta toteutettaessa tulee ottaa huomioon myös seuraavat asiat:

- mittamuuntajien muuntosuhteet
- peräkkäin tulevien suojausportaiden lukumäärä
- mahdollinen rengaskäyttö
- kaksoisjohdot

7.1 Yleishälytys

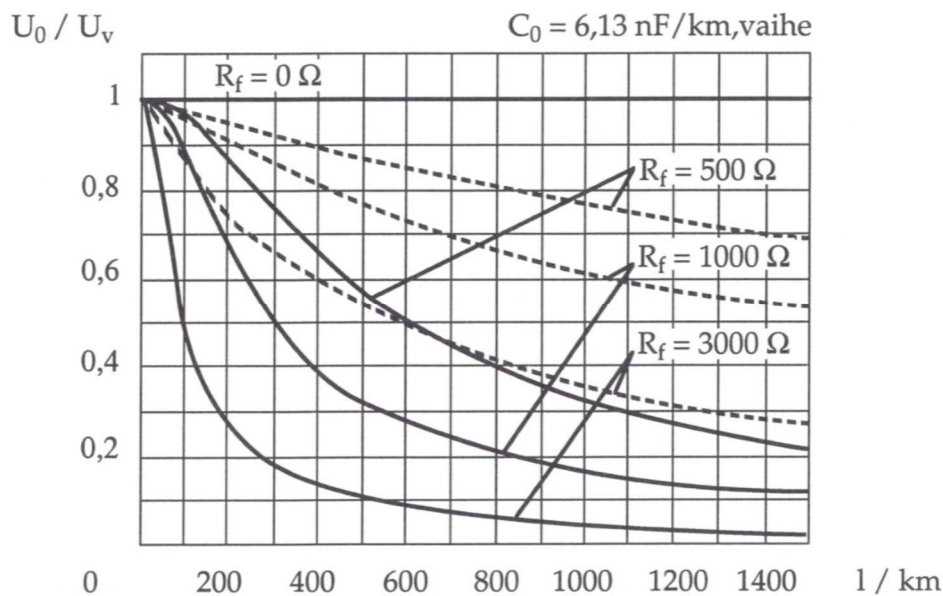
Syntyipä maasulku missä osassa verkkoa tahansa, ilmenee se aina epäsymmetrian aiheuttamana nolajännitteenä. Yleishälytys toteutetaankin tavallisimmin verkon nolajännitettä U_0 valvovalla vakioaikaylijännitereleellä. Yleishälytys on riittävä vain suurpeissa verkoissa, joissa vikapaikka on helposti löydettävissä. Yleishälytys soveltuu käytettäväksi myös varasuojana ilmaisemaan suuriresistanssisia vikoja. (ABB TTT-käsikirja 8.3.3 2000 - 07, 13)

Avojohtoverkoissa voidaan suhteellisen suuriresistanssisetkin maasulut ilmaista nollajännitteen avulla. Esimerkiksi 600 km laajassa maasta erotetussa avojohtoverkossa voidaan 5 % asettelulla tavoittaa viat $5 \text{ k}\Omega$ asti. Kaapeliverkkojen suuriresistanssisissa vioissa nollajännite romahtaa paljon nopeammin kuin avojohtoverkoissa. Tämä johtuu kaapelien suurista maakapasitansseista. Kaapeliverkon tapauksessa esimerkiksi 3 % asettelulla voidaan löytää viat $5 \text{ k}\Omega$ asti johtopituuden ollessa n. 20 km. Nollajännitteen romahtamista avojohto- ja kaapeliverkoissa eri vikaresistansseilla verkon pituuden mukaan on havainnoillistettu kuvissa 27 ja 28. (ABB TTT-käsikirja 8.3.3 2000 - 07, 13; Mörsky 1992, 327)

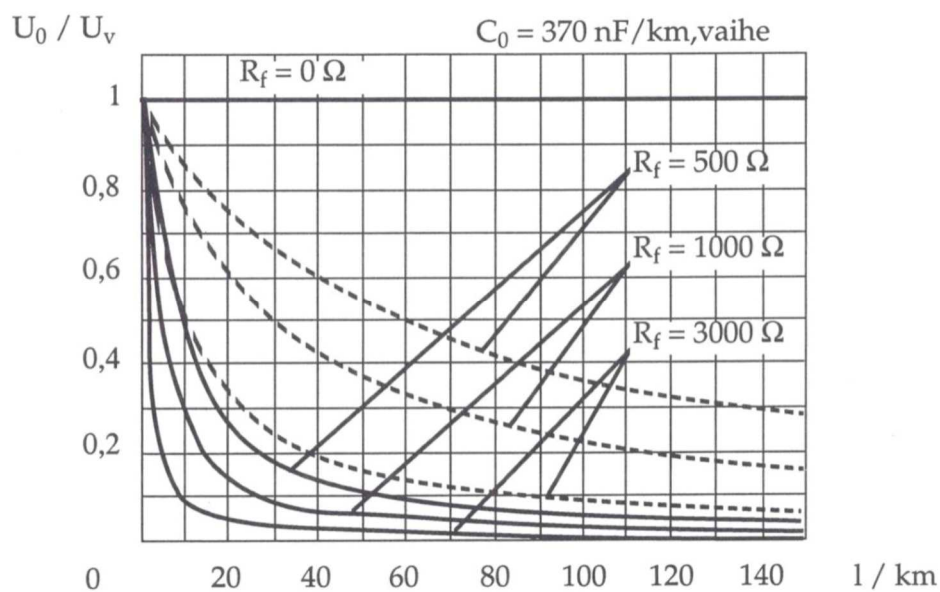
Nollajännitereleen havahtumisarvo pitää asetella mahdollisimman pieneksi varsinkin kaapeliverkoissa, joihin liittyy avojohto-osuuksia, jotta mahdollisimman suuriresistanssiset maasulut havaitaan. Asettelun ylärajan määräävät releen herkkyys ja verkon terveen tilan nollajännite. Maasta erotetun verkon terveen tilan nollajännitettä voivat aiheuttaa eri suuret vaiheiden maakapasitanssit, kapasitiivinen kytkentä toisesta verkosta (toisen verkon maasulussa), jännitemuuntajien kippivärähtely (jännitemuuntajan induktanssi ja verkon maakapasitanssi ovat resonanssissa) tai jännitemuuntajien virheet (näennäisnollajännite). (Mörsky 1992, 328)

Maasta erotettujen verkkojen nollajännitereleet voidaan yleensä asetella varsin herkkiksi, edullisissa olosuhteissa aina 1...2 % asti. Suurempaa asettelua vaativat lähinnä verkot, joihin nollajännite pääsee siirtymään kapasitiivisesti toisesta verkosta (rinnakkaisjohdot). Kompensoiduissa verkoissa pitää terveen tilan suuren nollajännitteen vuoksi käyttää suurempia asetteluarvoja kuin maasta erotetuissa verkoissa. Suojauksen herkkyyden kannalta tästä ei kuitenkaan ole haittaa, koska useimmiten suurenkin vikaresistanssin kautta tapahtuva maasulku aiheuttaa kompensoidussa verkossa huomattavasti suuremman nollajännitteen kuin maasta erotetussa verkossa. (Mörsky 1992, 328)

Maasulkusuojauksessa tarvittavat tiedot eri lähtöjen summavirroista mitataan kunkin lähdön alkupäässä olevalla summavirtamuuntajalla. Avojohtoverkossakin yleensä lähtö sähköasemalta toteutetaan kaapeleilla ja tällöin voidaan virtamuuntajien summakytkennän sijaan käyttää kaapelivirtamuuntajaa. (Lakervi & Partanen, 193)



Kuva 27. Avojohtoverkon suhteellinen nollajännite johtopituuden ja vikaresistanssin funktiona yksivaiheisessa maasulussa; — maasta erotettu verkko ja --- kompensoitu verkko. (Mörsky 1992, 318)



Kuva 28. Kaapeliverkon suhteellinen nollajännite johtopituuden ja vikaresistanssin funktiona yksivaiheisessa maasulussa; — maasta erotettu verkko ja --- kompensoitu verkko. (Mörsky 1992, 319)

Nollajännitereleet toimivat epäselektiivisesti kaikissa maasuluissa, koska niillä ei ole vian suunnasta mitään tietoa. Pelkästään summavirtaa mittaavia suoja voidaan käyttää ainoastaan maasta erotetussa verkossa, koska kompensoidun verkon summavirrassa ei

ole tarvittavia tietoja vian sijainnista. Tämä johtuu kapasitiivisen komponentin lähes täydellisestä puuttumisesta. Kapasitiivisen tai induktiivisen komponentin ilmeneminen ja suuruus riippuvat verkon kompensointiasteesta. Sammutetussa verkossa ilmevät kapasitiiviset tai induktiiviset virrat ovat kuitenkin niin pieniä että suojausta ei ole asetettu toimimaan niiden ilmetessä. Selektiivisyys edellyttää, että summavirta suojaavan johtolähdön ulkopuolella sattuvassa jäykässä maasulussa on asetteluarvoa vastaavaa virtaa pienempi:

$$I_e(R_f = R_{fmax}) > I_t(R_f = 0)$$

missä R_{fmax} on suurin vikaresistanssi, jolla suojan tulee toimia tarkasteltavan johdon maasulussa. (Mörsky 1992, 327)

7.2 Maasulkusuojaus maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa verkossa maasulkusuojausta ei voida perustaa oikosulkusuojauksen tavoin ylivirtasuojien käyttöön. Vikavirta on pieni, yleensä kuormitusvirtaakin pienempi. Mahdollisina maasulun indikaattoreina voidaan käyttää mm:

- perustaajuisen tähtipistejännitteen muutosta
- perustaajuisen vaihejännitteen muutosta
- perustaajuisista summavirtaa
- virran ja jännitteen yliaaltoja
- suurtaajuisia muutosvirtoja

Maasulun aikana virrassa esiintyy 5 yliaaltoa. Muutosvirtoja syntyy maasulun alkuhetkinä viallisen vaiheen maakapasitanssien purkautuessa ja terveiden maakapasitanssien varautuessa. (Lakervi & Partanen 2008, 190)

Selektiivinen hälytys tai selektiivinen laukaisu voidaan toteuttaa maasta erotetuissa verkoissa johtokohtaisten nollavirtareleiden tai nollajännitteeseen ja nollavirtaan kytettyjen suuntareleiden avulla. Nollavirtareleillä toteutettu suojaus perustuu terveen verkon maakapasitanssien kautta palaavaan maasulkuvirtaan, jonka viallisen johdon summavirtamuuntaja mittaa. Nollavirtareleisiin perustuvan suojauksen heikkoutena

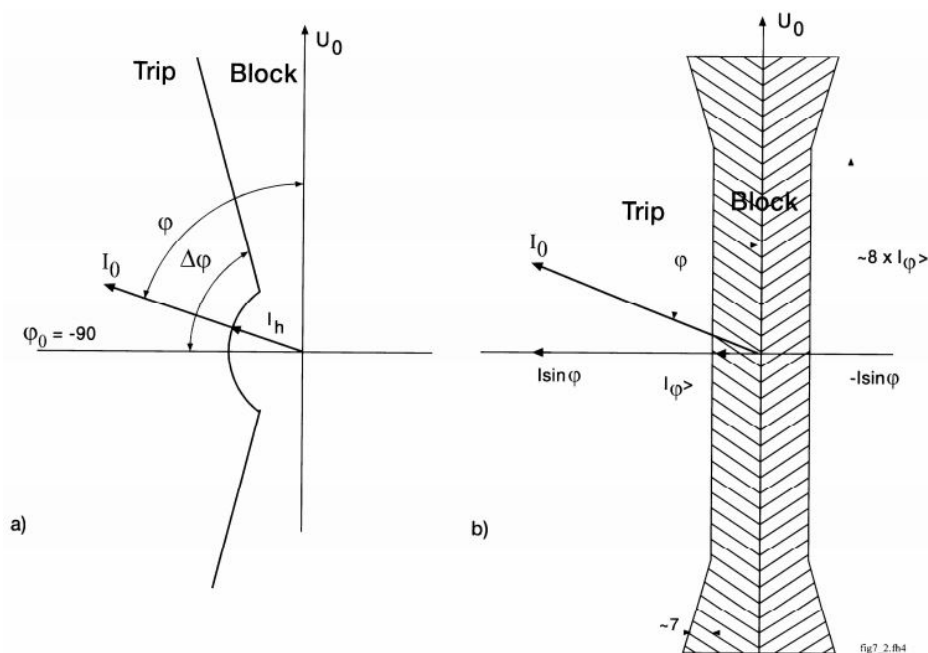
on nollavirran voimakas riippuvuus johtopituuksista ja vikaresistanssin suuruudesta, jolloin selektiivisyyden säilyttäminen saattaa tuoda vaikeuksia verkon johtopituuksien muuttuessa esimerkiksi varasyötön kytkemisen tai pitkän johdon puuttumisen takia. Nollavirtareiden asetteluissa saattaa tulla vaikeuksia, koska nollavirtarele ei saa toimia muualla verkossa sattuvassa vikaresistanssittomassa maasulussa, mutta sen on toimittava suojaamallaan johdolla sattuvassa 500Ω maasulussa. Jos jonkin johdon pituus tulee yhtä suureksi tai suuremmaksi kuin muu osa verkkoa, ei ko. johdon nollavirtareleillä voida saavuttaa lainkaan selektiivisyyttä edes vikaresistanssin ollessa nolla. Nollavirtareleillä suojattaessa on syytä käyttää nollajännitereleitä antamaan virtareleille laukaisulupa. Samaa jänniterelettä voidaan käyttää hidastettuna varamaasulkusuojana antamaan epäselektiivinen laukaisu, jos maasulku on jatkunut riittävän kauan. (Mörsky 1992, 328 - 330)

Maasulkureleen tulee havahtua vain siinä tapauksessa, että maasulku on juuri tämän releen suojaamalla lähdöllä. Vioittuneen lähdön alkupäässä sijaitsevan summavirtamuuntajan mittaama nollavirta on pienempi kuin vikapaikan maasulkuvirta I_f . Vioittuneen lähdön maakapasitanssien vaikutus on vähennettävä alkupään summavirtaa laskettaessa, sillä tämän lähdön maakapasitanssien määräämä vikavirran komponentti kulkee summavirtamuuntajan läpi molempiin suuntiin. (Lakervi & Partanen 2008, 191)

Käytännön maasulkusuojaus toteutetaan maasulun suuntareleillä. Maasulkureleet sijaitsevat yleensä sähköasemalla. Jos nollavirtareleillä ei voida saavuttaa selektiivisyyttä, on käytettävä suuntareleitä, joiden toiminta maasta erotetuissa verkoissa perustuu nollavirran ja nollajännitteen muodostaman nollaloistehon suuntaan. Virtaepäsymmetriaa kuvaava nollavirta saadaan johtolähdön vaihevirtojen osoitinsummasta. Tämän muodostaa kolmen vaiheen vaihevirtamuuntajien summakytkentä tai kaapelivirtamuuntaja. Nollaloistehon suunta riippuu siitä, kummalla puolella virtamuuntajia maasulku tapahtuu. Suuntareleillä toteutetun maasulkusuojauksen selektiivisyys perustuu siis nollavirtojen suuntiin eikä niiden suuruuteen, kuten nollavirtareleissä. Suuntareleissä tarvitaan aseteltava havahtumiskynnys vain sen takia, etteivät terveessä tilassa esiintyvät nollavirrat ja -jännitteet saisi suuntareleitä toimimaan. Nykyaikaiset suuntareleet perustuvat vaihekulmamittaukseen, eivät tehon mittaukseen. (Lakervi & Partanen 2008, 190 – 191; Mörsky 1992, 330)

Suuntareleiden suurena etuna nollavirtareleisiin nähden on niiden asettelujen riippumattomuus johtojen pituuksista varsin laajalla alueella. Tästä syystä suuntareleet säilyttävät selektiivisyytensä ilman asettelujen muutoksia myös esimerkiksi silloin, kun kytketään varasyöttö. Suuntareleen oikean toiminnan ehtona on, että virtamuuntajista katsottuna verkon puolella on riittävästi maakapasitanssia releen havahtumiskynnyksen ylittävän nollavirran aikaansaamiseksi. (Mörsky 1992, 330 – 331)

Maasulun suuntareleen toiminnan ehtona on, että sekä virta I_r että tähtipistejännite U_0 ylittävät tietyt asetteluarvot. Vikavirran suunnan tarkistamiseksi täytyy verrata jänniteosoittimen U_0 ja summavirtamuuntajan läpi kulkevan virran I_r osoittimen välistä kulmaa. Maasta erotetussa verkossa virran tulee olla noin $90^\circ \pm 75^\circ$ edellä nollajännitettä U_0 . Vika ei luonnollisesti voi olla yli 90° kulmassa, mutta tämä asettelu ei haittaa suojan toimintaa. Vaihekulmasuuntareleen hyviä puolia ovat edellä mainittujen jännite-, virta- ja kulmakriteerien riippumattomuus toisistaan sekä suuri herkkyys. (Lakervi & Partanen 2008, 192 - 193)



Kuva 29. Nollajännitereleen asettelun karakteristiikka maasta erotetussa verkossa. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut 2016)

Suunnattua suojausta voidaan täydentää pelkästään nollavirran suuruuteen perustavalla suuntaamattomalla suojauksella. Kaksoismaasulkutilanteissa suuntaamattomalla

suojalla nopeutetaan ja varmistetaan suojauksen toiminta varsinkin silloin, kun vikavirran suuruus jää vikaresistanssin vaikutuksesta pienemmäksi kuin ylivirtasuojien virta-asettelut. Sopivalla asettelulla suuntaamaton suoja saadaan toimimaan ainoastaan kaksoismaasulkuutilanteissa, jolloin saadaan selvä indikaatio vikatyypistä. (ABB TTT-käsikirja 8.3.4 2000 - 07, 14)

Suojausta voidaan täydentää myös ΔI eli vaihekatkosuojalla, joka mahdollistaa suojauksen toiminnan myös maasuluissa, jotka syntyvät johtimen katketessa ja pudotessa maahan. Mikäli maa on huonosti johtavaa tai johdin putoaa maahan kuorman puolelta, voi maasulkuvirta jäädä niin pieneksi, ettei varsinainen maasulkusuoja havahdu. Mikäli käytössä on lisäksi vielä katkaisijavikasuoja (CBFP = Circuit Breaker Failure Protection), voidaan laukaisu ohjata viiveajan jälkeen syötön katkaisijalle, ellei lähdön katkaisija jostain syystä aukea vikatilanteessa. (ABB TTT-käsikirja 8.3.4 2000 - 07, 14)

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvalokaaren sammuttamiseksi käytetään usein pikajälleenkytkentää. Pikajälleenkytkentöjen haittoina ovat niiden aiheuttamat lyhyet sähkökatkokset. Niiden yleisyyttä voidaan pienentää mm. tehostamalla johtokatuja raivausta ja viivästämillä laukaisua. Laukaisun viivästäminen on kuitenkin suoraan riippuvainen SFS 6001 standardin esittämistä suurimpien sallittujen kosketusjännitteiden ajasta. Maasulkuvirtojen kasvaessa, kasvaa myös maadoitusjännite. Tällaisessa tilanteessa suositellaankin erillisen maasulkuvirran sammutuskuristimen asennusta. Näin saadaan maasulkuvirtaa ja maadoitusjännitettä laskettua ja maasulun laukaisuai-koja pidennettyä. (Lakervi & Partanen 2008, 192)

7.2.1 Suojausportaiden määrittäminen

Johtolähdön maasulkusuojaukseen suositellaan ABB Oy:n TTT-käsikirjassa käytettäväksi kaksiportaista suojausta. VSV Oy:llä on tässä tapauksessa sekä yksi- että kaksiportaista suojausta käytössä. Ensimmäisen suojausportaan tehtävä on täyttää kosketusjännitevaatimukset jotka on esitetty standardissa SFS 6001. Tämä tarkoittaa että suojausportaan tulee olla sitä nopeampi mitä suurempia kosketusjännitteitä esiintyy. Mah-

dollisen toisen suojausportaan kohdalla kosketusjännitevaatimukseen ei tarvitse kiinnittää niin suurta huomiota, koska ensimmäinen porrassuojaus huolehtii niiden vaatimusten täytymisestä. Toisen suojausportaan laukaisuajan ei tarvitse olla myöskään lyhyt, joten se voidaan asettaa ensimmäistä huomattavasti herkemmäksi, jolloin suurempia vikavastuksia sisältävät maasulkuviat saadaan myös indikoitua. TTT-käsikirja esittää suojausportaiden päinvastaista käyttöä, jossa ensimmäinen porrassuoja toimii hälyttävänä ja vikavirran kasvaessa niin suureksi, että sallitun maadoitusjännitteen arvo ylittyy tai muut laukaisukriteerit täyttyvät, saadaan toiselta portaalta laukaisu vaadituilla toiminta-ajoilla. Ensimmäisen suojausportaan käyttäminen kosketusjännitevaatimukseen on kuitenkin tätä selkeämpi ratkaisu, ja näin suojausportaat vastaavat aina toisiaan, olipa suojaus sitten yksi- tai kaksiportainen. (ABB TTT-käsikirja 8.3.4 2000 - 07, 15; Salo 2006, 51)

20 kV syöttökennon suojaustasolla mittauskennon nollajänniterele sisältää tavallisesti kaksi suojausportaa. VSV Oy:llä on tässä tapauksessa sekä yksi- että kaksiportaista suojausta käytössä. Ensimmäisen suojausportaan tehtävä on indikoida kiskoston maasulut sekä toimia johtolähtöjen suunnatun maasulkusuojauksen varasuojana. Toisen suojausportaan tehtävä on toimia hälyttävänä ja se asetellaan mahdollisimman herkäksi indikoimaan maasulkuja joita johtolähtöjen suuntareleet eivät suuren vikavastuksen ja vuoksi havaitse. Nollajännitteen seuranta paljastaa usein myös alkavat maasulut, ennen niiden kehittymistä varsinaisiksi vioiksi. Käyttämällä kaksi- tai useampiportaista nollajännitesuojaa, jonka alimmat portaat laukaisevat ja ylin hälyttää, voidaan toteuttaa selektiivinen syöttöhaaran ja kiskoston suojaus sekä lähtöjen varasuojaus. Lisäportaiden avulla voidaan varalaukaisu toteuttaa useammassa aikaportaassa, jotta häiriö rajoittuisi mahdollisimman pienelle alueelle. Ensin laukaistaan vähemmän tärkeät lähdöt ja sen jälkeen muut lähdöt, mikäli nollajännite ei ennen sitä häviä. Mikäli vika ei vielä poistunut, laukaistaan päämuuntajan yläpuolen katkaisija. Tällöin on ilmeistä, että vika on syöttöhaarassa tai kiskostossa. (ABB TTT-käsikirja 8.3.4 2000 - 07, 15; Salo 2006, 51)

7.2.2 Laukaisukriteerien määrittely

20 kV syötön 2. suojausporras

20 kV syöttökennon toista suojausporrasta käytetään hälyttävänä. Suojaukseen käytetään nollajänniterelettä, ja asettelu arvo tulee asetella mahdollisimman herkäksi. Asetteltua rajoittaa verkon terveessä tilassa johtojen maakapasitanssien epäsymmetriasta aiheutuva U_0 . Asetteluarvon tulee olla tätä suurempi, jotta turhilta hälytyksiltä vältytään. Terveen tilan nollajännite on sähköasemakohtainen arvo, ja täten mitoitus on syytä käyttää tapauskohtaiseen arvoon lisättävää varmuusmarginaalia. VSV Oy:n käyttöhenkilöstö suosittelee tälle portaalle aseteltavan arvon olevan 1 % suurempi, kuin mitä nollajännite on verkon terveessä tilassa. 1 % varmuusmarginaalilla voidaan vähentää virheellisiä hälytyksiä. Tarvittaessa marginaalia pitää kasvattaa, mikäli virheellisiä hälytyksiä kuitenkin havaitaan. (Salo 2006, 52)

Johtolähtöjen suojausportaat

Johtolähdön suunnattua maasulkusuojausta varten pitää asetella nollajännitteen sekä nollavirran arvot. Nollavirran asettelua rajoittaa suojareleiden rajallinen herkkyys ja sähköasemilla käytettävät virtamuuntajat. Ensimmäisen portaan asettelu määrää SFS 6001 standardin kosketusjännitevaatimukset. Kytkeätilanteiden muutokset, jotka aiheuttavat ongelmia, ovat lähinnä lähtöjen irtoaminen verkosta, jolloin maasulkuvirran kapasiteetti laskee. Laajaa herkkyyttä tarvitaan varsinkin tapauksissa joissa kytkentätilanteet muuttuvat. Virran arvo tulee määrittää niin, että mahdolliset lähtöjen irtoamiset verkosta eivät haittaa suojan toimintaa. Suunnatun maasulkusuojauksen nollavirran ja nollajännitteen asettelujen sitominen suoraan tiettyyn vikavastuksen arvoon on hyvin selkeä toimintamalli. Vaihekulma-arvon asettelu nollajännitteen ja nollavirran välille on määritelty yleisesti niin, että maasta erotetussa verkossa arvo on $90^\circ \pm 75^\circ$ ja sammutetussa verkossa $0^\circ \pm 75^\circ$. Kulman ollessa näiden rajojen ulkopuolella, on relessä päällä laukaisun esto. Suunnatun maasulkusuojauksen herkkyys määräytyy pitkälti nollavirran mukaan, jonka asettelut tulevat vastaan yleensä ennen nollajännitteen asettelua. Tästä syystä lähdetään ensin määrittelemään nollavirran arvoa. (Salo 2006, 52 - 53)

Johtolähdön ensimmäinen suojausporras tulisi asetella siten, että se havaitsee vielä 5 k Ω vikavastusarvot maasulut. Tällä herkkyydellä havaitaan vielä linjaan osuneet työkoneet, jotka aiheuttavat tyypillisesti noin 2 k Ω vikavastuksen. Herkkyyden ollessa 5 k Ω tilanteessa, jossa eniten maasulkuvirtaa tuottava johtolähtö irtoaa verkosta, pysytään yleensä vielä havaitsemaan viat 2 k Ω asti. Tämä arvo on kuitenkin tapauskohtainen ja se tulee ottaa huomioon asetteluja määritettäessä kokeilukytkentöjen avulla. Ensimmäisellä suojausportaalla ei kannata tavoitella yli 5 k Ω herkkyyttä, sillä lyhyitä laukaisuaikoja käytettäessä voivat esimerkiksi erinäiset erotinohjaukset, joissa yksi vaihe avautuu muita hitaammin, aiheuttaa virhelaukaisuja. Myös käyttökokemus puoltaa sitä, että yli 5 k Ω herkkyydellä virhelaukaisujen määrä kasvaa. Johtolähdön mahdollisella toisella suojausportaalla tulisi pyrkiä havaitsemaan maasulut 10 k Ω vikavastukseen asti. Suojalaitteiden rajallinen herkkyys, ja esimerkiksi rinnan kulkevista johdoista syntyvät nollavirran indusoitumisilmiöt muodostavat rajoitteita, mistä syystä yli 10 k Ω herkkyyttä voidaan pitää perusteltuna ylärajana toiselle suojausportaalle. Nämä arvot ovat suosituksia, joten niiden soveltuvuutta käytäntöön pitää aluksi aktiivisesti seurata, jotta mahdolliset virhelaukaisut huomataan. Herkkyystavoitteita voidaan tarvittaessa laskea, tai muuttaa johtolähdön toisen suojausportaan toiminta laukaisevasta hälyttäväksi. Mikäli verkossa esiintyy vaikeasti paikannettavia, esimerkiksi vioittuneesta eristimestä johtuvia suuri-impedanssisia vikoja, voidaan portaiden herkkyyttä laskea hallitusti, kunnes vikapaikka löytyy. (Salo 2006, 52 - 53)

20 kV syötön 1. suojausporras

20 kV syötön ensimmäisen suojausportaan tulee suojata kiskostoa maasuluilta ja toimia lähtöjen suunnatun maasulkusuojauksen varasuojana. Tämän portaan suojaus tulee asetella niin, että johtolähtöjen suojaus on tätä porrasta herkempi, jotta selektiivisyys toteutuu. Asettelun herkkyys tulisi olla noin 2 k Ω luokkaa tällä portaalla. Kyseisellä herkkyydellä havaitaan esimerkiksi linjaan osuneet työkoneet, mitä voidaan pitää varsin hyvänä varasuojausvaatimukselle. (Salo 2006, 53 - 54)

7.2.3 Laukaisuaikojen määrittäminen

Maasulkusuojauksessa käytettävien laukaisuaikojen pituuksiin vaikuttaa monia, keskenään ristiriitaisia tekijöitä, joista osa puoltaa lyhyiden ja osa pidempien aikojen käyttöä. Sopivien laukaisuaikojen valitseminen ei ole siis itsestään selvää. SFS 6001 myötä kiristyneet kosketusjännitevaatimukset, vaikeat maadoitusolosuhteet sekä maakaapeloinnin myötä kasvaneet maasulkuvirrat ovat tekijöitä, joiden vuoksi verkkoyhtiöissä joudutaan pohtimaan, kuinka säilyttää keskijänniteverkon maadoitetut kohteet määreysten mukaisina. Yksinkertaisin ja kustannustehokkain ratkaisu on pudottaa maasulkusuojauksen laukaisuaikoja. Lyhyitä aikoja puoltavat myös vaara yksivaiheisen maasulun leviämisestä kaksoismaasuluksi sekä katkeilevien maasulkujen havaitsemisen helpotus. Pitkiä aikoja puoltaa tavoite maasulkuvikojen poistumisesta itsestään ilman, että jälleenkytkentöjä tarvitaan. Pidemmällä laukaisuajoilla on maasulkuvalokaarien itsestään sammuminen perustellusti mahdollista niiden pienistä virroista johtuen. Maasulkusuojauksessa käytettävien laukaisuaikojen tulisi olla pidempiä ylivirtasuojauksen laukaisuaikoihin nähden, jotta oikosulun paikannus toimisi mahdollisimman tehokkaasti. (Salo 2006, 55)

Johtolähtöjen suojausportaat

Vaikka suurin osa itsestään poistuvista maasuluista sammuu alle 0.3 s, on selvää, että pidempi laukaisuaika antaisi paremmat mahdollisuudet maasulkujen itsestään sammumiselle. Pidemmän laukaisuajan käyttöä rajoittaa kuitenkin SFS 6001 standardin vaatimukset. Maadoitusolosuhteiden ollessa monissa paikoissa vaikeat, on 0.3 s laukaisuaika käytännössä ainoa keino täyttää standardin vaatimukset. Siirtymällä yleisesti 0.3 s laukaisuaikoihin, saavutettaisiin huomattavia kustannussäästöjä, kun valtavia määriä maadoituksia ei tarvitsisi parantaa. Lyhyet laukaisuaajat helpottaisivat maadoitusten rakentamista myös uusissa keksijänniteverkon kohteissa. 0.3 s laukaisuaika on myös pidempi kuin ylivirtasuojauksen toisen portaan 0.15 s laukaisuaika, joten se toteuttaa oikosulun paikannuksen asettamat vaatimukset. (Salo 2006, 56)

Em. voidaan todeta, että maasulkusuojauksessa tulisi pyrkiä mahdollisimman lyhyeen laukaisuaikaan, mutta kuitenkin niin, että vialle jää mahdollisuus sammua itsestään.

Johtolähdön suunnatussa maasulkusuojauksessa ensimmäisen laukaisuajan tulisi oletusarvona olla 0.3 s. Mikäli kosketusjännitevaatimukset antavat mahdollisuuden, voidaan aikaa tapauskohtaisesti nostaa aina 0,5 s saakka, sillä pidempi aika antaa maasululle paremman mahdollisuuden sammua. Puiden oksien hipaisut aiheuttavat pidempiaikaisia itsestään poistuvia maasulkuja, mutta niitä ei kuitenkaan tässä yhteydessä huomioida, sillä näissä tapauksissa vikavastus on niin suuri, ettei suojaus sitä edes havaitse. (Salo 2006, 57)

Johtolähdön suunnatun maasulkusuojauksen toisella portaalla voidaan käyttää pitkää aikaa. Laukaisuaika johtolähdön suunnatun maasulkusuojauksen toiselle portaalle tulisi olla 1.5 s luokkaa. Toisen suojausportaan pitkä laukaisuaika ei nosta kaksoismaasulun syntymisen riskiä juurikaan, sillä portaan suojausalueelle sijoittuvien vikojen virrat ja terveiden vaiheiden ylijännitteet ovat suhteellisen pieniä. (Salo 2006, 57)

20 kV syötön suojausportaat

20 kV syötön nollajännitesuojauksessa voidaan käyttää reilusti pidempää laukaisuaikaa kuin johtolähdöillä. Syötön tason nollajännitesuojauksen ensimmäisen portaan laukaisuajan tulee olla 3 s ja toisen eli hälyttävän portaan 10 sekuntia. (Salo 2006, 57)

7.2.4 Jälleenkytkentöjen määrittäminen

Jälleenkytkennöillä voidaan selvittää merkittävässä määrin avojohtoverkon vikoja. Maasulkuvioissa syntyvät vikavirrat ovat tavallisesti pieniä, jolloin niistä ei aiheudu jännitekuoppia tai johtimien ylikuumenemista. Maasulkusuojauksessa jälleenkytkentöjä voidaan käyttää paljon vapaammin kuin oikosulkusuojauksessa. Kuitenkin lähdöt, joilla on teollisuutta ja joissa PJK:t voivat aiheuttaa merkittävää haittaa, tulee ottaa asetteluissa huomioon. Mikäli kyse ei ole kaapeliverkosta, jälleenkytkentöjä kannattaa käyttää johtolähtöjen suunnatussa maasulkusuojauksessa kaikilla suojausportilla. Jälleenkytkentäaikojen t_2 ja t_3 tulee olla samanmittaisia kuin kyseisen suojausportaan laukaisuaika t_1 . Vanhojen releiden tapauksessa t_3 tulee olla 0.10...0.15 s pidempi kuin t_1 ja t_2 . (Salo 2006, 57 - 58)

7.2.5 Tausta-asettelut

Uusissa numeerisissa suojaruletyypeissä on releiden pääasetteluarvot mahdollista korvata tausta-asetteluilla. Tausta-asettelut voidaan asettaa etukäteen vastaamaan jotakin tiettyä poikkeuksellista kytkentätilannetta ja ottaa tarvittaessa nopeasti käyttöön. Poikkeuksellisia kytkentätilanteita ovat esimerkiksi sähköasemien korvaukset. Tällaisissa tilanteissa verkkopituudet ja maasulkuvirrat kasvavat tavallisesti normaalia suuremmiksi. Korvaustilanteet muodostavat helposti turvallisuusriskin kasvaneiden maasulkuvirtojen myötä kosketusjännitteisiin, ellei laukaisuaikoja lyhennetä. Jotta turvallisuus kaikissa kytkentätilanteissa voidaan taata ilman, että jokaista laukaisuaika-asettelua täytyy erikseen muuttaa, tulee korvaustilanteita varten asettaa tausta-asettelut, joissa johtolähdön suunnatun maasulkusuojauksen ensimmäisen suojausportaan 0.3 s laukaisuaikat on korvattu 0.15 s laukaisuajoilla. Muita asetteluita ei tavallisesti kannata lähteä muuttamaan korvaustilanteiden mukaan, sillä korvaustilanteita on jokaista sähköasemaa kohtaa useita erilaisia. 0.15 s laukaisuaika ei ole optimaalisin maasulkujen itsestään sammumisen kannalta, mutta koska kyse on vain väliaikaisista kytkentätilanteista, ei asiaan kannata kiinnittää huomiota. (Salo 2006, 58 - 59)

7.2.6 Nollavirtasuojaus

Maasulkusuojaukseen täydennetään nollavirtasuojauksella, joka tarkkailee nimenomaan nollavirran I_0 arvoa. Nollavirtasuojauksen tehtävä on havaita kaksoismaasulut ja kytkä ne nopeasti pois. Nollavirtasuojaukseen käytetään pääasiassa johtolähdöillä. Nollavirtasuojauksessa voidaan käyttää kahta suojausportaa, joista ensimmäinen toimii johtolähtöjen suunnattujen suojiensa varasuojana ja toinen kaksoismaasulkusuojana. Maasulun suuntarele ei havaitse kaksoismaasulkua, koska vaihekulma ei ole tässä tapauksessa kapasitiivinen. (Salo 2006, 59)

Laukaisuvirtojen määrittäminen

Ensimmäisen suojausportaan havahtumisen tulee perustua maasulkuvirtaan, jonka terveet johtolähdöt syöttävät vikaantuneelle lähdölle. Jotta välttyttäisiin virheellisiltä kat-

kaisijatoiminnoilta, tulee asetteluarvon olla suurempi, kuin johdon itse tuottaman maasulkuvirran arvo. Tällöin suojaus ei toimi muilla johtolähdöillä sattuneissa maasu-luissa. Kyseinen ehto rajaa laukaisuvirran arvon kuitenkin niin korkeaksi, että sillä ei päästä kovinkaan suureen herkkyyteen. Herkkyyteen ei kannata kiinnittää huomiota tässä tapauksessa, sillä kyseessä on kuitenkin varasuojaus. Mikäli jokin lähtö tuottaa itse 50 % tai enemmän koko sähköaseman maasulkuvirrasta, ei selektiivisesti aseteltu nollavirtasuojauksen ensimmäinen porras toimi kyseisellä lähdöllä ollenkaan. (Salo 2006, 59)

Toisen suojausportaan tehtävä on laukaista kaksoismaasulut mahdollisimman nopeasti pois. Laukaisu on tyypillisesti nopeampi kuin suunnatun maasulkusuojauksen, mistä seuraa, että suojausporras ei saa toimia yksivaiheisessa maasulussa. Virta-arvo tulee siis asetella siten, että se on suurempi kuin sähköaseman terveiden johtolähtöjen tuottamien maasulkuvirtojen summa. Laukaisuvirran asettelua voidaan yksinkertaistaa siten, että se asetellaan suuremmaksi kuin koko sähköaseman yksivaiheinen maasulkuvirta. Korkea virran laukaisuarvo ei yleensä estä kaksoismaasulkujen havaitsemista, koska syntyvä vikavirta on tavallisesti hyvin suuri. (Salo 2006, 59 - 60)

Laukaisuvirtoja aseteltaessa on hyvä käyttää sopivia varmuusmarginaaleja. Nollavirtasuojauksen ensimmäisen portaan laukaisuvirran $I_{0>}$ tulee olla vähintään 1.2 x johtolähdön itsensä tuottaman maasulkuvirran suuruinen, ja toisen portaan laukaisuvirran $I_{0>>}$ tulee olla vähintään 1.2 x koko sähköaseman maasulkuvirran suuruinen. Sähköaseman maasulkuvirrat lasketaan verkkopituudeltaan suurimmassa kytkentätilanteessa, vikavastuksettoman yksivaiheisen maasulun mukaan. (Salo 2006, 60)

Laukaisuaikojen ja jälleenkytkentöjen määrittäminen

Jotta aikaselektiivisyys suojienvälillä toteutuu, pitää nollavirtasuojauksen ensimmäisen suojausportaan laukaisuaika olla pidempi kuin suunnatun maasulkusuojauksen ensimmäisen portaan laukaisuaika. Toisella portaalla selektiivisyyden osalta ei tarvitse huomiota kiinnittää laukaisuaikaan, sillä selektiivisyys toteutuu puhtaasti laukaisuvirralla. Laukaisuaikat asetellaan riippumattomasti lyhyiksi. (Salo 2006, 60 - 61)

Koska nollavirtasuojauksella on kyse maasulkuvikojen laukaisemisesta, ja todennäköisyys vikojen poistumisesta jälleenkytkennöillä on edelleen suuri, voidaan jälleenkytkentöjen käyttöä perustella samalla tavalla kuin suunnatun maasulkusuojauksen kohdalla. (Salo 2006, 61)

Nollavirtasuojauksen ensimmäisellä suojausportalla tulee käyttää 1.2 s ja toisella 0.25 s laukaisuaikaa. Jälleenkytkentöjä käytetään kaikilla suojausportilla ja laukaisuaikojen t_2 ja t_3 tulee olla samanmittaisia kuin alkuperäisen laukaisuajan t_1 . (Salo 2006, 61)

7.2.7 Erovirtasuojaus

Johdinkatkeamien havaitsemiseen voidaan käyttää suojareleistä löytyvää erovirran ΔI mittausta. Toiminnosta on erityisesti hyötyä tilanteissa, jossa johtimen kuormituksen puoleinen pää on pudonnut maahan tai vikavastus on muuten niin suuri, ettei normaali maasulkusuojaus vikaa havaitse. Erovirtasuojauksia käytetään pääasiassa johtolähdöillä, yksiportaisena suojaustoimintona. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan VSV Oy:llä ole käytössä, koska sen käytössä on ilmennyt virheellisiä katkaisijatoimintoja. (Salo 2006, 61)

Erovirtasuojauksen toiminta perustuu suurimman ja pienimmän vaihevirran eroon ΔI . Johdinkatkeaman kohdalla vaihevirtojen ero kasvaa. Suojaus toimii, kun asetteluarvo ylittyy ja aikaviive täyttyy. Vaikka erovirtasuojaus tarjoaa hyvän työkalun johdinkatkeamien havaitsemiseen, on menetelmän tarkkuus riippuvainen kuormituksesta. Mikäli johdinkatkeaman takana ei ole kuormitusta riittävästi, ei havaitsemiseen vaadittavaa eroa välttämättä vaihevirtojen välille synny. Erovirtasuojauksen toiminta edellyttää tavallisesti, että vähintään 20 % kuormituksesta sijaitsee johdinkatkeaman takana. Myös verkko asettaa rajoituksia ΔI arvon asetteluun. Epäsymmetriset kuormat ja voimallaitokset synnyttävät eroa vaihevirtojen välille verkon terveessäkin tilassa. Koska erovirtasuojauksen käytössä on suuri riski virheellisiin katkaisijatoimintoihin, kannattaa sitä käyttää hälyttävänä. Jos halutaan käyttää johtolähtökohtaista ΔI suojausta, kannattaa sen optimaalista asetteluarvoa lähteä määrittämään häiriötallenteeseen jääneiden merkintöjen avulla. Vattenfall Verkko Oy:n käyttöhenkilöstön mukaan erovir-

tasuojauksen toiminta-aikojen tulisi olla minuuttiluokkaa, jotteivät mm. kytkentämuutoksiin liittyvät erotinohjaukset tai hetkelliset muutokset kuormitusten epäsymmetriassa aiheuta turhia hälytyksiä ja vie suojaustoimintojen uskottavuutta. Lisäksi käyttöhenkilöstö on esittänyt, että johtolähtöjen toiminta-aikojen tulisi olla jonkin verran eripituisia. Syynä tähän ovat johtolähtöjen hetkelliset rengaskytkenät, joita tarvitaan esim. kytkentämuutosten yhteydessä. Keskenään eripituiset toiminta-ajat estävät johtolähtöjä hälyttämästä samanaikaisesti. (Salo 2006, 61 - 62)

VSV Oy:n käyttöhenkilöstö suosittelee ΔI suojausta käytettäväksi hälyttävänä. Käytettäessä ΔI suojausta hälyttävänä, tulee asettelun perustua verkon terveen tilan suuriin epäsymmetriaan ja olla sitä 3..5 % isompi. Toiminta-aikojen tulee vaihdella välillä 120...240 s.

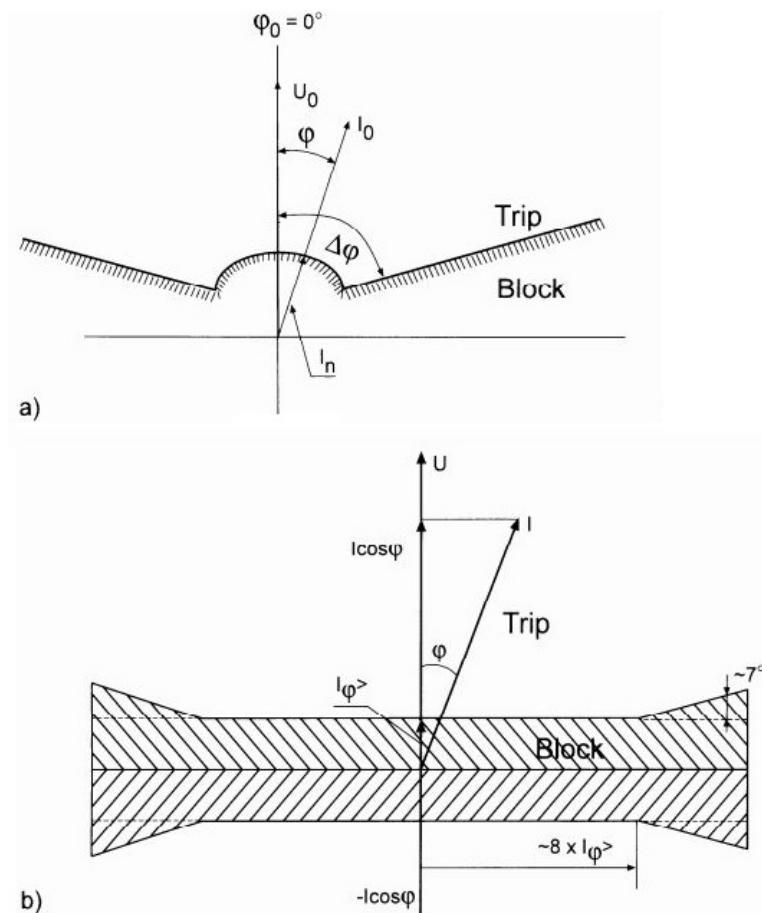
7.2.8 Jännitteettömien aikojen määrittäminen

Pjk:n jännitteettömien aikojen määrittämisessä voidaan maasulkujen osalta soveltaa samoja periaatteita mitä kappaleessa 6.1.7 todettiin. Ajk:n jännitteettömän ajan pituuden määrittämisessä maasulkujen kohdalla ei tarvitse ottaa huomioon suuren virran aiheuttamaa johtimen lämpenemistä. VSV:n käyttöhenkilöstön mukaan 30...60 s jännitteetön aika ajk:lle on riittävä niissä tapauksissa missä vian on mahdollista poistua. Jos vika ei poistu tässä ajassa, yrittää käyttökeskus mahdollisesti ohjata katkaisijaa vielä kerran kauko- tai käsiohjauksella kiinni. Jos katkaisija ei pysy kiinni tämän ohjauksen jälkeenkään, pitää vikaa alkaa selvittämään tarkemmin.

7.3 Maasulkusuojaus sammutetussa verkossa

Kompensoidussa verkossa ei selektiivistä suojausta voi toteuttaa nollavirtareleillä eikä loistehoon tai -virtaan perustuvilla suuntareleillä, koska kuristimen kautta kulkeva loisvirta sekoittaa tällaisen suojauksen toiminnan. Sen sijaan johtojen nollavirtojen päätöskomponentit noudattavat samoja suuntalakeja kuin nollavirtojen loiskomponentit maasta erotetuissa verkoissa. Selektiivinen maasulkusuojaus voidaan siis nykyin järjestää suuntareleiden avulla. Sammutetussa verkossa vaihekulmasuuntareleiden toimin-

nan ehtona on, että sekä virta I_r (muodostuu pääosin sammutuskuristimen rinnalle kytkettävän resistanssin R kautta kulkevasta muutaman ampeerin suuruisesta pätövirrasta) että tähtipistejännite U_0 ylittävät tietyt asetteluarvot. Sammutetussa verkossa nollavirran ja negatiivisena otetun tähtipistejännitteen välisen kulmaeron asetteluarvo on $0^\circ \pm 75^\circ$. (Mörsky 1992, 334; Lakervi & Partanen, 193)



Kuva 30. Nollajännitereleen asettelun karakteristiikka maasta erotetussa verkossa. (Lappeenrannan teknillisen yliopiston [www-sivut](http://www.lut.fi) 2016)

Kompensointiasteen ollessa suuri, on nollajännite pieni. Sammutuskuristimen rinnalle kytketään useasti vastus jonka yhtenä tarkoituksena on kasvattaa nollavirran pätökomponenttia siten, että releet pystyvät tunnistamaan sen paremmin. Vastuksen erilaisia ohjaustapoja on esitetty kappaleessa 4.7. Pätökomponenttia tarkkailevat releet havaitsevat tässä tilanteessa vain sammutuskelan resistiivisen osuuden, verkon resistanssin ja hajaresistanssin läpi kulkevan virran.

Sähköasemille keskitetysti asennetut sammutuskuristimet vaikuttavat olennaisesti suunnattuun maasulkusuojaukseen ja nollajännitesuojaukseen. Suojauksessa käytettävien portaiden roolit ovat kuitenkin samat kuin maasta erotetun verkon kohdalla, joten niitä ei enää käsitellä. Portaiden roolien ollessa samat, poikkeavat ne toisistaan merkittävästi asetteluiden osalta. Seuraavissa kappaleissa pyritään löytämään sammutetun verkon maasulkureleiden asetteluille yhtenäiset mitoitusperiaatteet. Asetteluja käydään läpi laukaisukriteerien ja laukaisuaikojen osalta. Muiden asetteluiden osalta voidaan soveltaa samoja periaatteita kuin maasta erotetussa verkossa. (Salo 2006, 67 - 68)

7.3.1 Laukaisukriteerien määrittäminen

Maasulkuvirran kompensointi ei juuri muuta maasulkusuojauksessa tavoiteltavia suojausportaiden herkkyysrajoja, mutta herkkyyksiä vastaavat nollajännitteen ja nollavirran asettelut ovat erilaiset verrattuna maasta erotettuun verkkoon. Kompensointi nostaa merkittävästi terveen tilan ja maasulun aikaista nollajännitettä U_0 sekä pienentää maasulkuvirtaa I_e sekä nollavirtaa I_0 . Sammutetussa verkossa nollajänniteasettelua ei voida asettaa yhtä alhaiseksi kuin maasta erotetussa. Siitä huolimatta, on nollajännitesuojauksen herkkyys usein jopa entistä parempi suuremmasta maasulkutilanteen aikaisesta jännitteestä johtuen. (Salo 2006, 68)

20 kV syötön suojausportaat

Syötön tason toinen eli hälyttävä porras voidaan tässäkin tapauksessa asettaa samoilla rajaehdoilla kuin maasta erotetussa verkossa eli lisätään 1 % verkon terveen tilan nollajännitteeseen. Ensimmäisen eli laukaisevan portaan kohdalla ei voida soveltaa samaa periaatetta kuin maasta erotetussa. Ensimmäisen suojausportaan kohdalla tulee kiinnittää eri tavalla huomiota katkeileviin maasulkuihin. Kompensoidussa verkossa esiintyy vikatilanteita, joissa johtolähdön suunnattu maasulkusuojaus ei kykene erottamaan katkeilevaa maasulkua, mutta maasulun nollajännite säilyy korkealla tasolla myös katkeilujaksojen välissä. Jos nollajännitteen taso säilyy ensimmäisen portaan U_0 asettelu yläpuolella, voi 20 kV syötön katkaisija toimia suoraan erottaen koko sähköaseman verkosta. Tämän välttämiseksi ensimmäisen portaan asettelua ei kannata enää sitoa

tiettyyn herkkyYTEEN. Sen sijaan se asetellaan suoraan riittävän korkeaksi vaihejännitteeseen nähden. Käyttökokemusten mukaan tällä portaalla käytettävän arvon pitää olla luokkaa 50...60 %. (Salo 2006, 68 - 69)

Johtolähtöjen suojausportaat

Johtolähtöjen suunnatun maasulkusuojauksen asettelemiseksi täytyy nollajännitteen lisäksi tuntea myös nollavirta. Kompensoidun verkon nollavirta koostuu sammutuskuristimen ja verkon häviöistä muodostuvasta pätökomponentista sekä kompensoinnin epävirityksen jäljelle jättämästä loiskomponentista. Lisäksi nollavirran pätökomponenttia kasvatetaan keinotekoisesti sammutuskuristimen rinnalle kytkettävällä lisävastuksella. Lisävastuksella varmistetaan, ettei suunnatun maasulkusuojauksen herkkyys laskisi pienentyneen maasulkuvirran myötä. (Salo 2006, 69)

Johtolähtöjen suunnatun maasulkusuojauksen suojausportaiden kohdalla käytetään samoja herkkyysrajoja kuin maasta erotussa verkossa. Herkkyysrajat ovat siis edelleen 5 k Ω laukaisevalla ja 10 k Ω hälyttävällä portaalla. Jos suunnattu maasulkusuojaus pohjautuu nollavirran pätökomponenttiin, muuttuu myös vaihekulman perusasettelu. Nollavirran laukaisuehtona voidaan käyttää joko pelkkää pätökomponenttia tai nollavirran itseisarvoa, joka huomioi myös virran loiskomponentin. Nollavirran itseisarvoa käytettäessä suunnatulla maasulkusuojauksella, päästään hieman parempaan herkkyYTEEN. Vaihekulman laukaisuehto tulee asetella mitattavan virran perusteella. (Salo 2006, 69)

7.3.2 Laukaisuaikojen määrittäminen

Johtolähtöjen suojausportaat

Kompensoinnilla saavutettavat suurimmat edut ovat maasulkuvikojen itsestään sammuminen ja laukaisuaikojen pidentämisen mahdollisuus. SFS 6001 määrittelee, että kompensoidun verkon maadoitukset voidaan mitoittaa maasulkuvirran mukaan, joka on suuruudeltaan 10 % vastaavan maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta. Näin saadaan hyötyä myös alhaisemmista maadoituskustannuksista. Kompensoinnin myötä

johtolähdön suunnatun maasulkusuojauksen ensimmäisen portaan laukaisuaikaa voidaan reilusti pidentää pienentyneen maasulkuvirran myötä. SFS 6001 standardin kosketusjännitevaatimukset on tässä tapauksessa helpompi täyttää. Vaikka aikaa voidaan nyt pidentää, tulee monilla alueilla silti vastaan heikkojen maadoitusten rajoitukset. Raja tulee tavallisesti vastaan 0.5 s kohdalla. Tämä arvo takaa kuitenkin paremmat mahdollisuudet maasulun itsestään sammumiselle, eikä itsestään sammumisen mahdollisuus juurikaan kasva vaikka laukaisuaikaa saataisiin pidennettyä paikoissa joissa maadoitukset sen sallivat. Lisäksi jos laukaisuaikaa lisätään, heikkenee katkeilevien maasulkujen havaitseminen huomattavasti. Katkeilevien maasulkujen havaitsemisen kannalta laukaisuajan tulisi olla mahdollisimman lyhyt. Toisen suojausportaan aika-asettelut voidaan pitää samana kuin maasta erotetussa verkossa. (Salo 2006, 71)

20 kV syötön suojausportaat

20 kV syötön ensimmäisen suojausportaan laukaisuaika tulee nostaa 10 sekuntiin, jotta katkeilevat maasulut eivät aiheuta virhelaukaisuja. Toisen portaan aika-asettelut voidaan pitää samana kuin maasta erotetussa verkossa. Myös VSV:n käyttöhenkilöstö suosittelee 10 sekunnin laukaisuajan asettelua 20 kV syötön ensimmäiselle portaalle. (Salo 2006, 71)

8 SUOJAUSKAAVIO

8.1 Kuvaus

Työn tavoitteena oli selvittää releasetteluiden mitoittamisen perusteet sekä luoda selkeä ja helppokäyttöinen suojauskaavio. Kaavion tarkoituksena oli esittää VSV Oy:n kaikkien sähköasemien johtolähtöjen oiko- ja maasulkusuojausten releasettelut. Lisäksi kaavioon haluttiin laskurit, joiden avulla pystytään mitoittamaan asetteluja uusille johtolähdöille sekä tarkistamaan vanhojen käytössä olevien oiko- ja maasulkusuojausten asetteluja. Kappaleiden 6 ja 7 kirjoittamisen aikana havaittiin, että kaavioon pitää tuoda paljon dataa VSV Oy:n verkkotietojärjestelmästä, jotta halutut laskurit saadaan tehtyä. Todettiin, että kaavioon tehtyjen laskurien tarvitsemia tietoja voidaan tuoda SQL-tietokannasta, johon VSV Oy:n käyttämä verkkotietojärjestelmä varastoi datansa. Suojauskaavioon luotiin ominaisuus jolla kaavio hakee kaikki tarvitsemansa ja esittämänsä tiedot SQL-tietokannasta löytyviltä tauluilta.

8.2 Oikosulkusuojaus

Kaaviossa tehtiin jokaista asemaa varten kaksi välilehteä. Ensimmäinen välilehti tehtiin nykyisten ylivirtasuojauksien asetteluiden esittämiseen, tarkistamiseen ja uusien määrittämiseen. Nykyisten ylivirtasuojauksen asetteluiden lisäksi tietokannasta tuotiin kaavioon mm. seuraavia mitoittamiseen tarvittavia tietoja:

- suurin johtolähdöllä esiintyvä kuormitusvirta
- johtolähdön pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta
- johtolähdöllä esiintyvän suojattavan kohteen maksimi etäisyys
- pikalaukaisun asettelun kantama
- metrimäärät johtolähdöllä esiintyvistä Swan johdintyyppistä
- viimeisimmän laskennan esittämä oikosulkukestoisuus prosentteina
- päivämäärät joilta edellä mainitut datatiedot ovat peräisin

Swan on käytöstä poistettu johdintyyppi, joka on poikkipinnaltaan vain 25 mm². Johdinten pieni poikkipinta-ala aiheuttaa usein ongelmia oikosulkukestoisuuden kanssa.

Johtolähdön suojausta mitoitettaessa on syytä ottaa huomioon mikäli Swan johdinta esiintyy kyseisellä lähdöllä. Huomioon ottaminen tapahtuu käytännössä siten, että pikalaukaisun virta-arvoa asetellaan alemmaksi, jotta kestoisuus näillä johto-osilla täyttyy myös virroilla, jotka ovat välillä $I > - I >>$. Viimeisimmän verkkotietojärjestelmän suorittaman laskennan määrittämistä johtolähdön oikosulkukestoisuudesta voidaan nähdä heti, mikäli oikosulkukestoisuus johtolähdöllä ei täyty. Ylivirtasuojauksen välilehdeltä löytyy laskuri, jolla pystytään määrittämään johtolähdön asettelut myös mahdollisessa varasyöttötilanteessa. Kaavioon tehtiin virheentarkistusmenetelmä, jotta asetteluja tarkistettaessa voitaisiin helposti huomata jos jokin asettelu ei ole laskennan suosittelemalla asetteluvälillä. Ylivirtasuojauksen asetteluja on syytä tarkistaa määrärajoittain. Tarve asettelujen muuttamiselle ilmenee yleensä tilanteissa, joissa johtolähdön pituus kasvaa, jonka seurauksena kuormitusvirta kasvaa ja pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta pienenee. Tällöin pitää tarkistaa, että kytkentävirtasysäykset eivät aiheuta ongelmia johtolähdön käyttöönotossa ja tarkistaa, että suojaus toimii myös varmasti johtolähdön lopussa esiintyvällä pienimmällä 2-vaiheisella oikosulkuvirralla. Asetteluja pitää myös muuttaa tilanteissa, joissa johtolähdöllä varasyötetään toista johtolähtöä tai toista asemaa tai johtolähdön pituus lyhenee.

Laukaisuaikojen osalta kaaviossa esitetään aikaisemmin määritetyt laukaisuaikasuositukset, mistä voidaan erityistilanteissa kuitenkin tarpeen mukaan poiketa. On kuitenkin otettava huomioon, että suositellut laukaisuaajat pohjautuvat laskurien esittämiin asetteluväleihin ja niiden käyttö on perusteltua. Mikäli laskurien esittämistä asetteluväleistä poiketaan, tulee se ottaa huomioon laukaisuajan määrittämisessä ja huomioida kytkentävirtasysäyksen vaikutukset uudella laukaisuajalla, tarkistaa oikosulkukestoisuuden säilyminen sekä varmistua, että suoja toimii myös johtolähdön lopussa tapahtuvalla 2-vaiheisella oikosulkuvirralla. Kytkentävirtasysäys saattaa aiheuttaa ongelmia siirryttäessä alle 0.3 s laukaisuaikaan. Pidempään laukaisuaikaan siirryttäessä tulee varmistua, että oikosulkukestoisuus täyttyy virroilla jotka ovat välillä $I > - I >>$. Poikkeuksia ovat esimerkiksi johtolähdöt, joilla laskurien esittämät asetteluvälit eivät täytä oikosulkukestoisuuden esittämää vaatimusta tai johtolähdöt, joilla on muita katkaisijoita.

8.3 Maasulkusuojaus

Toinen asemakohtainen välilehti tehtiin nykyisten maasulkusuojausten asetteluiden esittämiseen, tarkistamiseen ja uusien määrittämiseen. Tällä välilehdellä esitettiin seuraavien suojaustyyppien nykyiset asetelut sekä laskurit niiden mitoittamiseen:

- suunnattu maasulkusuoja maasta erotetussa verkossa
- suunnattu maasulkusuoja sammutetussa verkossa
- nollajännitesuoja maasta erotetussa verkossa
- nollajännitesuoja sammutetussa verkossa
- suuntaamaaton maasulkusuoja

Maasta erotetun verkon maasulussa releet eivät havaitse vikavirrasta johtolähdön itse tuottamaa osuutta. Tästä syystä maasta erotetun verkon suunnatun maasulkusuojausten laskureille tuotiin tietokannasta tieto johtolähdön itse tuottaman maasulkuvirran suuruudesta, jota käytettiin skaalauskerroina olemassa olevien asettelujen herkkyyksien laskentaan. Lisäksi kaaviosta löytyy laskuri, johon voidaan syöttää haluttu vikavastusarvo, jolla laskuri määrittää jokaiselle johtolähdölle nollavirran ja nollajännitteen arvot halutulla vikavastusherkkyydellä, ottaen huomioon johtolähdön itse tuottaman osuuden maasulkuvirrasta.

Sammutetun verkon suunnatun suojan asettelujen määrittämistä varten piti selvittää kaikkien asemien kompensointiasteet, lisävastuksien ohjaustavat ja laskea lisävastuksien redusoidut arvot. Näitä tietoja varten kaavioon tehtiin oma välilehti, jossa kaikki em. tiedot sekä muita sammutuksen kannalta oleellisia tietoja listattiin. Kaavioon tehtiin laskuri, jolla pystytään laskemaan vikavirran suuruutta. Vikavirran suuruuteen vaikuttavat kompensointiaste ja sekä vikavastuksen että kelan rinnalle kytkettävän lisävastuksen suuruudet. Laskuriin määritetään haluttu vikavastusarvo, jonka perusteella laskuri määrittää vian aikaisen vikavirran arvojen kaikkien komponenttien suuruudet sekä viassa ilmenevän nollajännitteen. Laskurissa on myös mahdollisuus laskea vikavirtoja lisävastuksen ollessa kiinni tai auki. Kun halutaan antaa maasululle mahdollisuus sammuun lisävastuksen aukiohjauksen aikana, tulee varmistua, että virta- ja jänni-

teasetteluiden arvot eivät tällöin ylity tai laukaisuaika on pidempi, kuin vastuksen aukiohjausaika. Sammutussäätäjä voidaan myös kalibroida lähettämään havahtuneelle suojareleelle lukituskäsky lisävastuksen aukiohjauksen aikana, jotta suojarele ei avaa katkaisijaa. Tällöin pitää kuitenkin arvioida tarkasti vian ilmenemisestä irtikytkentään kestävää aikaa, jotta kosketusjännitevaatimukset täyttyvät.

Maasta erotetun verkon nollajännitesuojauksen osalta kaavioon tehtiin nykyisen asettelun herkkyyden määrittäminen sekä laskuri, jolla voidaan laskea asattelun suuruus halulla vikavastuserkkyydellä. Tämän suojauksen asetteluja ei verkkotietojärjestelmästä saatu tuotua, koska järjestelmään ei toistaiseksi ole lisätty johtolähtökohtaisia nollajännitereleitä.

Sammutetun verkon nollajännitesuojauksen osalta kaaviossa käytettiin samaa laskuria kuin sammutetun verkon suunnatun suojan asetteluja määrittämisessä. Laskuriin määritetään herkkyyden vikavastuksen suuruutena. Lisäksi vian aikaista nollajännitteen suuruutta on mahdollisuus tarkastella vikavastuksen ollessa ohjattu kiinni tai auki. Tämän suojauksen asetteluja ei verkkotietojärjestelmästä saatu tuotua, koska järjestelmään ei toistaiseksi ole lisätty johtolähtökohtaisia nollajännitereleitä.

Suuntaamattoman nollavirtasuojan asattelun laskuri oli yksinkertaisin tehdä, koska sen mitoitus perustui ainoastaan aseman oman maasulkuvirran suuruuteen tai oman ja varasyötetyn aseman maasulkuvirtojen summaan.

Sekä maasta erotetun että sammutetun verkon suunnattujen suojien osuiksi tehtiin laukaisuaajan mitoitus varten maadoitusryhmittäin suurimpien sallittujen maadoitusarvojen laskurit eri laukaisuaikojen pituuksilla. Laskuri sisälsi myös vanhat maadoitusryhmät. Jotta laskuriin saatiin sisällytettyä uudet maadoitusryhmät, piti kaavioon luoda oma välilehti, jossa listattiin SFS 6001 standardin U_{tp} käyrältä löytyviä arvoja sekä määritettiin muutamia niistä käsin. Näiden pisteiden perusteella luotiin kahden pisteen välisellä interpoloinnilla yhtälö pisteiden välisten arvojen määrittämiseksi. Pisteiden välisten arvojen virhemarginaalia saatiin rajattua pienemmäksi, koska tunnettuja pisteitä käyrältä oli paljon. Suurimpien sallittujen maadoitusarvojen määrittämiseksi laskuriin eri laukaisuaajoilla tehtiin sammutetun verkon osalta mahdollisuus säätää maadoitukseen menevää virtaa. Maasta erotetussa verkossa maadoitukseen menevän

virran arvona käytetään yhteen kytketyn verkon 100% maasulkuvirtaa. Sammutetussa verkossa maadoituksiin menevänä virtana käytetään kompensoinnin jäännösloisvirtaa, johon laskurissa on mahdollisuus lisätä halutun suuruinen varmuusmarginaali. Kompensoinnin jäännösloisvirtaan tulisi lisätä tapauskohtaisesti vähintään 5-10A suuruinen virta, jotta maadoitusarvojen mukaan valittu laukaisuaika täyttäisi varmasti SFS 6001 standardin esittämät kosketusjännitevaatimukset.

Kaikkiin maasulkusuojausvälilehden sisältämiin suojaustyyppeihin luotiin virheentarkistusmenetelmä, johon käyttäjä voi määrittää itse valitsemansa hyväksytyyn virhemarginaalin prosentteina. Tämä tehtiin siitä syystä, että asetteluja määraajoin tarkistettaessa ei taulukko antaisi kaikista asetteluista virhettä niiden poiketessa laskennan esittämistä asetteluista vain muutamalla prosentilla. Koska asettelujen määrittäminen perustuu jo lähtökohtaisesti suurilla vikavastuksilla sisältävien maasulkujen havaitsemiseen, ei muutaman prosentin heitto juurikaan suojausta heikennä.

9 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tarkistella VSV Oy:n keskijänniteverkon johtolähtöjen suojausta oiko- ja maasulkusuojauksen osalta sekä korjata niissä mahdollisesti havaittuja virheitä. Toinen tavoite oli löytää niistä mahdollisia puutteita ja esittää niihin perusteltuja kehitysehdotuksia. Kolmas tavoite oli luoda suojauskaavio, jolla voidaan esittää ja tarkistaa verkon nykyiset oiko- ja maasulkusuojauksen asetellut sekä uutta verkkoa rakennettaessa mitoittaa niitä.

Työtä tehdessä huomattiin, että relesuojaus on suuri kokonaisuus, johon kuuluu useita osia. Nämä osat ovat erilaisia suojausportaita, suojiin sisältyviä suojausportaita, suojiin kanssa yhteydessä olevia verkon osia, suojiin kohdistuvia suojausportaita ja suojiin asetellujen suojausperiaatteita. Jotta olemassa olevien suojausportaita asetelluihin pystyttiin luotettavasti ottamaan kantaa, piti ensin tutkia tarkasti suojiin kohdistuvien vikailmiöiden teorioita sekä selvittää laajasti em. osien tarkoitusta verkon suojauksessa että niiden yhteyksiä toisiinsa.

Työssä selvitettiin ensin tarkasti oiko- ja maasulkuilmiöiden käyttäytymistä sekä niiden erilaisia muotoja. Ilmiöiden teorian jälkeen perehdyttiin keskijänniteverkon suojaukseen sekä selvitettiin tapoja, joilla ilmiöitä voidaan havainnoida. Osuudessa käsiteltiin suojareleiden kanssa yhteistyötä tekeviä verkon osia sekä niiden tarkoituksia verkon suojauksessa. Ilmiöihin ja suojauksen osiin perehtymisen jälkeen tehtiin selvitys suojauksien mitoittamisen periaatteista. Periaatteiden selvityksen jälkeen aloitettiin olemassa olevien suojauksien tarkastelu. Tarkastelu aloitettiin yhtiön verkkotietojärjestelmä Trimble NIS:in suojausasettelujen tarkistamisella. Verkkotietojärjestelmästä löytyi muutamia virheellisiä tai puutteellisia asetuksia, jotka vääristävät järjestelmän antamia laskentatuloksia. Kaikki tarkistuksen aikana verkkotietojärjestelmästä havaitut asetteluvirheet korjattiin vastaamaan viimeisimpien relekoestusraporttien tuloksia. Tarkastelun aikana havaittiin olemassa olevan suojauksen poikkeavan selvitettyjen mitoitusperiaatteiden arvoista moniltakin osin. Poikkeuksia löytyi kaikilta sähköasemilta sekä oiko- että maasulkusuojauksien asetteluista. Kaikki nämä poikkeukset ovat nähtävissä työssä tehdystä suojauskaaviosta, joka jää työn tilaajan käyttöön. Lisäksi tilaajalle tehtiin kirjallinen ohje suojauksien mitoitusta varten, joka sisälsi sanalliset perustelut kunkin suojauksen mitoituksen perusteista ja niiden suositusarvoista.

Olemassa olevia releasetteluja ei vielä työn aikana muutettu, mutta tilaajalle toimitetussa suojaustarkastelun raportissa kehoitettiin välittömästi aloittamaan uusien asettelujen käyttöönotto sekä tarkkailemaan uusien asettelujen toimivuutta käytännössä. Suurimmat poikkeukset tilaajan verkon releasetteluissa verrattuna työssä selvitettyihin mitoitusperiaatteisiin olivat ensimmäisen ylivirtaportaan virta-asetteluissa ja laukaisuaajoissa, maasta erotetun ja sammutetun verkon suuntareleiden nollavirran ja nollajännitteen asetteluissa sekä maasta erotetun verkon nollajännitereleen nollajänniteasetteluissa. Ensimmäisen ylivirtaportaan virta-asettelut poikkesivat muutamilla lähdöillä mitoitusperiaatteiden asetteluväleistä. Myös muutamat ensimmäisen ylivirtaportaan laukaisuaajoista poikkesivat suositellusta 0.3 s laukaisuajasta. Maasta erotetun verkon suuntareleiden virran asetteluarvossa ei oltu otettu huomioon lähdön itse tuottamaa maasulkuvirtaa, joka pitää skaalata asettelusta pois. Nollajännite- ja nollavirta-asettelut poikkesivat selvitetystä mitoitusperiaatteista myös suositellun herkkyyden osalta. Lisäksi asettelujen herkkyydet eivät vastanneet toisiaan vaikka asettelusuosituksissa näin ohjeistetaan. Sammutetun verkon suuntareleiden asetteluissa muutamalla ase-

malla oli aseteltu turhankin herkät laukaisuehdot nollavirran ja nollajännitteen suhteen. Asettelemalla suojat herkemmiiksi, kuin mitä suosituksissa on mainittu, kasvaa riski virheellisiin katkaisijatoimintoihin ja herkkyyden kasvattamisesta saatu hyöty on pienempi, kuin haitta, joka virheellisistä katkaisijatoiminnoista aiheutuu.

Tilaaajalle tehdyssä raportissa suositeltiin mm. ylivirtasuojauksen osalta siirtymään joko kolmiportaiseen ylivirtasuojaukseen tai vaihtoehtoisesti käyttämään käänteisai-käylivirtarelettä. Kumpikin em. tavoista on perustellusti parempi ylivirtasuojaukseen, kuin tilaaajan tällä hetkellä käyttämä kaksiportainen ylivirtasuojaus. Kolmiportainen ylivirtasuojaus helpottaa asettelujen tekoa varsinkin lähdoillä, jotka ovat pitkiä ja missä on suuri kuormitusvirta sekä pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta johtolähdön lopussa on pieni. Käänteisaikavirtareleellä sen sijaan saadaan muodostettua laukaisukäyrästä sellainen, että oikosulkukestoisuuden kanssa ei tule ongelmia suojausportaiden välillä, koska tämä suoja on portaaton.

Raportissa suositeltiin saneeraamaan sähköasemilta löytyviä vanhoja suojareleitä. Suositusta perusteltiin vanhojen suojareleiden puutteellisella automatiikalla asettelujen vaihtoon tilanteissa, joissa verkon maadoitustapa muuttuu, sillä maasta erotetun ja sammutetun verkon asetellut poikkeavat merkittävästi toisistaan nollavirran ja nollajännitteen havahtumisarvojen osalta. VSV Oy:llä käytössä olevat vanhat suojareleet sisältävät vain automatiikan, jolla releen mittaama virtakomponentti muuttuu verkon maadoitustavan muuttuessa. Tämä on huomattava puute suojien ominaisuuksissa ja tällaiset tulisi päivittää uusiin, joissa on mahdollisuus määrittää erisuuruiset havahtumisasetellut nollavirralle ja nollajännitteelle – kummallekin käytössä olevalle maadoitustavalle.

Uusista suojareleistä löytyvällä logiikalla saadaan suojauksien välille rakennettua tehokkaasti lukituksia, joiden avulla voidaan asetella hyvinkin tarkat arvot kullekin suojaukselle. Arvojen tarkoilla asetteluilla saadaan suojausalueista mahdollisimman laajat ja lukituksilla varmistetaan, että suojat toimivat selektiivisesti huolimatta tar-koista ja herkistä asetteluistaan. Lukituksien avulla voidaan myös varmistua, että vi- katilanteessa katkaisijatoiminnon suorittaa vain se suoja, jonka vika kuuluisi laukaista ja jonka alueella vika oikeasti on. Tämä tukee vian diagnosointia. Samalla saadaan

vika-alue rajattua mahdollisimman pieneksi ja myös vianpaikannus on helpompaa. Lisäksi uusista suojaareleista löytyy ominaisuutena ns. kaksinkertaistamislogiikka, jonka tarkoitus on johtolähdön kytkentätilanteessa kaksinkertaistaa ylivirta-asettelujen arvot. Tällä ominaisuudella saadaan tehokkaasti vähennettyä kytkentävirtasysäyksestä aiheutuvia virhelaukaisuja johtolähdön kytkentätilanteessa. Ominaisuudesta on suurin apu sellaisilla johtolähdöillä, joissa ylivirtaportaan asetteluväli on pieni. Tällaisia johtolähtöjä ovat pitkät johtolähdöt, joilla on suuret kuormitusvirrat ja pienet oikosulkuvirrat.

Sähköasemilla sijaitsevien sammutuskuristimien kompensointiasteen ja lisävastuksen ohjaustavan selvitystä tehtäessä huomattiin tarve maasulkuvirran kompensoinnin lisäykseen. Tämäkin tieto mainittiin tilaajalle toimitetussa raportissa. Maasulkuvirran kompensoinnin lisäys on hyvin perusteltua, koska sammutetussa verkossa voidaan käyttää pidempiä laukaisuaikoja ja samalla jälleenkytkentöjen määrä vähenee tehokkaasti. Pidempää laukaisuaikaa voidaan käyttää, koska pienentyneen maasulkuvirran mukana pienenee myös vikatilanteissa ilmenevät kosketusjännitteet. Pidempi laukaisuaika ja pienempi maasulkuvirta antavat myös paremmat mahdollisuudet vialle poistua itsestään.

Työtä voidaan pitää hyvin onnistuneena, sillä kaikki työn tavoitteet saavutettiin. Työstä oli merkittävää hyötyä työn tekijälle sekä työn tilaajalle. Työn tekijä kehitti työn tekemisen aikana itselleen merkittävän osaamisen keskijänniteverkon suojauksesta. Tilaajalle merkittävin hyöty oli työssä tehty tilaajan käyttöön jäävä suojauskaavio, jolla saadaan esitettyä, tarkistettua ja mitoitettua keskijänniteverkon johtolähtöjen oiko- ja maasulkusuojausasettelut. Muita merkittäviä tilaajan hyötyjä olivat verkkotietojärjestelmän asetteluvirheiden korjaukset, releasetteluiden mitoittamisohje, lista havaituista virheellisistä asetteluista ja suojauksen parantamiseen liittyvät kehitysehdotukset.

LÄHTEET

- ABB:n TTT-käsikirja 2000 - 07. Helsinki: ABB Oy. Viitattu 26.7.2016.
<http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>
- Aura, L & Tonteri, A. J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I. 2. p. Helsinki: Otatieto
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II. 2. p. Helsinki: Otatieto
- Isomäki, R. 2010. Sammutetun keskijänniteverkon kompensointilaitteiston lisävaikutuksen ohjaus. AMK-opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. Viitattu 30.8.2016.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2010052710731>
- Jyväskylän yliopiston www-sivut. Viitattu 28.7. <https://www.jyu.fi/>
- Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto
- Lappeenrannan teknillisen yliopiston www-sivut. Viitattu 5.8.2016.
<http://www.lut.fi/>
- Leena Korpisen www-sivut. Viitattu 25.7.2016. <http://www.leenakorpinen.fi/>
- Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. 2. p. Hämeenlinna: Karisto Oy
- Oulun ammattikorkeakoulun www-sivut. Viitattu 27.7.2016. <http://www.oamk.fi/fi/>
- Putkonen, A. 2016. Teollisuuden keskijänniteverkon vika- ja suojaustarkastelu. AMK-opinnäytetyö. Savonia ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.8.2016.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604254948>
- Rouhiainen, J. 2008. Maasulkuvirtojen kehitys ja kompensointi Haminan Energia Oy:n keskijänniteverkossa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 5.8.2016. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200810152007>
- Salo, J. 2006. Sähköisen suojauksen periaatteet Vattenfall Verkko Oy:n keskijänniteverkossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 5.9.2016.
- Satakunnan ammattikorkeakoulun www-sivut. Viitattu 25.7.2016.
<http://www.samk.fi>
- SFS-käsikirja 601 Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 2015. Suomen Standardoimisliitto SFS. 2. p. Helsinki: SFS ry
- Timonen, E. 1967. Sähkölaitosoppi. Teoksessa R. Saari (toim.) Sähkötekniikan käsikirja 1. Helsinki: Tammi, 607 - 770.
- Vakka-Suomen Voima Oy:n www-sivut. Viitattu 19.7.2016. <http://www.vsv.fi>