

SÄHKÖNJAKELUVERKON VIAT JA NIIDEN PAIKANTAMINEN

Nieminen Jalo

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkö-ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkövoimatekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jalo Nieminen	Vuosi	2019
Ohjaaja(t)	DI. Jaakko Etto Ins.(AMK) Erkki Näätsaari		
Toimeksiantaja	Kemin Energia ja Vesi Oy		
Työn nimi	Sähkönjakeluverkon viat ja niiden paikantaminen		
Sivu- ja liitesivumäärä	65		

Maakaapeloinnin yleistyttyä sekä säävarman verkon rakentamiseen siirtymisen takia vikojen etsiminen vaikeutuu huomattavasti ja vikojen etsintä maan päällä vaikeutuu. Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin sähkönjakeluverkkojen vikatyyppeihin ja niiden paikantamiseen. Työssä tutustuttiin Kemin Energian ja Veden vianhakulaitteistoon sekä käytettiin niitä vianhakuun käytännössä. Pääasiassa tässä työssä keskityttiin maakaapeliverkkoon.

Työssä paneuduttiin ensin teoriaosuudella sähköverkon rakenteeseen ja komponentteihin, jotta sähköverkon ymmärtäminen parantuu huomattavasti. Näin ollen myös sähköverkon vikojen ymmärtäminen ja löytäminen helpottuu, kun ymmärtää verkon teknisen rakenteen ja sähköiset ominaisuudet.

Lähteinä opinnäytetyön tekemisessä käytettiin sähköverkon rakentamiseen liittyvää kirjallisuutta, sekä muutaman muun opiskelijan tekemiä diplomi- ja opinnäytetöitä.

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin. Työssä saatiin käytyä suurin osa maakaapeliverkkoon painottuvista vioista ja löydettiin ratkaisut niiden löytämiseksi.

Avainsanat

maakaapelointi, vianhaku, maasulku, oikosulku, vikatyypit, syöksyaaltogeneraattori.

Technology, Communication and Transport
Electrical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Jalo Nieminen	Year	2019
Supervisor	Jaakko Etto, MSc (El.Eng) Erkki Näätäsaari, BEng		
Commissioned by	Kemin Energia ja Vesi Oy		
Subject of thesis	Electrical distribution network faults and their locating		
Number of pages	65		

Due to the widespread use of ground cabling and the transition to the construction of a weather-resistant network, finding faults is much more difficult and the search for faults on the ground becomes more difficult. This thesis explored the types of faults in electricity distribution networks and their tracing. The work familiarizes with the troubleshooting equipment of Kemin Energia ja Vesi and its use in troubleshooting. The main focus of this work was on the ground cable network.

The work first focused on the theoretical part of the structure and components of the power grid in order to significantly improve the understanding of the electricity grid. The understanding and discovering of electrical network faults makes it easier to understand the technical structure and electrical characteristics of the network.

The sources used in the thesis were the literature related to the construction of the power grid, as well as some Master and Bachelor Theses.

The aim of the thesis was achieved. Most of the ground cabling network faults were found in the work and solutions were found to find them.

Key words underground cabling, troubleshooting, ground fault, short circuit, failure modes, surge generator

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Kemin Energia ja Vesi Oy	7
1.2	Työn tavoite	8
2	SÄHKÖVERKKO	9
2.1	Sähkönjakeluverkon toteuttamistapa	9
2.2	Relesuojaus ja verkostoautomaatio	11
2.2.1	Relesuojauksen vaatimukset	11
2.2.2	Virtarele	12
2.2.3	Differentiaalirele	13
2.2.4	Suunta- ja tehorele	13
2.2.5	Katkaisijat	14
2.3	Sähköjohdot	14
2.4	Sähköverkon sijaiskytkennät	17
2.5	Verkostolaskenta	19
2.5.1	Redusointi	20
2.5.2	Jännitteenalenema	21
2.5.3	Häviöt	22
2.5.4	Sähköverkkojen laskenta käytännössä	23
3	KESKIJÄNNITEVERKKO	26
3.1	Oikosulku	26
3.1.1	Jännitekuopat	27
3.1.2	Oikosulkuvirran rajoittaminen	27
3.1.3	Oikosulkuvirran laskeminen Thevenin menetelmällä	28
3.2	Maasulku	29
3.2.1	Maasulkuvirran laskeminen maasta erotetussa verkossa	30
3.2.2	Maasulkuvirran laskeminen kompensoidussa verkossa	34
4	PIENJÄNNITEVERKKO	39
4.1	Sulakesuojaus	39
4.1.1	Kahvasulakkeiden toiminta-aika	40
4.1.2	Kahvasulakkeen virranrajoitus	41
4.1.3	Selektiivisyys	41
4.2	Nollavika	42

Koulutusalan nimi
Koulutusala
Koulutus

4.3	Oikosulku	43
5	VIANPAIKANNUSMENETELMÄT	44
5.1	Vianpaikannus laskemalla	44
5.1.1	Oikosulkuvirran laskeminen	44
5.1.2	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta	47
5.1.3	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta	47
5.1.4	Yksivaiheinen oikosulkuvirta	47
5.2	Vianpaikannus syöksyaaltogeneraattorilla	48
5.3	TDR-tutka	50
5.4	Askeljännite	51
5.5	Vianilmaisimet.....	52
6	VIKATAPAUKSIA	54
6.1	Vian paikantaminen Ajoksessa MA202:lla	54
6.1.1	Taustaverkon impedanssi	55
6.1.2	Päämuuntajan impedanssi	55
6.1.3	Kaapelin impedanssi	56
6.1.4	Vikapaikan impedanssi ja oikosulkuvirta	57
6.2	Myrskyvaurioiden korjaus Simossa.....	58
6.3	Kaapelivaurio Outokummulla	60
7	POHDINTA.....	63
	LÄHTEET.....	64

ALKUSANAT

Tahdon kiittää opinnäytetyön ohjaajina toimineita Lapin Ammattikorkeakoulun opettaja Jaakko Ettoa ja Kemin Energian ja Veden käyttöinsinööriä Erkki Näät-saarta. Tahdon myös kiittää Kemin Energia ja Vesi Oy:tä kun sain mahdollisuu-den tehdä heille opinnäytetyön töiden ohessa firmaan. Lisäksi tahdon kiittää per-hettäni saamasta tuesta ja tsemppaamisesta opinnäytetyössäni.

Kemissä 29.3.2019

Jalo Nieminen

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä perehdytään sähköjakeluverkkojen vikatyyppeihin ja niiden paikantamiseen. Työssä paneudutaan sähköverkon rakenteeseen ja komponentteihin ensin teoriaosuudella, jonka jälkeen siirrytään käytännön työtehtäviin. Työssä tutustutaan myös Kemin Energian ja Veden vianhakulaitteistoon sekä käytetään niitä vianhakuun käytännössä.

1.1 Kemin Energia ja Vesi Oy

Kemin Energia ja Vesi Oy vastaa sähkön siirrosta ja jakelusta sekä niihin liittyvistä palveluista Kemissä. Kemin Energialla ja Vedellä on kaksi sähköasemaa, jotka sijaitsevat Syväkankaalla ja Karihaarassa. Vuonna 2018 Kemin Energia ja Vesi Oy:lla oli 14 972 asiakasta, joille sähköä siirrettiin yhteensä 167,9 GWh, jossa kasvua edelliseen vuoteen verrattuna oli 2.1%. Kemin Energia ja Vesi Oy:n päämuuntajien yhteisteho oli vuonna 2018 75 MVA. Kuvassa 1 on Karihaaran sähköasema, jonka teho on 25 MVA. (Kemin Energian ja Veden vuosikertomus 2017.)



Kuva 1. Karihaaran sähköasema. (Kemin Energian ja Veden vuosikertomus 2017.)

1.2 Työn tavoite

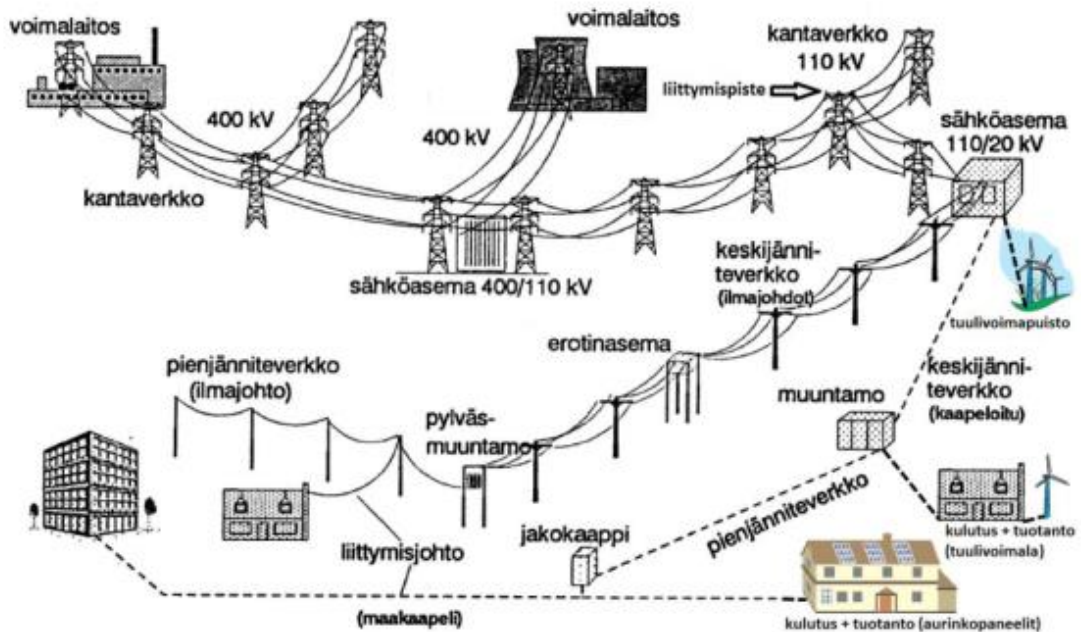
Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä sähköjakeluverkon vikoihin ja niiden paikantamiseen maakaapeloinnin yleistyttyä. Yhä useampi verkkoyhtiö saneeraa verkkojansa ja korvaa ilmalinjoja maakaapeloinnilla. Täten kaapeloinnin yleistyessä vikojen paikantaminen hankaloituu huomattavasti ilmalinjojen vikoihin verrattuna. Tässä työssä pyritään selvittämään sähköjakeluverkon viat ja niiden paikantaminen. Tavoitteena on myös käydä läpi erilaisia ratkaisuja millä vikoja voidaan rajata ja lopulta löytää korjaamista varten.

2 SÄHKÖVERKKO

Sähköverkot jaetaan käytetyn jännitetason perusteella jakelu- ja siirtoverkkoihin. Suomessa siirtoverkkoihin kuuluvat johdot, joiden jännite on 400, 220 ja 110 kV. Nämä muodostavat yhdessä sähköasemien kanssa koko maan kattavan valtakunnallisen kantaverkon, joka yhdistää toisiinsa syöttöasemia ja voimalaitoksia. (Sähkön siirto ja jakeluverkot 1998a, 1.)

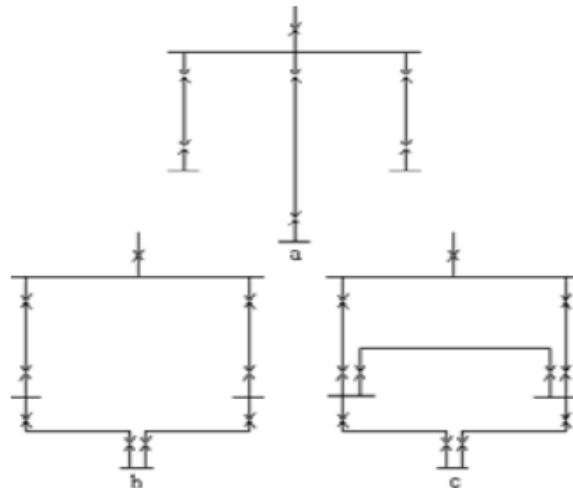
2.1 Sähkönjakeluverkon toteuttamistapa

Sähkönjakelujärjestelmän tärkeimpänä tehtävänä on siirtää sähkövoimansiirtojärjestelmän kautta tuleva tai jakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähkö sähkön loppukäyttäjille. Sähkönjakelujärjestelmän osia ovat alueverkko (110 kV ja 45 kV), sähköasemat (110/20 kV, 45/20 kV), keskijänniteverkko (20 kV), jakelumuuntamot (20/0,4 kV) sekä pienjänniteverkko (0,4 kV). Tavallisille sähkönkäyttäjille tuttu 230 V:n jännite on pienjänniteverkon vaihejännite. Valtaosalle sähkönkäyttäjistä pienjänniteliiyntyä on sopivin laitteiden käyttöjännitteen kannalta. Seuraavan sivun kuviossa 1 näkyy Suomen kantaverkon rakenne, missä on eroteltu eri jännitetason verkko-osuudet. Sähkönjakeluverkko koostuu monista yksittäisistä johdoista ja komponenteista, joista suurimmat komponentit löytyvät sähköasemilta. Jakelujärjestelmän komponentit jaetaan primäärikomponentteihin ja sekundäärikomponentteihin. Primäärikomponentteja ovat muun muassa, muuntamot, erottimet, muuntajat ja jakokaapit. Sekundäärikomponentteihin kuuluu sähköasemilla suoja releet ja apujännite-laitteistot, käyttökeskissä käytössä olevat käytönvalvonta- ja käytöntukijärjestelmät, tiedonsiirto- ja radiopuhelinjärjestelmät sekä useat muut laajat tietojärjestelmät. (Lakervi & Partanen 2009, 11.)



Kuvio 1. Suomen sähkönsiirto- ja jakelujärjestelmä (Suvela 2016, 7; Hellgrén et al. 1992; Hirvonen 2002)

Jakeluverkot rakennetaan joko silmukoiduksi tai säteittäiseksi, mutta niitä käytetään lähes aina säteittäisenä. Asemakaava-alueet pyritään aina rakentamaan silmukoiduksi ja asemakaavan ulkopuoliset alueet rakennetaan säteittäiseksi pienjännitepuolelta. Tavallisin ratkaisu kuitenkin on, että keskijänniteverkko keskeisiltä osiltaan rakennetaan silmukoiduksi, mutta renkaita käytetään avoimina. Jäkorajoina toimii yleensä käsin ohjattavat tai kauko-ohjattavat erottimet. Silmukka-verkolla parannetaan verkon käyttövarmuutta erilaisissa huolto- ja vikatilanteissa muuttamalla sähkön syöttösuuntaa ja rajaamalla verkkoa vikatilanteissa. Säteittäisen verkon etuihin kuuluu yksinkertainen rakenne pienine oikosulkuvirtoineen ja halvemmat rakennuskustannukset. Silmukka-verkon haittapuolina taas ovat suuret oikosulkuvirrat ja suojauksen monimutkaisuus. Alla olevassa kuviossa 2 näkyy säteittäinen verkkomuoto (a), rengas verkkomuoto (b) sekä silmukoitu verkkomuoto (c). (Lakervi & Partanen 2009, 13.)



Kuvio 2. Verkkomuodot: säteittäinen, rengas sekä silmukoitu. Kuvissa lyhyet vaakasuorat viivat kuvaavat kuormituspisteitä ja X:t kytkinlaitteina käytettäviä katkaisijoita. (Sähkön siirto ja jakeluverkot 1998a, 2)

2.2 Relesuojaus ja verkostoautomaatio

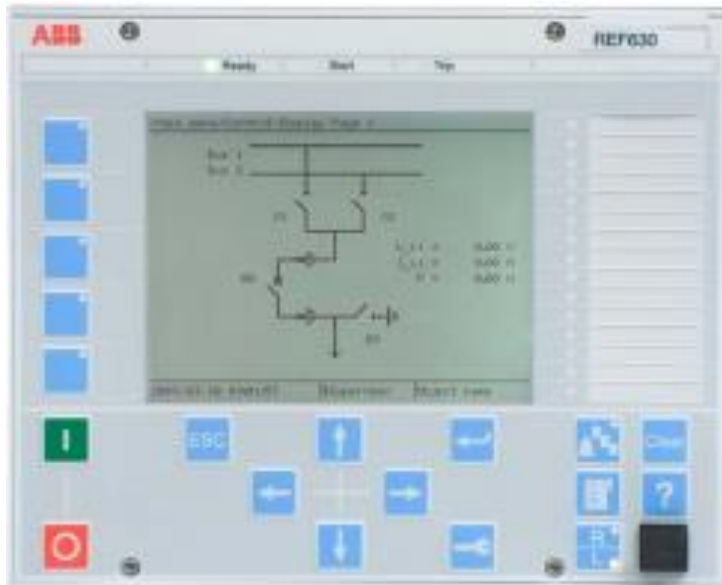
Sähköverkon vioilta ei voida kokonaan välttyä vaan niitä voidaan ehkäistä ja niihin varaudutaan esimerkiksi relesuojauksella. Suojauksella ei voida estää vikoja vaan sillä pyritään poistamaan viat mahdollisimman nopeasti ja vikojen sattuessa pyritään rajoittamaan niiden aiheuttamat vahingot pieniksi ja käyttökeskeytykset lyhyiksi. Nykyään käytössä on numeerisia, staattisia ja sähkömekaanisia releitä. Numeeriset releet ovat monipuolisempia ja nykyaikaisempia. (Elovaara & Haarla 2011b, 335-336.)

2.2.1 Relesuojauksen vaatimukset

Keskijänniteverkossa jokainen johtolähtö on varustettu täysin itsenäisesti toimivalla suojareleellä. Suojarele mittaa yhtä tai useampaa haluttua suuretta verkosta ja mikäli mitattava suure ylittää ennalta asetellun arvon se suorittaa katkaisijan aukiohjauksen. Erityyppisille vioille (maasulku, oikosulku) voi olla omat releensä tai suojaustoiminta on voitu yhdistää samaan releeseen. (Mörsky 1993, 30-31.)

Relesuojauksen on suojattava koko sähköverkkoa ja samalla suojauksen on toimittava mahdollisimman selektiivisesti, eli vain viallinen osa verkosta kytetään jännitteettömäksi. Relesuojauksen toteutuksen on oltava yksinkertainen, mutta

kuitenkin mahdollisimman käyttövarma. Releiden täytyy myös toimia riittävän nopeasti ja tarkasti, jotta erityisesti henkilövahingoilta ja materiaalivahingoilta vältyttäisiin. Lisäksi releistä täytyy löytyä riittävän kattava itsevalvonta, mikä tarkoittaa, että rele antaa hälytyksen, jos siinä tapahtuu sellainen sisäinen vika, joka voi aiheuttaa virhetoiminnon tai suojauksen toimimattomuuden. Relesuojaus on myös voitava koestaa ja huoltaa käytön aikana ilman käyttökeskeytystä. Kuvassa 2 näkyy ABB:n oma suojarahle REF630. (Holm 2018.)



Kuva 2. ABB:n suojarahle REF630. (Holm 2018)

2.2.2 Virtarele

Hetkelliset ylivirta releet ja vakioaikaylivirtareleet ovat tyypillisiä oikosulkusuoja-releitä. Jotta ne toimimatta sallisivat käytössä esiintyvät lyhytaikaiset kuormitusnykäykset, ne on aseteltava huomattavasti nimellisvirran yläpuolelle (esim. $1,5 \dots 2I_N$). Ne eivät kykene suojaamaan kohdettaan varsinaisilta ylikuormituksilta, jotka ajan mittaan saattavat aiheuttaa kohteessa ylikuumenemista. Ylivirtareleet voidaan toteuttaa ns. ylivirtasuuntareleinä, jolloin vikapaikan sijainti, ts. vikavirran suunta, vaikuttaa siihen toimiiko rele vai ei. Kolmivaiheisissa vikaresistanssitto-missa lähivioissa releen mittaama jännite on hyvin pieni ja vian suunnan määrit-täminen vaikeutuu. Tällaisessakin tilanteessa releen tulee toimia ainakin suun-taamattomana. Numeeristen ylivirtareleiden avulla voidaan saada tietoa vikapai-kan etäisyydestä sähköasemalta releen ensin toimittua. Myös releiden välisen

selektiivisyyden toteutumisesta saadaan tietoa, kun nähdään, miten kauan ha-
vahtuneena rele on ollut alemman portaan viassa. (Mörsky 1993, 36-37.)

2.2.3 Differentiaalirele

Differentiaalirele eli erovirtarele toimii, kun suojattavaan kohteeseen tulevien ja
siitä lähtevien virtojen erotus on suurempi kuin releeseen aseteltu arvo. Silloin
kun suojausalueella ei ole vikaa, niin virtojen summa on nolla, koska virta menee
suojausalueen läpi. Kun vika on suojausalueella, virta ei mene sen läpi vaan
kaikki ulkopuolelta tulevat vikavirrat tulevat suojausalueelle. Differentiaalisuojaus
suojaa vain niiden virtamuuntajien välisen alueen, joiden virtoja vertaillaan, eikä
se pysty toimimaan muiden alueiden varasuojana distanssireleen tapaisesti. Toi-
minta-aika differentiaalireleellä on noin 30ms, eikä siihen asetella hidastusta. Dif-
ferentiaalirelettä käytetään yksinkertaisten kiskojärjestelmien suojaamiseen ja on
myös muuntajan tärkein suojarele. (Elovaara & Haarla 2011b, 354-355.)

2.2.4 Suunta- ja tehorele

Suunta- ja tehoreleet mittaavat suojattavan kohteen virran ja jännitteen hetkellis-
arvoja sekä toisinaan näistä johdettuja tehoja. Suunnatun ylivirtareleen muok-
kauselimessä muodostetaan virran sekä jännitteen ja virran välisen vaihekulman
suuruuteen verrannolliset suureet. Rele havahtuu, kun releen mittaama virta on
yhtä suuri tai suurempi kuin asetteluarvo ja jännitteen sekä virran välinen vaihe-
kulma on määritellyllä alueella. Suunnattuja ylivirtareleitä käytetään yleensä sil-
mukkaverkkojen oikosulku- ja ylivirtasuojina. (Mörsky 1993, 40.)

Maasulun suuntareleet mittaavat suojattavan kohteen nollavirran ja nollajännit-
teen hetkellisarvoja. Releen muokkauselimessä muodostetaan nollajännitteen ja
-virran sekä niiden välisen vaihekulman suuruuteen verrannolliset suureet. Rele
havahtuu, kun releen mittaama nollajännite ja -virta ovat yhtä suuria tai suurem-
pia kuin asetteluarvo ja nollajännitteen sekä -virran välinen vaihekulma on toi-
minta-alueella. (Mörsky 1993, 40.)

2.2.5 Katkaisijat

Katkaisijat kuuluvat kytkinlaitteisiin, joita käytetään virtapiirin avaamiseen ja sulkemiseen. Katkaisijan täytyy pystyä katkaisemaan suurimmatkin verkossa esiintyvät virrat. Ne voivat toimia sekä käsin ohjattuina että automaattisesti. Yleisin automaattinen katkaisijatoiminto on avautuminen ylivirran (esim. maasulkuvirran tai oikosulkuvirran) vaikutuksesta. Avautumiskäskyn tällaisessa tilanteessa katkaisijalle antaa tällöin virtapiiriin mittamuuntajien avulla kytketty rele. Myös sulkautuminen voi olla automaattista esimerkiksi erityisen jälleenkytkentäreleistyksen käynnistämänä. Automaattista jälleenkytkentää käytetään yleisimmin ilmajohtoverkossa. Kuvassa 3 näkyy tyhjiökatkaisija, mikä on sisäkäyttöön tarkoitettu kiinteä katkaisija. Tyypillistä katkaisijalle on, että se kykenee vaurioitumatta sekä avaamaan että sulkemaan oikosulkupiirin eli piirin, jossa virta on moninkertainen katkaisijan nimellisvirtaan verrattuna. (Elovaara & Haarla 2011b, 161-163.)



Kuva 3. ABB:n VD4 tyhjiökatkaisija (ABB 2011, 1)

2.3 Sähköjohdot

Sähköenergian jakelussa ja siirrossa käytettävät johdot ovat rakenteeltaan kaapeleita tai ilmajohtoja. Normaalisti kaapeleiksi tulkitaan kaikki sellaiset johtoratkaisut, joissa jännitteellisten osien eristämiseen on käytetty muuta kuin ilmaa.

Määrästeknisesti raja ei kulje kuitenkaan eristysmateriaalien vaan asennustavan mukaan. Ilmajohdot ripustetaan ulkoilmaan pylväiden varaan ja kaapelit sijoitetaan kaapelikanaviin. Sisätiloissa kaapelit yleisimmin asennetaan hyllyihin tai vastaaviin ja ulkotiloissa ne upotetaan maahan ja veteen. Kuvista 4, 5 ja 6 löytyvät erilaiset asennustavat, mitkä on todettu tarpeellisiksi tässä työssä. Kuvassa 4 esitetään hyllyasennustapa. Kuvassa 5 näkyy ilmajohtoasennus tapa AMKA. Kuvassa 6 näkyy maakaapelointi maastossa. (Elovaara & Haarla 2011b, 250.)



Kuva 4. Hyllyasennustapa. (D1-2017, 141)



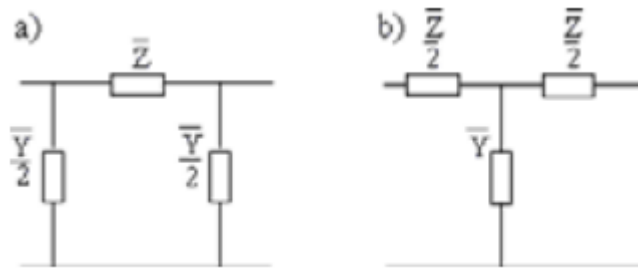
Kuva 5. Ilmajohdo asennustapa. Kuvassa ilmalinja Kemin ajoksessa.



Kuva 6. Maakaapelointi putkitusten yhteydessä. Kaapelit noin metrin syvyydessä.

2.4 Sähköverkon sijaiskytkennät

Verkon komponentit on kuvattava sähköverkojen laskentaa varten likimääräisellä sijaiskytkennällä. Johdot sisältävät induktanssia L , kapasitanssia C , konduktanssia G ja resistanssia R tasaisesti johtopituudelle S jakautuneena. Alle 200 kilometrin mittaisille voimansiirtojohdoille käytetään π - tai T-sijaiskytkentää (kuvio 3.) (Aura & Tonteri 1993, 73.)



Kuvio 3. Sähköjohdon a) π - ja b) T-sijaiskytkennät (Aura & Tonteri 1993, 73.)

$$\bar{Z}_k = (r + j\omega l)s = (r + jx)s = R + jX \quad (1)$$

$$Y_k = (g + j\omega c)s = (g + jb)s = G + jB \quad (2)$$

missä

r	on	johdon resistanssi pituusyksikköä kohti [Ω/m]
R	on	johdon kokonaisresistanssi [Ω]
x	on	johdon reaktanssi pituusyksikköä kohti [Ω/m]
X	on	johdon kokonaisreaktanssi [Ω]
l	on	johdon induktanssi pituusyksikköä kohti [H/m]
Z	on	johdon kokonaisimpedanssi [Ω]
ω	on	kulmataajuus [$1/s$]
s	on	johdon pituus [m]
b	on	suskeptanssi pituusyksikköä kohti [S/m]
B	on	johdon kokonaissuskeptanssi [S]
c	on	johdon kapasitanssi pituusyksikköä kohti [F/m]
g	on	johdon konduktanssi pituusyksikköä kohti [S/m]
G	on	johdon kokonaiskonduktanssi [S]
Y	on	johdon kokonaisadmittanssi [S]

Konduktanssi jätetään yleisimmin huomiomatta, jos johdon nimellisjännite on pienempi kuin 220kV. Kapasitanssi taas voidaan jättää huomioimatta 45kV jännitteisillä avojohdoilla. Suurjänniteavojohdoilla joiden $U \geq 110$ kV reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin resistanssi, joten silloin sijaiskytkentä voidaan laatia

monesti käyttäen pelkkiä reaktansseja. Pienjännitejohdoilla, joiden jännite on 400V tai pienempi, on tilanne päinvastainen ja sijaiskytkennässä voidaan käyttää pelkkää resistanssia. Kaapeleille voidaan käyttää samanlaista sijaiskytkentää kuin avojohdoilla. Kaapeleiden ominaisarvot poikkeavat kuitenkin huomattavasti avojohtojen arvoista. (Aura & Tonteri 1993, 74.)

Kaapelien reaktanssi ja resistanssi tiedot löytyvät yleensä kaapelivalmistajan tiedoista. Molemmat arvot ilmoitetaan yleensä pituusyksikköä kohden (Ω/km). Resistanssi ilmoitetaan yleensä tietyssä lämpötilassa. Kaapelin impedanssi saadaan laskettua kaavalla 3.

$$Z_j = (r + jx)l \quad (3)$$

missä

Z_j	on	kaapelin impedanssi (Ω)
x	on	kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohden (Ω/km)
r	on	kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohden (Ω/km)
l	on	kaapelin pituus (km)

Jotkut kaapelivalmistajat ilmoittavat reaktanssin induktanssina pituusyksikkö kohden (m^h/km), tällöin reaktanssin laskeminen onnistuu induktiivisen reaktanssin kaavalla 4.

$$X_L = 2\pi * f * L \quad (4)$$

missä

X_L	on	induktiivinen reaktanssi (Ω)
f	on	verkon taajuus (Hz)
L	on	induktanssi (H)

Sähköverkkojen laskennassa muuntaja korvataan oikosulkuimpedanssilla Z_k . Oikosulkuimpedanssi Z_k muodostuu muuntajan oikosulkuresistanssista ja -reaktanssista joka saadaan laskettua kaavalla:

$$\bar{Z}_k = R_k + jX_k \quad (5)$$

missä

Z_k	on	muuntajan oikosulkuimpedanssi
R_k	on	muuntajan oikosulkuresistanssi
X_k	on	muuntajan oikosulkureaktanssi

Tavallisesti taulukoissa muuntajalle ilmoitetaan: nimellisjännitteet U_n , nimellisteho S_n sekä oikosulkujännite u_k tai z_k . Oikosulkujännitteelle ilmoitetaan erikseen resistiivinen osa r_k ja reaktiivinen osa x_k . Arvot ilmoitetaan yleisimmin suhteellisena arvona tai prosentteina muuntajakäänin nimellisjännitteestä. Näiden suureiden perusteella oikosulkuresistanssin ja -reaktanssin arvot voidaan laskea yhtälöistä:

$$R_k = r_k \frac{U_n^2}{S_n} \quad (6)$$

$$X_k = x_k \frac{U_n^2}{S_n} \quad (7)$$

(Aura & Tonteri 1993, 75-76)

2.5 Verkostolaskenta

Verkostolaskennassa on tavoitteena mitoittaa sähköverkko siten, että asetetut jännite- ja muut vaatimukset saavutetaan mahdollisimman taloudellisesti. Sähköjohtoja laskemalla pyritään määrittämään tarvittavien johtimien materiaali, poikkipinta ja rakenne. Verkon rakenteen valinnalla voidaan myös vaikuttaa sähkön siirron ja jakelun luotettavuuteen. Verkolle asetettavat vaatimukset, kuten jännitteenalenema, taloudellisuus, kuormitettavuus, maasulkusuojaus, oikosulkukeskittoisuus ja varatehovaatimukset tarkistetaan verkon tehonjaot sekä maasulku- ja oikosulkuvirrat laskevilla ohjelmilla. Vaikka nykyisin kaikki laskennat tehdään pääsääntöisesti tietokoneilla, on suunnittelijoiden kuitenkin hallittava peruslaskentatapausten teoria. Verkostolaskennalla varmistetaan sähkönjakeluverkon

toimintavarmuus ja turvallisuus erilaisissa häiriö- ja käyttötilanteissa. (Aura & Tonteri 1993, 81; Elovaara & Haarla 2011a, 62.)

2.5.1 Redusointi

Sähköverkkoja laskettaessa on huomioitava tärkeä seikka. Kaikkia tarkasteltavia suureita on käsiteltävä samassa jänniteportaassa. Kun on valittu jokin jänniteportas, jota aletaan tarkastella, on muiden jänniteportaiden suureet redusoitava valittuun jänniteportaaseen. Laskujen suorittamisen jälkeen redusoidun verkon osat voidaan palauttaa alkuperäisiin jännitteisiin uudelleen redusoidamalla. Redusoidun suureen merkinä käytetään heittomerkkiä. Jännitteet redusoidaan kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella. (Sähköverkkojen laskentaa 1998b, 2-3.)

$$U' = \left(\frac{U_1}{U_2}\right) U \quad (9)$$

missä

U'	on	reduoitu jännite
U	on	reduoitava jännite
U_1	on	jännitetaso mistä redusoidaan
U_2	on	jännitetaso mihin redusoidaan

Virtojen redusointi onnistuu kertomalla ne muuntosuhteen käänteisarvolla.

$$I' = \left(\frac{U_2}{U_1}\right) I \quad (10)$$

missä

I'	on	reduoitu virta
I	on	reduoitava virta
U_1	on	jännitetaso mistä redusoidaan
U_2	on	jännitetaso mihin redusoidaan

Impedanssit redusoidaan kertomalla ne muuntosuhteen neliöllä.

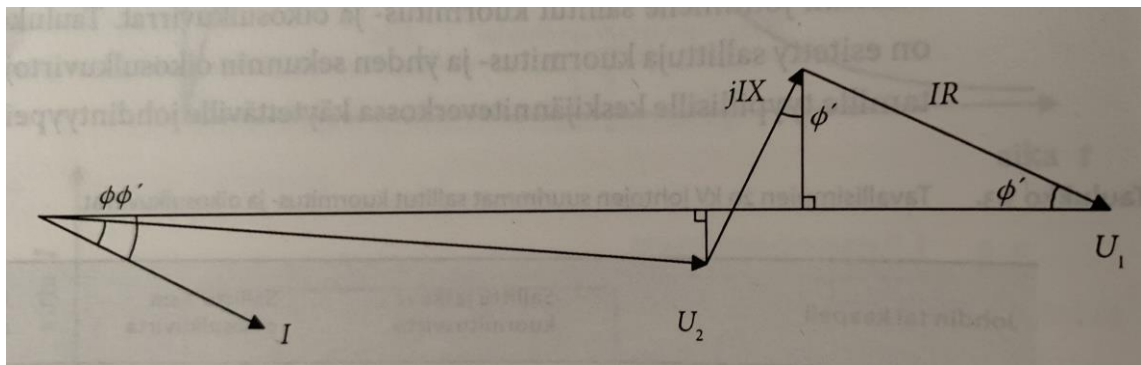
$$Z' = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 * Z \quad (11)$$

missä

Z'	on	reduoitu impedanssi
Z	on	reduoitava impedanssi
U_1	on	jännitetaso mistä redusoidaan
U_2	on	jännitetaso mihin redusoidaan

2.5.2 Jännitteenalenema

Kuormitusvirran I siirtyessä johtimessa sen impedanssissa syntyy jännitteenalenema. Tämän takia jännite johdon alkupäässä on suurempi kuin loppupäässä. Mutta jos johdon kuormitus jää melko pieneksi, jää johdon alku- ja loppupään jännitteiden välinen kulma myös pieneksi. Tällöin loppupään jännite on suunnilleen sama kuin alkupään. Loppupään iso kapasitanssi myös pitää loppupään jännitteen melkein samana kuin alkupään. Keskijänniteverkon kaapeli taas saattaa luoda kapasitiivisella varauksella loppupään jännitteen suuremmaksi kuin alkupään jännitteen. Kondensaattoriparisto voi tehdä saman pj- ja keskijänniteilmajohtoverkossa. Jännitteenaleneman muodostuminen näkyy hyvin kuviossa 4. Jännitteenalenema on kuviossa 4 näkyvien U_1 sekä U_2 jännitteiden itseisarvojen erotus. Jännitteenalenemalla on suuri merkitys verkkoja mitoitettaessa ja se ilmoitetaan yleensä prosenttilukuna. (Aura & Tonteri 1993, 84; Lakervi & Partanen 2009, 38.)



Kuvio 4. Jännitteenaleneman muodostuminen. (Lakervi & Partanen 2009,38)

Hyvän sähkönlaadun takaamiseksi normaalitilanteessa jännitteen tulisi olla $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä. Normaalitilanne tarkoittaa, että ei ole vikaa tai jännitekatkoa. Yleisimmin jännitteen vaihtelut aiheutuvat kuorman ja siitä seuraavan tehonsiirron vaihteluista. Myös pitkät siirtomatkat vaikuttavat jännitteen vaihteluun. (Elovaara & Haarla 2011a, 439.)

Käytännön laskelmia varten riittävän tarkka likimääräinen jännitteenalenema saadaan yhtälöstä:

$$U_h = \sqrt{3} \cdot (I \cdot R \cdot \cos \varphi + I \cdot X \cdot \sin \varphi) + \sqrt{3}(I_p R + I_q X) \quad (12)$$

missä

U_h	on	likimääräinen jännitteen alenema
I_p	on	kuormitusvirran pätökomponentti
I_q	on	kuormitusvirran loiskomponentti
$\cos \varphi$	on	tehokerroin
R	on	laskettavan johdon, muuntajan resistanssi
X	on	laskettavan johdon, muuntajan reaktanssi
$\sqrt{3}$	on	kerroin, jonka avulla tulos saadaan pääjännitteenä.

Kertoimen $\sqrt{3}$ ansiosta tulos saadaan pääjännitteenä. Lisäksi on huomioitava, miten kuormitus on jakautunut johdolle. Esimerkiksi jännitteenalenema on tasaisesti johdon varrelle jakautuneen kuormituksen tapauksessa puolet sellaisesta tapauksesta, jossa sama kokonaiskuormitus sijaitsisi täysin johdon loppupäässä. (Sähköverkkojen laskentaa 1998b, 3-4.)

2.5.3 Häviöt

Sähköjohdoissa syntyvät häviöt ovat kuormitushäviöitä, koronahäviöitä ja vuotohäviöitä. Pienjännitejohtojen häviöt ovat pelkästään kuormitushäviöitä. Kuormitushäviöt ovat johdossa kulkevan kuormitusvirran aiheuttamia virtalämpöhäviöitä.

Kolmivaihejohdon virtahäviöiden teho eli pätöteho häviöt voidaan laskea yhtälöstä:

$$P_h = 3I^2 R \quad (13)$$

missä

P_h	on	pätöteho häviöt
I	on	virta
R	on	resistanssi

Loistehohäviöt saadaan yhtälöstä:

$$Q_h = 3I^2 X \quad (14)$$

missä

Q_h	on	loistehohäviöt
I	on	virta
X	on	reaktanssi

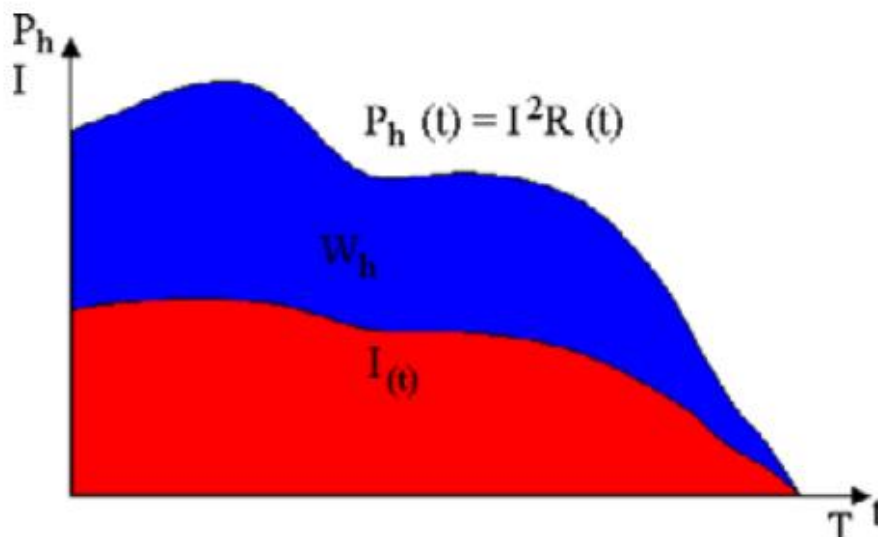
Kuormituksen mukaan vaihtelevien virtalämpöhäviöiden aiheuttama häviöenergia W_h vuodessa voidaan laskea tarkastelujaksona T integraalista:

$$W_h = \int_0^T P_h dt \quad (15)$$

missä

T on vuoden pituus 8760h.

Häviöenergia voidaan laskea johtoa pitkin siirrettävän tehon vuotuisen pysyvyyskäyrän avulla. Vuotuisen häviöenergian määrittäminen onnistuu graafisesti (kuvio 5), kun pätötehon ja kuormitusvirran pysyvyyskäyrät tunnetaan. Nämä arvot taas saadaan siirrettävän tehon pysyvyyskäyrästä, kun tunnetaan kutakin tehoarvoa vastaava tehokerroin. (Aura & Tonteri 1993, 93.)



Kuvio 5. Häviöenergian graafinen määrittäminen. (Aura & Tonteri 1993, 93)

2.5.4 Sähköverkkojen laskenta käytännössä

Käytännössä laskelmat tehdään aina tietokoneella. Silmukoituna käytettävien siirtoverkkojen laskelmat ovat yleensä monimutkaisia ja hankalia. Näitä laskelmia tarvitaan verkon suunnitteluvaiheessa ja olemassa olevan verkon tilan tarkkailussa. Tehonjakolaskennalla saadaan selvitettyä kuormitusten, häviöiden ja jännitteiden arvojen jakautuminen silmukoidun verkon eri haaroille. Lähtötietoina laskennalle ovat solmupisteiden pätö- ja loistehot sekä generaattoreiden pätötehot ja jännitteiden itseisarvot. Solmupisteiden jännitteiden kulmat ja itseisarvot

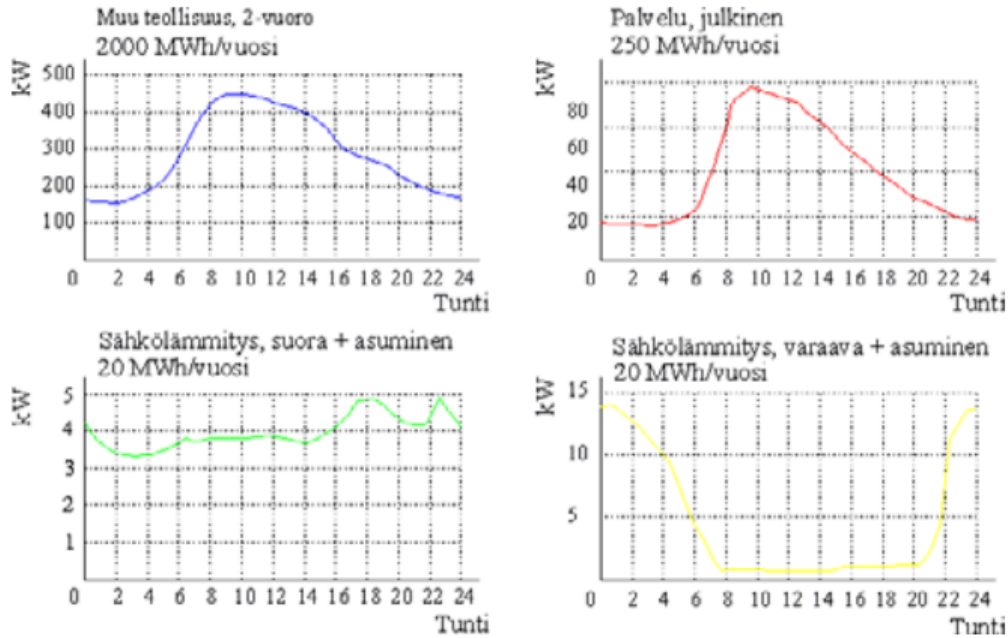
ratkaistaan iteroimalla Kirchoffin I. lain mukaisesti yhtälöryhmästä. Sen jälkeen jokaisen johtohaaran virrat ja häviöt lasketaan Ohmin lain avulla. Vikavirtojenlaskennassa hankalin tehtävä on määrittää verkon impedanssi vikakohtasta lasketuna eli ns. Thevenin'in impedanssi. Silmukkaverkoissa vikavirralla on useita kulkureittejä, jolloin verkon impedansseista muodostuu monimutkaisia rinnan- ja sarjakytkentöjä. Nämä voidaan ratkaista ns. solmupisteimpedanssimatriisin avulla. (Sähköverkkojen laskentaa 1998b, 5-7.)

Jakeluverkkojen laskelmat ovat huomattavasti yksinkertaisempia siirtoverkkoihin verrattuna. Tämä johtuu jakeluverkkojen säteittäisestä käyttötavasta, jolloin virralla on vain yksi kulkusuunta. Jakeluverkkojen laajuuden ja laskentatilanteiden määrän vuoksi laskelmat tehdään nykyisin kuitenkin pääsääntöisesti tietokoneilla sähköyhtiöiden tietojärjestelmien avulla. (Sähköverkkojen laskentaa 1998b, 5-7.)

Verkkotietojärjestelmä (VTJ) sisältää verkon käsittelyyn ja laskentaan tarvittavat toiminnot sekä tietokannan, joka sisältää yksityiskohtaiset teknilliset tiedot muuntamoilta, sähköasemilta sekä pien- ja keskijänniteverkosta. Verkkotietojärjestelmän tehtäviin kuuluvat sähkönjakeluverkon seurantalaskenta, suunnittelu ja verkkotietojen ylläpito. Nykyaikaiset verkkotietojärjestelmät perustuvat graafiseen käyttöliittymään. Verkkotietojen ylläpidossa käytetään yleensä CAD-työkalua, johon liitetyllä digitointilaitteella tiedot syötetään tietokantaan. (Sähköverkkojen laskentaa 1998b, 5-7.)

Verkon seurantalaskennassa lasketaan verkon eri osien kuormitustilanteiden suurimmat virrat ja -tehot, energia- ja tehohäviöt, vikavirrat ja jännitteenalenemat. Relesuojauksen toimivuus voidaan myös tarkastaa. Huipputeho kiinnostaa erityisesti, koska se on yleensä määräävä tekijä verkon komponentteja mitoittaessa. Huipputehot saadaan muuntamalla ne asiakkaiden vuosienenergiaista, jotka tiedetään, sillä sähköyhtiöiden laskutus perustuu niihin. Aikaisemmissa järjestelmissä teho/energia-muunnos perustuu kuluttajaryhmäkohtaisiin kuormituskäyriin. Nykyisissä järjestelmissä mittaus perustuu asiakkailta tuntitehomittaukseen pääsääntöisesti, jolla pyritään saamaan reaaliaikainen tieto mittauksista, jota voidaan hyödyntää verkon seurantalaskennassa. Yksi mahdollinen kuluttajaryhmäjako on jalostus, kotitalous, loma-asutus, maatalous, palvelu ja sähkölämmitys. Kuviossa

6 on esitetty neljän esimerkki kuluttajaryhmän kuormituskäyrät. (Sähköverkköjen laskentaa 1998b, 5-7.)



Kuvio 6. Esimerkki neljästä kuormituskäyrästä. (Lakervi 1996, 22-23)

Yksinkertainen tapa arvioida kuormitustehon suuruutta on perustaa se vuosienenergian kulutukseen. Vuosienergia saadaan ainakin asiakkaan laskutustiedoista. Vuoden huipputehon P_{\max} laskemiseen voidaan käyttää Velanderin kaavaa:

$$\frac{P_{\max}}{kW} = k_1 \frac{W}{MWh} + k_2 \sqrt{\frac{W}{MWh}} \quad (16)$$

Kaavassa W on vuosienenergia ja k_1 ja k_2 arvot ovat Velanderin kaavan kertoimia, jotka on saatu todellisuudessa käytännön mittausten ja kokemuksen perusteella. Kokemus on osoittanut, että Velanderin kaava antaa keskijännitteisissä jakeluverkoissa melko luotettavia tuloksia, kun kuluttajamäärä on suuri. Pienjänniteverkoissa taas kuluttajamäärät jäävät pieniksi ja tulokset ovat epäluotettavampia. Suuruusluokka-arvona voidaan todeta, että kun energiat ilmoitetaan megawattitunteina (MWh), teho saadaan kilowatteina (kW) kertoimien ollessa $k_1=0,27$ ja $k_2=1.5$. Kertoimien suuruus riippuu luonnollisesti siitä, missä laaduissa energiat ja tehot ilmoitetaan. Lisäksi pitää myös huomioida eri kuluttajaryhmien tehontarve eri kellonajoille. (Elovaara & Haarla 2011a, 86-87.)

3 KESKIJÄNNITEVERKKO

Keskijänniteverkon jännitetaso on Suomessa tyypillisesti 20kV, mutta joissakin kaupungeissa on myös käytössä 10kV:n jännitetaso. Keskijänniteverkko on joko maasta erotettu tai sammutettu sammutuskuristimen kautta. Keskijänniteverkossa sähköasemalta lähtevän keskijännitejohdon eli ns. lähdön suojana toimii katkaisija ja siihen liitetyt maasulkurele, ylivirtarele ja jälleenkytkentärele. Avojohtoverkossa ei ole käytössä ylivirtasuojauksia kuormitusvirran suhteen, ylivirtarele toimii oikosulkusuojana. Vaikka keskijänniteverkko yleensä rakennetaan silmukoiduksi niin sitä käytetään säteittäisenä. Keskijänniteverkko muodostaa yhdessä 110kV:n johtojen sekä sähköasemien kanssa kokonaisuutena toimivan jakelujärjestelmän. (Lakervi & Partanen 2009, 125.)

Keskijänniteverkko vaikuttaa hyvin olennaisesti verkon käyttövarmuuteen. Jopa yli 90% sähkökäyttäjien kokemista keskeytyksistä on peräisin keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista. Keskijänniteverkolla on myös normaalin sähkönjakelutoiminnan lisäksi keskeinen varayhteysrooli pahoissa 110kV:n sähköasemien ja johtojen vioissa. Varayhteysvaihtoehtojen analysointi on tärkeää huoltotoimenpiteitä sekä vikoja ajatellen. (Lakervi & Partanen 2009, 125.)

3.1 Oikosulku

Keskijänniteverkossa oikosulku tapahtuu, kun sähköverkon virtapiiri sulkeutuu eristysvian, valokaaren, vikaimpedanssin tai ulkoisen kosketuksen kautta. Yksivaiheista oikosulkua ei ole keskijänniteverkossa. Se on nimeltään maasulku. Oikosulku voi tällöin tapahtua kahden tai kolmen vaihejohtimen välille ja sille ominaista on kuormitusvirtaa suurempi virta. Sähköverkkoa eniten rasittava vika on 3-vaiheinen oikosulku, joka on aina kytkettävä mahdollisimman nopeasti pois. Hetkellisiä oikosulkuja verkkoon voi aiheuttaa esimerkiksi eristämättömälle johdolle kaatunut puu tai tuulen tiputtama oksa. Oksat eivät yleensä aiheuta pitkäkestoista vikaa tai välttämättä vikaa ollenkaan, mutta jos vika syntyy niin ne yleensä palavat poikki ja pikajälleenkytkentä toimii ja kytkee sähköt uudestaan päälle. (Lakervi & Partanen 2009, 28; Aura & Tonteri 1993, 159.)

Verkkoa eniten rasittava vika on vastukseton 3-vaiheinen oikosulku, joka aiheuttaa suurimman vikavirran. Oikosulkuvirran suuruus voi nousta jopa 10...40-kertaiseksi kuormitusvirtaan verrattuna. Nopea vianlaukaisuautomaatiikka onneksi suojaa verkkoa ja estää komponenttien vaurioitumisen. (Elovaara & Haarla 2011a, 170.)

3.1.1 Jännitekuopat

Oikosulkujen haittavaikutukset eivät rajoitu ainoastaan suuren vikavirran aiheuttamiin voimavaikutuksiin, verkostokomponenttien lämpenemiseen ja turvallisuusseikkoihin vaan niiden lisäksi se aiheuttaa myös ns. jännitekuopan. Vastukseton kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa vikapaikassa verkon jännitteen putoamisen nollaan. Jännitteen pudotus ei rajoitu vain vikapaikkaan vaan se putoaa myös muualla verkossa. Haitallisimpia ovat 110/20kV sähköasemien lähellä tapahtuvat oikosulut, koska tällöin kyseisen sähköaseman alueella kaikki sähkökäyttäjät kokevat syvän jännitekuopan, jonka kesto on viiallisen lähdön oikosulkusuojauksen toiminta-aika. (Lakervi & Partanen 2009, 31.)

3.1.2 Oikosulkuvirran rajoittaminen

Nollapistekatkaisuun perustuvilla katkaisijoilla ei pystytä pienentämään oikosulkuvirran dynaamista huippua. Oikosulkuvirran kestoa kuitenkin pystytään rajoittamaan nopealla relesuojauksella ja siten pienentämään termistä rasiitusta ja valkokaaren vaikutusaikaa. Oikosulkuvirran huippuarvoa voidaan rajoittaa sulakkeilla ja alle 1000V jännitteillä oikosulkuvirtaa rajoittavilla katkaisijoilla. Verkon suunnittelussa oikosulkukestoisuuden kasvattaminen nostaa käytettävien komponenttien hintoja ja siten kokonaiskustannuksia. Jokaisella jännitetasolla on oma oikosulkuvirtataso, joten täytyy miettiä mihin asti on järkevää kasvattaa oikosulkuvirtakestoisuutta kustannusmielessä. Kestoisuuksien valintaan vaikuttaa tuleva verkon laajeneminen sekä tuleva oikosulkuvirtojen kasvu. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07b, 10.)

Oikosulkusuojana yleensä kantaverkoille ja päämuuntajille käytetään ylivirtareleitä, distanssireleitä ja differentiaalireleitä. Ylivirtarelettä voidaan käyttää, kun

pieninkin vikavirta on suurempi kuin suurin kuormitusvirta. Silmukoidussa verkossa ylivirtarele on kuitenkin huono vaihtoehto. Silmukoidussa verkossa voi vikavirtaa tulla eri suunnista, joten se ei kykene havaitsemaan virran suuntaa. Distanssirele taas havaitsee vikavirran suunnan ja etäisyyden, joten sitä voidaan käyttää myös silmukoiduissa verkoissa. Distanssireleillä toteutetun suojauksen etuna differentiaalireleeseen verrattuna on sen toimiminen selektiivisesti myös ilman viestiyhteyttä. (Elovaara & Haarla 2011b, 340.)

3.1.3 Oikosulkuvirran laskeminen Thevenin menetelmällä

Laskettaessa oikosulkuvirtaa, tiedossa täytyy olla vikapaikan jännite sekä siitä näkyvä verkon impedanssi. Thevenin menetelmässä lähteet ja komponentit korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ns. ekvivalenttisella jännitelähteellä. Kaavan kerroin c saadaan taulukosta 1. Oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla:

$$I_k = \left(\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \right) = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (17)$$

missä

c	on	taulukon 1 mukainen jännitekerroin
U_n	on	syöttävän verkon jännite
Z_k	on	impedanssi vikapaikasta katsottuna

Taulukko 1. Oikosulkuvirtaa laskettaessa käytettävä taulukko jännitekertoimelle. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07b, 2)

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta C_{max}	Minimioikosulkuvirta C_{min}
pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1.00 1.05	0.95 1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

3.2 Maasulku

Maasulku määritellään käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Silloin kun verkon kahdessa eri vaiheessa ja eri kohdissa verkkoa esiintyy samanaikaisesti eristysvika, kutsutaan sitä kaksoismaasuluksi. Käyttömaadoitetussa verkossa maasulku on luonteeltaan yksivaiheisen oikosulun kaltainen ja vikavirran suuruus voidaan laskea, kun tunnetaan verkon impedanssit. Verkon oikosulkusuojat toimivat myös maasulussa, kunhan vikaresistanssi ei ole liian suuri maasulkukohdassa. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 1.)

Kompensoidussa sekä maasta erotetussa verkossa täytyy tuntea koko galvaanisesti yhteenkytketty verkko, jotta nollajännitteet ja maasulkuvirrat voidaan määrittää. Tässä tilanteessa verkon impedanssilla ei ole käytännön merkitystä. Verkot luotellaan maadoitustapojensa perusteella maasta erotettuihin, sammutettuihin sekä suoraan tai impedanssin kautta maadoitettuihin verkkoihin. Yleensä impedanssina toimii vastus tai kuristin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 1.)

Maasulkuvirran aiheuttamien erilaisten vaarajännitteen vuoksi maasulusta aiheutuu maadoitetuissa verkoissa vikapaikkaan sekä sen ympäristöön hengenvaara. Maasulkuvirran suuruus ja sen vaikutukset riippuvat vikaresistanssin suuruuden lisäksi siitä, miten moni tähtipiste on maadoitettu ja onko maadoitukset tehty suoraan vai virtaa rajoittavan kuristimen kautta. Jos verkko on sammutettu tai maasta erotettu, maasulkuvirta on pieni. Muuntajat ja voimansiirtojohdot rajoittavat sekä maadoitetun verkon maasulkuvirtaa että oikosulkuvirtaa. Ylivirtareleitä voidaan käyttää maasulkusuojana, jotka asetetaan mittaamaan nollavirtaa (nollavirtarele) eli vaiheiden summavirtaa ($3I_0$). Nollavirtareleen toiminta perustuu pelkästään virran suuruuteen, joten se ei ole suuntaherkkä. Tästä syystä se laukaisee sekä suojattavassa kohteessa (releestä katsoen edessä) olevat viat, että muissa kohteissa (releestä katsoen takana) olevat viat, jos vain vikavirta on riittävän suuri. Distanssireleitä ja suunnattuja maasulkureleitä, jotka havaitsevat maasulkuvirran suunnan voidaan myös käyttää maasulkusuojana. (Elovaara & Haarla 2011b, 340-341.)

3.2.1 Maasulkuvirran laskeminen maasta erotetussa verkossa

Normaalissa verkon tilassa vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä eli niiden summa on joka hetki nolla. Maakapasitanssin kautta vastaavasti kulkeva osa verkon virroista muodostaa symmetrisen järjestelmän. Maasulun sattuessa terveiden vaiheiden vaihejännitteet maata nähden kasvavat. Epäsymmetrian takia varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä summavirta muodostaa maasulkuvirran, joka kulkee vikapaikan kautta maahan. Vikaresistanssittomassa maasulussa maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla:

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (18)$$

missä

C_0	on	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
U	on	verkon pääjännite
ω	on	$2 \cdot \pi \cdot f$

Maakaapeleille löytyy taulukoita, joihin on kaapelilajeittain ilmoitettu maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohden. Tällöin maasulkuvirran määrittämiseksi tarvitsee tietää vain kaapelilaji, poikkipinta ja kaapelin pituus. Nämä tiedot yleensä löytyvät valmistajien kaapeliesitteistä nimellisjännitteellä pituutta lukuunottamatta. Taulukosta 2 löytyy 10-30 kV:n kaapeleille maasulkuvirtoja.

Taulukko 2. 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja [A/km],50Hz.
(ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 3)

Poikki- pinta mm ²	10 kV voimakaapelit					15 kV voima- kaapelit	20 kV voimakaapelit				30 kV voima- kaapelit
	Paperi- eristeiset PLKVJ APAKM APLKPJJ	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WTC AHXCMK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLJK AX-, FXPLJK AX-, FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLJK AX-, FXPLJK AX-, FXBTLJK	Paperi- Eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM AHXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WP AHXCMK- WTC AHXCMK HXCMK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLJK AX-, FXPLJK AX-, FXBTLJK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLJK AX-, FXPLJK AX-, FXBTLJK
3x25	0,6	1,3	1,0	-	-	-	2,1	1,6	1,5	-	-
3x35	0,8	1,4	1,1	-	-	-	2,3	1,7	-	-	-
3x50	0,9	1,7	1,3	-	1,3	1,6	2,5	1,9	-	1,7	2,1
3x70	1,0	1,9	1,4	-	1,4	1,7	2,8	2,0	2,0	2,0	2,4
3x95	1,1	2,3	1,6	-	1,6	2,0	3,2	2,2	2,3	2,3	2,6
3x120	1,2	2,5	1,7	1,8	1,8	2,2	3,5	2,3	2,4	2,5	2,8
3x150	1,3	2,7	1,8	-	2,0	2,4	3,7	2,5	2,6	2,7	3,1
3x185	1,4	3,0	1,9	2,1	2,2	2,5	4,0	2,6	2,8	2,9	3,3
3x240	1,5	3,2	2,2	2,4	2,4	2,9	4,5	2,9	3,2	3,2	3,6
3x300	1,5	3,4	2,4	2,6	2,7	3,1	4,9	3,1	3,5	3,5	3,9
3x1x35	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
3x1x50	-	-	-	-	1,3	1,6	-	-	-	1,7	2,1
3x1x70	-	-	1,4	-	1,4	1,7	-	2,0	-	2,0	2,4
3x1x95	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	2,6
3x1x120	-	-	1,8	-	1,8	2,2	-	2,5	-	2,5	2,8
3x1x150	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	3,1
3x1x185	-	-	2,1	-	2,2	2,5	-	2,8	-	2,9	3,3
3x1x240	-	-	-	-	-	2,9	-	-	-	-	3,6
3x1x300	-	-	2,6	-	2,7	3,1	-	3,5	3,6	3,5	3,9
3x1x400	-	-	-	-	2,9	3,5	-	-	-	3,9	4,2
3x1x500	-	-	3,3	-	3,3	3,9	-	4,2	4,4	4,4	4,7
3x1x630	-	-	-	-	3,7	4,4	-	-	-	4,8	5,2
3x1x800	-	-	4,1	4,1	4,1	4,8	-	5,3	5,4	5,3	5,9
3x1x1000	-	-	-	-	4,6	5,3	-	-	-	6,0	6,5
3x1x1200	-	-	-	-	5,0	5,7	-	-	-	6,4	7,0

Vikaresistanssin vaikutuksesta maasulkuvirta pienenee ja pienentynyt vikapai-
kan maasulkuvirta saadaan kaavasta:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} U \quad (19)$$

missä

C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
 R_f on vikaresistanssi
 U on verkon pääjännite

Kun maasulkuvirta on tiedossa suorassa maasulussa, niin voidaan myös yllä
oleva kaava esittää muodossa:

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1+\left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} \quad (20)$$

missä

I_e on maasulkuvirta
 R_f on vikaresistanssi
 U on verkon pääjännite

Edellä olevien kaavojen avulla laskettu virta on viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta vikapaikassa. Maasulussa olevan johdon syöttöpään vaihevirtojen summavirta ei kuitenkaan sisällä johdon omien maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta, joka näkyy kuviossa 7. Taustaverkon syöttämäksi maasulkuvirraksi eli kyseisen johtolähdön suojareleen havaitsemaksi vaihevirtojen summavirraksi saadaan siten:

$$\Sigma I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} I_{ef} \quad (21)$$

missä

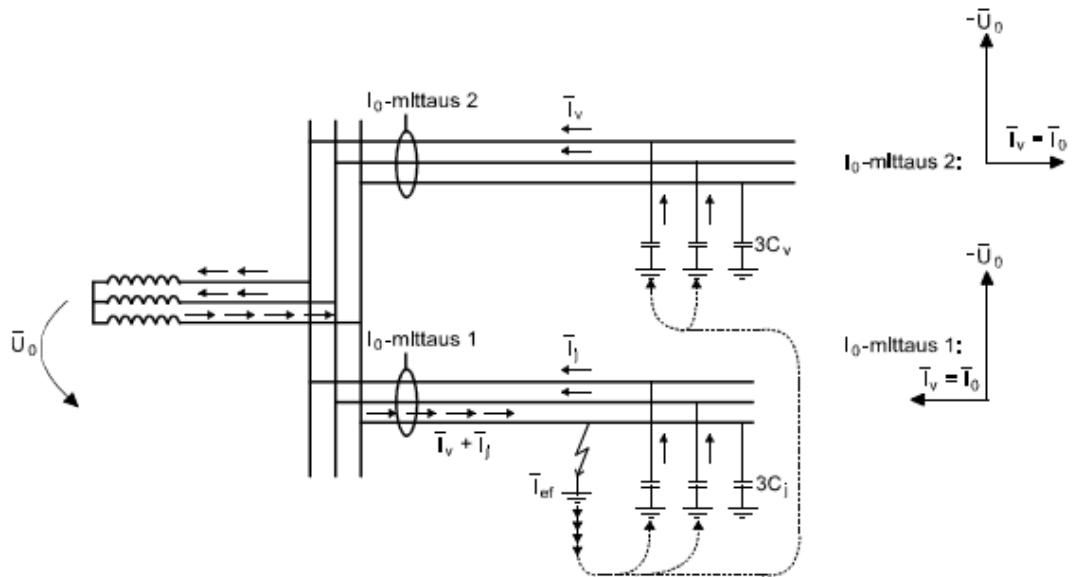
C_{0j}	on	suojattavan johdon yhden vaiheen maakapasitanssi
C_0	on	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

Mikäli jokaiselle johdolle on laskettu johdon itsensä syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa, voidaan taustaverkon syöttämä maasulkuvirta laskea kaavasta:

$$\Sigma I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_{ef} \quad (22)$$

missä

I_e	on	verkon kokonismaasulkuvirta suorassa maasulussa
I_{ej}	on	johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa
I_{ef}	on	vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.



Kuvio 7. Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa. Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin.

(ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 5)

Maasulkuvirta aiheuttaa jännite-epäsymmetrian, minkä vaikutuksesta myös verkon tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista. Tästä syntyvää jännitettä kutsutaan nollajännitteeksi. Tämä jännite on sama, jonka maasulkuvirta saa aikaan kulkiessaan maakapasitanssien kautta. Nollajännite voidaan laskea kaavalla:

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C_0} I_{ef} \quad (23)$$

missä

C_0	on	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
ω	on	kulmataajuus
I_{ef}	on	vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

Kaavojen (19) ja (20) avulla kaava (23) saadaan muotoon:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (24)$$

tai muotoon:

$$\frac{U_0}{U_V} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U}\right)^2}} \quad (25)$$

missä

I_e	on	tarkasteluhetkellä koko galvaanisesti yhteenkytetyin verkon maasulkuvirta suorassa maasulussa.
R_f	on	vikaresistanssi
U	on	verkon pääjännite
U_V	on	verkon vaihejännite

3.2.2 Maasulkuvirran laskeminen kompensoidussa verkossa

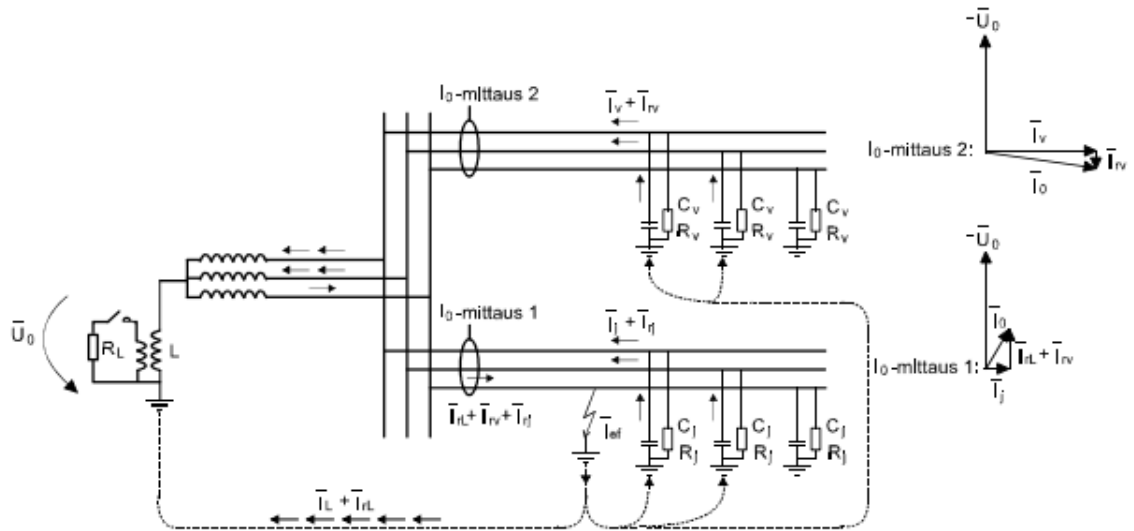
Kompensoidussa verkossa käytetään hyväksi verkon tähtipisteeseen kytkettyä kuristinta, jonka avulla kompensoidaan verkon kapasitiivista maasulkuvirtaa. Keski-jänniteverkoissa on vain harvoin muuntajan tähtipiste käytettävissä. Sen takia joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. Taloudellisin vaihtoehto jolla tämä voidaan toteuttaa on Z-kytkentäinen maadoitusmuuntaja, jonka avulla tähtipisteeseen liitetään kompensointikuristin. Kompensoidussa verkossa kompensointiastetta kuvataan K-kirjaimella. Jos K:n arvo on yksi tai lähellä sitä, niin verkko on täysin kompensoitu eli sammutettu. K:n ollessa suurempi kuin yksi verkko on ylikompensoitu ja vastaavasti K:n ollessa pienempi kuin yksi on verkko alikompensoitu. Kompensointiaste saadaan laskettua kaavalla:

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (26)$$

missä

I_L	on	kuristimen virta suorassa maasulussa
I_C	on	Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa.

Verkossa, joka on täysin kompensoitu, vikapaikan läpi kulkee vain jäännösvirta, joka muodostuu kuristimen ja verkon häviöistä sekä mahdollisen kuristimen toisiovastuksen aiheuttamasta pätövirrasta sekä yliaalloista, jotka näkyvät kuvioista 8.



Kuvio 8. Maasulkuvirran muodostuminen sammutetussa eli täysin kompensoidussa verkossa. Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 8.)

Vikavirran laskeminen onnistuu kaavalla:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_0)^2 R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

missä

I_{ef}	on	vikavirta
ωL	on	kompensointikuristimen reaktanssi
R_0	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi.
R_f	on	vikaresistanssi
U	on	verkon pääjännite

Täysin kompensoidussa verkossa kaava sievenee muotoon:

$$I_{ef} = \frac{1}{R_0 + R_f} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

missä

ωL	on	kompensointikuristimen reaktanssi
R_0	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi.
R_f	on	vikaresistanssi
U	on	verkon pääjännite

Nollajännite koostuu verkon maakapasitanssien sekä maasulkuvirran, kuristimen häviöresistanssien ja induktanssin rinnankytkennän muodostamasta impedanssien tulosta. Nollajännite saadaan laskettua kaavalla:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 + \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} I_{ef} \quad (29)$$

missä

R_0	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi.
C_0	on	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
ω	on	kulmataajuus
ωL	on	kompensointikuristimen reaktanssi
I_{ef}	on	vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

Täysin kompensoidussa verkossa nollajännitteen kaava sievenee muotoon:

$$\frac{U_0}{U_V} = \frac{R_0}{R_0 + R_f} \quad (30)$$

missä

R_0	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen reducedoitu kokonaisresistanssi
R_f	on	vikaresistanssi

Lähtöjen suojausten toimintaa tarkasteltaessa on usein tarpeellinen määrittää vaihevirtojen summavirran sisältämä pätökomponentti. Vikapaikan virran pätökomponentin suuruus saadaan laskettua likimääräisesti kaavalla:

$$I_{efp} = \frac{1}{(R_f + R_0)^2 + R_f^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

missä

R_0	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen reducedoitu kokonaisresistanssi.
R_f	on	vikaresistanssi
C_0	on	verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
ω	on	kulmataajuus
ωL	on	kompensointikuristimen reaktanssi
U	on	verkon pääjännite

Edellä mainituilla kaavoilla saadaan laskettua vikapaikassa viallisesta vaiheesta maahan kulkeva virta. Johtolähdössä vaihevirtojen summavirran suuruuteen ja vaihekulmaan vaikuttaa lisäksi myös johdon omien vuotohäviöresistanssien ja maakapasitanssien kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta. Vaihevirtojen summavirran suuruus saadaan laskettua kaavasta 32 sekä vaihekulma negatiivisena otettuun nollajännitteeseen nähden kaavalla 33. Kaavat 32 ja 33 ovat erityisesti hyödyllisiä osittain kompensoidun verkon tapauksessa.

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{((1-K)I_e - I_{ej})^2 + (I_r - I_{rj})^2}}{\sqrt{((1-K)I_e)^2 + I_r^2}} I_{ef} \quad (32)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{(1-K)I_e - I_{ej}}{I_r - I_{rj}}\right) \quad (33)$$

missä

I_e	on	verkon kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa.
I_{ej}	on	johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa.
K	on	kompensointiaste
I_r	on	kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa.
I_{rj}	on	lähdön häviöiden aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa.
I_{ef}	on	vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

(ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a, 1-9.)

4 PIENJÄNNITEVERKKO

Pienjänniteverkon jännitetaso on Suomessa 400V, joka on kahden vaiheen välinen jännite. Tutumpi jännite sähkökäyttäjälle on 230V, joka on vaiheen ja maan välinen jännite. Suurimmalle osalle sähkökäyttäjistä pienjänniteliityntä on sopivin liityntämuoto sähkölaitteiden käyttöjännitteen osalta. Pienjänniteverkossa maadoitettu järjestelmä on yleisesti käytössä, kun taas keskijänniteverkko on yleensä maasta erotettu tai sammutettu. Yhtäläisyyksiäkin on helppo löytää keskijännite- sekä pienjänniteverkon väliltä. Kumpaakin verkkoa käytetään tavallisesti säteittäisinä. Siten verkoissa on tavallisesti yksi syöttöpiste. Keskijänniteverkossa tämä yleensä on 110/20kV:n sähköasema ja pienjänniteverkossa 20/0.4kV:n jakelumuuntamo. Keskijänniteverkossa kuormitukset ovat jakelumuuntamoita tai keskijännitteelle suunniteltuja kulutuslaitteita ja pienjänniteverkossa pienjännitekulutuskojeita. Yhtäläisyyksiä on helppo löytää lisää. Verkkojen yhtäläisyydet johtavat samankaltaisuuksiin esimerkiksi mitoitus- ja suojaamisperiaatteissakin. (Lakervi & Partanen 2009, 125.)

4.1 Sulakesuojaus

Pienjänniteverkossa kahvasulakkeita käytetään suojaukseen niiden, turvallisuuden, selektiivisyyden, edullisuuden sekä hyvän virranrajoituskyvyn vuoksi. Kahvasulakkeen pääosina toimii runkolieriö, sulakehiekkä ja toimivana osana sulakeliuskä tai lanka, jonka rakenteen ja mitoituksen avulla voidaan säädellä sulakkeen toimintaominaisuuksia. Sulakehiekän tehtävänä on sitoa valokaaresta syntyvä energia. Taulukosta 3 selviää kahvasulakkeiden raja-ajat sekä virta-arvot ja kuviosta 9 toiminta-ajat. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 15.)

4.1.1 Kahvasulakkeiden toiminta-aika

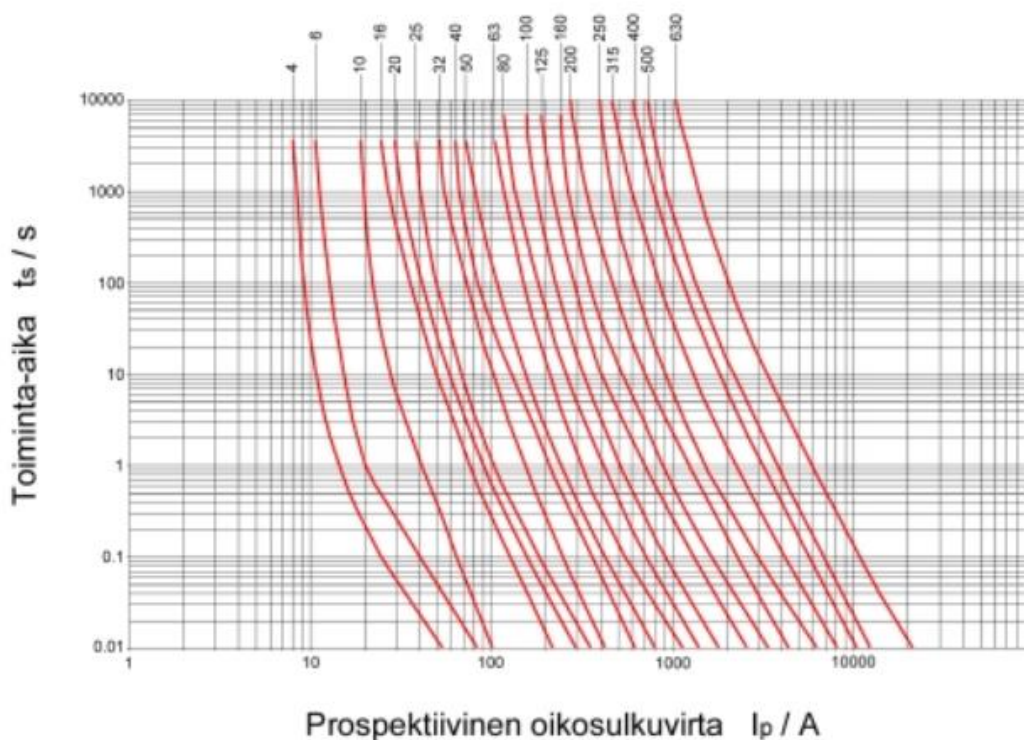
Kahvasulakkeilla on erittäin hyvä oikosulkuvirran rajoituskyky sekä hyvät katkaisuominaisuudet. Niitä käytetään erityisesti silloin, kun kuormitusvirrat ovat suuria tai asennuspaikalla on suuret oikosulkuvirrat. Kahvasulakkeen toimintaan vaikuttaa sekä virran kesto-aika että ylivirran suuruus. (Ensto 2009a, 1.)

Taulukko 3. Kahvasulakkeiden raja-ajat sekä virrat. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 16)

Sulake I_n/A	I_{nf}	I_f	t/h
$I_n \leq 4$	$1,5 \times I_n$	$2,1 \times I_n$	1
$4 < I_n < 16$	$1,5 \times I_n$	$1,9 \times I_n$	1
$16 \leq I_n \leq 63$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	1
$63 < I_n \leq 160$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	2
$160 < I_n \leq 400$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	3
$400 < I_n$	$1,25 \times I_n$	$1,6 \times I_n$	4

missä

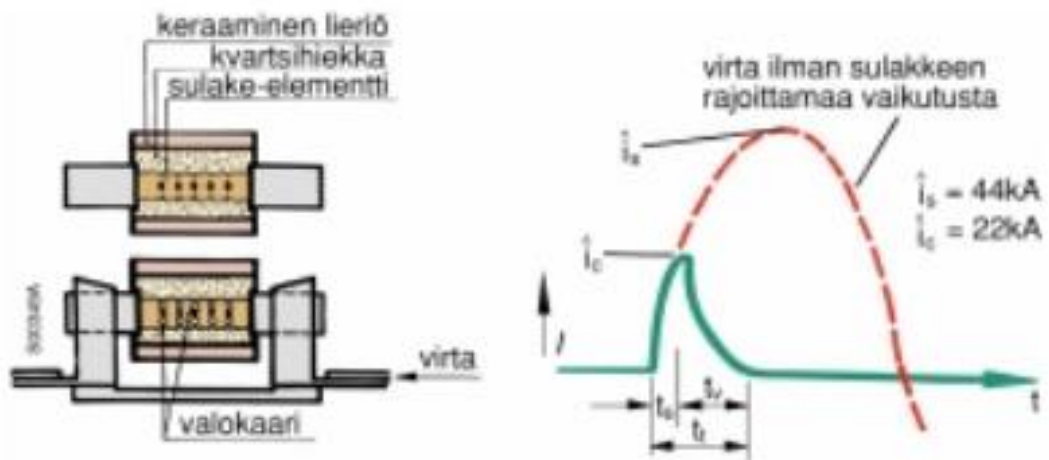
I_n on sulakkeen nimellisvirta
 I_{nf} on kestorajavirta; sulake ei saa toimia ajassa t
 I_f on sulamisrajavirta; sulakkeen tulee toimia ajassa t



Kuvio 9. OFAA- kahvasulakkeiden toiminta-ajat (gG). (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 16)

4.1.2 Kahvasulakkeen virranrajoitus

Sulakkeen virranrajoitusominaisuuksilla tarkoitetaan sulakkeiden kykyä rajoittaa oikosulkuvirran kasvua, joka esiintyy katkaisutilanteessa ennen oikosulun poistamista. Sulakkeilla oleva erinomainen virranrajoituskyky perustuu sulakkeen sisällä syntyvään valokaariresistanssin nopeaan kasvuun. Kahvasulakkeen toiminta ja rakenne oikosulussa näkyy kuviossa 10. Virranrajoituskäyristä voidaan lukea suurin virtahuippu, jonka sulake päästää läpi tietyllä prospektiivisen virran arvolla. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 18.)



Kuvio 10. Kahvasulakkeen toiminta ja rakenne oikosulussa. Prospektiivisen virran virtahuippu näkyy punakatkoviivan korkeimmassa kohdassa. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 18.)

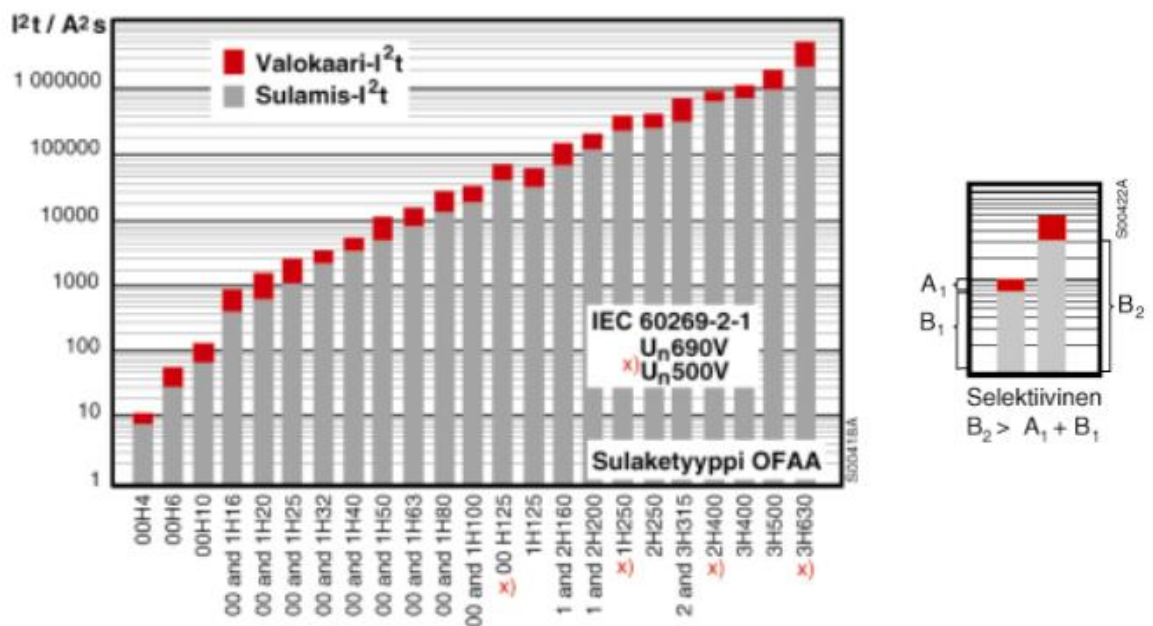
missä

I_p	on	prospektiivinen oikosulkuvirta (r.m.s)
\hat{i}_s	on	oikosulkuvirran huippuarvo
\hat{i}_c	on	sulakkeen rajoittaman virran huippuarvo
t_s	on	sulakeliuskan sulamisaika
t_v	on	valokaariaika
t_t	on	kokonaistoiminta-aika

4.1.3 Selektiivisyys

Selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että vikapaikkaa lähin suojalaite toimii ensimmäisenä. Selektiivisyyttä on kahdenlaista: on aikaselektiivisyyttä, jossa kuorman puoleinen suojalaite toimii kaikilla ylivirroilla nopeammin kuin syötön puoleinen

suoja-laite. Sekä virtaselektiivisyyttä, jossa syötön puoleisen suojalaitteen sulamisaikaa vastaava I^2t -arvon tulee olla suurempi kuin kuorman puoleisen suojalaitteen kokonaistoiminta-aikaa vastaavan I^2t -arvon. Kahvasulakkeiden I^2t arvot ja selektiivisyys näkyvät hyvin kuviossa 11. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ryhmitellään esimerkiksi muuntoasemalta lähtevien kaapelien sulakkeet järjestyksessä, että ensimmäisenä vian sattuessa sulakkeet eivät pala muuntoasemalta vaan läheltä vikapaikkaa. Tässä tilanteessa turvaututaan virtaselektiivisyyteen. (Ensto 2009b, 1-2.)



Kuvio 11. OFAA - Kahvasulakkeiden I^2t arvot (gG) ja selektiivisyys. (ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b, 20)

4.2 Nollavika

Nollaviaksi kutsutaan tilannetta, jossa sähköjärjestelmässä nollajohdin katkeaa. Tämä voi tapahtua sähköverkkoyhtiön vastuulla olevassa muuntajan ja kiinteistön välisessä pienjännitejohdossa tai kiinteistön omissa sähköasennuksissa.

Nollavikaa tulee aina suhtautua vakavasti, sillä se on pienjänniteverkon vaarallisin vika, sillä se voi rikkoa sähkölaitteita ja aiheuttaa jopa hengenvaaran. Tyypillisin nollavian aiheuttaja sähköverkossa syntyy niin, että puu kaatuu pylväissä kulkevan riippukierrehjon (AMKA) päälle ja katkaisee siinä kannatinlankana

toimivan eristämättömän johtimen, mikä toimii myös nollajohtona. Nollavika voi syntyä myös kaapeliverkossa esim. johdon liittimen huonon kontaktin vuoksi tai esimerkiksi maakaapelissa veden päästessä kaapelin sisälle voi tapahtua nollan syöpyminen, missä nollajohtimena toimii konsentrinen kupari (MCMK), joka kiertää vaiheita paljaana kupariviuhkana päällysvaipan alla.

Nollavian seurauksena eri vaiheiden jännitteet voivat heitellä ja olla epätavallisia. Yhdessä tai kahdessa vaiheessa voi olla ylijännite ja vastaavasti muissa alijännite. Nollavikatilanteessa jännite voi vaihdella 0-400V:n välillä ja tästä syystä varsinkin elektroniikkaa sisältävät sähkölaitteet ovat vaarassa vaurioitua. Nollavika voi lisäksi aiheuttaa vakavan sähköiskun vaaran. (Vantaan Energia Sähköverkot Oy. 2019.)

4.3 Oikosulku

Oikosululla tarkoitetaan kahden tai useamman piirissä olevan, tavallisesti erijännitteisen pisteen välistä suoraa tai pieni-impedanssista yhteyttä. Oikosulku on yksivaiheinen, silloin kun eristysvika syntyy yhden vaihejohtimen ja nollajohtimen tai nollajohtimeen yhdistetyn suojajohtimen tai metalliosan välillä. Kaksi- tai kolmivaiheinen oikosulku on silloin, kun eristysvika sattuu kahden tai kolmen vaihejohtimen välillä. Oikosulkuvirta syntyy verkkoon oikosulun seurauksena, mikä on yleensä vähintään kertaluokkaa suurempi kuin normaali kuormitusvirta. Viikaantunut verkon osa erotetaan yleensä muusta verkosta nopeasti, jotta henkilöturvallisuus ei vaarannu, eivätkä verkon komponentit rikkoonnu vikavirran aiheuttaman kuormituksen takia. (Sähköverkon automaatio ja suojaus 1998c, 6.)

5 VIANPAIKANNUSMENETELMÄT

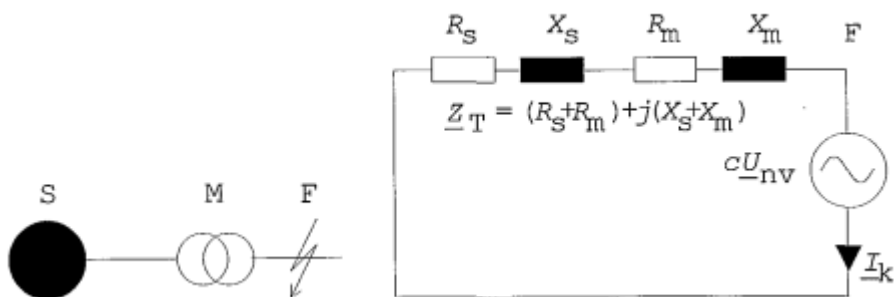
Johtoverkon viat muodostavat ylivoimaisesti suurimman osan sähköverkon vioista. Vaikka suurin osa vioista on ohimeneviä, on pysyvien vikojen mahdollisimman nopea paikantaminen ja korjaaminen erityisen tärkeää sähkönlaidun kannalta. Vikojen ennaltaehkäisyllä voidaan vähentää relesuojauksen toimintaa ja parantaa sähkön laatua. Nopea vian paikantaminen ja korjaaminen myös lyhentää sähkökatkoksen kestoa. (Mörsky 1993, 399.)

5.1 Vianpaikannus laskemalla

Eristysvian tai ulkoisen kosketuksen takia jakeluverkon virtapiiri voi sulkeutua suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Oikosulku voi sattua kahden tai kolmen vaihejohtimen välille. Releet toimivat mittaavana elimenä, jotka ilmoittavat vikavirran suuruuden. Laskemalla päästään noin 10% tarkkuudella vikavirtaa vastaavan oikosulkupaikan sijaintiin.

5.1.1 Oikosulkuvirran laskeminen

Oikosulkuvirran laskemista varten tarvitaan vikapaikan jännite ja siitä näkyvä verkon impedanssi (Theveninin menetelmä). Vian synnyttyä, sen ensimmäisiin jaksoihin vaikuttaa jännitteen hetkellisarvo sekä pyörievien koneiden aluksi pieni impedanssi. Pian virta muuttuu nolla-arvonsa suhteen symmetriseksi ja alenee muutostilan kautta jatkuvan tilan arvoonsa. (Lakervi & Partanen 2009, 28.)



Kuvio 12. Thevenin menetelmän periaatekuva oikosulkulaskennassa. (Huotari & Partanen 1998, 8)

Kuviossa 12 esiintyvää sijaiskytkentää voidaan käyttää vain kolmivaiheisen oikosulun tapauksessa. Symmetrinen eli kolmivaiheinen oikosulku on oikosulkulas-
kujen perustapaus, koska tällöin esiintyy vain myötäimpedansseja eli kolmivaihe-
verkon komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. Epäsymmetrisiä oiko-
sulku tapauksia laskettaessa sen sijaan joudutaan verkon eri osille muodosta-
maan myös niiden vasta- ja nollaimpedanssit. Tilannetta vastaavan sijaiskytken-
nän (kuvio 12) perusteella voidaan oikosulkuvirta laskea seuraavalla kaavalla:

$$I_k = \left(\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \right) = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (17)$$

missä

c	on	taulukon 1 mukainen kerroin
U_n	on	vikapaikan nimellispääjännite
Z_k	on	impedanssi vikapaikasta katsottuna

Thevenin impedanssia Z_k laskettaessa kaikki vikavirtaa syöttävät lähteet sekä verkon muut komponentit korvataan oikosulkuimpedansseilla.

(Huotari & Partanen.1998, 8-9.)

Sähköverkon oikosulkuvirtoja laskettaessa Thevenin menetelmällä täytyy oiko-
sulkupiirin eri komponentit kuvata riittävän tarkkoilla matemaattisilla malleilla. Oi-
kosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja ovat tahtikoneet, epätahtimoottorit ja syöt-
tävä verkko. Oikosulkuvirtaa taas rajoittavat piirin komponenttien impedanssit,
joita ovat kuristimet, muuntajat, kiskot, johdot ja kaapelit. Näistä tärkeimpinä ovat
muuntajat ja kuristimet. Oikosulkuimpedanssit taas muodostuvat edellämainittu-
jen komponenttien ja lähteiden reaktanssien ja resistanssien summasta. Resis-
tansseja käsitellään reaalityyppisillä ja reaktansseja imaginaarityyppisillä, joka ilmoite-
taan sähkötekniikassa kirjaimella j ja matematiikassa kirjaimella i. Symmetrisessä
viassa vaikuttavat impedanssit muodostuvat syöttävästä verkosta, muuntajista ja
kaapeleista. (Huotari & Partanen 1998, 21.)

Syöttävästä verkosta tunnetaan yleensä oikosulkuteho tai kolmivaiheinen oikosulkuvirta, joiden avulla saadaan laskettua impedanssi kaavalla:

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} * I_{kv}''} \quad (34)$$

missä

c	on	taulukon 1. mukainen kerroin
U_n	on	syöttävän verkon nimellispääjännite
S_k''	on	syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho
I_{kv}''	on	syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

Pienjänniteverkkojen oikosulkuvirtoja laskettaessa syöttävän verkon pienjännitepuolelle redusoitu reaktanssi voidaan laskea kaavalla:

$$X_k = \frac{1,1U_n^2}{S_k} \quad (35)$$

ja resistanssi kaavalla:

$$R_k = 0,1X_k \quad (36)$$

missä

U_n	on	pienjännitepuolen nimellispääjännite
S_k	on	syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho
X_k	on	syöttävän verkon reaktanssi
R_k	on	syöttävän verkon resistanssi

Mikäli oikosulku tapahtuu lähellä muuntajaa, voidaan syöttävä verkko jättää huomioimatta pienjänniteverkon oikosulkuvirtaa laskettaessa, jos syöttävän verkon näennäisen alkuoikosulkutehon S_k ja muuntajan nimellistehon S_n välillä toteutuu epäyhtälö $S_k > 400S_n$. (Huotari & Partanen.1998, 15-16.)

Jos verkko sisältää useita eri jänniteportaita, täytyy niiden impedanssit redusoida tarkasteltavaan jännitetasoon, jotta tulokset pysyvät todenmukaisina. Impedanssien redusointi onnistuu kaavalla 11. (Elovaara & Haarla 2011a, 135.)

5.1.2 Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

Sähköverkkoa eniten rasittava symmetrinen vika, jossa syntyy galvaaninen kosketus kolmen vaihejohtimen välillä. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla:

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_s + R_m + R_j)^2 + (X_s + X_m + X_j)^2}} \quad (37)$$

missä

R_s ja X_s	ovat	syöttävän verkon resistanssi ja reaktanssi
R_m ja X_m	ovat	muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi
R_j ja X_j	ovat	vikapaikkaan johtavien johtojen resistanssi ja reaktanssi

5.1.3 Kaksivaiheinen oikosulkuvirta

Kaksivaiheisessa oikosulussa kolmivaihejärjestelmässä kaksi vaihetta kytkeytyy yhteen. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on epäsymmetrinen vika, joten sitä määriteltäessä täytyy ottaa huomioon myötäverkon impedanssin lisäksi myös vastaverkon impedanssi. Verkoissa, joissa ei sijaitse pyöriviä koneita lähellä, myötäverkon impedanssi on yhtä suuri kuin vastaverkon impedanssi, jolloin impedanssi on kaksinkertainen. Täten 2-vaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kolmivaiheisen oikosulkuvirran I_{k3} avulla kaavalla:

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} \quad (38)$$

(Eironen M.2015, 50.)

5.1.4 Yksivaiheinen oikosulkuvirta

Yksivaiheinen oikosulku tarkoittaa vaihejohtimen yhteyttä nollajohtimeen tai maahan ja on mahdollinen vain pienjänniteverkoissa, joissa muuntajan tähtipiste on maadoitettu. Muissa verkoissa kyseessä on 1-vaiheinen maasulku. Vikatilanteissa verkon kahden muun jännite kasvaa ja verkko joutuu epäsymmetriseen tilaan. Yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla:

$$I_{k1} = \frac{3 \cdot c U_v}{\sqrt{\left(2R_m + R_{m0} + 3l(R_j + R_0)\right)^2 + \left(2X_m + X_{m0} + l(2X_j + X_{j0} + 3X_0)\right)^2}} \quad (39)$$

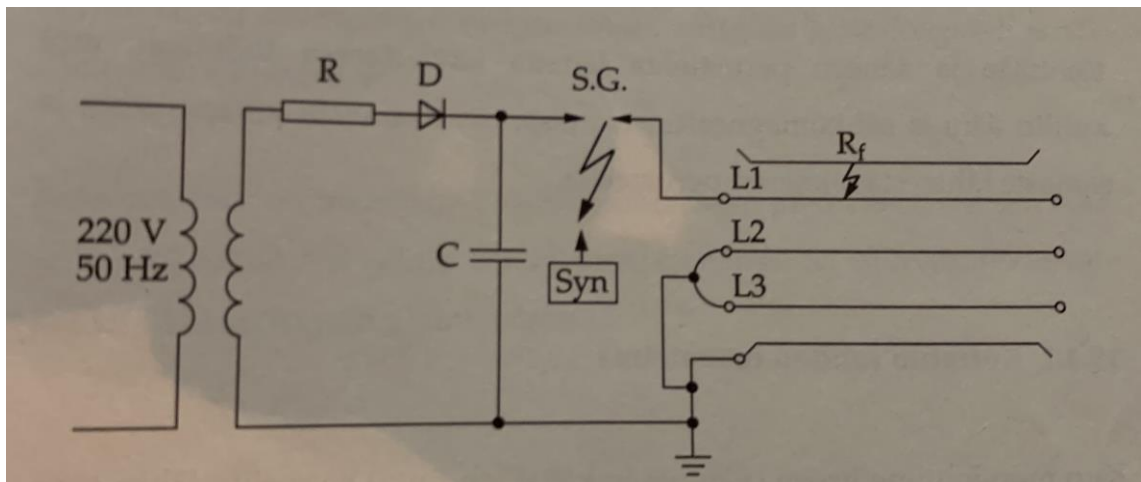
missä

U_v	on	vaihejännite
c	on	jännitekerroin
l	on	pituus
R_m ja X_m	ovat	muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi
R_{m0} ja X_{m0}	ovat	muuntajan nollaresistanssi ja – reaktanssi
R_j ja X_j	ovat	vaihejohtimen resistanssi ja reaktanssi
X_{j0}	on	vaihejohtimen nollareaktanssi
R_0 ja X_0	ovat	nollajohtimen resistanssi ja reaktanssi

(Eironen 2015, 50.)

5.2 Vianpaikannus syöksyaaltogeneraattorilla

Syöksyjännitemenetelmä on kaikista käytetyin menetelmä vikojen tarkkaan paikannukseen. Syöksyjännitemenetelmä perustuu nimensä mukaisesti syöksyaallon lähettämiseen kaapeliin. Syöksyjännitemenetelmän periaate on esitetty kuviossa 13. (Mörsky 1993, 413.)



Kuvio 13. Syöksyjännitemenetelmän periaate ja kytkentä. C on varauskondensaattori, R on vaimennusvastus, D on diodi, S.G on ohjattu kipinäväli ja R_f on vikaresistanssi. (Mörsky 1993, 413)

Syöksyjännitemenetelmässä varataan tasajännitelähteellä kondensaattorit, joiden energia puretaan kipinävälin (S.G.) kautta johdolle, jolloin vikapaikasta kuu-

luu läpilyönnin pamahdus. Kuvassa 7 näkyy HDW Salzgitterin syöksyaalto-generaattori missä jännitteensäätö onnistuu 6kV:sta 24kV:iin. Tämä ääni voidaan paikallistaa maamikrofonin ja kuulokkeiden avulla. Meggerin maamikrofoni ja kuuntelulaite näkyy kuvassa 8. Tällä menetelmällä voidaan paikallistaa kaikki viat galvaanista (vikaresistanssitonta) oikosulkua lukuunottamatta. Koska tämä menetelmä on ääneen perustuva, niin ympäristön melu useasti haittaa vian paikannusta. (Mörsky 1993, 413.)



Kuva 7. HDW Salzgitterin tekemä syöksyaalto-generaattori, joka on Kemin Energialla ja Vedellä käytössä.



Kuva 8. Meggerin maamikrofoni ja kuuntelulaite, jotka ovat käytössä Kemin Energiassa ja Vedellä

5.3 TDR-tutka

Kaapelitutkan käyttö erilaisten kaapelivikojen etsinnöissä on yleistynyt. Tottuneelle käyttäjälle kaapelitutka antaa luotettavan mittaustuloksen vikapaikan sijainnista ja vian laadusta. Tutkan toiminta perustuu siihen, että tutkittavaan johtimeen lähetetään jatkuvasti toistuvia jännitepulsseja. Pulssin kohdatessa vikapaikan tai kaapelinpäähän heijastuu osa pulssin energiasta takaisin mittauspäähän. Heijastuneen pulssin kulkuajasta, joka voidaan määrittellä kuvaputkelta, ja aallon etenemisnopeuden $V/2$ (kaapelityypistä johtuva arvo) perusteella voidaan heijastuspaikka eli vikapaikka määrittää. (Monni 2015, 122.)

Kaapelitutkalla pystytään paikallistamaan vikapaikka tarkasti, jos seuraavat kohdat ovat samanaikaisesti voimassa. Vikavastus on pienempi kuin $2\text{ k}\Omega$ ja kaapelin pituus tiedetään tarkasti tai $V/2$ -arvo tiedetään lähes yhtä tarkasti ja kaapeli ei ole pitkä. Kaapelitutkan käyttäminen vikojen paikallistamiseen vaatii koulutusta ja kokemusta laitteen käyttäjältä. Meggerin TDR:tutka löytyy kuvasta 9. (Monni 2015, 122.)

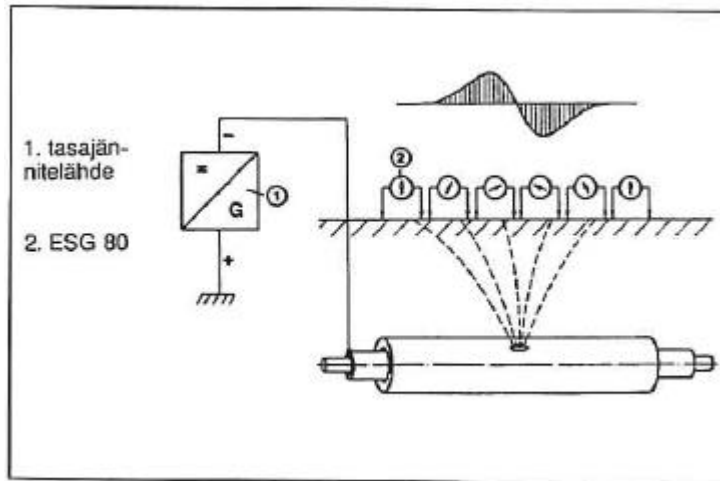


Kuva 9. Meggerin TDR-tutka 2000/3, joka on käytössä Kemin Energialla ja Vedellä.

5.4 Askeljännite

Usein kaapeleilla, joissa on alumiininen suojavaippa ja sen päällä PE tai PVC suojavaippa sattuu usein, että ulommainen vaippa vaurioituu ja vesi pääsee sisään syövyttämään alumiinista vaippaa. Tämän vaippavian paikallistaminen on mahdollista seuraavalla menetelmällä:

Kun jännite kytketään eristettyvaippaisen kaapelin maan ja vaipan väliin, syntyy sähköinen voimaviivakenttä kohtaan, jossa uloin suojavaippa on vioittunut. Tämä kohta voidaan paikallistaa maapuikkojen avulla. Eristysvika sijaitsee tarkasti voimaviivakentän keskellä. Jännitettä kytketään jaksottaisesti, ettei se kuivattaisi kaapelivikaa. Kuviossa 14 näkyy vaippavian paikantamisen toimintaperiaatekuva ja kuvassa 10 näkyy kun vaippavian etsintähaarukka on käytössä maastossa. (Monni 2015, 123.)



Kuvio 14. Vaippavian paikantamisen kaaviokuva. (Monni 2015, 123)



Kuva 10. Vaippavian etsintähaarukka käytössä. (Monni 2015, 119)

5.5 Vianilmaisimet

Vianilmaisimet nimensä mukaisesti pyrkivät ilmaisemaan vikaa. Ne ovat suojarkeitä muistuttavia prosessoripohjaisia laitteita, joita käytetään keskijänniteverkon kauko-ohjatuilla muuntoasemilla kuten avojohtoverkon erotinasemilla, kaapeliverkon RMU-asemilla ja jakelumuuntamoilla. Niiden ensisijaisena tehtävä on helpottaa vianpaikannusta siirtämällä ja tallentamalla valvomoon johtolähtöjen vikavirta ja jännitearvoja. Vianpaikallistaminen täten tarkentuu, kun saadaan tietoa muualtakin kuin pelkästään suojarkeiden johtolähtökohtaisista mittauksista.

Myös erottimien ohjaus saadaan toimimaan vianilmaisimen kanssa, jos halutaan. Tehostunut vianpaikannus ja erottimien kauko-ohjausmahdollisuus lyhentävät sähkönjakeluverkon keskeytysaikoja. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07b, 1.)

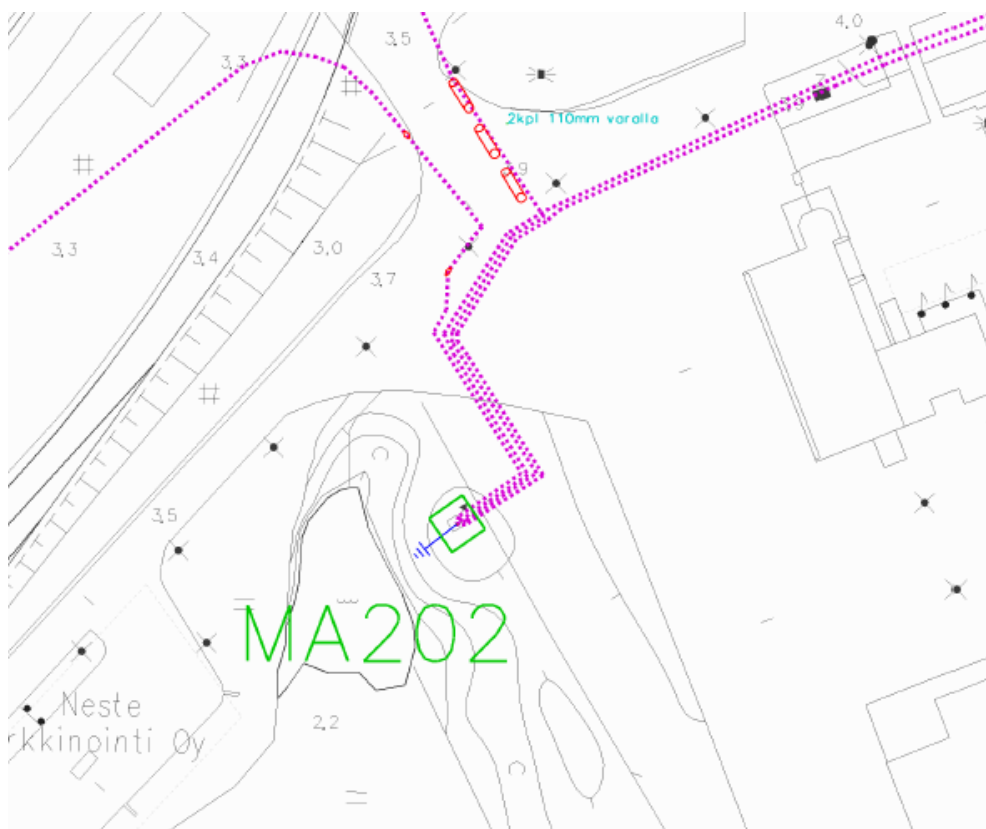
Vianilmaisimien asettelu ja toiminta tapahtuu samalla tavalla kuin suojareleillä. Erona näillä kahdella on se, ettei vianilmaisimien anna itsenäisesti laukaisua kytkinlaitteelle vaan vasta saatuaan valvomosta ohjauskäskyn. Kun mitattava suure ylittää asetteluarvon ilmaisimien ainoastaan tallentaa ja siirtää mittausarvot eteenpäin. Vianilmaisimet mittaavat ensiösuureita kauko-ohjattuihin erottimiin integroitujen antureiden avulla. Toimimiseen tarvitsemansa tehon vianilmaisimet saavat pienjänniteverkosta tai aseman omakäyttömuuntajalta. Sähkökatkon sattuessa apusähkön saanti varmistetaan akuilla. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-07b, 1.)

6 VIKATAPAUKSIA

Tässä kappaleessa käsitellään työelämässä kohdalleni sattuneita vikatapauksia. Nämä kaikki tämän kappaleen vikatapaukset on saatu selvitettyä ja korjattua tässä työssä mainituilla menetelmillä.

6.1 Vian paikantaminen Ajoksessa MA202:lla

Kemin keskijänniteverkossa sattui oikosulku elokuussa 2018, joka aiheutti Syväkankaan kytkinaseman Ajoksen muuntoaseman MA202:sen johtolähdön aukeamisen. Tämän seurauksena koko tämä väli ja siitä haarautuvat muut lähdöt olivat kylmänä hetken ajan toimimattoman maadoituserottimen takia. Oikosulkuvirta vikatapauksen aikana oli noin 3,4 kA MA202:lla jokaisella vaiheella reletietojen mukaan. Käsin laskettu oikosulkuvirta lasketaan käyttämällä tässä opinnäytetyössä läpikäytyjä paikannusmenetelmiä ja laskukaavoja. Kuvassa 11 näky Ajoksessa sijaitseva muuntoasema 202



Kuva 11. Trimble NIS:n verkkokartasta otettu 2019.

6.1.1 Taustaverkon impedanssi

Kemin Energian ja Veden verkkotietojärjestelmästä löytyy vuonna 2016 Fingrid Oyj:ltä saadut taustaverkon maksimioikosulkuvirrat ja impedanssit Syväkankaan sähköasemalle. Taulukossa 4 näkyy impedanssiarvot 110kV:lle ja redusoidut arvot 20kV:lle. Arvoja löytyi verkkotietojärjestelmästä useita keskijänniteverkon oikosulun tyyppin mukaisesti, mutta tähän laskentaan valitsin maksimitilanteen mukaiset arvot. Koska oikosulku tapahtuu 20kV:n jänniteportaassa pitää redusoida kaikki arvot tähän jänniteportaaseen. Redusointi onnistuu kaavaa 9 hyväksi käyttämällä:

$$Z'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (11)$$

$$Z'_{sv} = \left(\frac{20,5kV}{110kV}\right)^2 * (1,0 + j5,0) = (0,0347 + j0,173)$$

missä

Z'_{sv} on halutun jänniteportaassa redusoitu impedanssi

Taulukko 4. Syväkankaan sähköaseman taustaverkon impedanssit.

Taustaverkko	110kV jänniteporras	Redusoitu 20,5kV jänniteportaalle
Z_k''	$(1,0+j5,0)\Omega$	$(0,0347+j0,173)\Omega$

6.1.2 Päämuuntajan impedanssi

Syväkankaan sähköasemalta keskijänniteverkkoa syöttää kaksi päämuuntajaa SPM1 ja SPM2. Päämuuntaja 2 syöttää Ajoksessa olevaa muuntoasemaa 202:sta, jossa oikosulku tapahtui. Ensimmäisenä selvitetään muuntajan kilpitiedoista oikosulkuimpedanssi Z ja resistanssi R muuntajalle, jotta voimme laskea myös muuntajan reaktanssin X . Taulukossa 5 näkyy Syväkankaan sähköaseman päämuuntaja 2:sen tarvittavat kilpitiedot laskuja varten.

Taulukko 5. Syväkankaan sähköaseman päämuuntaja 2:sen tarvittavat kilpitiedot.

SKG PM2	Kilpitiedot
Zk	9.8%
Rk	0.44%
SN	25MVA

Seuraavaksi lasketaan päämuuntajan SPM2:sen resistanssi (R_m) ja impedanssi (Z_m) 20.5kV:n jänniteportaalle käyttäen keskioikosulkuimpedanssi ja -resistanssin arvoja kaavoja 40 ja 41 käyttäen. Näiden jälkeen saadaan laskettua reaktanssi kaavalla 42

$$Z_m = \frac{9,80}{100} * \frac{20,5kV^2}{25MVA} = 1,64738\Omega$$

$$R_m = \frac{0,44}{100} * \frac{20,5kV^2}{25MVA} = 0,7396\Omega$$

$$X_m = \sqrt{1,64738^2 - 0,7396^2} = 1,6457\Omega$$

missä

Z_m	on	Syväkankaan päämuuntaja 2:sen impedanssi
R_m	on	Syväkankaan päämuuntaja 2:sen resistanssi
X_m	on	Syväkankaan päämuuntaja 2:sen reaktanssi

Ylhäällä näkyvillä kaavoilla muuntajan arvot on suoraan saatu redusoitua 20,5kV:n tasolle joten näitä ei enää tarvitse enää redusoida kun oikosulku tapahtui tällä jänniteportaalla.

6.1.3 Kaapelin impedanssi

Syväkankaan sähköaseman ja Ajoksen MA202:sen välinen kaapeli on AHXAMK-W 3x185:sta, jonka pituus on 10km (tarkka pituus, jota laskuissa on käytetty on 9,313km). Kaapelin arvot on saatu valmistajan sivuilta ja laskut suoritetaan kaapelinvalmistajan +40°C asteen arvoilla. Taulukossa 6 näkyy impedanssi arvot syväkankaan sähköaseman sekä ajoksen MA202:sen väliselle kaapelille.

Taulukko 6. Kaapelin resistanssi 40°C:ssa ja reaktanssit /km

Kaapeli	Vaiheresistanssi R_v Ω/km lämpötilassa +40°C	Vaihereaktanssi X_v Ω/km
AHXAMK 3x185	0,183	0,119

Syväkankaan sähköaseman ja MA202:sen välisen kaapelin resistanssi ja reaktanssi saadaan laskettua kaavoilla 43 ja 44:

$$R = 9,313 * 0,183 = 1,704\Omega$$

$$X = 9,313 * 0,119 = 1,1082\Omega$$

6.1.4 Vikapaikan impedanssi ja oikosulkuvirta

Kun kaikki arvot on saatu laskettua ja kaikki arvot on redusoitu samaan jänniteportaaseen (20.5kV) niin voidaan laskea vikapaikan impedanssi summaamalla kaikki resistanssit ja reaktanssit keskenään yhteen ja pythagoran lauseella muuttamaan ne impedanssiksi.

$$R_{tot} = 0,0347 + 0,073964 + 1,704 = 1,81266\Omega$$

$$X_{tot} = 0,173 + 1,6457 + 1,1082 = 2,9269\Omega$$

$$Z_{tot} = \sqrt{1,81266^2 + 2,9269^2} = 3,4427\Omega$$

missä

R_{tot}	on	laskettu kokonaisresistanssi
X_{tot}	on	laskettu kokonaisreaktanssi
Z_{tot}	on	laskettu kokonaisimpedanssi

Vikapaikan kokonaisimpedanssin laskemisen jälkeen seuraavaksi lasketaan vikapaikan oikosulkuvirta. Oikosulkuvirta saadaan kaavalla 48:

$$I_k = \frac{c * U_n / \sqrt{3}}{Z_{tot}} = \frac{1 * 20,5 \text{ kV} / \sqrt{3}}{3,4427\Omega} = 3,438 \text{ kA}$$

missä

I_k	on	vikapaikan oikosulkuvirta
c	on	taulukosta 1 saatava jännitekerroin
U_n	on	Verkon pääjännite
Z_{tot}	on	laskettu kokonaisimpedanssi

Näin ollen ylhäällä näkyvä käsin laskettu oikosulkuvirta on riittävän lähellä reeleelta saatua oikosulkuvirtaa, joten voimme todeta, että käsin laskemalla on valian hyvä keino selvittää missä vikapaikka sijaitsee, jos ei tietojärjestelmää ole käytettävissä.

6.2 Myrskyvaurioiden korjaus Simossa

Vuonna 2015 alkuvuodesta oli kova myrsky, joka kaatoi puita Meri-Lapin alueella ja meidät hälytettiin naapuriverkkoyhtiöön töihin. Paikalle saavuttuamme selvisi että heidän koko ilmajohtoverkkonsa oli puiden peitossa ja me lähdimme niitä karsimaan ja palauttelemaan sähköjä takaisin käyttäjille. Kun kyseessä on ilmajohtoverkko, niin viat ovat 95% todennäköisyydellä silmin nähtäviä. Tässäkin tapauksessa puita oli kaatunut PAS-linjan päälle, mikä näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Kaatunut puu PAS-linjaa vasten.

Työ alkoi linjan jännitteettömäksi ottamisella, jonka jälkeen erottimet lukittiin ja merkittiin älä-kytke lapuilla. Sen jälkeen linja koestettiin ja maadoitettiin molemmista päistä ja yhdet maadoitukset tulivat vielä työpisteeseen, kun sinne ei linjan kumpaakaan maadoitusta nähnyt. Maadoitusten jälkeen kävelimme linjan alle ja kaadoimme kaikki linjaa vasten makaavat puut pois ja katsoimme ovatko puut katkaisseet yhtäkään johdinta. Kaikki puut kaadettua huomasimme yhden johtimen katkenneen kokonaan ja päät olivat karanneet pylväsvälin verran. Seuraavana vuorossa oli hakea kuvassa 13 näkyvä jatkopakkaus Rantakairan päävarastolta, jonka jälkeen palasimme vikapaikalle ja rupesimme töihin. Kiipesimme pylväeseen työparini kanssa ja otimme molemmat langan päät taljalla kiinni ja vedimme ne toisia vasten. Toiseen johtimen päähän laitoimme jatkosholkin ja pujotimme kutisteletkun jatkosholkin yli, mitkä näkyvät kuvassa 14. Tämän jälkeen löimme kummatkin johtimen päät holkkiin kiinni ja kokeilimme että holkki pitää. Sen jälkeen vedimme kaasupullon ylös pylväeseen ja pujotimme kutisteletkun holkin päälle ja kutistimme sen kiinni. Sen jälkeen oli tämä linjan kohdan korjaus valmis.



Kuva 13. PAS-johdon jatkopakkaus.



Kuva 14. PAS-johdon kuorinta ja jatkosholkin laittaminen kuoritun johtimen päähän sekä kutistemuovin pujottaminen jatkosholkin yli.

6.3 Kaapelivaurio Outokummulla

Lokakuussa 2018 Kemin Energialle ja Vedelle tuli ilmoitus, että Outokummulla on keskijännitekaapelihohtolähtö lauennut suuresta oikosulkuvirrasta. Meidän tehtäväksemme tuli lähteä selvittämään vikapaikkaa syöksyaaltogeneraattorilla. Paikalle päästyämme Auroran sähköasentajat tulivat vastaan ja selvittivät tilanteen meille. Johtolähtö oli otettu jännitteettömäksi ja kaapeli käytetty maissa (maadoitettu) kummastakin päästä. Syöksyaaltogeneraattorilla vian etsinnän ajaksi kaapelin maadoitukset on kuitenkin poistettava ja saatava kaapeli kelluvaksi.

Ensimmäinen työvaihe oli kuitenkin jännitteettömyyden toteaminen koestimella kennosta. Jännitteettömyyden toteamisen jälkeen kytkimme syöksyaaltogeneraattorin ja rupesimme etsimään vikaa. Syöksyaaltogeneraattori kytkettynä kennostoon näkyy kuvasta 15. Toinen meistä jäi kuuntelemaan, että syöksyaaltogeneraattori varasi ja löi kokoajan ja minä otin maamikrofonin ja kuuntelulaitteen mukaan. Kaapelin pituus oli noin 2 km, joten vian kuuntelemisessa meni

hyvä tovi. Kaapelivika kuitenkin löytyi noin puolentoista kilometrin päästä maakasan vierestä mistä kaivinkone oli edellisenä päivänä siirtänyt maita pois. Vika löytyi maamikrofonilla ja kuuntelulaitteella ja pääsimme noin metrin tarkkuuteen suorasta vikapaikasta, joka näkyy kuvassa 16. Kuvassa 17 näkyy AHXAMK-W kaapelin kokonaan katkennut yksi vaihe.



Kuva 15. Syöksyaaltogeneraattorin johdot kytketty vialliseen vaiheeseen ja suo-
jamaan kiskoon.



Kuva 16. Meggerin kuuntelulaite ja etäisyys suorasta vikapaikasta vasemmalla kuvaruudussa.



Kuva 17. AHXAMK-W kaapeli Outokummussa, josta yksivaihe kokonaan poikki.

7 POHDINTA

Sähköverkon rakenne on ymmärrettävä, mikäli haluaa etsiä vikoja sähköverkosta. Nykyiseen rakenteeseen vaikuttaa suuresti sen historia. Suojaukset ovat muuttuneet kovasti vuosikymmenen aikana ja säävarmaa verkkoa on alettu rakentamaan. Tämä taas osalta vaikeuttaa vikojen etsimistä. Tämän takia on hyvä tietää sähköverkon rakenteen perustiedot. Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkoitus saada koottua nämä perustiedot, jonka jälkeen vianhaku helpottuu huomattavasti.

Työn alussa tutustuttiin verkon rakenteeseen kantaverkosta lähtien, josta siirryttiin keskijänniteverkon kautta pienjänniteverkkoon ja sieltä kuluttajalle. Työssä vianhakeminen keskittyy keskijännite- sekä pienjänniteverkkoon. Suurin osa näistä läpikäydyistä vioista tapahtuu keskijänniteverkon puolella. Kemin Energialla ja Vedellä on käytössä hyvä kalusto näiden vikojen paikantamiseen. Käytöstä löytyy syöksyaaltogeneraattori ja maamikrofoni, TDR-tutka sekä vaippavian paikannuslaitteet.

Tässä työssä päästiin mielestäni hyvästi alkuperäisiin tavoitteisiin. Opinnäytetyössä käsitellään suurin osa vioista ja niiden paikantamisista sähkönsjakeluverkossa. Isona apuna tämän työn toteuttamisessa ja tekemisessä itselläni on hyvä työperäinen kokemus laitteiden käytöstä käytännössä, joten joltain osin vianpaikannuslaitteet olivat tuttuja minulle. Tämä opinnäytetyö on onnistunut täydellisesti silloin, jos tästä tulevaisuudessa on apua jollekin tulevalle sähköinsinöörille tai sähköasentajalle, joka etsii tietoa sähköverkon vioista ja niiden paikantamisesta.

LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07a. Luku 8: Maasulkusuojaus. Viitattu 18.1.2019.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf

ABB:n TTT-Käsikirja 2000-07b. Luku 7: Oikosulkusuojaus. Viitattu 16.2.2019.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/07_1_Oikosulkusuojaus%20ja%20sulakkeet.pdf

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07c. Luku 10: Vianilmaisimet. Viitattu 15.2.2019.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/10_6_Vianilmaisimet.pdf

Aura L. & Tonteri A.J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Helsinki: WSOY.

D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista 2017. 24. uudistettu painos.
 Espoo: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry

Eironen M. 2015. Muuntoaseman saneeraussuunnittelu. Lapin Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikka.

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

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

Ensto 2009a. Sulakkeet. Viitattu 24.2.2019
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594509783/1210594789763.html>

Ensto 2009b. Suojien selektiivisyys. Viitattu 23.2.2019.
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594509783/1210594830404.html>

Hellgrén M., Heikkinen L. & Suomalainen L. 1996. Energia ja Opetushallitus. Helsinki, Opetushallitus, Porin teknillinen oppilaitos.

Hirvonen R. (toim.) 2002. Suomen energiavisio 2030 : Suomenkielinen tiivistelmä. VTT Prosessit. Viitattu 28.1.2017 http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf

Holm, S. 2018. ABB Oy. Liiketoiminnan kehityspäällikön webinaari 22.1.2019.
https://new.abb.com/docs/librariesprovider113/fi_buildingspace_webinars/valokaarisuojaus-ja-relesuojaus.pdf?sfvrsn=2b074d14_2

Huotari K. & Partanen J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Opinnäytetyö.

Kemin Energian ja Veden vuosikertomus 2017. <http://www.kenve.fi/wp-content/uploads/2018/06/Kenve-vuosikertomus-2017.pdf>

- Lakervi E. 1996 Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Espoo: Otatieto.
- Lakervi E. & Partanen J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Espoo: Otatieto.
- Medium voltage products VD4 asennus- ja käyttöohjeet. 2011. ABB. Viitattu 16.2.2019. [https://library.e.abb.com/public/3d45fe7be18780c2c1257b1300574722/MA_VD4-36kV-50KA\(FI\)U_647654061-1111.pdf](https://library.e.abb.com/public/3d45fe7be18780c2c1257b1300574722/MA_VD4-36kV-50KA(FI)U_647654061-1111.pdf)
- Monni, M. 2015. Jakeluverkon Käyttötehtävät. 5. painos. Hämeenlinna: Adato Energia
- Mörsky J. 1993. Relesuojaustekniikka. 2. korj. painos. Espoo: Otatieto
- Suvela T. 2016. Sähköverkkoyhtiön käyttökeskustoiminnan kehittäminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- Sähkön siirto ja jakeluverkot 1998a. Teoksessa L. Korpinen (toim.) Sähkövoimatekniikkaopus. Viitattu 11.1.2019. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- Sähköverkkojen laskentaa 1998b. Teoksessa L. Korpinen (toim.) Sähkövoimatekniikkaopus. Viitattu 12.1.2019. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/4sahkoverkkojen_laskenta.pdf
- Sähköverkon automaatio ja suojaus 1998c. Teoksessa L. Korpinen (toim.) Sähkövoimatekniikkaopus. Viitattu 1.3.2019. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/5sahkoverkon_automatio_ja_suojaus.pdf
- Vantaan Energia Sähköverkot Oy 2019. Nollavika. Viitattu 9.3.2019 <https://www.vantaanenergiasahkoverkot.fi/sahkokatkot/tunnista-nollavika/>