





## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
School of Energy Systems  
Degree Programme in Electrical Engineering

Antti Puisto

### **Protection relay retrofits in industry**

Master's thesis

2021

119 pages, 27 figures, 16 tables

Examiners: Professor Jarmo Partanen  
D.Sc. Jukka Lassila

Keywords: medium-voltage grid, protection of electricity distribution, relay protection, protection requirements, technical specification

The purpose of this work was to study how to smoothen the relay retrofit projects in the industry. A retrofit project might even concern an apparatus manufactured 40 years earlier. Within this period the electricity distribution network, legislation and standards have been revised.

In the literature study, the demands for the power system protection, based on current legislation and standards have been studied. The boundary conditions for some protection features were also reviewed. In addition to these, a comparison between different protection relay generations was done.

The case study was done by following a retrofit project during autumn 2020. Notes were taken on the features which had an unfavourable impact on use of the resources. Additionally, a partial protection setting evaluation was done.

Proposals how to develop the technical specification and the commercial agreement in the context of relay retrofits were made based on the result of the research. Based on these studies, process models, which take into consideration different starting points, should be made. The example processes how to define protection requirements and technical specification are presented in this study.

## **ALKUSANAT**

Tämä työ on tehty ABB:n Distribution Solutions - Electrification Service yksikölle. Haluan kiittää työnantajaani ajankohtaisesta ja erittäin monipuolisesta työn aiheesta. Erityiset kiitokset haluan osoittaa työtä valvoneelle insinööri Matti Niemelle, joka neuvoi ja kannusti työn tekemisessä.

Lappeenrannan-Lahden teknilliseltä yliopistolta haluan kiittää professori Jarmo Partasta asiantuntevasta ja kannustavasta työn ohjauksesta.

Suuri kiitos myös kaikille teille, jotka jaoitte tietämystänne ja avustitte työn eri osaluilla. Antamaanne konsultaatioon liittyen otan kirjoittajana vastuun työhön mahdollisesti jääneistä virheistä.

Työn viimeiset metrit ovat usein pitkiä, kiitokset myös luokkakaverilleni Toni Takalolle ja siskolleni Tiinalle, jotka molemmat omien opintojensa ja töidensä ohessa auttoivat tämän työn viimeistelyssä.

Vaasassa 23.02.2021

Antti Puisto

# SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO.....	1
1 JOHDANTO .....	5
1.1 Tutkimuksen tavoitteet.....	5
1.2 Tutkimuksen rajaukset .....	5
2 SÄHKÖLAITTEISTOJA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ.....	7
2.1 Lakimääräykset .....	7
2.1.1 Vaatimukset laitteistoille.....	7
2.1.2 Vaaditut tarkastukset.....	8
2.1.3 Sähkötyöturvallisuus.....	10
2.2 Asetukset .....	10
3 STANDARDIEN VAATIMUKSET SÄHKÖLAITTEISTOILLE .....	13
3.1 Suurjänniteasennukset .....	14
3.1.1 Ympäristöolosuhteet .....	15
3.1.2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus .....	16
3.1.3 Dokumentointi sekä laite- ja johdinmerkinnät .....	17
3.1.4 Suojausvaatimukset sähköisiä ilmiöitä vastaan .....	17
3.1.5 Asennus .....	19
3.1.6 Käyttöönottotarkastukset.....	20
4 TEOLLISUUDEN KESKIJÄNNITEVERKKO.....	22
4.1 Jännitetasot .....	22
4.2 Maadoitusolosuhteet.....	22
4.3 Verkon tähtipisteen maadoitustavat .....	23
4.3.1 Kuristimen kautta maadoitettu verkko.....	24
4.3.2 Maasta erotettu verkko.....	24
4.3.3 Resistanssin kautta maadoitetut verkot .....	24
4.4 Vikatilanteiden kokonaisvaikutukset .....	25
5 SUOJAUSTA VAATIVAT SÄHKÖISET ILMIÖT .....	26
5.1 Oikosulku.....	26
5.1.1 Oikosulkuvirran kehittyminen ajan suhteen.....	26

5.1.2	Thevenin laskentamenetelmä .....	27
5.1.3	Suojauksen kannalta merkittävimmät oikosulkuvirrat.....	28
5.1.4	Oikosulkupiirin impedanssit.....	30
5.1.5	Katkaisuvirta.....	35
5.1.6	Oikosulkuvirran terminen vaikutus .....	37
5.1.7	Oikosulkusuojauksen toteutusperiaatteita .....	39
5.2	Maasulku .....	40
5.2.1	Maasulkuvian vaikutusalue .....	41
5.2.2	Maasta erotetun verkon maasulkuvirrat.....	41
5.2.3	Maasta erotetun verkon jännitteet maasulussa .....	45
5.2.4	Resistanssin kautta maadoitetun verkon maasulkuvirrat .....	46
5.2.5	Resistanssin kautta maadoitetun verkon jännitteet maasulussa ..	48
5.2.6	Maasulun poiskytkentäehdot .....	49
5.2.7	Katkeileva maasulku.....	51
5.2.8	Maasulkusuojauksen toteutusperiaatteita.....	52
5.3	Lämpenemä.....	54
5.3.1	Kaapelit .....	55
5.3.2	Muuntajat .....	55
5.3.3	Moottorit .....	59
5.4	Yli- ja alijännite .....	61
5.4.1	Laitteiden yli- ja alijännitesuojaus.....	61
5.4.2	Toimintavaatimukset yli- ja alijännitteillä .....	62
5.5	Yli- ja alitaajuus .....	63
6	<b>KESKIJÄNNITEVERKON RELESUOJAUS .....</b>	<b>65</b>
6.1	Apusähköjärjestelmä .....	65
6.2	Ensiöpiirin mittaukset.....	65
6.2.1	Maasulkuvirtojen mittaus.....	65
6.2.2	Vaihevirtojen mittaus.....	68
6.2.3	Jännitteiden mittaus .....	68
6.3	Eri ikäiset ja tyyppiset suojareleet.....	69
6.3.1	Ensiöreleet.....	70

6.3.2	Sähkömekaaniset toisioreleet .....	71
6.3.3	Staattiset toisioreleet .....	72
6.3.4	Eri ikäiset mikroprosessoripohjaiset toisioreleet .....	74
6.3.5	Eri ikäisten suojareiden tekninen yhteensopivuus .....	75
6.4	Etäohjaus ja kommunikaatio.....	77
6.4.1	Valvonnan ja etäohjauksen kehitys.....	77
6.4.2	Laitevalmistajien käyttämät kommunikaatioprotokollat .....	79
6.4.3	Alaa yhdistävä kommunikaatioprotokolla .....	80
7	SUOSITELTAVAT SUOJAUSTOIMINNALLISUUDET .....	84
7.1	Suojaustoiminnallisuudet kennoittain .....	84
7.2	Tekniset vaatimukset suojausten toteuttamiseksi .....	85
8	CASE-TUTKIMUS .....	87
8.1	Yleiskuvaus.....	87
8.2	Uusintakohteen laitteiston kuvaus .....	89
8.2.1	Syöttö kojeistolta DA.....	89
8.2.2	DB16 kojeiston kennot.....	89
8.3	Kojeiston DB16 lähdöt.....	90
8.3.1	Mittauskenno .....	90
8.3.2	Syöttökenno.....	91
8.3.3	Varasyöttö .....	93
8.3.4	Muuntaja RG .....	93
8.4	Asettelujen tarkistus .....	96
8.4.1	Lähtötiedot: kuormitusvirrat ja kaapeliosuudet.....	96
8.4.2	Lähtötiedot: oikosulkuvirrat ja taustaverkon maasulkuvirta.....	97
8.4.3	Lähtötiedot: suojareiden asettelut .....	98
8.4.4	Tehdyt havainnot .....	99
8.5	Projektin sujuvuuteen vaikuttaneet tekijät.....	102
8.5.1	Tekninen selvitystyö .....	103
8.5.2	Käyttöönottovaiheen muuttujat .....	104
9	TOIMENPIDE-EHDOTUKSET.....	105
9.1	Toimintatapojen kehittäminen .....	105

9.1.1	Kaupallinen sopiminen .....	105
9.1.2	Kehitys projektinäkökulmasta .....	110
9.2	Jatkotoimenpiteet .....	111
10	YHTEENVETO .....	112
	LÄHDELUETTELO.....	114

## LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

### Lyhenteet

IEC	International Electrotechnical Commission
IRC	Inter Relay Communication
LON	Local Operating Network
RC	Vastuksesta ja kondensaattorista muodostuva piiri
SESKO	Sähkötekniikan alan kansallinen standardointijärjestö
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
STL	Sähtöturvallisuuslaki
SPA	Strömberg Protection Acquisition
TTL	Työturvallisuuslaki
VNa	Valtioneuvoston asetus

### Symbolit

$\mu$	Katkaisukerroin
$\mu_i$	Vikapaikkaa syöttävän lähteen $i$ katkaisukerroin
$c$	Jännitekerroin
$C_0$	Verkon yhden vaiheen maakapasitanssi
$c_{\max}$	Laskennassa maksimi oikosulkuvirtaa vastaava jännitekerroin
$c_{\min}$	Laskennassa minimi oikosulkuvirtaa vastaava jännitekerroin
$f$	Taajuus
$I''_k$	Alkuoikosulkuvirta/vikapaikan alkuoikosulkuvirta
$I''_{ki}$	Vikapaikkaa syöttävän lähteen $i$ alkuoikosulkuvirta
$I''_{kTK}$	Tahtikoneen syöttämä alkuoikosulkuvirta
$I_0$	Mitattu maasulkuvirta eli nollavirta
$I_{0>}$	Maasulkusuojauksen asettelu suojareleessä
$I_{1s}$	Laite- tai kaapelivalmistajan ilmoittama 1 s oikosulkukestoisuus
$I^2t$ -arvo	Jouleintegraali

$I_b$	Katkaisuvirta
$i_{dc}$	Oikosulkuvirran vaimeneva tasavirtakomponentti
$I_e$	Maasulkuvirta suorassa maasulussa / taustaverkon maasulkuvirta
$I_{ef}$	Maasulkuvirta vikaresistanssi huomioituna
$I_{ej}$	Suojattavan johtolähdön itsensä tuottama maasulkuvirta
$I_k$	Pysyvän tilan oikosulkuvirta
$I'_k$	Muutostilan oikosulkuvirta
$I_{k2}$	2-vaiheinen oikosulkuvirta
$I_{k3}$	3-vaiheinen oikosulkuvirta
$I''_{kv}$	Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta
$I_{nm}$	Epätahtimoottorin nimellisvirta
$I_{nt}$	Muuntajan nimellisvirta
$I_{nTK}$	Tahtikoneen nimellisvirta
$\hat{I}_p$	Alkuoikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo
$I_r$	Maadoitusresistanssin tuottama maasulkuvirta suorassa maasulussa
$I_{sm}$	Epätahtimoottorin käynnistysvirta
$I_{th}$	1 s oikosulkuvirtaa vastaava keskimääräinen virran tehollisarvo
$I_{thn}$	Laitteen tai kaapelin ilmoitettu oikosulkukestoisuus
$\kappa$	Sysäyskerroin
$K_G$	Korjauskerroin tahtikoneen oikosulkusuureille
$L_j$	Kaapelin induktanssi pituusyksikköä kohden per vaihe
$l_j$	Kaapelin pituus km
$m$	Nimellinen pätöteho moottorin napaparia kohden / oikosulkuvirran vaimenevaa tasavirtakomponenttia kuvaava tekijä
$n$	Oikosulkuvirran vaimenevaa vaihtokomponenttia kuvaava tekijä / virtamuuntajan tarkkuusrajakerroin nimellisestä poikkeavalla taakalla
$n_N$	Virtamuuntajan tarkkuusrajakerroin nimellistaakalla
$p$	Napapariluku
$P_{kn}$	Muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla
$P_{nm}$	Epätahtimoottorin nimellispätöteho

$q$	Katkaisukerroin epätahtikoneelle
$R_{dTK}$	Tahtikoneen oikosulkuresistanssi
$R_f$	Vikaresistanssi
$R_j$	Kaapelin resistanssi
$r_j$	Kaapelin resistanssi pituusyksikköä kohden
$R_{kt}$	Muuntajan oikosulkuresistanssi
$R_{kv}$	Syöttävän verkon oikosulkuresistanssi
$R_m$	Epätahtimoottorin oikosulkuresistanssi
$S''_k$	Alkuoikosulkuteho vikapaikassa ilman laskettavaa moottoriryhmää
$S_2$	Virtamuuntajan todellinen taakka
$S_i$	Virtamuuntajan sisäinen taakka
$S''_{kv}$	Syöttävän verkon alkuoikosulkuteho
$S_N$	Virtamuuntajan nimellinen taakka
$S_{nm}$	Epätahtimoottorin nimellinen näennäisteho
$S_{nTK}$	Tahtikoneen nimellisteho
$t_k$	Oikosulun kesto aika
$t_{min}$	Katkaisuviive
$t_n$	Laitteelle tai kaapelille ilmoitettua nimellistä oikosulkukestoisuutta vastaava oikosulun kesto aika
$U$	Verkon pääjännite
$U_0$	Tähtipistejännite eli nollajännite
$u_k$	Muuntajan oikosulkujännitteen suhteellinen arvo
$U_n$	Nimellisjännite vikapaikassa/nimellisjännite syöttävässä verkossa
$U_{ni}$	Vikapaikkaa syöttävän lähteen $i$ nimellisjännite
$U_{nm}$	Epätahtimoottorin nimellinen pääjännite
$U_{nt}$	Muuntajan nimellinen pääjännite
$U_{nTK}$	Tahtikoneen nimellisjännite
$u_r$	Muuntajan resistiivisen oikosulkujännitteen suhteellinen arvo
$U_{TP}$	Kosketusjännite
$U_v$	Vaihejännite normaalitilassa
$x''_d$	Tahtikoneen suhteellinen alkuoikosulkureaktanssi

$X''_{dT_K}$	Tahtikoneen alkuoikosulkureaktanssi
$X_j$	Kaapelin reaktanssi
$X_{kt}$	Muuntajan oikosulkureaktanssi
$X_{kv}$	Syöttävän verkon oikosulkureaktanssi
$X_M$	Epätahtimoottorin oikosulkureaktanssi
$Z_1$	Myötäverkon impedanssi
$Z_2$	Vastaverkon impedanssi
$z_{kt}$	Muuntajan oikosulkuimpedanssin suhteellinen arvo
$Z_{kt}$	Muuntajan oikosulkuimpedanssi
$Z_{kv}$	Syöttävän verkon impedanssi
$\Sigma I_{ev}$	Suojattavan lähdön kokema summavirta maasulussa
$\Sigma P_{nm}$	Moottoriryhmän yhteenlaskettu nimellispäteho
$\Sigma S_{nt}$	Moottoriryhmiä syöttävien muuntajien yhteenlaskettu nimellistä- ennäisteho
$\varphi_{nTK}$	Tahtikoneen nimellisvirran ja nimellisjännitteen välinen kulma
$\omega$	Kulmataajuus

# 1 JOHDANTO

Suomen teollisuuden sähköjakelussa on käytössä laitteistoja useilta eri vuosikymmeniltä. Näiden laitteistojen suojarleet ovat omien vuosikymmentensä tuotteita, ja näille huoltojen tai korjausten saatavuus on hyvin tapauskohtaista. Siinä, missä laitteiden ensisijainen käyttötarkoitus on pysynyt samana, on laitteiden tekniikka kehittynyt vuosikymmenten aikana sähköjakelun ilmiöiden mekaanisesta mallinnuksesta nykyisiin mikroprosessoripohjaisiin ja laskennalliseen mallinnukseen. Samalla sähköturvallisuutta ja sähkölaitteistoja koskevat lait, asetukset ja standardit ovat useasti uudistuneet. Uusittaessa vanhoja suojarleitä saatetaan olla tilanteessa, jossa kohtaavat kahden aikakauden säädökset ja suojalaitteet. Tässä työssä tutkitaan mitkä ovat tämänhetkiset vähimmäisvaatimukset työssä rajatuille lähtötyypeille suojaustoiminnallisuuksien osalta ja, kuinka sujuvoittaa tilaus-toimitusketjua suojarleuusinoissa.

## 1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Työn ensisijainen tavoite on kehittää suojarleiden uusintaprosessia, joka huomioi turvallisuuden ja käytettävyyden näkökulmasta Suomen lakien ja asetusten määräykset. Toissijainen tavoite on tutkia, kuinka selkeyttää tilaus-toimintaketjua tarjouksesta toteutukseen. Hypoteesina on, että valmista uusintaprosessia hyödyntämällä säästetään ajallisesti jopa 35% suunnittelu ja käyttöönottoaiheessa.

Tutkimuskysymykseksi on asetettu seuraava:

- Kuinka teollisuuden suojarleuusintoja voidaan sujuvoittaa?

## 1.2 Tutkimuksen rajaukset

Uusintakohteiden osalta rajaus on tehty koskemaan kohteita, joiden vanhat suojarleet ovat toisioreleitä. Primäärimitausten osalta rajaus asetetaan koskemaan perinteisiä virta- ja jännitemuuntajia. Niin ikään ohjattavien objektien osalta keskitytään lähinnä vain releiden ja katkaisijoiden väliseen toimintaan.

Työ rajataan koskemaan yleisimpiä teollisuuden keskijännitejakelun suojaus-  
näihin on valittu johtolähdön suojaus, jakelumuuntajasuojaus, epätahtimoottorin-  
suojaus ja syöttökennon suojaus.

Laitteiden kytkennät esitellään pääperiaatteiltaan mittauskytkentöjen osalta. Yksi-  
tyiskohtaiset kytkennät rajataan pois, sillä nämä vaihtelevat kohteittain.

Työssä käsitellään laskentaperiaatteet ylivirtasuojauksen ja maasulkusuojauksen  
osalta, sillä näistä muodostuu reunaehdot monien suojausfunktioiden asetteluille.  
Maasulkusuojauksen toimintaehdot käsitellään pääperiaatteeltaan.

Varavoimaa sisältävien kohteiden osalta työssä on seuraavat rajaukset. Oikosulku-  
virtojen laskennassa esitetään oikosulkuvirtaa syöttävien komponenttien, kuten tah-  
tigeneraattoreiden laskenta. Tämän lisäksi viitataan lyhyesti mitä on otettava ylivir-  
tasuojauksessa huomioon, kun verkossa on oikosulkuvirtaa syöttäviä komponent-  
teja.

Kommunikaatioprotokollien/väylien osalta esitellään suppeasti kommunikaatio-  
protokollien kehitys. Tässä osuudessa on nostettu esiin millaisia tekijöitä kommu-  
nikaatio muodostaa yhteensopivuudelle eri ikäisten suojausväylien välillä.

Työ rajataan koskemaan suojausien teknisiä määrittelyjä ja toteutusta. Vaatimuk-  
set teknisille piirustuksille, asennukselle ja käyttöönotolle esitellään kuitenkin ylei-  
sellä tasolla.

## 2 SÄHKÖLAITTEISTOJA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Tässä kappaleessa on käsitelty suoja-releusinnan tekniseen toteutukseen liittyviä velvoittavia tekijöitä, eli minkälaisia lainsäädännöllisiä määritelmiä ja säädöksiä sähkölaitteistoja koskien on annettu.

### 2.1 Lakimääräykset

Velvoittavat määräykset sähköturvallisuudelle ja sähköverkkojen suojaukselle tulevat laista. Tämän työn kirjoitushetkellä voimassa on sähkölaitteita ja -laitteistoja koskeva sähköturvallisuuslaki (STL) 1135/2016. Laissa on säädetty vaatimuksista sähkölaitteistoille ja -laitteille, sekä siitä kuinka vaatimuksien mukaisuus todetaan. Tämän lisäksi laissa säädetään laitteistoille tehtävistä töistä ja niiden valvonnasta. Sähkötöihin liittyvää lainsäädäntöä löytyy sekä sähköturvallisuus- että työturvallisuuslaista.

Tässä työssä keskitytään sähkölaitteistojen relesuojauksen toteuttamiseen, joten työturvallisuuteen viitataan vain yhtenä sähkönjakelun suojaukseen velvoittavana tekijänä.

#### 2.1.1 Vaatimukset laitteistoille

Sähköverkkojen suojauksen kannalta tärkeimpänä yksiselitteisenä määritelmänä voidaan nähdä STL:n 6 §, jonka ensimmäisen momentin 1 kohdassa säädetään suoraan lainaten seuraavasti:

*Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:*

- 1) *niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) *niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;*

3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

*Jos sähkölaite tai -laitteisto ei täytä I momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön.*

(STL 1135/2016, 6 §.)

Tarkennuksia sähkölaitteistojen osalta annetaan lain kolmannessa luvussa, jossa säädetään turvallisuusvaatimuksista, ja kuinka nämä vaatimukset voidaan katsoa tulleen täytetyiksi. STL:n mukaan sähkölaitteiston suunnittelu, rakennus ja korjaus on tehtävä turvallisuuden näkökulmasta hyvien teknisten käytäntöjen mukaan ottaen huomioon edellä lainattu 6 §, 1 momentin 1 kohdassa säädetty määritelmä. Lisäksi laissa säädetään, että sähkölaitteiston tulee täyttää olennaiset turvallisuusvaatimukset, joista on määritelty laista lainaten seuraavasti:

*Olennaiset turvallisuusvaatimukset koskevat suojausta sähköiskulta, suojausta tulipaloa ja kuumuutta vastaan, suojausta muilta haittavaikutuksilta, erityislaitteistojen sekä erityisolosuhteiden vaatimuksia, eri laitteistojen keskinäistä yhteensopivuutta sekä muita olennaisia rakennevaatimuksia. Vaatimukset koskevat myös tarpeellisia merkintöjä ja asiakirjoja.*

(STL 1135/2016, 31 §.)

Edellä mainittujen turvallisuusvaatimusten voidaan katsoa täyttyvän, mikäli sähkölaitteisto on suunniteltu, rakennettu ja korjattu sähköturvallisuusviranomaisen julkaiseman standardiluettelon mukaisesti. Standardeistakin saa STL:n mukaan tiettyillä ehdoilla poiketa. (STL1135/2016 32 §, 33 §, 34 §.) Näitä ehtoja ei tämän työn yhteydessä kuitenkaan käsitellä. Suomessa edellä mainitun standardiluettelon päivittämisestä ja julkaisemisesta vastaa Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes).

### **2.1.2 Vaaditut tarkastukset**

Ennen laitteiston käyttöönottoa täytyy sille STL:n mukaan tehdä käyttöönottotarkastus. Lain mukaan käyttöönottotarkastuksessa on riittävässä laajuudessa selvitettävä, ettei laitteisto aiheuta vaaraa tai häiriötä, mikä on mainittu lain 6 §, 1 momentissa. Käyttöönottotarkastus ja tarkastuspöytäkirja täytyy tehdä myös laitteistolle tehtyjen muutos- tai laajennustöiden jälkeen. Ensisijainen vastuu

käyttöönottotarkastuksen tekemisestä on laitteiston rakentajalla, mutta mikäli rakentaja ei tätä tee, siirtyy vastuu käyttöönottotarkastuksen toteuttamisesta sähkölaitteiston haltijalle. (STL 1135/2016, 43 §.)

STL:ssa on säädetty sähkölaitteistojen luokituksista. Koska tässä työssä käsitellään teollisuuslaitosten keskijännite sähköjakelujärjestelmiä, on kyse tällöin luokan 2 laitteistosta. Tarkemmin määriteltynä kyse on 2c luokitellusta laitteistosta, jonka määritelmä laissa on suoraan lainaten seuraava:

*2) luokan 2 sähkölaitteisto:*

*c) sähkölaitteisto, johon kuuluu yli 1 000 voltin nimellisjännitteisiä osia, lukuun ottamatta sellaista sähkölaitteistoa, johon kuuluu vain enintään 1 000 voltin nimellisjännitteellä syötettyjä yli 1 000 voltin sähkölaitteita tai niihin verrattavia laitteistoja;*

(STL 1135/2016, 44 §.)

STL määrittää myös, milloin sähkölaitteistolle täytyy tehdä käyttöönottotarkastuksen lisäksi varmennustarkastus. Käytännössä raja menee siinä, missä muutos tai laajennustyöt katsotaan merkittäviksi. (STL 1135/2016, 45 §.) Määritelmiin esitetään tarkennusta jäljempänä esitellyssä valtioneuvoston asetuksessa ja standardissa SFS 6001.

Edellä mainitun laitteistoluokituksen mukaan säädetään STL:ssa sähkölaitteistoille tehtävien määräaikaistarkastuksien sisällöstä. Määräaikaistarkastuksesta on säädetty laista lainaten seuraavasti:

*Määräaikaistarkastuksessa tulee riittävässä laajuudessa pistokokein tai muulla soveltuvalla tavalla varmistua siitä, että:*

*1) sähkölaitteiston käyttö on turvallista, kunnossapito on riittävää turvallisuuden ylläpitämiseksi ja laitteistolle on tehty kunnossapito-ohjelman mukaiset toimenpiteet;*

*2) sähkölaitteiston käyttöön ja hoitoon tarvittavat välineet, piirustukset, kaaviot ja ohjeet ovat käytettävissä;*

*3) sähkölaitteiston laajennus- ja muutostöistä on asianmukaiset tarkastuspöytäkirjat.*

(STL 1135/2016, 50 §.)

### **2.1.3 Sähkötyöturvallisuus**

STL:ssä viitataan työturvallisuuslakiin (TTL) kun käsitteinä on sähkön käyttö, sähkötyö ja sähkölaitteistojen lähellä tehtävä työ, jossa on sähköiskun tai valokaaren vaara. TTL:n määritelmä sähkötyöturvallisuudesta on suoraan lainaten seuraava:

*Sähkölaitteista, sähkön käytöstä ja staattisesta sähköstä johtuvan vaaran tulee olla mahdollisimman vähäinen.*

*Valtioneuvoston asetuksella voidaan antaa tarkempia säännöksiä fysikaalisista tekijöistä ja niiden tunnistamisesta, altistuksen luonteesta ja sen kestosta ja arvioinnista, raja-arvoista ja torjuntatoimenpiteistä.*

(TTL 738/2002, 39 §.)

## **2.2 Asetukset**

Edellä mainituissa laeissa viitataan usein valtioneuvoston asetuksiin, joissa tarkennetaan tarpeelliseksi katsottuja säädöksiä laissa annetun asetuksenantamisvaltuutuksen perusteella. Työn kirjoitushetkellä viimeisin sähkölaitteistojen koskeva valtioneuvoston asetus (VNa) on 1434/2016. Tässä asetuksessa on tarkennettu olennaisia turvallisuusvaatimuksia, standardeista poikkeamista, käyttöönottopöytäkirjan sisältöä, määritelmiä vähäisestä sekä merkittävästä muutos- ja laajennustyöstä ja varmennustarkastukseen liittyviä seikkoja.

Asetuksen 5 §:ssä ja 6 §:ssä on määritelmät laajennus- ja muutostöiden luokittelusta vähäisen ja merkittävän välillä. Muutama 5 §:ssä mainittu kohta voidaan nähdä tämän työn näkökulmasta soveltuvina, mutta asetuksen kuvaukset töistä eivät ole tarkkoja. Tarkennuksia näihin tulee myöhemmin esitellyssä suurjänniteasennuksiin liittyvässä standardissa SFS 6001. Alla suoraan lainattuina nämä edellä mainitut pykälät, joiden voidaan tietyin ehdoin katsoa liittyvän myös suojareleusintaan:

*Vähäisiksi katsottavat työt käyttöönottotarkastuksessa*

*Sähköturvallisuuslain 43 §:ssä tarkoitettua käyttöönottotarkastuspöytäkirjaa ei edellytetä:*

*3) yksittäisten komponenttien vaihdoista tai lisäyksistä taikka näihin verrattavista toimenpiteistä;*

*5) nimellisjännitteeltään enintään 1 000 voltin kytkinlaitoksiin kohdistuvista muutostöistä, joissa kytkinlaitoksen nimellisarvoja ei muuteta*

(VNa 1434/2016, 5 §.)

6 §:ssä tarkennetaan merkittäväksi muutostyöksi tulkittavia töitä. Alla lainattuina tämän työn aiheen kannalta oleelliset kohdat.

*Merkittäviksi katsottavat sähkölaitteiston muutos- ja laajennustyöt*

*Kysymyksessä ei katsota olevan sähköturvallisuuslain 45 §:ssä tarkoitettu merkittävä sähkölaitteiston muutostyö, kun:*

*1) kyse on 5 §:ssä tarkoitetuista sähköalan töistä;*

*2) muutos- tai laajennustyö kohdistuu kytkinlaitokseen eikä kytkinlaitoksen nimellisarvoja muuteta.*

(VNa 1434/2016, 6 §.)

Näiden lisäksi asetuksen liitteessä on annettu lista olennaisista turvallisuusvaatimuksista. Nämä ohjaavat tämän työn suunnittelua siltä osin, kuin suojareleellä osana sähkölaitteistoa voidaan turvallisuuteen vaikuttaa. Alla VNa:n liitteestä lainattuja kohtia, jotka tulee ottaa huomioon sähkönjakelun suojauksen suunnittelussa:

*5. Jännitteisissä johtimissa mahdollisesti kulkeva ylivirta ei saa aiheuttaa sellaisia korkeita lämpötiloja tai sähkömekaanisia rasituksia, jotka voivat vahingoittaa ihmisiä, kotieläimiä tai omaisuutta.*

*6. Sähkölaitteistossa esiintyvän vian yhteydessä on normaalitilanteessa jännitteettömien johtimien ja muiden johtavien osien kestettävä niiden kautta mahdollisesti kulkeva vikavirta ilman, että niiden lämpötila nousee vaarallisen korkeaksi tai että niistä aiheutuu mekaanista vaaraa.*

*7. Suojalaitteiden on toimittava sellaisilla virroilla, jännitteillä ja sellaisessa ajassa, jotka takaavat riittävän turvallisuuden.*

*8. Sähkölaitteiston sähköinen suojajärjestelmä on valittava siten, että se voidaan pitää toimintakuntoisena ja luotettavana koko sähkölaitteiston käyttöään.*

*21. Sähkölaitteisto on varustettava sen käyttöä ja hoitoa varten tarpeellisilla merkinnöillä ja varoituskilvillä.*

*Suojalaitteet, johdot ja johtimet on ryhmiteltävä selkeästi ja tarvittaessa merkittävä siten, että virtapiirit voidaan tunnistaa.*

*Sähkölaitteistosta on laadittava sen rakentamista, käyttöä ja hoitoa varten tarvittavat kaaviot ja ohjeet.*

*24. Jos vaaran esiintyessä on tarpeen katkaista sähkön syöttö välittömästi, katkaiseva laite tai sitä ohjaava laite on asennettava siten, että se on helposti havaittavissa ja tehokkaasti sekä nopeasti käytettävissä.*

(VNa 1434/2016, Liite: Sähkölaitteiston olennaiset turvallisuusvaatimukset.)

### 3 STANDARDIEN VAATIMUKSET SÄHKÖLAITTEIS- TOILLE

Tässä kappaleessa tarkennetaan laissa ja asetuksissa annettuja määritelmiä sähköturvallisen sähkölaitteiston rakentamiseen liittyen. Kappaleessa esitellään suojareleusintojen tekniseen toteutukseen liittyviä näkökohtia. Vaikka jokainen tässä kappaleessa esitelty aihepiiri on suojareleusinnan teknisen toteutuksen kannalta tärkeä, työn rajauksiin liittyen tässä kappaleessa pääpainona on löytää ne kohdat, joiden perusteella voidaan määrittää vaaditut suojaustoiminnallisuudet.

Ajantasainen, kappaleessa 2.1.1 mainittu, Tukesin ylläpitämä laitteiden rakentamiseen ja sähköturvallisuuteen liittyvä standardiluettelo on tällä hetkellä S10-2019. Teollisuuden keskijänniteverkon suojareleusintojen kannalta luettelosta voidaan suoraan poimia kaksi standardia, jotka liittyvät jakeluverkon suojaukseen ja suojareleusinnan toteutukseen. Nämä ovat SFS 6001 ja SFS 6002, joista edellä mainittu on standardi suurjänniteasennuksille ja jälkimmäinen on sähköturvallisuuteen liittyvä standardi. Tämän työn osuuden keskittyessä laitteiston teknisiin vaatimuksiin, jätetään SFS 6002 tässä työssä käsittelemättä, sillä se sisältää vaatimuksia ja ohjeistusta lähinnä itse fyysiseen asennustyöhön liittyen. (Tukes 2019.)

Standardissa SFS 6002 on kuitenkin työn kannalta merkittävä määritelmä jännite-  
tasoista. Määritelmän mukaan suurjännite käsitteenä tarkoittaa sekä keskijännitettä  
että suurjännitettä. (SFS 6002: 2018, s. 6.) Yleisesti käytetyt tarkemmat määritelmät  
jännitetasoista ovat suoraan lainattuina seuraavat:

***pienjännite (low voltage)***

*Jännite, jonka nimellinen tehollisarvo on  $U_n \leq 1 \text{ kV}$ .*

***keskijännite (medium voltage)***

*Jännite, jonka nimellinen tehollisarvo on  $1 \text{ kV} \leq U_n \leq 36 \text{ kV}$ .*

***suurjännite (high voltage)***

*Jännite, jonka nimellinen tehollisarvo on  $36 \text{ kV} < U_n \leq 150 \text{ kV}$   
(SESKO 2020, s. 9)*

### 3.1 Suurjänniteasennukset

Suurjänniteasennuksia käsittelevässä standardissa SFS 6001:ssä on huomioitu Suomen asennusolosuhteet ja näihin liittyen standardiin on tehty kansallisia lisäyksiä. Standardi sisältää sekä velvoittavia että opastavia kohtia suurjännitesähköasennuksiin ja niiden käyttöön liittyen. Kirjoitushetkellä voimassa oleva suurjännitesähköasennuksia koskeva standardi on vahvistettu käyttöön 15.6.2018. (SFS 6001: 2018, s. 1, 6.)

Standardin liitteessä NB, joka on Suomen osalta kansallinen opastava lisäys, on vaatimuksia ja ohjeita koskien sähkölaitteiston korjauksia, muutoksia tai laajennuksia. Liitteessä on määritetty, etteivät tämän uuden standardin vaatimukset ole laitteistoille takautuvia ja täten laitteiston alkuperäisen rakennusajankohdan aikana voimassa olleita asennusvaatimuksia voidaan edelleen käyttää, mikäli näiden käyttöä ei erikseen ole kielletty tai näistä ei aiheudu selkeää vahinkoa tai vaaraa. Lisäksi on mainittu, että sähköturvallisuusvaatimuksia täytyy noudattaa aina korjaus-, laajennus- tai muutostöissä. (SFS 6001: 2018, s. 151.)

Liitteen mukaan yleisenä periaatteena on se, että muutos- ja laajennustyöt noudattavat standardia SFS 6001 niiltä osin, mitä tehtävä työ koskettaa. Vanhat asennusosuudet, joita laajennus- tai muutostyöt eivät kosketa voidaan täten jättää ennalleen, ellei tästä aiheudu edellä mainittuja vaaratekijöitä. (SFS 6001: 2018, s. 151.)

Liitteen soveltamisalaa käsittelevässä osuudessa on tarkennettu määritelmää korjaus-, muutos- ja laajennustyöistä. Määritelmän mukaan korjaustyössä aiemmin rakennetun asennuksen käyttötarkoitukseen ei tule muutosta. Korjaustyötä on esimerkiksi yksittäisen kojeen vaihtaminen esimerkiksi rikkoutumisen vuoksi. Muutos- tai laajennustyöksi katsotaan sellaiset työt, joissa asennuksen käyttötarkoitus tai laajuus muuttuu. (SFS 6001: 2018, s. 151.)

Suojareleen tehtävä on suojata sähköverkkoa, joten uusittaessa käyttötarkoitus ei tältä osin muutu, mutta uudet suojareleet mahdollistavat monia uusia toiminnallisuuksia. Tämän takia Tukesilta pyydettiin tulkintaa asiasta. Tukesin tulkinta oli,

että mikäli laite vaihdetaan juuri samanlaiseen uuteen, on kyseessä korjaustyö, mutta uusittaessa laite uudemmalla erityyppisellä suojareleellä, on kyseessä muutostyö. (Tukes 2020.)

Tällä tulkinnalla on vaikutusta myös lain ja asetusten kannalta, sillä niissä on säädetty erikseen muutostöistä. Tämän vuoksi Tukesilta pyydettiin samassa yhteydessä tulkinta muutostyön merkittävydestä, kun kyseessä on suojareleen uusinta erilaisella laitteella. Tulkinnan mukaan kyseessä ei ole merkittävä muutostyö. Perusteena tälle on aiemmin esitetty VNa 1434/2016, 6 §, jossa todetaan, ettei muutostyötä katsota merkittäväksi, jos se kohdistuu kytkinlaitokseen ja kytkinlaitoksen nimellisarvoja ei muuteta. (Tukes 2020; VNa 1434/2016, 6 §.)

SFS 6001 sisältää kuitenkin useita viittauksia muihin standardeihin, joista esimerkiksi IEC 62271 (International Electrotechnical Commission) standardisarja. Tämä standardisarja koskee esimerkiksi tehdasrakenteisia kojeistoja. (SFS 6001: 2018, s. 52.)

SFS 6001 mukaan tarkastuksilla ja testauksilla tulee todentaa, että laitteistokohtaisten standardien vaatimukset täyttyvät standardin SFS 6001 vaatimusten lisäksi. (SFS 6001: 2018, s. 98.)

### **3.1.1 Ympäristöolosuhteet**

Uusien sähkölaitteistojen asennuksien osalta voidaan ajatella, että kojeistot ja suojareleet sijaitsevat yleensä sähkötilassa, jossa vallitsee normaalit sisätilaksi luokitellut olosuhteet.

Standardi SFS 6001:stä löytyy määritelmät normaaleille sisä- ja ulkotilan olosuhteille (SFS 6001: 2018, s. 33-36). Alla suorana lainauksena yksi normaalin sisätilan olosuhteen ehdoista, joka on suojareleusintojen kannalta merkitsevä.

*d) Ilmassa ei ole sanottavasti pölyä, savua, syövyttäviä ja/tai paloherkkiä kaasuja, höyryjä tai suolaa.*

(SFS 6001: 2018, s. 33.)

Edellä lainatusta ehdosta poikkeavia olosuhteita löytyy kokemusperäisesti arvioituna niin jakeluverkko kuin teollisuuspuoleltakin. Laitteita, eli tämän työn kontekstissa suojareileitä valittaessa, täytyy täten huomioida ympäristötekijät.

Tarkemmin ympäristöolosuhteiden luokitteluun liittyen SFS 6001:ssä viitataan standardisarjaan SFS-EN 60721 ja räjähdevaarallisten tilojen osalta standardisarjaan SFS-EN 60079. Laitevalintojen lisäksi on otettava huomioon vaatimukset myös asennustarvikkeille, kuten kaapeleille. Kaapeleita luokitellaan esimerkiksi savunmuodostuksen ja palonleviämismominaisuuksien mukaan. (SFS 6001: 2018, s. 33, 72.)

### **3.1.2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus**

Sähkömagneettista yhteensopivuutta käsitellään SFS 6001 standardissa varsin laajasti. Tyyppitestatut suojareleet ovat yksittäisenä laitteena läpäisseet niiltä vaaditut sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevat testit. Asennettaessa suojarele osaksi olemassa olevaa laitteistoa, täytyy sähkömagneettinen yhteensopivuus ottaa huomioon asennuksen yhtenä osa-alueena.

Standardissa esitellään joitain kohtia, joita noudattamalla voidaan vähentää häiriöiden esiintymismahdollisuutta ja niiden vaikutuksia. Alla suoraan standardista SFS 6001:stä lainatut edellä mainitut kohdat:

- a) I/O-signaalipiirien metallinen erottaminen.*
- b) Suodattimien asentaminen apusähkön syöttöpiireihin.*
- c) Esimerkiksi seuraavanlaisten jännitettä rajoittavien laitteiden asentaminen:*
  - suojakondensaattorit tai RC-piirit*
  - pienjännitteiset ylijännitesuojat*
  - zenerdiodit tai varistorit*
  - transzorbiodit.*

(SFS 6001: 2018, s. 86.)

Lisäksi standardissa on esitetty asennukseen ja materiaalivalintoihin liittyviä ohjeistuksia häiriöiden ehkäisemiseksi. Näistä muutama standardista suoraan lainaten:

- *ohjauskaapelit asennetaan metallisiin suojaputkiin, joiden yhtenäisyys ja maadoitus varmistetaan niiden koko pituudelta*
- *kaapelit asennetaan mahdollisuuksien mukaan metallipintoja pitkin*
- *käytetään valokaapeleita ja niiden kanssa yhteensopivia laitteita.*

(SFS 6001: 2018, s. 86.)

### **3.1.3 Dokumentointi sekä laite- ja johdinmerkinnät**

Standardissa viitataan hyvin lyhyesti tarpeelliseen dokumentaatioon. Tämän mukaan laitteistoon liittyvä dokumentointi on oltava liittyen asennus, käyttöönotto, käyttö, kunnossapito ja ympäristöasioihin. Samalla on lisäksi mainittu, että tarkemmin dokumentoinnin laajuudesta ja käytetystä kielestä sovitaan käyttäjän ja tilaajan välisesti. (SFS 6001: 2018, s. 49.)

Näiden laatimiseen liittyen viitataan standardeihin IEC 60617 ja IEC 61082-1, joista ensin mainittu kattaa sähkökaavioiden ja piirustusten piirrosmerkit ja jäljempänä mainitussa on yleiset säännöt ja ohjeet sähkötekniikan dokumenttien laatimiseksi. (SFS 6001: 2018, s. 49.)

Laitteiden ja johtimien merkinnästä määritetään yksiselitteisesti, että kaikki tärkeät osat laitteistossa on oltava merkittynä ja merkintöjen on oltava selkeälukuisia ja kestäviä. Tämä määritelmä on standardissa tarkka ja ohjeistuksessa määritetään merkinnät tehtäviksi aina yksittäisten johtimien tasolle saakka. (SFS 6001: 2018, s. 50.)

### **3.1.4 Suojausvaatimukset sähköisiä ilmiöitä vastaan**

Suojaukseen sähköisiä ilmiöitä vastaan määritetään, että sähkölaitteistossa on virheettömän ja turvallisen toiminnan takaamiseksi oltava valvontaan, suojaukseen ja säätöön liittyvät ohjauslaitteet. Määrityksen mukaan sähkölaitteiston suojauksen on oltava automaattisesti toimiva ja suojattava sekä laitteiston sisäisiä- että ulkoisia

vikoja vastaan. Tämän lisäksi on mainittu, että suojauksen on toimittava selektiivisesti. (SFS 6001: 2018, s. 81.)

Suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon sähkönjakelun muutostilat, kuten suurten moottoreiden käynnistystilanteet ja mahdolliset jälleenkytkennät. Näiden lisäksi on huomioitava käyttäjän määrittämät vaatimuksen käytettävyyteen liittyen. (SFS 6001: 2018, s. 27.)

Sähkölaitteistojen vaara- ja vikatilanteita ilmaisevien laitteiden indikoinnista standardissa on määritetty, että laitteiden on ilmaistava vikatilanteista selkeästi. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi koottuna yhteishälytyksenä, joka on havaittavissa valvomosta. (SFS 6001: 2018, s. 81.)

Suojausta vaativista sähköisistä ilmiöistä standardissa on listaus, jotka on otettava huomioon suojauksen suunnittelussa. Alla suoraan lainattuna tämä listaus:

- *ylivirta, oikosulku ja maasulku*
- *ylikuormitus ja lämpövaikutukset*
- *ylijännite*
- *alijännite*
- *ali- tai ylitaajuus*

(SFS 6001: 2018, s. 81.)

Oikosulkujen ja maasulkujen osalta standardi määrittää selkeästi millaiset toiminnallisuudet suojauksella tulee olla. Nämä ovat suoraan lainaten seuraavat:

*Laitteistot on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka poiskytkävät kolmivaiheiset ja kaksivaiheiset oikosulut.*

*Laitteistot on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka poiskytkävät tai ilmaisevat maasulun.*

(SFS 6001: 2018, s. 29.)

Alitaajuussuojauksen osalta standardissa viitataan mahdollisiin kansallisiin vaatimuksiin. Lisäksi on mainittu, että mikäli laitteistolla on oma tehoa syöttävä lähde, taajuussuojaukseen perustuva kuormien irrottaminen on harkinnanvaraista, ettei koko järjestelmän tehonsyöttö vaarannu taajuushäiriön seurauksena. (SFS 6001: 2018, s. 81.)

Yli- ja alijännitteiden osalta standardissa ohjeistetaan, että laitteiston mahdolliset käytönaikaiset yli- ja alijännitteet ja niiden vaikutukset on selvitettävä. Ylijännitesuojia on asennettava sellaisiin sijainteihin, joissa ylijännite voi ylittää laiteen jännitekestoisuuden ja alijännitesuojaus on puolestaan toteutettava tarvittaessa. Alijännitesuojauksen perusteena voi olla jonkin laitteen virheellinen toiminta tai rikkoutumisriski. (SFS 6001: 2018, s. 81.)

Kuten monessa muussakin kohtaa, myös suojauskoordinaation osalta standardissa on määritetty, että suojauskoordinaation selvityksen laajuudesta sopii laitteiston toimittaja ja käyttäjä keskenään. Standardissa ei esimerkiksi ohjeisteta erityisen tarkasti siihen, milloin tarvitaan varasuojauksia. Varasuojauksen tarpeellisuutta on standardin mukaan harkittava oikosulkusuojauksen osalta ja maasulkusuojauksen yhteydessä silloin, jos maasululle on poiskytkentä vaatimus. (SFS 6001: 2018, s. 81.)

### **3.1.5 Asennus**

Aiemmin mainittu viittaus laitteistokohtaisista standardeista koskee esimerkiksi tehdasvalmisteista kojeistoja. Täten tähän osuuteen on poimittu kohtia standardista IEC 62271-1, joka sisältää yleiset määritelmät yli 1 kV tehdasvalmisteisille kojeistoille. Poimintoja on rajattu suojareleusintoja ajatellen, sillä muutostyöt koskevat suurimmalta osin johdotuksia ja käytettyjä laitteita.

Standardin ei voida kuitenkaan sanoa sopivan yksiselitteisesti kaikkiin tapauksiin, sillä eri ikäisiä kojeistoja saattaa koskea oman aikakautensa standardit. Standardista on poimittu kuitenkin sellaisia kohtia, joiden voidaan olettaa olevan yleispäteviä.

Standardin IEC 62271-1 eri osa-alueita apu- ja ohjausjännitepiireihin sekä laitteisiin liittyen yhdistellen, on alle listattu ohjeistuksia, joiden voidaan sanoa olevan yleispäteviä asennuksiin liittyen:

- Komponenttien valinnassa on huomioitava ympäristöolosuhteet.
- Laitteet ja kojeet on asennettava kyseisen koje- tai laitevalmistajan ohjeiden mukaan.
- Asennettujen laitteiden laitemerkinnöistä vastaa valmistaja, merkintöjen on vastattava piirikaavioita. Mikäli laite on kotelostaan ulosvedettävää tyyppiä, laitemerkintä kiinnitetään kiinteään osaan.
- Johtimien valinnasta vastaa laitteiston valmistaja, mitoituksen suhteen täytyy huomioida esimerkiksi virtamuuntajien toisiotaakka ja jännitemuuntajien tapauksessa johtimien jännitehäviöt.
- Johtimien valinnassa on otettava huomioon vaadittu eristystaso, ja johtimiin mahdollisesti kohdistuvat mekaaniset rasitukset.
- Riviliittimien väliset jatkokset johtimissa ovat standardin mukaan kiellettyjä.
- Johtimet on reititettävä siten, että johtimet eivät altistu teräville reunoille. Erityisesti on kehoitettu ottamaan huomioon kojekaapin oveen tulevat johtimet ja niiden liikeradat.
- Johtimet eivät saa altistua tarpeettomasti kuumuudelle, mahdolliset lämmityselementeille on huomioitava johdinreitityksessä.
- Yksittäisten johtimien osalta johtimien tunnistaminen voidaan toteuttaa johtimien päissä sijaitsevin merkinnöin ja merkintöjen on vastattava piirikaavioita.
- Riviliittimet on valittava käytettyjen johtimien poikkipinta-alan mukaan. (IEC 62271-1: 2007+A1: 2011, s. 44 – 47.)

### **3.1.6 Käyttöönottotarkastukset**

Standardin SFS 6001 velvoittavassa liitteessä NA toistetaan laissa säädetty määritelmä suurjänniteasennuksien muutos- ja laajennustöiden

käyttöönottotarkastuksesta. Liitteessä tarkennetaan, että laitteisto tarkistetaan laitestandardeihin ja laitemerkintöihin sekä laitteiston mukana toimitettuihin dokumentteihin perustuen. (SFS 6001: 2018, s. 146.)

Suojareleusintoja koskevat muutokset liittyvät lähinnä johdotuksiin sekä mahdollisiin apureleiden tai rajakytkimien lisäyksiin. Tällöin dokumenttina muutos- tai laajennustyössä voidaan tulkita toimivan toteutuksesta sovittujen asiakirjojen lisäksi piirikaaviot, sillä näiden perusteella tarkistetaan tehdyt kytkennät ja merkinnät asennuksen jälkeen.

Standardissa IEC 62271-1 on myös ohjeita yli 1 kV:n kojeistojen käyttöönottoon ja testaukseen liittyen. Rutiinitestausta standardissa IEC 62271-1 käsittelevän osuuden voidaan katsoa olevan soveltuvin osin sopiva suojareleusintojen näkökulmasta. Tämä kattaa seuraavat osa-alueet: apu- ja ohjauspiirien visuaalinen tarkistus, piirikaavioiden tarkistus, toiminnallinen testaus sekä jännitelujuustestaus. (IEC 62271-1: 2007+A1: 2011, s. 88 – 89.)

Myös SFS 6001 standardissa on määritetty tarkastuksista ja testauksista. Määritelmän mukaan sovellettavista testausstandardeista ja asennuksen sekä käyttöönoton aikaisten testien vaatimuksista sopivat tilaaja ja toimittaja keskenään. Standardin mukaan vaatimuksienmukaisuus voidaan todeta visuaalisella tarkistuksella, mittauksin ja käyttökokeiden avulla. (SFS 6001: 2018, s. 98 – 99.)

Käytössä oleviin laitteistoihin ja näiden ohjaus- ja maadoituspiireihin liittyviin mittauksiin sekä testauksiin sisältyy kuitenkin huomattavia riskejä. Uusittaessa suoja-relettä, on usein vain työn alla oleva kenno poissa käytöstä. Tällöin suoritettaessa esimerkiksi jännitelujuustestauksia on hyvin haastavaa rajata vain tarvittava osuus testattavaksi ja täten varmistua, että muu käyttö ei häiriinny.

Tämän vuoksi käyttöönottovaiheen testauksista ja etenkin jännitelujuuden toteamisesta kysyttiin Tukesin asiantuntijalta. Asiantuntijan vastaus oli, että laitekohtaisten standardien ohjeita on noudatettava siltä osin, kuin se tilanne huomioon ottaen on mahdollista, mutta laitteiston käyttöturvallisuudesta tulee varmistua. (Tukes 2020)

## 4 TEOLLISUUDEN KESKIJÄNNITEVERKKO

Teollisuusverkoille on tunnusomaista, että maantieteellisesti pienellä alueella siirretään ja kulutetaan suuria tehoja. Suurien tehojen vuoksi jakelu- tai kantaverkkoon liityntäpiste on yleensä vahva, eli puhutaan jäykästä syöttävästä verkosta. Suurien tehojen vuoksi myös päämuuntajakoot ovat suuria ja joissain tapauksissa teollisuudella voi olla myös omaa sähköntuotantoa. Jäykkä syöttävä verkko, suuritehoiset päämuuntajat ja mahdollinen oma sähköntuotanto johtavat suuriin oikosulkutehoihin ja -virtoihin. Suuret oikosulkuvirrat johtavat laitteistojen ja kaapeleiden mitoituksessa suuriin poikkipinta-aloihin. (Willman 2020a.)

### 4.1 Jännitetasot

Yleisimmät jännitetasot Suomen teollisuusverkoissa ovat 6 kV, 10 kV ja 20 kV. Näistä 6 ja 10 kV ovat yleisiä siksi, että kyseisille jännitetasoille on saatavissa suuria keskijännitemoottoreita. Jännitetasolla on vaikutusta laitteiden eristykseen ja ilmajälkeihin. Suuremmat jännitetasot mahdollistavat suurempien tehojen siirron mitoitukseltaan pienemmällä kiskojen ja kaapeleiden poikkipinta-aloilla. (Willman 2020a.)

### 4.2 Maadoitusolosuhteet

SFS 6001 liitteessä NA on todettu, että Suomessa tyypillisiä alueita laajalle maadoitusjärjestelmälle ovat esimerkiksi teollisuusalueet. Saman standardin opastavassa liitteessä O kuitenkin todetaan, että tällaisten alueiden tunnistamiseen ole yksiselitteisiä sääntöjä. (SFS 6001:2018, s. 134, 149.)

Tarkka määritelmä laajasta maadoitusjärjestelmästä ja sen toteamisesta on SFS 6001:stä suoraan lainaten seuraava:

*Yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny.*

*HUOM. 1 Tällaiset järjestelmät mahdollistavat maasulkuvirtojen jakautumisen siten, että paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalin nousu pienenee. Järjestelmän voidaan sanoa muodostavan näennäisen tasapotentiaalipinnan.*

*HUOM. 2 Laajan maadoitusjärjestelmän olemassaolo voidaan todeta mitauksin tai laskennallisesti tyypillisten järjestelmien tapauksessa. Tyypillisiä esimerkkejä laajasta maadoitusjärjestelmästä ovat kaupunkien keskustat sekä kaupunki- ja teollisuusalueet, joilla on laajalle alueelle rakennettu suur- ja pienjännitemaadoitus*

(SFS 6001:2018, s. 20.)

### **4.3 Verkon tähtipisteen maadoitustavat**

Verkon tähtipisteen maadoitustavalla on suurin yksittäinen merkitys verkon käyttöön yksivaiheisen maasulkuvian aikana. Maadoitustavalla voidaan vaikuttaa vian aikana muun muassa verkon toimintakykyyn, ylijännitteisiin sekä kosketusjännitteisiin. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 11.)

Verkon tähtipiste voi olla joko maasta erotettu, maadoitettu, resistanssin kautta maadoitettu tai kuristimen eli suuren impedanssin kautta maadoitettu. Valintakriteerinä näiden kesken toimii maadoitusolosuhteet ja verkon toiminnalle asetetut vaatimukset. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 9 – 10.)

Suomessa huonojen maadoitusolosuhteiden vuoksi jakeluverkkopuolella on käytössä pääsääntöisesti sekä maasta erotettuja- että kuristimen kautta maadoitettuja verkkoja. Maasulkuvirtojen suuruus vaikuttaa tähtipisteen maadoitustavan valintaan, sillä pyrkimys on pitää maasulkuvirrat verkossa tasolla, jolla ne eivät aiheuta hengenvaarallisia kosketusjännitteitä. Maasulkuvirtojen suuruusluokkaan puolestaan vaikuttaa päämuuntajan taakse galvaanisesti yhteen kytkeytyvän verkon laajuus ja se, onko kyseessä avojohto- vai maakaapeliverkko. Jäljempänä mainitun vaikutus perustuu siihen, että avojohtoverkoissa maasulkuvirtaa muodostuu keskimäärin noin 0,0067 A / km, siinä missä maakaapeloiduissa verkoissa vastaava suuruusluokka on 2,7 - 4 A / km. (Lakervi & Partanen 2008, s. 182 – 186.)

Kotimaisen teollisuuden tapauksessa puhutaan puolestaan lähes poikkeuksetta maakaapeloiduista verkoista. Tähtipisteen maadoitustavan osalta verkot ovat useissa tapauksessa maasta erotettuja, joskin myös tähtipisteestä vastuksen kautta maadoitettuja verkkoja teollisuudesta löytyy. (Willman 2020a.)

Poikkeuksen tähän tuo luonnollisesti se, jos teollisuusasiakas on liitetty esimerkiksi paikallisen jakeluverkkotoimijan 20 kV jakeluverkkoon ilman välimuuntajaa. Tällöin tähtipisteen maadoitustapa riippuu jakeluverkon tähtipisteen maadoitustavasta ja tällöin myös sammutettu tähtipiste on mahdollinen.

#### **4.3.1 Kuristimen kautta maadoitettu verkko**

Kuristimen kautta maadoitettua verkkoa kutsutaan myös sammutetuksi verkoksi. Ideana sammutuksessa on, että kuristimen tuottama induktiivinen virta kompensoi verkon maakapasitanssien tuottaman kapasitiivisen virran ja maasulkuvirrat pienevät. (Lakervi & Partanen 2008, s. 184 – 185.)

#### **4.3.2 Maasta erotettu verkko**

Maasta erotetuilla verkoilla ei ole normaalitilassaan galvaanista yhteyttä maapotentiaaliin (Mörsky 1992, s. 298). Maasta erotettujen verkkojen suurimmaksi eduksi Hakola ja Lehtonen (1995, s. 15) ovat maininneet pienet vikavirrat ja etteivät yksittäiset viat vaadi syötön katkaisua. Jälkimmäisestä on mainittu olevan etua etenkin teollisuuden tapauksessa, jossa keskeytymättömällä sähkönjakelulla on suuri merkitys.

#### **4.3.3 Resistanssin kautta maadoitetut verkot**

Resistanssin kautta maadoitetulla tähtipisteellä voi olla useampikin tarkoitus. Yksi syy voi olla maasulkuvirtojen kasvattaminen suojauksen toteuttamiseksi, mutta tähtipisteen maadoitusresistanssilla voi olla myös ylijännitteiden rajaamiseen liittyvä tarkoitus. Mitoittamalla esimerkiksi maadoitusvastus siten, että vastuksen muodostama osuus maasulkuvirrasta on suurempi kuin verkon tuottamat kapasitiiviset maasulkuvirrat, voidaan rajata maasulkutilanteen aikaisia transienttiylijännitteitä. Tätä

metodia on käytetty teollisuudessa ja voimalaitoksilla rajaamaan suurien koneiden jänniterasituksia. Tällöin vastuksen mitoituksessa on huomioitava, ettei maasulkuvirta itse aiheuta lämpenemää ja vaurioita koneille. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 9, 20 – 21.)

Tyypillisesti pienen resistanssin kautta maadoitettujen verkkojen maasulkuvirta on 50 - 800 A. Verkon tähtipiste voidaan maadoittaa suuren resistanssin kautta, mikäli verkon kapasitiivinen maasulkuvirta ei ole joitain kymmeniä ampeereja suurempi. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 21 – 22.)

Tähtipisteestään suuren resistanssin kautta maadoitettuja verkkoja on Hakolan ja Lehtosen (1995, s. 21) mukaan käytössä lähinnä teollisuuden keski- ja suurjännitejärjestelmissä, sillä näiden etu on, etteivät yksittäiset maasulkuviat aiheuta sähkönjakelun keskeytystä.

#### **4.4 Vikatilanteiden kokonaisvaikutukset**

Teollisuudessa rinnakkaiset johtolähdöt saattavat olla suoraan samaan prosessiin, mutta eri prosessivaiheeseen liittyviä johtolähtöjä. Täten yksittäisen lähdön poiskykytyminen verkosta saattaa johtaa häiriön etenemiseen prosessin kautta. Tästä näkökulmasta pohtien teollisuudessa selektiiviselle suojaukselle muodostuu myös ulottuvuus, jossa selektiivisyyttä suunniteltaessa on pohdittava sähkönjakelun häiriötilanteiden kokonaisvaikutuksia. (Willman 2020a.)

## 5 SUOJAUSTA VAATIVAT SÄHKÖISET ILMIÖT

Tässä kappaleessa esitellään, kuinka suojausta vaativat sähköiset ilmiöt muodostuvat verkossa ja kuinka ne voidaan tunnistaa. Lisäksi käsitellään suppeasti mitkä ovat näiden yleisimmät suojausperiaatteet. Kappaleessa esitetään myös perustason laskenta maasulkuvirtojen ja oikosulkuvirtojen osalta.

### 5.1 Oikosulku

Teollisuusverkot Suomessa jakautuvat aiemmissä kappaleissa esitellyn mukaisesti yleisesti joko maasta erotettuihin tai suuren resistanssin kautta maadoitettuihin verkkoihin. Näissä verkkotyypeissä oikosulkutilanteet ovat joko 2- tai 3-vaiheisia oikosulkuja.

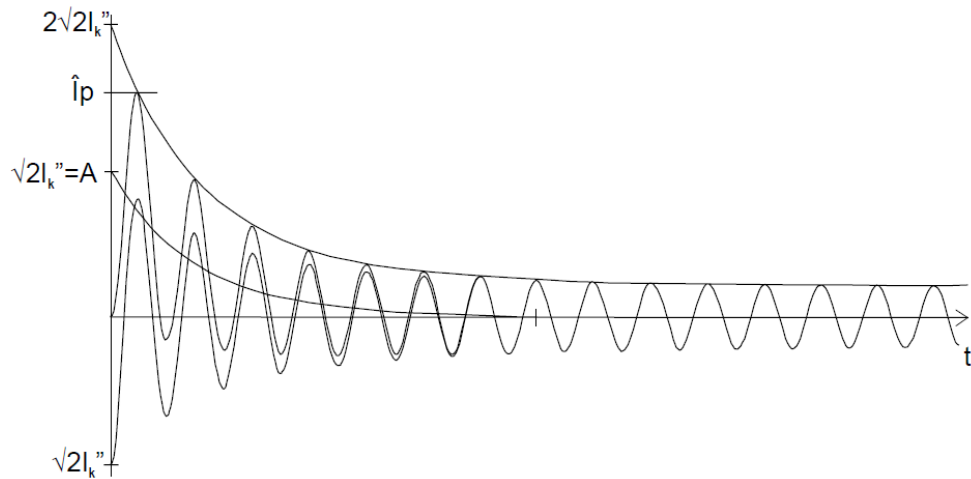
Oikosulkutilanne aiheuttaa sekä dynaamisia että termisiä rasituksia, mitkä verkon eri osien ja laitteiden on kestettävä. Verkon eri osissa vaikuttavat oikosulkuvirrat ovat täten merkittävä ohjaava tekijä laitteiston mitoituksessa ja oikosulkusuojausten suunnittelussa. Teollisuudessa johto-osuukien pituudet ovat tyypillisesti lyhyitä. Oikosulkuvirran suuruuteen vikapisteestä katsottuna vaikuttaa merkittävimmin syöttävän verkon vahvuus ja päämuuntajan koko sekä kulutuksen puolelta samaan verkkoon kytketyt pyörivät sähkökoneet. (Huotari & Partanen 1998, s. 1.)

Työn kannalta oikosulkusuojausten keskeisimmät näkökulmat liittyvät teollisuuden keskijännitejakelun oikosulkusuojaukseen. Verkon oikosulkuvirrat muodostavat suojausalueiden mahdollisille asetteluille omat reunaehdot.

#### 5.1.1 Oikosulkuvirran kehittyminen ajan suhteen

Oikosulkuvirran suuruus muuttuu ajan suhteen. Oikosulkuvirran vaiheista käytetään termejä alkuoikosulkuvirta  $I_k''$ , muutostilanoikosulkuvirta  $I_k'$  ja jatkuvan tilan oikosulkuvirta  $I_k$ . Nämä ovat oikosulkuvirtojen tehollisarvoja eri ajanhetkillä ja näiden muutosnopeus riippuu oikosulkutehoa syöttävien koneiden oikosulkureaktanssien muutosnopeudesta. Dynaamiseen mitoitukseen liittyvä sysäyoikosulkuvirta  $\hat{i}_p$  on puolestaan alkuoikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, johon

sisältyy vaimeneva tasavirtakomponentti  $i_{dc}$ . Tätä kuvaava vaimeneva käyrä on merkitty kuvaan 5.1 symbolilla A. (ABB 2000, s. 197.)



Kuva 5.1 Oikosulkuvirran käyttäytyminen ajan suhteen. (Lainattu lähteestä: ABB 2000, s. 197.)

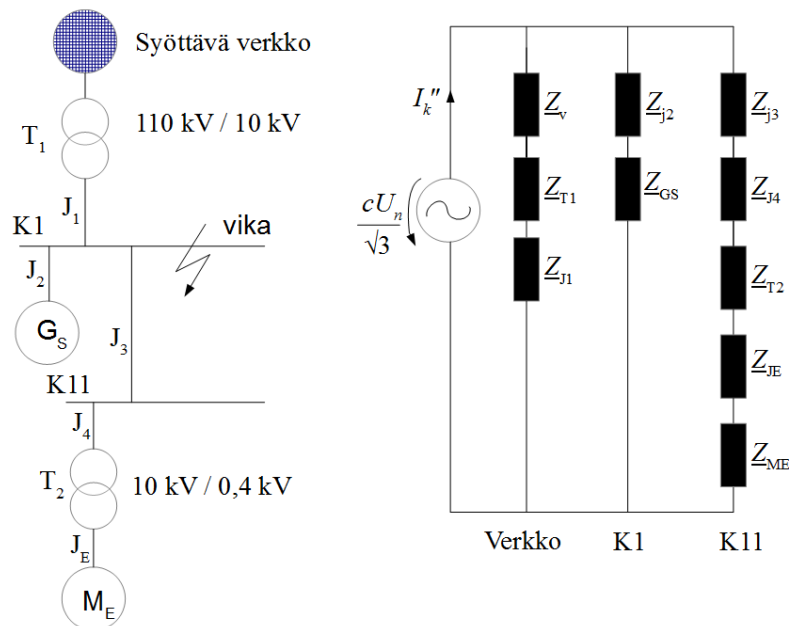
### 5.1.2 Thevenin laskentamenetelmä

Thevenin sijaiskytkennällä voidaan laskea niin 1-, 2-, kuin 3-vaiheisia vikavirtoja. Vikatyypin mukaan kuvataan verkon kytkennät komponenttiverkoilla, jotka kuvaavat vikavirtapiirin kytkeytymistä vikatilanteessa. Komponenttiverkot muodostuvat kolmesta laskennallisesta verkosta, jotka ovat myötäverkko-, vastaverkko- ja nollaverkko. 3-vaiheisia symmetrisiä vikoja laskettaessa vikavirtojen laskentaan riittää pelkkä myötäverkon mallinnus. 1- ja 2-vaiheisten vikojen tapauksessa on mallinnettava lisäksi vasta- ja nollaverkko. (ABB 2000, s. 197 – 198.)

Lyhyesti kuvailtuna Thevenin laskentamenetelmässä verkko mallinnetaan yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Myötäverkossa vikapaikkaan sijoitetaan ekvivalenttinen jännitelähde, jonka jännite vastaa vikapaikan jännitettä. Kaikki virtapiirin komponentit, niin oikosulkuvirtaa syöttävät, kuin sitä rajoittavat mallinnetaan oikosulkuimpedansseilla. Laskenta suoritetaan oikosulun alkua vastaavilla impedanssin arvoilla. Sekä katkaisuhetkeä, että termisiä vaikutuksia vastaavat virrat saadaan

erilaisilla kertoimilla. (ABB 2000, s. 197, 200 – 203; Huotari & Partanen 1998, s. 9, 19 – 20.)

Kuvassa 5.2 on esitetty yksinkertainen malli Thevenin sijaiskytkennän muodostamisesta 3-vaiheisen symmetrisen vian osalta.



Kuva 5.2 Yksinkertainen sähköverkkomalli ja sitä vastaava Thevenin sijaiskytkentä, kun 3-vaiheinen oikosulku on kojeiston K1 kiskostolla.

Kuvassa  $G_S$  on tahtigeneraattori.  $M_E$  on ekvivalenttinen epätahtimoottori, joka kuvaa ryhmän pienempiä epätahtikoneita yhtenä ekvivalenttisenä moottorina. Ekvivalenttiseen moottorin käyttöön laskennassa palataan myöhemmin kappaleessa 5.1.4.

### 5.1.3 Suojauksen kannalta merkittävimmät oikosulkuvirrat

Oikosulkusuojauksen kannalta merkittävimmät oikosulkuvirrat ovat 3-vaiheinen maksimioikosulkuvirta ja 2-vaiheinen minimioikosulkuvirta. Suurimman 3-vaiheisen oikosulkuvirran perusteella tarkistetaan kytkevien laitteiden mitoitus sekä verkon eri osien terminen oikosulkukestävyys. Pienimmän 2-vaiheisen

oikosulkuvirran perusteella tarkastetaan, että suojaus toimii kyseisessä tilanteessa. (Huotari & Partanen 1998, s. 10.)

3- ja 2-vaiheiset oikosulkuvirrat  $I_{k3}$  ja  $I_{k2}$  voidaan laskea seuraavista yhtälöistä. (Huotari & Partanen 1998, s. 10.)

$$I_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} \quad (5.1)$$

$$I_{k2} = \frac{cU_n}{Z_1 + Z_2} \quad (5.2)$$

$U_n$  = nimellisjännite vikapaikassa

$c$  = jännitekerroin taulukosta 5.1

$Z_1$  = myötäverkon impedanssi

$Z_2$  = vastaverkon impedanssi

Aiemmin kuvassa 5.2 ja yhtälössä 5.1 esiintyneelle jännitekertoimelle  $c$  käytetään taulukon 5.1 mukaisia kertoimia laskennassa, kertoimella huomioidaan eroavaisuus sähkömotoristen voimien ja nimellisjännitteen välillä. (Huotari & Partanen 1999, s. 9.)

Taulukko 5.1 Jännitekerroin oikosulkuvirran laskentaan, standardin IEC 60909 ja VDE 0102 mukaan. (Lähteiden mukaisesti: ABB 2000, s. 198; Huotari & Partanen 1998, s. 9.)

Nimellisjännite $U_n$	Suurimmalle oikosulkuvirralle $c_{\max}$	Pienimmälle oikosulkuvirralle $c_{\min}$
Pienjännite 100 V- 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

Kolmivaiheista maksimioikosulkuvirtaa laskiessa verkon kytkentätila valitaan siten, että se tuottaa suurimman oikosulkuvirran. Laskettaessa käytetään taulukon 5.1 kertoimesta kyseistä jännitetasoa vastaavaa kerrointa  $c_{\max}$ . (ABB 2000, s. 205.)

2-vaiheista minimioikosulkuvirtaa laskiessa verkon kytkentätila valitaan sen mukaan, joka tuottaa pienimmän oikosulkuvirran. Laskennassa oletetaan teollisuusverkkoon kytketyt moottorit pysähtyneiksi, kaapelit maksimi käyttölämpötilaansa ja käytetään taulukon 5.1 kertoimista kyseistä jännitetasoa vastaavaa kerrointa  $c_{\min}$ . (ABB 2000, s. 205.)

Impedanssien ollessa muuntajilla, johdoilla sekä muilla ei pyörivillä sähkökoneilla yhtä suuret sekä myötä- että vastaverkossa. Täten 2-vaiheista oikosulkuvirtaa laskiessa voidaan tehdä merkintä  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ . Tällöin 2-vaiheisen oikosulkuvirran laskennassa voidaan käyttää yhtälön 5.2 sijaan, seuraavaa pelkistettyä yhtälöä. (ABB 2000, s. 198.)

$$I_{k2} = \frac{cU_n}{2\underline{Z}_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k3} \quad (5.3)$$

Laskennassa oletetaan 2-vaiheinen oikosulkuvirta pienemmäksi, kuin 3-vaiheinen vikavirta. Huotari ja Partanen (1998, s.11) ovat todenneet, että käytännössä näin myös on, mikäli oikosulku kytketään pois ennen kuin oikosulkuvirta saavuttaa jatkuvan tilan arvon.

#### 5.1.4 Oikosulkupiirin impedanssit

Tässä kappaleessa esitetään oikosulkupiirin impedanssien laskenta myötäverkon impedanssien osalta. Laskettaessa oikosulkupiirin impedansseja, täytyy nämä laskea sille jännitetasolle, jossa vikapaikka sijaitsee.

#### Syöttävä verkko

Syöttävän verkon impedanssi  $\underline{Z}_{kv}$  lasketaan liityntäpisteen verkonhaltijan ilmoittamasta oikosulkutehosta tai oikosulkuvirrasta yhtälöllä 5.4. (Huotari & Partanen 1998, s. 15.)

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} \quad (5.4)$$

- $U_n$  = nimellisjännite syöttävässä verkossa  
 $c$  = jännitekerroin taulukosta 5.1  
 $S_{kv}''$  = syöttävän verkon alkuoikosulkuteho  
 $I_{kv}''$  = syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

Jos syöttävä verkko on avojohtoverkko, jonka nimellisjännite on yli 35 kV, voidaan impedanssin olettaa muodostuvan kokonaan reaktanssista, toisin sanoen  $Z_{kv} = X_{kv}$ . Mikäli edellä esitelty ehto ei täyty voidaan syöttävän verkon resistanssi  $R_{kv}$  ja reaktanssi  $X_{kv}$  laskea seuraavista yhtälöistä. (Huotari & Partanen 1998, s. 16.)

$$X_{kv} = 0,995 * Z_{kv} \quad (5.5)$$

$$R_{kv} = 0,1 * X_{kv} \quad (5.6)$$

### Kaksikäämimuuntaja sekä kuristin

Kaksikäämiselle muuntajalle annetaan kilpiarvoissa joko oikosulkujännite  $u_k$  ja resistiivinen oikosulkujännite  $u_R$  suhteellisina arvoina. Toisena vaihtoehtona kilpiarvoissa saatetaan ilmoittaa suhteellinen oikosulkuimpedanssi  $z_k$  sekä muuntajan kokonaispätötehohäviöt  $P_{kn}$  nimellisvirralla. Näiden avulla oikosulkusuureet voidaan laskea yhtälöistä 5.7 ja 5.8. Kuristimet voidaan laskea kuten muuntajat, joiden muuntosuhde on 1. (Huotari & Partanen 1998, s. 18; Korpinen 1998, kappale 9.)

$$Z_{kt} = \frac{u_k U_n^2}{100 S_n} = \frac{z_k U_n^2}{100 S_n} \quad (5.7)$$

$$R_{kt} = \frac{u_r U_n^2}{100 S_n} = \frac{P_{kn} U_n^2}{S_n^2} = \frac{P_{kn}}{3I_{nt}^2} \quad (5.8)$$

$$X_{kt} = \sqrt{Z_{kt}^2 - R_{kt}^2} \quad (5.9)$$

- $Z_{kt}$  = muuntajan oikosulkuimpedanssi  
 $X_{kt}$  = muuntajan oikosulkureaktanssi  
 $R_{kt}$  = muuntajan oikosulkuresistanssi

$$U_{nt} = \text{muuntajan nimellinen pääjännite}$$

$$I_{nt} = \text{muuntajan nimellisvirta}$$

### **Kaapelit**

Kaapelivalmistajat ilmoittavat kaapeleille tasavirtaresistanssin +20 °C lämpötilassa. Laskettaessa johtimien resistansseja käytetään laskennassa +40 °C lämpötilaa vastaavaa resistanssin arvoa. Tähän voidaan käyttää kerrointa 1,08 ilmoitettuihin +20 °C resistanssiarvoihin verrattuna. (Lakervi & Partanen 2008, s. 30.)

Kaapelivalmistajat ilmoittavat resistanssiarvot tyypillisesti  $\Omega / \text{km}$  muodossa, josta voidaan laskea kaapelin resistanssi, kun kaapelin pituus tiedetään. Mikäli kaapelille on ilmoitettu myös induktanssi vaihetta kohti yksikössä  $\text{H} / \text{km}$ , voidaan reaktanssi laskea induktiivisen reaktanssin yhtälöllä ja kaapelin pituuden perusteella. Kaapelin resistanssi ja reaktanssi saadaan laskettua täten seuraavista yhtälöistä. (Huotari & Partanen 1998; s. 20, Valtanen 2016, s. 1024.)

$$R_j = r_j * l_j \quad (5.10)$$

$$X_j = \omega L_j * l_j \quad (5.11)$$

$R_j$  = kaapelin resistanssi

$X_j$  = kaapelin reaktanssi

$r_j$  = kaapelin resistanssi  $\Omega / \text{km}$

$\omega$  =  $2\pi f$ , jossa  $f = 50 \text{ Hz}$

$L_j$  = kaapelin induktanssi vaihetta kohti  $\text{H} / \text{km}$

$l_j$  = kaapelin pituus

### **Tahtikoneet**

Tässä tahtikoneilla tarkoitetaan joko tahtigeneraattoria tai tahtimoottoria. Laskettaessa suurinta oikosulkuvirtaa, lasketaan reaktanssi alkuoikosulkuvirtaa vastaavalla alkureaktanssilla. Sama kaava soveltuu kuitenkin myös muutostilan ja jatkuvan tilan oikosulkureaktanssin laskentaan käytettäessä näitä ajanhetkiä vastaavia arvoja.

Suhteelliset reaktanssiarvot ilmoittaa tahtikoneen valmistaja. Tahtikoneiden reaktanssi voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä. (Huotari & Partanen 1998, s. 17.)

$$X''_{dTK} = \frac{x''_d U_{nTK}^2}{100 S_{ntk}} \quad (5.12)$$

$X''_{dTK}$  = tahtikoneen alkuoikosulkureaktanssi

$x''_d$  = tahtikoneen suhteellinen alkureaktanssi

$U_{nTK}$  = tahtikoneen nimellisjännite

$S_{nTK}$  = tahtikoneen nimellisteho

Myöhemmin laskennassa esiintyvän sysäyskertoimen määrittämiseksi generaattorin resistansseista voidaan käyttää taulukon 5.2 mukaisia fiktiivisiä resistanssin arvoja  $R_{dTK}$ . Näin ensimmäisen puolijakson aikana tapahtuva tahtikoneen oikosulkuvirran vaimeneminen voidaan ottaa huomioon. (Huotari & Partanen 1998, s.17)

Taulukko 5.2 Fiktiiviset resistanssiarvot tahtikoneille (Lähteen mukaisesti: Huotari & Partanen 1998, s. 17).

Nimellisjännite [kV]	Nimellisteho [MVA]	$R_{dTK}/X''_{dTK}$
> 1	$\geq 100$	0,05
> 1	< 100	0,07
$\leq 1$	kaikki	0,15

Käytettäessä ekvivalenttista jännitelähdettä  $cU_n$  täytyy alku- ja sysäysoikosulkuvirtoja tahtikoneelle laskiessa oikosulkusuureet kertoa korjauskertoimella  $K_G$ . Tämä saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä. (Huotari & Partanen 1998, s. 17.)

$$K_G = \frac{U}{U_{nTK}} \frac{c_{max}}{1+x''_d \sin \varphi_{nTK}} \quad (5.13)$$

$U$  = verkon nimellinen pääjännite

$\varphi_{nTK}$  = tahtikoneen nimellisvirran ja nimellisjännitteen välinen kulma

Näiden lisäksi lähdemateriaalina käytetyssä TTT-käsikirjassa on lisäksi esitelty laskentakaava, jolla voidaan laskea tahtikoneen ja muuntajan muodostaman

kombinaation oikosulkuimpedanssi. Tämän osalta viitataan kuitenkin vain lähde-  
materiaaliin. (ABB 2000, s. 202.)

### Epätahtikoneet

Vaikka epätahtikoneet eivät kokoluokaltaan ole yhtä suuria kuin tahtikoneet, muodostavat ne määränsä vuoksi merkittävän osan teollisuuden kulutuksesta. Symmetrisissä vioissa epätahtikoneiden muodostamalla oikosulkuvirroilla on vaikutusta alku-, sysäys- ja katkaisuhetken oikosulkuvirtaan. Epäsymmetrisissä vioissa oikosulkuvirralla on vaikutusta myös jatkuvan tilan oikosulkuvirtoihin. Epätahtikoneen oikosulkuimpedanssi  $Z_m$  saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä. (ABB 2000, s. 202 – 203; Huotari & Partanen 1998, s. 19.)

$$Z_m = \frac{1}{I_{sm}/I_{nm}} \frac{U_{nm}^2}{S_{nm}} \quad (5.14)$$

$U_{nm}$  moottorin nimellinen pääjännite

$I_{nm}$  moottorin nimellisvirta

$I_{sm}$  moottorin käynnistysvirta

$S_{nm}$  epätahtimoottorin nimellinen näennäisteho

Epätahtikoneen resistanssi  $R_m$  ja reaktanssi  $X_m$  voidaan muodostaa oikosulkuimpedanssista taulukon 5.3 perusteella. Taulukossa  $P_{nm}$  tarkoittaa epätahtimoottorin nimellistä pätötehoa ja  $p$  moottorin napaparilukua.

Taulukko 5.3 Taulukoidut  $R_m/X_m$  ja  $X_m/Z_m$  suhteet epätahtimoottoreille. (Lähteen mukaisesti: Huotari & Partanen 1998, s. 19.)

Nimellisjännite [kV]	$P_{nm} / p$ /MW	$R_m / X_m$	$X_m / Z_m$
$\geq 1$	$\geq 1$	0,10	0,995
$\geq 1$	$< 1$	0,15	0,989
$< 1$	kaikki	0,42	0,922

Yksittäiset suurjännitemoottorit mallinnetaan yleensä kukin erikseen. Pienjännitemoottoreita on sen sijaan tyypillisesti niin paljon, että näiden osalta on käytännöllisintä muodostaa suuremmista moottoriryhmistä ekvivalenttimoottorit muuntajittain. Myös ekvivalenttisen moottorin oikosulkuimpedanssi voidaan laskea yhtälöstä

5.14. Tällöin tehoksi kirjataan mallinnettavan moottoriryhmän summattu nimellisteho ja  $I_{sm} / I_{nm}$  suhteena voidaan käyttää arvoa 5. (ABB 2000, s. 203; Huotari & Partanen 1998, s. 19 – 20.)

Moottoriryhmiä tai yksittäisiä moottoreita ei tarvitse huomioida laskelmissa, mikäli moottorit kytkeytyvät vikaantuneeseen verkon osaan muuntajan kautta ja seuraava epäyhtälö toteutuu. (Huotari & Partanen 1998, s. 20.)

$$\frac{\sum P_{nm}}{\sum S_{nt}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \sum S_{nt}}{S_k} - 0,3 \right|} \quad (5.15)$$

$\sum P_{nm}$  = moottoriryhmän yhteenlaskettu nimellispäteho

$\sum S_{nt}$  = moottoriryhmiä syöttävien muuntajien yhteenlaskettu nimellinen näennäisteho

$c$  = jännitekerroin taulukosta 5.1

$S_k$  = alkuoikosulkuteho vikapaikassa ilman laskettavaa moottoriryhmää

### Muut komponentit

Mikäli verkossa on esimerkiksi runsaasti suuntaajakäyttöjä, jotka pystyvät syöttämään tehoa verkon suuntaan, täytyisi nämä huomioida laskennassa. Lämmitys ja valaistuskuormat voidaan jättää pienen vaikutuksensa vuoksi huomiotta. (Huotari & Partanen 1998, s. 21 – 22.)

#### 5.1.5 Katkaisuvirta

Oikosulkuvirran vaihtokomponentin tehollisarvo, jonka suojauksen toteuttava laite, usein katkaisija kokee navoillaan katkaisuhetken alussa, käytetään nimitystä katkaisuvirta  $I_b$ . Syöttäväverkko on usein miten niin jäykkä, että katkaisuvirran osalta voidaan olettaa tältä osin oikosulkuvirran pysyvän muuttumattomana. Täten muuttuvia tekijöitä katkaisuvirran suhteen ovat käytännössä pyörivät sähkökoneet. Näistä tahtikoneiden katkaisuvirta voidaan laskea yhtälön 5.16 avulla. (Huotari & Partanen 1998, s. 26.)

$$I_b = \mu I''_{\text{KTK}} \quad (5.16)$$

$\mu$  = katkaisukerroin

$I''_{\text{KTK}}$  = tahtikoneen syöttämä alkuoikosulkuvirta

Katkaisukertoimeen vaikuttaa laukaisuviive. Katkaisukerroin voidaan laskea eri viiveille seuraavista yhtälöistä. Yhtälöissä  $I_{\text{nTK}}$  on tahtikoneen nimellisvirta ja  $t_{\text{min}}$  on katkaisuviive. (Huotari & Partanen 1998, s. 27.)

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \frac{I''_{\text{KTK}}}{I_{\text{nTK}}}}, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,02 \text{ s} \quad (5.17)$$

$$\mu = 0,71 + 0,516e^{-0,30 \frac{I''_{\text{KTK}}}{I_{\text{nTK}}}}, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,05 \text{ s} \quad (5.18)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \frac{I''_{\text{KTK}}}{I_{\text{nTK}}}}, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,1 \text{ s} \quad (5.19)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38 \frac{I''_{\text{KTK}}}{I_{\text{nTK}}}}, \quad \text{kun } t_{\text{min}} \geq 0,25 \text{ s} \quad (5.20)$$

Mikäli tahtikoneen alkuoikosulkuvirran ja nimellisvirran suhde  $I''_{\text{KTK}}/I_{\text{nTK}}$  on 2 tai yli, katkaisukerroin  $\mu$  arvona laskennassa käytetään laukaisuviiveestä riippumatta arvoa 1. (Huotari & Partanen 1998, s. 27.)

Epätahtikoneiden katkaisuvirta saadaan vastaavasti seuraavasta yhtälöstä (Huotari & Partanen 1998, s. 28).

$$I_b = \mu q I''_k \quad (5.21)$$

Yhtälön kerroin  $\mu$  saadaan yhtälöistä 5.17 – 5.20 ja kerroin  $q$  voidaan vastaavasti laskea eri katkaisuviiveille seuraavista yhtälöistä. Yhtälöissä  $m$  on nimellinen pätöteho moottorin napaparia kohden. (Huotari & Partanen 1998, s. 28.)

$$q = 1,03 + 0,12 \ln m, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,02 \text{ s} \quad (5.22)$$

$$q = 0,79 + 0,12 \ln m, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,05 \text{ s} \quad (5.23)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln m, \quad \text{kun } t_{\text{min}} = 0,1 \text{ s} \quad (5.24)$$

$$q = 0,26 + 0,12 \ln m, \quad \text{kun } t_{\text{min}} \geq 0,25 \text{ s} \quad (5.25)$$

Mikäli kertoimen  $q$  laskennallinen arvo saavuttaa suuremman arvon, kuin 1, käytetään katkaisuvirtaa laskiessa kertoimelle arvoa 1 (Huotari & Partanen 1998, s. 28).

Mikäli vikapaikkaa syöttää useampi lähde, voidaan katkaisuoikosulkuvirta laskea seuraavien yhtälöiden avulla (Huotari & Partanen 1998, s. 28 - 29).

$$I_b = \mu_k I_k'' \quad (5.26)$$

$$\mu_k = \frac{\sum U_{ni} \mu_i I_{ki}''}{U_n I_k''} \quad (5.27)$$

$U_{ni}$  = vikapaikkaa syöttävän lähteen  $i$  nimellisjännite

$\mu_i$  = vikapaikkaa syöttävän lähteen  $i$  katkaisukerroin

$I_{ki}''$  = vikapaikkaa syöttävän lähteen  $i$  alkuoikosulkuvirta

$I_k''$  = vikapaikan alkuoikosulkuvirta

### 5.1.6 Oikosulkuvirran terminen vaikutus

Oikosulkuvirran terminen vaikutus on yksi merkittävin verkon komponenttien valintaan vaikuttava tekijä. Laite ja kaapelivalmistajat ilmoittavat oikosulkukestoisuuden yleisimmässä tapauksessa 1 sekunnin kestoisuutena ja tällöin merkintänä on  $I_{1s}$ . Koska oikosulkuvirta edellä esitetyn mukaisesti muuttuu ajan suhteen, täytyy alkuoikosulkuvirrasta laskea 1 sekunnin oikosulkuvirtaa vastaava keskimääräinen tehollisarvo  $I_{th}$ , joka vastaa oikosulun aiheuttamaa lämpenemää. Tämä voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä. (Huotari & Partanen 1998, s. 29.)

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n) t_k} \quad (5.28)$$

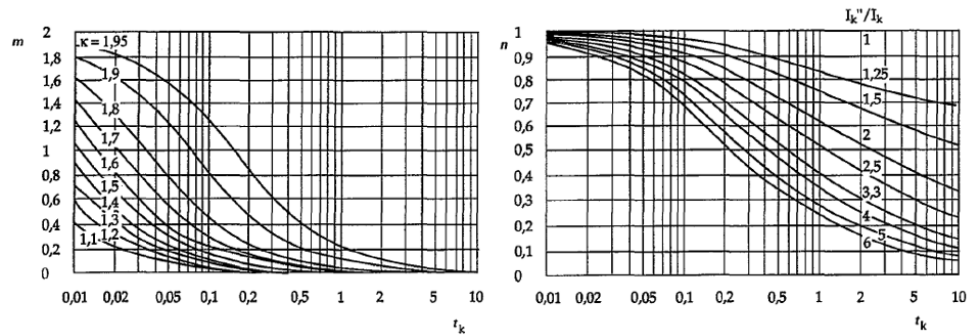
$m$  = oikosulkuvirran vaimenevaa tasavirtakomponenttia kuvaava tekijä

$n$  = oikosulkuvirran vaimenevaa vaihtokomponenttia kuvaava tekijä

$t_k$  = oikosulun kesto aika

Tasakomponenttia kuvaavan tekijän  $m$  suuruus riippuu sysäyskertoimesta  $\kappa$  ja oikosulun kestoajasta. Vaihtokomponenttia kuvaavan tekijän  $n$  suuruus puolestaan

riippuu alkuoikosulkuvirran ja pysyvän tilan oikosulkuvirran suhteesta sekä oikosulun kestoajasta. (Huotari & Partanen 1998, s. 29.) Kuvasta 5.3 on nähtävissä edellä kuvaillut riippuvuudet.



Kuva 5.3 Kertoimien  $m$  ja  $n$  kuvaajat. (Lainattu lähteestä: Huotari & Partanen 1998, s. 30.)

Kuvassa 5.3 esiintyvä sysäyskerroin  $\kappa$  voidaan laskea seuraavasti (Huotari & Partanen 1998, s. 24).

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (5.29)$$

Kuten yhtälöstä 5.29 on nähtävissä, sysäyskerroin on riippuvainen resistanssin ja reaktanssin välisestä suhteesta oikosulkupiirissä. Mikäli sysäyskerroimen tarkkaa arvoa ei pystytä määrittämään, voidaan suurjännitteellä käyttää oletusarvona  $\kappa = 1,8$ . (Huotari & Partanen 1998, s. 24.)

Verkon laitteet ja kaapelit ovat termisesti oikosulkukestoisia, kun epäyhtälö 5.30 tai 5.31 toteutuu. Yhtälöissä  $I_{thn}$  on laitteelle tai kaapelille ilmoitettu nimellinen oikosulkukestoisuus ja  $t_n$  laitteelle tai kaapelille ilmoitettua oikosulkukestoisuutta vastaava oikosulun kesto aika. (ABB 2000, s. 205.)

$$I_{th} \leq I_{thn}, \text{ kun } t_k \geq t_n \quad (5.30)$$

$$I_{th} \leq I_{thn} \sqrt{\frac{t_n}{t_k}}, \text{ kun } t_k \leq t_n \quad (5.31)$$

### 5.1.7 Oikosulkusuojauksen toteutusperiaatteita

Oikosulkusuojauksen yleisin toteutustapa kotimaisissa keskijänniteverkoissa perustuu vakioaikaiseen ylivirtasuojaukseen. Suojaus on yleensä toteutettu kaksipor- taisena. Toinen portaista asetellaan tällöin laukaisemaan viiveettä suuresta oikosul- kuvirrasta. Viiveettömällä laukaisulla suojataan erityisesti johto-osuuksia oikosul- kuvirtojen vaikutuksilta, mutta viiveetön laukaisu lyhentää myös oikosulun aiheut- taman jännitteenaleneman kestoaikaa. (Lakervi & Partanen 2008, s. 76.)

Virtaportaiden asettelu pyritään tekemään siten, että vikapaikka erottuu selektiivi- sesti. Selektiivisyys voidaan toteuttaa virta- ja aika-asetteluilla sekä lukituksia hyö- dyntäen. (Willman 2020a.)

Johtolähtöjen ylivirtasuojauksen asetteluissa tulee ottaa huomioon normaalit kuor- mitusvirrat ja mahdolliset kytkentävirtasysäykset. Suojauksen on myös kyettävä havaitsemaan johtolähdön lopussa sattuva 2-vaiheinen oikosulkuvika. (Lehesvuo 2020b.)

Jakelumuntajaa syöttävän keskijännitelähdön alempi ylivirtaporras asetellaan si- ten, että se näkee muuntajan alajännitepuolen viat, mutta laukaisuaika on joko pi- dempi kuin alajännitepuolen suojauksen toiminta-aika tai suojauksien välillä on lu- kitus. Mikäli käytetään lukitusta, alajännitepuolen havahtuminen lukitsee yläjänni- tepuolen suojauksen asetelluksi ajaksi. Viiveetön suojausporras puolestaan astel- laan siten, että suojaus näkee vain muuntajan yläjännitepuolen viat. (Willman 2020a) Asetteluissa on lisäksi huomioitava muuntajan kytkentävirtasysäys, tämän suuruudesta esimerkkejä taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4 Muuntajan kytkentävirtasysäyksen mitattuja suuruuksia muuntajan nimellisvirtaan  $I_{nt}$  nähden (Lähteen mukaisesti: Mörsky 1992, s. 191).

Muuntajanteho [MVA]	Syöttö yläjännitekäämiin	Syöttö alajännitekäämiin	Kytkeävirtasysäyksen puoleentumis aika [s]
1	$7 \cdot I_{nt}$	$12 \cdot I_{nt}$	0,1 - 0,2
5	$5 \cdot I_{nt}$	$9 \cdot I_{nt}$	0,2 - 0,5
10	$4 \cdot I_{nt}$	$8 \cdot I_{nt}$	0,5 - 1,0
50	$3,5 \cdot I_{nt}$	$7,5 \cdot I_{nt}$	1,2 - 7,2

Mikäli ylivirtasuojaus on toteutettu suuntaamattomana ja verkossa on omaa tuotantoa, tahtikoneita tai suuria määriä epätahtikoneita, voi oikosulkuilanteessa näiden vikapaikkaa kohden syöttämät virrat joko yksin tai summautuessaan jollekin lähdölle aiheuttaa ei toivotun laukaisun. Tällä tarkoitetaan sitä, että pyörivien koneiden virta kulkee kohti kiskostoa, suojaus havahtuu ja irrottaa verkosta terveen osan. Edellä esitettyä voidaan ehkäistä suuntaamattoman suojauksen tapauksessa käyttämällä riittävän suuria virta-asetteluita tai käyttämällä suunnattua ylivirtasuojaa. Oikosukusuojauksen tulee lisäksi sallia moottoreiden normaalit käynnistystilanteet, joissa virrat ovat tyypillisesti suuria. (Willman 2020b)

## 5.2 Maasulku

1-vaiheinen maasulku syntyy, kun virtapiirin johdin on kontaktissa suoraan tai jonkin johtavan yhteyden kautta maahan. Maasulun vaikutus ja vaarallisuus riippuu maasulkuvirran suuruudesta, johon puolestaan vaikuttaa vikaresistanssi ja tähtipisteen maadoitustapa. (Elovaara & Haarla 2011b, s.340.)

Kaksoismaasulussa kaksi galvaanisesti saman verkon vaihdejohdinta ovat suoraan tai jonkin johtavan yhteyden kautta yhteydessä maahan. Maasta erotetun verkon tapauksessa kaksoismaasulku saattaa olla seurausta 1-vaiheisesta maasulusta, sillä yksivaiheisen maasulun seurauksena terveiden vaiheiden vaihejännitteet nousevat alkutransientin aikana jopa moninkertaisiksi normaaliin tilaan nähden. (Mörsky 1992, s. 306.)

Myös Elovaara ja Haarla (2011a, s.185) ovat todenneet, että maasulku aiheuttaa helposti kaksoismaasulkuun johtavan vian verkon muissa osissa. Kaksoismaasulun on kuvailtu aiheuttavan mahdollisesti suuria vikavirtoja ja vikavirtojen kulkureittejä maassa vaikeasti ennustettaviksi.

Kappaleessa 4.2 esitellyn laajan maadoitusjärjestelmän alueella, jossa maadoitukset ovat vahvat ja potentiaalierot ovat pieniä, johtaa kaksoismaasulku ainakin teoriassa aina suuriin vikavirtoihin.

### 5.2.1 Maasulkuvian vaikutusalue

Maasulkuvirtojen ja jännitteiden laskennan kannalta täytyy koko galvaanisesti yhteen liittyvä verkko tuntea (ABB 2000, s. 248). Edellä mainitun galvaanisesti yhteen liittyvän verkon tunnistamisessa, auttaa ymmärrys komponenttiverkoista ja erityisesti nollaverkon muodostumisesta. Komponenttiverkkoja on käsitelty laajasti lähteenä käytetyssä Sähköverkot I kirjassa. Tiivistetysti sanottuna maasulkuvika on epäsymmetrinen vika, jossa vikavirta pyrkii palaamaan kohti tähtipistettä nollaverkkoa pitkin. (Elovaara ja Haarla 2011a, s. 185 – 187.)

Maasulun vaikutusalueen vaikuttaa verkon eri komponenttien ominaisuudet komponenttiverkkojen impedanssien näkökulmasta. Näistä erityisesti pyörivien koneiden ja kaksikäähimuuntajien käämien ja tähtipisteen kytkentöjen vaikutus nollaimpedanssiin ja maasulkuvirran kulkureittiin ovat maasulkuvikojen kannalta merkittäviä. Nollaverkko saattaa katketa muuntajan ja pyörivien koneiden käämien kytkennän tai käämien tähtipisteen maadoitustavan seurauksena. Tällöin ei myöskään nollaverkossa kulkeva maasulkuvirta pääse kulkemaan muuntajan ensiöpiirin ja toisiopiirin välillä. (Elovaara & Haarla 2011a, s. 190 – 191, 195 – 200.)

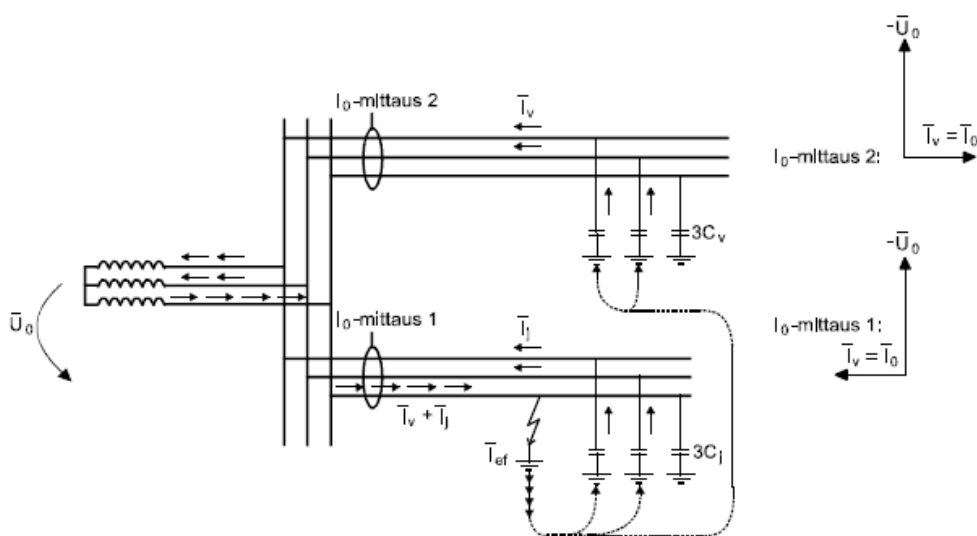
Täten voidaan todeta, että maasulkuvian vaikutusalue voi rajautua syöttävästä suunnasta esimerkiksi päämuuntajaan, mutta ollakseen varma täytyy tietää verkon eri komponenttien, kuten muuntajien ja pyörivien koneiden käämien kytkennät ja tähtipisteen maadoitustapa. On myös otettava huomioon, että mikäli tähtipiste on maadoitettu jostain kohtaa verkkoa, se vaikuttaa tällöin koko sen verkon alueella, jossa nollaverkolle muodostuu kulkureitti.

### 5.2.2 Maasta erotetun verkon maasulkuvirrat

Kun maasta erotetussa verkossa syntyy 1-vaiheinen maasulkutilanne ei maahan kytkeytyneen äärijohtimen kautta kulkevalla virralla ole galvaanista yhteyttä verkon tähtipisteeseen. Täten virtapiiri jää avoimeksi ja varsinaista oikosulkuvirtaa ei muodostu.

Maasulkutilanteessa syntyy aiemmin kuvailtu epäsymmetrinen vika, jossa vaihejännitteet maatasoon nähden ovat epäsymmetriset. Tällöin myös maakapasitanssien muodostamat varausvirrat ovat epäsymmetrisiä. Maasulussa sekä terveiden vaiheiden jännitteet että varausvirrat suhteessa maatasoon kasvavat. Maasulkuvirta syntyy, kun varausvirrat purkautuvat muuntajien ja mahdollisten pyörivien koneiden käämien kautta vialliseen vaiheeseen ja vikapaikasta maahan. Mikäli maasulku on vikaresistanssiton, ei viallinen vaihe itsessään muodosta varausvirtaa, sillä potentiaaliero kyseisellä vaiheella maatasoon nähden ei ole. (ABB 2000, s. 248; Mörsky 1992, s.298 – 299.)

Kuva 5.4 havainnollistaa edellä kuvailtua varauksien purkautumista ja kulkureittiä kohti vikapaikkaa. On kuitenkin huomioitava, että kuva on periaatteellinen ja maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa muun muassa kaapelien tyypit sekä niiden pituudet. (ABB 2000, s. 248.)



Kuva 5.4 Maasulkuvirtojen muodostuminen (Lainattu lähteestä: ABB 2000, s. 252).

Kuvan 5.4 oikeassa laidassa on osoitinpiirroksin osoitettu tähtipistejännitteen eli nollajännitteen ja maasulkuvirran väliset vektorisuunnat. Ylemmässä osoitinpiirroksessa, eli terveellä johtolähdöllä, maasulkuvirta on nollajännitettä  $90^\circ$  jäljessä. Alemmassa viallisen johtolähdön tapauksessa maasulkuvirta on  $90^\circ$  edellä

nollajännitettä. (ABB 2000, s. 252.) Mikäli kuvasta 5.4 muodostettaisiin kuvan 5.2 tapaan sijaiskytkentä, piiri muodostuisi ainoastaan ekvivalenttisesta jännitelähteestä ja maakapasitansseista.

Kaapelivalmistajat ilmoittavat kaapeleille maakapasitanssiarvot kilometriä kohden. Kaapeliosuuksien maakapasitanssit saadaan laskettua, kun tiedetään verkon kaapelien tyypit ja näiden pituudet. Maasulkuvirran  $I_e$  suuruus suorassa maasulussa saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä. (Hakola & Lehtonen 1996, s. 11.)

$$I_e = 3\omega C_0 U_v \quad (5.32)$$

$U_v$  = verkon vaihejännite

$C_0$  = koko verkon yhden vaiheen maakapasitanssit

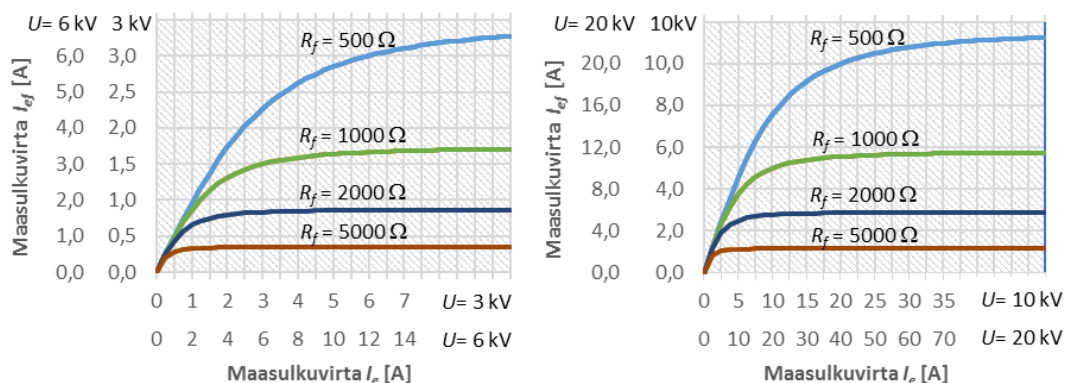
$\omega$  = kulmataajuus, eli  $2\pi f$

$f$  = verkon taajuus, Suomessa 50 Hz

Mikäli maasulku syntyy vikaresistanssin  $R_f$  kautta, pienentää vikaresistanssi maasulkuvirtaa. Jos maasulkuvirta suorassa maasulussa on jo laskettu yhtälön 5.32 mukaisesti, saadaan vikaresistanssillisessa maasulussa maasulkuvirta  $I_{ef}$  laskettua seuraavasta yhtälöstä. (Hakola & Lehtonen 1996, s. 13.)

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_e}{U_v} R_f\right)^2}} \quad (5.33)$$

Kuvassa 5.5 on esitetty vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirran suuruuteen eri pääjännitteillä  $U$  ja taustaverkon tuottamilla maasulkuvirroilla  $I_e$ . Kuvaajat ovat muodostettu yhtälön 5.33 avulla. (ABB 2000, s. 251.)



Kuva 5.5 Vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirtaan taustaverkon maasulkuvirran funktiona eri jännitteillä (Lähdettä mukailten: ABB 2000, s. 251).

Tavallisesti maasulkusuojaus mitoitetaan toimimaan tiettyyn vikaresistanssin arvoon saakka, tällöin puhutaan suojauksen herkkyydestä. TTT-käsikirja, että Elovaara ja Haarla ovat maininneet Suomessa aiemmin vaatimuksena olleesta 500  $\Omega$  herkkyyssrajasta. TTT-käsikirjassa on lisäksi mainittu, että maasulkusuojauksen olisi suositeltavaa toimia myös suuremmilla vikaresistansseilla, jos se vain on teknisesti kohtuullisissa rajoissa mahdollista. (ABB 2000, s. 258; Elovaara & Haarla 2011b, s. 341.)

Nykyisistä sähköturvallisuuden liittyvistä määräyksistä ei löydy yhtä täsmällistä herkkyyssarvoa maasulkusuojauksen toiminnalle. Myöhemmin kappaleessa 5.2.6 on käsitelty nykyisiä maasulkusuojauksen toimintaehtoja.

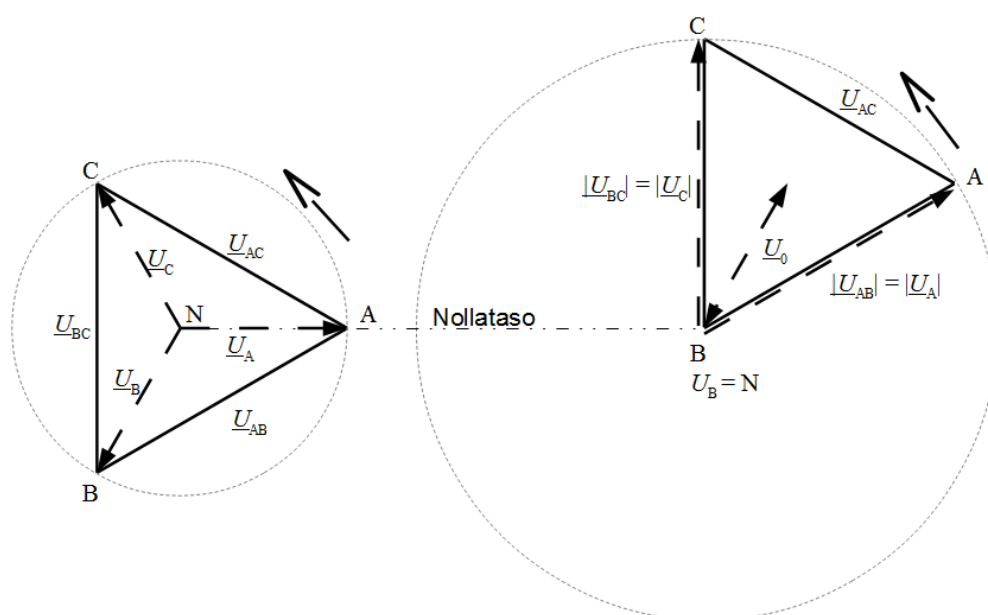
Kuvassa 5.4 havainnollistetusta syystä, viallisen johtolähdön suojareleen mittaama maasulkuvirta ei sisällä lähdön itsensä tuottama maasulkuvirtaa. Tämä siitä syystä, että lähdön itsensä tuottama maasulkuvirta läpäisee mittauksen molempiin suuntiin. Tähän perustuen suojattavan lähdön summavirta  $\Sigma I_{ev}$  vikapaikasta maahan saadaan laskettua yhtälöstä 5.34. Yhtälössä oletetaan, että suojattavan johdon ja taustaverkon maasulkuvirta ovat laskettuina. (ABB 2000, s. 251.)

$$\Sigma I_{ev} = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} I_{ef} \quad (5.34)$$

$I_{ej}$  = suojattavan johtolähdön itsensä tuottama maasulkuvirta

### 5.2.3 Maasta erotetun verkon jännitteet maasulussa

Maasulussa maahan kytkeytyneen vaiheen jännite maata vasten pienenee ja terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat. Pääjännitteet pysyvät kuitenkin muuttumattomina. (Mörsky 1992, s. 298 – 301.) Mikäli tilanne on vikaresistanssiton, voidaan jännitteiden muuttumista kuvailla kolmion avulla. Keskellä sijaitseva näennäinen tähtipiste eli nollassa siirtyy voittuneen vaiheen kolmion kärkeen. Tällöin kolmio pyörii maahan kytkeytyneen vaiheen kärjen ympärillä, kuten kuvassa 5.6 esitetään.



Kuva 5.6 Maasta erotettu verkko, vasemmalla terve tila, oikealla vikaresistanssiton maasulku vaiheella B.

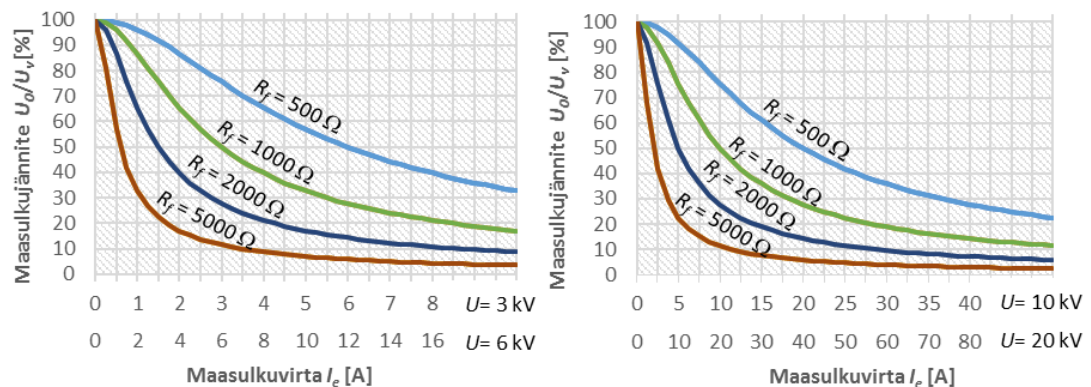
Kuvan 5.6 perusteella voidaan todeta, että terveessä tilanteessa vasemmalla vaihejännitteet näennäistä nollassa vasten ja toisiin vaiheisiin nähden ovat symmetriset. Oikealla tilanteessa, jossa on resistanssiton maasulku, voittuneen vaiheen jännite on siirtynyt nollassa- eli maatasolle ja terveiden vaiheiden jännitteet nollassa- teeseen eli maatasoon nähden ovat kasvaneet  $\sqrt{3}$  kertaisiksi. Tilanne on vaihejännitteiden osalta epäsymmetrinen ja järjestelmään syntyy vikaresistanssittomassa maasulussa nollassajännite, jonka suuruus on normaalien tilan vaihejännitteen suuruinen. (Mörsky 1992, s. 298 – 301.) Vikaresistanssillisessa tapauksessa nollassajännite  $U_0$  voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä. (Hakola & Lehtonen 1996, s. 13.)

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C_0} I_{ef} \quad (5.35)$$

Yhtälö 5.35 saadaan maasulkusuojauksen asettelun kannalta soveltuvampaan muotoon yhtälöiden 5.32 ja 5.33 avulla. Näin tulos on nollajännitteen suhteellinen osuus terveeseen vaihejännitteeseen  $U_v$  nähden. Tämä voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä. (Hakola & Lehtonen 1996, s. 14.)

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_e}{U_v} R_f\right)^2}} \quad (5.36)$$

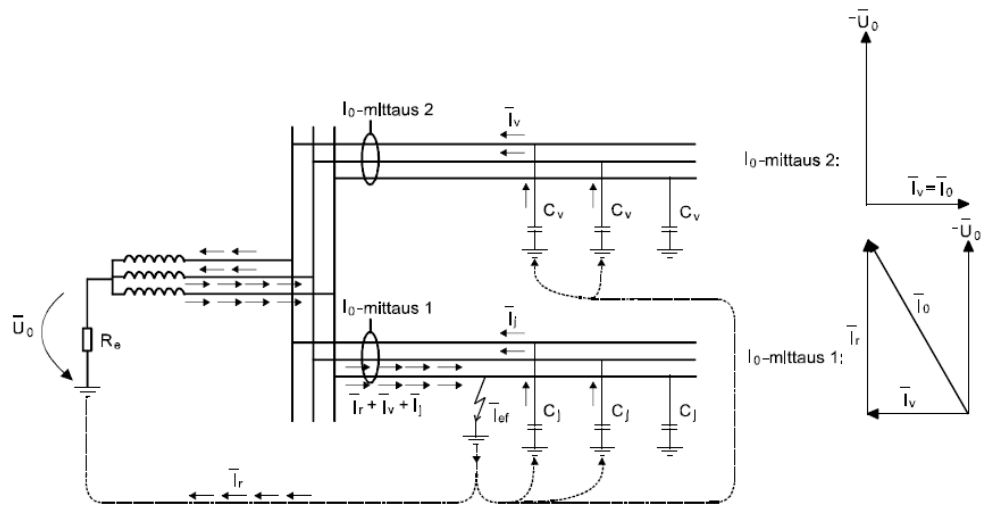
Kuten yhtälöistä 5.35 ja 5.36 voidaan päätellä, vikaresistanssi ja taustaverkon laajuus kasvaessaan pienentävät nollajännitettä. Kuvassa 5.7 on havainnollistettu nollajännitteen suhteellista suuruutta vaihejännitteeseen nähden eri vikaresistansseilla ja taustaverkon tuottamilla maasulkuvirroilla.



Kuva 5.7 Suhteellinen nollajännite maasulkuvirran funktiona eri vikaresistansseilla ja nimellisjännitteillä (Lähdettä mukaillen: Hakola & Lehtonen 1996, s. 14).

#### 5.2.4 Resistanssin kautta maadoitetun verkon maasulkuvirrat

Kuvassa 5.8 esitetään tähtipisteestä resistanssin kautta maadoitetun verkon maasulkuvirran periaatteellinen muodostuminen. Maadoitusvastuksen ja maakapasitanssien kautta kulkevat maasulkuvirrat muodostavat kuvan mukaisesti toisilleen rinnakkaiset kulkureitit.



Kuva 5.8 Tähtipisteestä maadoitetun verkon maasulkuvirtojen muodostuminen (Lainattu lähteestä: ABB 2000, s. 257).

Mikäli kuvasta piirrettäisiin Thevenin -sijaiskytkentä muodostuisi se vikapaikkaan sijoitetusta ekvivalenttisesta jännitelähteestä ja rinnakkaisina haaroina virralle muodostuisi maadoitusvastuksen resistanssi  $R_e$  ja maakapasitanssit. Kuvan 5.8 mukaisen verkon maasulkuvirta saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla. (ABB 2000, s. 257.)

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1+(R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f+R_e)^2+(R_f R_e 3\omega C_0)^2}} U_v \quad (5.37)$$

Laskentaa voidaan yksinkertaistaa, mikäli maakapasitanssien reaktanssi on suuri verrattuna maadoitusvastuksen resistanssiin. Tällöin maasulkuvirta voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 20.)

$$I_{ef} = \frac{U_v}{R_f+R_e} \quad (5.38)$$

Suojattavan lähdön kokema summavirta vikatilanteessa saadaan laskettua yhtälöstä 5.39. Yhtälössä  $I_r$  on maadoitusresistanssin tuottama maasulkuvirta suorassa maasulussa. (ABB 2000, s. 258.)

$$\sum I_{ev} = \frac{\sqrt{(I_e - I_{ej})^2 + I_r^2}}{\sqrt{I_e^2 + I_r^2}} * I_{ef} \quad (5.39)$$

Kuvan 5.8 oikeassa laidassa olevilla osoittimilla on havainnollistettu, että terveellä lähdöllä maasulkuvirta on  $90^\circ$  nollajännitettä jäljessä. Viallisella lähdöllä maasulkuvirta on puolestaan edellä, mutta kulman suuruus on  $0-90^\circ$  välissä riippuen maadoitusresistanssin ja maakapasitanssien reaktanssien välisestä suhteesta. Tämä kulma on laskettavissa seuraavasta yhtälöstä. (ABB 2000, s. 258.)

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{I_e - I_{ej}}{I_r} \right) \quad (5.40)$$

### 5.2.5 Resistanssin kautta maadoitetun verkon jännitteet maasulussa

Samoin kuin maasta erotetussa verkossa, vikaresistanssittomassa tapauksessa resistanssin kautta maadoitetun verkon nollajännite on vaihejännitteen suuruinen. Vastaavasti terveiden vaiheiden vaihejännitteet ovat tällöin pääjännitteiden suuruiset. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 21.)

Vastuksen kautta maadoitetun verkon nollajännite saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla (ABB 2000, s. 258).

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_e}\right)^2 + (3\omega C_0)^2}} * I_{ef} \quad (5.41)$$

Kuten jo maasulkuvirtojen osalta esitettiin, laskenta yksinkertaistuu, mikäli maakapasitanssien reaktanssi on suuri verrattuna maadoitusvastuksen resistanssiin. Tällöin nollajännitteen suhteellinen suuruus voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 21.)

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{R_e}{R_f + R_e} \quad (5.42)$$

### 5.2.6 Maasulun poiskytkentäehdot

Tähän osioon on koottu niitä tekijöitä, millaisin perustein maasulkusuojauksen poiskytkentäehto määräytyy automaattisen- ja käsin poiskytkennän välillä.

Teollisuuden sähköistysten parissa pitkän uran tehneen Juha Willmanin mukaan teollisuudessa maasulkusuojaus on historiallisesti katsottuna toteutettu Suomessa usein hälyttävänä, eli poiskytkentä on toteutettava käsin. Hänen mukaansa kuitenkin trendi toteutuksessa on jo pitkään ollut laukaisevan suojauksen kannalla uusissa projekteissa. Tähän yhtenä kannustimena toimii standardissa SFS 6001 annetut suunnitteluohjeet maadoitusjärjestelmän osalta. (Willman 2020b.)

Standardin SFS 6001 suunnitteluohjeissa onkin kansallinen lisäys, jossa mainitaan, että mikäli maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa maasulku kytetään pois alle 1 s viiveellä, voidaan maadoitusjohtimien ja -elektrodien terminen kestävyys mitoittaa kapasitiivisen vikavirran mukaisesti. Tällöin on kuitenkin käytettävä maasulkusuojauksen toiminta-aikana ekvivalenttista toiminta-aikaa. (SFS 6001: 2018, s. 90.)

Standardin SFS 6001 velvoittava liite NA antaa puolestaan selkeät reunaehdot, jos maasulkusuojaus halutaan toteuttaa hälyttävänä. Näiden mukaan maasulkutilanteesta on tultava hälytys, joka voidaan tietyin ehdoin kytkeä pois käsin. Perusteina maasulun poiskytkennälle käsin voi olla suunnittelemattomasta keskeytyksestä aiheutuva haitta tai muu käyttöön liittyvä tekijä, jonka vuoksi maasulun laukaisua on syytä siirtää suunnitellusti. Näitä syitä laukaisun siirrolle voisi olla esimerkiksi teollisuudessa prosessien hallittu alasajo, jolloin voidaan minimoida sekä materiaalivahingot, että mekaaniset vauriot. (SFS 6001: 2018, s. 140.)

Mikäli poiskytkentää siirretään eli kytetään pois käsin, on tähän oltava SFS 6001 mukaan ohjeistus. Standardin mukaan maasulku voidaan kytkeä pois käsin, mikäli seuraavat ehdot toteutuvat:

*Hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:*

– *Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään.*

– *Maasulusta on tullava hälytys, joka saatetaan välittömästi verkon käyttöä valvovan henkilöstön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pitempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.*

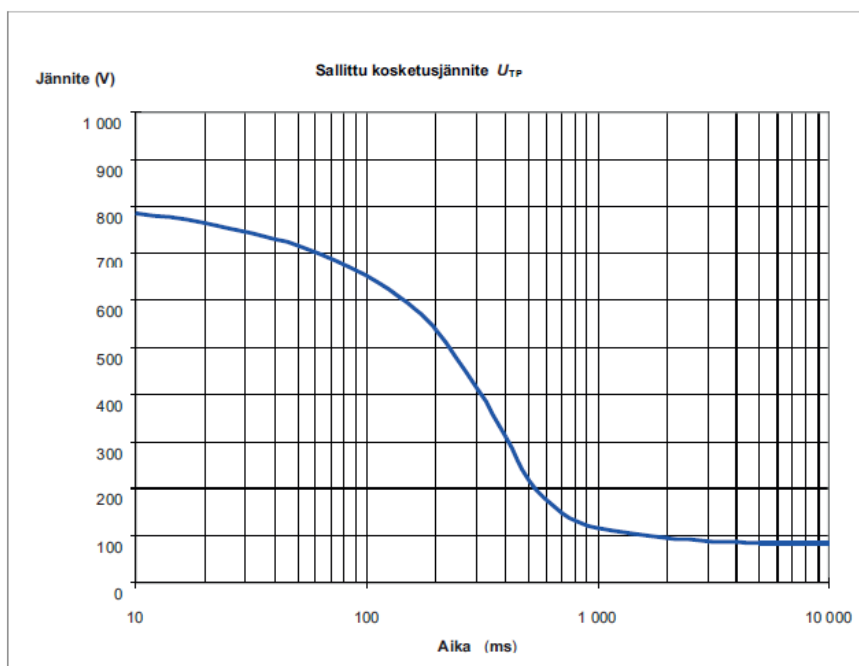
– *Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla muualla kuin laajassa maadoitusverkossa pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V.*

– *Kaksoismaasulkutilanteessa pitää maasulut kytkeä pois.*

– *Tietoliikenneverkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.*

(SFS 6001: 2018, s. 140)

Jos verkon alueella muodostuisi vaarallisia kosketusjännitteitä  $U_{TP}$ , on standardissa SFS 6001 esitetty kuvan 5.9 mukainen kuvaaja laukaisuajasta kosketusjännitteen funktiona. Kosketusjännitteisiin liittyviä laskelmia ei tässä työssä kuitenkaan esitetä. Näiden osalta viitataan käytettyyn lähdemateriaaliin mistä nämä löytyvät.



Kuva 5.9 Poiskytkentäajan riippuvuus kosketusjännitteen suuruudesta (Lainattu lähteestä: SFS 6001: 2018, s. 93)

### 5.2.7 Katkeileva maasulku

Katkeileva maasulku on nimensä mukaan vikatilanne, jossa maasulkuvika ei ole pysyvä vaan sammuu itsestään ja toistuu jollain aikavälillä. Tämän tyyppisen vian edellytyksenä on, että maasulkuvirran täytyy pystyä katkeamaan. Tämä käytännössä vaatii joko sen, että eristystaso palautuu tai maasulkuvirta kykenee katkeamaan virran nollakohdassa. Myös maasulkuvirran suuruudella ja jännitteen nousunopeudella vian jälkeen on merkitystä ilmiön syntymiselle. (Wahlroos 2020.)

Esimerkkinä palautuvasta eristystasosta voidaan käyttää avojohtoverkoissa tilannetta, jossa puun oksa tuulen myötä osuu eristämättömään linjaan. Tällöin eristystaso eli ilmaväli palautuu, kun oksa poistuu linjalta. (Wahlroos 2020.)

Sammutetussa verkossa vikapaikkaan palaava jännite nousee hitaammin johtuen sammutuskelan luonteesta. Täten katkeileva maasulku ei syty yhtä herkästi uudelleen ja viasta muodostuu todennäköisemmin katkeileva maasulku. (Wahlroos 2020.)

Vastaavasti maasta erotetussa verkossa jännite palaa nopeasti vikapaikkaan ja verkossa esiintyy maasulkutilanteessa myös transienttiylijännitteitä, jotka saattavat olla jopa viisinkertaisia normaaliin vaihejännitteeseen nähden. Hakola ja Lehtonen ovat esittäneet, että tyypillisesti alle 10 A maasulkuvirroilla katkeileva maasulkuvika voisi olla mahdollinen myös maasta erotetussa verkossa, mutta käytännössä maasulun aiheuttamat ylijännitteet johtavat todennäköisesti eristyksen pettämiseen ja pysyvään vikaan. (Hakola & Lehtonen 1995, s. 61 – 62.)

Katkeileva maasulkuvika on mahdollinen jännitealueella 3-20 kV, mikäli sammutetun verkon jäännösmaasulkuvirta on alle 60 A ja maasta erotetussa verkossa, kun maasulkuvirta on alle 35 A. (Hakola & Lehtonen 1995. s. 61.)

Verraten tätä teoriaa teollisuuteen, maakaapeloiduissa verkoissa eristyskyvyn palautuminen täysin ennalleen maasuluissa on epätodennäköisempää. Katkeileva maasulkuvika on tällöin suurella todennäköisyydellä seurausta pysyvästä eristevauriosta. Kotimaisessa teollisuudessa vikatyyppejä on esitetyn teorian mukaan mahdollinen lähinnä verkoissa, joissa tähtipiste on maadoitettu suuren resistanssin kautta.

### **5.2.8 Maasulkusuojauksen toteutusperiaatteita**

Tässä osiossa on käsitelty yleisimpiä maasulkusuojauksen toteutusperiaatteita, jotka soveltuvat käytettäväksi maasta erotetuissa- ja suuren resistanssin kautta maadoitetuissa verkoissa.

Maasulkuvirtaan perustuva suojaus voidaan toteuttaa joko suuntaamattomana tai suunnattuna. Ensin mainittua suuntaamatonta suojausta käytettäessä täytyy ottaa huomioon se, että maasulkuvirran asettelun suojareleessä on oltava korkeampi kuin suojattavan lähdön itsensä tuottama maasulkuvirta. Tällä estetään se, ettei lähtö laukea johtolähdön itsensä tuottamasta kapasitiivisesta virrasta, kun maasulku syntyy jossain muussa verkon osassa. Suuntaamatonta maasulkusuojauksia käytettäessä täytyy myös varmistua siitä, että taustaverkon tuottama maasulkuvirta on suurempi kuin suojauksen asettelu  $I_{0>}$ . Mörsky onkin kuvaillut suuntaamattoman suojauksen haasteeksi verkon erilaiset kytkentätilanteet ja niiden vaikutuksen maasulkuvirran

suuruuteen sekä asettelujen oikeellisuuteen. (Mörsky 1992, s. 328 – 329.) Käytännössä suuntaamatonta suojaa käytettäessä seuraavan epäyhtälön on toteuduttava joka hetki, jotta suojaus toimisi oikein ja selektiivisesti.

$$I_{ej} < I_{0>} < I_{ef} \quad (5.42)$$

Suuntaamattoman maasulkusuojauksen tapauksessa käytetään yleensä lisäksi lukitusta, jonka vapauttamisen ehtona on nollajännitteen  $U_0$  esiintyminen verkossa. Tällainen järjestely on tarpeen erityisesti silloin, kun maasulkusuojaus on laukaiseva. Tällä pyritään ehkäisemään ei toivottuja laukaisuja, sillä näennäisiä maasulkuvirtoja saattaa esiintyä mittauskytkennän toteutuksesta riippuen, esimerkiksi erilaisissa kytkentätilanteissa tai oikosulun seurauksena. (Mörsky 1992, s. 177 – 178, 192 – 193, 330.) Erilaisia mittauskytkentöjä esitellään myöhemmin tässä työssä kappaleessa 6.2.

Suunnattu maasulkusuojaus perustuu maasulkuvirran mittauksen lisäksi kuvien 5.4 ja 5.8 osoitinpiirroksissa esitettyihin maasulkuvirran ja tähtipistejännitteen vektorisuuntiin. Tällöin ehdoksi suojauksen toiminnalle tulee mitatun nollajännitteen ja nollavirran lisäksi näiden välinen kulma. Sekä maasulkuvirran, että nollajännitteen on ylitettävä määritetyt asetellut, ja mainittuihin vektorisuuntiin perustuvan kulmaehdon on täytyttävä. Näin kaapelin itsensä tuottama maasulkuvirta ja suojauksen havaitsema nollajännite eivät aiheuta laukaisua viassa, joka esiintyy muualla verkossa. Tämä siksi, että maasulkuvirran suunta on kulmaehdon osalta väärä. (Lakervi & Partanen 2008, s. 192.)

Verraten suunnatun ja suuntaamattoman suojauksen toimintaperiaatteita voidaan todeta, että suunnatun suojauksen etuna suuntaamattomaan nähden on se, että suojaus saadaan toimimaan pienemmillä maasulkuvirroilla. Toisin sanoen suunnattu suojaus voidaan asettaa herkemäksi.

Maasulkusuojauksen asetteluja ohjaavat asetettu herkkyysvaatimus ja erilaiset kytkentätilanteet. Suojauksen on kyettävä havaitsemaan vika, kun vian tunnistuksen kannalta on niin sanottu pahin mahdollinen tilanne. Maasulkuvirtojen osalta virrat

ovat pienimmillään, kun verkko on kytkennässä suppeimmillaan ja maasulun vikaresistanssi vastaa vaadittua herkkyystasoa. Käytännössä tällainen kytkentä on silloin, kun suojattavan lähdön lisäksi verkkoon kytkeytyy vain vähiten maasulkuvirtaa tuottava rinnakkainen lähtö. Vastaavasti nollajännitteet ovat pienimmillään, kun verkko on laajimmillaan ja maasulun vikaresistanssi vastaa vaadittua herkkyystasoa. Asettelemalla suojaus siten, että maasulkuviat kyetään tunnistamaan näissä tilanteissa, voidaan varmistaa, että suojauksen herkkyys on riittävä. (Lakervi & Partanen 2008, s. 193 – 194.)

Teollisuudessa kuitenkin lyhimmät ja täten vähiten maasulkuvirtaa tuottavat johtolähdöt saattavat olla vain joitain kymmeniä metriä pitkiä. Tämän vuoksi joudutaan todennäköisesti virta-asettelujen määrittämisessä arvioimaan suppein mahdollinen verkon kytkentätilanne muulla periaatteella.

Pelkkään nollajännitteeseen perustuvaa suojausta käytetään lähinnä varasuojana tai yleishälytyksenä. Asettelujen kannalta on tunnettava niin sanottu normaalintilan nollajännite. Mikäli alueella on toisen verkon osia voi nollajännite siirtyä kapasitiivisesti verkkojen välillä, mutta myös maakapasitanssien mahdollinen epäsymmetria näkyy nollajännitteessä. (Mörsky 1992, s. 194, 306, 327 – 330.) Suojauksen etuna on, että se kykenee havaitsemaan kaikki maasulkuviat, sillä nollajännitettä ilmenee aina maasulkutilanteessa (ABB 2000, s. 260). Tämän tyyppinen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa täten vaikka yhden lähdön laajuiseen verkkoon.

### **5.3 Lämpenemä**

Lämpenemästä johtuvien vikojen kehittymisnopeuteen vaikuttaa lämpötila ja rasi-tusaika. Eristyksen elinikää lyhentää erityisesti tilanteet, joissa yhdistyy suuri lämpötila ja pitkä vaikutusaika. Lämpenemän vaikutukset eristyksen elinikään vaihtelevat eristemateriaalien ominaisuuksien sekä laitteiden tyyppin mukaan. Esimerkiksi muuntajien eristepaperin vanheneminen kaksinkertaistuu jokaista 6 °C lämpötilan muutosta vastaan, kun käämin kuumin piste on yli suositellun maksimi lämpötilan. Pyörivien koneiden osalta kirjallisuudessa on mainittu eristeiden muuttuvan hitaasti. (Aro ym. 1996, s. 181 – 188; Mörsky 1992, s. 417.)

Laitteiden tai kaapelien lämpenemä voi olla seurausta edellä esitellystä oikosulku-tilanteesta, ylikuormituksesta, laitteiden jäähtymistä heikentävästä likaantumisesta, rikkoutuneesta jäähtytyksestä tai muusta vastaavasta syystä. (Lakervi & Partanen 2008 s. 176; Mörsky 1992, s.171 – 175.) Tämän kappaleen pääpainona on yleisimpien lämpenemää aiheuttavien tilanteiden esittely, mitkä voidaan relesuojauksen keinoin tunnistaa. Rajauksien puitteissa kyseisiä tilanteita käsitellään kaapelien, jakelumuuntajan ja suorakäynnisteisten oikosulkumoottoreiden osalta. Kappaleessa ei esitellä yksityiskohtaisesti suojauksien toteutusta.

### **5.3.1 Kaapelit**

Kaapeleille lämpenemää voi syntyä edellä esitetystä oikosulusta tai ylikuormituksesta. Ylikuormitussuoja voidaan toteuttaa ylivirtasuojaan perustuen, mutta nykyisissä suojareleissä on olemassa myös erillinen lämpenemäsuoja, joka soveltuu kaapeleiden suojaamiseen. (Lehesvuo 2020b.) Kaapeleiden teknisissä tiedoissa ilmoitetaan kaapelin suurin sallittu lämpenemä jatkuvassa käytössä ja poikkeustilanteissa. Nämä ovat kuormitettavuuden kannalta kuitenkin vain lähtöarvoja, joissa ei oteta huomioon asennustapaa, montako kaapelia on asennettuna rinnan ja mikä on asennuspaikan ympäristönlämpötila. Asennustavat, rinnakkaiset kaapelit ja ympäristöolosuhteet otetaan huomioon korjauskertoimilla. Korjauskertoimia löytyy esimerkiksi tässä työssä lähteenä käytetyn kaapelivalmistajan luettelosta. (Prysmian 2018 s. 9 – 12.)

### **5.3.2 Muuntajat**

Työn rajauksien puitteissa tässä osuudessa käsitellään lähinnä jakelumuuntajia. Muuntajat luokitellaan tyypillisesti kokoluokan ja käyttöpaikkansa mukaan tavanomaisesti päämuuntajiin ja jakelumuuntajiin. Muuntajan eristysrakenteen mukaan muuntajat jakautuvat öljyeristeisiin- ja kuivamuuntajiin. Öljyeristeisiä muuntajia käytetään sekä päämuuntajina että jakelumuuntajina. Kuivamuuntajien eristys on tyypillisesti hartsiseosta ja niitä käytetään pääsääntöisesti vain jakelumuuntajina.

Kuivamuuntajien kuormitusvirta saa olla maksimissaan 1,5-kertainen nimellisvirtaan nähden. Kuormitettavuuden toisena teknisenä ehtona on käämin kuumimman pisteen lämpötila. Tämä ei saa ylittää suurinta sallittua lämpötilaa, joka määräytyy käämin eristyksen lämpötilaluokituksen mukaan. (IEC 60076-12: 2008, s. 23)

Öljyeristeiset muuntajat jakautuvat kolmeen alla esitettävään kokokategoriaan. Näiden mukaan vaihtuu myös kuormitettavuudessa huomioon otavat tekijät. Mitä suurempia muuntajat ovat kooltaan, sitä herkempiä ne ovat ylikuormituksille ja vikavirroille. (IEC 60076-7:2018, s. 15)

1. Pienikokoiset tehomuuntajat, joilla ei ole erillistä jäähdytystä. Kuormitettavuuden laskennassa on otettava huomioon käämien kuumien pisteen lämpötilat ja eristyksen ikääntyminen.
2. Keskikokoiset tehomuuntajat, joiden nimellisteho maksimissaan 100 MVA kolmivaiheisena tai 33,3 MVA yksivaiheisena. Kuormitettavuudessa täytyy edellisen lisäksi ottaa huomioon muuntajan jäähdytystapa.
3. Suuret tehomuuntajat, joiden kokoluokka on yli 100 MVA kolmivaiheisena tai yli 33,3 MVA yksivaiheisena. Näiden kuormitettavuudessa täytyy edellisten edellä mainittujen lisäksi ottaa huomioon hajavuon aiheuttama lämpenemä ja muuntajan rikkoutumisesta koituvat huomattavat seuraukset.

Öljyeristeisten muuntajien suurimmat sallitut kuormitusvirrat riippuvat edellä esitettyjen kokoluokitusten lisäksi erilaisten käyttötilanteista. Alla olevassa taulukossa 5.5 on esitetty muuntajien suurimmat sallitut kuormitusvirrat suhteessa nimellisvirtaan.

Taulukko 5.5. Öljyeristeisten muuntajien suositellut maksimikuormitusvirrat suhteessa nimellisvirtaan erilaisissa käyttötilanteissa. (Lähteen mukaisesti: IEC 60076-7:2018, s. 23)

Kuormituksen tyyppi	Pienet tehomuuntajat	Keskikokoiset tehomuuntajat	Suuret tehomuuntajat
Normaali syklinen kuormitus	1,5	1,5	1,3
Pitkäaikainen hätäkuormitus	1,8	1,5	1,3
Lyhytaikainen hätäkuormitus	2	1,8	1,5

Taulukon 5.5 lisäksi on otettava huomioon muuntajan eri osien lämpötilarajoitteet, jotka edelleen määräytyvät muuntajan kokoluokituksen mukaan (IEC 60076-7:2018, s. 22). Näitä ei tässä työssä kuitenkaan tarkemmin esitellä, vaan viitataan lähdemateriaaliin, josta nämä ovat löydettävissä.

Suojareleen toteuttamaan oikosulku- ja maasulkusuojauksen lisäksi öljyeristeisistä muuntajista löytyy myös muuta suojaustoiminnallisuutta. Yleisimpiä lämpenemäsuojaukseen liittyviä toiminnallisuuksia ovat öljylämpötilan mittaukseen perustuva suojaus sekä kaasurele. Öljyn lämpötilamittarissa on tyypillisesti kaksiportainen suojaustoiminnallisuus, joista toinen on hälyttävä ja toinen laukaiseva. Kaasurele puolestaan tunnistaa muuntajan sisäisiä vikoja, kuten ylikuumenemaa tai oikosulkuja. Kaasureleen toiminta perustuu vian aiheuttamaan kaasun kehittymiseen tai öljynpurkaukseen tunnistamiseen. Myös kaasureleen suojaustoiminnallisuus on kaksiportainen, joista alempi on hälyttävä ja ylempi laukaiseva. (ABB 2000, s. 325.)

Kuivamuuntajilla lämpenemäsuojaus on tyypillisesti toteutettu termistoreilla ja termistorireleellä. Suojaus on tyypillisesti kaksiportainen, joista alempi porras toimii hälyttävänä ja ylempi laukaisevana. (Virtanen 2020.) Lämpötilan valvonta voidaan toteuttaa myös kapilaarilämpömittarilla tai PT100 antureilla. (ABB 2000, s. 326.)

Kuivamuuntajia valmistavan Finn Electricin teknisessä oppaassa on kuvailtu, että lämpötila-anturit sijoitetaan oletuksena jokaiselle vaiheelle pienjännitepuolella

sekä joskus myös runkoon. Tästä voidaan kuitenkin poiketa, mikäli asiakas toisin tilatessa määrittää. Oppaassa on korostettu, että lämpenemä voi olla seurausta muustakin syystä kuin ylikuormituksesta. (Finn Electric, n.d.)

Matemaattiseen lämpenemä mallinnukseen pystyviä suojareleitä käytettäessä muuntajien ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa kuormitusvirran mittaukseen perustuen. Yhdeksi haasteeksi kirjallisuudessa on kuitenkin mainittu ympäristötekijöiden huomioon ottaminen. (Mörsky 1992, s. 200 – 201.)

Muuntajien tutkimustyön parissa työskentelevä Esa Virtanen totesi ylikuormitussuojauksesta, että öljyeristeisillä muuntajilla virran mittaukseen perustuva lämpenemämallinnus täytyisi teoriassa toteuttaa kahdella aikavakiolla. Tämä siitä syystä, että lämpö siirtyy ensin käämistä ja rautasydämeistä öljyyn ja tämän jälkeen öljystä / muuntajan rungosta ilmaan. Vaikka öljyeristeisillä muuntajilla pitäisi teoreettisesti olla edellä mainittu kahden aikavakion malliin perustuva ylikuormitussuojaus, on yleistä, että suojaus toteutetaan yhden aikavakion malliin perustuen. Kuivamuuntajissa lämpenemämallinnus voidaan toteuttaa yhden aikavakion mallilla, sillä lämpö siirtyy suoraan käämistä ja rautasydämeistä ilmaan. (Virtanen 2020)

Tutkimalla muuntajien kuormittamiseen liittyviä standardeja IEC 60076-7 (2018) ja IEC 60076-12 (2008) selviää laskennallisen ylikuormitussuojauksen kompleksisuus verrattaessa sitä lämpötilan mittaukseen perustuvaan suojaukseen. Laskennassa täytyy huomioida ympäristötekijät, kuormitusprofiilit, jäädytystavat ja muuntajan eri osien aikavakiot. Jotkin muuttujista saattavat olla myös toisistaan riippuvaisia. Lisäksi on huomioitava, että asennusympäristön lämpötila voi muuttua kuormituksen funktiona.

Täten virran mittaukseen perustuvan ylikuormitussuojauksen toteutus riippuu sekä suojattavasta muuntajatyypistä että käytetyn suojareleen lämpenemämallinnuksen toteutuksesta. Tämän lisäksi virranmittaukseen perustuva ylikuormitussuoja ei kykene tunnistamaan heikentyneestä jäädytyksestä johtuvaa lämpenemää.

### 5.3.3 Moottorit

Tässä osuudessa moottorilla tarkoitetaan suorakäynnisteistä oikosulkumoottoria. Relesuojauksella voidaan suojata moottoria seuraavilta lämpenemää aiheuttavilta tilanteilta. Tässä yhteydessä käsitellään kolmea ensin mainittua ja neljättä käsitellään kappaleessa 5.4. Staattorin käämisulku on Mörskyn mukaan harvinainen vika ja sen suojaukseen käytetään ylivirtasuojaa (Mörsky 1992, s. 178 – 179.) Ylivirtasuojasta on käsitelty aiemmin kappaleessa 5.1.7.

- epäonnistunut käynnistys
- vinokuormitus
- ylikuormitus
- alijännite
- oikosulku
- staattorin käämisulku

Moottoreiden käynnistykset voivat olla hyvin raskaita. Käynnistysvirta keskijännite oikosulkumoottorilla on kokoluokkaa 3-7 kertainen nimellisvirtaan nähden (Lehesvuo 2020a.) Mikäli käynnistettäessä kuorman vaatima momentti ylittää moottorin momentin, käynnistys epäonnistuu. Tällöin puhutaan moottorin jumitumisesta. Jumitilanteessa kaikki verkosta otettu teho muuttuu lämmöksi, kun onnistuneessa käynnistyksessä osa verkosta otetusta tehosta muuttuu mekaaniseksi liikkeeksi. (Mörsky 1992, s. 172.)

Käynnistykseen aikainen jumisuojaus voi perustua vakioaikaiseen ylivirtasuojaan. Tämä on riittävä tilanteessa, jossa moottorin käynnistysaika tunnetaan ja sen oletetaan pysyvän vakiona. Mikäli käynnistykset alijännitteellä on tarpeen ottaa huomioon, käynnistykseen aikaiseen suojaukseen soveltuu paremmin käynnistysajan ja virran neliölliset lämpenemävaikutukset huomioiva  $I^2t$ -arvoon perustuva suojaus. (Mörsky 1992, s. 173.)

Lämpenemä oikosulkumoottorissa jakaantuu staattorin ja roottorin lämpenemään. Staattoripiirin lämpenemä on normaalissa käyttötilanteessa korkeampi kuin

roottorin, joten moottorin pysäytys ja uudelleen käynnistys ovat staattorin lämpenemän kannalta kriittisiä. Tilanne on kylmän moottorin käynnistyksien kannalta kuitenkin päinvastainen, sillä roottori lämpenee voimakkaasti käynnistystilanteessa. Täten peräkkäiset kylmästä tilasta käynnistämiset ovat roottorin kannalta kriittisiä. Roottori kuitenkin jäähtyy nopeasti, mikäli moottori pyörii hetken. Voidaan siis kuvailulla, että roottorilla on nopeampi lämpenemis- ja jäähtymisaikavakio kuin staattorilla. (Mörsky 1992, s. 173.)

Ylikuormitustilanteessa moottorin kuormitus on suurempi kuin sen nimellisteho. Tällaisessa tilanteessa toinen merkitsevä tekijä on ympäristön lämpötila. Mikäli moottori toimii alhaisemmassa kuin nimellisessä ympäristönlämpötilassa, voidaan moottoria kuormittaa suhteessa suuremmalla kuin nimellisellä teholla. (Mörsky 1992, s. 175.)

Aiemmin kuvailtuihin staattorin ja roottorin eriäviin lämpenemisaikavakioihin perustuen täytyy moottorin ylikuormitussuojaus Mörskyn mukaan perustua vähintään kahteen eri aikavakioon. Tällöin voidaan staattorin ja roottorin lämpenemä ottaa huomioon erikseen. (Mörsky 1992, s. 175.)

Moottorin vinokuormitus eli epäsymmetria voi olla seurausta johdin katkoksesta, yhden sulakkeen palamisesta tai kytkentälaitteen vajaasta kytkeytymisestä, jolloin yksi vaihe ei kytkeydy. Tällöin syntyvä vaihe-epäsymmetria muodostaa moottorin virtaan vastakomponentin, joka edelleen muodostaa roottoripiiriin lämpenemää aiheuttavan magneettivuon. Vaikka syntyvä epäsymmetria ei ole epätahtimoottorille kovin vaarallinen täytyy moottori kytkeä irti verkosta, mikäli vaihekatko ilmenee. Epäsymmetriasuojaus tulisi olla toimintaperiaatteeltaan käänteisaikainen eli suojauksen toiminta-aika on sitä nopeampi, mitä pahempi epäsymmetriatilanne on. (Mörsky 1992, s. 42, 176.)

Moottorisuojauksen laskentaan tarvitaan varsin kattavasti lähtötietoja. Näitä ovat esimerkiksi moottorin nimellisvirta, käynnistysvirta, lämpötilaluokitus, jäähdytys-tapa, normaali käynnistysaika sekä suurin sallittu roottorin jumissa oloaika. Lämpenemäsuojauksen osalta suojaus on suositeltavaa toteuttaa perustuen moottorille

sallittuun lämpenemään. Tämä on parempi lähtökohta, kuin lämpenemisaikavakion käyttö sillä lämpenemisaikavakio on laskettu moottorin nimellisvirralla, ja nimellisvirtaa suuremmilla kuormitusvirroilla lämpenemisaikavakio ei täten päde. Jäähymisaikavakio soveltuu sen sijaan moottorin jäähtymisajan laskentaan. Näiden lisäksi tarvitaan tietoa itse käytön tai prosessin luonteesta sekä ympäristöolosuh-teista. Käytöt voivat olla esimerkiksi jaksottaisia, jolloin moottorille kertyy useam-pia käynnistyksiä. Kaikki nämä täytyy ottaa huomioon suojausta suunniteltaessa. (Lehesvuo 2020a.)

## **5.4 Yli- ja alijännite**

Hetkelliset ylijännitteet voivat olla seurausta esimerkiksi ilmastollisesta tekijästä, kuten ukkosesta. Tällöin on kyse transienttiylijännitteestä. Hetkellinen alijännite voi johtua 3-vaiheisesta oikosulusta, jolloin vikapaikassa jännite menee noltaan ja alijännitteen vaikutus suojattavalle kohteelle riippuu vikapaikan etäisyydestä.

Ylijännitesuojaus jakaantuukin karkeasti suojaukseen transienttisilta ylijännitteiltä ja käyttötaajuisilta ylijännitteiltä. Näistä ensimmäinen liittyy aihepiiriltään laitteis-ton eristyskoordinaatioon ja laitteiston komponenttien valintaan, täten sitä ei työn viitekehysten puitteissa tarkemmin esitellä.

### **5.4.1 Laitteiden yli- ja alijännitesuojaus**

Käyttötaajuiset ylijännitteet aiheuttavat jänniterasitusta eristyksille ja toiminnallisia haittoja joillekin verkkoon kytketyille laitteille kuten muuntajille. Muuntaja toimii normaalisti vielä 1,05 kertaisella jännitteellä muuntajan nimelliseen käyttöjännit-teeseen nähden. Tämän ylittyessä muuntajan ottama magnetoimisvirta voi kasvaa jopa 10 - 100 kertaiseksi. Tilanne huononee entisestään, mikäli samaan aikaan esiintyy alitaajuutta. (Mörsky 1992, s. 197, 201 – 202.) Myös standardisarjassa IEC 60076 on mainittu muuntajien normaalin käyttöjännitteen ylärajaksi 1,05ertainen jännite nimellisjännitteeseen nähden. Tästäkin voidaan standardin mukaan poiketa tilauksen yhteydessä tehtävillä määritelmillä. (IEC 60076-7:2018, s. 24)

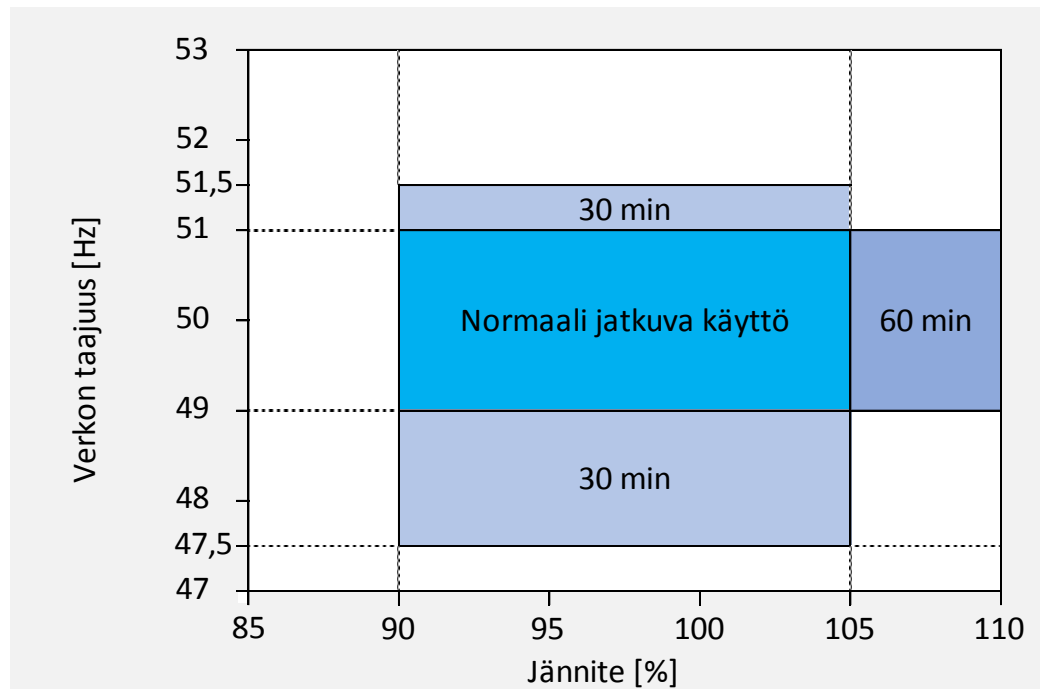
Moottoreilla toistuu samat ilmiöt ylijännitteen ja alitaajuuden suhteen, kuin muuntajilla. Moottorit tulee Mörskyn mukaan kytkeä irti verkosta, kun ylijännite on pysyvästi 15-20% yli nimellisjännitteen. Moottoreille alijännitteet aiheuttavat puolestaan kuormitusvirtojen kasvun myötä lämpenemää, sillä saman tehon tuottaminen alhaisemmalla jännitteellä vaatii suuremman virran. (Mörsky 1992, s. 177.)

Eri laitteiden toimintaehdot yli- ja alijännitteellä saattaa vaihdella kohteen mukaan. Mikäli esimerkiksi moottori liittyy voimalaitoksen järjestelmiin, on voimalaitoksille omat vaatimuksensa toiminnalle normaalista poikkeavilla jännitteillä. (Mörsky 1992, s. 177.)

#### **5.4.2 Toimintavaatimukset yli- ja alijännitteillä**

Yli- ja alijännitesuojausta voidaan tarkastella yksittäisten laitteiden sijaan myös siirtoverkkoliittymän ehtojen kannalta. Moni suurempi teollisuuslaitos onkin liitetty suoraan Fingridin siirtoverkkoon.

Fingridin kulutuksen järjestelmä teknisissä vaatimuksissa (KJV) on määritetty teknisistä vaatimuksista Suomen sähkösiirtoverkkoon liittyville kulutuksille. Nykyisten KJV2018 määritelmien mukaan liityntäpisteen jännitevaihtelualueet eri käyttötilanteille määrittää kyseisen liityntäpisteen verkonhaltija. Fingridin verkkoon liityessä liitettävän laitteiston on kyettävä toimimaan normaalisti vähintään 0,9 – 1,05 kertaisella jännitteellä verkon nimellisjännitteeseen nähden. Esitetty jännitteen vaihtelualue pätee, kun taajuus on normaalin vaihtelualueen 49,0 -51,0 Hz sisällä. Mikäli taajuus ja jännite poikkeavat normaalista, vaatimukset laitteiston vähimmäistoiminta-ajoille on nähtävissä kuvasta 5.10 (Fingrid 2018, s. 20.)



Kuva 5.10 Sähkölaitteiston vähimmäistoiminta-ajat normaalista poikkeavilla verkon eri jännite- ja taajuusalueilla (Lähdettä mukailten: Fingrid 2018, s.21).

### 5.5 Yli- ja alitaajuus

Yli- ja alitaajuudelta suojaus voidaan jakaa karkeasti yksittäisen generaattorin suojaukseen ja valtakunnalliseen tehotasapainosuojaukseen. Tehotasapaino tarkoittaa sitä, että mikäli siirtoverkon kuormitus on korkeampi kuin tuotanto ja siirtokapasiteetti, lähtee taajuus laskemaan. Mikäli tuotantoa on enemmän kuin kulutusta lähtee taajuus nousemaan. Työn rajojien puitteissa tässä osuudessa esitellään yli- ja alitaajuussuojauksen reunaehtoja tehotasapainon näkökulmasta katsottuna.

Edellä kappaleessa 5.4.2 esitettiin taajuuden normaali vaihteluväli ja tästä poikkeavien arvojen osalta kuvan 5.10 mukaiset vähimmäistoiminta-ajat. Verkon taajuustasapainon ylläpitämiseksi Fingrid on laatinut oman sovellusohjeen. Sovellusohje on laadittu Euroopan komission sähköjärjestelmän hätätilaa ja käytönpalautusta koskevan sääntelyn velvoittamana. Euroopan komission sääntöjen mukaan Fingrid ja jakelusta vastaavat verkkoyhtiöt ovat velvollisia luomaan yhteisen suojauksen alitaajuutta eli alitehoa vastaan. Suojauksen tarkoituksena on varautua

tilanteisiin, jossa normaalit häiriötehoreservit eivät riitä kattamaan syntyntä teho-  
vajetta. Fingridin sovellusohjeessa on määritelty, että 30% Suomen kulutuksesta on  
varustettava alitaajuussuojauksella taulukon 5.6 mukaisesti. (Fingrid 2019, s. 3.)

Taulukko 5.6. Taajuusrajat automaattiselle irtikytkennälle ja Fingridin verk-  
koon liittyvän asiakkaan vuosiraportointi portaittain (Lainattu lähteestä:  
Fingrid 2019, s. 3).

	Tavoite	Kokonaistoiminta- aika(s)	%	FG:n asiakas täyttää		
	f (Hz)			% kulutuksesta		
Porras			kulutuksesta	1.2 klo 8-9	1.7 klo 8-9	Koko vuosi
1	48,8	0,15	5			
2	48,6	0,15	5			
3	48,4	0,15	5			
4	48,2	0,15	5			
5	48	0,15	10			

Mikäli taulukkoon 5.6 perustuen irtoaa verkosta kulutuksen lisäksi myös tuotantoa,  
lasketaan irronnut teho vaikutus nettosumman mukaan (Fingrid 2019, s. 3).

Sovellusohjeessa on erillinen maininta teollisuuteen liittyen. Tässä kuvaillaan teol-  
lisuuden verkkoliityntöjen olevan usein sellaisia, että Fingrid kykenee irrottamaan  
kulutusta selektiivisesti kantaverkkotasolla. Tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että  
kantaverkkotasolta irrotettava kuormitus kohdistuu muutamiin suuriin kulutusyksi-  
köihin. Teollisuusasiakkailla onkin mahdollisuus itse ehdottaa millaisissa osissa  
vaadittu 30% osuus toteutetaan. Tämän esityksen perusteella Fingrid määrittää lo-  
pulliset taajuusasettelut kyseiselle asiakkaalle. (Fingrid 2019, s. 4.)

## **6 KESKIJÄNNITEVERKON RELESUOJAUS**

### **6.1 Apusähköjärjestelmä**

Apusähköjärjestelmä koostuu yleisessä tapauksessa akustosta, varaajasta ja apusähkön jakeluverkostosta. Tavanomaisimpia apusähköjärjestelmän jännitetasoja ovat 110 VDC ja 220 VDC, mutta pienissä kohteissa voi esiintyä jännitetasoja aina 24 VDC tasolle saakka.

Teollisuuden tapauksessa voi kokemukseräisesti todeta, että uudemmissa kohteissa lähes joka muuntamalla tai yksittäisessä sähkönjakelujärjestelmään liittyvässä rakennuksessa on oma apusähköjärjestelmänsä. Vanhempien kohteiden osalta käytännön toteutukset ovat vaihtelevia. Tähän on saattanut vaikuttaa myös kohteiden laajennukset ja muutokset aikojen saatossa.

Apusähköjärjestelmä toimii osana verkon suojausjärjestelmää, sillä suojareleet ja katkaisijat saavat lähes poikkeuksetta ohjausenergiansa apusähköjärjestelmästä. Tämä mahdollistaa laitteiston ohjaamisen, vaikka itse jakeluverkon jännite olisikin poissa. Apusähköjärjestelmä on täten samalla kriittinen osa verkon suojausta. (Mörsky 1992, s. 16 – 17.)

### **6.2 Ensiöpiirin mittaukset**

Tehtyjen rajauksien puitteissa käsitellään ensiöpiirin mittauksia perinteisten mittamuuntajien osalta. Kyseiset virta- ja jännitemuuntajat, niiden määrä ja mittauskytkennät ovat suurin yksittäinen tekijä, joka määrittää, millaisia suojaustoiminnallisuksia laitteistoon voidaan toteuttaa. Tässä kappaleessa esitetään yleisimmät perinteiset mittauskytkennät, joita toisioreleillä varustetuissa teollisuuskohteissa on yleisesti käytetty.

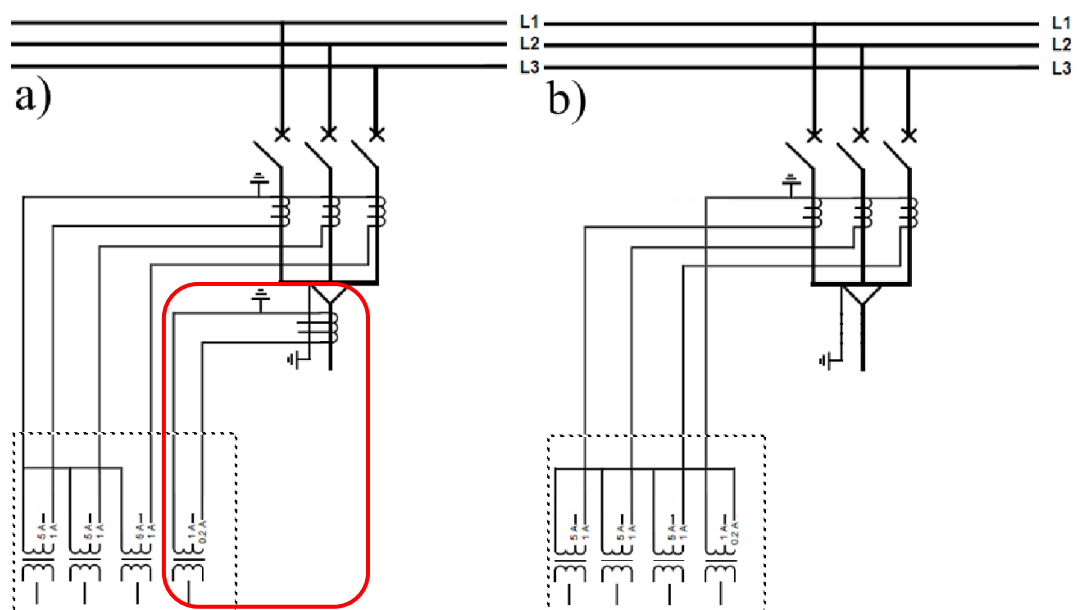
#### **6.2.1 Maasulkuvirtojen mittaus**

Verkossa vikatilanteessa muodostuva maasulkuvirta voidaan mitata useammallakin menetelmällä. Yleisimpiä mittaustapoja ovat:

- Rengasvirtamuuntajaan perustuva mittaus
- Virtamuuntajien toisiopiirin summakytkentään perustuva mittaus
- Numeeristen releiden mahdollistama laskennallinen maasulkuvirranmittaus.

Näistä luotettavin on rengasvirtamuuntajaan perustuva mittausmenetelmä etenkin verkoissa, joissa maasulkuvirrat ovat pieniä. Tällöin summakytkentäisissä mittauksissa pienistäkin vaihevirtojen mittausvirheistä syntyy suuri mittavirhe maasulkuvirran mittaukseen. Herkkyys mittausvirheille lisääntyy, mikäli käytetyt vaihevirtamuuntajat ovat muuntosuhteeltaan suuria. Summavirtaan perustuvat mittaukset ovat alttiita myös näennäisille maasulkuvioille, joita saattaa syntyä erilaisten kytkentätilanteiden seurauksena. (Mörsky 1992, s. 125 – 127, 177, 335.)

Kuvassa 6.1 on esitetty kaksi yleisintä vaihevirtojen ja maasulkuvirtojen mittauskytkennän toteutus tapaa.



Kuva 6.1 Vaihe- ja maasulkuvirtojen mittauskytkennät (Muokattu lähteestä: ABB 1997a, s. 4).

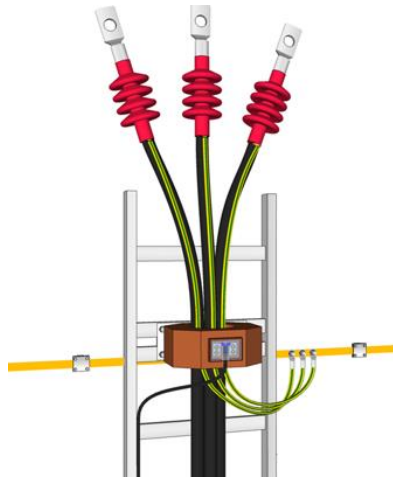
Toteutustavassa a) on erillinen kaapelivirtamuuntaja maasulkuvirtojen mittaamiseen. Kaapelivirtamuuntaja ei näe kuormitus- tai oikosulkuvirtoja sillä

virtamuuntajan läpäisevä kaapeli toimii mittauksessa itse ensiöpiirinä ja vaihevirtojen summa on nolla. Toteutustavassa b) maasulkuvirrat mitataan vaihevirtamuuntajien toisiopiirin summakytken avulla. Kytkenässä vaihevirtamuuntajien toisiopiirit kytkeytyvät rinnan ja näiden maadoitus kiertää kuvan mukaisesti suojareleiden maasulkuvirran mittauskanavan kautta maadoituspisteeseen.

Näennäisiä maasulkuviaksi tulkittavia tilanteita saattaa syntyä esimerkiksi moottorin käynnistys- tai muuntajan kytkentätilanteessa. Edellä mainituissa tilanteissa vaihevirtamuuntajat saattavat kyllästyä toisiinsa nähden eriävästi ja tällöin virtamuuntajien toisiopiirin summavirta poikkeaa nolasta. Summakytkenäisillä maasulkusuojauksilla onkin tarpeen käyttää laukaisun lukitusehtona nolajännitteen havahantumista, jotta välttyttäisiin turhilta laukaisuilta. (Mörsky 1992, s. 177 - 179, 192 – 193.)

Numeeristen suojareleiden maasulkuvirran mittaus voi perustua myös laskennalliseen summaperiaatteeseen. Laskennallisessa maasulkusuojassa summakytkenä ei täten tarvitse tehdä johdottamalla. Tällöin mittauskytkentä vastaa kuvaa a) josta poistetaan punaisella kehystetyllä alueella olevat maasulkuvirran mittaukseen liittyvät komponentit. Toteutustapa on samalla tavoin herkkä näennäisten nollavirtojen suhteen.

Kaapelivirtamuuntaja ei tunne vikoja, jotka sijaitsevat kaapelivirtamuuntajan ja vaihejohtimien liitospisteen välissä (Lehesvuo 2020b). Tästä syystä nykyisillä numeerisilla suojareleillä käytetään laskennallista maasulkusuojaa suojaamaan kaapelipäätteet maasulkuvioilta, mikäli maasulkuvirrat mitataan kaapelivirtamuuntajalla (Niemi 2020). Tilanne havainnollistuu hyvin kuvan 6.2 perusteella.



Kuva 6.2. Kaapelivirtamuuntajan ja kennon liitännäpisteen väliin jäävää osuus kaapelista (Lainattu lähteestä: Lehesvuo 2020b).

### 6.2.2 Vaihevirtojen mittaus

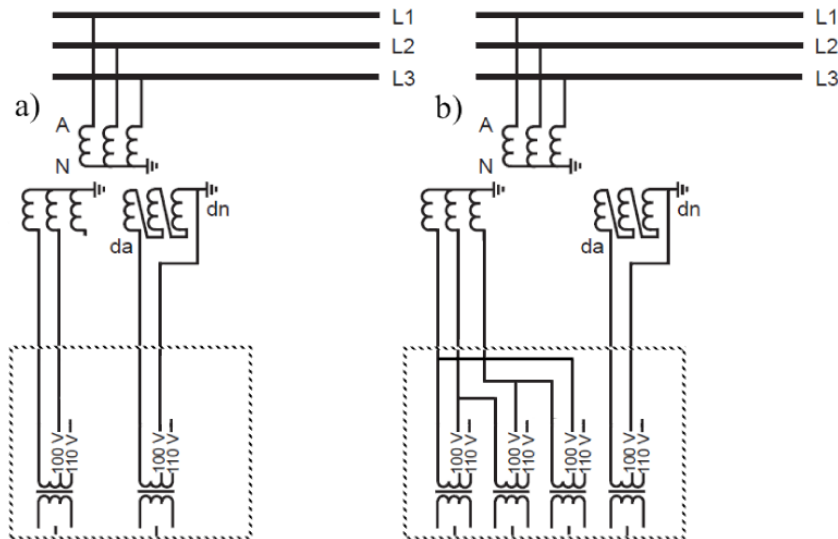
Vaihevirtojen mittaukseen perustuvat monet yleisimmistä suojaustoiminnallisuu-  
det, joista osa esitellään myöhemmin kappaleessa 7. Vaihevirtojen mittaukseen  
käytetään perinteisesti vaihekohtaisia virtamuuntajia kuvan 6.1 mukaisesti. Vaihe-  
virrat mitataan tyypillisesti kaikista kolmesta vaiheesta, mutta myös kahdesta vai-  
heesta toteutettuja suoja toteutuksia on olemassa. Esimerkkinä tästä, BBC:n esitteen  
mukaan generaattoreiden, muuntajien ja johtojen ylivirtasuojaus voidaan toteuttaa  
kahden vaiheen ylivirtasuojauksella. Tällöin verkon tähtipisteen on oltava maasta  
erotettu tai sammutettu (BBC n.d. a).

Mikäli vaihevirrät on mitattu vain kahdelta vaiheelta ei maasulkusuojasta voida  
toteuttaa summaerusteisena. KytKentä vastaa siis kuvaa 6.1 ja kohtaa a) josta pois-  
tetaan esimerkiksi vaiheen L2 virtamuuntaja ja siihen liittyvät johdotukset.

### 6.2.3 Jännitteiden mittaus

Tyypillisesti jännitemittaukset vanhemmissa teollisuuden keskijännitekojeistoissa  
on toteutettu keskitetysti mittakentässä, minne jännitemuuntajat ovat tällöin sijoit-  
ettuina. Mittausjärjestelyjen osalta vanhemmista laitteistoista löytyy useita eri

toteutusvariaatioita. Muutamia esimerkkejä mahdollisista mittauskytkennöistä on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. Jännitteiden mittaus, a) vain yksi pääjännite ja nollajännite, b) kolme pääjännitettä ja nollajännite (Muokattu lähteistä: ABB 1996, s. 5; ABB 1997b, s. 5).

Maasulkusuojaukseen liittyvä nollajännitteen mittaus saadaan kuvasta 6.3 nähtäviltä avokolmiokäämeiltä. Näiden toisioliitännät ovat merkittyinä tunnuksilla da ja dn.

Jännitteen mittaussignaalit ovat tapauskohtaisesti kytketty kojeistossa joko vain mittauskentän riviliittimille tai kyseisen kojeiston kiertokaapelointiin. Mikäli mittaussignaalit ovat johdotettuina kiertokaapelointiin ovat ne tyypillisesti saatavilla jokaisessa saman kojeiston eri kentässä. Mittaussignaalien määrässä on eroja tapauskohtaisesti. Joissain kohteissa saattaa olla pelkkä nollajännitteen mittaus.

### 6.3 Eri ikäiset ja tyyppiset suojareleet

Eri ikäiset suojareleet voivat olla toimintaperiaatteiltaan erilaisia. Tämän myötä laitteiston suojausjärjestelmän eri osa-alueet voivat poiketa nykyisistä esimerkiksi mitoitukseltaan. Tähän kappaleeseen on kerätty teknistä tietoa eri aikakausien suojareleiden eroavaisuuksista releusintoja ajatellen. Vaikka työ on rajattu

koskemaan vain toisioreleitä, tässä yhteydessä esitellään lyhyesti ensiöreleiden toimintaperiaate.

### 6.3.1 Ensiöreleet

Vanhimmat suojareleet ovat tyypiltään niin sanottuja ensiöreleitä, jotka tyyppiinsä viitaten toimivat osana ensiöpiiriä. Tällöin releen laukaisukäsky välitetään mekaanisesti katkaisijalle. Tämän vuoksi releen on oltava fyysisesti lähellä katkaisijaa. Ensiöreleiden suojaustoimintaperiaate perustuu virran kulkuun releen rakenteiden läpi ja sen aikaansaamaan toimintaan. Tarkemmin kuvattuna virta voi esimerkiksi Bi-metalliin syntyvän muutoksen kautta vapauttaa releen sisäisen jousikuorman, josta ohjausliike saa energiansa. (Lassila 2020.)

Ensiöreleen ollessa osana ensiöpiiriä tarvitaan jokaiselle vaiheelle oma releensä. Samoin erityyppiset suojaukset vaativat omat releensä. Tästä syystä suojauksien toteutus on usein tehty siten, että eri vaiheilla saattaa tapauskohtaisesti olla erityyppiset suojareleet. Tästä esimerkkinä kuvassa 6.4 on kokeneen relekoestajan Esa Syvävojan mukaan todennäköisesti suojausjärjestely, jossa vaiheilla L1 ja L3 on ylikuormitussuojina lämpöreleet ja vaiheella L2 oikosulkusuojana ylivirtarele. Syvävoja kommentoi myös, että yleisempi toteutus on kaksi ylivirtasuojaa ja yksi lämpörele. (Syvävoja 2020.)



Kuva 6.4. Ensiörelleillä toteutettu suojausjärjestely (Lainattu lähteestä: Lasila 2020).

Ensiörelleet eivät tarvitse erillistä apusähköjärjestelmää tai mittamuuntajia muuntaamaan mitattavaa suuretta, sillä rele saa toimintaansa tarvittavan energian yleensä jousikuormasta ja ensiöpiirin virta vaikuttaa suoraan suojareleeseen. Kuten ensiöreleen sijainnista osana ensiöpiiriä on kuvailtu ja kuvasta 6.1 todettavissa, eivät ensiörelleet ole aseteltavissa tai koestettavissa ilman jännitteettömäksi tekemistä.

Tämän tyyppisten suojausten uusinta vaatii jo kattavampia laitteistomuutoksia, kuten apusähköjärjestelmän ja mittamuuntajien lisäykset. Tämän vuoksi työssä ei ensiörelleitä tätä tarkemmin käsitellä.

### 6.3.2 Sähkömekaaniset toisioreleet

Ensimmäisiä toisioreleitä ja edellä esiteltyjä ensiörelleitä yhdistävä tekijä on se, että sähköinen suure muutetaan releessä mekaaniseksi liikkeeksi esimerkiksi magneetikentän muutoksen tai lämpenemän mallinnuksen kautta. Toisioreleet eivät

nimensä mukaisesti ole enää osa ensiöpiiriä. Mitattava suure on galvaanisesti erotettu ensiöpiiristä mittamuuntajilla ja skaalattu suojareleille standardoiduille mittausalueille. Ensiöpiiristä galvaanisesti erotettu ja suojareleille muuntosuhteella skaalattu suure mahdollistaa suojareleen vapaamman sijoittamisen. (Elovaara & Haarla 2011b, s.198; Mörsky 1992, s. 22 – 23.)

Sähkömekaanisessa toisioreleessä mekaanista liikettä ei kohdisteta suoraan ensiöpiiriin, vaan liike muutetaan lähtöreleen apukoskettimilla sähköiseksi ohjausviestiksi. Sähkömekaaninen suojarele saa käyttö- ja ohjausenergiansa täysin tai osittain mittauspiiristä. Vanhojen BBC:n valmistamien suojareleiden käyttöohjeiden perusteella lähtöreleiden kela ohjataan mittauspiiristä otetulla energialla, mutta releelle voidaan kytkeä lisäksi erillinen apusähkösyöttö. Mikäli releissä on erillinen apusähköliitäntä, tällöin lähtöreleiden apukoskettimien kautta lähtevät ohjaussignaalit ottavat energian apusähköjärjestelmästä. Tämän on mainittu olevan suositeltava kytkentätapa. Mikäli laukaisun ohjausenergia ja laukaisusignaalin energia molemmat saadaan virtamuuntajalta, suomennetussa manuaalissa oli tästä käytetty nimitystä virtamuuntajalaukaisu (Strömberg n.d.; BBC n.d. a; BBC n.d. b.)

Toimintaenergian osittain tai kokonaan ottaminen mittauspiiristä johtaa siihen, että mittamuuntajien toisioteho on pitänyt mitoittaa releen tarvitseman tehon eli taakan mukaan. Sähkömekaanisilla releillä mittamuuntajiin kohdistuva taakka saattaa olla useita kymmeniä voltiampeereita. (Mörsky 1992, s. 22.) Tutkittujen käyttöohjeiden ja esitteiden perusteella lämpöreleen muodostama taakka 5 A nimellisvirralla on 15 VA ja ylivirtareleen 8,5 – 10,5 A (Strömberg n.d.; BBC n.d. a; BBC n.d. b.)

Sähkömekaanisille releille on tyypillistä, että yksi rele sisältää tiettyyn mitattuun suureeseen perustuvan suojauksen. Täten ylivirta-, lämpenemä- ja maasulkusuojaukselle on yleensä omat releensä.

### **6.3.3 Staattiset toisioreleet**

Staattisiksi suojareleiksi kutsutaan releitä, joiden toiminnallisuus perustuu puoli-johdekomponenteilla ja yksittäisillä mikropiireillä tehtyyn signaalinkäsittelyyn.

Staattiset toisioreleet tarvitsevat erillisen apusähkön, mutta ovat samalla toimintakykyisiä ensiöpiirin jännitteistä tai virroista riippumatta. Staattisten releiden sisällä on omat sovitinmuuntajansa, jotka muuntavat mittamuuntajilta saatavat toisiopiirin mittaussuureet releen elektroniselle signaalinkäsittelytasolle sopiviksi. Staattisten suojarleiden muodostama taakka on pieni: 5 A nimellisvirralla tyypillisesti 0,5 VA. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 344 – 345; Mörsky 1992, s. 23 – 25.)

Staattisilta suojarleiltä saadaan laukaisukäskyn lisäksi apukoskettimien kautta myös tilatietoja kuten laukaisut ja havahtumiset. Joissain releissä on myös lukitus mahdollisuus osalle toiminnoista. Staattisten releiden tapauksessa on yleistä, että releessä on vain yksi suojausfunktio tai tiettyyn mitattuun suureeseen perustuvat suojaukset. Moottorinsuojarele on esimerkki, jossa samaan mitattuun suureeseen perustuen releessä yhdistyy oikosulkusuojaus, ylikuormitussuojaus ja vinokuormitussuojaus. Yleisessä tapauksessa johtolähdöllä on kuitenkin erilliset suojarleet eri suojaustoiminnoille, kuten maasululle ja ylivirrälle. Tilanne on täten pääosin sama kuin sähkömekaanisten suojarleiden osalta.

Etuna sähkömekaanisiin releisiin nähden on staattisten suojarleiden toimintatarkuus ja asettelualueiden laajempi säätömahdollisuus. Elektroninen signaalinkäsittely mahdollistaa releiden kompaktimman ja kevyemmän rakenteen sähköisiä ilmiöitä mekaanisesti mallintaviin releisiin nähden. (Mörsky 1992, s. 22 – 24.)

Kolikon käänttöpuolena staattisilla releillä on jatkuva apusähkön tarve ja elektroniikan ikääntymisen tuomat huoltotarpeet (Elovaara & Haarla 2011b, s. 345). Esimerkkinä huollon tarpeesta suojarleissä on oma teholähde, joka sisältää elektrolyyttikondensaattoreita. Kokemus on opettanut, että näiden ikääntyminen voi pahimmillaan aiheuttaa koko teholähteen rikkoutumiseen.

Staattisista suojarleistä hyvä esimerkki on Strömbergin J3-sarjan suojarleet, joita on edelleen teollisuudessa runsaasti käytössä. Edellä esitettyyn huollon tarpeeseen viitaten. ABB:n nykyinen suositus näiden huoltovälille on 10 vuotta.

### 6.3.4 Eri ikäiset mikroprosessoripohjaiset toisioreleet

Kirjallisuudessa Mörsky (1992, s.25) on käyttänyt kaikista mikroprosessorireleistä nimitystä numeerinen suojarahle. Elovaara ja Haarla (2011b, s. 345) ovat puolestaan käyttäneet näistä käsitettä mikroprosessorirele.

Myös ammattikielessä on käytössä vastaavat termit. Näistä mikroprosessoripohjaisilla suojarahleilla viitataan usein 80-luvulla markkinoille tulleisiin laitteisiin. Vanhemmille mikroprosessoripohjaisille laitteille on tyypillistä, että suojauskonfiguraatiot eivät ole monipuolisesti käyttäjän muokattavissa. Numeerisista laitteista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä vapaasti konfiguroitavaa laitetta. Tällaisia laitteita on tullut markkinoille 90-luvulla. Jako käsitteiden välillä ei täten ole täysin selkeä.

Käytetyistä termeistä riippumatta kyseisten releiden signaalinkäsittely on toteutettu nimensä mukaan mikroprosessoreilla. Laitteissa on aiempiin relesukupolviin verrattuna omaa muistia ja tiedonprosessoitokykyä. Laitteilla on yleensä myös sarjaliikenne liitettävyyttä, pois lukien jotkin ensimmäisen sukupolven mikroprosessorireleet. Digitaalinen signaalinkäsittely ja mikroprosessoripohjaiseen laskentaan perustuva suojaus on tarkka ja samalla mahdollistaa laitteen kompaktimman koon aiemmin esiteltyihin suojarahleisiin nähden. Samalla releissä on toteutettu useampien erityyppisten suojausfunktioiden integrointi samaan laitteeseen. Mikroprosessoripohjaisissa suojarahleissa on lisäksi oma itsevalvonta ja laite pystyy tämän myötä ilmoittamaan omasta viastaan. (Mörsky 1992, s. 25 – 34.)

Yksi esimerkki ensimmäisen sukupolven mikroprosessorireleistä ovat Strömbergin/ABB:n valmistamat SPACOM-sarjan releet, joita on edelleen käytössä runsaasti teollisuudessa. SPACOM-sarjan osalta voidaan nähdä jotain analogiaa vanhempiin relesukupolviin, sillä releen mallin mukaan näihin on saatavilla erilaisia mittaavia kortteja. Jokaisella mittaavalla kortilla on omat toimintonsa, siinä missä aiemmin oli kokonainen suojarahle tai useampikin samojen toiminnallisuuksien toteuttamiseksi.

## **Nykyiset mikroprosessoripohjaiset toisioreleet**

Viimeisintä suojarelesukupolvea kutsutaan niin sanotuiksi numeerisiksi suojareleiksi. Laitteiden voidaan sanoa sisältävän kaiken saman, minkä ensimmäisen sukupolven mikroprosessorireleet ja tämän lisäksi paljon muuta toiminnallisuutta. Siinä missä ensimmäisissä mikroprosessoripohjaisissa suojareleissa oli tyypillisesti tietyt suojausfunktiot, jotka vaativat vain kytkennän ja releasettelut toimiakseen, ovat numeeriset suojareleet kuin ohjelmoitavia automaatiolaitteita. Vapaa ohjelmoitavuus antaa lähes rajattomat mahdollisuudet signaalien käyttämiseen, mutta lisää huomattavasti hyvän ja luotettavan suojauskonfiguraation luomisen vaativuutta. Konfiguroinnin vaativuutta voi avata sillä, että joissain suojareleissa osa analogiatuloista on määritettävissä konfiguraatiossa. Kaikissa aiemmissa suojarelesukupolvissa analogiakanavat ovat olleet kiinteästi määritettyjä.

Numeerisille suojareleille onkin tyypillistä, että laitteisiin on ohjelmallisesti liitetty paljon muita toiminnallisuuksia. Näistä esimerkkeinä häiriötallenteet, itsediagnostiikka ja erilaiset suojaukseen liittymättömät mittaukset, kuten tehomittaukset ja yliaaltojen mittaus. Elovaara ja Haarla (2011b, s. 345) ovatkin maininneet suojauskonfiguraatioiden suunnittelutyötä tekevien henkilöiden kuvailleen asettelujen laajuutta kokonaisuutena asetteluviidakoksi. Tämän lisäksi he ovat huomauttaneet, että vaikka numeerisiin laitteisiin on saatavilla paljon oheistoimintoja, täytyy muistaa, että suojareleen ensisijainen tehtävä on havaita vika ja kytkeä se pois verkosta.

Myös työtä valvonut Matti Niemi totesi, että konfiguraatioita tehtäessä täytyy priorisoida suojaustoiminnallisuuteen. Rajoitteita muiden toimintojen toteuttamiseen voi Niemen mukaan tulla ensimmäisten numeeristen suojareleiden osalta esimerkiksi muistin määrässä. (Niemi 2020.)

### **6.3.5 Eri ikäisten suojareleiden tekninen yhteensopivuus**

Edellä käsiteltyjen kappaleiden perusteella sähkömekaanisia suojareleitä korvattaessa saattaa esiintyä teknisiä yhteensopivuushaasteita. Teollisuudessa

sähkömekaaniset suojareleet ovat kuitenkin jo vähemmistöä, eli tilanne ei oletettavasti ole kovin yleinen.

Mikäli apusähköjärjestelmä on tarpeen rakentaa, tehdään se tällöin uusimpien standardien ohjeistusten mukaisesti, kuten aiemmin on muutostöitä koskevissa määritelmässä esitetty. Koska sähkömekaanisten releiden käyttöohjeiden ja esitteiden perusteella releiden taakat eivät vaikuta olleen standardoituja, täytyy mittamuuntajien yhteensopivuus tarkistaa tapauskohtaisesti. ABB:n TTT-käsikirjassa (2000, s.288) on esitetty standardin mukaiset tarkkuusrajakertoimet mittamuuntajille, nämä ovat: 5, 10, 15, 20 ja 30.

Tarkkuusrajakerroin ilmoitetaan nimellisellä toisiotaakalla. Mikäli taakka poikkeaa nimellisestä voidaan tarkkuusrajakerroin  $n$  laskea seuraavasta yhtälöstä. (Mörsky 1992, s. 110, 113.)

$$n = n_N \left| \frac{S_i + S_N}{S_i + S_2} \right| \quad (6.1)$$

$n_N$  = virtamuuntajan tarkkuusrajakerroin nimellistaakalla

$S_i$  = virtamuuntajan sisäinen taakka

$S_N$  = virtamuuntajan nimellinen taakka

$S_2$  = virtamuuntajan todellinen taakka

Yhtälön 6.1 mukaan todellisen taakan  $S_2$  pienentyessä laskennallinen tarkkuusrajakerroin kasvaa. Tällöin virtamuuntajat eivät kyllästä yhtä herkästi ja vikavirrat toistuvat tarkemmin virtamuuntajan toisiopiiriin. (Mörsky 1992, s. 112 – 113.) Täten suojareleen vaihto pienemmän toisiotaakan muodostavaan reletyyppiin saattaa johtaa samalla tarpeeseen tarkastaa taakan pienenemisen vaikutus. Suuremmalle taakalle mitoitettu virtamuuntaja toistaa vikavirrat suurina toisiopiiriin, josta saattaa aiheutua termistä rasitetta suojareleelle. (Willman 2020b).

Selektiivisyys on teollisuuden sähkönjakelussa tärkeä osatekijä vianpaikannuksen ja häiriön laajuuden minimoinnin näkökulmasta. Eri relesukupolvista mekaanisten,

sähkömekaanisten, staattisten ja mikroprosessori pohjaisten suojarleiden asettelu-tarkkuus ja toimintanopeus saattavat poiketa eri syistä toisistaan.

Syväojan (2020) mukaan mekaanisilla ja sähkömekaanisilla suojarleillä esiintyy koestaessa hyvin usein viivettä aseteltuun nähden, kun kyse on ensimmäisestä lau-kaisusta. Tätä esiintyy etenkin silloin, kun suojarle on ollut pidemmän aikaa toi-mimatta. Syy on tällöin mekaanisen koneiston kangistumisessa.

Vanhoilla staattisilla suojarleillä puolestaan potentiometriä asettelutarkkuus saat-taa kokemusperäisesti arvioituna heittää jopa 10%. Syy tähän on usein vanhentu-neissa komponenteissa, jotka vääristävät potentiometriä asettelu-arvoja.

Lakervi ja Partanen (2008, s. 182) ovat esittäneet erilaisia aikaporrastuksia perät-täisille suojausportaille releen tyyppin mukaan, jotta selektiivisyys varmistetaan. Näiden suositusten mukaan mekaanisilla suojarleillä porrastus tulisi olla vähintään 500 ms, vanhemmilla elektronisilla suojarleillä vähintään 300 ms ja mikroproses-soripohjaisilla suojarleillä vähintään 150 ms.

## **6.4 Etäohjaus ja kommunikaatio**

Kappaleessa esitellään etäohjaus ja kommunikaatioprotokollat hyvin pintapuoli-sesti. Näkökulmana on kuvata suojarleiden kommunikaation kehitystä viime vuo-sikymmenten aikana. Aihetta on lähestytty käytännöllisestä näkökulmasta kahden pitkään markkinoilla toimineen suojarlevalmistajan manuaalien sekä alan kirjalli-suuden perusteella.

Tiedonsiirron sisältö, erilaiset kommunikaatioprotokollat ja laitteiden kommuni-kaatioon liittyvät liitännät tulevat olemaan kasvava osatekijä tulevaisuuden suoja-releusinnoissa myös teollisuudessa.

### **6.4.1 Valvonnan ja etäohjauksen kehitys**

Vuonna 1992 kirjoittamassaan relesuojaustekniikan kirjassa Mörsky (1992, s.363) on todennut, että sähköjaketun suojauksen myötä syntyy suuri määrä tilatietoja

laitteiden toiminnasta. Tällaisia ovat esimerkiksi hälytykset ja laukaisut. Tämä informaatio on Mörskyn mukaan kerättävä kootusti yhteen paikkaan, josta se on nopeasti ja selkeästi havaittavissa.

Äsken mainitun kirjan julkaisuhetkellä hälytyskeskuksia on kuvattu valvonnan mahdollistavina laitteina, joihin edellä mainitut tilatiedot liitetään sähköasemalla. Hälytyskeskuksen on kuvattu kirjaavan ja tallettavan myös mitta-arvoja sekä olevan liitettävissä kaukokäyttö ja automaatiojärjestelmiin. Näiden ominaisuuksien myötä hälytyskeskuksien on kuvattu osittain korvaavan perinteistä valvomotyötä ja kaukokäyttökeskuksen toiminnallisuuksia. Hälytyskeskuksien on näiltä osin kuvattu sulauttavan erillisiä toiminnallisuuksia, kuten mittauksen, suojauksen, valvonnan ja tietoliikennetoiminnot samaan kokonaisuuteen. (Mörsky 1992, s. 363.)

Elovaaran ja Haarlan vuonna 2011 julkaistun Sähköverkot II kirjan sähköasema-automaatiota käsittelevässä kappaleessa on teollisuuden sähköasema-automaatioon soveltuvia näkökantoja. Kyseisessä kappaleessa esimerkiksi kuvaillaan, että paikallis- tai etäohjauksia sähköjakelujärjestelmään voidaan tehdä sähköaseman automaatiojärjestelmän kautta. Automaation on kuvattu toimivan osana tiedonsiirtoa fyysisestä liitettävyydestä aina siirrettävän tiedon muuntamiseen eri laitteille soveltuvaan muotoon. Tässä yhteydessä tiedon muuntamisella on tarkoitettu eri kommunikaatioprotokollien yhteensovittamista, kuten valvomon ja sähköaseman välillä ja edelleen sähköaseman laitteiden välillä. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 386.)

Kirjan kirjoitushetkellä on kuvattu nykyaikaisen sähköasema-automaation mahdollisuudesta olla rakenteeltaan hajautuneempi. Tällainen järjestelmä voi koostua verkosta, johon mikroprosessoripohjaiset laitteet on liitetty. Mikroprosessoripohjaisten laitteiden ja sen mahdollistaman digitaalisen tiedonkäsittelyn eduiksi on mainittu esimerkiksi parempi tarkkuus, yksinkertaisempi tiedonsiirto, monipuolisemmat toiminnot, itsenäisempi valvonta ja parempi tiedon prosessointi mahdollisuus. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 387.)

Modernin sähköasema-automaation on kuvailtu olevan kolmekerroksinen. Sähköaseman eri laitteet ja mittaukset ovat liitettynä sähköaseman prosessiväylään.

Samaan väylään on liitetty myös suojareleet, jotka vaihtavat tietoa keskenään ja muiden laitteiden tai ylemmän asematason palvelimen kanssa. Asematason laitteet liittyvät puolestaan asemaväylään, joka mahdollistaa kommunikaation muiden sähköasemien kanssa sekä ylemmän tason valvontajärjestelmän suuntaan. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 390.)

Digitaaliseen aikakauteen siirtymisen on kuvattu tuoneen omat haasteensa. Yhdeksi haasteeksi on mainittu tietoliikennejärjestelmien suunnitteluosaaminen etenkin prosessorien häiriösuojauksen kannalta. Myös laitteiden nopea kehittyminen, vaihtuvat ohjelmistoversiot ja näiden yhteensopivuus on nähty mahdollisena järjestelmän ylläpidollisena haasteena. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 388.)

#### **6.4.2 Laitevalmistajien käyttämät kommunikaatioprotokollat**

Strömbergin kehittämä SPA (Strömberg Protection Acquisition) kommunikaatioprotokolla on ollut tässä työssä tutkittujen materiaalien perusteella yksi ensimmäisistä sähköasema-automaatioon suunnitelluista kommunikaatioprotokollista. Kommunikaatioprotokollan manuaalin mukaan ensimmäinen versio on julkaistu jo vuonna 1984 ja viimeinen päivitys siihen on tullut vuonna 1996. (ABB 2001, s. 3.) Luonnollisesti SPA-väylä on hyvin yleisesti käytetty vanhemmissa Strömbergin ja myöhemmin ABB:n valmistamissa laitteissa. Protokollaa käytetään edelleen ja sitä tukevia laitteita löytyy laitemanuaalien perusteella myös muiden suojareleitä ja sähköasema-automaatiota valmistavien toimijoiden valikoimista. (Schneider 2020; Arqtec 2019, s. 14.)

Manuaaleista kerätyn tiedon mukaan 1990-luvun alussa julkaistu, edelleen käytetty ja aktiivisesti päivitetty IEC 60870-5-103 on ollut Siemensin lähtökohta suojareleissä käytetyissä kommunikaatioprotokollissa (IPCOMM 2020; Siemens 1995, s. 56). Edellä mainittua IEC standardia voidaan kuvata ylitason standardijulkaisuksi, jonka sisältöä laajentavat liitännäiset standardijulkaisut eri osa-alueilta. Liitännäisissä standardijulkaisuissa on kuvattu tarkemmin eri osa-alueiden teknisiä määrittelyjä. Eri toimittajien välistä yhteensopivuus on pyritty varmistamaan

standardoimalla toiminnot laitteittain. Standardi kuitenkin sallii valmistajakohtaiset laajennukset, joita suojalaitteiden valmistajat ovat laajasti soveltaneet. (IPCOMM 2020.)

Kummatkin edellä mainituista kommunikaatioprotokollista ovat niin sanottuja vertikaaliprotokollia, joissa valvomotason kommunikaatioyksikkö on ”master” ja yksittäiset suojareleet ovat ”slave”-yksiköitä. Kommunikaatio toimii siten, että slave yksiköt vastaavat asematason kyselyihin tai käskyihin, muutoin nämä ovat passiivisia eli eivät lähetä tietoa. (ABB 2001, s. 10; IPCOMM 2020.)

2000-luvulle tultaessa molempien valmistajien laitteisiin on manuaalien perusteella tullut lisäksi teollisuusautomaatiossa käytettyjä kommunikaatioprotokollia. Toisen sukupolven numeeristen suojareleiden relemanuaaleista on nähtävissä myös viitteitä rinnakkaisten laitteiden välisestä eli horisontaalisesta kommunikaatiosta, joka vähentää laitteiden välisen fyysisen johdotuksen tarvetta. Siemens on käyttänyt IEC-870-5-2 standardiin perustuneesta horisontaalitiedonsiirrosta nimitystä IRC (Inter Relay Communication) ja ABB:n saman aikakauden vastine horisontaalitiedonsiirrosta on perustunut puolestaan LON-protokollan (Local Operating Network) pohjalle kehitettyyn versioon. (Siemens 2000, kappale 7; ABB 1997c, s. 31; ABB 2014, s. 20 – 25.)

### **6.4.3 Alaa yhdistävä kommunikaatioprotokolla**

Sähköasemien kommunikaatoratkaisut ovat perustuneet joko valmistajien omiin kommunikaatioprotokolleihin tai muille aloille alun perin suunniteltujen standardien pohjalle. Tämä on luonut haasteita eri valmistajien välisten laitteiden yhteensopivuuteen kommunikaation osalta. Haasteita on saattanut ilmetä pahimmillaan jopa saman laitevalmistajan eri ikäisten suojareleiden välillä. Usein yhteensovittaminen on vaatinut tapauskohtaista suunnittelutyötä ja erilaisia protokollamuuntimia. (ABB 2010, s.7.)

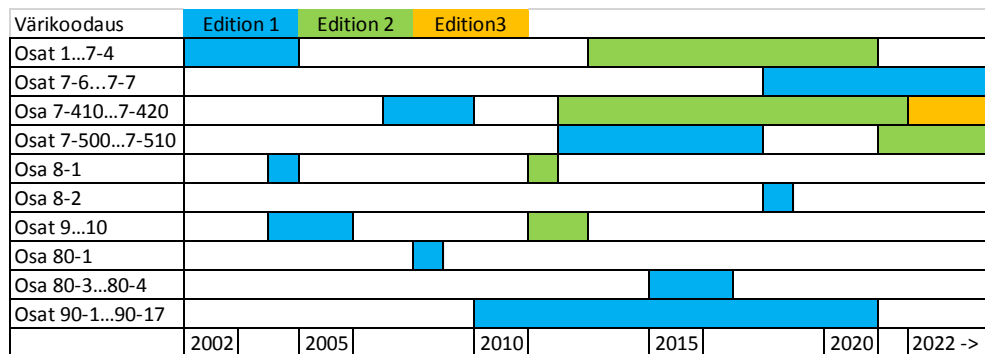
Suuremmassa kuvassa eroavaisuuksia kommunikaatioprotokollien osalta on luonut myös perinteinen maantieteellinen jako IEC ja ANSI (American National Standards

Institute) pohjaisten standardien kesken. Ratkaisuksi yhteensopivuushaasteisiin 1990-luvun puolivälissä alettiin kehittää yhtenäistä standardia kommunikaatioprotokollalle, joka mahdollistaisi paremman integraation eri laitteiden, laitevalmistajien ja järjestelmien välillä. Vuonna 2004 julkaistiin tämän kehitystyön pohjalta IEC 61850 standardisarja. Tämä tarjoaa teknisesti yksityiskohtaisen viitekehyksen sähköasemien automaatiojärjestelmien kommunikaatiolle. (ABB 2010, s. 4.)

ABB:n IEC 61850 protokollaa käsittelevä julkaisu kuvaa hyvin yksityiskohtaisesti protokollan suunniteltuja ominaisuuksia. Menemättä yksityiskohtien tasolle, julkaisun perusteella protokolla kattaa hyvin perusteellisesti sähköasema-automaation tarpeet. Kommunikaatio voi olla sekä vertikaalista suojareleen ja yläaseman välistä tai horisontaalista rinnakkaisten suojareleiden välistä. Horisontaalikommunikaatiossa, eli saman tason laitteiden välisen tiedonsiirron kautta, voidaan siirtää niin tilatietoja, lukituksia, laukaisuja ja jopa analogiamittaustietoa tietyin ehdoin. Tämä vähentää merkittävästi laitteiden välisen johdotuksen tarvetta. Nykyteknologia mahdollistaa lisäksi hyvät tiedonsiirtonopeudet, joka mahdollistaa aikakriittisempien tietojen siirron kommunikaation kautta. Protokollasuunnittelun yksi kulmakivistä on pyrkimys yhteensopivuuteen eri valmistajien välillä. Toinen tärkeä suunnittelukriteeri on protokollan vakaus, jonka tarkoitus on ottaa huomioon sähköasemien elinkaari. Itse sähköasemien primäärlaitteiden kestoikä voi olla jopa 60 vuotta, joten monet sähköasema-automaatioon liittyvät laitteet joudutaan uusimaan jopa useamman kerran tällä aikavälillä. Kolmantena tärkeänä suunnittelukriteerinä on mainittu globaali käytettävyys, siten protokollan on sovelluttava käytettäväksi erilaisissa teknisissä ympäristöissä. (ABB 2010.)

Kuten aiemmin mainittu IEC 60870-5-103, myös IEC 61850 on rakenteeltaan standardi, joka koostuu useista eri osa-alueista. Nämä osa-alueet ovat omia liitännäisstandardejaan ja täten päivitettävissä erikseen. IEC määrittelee standardeille vakaajankohdan, jota ennen standardia ei muuteta. Vakauspäiväys on nähtävissä IEC:n verkkosivuilta standardin julkaisutietojen yhteydessä. Tämän ajankohdan jälkeen standardi joko uudelleen vahvistetaan, kumotaan, korvataan uudemmalla versiolla tai sitä muutetaan. (ABB 2010; IEC 2020b.)

Kuvan 6.5 aikajanalla on esitetty IEC 61850 standardin eri osuuksien päivityshistoria. Kuvassa eivät näy standardin muutokset tai vahvistukset.



Kuva 6.5. IEC 61850 standardin julkaisut ja revisiopäivitykset eri osa-alueittain (Koottu lähteestä: IEC 2020).

IEC 61850 standardisarjan ensimmäisestä laajasta päivityksestä käytetään yleisesti nimitystä IEC 61850 edition 2. Julkaisun tiivistelmän mukaan merkittäviä muutoksia tuli standardin soveltamisalaan. Soveltamisalan laajennukset koskivat sähkönlaadun valvontaa, tilastitiikan ja historiatietojen siirtoa, hajautetun tuotannon valvontaa sekä siihen liittyvää automaatiota, sähköasemien välistä kommunikaatiota ja älyverkkoratkaisuja. (IEC 2020c.)

Käytännön kokemukset IEC 61850 käytöstä on nostaneet esille joitain yhteensopivuus haasteita. Eri valmistajien laitteiden välillä on ollut protokollan ensimmäisessä versiossa ollut eroavaisuuksia, jotka ovat aiheuttaneet yhteensopivuushaasteita. (Niemi 2020)

Elovaara ja Haarla ovat 2011 julkaistussa kirjassaan kirjoittaneet vastaavista havainnoista liittyen protokollaa soveltavaan pilottihankkeeseen. Vaikka standardien vaatimuksien tarkoitus on tehdä laitteiden ominaisuuksista laitevalmistajasta riippumattomia, on pilottihankkeen yhteydessä havaittu edelleen valmistajakohtaisia eroja. Täten standardin ei ole todettu kirjan kirjoitushetkellä taanneen täydellistä riippumattomuutta laitevalmistajien kesken. (Elovaara & Haarla 2011b, s. 391)

Siinä missä väyläteknologioiden yleistyminen vähentää johdotuksen tarvetta, muodostaa se samalla uuden ulottuvuuden sähköasemien ylläpidon näkökulmasta. Perinteisesti laitteiston toimintaan voi perehtyä pitkälti aseman piirikaavioiden pohjalta, mutta väylää pitkin siirrettävät tiedot eivät näistä ole nähtävissä. Täten sähköasemalla tehtävien ylläpitotoimenpiteiden, kuten koestusten suorittamisen tai vianhaun, näkökulmasta muodostuu kommunikaatiosta uusi ulottuvuus.

## 7 SUOSITELTAVAT SUOJAUSTOIMINNALLISUUDET

### 7.1 Suojaustoiminnallisuudet kennoittain

Universaalin ja samalla yksityiskohtaisen suojaustoiminnallisuuden määrittäminen jo olemassa oleville laitteistoille ja valikoiduille lähtötyypeille on hyvin haastavaa. Teoria osoittaa, että yksityiskohtien tasolla mahdollisuuksia suojausten toteuttamiseen on runsaasti.

Hyvä lähtökohta suojauksien osalta on olemassa oleva vanha suojaustoiminnallisuus. Vertaamalla tätä standardien vaatimukseen voidaan arvioida mahdollisten lisäysten tarvetta. Läpikäydyn teorian ja ABB:n koulutusmateriaalin perusteella, suojaareleillä toteutettava perustason suojaus saavutetaan taulukon 7.1 mukaisilla suojaustoiminnallisuuksilla.

Taulukko 7.1. Suojareleillä toteutettava perustason suojaus määritetyillä lähtötyypeillä (Soveltaen lisäksi lähteitä: Lehesvuo 2020a; Lehesvuo 2020b).

Suojaustoiminnallisuus	Syöttökenno	Johtolähtö	Moottorilähtö	Muuntajalähtö
Maasulku	X	X	X	X
Ylivirta	X	X	X	X
Lämpenemä		X	X	
Ylijännite	(*)		(*)	
Alijännite	(*)		(*)	
Taajuussuojat	(o)	(o)	(o)	(o)
Käynnistystyksen valvonta			X	
Epäbalanssi			X	
Jumisuojaus			X	
(*) Suojaustarve tarkastettava tapauskohtaisesti				
(o) Suojaustarve tarkastettava tapauskohtaisesti. Tulee yleistymään, kun 30% kaikesta Suomen kulutuksesta saatetaan alitaajuussuojauksen piiriin, katso kappale 5.5.				

Huomautuksena näihin määritelmiin todettakoon, että erilaisia toteutuksia löytyy kohdekohtaisesti sillä mikään standardi ei yksityiskohtaisesti määritä suojauksia mainituille lähtötyypeille. Taulukkoa ei tule tulkita siten, että olemassa olevasta suojauksesta poistettaisiin tämän perusteella ominaisuuksia.

## 7.2 Tekniset vaatimukset suojausten toteuttamiseksi

Edellisen kappaleen taulukko 7.1 ei määritä esiteltyjen suojausten tarkkaa toteutustapaa tai mitä teknisiä reunaehtoja suojaukset vaativat mittasignaalien suhteen. Taulukossa 7.2 on esitetty suojaukselle joitain vaihtoehtoisia toimintaperiaatteita ja näiden toteuttamiseksi vaaditut mittaussignaalit sekä lukitukset. Taulukko antaa vaihtoehtoja toteutukselle, mutta ei ohjaa valintaa eri periaatteiden välillä, sillä soveltuvuus vaihtelee kohteittain.

Taulukko 7.2 Suojaustoiminnallisuudet ja niiden vaatimat mittaukset tai lukitukset.

Suojaustoiminnallisuus	Maasulkuvirta ( $I_0$ )	Vaihevirratt ( $I_A, I_B, I_C$ )	Vaihe- tai pääjännitteet ( $U_A, U_B, U_C$ ) / ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ )	Nollajännite ( $U_0$ )	Nollajännite lukitus ( $U_0$ -ehto)
Suunnattu maasulku	$X^{(1)}$	tai $X^{(2)}$		X	
Suuntaamaton maasulku	$X^{(1)}$	tai $X^{(3)}$		X	tai X
Katkeileva maasulku	X			X	
Maasulkujännite			$X^{(3)}$	tai $X^{(4)}$	
Suunnattu ylivirta <sup>(5)</sup>		X	X		
Suuntaamaton ylivirta <sup>(5)</sup>		X			
Lämpenemä <sup>(5)</sup>		X			
Ylijännite <sup>(3)</sup>			X		
Alijännite <sup>(3)</sup>			X		
Käynnistys suojaus		X			
Epäbalanssi		X			
Jumisojaus <sup>(6)</sup>		X			
<b>Muu toiminnallisuus</b>					
Energiamittaukset		X	X		
Sähkölaatumittaukset		$X^{(7)}$	$X^{(7)}$		

1) Mitattu summavirta, suositeltava toteutustapa maasulkusuojausissa

2) Laskennallinen summavirta / summavirtakytkenä, mahdollinen toteutustapa maasulkusuojausissa

3) Laskennallinen nollajännite, mahdollinen toteutustapa joissain tapauksissa

4) Mitattu tähtipistejännite (nollajännite)

5) Suojaus toimii periaatteessa 1-, 2- tai 3-vaiheisena, (valitsee suurimman mitatun suureen)

6) Suojaus toimii 2- tai 3-vaiheisena (toimintaehtona 2 asettelun ylittävää vaihevirtaa)

7) Saatavilla virran, jännitteen sekä näiden molempia laatu mittaavia toiminnallisuuksia.

Mittaussignaalien tarve haluttujen toiminnallisuuksien perusteella.

Taulukko 7.2 on muodostettu ABB:n RE\_615 laitteiden teknisen manuaalin pohjalta. Taulukko on suuntaa antava, sillä useilla eri toimilohkoilla voidaan saavuttaa

sama suojaustoiminnallisuus. Osa toimilohkoista vaatii analogiset mittasignaalit ja toiset mahdollistavat laskennallisten signaalien käytön. (ABB 2018.)

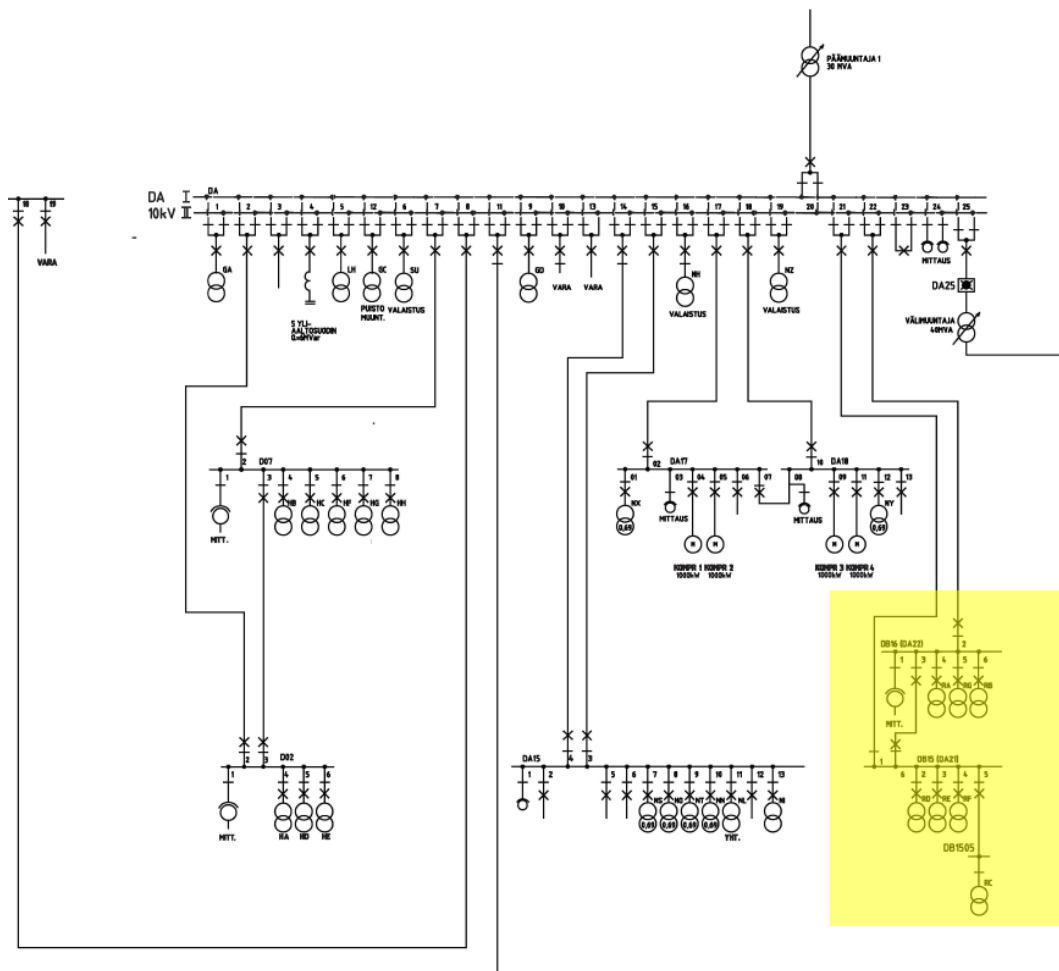
## 8 CASE-TUTKIMUS

Referenssitapauksena suojareleusinnasta tutkittiin suojareleusintaprojektia, jonka toteutus tapahtui syksyn 2020 aikana. Toteutus tehtiin uusinnasta tehdyn tarjouksen ja sittemmin sovitun kaupan perusteella. Referenssitapauksen perusteella pyrittiin tunnistamaan niitä tekijöitä, jotka ovat merkittäviä projektin sujuvan läpiviennin kannalta. Samalla tarkasteltiin löytyisikö kokonaisuudesta tekijöitä, joita voitaisiin hyödyntää vastaavissa projekteissa. Laitteistokuvaus on tarkoituksella tehty melko yksityiskohtaiseksi, jotta lukijalle välittyisi hyvä kokonaiskuva projektista ja siihen liittyvistä näkökulmista.

### 8.1 Yleiskuvaus

Kohteena on elintarvikepakkausmateriaalia valmistava tehdas, jolla on kaksi 10 kV:n jännitteellä toimivaa pääkojeistoa. Kuvassa 8.1 seuraavalla sivulla on nähtävissä osa alueen keskijännitejakeluverkosta, keltaisella alueella korostettuna referenssitapauksena toimivan tehtaan kojeistot DB15 ja DB16.

Huomautuksena kuvaan 8.1 todettakoon, että kuva on ajalta ennen kojeiston DA uusintaa ja muutokset ovat mahdollisia. Kuva kuitenkin havainnollistaa hyvin millainen jakeluverkko tehdasalueella on yksittäisen päämuuntajan takana, kun varasyöttöyhteydet ovat auki.



Kuva 8.1. Osa tehdasalueen 10 kV keskijännitejakoalueesta.

Kuvasta 8.1 voidaan havaita, että 10 kV:n pääjakelussa, johon referenssitapauksen tehdas liittyy, on kaksikiskojärjestelmä. Syöttö DA kojeiston kiskostolle voi piirikaavioiden mukaan olla kytketty kolmen eri muuntajan kautta. Nämä muuntajat ovat kooltaan 30 MVA, 40 MVA ja 50 MVA.

Yhteensä alueella on viisi päämuuntajaa, joista kaksi jännitetasoiltaan 110 kV/10 kV ja kolme 110 kV/20 kV. Piirikaavioiden perusteella alueen koko verkko on yhteen liitettävissä. Kuvan 8.1 oikeassa laidassa on nähtävissä tämän mahdollistava 20 kV / 10 kV välimuuntaja.

## **8.2 Uusintakohteen laitteiston kuvaus**

DB16 kojeisto on otettu käyttöön vuonna 1992 ja se on malliltaan ABB:n valmistama MH. Suojareleinä ennen uusintaa toimivat saman valmistajan alkuperäiset J3- ja SPACOM-sarjan suojareleet. Kojeiston rakenteen puolesta MH-kojeiston voidaan sanoa olevan jo moderni, sillä kojeistossa on selkeä osastointi kisko-, katkaisija- ja kaapelitilan välillä sekä erillinen kytkentäkotelo.

Nykyiset suojareleet ovat ennakkohuollettu vuonna 2011 ja valmistajan suositusten mukaan seuraava huolto olisi ollut ajankohtainen vuonna 2021. Yhdistäen lähestyneen huollontarpeen, sekä suojareleiden lähes 30 vuoden iän, oli laitteiden uusinta ennakoivasti ja hallitusti hyvä vaihtoehto.

### **8.2.1 Syöttö kojeistolta DA**

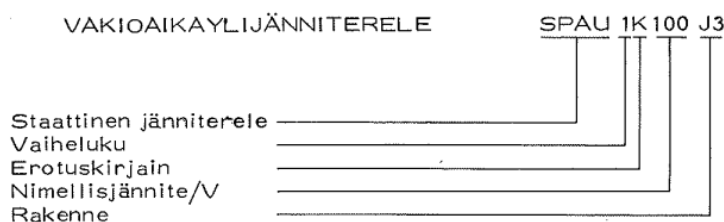
Kuvan 8.1 mukaisesti DA-kojeiston lähtö 22 syöttää kojeistoa DB16. Uusitus DA-kojeistossa toimii suojareleinä ABB:n valmistamat RE\_630 sarjan suojareleet. Kyseiset suojareleet ovat jo niin sanottuja numeerisia suojareleitä, joita on kuvattu tarkemmin aiemmin kappaleessa 6.3.4.

Syöttökaapeli kojeistojen DA ja DB16 välillä on lähtötietojen mukaan kaksiosainen. Alkupään 0,5 km pituinen osuus kaapelista on tyyppiltään AHXCMK-WTC 3x300 ja loppuosan 0,49 km pituinen osuus on tyyppiltään AHXCMK-WTC 3x185. Syy kaapelin kaksiosaisuuteen selittyy aiemmin tehdyllä kytkentämuutoksella, joissa tutkittu kojeisto on liitetty eri pääkojeistoon kuin alun perin.

### **8.2.2 DB16 kojeiston kennot**

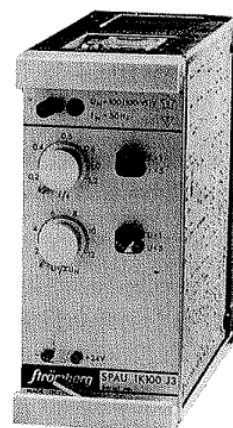
Kojeistossa DB16 on kuusi kennoa, jotka ovat kuvan 8.2 havainnollistamassa järjestyksessä.





#### Ominaisuuksia

- soveltuu sekä hälyttäväksi että laukaisevaksi maasulkusuojarieleeksi
- erillinen havahtumiskosketin
- mittauspiirissä tehokas suodatus
- laajat asettelualueet
- kaikissa tulo- ja lähtöpiireissä sekä apuenergian syöttöelimessä on galvaninen erotus
- valittavissa useita kotelo- ja asennusvaihtoehtoja
- tärinää kestävä rakenne, soveltuu voimalaitos- ja laivakäyttöön

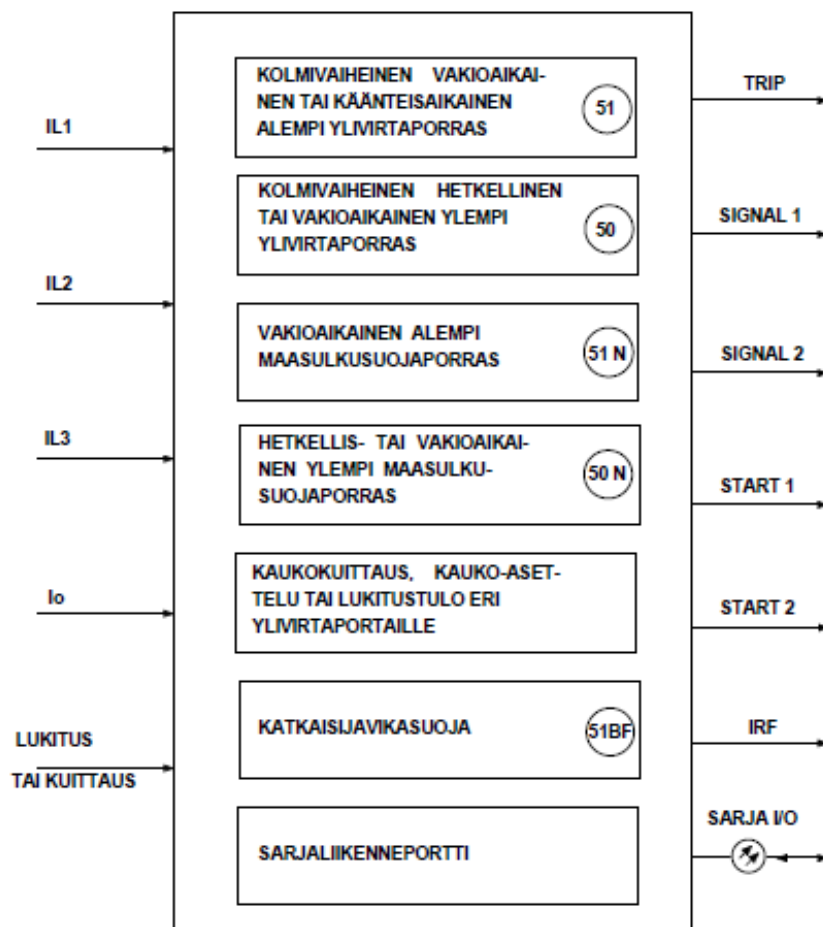


Kuva 8.3. SPAU 1K100 J3 suojariele ja sen ominaisuudet (Lainattu lähteestä: Strömberg 1981, s.1).

Kuten kuvassa 8.3 on soveltuvuudesta mainittu, kyseinen rele toimi osana maasulkusuojausta kyseisessä kohteessa. Tässä tapauksessa rele toimi kojeiston DB16 suuntaamattomien maasulkusuojausten  $U_0$ -lukituksenä.

### 8.3.2 Syöttökenno

Syöttökennossa oli suojarieleenä mikroprosessorisuojarieleeksi luokiteltava Strömbergin valmistama SPAJ 141 C tyyppinen suojariele. Suojausominaisuuksien puolesta releen mittaavalta kortilta löytyy kaksi ylivirtaporrasta ja kaksi maasulkuvirtaan eli nollavirtaan  $I_0$  perustuvaa maasulkusuojausporrasta. Tarkemmin relemallin toiminnallisuudet ovat nähtävissä kuvasta 8.4.



Kuva 8.4. Suojarelemallin SPAJ 141 C toiminnallisuudet (Lainattu lähteestä: ABB 1997a, s. 3).

Vasemmalla kuvassa 8.4 on kuvattuna laitteelle tulevat analogiset mittaussuureet ja yksi binääritulo. Oikealla on kuvattuna laitteelta lähtevät ohjaus- ja tilatiedot sekä sarjaliikenneportti. Laatikon sisällä on kuvattu releen ominaisuudet ja suojausfunctiot.

Vaihevirtojen mittauskanavat on mahdollista kytkeä joko 1 A tai 5 A toisiovirran mukaan ja vastaavasti  $I_0$  mittaus joko 1 A tai 0,2 A toisiovirran mukaan. Kuvan 8.4 mukaisesti ylivirtasuojaus voidaan asettaa toimimaan joko vakioaikaperusteisesti tai käännteisaikaperusteisesti. (ABB 1997a, s. 4)

Piirikaavioiden perusteella syöttökennossa on virtamuuntajat joka vaiheelle ja maasulkusuojaus on toteutettu virtamuuntajien summakytkenällä. Mittausjärjestely vastaa aiemmin teoriaosuudessa esitettyä kuvan 6.1 vaihtoehtoa b). Virtamuuntajien muuntosuhteet on esitetty myöhemmin taulukossa 8.6.

### **8.3.3 Varasyöttö**

Varasyöttöyhteys kojeistojen DB15 ja DB 16 välillä mahdollistaa sähkönjakelun molemmille kojeistoille toistensa kautta. Huomioitavaa varasyöttötapauksessa on kojeistojen yhteistehon summautuminen yhden lähdön taakse. Tämä on huomiotava sekä ylikuormitussuojauksen, että selektiivisyyden näkökulmista. Varasyöttökennon suojaus on samanlainen kuin syöttökennossa, eli SPAJ 141 C.

### **8.3.4 Muuntaja RG**

Kojeiston DB16 kenno numero 05 on nimetty tunnuksella RG. Lähdön takana on 2 MVA:n suuruinen 10 kV / 0,4 kV muuntaja, jonka kilpitiedot ovat nähtävissä alla kuvasta 8.5.

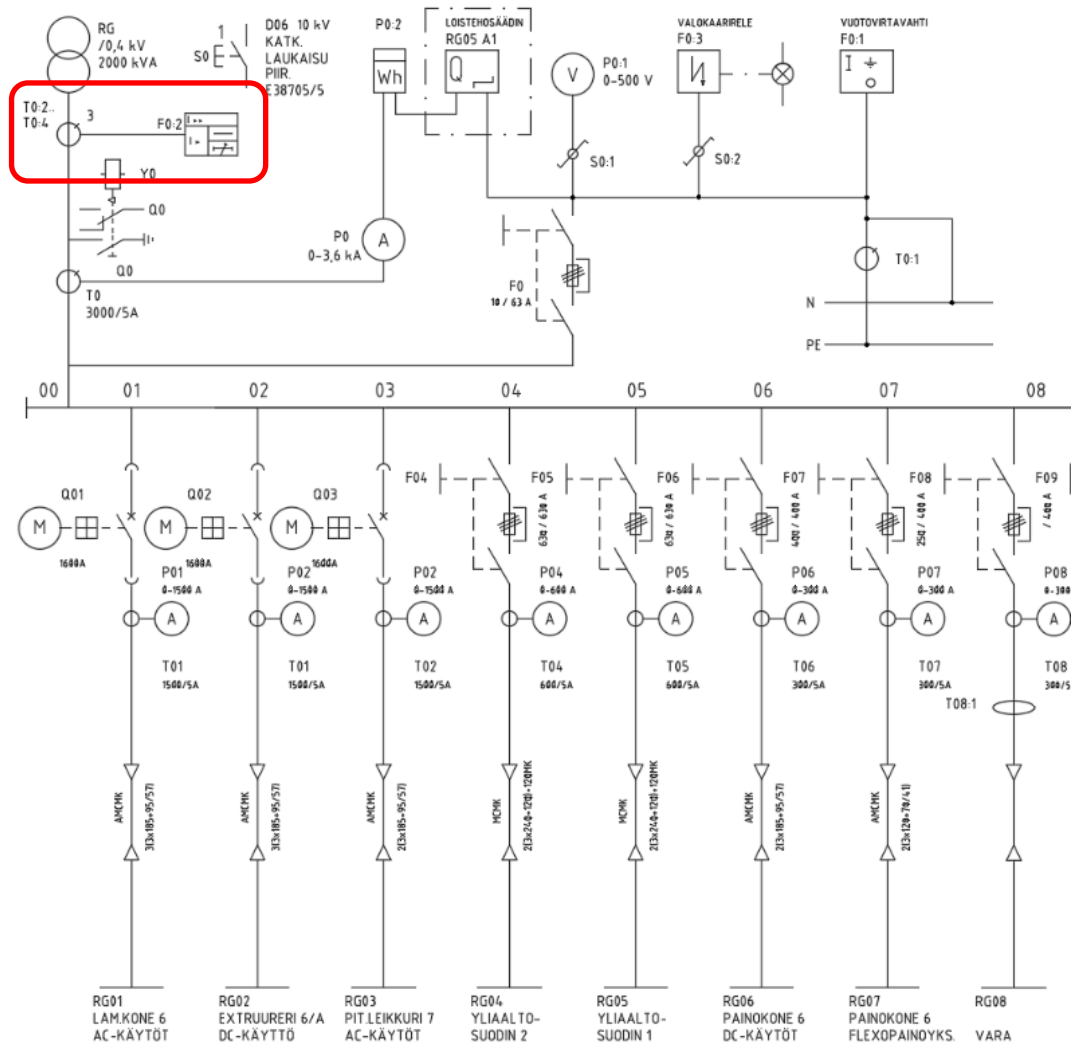
## RG

Tyyppi	3-v
Sarjanumero	No 5193776
Valmistusvuosi	1991
Laji	KTHN 12 C 2000
Standardi	IEC726
Teho	2000kVA
Kytentätapa	Dyn11
Taajuus	50Hz
Ensiön jännite	10000±2*2.5%V
Ensiön virta	115,5A
Toision jännite	400V
Toision virta	2886,8A
Erist. taso	L1 75 AC 28/AC 3 kV
Jäähdytystapa	AN
z <sub>k</sub>	6,0%
P <sub>k</sub>	14162W
P <sub>o</sub>	3191W
Kokonais- ja öljyn paino	5400kg / -

Kuva 8.5. Muuntajan RG kilpitiedot.

Muuntaja RG syöttää pienjännitekeskusta, joka vastaa paperi/päällystyskoneen sähkön syötöstä. Kuormituksena on sekä AC- että DC käyttäjiä. Paperikoneen linjakäyttö prosessina vaatii, että linjaan liittyvät moottorit pyörivät synkronisesti. Sähköjakelun kannalta tämä tarkoittaa sitä, että linjakäyttöön liittyvät kuormitukset ajoittuvat samanaikaisesti.

Pienjännitekeskuksen suojaukset ovat kolmea lähtöä lukuun ottamatta toteutettu sulakkeilla. Kojeisto poikkeaa nykyaikaisen pienjännitekojeistojen suojauksesta siten, että pienjännitekojeistossa ei ole omaa ilmakatkaisijaa syöttökennossa. Tämän sijaan syöttökennon suojarele ohjaa 10 kV:n puolen syöttävää katkaisijaa toimiesaan. Osa pienjännitekojeiston pääkaavion ensimmäisestä lehdestä on nähtävissä kuvasta 8.6.



Kuva 8.6. Osa pienjännitekojeiston RG pääkaavion ensimmäisestä lehdestä. Suojarele ja virtamuuntajat kuvassa punaisen kehyksen sisällä.

Pienjännitekeskuksen syöttökennon suojareleena toimii Strömbergin valmistama SPAJ 3C5 J3, joka on samaa J3-tuoteperhettä DB16 kojeiston mittauskennon suojareleena kanssa. Toiminnallisuudeltaan suojarele on kaksiportainen ja vakioaikainen ylivirtarele. Kyseisen relemallin ylempi ylivirtaporras toimii joko viiveettä tai 100 ms asetteluviiveellä. Lisäksi ylempi ylivirtaporras on lukittavissa ulkoisella signaalilla.

## 8.4 Asettelujen tarkistus

Selektiivisyyden tai asettelujen tarkistus ei tässä projektissa kaupallisesti kuulunut osaksi projektia. Kohteesta saadut hyvät lähtötiedot mahdollistivat kuitenkin näiden tarkistuksen osana tätä työtä.

Tässä kappaleessa tutkitaan kappaleissa 8.3.2 – 8.3.4 esiteltyjen lähtöjen suojausasettelujen selektiivisyys. Tarkastelun laajuus on yksi suojausporras/suojalaite uusittavasta suojausreitistä syöttösuunnassa ylöspäin ja alaspäin.

### 8.4.1 Lähtötiedot: kuormitusvirrat ja kaapeliosuudet

Kohteeseen on aiemmin tehty viikon mittaiset kuormitusvirtojen mittaukset kojeiston DB15 ja kojeiston DB16 osalta. Maksimikuormitusvirrat mittaussjaksojen perusteella ovat taulukon 8.1 mukaiset.

Taulukko 8.1. Maksimikuormitusvirrat viikon mittaussjakson perusteella

Vaihe	Maksimi kuormitusvirta (RMS) DB 15 [A]	Maksimi kuormitusvirta (RMS) DB 16 [A]	Yhteenlaskettu maksimi kuormitusvirta (RMS) [A]
L1	105	59,71	164,71
L2	104,1	59,34	163,44
L3	105,5	59,57	165,07

Verkkomallista kerättyjen tietojen mukaan verkossa käytössä olevat kaapelit ja näiden oikosulkukestoisuudet ovat listattuna taulukkoon 8.2. Maasulkuvirrat taulukkoon on laskettu kaapelin datalehden mukaan.

Taulukko 8.2. Kaapelityypit, näiden oikosulkukestoisuus ja osuuden tuottama maasulkuvirta.

Sijainti	Kaapelityyppi	Oikosulkukestoisuus $I_{1s}$ [kA]	Kaapelin pituus [km]	Kaapeliosuuden tuottama maasulkuvirta $I_{ej}$ [A]
DA - DB16-1	AHXCMK-WTC 3x300	28,3	0,5	1,029
DA - DB16-2	AHXAMK-W 3x185	17,4	0,49	1,3
DB16 - RA	AHXAMK-W 3x185	17,4	0,15	0,315
DB16 - RG	AHXAMK-W 3x185	17,4	0,25	0,0525
DB16 - RB	AHXAMK-W 3x185	17,4	0,12	0,252
DB16 - DB15	AHXAMK-W 3x185	17,4	0,12	0,252

#### 8.4.2 Lähtötiedot: oikosulkuvirrat ja taustaverkon maasulkuvirta

Kyseisestä tehdasalueesta on olemassa Neplan-ohjelmalla tehty mallinnus ja tässä työssä on käytetty mallinnuksesta poimittuja tietoja lähtötietoina. Täten kappaleessa 5.1 ja 5.2 esitettyjä oikosulku- ja maasulkuvirtalaskelmia ei tässä kohteessa ollut tarpeen suorittaa. Mallinnuksessa yli 1 kV:n osuudet on mallinnettu täsmällisesti verkon mukaan. Alle 1 kV:n osuudet on korvattu ekvivalenttisilla epätahtiko-neilla.

Koska kyseistä verkkomallinnusta ei tässä työssä luotu ja sen laajuus koskee useampaa eri toimijaa tehdasalueella, sitä ei tässä työssä tarkemmin esitellä. Mallinnuksesta poimitut tarvittavat suureet eri pisteissä on nähtävissä taulukosta 8.3. Taulukossa on listattu alkuoikosulkuvirtaa vastaavat oikosulkuvirrat. Näillä arvioituna tuloksissa on varmuusmarginaalia katkaisuvirtaan nähden.

Taulukko 8.3. Oikosulkuvirrat ja maasulkuvirta eri pisteissä tutkittavaa verkkoa.

Laskentapiste	Jännitetaso [kV]	$I''_{k3max}$ [kA]	$I''_{k2min}$ [kA]	$I_e$ [A]
DA	10	22,2	9,1	45,3
DB16	10	15,6	7,0	44,7
RA	0,4	49,4	26,5	-
RG	0,4	47,0	28,3	-
RB	0,4	13,0	9,5	-

Redusoimalla laskentaohjelman ilmoittamat 0,4 kV tason oikosulkuvirrat 10 kV tasolle tulee muuntajan oikosulkuvirtaa rajoittava impedanssi huomioiduksi.

Samalla virrat ovat selektiivisyystarkistuksen kannalta vertailukelpoisia 10 kV:n suojausasetteluihin nähden. Redusoidut oikosulkuvirrat ovat nähtävissä taulukosta 8.4.

Taulukko 8.4. Pienjännitekeskusten oikosulkuvirrat redusoituina 10 kV tasolle.

Laskentapiste	Jännitetaso [kV]	$I''_{k3max}$ [kA]	$I''_{k2min}$ [kA]
RA	10	1,98	1,06
RG	10	1,88	1,13
RB	10	0,52	0,38

### 8.4.3 Lähtötiedot: suojausasettelut

Taulukosta 8.5 on nähtävissä määritetyssä laajuudessa suoritettavan selektiivisyystarkastuksen kannalta tarvittavien lähtöjen suojausasettelut.

Taulukko 8.5. Suojausasettelut määritetyllä laajuudella. Harmaalla pohjalla korostettu selektiivisyystarkasteluun liittyvät DB16 kojeiston ulkopuoliset kennot.

Kojeisto	DA				DB15	RG
Kenno	22	02 Syöttö	03 Varasyöttö	05 RG	06 Varasyöttö	(0,4 kV) Syöttö
$I>$ [xIn]	-	1	1	2,33	1	2,4
$t>$ [s]	-	6	6	0,3	6	0,3
$I>>$ [xIn]	2,5	5	5	13,3	5	4
$t>>$ [s]	0,5	0,2	0,2	0,05	0,1 <sup>(2)</sup>	0,1
$I>>>$ [xIn]	5 <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-
$t>>>$ [s]	0,1 <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-
$I_o>$ [%xIon]	4	4	4	8	-	-
$t_o>$ [s]	0,7	1	1	1	-	-
$I_o>>$ [%xIon]						
$t_o>>$ [s]						
$I_{th}$	ON	-	-	-	-	-

1) Tulee käyttöön jos DB16 syöttökennolta saadaan lukitus

2) Ylivirtasuojan toisella portaalla lukitus

Taulukossa 8.6 on tarkasteltavien lähtöjen mittamuuntajien muuntosuhteet. Näiden avulla asetellut voidaan skaalata ensiövirroiksi.

Taulukko 8.6. Tarkasteltavien lähtöjen virtamuuntajien muuntosuhteet.

Kojeisto	DA				DB15	RG
Kenno	22	02 Syöttö	03 Varasyöttö	05 RG	06 Varasyöttö	(0,4 kV) Syöttö
Vaiheet	300 A / 5 A	600 A / 5 A	600 A / 5 A	300 A / 5 A	300/5	3000 A / 5 A
Rengas	100 A / 1 A	Summa kytk.	Summa kytk.	Summa kytk.	-	-

Taulukossa 8.7 on nähtävissä asetellut skaalattuina mittamuuntajien muuntosuhteilla.

Taulukko 8.7. Asetteluja vastaavat primäärivirrat tarkasteltavilla lähdöillä.

Kojeisto	DA				DB15	RG
Kenno	22	02 Syöttö	03 Varasyöttö	05 RG	06 Varasyöttö	(0,4 kV) Syöttö
I> [A]	-	600	600	699	300	7200 (288) <sup>(3)</sup>
t> [s]	-	6	6	0,3	6	0,3
I>> [A]	750	3000	3000	3990	1500	12000 (480) <sup>(3)</sup>
t>> [s]	0,5	0,2	0,2	0,05	0,1 <sup>(2)</sup>	0,1
I>>> [A]	1500 <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-
t>>> [s]	0,1 <sup>(1)</sup>	-	-	-	-	-
Io> [A]	4	4,8	4,8	4,8	-	-
to> [s]	0,7	1	1	1	-	-
Io>> [A]						
to>> [s]						
Ith	ON	-	-	-	-	-
Uo> [V]						
to> [s]						

1) Tulee käyttöön jos DB16 syöttökennolta saadaan lukitus

2) Ylivirtasuojan toisella portaalla lukitus

3) 10 kV tasolle redusoidut virrat

#### 8.4.4 Tehdyt havainnot

Taulukoiden 8.1 – 8.7 perusteella voidaan tehdä seuraavat päätelmät suojausasette-  
luihin liittyen. Huomautuksena todetaan, että alueen verkosta on olemassa uudempi  
verkkomallinnus, joten tässä esitetyt havainnot pätevät työssä käytettyyn vanhem-  
paan versioon.

## Ylivirta

Tarkastelluissa kennoissa ylivirtasuojauksen asettelut ovat oikosulkuvirroista muodostuvien reunaehtojen puolesta mahdolliset. Ylivirtasuojaus havaitsee 2-vaiheiset minimi oikosulkuvirrat ja asettelut ovat suuremmat, kuin kuormitusvirrat.

- **Syöttö kojeistolta DA**

Lähtötiedoissa on maininta, jossa on ehdotettu DA-kojeiston uusinnan yhteydessä ylivirran pikalaukaisuportaan käyttöönottoa lähdöille DB15 ja DB16. Ehtona toteutukselle on alakojeiston syöttökennoilta saatava lukitussignaali.

- **Muuntajalähtö 05 (RG)**

Suojaus on aseteltu toimimaan kappaleessa 5.1.7 esitetyn mukaisesti. 10 kV:n tason ylivirtasuojauksen ensimmäinen porras toimii varasuojana alajännitepuolen suojaukselle ja ylivirtasuojauksen toinen porras toimii viiveettä vain yläjännitepuolen vioissa.

Ottamalla mallia lähdemateriaalin asettelulaskennasta voidaan nykyisiä virta-asetteluja arvioida tarkemmin. Mikäli ylivirtasuojan alempi porras laskettaisiin kuivamuuntajalle kappaleessa 5.3.2 mainitun 1,5 kertaisen nimellisvirran mukaan, asettelu tulisi seuraavasti. (Soveltaen lähdettä: Huotari & Partanen 1998, s. 37.)

$$\circ I >: 1,5 * 115,5 \text{ A} \approx 173,3 \text{ A} \rightarrow \sim 0,6 * I_n$$

Verratessa saatua laskentatulosta taulukkoon 8.7 voidaan todeta, että virtaselektiivisyys ei enää toteutuisi alajännitepuolen suojauksen kanssa. Lisäksi suojaus tarvitsisi lukituksen kytkentävirtasysäykseltä, sillä taulukon 5.3 perusteella arvioituna muuntajan sysäysvirta saattaa olla noin 700 A. Täten voidaan todeta, että alemman portaan asettelumuutos vaatisi suojauskonfiguraatio muutoksen sekä alajännitepuolen suojauksen uudelleen laskennan. Tässä työssä tätä laskentaa ei rajoitusten puitteissa tehty.

Ylemmän ylivirtaportaan asetteluja voidaan tarkastella taulukon 8.4 avulla. Ylempi porras ei saa havahtua alajännitepuolen vioista. Laskemalla ylivirtasuojan ylempi porras taulukon 8.4 oikosulkuvirtoihin nähden 20% varmuusmarginaalilla asettelu tulisi seuraavasti. (Soveltaen lähdettä: Huotari & Partanen 1998, s.36.)

$$I_{>>}: 1,2 * 1,88 \text{ kA} \approx 2,3 \text{ kA} \rightarrow \sim 7,7 * I_n$$

Ylemmän ylivirtaportaan muutos voisi olla käytännössä mahdollinen. Lähtö tulisi tällöin aikaselektiivisyyden lisäksi virtaselektiiviseksi. Virtaselektiivisyys saavutetaan, mikäli ylemmän ylivirtaportaan asettelu on primäärivirtana alle 3000 ampeeria. Virtaselektiivisyys olisi saavutettavissa suuremmallakin marginaalilla, lähtö on kuitenkin aikaselektiivinen syöttöön ja varasyöttöön verrattuna.

#### ▪ **Varasyöttö**

Varasyöttötilanteessa kojeistojen DB15 ja DB16 välillä täytyisi tehdä lisäselvitystä. Taulukon 8.7 mukaan ylivirtasuojaus ei ole selektiivinen kummankaan portaan osalta ja toinen porras ei ole aikaselektiivinen varasyöttötilanteessa ilman lukitusta. Tällainen tilanne muodostuu, kun kojeiston DB15 kautta syötetään kojeistoa DB16. Käytössä olleiden piirikaavioiden ja suojareleiden asettelujen mukaan DB15 varasyötön suojareleelle on kuitenkin johdotettu lukitus riviliittimille saakka. Tällä voidaan lukita toinen ylivirtaporras. Käytössä olleista kuvista ei kuitenkaan selvinnyt mistä mahdollinen lukitussignaali riviliittimille tulee.

#### **Maasulku**

Tarkastelluissa kennoissa maasulkusuojauksen asettelut ovat maasulkuvirtojen ja kaapelien tuottamien maasulkuvirtojen reunaehtoisten puolesta mahdolliset sekä suuntaamattomalle että suunnatulle suojalle. Muut huomiot:

- Asettelut eivät ole aika- eivätkä virtaselektiiviset DA kojeiston syöttävän lähdön ja DB16 kojeiston kennojen kesken.
- Asettelut ottavat huomioon mahdollisen suppeamman verkon kytkentätilanteen.

### **Terminen kestävyys**

Taulukoiden 8.2 ja 8.3 perusteella kojeiston DB16 lähtöjen kaapelit ovat oikosulkukestoisia. Epäyhtälö 5.30 on voimassa.

- $15,6 \text{ kA} < 17,4 \text{ kA}$

Kojeistojen DA ja DB16 välinen kaapeli on oikosulkukestoinen. Epäyhtälö 5.31 on voimassa.

- $22,2 \text{ kA} < 24,6 \text{ kA}$ , kun  $t = 0,5 \text{ s}$
- $22,2 \text{ kA} < 55,0 \text{ kA}$ , kun  $t = 0,1 \text{ s}$

### **8.5 Projektin sujuvuuteen vaikuttaneet tekijät**

Projektin seuranta lähti tilanteesta, jossa oli olemassa kaupallinen sopimus uusinta-projektista. Kauppasopimuksessa oli määritetty uusien suojareleiden tyypit ja määrät. Näiden lisäksi toimittajan vastuulla on suojauspiirin suunnittelu ja asemakuvien päivitys. Muita tekniseen toteutukseen liittyviä tilaajan ja toimittajan välisiä yksityiskohtia ei kaupallisesti ollut sovittuna.

Uudet suojareleet ovat ABB:n RE\_615 laitesarjan viimeisintä revisioita, jotka ovat numeerisiksi suojareleiksi luokiteltavia ja toiminnoiltaan vapaasti konfiguroitavia. Rajoitteita toiminnallisuuksille laitteiden puolelta asettaa tilauskoodi, joka määrittää pitkälti laitteiden ominaisuudet. Laitteita on kuitenkin mahdollista modifioida jälkeenpäin, mikäli tarvetta tälle ilmenee.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty seuratusta projektista ne kohdat, joilla on katsottu olleen vaikutusta läpimenoaikaan seuratussa projektissa.

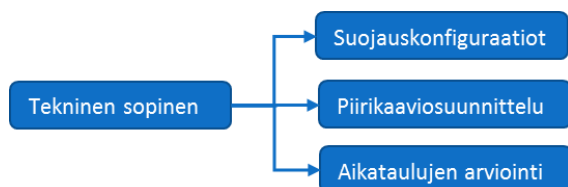
### 8.5.1 Tekninen selvitystyö

Kuten edellä on mainittu, ei tekniseen toteutukseen liittyvistä asioista ollut kaupallisesti sovittu yksityiskohtaisesti. Tämä johti seuratussa projektissa selvitystyön määrän lisääntymiseen ja joidenkin työvaiheiden toistumiseen. Kyseisessä kohteessa selvitettiin esimerkiksi, kuinka standardien vaatimat suojaukset toteutuvat, miten tilaaja haluaa maasulkusuojauksen toteutettavan ja millaiset asetelut ovat syöttösuunnassa ylemmän tason suojareleellä. Erityisesti maasulkusuojauksen toteutusta koskevalta osalta selvitystyötä tehtiin useita kertoja. Alla taulukossa 8.8 on listattu tekniseen selvitystyöhön liittynyt toistuvuus. Taulukkoon ei ole kirjattu yksityiskohtaista tietoa siitä, mitä selvitystyö on kullakin kerralla koskenut.

Taulukko 8.8. Suojauskonfiguraatioon liittyvät toistuvat työvaiheet.

Ajankohta	Aihe
06/2020	Alustava keskustelu teknisestä toteutuksesta ja toteutusajankohdasta
08/2020	Toimittajalta yksityiskohtaisia kysymyksiä teknisestä toteutuksesta Tilaajan osittaiset vastaukset
09/2020	Tilaaajalta vastauksia 8/2020 esitettyihin, mutta avoimeksi jääneisiin kysymyksiin Osa kysymyksistä jää avoimeksi
10/2020	Toimittaja kysyy avoimiin kysymyksiin liittyen Tilaaajalta vastaukset

Taulukossa 8.8 toistuvat työvaiheet voidaan nähdä vain muutamana ylimääräisenä toistona, mutta toistot vaikuttivat useampaan eri osa-alueeseen. Kuvassa 8.7 on esitetty esimerkkinä kolme osa-aluetta, joihin toistuminen vaikutti.

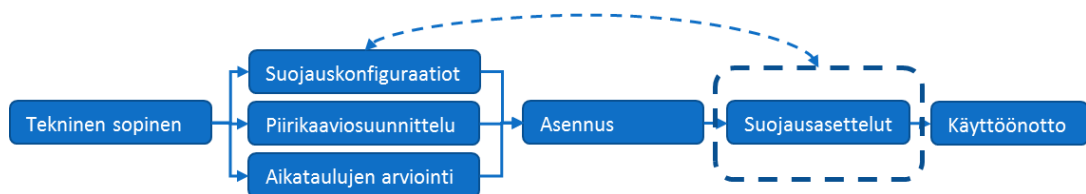


Kuva 8.7. Tunnistettuja potentiaalisesti toistuvia osa-alueita tekniseen sopimiseen liittyen

### 8.5.2 Käyttöönottovaiheen muuttujat

Käytännön kokemusten kautta on todettu, että käyttöönottovaiheessa ilmenee usein tekijöitä, jotka lisäävät työn määrää ennakoituun määrään verrattuna. Esimerkiksi suojaukseen liittyvät asetelut oletetaan usein soveltuvan suoraan vanhoista suojaruleista uusiin. Näiden osalta muutostarpeet käyttöönottovaiheessa ovat kuitenkin hyvin tyypillisiä.

Tässä työssä käytännön esimerkkinä nousi esiin kerätyn tiedon myötä uusintakohteen epäselektiivisyys maasulkusuojauksen osalta. Työssä kerättyjä tietoja ei kuitenkaan ollut tallennettuna suoraan projektikansioihin. Täten käyttöönoton yhteydessä aseteluisia oli tiedostettuja muutostarpeita, mutta lähtötiedot eivät olleet välittömästi saatavilla. Tapaus on hyvä esimerkki käyttöönottovaiheessa usein esiintyvistä pienistä muutostarpeista. Esimerkki osoittaa myös lähtötietojen kootun keräämisen tärkeyden. Kuvassa 8.8 on esitetty vastaava poikkeava tilanne projektiaikajanalla, jossa aseteluita korjataan tai tehdään vasta käyttöönoton yhteydessä.



Kuva 8.8 Projektiaikajana, jossa suojausasettelut on kuvattu tehtäviksi käyttöönoton yhteydessä.

## **9 TOIMENPIDE-EHDOTUKSET**

Tässä kappaleessa olevat toimenpide-ehdotukset ovat tehty työssä käsitellyn teorian ja tapaustutkimuksen pohjalta. Teemoittain voisi kuvailla ehdotuksien jakautuvan toimintatapojen kehittämiseen ja tarvittavien lähtötietojen määrittelyyn.

### **9.1 Toimintatapojen kehittäminen**

Toimintatapoihin liittyvien toimenpide-ehdotuksien pohjana toimii tapaustutkimuksessa tehdyt havainnot sekä näitä vastaavat kirjallisuustutkimuksen poiminnat. On kuitenkin otettava huomioon, että tässä työssä seurattiin vain yksittäistä projektia ja täten ei voida yleistää samojen asioiden toistuvan jokaisessa projektissa.

Tapaustutkimuksen kautta nousi esille, että tilaajan ja toimittajan välisen sopiminen lisäksi on tärkeää, että projektiin liittyvät tiedot ovat hyvin dokumentoituna ja eri osapuolien saatavilla. Työajan tehokkaan hyödyntämisen kannalta osoittautui tärkeäksi myös oikea työjärjestys, jotta vältetään toistuvilta työvaiheilta.

Havaittuja kehityskohtia on seuraavissa kappaleissa lähestytty teknisen sopimisen, kohdearvioinnin ja projektiseurannan kautta.

#### **9.1.1 Kaupallinen sopiminen**

Tapaustutkimus osoitti, että pienetkin yksityiskohdat aiheuttavat lisäkustannuksia ajankäytön kautta. Ajankäytön ja kustannusten kontrollointi on vaikeaa, mikäli kaupallinen sopiminen ei rajaa teknistä toteutusta riittävän tarkasti.

Lopullisen teknisen toteutuksen myötä laitevalinnat olisi voitu tehdä toisin. Mikäli tämä mahdollisuus olisi otettu huomioon jo tarjousvaiheessa laitekustannuksissa olisi saavutettu säästöjä.

Jokainen uusintaprojekti on kuitenkin erilainen ja teknisen toteutuksen mahdollisuudet ovat tapauskohtaisia. Yksityiskohtainen muuttujien huomioiminen kohteittain vaatisi paljon selvitystyötä tarjousvaiheessa.

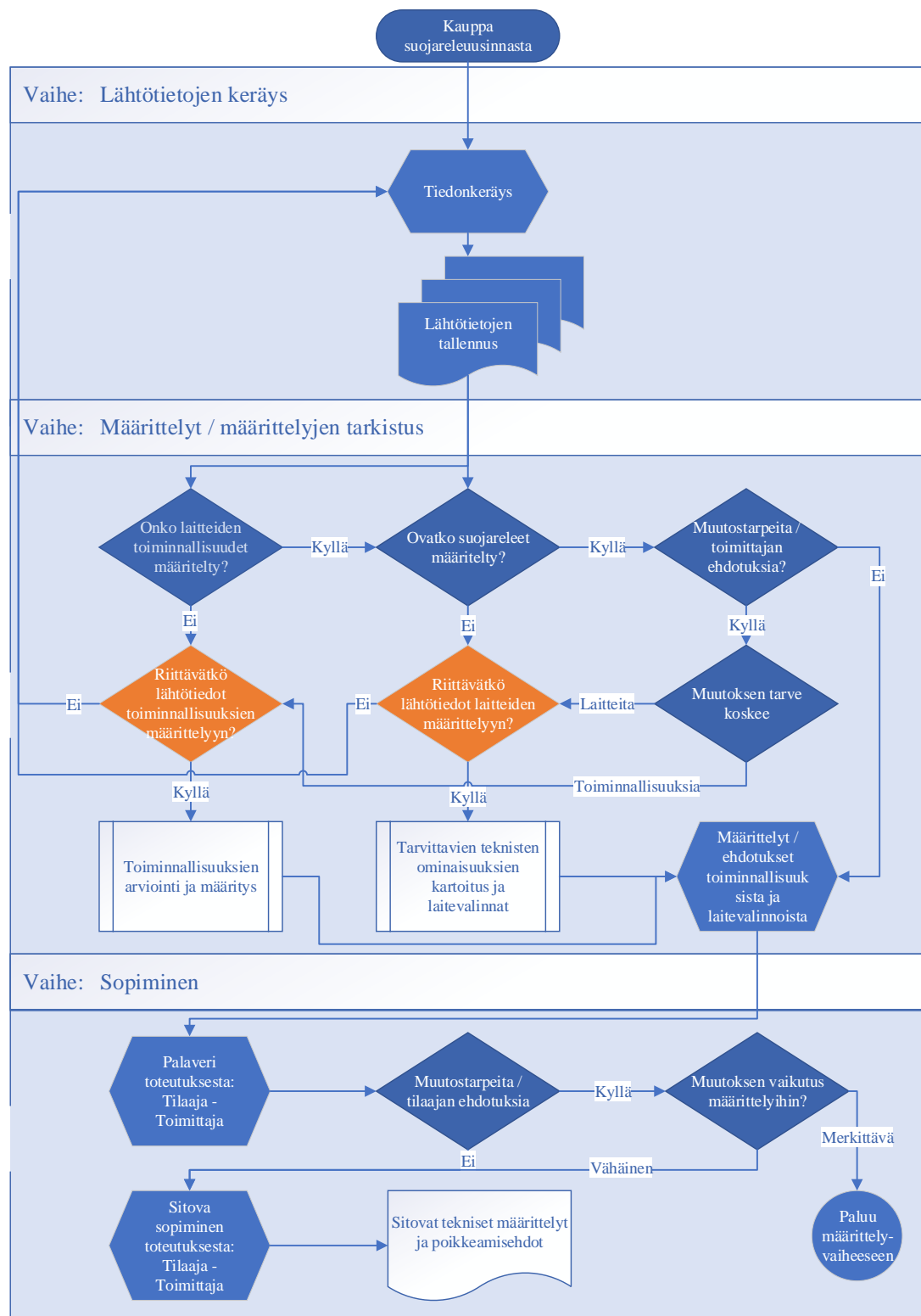
Kokonaisuutta ajatellen optimaalisinta olisi huomioida tekniset yksityiskohdat mahdollisimman kattavasti jo tarjousvaiheessa. Tällöin on mahdollista vaikuttaa toteutukseen kokonaisuutena kaupallisella sopimisella. Kuvissa 9.1 ja 9.2 on esitetty esimerkki prosessimallit, joita voitaisiin käyttää tarjousvaiheessa. Näissä on arvioitu tarvittavia suojaustoiminnallisuuksia ja laitteiden valintaa kohteittain.

Kuvien vuokaaviot ovat kuitenkin vain lähtökohtia ohjaamaan kaupallista ja teknistä sopimista. Luoduista esimerkeistä on nähtävissä, millaisia kokonaisuuksia sopimisessa on otettava huomioon.

Mikäli tarjousvaiheessa tekniset määrittelyt on otettu hyvin huomioon, vähentää tämä myös työmäärää myöhemmissä vaiheissa. Kuvassa 9.3 on nähtävissä teknistä määrittelyä ja sopimista kuvaava ylempi osaprosessi, johon kuvien 9.1 ja 9.2 alaprosessit sisältyvät. Teknisen sopimisen tärkeyteen viittaavat lisäksi työn teoriaosuudessa tehdyt havainnot, joissa useat standardit korostivat tilaajan ja toimittajan välistä sopimista.







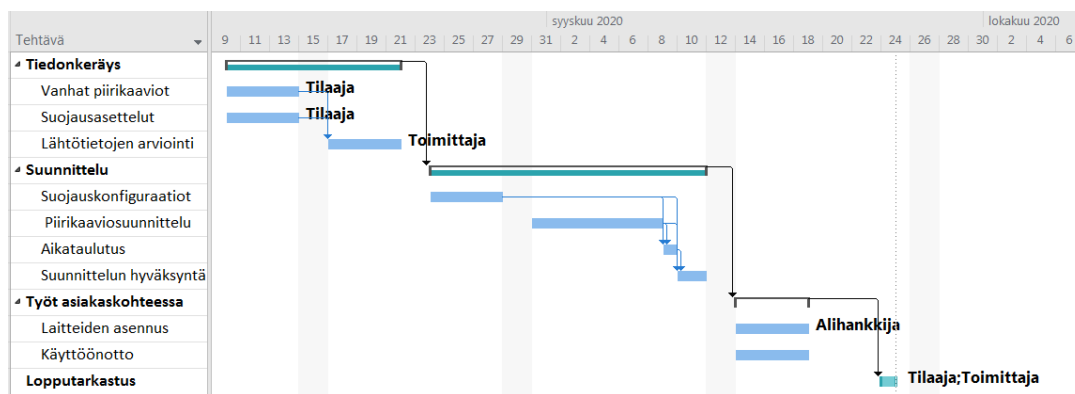
Kuva 9.3. Teknistä määrittelyä ja sopimista kuvaava osaprosessi

### 9.1.2 Kehitys projektinäkökulmasta

Projekti voidaan kuvata esimerkiksi aikajanana, joka muodostuu rinnakkaisista ja peräkkäisistä tehtävistä sekä peräkkäisistä tehtäväkokonaisuuksista. Tyypillisesti osa tehtävistä voidaan suorittaa samanaikaisesti, mutta toiset vaativat edellisen tehtävän olevan valmis ennen aloitusta. Projektin pituus määräytyy tehtäväkokonaisuuksien yhteispituuden mukaan.

Suoritusjärjestyksen ja projektinseurannan kannalta on suositeltavaa luoda projektimalli suoja-releusintojen seurantaan. Näin tehtäväkokonaisuuksien valmistumista ja valmiutta edetä seuraavaan tehtävään on helpompi seurata.

Kuvassa 9.4 on esitetty esimerkki projektiaikataulusta. Kuvassa nuolet kuvaavat siirtymäehtoja ennen seuraavaa tehtävää tai tehtäväkokonaisuutta. Noudattamalla määritettyjä siirtymäehtoja minimoidaan toistuvat työvaiheet. Päivittämällä aika-  
taulumuutokset reaaliaikaisesti voidaan puolestaan arvioida valmistumisaikatauluja sekä kustannuksia.



Kuva 9.4 Esimerkki projektiaikajanasta kuvitteellisilla työn kestoajoilla.

Kuvan esimerkki on luotu Microsoftin Project Professional ohjelmalla, joka tukee mm. muistiinpanojen tekemisen eri tehtäviin kohdistuen. Ohjelmassa on lisäksi mahdollista merkitä resurssit tehtäviin. Resurssiksi kuvaan 9.4 on esimerkkeinä kirjattu ”Tilaaja”, ”Toimittaja” sekä ”Alihankkija”.

## 9.2 Jatkotoimenpiteet

Jatkotoimenpiteenä on suositeltavaa käynnistää projekti, jossa luodaan yrityskohdattaiset käytännön ratkaisut edellä esitettyihin kehitystä vaativiin osa-alueisiin. Projektin tärkein osa-alue sujuvoittamisen sekä kaupallisen toteutuksen näkökulmasta on tilaajan ja toimittajan väliseen sopimiseen liittyvä kokonaisuus.

Työn yhteydessä käydyissä keskusteluissa on noussut esille lisäksi lähtötietojen soveltuvuuden ja laadukkuuden haaste. Täten edellä esitetyn projektin tueksi on suositeltavaa laatia prosessikuvissa 9.1 ja 9.2 mainitut lomakkeet. Määrittelemällä tarvittavat lähtötiedot mahdollisimman tarkasti saavutetaan ajallista hyötyä itse projektin toteutusvaiheessa.

Projektiseurannan kehittämisen näkökulmasta työn tilaajalla on käytettävissä aiemmin mainittu projektienhallintaan tarkoitettu sovellus. Tämä sisältää resurssoinnin osalta päällekkäisiä ominaisuuksia muihin käytettyihin sovelluksiin nähden. Mikäli projektiseurantaa halutaan parantaa esimerkiksi kyseisen sovelluksen avulla, tämän käyttöönotto vaatii henkilökunnan koulutusta.

Tapaustutkimuksessa tehdyt havainnot puoltavat selektiivisyystarkistuksen tarpeellisuutta. Onkin suositeltavaa harkita palvelun tuotteistusta ja tarjoamista suojaruleusintojen yhteydessä omana erillisenä työosuutenaan.

## 10 YHTEENVETO

Suojareleusintojen yhteydessä nousee usein esille runsaasti kysymyksiä. Nämä saattavat koskea toiminnallisuuksien lisäämistä, toteutukseen liittyviä vaatimuksia tai vanhojen suojausasettelujen soveltumista uusiin laitteisiin. Suojareleitä uusittaessa sekä tilaajan että toimittajan yhteinen intressi on suunnitellussa aikataulussa toteutunut työ, jossa sovitut asiat toteutuvat. Teollisen toimijan näkökulmasta sujuva toteutus tarkoittaa ennustettavaa jakelukatkon pituutta ja uusintaa suorittavan tahon osalta resurssien suunniteltua ja tehokasta käyttöä.

Työn tavoitteena oli tutkia, kuinka sujuvoittaa teollisuuden suojareleusintoja. Asetetun hypoteesin mukaan valmiilla suojareleiden uusintaprosessilla säästetään suojareleusainnoissa asennuksen ja käyttöönottovaiheen töissä ajallisesti jopa 35%. Tavoitetta tarkennettiin koskemaan sähköverkon suojaukseen velvoittavia määräyksiä sekä sitä, kuinka selkeyttää tilaus-toimitusketjua.

Kirjallisuustutkimuksessa on selvitetty tämän hetken lakien, asetusten ja alan standardien velvoitteita sekä joitain kantaverkkoyhtiö Fingridin vaatimuksia suojaukselle. Velvoitteiden ja vaatimusten toteuttamiseksi on tutkittu, millaisia suojaustoiminnallisuuksia edellä mainitut vaativat työssä tutkituille lähtötyypeille: kojeiston syöttökentälle, johtolähdölle, suorakäynnisteiselle epätahtimoottorille ja jakelumuntajalle. Suojaustoiminnallisuuksien toteutus vaatii erilaisia lähtötietoja, joiden osalta työ tarkentuu rajauksien perusteella. Lisäksi työssä on tutkittu eri ikäisten suojareleiden ominaisuuksia yhteensopivuuden näkökulmasta. Sähkölaitteistojen osalta on selvitetty, millaisia teknistä toteutusta ohjaavia/rajaavia tekijöitä nämä muodostavat.

Osa lähtötiedoista, kuten suojareleiden asettelut, periytyvät usein korvattavista suojareleistä. Useita vuosikymmeniä vanhoissa laitteistoissa on kuitenkin hyvin yleistä, että kytkentöihin on tullut muutoksia alkuperäiseen tilanteeseen nähden. Mikäli näiden seurauksena verkon laajuus on muuttunut, vaikuttaa tämä maasulkuvirtojen suuruuteen. Kantaverkon vahvistuminen tai muutos, jossa verkko kytketään suuremman päämuuntajan taakse, kasvattavat molemmat puolestaan

oikosulkuvirtoja. Oikosulku- ja maasulkusuojaus ovat relesuojauksen yleisimmät suojaukset. Näiden suojausasettelujen tarkistamiseksi täytyy oiko- ja maasulkuvirrat tuntea verkon eri osissa. Tämän perusteella työssä on esitetty perustason oiko- ja maasulkusuojauksen laskentaperiaatteet.

Tapaustutkimuksessa seurattiin yksittäisen suojareleusinnan toteutusta syksyn 2020 aikana. Tästä kerättiin havaintoja tekniseen toteutukseen ja ajankäyttöön vaikuttaneiden tekijöiden osalta. Kohteessa tehtiin lisäksi osittainen suojausasettelujen tarkistus, mikä osoittautui tarpeelliseksi suojauksen selektiivisyyden kannalta.

Tilaus-toimitusketjun selkeyttämisen osalta molemmat tutkimukset osoittavat, että suojareleusinnat ovat vahvasti projektiluontoisia mahdollisten muuttujien määrän vuoksi. Teknisen vakioimisen näkökulmasta suojareleistä löytyy samankaltaisuuksia sukupolvittain. Summaamalla muuttujat voidaan kuitenkin todeta, että tekninen vakioiminen ei ole hyvä ratkaisu tilaus-toimitusketjun selkeyttämiseksi.

Seuratussa suojareleusinnassa aikaa olisi potentiaalisesti ollut säästettävissä suunnittelu- ja käyttöönottovaiheessa. Merkittävin ajallinen säästö olisi ollut saavutettavissa suunnittelutyössä, jossa tekninen selvitystyö vei huomattavan paljon aikaa.

Asetettuihin tavoitteisiin nähden kirjallisuustutkimus vastaa sisällöltään hyvin työn tavoitteisiin eli kysymykseen, millaisia velvoitteita ja vaatimuksia on otettava huomioon relesuojauksen suunnittelussa. Työssä tehdyt toimenpide-ehdotukset perustuvat toimintatapojen kehittämiseen, jonka yhtenä osa-alueena on kaupallinen sopiminen ja sen teknisen sisällön tarkentaminen. Tältä osin toimenpide-ehdotukset vastaavat tavoitteita eli kysymykseen, kuinka selkeyttää tilaus-toimitusketjua. Hypoteesin toteutumista ei tässä työssä vain yhden seuratun tapauksen perusteella voitu kuitenkaan luotettavasti todistaa.

## LÄHDELUETTELO

ABB. 1996. SPAU 330 C - Overvoltage, undervoltage and residual voltage relay. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/c6f783a29e4cbf70c2256bf10038b1e3/FM\\_SPAU330C\\_EN\\_BADAA.pdf](https://library.e.abb.com/public/c6f783a29e4cbf70c2256bf10038b1e3/FM_SPAU330C_EN_BADAA.pdf)

ABB. 1997a. SPAJ 141 C - Overcurrent and earth-fault relay. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/e52d639795350da8c2256bf1002cd279/FM\\_SPAJ141C\\_EN\\_BBA.pdf](https://library.e.abb.com/public/e52d639795350da8c2256bf1002cd279/FM_SPAJ141C_EN_BBA.pdf)

ABB. 1997b. SPAU 320 C - Overvoltage, undervoltage and residual voltage relay. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/d42c238a07f52418c2256df30029e34b/FM\\_SPAU320C\\_EN\\_CACA.pdf](https://library.e.abb.com/public/d42c238a07f52418c2256df30029e34b/FM_SPAU320C_EN_CACA.pdf)

ABB. 1997c. Feeder Terminal REF 54\_ Technical Reference Manual. Version: R/21.10.2010 [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/c82d982069eddb42c1257d940039f3b7/1MRK511305-UEN - en\\_Communication\\_protocol\\_manual\\_LON\\_670\\_series\\_2.0\\_IEC.pdf](https://library.e.abb.com/public/c82d982069eddb42c1257d940039f3b7/1MRK511305-UEN - en_Communication_protocol_manual_LON_670_series_2.0_IEC.pdf)

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt. 626 s. ISBN 951-99366-0-2

ABB. 2001. SPA-Bus Communication Protocol V2.5. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/811733b652456305c2256db40046851e/SPAcommprot\\_EN\\_C.pdf](https://library.e.abb.com/public/811733b652456305c2256db40046851e/SPAcommprot_EN_C.pdf)

ABB. 2010. ABB Review - Special Report IEC 61850. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/a56430e1e7c06fdcf12577a00043ab8b/3BSE063756\\_en\\_ABB\\_Review\\_Special\\_Report\\_IEC\\_61850.pdf](https://library.e.abb.com/public/a56430e1e7c06fdcf12577a00043ab8b/3BSE063756_en_ABB_Review_Special_Report_IEC_61850.pdf)

ABB. 2014. 670 series 2.0 IEC LON Communication Protocol Manual. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://library.e.abb.com/public/c82d982069eddb42c1257d940039f3b7/1MRK511305-UEN - en Communication protocol manual LON 670 series 2.0 IEC.pdf>

ABB. 2014. 670 series 2.0 IEC SPA Communication Protocol Manual. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://library.e.abb.com/public/366797359db6681ec1257d94004875ef/1MRK511306-UEN - en Communication protocol manual SPA 670 series 2.0 IEC.pdf>

ABB. 2018. 615 series Technical Manual. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://library.e.abb.com/public/70602692769a4ffa87ca027e6fb1af1d/RE\\_615\\_tech\\_756887\\_ENn.pdf](https://library.e.abb.com/public/70602692769a4ffa87ca027e6fb1af1d/RE_615_tech_756887_ENn.pdf)

Arcteq Relays. 2019. AQ-200 Series Protection, Control, Measurement and Monitoring IEDs. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://www.arcteq.fi/wp-content/uploads/2019/12/AQ200\\_product-catalogue\\_1.3EN\\_web.pdf](https://www.arcteq.fi/wp-content/uploads/2019/12/AQ200_product-catalogue_1.3EN_web.pdf)

Aro, M. & Elovaara, J. & Karttunen, M. & Nousiainen, K. & Palva, V. 1996. Suurjännitetekniikka. 4. painos. Helsinki: Otatiето. 537 s. ISBN 978-951-672-375-7

Asetus sähkölaitteistoista 1434/2016. Tukes. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.6.2020]. Saatavissa: <http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/20161434?toc=1>

BBC. n.d. a. Esite CH-ES 61 -12-2 SF, Ylivirta-aikarele ISM. Lähteen julkaisuvuosi tuntematon.

BBC. n.d. b. Secondary Thermal Relay type ST. Asennus- ja käyttöohje. Lähteen julkaisuvuosi tuntematon.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I. 2. painos. Helsinki: Otatiето. 520 s. ISBN 978-951-672-360-3

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II. 2. painos. Helsinki: Otatieto. 551 s. ISBN 978-951-672-363-4

Fingrid. 2018. Kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset KJV2018. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/20181212\\_kjv2018.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/20181212_kjv2018.pdf)

"Fingrid. 2019. Alitaajuudesta tapahtuvan kulutuksen irtikytkennän toteutus Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/alitaajuussuojauksen-sovellusohje-5.8.2019.pdf>

Finn Electric. Valuhartsieristeiset muuntajat-tekninen opus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.8.2020]. Saatavilla PDF-muodossa: [http://media.klinkmann.fi/catalogue/content/data\\_fe/Imefy/Finn\\_Electric\\_Imefy\\_catalogue\\_fi\\_0817.pdf](http://media.klinkmann.fi/catalogue/content/data_fe/Imefy/Finn_Electric_Imefy_catalogue_fi_0817.pdf)

Hakola, T. & Lehtonen, M. 1996. Neutral Earthing and Power System Protection. Vaasa: ABB Transmit Oy. ISBN 952-90-7913-3

Huotari, K. & Partanen, J. 1998. Opetusmoniste 3 - Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 46 s. ISBN 951-764-282-2.

IEC 60076-12. 2008. Power transformers – Part 12: Loading guide for dry-type power transformers. Edition 1.0. Geneve: International Electrotechnical Commission

IEC 60076-7. 2018. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers. Edition 2.0. Geneve: International Electrotechnical Commission

IEC 62271-1+A1. 2011. High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications. Geneve: International Electrotechnical Commission

IEC. 2020a. International Electrotechnical Commission. IEC-verkkosivut. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavissa: <https://www.iec.ch/homepage>

IEC. 2020b. The validity of IEC publications. Standardien vakaus [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavissa: <https://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/xpFAQ.xsp?Open&id=ADMN-7NALM5>

IEC. 2020c. IEC TR 61850-1:2013. edition 2 päivitystiiivistelmä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavissa: <https://webstore.iec.ch/publication/6007>

IPCOMM. 2020. IEC 60870-5-103. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.12.2020]. Saatavissa: <https://www.ipcomm.de/protocol/IEC103/en/sheet.html>

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.8.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/)

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähköjälkelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto. 295 s. ISBN 978-951-672-359-7

Laki sähkötyöturvallisuudesta 16.12.2016/1135. Finlex. [Viitattu 5.6.2020] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135>

Laki työturvallisuudesta 23.8.2002/738. Finlex. [Viitattu 5.6.2020]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738>

Lassila, J. 2020. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. BL20A1001 Sähköverkkojen suojaus: Relesuojauksen perusteet. [Luento & Luentomateriaali]. [3.3.2020].

Lehesvuo, V. 2020a. ABB Oy, Distribution Solutions. Protection relay applications: Medium/high voltage AC induction motor protection. [Webinaari]. [Viitattu 18.7.2020]. Saatavissa: <https://share.library.abb.com/api/v4?cid=Root&dk=Movie&q=9akk107680a7522>

Lehesvuo, V. 2020b. ABB Oy, Distribution Solutions. Johtolähdönsuojaus. [Koulutusmateriaali].

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. 2.painos. Hämeenlinna: Otatieto. 451 s. ISBN 951-672-175-3.

Niemi, M. 2020. ABB. Vaasa. Päättyöhön liittyvät kysymykset. [Puhelinkeskustelut]. [Syksy 2020].

Prysmian Group Finland. 2018. Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.8.2020]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo\\_2018\\_lowres.pdf](https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf)

Schneider Electric. 2020. VAMP 50 communications maps. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavissa: <https://www.se.com/ww/en/faqs/FA225825/>

SESKO. 2020. Sähkötekniikan peruskäsitteet Osa 1: Jännite. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.2.2021]. Saatavissa PDF-muodossa: [https://www.sesko.fi/files/79/Peruskasitteet\\_osa1\\_jannitteet\\_2020.pdf](https://www.sesko.fi/files/79/Peruskasitteet_osa1_jannitteet_2020.pdf)

SFS 6001. 2018. Suurjännitesähköasennukset. 5. Painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS

SFS 6002. 2018. Sähköturvallisuus. 4. Painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS

Siemens. 1995. Numerical Time Overcurrent Protection Relay 7SJ512 v3.2 - Instruction Manual

Siemens. 2000. DIGSI 4 Communication Manual v4.2

Strömberg. n.d.. Ylivirta-aikarele S, Asennus- ja käyttöohje. Suomennus Brown Boverin käyttöohjeesta A 6000. Lähteen julkaisuvuosi tuntematon.

Syväoja, E. 2020. ABB. Ensireleisiin ja sähkömekaanisiin releisiin liittyvät kysymykset. [Puhelinkeskustelu]. [30.10.2020].

Tukes. 2019. Luettelo S10-2019 - Sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähköturvallisuutta koskevat standardit. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.6.2020]. Saatavissa: <https://tukes.fi/-/tukes-ohje-s10-on-jatkossa-luettelo-s10#518d2470>

Tukes. 2020. Laitteistoluokitukset ja vaadittavat tarkastukset. [Puhelinkeskustelu & sähköpostit]. [23.6 & 26.6.2020]

Wahlroos, A. 2020. ABB. Vaasa. Katkeileva maasulku. [Sähköpostit]. [27.8.2020].

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkirja. 21. painos. Helsinki. Genesis-Kirjat Oy. 1296 s. ISBN 978-952-9867-39-4

Willman, J. 2020a. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. BL20A1001 Sähköverkkojen suojaus: Prosessiteollisuuden sähköverkot. [Luento & Luentomateriaali]. [10.3.2020].

Willman, J. 2020b. ABB. Vaasa. Suojareleiden yhteensopivuus ja oikosulkusuojaus. [Puhelinkeskustelut]. [6.8 & 16.9.2020].

Virtanen, E. 2020. ABB Power Grids Finland. Vaasa. Muuntajan lämpenemäsuojaus. [Puhelinkeskustelu]. [26.8.2020]