PROSESSITEOLLISUUDEN PIENJÄNNITEPÄÄKESKUKSEN SUOJAUS OSANA TEOLLISUUDEN JAKELUVERKKOA

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Antti Kurki

Tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Janne Karppanen

Ohjaaja Sähköteknikko Kari Salmesoja

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Antti Kurki

Prosessiteollisuuden pienjännitepääkeskuksen suojaus osana teollisuuden jakeluverkkoa

Diplomityö

2022

87 sivua, 35 kuvaa, 13 taulukkoa ja 5 liitettä

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila
TkT Janne Karppanen
Työn ohjaaja: Sähköteknikko Kari Salmesoja

Hakusanat: pienjännitekeskus, suojaus, selektiivisyys

Teollisuusverkon ominaispiirteenä on suuri tehonkulutus maantieteellisesti pienellä alueella, mikä näkyy verkon rakenteessa lyhyinä kaapelipituuksina ja suurina poikkipintoina sekä edelleen suurina oikosulkuvirtoina myös pienjännitepääkeskuksilla. Tässä työssä selvitettiin pienjännitepääkeskuksen suojaukseen vaikuttavia seikkoja ja esiteltiin toimintapa pienjännitepääkeskuksen selektiivisyyden toteamiseen. Tapaustutkimuksessa toimintatapa jalkautettiin erään teollisuuslaitoksen jakeluverkkoon.

Suojauksen haasteiksi havaittiin suuret oikosulkuvirtatasot ja oikosulkuvirtojen pienet erot teollisuusverkon eri osien välillä. Suojauksen selektiivisyydessä hyödynnettävissä olevia oikosulkuvirtaeroja muodostuu lähinnä muuntajien kohdalla jännitetasosta toiseen siirryttäessä. Pienten virtaerojen vuoksi pienjännitepääkeskuksen selektiivisyydessä on käytettävä suojien aikaporrastusta tai energiaselektiivisyyttä virtaselektiivisyyden sijaan. Suuret oikosulkuvirrat puolestaan kasvattavat viassa syntyviä vaurioita, mikä pakottaa nopeaan suojaukseen ja rajoittaa aikaporrastuksen käytön lähinnä varasuojaukseen. Menetelmänä selektiivisyyden tarkasteluun käytetään selektiivisyyskäyrästöä, jolla voidaan todeta suojauksen kattavuus, selektiivisyys ja aikaporrastus myös eri valmistajien tuotteiden välillä.

Tapaustutkimuksessa tarkasteltiin erään teollisuuslaitoksen pienjännitepääkeskuksia selektiivisyyskäyrästön avulla. Tarkasteltavassa verkossa ei havaittu ongelmia pienjännitepääkeskusten ja keskijänniteverkon välillä, mutta pienjännitekeskuksen pääkatkaisijan ja lähtöjen etukojeiden suojauksen selektiivisyys havaittiin ongelmalliseksi, joskin tältäkin osin suojaus oli aukotonta ja nopeaa. Ratkaisuksi ongelmaan esitetään pääkatkaisijan toiminnan hidastamista tai lukituksia katkaisijan ja lähtöjen etukojeiden välille.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Antti Kurki

Protection of industrial low-voltage switchboard as part of industrial electricity distribution network

Master's Thesis

2022

87 pages, 35 figures, 13 tables and 5 appendixes

Examiners: Prof. (Tenue track) Jukka Lassila
D.Sc. (Tech.) Janne Karppanen

Supervisor: Electrical Engineering technician Kari Salmesoja

Keywords: low voltage switchboard, protection, selectivity

A typical feature of industrial electricity distribution networks is large power demand inside a geographically small area. Because of this the network consists from short cables with large cross-sectional area. Moreover, the short-circuit currents of the network are large even in the low-voltage switchboards. This thesis focuses on the factors affecting the protection of industrial low voltage main switchboards and a method for determining the selectivity of a low voltage main switchboard is applied to industrial network. In the case review the method is applied to the network of one factory.

The high short-circuit current levels and small differences between short-circuit currents between faults occurring in different parts of the network was found challenging. The short-circuit current differences that can be utilized in the selectivity of the protection are mainly formed at the transformers when switching from one voltage level to another. Because of the small current differences, the selectivity of the low-voltage switchgear must use time staggering or energy selectivity instead of current selectivity. The high short circuit currents make fast tripping times a priority, which limits the use of delays mainly for back-up protection. The method for examining selectivity, a time-current curve is used, which can be used to determine the coverage, selectivity and time staggering between different products of different manufacturers.

In the case review low-voltage main switchboards of one industrial plant were analyzed with the figure described above. No problems were detected between the protection devices of the medium and low-voltage networks, but the selectivity between the feeder and load circuit breakers of the main low-voltage switchboard was found problematic. Increasing the tripping time of the feeding circuit breaker or interlock between the circuit breakers is proposed as solution.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty yhteistyössä Etteplan Finland Oy:n Engineering Solutions -yksikön ja heidän asiakasyrityksensä kanssa. Haluan kiittää molempia erittäin mielenkiintoisesta aiheesta ja erityisesti asiakasta mahdollisuudesta tehdä tämä työ. Kiitokset työn tarkastajille Jukka Lassilalle ja Janne Karppaselle arvokkaista kommenteista ja neuvoista työn aikana. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työn tekemisessä auttaneita työkavereita sekä asiakkaan edustajia saamistani arvokkaista neuvoista ja ideoista. Lopuksi haluan kiittää perhettä ja ystäviäni opinnoissani saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Lappeenrannassa 6.6.2022
Antti Kurki

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET 7
1 JOHDANTO 10
1.1 Työn tavoitteet 10
1.2 Työn rajaukset 11
1.3 Työssä käytettävät menetelmät 11
2 TEOLLISUUSVERKKO 13
2.1 Pääjakeluverkko 15
2.1.1 Säteittäinen verkko 16
2.1.2 Rengasverkko 17
2.1.3 Silmukoitu verkko 18
2.2 Teollisuuden pienjänniteverkko 19
2.3 Järjestelmän maadoitustavat 20
3 VIKAVIRRAT 24
3.1 Oikosulkuilmiö 24
3.1.1 Alku-, muutos- sekä jatkuva oikosulkuvirta 24
3.1.2 Sysäysoikosulkuvirta 25
3.1.3 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th} 26
3.1.4 Oikosulkuvirran arvioiminen 27
3.2 Epäsymmetriset vikatilanteet 29
3.2.1 Myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssit 31
4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖVERKON SUOJAUS 33
4.1 Suojausjärjestelmän vaatimuksia 33
4.1.1 Virtaselektiivisyys 34
4.1.2 Aikaselektiivisyys 34
4.1.3 Lukitukset 34
4.1.4 Energiaselektiivisyys 35
4.2 Relesuojaus 35
4.2.1 Ylivirtareleet 36
4.2.2 Ylivirtareleen käyttökohteita 39
4.2.3 Differentiaalirele 39
4.3 Pienjännitesuojalaitteet 41
4.3.1 Pienjännitekatkaisijat 41

4.3.2 Sulakkeet 46
4.4 Teollisuusverkon suojausjärjestelyjä 50
4.4.1 Jakelumuuntajalähtö 50
4.4.2 Pienjännitepääkeskus 55
4.4.3 Moottorilähtö 56
4.5 Selektiivisyyskäyrästöt 58
5 TAPAUSTUTKIMUS 61
5.1 Tehtaan sähköverkko 61
5.1.1 10 kV:n jakeluverkko 62
5.1.2 Pienjänniteverkko 62
5.2 Tutkittava verkon osa 64
5.3 Verkon vikavirtalaskelma 64
5.4 Tarkasteltavan verkon oikosulkusuojaus 65
5.4.1 Tavoitesuojausasettelut 67
5.4.2 Toteutuneet suojausasettelut ja korjausehdotukset 68
6 YHTEENVETO 83
LÄHDELUETTELO 85

LIITTEET

LIITE 1: Tarkasteltavan verkonosan verkostokaavio
LIITE 2: Tarkasteltavan verkonosan tekniset tiedot
LIITE 3: Laskelma keskuksesta toiseen syötetystä oikosulkuvirrasta
LIITE 4: Pienjänniteverkon pienimmän oikosulkuvirran rajapituus
LIITE 5: Esimerkki moottorikäytön koordinaatiotaulukosta

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinnät

A	poikkipinta-ala, kerroin
c	jännitekerroin
I	virta
I_b	kuormitusvirta
I_d	erovirta
I_f	vikavirta
I_k	jatkuvan tilan oikosulkuvirta, oikosulkuvirta yleisesti
I_k''	alkuoikosulkuvirta
I_k'	muutosoikosulkuvirta
I_{k2}	kaksivaiheinen oikosulkuvirta
I_{k3}	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_{th}	ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
I_{thmaks}	suurin ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta
I_{term}	oikosulun terminen kestovirta
I_{term1s}	oikosulun terminen kestovirta yhden sekunnin ajalle
I_s	moottorin käynnistysvirta, differentiaalireleen vakavointivirta
$\hat{I}_{sm}$	muuntajan kytkentävirtasysäyksen huippuarvo
I_t	differentiaalireleen toimintavirta
I_r	differentiaalireleen toimintavirta
i_s	sysäysoikosulkuvirta
k	kerroin
P_{kn}	muuntajan kuormitushäviöt
p	kerroin
R	resistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi
S_k	ominaisoikosulkuteho
S_n	nimellisnäennäisteho
T''	alkuoikosulkuvirran aikavakio
T'	muutosoikosulkuvirran aikavakio

t	aika
t_{maks}	enimmäistoiminta-aika
t_{TRIP}	toiminta-aika
U	jännite, pääjännite
U_n	nimellisjännite
U_v	vaihejännite
u_k	oikosulkujännite
u_r	resistiivinen oikosulkujännite
X	reaktanssi
X''	alkureaktanssi
X'	muutosreaktanssi
X_d	pitkittäisreaktanssi
X_d''	pitkittäinen alkureaktanssi
X_d'	pitkittäinen muutosreaktanssi
X_k	oikosulkureaktanssi
X_0	nollareaktanssi
X_1	myötäreaktanssi
X_2	vastareaktanssi
x	reaktanssi suhteellisarvona
Z	impedanssi
Z_f	vikaimpedanssi
Z_k	oikosulkuimpedanssi
Z_{th}	Thevenin impedanssi
Z_0	nollaimpedanssi
Z_1	myötäimpedanssi
Z_2	vastaimpedanssi
κ	kerroin
τ	aikavakio
μ	muuntosuhde

Lyhenteet

ACB	ilmakatkaisija (Air Circuit Breaker)
Dyn	muuntajan kolmio–tähti-kytkentäryhmä, jossa tähtipiste on maadoitettu
IEC	International Electrotechnical Commission
I>	ylivirtareleen hidas porras
I>>	ylivirtareleen nopea porras
I^2t	Joulen integraali
KJ	keskijännite (1–70 kV)
MCCB	kompaktikatkaisija (Molded Case Circuit Breaker)
PJ	pienjännite (< 1000 V)
PKS	PKS Standardisointi
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry (Finlands Standardiseringsförbund)
UPS	keskeytymätön virransyöttö (Uninterruptible Power Supply)

1 JOHDANTO

Teollisuuslaitoksissa sähköverkko on yksi tuotantokoneiston osa, joka mahdollistaa muun koneiston toiminnan. Sähkökatkoissa tämän koneiston toiminta keskeytyy jopa sähkökatkoa pidemmäksi aikaa aiheuttaen huomattavia tuotannonmenetyksiä. Verkon onkin siis toimittava luotettavasti ja verkossa esiintyvien keskeytysten määrä ja kesto on minimoitava. Tämän saavuttamiseksi on yksittäisen vian vaikutusalueesta tehtävä mahdollisimman pieni jakamalla verkko useisiin suojausvyöhykkeisiin, jotka ovat keskenään selektiivisiä. Teollisuusverkossa tämä tarkoittaa pienjännitepääkeskusten jakamista eri suojausvyöhykkeisiin, jotta sähkönjakelun keskeytykset eivät leviä pääkeskuksesta toiseen.

Vuosien varrella teollisuusverkko kehittyy muun tuotantolaitteiston tarpeiden mukaan ja niiden sanelemassa tahdissa, joka on usein riippuvainen erilaisista investointiprojekteista. Tuotantolaitteiston projektiluonteiset laajennukset ja muutokset asettavat haasteita verkon suojausvyöhykkeiden hallinnalle. Kiivaasti etenevässä projektitoiminnassa suojausvyöhykkeet voivat jäädä taka-alalle tuotantokojeistoa laajennettaessa, mikä saattaa johtaa ennalta arvaamattoman laajoihin sähkökatkoihin jopa vuosikymmenien päästä projektin valmistumisesta. Tässä työssä tutkitaan, kuinka suojausvyöhykkeiden muutokset voitaisiin havaita ja korjata teollisuuden pienjännitekeskusten välillä ja siten estää ennalta-arvaamattomat jakelukeskeytykset ja niiden leviäminen teollisuuslaitoksen osastolta toiselle. Tapaustutkimuksessa tarkastellaan lähemmin erään teollisuuslaitoksen pienjännitepääkeskusten suojauksen selektiivisyyttä.

1.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää prosessiteollisuuden pienjännitepääkeskusten väliseen selektiivisyyteen oleellisesti vaikuttavat seikat ja esittää toimintatapa selektiivisyyden tarkastelemiseen keskusten välillä. Tapaustutkimuksessa toimintatapa jalkautetaan erään teollisuuslaitoksen verkkoympäristöön. Tutkimuskysymyksiksi on asetettu seuraavat:

- Kuinka pienjännitteisten prosessisähkökeskusten suojauksen selektiivisyydestä voidaan varmistua ja mahdolliset puutteet korjata?
- Mitä suunnittelussa on huomioitava, jotta varmistetaan pienjännitteisten prosessisähkökeskusten suojauksen toiminnalta edellytettävät muut vaatimukset?

Näihin kysymyksiin vastatessa tutustutaan sähköverkon suojaukselle asetettuihin vaatimuksiin sekä niihin ilmiöihin, fyysisiin ominaisuuksiin ja teknisiin ratkaisuihin, joihin sähköverkon suojaus perustuu. Näiden perusteella pohditaan, mitä rajoitteita pienjännitteisen prosessisähkökeskuksen selektiivisyydelle muodostuu ja toisaalta kuinka näitä voidaan hyödyntää selektiivisessä suojauksessa.

1.2 Työn rajaukset

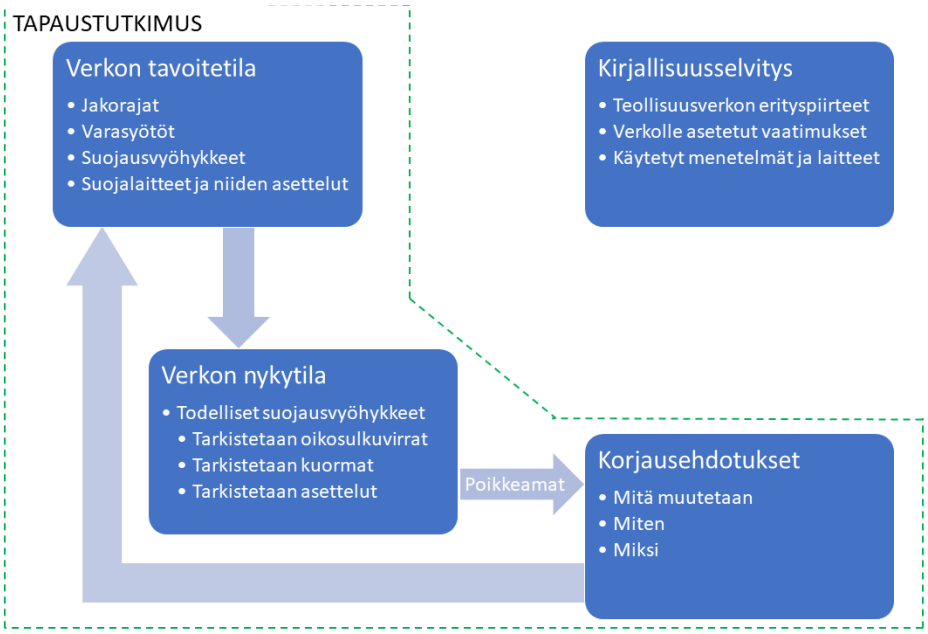
Tutkimuksessa keskitytään suojauksen periaatteisiin ja ratkaisumalleihin, kuten suojalaitteiden välisen selektiivisyyden ja suojauksen kattavuuden toteamiseen. Laitteiden kytkennät, asennustavat ja vastaava kenttäsuunnittelu on rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Teollisuusverkon laajasta keskuskannasta keskitytään prosessisähkökeskuksiin normaalissa kytkentätilanteessa. Valaistus- ja korjausvoimakeskukset sekä varavoimakojeiden ja UPS-järjestelmien syöttämät varmennetut jakelujärjestelmät on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle. Tapaustutkimuksessa keskijännitekojeistojen välinen selektiivisyys on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle, koska se on todettu toimivaksi aiemmassa selvityksessä. Tätä rajausta on havainnollistettu sivun 14 kuvaan 2.1 piirretyllä katkoviivalla. Katkoviivan ulkopuoliset verkon osat on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

1.3 Työssä käytettävät menetelmät

Edellä mainittuihin tutkimuskysymyksiin ja työn tavoiteasetteluun haetaan ratkaisuja kirjallisuusselvityksen avulla, jossa tutustutaan teollisuusverkon erityispiirteisiin sekä näistä aiheutuviin teknisiin yksityiskohtiin. Tämän perusteella esitellään suojauksen selektiivisyyden tarkastelun toimintatapa, jota hyödynnetään tapaustutkimuksessa.

Tapaustutkimuksessa selvitetään tutkittavan verkon tavoitetila ja siitä mahdollisesti poikkeava nykytilanne sekä laaditaan tarvittavat korjausehdotukset tavoitetilaan pääsemiseksi. Kuvassa 1.1 on esitetty työn rakenne lohkokaaviona. Katkoviivalla kuvaan on rajattu tapaustutkimusosa.



Kuva 1.1 Kuvaus työn kulusta lohkokaavion muodossa Tapaustutkimus on rajattu katkoviivalla kuvaan.

Kuvassa 1.1 on kuvattu diplomityön työvaiheet ja niiden väliset suhteet. Työ aloitetaan kirjallisuusselvityksellä, jossa perehdytään sähköverkkojen suojaukseen teollisuusverkkojen näkökulmasta. Tarkasteltavia aihepiirejä ovat teollisuusverkkojen erityispiirteet, suojaukselle asetetut vaatimukset, näiden toteuttamisessa käytettävät menetelmät ja suojalaitteiden suunnitellun toiminnan varmistamisen keinot.

Muun tutkimuksen tietoja hyödyntäen siirrytään tapaustutkimukseen, joka aloitetaan selvittämällä tutkittavan verkon tavoitetila suojauksen kannalta. Tavoiteverkosta selvitetään teknisiä yksityiskohtia kuten jakorajat, varasyöttöyhteydet ja käytetyt suojalaitteet sekä kuormat. Näiden lisäksi selvitetään periaatteita, kuten suojausvyöhykkeiden rajat ja niiden määräytymisperusteet.

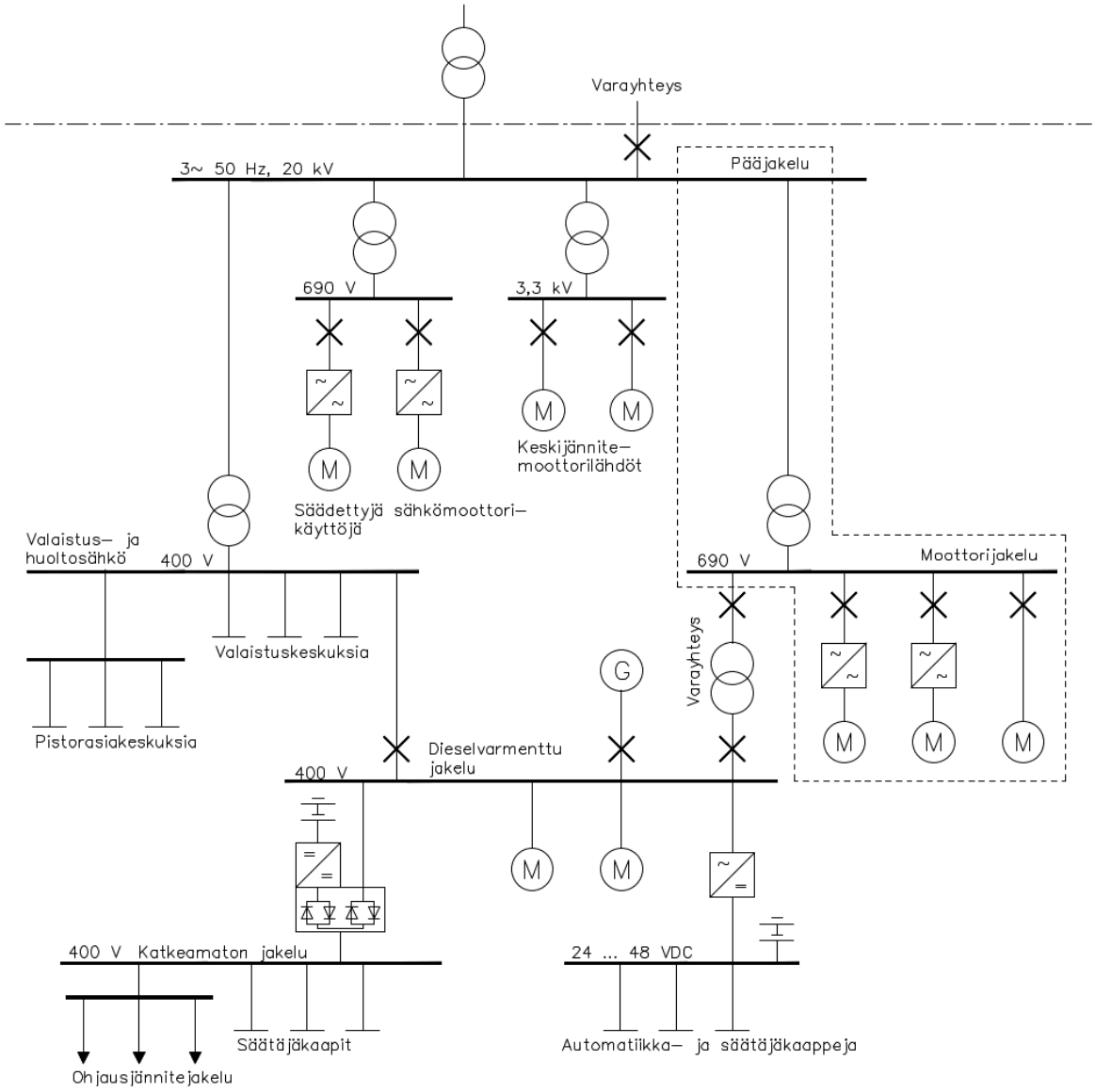
Verkon tavoitetilan vertailukohdaksi kerätään tiedot verkon nykytilasta relekojeistuspöytäkirjoja, kenttäkierroksia ja oikosulkulaskelmia hyödyntäen. Tavoite- ja nykytilaa verrataan toisiinsa ja poikkeamat merkitään muistiin. Havaituille poikkeamille laaditaan korjausehdotukset tutkimuksen muista osista ammenettavien ratkaisumallien avulla.

2 TEOLLISUUSVERKKO

Teollisuusverkolla tarkoitetaan tehtaiden tai teollisuusalueen sisäisessä käytössä olevaa sähköverkkoa. Niihin liitetyt kuormitukset ja verkon rakenne poikkeavat yleisestä sähkönjakeluverkosta. Teollisuusverkkojen sähköstä suurin osa kuluu sähkömoottoreissa, mikä on vaikuttanut teollisuusverkkojen rakenteeseen. Ne ovat yleisiin sähköverkkoihin verrattuna pituudeltaan pieniä, mutta niissä siirrettävät tehot ovat suuria. Myös käytettävät jännitteet poikkeavat yleisestä sähkönjakelusta. (Etto, 1998)

Teollisuusverkko koostuu liitynnästä yleiseen sähkönjakeluverkkoon, pääjakelusta ja käyttöjakelusta kulutuskohteille. Verkkojen koot vaihtelevat yhdellä jakelumuuntajalla paikallisen sähkönjakeluyhtiön keskijänniteverkkoon liitetyistä laitoksista useita kymmeniä jakelumuuntajia sisältäviin päämuuntajalla suurjänniteverkkoon liitettyihin laitoksiin.

Laitoksen koosta riippuen teollisuusverkko voi olla liitetty yleiseen sähköverkkoon 110 kV:n, 20 kV:n, 10 kV:n tai 400 V:n jännitetasolla. Näistä viimeiseksi mainittua käytetään vain pienteollisuudessa, muutoin liittymiseen käytetään keski- tai suurjännitettä. Tyypillisesti sähköteholtaan yli 10 MW:n suuruiset laitokset liittyvät yleiseen sähköverkkoon 110 kV:n jännitetasolla. Tämän kokoluokan laitoksissa on tyypillisesti myös omaa sähköntuotantoa, ja niiden pääjakelu on toteutettu keskijännitteellä. Pääjakeluun on liitetty kulutuskohteiden käyttöjakelu, joka jakaantuu edelleen prosessisähköverkkoon, valaistus- ja korjausvoimaan sekä apusähköjärjestelmiin. (Korpinen, 1998) Näiden rakenne on esitetty kuvassa 2.1, johon on katkoviivalla ympyröity prosessisähkökeskus, joiden suojaukseen tutkimus on rajattu.



Kuva 2.1 Suuren teollisuusverkon rakenne. Työn rajaus on merkitty kuvaan katkoviivalla. (Muokattu lähteistä: Hietalahti, 2013; Korpinen, 1998)

Kuvan 2.1 ylälaidassa näkyy päämuuntaja, jolla teollisuusverkko on liitetty suurjänniteverkkoon. Tämän alapuolella on laitoksen pääjakelu, johon kulutuskohteiden käyttöjakelu on liitetty jakelumuuntajilla. Käyttöjakelu jakaantuu edelleen karkeasti kolmeen osaan: tuotannon sähkönjakeluun eli prosessisähköverkkoon, valaistus- ja huoltosähköön sekä apusähköjärjestelmään. Nämä eroavat toisistaan mm. toiminnallisen tehtävän ja liitettyjen laitteiden osalta. Tuotannon sähkönjakeluun on liitetty tuotannossa käytettävät laiteet, jotka ovat pääosin moottoreita. Nimensä mukaisesti valaistus- ja huoltosähköön on liitetty laitoksen valaisimet sekä korjauksessa tarvittavat laitteet ja työmaakeskukset Apusähköjärjestelmään on liitetty laitteita, joiden sähkönjakelu ei saa keskeytyä normaalin jakelun katketessa, kuten säätö- ja ohjausjärjestelmiä. (Etto, 1998; Hietalahti, 2013; Korpinen, 1998)

Tuotannon sähkönjakeluverkkoon on liitetty tuotannossa käytettävät koneet, ja siinä kulutetaan suurin osa laitoksessa käytettävästä energiasta. Pääosa prosessisähköverkkoon liitetyistä laitteista on moottoreita. Ne on liitetty pääjakelujärjestelmiin omilla jakelumuuntajillaan, ja käytettävä jännite on yleisen sähkönjakeluverkon 400 V:a korkeampi. Korkeamman jännitteen syynä on sen mahdollistama suurempi siirtokapasiteetti ja pienemmät häviöt. Tyypillinen tuotannon sähkönjakeluverkon jännite on vanhemmissa laitoksissa 525 V ja uudemmissa 690 V. Näillä jännitteillä voidaan yhä käyttää pienjänniteisiä kaapeleita ja keskuskomponentteja, mutta moottorien tehot ja verkon tehonsiirtokyky kasvavat 400 V:n jakelujännitteeseen verrattuna. (Etto, 1998)

Apusähköjärjestelmä varmennetaan tarpeen mukaan, ja se voi muodostua useista keskenään itsenäisistä laitteistoista tuotantolaitoksen eri osissa. Tyypillisiä laitteistoja ovat 400 V:n dieselvarmennettu vaihtosähköverkko, 220, 110 tai 24 V:n paristovarmennettu tasasähkönjakelu ja paristovarmennettu 400 V:n vaihtosähkönjakelu eli niin sanottu UPS-verkko. Diesel- ja paristovarmennettujen laitteistojen oleellisena erona on dieselvarmennuksessa generaattorin käynnistyksen aikana ilmenevä lyhyt katko. Dieselvarmennettuun verkkoon on liitetty laitteet, joille katko voidaan sallia, kuten tärkeimmät pumput ja paristojen varaajat. Paristovarmennuksessa ovat puolestaan laitteet, joiden jakelu ei saa lainkaan katketa. Tasasähköverkkoon on liitetty esimerkiksi kytkinlaitosten ohjaukset ja suojareleet. Paristovarmennettuun vaihtosähköverkkoon on liitetty esimerkiksi kenttäinstrumentteja, tietokoneita ja valvomomonitoreja. (Etto, 1998)

Valaistus- ja huoltosähkö on pieniä teollisuuslaitoksia lukuun ottamatta erotettu tuotannon sähkönverkosta, ja sen jännitteenä on 400 V. Verkkoa syötetään omalla jakelumuuntajallaan laitoksen pääjakeluverkosta. Siihen on liitetty nimensä mukaisesti valot ja korjauksessa tarvittavat koneet sekä muita 400 V:n jännitettä tarvitsevia laitteita.

2.1 Pääjakeluverkko

Pääjakeluverkolla tarkoitetaan jännitetasoa, jolla suoritetaan pääsääntöinen sähkönjakelu teollisuuslaitoksessa ja johon jakelumuuntajat liitetään. Tyypillisesti pääjakelu on toteutettu keskijännitteellä. Käytössä voi olla tuotantolaitoksesta riippuen 33, 20, 10 tai 6 kV:n jännitetaso. Käytettävään pääjakelujännitteeseen vaikuttaa laitoksen rakentamisajankohta ja laitoksen suurimpien moottorien tehot. Tyypillisesti uusissa laitoksissa käytetään korkeampaa

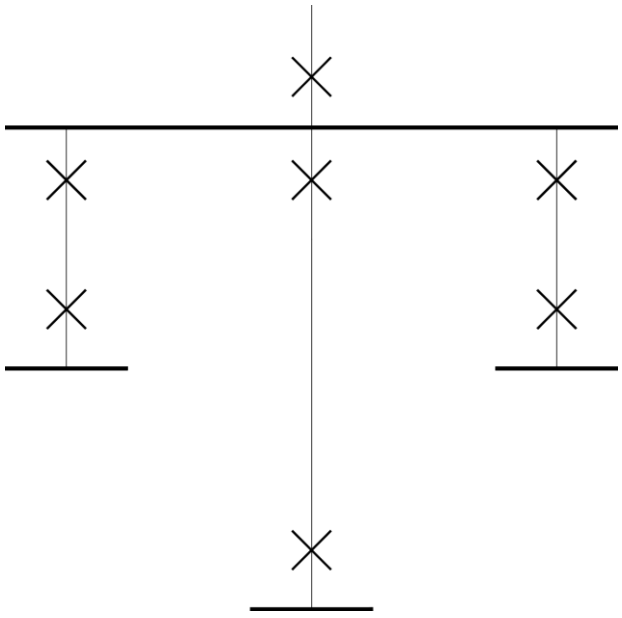
jakelujännitettä kuin vanhemmissa. 20 kV:n jännitetason etuna on sen yleinen käyttö julkisissa sähkönjakeluverkoissa, mikä mahdollistaa suoran liittymisen julkiseen jakeluverkkoon. Kuuden ja kymmenen kilovoltin jännitetasojen etuna on niiden yleinen käyttö keskijännitemoottoreissa. (Etto, 1998; Korpinen, 1998)

Usein pääjakeluverkon jännitetason lisäksi verkossa saattaa olla käytössä myös muita jännitetasoja keskijännitteellä, jos jotkin laitteet niitä tarvitsevat. Esimerkiksi pääjakelujännitteenä voidaan käyttää 20 kV:n jännitetasoa, mutta tämän lisäksi laitoksessa voi olla 10 kV:n kojeisto suuria keskijännitemoottorikäyttöjä varten.

Pääjakelua voidaan luokitella jännitetason lisäksi verkon rakenteen perusteella. Verkkojen rakenteesta on olemassa neljä päätyyppiä: säteittäinen verkko, rengasverkko ja silmukoitu verkko. (ABB, 2000)

2.1.1 Säteittäinen verkko

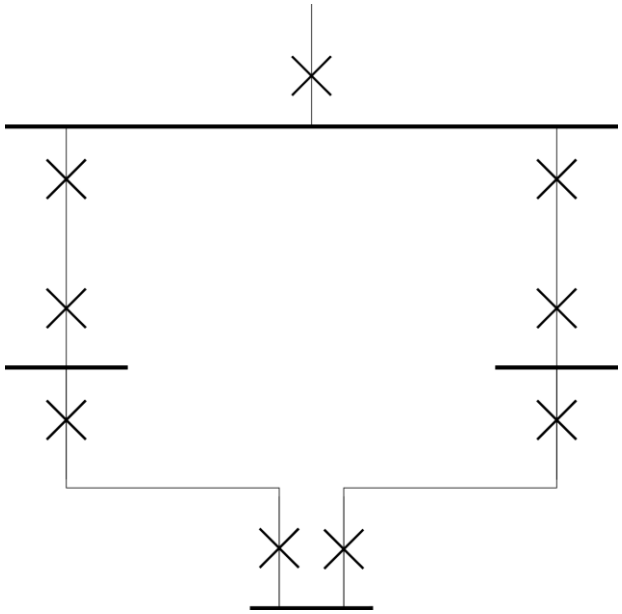
Säteittäinen verkko on rakenteeltaan verkostorakenteista yksinkertaisin, mutta samalla vikaherkin. Tässä verkkotyypissä alemmat jakeluportaat haarautuvat ylemmistä säteittäisesti, minkä vuoksi vika aiheuttaa jakelukeskeytyksen kaikissa alemmissa portaissa. Säteittäisen verkon etuina on selkeä yleisrakenne, yksinkertainen käyttö ja suojauksen yksinkertaisuus. Haittoina ovat puolestaan varayhteyksien puute ja huollon vaatimat käyttökeskeytykset. Säteittäisen jakeluverkon rakenne on esitetty kuvassa 2.2. (ABB, 2000)



Kuva 2.2 Säteittäinen verkkorakenne. (Muokattu lähteestä: ABB, 2000)

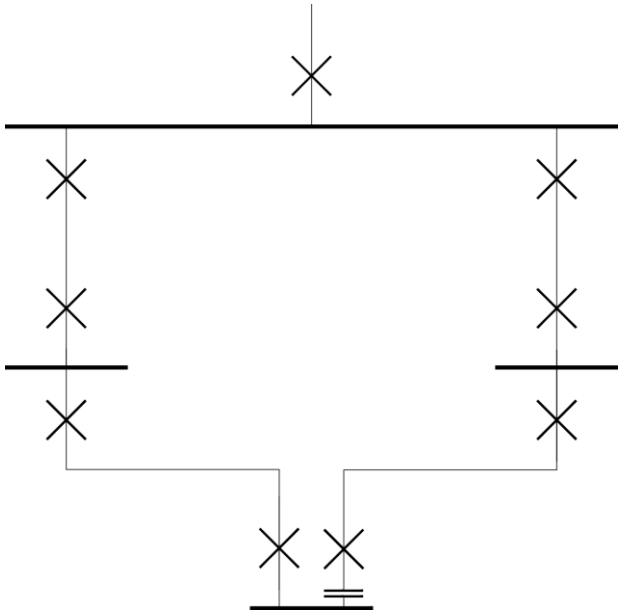
2.1.2 Rengasverkko

Rengasverkossa alempi jakeluporras on yhdistetty ylempään molemmista päistään, minkä vuoksi verkon rakenne muistuttaa rengasta. Rengasverkon etuina säteittäiseen jakeluverkkoon nähden ovat syöttöjen varmistus, parempi jännitevakaus ja pienemmät tehohäviöt. Haittoina ovat puolestaan käytön vaikeutuminen, monimutkaisemmat suojausjärjestelyt sekä verkon oikosulkuvirtojen kasvu. Rengasverkon rakenne on esitetty kuvassa 2.3. (ABB, 2000)



Kuva 2.3 Rengasverkko. (Muokattu lähteestä: ABB, 2000)

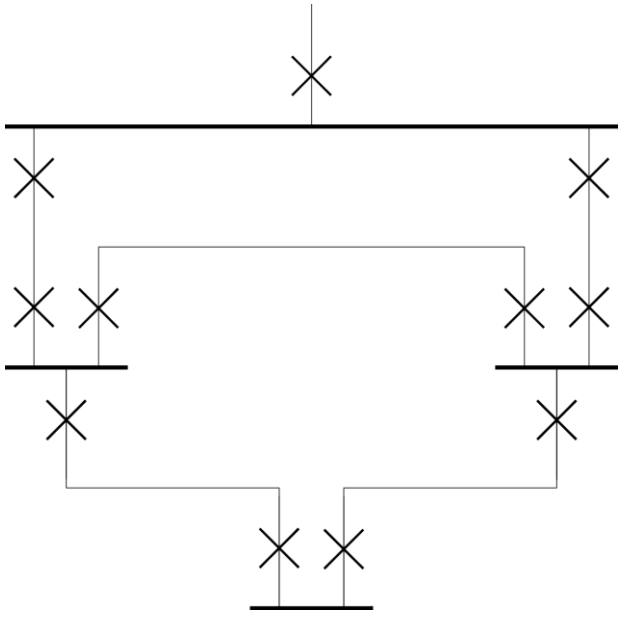
Rengasverkon ja säteittäisen verkon välimuotona voidaan pitää säteittäisesti käytettävää rengasverkkoa. Siinä verkko on rakennettu renkaaksi, mutta se jaetaan osiin jakorajojen avulla ja sitä käytetään säteittäisesti. Tällä saavutetaan rengasverkkoa yksinkertaisemmat suojausjärjestelyt, säteittäistä verkkoa pienemmät vian vaikutusalueet ja varasyötöt vikojen korjauksen ajaksi. Haittoina ovat rengasverkkoa suuremmat tehohäviöt sekä jännitteen alenemien kasvu. Säteittäisesti käytettävä rengasverkko on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Säteittäisesti käytetty rengasverkko.

2.1.3 Silmukoitu verkko

Silmukoitu verkko on luonteeltaan rengasverkon tapainen, mutta siinä on renkaan sisäisiä yhteyksiä. Tällä saavutetaan edelleen parempi syöttöjen varmistus, parempi jännitevakaus ja pienemmät tehohäviöt. Haittoina ovat käytön monimutkaisuus, vikavirtojen kasvu ja relesuojauksen kallistuminen. Silmukoituja verkkoja käytetään Suomessa lähinnä 220 kV:n ja 400 kV:n kantaverkossa. (ABB, 2000) Silmukoitu verkko on esitetty kuvassa 2.5.

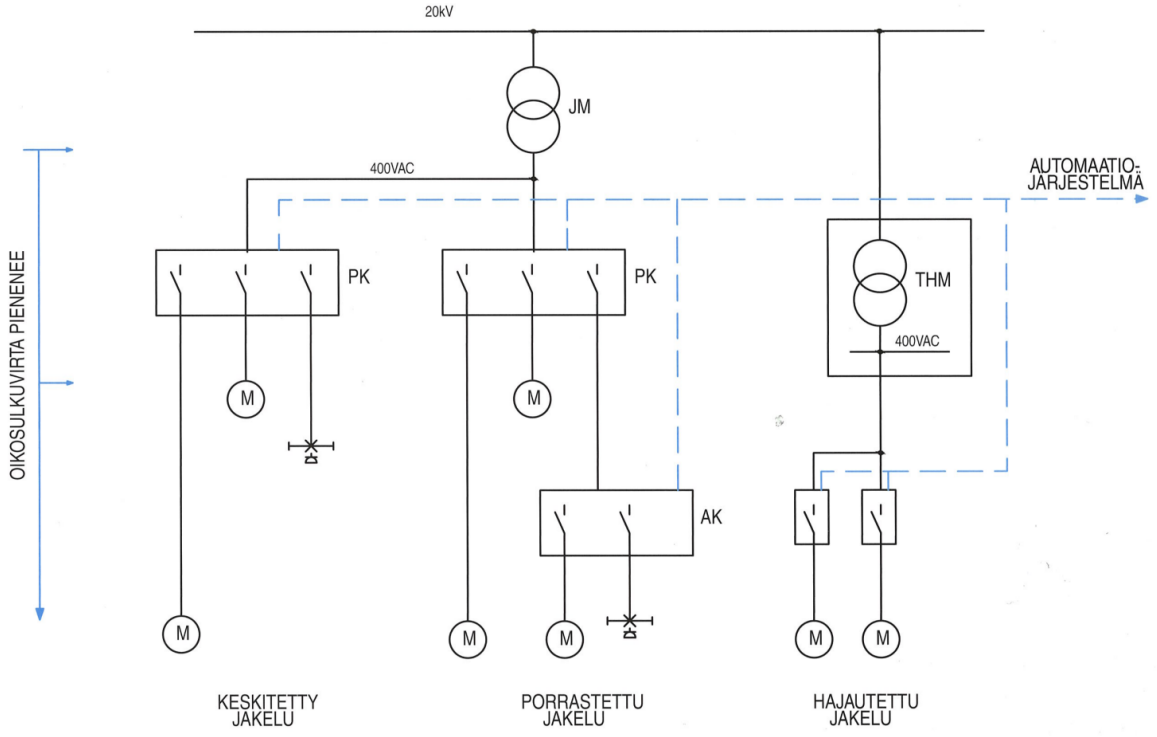


Kuva 2.5 Silmukoitu verkkomuoto. (Muokattu lähteestä: ABB, 2000)

2.2 Teollisuuden pienjänniteverkko

Pienjänniteverkolla tarkoitetaan verkkoa, jonka jännite on alle 1 000 V vaihtosähköä tai 1 500 V tasasähköä. Yleisesti käytössä olevia pienjänniteverkon jänniteitä ovat 400 V, 525 V ja 690 V. Näistä kahta ensimmäistä käytetään lähinnä moottorikeskuksissa viimeiseksi mainitun ollessa Suomen yleisen sähkönjakeluverkon nimellisjännite. Teollisuuslaitoksessa pienjänniteverkko on liitetty pääjakeluverkkoon jakelumuuntajalla, ja sähkö jaetaan sitä pitkin kulutuskohteisiin.

Teollisuuden pienjänniteverkko voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin: keskitettyyn, porrastettuun ja hajautettuun jakeluun (Hietalahti, 2013; Mäkinen, 2009). Vaikkakin verkon todellinen rakenne muodostuu usein useamman päätyypin yhdistelmäksi, on päätyypit esitetty kuvassa 2.6



Kuva 2.6 Periaatekuva teollisuuslaitoksen pienjänniteverkon perusrakenteista. Kuvassa JM = jakelumuuntaja, THM = tehdashallimuuntaja, PK = pääkeskus ja AK = alakeskus. (Mäkinen, 2009)

Kuvan 2.6 vasemmassa laidassa näkyvässä keskitetyssä jakelussa kaikki sähkölähdöt on sijoitettu pääkeskuksiin ja niitä ohjataan automaatiojärjestelmästä. Rakenne on selväpiirteinen, sillä kaikki sähkölähtöihin liittyvät komponentit ovat samassa sähkötilassa. Rakenteen heikkoutena ovat pääkeskuksessa esiintyvät suuret oikosulkuvirrat, joille kaikki keskukseen

liitetyt komponentit altistuvat. Samalla johtopituudet voivat kasvaa liian pitkiksi ja loppupään oikosulkuvirta laskea liian pieneksi suojalaitteiden toiminnan kannalta. (Mäkinen, 2009)

Kuvan keskellä näkyvässä porrastetussa jakelussa suuritehoiset lähdöt on sijoitettu pääkeskukseen ja pienemmät alakeskuksiin. Pää- ja alakeskukset voivat sijaita samassa sähkötilassa tai alakeskukset omissa sähkötiloissaan kulutuskohteiden lähellä. Rakenteen etuna on alakeskuksen komponenteilta vaadittavat pienemmät oikosulkukestoisuudet pääkeskukseen verrattuna. Myös ryhmäjohtojen pituudet laskevat, kun alakeskukset sijoitetaan kulutuskohteiden lähelle. Haittana on alakeskuksen sijoituspaikkaan tarvittavat liitynnät automaatiojärjestelmään. (Mäkinen, 2009)

Kuvan oikeassa laidassa näkyvässä hajautetussa jakelussa moottorien käynnistimet ovat moottorien välittömässä läheisyydessä, ja niitä ohjataan kenttäväylän avulla. Sähkönsyöttö käynnistimille on toteutettu tehdashallimuuntamoista, joissa on tarvittavat liitännät ja suojalaitteet. (Mäkinen, 2009)

2.3 Järjestelmän maadoitustavat

Aiemmin mainittujen jännitetason ja verkkotopologian lisäksi jakeluverkon ominaisuuksiin vaikuttaa oleellisesti järjestelmän maadoitustapa. Maadoitustapa vaikuttaa verkossa vian aikana ilmeneviin virtoihin ja jännitteisiin merkittävästi. Luonnollisesti myös suojalaitteiden toiminta muuttuu verkon maadoitustavasta riippuen.

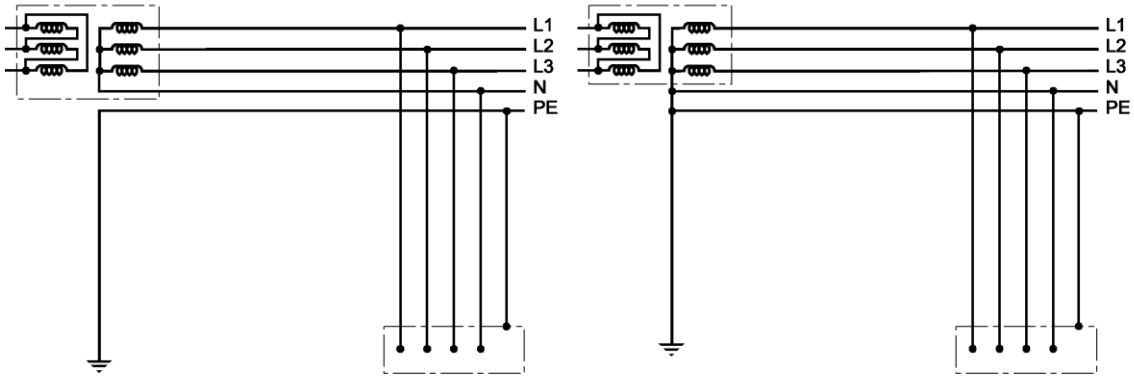
Maadoitustavat on tapana ilmoittaa kahden kirjaimen yhdistelmällä ja tarvittaessa lisäkirjaimilla. Kirjainyhdistelmässä ensimmäinen kirjain ilmoittaa jakelujärjestelmän tehonlähteen maadoitustavan, eli yleensä jakelumuuntajan toision maadoitustavan:

- T = Yksi piste on yhdistetty suoraan maahan.
- I = Kaikki tehonlähteen jännitteelliset osat on erotettu maasta, tai yksi piste on yhdistetty maahan impedanssin kautta.

Toinen kirjain ilmoittaa sähkölaitteiston jännitteelle alttiiden osien maadoitustavan:

- T = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty galvaanisesti suoraan maahan riippumatta jakelujärjestelmän tehonlähteen maadoitustavasta.
- N = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty jakelujärjestelmän tehonlähteen maadoitettuun pisteeseen, kuten jakelumuuntajan maadoitettuun tähtipisteeseen. (Hietalahti, 2013)

Eri puolilla maailmaa käytettyjä maadoitustapoja ovat TN-, IT- ja TT-järjestelmät, josta viimeiseksi mainittua ei käytetä Suomessa lähes lainkaan. Yleisin maadoitustapa on TN-järjestelmä, jota käytetään Suomessa tavallisissa pienjännitejakeluverkoissa. TN-järjestelmän ohella Suomessa käytetään IT-järjestelmää, joka on yleisesti käytössä teollisuuden pienjänniteverkoissa ja keskijännitejakeluverkoissa. Suomessa käytössä olevien maadoitustapojen eroja on havainnollistettu seuraavassa kuvassa 2.7.



a) b)

Kuva 2.7 IT- (a) ja TN-järjestelmien (b) maadoitus. (Muokattu lähteestä: Mäkinen, 2009)

Kuvan 2.7 vasemmassa laidassa näkyvässä IT-järjestelmässä mitään jakelujärjestelmän osaa ei ole yhdistetty suoraan maahan ja sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat on maadoitettu omaan maadoituselektrodiinsa. Kuvan oikeassa laidassa näkyvässä TN-järjestelmässä sen sijaan järjestelmän tähtipiste on maadoitettu ja jännitteelle alttiit osat on yhdistetty maadoitukseen.

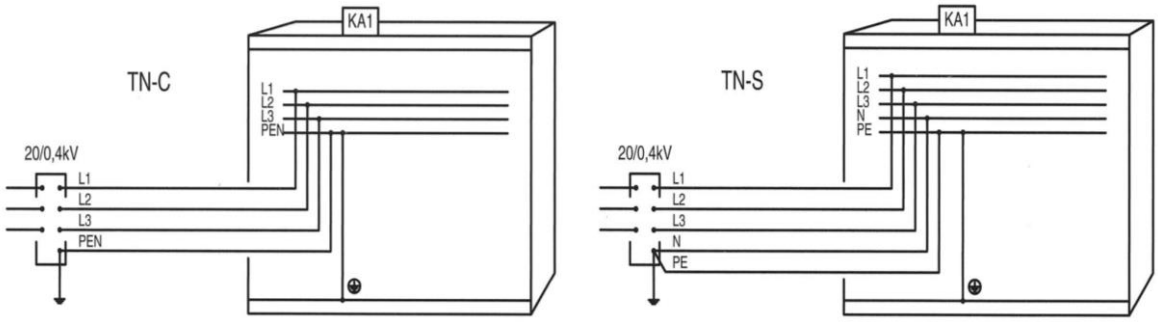
IT-järjestelmässä ensimmäisen vian aiheuttama vikavirta on hyvin pieni, minkä vuoksi käyttöä voidaan jatkaa ensimmäisen vian jälkeen ilman käyttökeskeytystä. Tämän vuoksi IT-järjestelmää käytetään kohteissa, joissa halutaan varmistaa katkeamaton sähkönjakelu, kuten sairaaloiden leikkaussaleissa ja teollisuuden sähkönjakelussa. Samalla pieni vikavirta vaatii eristyksenvalvontaa vian havaitsemiseksi, mikä on vähentänyt IT-järjestelmän käytön leviämistä Suomessa laajemmalle. TN-järjestelmässä vikavirta on suuri jo ensimmäisessä viassa, mikä mahdollistaa vian havaitsemisen pelkästään virran suuruuden perusteella.

2.3.1 TN-järjestelmä

Kuvassa 2.7 esitettyyn tapaan TN-järjestelmissä jännitteelle alttiit osat on yhdistetty jakelujärjestelmän tehonlähteen maadoitettuun pisteeseen. Tämä yhdistys jaetaan edelleen nolla- ja suojamaadoitusjohtimeen (SFS 6000-1). Nollajohdin on yhdistetty järjestelmän maadoitettuun pisteeseen ja voi osallistua sähköenergian siirtoon. Suojamaadoitusjohdin puolestaan on tarkoitettu suojamaadoittamiseen, eikä se osallistu sähköenergian siirtoon. Näiden johtimien välinen kytkentä ilmaistaan lisämerkillä maadoitustavan nimessä:

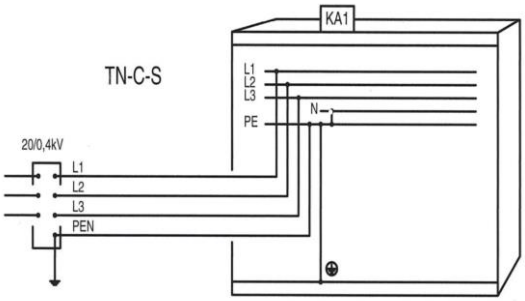
- S = Koko järjestelmässä on erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet, jotka on molemmat yhdistetty tehonlähteen maadoitettuun pisteeseen ja muutoin erotettu toisistaan (Mäkinen, 2009).
- C = Järjestelmässä ei ole erillistä nolla- ja suojamaadoitusjohdinta, vaan näiden toiminnot on yhdistetty yhteen johtimeen, jota kutsutaan PEN-johtimeksi (Mäkinen, 2009).

Tästä kytkennästä riippuen TN-järjestelmää voidaan kutsua TN-C, TN-S tai TN-C-S järjestelmäksi. Näiden järjestelmien kytkennät on esitetty kuvissa 2.8 ja 2.9. (Mäkinen, 2009)



Kuva 2.8 TN-järjestelmien maadoitustavat: vasemmalla TN-C- ja oikealla TN-S-järjestelmä. TN-C-järjestelmän PEN-johdin on TN-S-järjestelmässä jaettu nolla- (kuvassa N) ja suojamaadoitusjohtimiksi (kuvassa PE). (Mäkinen, 2009)

Kuvan 2.8 vasemmassa laidassa esitetyssä TN-C järjestelmässä ei ole erillistä nolla- ja suojamaadoitusjohdinta (PE), vaan jännitteelle alttiit osat on yhdistetty PEN-johtimella tehonlähteen maadoitettuun pisteeseen. Kuvan oikeassa laidassa esitetyssä TN-S järjestelmässä on erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet, jotka on yhdistetty toisiinsa ainoastaan tehonlähteen maadoitetussa pisteessä ja muutoin erotettu toisistaan.



Kuva 2.9 TN-C-S-järjestelmän maadoitus. (Mäkinen, 2009)

TN-C-S järjestelmässä on sekä TN-C- että TN-S-osa. Järjestelmä on yhdistetty tehonlähteen maadoitettuun pisteeseen TN-C järjestelmän mukaisesti, mutta nolla- ja suojamaadoitusjohdin on erotettu toisistaan jossain pisteessä, esimerkiksi pääkeskuksessa. Erotuskohdan jälkeen asennus on toteutettava TN-S järjestelmän mukaisesti eli N- ja PE-johtimia ei saa yhdistää toisiinsa erotuskohdan jälkeen.

3 VIKAVIRRAT

Monien muiden teknisten laitteiden tapaan sähkölaitteistot vikaantuvat ajan saatossa. Vikaantuminen voi aiheutua esimerkiksi inhimillisestä erehdyksestä, laitteen toimintahäiriöstä, laitteistoon päätyneestä vierasesineestä, eläimestä, vedestä tai pölystä. Sähkölaitteiston viat voivat vahingoittaa itse sähkölaitteiston lisäksi myös ihmisiä, eläimiä ja muuta omaisuutta. Mahdolliset viat onkin huomioitava sähkölaitteistoa suunniteltaessa, jotta vahingoilta voidaan välttyä (SFS 6000-1). Tässä luvussa on käsitelty huomiota vaativia vikatapauksia.

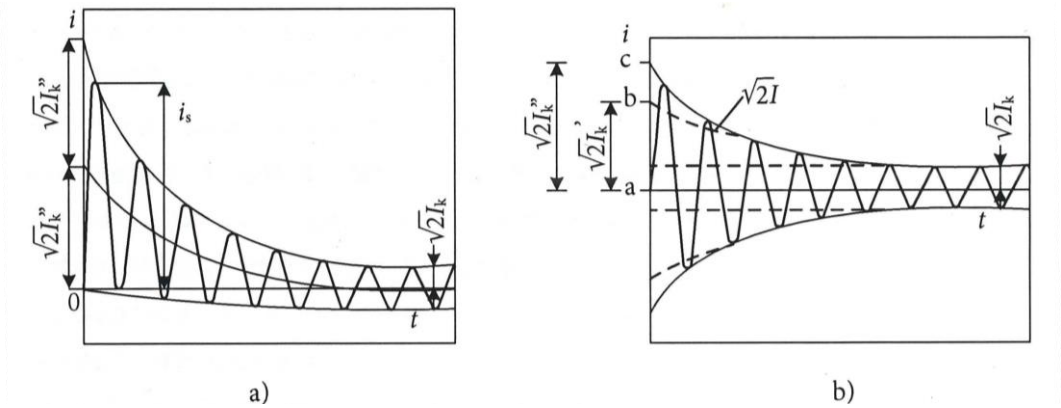
3.1 Oikosulkuilmiö

Sähköverkon suojareleiden asettelujen kannalta oleellisia oikosulkuvirtoja ovat suurimmat ja pienimmät verkossa esiintyvät oikosulkuvirrat sekä verkkokomponenttien terminen kestovirta ja vian erotusaikaa vastaava terminen ekvivalentti. Tyypillisesti maasta erotetussa keskijänniteverkossa suurin oikosulkuvirta esiintyy kolmivaiheisessa oikosulussa ja pienin kaksivaiheisessa oikosulussa.

3.1.1 Alku-, muutos- sekä jatkuva oikosulkuvirta

Vikatapauksista haastavin on vastukseton kolmivaiheinen oikosulku, missä verkon kaikki vaiheet ovat yhdistyneet toisiinsa ilman vastusta. Kolmivaiheisessa oikosulussa vikavirta voi olla 10–40-kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Verkon suojalaitteiden on katkaistava vikavirta nopeasti, jotteivat verkon laitteet vaurioidu. Vian aikana vikavirrat eivät ole vakioita, vaan ne vaimenevat alun huipusta kohti staattisen tilan arvoa, mikä ilmenee seuraavan sivun kuvasta 3.1. (Elovaara & Laiho, 2007)

Oikosulkuvirran vaimeneminen on esitetty kuvassa 3.1. Oikosulkuvirta kostuu vaihtokomponentista ja tasakomponentista, jonka suuruus riippuu jännitteen hetkellisarvosta oikosulun alkuhetkellä. Kolmivaihejärjestelmässä tasakomponentin vaikutuksesta oikosulkuvirta on aina epäsymmetrinen (kuva 3.1a) ainakin kahdessa vaiheessa. Tasakomponentin suuruuden ollessa nolla on oikosulkuvirta symmetrinen (kuva 3.1b). (Elovaara & Laiho, 2007; Elovaara & Haarla, 2011a)



Kuva 3.1 Epäsymmetrinen (a) ja symmetrinen (b) oikosulkuvirta (Elovaara & Laiho, 2007)

Tasavirtakomponentti vaimenee pois oman verkon ominaisuuksista riippuvan aikavakion mukaan. Vaihtovirtakomponentin amplitudista erotetaan alkuoikosulkuvirta I_k'' ja muutosoikosulkuvirta I_k', jotka vaimenevat omien aikavakioidensa T'' ja T' mukaan. Tasa- ja vaihtovirtakomponenttien vaimennuttua oikosulkuvirralle jää jatkuvan tilan arvo eli pysyvä arvo I_k. (Elovaara & Laiho, 2007; Elovaara & Haarla, 2011a)

3.1.2 Sysäysoikosulkuvirta

Näiden lisäksi kuvaan 3.1a on merkitty oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo eli sysäysoikosulkuvirta i_s, joka esiintyy ensimmäisen oikosulun jälkeisen puolijakson aikana. Kuvassa oikosulun on oletettu alkaneen hetkenä, jolloin oikosulku saa suurimman arvonsa. Kuvasta voidaan arvioida sysäysoikosulkuvirran noudattavan aina yhtälöä

$$i_s < 2\sqrt{2}\, I_k'' \tag{3.1}$$

missä i_s on sysäysoikosulkuvirta ja I_k'' on alkuoikosulkuvirta. (Elovaara & Haarla, 2011a)

Tasakomponentti ei kuitenkaan yleensä ole yhtä voimakas kuin kuvassa 3.1a. Tämä huomioiden sysäysoikosulkuvirran suuruutta voidaan arvioida yhtälöllä

$$i_s = 1{,}8\sqrt{2}\, I_k'' \approx 2{,}5 \cdot I_k'', \tag{3.2}$$

joka vastaa kaavan 3.3 tulosta resistanssin R ja reaktanssin X suhteella $R/X \approx 0{,}103$. Muilla resistanssin ja reaktanssin suhteilla sysäysoikosulkuvirtaa voidaan arvioida IEC 60909 -standardin mukaisella yhtälöllä

$$i_s = \kappa\sqrt{2}\, I_k'', \tag{3.3}$$

missä κ on resistanssin ja reaktanssin suhteesta riippuva kerroin, joka voidaan laskea yhtälöllä

$$\kappa \approx 1{,}02 + 0{,}98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}}. \tag{3.4}$$

(Elovaara & Haarla, 2011a)

Suurimpana virtana sysäysoikosulkuvirta määrää laitteiden rakenteiden mekaanisen keston. Katkaisijoiden katkaisutapahtuman alkaessa oikosulkuvirta on vaimentunut muutosoikosulkuvirran suuruiseksi. Muutosoikosulkuvirta siis määrää katkaisijoilta vaadittavan katkaisukyvyn ja suojareleiden virta-asettelut. (Elovaara & Haarla, 2011a)

3.1.3 Ekvivalenttinen terminen oikosulkuvirta I_{th}

Laitteiden ja kojeistojen vikakestoisuudelle ilmoitetaan IEC-standardin 60851-1 mukainen terminen kestovirta I_{th}, joka on suurin oikosulkuvirran tehollisarvo, jonka koje kestää määritellyn ajan ilman, että lämpenemiselle asetetut raja-arvot ylittyvät. Määriteltynä aikana käytetään yleensä yhtä sekuntia, joskin erityistapauksissa aika voi olla pitempikin, esimerkiksi kolme sekuntia.

Yleensä suojalaitteet kuitenkin erottavat vian verkosta tätä nopeammin ja vikavirran termiset rasituksetkin eroavat määritellystä ajasta. Tiettyä aikaa vastaava terminen ekvivalenttinen oikosulkuvirta voidaan laskea alkuoikosulkuvirrasta I_k'' yhtälöllä

$$I_{\text{th}} = I_k'' \sqrt{(m + n)} \tag{3.5}$$

missä termi *m* kuvaa vaimenevaa tasasähköosaa ja *n* kuvaa vaimenevan vaihtovirtaosan vaikutusta. Ne voidaan lukea vian erottamisen vaatiman ajan t_k, resistanssin ja reaktanssin välisen suhteen R/X sekä alkuoikosulkuvirran ja pysyvän oikosulkuvirran suhteen I_k''/I_k perusteella standardin IEC 60865 käyrästöstä ja taulukoista, joista on alla olevaan taulukkoon poimittu joitain arvoja. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Taulukko 3.1 Yhtälön 3.5 suureet *m* ja *n* oikosulun kestoajan t_k funktiona resistanssin ja reaktanssin suhteella $R/X = 0{,}04$ eri alkuoikosulkuvirran ja pysyvän oikosulkuvirran suhteilla suhteilla I_k''/I_k. (Elovaara & Haarla, 2011b)

t_k [s]	*m*	*n*			
	$R/X = 0{,}04$	$I_k''/I_k = 1{,}0$	$I_k''/I_k = 1{,}25$	$I_k''/I_k = 2{,}0$	$I_k''/I_k = 3{,}5$
0,1	0,770	0,988	0,969	0,908	0,798
0,2	0,422	0,979	0,944	0,841	0,677
0,5	0,170	0,961	0,892	0,720	0,500
1	0,085	0,948	0,846	0,620	0,380
2	0,043	0,945	0,799	0,519	0,276
5	0,017	0,958	0,736	0,393	0,172
10	0,0085	0,974	0,695	0,326	0,127

3.1.4 Oikosulkuvirran arvioiminen

Aiemmin mainittuja oikosulkuvirtojen suuruusluokkia voidaan arvioida Thevenin teoreemalla sijoittaen impedanssiarvoiksi eri muutostiloja vastaavat impedanssien arvot. Thevenin teoreemalla oikosulkuvirta *I* lasketaan yhtälöllä

$$I = \frac{cU_{\mathrm{v}}}{Z_{\mathrm{th}}+Z_{\mathrm{f}}} \tag{3.6}$$

missä *c* on sähkömotoristen voimien ja nimellisjännitteen eron huomioiva jännitekerroin, U_{v} on vikapaikan vaihejännite ennen vikaa, Z_{f} vikaimpedanssi ja Z_{th} verkon Thevenin impedanssi vikapaikasta katsottuna (Huotari & Partanen, 1998).

Jännitekertoimen arvo riippuu laskettavasta oikosulkuvirrasta ja tarkasteltavasta jännitetasosta. Kertoimen arvoja eri tilanteissa on koottu taulukkoon 3.2.

Taulukko 3.2 Jännitekerroin *c* eri tilanteissa. (Huotari & Partanen, 1998)

Nimellisjännite U_{n}	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa
Pienjännite		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1–35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 3–230 kV	1,10	1,00

Thevenin impedanssi lasketaan verkkokomponenttien impedanssien perusteella. Se muodostuu vikapaikkaan vikavirtaa syöttävien jännitelähteiden ja vikapaikan välisten komponenttien impedanssien sarjaankytkennöistä, jotka ovat keskenään rinnan. Tämän rinnankytkennän impedanssi kuvaa vikapaikassa näkyvää impedanssia symmetrisessä viassa. Laskentaan tarvittavien yksittäisten komponenttien impedanssit on laskettava laitteen tyyppikilvessä ilmoitetuista arvoista tai tarkistettava valmistajan dokumentaatiosta. Tyypillisimpien komponenttien impedanssien laskemiseen tarvittavat yhtälöt on koottu seuraaville sivuille.

Syöttävän verkon impedanssi

Syötävän verkon impedanssi lasketaan verkon ominaisoikosulkutehoon tai oikosulkuvirtaan pohjautuen. Näiden perusteella impedanssi lasketaan yhtälöllä

$$Z_v = \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{k}}} = \frac{U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}I_{\mathrm{k}}}, \tag{3.7}$$

missä U_{n} on verkon nimellisjännite, S_{k} verkon ominaisoikosulkuteho ja I_{k} verkon syöttämä oikosulkuvirta.

Kaksikäämimuuntajat ja kuristimet

Muuntajien oikosulkuimpedanssi Z_k, oikosulkuresistanssi R_k ja oikosulkureaktanssi X_k voidaan laskea muuntajan tyyppikilvessä ilmoitetuista arvoista yhtälöillä

$$Z_k = u_k \frac{U_n^2}{S_n} \tag{3.8}$$

$$R_k = u_r \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3I_n^2} \tag{3.9}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \tag{3.10}$$

missä u_k on suhteellinen oikosulkujännite, U_n nimellisjännite, S_n nimellisnäennäisteho, u_r resistiivinen oikosulkujännite, P_{kn} kuormitushäviöt ja I_n nimellisvirta. (ABB, 2000)

Kuristimen oikosulkuimpedanssi Z_k voidaan laskea yhtälöstä

$$Z_k = \frac{u_h}{100\%} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{u_h}{100\%} \frac{U_n^2}{S_n} \tag{3.11}$$

missä u_h on kuristimen nimellinen jännitteenalenema. (ABB, 2000)

Pyörivät koneet

Pyörivien koneiden impedanssi muuttuu oikosulun aikana, ja siksi näiden impedanssi on valittava laskettavan oikosulkuvirran mukaan.

Alkuoikosulkuvirtaa I_k'' laskettaessa huomioidaan epätahtikoneiden reaktanssina alkureaktanssi *X''* ja tahtikoneiden reaktanssina pitkittäiset alkureaktanssit X_d'', jos koneessa on vaimennuskäämitys. Jos tahtikoneessa ei ole vaimennuskäämityksiä, käyttäytyy kone oikosulun alusta alkaen muutostilan mukaisesti eli X_d''= X_d'. (Elovaara & Laiho, 2007; Elovaara & Haarla, 2011a)

Muutosoikosulkuvirtaa I_k' laskettaessa käytetään epätahti- ja tahtikoneiden reaktansseina niiden muutosreaktansseja *X*'. Pysyvän tilan oikosulkuvirtaa laskettaessa tarvitsee huomioida vain tahtikoneiden reaktanssit, joina käytetään pitkittäisiä tahtireaktansseja X_d. (Elovaara & Laiho, 2007; Elovaara & Haarla, 2011a)

Edellä mainitut reaktanssit ilmaistaan tyypillisesti tahtimoottoreiden tiedoissa suhteellisarvoina, jotka voidaan muuntaa ohmeiksi yhtälöllä

$$X_{\mathrm{k}} = x\frac{U_{\mathrm{n}}^2}{S_{\mathrm{n}}}, \tag{3.12}$$

missä X_{k} on oikosulkureaktanssi ohmeina ja x suhteellinen reaktanssi.

Epätahtimoottoreiden oikosulkuimpedanssi lasketaan yhtälöllä

$$Z_{\mathrm{k}}'' = \frac{U_{\mathrm{n}}^2}{\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{n}}}S_{\mathrm{n}}} = \frac{U_{\mathrm{n}}}{\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{n}}}\sqrt{3}I_{\mathrm{n}}} = \frac{U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}I_{\mathrm{s}}}, \tag{3.13}$$

missä I_{s} on moottorin käynnistysvirta (ABB, 2000). Tyypillisesti käynnistysvirta on 4–8-kertainen moottorin nimellisvirtaan nähden (Hietalahti, 2013). Pienjännitemoottoreilla impedanssi voidaan edelleen jakaa resistanssiin ja reaktanssiin olettaen, että $R_{\mathrm{k}}/X_{\mathrm{k}}$ = 0,42 ja X_{k} = 0,922 Z_{k} (ABB, 2000).

Teollisuusverkon kuormituksesta suurin osa koostuu pienjännitteisistä epätahtimoottoreista, jotka ovat yksittäistehoiltaan pieniä, mutta moottoreiden yhteenlaskettu teho on laitoksen oikosulkutarkasteluissa merkittävä. Näitä moottoreita ei tarvitse käsitellä laskennassa yksitellen, vaan ne voidaan yhdistää sopivissa ryhmissä ekvivalenttiseksi moottoriksi. Ekvivalenttisen moottorin nimellisteho on moottoriryhmän moottoreiden nimellistehojen summa, ja käynnistysvirta on 5-kertainen moottoriryhmän nimellisvirtaan nähden (ABB, 2000). Näillä oletuksilla ekvivalenttisen moottorin oikosulkuimpedanssi voidaan laskea yhtälöllä 3.13.

3.2 Epäsymmetriset vikatilanteet

Kolmivaiheisen oikosulun lisäksi verkossa ilmenee monia vikatilanteita, joissa eri vaiheiden vikavirrat ja jännitteet eroavat toisistaan. Tällaisia vikatilanteita sanotaan epäsymmetrisiksi vioiksi. Tyypillisiä epäsymmetrisiä vikoja ovat 1-vaiheinen oikosulku eli maasulku ja kaksivaiheinen maaoikosulku (Elovaara & Haarla, 2011a). Epäsymmetristen virtojen ja jännitteiden vuoksi näiden vikatilanteiden analysoimiseen ei voida käyttää yhtä yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan jokaista vaihetta on käsiteltävä erikseen, jolloin ratkaistavien yhtälöiden määrä kasvaa 3-kertaiseksi (Elovaara & Haarla, 2011a).

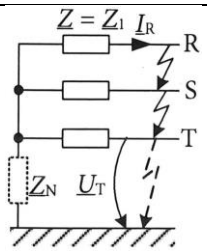
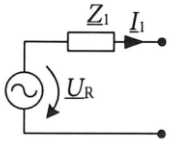
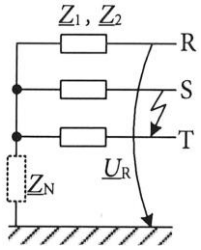
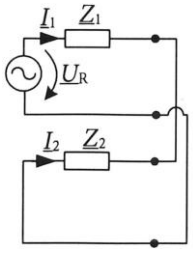
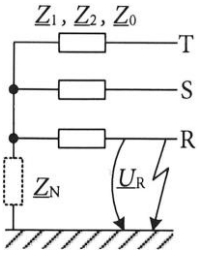
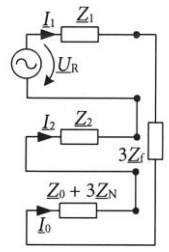
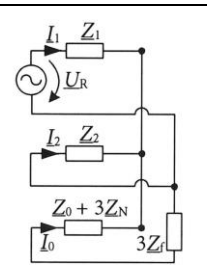
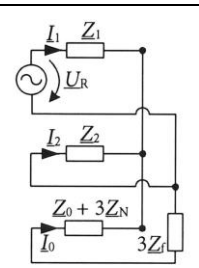
Epäsymmetristen vikatilanteiden laskemista voidaan yksinkertaistaa valitsemalla ratkaistaviksi suureiksi symmetriset komponentit yksittäisten vaihesuureiden sijaan. Symmetrisillä komponenteilla käsiteltävä verkko jaetaan kolmeen itsenäiseen symmetriseen järjestelmään:

nolla-, myötä- ja vastajärjestelmään. Näitä käyttämällä kaikkien kolmen vaiheen epäsymmetriset vaihejännitteet voidaan esittää yhdellä osoittimella kussakin symmetrisessä järjestelmässä. (Elovaara & Haarla, 2011a)

Jokainen symmetrisen järjestelmän jännitekomponentti synnyttää itsenäisesti virtakomponenttinsa Ohmin lain mukaan. Tätä ominaisuutta hyödyntämällä voidaan epäsymmetristen vikatilanteiden vikavirrat laskea, kun eri komponenttien vikatilanteessa kohtaamat impedanssit ja vikapaikan vikaa edeltäneet jännitteet tunnetaan. (Elovaara & Haarla, 2011a)

Taulukkoon 3.3 on koottu yleisimpiä vikatilanteita vastaavat myötä-, vasta- ja nollaverkon väliset kytkennät sekä niitä vastaavat vaihevirtojen ja -jännitteiden yhtälöt.

Taulukko 3.3 Tavallisimpien vikatilanteiden laskeminen myötä- (Z_1), vasta- (Z_2) ja nollaverkon impedanssien (Z_0) ja vikaa edeltävien vaihejännitteiden perusteella. Huomaa, että yhtälöissä $Z_{0N} = Z_0+3Z_N$ ja $a = 1 \angle 120°$. (Muokattu lähteestä: Elovaara & Haarla, 2011a)

Vikatapaus	Verkkojen kytkeytyminen	Virtojen yhtälöt	Jännitteiden yhtälöt
		$\underline{I}_R = \frac{\underline{E}_R}{\underline{Z}_1}$ $\underline{I}_S = \underline{a}^2\,\underline{I}_R$ $\underline{I}_T = \underline{a}\underline{I}_R$ $\underline{I}_0 = 0$	$\underline{U}_R = 0$ $U_S = 0$ $\underline{U}_T = 0$ $\underline{U}_0 = 0$
		$\underline{I}_R = 0$ $\underline{I}_S = \frac{-j\sqrt{3\underline{E}_R}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ $\underline{I}_T = -\underline{I}_S$ $\underline{I}_0 = 0$	$\underline{U}_R = \frac{2\underline{Z}_2\underline{E}_R}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ $U_S = -0{,}5 \cdot \underline{U}_R$ $\underline{U}_T = U_S$ $\underline{U}_0 = 0$
		$\underline{I}_R = \frac{3\underline{E}_R}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}}$ $\underline{I}_S = 0$ $\underline{I}_T = 0$ $\underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_R}{3}$	$\underline{U}_R = 0$ $U_S = \frac{j\sqrt{3}(-\underline{Z}_2 + \underline{a}\,\underline{Z}_{0N})\underline{E}_R}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}}$ $U_T = \frac{j\sqrt{3}(\underline{Z}_2 - \underline{a}^2\,\underline{Z}_{0N})\underline{E}_R}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}}$ $\underline{U}_0 = \frac{\underline{Z}_{0N}\underline{E}_R}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}}$
		$\underline{I}_R = 0$ $\underline{I}_S = \frac{j\sqrt{3}(\underline{a}\underline{Z}_2 - \underline{Z}_{0N})\underline{E}_R}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}) + \underline{Z}_2\underline{Z}_{0N}}$ $\underline{I}_T = \frac{j\sqrt{3}(-\underline{a}^2\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N})\underline{E}_R}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}) + \underline{Z}_2\underline{Z}_{0N}}$ $\underline{I}_0 = \frac{-\underline{Z}_2\underline{E}_R}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}) + \underline{Z}_2\underline{Z}_{0N}}$	$\underline{U}_R = \frac{3\,\underline{Z}_2\,\underline{Z}_{0N}\underline{E}_R}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{0N}) + \underline{Z}_2\underline{Z}_{0N}}$ $U_S = 0$ $U_I = 0$ $\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_R}{3}$

3.2.1 Myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssit

Taulukon 3.3 toisessa sarakkeessa ilmenevät myötäverkon (Z_1), vastaverkon (Z_2) ja nollaverkon (Z_0) impedanssien väliset kytkennät eri vikatilanteissa. Näistä impedansseista jokainen on määritettävä verkon komponenttien impedanssien perusteella samaan tapaan kuin Thevenin impedanssi 3 vaiheisen oikosulkuvirran yhteydessä. Yksittäisen komponentin myötä-, vasta ja nollaimpedanssit voivat kuitenkin erota toisistaan ja nollaverkko kattaa vain osan verkosta. Seuraavaksi on käyty läpi joitain yleisiä pääsääntöjä eri verkkojen impedanssien määrittämiseen.

Myötä- ja vastaverkon impedanssit ovat niitä impedansseja, jotka tarkastelupisteestä syötetty symmetrinen kolmivaihevirta kohtaa. Myötäjärjestelmän impedanssit ovat siis samoja, joita symmetrisen oikosulkuvirran yhteydessä käytetään. Myötäverkon yksivaiheisessa sijaiskytkennässä on mukana pyörivien koneiden synnyttämä sähkömotorinen voima jännitelähteenä, ja se kattaa koko verkon. (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

Vastajärjestelmän impedanssit poikkeavat myötäjärjestelmän arvoista vain, jos vaihejärjestys vaikuttaa impedanssin arvoihin. Johdoilla, muuntajilla ja ei-pyörivillä kojeilla vastaimpedanssit ovat yhtä suuria kuin myötäimpedanssit. Pyörivillä koneilla ja erityisesti tahtikoneilla vastaimpedanssit ovat 0–5 % suurempia kuin myötäreaktanssi, mutta avonapakoneilla voi vastareaktanssi olla jopa 200 % suurempi kuin myötäreaktanssi. Vastajärjestelmän sijaiskytkentään ei merkitä jännitelähteitä. Myös vastajärjestelmä kattaa koko verkon. (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

Nollajärjestelmä poikkeaa vasta- ja myötäjärjestelmästä, koska nollajännite on saman vaiheinen kaikissa vaiheissa, jolloin nollajohtimessa kulkee kolminkertainen virta vaihejohtimiin nähden. Siksi nollaverkon yksivaiheisessa sijaiskytkennässä nollajohtimen impedanssi huomioidaan kolminkertaisena eli nollaimpedanssi Z_0 määräytyy yhtälön 3.14 mukaisesti.

$$Z_0 = Z_\mathrm{V} + 3Z_\mathrm{N}, \tag{3.14}$$

missä Z_V on vaihejohtimen impedanssi ja Z_N nollajohtimen impedanssi. (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

Nollaverkko ei kata koko verkkoa, vaan ehtona nollavirran esiintymiselle on virran paluureitti muuta kuin vaihejohtimia pitkin. Nollaimpedanssin suuruus riippuu tämän paluureitin

impedanssin suuruudesta, ja siksi se eroaa aina merkittävästi myötä- ja vastaverkon impedansseista. Joissain tapauksissa ei nollavirralla ole lainkaan paluutietä, ja nollaverkko katkeaa tähän pisteeseen eli nollaimpedanssi on ääretön. (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

Muuntajilla ja generaattoreilla nollaverkko sulkeutuu, jos muuntajalla on tähti- (Y) tai hakatähtikytkentäinen (Z) käämitys, jonka tähtipiste on maadoitettu. Jos käämitys on Y-kytkentäinen, on toisen käämityksen oltava kolmiokytkentäinen. Tällöin nollaverkko sulkeutuu maadoitetun käämityksen puoleisesta verkosta toisen puolen nollaverkon katketessa. Jos muuntajan molemmat käämitykset on kytketty tähteen ja maadoitettu, jatkuu nollaverkko muuntajan läpi. Muilla käämityksen kytkennöillä nollaverkko katkeaa. (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

Maadoitetun tähtikytkentäisen muuntajan nollaimpedanssi riippuu toisen käämin kytkennän lisäksi muuntajan magneettipiirin rakenteesta. Taulukkoon 3.4 on koottu ohjeellisia arvoja eri muuntajatyyppien nollaimpedansseille.

Taulukko 3.4 Muuntajan nollaimpedanssien ohjeellisia arvoja (Missaghi & Pyrhönen, 1983)

	X_0/X_1		
Muuntajan kytkentä	Y/Y	D/Y	Y/Z
Kolmipylväsmuuntaja	3–10	0,65–0,9	0,10–0,15
Viisipylväsmuuntaja	10–100	1	0,10–0,15
Kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta koottu kolmivaihemuuntaja	10–100	1	0,10–0,15

Symmetristen komponenttien teoriaa ei tässä yhteydessä käsitellä tarkemmin, mutta siihen voi perehtyä esimerkiksi tutustumalla lähteen (Elovaaran ja Haarla, 2012) lukuihin 4.3 ja 4.4 tai lähteeseen (Missaghi ja Pyrhönen, 1983).

4 TEOLLISUUDEN SÄHKÖVERKON SUOJAUS

Luotettava sähkönjakelu on yksi nyky-yhteiskunnan toiminnan perusteista. Sähköä käytetään kaikilla yhteiskunnan aloilla ja keskeytykset pysäyttävät useimpien alojen toiminnan. Luotettavuuden lisäksi sähkönjakelun on oltava turvallista, vaikka järjestelmä on jatkuvasti alttiina erilaisille häiriöille, kuten luonnonilmiöiden aiheuttamille vioille, laitevioille ja inhimillisille virheille. Näiden haasteiden edessä luotettavaan ja turvalliseen sähkönjakeluun tarvitaan sähköverkon suojausta, jolla irrotetaan vikaantuneita osia verkosta hallituissa ja ennalta suunnitelluissa osissa. Hallitulla irtikytkennällä mahdollistetaan tehonsiirron jatkuminen verkon terveissä osissa ja vikapaikassa aiheutuvien vahinkojen minimointi. Tämän toteuttamiseen vaaditaan verkon eri osien suojalaitteiden ja muiden komponenttien välistä koordinaatiota. Tässä luvussa käsitellään sähköverkon suojausta ja suojalaitteiden toimintaa sekä esitellään teollisuuden sähköverkossa yleisesti käytettyjä suojalaitteita.

4.1 Suojausjärjestelmän vaatimuksia

Suojausjärjestelmän tulisi olla nopea, herkkä, luotettava, käyttövarma, selektiivinen ja mahdollisimman yksinkertainen (Elovaara & Haarla, 2011b; Mörsky, 1992). Suojauksen nopeudella on oleellinen osa vahinkojen ehkäisyssä, sillä mitä nopeammin vika saadaan poistettua, sitä pienemmät ovat vikavirran aiheuttamat vahingot niin ihmisille kuin laitteille. Suojauksen riittävä herkkyys tarkoittaa sitä, että kaikissa verkon kytkentätilanteissa syntyneet viat havaitaan ja poistetaan kohtuullisessa ajassa. Suojauksen toimintanopeutta ja herkkyyttä säätämällä voidaan vaikuttaa suojalaitteiden väliseen selektiivisyyteen, kun suojalaitteen läheiset viat kytketään pois kaukaisempia nopeammin.

Suojauksen luotettavuudella tarkoitetaan suojauksen toimintavarmuutta ja käyttövarmuutta. Toimintavarmuudella tarkoitetaan sitä, että rele ei lähetä laukaisukäskyä, jos sen suojausalueella ei ole vikaa, ja käyttövarmuudella sitä, että rele toimii, kun sen suojausalueella on vika. Selektiivisyys on useisiin edellä mainittuihin termeihin liittyvä käsite, jolla tarkoitetaan sitä, että vain vikaantunut komponentti erotetaan muusta verkosta. Toiseksi selektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että kaikki verkon osat on suojattu jollain suojalaitteella. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Selektiivisyys jaetaan sen toteutustavan perusteella virta-, aika-, lukitus- ja energiaselektiivisyyteen.

4.1.1 Virtaselektiivisyys

Virtaselektiivisyydellä tarkoitetaan selektiivisyyden saavuttamista suojalaitteiden toiminta-virtoja porrastamalla. Tyypillisesti lähellä syöttöä tapahtuvissa vioissa vikavirrat ovat suuria ja pienenevät mitä kauempana syötöstä vika sattuu. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää asettelemalla syötön suojalaite riittävän epäherkäksi, jolloin se ei havahdu kaukana syötöstä tapahtuvassa viassa.

4.1.2 Aikaselektiivisyys

Aikaselektiivisyydellä tarkoitetaan sarjassa olevien suojien toiminta-aikojen porrastamista toisiinsa nähden siten, että kauempana kuormituksesta olevat suojat toimivat lähellä kuormitusta olevia hitaammin. Tällöin kuormituksen luona sattuvassa viassa lähin suojalaite toimii poistaen vian ennen kuin kauemman suojalaitteen hidastus on kulunut. Kauempi suojalaite havaitsee vian poistumisen ja palautuu.

4.1.3 Lukitukset

Lukituksia käytetään aikaselektiivisyyden apuna lyhentämään suojien välillä tarvittavan aikahidastuksen suuruutta. Lukituksissa vian kuormanpuoleinen suojalaite lukitsee kauemman suojalaitteen toiminnan.

Havahtuessaan suojarele lähettää ylemmän portaan suojareleelle lukituskomennon pysyä kiinni tai hidastaa toimintaansa ja tarkistaa, onko se itse saanut lukituskomentoa. Jos rele ei itse vastaanota lukituskomentoa, se toimii siihen asetellun aikahidastuksen kuluttua ja avaa katkaisijan. Kaikkien suojareleiden on siis oltava hidastettuja, mutta peräkkäiset portaat voivat olla samalla aikahidastuksella.

Lukitusselektiivisyyden etuna on ylempien suojausportaiden nopea toiminta pelkästään aikaselektiiviseen suojaukseen nähden ja lukituksilla aikaansaatava erottelukyky ainoastaan vikapaikkaa lähimmän katkaisijan toimiessa. Ylemmän portaan suojat toimivat myös varasuojana alemman portaan suojien vioille, kun lukituksella vain hidastetaan ylemmän portaan suojien toimintaa. Haittoina ovat lukitussignaalin välityksen vaatimien tietoliikenneyhteyksien kustannukset.

4.1.4 Energiaselektiivisyys

Energiaselektiivisyys on pienjännitesuojalaitteiden yhteydessä käytetty termi, jolla vertaillaan virtaa rajoittavia suojalaitteita keskenään. Suurilla oikosulkuvirroilla pienjännitesulakkeet ja kompaktikatkaisijat katkaisevat oikosulun, ennen kuin se ehtii saavuttaa huippuarvonsa. Katkaisutapahtuma on siis hyvin nopea (< 10 ms), minkä vuoksi laitteiden toiminta-aikojen vertailu on hyvin haastavaa, ellei mahdotonta.

Näitä laitteita vertaillaan katkaisutapahtuman aikana kuluvan energian perusteella I^2t-arvoilla. Alemman suojalaitteen toimiessaan läpipäästämän energian määrän on oltava pienempi kuin ylemmän suojalaitteen avautumiseen tarvittava energia määrä. Sulakkeilla tämä tarkoittaa kuvassa 4.9 esitettyä tarkastelua kokonais- ja sulamis-I^2t-arvojen välillä, eli sitä, että alemman sulakkeen kokonais-I^2t-arvon oltava suurempi kuin ylemmän sulakkeen sulamis-I^2t-arvon. Katkaisijoiden kesken sekä katkaisijoiden ja sulakkeiden välillä tällaiset tarkastelut ovat haastavampia, mutta mahdollisia luvussa 4.3.2 esitetyllä tavalla.

4.2 Relesuojaus

Keski- ja suurjännitteellä sähköverkon suojaus perustuu suojareleiden, mittamuuntajien ja katkaisijoiden muodostamaan kokonaisuuteen. Tämän suojausjärjestelmän tehtävänä on havaita viat tai epänormaalit olosuhteet voimajärjestelmässä, jotta ne saadaan loppumaan (Elovaara & Haarla, 2011b).

Vikojen tai epänormaalien olosuhteiden tarkkailu perustuu sähkövoimajärjestelmän suureiden tarkkailuun. Tarkkailtavana suureena on yleensä suure, joka muuttuu vian seurauksena, kuten virta ja jännite. Tarkkailtavan suureen muutoksen seurauksena suojarele havahtuu, toimii tai palautuu muutoksesta ja releen toiminta-arvoista riippuen. Releen toiminta-ajalla tarkoitetaan aikaa vian alkamisesta hälytykseen tai laukaisuun, ja sitä voidaan haluttaessa pidentää asettamalla releelle hidastus. Palautumisajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu mittaussuureen pienenemisestä releen asettelualueelle siihen, kunnes rele palautuu. Erotusajalla tarkoitetaan aikaväliä vian alkamisen ja vikapaikan verkosta erottamisen välillä. (Elovaara & Haarla, 2011b)

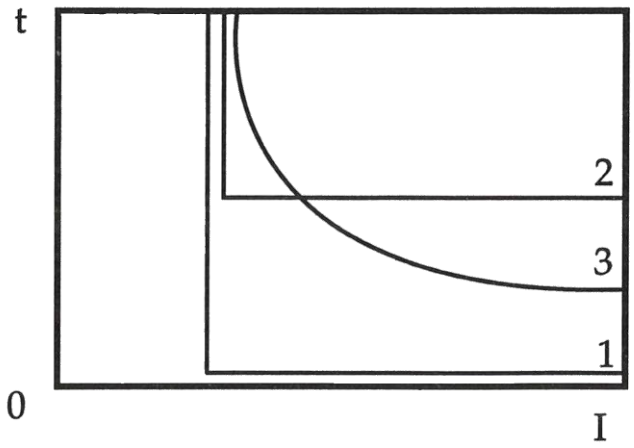
4.2.1 Ylivirtareleet

Ylivirtareleet ovat yleisimpiä releitä säteittäisesti syötettyjen verkkojen suojauksessa. Niitä käytetään moottoreiden, jakelumuuntajien ja johtojen suojina. Ylivirtareleiden toiminta perustuu kuormitus- ja oikosulkuvirran suuruusluokkaeroon. Oikosulkuvirta on suurempi kuin kuormitusvirta, minkä perusteella releet havaitsevat vikatilanteen.

Ylivirtarele toimii, kun virta ylittää sille asetetun arvon eli asetteluarvon. Ylivirtareleet jaetaan toimintansa perusteella seuraaviin ryhmiin:

- hetkellinen ylivirtarele (käyrä 1)
- vakioaikaylivirtarele (käyrä 2)
- käänteisaikaylivirtarele (käyrä 3)
- lämpörele. (Mörsky, 1992)

Eri ylivirtareleiden toimintakarakteristikoiden eroja on kuvattu kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Ylivirtareleiden toiminta-aikoja virran funktiona. 1 hetkellinen ylivirtarele, 2 vakioaikaylivirtarele ja 3 käänteisaikaylivirtarele. (Mörsky, 1992)

Käyrän 1 esittämä hetkellinen ylivirtarele toimii ilman lisäviivettä, kun sen havaitsema virta ylittää releeseen asetellun asetteluarvon. (Mörsky, 1992)

Käyrän 2 esittämän vakioaikaylivirtareleen toimintaa on hidastettu erikseen aseteltavan ajan verran. Kun releen havaitsema virta ylittää releeseen asetellun arvon, toimii rele asetellun aikahidastuksen kuluttua. Rele palautuu, jos virta alittaa asetteluarvon riittävästi hidastuksen aikana. Nimitys ”vakioaika” viittaa toiminta-ajan riippumattomuuteen ylivirran suuruudesta. (Mörsky, 1992)

Käyrän 3 esittämän käänteisaikaylivirtareleen toiminta-aika riippuu virran ylityksen suuruudesta. Rele toimii sitä nopeammin, mitä enemmän virta ylittää asetteluarvon. Virran lisäksi käänteisaikaylivirtareleiden toimintakäyrän jyrkkyys voidaan asetella. (Mörsky, 1992)

Käänteisaikaylivirtareleiden toimintakäyriä on määritetty esimerkiksi standardissa IEC 60255-3, jonka mukaisten käyrien toiminta-aika t_{TRIP} voidaan laskea yhtälöllä

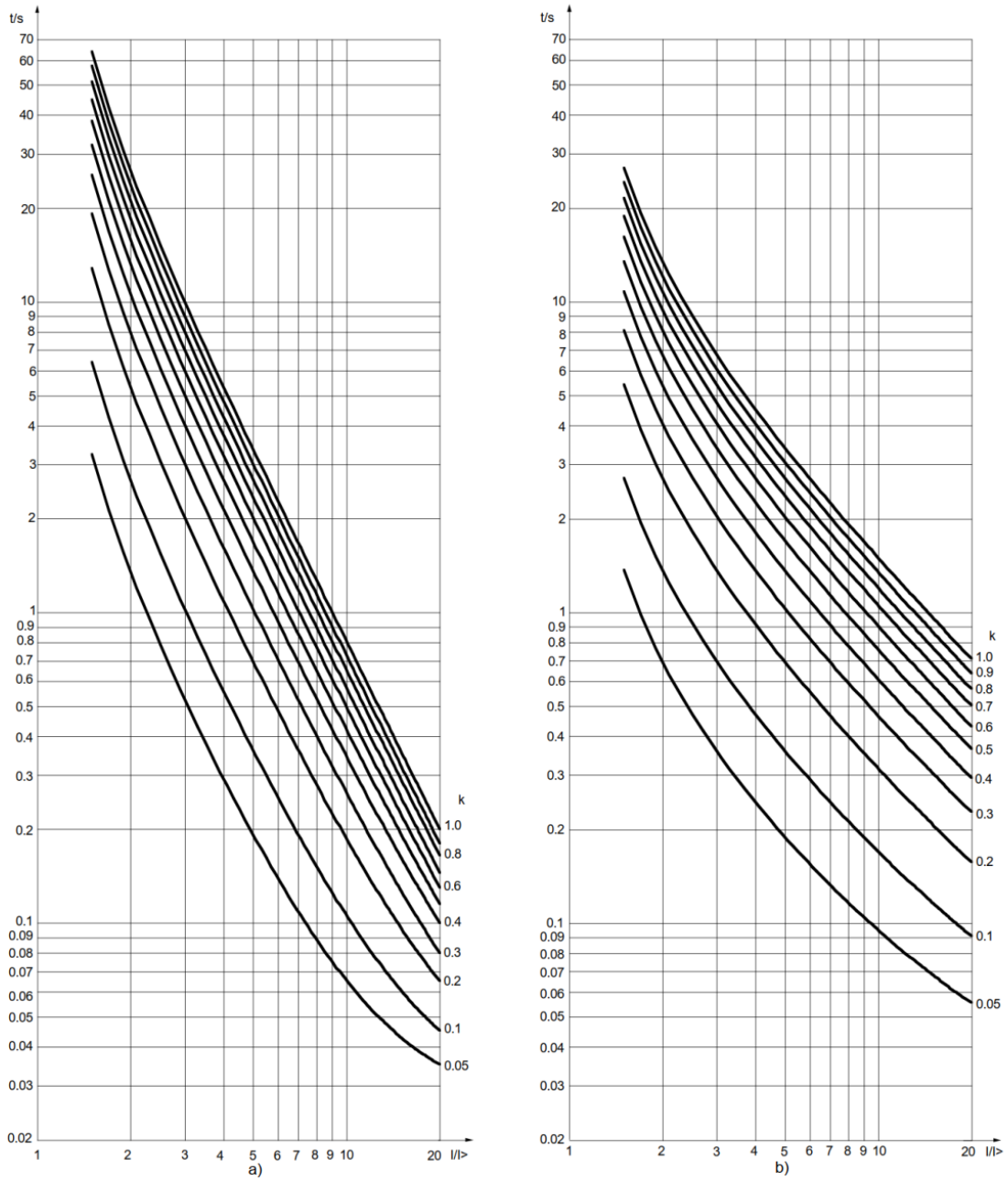
$$t_{\mathrm{TRIP}} = \frac{\mathrm{A \cdot k}}{\left(\frac{I}{I>}\right)^{\mathrm{p}}} \tag{4.1}$$

missä *I* on vikavirta, *I*> releen virran asetteluarvo ja A ja p ovat taulukossa 4.1 näkyviä kertoimia, jotka vaikuttavat laukaisukäyrän jyrkkyyteen. Parametrilla k valitaan käyrän laukaisuaika. Kuvassa 4.2 on havainnollistettu parametrin k vaikutusta laukaisuaikaan ja parametrien A ja p vaikutusta käyrän jyrkkyyteen. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Taulukko 4.1 Standardin IEC 60255 mukaisten käänteisaikaylivirtareleiden laukaisukäyrien parametrit yhtälöön 4.1. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Käyrän tyyppi	Parametri A	Parametri p
Normal	0,14	0,02
Very inverse	13,5	1
Extremely inverse	80	2
Longtime inverse	120	1

Seuraavan sivun kuvaan 4.2 on piirretty very inverse ja extremely inverse -laukaisukäyrät, joista ilmenee parametrien eri käyrien jyrkkyyksien erot ja aseteltavan kertoimen k vaikutus.



Kuva 4.2 Käänteisaikaylivirtareleen laukaisukäyrät a) extremely inverse b) very inverse. (ABB, 2002)

Kuvasta 4.2 havaitaan extremely inverse -käyrän toimivan pienillä vikavirroilla very inverse -käyrää hitaammin ja suurilla vikavirroilla tätä nopeammin samalla kertoimen k asettelulla. Extremely inverse -käyrää voidaankin kuvata very inverse -käyrää jyrkemmäksi. Asettelemalla kerrointa k voidaan toiminta-aikaa hidastaa koko virta-alueella vaikuttamatta kuitenkaan käyrän jyrkkyyteen eli siirtää käyrää ajan suhteen virta, aika -tasossa.

4.2.2 Ylivirtareleen käyttökohteita

Kotimaisissa jakeluverkoissa oikosulkusuojaus on yleensä toteutettu kaksiportaisena ja vakioaikaisena. Ensimmäisenä suojausportaana käytetään hidastamatonta ylivirtalaukaisua ja toisena portaana vakioaikaylivirtalaukaisua. Tällöin hidastamaton porras rajoittaa oikosulkuvirtojen vaikutuksia suurivirtaisissa vikatilanteissa toisen portaan toimiessa aikaselektiivisesti pienempivirtaisissa vioissa. Viiveettömällä laukaisulla lyhennetään myös oikosulun muille johtolähdöille aiheuttaman jännitteenaleneman kestoaikaa. (Lakervi & Partanen, 2009)

Myös teollisuuden jakeluverkkojen suojauksessa ylivirtareleet ovat keskeisessä osassa ja myös käänteisaikatoiminnalle on käyttökohteensa. Oleellisena erona jakeluverkkojen suojaukseen ovat lyhyet johtopituudet ja suuret jakelumuuntajien nimellistehot, jolloin oikosulkuvirran erot keski- ja pienjänniteverkon välillä jäävät julkisia jakeluverkkoja pienemmiksi. Pienen virtaeron vuoksi on keski- ja pienjänniteverkon välisessä selektiivisyydessä turvauduttava aikaselektiivisyyteen tai lukituksiin erityisesti ylivirtasuojan alemman portaan osalla.

Ylivirtasuojan ylempi porras asetellaan toimimaan vain muuntajan yläjännitepuolen suurivirtaisissa vioissa, ja alemmalla portaalla suojataan muuntajan alajännitepuoli (Willmann 2021). Alemman portaan ja alajännitepuolen välinen selektiivisyys toteutetaan joko hidastamalla alemman portaan toiminta alajännitepuolen suojausta hitaammaksi tai tuomalla sille lukitus alajännitepuolen suojalta. Alajännitepuolen suojien toiminta on useimmiten käänteisaikaylivirtatyyppistä, minkä vuoksi yläjännitepuolen suojan alemman portaan asetteleminen käänteisaikatoimintaiseksi on edullista, jos selektiivisyys toteutetaan yläjännitepuolen suojan toimintaa hidastamalla. Molempien suojien käänteisaikatoiminta mahdollistaa yhtä suuren porrasajan suojien välillä koko virta-alueella, kun taas käänteis- ja vakioaikaisten suojien välinen porrasaika kasvaa virran pienentyessä.

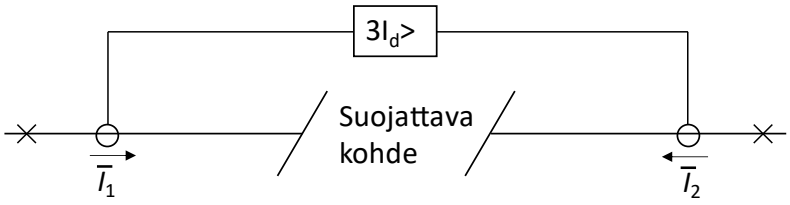
4.2.3 Differentiaalirele

Differentiaalireleet vertailevat molemmin puolin suojattavaa kohdetta mittaamiaan suureita, kuten tulevia ja lähteviä virtoja. Vikatilanteessa kohteeseen tulevat ja sieltä lähtevät virrat eroavat toisistaan, minkä rele havaitsee. Rele toimii tämän erosuureen ylittäessä asetteluarvon. Oikein asetellun differentiaalisuojan etuna on sen nopea toiminta ja absoluuttinen selektiivisyys. Sen toiminta-aika on vain muutamia millisekunteja, ja se havaitsee viat vain

niiden virtamuuntajien välillä, joiden virtoja se vertailee. Näin ollen differentiaalirele ei pysty toimimaan varasuojana muille alueille ja tarvitsee itselleen varasuojan. (Elovaara & Haarla, 2011b; Mörsky, 1992)

Differentiaalireleen toimintaa haittaavat virtamuuntajien virheet ja käämikytkimien muuttuvat asennot. Sen vuoksi tulevat ja lähtevät virrat eroavat toisistaan myös normaalissa käyttötilanteessa. Nämä virtamuuntajien virheistä ja käämikytkimen asennoista aiheutuvat virheet ovat suurilla kuormitusvirroilla suurempia kuin pienillä. Differentiaalireleiden toimintaa on vakavoitu virhetoiminnan estämiseksi. Vakavoinnin vuoksi releen toimintaan vaadittava erovirta on isoilla kuormitusvirroilla suurempi kuin pienillä. (Elovaara & Haarla, 2011b)

Käytännössä numeerisissa releissä ero- ja vakavointivirrat muodostetaan laskennallisesti ja releen asettelu on jokin käyrä vakavointivirta, erovirta -tasossa. Rele mittaa suojattavaan kohteeseen tulevia ja siitä lähteviä virtoja kuvassa 4.3 ilmenevillä suunnilla.



Kuva 4.3 Numeerisen differentiaalireleen mittausperiaate. (Lähdettä ABB 2010 mukaillen)

Rele laskee erovirtaa I_d-mittausten perusteella ja toimii erovirran ylittäessä vakavointivirrasta riippuvan funktion $f(I_S)$ arvon:

$$I_d = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2| > f(I_s) \quad (4.2)$$

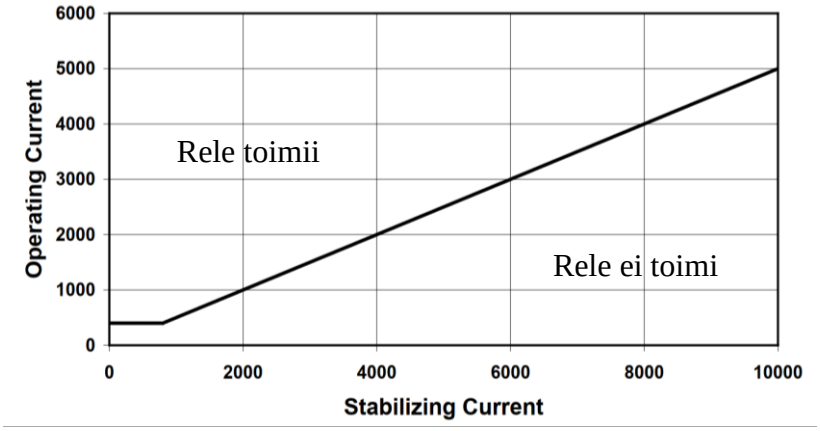
missä I_1 on suojattavaan kohteeseen tuleva virta ja I_2 siitä lähtevä virta kompleksilukuna, ja vakavointivirta I_S lasketaan yhtälöllä

$$I_s = |\bar{I}_1| + |\bar{I}_2|. \quad (4.3)$$

Numeerisissa releissä funktiolle $f(I_s)$ voidaan valita useita vaihtoehtoja, kuten esimerkiksi

$$f(I_s) = \max(I_t, k \cdot I_s), \quad (4.4)$$

missä I_t on pienin toimintavirta ja k on toimintasuhde. Kuvassa 4.3 on esitetty näiden yhtälöiden muodostama toimintakarakteristika vakavointivirta, erovirta -tasossa. (ABB, 2010)



Kuva 4.4 Yhtälön 4.4 mukainen differentiaalireleen toimintakarakteristika vakavointivirta (Operating current), erovirta (Stabilizing current) -tasossa. Rele toimii erovirran ylittäessä kuvan käyrän arvon. (ABB, 2010)

Kuvan 4.4 käyrä esittää erään differentiaalireleen toimintakarakteristikaa vakavointi- ja erovirtatasossa. Rele laskee mittaamiensa vaihevirtojen perusteella vakavointi- ja erovirtaa. Rele toimii, kun tämä laskutulos ylittää kuvaan piirretyn käyrän.

4.3 Pienjännitesuojalaitteet

Pienjännitteellä suojausjärjestelmät eroavat rakenteeltaan keskijännitesuojauksesta, mutta niiden tarkoitus on yhä havaita epänormaalit tilanteet ja viat. Suojausjärjestelmät ovat tyypillisesti korkeampia jännitetasoja yksinkertaisempia ja voivat koostua vain yksittäisestä varokkeesta tai katkaisijasta, johon on integroitu virtamuuntajat ja suojarelettä vastaava laukaisukojeisto. Teollisuusverkon lyhyiden johtopituuksien ja suurien siirtokapasiteettien vuoksi pienjänniteverkossa esiintyy suuria oikosulkuvirtoja, jotka näkyvät myös keskijännitekojeistojen suojareleille. Tämän vuoksi myös pienjänniteverkon suojalaitteiden tarkasteleminen on tarpeen selektiivisyyttä selvitettäessä. Tyypillisiä suojalaitteita pienjänniteverkossa ovat ilma- ja kompaktikatkaisijat sekä erilaiset varokkeet.

4.3.1 Pienjännitekatkaisijat

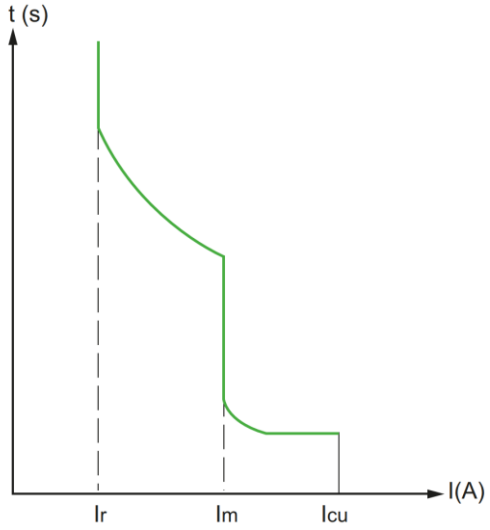
Teollisuuden pienjännitekeskusten suojauksessa käytetään ilma- ja kompaktikatkaisijoita keskusten ja suurien moottorilähtöjen suojauksessa. Ilmakatkaisijoita valmistetaan 0.8–10 kA:n virroille jännitelle 0,69–1 kV niiden katkaisukyvyn ollessa tyypillisesti 150 kA. Kompaktikatkaisijoita käytetään moottorien suojaukseen ja kuormaerottimina. Niitä valmistetaan 125–1 600 A:n virroille 230–690 V:n jännitteille. Joillain kompaktikatkaisijoilla on lisäksi oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus sulakkeiden tapaan. (Hietalahti, 2013)

Pienjännitekatkaisijoihin on yleensä integroitu laukaisulaite, joka laukaisee katkaisijan ylikuormitus- ja oikosulkutilanteissa suojareleen tapaan. Laukaisulaitteiden toiminta voi perustua bi-metalliliuskan taipumiseen ylikuormitusvirran takia ja magneettiseen laukaisuun oikosulkuvirralla tai ohjelmoitavaan elektroniikkaan.

Teollisuuskäyttöön tarkoitettujen pienjännitekytkinlaitteiden rakennetta ja toimintaa ohjaa standardi IEC 60947-2, jossa on määritelty ylivirtalaukaisukojeistojen toimintatavat ja tarkkuudet. Laukaisukojeistojen toiminta jaetaan erikseen ylikuormitus- ja oikosulkusuojaustoimintoihin. Niin ylikuormitus- kuin oikosulkusuojaus voi olla vakioaika- tai käänteisaikatoimintainen. Standardin mukaan vakioaikaisen ylikuormitussuojauksen on toimittava 10 prosentin sisällä asetteluvirrastaan. Käänteisaikaisen ylikuormitussuojan on toimittava 1,3-kertaisella asetteluvirrallaan, kun sitä on ensin kuormitettu 1,05-kertaisella asetteluvirralla kahden tunnin ajan. Oikosulkusuojauksen on toimittava 20 prosentin sisällä asetteluarvostaan molemmissa toimintatiloissa. (IEC 60947-2:2006)

Valmistajien pienjännitekatkaisijoiden käyttöohjeiden perusteella termomagneettisten laukaisukojeistojen tarkkuus vastaa edellä mainittuja standardin arvoja. Elektronisten laukaisukojeistojen toiminta on näitä arvoja tarkempaa osassa virta-aluetta, mutta alueen ääripäissä taataan vain standardin arvoja vastaava tarkkuus. Siksi pienjännitekatkaisijoiden toimintatarkkuuden nyrkkisääntönä voidaan pitää 10 %:a ylikuormitussuojan asetteluille ja 20 %:a oikosulkusuojan asetteluille. Erityisesti elektroniset laukaisulaitteet ovat ominaisuuksiltaan monipuolisia, ja niiden kohdalla nyrkkisääntöjen sijaan kannattaa tutustua valmistajan dokumentaatioon katkaisijaa aseteltaessa. Seuraavaksi on tarkasteltu esimerkinomaisesti erään valmistajan elektronisen ja termomagneettisen laukaisulaitteen eroja.

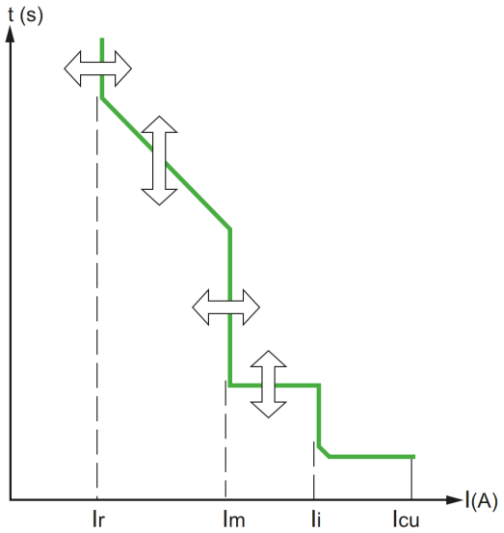
Termomagneettisten laukaisulaitteiden toimintavirrat ovat tyypillisesti aseteltavissa ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukselle erikseen. Laukaisulaitteiden aika-asettelut eivät ole aseteltavissa. Toimintakarakteristika on muodoltaan käänteisaikaylivirtareleen toimintakarakteristikaa muistuttava. Esimerkki termomagneettisen ylivirtareleen toimintakarakteristikasta on esitetty seuraavan sivun kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Termomagneettisella laukaisulaitteella varustetun kompaktikatkaisijan laukaisukäyrä. Kuvassa Ir on ylikuormitussuojan asetteluarvo, Im oikosulkusuojan asetteluarvo ja Icu katkaisijan katkaisukyky. (Schneider Electric, 2018)

Kuvaan 4.5 on merkitty ylikuormitussuojan asetteluarvo (Ir), oikosulkusuojan asetteluarvo (Im) sekä katkaisijan katkaisukyky (Icu). Asetteluarvot ilmaistaan tyypillisesti katkaisijan nimellisvirran I_n monikertoina. Esimerkiksi ABB:n valmistamien termomagneettisella laukaisulaitteella varustettujen kompaktikatkaisijoiden bi-metalliliuskaan perustuva ylikuormituslaukaisu voidaan asetella alueella 0,7–1 · I_n. ja magneettinen oikosulkulaukaisu alueella 5–10 · I_n.(ABB SACE, 2010).

Elektronisella laukaisulaitteella varustettujen katkaisijoiden asetteluarvot ovat termomagneettisia monipuolisempia. Esimerkki elektronisen laukaisukojeiston toimintakarakteristikasta on esitetty seuraavan sivun kuvassa 4.6.



Kuva 4.6 Elektronisella laukaisulaitteella varustetun katkaisijan toiminta-aikakäyrä. Ir on ylikuormitussuojan asetteluarvo, Im hidastetun oikosulkusuojauksen asetteluarvo, Ii hidastamattoman oikosulkusuojausportaan asetteluarvo ja Icu katkaisijan katkaisukyky (Schneider Electric, 2018).

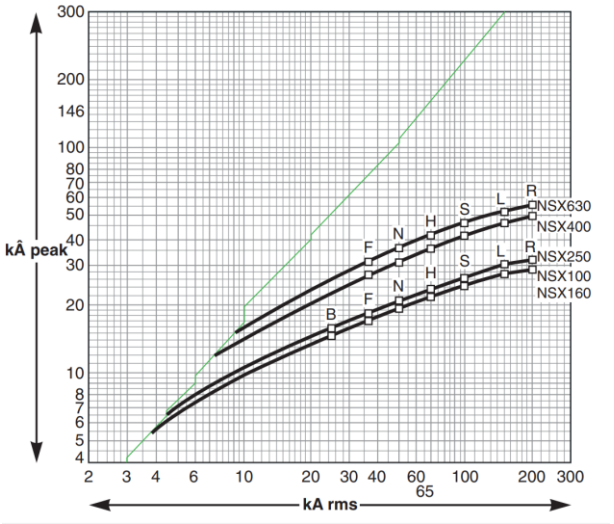
Kuvassa 4.6 näkyvään tapaan elektronisella laukaisulaitteella oikosulkusuojaus on usein kaksiportainen, joista ensimmäisen portaan toimintaa on hidastettu ja toisen toiminta on välitön. Ylikuormitusosan tyypillinen asettelualue on 0,4–1 · I_n. Oikosulkuosan ensimmäisen portaan asettelualue puolestaan on 1,5–10 · I_n ja välittömän portaan 12–15 · I_n (ABB SACE, 2010). Oikosulkusuojan hidastetun portaan virran lisäksi myös toiminta-aikaa voidaan asetella.

Katkaisijan oikosulkusuojausosan hidastusmahdollisuus riippuu laukaisukojeiston lisäksi katkaisijan rakenteesta. Jotta toimintaa voidaan hidastaa, on katkaisijan kestettävä oikosulkuvirtaa hidastuksen ajan. Rakenteensa osalta katkaisijat jaetaan kahteen selektiivisyyskategoriaan standardissa IEC 60947-2. Kategorian A katkaisijoiden oikosulkusuojaus toimii ilman hidastusta virran ylittäessä asetteluarvon. Kategorian B katkaisijoiden oikosulkusuojauksen toimintaa voidaan hidastaa, ja niille ilmoitetaan lyhytaikainen oikosulun mitoituskestovirta I_{cw}, jonka suuruisen virran katkaisija kestää hidastuksen ajan. Tyypillisesti ilmakatkaisijat (ACB) ja suurimmat kompaktikatkaisijat (MCCB) luokitellaan kategoriaan B pienempien kompaktikatkaisijoiden kuuluessa kategoriaan A. (Hietalahti, 2013; Takalo, 2021)

Kategorian B katkaisijat voidaan siis asetella aikaselektiivisesti niiden alapuolella olevien suojalaitteiden kanssa. Sen sijaan kategorian A katkaisijoita ei voida asetella aikaselektiivisesti niiden alapuolella olevien suojalaitteiden kanssa, vaan niillä on turvauduttava virta- ja

energiaselektiivisyyteen. Energiaselektiivisyyden toteamiseksi valmistajien kuvastoissa on ilmoitettu katkaisijoille I^2t-arvoja, joita voidaan verrata varokkeiden I^2t-arvojen tapaan.

Kategorian A katkaisijoiden hidastamattoman epäselektiivisen toiminnan etuna on suojauksen nopea toiminta ja oikosulkuvirran rajoituskyky. Katkaisija toimii jo oikosulkuvirran ensimmäisen puolijakson aikana katkaisten virran ennen kuin oikosulkuvirran huippuarvo ehditään saavuttaa. Katkaisijoiden virranrajoituskyky on ilmoitettu valmistajien luetteloissa samantapaisilla käyrillä kuin varokkeiden virran rajoituskyky ilmoitetaan.



Kuva 4.7 Esimerkki kompaktikatkaisijan virranrajoituskäyrästöstä. Kuvassa joidenkin Schneider Electricin valmistamien kompaktikatkaisijoiden virran rajoituskyky 400/440 V:n jännitteellä (Schneider Electric, 2018).

4.3.2 Sulakkeet

Sulakkeita käytetään yleisesti teollisuuden pienjännitekeskusten lähdöissä niiden edullisuuden, turvallisuuden, selektiivisyyden ja hyvän virranrajoituskyvyn vuoksi. Kahvasulakkeita valmistetaan eri käyttökohteisiin ja virrankatkaisualueille. Sulakkeen tyyppimerkinnässä ensimmäinen kirjan ilmaisee katkaisualueen ja toinen käyttökohteen taulukossa 4.2 esitetyllä tavalla. (Hietalahti, 2013)

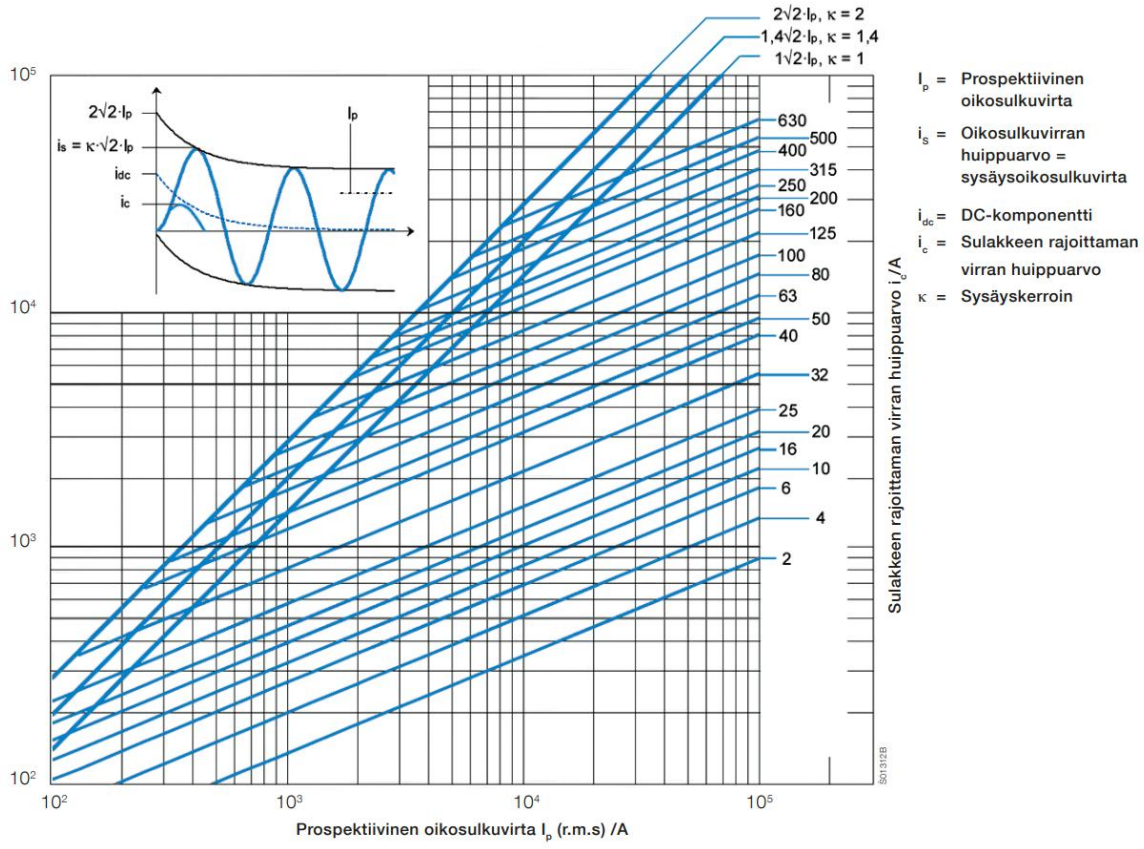
Taulukko 4.2 Kahvasulakkeiden tyyppimerkintöjen merkitykset. (Hietalahti, 2013)

Ensimmäinen kirjain	
g	koko alueen kattava katkaisukyky, soveltuu sekä oikosulku- että ylikuormitussuojaksi
a	osa-alueen kattava katkaisukyky, soveltuu vain oikosulkusuojaksi
Toinen kirjain	
G	johdon suojaukseen tarkoitettu sulake
M	moottorinsuojaukseen tarkoitettu sulake
Kirjainyhdistelmien selitykset	
gG	yleiskäyttöön tarkoitettu sulake, johdon oikosulku- ja ylikuormitussuojaukseen
aM	moottoripiirin suojaukseen soveltuva sulake, jonka katkaisukyky käsittää vain osan virta-alueesta. Soveltuu vain ylikuormitussuojaksi
gM	moottoripiirin suojaukseen soveltuva sulake, jonka katkaisukyky käsittää koko virta-alueen.

Yleisimmin käytettyjä sulakkeita ovat aM- ja gG-tyypin sulakkeet. Tyypin gG-sulakkeilla pystytään toteuttamaan sekä oikosulkusuojaus että kaapeleiden ylikuormitussuojaus. Ne sulavat viidessä sekunnissa noin 3,5-kertaisella nimellisvirrallaan. Tyypin aM-sulakkeilla saavutetaan vain oikosulkusuojaus, sillä sulake ei sula lainkaan alle nelinkertaisella nimellisvirralla. Niitä käytetään tyypillisesti moottoripiirien etukojeina yhdessä erillisen ylikuormitussuojan, kuten moottorinsuojareleen kanssa. (Hietalahti, 2013)

Sulakkeiden virranrajoituskyky

Sulakkeiden virranrajoituskyvyllä tarkoitetaan sulakkeiden kykyä rajoittaa oikosulkuvirran kasvua katkaisemalla oikosulkuvirta ennen kuin se saavuttaa huippuarvon. Sulakkeiden virranrajoituskyky perustuu sulakkeen valokaariresistanssin nopeaan kasvuun. Virranrajoituskäyristä voidaan lukea suurin virtahuippu, jonka sulake päästää läpi kytkentätapahtuman aikana tietyllä prospektiivisen oikosulkuvirran arvolla. (Hietalahti, 2013) Esimerkki virranrajoituskäyrästöstä on esitetty kuvassa 4.8.

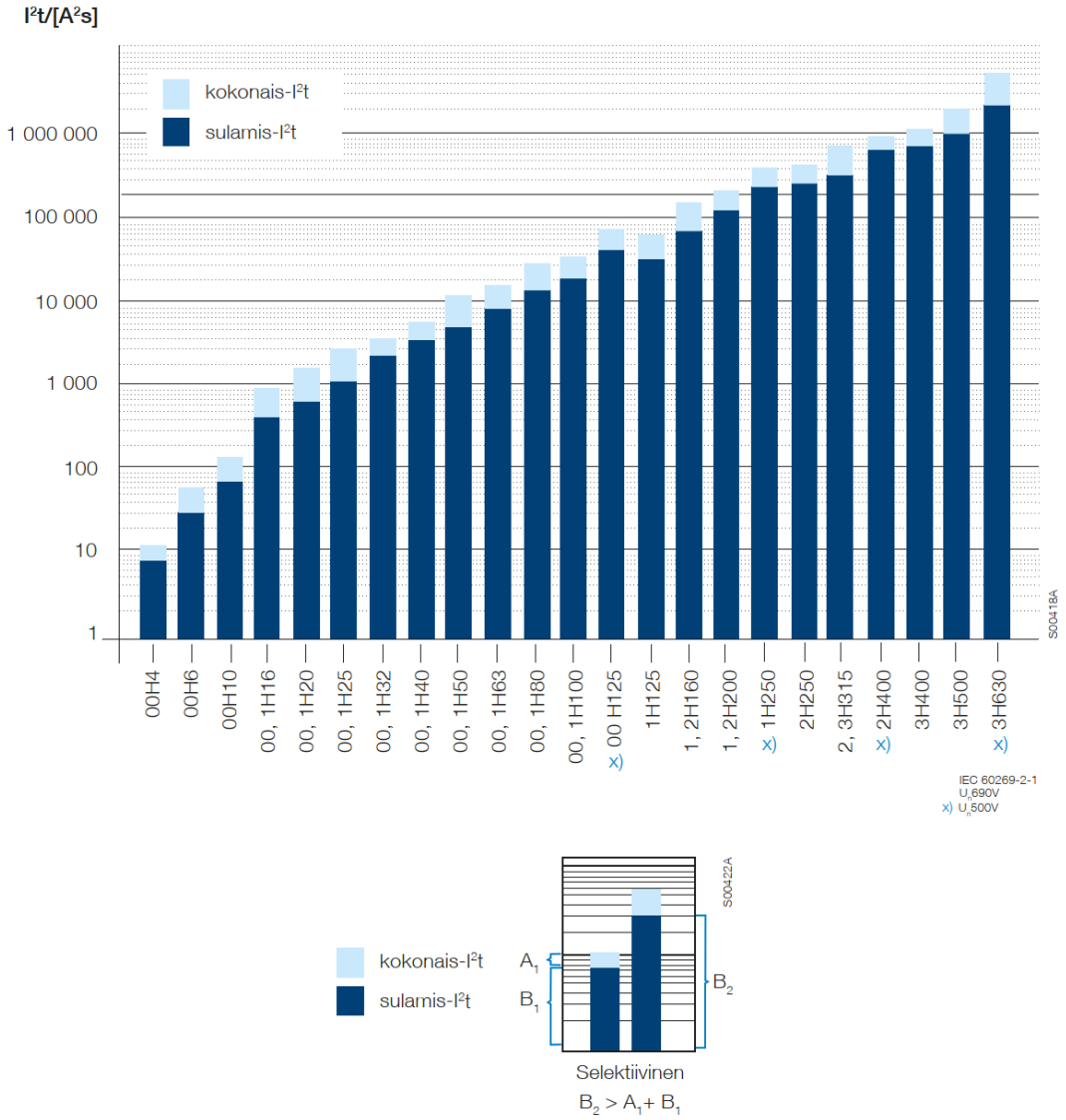


Kuva 4.8 Esimerkki kahvasulakkeen virranrajoituskäyristä. ABB:n OFAA_H_ ja OFAA_H_-H20, koot 00…3, jännite 690 V. (ABB, 2011)

Sulakkeiden välinen selektiivisyys

Sulakkeiden nopean toiminnan vuoksi ne eivät toimi aikaselektiivisesti oikosulkutilanteessa vaan niiden selektiivisyyttä on tarkasteltava virta- tai energiaselektiivisyyden perusteella. Useimmissa tapauksissa sulakkeet ovat selektiivisiä keskenään, kun sulakkeiden nimellisvirtojen suhde on vähintään 1:1,6. Täyden varmuuden saavuttamiseksi on tutkittava sulakkeiden I^2t-taulukoita. (ABB, 2011; Sähkötieto, 2018)

I^2t-taulukossa sulakkeelle ilmoitetaan sulamis- ja valokaari-I^2t-arvot, joiden summaa nimitetään kokonais-I^2t-arvoksi. Selektiivisen toiminnan varmistamiseksi syöttävän sulakkeen sulamis-I^2t-arvon on oltava suurempi kuin alemman sulakkeen kokonais-I^2t-arvo. Kuvassa 4.9 on esitetty kuvan 4.8 sulakkeiden I^2t-taulukko ja havainnollistettu sen tulkintaa. (ABB, 2011)



Kuva 4.9 Esimerkki I^2t -taulukosta ABB:n OFAA_H_ ja OFAA_H_-H20, koot 00…3, jännite 690 V. (ABB, 2011)

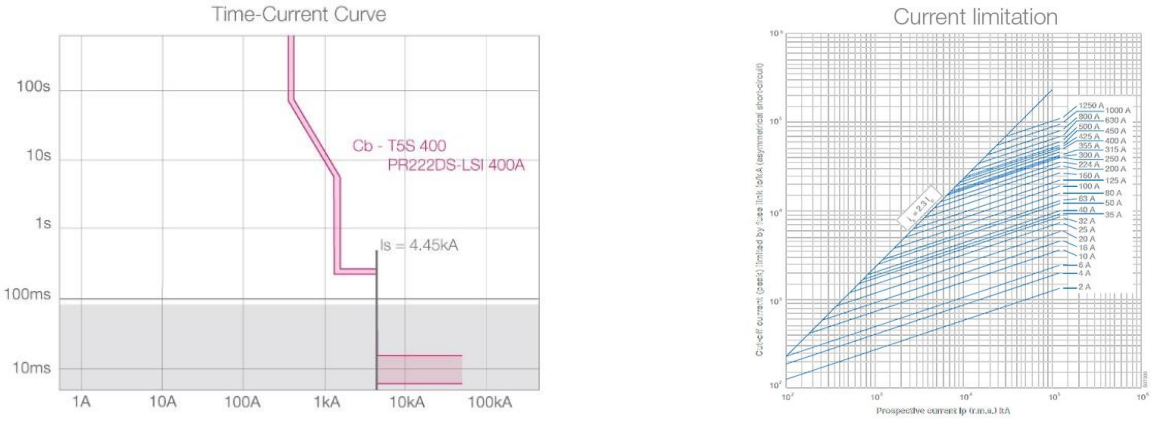
Kuvan 4.9 alalaidassa on esimerkki taulukon tulkinnasta kahden keskenään selektiivisen sulakkeen tapauksessa. Vasen palkki kuvaa kuormanpuoleista sulaketta ja oikeanpuoleinen syöttävää sulaketta. Sulakkeet ovat keskenään selektiivisiä, koska syöttävän sulakkeen tummansininen sulamis-I^2t-arvo (kuvassa B_2) on suurempi kuin kuormanpuoleisen sulakkeen vaaleansininen kokonais-I^2t-arvo (kuvassa A_1 ja B_1).

Sulakkeen ja katkaisijan välinen selektiivisyys

Sulakkeen ja pienjännitekatkaisijan välinen selektiivisyys voidaan ylikuormitustilanteissa todeta sulakkeen nimellisvirtaa ja katkaisijan ylikuormituslaukaisun virta-asetteluja vertailemalla. Laiteiden valinnassa ja asettelussa on huomioitava, että etummainen suojalaite saa toimia vain taempaa suojalaitetta suuremmalla virralla ylikuormitustilanteessa.

Oikosulkutilanteissa on huomioitava katkaisijan ja sulakkeen toiminta-aika, joka voidaan todeta laitteiden virta-aikakäyriä vertailemalla. Etummaisen suojalaitteen toimiessa takimmaista hitaammin on suojaus selektiivinen. Suurilla oikosulkuvirroilla katkaisijoiden ja sulakkeiden toiminta-ajat ovat hyvin lyhyitä (< 0,1 ms) ja lähellä toisiaan. Tällöin selektiivisyyttä ei voida todeta ainoastaan virta-aikakäyrien perusteella. Saman valmistajan tuotteille on useimmiten tarjolla valmistajan kokeellisesti tekemiä taulukoita, joissa laitteiden välinen selektiivisyys voidaan todeta. Eri valmistajien laitteiden välillä on selektiivisyyden tarkastaminen haastavampaa, koska eri valmistajien välisiä selektiivisyystaulukoita ei ole. Tällöin selektiivisyyttä voidaan tarkastella laitteiden I^2t-arvoja ja sulakkeen virranrajoituskykyä vertailemalla.

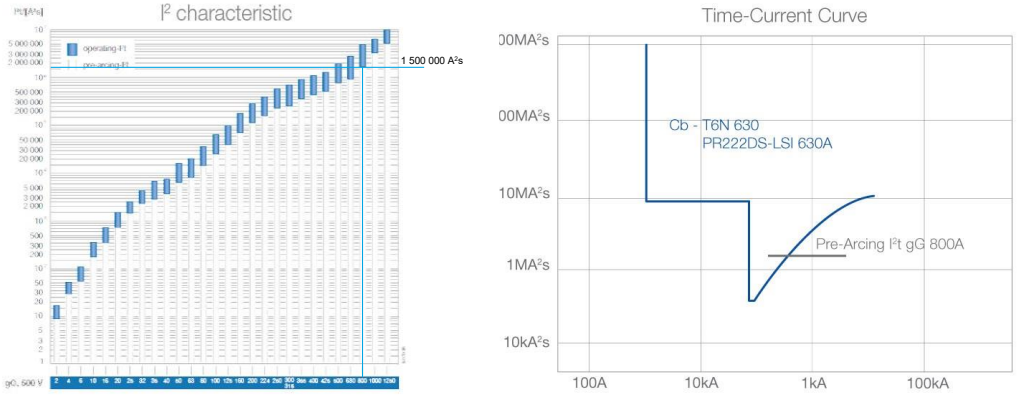
Katkaisijan sijaitessa sulakkeen edessä on vertailtava sulakkeen virranrajoituskykyä ja katkaisijan pikalaukaisun toimintavirtaa. Katkaisijasta on tarkastettava pikalaukaisun toimintavirta (kuva 4.10a) ja sulakkeen virranrajoituskäyrästöstä (kuva 4.10b) luettava suurin virtahuippu, jonka sulake päästää lävitseen. Suojaus on selektiivinen, jos katkaisijan pikalaukaisun toimintavirta on sulakkeen lävitseen päästämän virran huippuarvoa suurempi. (ABB, 2022a)



a) b)

Kuva 4.10 Katkaisijan ja sulakkeen välisen selektiivisyyden tarkasteleminen, kun katkaisija on sulakkeen edessä. Suojaus on selektiivinen, jos katkaisijan pikalaukaisun asetteluarvo (Is kuva 4.10a) on sulakkeen läpipäästämän virran huippuarvoa suurempi (kuva 4.10b). (ABB, 2022a)

Sulakkeen sijaitessa katkaisijan etupuolella on vertailtava laitteiden välisiä I^2t-arvoja. Sulakkeen I^2t-taulukosta on luettava sulakkeen sulamis-I^2t-arvo (kuva 4.11a), jonka perusteella tutkitaan katkaisijan I^2t-ominaiskäyrää (kuva 4.11b), jossa katkaisijan I^2t-arvot ilmoitetaan virran funktiona. Suojaus on selektiivinen siihen virran arvoon saakka, jolla katkaisijan I^2t-ominaiskäyrä kasvaa sulakkeen sulamis-I^2t-arvoa suuremmaksi. (ABB, 2022b)



a) b)

Kuva 4.11 Sulakkeen ja katkaisijan selektiivisyyden tarkastelu, kun sulake on katkaisijan takana. Suojaus on selektiivinen siihen virran arvoon saakka, jolla katkaisijan I^2t-ominaiskäyrä ylittää sulakkeen sulamis-I^2t arvon. (ABB, 2022b)

4.4 Teollisuusverkon suojausjärjestelyjä

Suojausjärjestelyt vaihtelevat suojattavan kohteen perusteella. Pienjännitepääkeskuksen suojaukseen liittyviä suojattavia kokonaisuuksia ovat keskijännitekojeiston jakelumuuntajalähtö, pienjännitepääkeskus ja suuritehoinen pienjännitemoottorilähtö. Näiden kohteiden suojaukset vaikuttavat oleellisesti toisiinsa ja pienjännitepääkeskuksen suojaukseen.

4.4.1 Jakelumuuntajalähtö

Jakelumuuntajalähtö suojataan tyypillisesti useampiportaisilla vakioaikaylivirtareleillä ja muuntajan omilla suojareleillä (Mörsky, 1992). Ylivirtareleen suojausvyöhykkeeseen sisältyy itse muuntajan ohella muuntajaa syöttävä kaapeli, alajännitepuolen kiskosilta ja pienjännitepääkeskus, joista jokainen asettaa vaatimuksia ylivirtareleen asetteluille. Suojan asettelua rajaavat

- syöttävän kaapelin oikosulkukestoisuus
- muuntajan ylikuormitettavuus ja kytkentävirtasysäys
- alajännitepuolen pienimmät oikosulkuvirrat ja PJ-katkaisijan toiminta-ajat.

Kaapelin oikosulkukestoisuus

Kaapelin oikosukukestoisuus rajoittaa suojan enimmäistoiminta-aikaa suurilla vikavirroilla. Suojauksen on erotettava vika verkosta ennen kuin kaapeli vaurioituu oikosulun aiheuttamasta lämpenemästä. Kaapelin terminen oikosulkukestoisuus eri vian erotusajoilla voidaan arvioida yhtälöllä

$$I_{\text{term}} = \frac{I_{\text{term1s}}}{\sqrt{t}} \tag{4.5}$$

missä t on aika sekunteina, I_{term1s} kaapelille ilmoitettu yhden sekunnin oikosulkukestoisuus ja I_{term} kaapelin terminen oikosulkukestoisuus vaikutusajalla t (Prysmian, 2018). Edelleen suojauksen enimmäiserotusaikaa t_{maks} voidaan arvioida kaapelin termisen oikosulkukestoisuuden ja oikosulkuvirran perusteella yhtälöllä

$$t_{\text{maks}} = \frac{I^2_{t\text{erm1}s}}{I_k^2} \tag{4.6}$$

missä I_{term1s} on kaapelille ilmoitettu yhden sekunnin oikosulkukestoisuus ja I_{k} oikosulkuvirta.

Vaihtoehtoisesti kaapelin oikosulkukestoisuutta voidaan arvioida epäyhtälön 4.7 avulla, jos yhden sekunnin oikosulkukestoisuus ei ole tiedossa. Siinä oikosulkukestoisuutta arvioidaan kaapelin poikkipinta-alan, johdin- ja eristemateriaalin sekä kaapelin loppulämpötilan perusteella.

$$t \leq \frac{\mathrm{k}^2 A^2}{I_k^2} \tag{4.7}$$

missä I_{k} on oikosulkuvirta, t vian vaikutusaika, A kaapelin poikkipinta-ala neliömillimetreinä ja k johdin- ja eritemateriaaleista sekä alku- ja loppulämpötilasta riippuva kerroin (SFS 6000-4-43:2017). Taulukkoon 5.3 on koottu k-arvoja joillekin tyypillisille kaapelirakenteille. Tarkemmin kertoimen k laskemista käsitellään esimerkiksi standardin SFS 6000 osassa 5-54 tai standardissa IEC 60949.

Taulukko 4.3 Kaapeleiden termistä kuormitettavuutta kuvaavia k-arvoja yleisimmille johdin- ja eristemateriaalien yhdistelmille. (SFS 6000-5-52:2017)

Johdineristys	Alkulämpötila [C]	Loppulämpötila [C]	Kuparikaapelin k-arvo	Alumiinikaapelin k-arvo
PVC	90	160	115	76
PEX, EPR	90	250	143	94

Taulukkoon 4.4 on laskettu yhtälön 4.7 ja taulukon 4.3 perustella yhden sekunnin oikosulkukestoisuuden arvot yleisimmille kaapeleissa käytetyille johdin- ja eristemateriaaleille eri poikkipinnoilla.

Taulukko 4.4 Kaapeleiden yhden sekunnin termisen oikosulkukestoisuuden arvoja.

Johtimen poikki-pinta-ala [mm^2]	Kuparijohtimellisen kaapelin I_{1s} [kA]		Alumiinijohtimellisen kaapelin I_{1s} [kA]	
	PVC-eriste	PEX/EPR-eriste	PVC-eriste	PEX/EPR-eriste
	MMJ, MCMK		AMCMK	AXMK, AXCMK, AHXAMK-W
2,5	0,30	0,36		0,24
6	0,70	0,86		0,56
10	1,15	1,40		0,94
16	1,85	2,30	1,20	1,50
25	2,85	3,60	1,90	2,35
35	4,00	5,00	2,65	3,30
70	8,05	10,0	5,30	6,60
120	13,8	17,1	9,10	11,3
185	21,3	26.4	1,00	17,4
240	27,6	34,3	18,2	22,6
300	34,5	42,9	22,8	28,2

Muuntajan ylikuormitussuojaus

Jakelumuuntajalähdön suoja toimii muuntajan suojareleiden varasuojana, minkä vuoksi muuntajan ylikuormitettavuus on huomioitava suojan asettelussa. Muuntajan ylikuormitettavuus rajoittaa ylivirtareleen alemman portaan virta-asetteluja. Suojan asetteluilla on sallittava muuntajan hetkittäinen ylikuormitettavuus, koska määräävänä tekijänä muuntajan kuormituksessa on virran sijaan muuntajan lämpenemä, jota muuntajan omat suojareleet tarkkailevat. Suojan on kuitenkin toimittava muuntajan omien suojien vikaantuessa ennen muuntajan vakavaa vaurioitumista.

Ylikuormitussuojan alemman portaan enimmäisvirta-asettelua rajoittaa muuntajan suurin hetkellinen kuormitettavuus. Öljymuuntajia voidaan ylikuormittaa säännöllisesti 1,5-kertaisella nimellisvirralla ja lyhytaikaisesti hätätilanteessa 2-kertaisella nimellisvirralla (IEC 60076-7: 2018). Kuivamuuntajien kuormituksen ei tulisi ylittää 1,5-kertaista muuntajan nimellisvirtaa (IEC 60076-12: 2008). Alemman portaan virta-asetteluna voidaan käyttää enintään edellä mainittuja arvoja.

Kytkentävirtasysäys

Kytkettäessä muuntaja jännitteiseen verkkoon on muuntajan ottama virta moninkertainen muuntajan nimellisvirtaan nähden, minkä vuoksi suojareleen alemmalle portaalle on aseteltava riittävä hidastus, ettei rele toimi kytkettäessä muuntaja verkkoon. Tämä kytkentävirtasysäys on muuntajan sydämen magnetoitumiseen liittyvä muutosilmiö. Virtasysäyksen huippuarvoon vaikuttaa useita tekijöitä kuten kytkentähetken vaihekulma, käämikytkimen asento, rautasydämen remanenssi sekä muuntajan ja verkon rakenne. Virtasysäyksen vaimenemiseen puolestaan vaikuttaa erityisesti muuntajan resistanssin ja reaktanssin suhde. (Mörsky, 1992)

Kytkentävirtasysäykseen vaikuttavista useista seikoista huolimatta on virtasysäys matemaattiselta luonteeltaan vaimeneva ensimmäisen kertaluvun eksponenttifunktio, jolla on huippuarvo ja aikavakio. Tällä perusteella yhden muuntajan aiheuttamaa virtasysäystä voidaan mallintaa releasetteluja määritettäessä yhtälöllä

$$i(t) = \frac{\hat{I}_{\mathrm{sm}}}{I_n}\frac{I_n}{\sqrt{2}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \tag{4.8}$$

jossa $\hat{I}_{\mathrm{sm}}$ on virtasysäyksen huippuarvo, I_{n} muuntajan nimellisvirta, τ aikavakio ja t aika (ABB, 2012). Huippuarvon ja nimellisvirran suhteelle ja aikavakiolle voidaan käyttää kokeellisesti määritettyjä tyypillisiä arvoja muuntajatyypin ja nimelliskoon perusteella, joita on koottu taulukoihin 4.5 ja 4.6. Kun samaan lähtöön on kytketty useita muuntajia, on suojareleen havaitsema kytkentävirtasysäys yksittäisten muuntajien kytkentävirtasysäysten summa.

Taulukossa 4.5 on erään muuntajavalmistajan ilmoittamat tyypilliset arvot muuntajatyypin ja nimelliskoon perusteella alle 2 MVA-tehoisille muuntajille.

Taulukko 4.5 Muuntajan kytkentävirtasysäyksen ja nimellisvirran suhde $\hat{I}_{\mathrm{sm}}/I_{\mathrm{n}}$ ja kytkentävirtasysäyksen aikavakio τ muuntajan nimellistehon ja muuntajatyypin mukaan lajiteltuna. (ABB, 2012)

Öljymuuntaja			Kuivamuuntaja		
Nimellisteho S_{n} [kVA]	$\hat{I}_{\mathrm{sm}}/I_{\mathrm{n}}$	τ [s]	Nimellisteho S_{n} [kVA]	$\hat{I}_{\mathrm{sm}}/I_{\mathrm{n}}$	τ [s]
50	15	0,10	200	10,5	0,15
100	14	0,15	250	10,5	0,18
160	12	0,20	315	10	0,20
250	12	0,22	400–500	10	0,25
400	12	0,25	630	10	0,26
630	11	0,30	800–1000	10	0,30
1000	10	0,35	1250	10	0,35
1600	9	0,40	1600	10	0,40
2000	8	0,45	2000	9,5	0,40

Lähteessä (Mörsky, 1992) on esitetty tyypillisiksi kytkentävirtasysäyksen arvoiksi taulukkoon 4.6 kootut arvot 1 MVA:a suuremmille muuntajille. Taulukkoon on lisäksi laskettu yhtälössä 4.8 tarvittavat aikavakiot.

Taulukko 4.6 Mittauksiin perustuvia muuntajan kytkentävirtasysäyksen huippuarvon ja muuntajan nimellisvirran suhteen keskimääräisiä arvoja. (Mörsky, 1992)

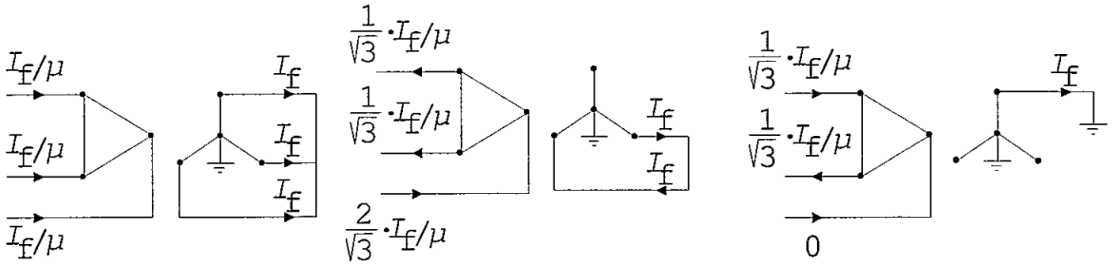
Muuntajateho [MVA]	$\hat{I}_{sm}$ /I_n kytkettäessä syöttö yläjännite-käämiin	$\hat{I}_{sm}$ /I_n kytkettäessä syöttö alajännite-käämiin	Aika, jossa virta pienenee puoleen [s]	Aikavakio τ [s]
1	7	12	0,1–0,2	0,15–0,30
5	5	9	0,2–0,5	0,3–0,7
10	4	8	0,5-1,0	0,7–1,4
50	3,5	7,5	1,2–7,2	1,7–10

Taulukoiden 4.5 ja 4.6 arvojen selvänä erona on taulukossa 4.6 noudatettu erottelu muuntajan verkkoon kytkettävän jännitetason perusteella. Kuitenkin pienempiä muuntajakokoja käytetään lähinnä jakelumuuntajina, jotka kytketään verkkoon yläjännitepuoleltaan. Tällä perustella voidaan olettaa taulukon 4.5 arvojen pätevän yläjännitepuolen verkkoon kytkemiseen. Tällä oletuksella taulukossa 4.5 näkyvät virran huippuarvot ovat hieman taulukon 4.6 arvoja suurempia. Virhe on kuitenkin harmittomaan suuntaan, koska liian pieneksi arvioitu kytkentävirtasysäys voi aiheuttaa suojareleen toiminnan kytkettäessä muuntaja verkkoon.

Taulukoiden arvoja käytettäessä olemassa olevassa verkossa on arvojen keskimääräinen luonne muistettava ja huomioitava myös muut tiedot tarkasteltavasta kohteesta. Jos muuntaja on aiemmin kytkeytynyt verkkoon ilman ongelmia, kytkeytyy se niin myös jatkossa, vaikka edellä mainituilla arvoilla arvioiden suojaus ei olisikaan selektiivinen. Tällöin kytkentävirtasysäyksen voidaan olettaa olevan korkeintaan käytössä olevien releasettelujen suuruinen.

Alajännitepuolen pienimmät oikosulkuvirrat

Alajännitepuolen pienimmät oikosulkuvirrat asettavat ylärajan suojan alemman portaan virta-asettelulle. Suojan toimiessa alajännitepuolen varasuojana on sen havahduttava myös pienimmällä alajännitepuolen vikavirralla. Tässä on huomioitava alajännitepuolen vikavirtojen näkyminen Dyn-kytkentäryhmäisen muuntajan ensiöpuolella kuvan 4.12 mukaisesti.



Kuva 4.12 Dyn-kytkentäryhmäisen muuntajan toision vikavirtojen näkyminen muuntajan ensiössä. I_f on vikavirta ja μ muuntosuhde. (Huotari & Partanen, 1998)

Pienin yksivaiheinen vikavirta on kerrottava redusoitaessa muuntosuhteen lisäksi arvolla $1/\sqrt{3}$, mikä pätee myös kaksivaiheiselle oikosulkuvirralle käytettäessä kaksivaiheista mittausta. (Huotari & Partanen, 1998)

4.4.2 Pienjännitepääkeskus

Pienjännitepääkeskuksen suojalaitteista voidaan erottaa keskuksen kiskoton erottava pääkoje ja keskuksen lähtöjä suojaavat etukojeet. Pääkoje on keskuksen syöttökenttään sijoitettu kuormakytkin tai katkaisija, joka mahdollistaa ensisijaisesti keskuksen erottamisen jännitteettömäksi ja saattaa lisäksi toimia ylikuormitus- ja oikosulkusuojana. Etukojeet ovat keskuksen lähtökentissä sijaitsevia kytkinvarokkeita tai katkaisijoita, jotka suojaavat keskukseen liitettyjä asennuksia. (Takalo, 2021)

Pääkojeen mahdollistaessa vain erottamisen sisältyy keskuksen kiskosto syöttävän KJ-lähdön suojausalueeseen. Tyypillisesti keskuksen pääkojeena käytetään kuitenkin ilma- tai kompaktikatkaisijaa, jolloin syöttävän KJ-lähdön rooliksi jää toimia varasuojana ilmakatkaisijan suojatessa keskuksen kiskostoa. Pääkatkaisijan asettelujen on oltava selektiivisiä syöttävän KJ-katkaisijan ja syötettyjen etukojeiden kanssa sekä suojattava keskusta ylikuormitukselta ja oikosuluilta. Selektiivisyyden saavuttamiseksi katkaisijoissa käytetään käänteisaikaisia toimintakäyriä.

Pääkatkaisijan käyrän ylikuormitusosa asetellaan keskuksen nimellisvirran perusteella ja oikosulkuosa oikosulkuvirran perusteella. Oikosulkuosa on aseteltava toimimaan pienimmällä vikavirralla enintään 5 sekunnissa (SFS 6000-4-41:2017). Vikavirran aiheuttamien vaurioiden minimoimiseksi on kuitenkin pyrittävä tätä nopeampaan toimintaan. Esimerkiksi prosessiteollisuuden standardissa PSK 1801 ohjeistetaan pääkatkaisijan oikosulkusuojan enimmäistoiminta-ajaksi 100 millisekuntia (PSK 1801). Oikosulkusuojauksen hidastus voi siis

olla korkeintaan 50 millisekuntia, kun pienjännitekatkaisijoiden toiminta-aika on noin 50 millisekuntia.

Oikosulkuosan virta-asettelua rajoittavat pienin keskuksessa esiintyvä oikosulkuvirta eli kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{2k} ja keskukseen liitettyjen laitteiden suurimmat kytkentävirtasysäykset. Oikosulkusuojaosan asettelun on asetuttava näiden väliin.

Pääkatkaisijan ja etukojeiden välinen selektiivisyys voidaan todeta selektiivisyyskäyrästöstä vertailemalla laitteiden toiminta-aikakäyriä. Vaihtoehtoisesti oikosulkusuojan pikalaukaisualueella voidaan tutkia katkaisijan ja etukojeen I^2t-arvoja tai valmistajan julkaisemia koordinaatiotaulukoita. Viimeksi mainitulla tavalla päästään pienempään porrastukseen ja nopeampaan suojaukseen, koska tällöin myös energiaselektiiviset suojausratkaisut huomioidaan virta- tai aikaselektiivisyyden sijaan (PSK 1801). Koordinaatiotaulukoiden ja I^2t-arvojen vertailu rajoittuu kuitenkin lähinnä saman valmistajan tuotteiden välille, koska valmistajat eivät ilmoita muiden valmistajien tuotteita julkaisuissaan.

4.4.3 Moottorilähtö

Moottorilähtöjen suojausjärjestelyt vaihtelevat moottorin koon perusteella. Suuremmat moottorit on suojattu pienempiä laajemmin niiden korkean hankintahinnan vuoksi. Moottoreita suojataan ylikuormitukselta, vaihekatkoksilta, moottorin jumiutumiselta, ali- ja ylijännitteeltä sekä ylivirralta. Pienempien moottoreiden suojaus on perinteisesti toteutettu ja toteutetaan yhä useimmiten ylikuormitusreleen ohjaaman kontaktorin ja sulakkeen yhdistelmällä. Suurempien ja arvokkaampien moottoreiden suojaus on puolestaan toteutettu moottorinsuojareleen ja katkaisijan yhdistelmällä. Molemmissa tapauksissa suojauksesta voidaan erottaa oikosulkusuojausosa, jonka tehtävänä on tunnistaa verkon vikatikanteet, ja muut suojaustoiminnot, joiden tehtävänä on tunnistaa moottorin vikatilanteet. (Hietalahti, 2013)

Moottorilähdöllä sattuvassa viassa oikosulkuvirrat näkyvät myös keskuksen syöttökatkaisijalla, mistä syystä tässä keskitytään oikosulkusuojien asetteluihin ja valintaan.

Katkaisijan ja moottorinsuojareleen yhdistelmässä oikosulkusuojana toimii joko katkaisijan laukaisukojeisto tai moottorin suojareleen pikalaukaisuporras. Sulakkeen ja lämpöreleen yhdistelmässä oikosulkusuojana toimii sulake. Oikosulkusuojan asettelussa on huomioitava:

1) suurimmat henkilöturvallisuuden kannalta sallitut poiskytkentäajat
2) lähdön osien oikosulkukestoisuus
3) moottorin käynnistysvirtasysäys. (Hietalahti, 2013)

Suurimmat sallitut poiskytkentäajat riippuvat jännitteestä ja suojalaitteen nimellisvirrasta. Kiinteästi asennetuilla sähkölaitteilla, kuten moottoreilla, vaadittu poiskytkentäaika on enintään 5 sekuntia yli 32 A:n suojalaitteilla jännitteestä riippumatta. Tätä pienemmällä nimellisvirralla poiskytkentäaika riippuu jännitteestä. Enintään 230 V:n vaihejännitteellä poiskytkentäaika on enintään 0,4 sekuntia ja enintään 400 V vaihejännitteellä 0,2 sekuntia. (SFS 6000-4-41). Tavallisesti jännitetason ilmaisussa käytettyinä pääjännitteinä tämä tarkoittaa, että enintään 400 V:n verkossa enimmäispoiskytkentäaika on 0,4 sekuntia ja enintään 690 V:n verkoissa 0,2 sekuntia, ja yli 32 A:n suojalaitteella suojatuilla piireillä aina 5 sekuntia.

Suojalaitteen on toimittava korkeintaan edellä mainitussa ajassa pienimmällä verkossa esiintyvällä oikosulkuvirralla. Tarkastelussa huomioitava pienin vikavirta riippuu verkon maadoituksesta. Maasta erotetussa (IT) verkossa pienin oikosulkuvirta saadaan kaksivaiheisessa oikosulussa. Maadoitetussa TN-S tai TN-C järjestelmän verkossa pienin vikavirta saadaan joko kaksi- tai yksivaiheisessa oikosulussa riippuen vikapaikan etäisyydestä syöttöpisteeseen. Lähellä jakelumuuntajaa sattuvissa vioissa pienimmät vikavirrat saadaan kaksivaiheisessa oikosulussa. Sen sijaan kauempana verkossa sattuvissa vioissa pienimpiä ovat yksivaiheisen oikosulun vikavirrat. (Huotari & Partanen, 1998)

Käytännössä maadoitetussa verkossa moottorilähdön pienin vikavirta on lähes aina yksivaiheinen oikosulkuvirta, koska pienimmän vikaviran tuottava vikapaikka sijaitsee moottorikaapelin hännillä eikä jakelumuuntajan vieressä. Liitteessä 4 on esimerkinomaisesti laskettu rajapituuksia, joita pidemmän kaapelin hännillä sattuvassa viassa yksivaiheinen oikosulkuvirta on kaksivaiheista pienempi. Kaikki lasketut rajapituudet ovat alle kymmenen metriä. Moottorikaapelin hännille kaapelointia tulee lähes aina tätä enemmän, kun huomioidaan jakelumuuntajan ja keskuksen sekä keskuksen ja moottorin välisten kaapeleiden pituudet.

Lähdön osien oikosulkukestoisuuden tarkistamisella tarkoitetaan kaapelin, kontaktorin ja lämpöreleen riittävää oikosulkukestoisuutta. Kaapelin oikosulkukestoisuus voidaan tarkistaa

edellä luvussa 4.1 esitetyllä tavalla. Kontaktorin ja lämpöreleen osalta on tutustuttava valmistajan dokumentaatioon. Tyypillisesti laitteille ilmoitetaan suurin sallittu etusulake, jota pienempi suojaavan sulakkeen on oltava.

Releen pikalaukaisuportaan asettelun on oltava moottorin ottamaa käynnistysvirtasysäystä suurempi. Samoin sulake on valittava riittävän suureksi, jotta se sallii moottorin käynnistyksen. Moottoreiden käynnistysvirran ja nimellisvirran suhde vaihtelee noin 7 ja10 välillä, jota suuremmaksi pikalaukaisuporras on aseteltava.

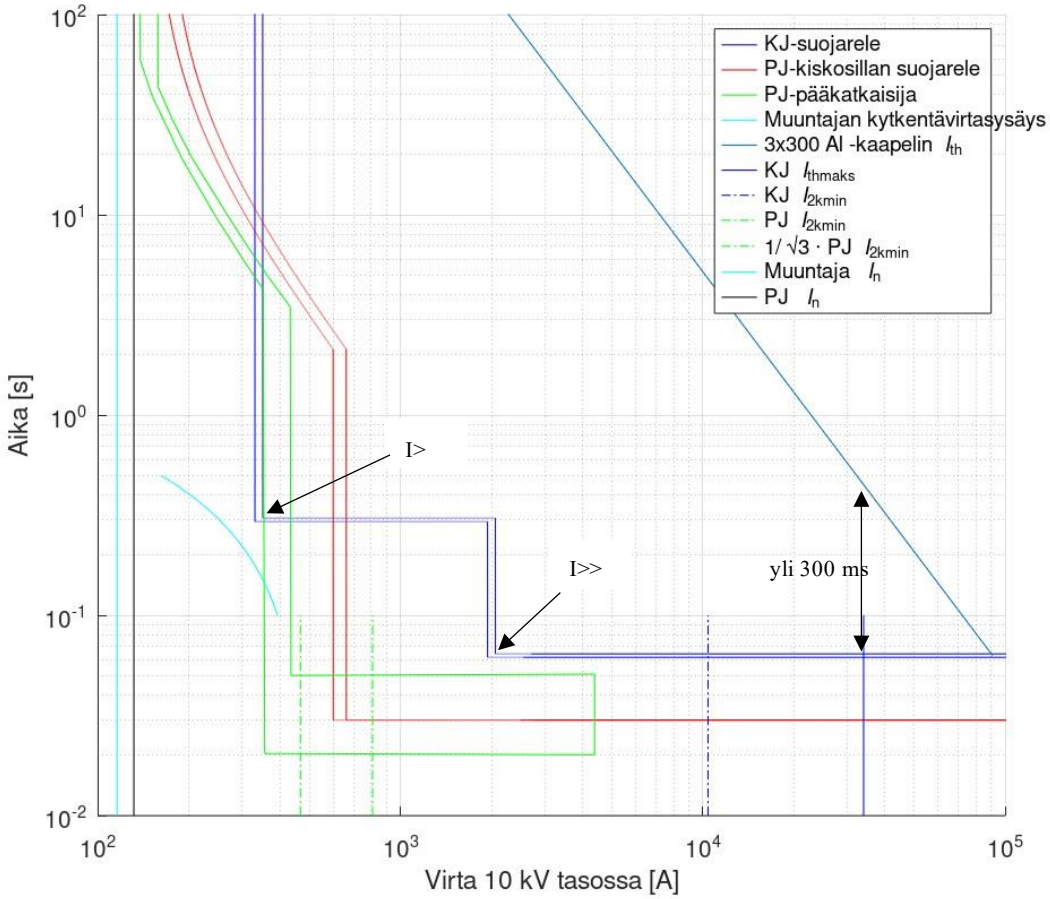
Sulakkeen, kontaktorin ja moottorin yhteensovittamiseksi laitevalmistajat julkaisevat koordinaatiotaulukoita, joissa on koottu keskenään yhteensopivia laiteyhdistelmiä moottorikoittain. Standardissa SFS-EN 60947-4-1 on määritelty tätä varten koordinaatiotyypit 1 ja 2. Kummassakaan tyypissä ihmisille tai asennukselle ei saa aiheutua vaaraa oikosulkutilanteessa, mutta kontaktorin tai lämpöreleen vauriot ovat sallittuja. Tyypin 2 koordinaatiossa sallitaan ainoastaan kontaktorin kärkien hitsautuminen, kun tyypin 1 koordinaatiossa laitteet eivät ole käyttökelpoisia vian jälkeen. Koordinaatiotyypin ohella taulukossa on ilmoitettava:

- suurin oikosulkuvirta, jolla taulukkoa voi käyttää
- jännite
- oikosulkusuojalaiteen tyyppi, kuten sulake, kompaktikatkaisija tai ilmakatkaisija
- käynnistystapa, kuten normaali-, raskas- tai tähti-kolmiokäynnistys. (Sähkötieto, 2015)

Liitteessä 5 on esimerkkinä ABB:n sulakkeiden ja lämpöreleiden koordinaatiotaulukko, joka pätee enintään 80 kA:n oikosulkuvirroilla 690 V:n jännitteellä. Käynnistystapa taulukossa on suorakäynnistys normaalilla kuormituksella.

4.5 Selektiivisyyskäyrästöt

Ohjelmistosta riippumatta suojaustoimintaa havainnollistetaan selektiivisyyskäyrästöllä, johon on merkitty suojalaitteiden toiminta-aika eri oikosulkuvirran arvoilla sekä muita tarpeellisia tietoja suojauksen analysointiin. Suojalaitteiden toiminnan ohella kuvaan on merkitty suurimmat ja pienimmät vikavirrat, kuormitusvirta, verkkoon kytkettyjen laitteiden kytkentävirtasysäykset ja laitteiden oikosulkukestoisuus.



Kuva 4.13 Erään jakelumuuntajalähdön selektiivisyyskäyrästö, missä KJ tarkoittaa keskijännitettä, PJ pienjännitepääkeskusta, I_{thmaks} oikosulkuvirran termistä ekvivalenttia ja I_{k2} kaksivaiheista oikosulkuvirtaa eli pienintä vikapaikassa esiintyvää oikosulkuvirtaa ja I_n nimellisvirtaa. Kuvaan on merkitty KJ-suojan alempi (I>) ja ylempi (I>>) porras sekä katkaisijan toimintaviiveen marginaali suhteessa kaapelin oikosulkukestoisuuteen.

Kuvan 4.13 perusteella voidaan todeta yksittäisen suojalaitteen suojausalue, varmistaa suojalaitteiden muodostaman suojausketjun aukottomuus ja selektiivisyys sekä vertailla eri suojalaitteiden toimintaa keskenään sekä suhteessa verkossa esiintyviin virtasysäyksiin. Suojalaitteen suojausvyöhyke todetaan vertaamalla suojalaitteiden toimintakäyriä pienimpiin vikavirtoihin verkon eri osissa. Suojalaite suojaa ne alueet, joiden pienin vikavirta on riittävän suuri eli jää kuvaajassa suojalaiteen toimintakäyrän oikealle puolelle. Suojausketju on aukoton, kun kaikista pienin vikavirta on jonkin suojalaitteen toimintavirtaa suurempi eli jää kuvassa jonkin suojalaitteen toimintakäyrän oikealle puolelle. Suojalaitteiden keskinäinen toiminta ilmenee toiminta-aikakäyrien risteämisestä. Suojalaitteiden toiminta on selektiivistä, kun käyrät eivät risteä. Myös virtasysäysten aiheuttamat vikalaukaisut ilmenevät käyrien

risteämisestä: jos suojan toimintakäyrä risteää virtasysäyksen käyrän kanssa, aiheuttaa virtasysäys vikalaukaisun. (Eronen, 2014)

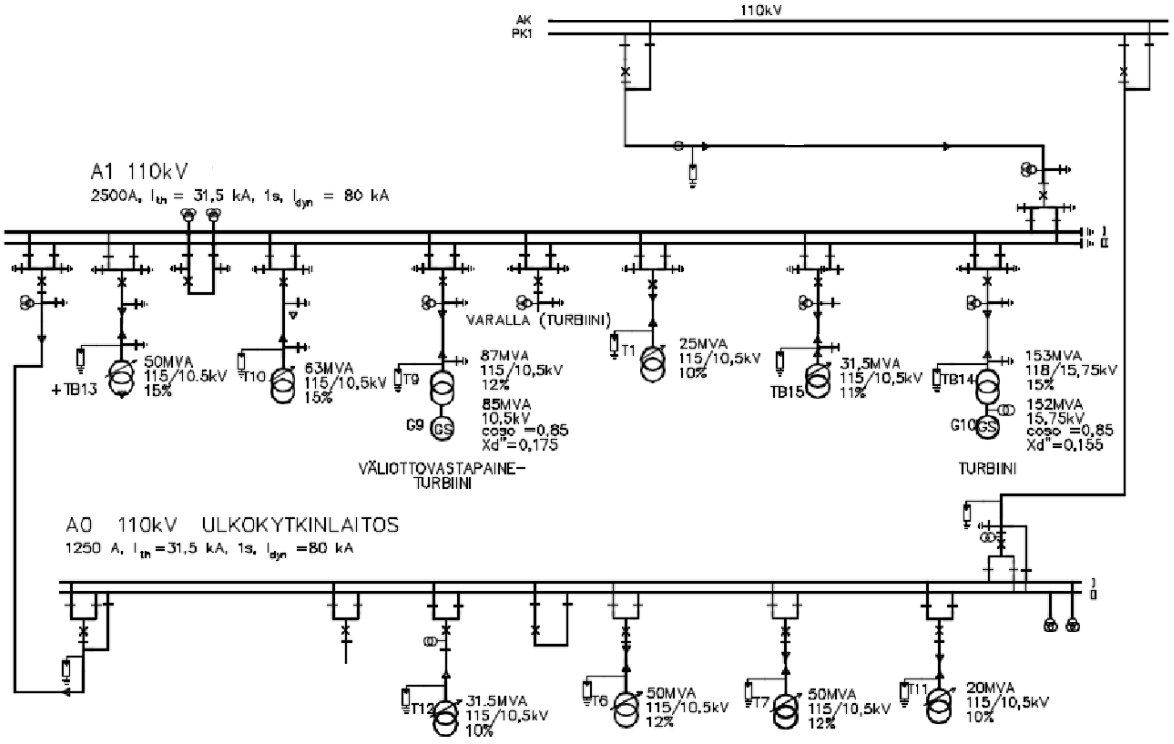
Myös kaapelien terminen kuormitettavuus voidaan tulkita käyrästöstä, kun käyrästöön merkitään kaapelin terminen oikosulkukestoisuus erotusajan funktiona. Tämä voidaan tehdä yhden sekunnin oikosulkukestoisuuden perusteella yhtälöllä 4.6. Kaapelin oikosulkukestoisuus todetaan releen toimintakäyrän ja kaapeliin kohdistuvan suurimman oikosulkuvirran käyrän leikkauspisteen kohdalta. Oikosulkukestoisuus on riittävä, kun oikosulkukestoisuuskäyrän ja releen toiminta-aikakäyrän ero tällä virralla on vähintään katkaisijan toimintaviiveen verran. Katkaisijan toimintaviiveenä voidaan pitää 50 millisekuntia pienjännitekatkaisijoilla ja 100 millisekuntia keskijännitekatkaisijoilla. Edellisen sivun kuvassa 4.13 on esimerkkinä erään jakelumuuntajalähdön selektiivisyyskäyrästö. (Eronen, 2014)

Kuvasta 4.13 havaitaan KJ-suojareleen alemman portaan suojausvyöhykkeen kattavan verkon pienjännitepääkeskukseen asti ja ylemmän portaan suojausvyöhykkeen rajoittuvan muuntajan KJ-puolelle, koska PJ-keskuksen oikosulkuvirta on alemman portaan (I>) oikealla puolella ja ylemmän portaan (I>>) vasemmalla puolella. Myös PJ-kiskonsuoja ja -pääkatkaisija havaitsevat pienjännitekeskuksen viat, koska nekin on aseteltu toimimaan pienintä oikosulkuvirtaa pienemmällä virralla eli ne jäävät oikosulkuvirran käyrän vasemmalle puolen. Käyrien risteämisestä huomataan KJ-suojan ja PJ-suojien toiminnan oleva epäselektiivistä useamman suojan toimiessa samalla vikavirralla samassa ajassa. Kytkentävirtasysäys ei aiheuta ongelmaa, koska KJ-suojan käyrä ei risteä kytkentävirtasysäyksen käyrän kanssa. Muuntajaa syöttävän kaapelin oikosulkukestoisuus on riittävä, koska KJ-suojan ylemmän portaan ja kaapelin I_{th}-käyrän väliin jää yli 300 millisekuntia eli yli 3 kertaa katkaisijan toimintaviiveen verran.

5 TAPAUSTUTKIMUS

5.1 Tehtaan sähköverkko

Tehtaan sähköverkko koostuu liitynnästä 110 kV:n kantaverkkoon, kahdesta 110 kV:n kytkinlaitoksesta, keski- ja pienjännitejakeluverkosta sekä niihin kytkeytyvästä kuormasta ja tuotannosta. Suurjännitekytkinlaitoksista avokytkinlaitos (A0) sijaitsee tehdasalueen laidalla ja kaasueristeinen kytkinlaitos (A1) tehtaan voimalaitoksessa. Kummaltakin kytkinlaitokselta lähtee johto kantaverkon liityntäpisteeseen, minkä lisäksi kytkinlaitosten välillä on kaapeli. Tämä rengasverkko toimii tehtaan sähköverkon runkona.



Kuva 5.1 Tarkasteltavan tehtaan 110 kV:n verkko. (Muokattu lähteestä Pöyry, 1995)

Tähän runkoon on liitetty laitoksen sähköntuotantokapasiteetti, joka koostuu 152 ja 85 MVA:n generaattoreista. Kumpikin generaattori on liitetty omalla muuntajallaan kytkinlaitokseen A1. Kulutus sen sijaan on liitetty 110 kV:n runkoon kahdeksalla päämuuntajalla, jotka jakaantuvat tasan kytkinlaitosten A0 ja A1 kesken. Päämuuntajat syöttävät tehtaan 10 kV:n verkkoa, jota pitkin sähkö jaetaan kulutuskohteisiin.

Sähkönkulutus koostuu teollisuusverkoille tyypilliseen tapaan moottori- ja pumppukäytöistä, jotka muodostavat noin 80 % tehtaan sähköntarpeesta (Kauria, 2019). Lukumääräisesti suurin osa käytöistä on 500 ja 690 V:n pääjännitteisiin kojeistoihin liitettyjä oikosulkumoottoreita. Tämän lisäksi laitoksessa on 6 ja 3 kV:n kojeistot keskijännitemoottoreille.

5.1.1 10 kV:n jakeluverkko

Tehtaan pääjakelun muodostaa 10 kV:n jakeluverkko, joka on maasta erotettu. Jakeluverkko koostuu yhdeksästä pääkojeistosta, joihin on liitetty saman jännitetason alakojeistoja ja jakelumuuntajia. Jakelumuuntajalla siirrytään joko 3 tai 6 kV:n moottorijännitteelle tai suoraan pienjännitteelle. Kaikkiaan keskijänniteverkossa on yli 180 jakelumuuntajaa, joiden lisäksi 10 ja 3 kV:n verkkoon on liitetty keskijännitemoottorikäyttöjä. Tyypilliset jakelumuuntajakoot ovat 2 ja 3,15 MVA.

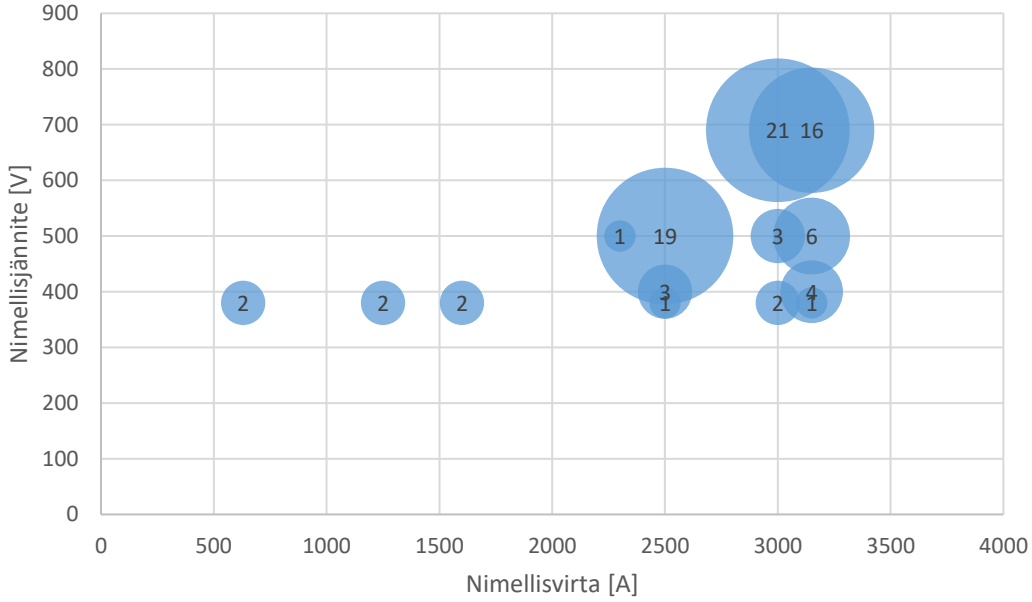
Keskijänniteverkon kojeistot on toteutettu yksikiskojärjestelmällä, ja verkko on rakennettu silmukoiduksi niin, että jokaiseen kojeistoon on vähintään yksi varasyöttö. Verkkoa käytetään kuitenkin säteittäisesti sen mahdollistaman yksinkertaisemman käyttötoiminnan vuoksi.

Keskijänniteverkko on kaapeloitu, ja johtopituudet ovat lyhyitä ja poikkipinnat suuria. 10 kV:n pääkojeistot sijaitsevat päämuuntajien läheisyydessä, ja ne on liitetty muuntajaan kiskosillalla tai lyhyellä (< 40 m) kaapelilla. Keskijännitealakojeistoista yksi on 2 kilometrin ja toinen noin 1,5 kilometrin päässä pääkojeistoista muiden kaapelipituuksien jäädessä alle puoleen kilometriin. Pisin jakelumuuntajaan syöttävä kaapeli on noin 480 metriä pitkä, ja sen poikkipinta on 3 x 240 mm^2 alumiinia. Yleisin jakelumuuntajaan syöttävän kaapelin poikkipinta on 3 x 300 mm^2 alumiinia, ja pituus vaihtelee muutamasta kymmenestä metristä kahteensataan metriin. (Pöyry, 1995)

5.1.2 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkko koostuu valaistus- ja korjausvoimaverkosta sekä prosessisähköverkosta. Valaistus- ja korjausvoimaverkon jännitteenä on 400 V ja prosessissähköverkon jännitteenä 500 tai 690 V. Prosessisähköverkko on rakenteeltaan keskitetty, eli verkossa ei ole alakeskuksia vaan laitteita syötetään suoraan suurista pääkeskuksista. Yksi pääkeskusten lähelle tuotu jakelumuuntaja syöttää yhtä tai kahta pääkeskusta, jotka on liitetty muuntajaan lyhyellä kiskosillalla.

Keskitetty jakelu näkyy myös pienjännitekeskusten nimellisvirroissa. Pienjännitekeskusten nimellisvirrat ovat suuria erityisesti prosessisähköverkossa. Kuvaan 5.2 on piirretty keskusten lukumäärät keskuksen nimellisvirran ja jännitteen funktiona. Kuvassa ympyrän halkaisija kuvaa keskusten lukumäärää, joka on merkitty ympyrän keskelle.



Kuva 5.2 Nimellisvirraltaan erikokoisten pienjännitekeskusten lukumäärät keskuksen jännitteen ja nimellisvirran perusteella jaoteltuna. Ympyrän halkaisija kuvaa keskusten lukumäärää ja sijainti koordinaatistossa keskuksen nimellisvirtaa ja -jännitettä.

Kuvaajasta havaitaan keskusten nimellisvirtojen olevan tyypillisesti 2 500, 3 000 tai 3 150 A. Nimellisvirroiltaan pienemmät keskukset ovat 380 tai 400 V:n nimellisjännitteisiä, eli ne kuuluvat valaistus- ja korjausvoimaverkkoon. Yleisin nimellisvirta 500 V:n keskuksella on 2 500 A ja 690 V:n keskuksella 3 000 A.

Prosessisähköverkon kuormat ovat suoria oikosulkumoottorikäyttöjä ja taajuusmuuttajakäyttöjä. Pienjänniteverkkoon liitettyjen moottoreiden koot ovat 700 kW:sta alaspäin. Suuritehoiset (> 200 kW) moottorit on pyritty kytkemään eri pääkeskuksiin kuormituksen ja moottoreiden käynnistysvirtasysäysten tasaamiseksi keskusten välillä (Jääskeläinen, 2022). Tämän menettelyn johdosta yhteen pääkeskukseen on yleensä liitetty vain muutamia suuria moottoreita. Yhdessä keskuksessa on useimmiten muutama suurempi 200–400 kW:n moottori ja muutama kymmenen pienempää moottoria. Viimeaikaisena kehityksenä ollut taajuusmuuttajien yleistyminen näkyy myös suurissa moottorikäytöissä. Suurien suorien moottorikäyttöjen osuus kuormituksesta on laskenut, kun moottorit on muutettu taajuusmuuttajakäyttöisiksi (Jääskeläinen, 2022).

5.2 Tutkittava verkon osa

Tutkimuksessa tarkastellaan vesilaitoksen ja keittämön pienjännitekeskusten selektiivisyyttä normaalissa kytkentätilanteessa. Vesilaitoksen alueella tarkastellaan kahta pienjännitekeskusta 22 27AE 03 ja 22 27AE 02. Keittämön alueella tarkastellaan viittä keskusta 23 41AD 11, 23 41AD 12, 23 41AD 13, 23 44AD 14 ja 23 44AD 15. Tarkasteltavan verkonosan rakenteen yksityiskohdat ilmenevät liitteen 1 verkostokaaviosta. Pienjännitekeskuksen suojauksen selektiivisyyden toteamiseksi on tarkasteltava myös pienjännitekeskusta syöttävän keskijännitelähdön oikosulkusuojauksen asettelut. Keskijännitekeskusten välinen selektiivisyys on todettu toimivaksi aiemmassa selvityksessä, joten sitä ei tässä tutkimuksessa selvitetä.

Vesilaitoksen alueella tarkasteltavista keskuksista 22 27AE 03 on liitetty keskijännitekojeistoon 23 57AB 10, jota syötetään 110 kV:n kytkinkentästä A1. Keskuksista toinen 22 27AE 02 on liitetty keskijännitekojeistoon A6, jota syötetään 110 kV:n kytkinkentästä A0. Vesilaitoksen keskusten nimellisjännite on 500 V ja -virta 2 500 A. Kumpikin keskus on liitetty jakeluverkkoon nimellisteholtaan 2 MVA:n ja muuntosuhteeltaan 525 V/10 kV:n jakelumuuntajalla. Keittämön alueen keskuksista kolme (AD11, AD12 ja AD13) on liitetty keskijännitekojeistoon 23 57AB10 ja kaksi (AD14 ja AD15) keskijännitekojeistoon 23 57AB13, jota syötetään omalla päämuuntajallaan 110 kV:n kytkinlaitoksesta A1. Keittämön keskusten nimellisjännite on 690 V ja -virta 3 000 A. Niistä jokainen on liitetty omalla nimellisteholtaan 3,15 MVA:n ja muuntosuhteeltaan 725 V/10 kV:n jakelumuuntajalla keskijänniteverkkoon.

5.3 Verkon vikavirtalaskelma

Verkostosta on käytettävissä vikavirtalaskelma, joka on suoritettu ulkopuolisen yhtiön toimesta Neplan-ohjelmistolla. Ohjelmassa laskenta on suoritettu IEC 60909 -standardin mukaisesti. Laskelmaa on päivitetty tarpeen vaatiessa tyypillisesti muutaman vuoden välein. Tässä tutkimuksessa on käytetty vuonna 2019 laadittua laskelman revisiota D, minkä jälkeen verkkoon ei ole tehty vikavirtoihin vaikuttavia muutoksia. Laskelma sisältää verkon 110 kV:n kytkinkentät, keskijännitekojeistot ja pienjännitepääkeskukset. Vikavirrat on laskettu maksimi- ja minimitilanteissa kantaverkkoon liityttynä sekä generaattorin erikseen

syöttämässä saarekekäytössä. Tässä työssä huomioidaan suurimpina oikosulkuvirtoina laskelman maksimitilanne kantaverkkoon liityttynä ja pienimpinä oikosulkuvirtoina 85 MVA:n generaattorin syöttämä saarekekäyttötilanne. (Pöyry, 2019)

Suurimmat oikosulkuvirrat tuottavassa tilanteessa:

- Verkkoa syötetään kantaverkosta kahdella johdolla ja 110 kV:n kytkinkenttien välinen rengas on kiinni.
- 110 kV:n kantaverkon liityntäpisteessä ilmenee suurin oikosulkuvirta $I_k'' = 15{,}8$ kA $Z_k'' = (0{,}7 + j\ 4{,}25)\ \Omega$.
- Generaattorit ja moottorit ovat verkossa.
- Tuloksena saadaan suurimmat 3-vaiheset oikosulkuvirrat I_{3kmax}.

Pienimmät oikosulkuvirrat tuottavassa tilanteessa:

- Laitos on saarekekäytössä, jota syöttää 85 MVA:n generaattori.
- Moottorit ja toinen generaattori ovat irti verkosta.
- Oikosulkuvirta ei vaimene.
- Tuloksena saadaan pienimmät 2-vaiheiset oikosulkuvirrat I_{2kmin}.

Laskelma on toteutettu IEC-standardin mukaisesti Thevenin menetelmällä, jossa vikapaikkaan sijoitetun jännitelähteen jännitteen arvo on verkon käyttöjännite kerrottuna jännitekertoimella *c*. Suurimmat oikosulkuvirrat tuottavassa tilanteessa kertoimen arvona on käytetty IEC-standardin mukaisesti 1,1. Pienimpiä vikavirtoja laskettaessa on kertoimen arvo laskettu standardista poiketen arvoon 0,7, millä laskelman mukaan huomioidaan mahdollinen vikaimpedanssi. Laskelmassa on laskettu katkaisuvirrat 50 millisekunnin katkaisuviiveellä ja termiset ekvivalentit 1 sekunnin kestoajalla. Generaattorit ja keskijännitemoottorit on huomioitu laskennassa yksitellen ja pienjännitemoottorit pienjännitepääkeskuskohtaisilla ekvivalenttisilla moottoreilla, joiden tehot vastaavat keskukseen liitettyjen moottoreiden tehojen summaa ja käynnistysvirta on viisinkertainen nimellisvirtaan nähden. (Pöyry, 2019)

Laskelma sisältää oikosulkuvirtojen lisäksi keskijänniteverkon maasulkuvirrat. Nämä eivät kuitenkaan vaikuta tarkasteltavien pienjännitekeskusten vikavirtoihin, koska jakelumuuntajat ovat Dyn-kytkentäisiä katkaisten nollaverkon keski- ja pienjänniteverkon välillä.

5.4 Tarkasteltavan verkon oikosulkusuojaus

Tarkasteltavan verkon keskijännitekojeistojen ja jakelumuuntajalähtöjen oikosulkusuojaus on toteutettu pääsääntöisesti kaksiportaisilla vakioaikaylivirtareleillä. Valtaosa käytettävistä

releistä luokitellaan staattisten releiden sukupolveen. Tehtaan 16:sta keski- ja suurjännitekojeistosta kolmessa kaikki suojareleet ovat mikrokontrollerireleitä, muissa kojeistoissa releet ovat pääosin staattisia. Staattiset releet on valittu suojattavan kohteen perustella siten, että moottorilähdöillä on elektroninen moottorinsuojarele ja muilla lähdöillä kaksiportainen vakioaikaylivirtarele.

Staattisilla releillä varustetuissa pääkojeistoissa alakojeistoja syöttävien lähtöjen alemman portaan (I>) hidastukseksi on aseteltu 0,3 sekuntia ja ylemmän (I>>) portaan 0,1 sekuntia. Jakelumuuntajia syötävillä lähdöllä on I>-portaan hidastus 0,3 tai 0,2 sekuntia ja I>>-porras toimii hidastuksetta. Pääkojeisto toimii siis aikaselektiivisenä varasuojana alakojeiston jakelumuuntajaa suojaavalle suojareleelle I>>-portaan osalta.

Mikrokontrollerireleet on aseteltu toimimaan suuntaamattomina kaksiportaisina vakioaikaylivirtareleinä tai moottorinsuojareleinä suojattavan kohteen mukaan. Yhdessä alakojeistossa on syötössä ja varasyötössä käytössä kolmiportainen ylivirtasuojaus lukituksilla, minkä kaksi ylintä porrasta ovat suunnattuja. Portaiden hidastukset ja toimintavirrat ovat yhtä suuret, mutta suunta ja lukitukset eroavat. Toinen portaista havaitsee vian johdolla ja lukitsee toisen releen kiskoon suunnatun portaan toiminnan. Vastaavasti kiskon suunnassa olevassa viassa releet lukitsevat syöttävien pääkojeistojen releiden toiminnan. Myös kojeiston lähtöjen releet lukitsevat kiskolle suunnattujen portaiden toiminnan havahtuessaan.

Jakelumuuntajalähtöjen suojaus on toteutettu yleensä kahdella releellä, jotka laukaisevat keskijännitelähdön katkaisijan. Releistä toisen virtamuuntajat on sijoitettu jakelumuuntajan alajännitepuolelle muuntajan napojen välittömään läheisyyteen ja toisen muuntajaa syöttävään 10 kV:n kenttään. Keskijännitekojeistosta mittaava rele on kaksiportainen vakioaikaylivirtarele, jonka ylempi porras toimii ilman hidastusta ja alemman toimintaa on hidastettu 0,2 tai 0,3 sekuntia. Muuntajan navoista mittaavan releen alempi porras on käänteisaikatoimintainen ja ylempi vakioaikatoimintainen. Vakioaikaportaalla ei ole hidastusta ja käänteisaikaportaan toimintaa on hidastettu PJ-keskuksen suojia hitaammaksi. Vakioaikaportaan laukaisu on kuitenkin lukittu PJ-keskuksen valokaarisuojalla, jonka havahtuminen vaaditaan katkaisijan laukaisuun. Muuntajien sisäisiltä vioilta ja ylikuormitukselta suojaavat muuntajan lämpötilaa mittaava rele ja muuntajan öljyn pinnankorkeutta mittaava rele.

Pienjännitepääkeskuksen pääkatkaisijaan on asennettu elektroninen laukaisulaite, joka on aseteltu käänteisaikatoimintaiseksi. Tämän lisäksi keskuksiin on asennettu valokaarisuojat,

jotka laukaisevat syöttävän KJ-katkaisijan. Laukaisun ehtona on valokaarisuojan havahtumisen lisäksi muuntajan navoista mittaavan releen pikalaukaisuportaan havahtuminen. Valokaarisuojan ilmaisimet kattavat keskusten pystykiskot ja suurimmat kennot, mutta ulosvedettäviin kasetteihin ne eivät näe. Uudemmissa keskuksissa valokaarisuojien ilmaisimet kattavat myös keskusta syöttävän kiskosillan.

5.4.1 Tavoitesuojausasettelut

KJ-katkaisija suojaa ensisijaisesti muuntajan yläjännitepuolen ja toimii varasuojana alajännitepuolen vioissa. Muuntajan alajännitepuolelta mittaava suojarele suojaa ensisijaisesti PJ-keskuksen ja muuntajan välisen kiskosillan ja toimii varasuojana PJ-keskuksen sisäisissä vioissa. Pienjännitekeskuksen pääkatkaisija suojaa ensisijaisesti PJ-keskuksen sisäisen kiskoston ja toimii varasuojana keskuksen PJ-johtolähtöjen alun vioissa.

Suojien hidastusten suhteen tarkasteltavat pienjännitekeskukset voidaan jakaa kahteen päätyyppiin:

1) samassa lähdössä yksi jakelumuuntaja ja yksi pienjännitepääkeskus
2) samassa lähdössä kaksi jakelumuuntajaa ja kaksi pienjännitepääkeskusta.

Tapauksessa 1) suojauksen toimimisesta aiheutuva jakelukeskeytys koskee aina koko pienjännitekeskusta. Tämän vuoksi vika voidaan laukaista niin KJ-katkaisijalla kuin PJ-keskuksen katkaisijalla. Näissä tilanteissa on tärkeintä rajata vikavirran aiheuttamia vahinkoja vikapaikassa, ja suojat asetellaan toimimaan mahdollisimman nopeasti ilman aikaporrastusta suojien välillä.

Tapauksessa 2) KJ-katkaisijan toimiminen aiheuttaa jakelukeskeytyksen molempiin pienjännitepääkeskuksiin, vaikka vain toinen keskuksista vikaantuisi. Tässä tapauksessa PJ-keskuksen pääkatkaisijan on toimittava ennen KJ-katkaisijaa, joka toimii PJ-katkaisijan varasuojana. Keskijännitekatkaisijan laukaisevien releiden toimintaa on siis hidastettava PJ-katkaisijan laukaisukojeistoon nähden.

Tapauksessa 2) pienjännitekeskuksen pääkatkaisija ei saa toimia toisen pienjännitekeskuksen viassa, koska se aiheuttaa myös vikaantumattomaan keskukseen jakelukeskeytyksen. Laukaisun voi aiheuttaa keskukseen liitettyjen oikosulkumoottorien toisen keskuksen vikaan syöttämä alkuoikosulkuvirta, joka kuitenkin vaimenee noin 0,1 sekunnin aikavakiolla. Vir-

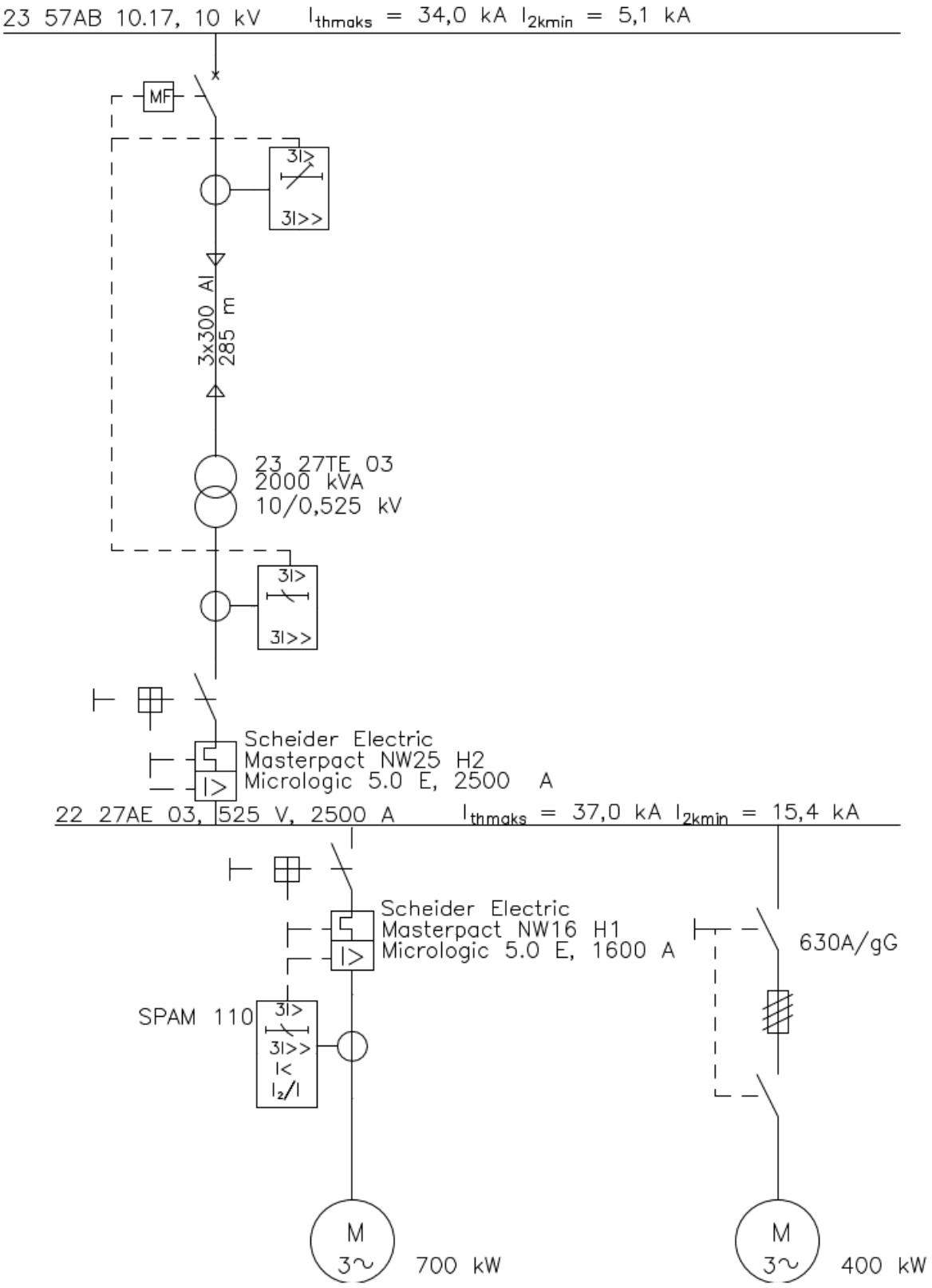
helaukaisu voidaan estää riittävän suurella pääkatkaisijan pikalaukaisuportaan virta-asettelulla. Pikalaukaisuporras tulisi asetella tarkasteltavissa 500 V:n ja 2 500 A:n keskuksissa vähintään 3,75-kertaiselle keskuksen nimellisvirralle ja 690 V:n ja 3 000 A:n keskuksissa vähintään 3,5-kertaiselle keskuksen nimellisvirralle. Arvot perustuvat liitteen 3 laskelmaan.

5.4.2 Toteutuneet suojausasettelut ja korjausehdotukset

Alla on tarkasteltu esimerkkinä yksityiskohtaisesti yhden kummankintyyppisen pienjännitepääkeskuksen suojausasettelut. Esimerkkinä yhden pienjännitepääkeskuksen ja yhden jakelumuuntajan tapauksesta on tarkasteltu keskusta 22 27AE 03. Esimerkkinä kahden pienjännitepääkeskuksen ja kahden jakelumuuntajan tapauksesta on tarkasteltu keskuksia 23 44AD 14 ja 23 44AD 15.

Yhden pienjännitepääkeskuksen lähtö

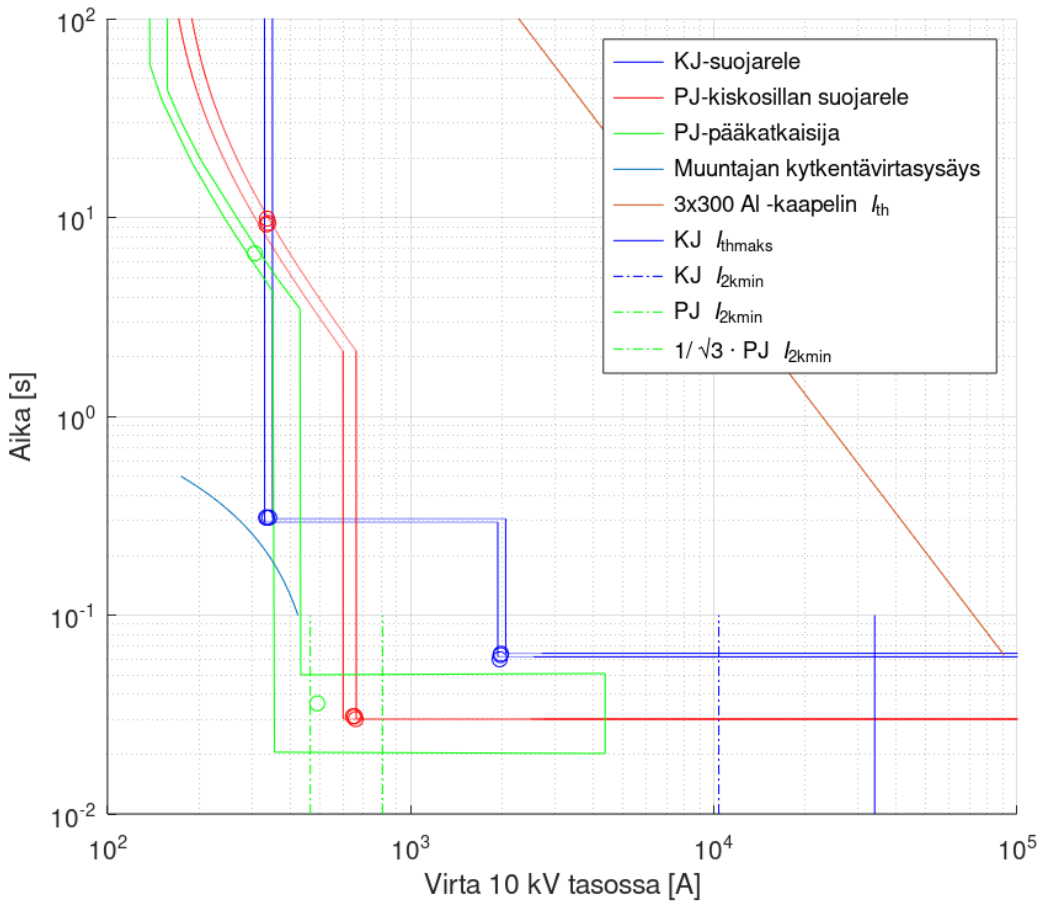
Keskusta 22 27AE 03 syötetään 10 kV:n kojeiston 23 57AB10 kentästä 17. Keskuksen suurin sulakelähtö on 630 A:n gG-kahvasulakkeella suojattu ja suurin katkaisijalähtö 1 600 A:n ilmakatkaisimella suojattu. Sulakelähdön kuormana on 400 kW:n oikosulkumoottori ja katkaisijalähdöllä 700 kW:n oikosulkumoottori. Keskuksen syöttö, suurimmat kuormat, oikosulkuvirrat ja suojalaitteet on esitetty seuraavan sivun kuvassa 5.3.



Kuva 5.3 Tarkasteltavan keskuksen 22 27AE03 syöttö, suurimmat kuormat ja suojalaitteet sekä suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirrat verkon eri pisteissä.

Keskuksen syötön suojaus on toteutettu tarkasteltavalle verkolle tyypilliseen tapaan kahdella releellä, joista toisen virtamuuntajat ovat 10 kV:n kojeistossa ja toisen muuntajan PJ-napojen välittömässä läheisyydessä. Keskijännitekojeistosta mittaava rele on kaksiportainen vakioaikaylivirtarele, ja alajännitepuolelta mittaavan releen alempi porras on käänteisaikatoimintainen ja ylempi vakioaikatoimintainen. Alajännitepuolen releen vakioaikaportaan toiminta vaatii myös PJ-keskuksen valokaarisuojan havahtumisen. Releiden mallit ja asettelut löytyvät liitteestä 2.

Syötön suojareleiden ja PJ-pääkatkaisijan toiminta-aikakäyrät on piirretty kuvaan 5.4 redusoituna 10 kV:n jännitetasoon. Kuvaan on merkitty myös suurimmat vikavirrat tuottavan kytkentätilanteen yhden sekunnin oikosulkuvirran terminen ekvivalentti I_{thmaks} ja pienimmät vikavirrat tuottavan kytkentätilanteen kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{2kmin} molemmissa jännitetasoissa sekä muuntajan ensiössä näkyvä pienin alajännitepuolen vikavirta $1/\sqrt{3}\cdot I_{\mathrm{2kmin}}$. Lisäksi kuvaan on merkitty relekojeistusten tulokset ja muuntajaa syöttävän kaapelin oikosulkukestoisuus. Näiden ohella kuvaan on merkitty 10/0,525 kV:n muuntajaan syöttävän kaapelin terminen kestovirta I_{th} yhtälön 4.7 mukaisesti ja muuntajan kytkentävirtasysäys yhtälön 4.8 mukaisesti mallinnettuna. Kaapeli on PVC-eristeinen 300 mm^2 alumiinikaapeli, ja muuntaja on 2 000 kVA:n öljyeristeinen jakelumuuntaja. Virtasysäyksen aikavakiona on käytetty taulukon 4.5 mukaista arvoa 0,45. Sysäysvirran huippuarvon ja nimellisvirran suhteeksi on interpoloitu 6,5 taulukosta 4.6 muuntajan nimellistehon perusteella.



Kuva 5.4 Keskuksen 22 27AE03 syötön suojareleiden toimintakarakteristikat 10 kV:n jännitetasoon redusoituna. Lisäksi kuvaan on merkitty jakelumuuntajan kytkentävirtasysäys ja muuntajaa syöttävän kaapelin terminen kuormitettavuus. Ympyröillä kuvaan on merkitty releiden toiminta-arvot relekojeistuksessa.

Kuvan 5.4 perusteella tämän lähdön suojausasettelut toimivat tavoitteiden mukaisesti. Pienjännitepääkatkaisija ja kiskosillan suojareleen molemmat portaat havahtuvat myös pienimmällä vikavirralla. KJ-suojareleen alempi (I>) porras havahtuu pienimmällä KJ-puolella näkyvällä pienjännitepuolen oikosulkuvirralla toimien siten myös PJ-puolen varasuojana. Kaapelin oikosulkukestoisuus on riittävä, koska katkaisijan toimintaviiveelle jää marginaalia yli 300 millisekuntia.

Keskukseen liitettyjä kuormia tarkasteltiin samaan tapaan 500 V:n jännitetasossa. Keskuksen lähtöjen suojalaitteiden toimintakarakteristikoita on verrattu syöttökentän ilmakatkaisijan karakteristikaan. Pääkatkaisijan suurimpien lähtöjen katkaisijoiden asettelut on esitetty

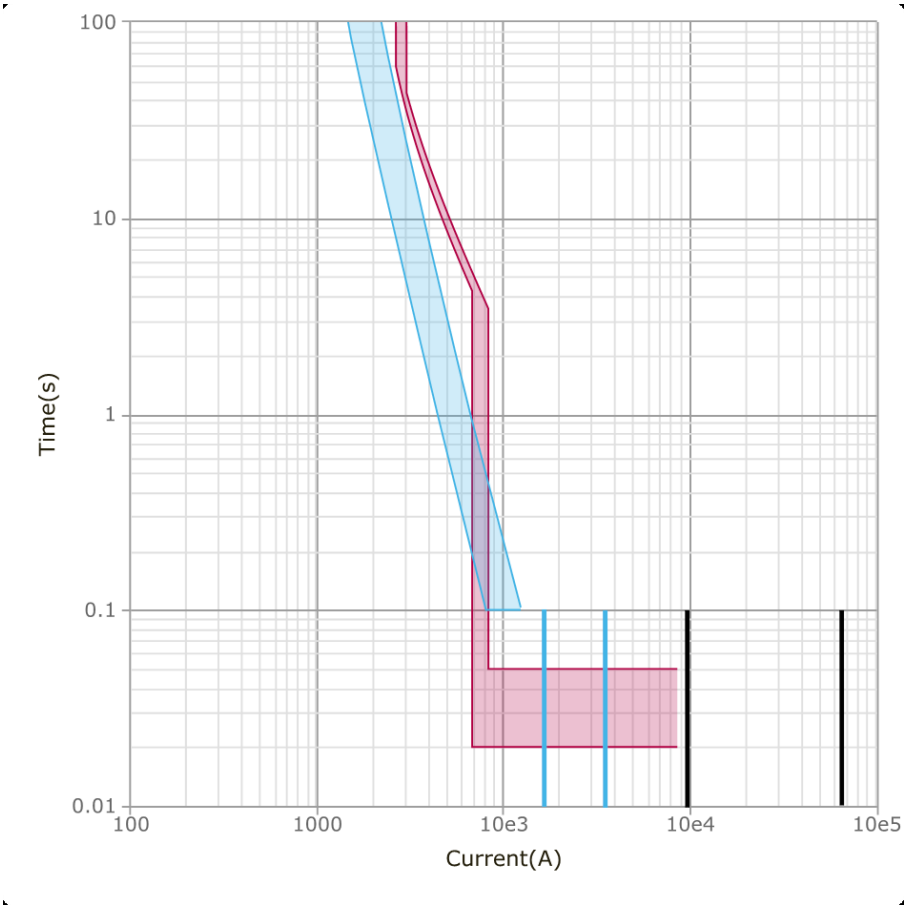
taulukossa 5.1. Kuvassa 5.5 on esitetty 630 A:n gG-sulakkeen ja pääkatkaisijan selektiivisyyskäyrästö ja kuvassa 5.6 moottorilähdön katkaisijan ja pääkatkaisijan selektiivisyyskäyrästö.

Taulukko 5.1 Keskuksen 22 27AE03 katkaisijoiden nykyiset asettelut.

	Ylikuormitusporras (L)	Hidastettu porras (S)	Pikalaukaisu (Ii)
Pääkatkaisija	2 500 A, asettelu 1 Tr = 1 s	20 000 A, asettelu 8 Tsd = 0.2 s	7 500 A, asettelu 3
Lähtöjen 03 ja 04 katkaisijat	1 600 A, asettelu 1 Tr = 0.5 s	16 000 A, asettelu 10 Tsd = 0.3 s	12 800 A, asettelu 8

Taulukosta havaitaan, että pikalaukaisuporras on aseteltu toimimaan pienemmällä virralla kuin hidastettu porras. Hidastettu porras ei siis vaikuta katkaisijan toimintaan, koska pikalaukaisuporras toimii nopeammin ja pienemmällä virralla.

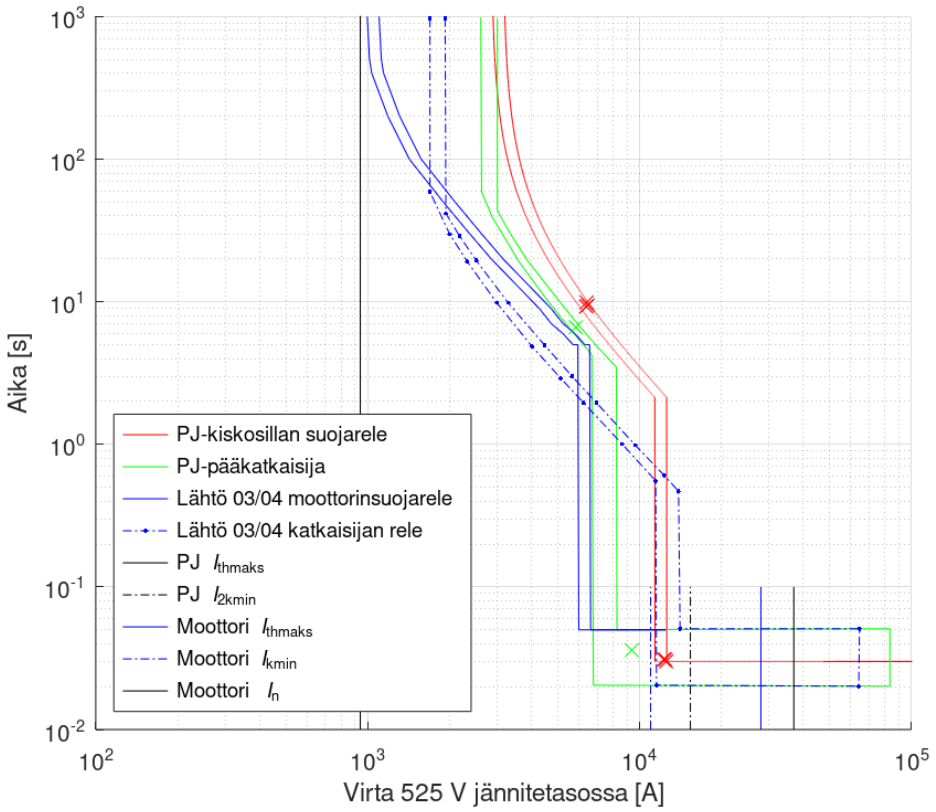
Kuvassa 5.5 on esitetty 630 A:n gG-sulakkeen ja pääkatkaisijan selektiivisyyskäyrästö.



Kuva 5.5 Pääkatkaisijan ja 630 A:n gG-sulakkeen selektiivisyyskäyrästö. Pääkatkaisija kuvassa punaisella ja sulake sinisellä. Pystysuorat viivat ovat suurimpia ja pienimpiä oikosulkuvirtoja verkon eri pisteissä. KJ-kojeiston oikosulkuvirrat on merkitty mustalla ja PJ-keskuksen sinisellä. (Muokattu lähteestä: Schneider Electric, 2020)

Kuvasta havaitaan, että suojaus ei ole selektiivinen, koska sulakkeen ja katkaisijan käyrät leikkaavat toisensa ja leikkauspiste on vasemmalla kaikkiin keskuksen oikosulkuvirtoihin verrattuna. Lähdöllä tapahtuvassa oikosulkutilanteessa syöttökentän katkaisija toimii ennen sulaketta, koska sen käyrä on alempana kuin sulakkeen käyrä ja vasemmalla oikosulkuvirtoihin verrattuna. Sulakkeen takana on sprinklerivesipumppu, joka on turvalaite. Turvalaitteen syöttö ei saa vaarantua muiden laitteiden vikatilanteissa, minkä vuoksi on tarkasteltava muut lähdöt ja varmistettava, että ne eivät laukaise keskuksen syöttökatkaisijaa.

Suurimmat katkaisijalähdöt 23 27AE03.03 ja 23 27AE03.04 ovat keskenään samanlaiset. Niiden selektiivisyyskäyrästöt on esitetty kuvassa 5.6. Lähdön katkaisijaa ohjaa katkaisijan elektroninen laukaisukojeisto ja erillinen moottorinsuojarele. Laukaisukojeisto on merkitty kuvaan sinisellä katkoviivalla ja moottorinsuojarele yhtenäisellä viivalla. Kuvaan on merkitty moottorinsuojareleen toimintakarakterista niin sanotusta kylmästä tilasta alkaen eli ilman vikaa edeltävää kuormitusta. Ylikuormitusalueella suoja toimii siis merkittyä nopeammin, riippuen vikaa edeltävästä kuormituksesta. Pikalaukaisuportaan toiminta-aikaan edeltävä kuormitus ei vaikuta.



Kuva 5.6 Suurimpien katkaisijalähtöjen 23 27AE03.03 ja 23 27AE03.04 selektiivisyyskäyrästöt. Katkoviivalla kuvaan on merkitty lähtökatkaisijan releen toiminta ja yhtenäisellä viivalla moottorinsuojareleen toiminta. Pystyviivat kuvaavat oikosulkuvirtoja verkon eri pisteissä kuvan merkintöjen mukaan.

Kuvasta 5.6 havaitaan lähdön katkaisijan ja pääkatkaisijan toiminnan olevan selektiivistä ylikuormitusalueella ja epäselektiivistä oikosulkutilanteessa. Tämä havaitaan siitä, että lähdön katkaisijan ja pääkatkaisijan käyrät eivät leikkaa toisiaan alle 5 000 A:n virralla. Suuremmilla, oikosulussa esiintyvillä virroilla katkaisijoiden toiminta-aikakäyrät ovat päällekkäin eli ne toimivat samassa ajassa. Suurimmat oikosulkuvirrat aiheuttavassa kytkentätilanteessa kaikki suojat havahtuvat moottorilähdön hännillä tapahtuvassa viassa, koska niiden käyrät ovat vasemmalla moottorin suurimpaan oikosulkuvirtaan verrattuna. Pienimmät vikavirrat aiheuttavassa kytkentätilanteessa PJ-kiskosillan suojareleen pikalaukaisuporras ei havahdu, mutta muut suojat havahtuvat, koska moottorin pienimpään oikosulkuvirtaan verrattuna pikalaukaisuporras on kuvaajassa oikealla ja muut vasemmalla. Kytkentätilanteesta riippumatta suojista toimivat pääkatkaisijan laukaisukojeiston ja moottorinsuojareleen pikalaukaisuporras. Kiskosillan suojarele ei toimi, koska sen pikalaukaisuporras vaatii myös valokaarisuojan havahtumisen.

Korjausehdotukset

Tarkasteltavaa keskusta syöttävän KJ-kojeiston suojareleen ja kiskosuojan asettelussa ei havaittu ongelmia, joten niihin liittyen ei esitetä korjausehdotuksia. Keskuksen katkaisijalähtöjen havaittiin toimivan epäselektiivisesti keskuksen pääkatkaisijaan nähden. Seuraavaksi esitettävissä korjausehdotuksissa keskitytään näihin laitteisiin.

Keskuksen oikosulkusuojaus virtaselektiivisesti ei ole mahdollista, koska pienimmät vikavirrat keskuksessa sattuvassa viassa ovat pienempiä kuin suurimmat vikavirrat lähtöjen 03 tai 04 hännillä. Myöskään energiaselektiivisyys ei ole mahdollista pääkatkaisijan lähtöjen katkaisijoiden välillä, koska katkaisijat ovat virtaa rajoittamatonta tyyppiä (Schneider Electric, 2009). Katkaisijoiden toimintaa on kuitenkin mahdollista hidastaa ja pääkatkaisija lukita lähtöjen 03 ja 04 suojien havahtuessa (Schneider Electric, 2012).

Seuraavan sivun kuvaan 5.7 on piirretty keskuksen katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästöt seuraavien asettelumuutosten jälkeen:

- Pääkatkaisijan hidastetun (S) portaan virta-asettelu nostetaan PJ-kiskosuojan pikalaukaisuportaan tasolle ja sitä hidastetaan 100 millisekuntia.
- Pääkatkaisijan pikalaukaisuporras (I) asetetaan suurimmalle asetteluarvolleen.
- Lähtöjen 03 ja 04 katkaisijoiden releiden pikalaukaisuportaan (I) virta-asettelu lasketaan lähdön pienintä vikavirtaa pienemmäksi ja moottorinsuojareleen asettelua suuremmaksi.
- Lähtöjen 03 ja 04 katkaisijoiden ylikuormitusportaan (L) virta-asettelu lasketaan moottorin syöttökaapelin kuormitettavuuden asettamiin rajoihin, mutta kuitenkin moottorisuojan asettelua suuremmaksi.

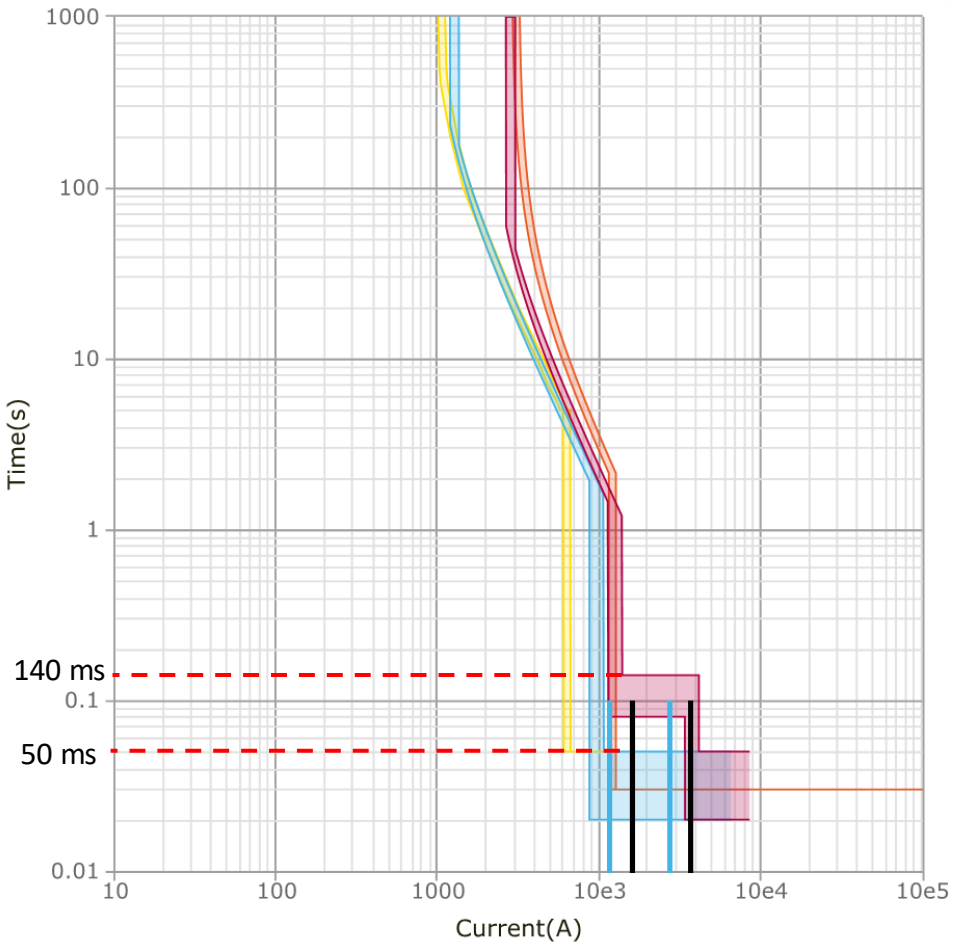
Näillä muutoksilla katkaisijoiden välinen toiminta on aikaselektiivistä eikä lukituksia tarvita. Asettelumuutoksia vastaavat asetteluarvot ovat taulukon 5.2 mukaiset.

Taulukko 5.2 Keskuksen 22 23AE03 korjausehdotusten mukaiset asettelut.

	Ylikuormitusporras (L)	Hidastettu porras (S)	Pikalaukaisu (I)
Pääkatkaisija	2 500 A, asettelu 1 Tr = 1 s	12 500 A, asettelu 5 Tsd = 0.1 s, I^2t = OFF	37 500 A, asettelu 15
Lähtöjen 03 ja 04 katkaisijat	1 120 A, asettelu 0,7 Tr = 4 s	11 200 A, asettelu 10 Tsd = 0 s, I^2t = OFF	9 600 A, asettelu 6

Taulukosta havaitaan, että lähtöjen 03 ja 04 katkaisijoiden pikalaukaisuporras on aseteltu toimimaan pienemmällä virralla kuin hidastettu porras. Hidastettu porras ei siis vaikuta näiden katkaisijoiden toimintaan, koska pikalaukaisuporras toimii nopeammin ja pienemmällä virralla.

Asetteluja vastaava katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästö on esitetty seuraavan sivun kuvassa 5.7.



Kuva 5.7 PJ-pääkatkaisijan sekä lähtöjen 03 ja 04 katkaisijoiden selektiivisyyskäyrästö asettelumuutosten jälkeen. Syöttökatkaisija on kuvassa punaisella, lähtöjen katkaisijoiden suojareleet sinisellä ja moottorinsuojarele keltaisella. Oranssilla kuvaan on merkitty PJ-kiskoston suojarele. Mustilla pystyviivoilla kuvaan on merkitty suurin ja pienin oikosulkuvirta keskuksessa ja sinisillä lähtöjen 03 ja 04 moottorikaapelin hännillä. (Muokattu lähteestä: Schneider Electric, 2020)

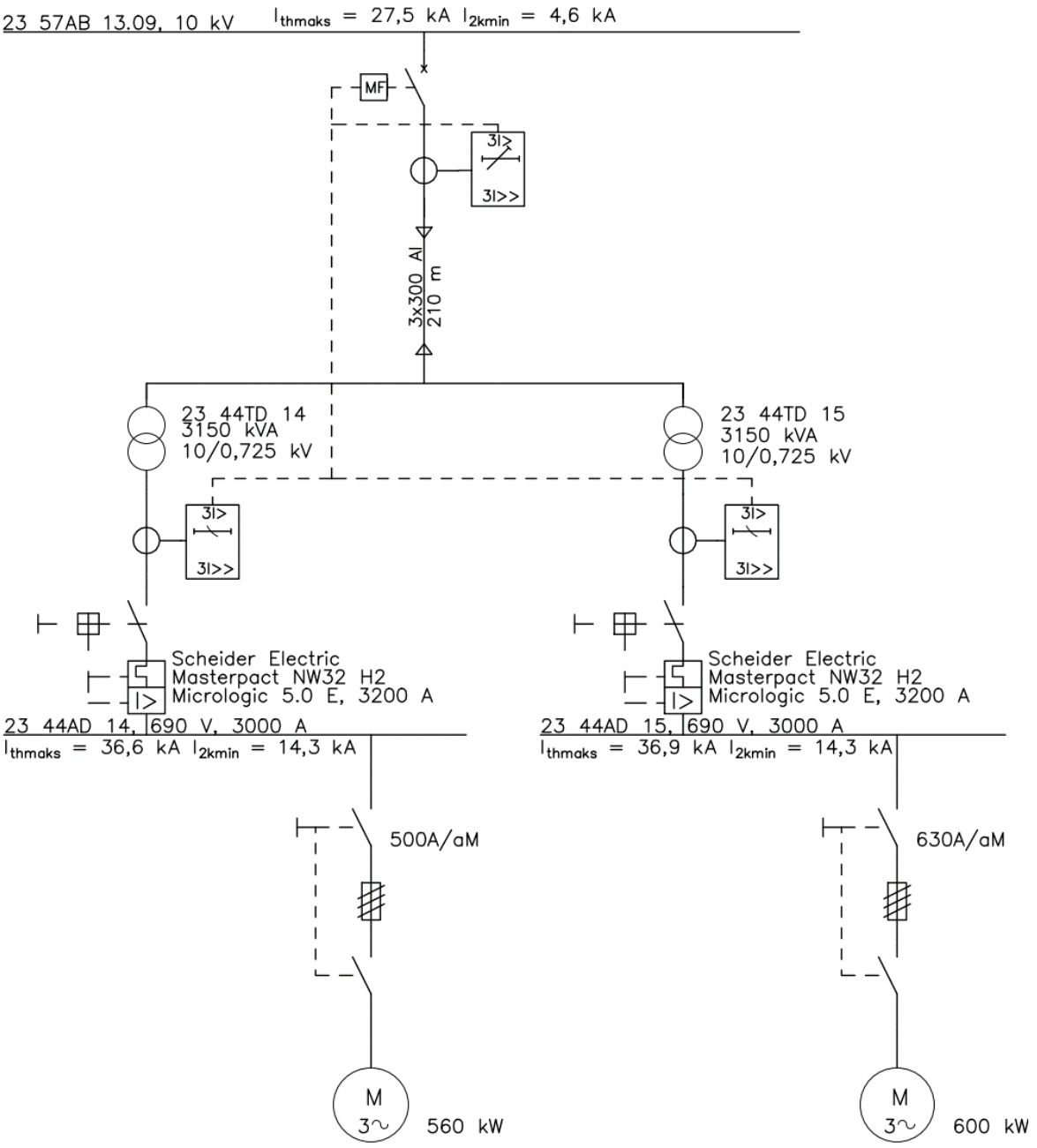
Kuvasta havaitaan suojauksen olevan aikaselektiivinen niin ylikuormitus- kuin oikosulkusuojauksen alueella, kun vikavirta on alle 33 kA. Tätä suuremmilla virroilla pääkatkaisijan pikalaukaisu saattaa toimia ennen lähdön katkaisijaa, mikä havaitaan kuvasta siitä, että suojien käyrät ovat päällekkäin. Käytännössä näin suuri vikavirta tarkoittaa keskuksessa tai moottorikaapelin alussa tapahtuvaa 3-vaiheista oikosulkua. Muissa vikatilanteissa vikavirta on pienempi ja suojaus toimii selektiivisesti. Muutoksista johtuen keskuksessa tapahtuvan vian poiskytkentäaika kasvaa aiemmasta alle 50 millisekunnista 140 millisekuntiin, jos valokaarisuoja ei havaitse vikaa.

Lukituksia käyttämällä pääkatkaisijan toimintaa voitaisiin nopeuttaa vioissa, joissa moottorilähdön katkaisija ei havahdu, eli esimerkiksi keskuksessa sattuvassa viassa. Tällöin hidas-

tettu porras toimisi noin 80 millisekunnissa lukituksettoman asettelun 140 millisekunnin sijaan (Schneider Electric, 2012). Moottorilähdön katkaisijan havahtuessa pääkatkaisijan toimintaa hidastettaisiin samalla tavalla kuin ilman lukituksia, eli selektiivisyyskäyrästö vastaisi kuvaa 5.7.

Kahden pienjännitepääkeskuksen lähtö

Keskuksia 23 44AD 14 ja 23 44AD 15 syötetään keskijännitekojeiston 23 57AB 13 kentästä 09. Kummankin keskuksen nimellisvirta on 3 000 A ja -jännite 690 V. Molempien jakelumuuntajien muuntosuhteeksi on asetettu 10/0,725 kV. Kuormitus koostuu moottorikäytöistä, joiden suojaus on toteutettu sulakkeen, lämpöreleen ja kontaktorin yhdistelmällä. Katkaisijalähtöjä keskuksissa ei ole lainkaan. Suurimpana kuormana keskuksessa AD14 on 400 kW:n oikosulkumoottori, jonka suojana on 500 A:n aM-sulake ja lämpörele. Keskuksessa AD15 suurimpana kuormana on 560 kW:n oikosulkumoottori, jonka suojana on 630 A:n aM-sulake ja lämpörele. Keskusten syöttö ja suurimmat kuormat on esitetty seuraavan sivun kuvassa 5.8.

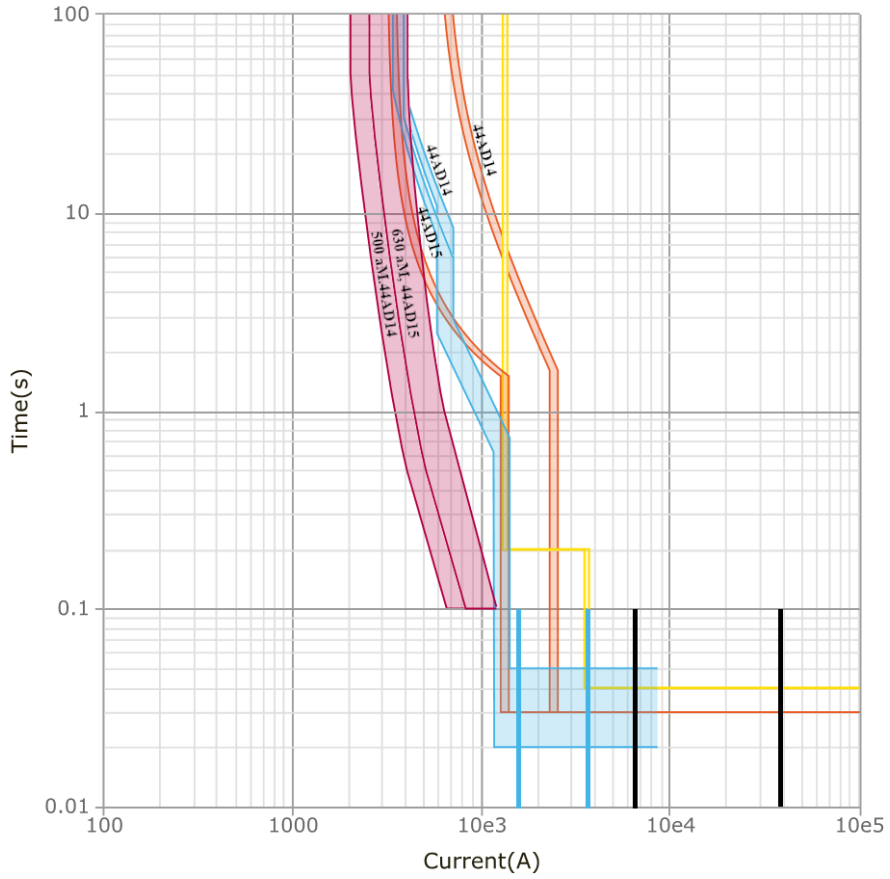


Kuva 5.8 Tarkasteltavien pienjännitekeskusten syöttö ja suurimmat kuormat sekä suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirrat.

Kuvasta havaitaan, että keskuksen syötön suojaus on toteutettu tarkasteltavalle verkolle tyypilliseen tapaan keskijännitelähtöön ja pienjännitepääkeskukseen sijoitetuilla releillä, jotka laukaisevat KJ-katkaisijan. Keskijännitelähdön releen virtamuuntajat ovat 10 kV:n kojeistossa ja pienjännitepääkeskuksen releen virtamuuntajat jakelumuuntajan PJ-napojen välittömässä läheisyydessä. Keskijännitekojeistosta mittaava rele on kaksiportainen vakioaikaylivirtarele, ja alajännitepuolelta mittaava releen alempi porras on käänteisaikatoimintainen ja

ylempi vakioaikatoimintainen. Alajännitepuolelle asennetun releen vakioaikaportaan laukaisu vaatii myös PJ-kojeiston valokaarireleen havahtumisen. Releiden mallit ja asettelut löytyvät liitteestä 2.

Suojien toiminta-aikakäyrät on piirretty kuvaan 5.9. Kuvaan on myös merkitty suurin ja pienin oikosulkuvirta pienjännitepääkeskuksissa ja keskijännitekojeistossa. Pienjännitesuojalaitteiden käyrät on piirretty laitevalmistajan 690 V:lle ilmoittamien toiminta-aikojen mukaan. KJ-kojeiston suojareleen käyrä on redusoitu pienjännitepuolelle jakelumuuntajaan 10/0,725 kV:n muuntosuhteella. Keskijännitekojeiston vikavirrat on merkitty mustalla ja pienjännitepääkeskuksen sinisellä. Jakelumuuntajaa syöttävän kaapelin oikosulkukestoisuutta ei ole kuvaan merkitty, koska sen todettiin olevan riittävä yhden PJ-pääkeskuksen esimerkkitarkastelussa. Kaapelityyppi ja vian poiskytkentäaika ovat yhtä suuret kuin yhden PJ-pääkeskuksen esimerkissä ja suurin oikosulkuvirta pienempi, joten kaapelin oikosulkukestoisuus on riittävä.



Kuva 5.9 Keskusten 23 44AD 14 ja 23 44AD 15 sekä niiden syötön suojien selektiivisyyskäyrästö. Pystysuorat viivat kuvaavat suurimpia ja pienimpiä oikosulkuvirtoja verkon eri osissa. KJ-kojeiston oikosulkuvirrat on merkitty mustalla ja PJ-keskusten sinisellä. Keltaisella kuvaan on merkitty KJ-lähdön suojarele, oranssilla PJ-kiskonsuoja, sinisellä PJ-pääkatkaisija ja punaisella PJ-keskuksen suurin sulake. (Muokattu lähteestä: Schneider Electric, 2020)

Kuvasta 5.9 havaitaan AD15-keskuksen pääkatkaisijan, PJ-kiskosuojan ja KJ-lähdön suojareleen toiminta-aikakäyrien olevan päällekkäin. Kiskosuojan pikalaukaisuportaan havahtuminen ei kuitenkaan aiheuta laukaisua, jollei myös PJ-keskuksen valokaarisuoja havahdu. KJ-lähdön suojarele on aikaporrastettu PJ-pääkatkaisijan pikalaukaisuportaaseen nähden pienimmällä keskuksen oikosulkuvirralla, joten käyrien leikkaaminen ei aiheuta virhelaukaisua. AD15-keskuksen 630 A:n aM-sulakkeella suojatulla lähdöllä sattuva vika saattaa aiheuttaa keskuksen pääkatkaisijan virhelaukaisun, koska sulakkeen ja katkaisijan toimintakäyrät leikkaavat hieman.

AD14-keskuksen osalta tilanne on vastaava KJ-lähdön suojareleen ja pääkatkaisijan kesken. Keskuksen suurin sulake on kuitenkin pienempi ja selektiivinen pääkatkaisijan kanssa. Pienimmät vikavirrat tuottavassa kytkentätilanteessa kiskosuojan pikalaukaisuporras ei kuitenkaan havahdu, mikä estää valokaarisuojan toiminnan.

Suojauksen toiminta-ajan ja varasuojuksen näkökulmasta nykyiset asettelut ovat hyvät. Kaikki suojat toimivat alle SFS 6000 -standardin osassa 4-41 vaaditussa 5 sekunnissa pienimmällä PJ-pääkeskuksessa esiintyvällä vikavirralla. Vikojen aiheuttamat vauriot rajautuvat pieniksi, koska vaikka valokaarisuoja ei havaitsisi vikaa, pääkatkaisijoiden pikalaukaisuportaat toimivat myös pienimmällä oikosulkuvirralla poistaen vian noin 50 millisekunnissa.

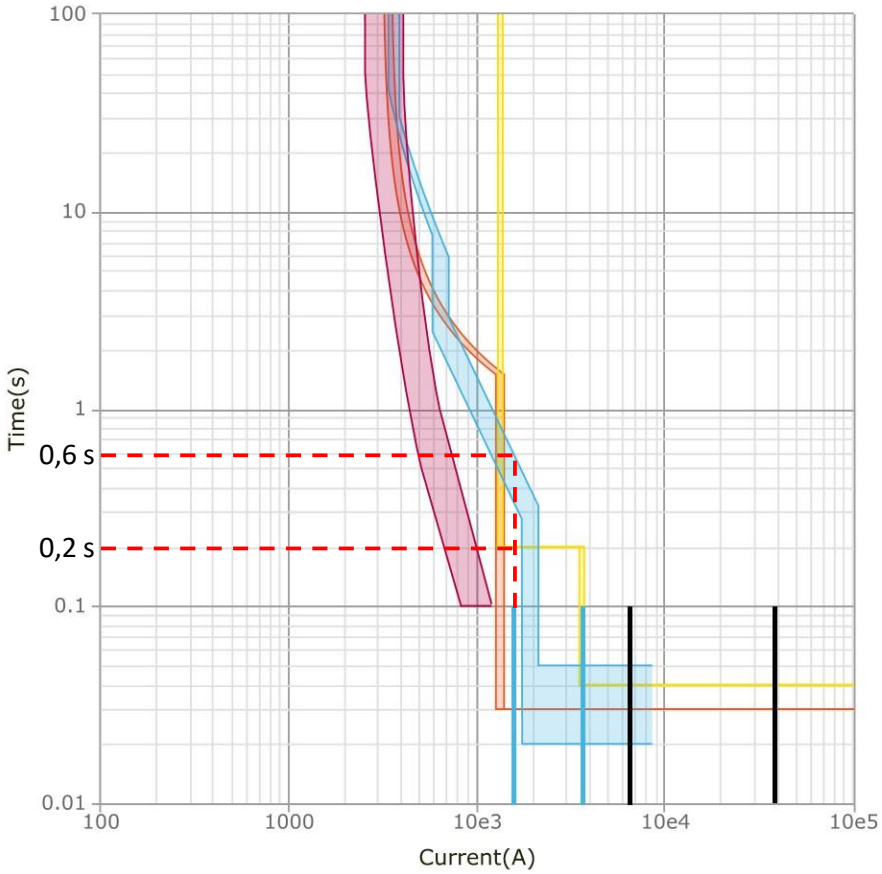
Korjausehdotus

AD14-keskuksen suojaus toimii tavoitteiden mukaisesti, joten siihen ei esitetä korjausehdotuksia. AD15-keskukselle esitetään suojausasettelut, joissa on huomioitu selektiivisyys 630 A:n aM-sulakkeen kanssa nostamalla pääkatkaisijan pikalaukaisuportaan virta-asettelua. Pääkatkaisijan uudet asettelut on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 Keskuksen AD15 pääkatkaisijan korjausehdotuksen mukaiset asettelut.

	Ylikuormitusporras (L)	Hidastettu porras (S)	Pikalaukaisu (I)
Pääkatkaisija	3 200 A, asettelu 1 Tr = 0,5 s	6 400 A, asettelu 2 Tsd = 0.1 s, I^2t = ON	19 200 A, asettelu 6

Tätä korjausehdotusta vastaava AD15-keskuksen selektiivisyyskäyrästö on esitetty kuvassa 5.10.



Kuva 5.10 Korjausehdotusten mukainen AD15-keskuksen selektiivisyyskäyrästö. Pystysuorat viivat kuvaavat suurimpia ja pienimpiä oikosulkuvirtoja verkon eri osissa. KJ-kojeiston oikosulkuvirrat on merkitty mustalla ja PJ-keskusten sinisellä. Keltaisella kuvaan on merkitty KJ-lähdön suojarele, oranssilla PJ-kiskonsuoja, sinisellä PJ-pääkatkaisija ja punaisella PJ-keskuksen suurin sulake. (Muokattu lähteestä: Schneider Electric, 2020)

Kuvasta 5.10 havaitaan, että pääkatkaisijan laukaisukojeiston toiminta-aika on 630 A:n aM-sulakkeen toiminta-aikaa suurempi oikosulkuvirtojen alueella. Sulakkeen takana sattuvassa viassa sulake sulaa nopeammin kuin pääkatkaisija havahtuu, jolloin suojaus on selektiivinen. Keskuksen sisällä sattuvissa vioissa valokaarisuoja ja PJ-kiskostosuoja toimivat laukaisten KJ-katkaisijan samoin kuin aiemminkin.

Jos valokaarisuoja ei havaitse valokaarta, jää vian poistaminen pääkatkaisijalle tai KJ-lähdön suojareleelle. Pienimmät vikavirrat aiheuttavassa kytkentätilanteessa näistä nopeammin toimii kolmivaiheisessa oikosulussa KJ-lähdön suojarele noin 0,2 sekunnissa. Muissa vikatilanteissa jakelumuuntajan ensiössä näkyvät toision vikavirrat eivät riitä havahduttamaan KJ-suojarelettä, jolloin varasuojana toimii PJ-pääkatkaisija noin 0,6 sekunnissa. Suurimmat vikavirrat aiheuttavassa kytkentätilanteessa PJ-pääkatkaisijan pikalaukaisuporras toimii noin

50 millisekunnissa kuten aikaisemminkin. Nämäkin toiminta-ajat täyttävät SFS 6000 -standardin osan 4-41 vaatimuksen, mutta vikojen vaurioiden rajoittamisessa valokaarisuojan toiminta korostuu keskuksessa sattuvissa vioissa.

Yhteenveto toteutuneista suojausasetteluista ja korjausehdotuksista

Verkoston suojausasettelut toteutuvat tavoitteiden mukaisesti, kun tarkastellaan pienjännitekeskuksia syöttäviä keskijännitekojeistoja. Pienjännitekeskusten sisällä tavoitteisiin ei päästä: pääkatkaisijan toiminta ei ole selektiivistä lähtöjen katkaisijoiden tai yli 500 A:n sulakkeiden kanssa. Verkoston suojaus on kuitenkin kattavaa ja nopeaa näissäkin verkon osissa.

Pienjännitekeskusten pääkatkaisijan ja lähtöjen katkaisijoiden välisen selektiivisyyden ratkaisuksi esitetään pääkatkaisijan laukaisukojeiston hidastetun portaan käyttämistä pikalaukaisun sijaan. Tällöin katkaisijoiden välinen toiminta on aikaselektiivistä lähdöllä sattuvassa viassa. Keskuksessa sattuvilta vioilta suojaa valokaarisuojan ja PJ-kiskoston suojareleen muodostama kokonaisuus samoin kuin ennen muutosta. Valokaarisuojan varasuojauksessa pääkatkaisijan toiminta-aika kasvaa pikalaukaisuportaan 50 millisekunnista hidastetun portaan 140 millisekuntiin.

Pienjännitekeskusten pääkatkaisijan ja lähtöjen suurimpien sulakkeiden väliseen selektiivisyyteen esitetään ratkaisuksi pääkatkaisijan pikalaukaisuportaan asettelun kasvattamista, jolloin katkaisijan toiminta-aika on korkeintaan 630 A:n sulakkeen sulamisaikaa pidempi. Myös näillä asetteluilla keskuksessa sattuvilta vioilta suojaa valokaarisuojan ja PJ-kiskoston suojareleen muodostama kokonaisuus samoin kuin ennen muutosta. Valokaarisuojan varasuojauksessa suojauksen toiminta-aika kasvaa pienimmät oikosulkuvirrat aikaansaavassa kytkentätilanteessa noin 0,2 sekuntiin kolmivaiheisessa oikosulussa ja muissa oikosuluissa noin 0,6 sekuntiin. Suurimmat vikavirrat aikaansaavassa kytkentätilanteessa toiminta-ajat pysyvät ennallaan.

6 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää prosessiteollisuuden pienjännitekeskuksen selektiivisyyteen oleellisesti vaikuttavat seikat ja esittää toimintatapa selektiivisyyden tarkastelemiseksi pienjännitekeskusten ja muun verkon välillä. Selektiivisyyden lisäksi huomioitiin muut hyvän suojausjärjestelmän vaatimukset, kuten nopea toiminta, aukottomuus ja varasuojaus, sekä näiden selektiivisyydelle asettamat vaatimukset. Tapaustutkimuksessa toimintatapa jalkautettiin erään teollisuuslaitoksen verkkoon.

Teollisuuden pienjännitepääkeskuksen suojauksen haasteiksi havaittiin teollisuusverkossa esiintyvät suuret oikosulkuvirrat sekä lyhyet verkkopituudet suurella tehonsiirtokapasiteetilla. Lyhyen ja suurikapasiteettisen verkon vuoksi oikosulkuvirrat ovat lähes saman suuruisia eri puolilla verkkoa: oikosulkuvirtojen välille muodostuu suojareleillä hyödynnettävissä oleva ero vain muuntajien kohdalla siirryttäessä jännitetasosta toiseen. Edellä mainitusta syystä pienjännitepääkeskuksen sisäisessä selektiivisyydessä ei voida hyödyntää virtaselektiivisyyttä, vaan on turvauduttava suojien väliseen aikaporrastukseen, lukituksiin tai energiaselektiivisyyteen. Toisaalta suuret vikavirtatasot kasvattavat vian aiheuttamia vaurioita, mikä pakottaa mahdollisimman nopeaan suojaukseen rajoittaen aikaporrastuksen käytön lähinnä varasuojaukseen.

Menetelmänä teollisuuslaitoksen selektiivisyyden tarkasteluun suositellaan selektiivisyyskäyrästön käyttöä. Käyrästölle merkitään suojien toiminta-ajat virran funktiona sekä vikavirrat eri puolilla tarkasteltavaa verkkoa. Näiden tietojen perusteella käyrästöstä voidaan todeta suojalaitteiden välinen virta- ja aikaselektiivisyys, suojauksen kattavuus, aukottomuus sekä toiminta-aika yhdestä paikasta myös eri valmistajien tuotteiden välille. Käyrästöä tulkittaessa on huomioitava myös suojien väliset lukitukset ja energiaselektiivisyys, joita ei näe käyrästöstä. Lukitukset on selvitettävä tapauskohtaisesti asennuksen dokumentaatiosta, kuten piirikaavioista. Energiaselektiiviset ratkaisut rajoittuvat lähinnä saman valmistajan tuotteiden välille, joiden kohdalla on tutustuttava valmistajan dokumentaatioon, kuten selektiivisyystaulukoihin.

Tapaustutkimuksessa ei havaittu ongelmia keskijännite- ja pienjänniteverkon suojausjärjestelyjen välillä, mutta pienjännitepääkeskusten pääkatkaisija ja lähtöjen kojeet eivät toimi selektiivisesti keskenään. Muutoin myös pienjännitepääkeskuksen suojausjärjestelyt täyttivät hyvän suojausjärjestelmän vaatimukset. Suojaus on nopea, aukoton ja ylemmän portaan suojat toimivat alemman portaan suojien varasuojana. Ratkaisuksi epäselektiiviseen toimintaan

esitetään aikaporrastusta tai lukituksia pääkatkaisijoiden ja keskuslähtöjen etukojeiden välille. Ratkaisun yksityiskohdat ilmenevät tapaustutkimusluvusta (luku 5).

LÄHDELUETTELO

ABB (2022a) *Selectivity with Fuses, Upstream Fuse and Downstream Circuit-Breaker.* [verkkosivu]. [Viitattu 17.01.2022] Saatavilla: https://new.abb.com/low-voltage/solutions/selectivity/focus-on/selectivity-with-fuses.

ABB (2022b) *Selectivity with Fuses, Upstream Circuit-Breaker and Downstream Fuse.* [verkkosivu]. [Viitattu 17.1.2022] Saatavilla: https://new.abb.com/low-voltage/solutions/selectivity/focus-on/selectivity-with-fuses.

ABB (2022c) *SOC - Selected Optimised Coordination IEC Coordination Tables for Motor Protection.*

ABB (2012) *Technical Application Papers no.2 MV/LV Transformer Substations: Theory and Examples of Short-Circuit Calculation.*

ABB (2011) *Pienjännitekojeet, Esite OF1FI 11-09. Kahvasulakkeet, 2...1600 A.*

ABB (2010) *Distribution Automation Handbook Section 8.5 MV Feeder Short-Circuit Protection* . : ABB Oy.

ABB (2002) *SPAJ 141 C Yhdistetty Ylivirta- Ja Maasulkurele Käyttöohje Ja Tekninen Selostus.*

ABB SACE (2010) *Electrical Installation Handbook Protection, Control and Electrical Devices.* Bergamo, Italy: ABB SACE.

Elovaara J & Haarla L, (2011a) *Sähköverkot. I, Järjestelmätekniikka Ja Sähköverkon Laskenta.* Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.

Elovaara J & Haarla L, (2011b) *Sähköverkot. II, Verkon Suunnittelu, Järjestelmät Ja Laitteet.* Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.

Elovaara J & Laiho Y, (2007) *Sähkölaitostekniikan Perusteet.* Espoo: Otatieto.

Eronen P (2014) Tehtaan Keskijännitejakelun Selektiivisyystarkastelu. Tampereen teknillinen yliopisto.

Etto J (1998) Prosessisähköistyksenkunnossapito, osa 2. *Kunnossapito-Lehden Erikoisliite* 7(48): 3–4.

Hietalahti L (2013) *Teollisuuden Sähkökäytöt.* Tampere: Amk-kustannus oy Tammertekniikka.

Huotari K & Partanen J, (1998) *Teollisuusverkkojen Oikosulkuvirtojen Laskeminen.* Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

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

Jääskeläinen, J. (2022) Projekti-insinööri, Tarkasteltava teollisuuslaitos. Yksityinen kirjeenvaihto ja haastattelut 2021–2022.

Korpinen L (1998) *Sähkön siirto- ja jakeluverkot.* Teoksessa: Sähkövoimatekniikkaopus. 9–10.

Lakervi E & Partanen J, (2009) *Sähkönjakelutekniikka.* Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.

Mäkinen MJ (2009) *Prosessiteollisuuden Sähkö- Ja Automaatioasennukset.* Helsinki: Otava.

Missaghi K & Pyrhönen J, (1983) *Symmetriset Komponentit Ja Niiden Käyttö.* Lappeenranta.

Mörsky J (1992) *Relesuojaustekniikka.* Espoo: Otatieto.

Prysmian Group Finland Oy (2018) *Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit*. Saatavilla: https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf

Pöyry Oyj. (1995) *Sähkönjakelun periaatekuva*. [Sisäinen dokumentti]

Pöyry Finland Oyj. (2019) *Verkostolaskelmat*. [Sisäinen dokumentti]

Schneider Electric (2009) *Masterpact NW User Manual.*

Schneider Electric (2012) *User Manual Micrologic Control Units* .

Schneider Electric (2018) *Electrical Installation Guide.* : Schneider Electric.

Schneider Electric (2020) *Electrical Calculation Tools – Display t(i) curves.* Versio: 4.9.7. [verkkosivu]. [Viitattu: 7.5.2022, 10.5.2022, 12.5.2022, 19.5.2022 ja 27.5.2022]. Saatavissa: https://ect.se.com/

SFS 6000-1 (2017) *Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Perusperiaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 6000-4-41 (2017) *Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 6000-4-43 (2017) *Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

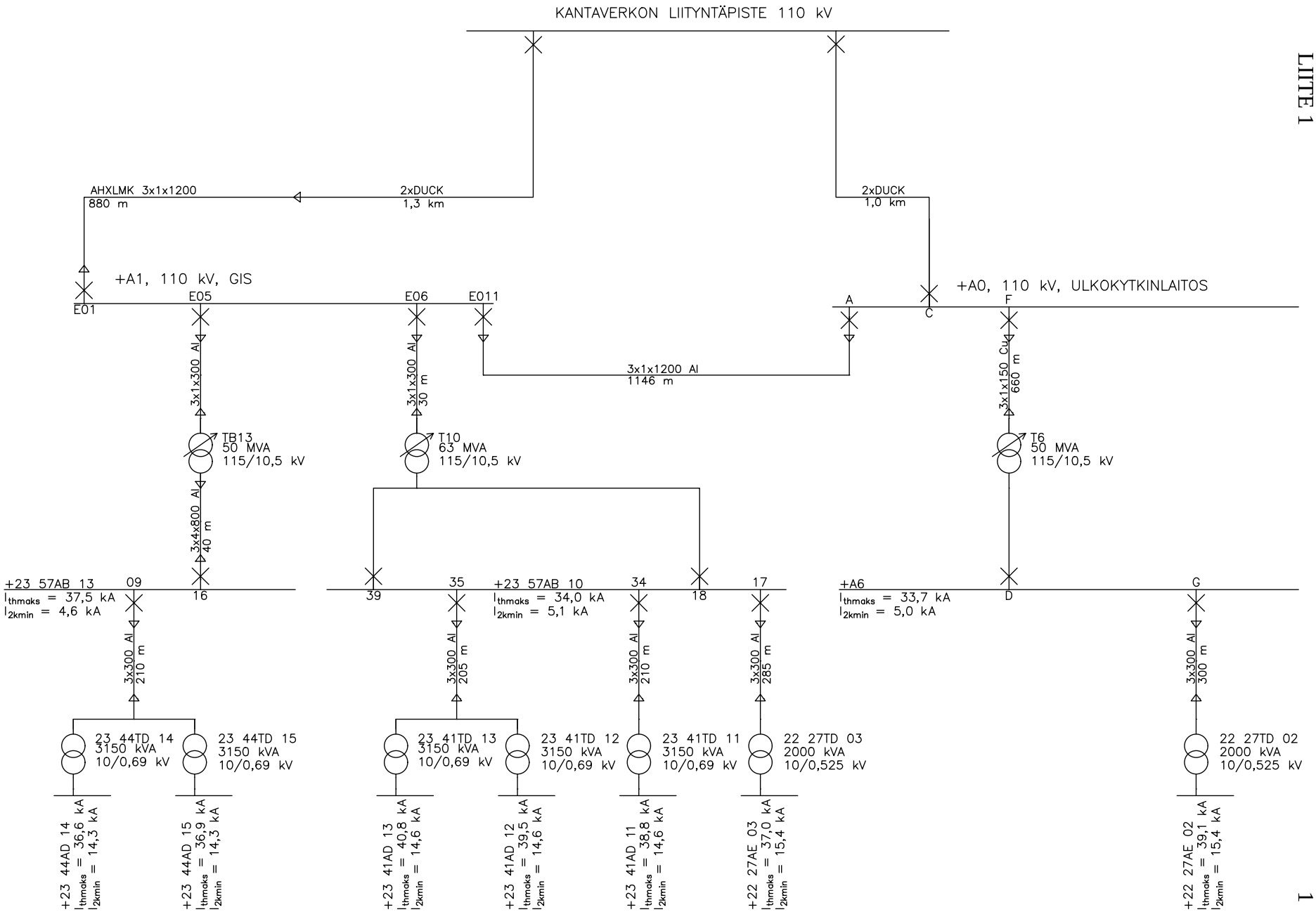
SFS 6000-5-52 (2017) *Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sähkötieto (2018) *ST 53.14 Ohjeet Perinteisten Sulakkeiden Valinnasta Ja Käytöstä, Alle 1000 V:N Sähköjärjestelmät.*

Sähkötieto (2015) *ST 53.45 Sulakkeeton Suojaus.* Espoo: Sähköinfo oy.

Takalo T (2021) *Moottorinohjauskeskuksen Suunnittelu*. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT.

Willman, J (2020) Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. BL20A1001 *Sähköverkkojen suojaus: Prosessiteollisuuden sähköverkot*. [Luento & Luentomateriaali]. [16.4.2021]


KANTAVERKON LIITYNTÄPISTE 110 kV
AHXLMK 3x1x1200
880 m
2xDUCK
1,3 km
2xDUCK
1,0 km
+A1, 110 kV, GIS
+A0, 110 kV, ULKOKYTKINLAITOS
E01
E05
E06
E011
A
C
F
3x1x300 Al
3x1x300 Al
30 m
3x1x1200 Al
1146 m
3x1x150 Cu
660 m
TB13
50 MVA
115/10,5 kV
T10
63 MVA
115/10,5 kV
T6
50 MVA
115/10,5 kV
3x4x800 Al
40 m
+23 57AB 13
I_{thmaks} = 37,5 kA
I_{2kmin} = 4,6 kA
09
16
39
35
+23 57AB 10
I_{thmaks} = 34,0 kA
I_{2kmin} = 5,1 kA
34
18
17
+A6
I_{thmaks} = 33,7 kA
I_{2kmin} = 5,0 kA
D
G
3x300 Al
210 m
3x300 Al
205 m
3x300 Al
210 m
3x300 Al
285 m
3x300 Al
300 m
23 44TD 14
3150 kVA
10/0,69 kV
23 44TD 15
3150 kVA
10/0,69 kV
23 41TD 13
3150 kVA
10/0,69 kV
23 41TD 12
3150 kVA
10/0,69 kV
23 41TD 11
3150 kVA
10/0,69 kV
22 27TD 03
2000 kVA
10/0,525 kV
22 27TD 02
2000 kVA
10/0,525 kV
+23 44AD 14
I_{thmaks} = 36,6 kA
I_{2kmin} = 14,3 kA
+23 44AD 15
I_{thmaks} = 36,9 kA
I_{2kmin} = 14,3 kA
+23 41AD 13
I_{thmaks} = 40,8 kA
I_{2kmin} = 14,6 kA
+23 41AD 12
I_{thmaks} = 39,5 kA
I_{2kmin} = 14,6 kA
+23 41AD 11
I_{thmaks} = 38,8 kA
I_{2kmin} = 14,6 kA
+22 27AE 03
I_{thmaks} = 37,0 kA
I_{2kmin} = 15,4 kA
+22 27AE 02
I_{thmaks} = 39,1 kA
I_{2kmin} = 15,4 kA

PIENJÄNNITEKESKUS					PIENJÄNNITEKESKUS									
	Perustiedot							Oikosulkuvirrat						
Tunnus	Niemellisvirta [A]	Nimellisjännite [V]	Jakelujärjestelmä	Syöttävä KJ-lähtö	Suurin kahvasulake	Suurin katkaisija	Valokaarirele	I_{thmaks} [kA]	$I2k_{maks}$ [kA] $I_{2k} = \frac{\sqrt{3}}{1+\frac{Z_2}{Z_1}} I_{k3}$ (Huotari, Partanen 1998, s.12)	I_{2kmin} [kA]	I_{1kmin} [kA] $I_{1k} = \frac{2\sqrt{3}}{2+\frac{Z_0}{Z_1}} I_{k2}$ (Huotari, Partanen 1998, s.12)	I_{2kmin} [kA] G9 Saarikäyttö	I_{3kmin} [kA] $I_{3k} = \frac{1+\frac{Z_2}{Z_1}}{\sqrt{3}} I_{2k}$
22 27AE 03	2500	500	TN	23 57AB 10.17	630 A gG / 400 kW	700 kW moottorilähtö	ON	37.0	32.0	16.8	18.9	15.4	17.8
22 27AE 02	2500	500	TN	26 A6.G	630 aM + Lämpörele/350 kW	700 kW moottorilähtö	ON	39.1	33.9	16.8	18.9	15.4	17.8
23 41AD 11	3000	690	IT	23 57AB 10.34	315 aM + Lämpörele/250 kW	-	ON	38.8	33.6	16.4	18.1	14.6	16.9
23 41AD 12	3000	690	IT	23 57AB 10.35	500 aM + Lämpörele/400 kW	-	ON	39.5	34.2	16.4	18.1	14.6	16.9
23 41AD 13	3000	690	IT	23 57AB 10.35	630 aM + Lämpörele/355 kW	-	ON	40.8	35.3	16.4	18.1	14.6	16.9
23 41AD 14	3000	690	IT	23 57AB 13.09	500 aM + Lämpörele/400 kW	-	ON	36.6	31.7	16.1	17.7	14.3	16.5
23 41AD 15	3000	690	IT	23 57AB 13.09	630 aM + Lämpörele/560 kW	-	ON	36.9	32.0	16.1	17.7	14.3	16.5

* myötä- Z1 ja vastaimpedanssi Z2 ovat keskenään yhtäsuuret muilla verkon laitteilla kuin tahtimoottoreilla.

PIENJÄNNITEKESKUS				PIENJÄNNITEKESKUS									
	Pääkatkaisija			Pääkatkaisijan suojarele									
Tunnus	Merkki	Malli	Io [A]	Merkki	Malli	In [A]	Ir [In]	tr [s]	Im (Isd) [Ir]	tm (tsd) [s]	tr I2t ON/OFF	Ii [In]	HUOM
22 27AE 03	Schneider Electric	M25 H1	2500	Schneider Electric	Micrologic 5.0 E	2500	1	1	8	0.2	ON	3	
22 27AE 02	Schneider Electric	NW25 H2	2500	Schneider Electric	STR 58 U	2500	1	30	4	0.1	ON	6	Io = 1xIn
23 41AD 11	Merlin Gerin	M32 H1	3200	Schneider Electric	STR 58 U	3200	1	15	2	0.1	ON	4	
23 41AD 12	Merlin Gerin	M32 H1	3200	Schneider Electric	STR 58 U	3200	1	15	2	0.1	ON	4	Io = 1xIn
23 41AD 13	Schneider Electric	NW32 H2	3200	Schneider Electric	Micrologic 5.0 E	3200	1	1	2	0.1	ON	4	
23 41AD 14	Schneider Electric	NW32 H2	3200	Schneider Electric	Micrologic 5.0 E	3200	1	1	2	0.1	ON	4	
23 41AD 15	Schneider Electric	NW32 H2	3200	Schneider Electric	Micrologic 5.0 E	3200	1	0.5	2	0.1	ON	4	

PIENJÄNNITEKESKUS	KISKOSILTA Muuntajan kiskosillan suojarele										JAKELUMUUNTAJA								
Tunnus	Merkki	Malli	In [A]	Virtamuuntaja	Virtamuuntaja	k	Käyrä	I>/xIn	I>>/xI>		Tunnus	U1 [V]	U2 [V]	Sn [MVA]	uk(1) [%] myötäverkko	uk(1) [ohm] myötäverkko	ur(1) [%] myötäverkko	uk(0) [%] nollaverkko	ur(0) [%] nollaverkko
22 27AE 03	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	2500	5	0.4	E	1.2	4	12000	22 27TE 03	10 000	525	2	6	0.0083	0.7	6.5	0.9
22 27AE 02	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	2500	5	0.4	E	1.2	4	12000	22 27TE 02	10 000	525	2	6	0.0083	0.7	6.5	0.9
23 41AD 11	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	3000	5	0.3	E	1.1	4	13200	23 41TD 11	10 000	725	3.15	7	0.0117	0.6	8	0.7
23 41AD 12	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	3000	5	0.3	E	1.1	4	13200	23 41TD 12	10 000	725	3.15	7	0.0117	0.6	8	0.7
23 41AD 13	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	3000	5	0.3	N	1.1	4	13200	23 41TD 13	10 000	725	3.15	7	0.0117	0.6	8	0.7
23 41AD 14	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	3000	5	0.3	E	2	4	24000	23 41TD 14	10 000	725	3.15	7	0.0117	0.6	8	0.7
23 41AD 15	Strömberg	SPAJ 3D5 J3	5	3000	5	0.3	N	1.1	4	13200	23 41TD 15	10 000	725	3.15	7	0.0117	0.6	8	0.7

KESKIJÄNNITEKOJEISTO																	
Perustiedot					Oikosulkuvirat G9 Saari			Suojarele								Virtamuuntajat	
Tunnus	Nimellisjännite [V]	Syöttävä KJ-lähtö	Syötetyt PJ-keskukset		I_{thmaks} [kA]	I_{2kmin} [kA]	I_{2kmin} [kA]	Merkki	Malli	In [A]	I>	t> [s]	I>>	t>> [s]		I1 [A]	I2 [A]
23 57AB 10.17	10 000	Muuntaja T10	22 27AE 03		34.0	10.4	5.1	Strömberg	SPAJ 141	5	1.7	0.3	10	0		200	5
23 57AB 10.34	10 000	Muuntaja T10	23 41AD 11		34.0	10.4	5.1	Siemens	7SJ512	5	2.4	0.2	13	0		200	5
23 57AB 10.35	10 000	Muuntaja T10	23 41AD 12	23 41AD 13	34.0	10.4	5.1	Siemens	7SJ512	5	2.4	0.2	6.5	0		400	5
23 57AB 13.09	10 000	Muuntaja TB13	23 41AD 14	23 41AD 15	27.5	8.7	4.6	Siemens	75J512	5	2.4	0.2	6.5	0		400	5
26 A6.G	10 000	Muuntaja T6	22 27AE 02		33.7	10.3	5.0	Strömberg	SPAJ 3A5 /E	5	1.4	0.3	10	0		240	5
							G9 saari										

LASKELMA PIENJÄNNITEKESKUKSESTA TOISEEN SYÖTETYSTÄ ALKUOISULKUVIRRASTA

Tarkasteltavan verkon kahden pienjännitepääkeskuksen keskijännitelähdöt koostuvat kahdesta jakelumuuntajassa ja näitä syöttävästä kaapelista. Lähtöjä on kahdenlaisia: 1) pienjännitepääkeskukset U_n = 525 V ja I_n = 2500 A ja muuntajat näennäisteho S_n = 2 MVA ja u_k = 6 %, 2) pienjännitepääkeskukset U_n = 690 V ja I_n = 3000 A ja muuntajat näennäisteho S_n = 3,15 MVA ja u_k = 7 %.

Tapauksessa 1) keskuksesta toiseen siirtyvä alkuoikosulkuvirta

Olettaen, että keskuksiin on liitetty oikosulkumoottoreita niiden nimellisvirran verran on yhteen keskukseen liitettyjen oikosulkumoottorien impedanssi

$$Z_{kmoottori} = \frac{U_n}{\frac{I_s}{I_n}\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{525\ \text{V}}{5\sqrt{3} \cdot 2500\ \text{A}} = 24{,}2\ \text{m}\Omega$$

Muuntajan impedanssi

$$Z_{kmuuntaja} = u_k \frac{U_n^2}{S_n} = 0{,}06 \cdot \frac{(525\ \text{V})^2}{2 \cdot 10^6 \text{VA}} = 8{,}27\ \text{m}\Omega$$

Pienjännitekeskusten välisen haaran Thevenin impedanssi, kun toisen jakelumuuntajan alajännitepuolen navoissa sattuu 3 vaiheinen oikosulku, jonaka vikaimpedanssi on nolla

$$Z_{kvika} = Z_{kmoottori} + 2 \cdot Z_{kmuuntaja} = 40{,}8\ \text{m}\Omega$$

Moottoreiden syöttämä vikavirta

$$I_{3k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\, Z_{vika}} = \frac{1{,}05 \cdot 525\ \text{V}}{\sqrt{3} \cdot 40{,}8\ \text{m}\Omega} = 7{,}80\ \text{kA}$$

joka on noin 3,1 kertaa keskuksen nimellisvirta. Kun huomioidaan PJ katkaisijoiden noin 20 % toleranssi oikosulkusuojausalueella tulisi asettelun olla vähintään 3,75 I_n

Puolestaan tapauksessa 2)

Olettaen, että keskuksiin on liitetty oikosulkumoottoreita niiden nimellisvirran verran on yhteen keskukseen liitettyjen oikosulkumoottorien impedanssi

$$Z_{kmoottori} = \frac{U_n}{\frac{I_s}{I_n}\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{690\ \text{V}}{5\sqrt{3} \cdot 3000\ \text{A}} = 26{,}6\ \text{m}\Omega$$

Muuntajan impedanssi

$$Z_{kmuuntaja} = u_k \frac{U_n^2}{S_n} = 0{,}07 \cdot \frac{(690\ \text{V})^2}{3{,}15 \cdot 10^6 \text{VA}} = 10{,}1\ \text{m}\Omega$$

Pienjännitekeskusten välisen haaran Thevenin impedanssi, kun toisen jakelumuuntajan alajännitepuolen navoissa sattuu 3 vaiheinen oikosulku, jonka vikaimpedanssi on nolla

$$Z_{kvika} = Z_{kmoottori} + 2 \cdot Z_{kmuuntaja} = 47{,}7\ \text{m}\Omega$$

Moottoreiden syöttämä vikavirta

$$I_{3k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\, Z_{vika}} = \frac{1{,}05 \cdot 690\ \text{V}}{\sqrt{3} \cdot 47{,}7\ \text{m}\Omega} = 8{,}77\ \text{kA}$$

joka on noin 2,9 kertaa keskuksen nimellisvirta. Kun huomioidaan PJ katkaisijoiden noin 20 % toleranssi oikosulkusuojausalueella tulisi asettelun olla vähintään 3,5 I_n

PIENIMMÄN OIKOSULKUVIRRAN RAJAPITUUS PIENJÄNNITEVERKOSSA

Pienin oikosulkuvirta maadoitetussa pienjänniteverkossa esiintyy joko yksivaiheisessa tai kaksivaiheisessa oikosulussa riippuen vikapaikan etäisyydestä jakelumuuntajasta. Lähellä jakelumuuntajaa kaksivaiheinen oikosulkuvirta on pienin, kun taas kauempana pienin on yksivaiheinen oikosulkuvirta (Huotari, Partanen, 1998). Rajapituutta, jota kauempana yksivaiheinen oikosulkuvirta on pienempi voidaan haarukoida tarkastelemalla yksi- tai kaksivaiheisen oikosulkuvirran ja kolmivaiheisen oikosulkuvirran suhdetta.

Kun pienjänniteverkkoon ei ole kytketty tahtikoneita, ovat myötä- ja vastaimpedanssit yhtä suuret. Tällöin kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan esittää kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla yhtälöllä

$$I_{\mathrm{k2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\mathrm{k3}} \qquad 1$$

missä I_{k2} on kaksivaiheinen oikosulkuvirta ja I_{k3} kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Samalla olettamuksella yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan esittää kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla yhtälöllä

$$I_{\mathrm{k1}} = \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}} \cdot I_{\mathrm{k3}} \qquad 2$$

missä I_{k1} on yksivaiheinen oikosulkuvirta, Z_0 nollaimpedanssi ja Z_1 myötäimpedanssi. (Huotari, Partanen, 1998)

Yhtälöstä kaksi havaitaan, että yksivaiheinen oikosulkuvirta on sitä pienempi mitä suurempi nollaimpedanssi on suhteessa myötäimpedanssiin. Yhtälöiden yksi ja kaksi perusteella voidaan ratkaista piste, jossa yksi- ja kaksivaiheiset oikosulkuvirrat ovat yhtäsuuret.

$$I_{k2} = I_{k1}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}}$$

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 2\sqrt{3} - 2 = \mathrm{k} \qquad 3$$

Johtolähdön hännillä sattuvassa viassa nämä impedanssit ovat kaapelin ja muuntajan impedanssien summa. Kun yhtälöön 3 sijoitetaan muuntajan ja kaapelin impedanssit saadaan

$$\frac{Z_{0\mathrm{m}} + l\,Z_{0\mathrm{kaapeli}}}{Z_{1\mathrm{m}} + l\,Z_{1\mathrm{kaapeli}}} = \mathrm{k}$$

missä $Z_{0\mathrm{m}}$ on muuntajan nollaimpedanssi ja $Z_{1\mathrm{m}}$ muuntajan myötäimpedanssi. Kun tästä ratkaistaan kaapelin rajapituus l, yhtälöksi saadaan

$$l = \frac{\mathrm{k}\,Z_{1\mathrm{m}} - Z_{0\mathrm{m}}}{Z_{0\mathrm{kaapeli}} - k\,Z_{1\mathrm{kaapeli}}}. \qquad 4$$

Kirjoitetaan yhtälö resistanssien ja reaktanssien avulla saadaan

$$l = \frac{\sqrt{(\mathrm{k}\,R_{1\mathrm{m}} - R_{0\mathrm{m}})^2 + (\mathrm{k}\,X_{1\mathrm{m}} - X_{0\mathrm{m}})^2}}{\sqrt{\left(R_{0\mathrm{kaapeli}} - \mathrm{k}\,R_{1\mathrm{kaapeli}}\right)^2 + \left(X_{0\mathrm{kaapeli}} - \mathrm{k}\,X_{1\mathrm{kaapeli}}\right)^2}}$$

Kun oletetaan vikavirran palaavan ainoastaan kaapelia pitkin ja PE-johtimena toimii kaapelin suojavaippa, ovat kaapelin myötä- ja nollaimpedanssi likimain

$$Z_{1\mathrm{kaapeli}} \approx l \cdot (R_{\mathrm{vaihe}} + jX_{\mathrm{vaihe}})$$
$$Z_{0\mathrm{kaapeli}} \approx l \cdot (R_{\mathrm{vaihe}} + 3R_{\mathrm{pe}} + jX_{\mathrm{vaihe}})$$

missä R_{vaihe} on vaihejohtimen reisistanssi, R_{pe} suojamaadoitusjohtimen resistanssi ja X_{vaihe} vaihejohtimen reaktanssi.

Sijoittamalla kaapelin ja muuntajan resistanssit ja reaktanssit yhtälöön 4 saadaan

$$l \approx \frac{\sqrt{(\mathrm{k}\,R_{1\mathrm{m}} - R_{0\mathrm{m}})^2 + (\mathrm{k}\,X_{1\mathrm{m}} - X_{0\mathrm{m}})^2}}{\sqrt{\left[\left(R_{\mathrm{vaihe}} + 3R_{\mathrm{pe}}\right) - \mathrm{k}(R_{\mathrm{vaihe}})\right]^2 + \left[(X_{\mathrm{vaihe}}) - \mathrm{k}\,(X_{\mathrm{vaihe}})\right]^2}} \qquad 5$$

Tämän liitteen sivuilla 4 ja 5 on laskettu esimerkin omaisesti rajapituudet yhtälöllä 5 tapaustutkimuksessa tarkasteltavilla jakelumuuntajilla. Kaapeleiden reaktansseina ja reaktansseina on käytetty taulukon 1 keskimääräisiä arvoja. PE-johtimen resistanssi on taulukon arvo kerrottuna kahdella, koska sen poikkipinta-ala suosituimmuus kaapeleilla noin puolet vaihejohtimen poikkipinta-alasta. Arvot on tarkoitettu vain suuntaa-antaviksi, koska ne on laskettu keskimääräisillä impedansseilla ja nollaverkon impedanssi voi vaihdella paljon kaapeleiden välillä. Oleellisinta on, havaita rajapituuden olevan vain muutamia metrejä eli huomattavasti tyypillistä moottorikaapelia lyhyempi. Pienin oikosulkuvirta moottorilähdöllä on siis yksivaiheinen oikosulkuvirta.

Poikki-pinta-ala A/mm^2	Kupari			Alumiini		
	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z
4 x 1,5	14,620	0,115	14,620			
4 x 2,5	8,770	0,110	8,770			
4 x 4	5,480	0,107	5,480			
4 x 6	3,660	0,100	3,660			
4 x 10	2,244	0,094	2,246			
4 x 16	1,415	0,090	1,418	2,324	0,090	2,326
4 x 25	0,898	0,086	0,902	1,4889	0,086	1,492
4 x 35	0,652	0,083	0,657	1,086	0,083	1,089
4 x 50	0,482	0,083	0,489	0,796	0,083	0,800
4 x 70	0,336	0,082	0,346	0,551	0,082	0,577
4 x 95	0,244	0,082	0,257	0,398	0,082	0,406
4 x 120	0,195	0,080	0,211	0,316	0,080	0,326
4 x 150	0,155	0,080	0,174	0,258	0,080	0,270
4 x 185	0,125	0,080	0,148	0,207	0,080	0,222
4 x 240	0,095	0,079	0,124	0,162	0,079	0,180
4 x 300	0,078	0,079	0,111	0,133	0,079	0,155

Taulukko 1 Kaapeleiden keskimääräisiä impedansseja johdinlämpötilassa 80 °C (D1-2017)

Muuntajan tiedot

S	2 000 000 VA		
Un	525 V		
uk1	6 %	Z_{1m}	0.01 ohm
ur1	0.7 %	R_{1m}	0.00 ohm
		X_{1m}	0.01 ohm
uk0	6.5 %	Z_{0m}	0.01 ohm
ur0	0.9 %	R_{0m}	0.00 ohm
		X_{0m}	0.01 ohm
		k	1.46

Kuparikaapelit

Poikkipinta-ala [mm^2] *	Resistanssi R_{vaihe} [ohm/km]	Reaktanssi X_{vaihe} [ohm/km]	PE-resistanssi R_{pe} [ohm/km]	Rajapituus / [km]	/ [m]
35	0.652	0.083	1.304	0.00	1
50	0.482	0.083	0.964	0.00	1
70	0.336	0.082	0.672	0.00	2
95	0.244	0.082	0.488	0.00	2
120	0.195	0.08	0.39	0.00	3
150	0.155	0.08	0.31	0.00	4
185	0.125	0.08	0.25	0.00	5
240	0.095	0.079	0.19	0.01	6
300	0.078	0.079	0.156	0.01	7

Alumiinikaapelit

Poikkipinta-ala [mm^2] *	Resistanssi R_{vaihe} [ohm/km]	Reaktanssi X_{vaihe} [ohm/km]	PE-resistanssi R_{pe} [ohm/km]	Rajapituus / [km]	/ [m]
35	1.086	0.083	2.172	0.00	1
50	0.796	0.083	1.592	0.00	1
70	0.551	0.082	1.102	0.00	1
95	0.398	0.082	0.796	0.00	1
120	0.316	0.08	0.632	0.00	2
150	0.258	0.08	0.516	0.00	2
185	0.207	0.08	0.414	0.00	3
240	0.162	0.079	0.324	0.00	4
300	0.133	0.079	0.266	0.00	4

* Kaapeleiden on oletettu olevan 3 johtimisia konsentrisella PE johtimella, jonka poikkipinta-ala on puolet vaihejohtimesta.

Muuntajan tiedot

S	3 150 000 VA		
Un	690 V		
uk1	7 %	Z_{1m}	0.01 ohm
ur1	0.6 %	R_{1m}	0.00 ohm
		X_{1m}	0.01 ohm
uk0	8.0 %	Z_{0m}	0.01 ohm
ur0	0.7 %	R_{0m}	0.00 ohm
		X_{0m}	0.01 ohm
		k	1.46

Kuparikaapelit

Poikkipinta-ala [mm^2] *	Resistanssi R_{vaihe} [ohm/km]	Reaktanssi X_{vaihe} [ohm/km]	PE-resistanssi R_{pe} [ohm/km]	Rajapituus / [km]	/ [m]
35	0.652	0.083	1.304	0.00	1
50	0.482	0.083	0.964	0.00	1
70	0.336	0.082	0.672	0.00	2
95	0.244	0.082	0.488	0.00	3
120	0.195	0.08	0.39	0.00	3
150	0.155	0.08	0.31	0.00	4
185	0.125	0.08	0.25	0.00	5
240	0.095	0.079	0.19	0.01	6
300	0.078	0.079	0.156	0.01	8

Alumiinikaapelit

Poikkipinta-ala [mm^2] *	Resistanssi R_{vaihe} [ohm/km]	Reaktanssi X_{vaihe} [ohm/km]	PE-resistanssi R_{pe} [ohm/km]	Rajapituus / [km]	/ [m]
35	1.086	0.083	2.172	0.00	1
50	0.796	0.083	1.592	0.00	1
70	0.551	0.082	1.102	0.00	1
95	0.398	0.082	0.796	0.00	2
120	0.316	0.08	0.632	0.00	2
150	0.258	0.08	0.516	0.00	2
185	0.207	0.08	0.414	0.00	3
240	0.162	0.079	0.324	0.00	4
300	0.133	0.079	0.266	0.00	5

* Kaapeleiden on oletettu olevan 3 johtimisia konsentrisella PE johtimella, jonka poikkipinta-ala on puolet vaihejohtimesta.

ESIMERKKI MOOTTORIKÄYTÖN KOORDINAATIOTAULUKOSTA

Table ID:	**3098**				
Starter Type :	**Direct-on-line starter**	Starting type :	**Normal start**	Motor Efficiency Class - Design :	**IE3/IE4 NE/HE**
Rated voltage :	**690 V AC**	Rated short-circuit current :	**80 kA**	Coordination type :	**IEC Type 2**
Protection Device :	**Switch fuse**	Overload protection :	**Electronic overload relay**	Table version :	**aM + EOL - IE3**
Table status:	**Active**	Created on date :	**11/12/2014 1:07:20 PM**	Edited on date :	**3/28/2018 9:44:28 AM**

	Motor		Switch fuse				Contactor	Overload protection			Max allowed load current	Status
	Motor rated power	Rated Current	Switch-Fuse Type	Fuse Characteristic	Rating	Type and Size	Type	Type	Trip Class	Current range		
1	0.37 kW	0.64 A	OS32GD03P	aM	2 A	OFAA000AM2	AF09	EF19-1.0 [1)]	10E	0.30 - 1.00 A	0.88 A	Active
2	0.55 kW	0.87 A	OS32GD03P	aM	2 A	OFAA000AM2	AF09	EF19-2.7 [1)]	10E	0.80 - 2.70 A	1.23 A	Active
3	0.75 kW	1.1 A	OS32GD03P	aM	2 A	OFAA000AM2	AF09	EF19-2.7 [1)]	10E	0.80 - 2.70 A	1.23 A	Active
4	1.1 kW	1.6 A	OS32GD03P	aM	4 A	OFAA000AM4	AF09	EF19-2.7 [1)]	10E	0.80 - 2.70 A	2.37 A	Active
5	1.5 kW	2.1 A	OS32GD03P	aM	4 A	OFAA000AM4	AF09	EF19-2.7 [1)]	10E	0.80 - 2.70 A	2.37 A	Active
6	2.2 kW	2.8 A	OS32GD03P	aM	6 A	OFAA000AM6	AF09	EF19-6.3 [1)]	10E	1.90 - 6.30 A	3.78 A	Active
7	3 kW	3.8 A	OS32GD03P	aM	10 A	OFAA000AM10	AF12	EF19-6.3 [1)]	10E	1.90 - 6.30 A	5.53 A	Active
8	4 kW	4.9 A	OS32GD03P	aM	10 A	OFAA000AM10	AF12	EF19-6.3 [1)]	10E	1.90 - 6.30 A	5.53 A	Active
9	5.5 kW	6.7 A	OS32GD03P	aM	16 A	OFAA000AM16	AF26	EF19-18.9 [1)]	10E	5.70 - 18.90 A	7.9 A	Active
10	7.5 kW	8.9 A	OS32GD03P	aM	16 A	OFAA000AM16	AF26	EF19-18.9 [1)]	10E	5.70 - 18.90 A	10.1 A	Active
11	11 kW	12.8 A	OS32GD03P	aM	25 A	OFAA000AM25	AF26	EF45-30 [1)]	10E	9.00 - 30.00 A	14.93 A	Active
12	15 kW	17 A	OS32GD03P	aM	32 A	OFAA000AM32	AF30	EF45-30 [1)]	10E	9.00 - 30.00 A	18.44 A	Active
13	18.5 kW	21 A	OS32GD03P	aM	32 A	OFAA000AM32	AF38	EF45-30 [1)]	10E	9.00 - 30.00 A	21.07 A	Active
14	22 kW	24 A	OS63GD03P	aM	40 A	OFAA000AM40	AF52	EF65-70 [1)]	10E	25.00 - 70.00 A	25.46 A	Active
15	30 kW	32 A	OS63GD03P	aM	63 A	OFAA000AM63	AF65	EF65-70 [1)]	10E	25.00 - 70.00 A	34.24 A	Active
16	37 kW	39 A	OS125GD03P	aM	80 A	OFAA00AM80	AF80	EF96-100 [1)]	10E	36.00 - 100.00 A	43.02 A	Active
17	45 kW	47 A	OS125GD03P	aM	80 A	OFAA00AM80	AF96	EF96-100 [1)]	10E	36.00 - 100.00 A	48.29 A	Active
18	55 kW	57 A	OS125GD03P	aM	100 A	OFAA00AM100	AF140	EF146-150 [1)]	10E	54.00 - 150.00 A	57.07 A	Active
19	75 kW	77 A	OS250D03P	aM	160 A	OFAA1AM160	AF190	EF146-150 [1)]	10E	54.00 - 150.00 A	81.66 A	Active
20	90 kW	93 A	OS250D03P	aM	160 A	OFAA1AM160	AF190	EF205-210 [1)]	10E	63.00 - 210.00 A	100.98 A	Active
21	110 kW	113 A	OS250D03P	aM	200 A	OFAA1AM200	AF205	EF205-210 [1)]	10E	63.00 - 210.00 A	118.54 A	Active
22	132 kW	134 A	OS250D03P	aM	250 A	OFAA1AM250	AF265	EF205-210 [1)]	10E	63.00 - 210.00 A	140.49 A	Active
23	160 kW	162 A	OS250D03P	aM	250 A	OFAA1AM250	AF265	EF370-380 [1)]	10E	115.00 - 380.00 A	180 A	Active
24	200 kW	203 A	OS400D03P	aM	315 A	OFAA2AM315	AF305	EF370-380 [1)]	10E	115.00 - 380.00 A	219.51 A	Active
25	250 kW	250 A	OS400D03P	aM	355 A	OFAA2AM355	AF370	EF370-380 [1)]	10E	115.00 - 380.00 A	252 A	Active
26	315 kW	313 A	OS630D03P	aM	500 A	OFAA3AM500	AF460	EF460-500 [1)]	10E	150.00 - 500.00 A	320 A	Active
27	355 kW	354 A	OS1250DA03P	aM	630 A	OFAA4AAM630	AF580	EF750-800 [1)]	10E	250.00 - 800.00 A	377.56 A	Active
28	400 kW	400 A	OS1250DA03P	aM	630 A	OFAA4AAM630	AF750	EF750-800 [1)]	10E	250.00 - 800.00 A	421.46 A	Active
29	450 kW	460 A	OS1250DA03P	aM	800 A	OFAA4AAM800	AF1350	EF1250DU-1250	10E	375.00 - 1250.00 A	553.17 A	Active
30	500 kW	493 A	OS1250DA03P	aM	800 A	OFAA4AAM800	AF1350	EF1250DU-1250	10E	375.00 - 1250.00 A	553.17 A	Active
31	560 kW	551 A	OS1250DA03P	aM	800 A	OFAA4AAM800	AF1350	EF1250DU-1250	10E	375.00 - 1250.00 A	553.17 A	Active
32	630 kW	615 A	OS1250DA03P	aM	1000 A	OFAA4AAM1000	AF1350	EF1250DU-1250	10E	375.00 - 1250.00 A	640 A	Active

Comments :

[1)]: selected trip class of Electronic overload relay.

Kuva 0.1 ABB:n julkaisema koordinaatiotaulukko, sulakesuojaus, normaalikäynnistys, 690 V, 80 kA, koordinaatiotyyppi 2. (ABB, 2022c)