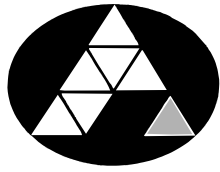


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Juha Huurinainen

KESKIJÄNNITEVERKON VIKOJEN JA SUOJAUKSEN SIMULOINTI  
ABB REF – 541 KENNOTERMINAALILLA

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2011



POHJOIS-KARJALAN  
AMMATTIKORKEAKOULU

**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2011**  
**Sähkötekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. (013) 260 6800

Tekijä(t)

Juha Huurinainen

Nimeke

Keskijänniteverkon vikojen ja suojauksen simulointi ABB REF-541 kennoterminaalilla

Toimeksiantaja

Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriotiloissa käyttämättömänä olevaa ABB REF-541 kennoterminaalilla ja sen soveltuvuutta sähkötekniikan laboratorioharjoitukseksi.

Työssä käydään läpi keskijänniteverkon yleisimmät vikatyypit ja tilanteet sekä tutustutaan sähköverkon vikavirtasuojaukseen, hyödyntäen keskeisimpiä sähköturvallisuusmääräyksiä ja standardeja. Lisäksi tutkittiin kennoterminaalilla simuloituihin ylivirta- ja maasulkuvikoihin ja niiltä suojautumiseen kennoterminaalien suojaruleen avulla.


Opinnäytetyön tulokseksi saatiin kattava kooste sähköverkon vioista ja suojauksesta sekä selvitettiin mitä kennoterminaalissa on vikana. Työssä esitellään myös mahdollisen jatkotutkimuksen aihe suositeltavia korjaustoimia.

Kieli  
suomi

Sivuja 49  
Liitteet 2  
Liitesivumäärä 11

Asiasanat

vikavirta, vikavirtasuojaus, kennoterminaalilla, ref-541, sähkötekniikan laboratoriotyöt

 <p data-bbox="264 409 687 461">NORTH KARELIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</p>	<p data-bbox="767 237 1390 454"><b>THESIS</b> <b>May 2011</b> <b>Degree Programme in Electrical Engineering</b> Karjalankatu 3 FIN 80200 JOENSUU Tel. 358-13-260 6800</p>
<p data-bbox="233 521 360 555">Author(s)</p> <p data-bbox="233 595 464 629">Juha Huurinainen</p>	
<p data-bbox="233 656 300 689">Title</p> <p data-bbox="233 692 1493 759">Simulated Malfunctions and Protection of Distribution Network by ABB REF-541 Feeder Terminal</p> <p data-bbox="233 799 472 833">Commissioned by</p> <p data-bbox="233 835 831 869">North Karelia University of Applied Sciences</p>	
<p data-bbox="233 880 347 913">Abstract</p> <p data-bbox="233 954 1493 1055">The purpose of this thesis was to study an idle ABB REF 541 feeder terminal located in the electrical laboratory facilities of the North Karelia University of Applied Sciences and its suitability as a part of electrical laboratory work.</p> <p data-bbox="233 1095 1493 1240">This thesis examines the medium voltage network and its most common defect types and situations. In addition, the thesis also reviews fault current protection by using the main electrical safety regulations and standards. Furthermore, simulated overcurrent and ground faults were studied and protection from by the feeder terminal relay.</p> <p data-bbox="233 1281 1493 1382">The results of this study was a comprehensive summary of distribution network faults and protection. The thesis revealed what are the main problems with the feeder terminal in North Karelia University of Applied Sciences. This thesis also provides theme for further research.</p>	
<p data-bbox="233 1724 363 1758">Language</p> <p data-bbox="233 1760 336 1794">Finnish</p>	<p data-bbox="946 1724 1062 1758">Pages 49</p> <p data-bbox="946 1760 1123 1794">Appendices 2</p> <p data-bbox="946 1796 1254 1830">Pages of Appendices 11</p>
<p data-bbox="233 1836 368 1870">Keywords</p> <p data-bbox="233 1910 1254 1944">fault current, fault current protection, feeder terminal, ref-541, laboratory work</p>	

## Sisältö

### Tiivistelmä

### Abstract

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Sähköverkon vikatilanteet</b> .....	<b>6</b>
2.1	3-VAIHEINEN OIKOSULKU .....	6
2.2	EPÄSYMMETRISET OIKOSULUT .....	11
2.3	MAASTA EROTETUN VERKON YKSIVAIHEINEN MAASULKU .....	12
2.4	SAMMUTETUN VERKON YKSIVAIHEINEN MAASULKU.....	16
2.5	JOHDINKATKOKSET .....	19
<b>3</b>	<b>Sähköverkon suojaus</b> .....	<b>20</b>
3.1	SUOJARELEIDEN TOIMINTAPERIAATE JA RAKENNE .....	23
3.2	RELEIDEN IÄN MERKITYS .....	23
<b>4</b>	<b>Vikavirtasuojaus</b> .....	<b>25</b>
4.1	KESKIJÄNNITEVERKON OIKOSULKUSUOJAUS .....	25
4.2	MAASULKUSUOJAUKSEN TOTEUTTAMINEN .....	28
<b>5</b>	<b>ABB REF 541-kennoterminaali</b> .....	<b>33</b>
5.1	YLEISTOIMINNOT .....	33
5.2	SUOJAUSTOIMINNOT .....	36
<b>6</b>	<b>Sähkölaboratoriotilan kennoterminaali</b> .....	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Tutkimustulokset</b> .....	<b>41</b>
7.1	OHJAUSPIIRIN TESTAUS .....	41
7.2	YLIVIRTASUOJAUS .....	42
7.3	MAASULKUSUOJAUS .....	42
7.4	MICROSCADA .....	45
<b>8</b>	<b>Johtopäätökset</b> .....	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>Pohdinta</b> .....	<b>47</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>49</b>

### LIITTEET

- |         |   |
|---------|---|
| Liite 1 | Vuoden 2007 alkuperäiset piirikaaviokuvat |
| Liite 2 | Vuoden 2009 päivitetty ohjauspiirikuvat   |

## 1 Johdanto

Sähköenergian saannin häiriötön jatkuvuus sekä kasvavat vaatimukset sähkön laadun suhteen asettavat sähköenergiaa jakavalle järjestelmän suojaukselle sekä häiriövalvonalle tiettyjä edellytyksiä. Yleisiä tarpeita palveleville laitoksille sekä eri teollisuuden tuotantoprosesseille voi sähkösaannin häiriintyminen aiheuttaa suuria taloudellisia vahinkoja. Lisäksi häiriöt ja viat voivat aiheuttaa myös vaaratilanteita, joita voidaan huomattavasti vähentää hyvän ja luotettavan suojauksen avulla.

Tämän työn tarkoituksena on esitellä lukijalle keskijänniteverkon yleisimmät vikatapaukset ja suojausmenetelmät. Opinnäytetyön ensimmäisessä osuudessa tarkastellaan juuri näitä edellä mainittuja asioita, jotta tutkimusosuuden tuloksia voidaan täysin ymmärtää.

Työn toisessa vaiheessa tutustutaan ABB:n REF -541 kennotermiinalin yleistoi-  
mintoihin, sähkönjakeluverkon vikojen simulointiin ja suojausmenetelmiin. REF -541 kennotermiinali on koottu simuloimaan erityisesti ylivirta- ja maasulkusuojausta.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, jonka sähkölaboratoriotiloissa suoritettiin tutkinnallinen osuus. Opinnäytetyön tarkoituksena oli parantaa koululaitoksen sähkölaboratoriossa sijaitsevan kennotermiinalin, joka on tätä nykyä käyttämättömänä, toimivuutta.

## 2 Sähköverkon vikatilanteet

Sähköverkon turvallinen toiminta edellyttää, että estetään vaarallisten jännitteiden syntyminen ja että verkon virrat eivät vahingoita laitteita tai synnytä turhaa ympäristöä turmelevaa lämpötilaa. Sähköturvallisuusmääräyksissä annetaan yksityiskohtaisia määräyksiä sellaisten vikatapauksen varalta, jotka saattavat aiheuttaa hengen tai omaisuuden vaaraa. Seuraavassa on lueteltu sähköverkon vikojen aiheuttajia.

- ylijännitteet, jotka ovat seurausta salamaniskuista tai joistakin verkon sisäisistä seikoista
- laitteiden toimintahäiriöt tai virhetoiminnat, johtuvat pääosin laitteiden mekaanisista vioista
- verkkokomponentin eristyskyvyn aleneminen
- ylikuormitus. [1, s. 159; 7, s. 166]

Turvallisuuden lisäksi on jakeluverkko suunniteltava niin, että siinä syntyvät viat eivät aiheuta käyttäjille tarpeettomia käyttökeskeytyksiä. Lisäksi sähköverkko suunnitellaan siten, että mahdolliset vikatilanteet huomioidaan jo ennakkoon ja suunnitellaan eri vikatyypeille soveltuvat suojalaitteet. [1, s. 159]

### 2.1 3-vaiheinen oikosulku

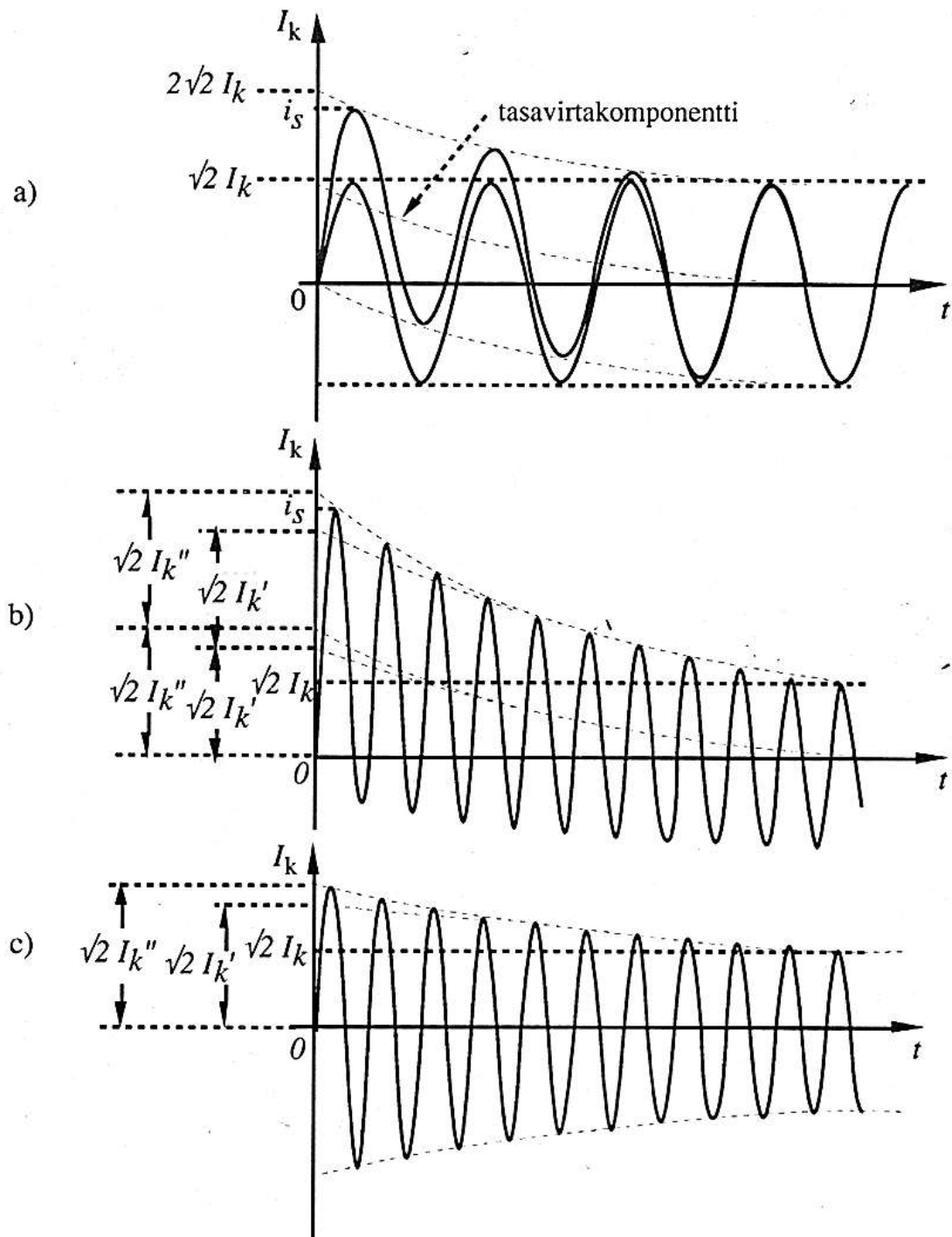
Kolmivaihejärjestelmän suurimman vikavirran aiheuttaa on vikavastukseton 3-vaiheinen oikosulku. Tällaisen oikosulkuvirran suuruus on usein jopa 10–40-kertainen nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna. Suojausautomaatiikan on katkaistava se riittävän nopeasti, jotta sähköverkon laitteet eivät vahingoittuisi. Tästä johtuen on laitteille ilmoitettu suurimpien sallittujen vikavirtojen sallitut kestoajat. Kantaverkossa vikojen nopea laukaisu on tarpeen myös, jotta voimajärjestelmä ei menettäisi vakauttaan. Siksi oikosulkuvirta ei juuri koskaan ehdi saavuttaa jatkuvan tilan arvoa. [1, s. 159; 7, s. 170]

Sähköverkon rinnakkaisia vikoja ovat oiko- ja maasulut, jotka ovat seurausta muun muassa salamaniskuista, pylvään katkeamisesta tai sortumisesta, virtamuuntajan räjähtämisestä, erottimen murtumisesta, lumen tai jään kuormasta tai johtimen katkeamisesta.

Kun virtapiirin johtimet joutuvat keskenään johtavaan yhteyteen, syntyy virtapiiriin oikosulku, esimerkiksi valokaaren kautta. Oikosulun ominainen piirre on, että vikavirta on suuri ja vikakohtan jännite on pieni. Oikosulku voi olla joko 2- tai 3-vaiheinen, mutta usein se on ukkosen aiheuttama 3-vaiheinen oikosulku. Voimansiirtojohtojen ja muuntajien impedanssit rajoittavat verkossa esiintyvää oikosulkuvirtaa, siitä johtuen oikosulkuvirta on sitä pienempi, mitä kauempana vikapaikka on generaattoreista. [3, s. 340]

Normaalitilan kolmivaiheista oikosulkua syöttää verkon symmetrinen kolmivaihejännite. Oikosulun alkuhetkestä riippuu onko virta joko symmetrinen (oikosulku tapahtuu jännitteen huippuarvon hetkellä) tai epäsymmetrinen. Pääasiassa oikosulkuvirrat ovat näiden välimuotoja ja erityisesti kolmivaiheverkon vaiheiden oikosulkuvirrat ovat satumanvaraisia välimuotoja. Oikosulkuvirta summautuu piirin kuormitusvirtaan, mutta koska oikosulkuvirta on monin kerroin suurempi kuin terveen verkon kuormitusvirta, voidaan oikosulkulaskuissa olettaa verkon olevan tyhjäkäynnissä. [1, s. 159; 7, s. 171]

Epäsymmetrisessä oikosulkuvirrassa on vaihtovirtakomponentin lisäksi myös tasakomponentti, joka on merkitty kuvaan 1. Tasakomponentin arvo on verrannollinen oikosulun alkuhetkeen. Mainittu tasakomponentti voi olla vaihtovirtapiirin kannalta haitallinen ja se voi muun muassa esimagnetoida mittamuuntajia ja huonontaa niiden tarkkuusominaisuuksia. Epäsymmetrisen oikosulkuvirran ensimmäistä huippuarvoa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi  $I_s$ . Sysäysoikosulkuvirta määrää sähkölaitteiden mekaanisten rakenteiden mitoituksen ja kestävyuden. [1, s. 159; 7, s. 171, 174]



Kuva 1. Oikosulkuvirran symmetriset ja epäsymmetriset käyrämuodot. [1, s. 160]

- a) symmetrinen ja epäsymmetrinen oikosulkuvirta,
- b) epäsymmetrinen oikosulkuvirta tahtikoneen läheisyydessä,
- c) symmetrinen oikosulkuvirta tahtikoneen läheisyydessä.



Oikosulkukohdan oikosulkuvirran  $I_k$  suuruusluokkaa voidaan arvioida kaksinapamene-  
telmän eli Theveninin teoreeman avulla, joka on esitetty kaavassa 1. [1, s. 161; 7, s.  
175]

$$\bar{I}_k = \frac{\bar{U}_v}{\bar{Z}_f + \bar{Z}_i}, \quad (1)$$

jossa  $U_v$  = vikakohdan jännite ennen vikaa,

$Z_f$  = vikaimpedanssi,

$Z_i$  = vikakohdan impedanssi.

Sysäysoikosulkuvirta  $i_s$ , esiintyy noin yhden puolijakson kuluttua vian alkamishetkestä.  
Oikosulun oletetaan syntyvän hetkenä, jolloin tasakomponentti saa suurimman arvonsa,  
Kuvan 1 a-kohdan perusteella voidaan arvioida, että [7, s. 174]

$$i_s < 2\sqrt{2}I_k \quad (2)$$

Aikaisemmin sysäysoikosulkuvirran arviointiin käytettiin saksalaisesta VDE-  
standardista peräisin olevaa kaavaa 3. [1, s. 161; 7, s. 174]

$$i_s = 1,8\sqrt{2}I_k \sim 2,5 I_k \quad (3)$$

Jos oikosulkutilanne syntyy tahtigeneraattorin läheisyydessä tai kantaverkossa, on oi-  
kosulkulaskuissa lisäksi käytettävä reaktansseja, joissa on huomioitu tahtikoneiden al-  
ku- ja muutosreaktanssit. Oikosulkuvirran alkuarvon tehollisarvo saadaan yhtälöstä 4.  
[1, s. 161; 7, s. 175]

$$I_k'' = \frac{U_v}{\bar{Z}_k'' + \bar{Z}_f}, \quad (4)$$

jossa  $\bar{Z}_k''$  = verkon impedanssin alkuarvo.

Alkuoikosulkuvirta vaimenee nopeasti, aikavakion  $\tau''$  ollessa noin 0,1 s. Voidaankin siis todeta, että vaimennuskäämeihin ja napapyörän massiivisiin osiin indusoituneet virrat vaimenevat nopeasti. Kuvan 1 b-kohdassa on esitetty tahtikoneen epäsymmetrisen oikosulkuvirran kehittyminen ajan muuttuessa. Jos koneessa ei ole vaimennuskäämejä, niin  $X_d'' = X_d'$ . Alkutilaa seuraa muutostila, jonka arvo saadaan yhtälöllä 5. [1, s. 161; 7, s. 175]

$$I_k' = \frac{U_v}{Z_k'' + Z_f}, \quad (5)$$

Muutostilan oikosulkuvirtaa  $I_k'$  laskettaessa käytetään reaktansseina sähkökoneiden pitkittäistä muutosreaktanssia  $X_d'$ . Muutostilan oikosulkuvirta vaimentuu hitaammin kuin alkuoikosulkuvirta, aikavakiolla  $\tau' \sim 3-6$  s kohti jatkuvan tilan arvoa. Muutosoikosulkuvirran pitkästä kestoajasta johtuen, katkaisijat joutuvat monesti katkaisemaan sen. Tämä seikka on huomioitava sähköverkon katkaisijan valinnassa. [1, s. 161; 7, s. 175]

Kun lasketaan jatkuvuustilan oikosulkuvirran  $I_k$  arvoa, on tahtikoneilla käytettävä lisäksi niiden pitkittäisreaktanssia  $X_d$ . Oikosulkuvirran jatkuvuustilan arvoa ei saavuteta muualla kuin jakeluverkoissa (tosin sielläkin erittäin harvoin), sillä kantaverkon suojaus toimii ajassa 0,1–0,5 s. Jatkuvuustilan oikosulkuvirta on kestoaltaan suhteellisen pitkä ja täten se määrää johtimien ja komponenttien lämpenemisen. [1, s. 162; 7, s. 175–176]

Oikosulkutehoa  $S_k$  käytetään kuvaamaan katkaisijoiden ominaisarvoja. Lisäksi oikosulkutehoa käytetään myös monesti kuvaamaan sähköverkon oikosulkuominaisuuksia. Oikosulkuteho on terveen verkon nimellisjännitteen ja oikosulkuvirran tulo laskettuna kolmivaihetehona. [1, s. 162; 7, s. 177]

$$S_k = \sqrt{3}UI_k, \quad (6)$$

jossa  $S_k$  = verkon oikosulkuteho,  
 $U$  = verkon jännite ennen oikosulkua,  
 $I_k$  = oikosulkuvirran jatkuvuustilan arvo.

## 2.2 Epäsymmetriset oikosulut

Yleisimmät epäsymmetriset viat ovat 1-vaiheinen maasulku ja 2-vaiheinen maa-oikosulku. Tällaisissa vikatapausten käsittelyssä ei voida laskea vaiheita erillisinä yksivaihetapauksina symmetristen oikosulkujen tapaan, vaan piiri on ratkaistava kokonaisuudessaan soveltaen piiriteorian menetelmiä. Epäsymmetriset vikatapaukset ratkaistaan usein hyödyntäen symmetristen komponenttien menetelmää, jolloin myös epäsymmetrisille vikatapauksille voidaan johtaa yleispätevät laskusäännöt. [1, s. 162; 7, s. 177]

Jokaiselle tuttu ja yleinen sähköverkon epäsymmetrinen vika on salamaniskun aiheuttama 1-vaiheinen maasulku avojohdolle. Salamanisku iskee kuitenkin suoraan vaihejohtimeen erittäin harvoin, koska siirtoverkon johdoilla käytetään ukkosjohtimia, joihin salama iskee useasti ennemmin kuin vaihejohtimeen. Salamanisku ukkosjohtimeen ei välttämättä aiheuta vikaa. Jos jakelulinjanpylvään ukkosjohtimen ja vaihejohtimen välinen eristystaso ei ole tarpeeksi suuri, näiden johtimien välille syntyy valokaari ja silloin salamaniskun aiheuttama vika syntyy niin sanottuna takaiskuna vaihejohtimeen. Takaiskuna syntynyt vika leviää helposti kaksi- tai kolmivaiheiseksi maasuluksi. [3, s. 339]

Maadoitetun verkon valokaari ei sammu itsestään, joten se on laukaistava verkosta, käyttäen jälleenkytkentäautomaatiikkaa. Sammutetun verkon ja suppean maasta erotetun verkon maasulkuvirta on pieni, joten maasulun laukaisu ei ole välttämätöntä vaan voidaan käyttää hälyttävää suojaustapaa. Suurissa maasta erotetuissa verkoissa kapasitiivinen maasulkuvirta kasvaa kuitenkin suureksi. [3, s. 339]

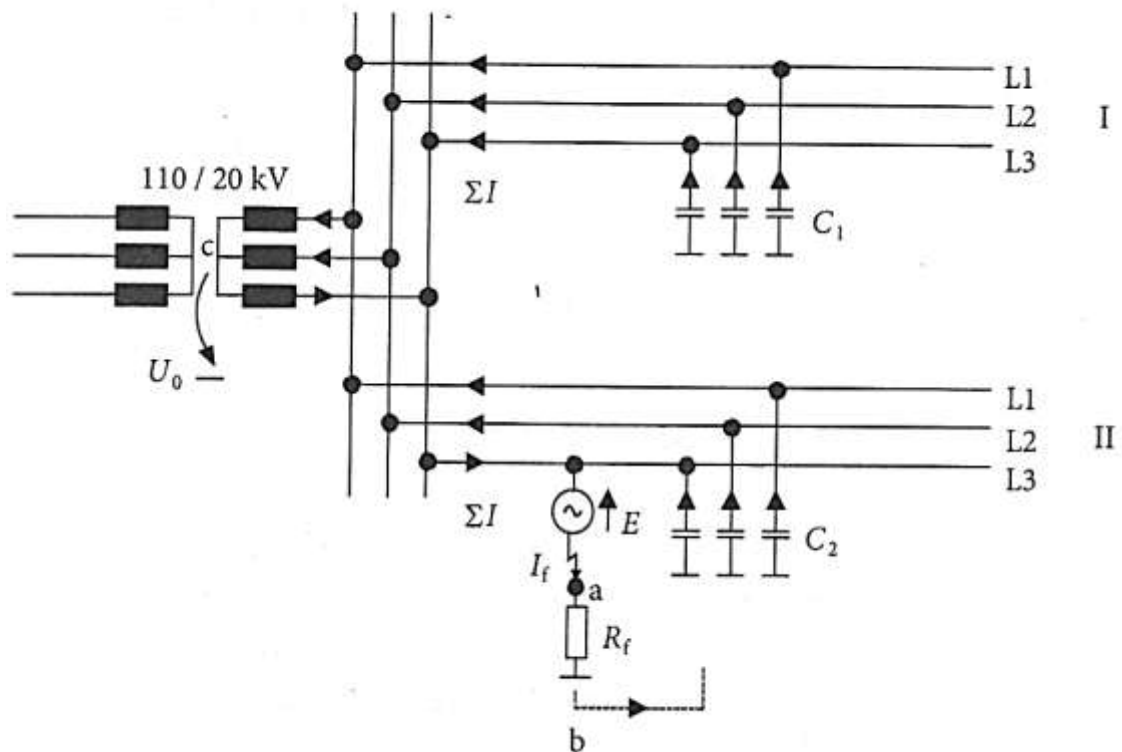
Kaksivaiheinen oikosulku sekä jäykästi maadoitetun järjestelmän yksivaiheinen maasulku, on sähköverkon kannalta vika joka on aina suojattu oikosulkusuojilla. Verkko on luonnollisesti mitoitettava siten, että oikosulkusuojat toimivat moitteettomasti. [1, s. 162]

Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku on suojauksen kannalta vaikea vika, koska maasulkukohdan vikavastus on tuntematon ja sen arvo voi vaihdella laajassa mitta-alueella. Tämä vaikeuttaa maasulkukohdan löytämistä ja vian poistamista sähköverkosta. Pahimmassa tapauksessa yksivaiheinen maasulku voi aiheuttaa verkkoon vaarallisia vikajännitteitä, siten vaarantaa koko sähköjakelun turvallisuuden. Maasulkutilan-

teista ja niiden poiskytkennästä, on yksityiskohtaisia vaatimuksia Sähköturvallisuusmääräysten 8 §:ssä. Yli 1000V järjestelmien kosketusjännitesuojauksen määräykset on käsitelty STM:n 10 §:ssä, johon liittyy läheisesti yksivaiheinen maasulku. [1, s. 162–163]

### 2.3 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

Kuva 2 esittää maasta erotetun verkon yksivaiheista maasulkutilannetta. Normaalin toimivan verkon vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä ja niiden summa on nolla. Verkon maakapasitanssien virrat ovat symmetrisiä ja myös niiden summa on nolla. Vaiheen joutuessa maakosketukseen vikaresistanssin kautta, laskee viallisen vaiheen jännite maahan nähden, ja terveiden vaiheiden jännite päinvastoin kasvaa. Jos vikaresistanssin arvo on nolla, laskee viallisen vaiheen jännite nolleen ja muiden vaiheiden jännite kasvaa pääjännitteen suuruiseksi. [1, s. 163; 9]



Kuva 2. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku. [4, s. 183]

Maasulkuvirran  $I_f$  arvo voidaan laskea kaavasta 7. [1, s. 164; 9]

$$I_f = \sqrt{3}\omega CU, \quad (7)$$

jossa  $U$  = verkon pääjännite,  
 $C$  = yhden vaiheen maakapasitanssi,  
 $\omega = 2\pi f$ .

Vikapaikan resistanssin suurentuessa maasulkuvirta pienentyy. Maasulkuvirran  $I_f$  itseisarvo on tällöin yhtälön 8 mukaisesti. [1, s. 164; 9]

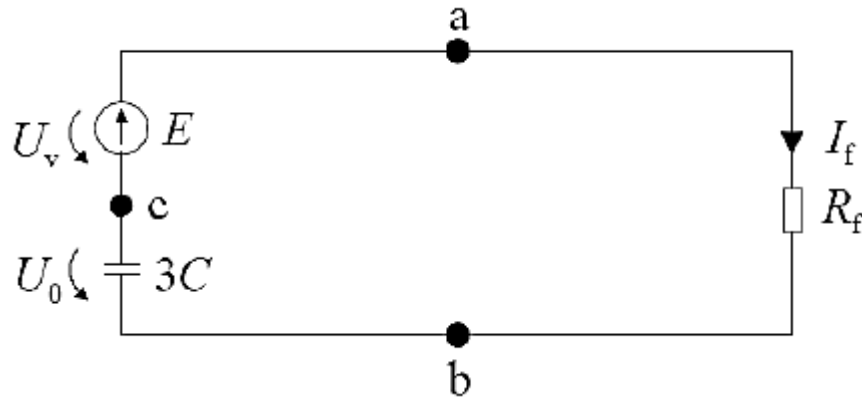
$$I_f = \frac{\sqrt{3}\omega C}{\sqrt{1+(3\omega CR_f)^2}} U, \quad (8)$$

jossa  $C$  = verkon vaiheen maakapasitanssi,  
 $R_f$  = maasulun vikaresistanssi,  
 $U$  = verkon pääjännite.

Maasulkua seuraa jännite-epäsymmetria, jonka seurauksena verkon nollapisteen ja maan välille syntyy jännite-ero, nollajännite  $U_0$ . Tämä on vastaava jännite, jonka maasulkuvirta aiheuttaa kulkiessaan verkon maakapasitanssien kautta. Nollajännite saadaan kaavasta 9. [1, s. 164; 9]

$$U_0 = \frac{1}{3\omega C} I_f. \quad (9)$$

Johtimien ja muuntajakäämien impedanssit ovat vaihejohtimien maakapasitansseihin  $C$  (satoja tai tuhansia ohmeja) nähden hyvin mitättömiä, joten ne voidaan olettaa nolllaksi maasulkulaskelmissa. Maasta erotetun verkon, Theveninin menetelmän mukainen, sijaiskytkentä on kuvan 3 kaltainen. [4, s. 183]



Kuva 3. Maasta erotetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä. [4, s. 184]

Kuvan 3 Theveninin lähde on sijoitettu maasulkupaikkaan. Theveninin lähdejännite on viallisen vaiheen ennen vikaa vallinneen vaihejännitteen suuruinen. Virtapiiri muodostuu vain verkon maakapasitansseista, joiden arvoa kuvaa kondensaattori  $3C$ . Maakapasitanssit ovat rinnan tähtipisteen ja maan välillä, joten kuvaan 3 merkattu piste  $c$  edustaa verkon tähtipistejännitettä. Sijaiskytkennän maasulkuvirta  $I_f$  ja tähtipistejännite  $U_0$  voidaan laskea yhtälöillä 10 ja 11. [4, s. 184; 8, s. 51]

$$I_f = \frac{j3\omega C}{1+j3\omega CR_f} * U_v \quad (10)$$

$$U_0 = \frac{-1}{1+j3\omega CR_f} * U_v \quad (11)$$

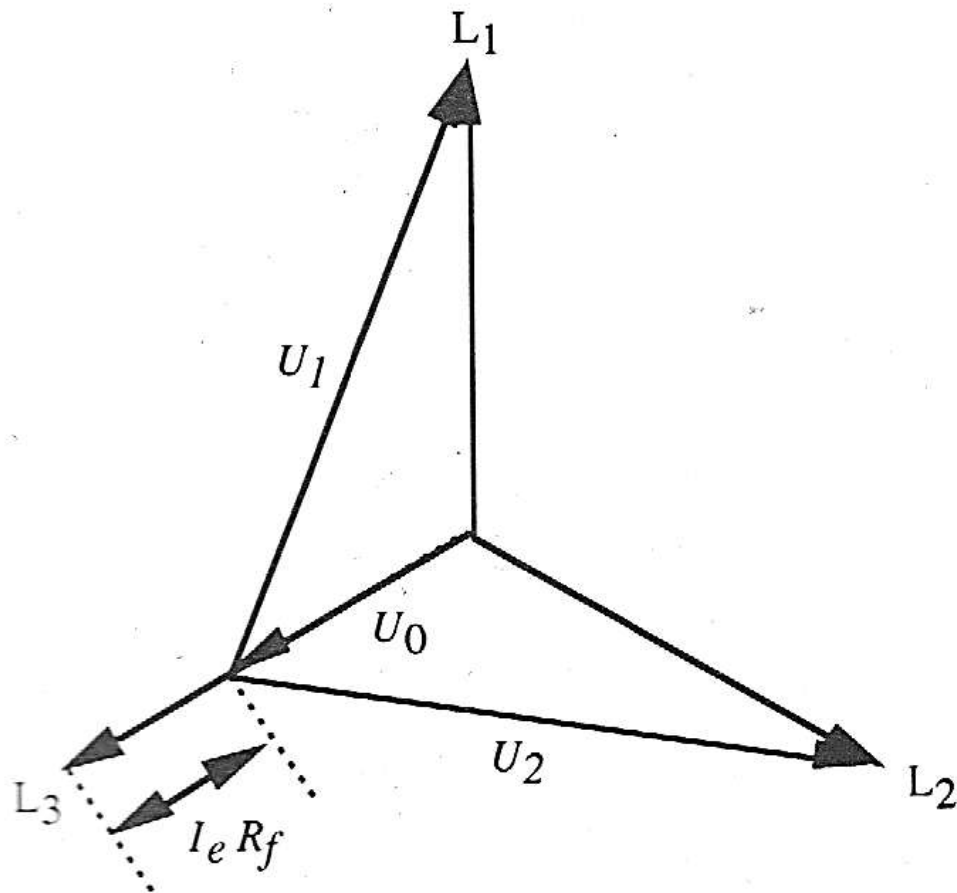
jossa  $C$  = verkon vaiheen maakapasitanssi,  
 $R_f$  = maasulun vikaresistanssi,  
 $U_v$  = viallisen vaiheen jännite ennen vikaa.

Sähkötekniikan käsikirjoissa on valmiita taulukoita, joissa on ilmoitettu kaapelilajeittain maasulkuvirran suuruus pituusyksikköä kohti. Maasulkuvirran tuntemiseksi riittää tällöin vain kaapelilaji ja sen pituus. Avojohton maasulkuvirta saadaan riittävän tarkasti yleispätevästä yhtälöstä 12. [1, s. 164; 9]

$$I_f = \frac{UkV \cdot l_{km}}{300} A, \quad (12)$$

jossa  $U$  = verkon pääjännite,  
 $l$  = galvaanisesti yhteen kytketyn avojohtoverkon pituus.

Kuvassa 4 on osoitinpiirroksen avulla esitetty maasta erotetun verkon maasulun jännitteet. Jännite  $I_e R_f$  on vioittuneen johtimen vikapaikan jännite ja jännitteet  $U_1$  ja  $U_2$  terveiden vaihejohtimien jännitteet. [1, s. 165]



Kuva 4. Eristetyn verkon nollajännite yksivaiheisessa maasulussa. [1, s. 165]

$U_0$  = nollajännite

$U_1$  ja  $U_2$  = terveiden vaiheiden jännitteet maahan nähden

## 2.4 Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku

Kun järjestelmän muuntajan nolllapiste on yhdistetty maahan induktanssin välityksellä, sitä kutsutaan sammutetuksi verkoksi. Sammutettu verkko on saanut nimensä siitä, kun johtokapasitanssien kautta kulkevalle kapasitiiviselle vikavirralla kehitetään vastakkaisuuntainen (noin 180° vaihesiirrossa oleva) muuntajan nolllapistevirta, joka summautuu vikapaikan johtokapasitanssien summavirtaan, jolloin vikavirta osuus jää pieneksi. Vikavirta voidaan tällä tavoin sammuttaa. Täysin sammutetun verkon tapauksessa voidaan todeta yhtälö 13. [1, s. 165; 2, s. 84; 9]

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C}, \quad (13)$$

jossa  $L$  = sammutuskelan induktanssi,  
 $C$  = verkon vaiheen kapasitanssi.

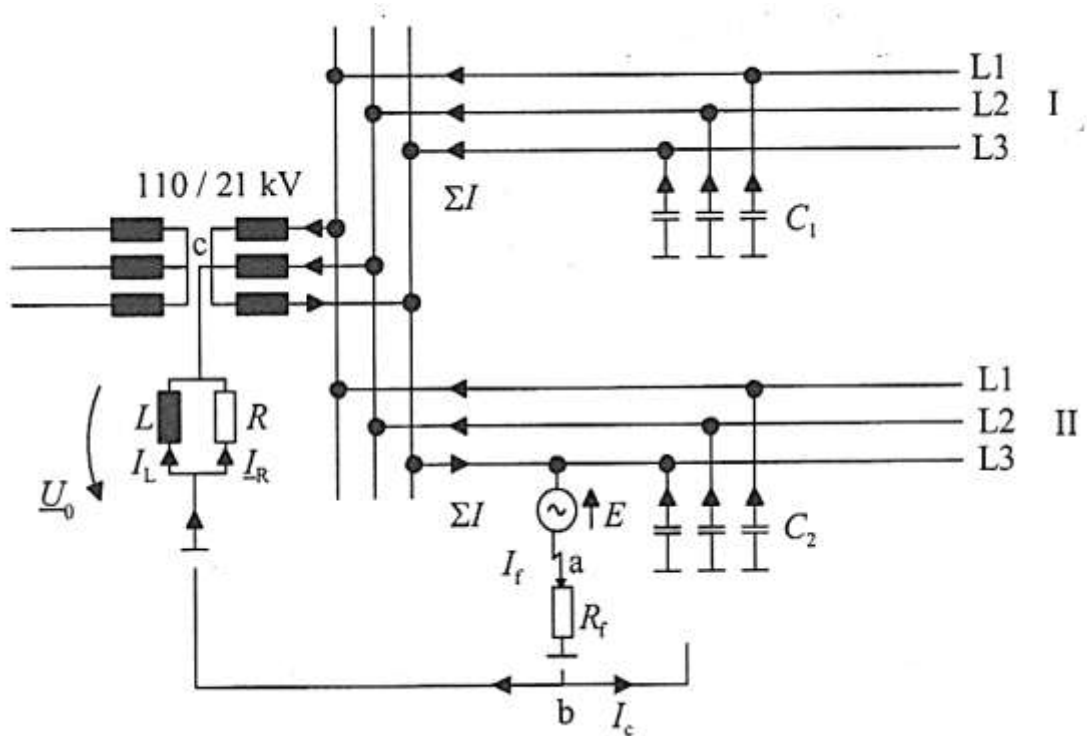
Tähtipisteen jännite (nollajännite) saa arvon yhtälöllä 14. [1, s. 165; 2, s. 84]

$$U_0 = \omega L I_L = \omega L \frac{U_v}{\frac{1}{3\omega C}} = 3\omega^2 L C U_v, \quad (14)$$

jossa  $U_v$  = verkon vaihejännite,  
 $U_0$  = nollajännite.

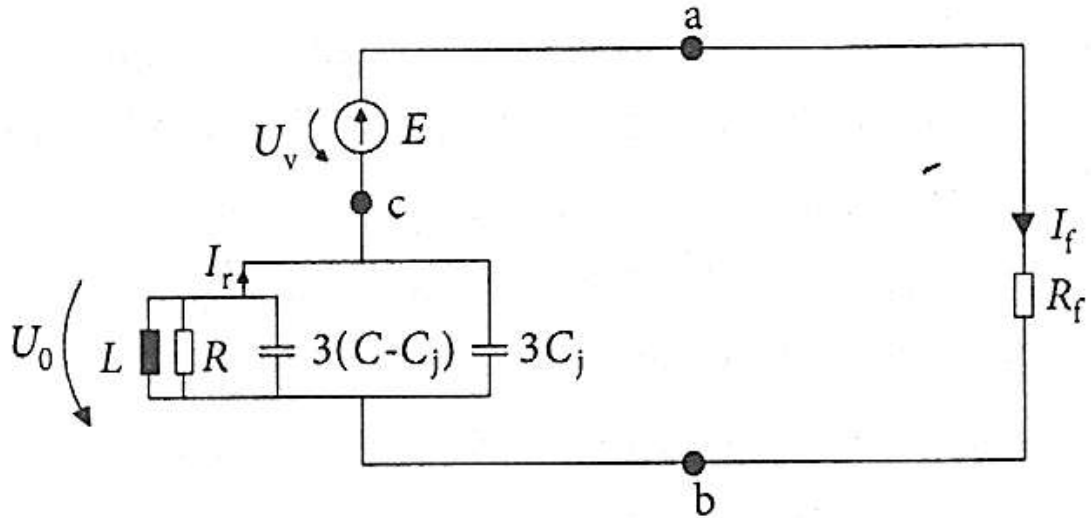
Kuva 5 on sammutetun verkon mallikytkentä. Maasulkuvirta voidaan sammuttaa vain sille määrättyllä verkon pituudella. Jos verkon pituutta muutetaan, on sammutuskelan induktanssia muutettava samassa suhteessa. Sammutettu järjestelmä on Suomessa käytössä pääasiassa välijänniteverkoissa. [1, s. 166; 2, s. 84]





Kuva 5. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku. [4, s. 185]

Sammutetun verkon sijaiskytkentä saadaan lisäämällä maasta erotetun verkon sijaiskytkentään sammutuskuristimen induktanssi  $L$  ja kuristimen resistanssia (ja mahdollista lisävastusta kuvaava) resistiivinen osa  $R$ . Kuvan 5 vioittuneen lähdön II alussa oleva summavirtamuuntaja havaitsee virran  $I_r$ , joka koostuu sijaiskytkennän piirissä lähinnä tähtipistejännitteestä  $U_0$  ja kuristimen resistiivisestä osasta  $R$ . Jännite  $-U_0$  ja virta  $I_r$  ovat likimain samansuuntaiset. [4, s. 184–185]



Kuva 6. Sammutetun verkon maasulun sijaiskytkentä. [4, s. 185]

Kuvan 6 sijaiskytkennän maasulkuvirta  $I_f$  ja tähtipistejännite  $U_0$  voidaan laskea yhtälöillä 15 ja 16. [4, s. 185–186]

$$\underline{I}_f = \frac{\underline{U}_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (15)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (16)$$

jossa  $C$  = verkon vaiheen maakapasitanssi,  
 $R_f$  = maasulun vikaresistanssi,  
 $\underline{U}_v$  = viallisen vaiheen jännite ennen vikaa.

## 2.5 Johdinkatkokset

Sähköverkon johtimen katkeaminen ilman maasulkua ja katkaisijan vajaanapainen toiminta ovat verkon sarjavikoja. Johdinkatkoksen aikainen kuormitusvirta on epäsymmetrinen, joka vaikuttaa siihen että kaikki kulutuslaitteet eivät kestä sitä pitkään ilman vaurioita. Johdinkatkoksen tapahduttua verkossa ei ole maasulkua eikä oikosulkua, joten syöttävän verkon suojaus voi pettää. Kulutuslaitteille tämä tilanne on kuitenkin haitallinen, joten niiden suojaus toteutetaan esimerkiksi kolmivaiheisella alijännitereleellä. [3, s. 341]

Mikäli avojohto katkeaa ja johtimen päät putoavat suoraan maahan, tapaus on sama kuin maasulku, jossa on vikaresistanssia. Tässä tapauksessa voidaan hyödyntää maasulkusuojauksen periaatteita. Jos taas johtimen pää jää roikkumaan ilman maakosketusta, suojauksen toiminta riippuu verkon rakenteesta ja kuormituksesta. Tällaista tapausta voidaan verrata katkaisijan tai erottimen yhden vaiheen katkokseen. Johdinkatkoksen aikana esiintyvä nollavirta voi olla niin pieni, että edes herkät maasulkureleet eivät kykene reagoimaan siihen. Maasulkureleet vaativat toimiakseen tietyn virta-asettelun ylitymisen ja toimivat vain, jos kuormitusvirta ja nollavirta lisääntyvät riittävästi. [3, s. 341]

### 3 Sähköverkon suojaus

Sähköverkon laitteiden suojaus on kokonaisuus, joka koostuu mittamuuntajista, suojareleistä ja katkaisijoista. Kuten standardissa SFS 60050–448 mainitaan, suojausjärjestelmä on tarkkaan määritelty ja se sisältää suojauslaitteet, mittamuuntajat, johdotuksen laukaisupiirin, teholahteet sekä tiedonsiirtojärjestelmän ja jälleenkytkentäautomaatiikan, mutta sen piiriin ei lasketa katkaisijoita. Sähköaseman sisäinen laitteiden välinen tiedonsiirto hoidetaan tavallisesti johtimilla tai valokuidulla. Joskus myös eri aseman releet on yhdistetty toisiinsa tietoliikenneyhteydellä. Yhteistoiminta eri laitteiden välillä on välttämätöntä, jotta suojaus toimii moitteettomasti ja vialliset osat saadaan irrotettua muusta verkosta. [3, s. 335]

Suojalaitteiden tehtävä on häiriövaikutusten torjunta. Suojalaitteet mittaavat sähköverkon ylivirrat, yli- tai alijännitteet, yli- tai alitaajuudet, vaaralliset kosketusjännitteet ja häiriöjännitteet. Vikatilanne on niin nopea että suojalaitteiden on toimittava ilman käyttökunnan apua ja valvontaa, ja niiden on selvittävä tarvittavista säätö- ja ohjaustoiminnoista. Hälyttävää suojaustapaa voidaan käyttää kun häiriö on lievä eikä siitä synny välitöntä vaaraa tai turvallisuusriskiä. Seuraavassa luettelossa on suojauksen yleiset vaatimukset. [1, s. 167]

- Suojauksen on oltava selektiivinen niin, että häiriötilanteessa mahdollisimman pieni osa verkosta kytkeytyy pois,
- sen on oltava nopea, niin että häiriön aiheuttamat vahingot jäävät lieviksi,
- sen on suojattava aukottomasti kaikkia verkon osia,
- sen on oltava luotettava, yksinkertainen ja käyttövarma,
- lisäksi sille voidaan suorittaa koestus käytön aikana.[1, s. 167; 2, s. 389; 5, s. 15]

Sähköverkko jaetaan suoja-alueisiin. Suoja-alue on se järjestelmän osa, jossa vikatilanteessa suoja toimii. Kun vika tapahtuu suoja-alueen ulkopuolella, suojaus ei reagoi vikaan. Suoja-alueita ovat esimerkiksi järjestelmän johdot, muuntajat, generaattorit, moottorit ja kokoomakiskot. Suojaustoimintojen luotettavuuden turvaamiseksi jokainen verkon osa kuuluu ainakin kahden itsenäisen releen suojausalueeseen. Kahdennus tehdään joko kahdella erillisellä pääsuojauksella tai siten, että varasuojana on toisen releen hi-

dastettu porras. Tärkeät suoja-alueet kuten kantaverkko, suuret muuntajat ja generaattorit suojataan lisäksi erillisellä varasuojalla. [1, s. 167; 2, s. 391; 5, s. 15; 3, s. 343]

Sähköturvallisuusmääräyksissä on annettu tarkat ohjeet ja määräykset vikatapausten suojaukseen ja hälytykseen. Sähköturvallisuusmääräyksillä pyritään turvaamaan ihmishengen ja terveyden turha vaara sekä turvaamaan sähkölaitokseen kuulumattoman omaisuuden vaara. Seuraavissa kappaleissa on esitelty sähköturvallisuuden kannalta oleellisimpia määräyksiä. [1, s. 167]

Kosketusjännitesuojauksesta annetaan määräykset Sähköturvallisuusmääräysten 9 ja 10 §:ssä. Yli 1000 V järjestelmien maasulkusuojaukseen koskevilla määräyksillä on huomioitu Suomen maaperän suuren ominaisresistanssin aiheuttamat tekniset ja taloudelliset vaikeudet. [6, s. 59–68]

Jännitteen valvonnalle on asetettu yleisluonteisia sähköntoimitusehtoja sekä sille on esitetty tiettyjä vaatimuksia Sähköturvallisuusmääräyksissä: ”Sähkölaitoksen tulee huolehtia siitä, että käyttöhäiriöt ja sähkön laadun poikkeamat nimellisarvosta pysyvät teknillisen käytännön ja taloudellisen tarkoituksenmukaisuuden edellyttämässä rajoissa”. Rajojen on täytettävä Sähköturvallisuusmääräysten 3 § kohdassa 2 asetetut sähkölaitteiden koestusmääräykset. [1, s. 168]

Jännitteen ja taajuuden valvontaan on määräyksiä myös Sähköturvallisuusmääräysten 16 § kohdassa 1 ”kone, jota ei jatkuvasti valvota, on varustettava itsetoimivalla säätö- ja suojalaitteella, joka luotettavasti estää vaaraa aiheuttavan jännitteen nousun tai taajuuden muutoksen verkossa, johon kone on kytketty.” [6, s. 101–102]

Ylijännitesuojauksesta on määräyksiä Sähköturvallisuusmääräysten 12 §:ssä. ”Sähkölaitos on rakennettava sellaiseksi, että vahingollisen ylijännitteen esiintyminen sen virtapiirissä on riittävästi estetty.” [6, s. 85]

Oiko- tai maasulun tapahtuessa on vikaantunut verkon osa yleensä erotettava muusta järjestelmästä, jotta se ei aiheuta vaaraa eikä vikavirta tuhoa verkon sähkölaitteita (3, s. 336). Sähköturvallisuuslain toisen luvun viidennessä pykälässä todetaan, että ”sähkölaitteet on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, että

1. niistä ei aiheudu hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa,
2. niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu suurempaa häiriötä,
3. niiden toiminta ei häiriydy helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti”. [14, s. 8]

Alla olevassa luettelossa on koottu syitä, miksi verkon viallinen osa on erotettava terveestä verkosta:

- Vikavirran lämpövaikutus voi olla vaarallinen ihmisille ja eläimille tai vahingoittaa laitteita ja aiheuttaa tulipaloja. Sisäkytkinlaitoksessa valokaaren paine- ja lämpövaikutus voi olla jopa hengenvaarallinen.
- Maasulunaikainen maassa kulkeva vikavirta voi aiheuttaa vaaraa ihmisille ja muille eläville olennoille.
- Maasulun aikana sähköaseman potentiaali voi nousta vaaralliseksi.
- Oiko- ja maasulkujen aiheuttamat jännitekuopat leviävät verkossa laajalle alueelle, joka voi johtaa monien tehtaiden tuotantoprosessien keskeytymiseen ja aiheuttaa turhia lisäkustannuksia.
- Maasulkuvirran takia muihin virtapiireihin voi indusoitua häiriöjännitteitä (mm. viestiverkkoihin). [3, s. 336–337]

### 3.1 Suojareleiden toimintaperiaate ja rakenne

Suojareleet havahtuvat, toimivat ja palautuvat tarkkailemiensa asettelusuureiden tilanmuutosten perusteella. Rele toimii normaalisti niin kauan kuin sen tarkkaileman suuren arvo ei ylitä aseteltua toiminta-arvoa. Kun releen tarkkailema suure saavuttaa asetellun toiminta-arvon, rele havahtuu siihen. Jos rele on havahtuneena tarpeeksi kauan, se antaa laukaisukäskyn katkaisijalle tai lähettää hälytyksen tai tekee molemmat. Jos suure pienenee toiminta-alueelta havahtumisaikana tai releen toimittua, rele palautuu jälleen normaalitilaan. Releen toiminta-ajaksi kutsutaan vian alkuhetkestä laukaisuun tai hälytykseen kuluva aikaa, jota voidaan pidentää asettelemalla releelle haluttu hidastus. Palautumisaika on se ajanjakso, mikä tarvitaan mittaussuureen pienenemisestä alle asetteleuarvon releen palautumiseen normaalitilaan saakka. Vian erotusaika on aikaväli vian alkamisen ja vikapaikan verkosta erottamisen välillä. [2, s. 391; 3, s. 344; 5, s. 19]

### 3.2 Releiden iän merkitys

Vanhimmat releistä ovat sähkömekaanisia ja ne koostuvat liikkuvista osista. Niiden toiminta voi perustua esimerkiksi virran muutoksen aiheuttaman magneettikentän muutokseen, joka aiheuttaa releessä liikkeen. Sähkömekaaniset releet ovat suuria, kestäviä, epätarkkoja ja niitä on koestettava väliajoin, jotta ne eivät jäykisty. Niiden toiminta on verrattain yksinkertaista ja niitä käytetään vielä nykyäänkin. Nopeimmat sähkömekaaniset distanssireleet voivat antaa laukaisukäskyn 20 millisekunnissa. [2, s. 391–392; 3, s. 344]

Staattiset eli elektroniset releet ilmestyivät markkinoille 1960-luvulla. Ne eivät sisällä mekaanisesti liikkuvia osia vaan ne koostuvat puolijohdekomponenteista ja mikropiireistä. Ne kykenevät monipuolisempiin suojaustoimintoihin kuin sähkömekaaniset releet. Lisäksi ne ovat sähkömekaanisia releitä tarkempia ja niiden palautumisaika on lyhyempi kuin sähkömekaanisilla releillä. Staattisten releiden haittapuolia ovat ylijänniteherkkyys, aputehon jatkuva tarve ja elektronisten osien vanheneminen, minkä takia ne ovat väliajoin korjattava tai jopa vaihdettava. [2, s. 392; 3, s. 344–345]

Uusimmat mikroprosessorireleet eli digitaalireleet tulivat käyttöön 1980-luvun lopulla. Niiden suojaustoiminnot ovat monipuolisempia kuin muissa releissä, ja niissä on runsaasti erilaisia asettelumahdollisuuksia. Se mahdollistaa monipuoliset suojausratkaisut, mutta toisaalta asetteluihin voi tulla virheitä, koska niitä on runsaasti. Digitaalireleiden virhelaukaisujen määrä on suurempi muilla releillä, mikä johtuu releiden monimutkaisuudesta. Turhat virhelaukaisut tekevät asettelujen ja kytkentöjen määrittämisen hankalaksi. Mikroprosessorireleissä voi olla lisätoimintoja varsinaisen päätoiminnan lisäksi, joita ovat muun muassa distanssireleeseen lisätty suunnattu maasulkusuoja, vikapaikan laskenta tai häiriötallennin. [3, s. 345]

Digitaalireleissä on itsevalvonta, eli se pystyy toimimaan täysin itsenäisesti ja ilmoittamaan joistakin rele vioista. Itsevalvonnan ansiosta digitaalireleiden koestusväliä voidaan pidentää, sillä niiden kunnosta saadaan jatkuvasti ajankohtaista tietoa. Niissä ei ole lainkaan kuluvia mekaanisia osia, mutta releiden ohjelmistoissa saattaa piillä ohjelmointivirheitä. Digitaalipiirien nopea kehitys voi tehdä tietyn reletyypin eliniän lyhyeksi eikä releen vaihtaminen toiseen ole välttämättä yksinkertainen tehtävä. Jos digitaalisiin releisiin on lisätty muita kuin suojaustoimintoja, on pidettävä mielessä, että releen ensisijainen toiminto on havaita vika ja lähettää laukaisukäsky katkaisijoille. Mahdolliset ylimääräiset toiminnot on toteutettava niin, että päätoiminnot eivät häiriydy. [3, s. 345]



## 4 Vikavirtasuojaus

Sähköturvallisuusstandardit sisältävät joukon yleisiä vikasuojaukselle asetettuja vaatimuksia, jotka sähköyhtiön on täytettävä. Vähimmäisvaatimuksia tehokkaammalla suojauksella voidaan usein parantaa sähkönjakelun luotettavuutta. Keskijänniteverkon huomioitavia erikoispiirteitä ovat verkon säteittäinen syöttötapa sekä tähtipistemaadoitusten ja nollajohtimen puuttuminen. Säteittäinen syöttötapa yksinkertaistaa selektiivisen suojauksen toteuttamista, päinvastoin kuin rengasverkossa. Tähtipistemaadoitusten ja nollajohtimen puuttuminen tekee maasulusta poikkeuksellisen vaikean vian, jonka tunnistaminen ja paikantaminen vaativat oman erikoistekniikkansa. [4, s. 176; 8, s. 44]

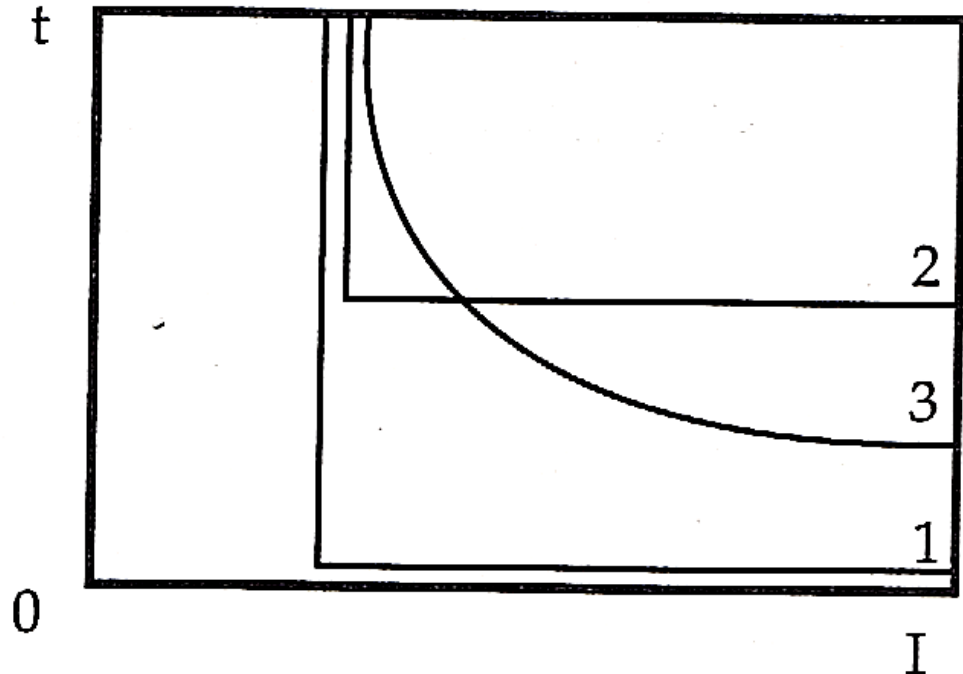
Ylikuormitus-, oikosulku-, maasulku- ja kaksoismaasulkusuojauksen vaatimuksia on Sähköturvallisuusmääräysten 8 §:ssä, jossa todetaan ”Määräysten edellyttämät suojausjärjestelmät on suunniteltava, rakennettava ja hoidettava siten, että ne toimivat luotettavasti. Lisäksi on pyrittävä siihen, ettei laitteen vioittuminen tee suojausta tehottomaksi. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota suojauslaitteiden ja katkaisijoiden apusähköjärjestelmien toiminnan luotettavuuteen ja niissä esiintyvien vikojen ilmaisuun”. [6; s. 32]

Oikosulkusuojaus on tehtävä laukaisevaksi, eli vikapaikka on kytkettävä jännitteettömäksi. Maasulkusuojaus voi sitä vastoin olla maadoitusjännitteen suuruudesta riippuen joko hälyttävä tai laukaiseva. Lisäksi johdon oikosulku- ja maasulkusuojauksen toteutus riippuu merkittävästi sähköverkon maadoitustavasta, johdon tärkeydestä ja johtoverkon rakenteesta. [1, s. 168; 2, s. 402]

### 4.1 Keskijänniteverkon oikosulkusuojaus

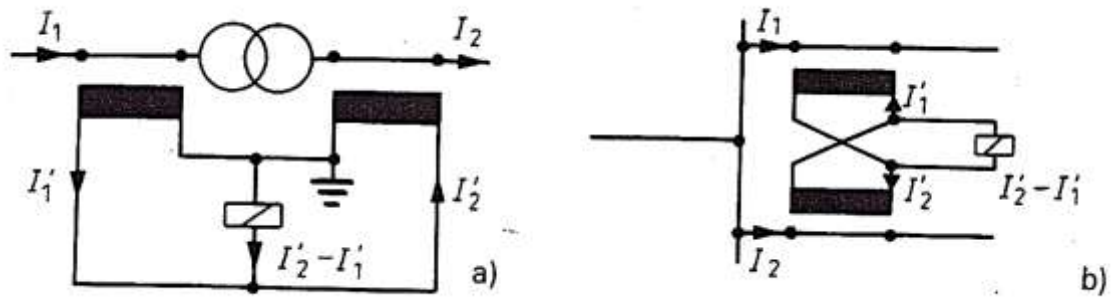
Oikosulkusuojauksen tavoite on ehkäistä oikosulkuvirran aiheuttamat lämpenemisvauriot johdoille ja laitteille sekä erottaa vioittunut verkon osa järjestelmästä. Toisena tavoitteena on järjestelmän turvallisuus vikatilanteissa sekä käyttäjille että ulkopuolisille. Suomessa oikosulkusuojaukseen käytetään vakioaikaylivirtareleitä, tämän lisäksi rele sisältää usein suuren virran hetkellislaukaisutoiminnon. Ylivirtarelettä voidaan käyttää, kun vikavirta on hitusenkin suurempi kuin suurin kuormitusvirta. Ylivirtarele ei havait-

se vikavirran suuntaa, joten se ei ole luotettava suojariele silmukoidussa verkossa, jossa vikavirta voi tulla eri suunnista. [3, s. 340; 4, s. 176; 8, s. 44]



Kuva 7. Ylivirtareleiden toimintakäyrät. 1) hetkellinen ylivirtarele, 2) vakioaikaylivirtarele, 3) käänteisaikaylivirtarele. [5, s. 36]

Lisäksi oikosulkusuojana voidaan käyttää myös differentiaalireleitä ja distanssireleitä. Differentiaalireleen toiminta perustuu mitattujen virtojen vertailuun. Kuvassa 8 on differentiaalireleen periaatteellinen sijoitus mittauspiiriin käytettäessä pitkittäis- ja poikittais-suojaa. Distanssireleellä voidaan havaita suunta ja etäisyys, joten sitä voidaan käyttää myös silmukoidussa verkoissa. Distanssireleillä toteutetun suojauksen etuna on suojauksen selektiivinen toiminta ilman viestiyhteyttä, tämä ominaisuus puuttuu differentiaalireleistä. [2, s. 394; 3, s. 340]



Kuva 8. Differentiaalirele a) pitkittäis- ja b) poikittaiskytkennässä. [2, s. 394]

Avojohtoverkon ylikuormitus on harvinainen ilmiö, koska johdin omaa hyvän lämmönluovutusominaisuuden. Havahtumisvirran asetteluarvo on valittava siten, että rele toimii noin kaksinkertaisella kuormitusvirralla sekä myös johtimen loppupäässä tapahtuvassa 2-vaiheisessa oikosulussa. Kaapeliverkossa havahtumisen on tapahduttava viimeistään johtimen kuormitettavuuden tullessa vastaan. Jos ylikuormittumista seurataan valvotun kaukojärjestelmän avulla, voidaan sallia suurempiakin virta-arvoja. [4, s. 176; 8, s. 45]

Johtosuojaukseen liittyy läheisesti jälleenkytkentäautomaatiikka, sillä valokaariviat häviävät jos vikapaikka tehdään hetkellisesti jännitteettömäksi. Hyödyntämällä pikajälleenkytkentää voidaan poistaa noin 60 % jakeluverkon vioista ja siirtoverkoissa ( $U \geq 110$  kV) noin 83 %. Yleisemmin käytetyt pj:n jännitteettömät väliajat ovat 0,2–0,4 s, tämän lisäksi suoritetaan monesti myös aikajälleenkytkentä 0,5–3 minuutin kuluessa. Käyttöhenkilökunta hälytetään paikalle siinä tapauksessa jos jälleenkytkentäohjelma epäonnistuu. [1, s. 175; 2, s. 402]

Hetkellislaukaisulla varmistetaan, etteivät sähköaseman läheiset tärkeät johto-osien oikosulkukestoisuudet ylitä. Samalla estetään syvien jännitekuoppien pitkät kestoajat. Sähköaseman pääkatkaisijassa käytetään hetkellislaukaisua suojaamaan mahdollisilta kiskoston oikosuluilta. Hetkellislaukaisun toimiminen edellyttää virtamuuntajilta kestävästä toistokykyä myös verkon suurilla virroilla. [4, s. 176–177; 8, s. 44]

Oikosulkukestoisuutta tarkistettaessa on huomioitava mahdollisen pikajälleenkytkennän vaikutus sähköverkon komponentteihin. Etenkin suurilla johtimilla sekä maakaapeleilla myös aikajälleenkytkennällä on lämpenevää lisäävä vaikutus. On muistettava, että lämpenemävaurioita voidaan aiheuttaa myös kauko-ohjauksella kytkemällä oikosulussa oleva johto takaisin verkkoon liian lyhyen jäähtymisajan jälkeen. [4, s. 177; 8, s. 45]

Aikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana tapahtuva jäähtyminen huomioidaan laskemalla oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika yhtälöstä 17. [4, s. 177]

$$t = t_1 * e^{-t_0/\tau} + t_2, \quad (17)$$

jossa

$t_1$  = pikajälleenkytkentää edeltävän ja sen jälkeisen oikosulkujen kestojen summa,

$t_0$  = aikajälleenkytkennän jännitteetön aika,

$\tau$  = johtimen jäähtymisaikavakio,

$t_2$  = aikajälleenkytkennän jälkeinen oikosulun kesto aika.

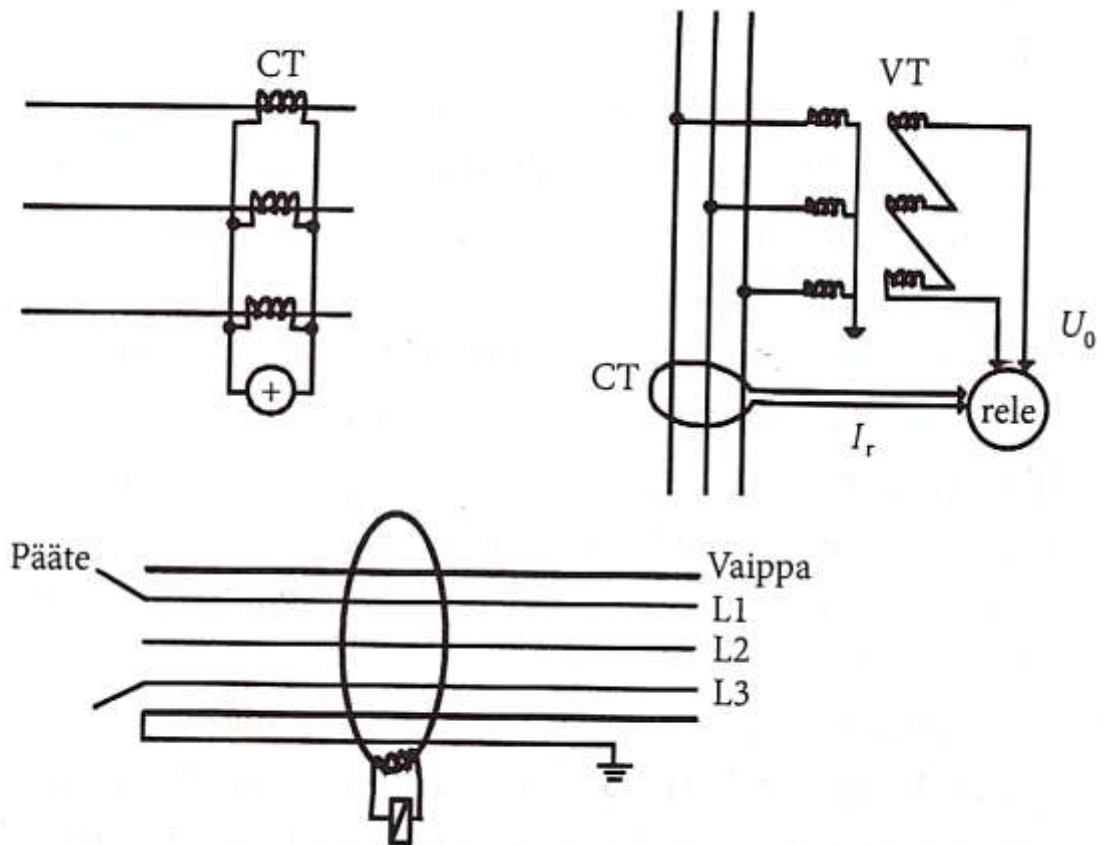
## 4.2 Maasulkusuojausten toteuttaminen

Maasta erotetun verkon maasulkusuojausta ei voida perustaa oikosulkusuojausten tavoin ylivirtasuojien käyttöön., koska maasulkutilanteen vikavirta on pieni (tavallisesti kuormitusvirtaakin pienempi). Maasulun indikaattoreita on kuitenkin monia, joista seuraavassa on esitetty tärkeimpiä.

- Tähtipistejännitteen muutos,
- vaihejännitteen muutos,
- summavirta,
- virran ja jännitteen mahdolliset yliaallot
- sekä suurtaajuiset muutosvirrat. [4, s. 190]

Maasulun muutosvirtoja syntyy maasulkuhetken alussa, kun viallisen vaiheen maakaapasitanssit purkautuvat ja terveiden vaiheiden maakaapasitanssit varautuvat. Sähköverkon maasulkusuojaus toteutetaan yleensä maasulun suuntareilla. Maasulkureleet si-

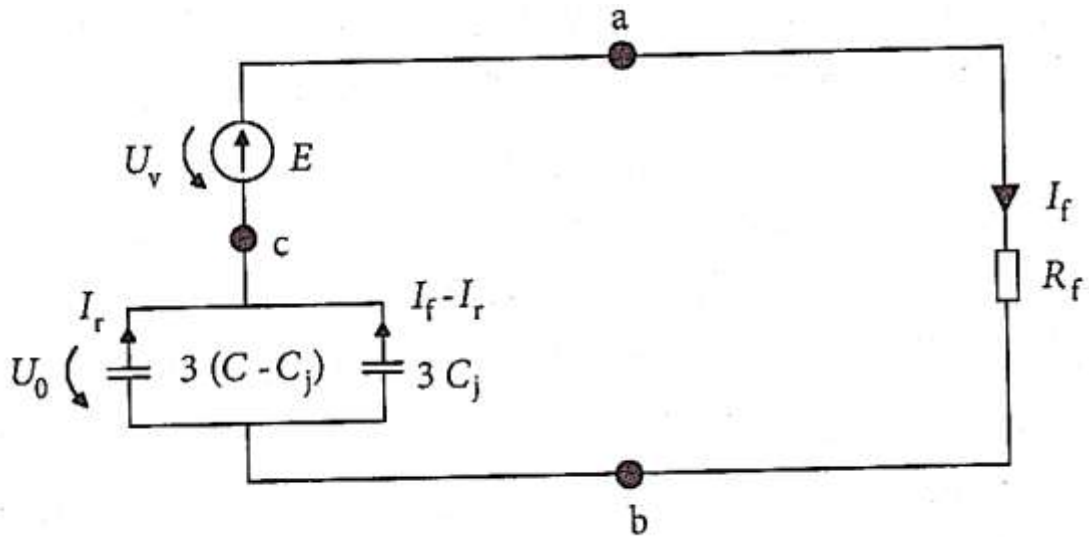
jaitsevat tavallisesti sähköasemien lähtöjen yhteydessä. Maasulkusuojaus perustuu maasulunvian aiheuttamaan vaihevirtojen epäsymmetriaan ja tähtipistejännitteen kohoamiseen. Virtaepäsymmetriaa havainnollistava nollavirta saadaan johtolähdön vaihevirtojen osoitinsummasta. Tämä saadaan kolmen vaiheen virtamuuntajien summakytkenällä tai kaapelivirtamuuntajalla. [4, s. 190–191]



Kuva 9. Summavirran ja tähtipistejännitteen mittaaminen. [4, s. 190]

Tähtipistejännite mitataan vaihejännitteisiin kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkenästä. Maasulkureleen on havahduttava vain siinä tapauksessa, että maasulku on juuri tämän releen suojaamalla lähdöllä eli tällä tavoin varmistetaan suojuksen selektiivinen toiminta. Vioittuneen lähdön alun summavirtamuuntajan mittaama nollavirta on pienempi kuin maasulkupaikan maasulkuvirta  $I_f$ . Vioittuneen lähdön maakapasitanssien vaikutus on huomioitava summavirtaa laskettaessa, sillä vioittuneen lähdön maakapasitanssien määräämä vikavirran komponentti kulkee summavirtamuuntajan läpi molempiin suuntiin (kuva 10). [4, s. 191; 9]

Maasta erotetussa verkossa vioittuneen lähdön sijaiskytkennän maasulkuvirta  $I_r$  saadaan seuraavasti.



Kuva 10. Useampilähtöisen maasulkupiirin sijaiskytkentä. [4, s. 191]

Piirroksessa  $C$  edustaa koko verkon kapasitanssia ja  $C_j$  vioittuneen lähdön maakapasitanssia. Olettamalla tähtipistejännite yhtä suureksi molempien haarojen kautta laskettuna saadaan yhtälön 18 mukaisesti. [4, s. 191]

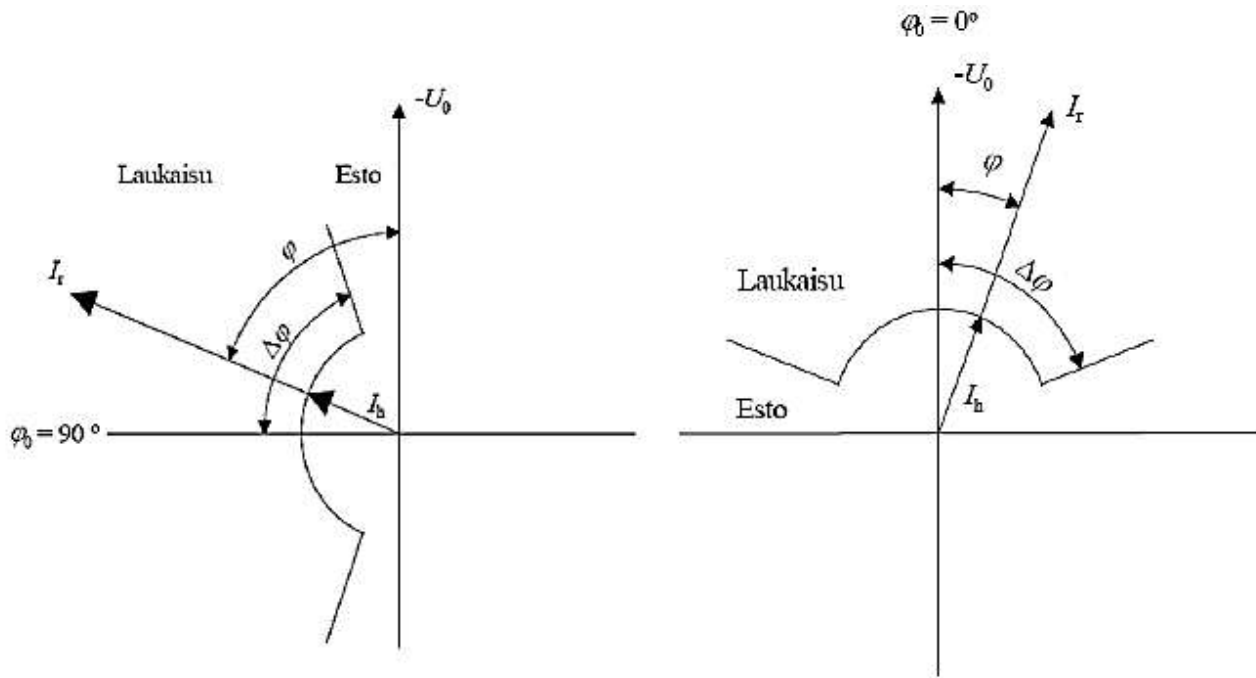
$$-I \left[ \frac{1}{j3\omega(C-C_j)} \right] = -(I_f - I_r) \frac{1}{j3\omega C_j}, \quad (18)$$

josta

$$I_r = \frac{C-C_j}{C} * I_f. \quad (19)$$

Maasulun suuntareleen toiminnan ehtona on, että virta  $I_r$  ja tähtipistejännite  $U_0$  ylittävät määritetyt alkuasetteluarvot. Maasulun sattuessa kuvan 2 mukaisesti lähdössä II, suuri osa vikavirrasta kulkee maakapasitanssin  $C_j$  ja lähdön I kautta kiskostoon, ja sieltä takaisin vialliseen lähtöön II. Ehtona lähdön II releen havahtumiselle on, että nollavirta kulkee summavirtamuuntajan kautta kohti vikapaikkaa eikä takaisin kiskostoon päin. Kuvan 10 sijaiskytkennän kapasitanssit  $C-C_j$  havainnollistavat kuvan 2 maakapasitanssia  $C_1$ , joten tässä tapauksessa virta  $I_r$  kulkee lähtöä I pitkin kiskostoon ja edelleen läh-

dön II kautta vikapaikkaan. Vikavirran suunnan tarkistamiseksi on verrattava  $-U_0$  ja virran  $I_r$  osoittimen välistä kulmaa. Virran on oltava noin  $90^\circ$  edellä maan ja tähtipisteen välistä jännitettä  $-U_0$ . Tästä saadaan releen kolmanneksi ja vian sijaintilähdön tunnistavaksi toimintaehdoksi:  $90^\circ - \Delta\varphi < 90^\circ + \Delta\varphi$ . [4, s. 192]



Kuva 11. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi maasta erotetussa verkossa sekä sammutetussa verkossa. [4, s. 192]

Myös sammutetussa verkossa vaihekulmasuuntareleen toiminnan ehtona on, että virta  $I_r$  ja tähtipistejännite  $U_0$  ylittävät määrätyt asetteluarvot. Sammutetussa verkossa nollavirran ja negatiivisen tähtipistejännitteen välinen kulmaero on enintään  $\pm \Delta\varphi$ . Resonanssitilanteen vuoksi vian aikainen kulmaero voi vaihdella merkittävästi. Tästä johtuu, että sallittu toleranssi  $\Delta\varphi$  on usein melko suuri, esimerkiksi  $80^\circ$ . [4, s. 193]

Vaihekulmasuuntareleen hyviä puolia ovat jännite-, virta- ja kulmavaatimusten riippumattomuus toisistaan sekä sen herkyys. Maasulkusuojauksessa tarvittavat tiedot lähtöjen summavirroista mitataan kunkin lähdön alkupäässä olevalla summavirtamuuntajalla. Kaapelilähdöissä voi summakytken sijaan käyttää maasulkusuojauksessa kaapelivirtamuuntajaa, joka muodostuu kaapelin ympärille laitetusta virtamuuntaja sydäimestä, johon on käämitty toisiokäämi (kuva 9). Summavirtamuuntajien toision nimellisvirta on tavallisesti 5A, mutta ensiökäämin nimellisvirta valitaan verkon maasulkuvirran mukaan (esimerkiksi 20/5A). [4, s. 193]

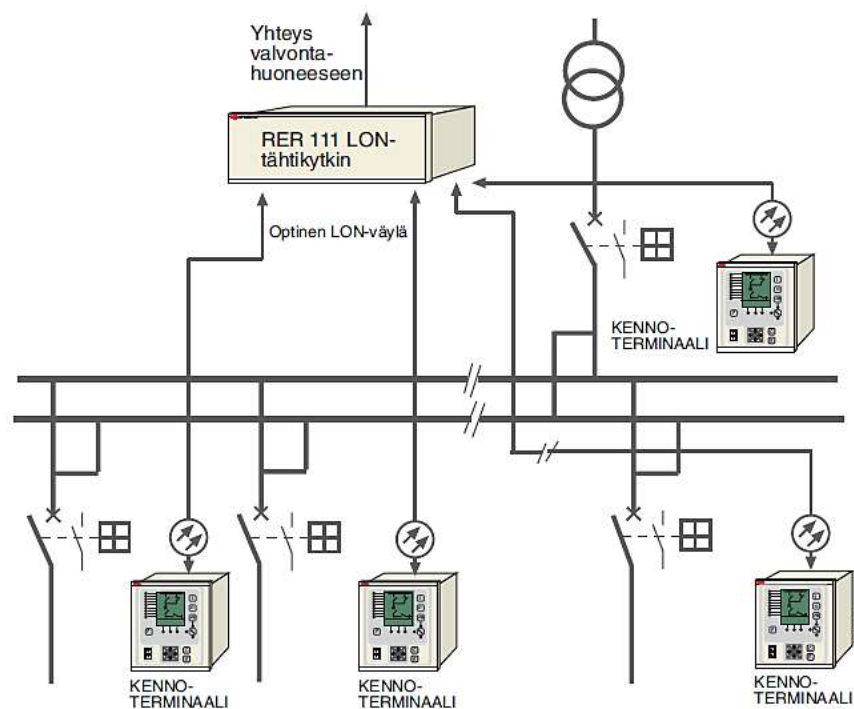
Koko sähköverkon nollapistejännite mitataan sähköasemalla olevilla jännitemuuntajilla. Nollajännitteen mittausta suoritetaan avokolmiokytken avulla, jossa vaiheiden väliin kolmioon kytkettyjen jännitemuuntajien yksi kulma jätetään avoimeksi. Nollajännite on silloin mitattavissa tästä avokolmiosta. Jännitemuuntajien muuntosuhteet on usein mitoitettu siten, että avokolmion jännite on 100 V, kun tähtipisteessä on vaihejännitteen suuruinen jännite. [4, s. 193]



## 5 ABB REF 541-kennoterminaali

### 5.1 Yleistoinnot

ABB REF 541 -sarjan kennoterminaali on ensisijaisesti tarkoitettu käytettäväksi kauko-ohjatun sähköaseman säteittäisten jakelusähköverkkojen johtolähtöjen suojaukseen, ohjaukseen, mittaukseen ja valvontaan. Kennoterminaalia käytetään yksikisko-, kaksikisko- ja dupleksijärjestelmissä lisäksi maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa. [11, s. 13; 12, s. 44]

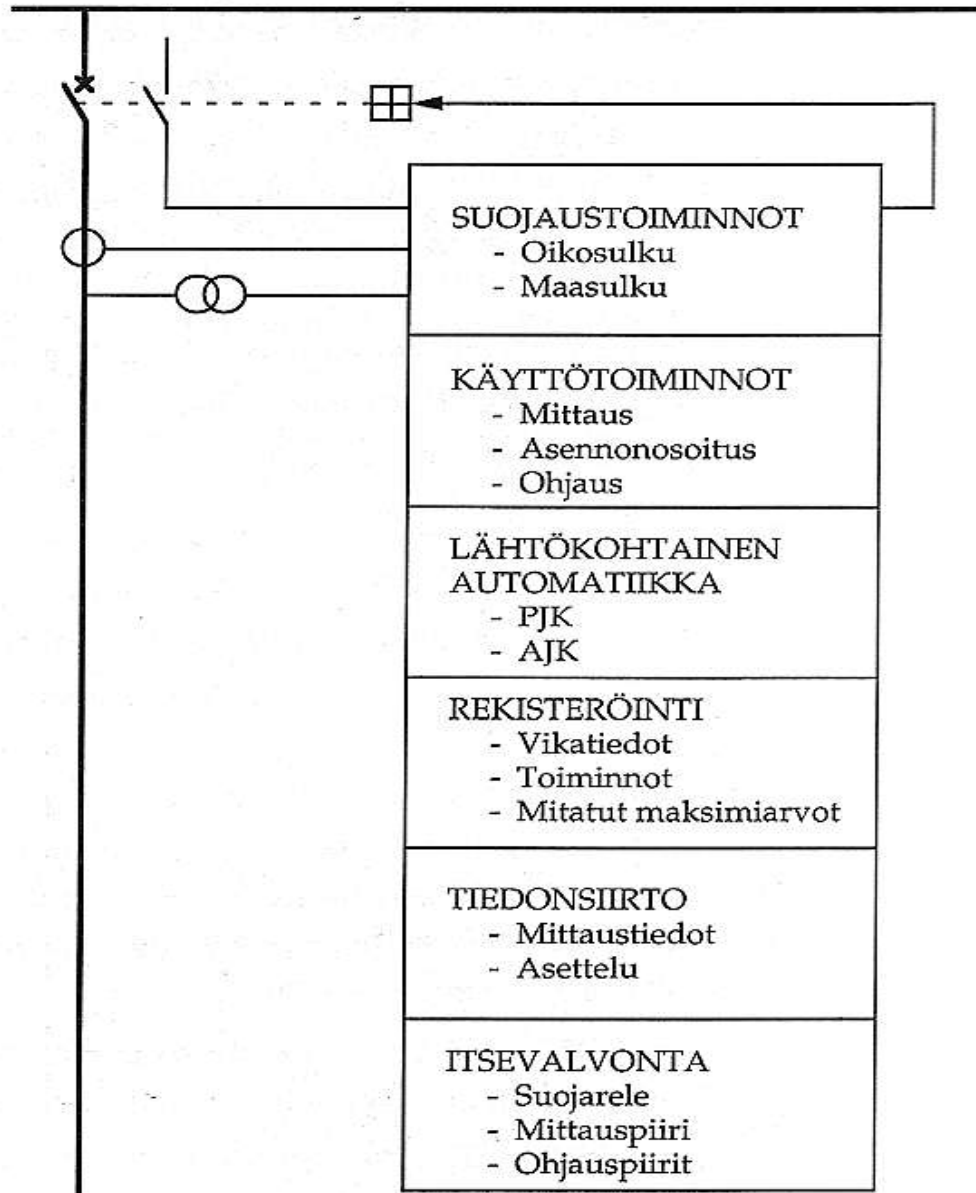


Kuva 12. REF 541 -sarjan kennoterminaaleihin perustuva hajautettu suojaus ja ohjausjärjestelmä. [10]

REF 541 -sarjan kennoterminaalin toiminnot riippuvat valitusta ja halutusta toimintotasosta ja mekaanisesta kokoonpanosta. Halututtuja sovelluskohtaisia toimintoja voidaan aktivoida kattavista suojaus-, ohjaus-, mittaus-, tehonlaatu-, kunnonvalvonta-, yleisfunktioista. Verrattuna erillisten tuotteiden käyttöön, haluttujen toimintojen yhdistäminen tarjoaa erittäin kustannustehokkaan ratkaisun. [11, s. 13]

Paikalliskäytössä erottimien ja katkaisijoiden tilatiedot näytetään kennotermiinin LCD-näytön mimiikkänäkymässä. Katkaisijoiden ja erottimien tilatiedot ovat myös välitettävissä kaukokäyttöjärjestelmään väyläliitynnän kautta. Ohjattavia kohteita, kuten katkaisijoita ja erottimia, voidaan ohjata auki tai kiinni kaukokäyttöjärjestelmän, esimerkiksi ABB MicroSCADA -ohjelman, kautta. Tilatiedot ja ohjaussignaalit siirretään sarjaväylän kautta. Katkaisijoita ja erottimia voidaan myös ohjata auki tai kiinni paikallisesti kennotermiinin etupaneelin painikkeiden avulla, jotka ovat täysin ohjelmoitavissa halutulla tavalla. [11, s. 13]

REF-541 -kennotermiini on suunniteltu käytettäväksi selektiivisenä sähköverkon oikosulku- ja maasulkusuojana. Se sisältää yksityiskohtaiset ylivirta- ja maasulkusuojastoiminnot. Haluttaessa kennotermiinillä voidaan toteuttaa myös jälleenkytkentätoiminto. Toiminnolla on mahdollista suorittaa viisi peräkkäistä jälleenkytkentää. Kuva 13 on havainnollistava esimerkki kennotermiinin perustoiminnoista. [11, s. 14]



Kuva 13. Esimerkki kennoterminaalien käytöstä johtolähdössä. [5, s. 26]

REF-541 -kennoterminaalilla mitataan muun muassa vaihevirtoja, pääjännitteitä, vaihejännitteitä, nollavirtaa ja -jännitettä, taajuutta ja vaihekulmaa. Pätö- ja loisteho lasketaan hyödyntäen mitattuja virtoja ja jännitteitä. REF-541 -kennoterminaalien kunnonvalvontatoiminnoilla voidaan valvoa muun muassa kaasunpainetta ja katkaisijoiden kulumista, sekä tallentaa toiminta-aikoja ja aikatauluttaa määräaikaishuoltoja. [11, s. 14]

## 5.2 Suojaustoiminnot

Suojaus on REF-541 -kennoterminaalien oleellisimpia toimintoja. Suojaustoiminnot, kuten ylivirtasuojaus NOC3Low ovat toisistaan riippumattomia ja toiminnoilla on omat muokattavat asetteluryhmänsä. Esimerkiksi suuntaamaton ylivirtasuojas sisältää kolme suojausporttia: NOC3Low, NOC3High ja NOC3Inst. Jokaisen portin toiminnot ovat toisistaan riippumattomia. [11, s. 16]

Virtamittaukseen perustuvissa suojaustoiminnoissa käytetään joko Rogowski-antureita (virtasensori) tai perinteisiä virtamuuntajia. Vastaavasti jännitemittaukseen perustuvissa suojaustoiminnoissa voidaan käyttää joko jännitteen jakajia tai perinteisiä jännitemuuntajia ja avokolmiokytkentää. [10, s. 4]

Taulukko 1. REF 541 -sarjan kennoterminaalien suojaustoiminnot [11, s. 16–17]

Toiminto	Selitys
AR5Func	Jälleenkytkentä (5 porrasta)
CUB1Cap <sup>2)</sup>	Kondensaattoriparistojen epäsymmetriasuoja
CUB3Cap <sup>3)</sup>	H-siltaan kytketyn kondensaattoripariston 3-vaiheinen epäsymmetriasuoja
CUB3Low	Vaihekatkosuoja
DEF2Low	Suunnattu maasulkusuoja, $I_0>$ -porras
DEF2High	Suunnattu maasulkusuoja, $I_0>>$ -porras
DEF2Inst	Suunnattu maasulkusuoja, hetkellistoiminta
DOC6Low <sup>1)</sup>	Kolmivaiheinen, suunnattu ylivirtasuoja, $I>$ -porras
DOC6High <sup>1)</sup>	Kolmivaiheinen, suunnattu ylivirtasuoja, $I>>$ -porras
DOC6Inst <sup>1)</sup>	Kolmivaiheinen, suunnattu ylivirtasuoja, hetkellistoiminta
Freq1St1 <sup>1)</sup>	Ali- tai ylitaajuussuoja, porras 1
Freq1St2 <sup>1)</sup>	Ali- tai ylitaajuussuoja, porras 2
Toiminto	Selitys
Freq1St3 <sup>1)</sup>	Ali- tai ylitaajuussuoja, porras 3
Freq1St4 <sup>1)</sup>	Ali- tai ylitaajuussuoja, porras 4
Freq1St5 <sup>1)</sup>	Ali- tai ylitaajuussuoja, porras 5
Fusefail <sup>3)</sup>	Sulakevikavalvonta
Inrush3	Kolmivaiheinen, muuntajan kytkentä- ja moottorin käynnistysvirran ilmaisin
MotStart <sup>2)</sup>	Moottorien kolmivaiheinen käynnistysvirran valvonta
NEF1Low	Suuntaamaton maasulkusuoja, $I_0>$ -porras
NEF1High	Suuntaamaton maasulkusuoja, $I_0>>$ -porras
NEF1Inst	Suuntaamaton maasulkusuoja, hetkellistoiminta
NOC3Low	Kolmivaiheinen, suuntaamaton ylivirtasuoja, $I>$ -porras
NOC3High	Kolmivaiheinen, suuntaamaton ylivirtasuoja, $I>>$ -porras
NOC3Inst	Kolmivaiheinen, suuntaamaton ylivirtasuoja, hetkellistoiminta
OL3Cap <sup>2)</sup>	Kondensaattoripariston 3-vaiheinen ylikuormitussuoja
OV3Low	Kolmivaiheinen ylijännitesuoja, $U>$ -porras
OV3High	Kolmivaiheinen ylijännitesuoja, $U>>$ -porras
PSV3St1 <sup>2)</sup>	Symmetrisiin komponentteihin perustuva jännitesuoja, porras 1
PSV3St2 <sup>2)</sup>	Symmetrisiin komponentteihin perustuva jännitesuoja, porras 2
ROV1Low	Nollajännitesuoja, $U_0>$ -porras
ROV1High	Nollajännitesuoja, $U_0>>$ -porras
ROV1Inst	Nollajännitesuoja, hetkellistoiminta
SCVCSt1 <sup>1)</sup>	Tahdissaolon valvontatoiminto/jännitteenvolvontatoiminto, porras 1
SCVCSt2 <sup>1)</sup>	Tahdissaolon valvontatoiminto/jännitteenvolvontatoiminto, porras 2
TOL3Cab <sup>1)</sup>	Kolmivaiheinen terminen kaapelisuoja
TOL3Dev <sup>2)</sup>	Kolmivaiheinen terminen laitesuoja
UV3Low	Kolmivaiheinen alijännitesuoja, $U>$ -porras
UV3High	Kolmivaiheinen alijännitesuoja, $U>>$ -porras

## 6 Sähkölaboratoriotilan kennoterminaali

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriotiloissa sijaitsevan ABB REF – 541 kennoterminaalin toimintaa. Kennoterminaalin tarkoituksena on simuloida säteettäisen keskijänniteverkon vikoja sekä johtojen ylivirta- ja maasulkusuojausta. Vikojen simulointi perustuu kolmivaihemuuntajan ja kahden johtomallin käyttöön.



Kuva 14. Sähkölaboratorion kennoterminaali.

Kennoterminalilla toteutettu säteettäisen keskijänniteverkon vikojen ja suojauksen simulointi on kuulunut osana sähkövoimatekniikan laboratorioharjoitus II -kurssia. Kuitenkin viime vuosina kennoterminali on ollut lähes käyttämättömänä, koska sen toimivuus on ollut eri syistä vajavainen. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää mitkä kennoterminalin toiminnoista on mahdollista suorittaa sekä mitkä ovat laitteen toimimattomuuden syyt ja voidaanko näistä vioista päästä eroon, jotta laboratorioharjoituksesta saisi toimivan ja täten kennoterminali saataisiin täyteen hyötykäyttöön.

Kennoterminali on hankittu sähkölaboratoriotiloihin vuonna 2006, jonka jälkeen sen alkuperäinen kokoonpano on toteutettu vuonna 2007 osana projektityötä. Kokoonpanotyön on suorittanut entinen Pohjois-karjalan ammattikorkeakoulun oppilas ja työn ohjaajana on toiminut koulun entinen tuntiopettaja Osmo Massinen. Alkuperäisen asennustyön jälkeen laite on ollut toiminnoiltaan rajallinen, sillä kennoterminalille suunniteltuja vika- ja suojaustoimintojen testauksia ei ole koskaan voitu suorittaa toimivasti. [13]

Kennoterminalin paikalliskäytössä erottimien ja katkaisijoiden tilatiedot ovat näkyvisissä kennoterminalin LCD – näytössä, mutta näitä tilatietoja ei ole päästy muokkaamaan käyttöjärjestelmän lisenssin rajallisuuden vuoksi. [13]



Kuva 15. LCD – näytön mimiikkanäkymä.

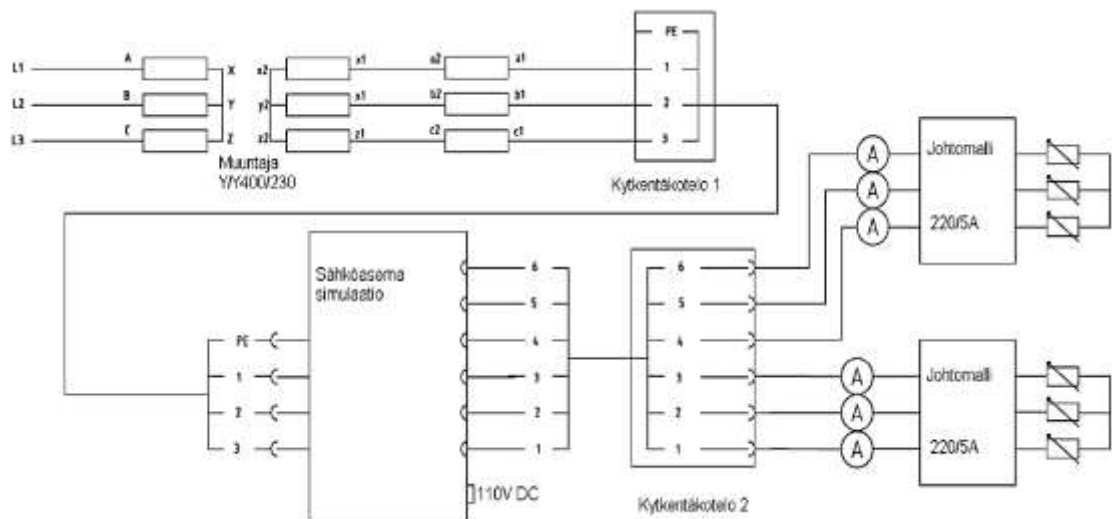
Vuonna 2009 kennoterminaalien ohjauspiiri on suunniteltu ja johdotettu uudelleen (ks. liite 1), sillä alkuperäisen ohjauspiirin piirikaavio ja kytkentä on ollut virheellinen. Lisäksi käyttöjärjestelmän lisenssi on uusittu yhteistyössä ABB:n kanssa sekä kaukokäyttöohjelma MicroSCADA on päivitetty ja sen lisenssi uusittu. Korjaustyöt ovat tehty osana kesätyöprojektia entisten Pohjois- Karjalan ammattikorkeakoulun oppilaiden toimesta. Korjaustoimien ansiosta kennoterminaalien ohjauspiiri sekä käyttöjärjestelmän suojaustoiminnot ovat saatu muokattaviksi, joskin vikatestaus johtomalleilla on tässäkin tapauksessa jätetty tekemättä. [13]



## 7 Tutkimustulokset

Tutkimustyön lähtökohtana oli selvittää kennoterminalin toimintaa hyödyntäen sähkölaboratorioharjoituksen ”keskijänniteverkon viat ja johtojen suojaus” -työohjeita. Tutkimuksen tässä vaiheessa oli selvää, että johtomallien vikatestausta ei ollut laitteen käyttöhistorian aikana koskaan suoritettu onnistuneesti. Tästä johtuen laboratorioharjoituksen työohjeiden orjallinen seuraaminen oli järkevin käytäntö tutkia kennoterminalia.

Tutkimuksen aluksi rakennettiin alla olevan kuvan 16 mukainen kytkentä.



kuva 16. Sähköasemaympäristön simulaatio.

### 7.1 Ohjauspiirin testaus

Työohjeen mukaisesti kokeiltiin ohjauspiirin toiminta, eli kokeiltiin molempien johtomallilähtöjen erottimen ja katkaisijan toiminta. Tässä vaiheessa huomattiin, että erottimien toiminta oli moitteetonta, mutta kytkimien samanaikainen ohjaus auki – asentoon ei ollut mahdollista eli johtomallilähdöt toimivat vain yksi kerrallaan. Tämä vika noteerattiin, mutta tässä vaiheessa päätettiin jatkaa työohjeiden mukaisesti yhdellä toimivalla johtomallilähdöllä.



Kuva 17. Johtomallit 1 ja 2.

## 7.2 Ylivirtasuojaus

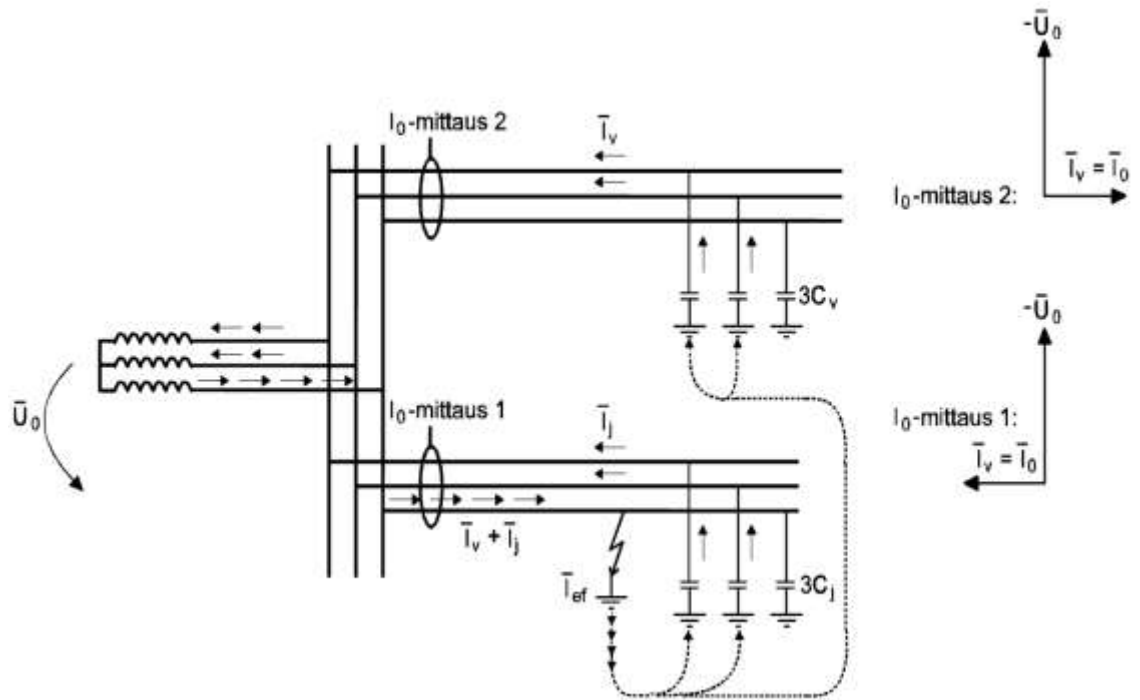
Seuraavaksi tutkittiin kennoterminaalin ylivirtasuojausta. Kennoterminaalin ylivirtareleen pikalaukaisu (NOC3Inst) aseteltiin pienimpään arvoonsa vastaamaan 55 % nimellisvirrasta. Nimellisvirta oli molemmissa käytetyissä johtomalleissa 5A. Pikalaukaisun lisäksi, aseteltiin ylivirtalaukaisu (NOC3High) vastaamaan 50 % nimellisvirrasta ja sen laukaisuajaksi määriteltiin 5 sekuntia.

Itse vika kytkettiin verkkoon lisäämällä johtomallin kuormitukseksi kolmivaiheinen kuormitusvastus. Johtomallin ylivirta synnytettiin säätämällä kuormitusvastusta ja täten kasvattamalla johdon virtaa. Ylivirtareleet havahtuivat ja toimivat kokeen aluksi säädettyillä arvoilla. Ylivirtasuojauksen testaus suoritettiin onnistuneesti molemmilla johtomalleilla, joskin vikatestaus voitiin toteuttaa nyt vain yhdellä johtomallilähdöllä kerrallaan.

## 7.3 Maasulkusuojaus

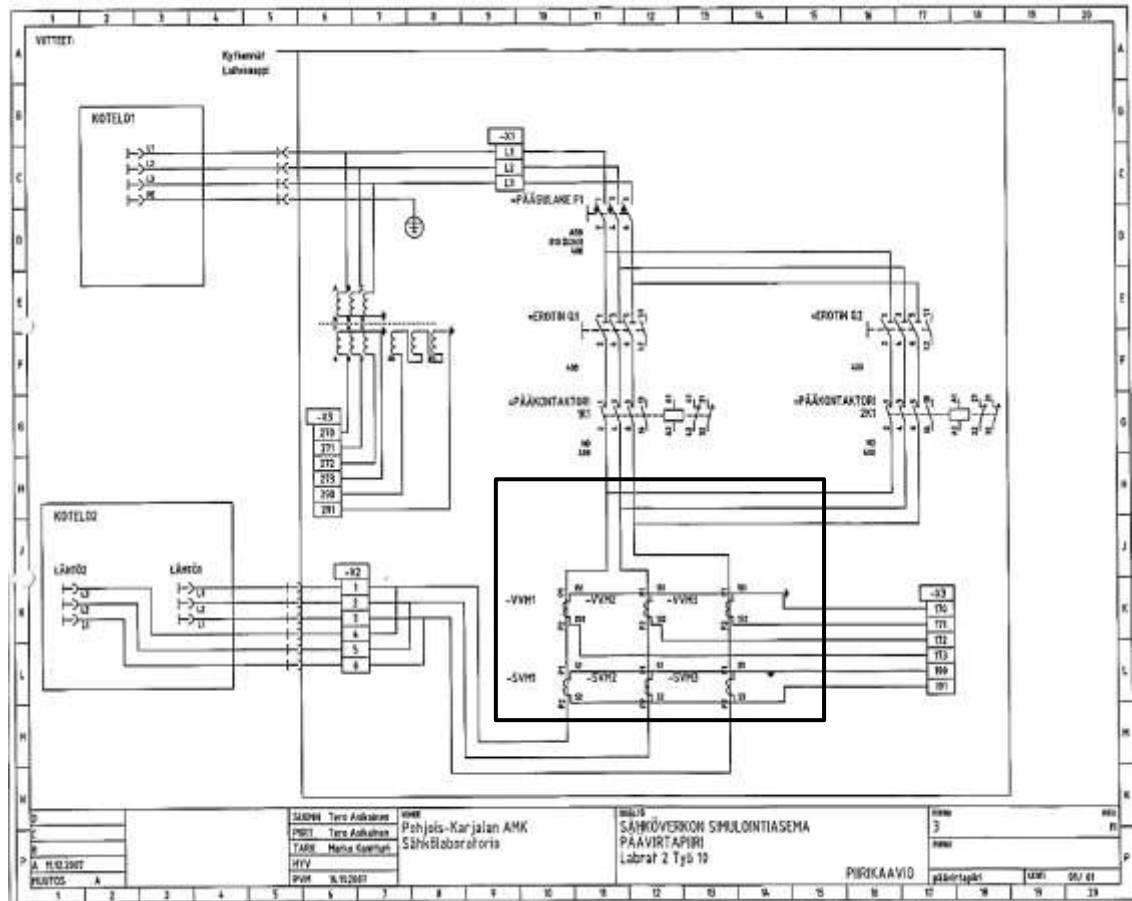
Ylivirtasuojatutkimuksen jälkeen tarkasteltiin maasulkutestausta. Maasulkututkimuksen varasuojina käytettiin johtomallien ylivirtasuojausta määritellyin asetteluin. Maasulkuvika tehtiin vaiheen ja suojamaan välille käyttämällä säädettävää lisävastusta. Kennoterminaalien maasulkureleen pikalaukaisu (DEF2Inst) ja vakioaikalaukaisu (DEF2High) aseteltiin tarkkailemaan nollajännitettä ja peruskulman muutosta. Lisäksi maasulkusuojaus tuli toteuttaa ilman johtokuormaa.

Maasulkusuojausten toimintaa kokeiltaessa molempien johtojen tulee olla kytkettyinä, koska maasulkusuojaus toimii viallista johtoa syöttävän muun sähköverkon osan maasulkuvirran perusteella (kuva 18). Viallisen johdon oma maasulkuvirta on johdon summavirtamittauksessa nolla. Maasulkuvian ollessa muualla ei terveen johdon syöttämä maasulkuvirta saa laukaista johdon maasulkusuojausta. Maasulkusuojausten periaatteita on kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.2.



Kuva 18. Maasta erotetun verkon maasulkuvirran muodostuminen. Osoitinpiirroksessa virran positiivinen suunta on kiskostosta johdolle päin. [9]

Koska maasulkusuojausten kokeiluun tarvitaan molemmat johtolähdöt, oli tutkittava jo aiemmin ilmennyt ongelma kennoterminaalien ohjauspiirissä.



Kuva 19. Kennoterminaalin päävirtapiiri.

Tutkimalla kennoterminaalin alkuperäistä päävirtapiiriä kennoterminaalin ongelma on selvä. Kuten kuvaan 19 on merkitty johtomallilähdöt yhdistyvät heti ohjauspiiriin jälkeen. Tämä on karkea virhearvio suunnittelussa ja vaikuttaa kennoterminaaln toimintaan merkittävästi. Toimintatasolla tämä suunnitteluvirhe tarkoittaa sitä, että molempia johtomallilähtöjä vastaa käytännössä yksi johtomallilähtö. On siis merkitsemätöntä kumpaa ohjauspiiriin erotin/katkaisija -paria käyttää, koska niillä ohjataan samaa johtomallilähtöä. Vaikka ohjauspiiri on uudistettu vuonna 2009, on tämä seikka jäänyt tekijöiltä huomioimatta ja siten laitteen toiminta on jäänyt vääjäämättä rajalliseksi.

Maasulkusuojauksen kannalta tämä merkitsee suojauksen toimimattomuutta, koska maasulkusuojauksessa tarvitaan molemmille johtomallilähdöille oma summavirtamittaus. Ilman johtomallilähtöjen summavirran mittauspistettä maasulkuvikaa ei voida havaita viallisessa johtomallissa, sillä ehtona viallisessa lähdössä sijaitsevan releen havahtumiselle pitää olla, että nollavirta kulkee summavirtamuuntajan kautta vikapaikkaan eikä kiskostoon päin.

Ylivirta- ja maasulkusuojauksessa kennotermiinalin vajavainen johtomallilähtöjen toiminta estää suojauksen selektiivisen toiminnan, joka on vikavirtasuojauksessa verkon kannalta hyvin oleellinen osa toimivaa suojausjärjestelmää.

#### **7.4 MicroSCADA**

Kennotermiinalin katkaisijoiden ja erottimien tilatiedot ovat myös välitettävissä kaukokäyttöjärjestelmään väyläliitynnän kautta. Kennotermiinalin ohjattavia kohteita, kuten katkaisijoita ja erottimia, voidaan ohjata auki tai kiinni ABB MicroSCADA -ohjelman kautta. Tilatiedot ja ohjaussignaalit siirretään sarjaväylän kautta. MicroSCADA vaatii toimiakseen voimassa olevan lisenssin, joka on päivitetty kesällä 2009. Ohjelmaa kehitellessä törmättiin vastaaviin ongelmiin kuin vuonna 2007, katkaisijoiden ja erottimien tilatiedot eivät olleet muokattavissa, vaikka yhteys tietokoneen ja kennotermiinalin välillä oli kunnossa. Ongelma viesti siitä, että ohjelman lisenssin käyttöaika oli umpeutunut.

## 8 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tekivät aiheelliseksi ongelmat kennoterminaalien toiminnassa. Tutkimustuloksissa esiin nousseet seikat ovat kennoterminaalien normaalin käytön kannalta ratkaisevia. Aiemmin toteutetut projektiluonteiset suunnittelu- ja kokoonpanotyöt ovat jättäneet jälkensä laitteen kokonaisvaltaiselle toimivuudelle. Lisäksi vuosien 2007 ja 2009 suunnittelu- ja kokoonpanotyöt ovat jääneet tekijöiltään keskeneräisiksi, sen seurauksena kennoterminaalien sarjalta on herännyt monia kysymyksiä.

Kuten tutkimustulokset-luvussa ilmenee, suunnitteluvirheet kennoterminaalien pääpiirikaaviossa ovat aiheuttaneet monen kennoterminaalien toiminnon lamautumisen. Erityisesti uudistetun ohjauspiirin johtomallilähtöjen yhteensopimattomuus alkuperäisen pääpiirikaavion kanssa on otettava tarkastelun alle, jotta maasulku- ja ylivirtasuojaus sekä vikavirtasuojauksen selektiivisyys saadaan siihen kuntoon, johon laboratorioharjoituksessa pyritään.

Tutkimustyö seuraa laboratorioharjoituksen ”keskijänniteverkon viat ja suojaus” -työohjetta, minkä soveltuvuus kennoterminaalien nykyiseen vajaatoimintaisuuteen on kiistämättä heikko. Toki työohjeet ovat erittäin yksityiskohtaiset ja soveltuvat täysin toimivan kennoterminaalien vikavirran ja suojauksen testaukseen.

On kuitenkin mainittava, että kennoterminaalit eivät ole tätä nykyä täysin toimimaton. Yhdellä johtomallilähdöllä on toteutettavissa muun muassa ylivirtasuojauksen testaus sekä johtomallilähdön pika- ja aikajälleenkytkentä. Täten kennoterminaalilla on toteutettavissa toimiva laboratorioharjoitus, joskin harjoituksen työohjeita ja tavoitteita on muutettava sen mukaisiksi.

Opinnäytetyön tutkimusosuudeksi muodostui kokonaisvaltainen kennoterminaalien tilanselvitystyö, jonka tiedot ja tulokset antavat tukevan pohjan mahdolliselle jatkotutkimukselle. Mahdollisen jatkotutkimuksen keskeisenä ongelmana on suunnitella ja toteuttaa toimivat ratkaisut löydettyihin tutkimusongelmiin. Näistä mainittakoon kennoterminaalien pääpiirikaavion suunnittelutyö, summavirtamittauksen toteuttaminen molemmille johtomallilähdöille, jännitemuuntajan toisiokäämin avokolmiokytkennän tarkastus sekä kaukokäyttöjärjestelmä MicroSCADA:n lisenssin uusiminen.

## 9 Pohdinta

Opinnäytetyötä voidaan käyttää hyväksi perehtymislähteenä tutustuttaessa keskijänniteverkon vikoihin ja suojaukseen. Työtä hyödyntämällä saadaan perusteelliset ja ajankohittaiset tiedot keskijänniteverkon vikatilanteista sekä siitä, miten näitä tietoja voidaan hyödyntää suunniteltaessa ja koestettaessa kennoterminaalilla toteutettua johtolähtösuojausta.

Opinnäytetyössä käsitelty materiaali on luotettavuudeltaan hyvä, sillä tutkimuksen aineisto on pääosin ajankohtaista sähkötekniikan kirjallisuutta sekä lainmukaisia määräyksiä ja standardeja. Tutkimusosuudessa tulkitaan keskijänniteverkon suojausmenetelmiä, puhelinhaastatteluja sekä aiempia sähkölaboratorion harjoitustyöohjeita, joten niiden täsmälliseen soveltamiseen mahdollisen jatkotutkimuksen osalta on kiinnitettävä huomiota.

Opinnäytetyössä käytetyt menetit olivat sähkötekniikan menetelmäkirjallisuuteen perehtyminen ja asiantuntijoiden kanssa keskusteleminen. Tutkimuksen asiantuntijat olivat tutkittavan kohteen kanssa ennen työskennelleitä henkilöitä, joiden kanssa tutkimustuloksia tulkittiin yhdessä. Valittu menetelmä osoittautui erinomaiseksi, sillä kirjallisuuslähteistä saadut tiedot ja niiden itsenäinen pohtiminen avarrutti monia tutkimusongelmia, jonka jälkeen niistä keskusteleminen vankisti tutkimustuloksia. Opinnäytetyössä esitellään laaja-alainen viitekirjallisuus, joka tarkastelee tutkittavan kennoterminaalien ymmärtämiseen vaadittuja seikkoja.

Yksityiskohtainen perehtyminen kennoterminaalien toimintamahdollisuuksiin oli tässä opinnäytetyössä avainasemassa, sillä laitevalmistajalla on monipuoliset ohjeet toiminoista joita laitteella voidaan suorittaa. Näiden toimintamahdollisuuksien yhteensovittaminen toteutettiin harjoitustyöohjeita mukailevaksi.

Kokemuksena opinnäytetyö opetti laaja-alaisen tiedon käsittelyä, keskustelua asiantuntijoiden kanssa niin kasvotusten, puhelimitse kuin sähköpostin välityksellä. Kirjallisuuteen, laitevalmistajan tuoteoppaisiin ja verkkomateriaaliin tutustuminen opetti oleellisen tiedon poimimisen kustakin lähteestä hyödylliseksi kirjalliseksi tuotokseksi. Opinnäytetyö tiivistä samojen kansien sisään monissa lähteissä hajallaan olleen tiedon käytännölliseksi paketiksi.

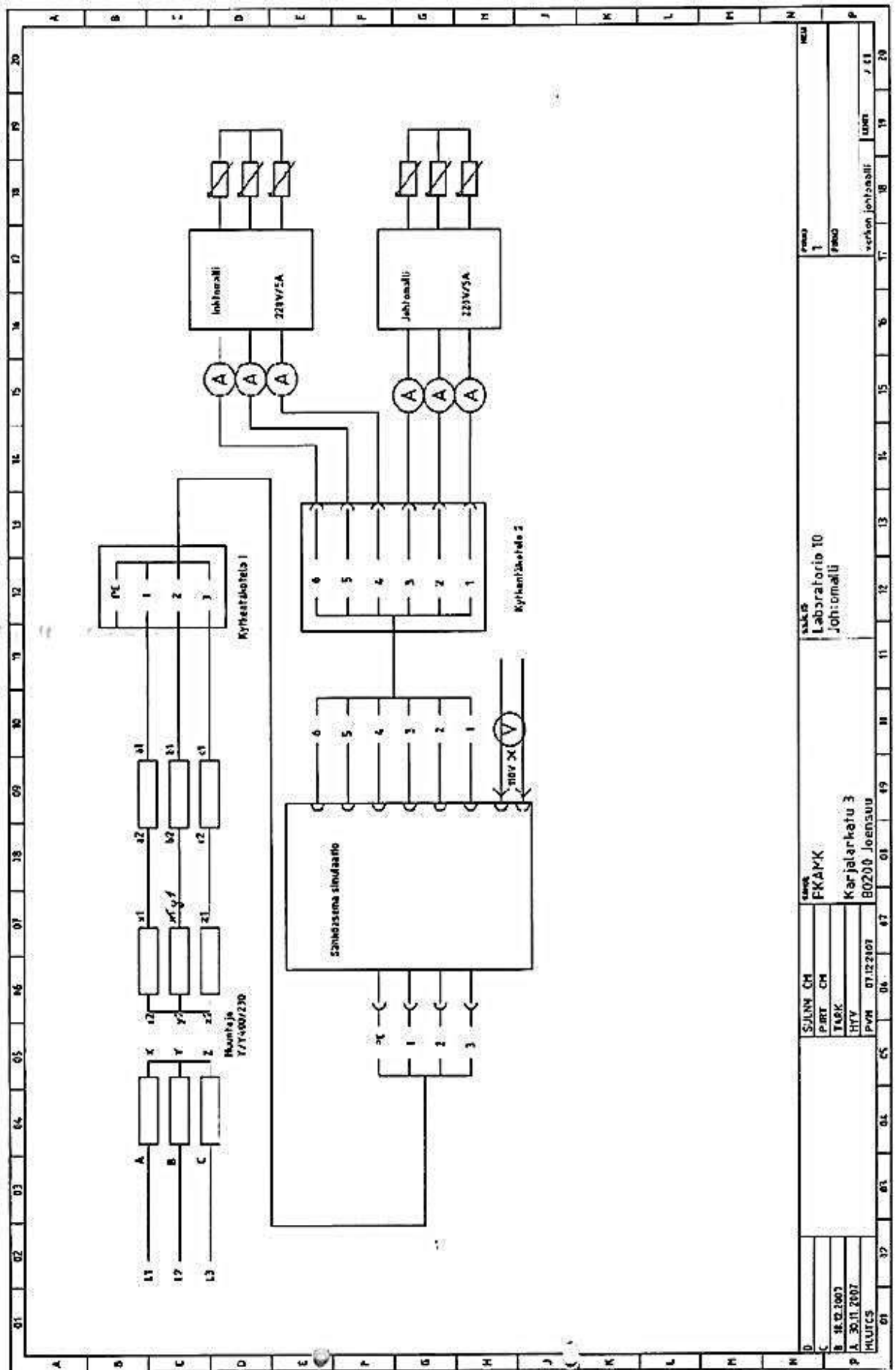
Kennoterminalilla simuloitua keskijänniteverkon viat ja suojaus on erinomainen tapa tutkia arkipäiväisiä sähköverkon vikatilanteita turvallisessa laboratorioympäristössä. Tutkimustulokset antavat hyvän lähtökohdan jatkotutkimukselle, joiden avulla tämän opinnäytetyön tulokset voidaan toteuttaa enemmän käytännön tasolla, eli saada Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun sähkölaboratorio tiloissa oleva ABB REF-541 kennoterminali, hyödyntämään sitä tarkoitusta jonka vuoksi se on hankittu.

Lopuksi haluan kiittää erittäin mielenkiintoisesta aiheesta työni ohjaajana toiminutta sähkötekniikan tuntiopettajaa Reijo Pussista Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulusta. Lisäksi esitän erityiskiitokset sähkölaboratorioinsinööri Antti Venäläiselle suuresta avusta työn eri vaiheissa.

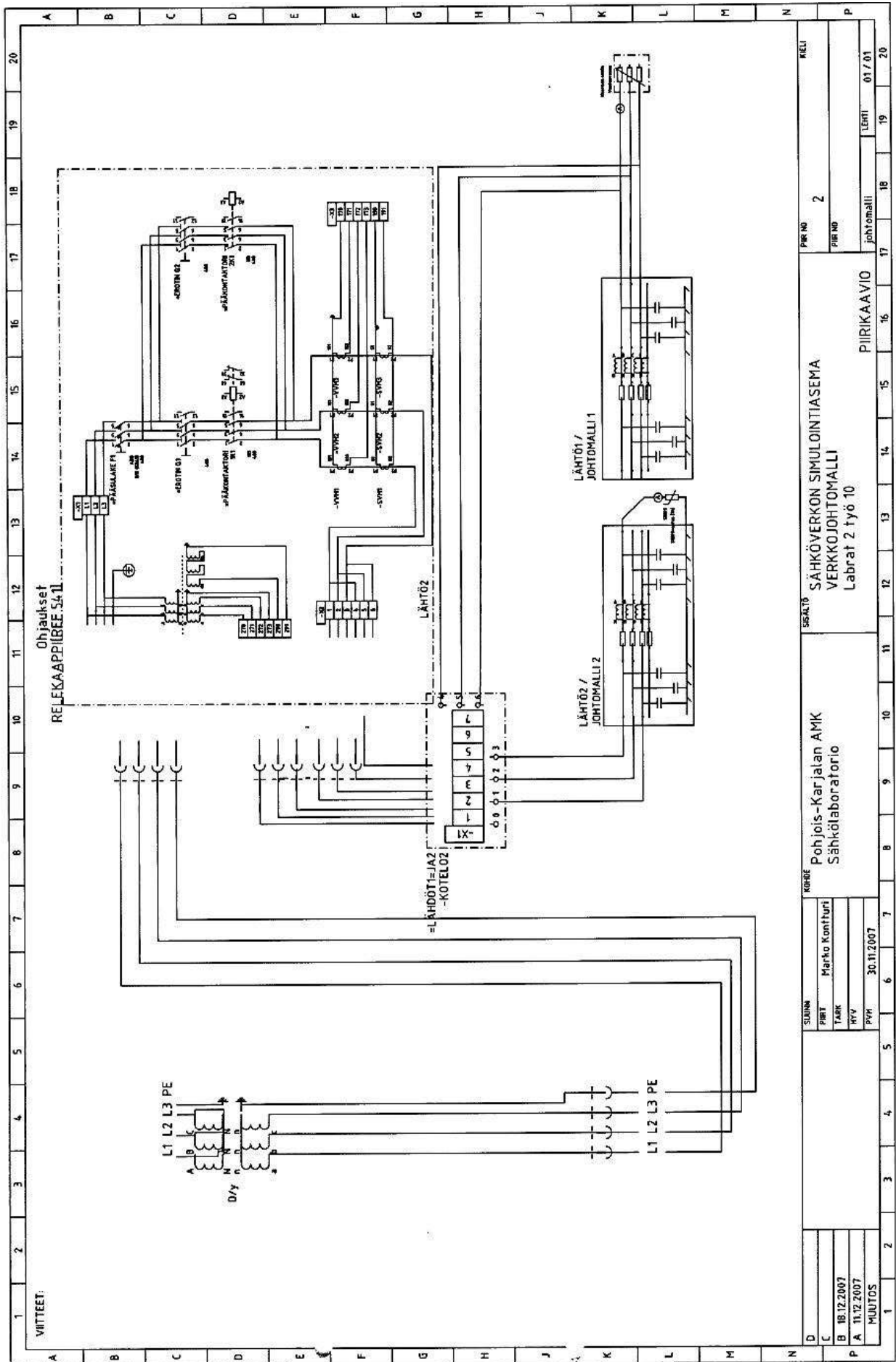


## Lähteet

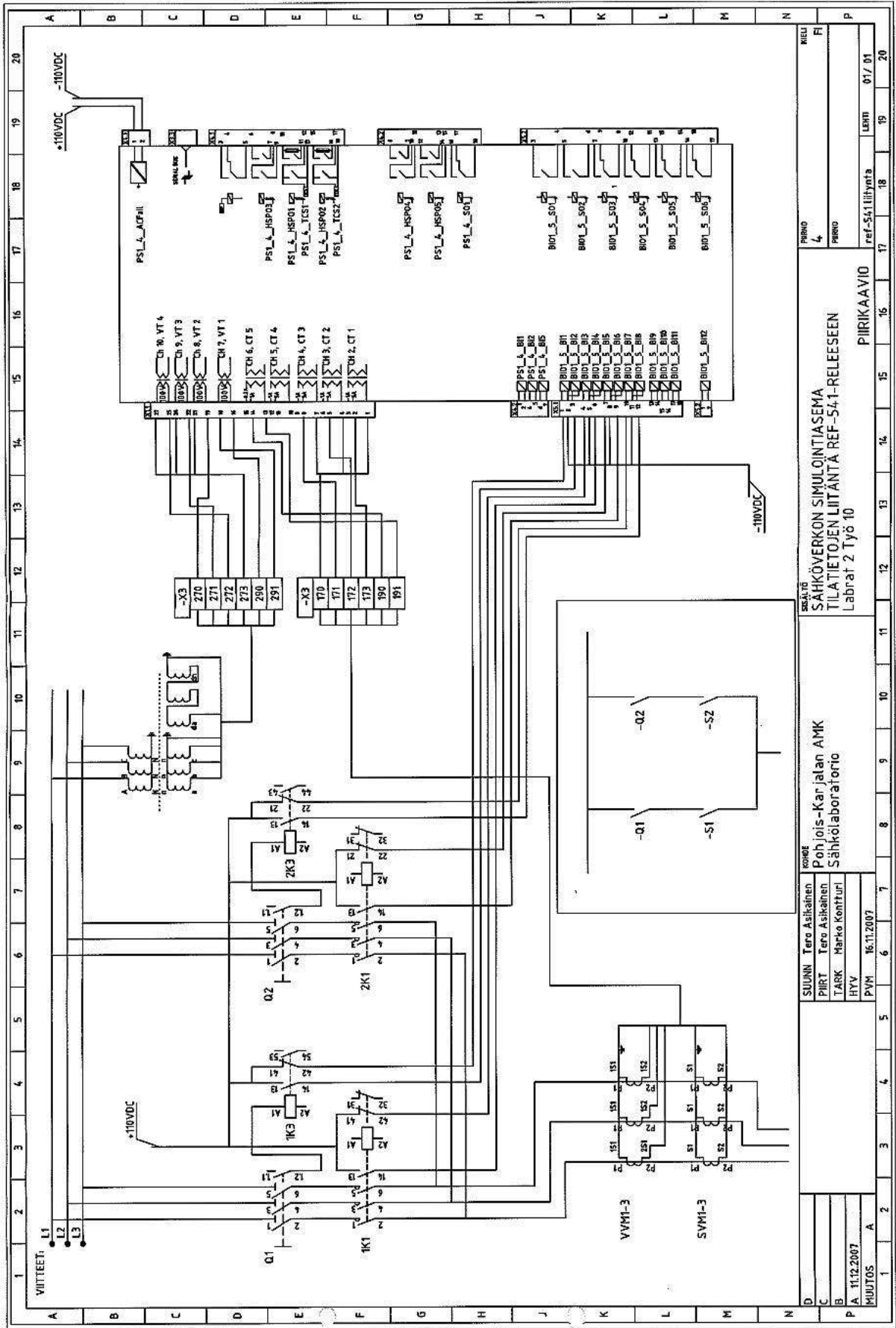
- 1 Aura, L., Tonteri, A.J., 1993, Sähkölaitostekniikka, Porvoo, WSOY
- 2 Elovaara, J., Laiho, Y., 2005, Sähkölaitostekniikan perusteet, Helsinki, Otatieto
- 3 Elovaara, J., Haarla, L., 2011, Sähköverkot II. Helsinki, Otatieto
- 4 Lakervi, E., Partanen, J., 2008, Sähkönjakelutekniikka, Helsinki, Otatieto
- 5 Mörsky, J., 1992, Relesuojaustekniikka, Hämeenlinna, Otatieto
- 6 Sähkötarkastuskeskus, 1989, Sähköturvallisuusmääräykset, Helsinki, Gummerus Kirjapaino Oy
- 7 Elovaara, J., Haarla, L., 2011, Sähköverkot I. Helsinki, Otatieto
- 8 Lakervi, E., 1996, Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu, Otatieto,
- 9 ABB Oy TTT- käsikirja, 2000, Luku 8: Maasulkusuojaus
- 10 ABB Oy, 2010, 1MRS755512 -tuoteopas,  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/f9eb02a6dff44160c12577c90029b8bd/\\$file/ref54\\_tob\\_755512\\_fid.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/f9eb02a6dff44160c12577c90029b8bd/$file/ref54_tob_755512_fid.pdf)
- 11 ABB Oy, 2004, 1MRS 750990-MUM -tuoteopas,  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/62e52b4424f25f24c2256e5200321e6d/\\$file/ref54\\_techfic.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/62e52b4424f25f24c2256e5200321e6d/$file/ref54_techfic.pdf)
- 12 Monni, M., 2005, Sähköverkkoasennukset, Kirjapaino Laine Direct Oy
- 13 Massinen, O., Sähkötötekniikan DI., Savonia-ammattikorkeakoulu, puhe-  
linhaastattelu, 18.4.2011
- 14 Lakikokoelma, 2005, Sähköturvallisuuslaki, Helsinki, Edita



01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
										nimi Päättökoulu vuosi 2000 verton johtosali vuosi 2000									
										alkus Laboratorio 10 Johdonali									
										nimi EKAKK Karjalankatu 3 00200 Joensuu									
										SÄILIN OH PIIRI OH TARK IHV PVM 07.12.2007									
										A. 30.11.2007 MLUTCS									







SAATIB  
 SÄHKÖVERKON SIMULOINTIASEMA  
 TILA TIETOJEN LIITANTA REF-541-RELEESEEN  
 Labrat 2 Työ 10

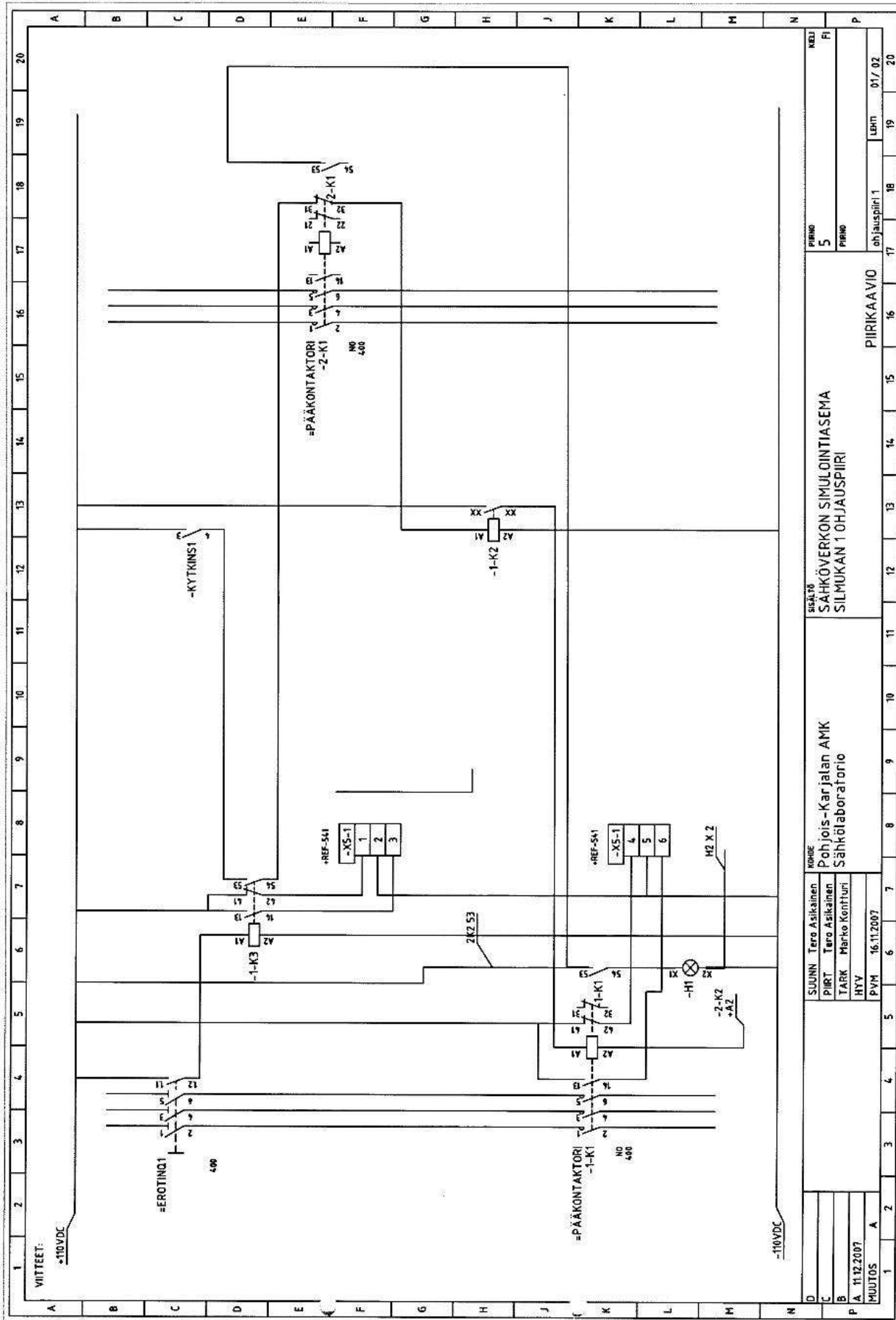
PIIRIKAAVIO

SUUNNITTELI	Tero Asikainen
TARKASTAJA	Mikko Kontturi
HYV. PVM	16.11.2007

Pohjois-Karjalan AMK  
 Sähkölaboratorio

MUUTOS	A
P A	11.12.2007
C	
D	

PIIRIO	4
LEHTI	F
LEHTI	01/01

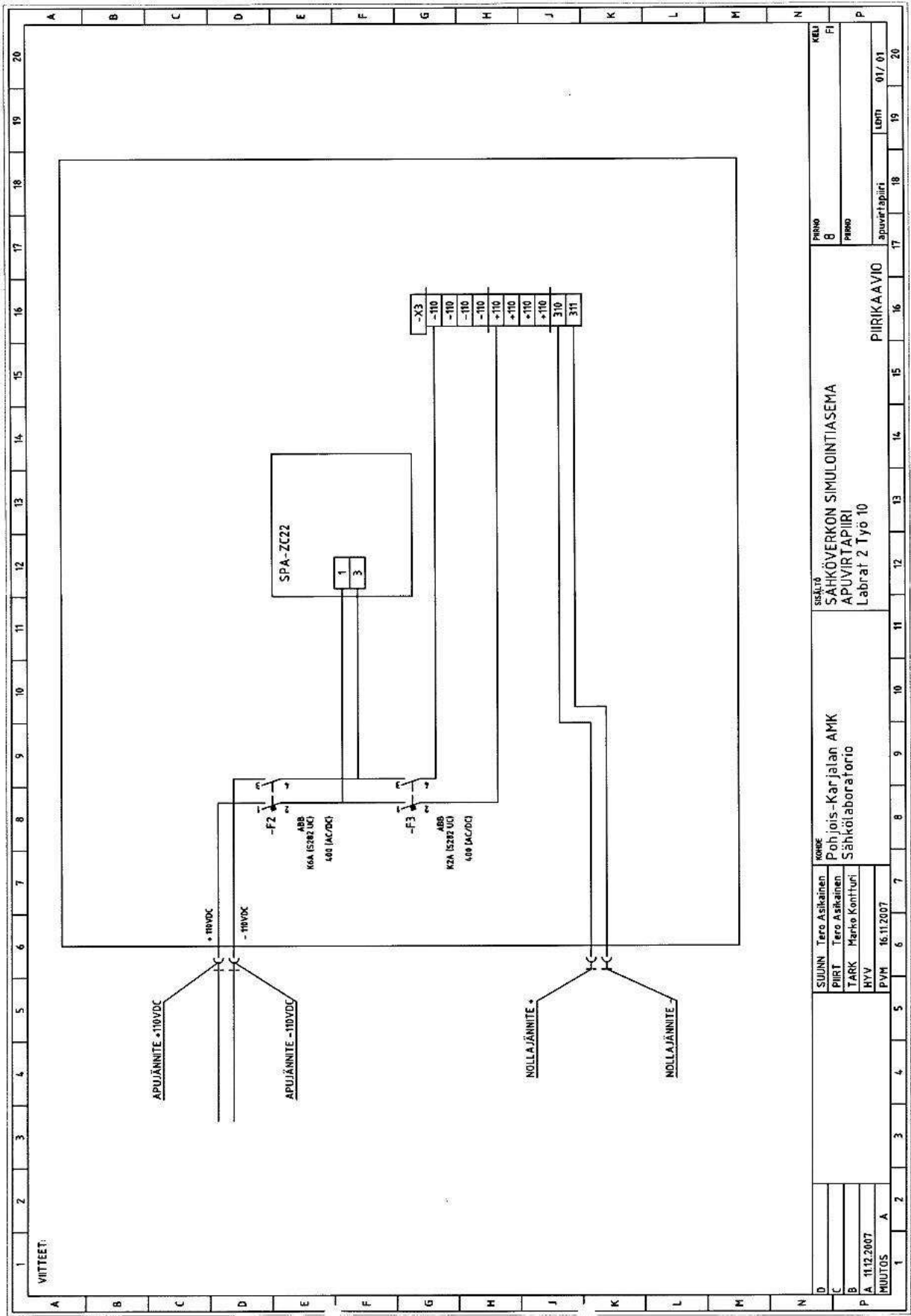


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VIITTEET: -110VDC																			
-PÄÄKONTAKTORI -2-K1 NO 400																			
-KYTKIN																			
-EROTINQ1 400																			
-1-K1 NO 400																			
-1-K2																			
-1-K3																			
-REF-541 -XS-1 1 2 3																			
-REF-541 -XS-1 4 5 6																			
-H1																			
-2-K2 -A2																			
-110VDC																			
SUUNN. Tero Asikainen PIIRIT Tero Asikainen TARK. Marko Kentturi HYV. PVM 16.11.2007											KOKOJE Pohjois-Karjalan AMK Sähkölaboratorio								
PÄÄKONTAKTORI -2-K1 NO 400											SISÄLTÖ SÄHKÖVERKON SIMULOINTIASSEMA SILMUKAN 1 OHJAUSPIIRI								
MUUTOS A											PIIRIKAAVIO								
MUUTOS A											PIIRINUMERO 5								
MUUTOS A											ohjauspiiri 1								
MUUTOS A											LEMM 017.02								



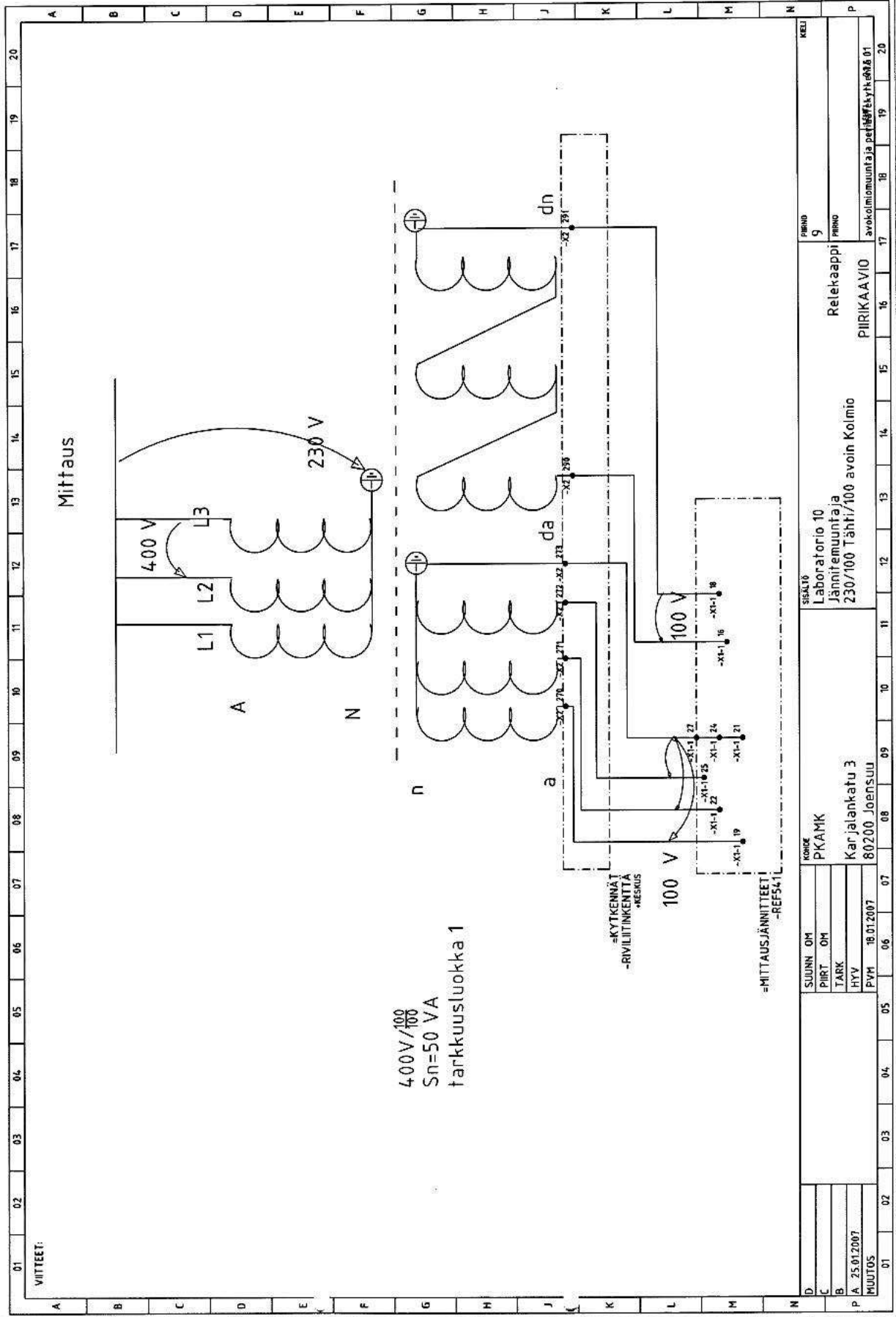




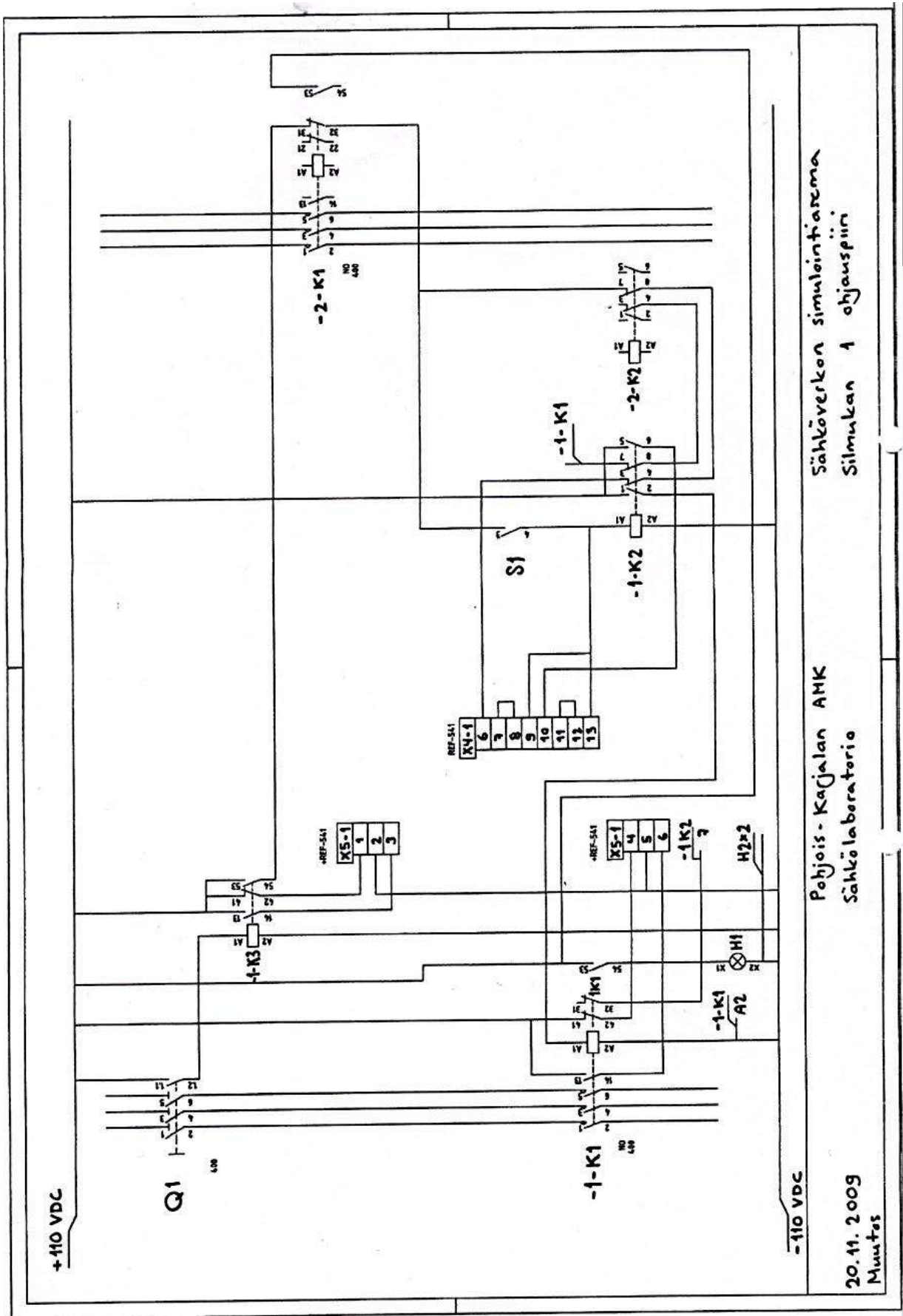


VIITTEET:

D	SUUNN	Tero Asikainen	KORKE	sisälty	PIIRIKAAVIO	01/01
C	PIIRIT	Tero Asikainen	Pohjois-Karjalan AMK	SÄHKÖVERKON SIMULOINTIASEMA	PIIRNO	FI
B	TARK	Marko Kontturi	Sähkölaboratorio	APUVIRTAPIIRI	PIIRNO	
P	A	11.12.2007		Labrat 2 Työ 10	suorituspäivi	01/01
1	1	16.11.2007			LEHTI	19
2	2					20
3	3					
4	4					
5	5					
6	6					
7	7					
8	8					
9	9					
10	10					
11	11					
12	12					
13	13					
14	14					
15	15					
16	16					
17	17					
18	18					
19	19					
20	20					



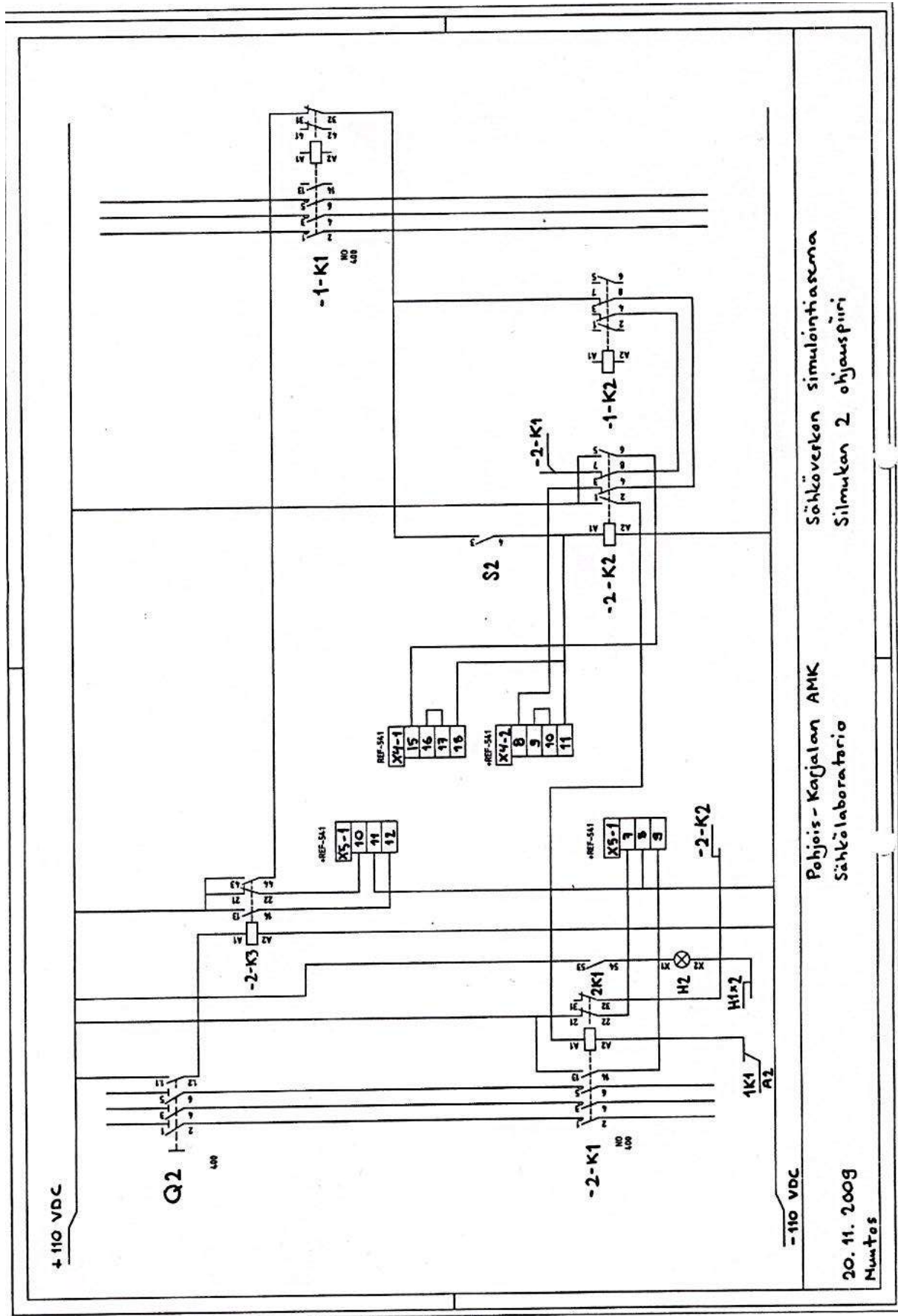
D	SUUNN. OH	KOHKE	SRK10	PIIRNO	9
C	PIIRT. OH	PKAMK	Laboratorio 10	PIIRNO	
B	TARK.	Karjalankatu 3	Jännitemuuntaja		
A	HYV	80200 Joensuu	230/100 Tähti/100 avoin Kolmio		
P	PVM	18.01.2007	PIIRIKAAVIO		
01	MUUTOS		avokolmio muuntaja pehkörekytkä 01		



Sähköverkon simulointitarema  
Silmukan 1 ohjauspiiri

Pohjois-Kajalan AMK  
Sähkölaboratorio

20.11.2009  
Muutos



Sähköverkon simulointiasema  
Silmukan 2 ohjauspiiri

Pohjois-Karjalan AMK  
Sähkölaboratorio

20.11.2009  
Muntos