



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KESKIJÄNNITEVERKON MAASULKUSUOJAUKSEN TOTEUTTAMINEN JOHDONSUOJARELEELLÄ

TEKIJÄ: Olli Räsänen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Olli Räsänen			
Työn nimi Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toteuttaminen johdonsuojareleellä			
Päiväys	12.12.2016	Sivumäärä/Liitteet	50/16
Ohjaaja(t) Yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Timo Savallampi			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu			
Tiivistelmä			
<p>Tässä opinnäytetyössä toteutettiin keskijännitejakeluverkon maasulkusuojauksen simulointi Savonia-ammattikorkeakoulun sähkölaboratorion laitteistolla. Tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa keskijännitejakeluverkkoa ja johdotlähtöjä kuvaava virtapiiri, jossa voidaan turvallisesti simuloida maasulku ja maasulkusuojaus. Laboratoriossa tehdyn työn tavoitteena oli myös laatia työohje, jota Savonia-ammattikorkeakoulu voi jatkossa hyödyntää teettämällä opiskelijoilla tässä opinnäytetyössä kuvatun maasulkusuojauksen laboratoriotyönä.</p> <p>Työn teoriaosuus pyrkii avaamaan lukijalle maasulkua ilmiönä sekä eri suureiden laskentaa menemättä kuitenkaan sen syvällisemmin esimerkiksi kaavojen johtamiseen. Teoriaosuus käsittelee myös maasulkusuojauksista johdonsuojareleellä ja maasulkusuojaukseen tarvittavia muita laitteita. Eryteisesti johdonsuojareleen asettelua ja toimintaperiaatteita käsitellään tapauksissa, joissa maasulku tapahtuu maasta erotetussa verkossa tai sammutetussa verkossa. Kyseiset keskijänniteverkot ovat niitä, joita Suomessa käytetään.</p> <p>Työn teoriaosuus tehtiin tutustumalla maasulkuun ja maasulkusuojaukseen kirjallisten ja sähköisten lähdemateriaalien avulla. Laboratoriotyö tehtiin käyttämällä oikeaa keskijänniteverkon katkaisijaa ja johdonsuojarelettä. Laboratoriota ja sen työpöytiä syöttää normaali TN-S-pienjännitejakeluverkko ja yhdestä työpöydästä otettiin syöttö virtapiiriä varten. Suojaerotusmuuntajalla ja sopivilla mittamuuntajilla virtapiiri saatiin toiminnallisesti mallinnettua keskijänniteverkoksi, jolloin myös johdonsuojarele toimi tarkoituksenmukaisesti.</p> <p>Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin. Käytännön laboratoriotyönä tehty virtapiiri ja maasulun simulointi toimivat suunnitellusti ja maasulkusuojaus saatiin toimimaan. Tuloksena laadittu työohje mahdollistaa virtapiirin rakentamisen ja simuloinnin kohtuullisessa ajassa, joten työtä voidaan käyttää johonkin kurssiin liittyvänä tehtävänä.</p>			
Avainsanat maasulku, johdonsuojarele, keskijänniteverkko, SPAA 322C			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Olli Räsänen			
Title of Thesis Implementation of Medium Voltage Network Ground Fault Protection with a Line Protection Relay			
Date	12 December 2016	Pages/Appendices	50/16
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr. Timo Savallampi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to implement medium voltage distribution network ground fault protection in the laboratory of Savonia University of Applied Sciences. The aim was to design and build a circuit that represents a medium voltage network and its cable outlets. In this circuit the aim was to safely simulate ground fault and ground fault protection. Part of the practical work was also to draw up instructions for the simulation which can later be used as an assignment for the students at Savonia University of Applied Sciences.</p> <p>The theoretical part aims to explain ground fault as a phenomenon as well as how to calculate variables that occur during ground fault. The theoretical part also deals with ground fault protection and other equipment that are needed for ground fault protection. Especially the layout and operational characteristics of the protection relay were considered in situations where ground fault occurs in an isolated network or in a reactance grounded network. These types of medium voltage networks are used in Finland.</p> <p>The theoretical part was carried out by referring to literal and electronic sources about ground fault and ground fault protection. The practical part in the laboratory was carried out by using a real medium voltage switchgear and a protection relay. The laboratory and its tables were fed by a normal low voltage TN-S distribution network and the output for the test circuit was taken from one of the tables. By using a convenient isolating transformer and instrument transformers, a properly working circuit which acts like a medium voltage distribution network was achieved. Also the protection relay functioned properly.</p> <p>All the aims set for the thesis were achieved. A functional circuit and ground fault protection were achieved in the laboratory. The instructions that were drawn up make it possible to carry out the simulation within reasonable time so it can be used as a task for students.</p>			
<p>Keywords ground fault, line protection relay, medium voltage network, SPAA 322C</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää yliopettaja Juhani Rouvalia tämän opinnäytetyön ohjaamisesta ja toteuttamisen mahdollistamisesta. Kiitokset kuuluvat myös lehtori Jari Ijäkselle, jolta sain apua ja monia neuvoja työtä tehdessäni.

Lisäksi haluan kiittää luokkakavereitani ja muita opettajia kuluneista vuosista.

Kuopiossa 12.12.2016

Olli Räsänen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	MAASULKU	9
2.1	Yksivaiheinen maasulku.....	10
2.1.1	Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa	11
2.1.2	Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa.....	14
2.2	Kaksoismaasulku.....	15
2.3	Johtimen katkeaminen ja yksivaiheinen maasulku	16
2.4	Kaksi- tai kolmivaiheinen oikosulku maakosketuksella.....	17
3	MAASULKUSUOJAUS.....	18
3.1	Relesuojauksen vaatimukset.....	18
3.2	Suojarelelyypit.....	18
3.3	Maasulun laukaisuehdot	19
3.3.1	Maasta erotettu verkko.....	20
3.3.2	Sammutettu verkko.....	22
3.4	Muita maasulun suojausperiaatteita	24
4	LABORATORIOTYÖN LAITTEISTO.....	25
4.1	Vähäöljykatkaisija	26
4.2	Mittamuuntajat	26
4.2.1	Avokolmiomuuntaja.....	26
4.2.2	Summavirtamuuntaja	29
4.3	SPAA 322C -johdonsuojarele.....	29
5	MAASULUN SIMULOINTI	32
5.1	Releen asettelu.....	37
5.1.1	Releen yleisosa ja ylivirtayksikkö	38
5.1.2	Maasulkuyksikkö	39
5.1.3	Jälleenkytkentäyksikkö	41
5.2	Maasulku releen asettelujen jälkeen	43
6	LOPPUPÄÄTELMÄ	45
7	YHTEENVETO.....	47
	LÄHTEET	48
	LIITE 1: PÄÄKAAVIO.....	49

LIITE 2: TYÖOHJE 50

KÄSITTEISTÖ

U_0	Nollajännite eli tähtipisteen ja maan välinen jännite maasulussa
U'_0	Avokolmiomuuntajan yhteen käämiin indusoituva jännite maasulussa
I_f	Maasulkuvirta eli viallisen vaiheen kautta maahan kulkeva vikavirta
R_f	Viallisen vaiheen ja maan välinen vikavastus maasulussa
I_0	Summavirtamuuntajan mittaama summavirta
C	Galvaanisesti yhteen kytketyn verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

1 JOHDANTO

Suurin osa kuluttajien kokemista sähkökatkoista johtuu keskijännitejakeluverkossa sattuvista vioista. Maasulku on yksi yleisimmistä jakelukatkoja aiheuttavista vioista, ja näin ollen toimiva maasulkusuojaus on ensiarvoisen tärkeää niin sähkönjakelun jatkuvuuden kuin myös henkilöturvallisuuden kannalta. Suomen huonojen maadoitusolosuhteiden vuoksi maasulut on pyrittävä tunnistamaan ja poistamaan nopeasti sekä tarkasti.

Tämän opinnäytetyön ensimmäinen puolisko käsittelee maasulkua ilmiönä, erilaisia maasulkuja sekä maasulkusuojauksen periaatteita. Maasta erotetun verkon ja sammutetun verkon osalta käsitellään yksivaiheinen maasulku tarkemmin. Myös näiden tilanteiden nollajännitteen ja maasulkuvirran laskukaavat esitetään perehtymättä kuitenkin tarkemmin kaavojen johtamiseen.

Maasulkusuojauksista ja relesuojauksen yleisiä periaatteita käsitellään myös teoriassa. Tarkemmin käsitellään niin sanottua suunnattua maasulkusuojauksista, jonka ominaisuuksia avataan maasta erotetun verkon ja sammutetun verkon tapauksissa. Itse käytännön työnä tehty maasulkusuojaus toteutettiin maasta erotettuun verkkoon.

Työn käytännön osuus käsittelee Savonia-ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratorion laitteistolla tehtyä maasulun simulointia ja sen suojausta. Laboratoriossa on oikea keskijänniteverkon vähäljykatkaisija ja sitä ohjaava johdonsuojarele, jolla voidaan toteuttaa muun muassa suunnattu maasulkusuojaus. Laitteisto käsittää myös maasulkusuojaukseen tarvittavat mittamuuntajat ja varsinkin nollajännitteen mittaukseen käytettävän avokolmiomuuntajan toimintaa työssä käsitellään tarkasti.

Valitsin opinnäytetyön aiheen, koska halusin perehtyä maasulkuun tarkemmin ja olin myös aikaisemmin käyttänyt laboratorion laitteistoa. Olin tehnyt laitteistolla aikaisemmin ylivirtasuojauksen simuloinnin, joten laitteisto oli entuudestaan tuttu. Maasulkusuojaus oli laitteistolla vielä kuitenkin simuloimatta. Tämän työn jälkeen laboratorion laitteiston kaikki eri ominaisuudet on testattu ja muutkin oppilaat voivat suorittaa simulointeja laboratoriotöiden muodossa.

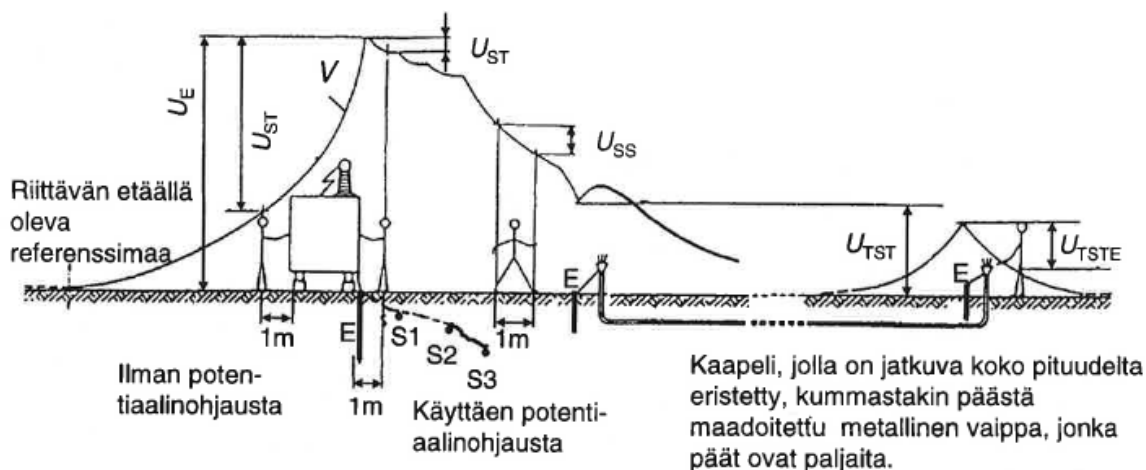
2 MAASULKU

Maasulku tarkoittaa vaihejohtimen joutumista kosketuksiin maaperän tai maadoitetun osan kanssa joko suoraan tai vikavastuksen kautta sellaisissa sähköverkoissa, joissa generaattorien tai muuntajien tähtipisteet ovat maasta erotettuja tai yhdistettyjä maahan muuten kuin suoralla yhteydellä. Puhutaan siis käyttömaadoittamattoman johtimen ja maan välisestä eristysviasta. (SESKO ry, 2009; ABB Oy, 2000)

Myös vaihejohtimen kosketus kelluvaan nollapotentiaaliin vastaa maasulkuja. Tällainen tilanne on esimerkiksi laivoissa tai lentokoneissa, joissa alusten rungot muodostavat nollapotentiaalin, vaikka alukset eivät välttämättä ole fyysisesti kosketuksissa maaperään.

Vaikka maasulun aikana sähköjako voisi jatkua normaalisti, täytyy maasulku silti poistaa turvallisuussyistä. Vaikka maasulkuvirrat ovat avojohtoverkoissa tyypillisesti pieniä, yleensä 5 - 100 A, aiheuttavat ne silti Suomen huonojen maadoitusolosuhteiden ja maaperän resistiivisyyden takia suuria kosketus- ja askeljännitteitä, jotka voivat olla ihmiselle vaarallisia. (Lakervi & Partanen, 2012)

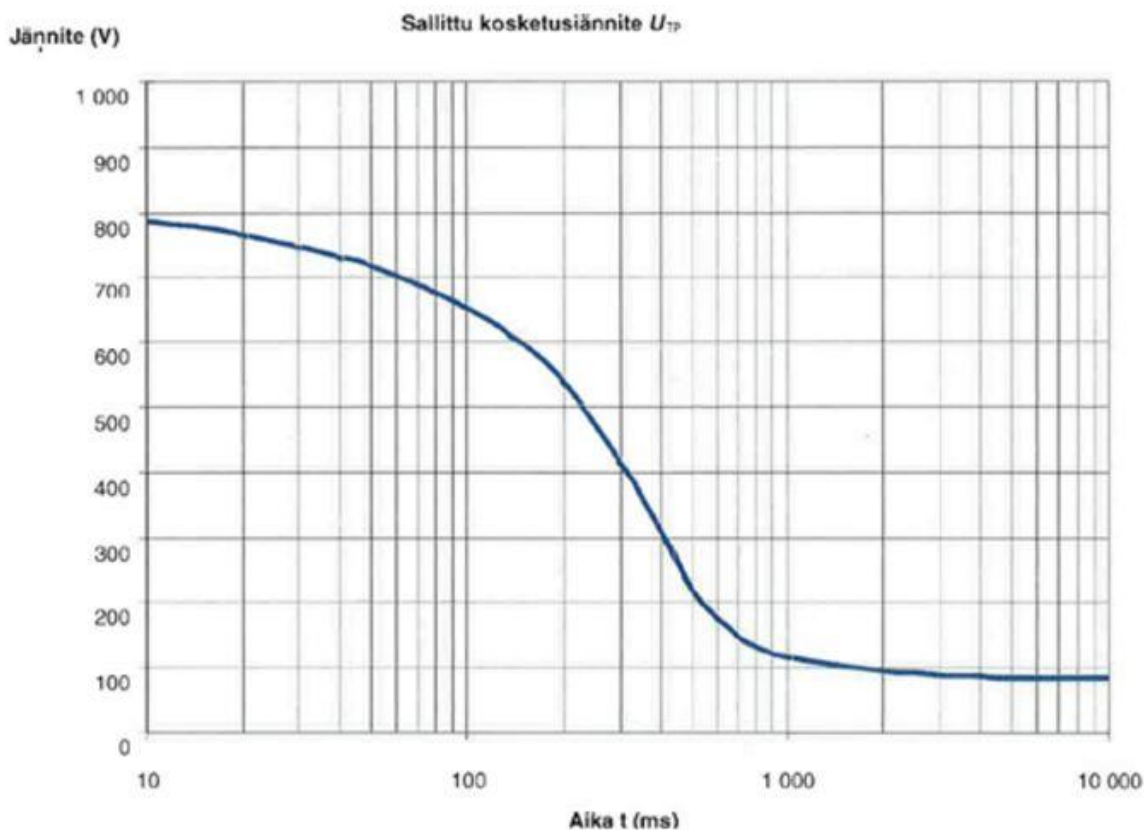
Vikapaikan ja maaperän resistanssien sekä mahdollisten maadoitusten maadoitusvastuksien vuoksi aiheutuu maasulkuvirrasta mahdollisesti suurikin potentiaalinen nousu. Tämä potentiaalinen nousu aiheuttaa vaarallisia kosketus- ja askeljännitteitä vikapaikan välittömässä läheisyydessä ja joissain tapauksissa siirtyviä kosketusjännitteitä (kuva 1). (SESKO ry, 2009)



E	Maadoituselektrodi
$S1, S2, S3$	Potentiaaliohjauselektrodit (esimerkiksi rengasmaiset maadoituselektrodit), jotka on kytketty maadoituselektrodiin E
U_E	Maadoitusjännite
U_{SS}	Suurin askeljännite
U_{ST}	Suurin kosketusjännite
U_{TST}	Suurin siirtyvä kosketusjännite, jos kaapelin vaippaa ei ole maadoitettu kauimmaisesta päästään
U_{TSTE}	Suurin siirtyvä kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu myös kauimmaisesta päästään
V	Maanpinnan potentiaali

KUVA 1. Mahdolliset kosketus- ja askeljännitteet, kun maadoituselektrodeissa kulkee virta (SESKO ry, 2009, s. 27)

Jokainen maasulku on kytkettävä pois automaattisesti tai käsin, jotta vaarallisilta jänniteiltä (kuva 1, kuvio 1) vältytään. Maasulusta on myös aina tultava yleishälytys. Vaikka verkon käyttöä voidaan jatkaa maasulun aikana joissain poikkeustapauksissa, on maadoitusjännitteen U_E (kuva 1) pysyttävä sallituissa rajoissa, ja se saa olla enimmilläänkin 150 V. (SESKO ry, 2009)

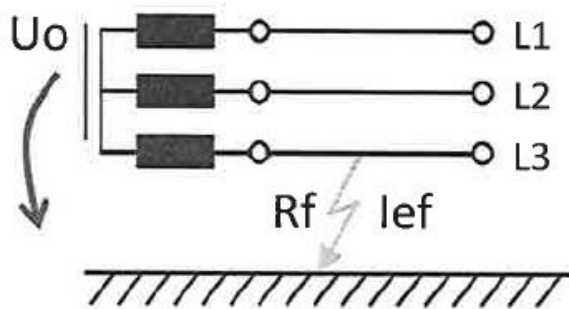


KUVIO 1. Sallitut kosketusjännitteet maasulkuvirran kestoajan funktiona (SESKO ry, 2015, s. 155)

Maasulku käyttäytyy eri tavoin sen mukaan, onko sähköverkko maasta erotettu vai maadoitettu jontekin muuten kuin suoralla yhteydellä maahan. Myös se, millä tavalla vaihejohdin joutuu kosketuksiin maaperän kanssa, vaikuttaa merkittävästi maasulun käyttäytymiseen ja havaitsemiseen. Seuraavissa luvuissa käsitellään näitä tilanteita.

2.1 Yksivaiheinen maasulku

Yksivaiheinen maasulku (kuva 2) voi tapahtua ilman, että vaiheen ja maan välillä on juurikaan vikavastusta. Tällöin kyseessä on suora maasulku. Esimerkiksi jakeluverkoissa salamanisku vaihejohtimeen saattaa johtaa vaihejohtimen eristeen läpilyöntiin jotakin maadoitettua rakennetta vasten, jolloin maasulku on kutakuinkin suora. Läpilyönnin valokaaren pituus vaikuttaa kuitenkin vikavastukseen. (Lakervi & Partanen, 2012)



KUVA 2. Yksivaiheinen maasulku (Vedenjuoksu, 2016)

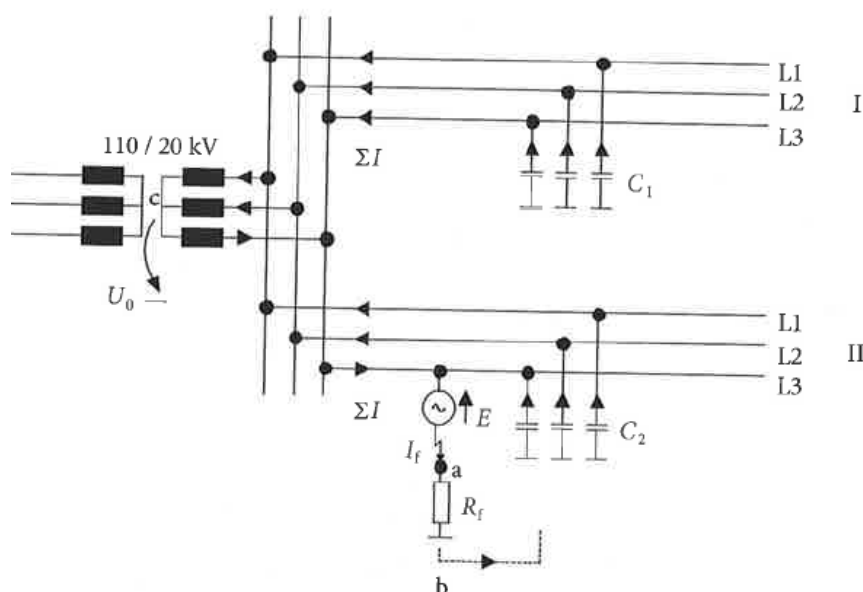
Usein maasulku tapahtuu jonkin suuremman vikavastuksen kautta. Yleinen tilanne esimerkiksi jakeluverkoissa on puun oksan tai rungon osuminen vaihejohtimeen, mikä aiheuttaa maasulun. Näissä tapauksissa vikavastuksena toimii puu. Riittävän suurella vikavastuksella verkon tila ei käytännössä muutu. (Lakervi & Partanen, 2012)

Jakeluverkossa jännitteisten vaiheiden ja maan välillä on kapasitiivinen kytkentä, jota nimitetään maakapasitanssiksi. Terveessä tilassa verkon maakapasitanssien varausvirtojen summa on lähellä nollaa, koska verkko toimii lähes symmetrisesti. Maasulku saa aikaan sen, että viallisen vaiheen maakapasitanssin jännite ja varausvirta laskevat nollaan. Terveiden vaiheiden maakapasitanssien varausvirrat kasvavat, koska viallinen vaihe on nyt maan potentiaalissa ja terveiden vaiheiden maakapasitanssien yli vaikuttaa pääjännite aikaisemman terveen tilan vaihejännitteen sijasta. Varausvirtojen välillä maasulussa on siis epäsymmetria ja virtojen summa ei ole nolla. (Mörsky, 1992)

Maasulussa kapasitanssien varausvirrat kiertävät vikapaikasta terveisiin vaiheisiin verkon eri johtolähdöillä maakapasitanssien kautta (Lakervi & Partanen, 2012). Puhutaan siis maasulkuvirrasta. Maasulkuvirran ja jännitteiden ominaisuuksia maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa käsitellään seuraavissa luvuissa.

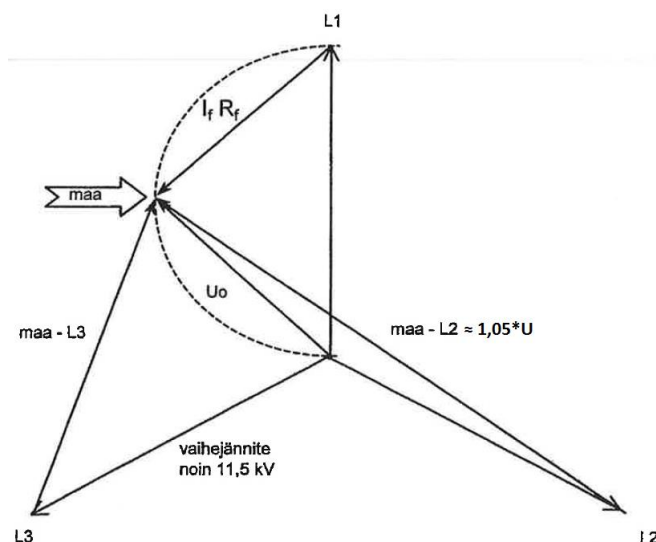
2.1.1 Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa verkossa muuntajien ja generaattorien tähtipisteiden ja maan välillä ei ole johtavaa yhteyttä. Tällaisen verkon yksivaiheisessa maasulussa maasulkuvirta kulkee vikapaikasta maahan ja nousee takaisin vaihejohtimiin maakapasitanssien kautta. Vaihejohtimissa virta kiertää muuntajan käämien kautta takaisin vikapaikkaan. Ilmiö tapahtuu viallisella johtolähdöllä sekä myös muilla johtolähdöillä. (kuva 3) (Lakervi & Partanen, 2012)



KUVA 3. Yksivaiheinen maasulku maassa erotetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012, s. 183)

Yksivaiheisessa maasulussa verkon pääjännitteet eivät muutu ja kuormitukset eivät häiriinny. Terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten puolestaan nousevat jopa pääjännitettä suuremmaksi, mikä voi aiheuttaa ongelmia eristeiden kestävyudessa. Suurin jatkuvan tilan jännite ilmenee silloin, kun maasta erotetun verkon yksivaiheisessa maasulussa vikaresistanssi on noin 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista (kuva 4). (Mörsky, 1992)



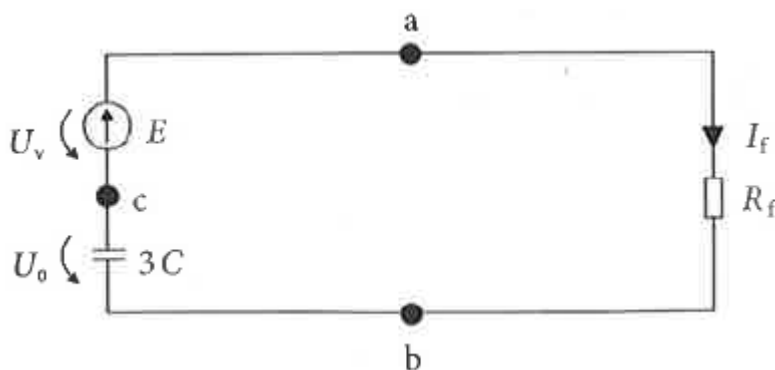
KUVA 4. Jännitevektorit yksivaiheisessa vikavastuksellisessa maasulussa (Majanen, 2016)

Nollajännitevektorin U_0 ja vikavastuksen jännitehäviön $I_f R_f$ välillä on maasta erotetussa verkossa 90 asteen vaihesiirto. Nollajännitevektori piirtää osoitinpiirroksessa puolikaaren, jonka halkaisija on vaihejännitteen vaihejännitteen osoitin. Suorassa maasulussa ($I_f R_f = 0$) nollajännite on siis vaihejännitteen suuruinen, mikä voidaan myöhemmin esitettävällä kaavalla (2) myös laskennallisesti todistaa. (Mörsky, 1992)

Aivan maasulun alussa viallisen vaiheen maakapasitanssin varausvirta laskee nollaan ja terveiden vaiheiden varausvirrat kasvavat muutosilmiöiden kautta, jolloin jännitteet saattavat hetkellisesti eri vaiheissa kohota moninkertaisiksi normaaliin tilanteeseen verrattuna. Myös 50 Hz perustaajuudesta poikkeavia taajuuksia eli yliaaltoja esiintyy maasulun muutosilmiöissä. (Mörsky, 1992)

On myös tutkittu, voitaisiinko maasulun tarkka paikka jakeluverkossa paikallistaa nimenomaan näiden muutosilmiöiden avulla. Ainakaan vielä täysin luotettaviin ja käytännöllisiin sovelluksiin ei ole päästy. Matti Lehtonen (1992) käsittelee tätä aihetta väitöskirjassaan "Transient analysis for ground fault distance estimation in electrical distribution networks".

Vaikka viallisen vaiheen maakapasitanssin varausvirta laskee nollaan, voidaan ilmiö kuvata ja laskea matemaattisesti Theveninin teoreeman mukaan. Tällöin vikapaikassa vaikuttaa jännite ennen vikaa ja myös viallisen vaiheen maakapasitanssi on mukana. Yksivaiheisen maasulun sijaiskytkennäksi maasta erotetussa verkossa saadaan kuvan mukainen kytkentä (kuva 5). (Lakervi & Partanen, 2012)



KUVA 5. Maasta erotetun verkon yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen, 2012, s. 184)

Johtimien ja muuntajien impedanssit ovat niin pieniä verrattuna maakapasitansseihin ja mahdolliseen vikavastukseen, että ne jätetään huomioimatta. Maakapasitanssien summaa kuvaava termi $3C$ on galvaanisesti yhteen kytketyn verkon vaihekohtaisten maakapasitanssien summa ja termi R_f mahdollinen vikapaikan vastus. Maakapasitanssit kytkeytyvät rinnan tähtipisteen ja maan välille, jolloin maasulkuvirralla saadaan seuraava kaava (Lakervi & Partanen, 2012):

$$\underline{I}_f = \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega C R_f} * \underline{U}_v \quad (1)$$

Maasulkuvirta siis kasvaa, mikäli vikavastus pienenee tai jännite tai maakapasitanssi kasvaa.

Nollajännitteelle saadaan puolestaan seuraava kaava (Lakervi & Partanen, 2012):

$$\underline{U}_o = \frac{1}{j3\omega C} * (-\underline{I}_f) = \frac{-1}{1 + j3\omega C R_f} * \underline{U}_v \quad (2)$$

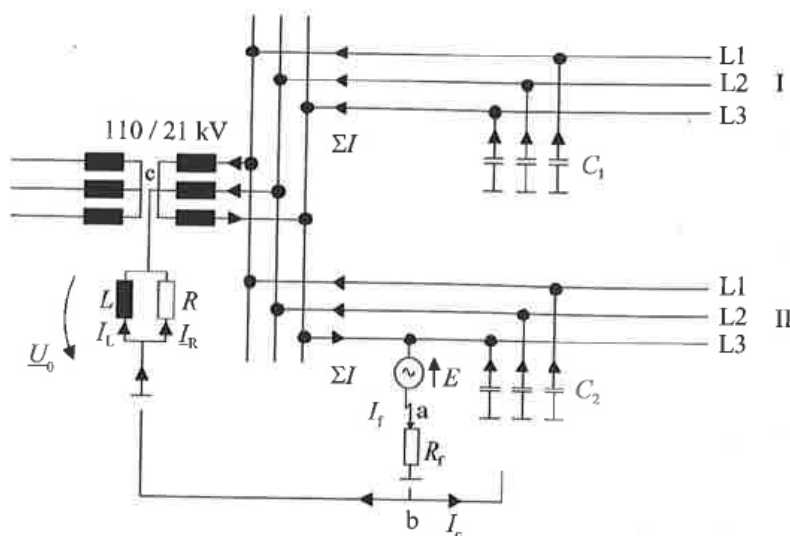
Vikavastuksen ollessa nolla on nolajännite vaihejännitteen suuruinen. Maasulkuvirta on maasta erotetussa verkossa lähes puhtaasti kapasitiivista ja siten noin 90 astetta nolajännitettä edellä. (Lakervi & Partanen, 2012)

Tätä vaihe-eroa käytetään hyväksi maasulkusuojauksessa, johon palataan luvussa 3.3.

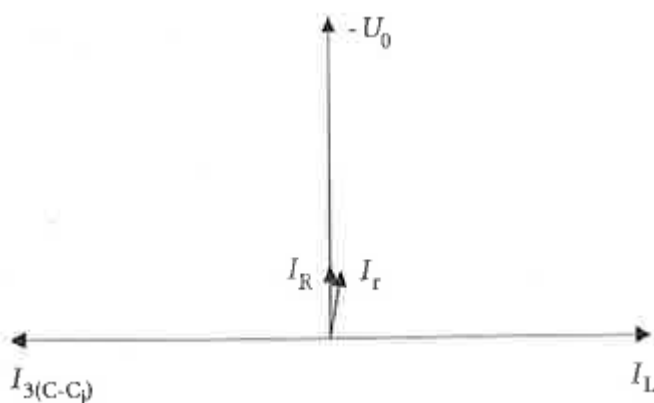
2.1.2 Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa

Verkon laajetessa tai käytettäessä maakaapeleita maakapasitanssi kasvaa, jolloin myös maasulkuvirta kasvaa. Tällöin maasulkuvirtaa voidaan pienentää sammuttamalla verkko, eli kytkemällä muuntajan tähtipisteen ja maan väliin induktiivinen sammutuskuristin. Kuristimen rinnalle lisätään myös vastus, joka kasvattaa maasulkuvirran pätöosuutta. (Lakervi & Partanen, 2012)

Kuristin viritetään siten, että saadaan aikaan lähes resonanssi verkon maakapasitanssien kanssa, jolloin suurin osa maasulkuvirrasta värähtelee kuristimen ja maakapasitanssien välillä. Induktiivisen kuristimen ja maakapasitanssien virrat ovat siis vastakkaissuuntaiset (kuva 7), ja vain pieni osa virrasta kiertää kuristimen rinnalla olevan vastuksen kautta (kuva 6). (Lakervi & Partanen, 2012)

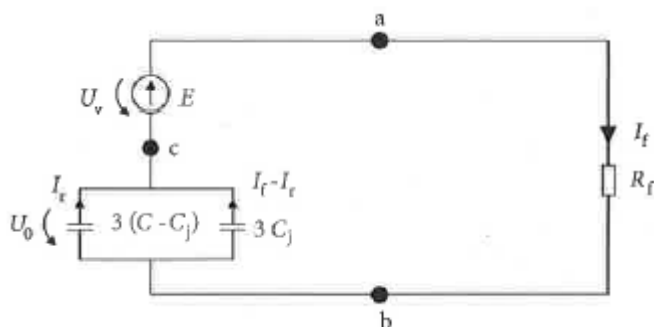


KUVA 6. Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012, s. 185)



KUVA 7. Virtojen vektorit sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen, 2012, s. 186)

Sammutetulle verkolle voidaan myös tehdä Theveninin sijaiskytkentä (kuva 8).



KUVA 8. Sammutetun verkon yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen, 2012, s. 185)

Maasulkuvirralle saadaan sammutetun verkon tapauksessa kaava (Lakervi & Partanen, 2012):

$$\frac{I_f}{R_f} = \frac{\frac{U_v}{R}}{1 + jR \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} \quad (3)$$

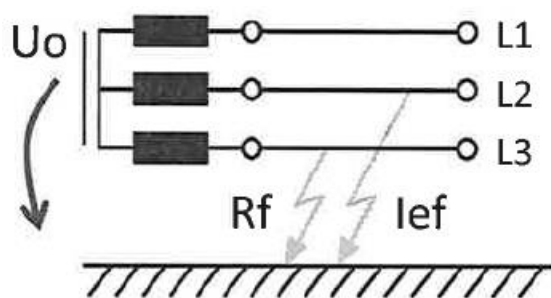
Nollajännitteelle saadaan sijaiskytkennän perusteella kaava (Lakervi & Partanen, 2012):

$$\frac{U_o}{R_f} = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} * U_v \quad (4)$$

Parhaassa tilanteessa sammutetussa verkossa vaihejohtimien kautta kiertävä osuus maasulkuvirrasta on pitkälti resistiivistä virtaa ja näin ollen virran ja nollajännitteen välillä ei juuri ole vaihesiirtoa (Lakervi & Partanen, 2012). Tilanne voi kuitenkin muuttua paljon ja asiaan palataan luvussa 3.3.

2.2 Kaksoismaasulku

Kaksoismaasulussa (kuva 9) kaksi eri vaihejohtinta joutuu kosketuksiin maaperän kanssa joko samalla johtolähdöllä tai eri lähdöillä. Usein kaksoismaasulku alkaa yksivaiheisena maasulkuna, jolloin terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten kohoavat. Yksivaiheisen maasulun alussa muutosilmiön jännitepiikit tai jatkuvan tilan jopa pääjännitetä suurempi jännite (kuva 4) saattavat johtaa toisen vaiheen läpilyöntiin ja kaksoismaasulkuun. Läpilyönti johtuu usein viallisen vaiheen ylijännitesuojan virheellisestä toiminnasta. (Mörsky, 1992; Lakervi & Partanen, 2012)



KUVA 9. Kaksoismaasulku (Vedenjuoksu, 2016)

Jos toisen viallisen vaiheen vikaresistanssi on hyvin suuri, vastaa tilanne yksivaiheista maasulkua. Verkon ollessa suppea on pienillä, mutta keskenään yhtä suurilla vikaresistansseilla nollajännite pienimmillään. Johtopituuksien kasvaessa myös nollajännite kasvaa. Vikaresistanssien ja johtopituuksien kasvaessa tarpeeksi muistuttaa kaksoismaasulku yhä enemmän yksivaiheista maasulkua. (Mörsky, 1992)

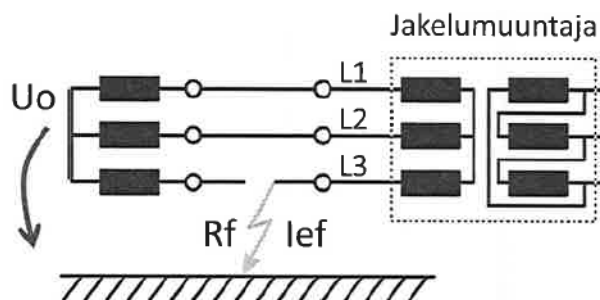
Kaksoismaasulun sattuessa eri johtolähdöillä, on mitattu summavirta pienempi kuin samalla vikaresistanssin arvolla tapahtuvassa yksivaiheisessa maasulussa. Samalla johtolähdöllä sattuvassa kaksoismaasulussa puolestaan nollajännite on pienempi kuin samalla vikaresistanssin arvolla tapahtuvassa yksivaiheisessa maasulussa. Näin ollen maasulkureleet havahtuvat kaksoismaasulkuihin yksivaiheista maasulkua huonommin. (Mörsky, 1992)

Eri lähdöillä tapahtuva kaksoismaasulku muuttaa nollajännitteen ja summavirran vaihesiirtoa, mikä haittaa toisen johtolähdön maasulkureleen havahtumista. Kun toisen lähdön oikein toimiva rele havahtuu ja suorittaa laukaisun, muuttuu tilanne yksivaiheiseksi maasuluksi, johon toinenkin rele havahtuu ja suorittaa laukaisun. (Mörsky, 1992)

Mikäli molemmissa vaiheissa on pieni vikaresistanssi ja maaperä johtaa hyvin, voi viallisten vaiheiden välillä vaikuttaa huomattava oikosulkuvirta, joka voi johtaa oikosulkusuojausten toimimiseen. Eri johtolähdöillä sattuvassa kaksoismaasulussa saattaa oikosulkusuojaus toimia myös ennen maasulkusuojausta, jos vikaresistanssit ovat tarpeeksi pienet. (Mörsky, 1992)

2.3 Johtimen katkeaminen ja yksivaiheinen maasulku

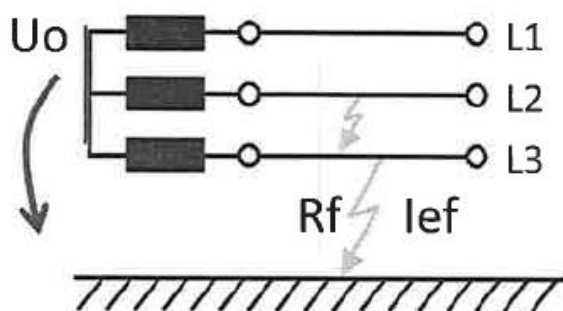
Mikäli verkossa vaihejohdin katkeaa syötön puolelta ja muodostuu kosketus maahan, on seurauksena sekä häiriö sähköjakelussa puuttuvan vaiheen takia, että yksivaiheinen maasulku. Kuorman puolelta katkeava vaihejohdin aiheuttaa yhtä lailla häiriön jakelussa ja yksivaiheisen maasulun (kuva 10), mutta maasulun havaitsemisen kannalta tilanne on hankalampi. Maasulkuvirta ja nollajännite pienenevät molemmat merkittävästi, koska kuorma toimii tässä tapauksessa vikavastuksena. (Mörsky, 1992)



KUVA 10. Johtimen katkeaminen ja yksivaiheinen maasulku kuorman puolelta (Vedenjuoksu, 2016)

2.4 Kaksi- tai kolmivaiheinen oikosulku maakosketuksella

Oikosulun ja maasulun sattuessa samaan aikaan vian pysyvyys määrittää verkon tilan. Mikäli oikosulku vaiheiden välillä (kuva 11) jatkuu riittävän pitkään ja riittävän suurella oikosulkuvirralla, havahtuu oikosulkusuoja todennäköisesti maasulkusuoja nopeammin. Tilanne voi myös päättyä lopulta yksi- tai kaksivaiheiseen maasulkuun, jolloin johtolähdön jännitteettömäksi saaminen riippuu maasulkusuo-
jauksen toiminnasta. (Majanen, 2016)



KUVA 11. Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella (Vedenjuoksu, 2016)

3 MAASULKUSUOJAUS

Vaikka verkkoa voisi periaatteessa käyttää myös maasulun aikana, aiheuttaa maasulkuvirta vaarajännitteitä (kuva 1), joiden takia vialliset johtolähdöt on kytkettävä jännitteettömiksi ja maasulut tulee poistaa. Vaarajännitteitä voidaan pienentää parantamalla maadoituksia tai pienentämällä maasulkuvirtaa. Maasulkuvirtaa saadaan pienennettyä jakamalla galvaanisesti yhdessä olevaa verkkoa pienempiin osiin eli lisäämällä verkkoon muuntajia. Myös verkon sammuttamisella saadaan pienennettyä maasulkuvirtaa. (Lakervi & Partanen, 2012)

Jokaista keskijännitejohtolähtöä suojaa katkaisija, jota ohjaa johdonsuojarele. Rele mittaa yhtä tai useampaa valittua suureta verkosta ja suorittaa katkaisijan aukiohjauksen, mikäli mitattava suure ylittää ennalta asetetun arvon. Erityyppisille vioille voi olla omat releensä tai suojaustoimintoja on voitu yhdistää samaan releeseen. (Mörsky, 1992)

3.1 Relesuojauksen vaatimukset

Jokaista sähköasemaa ja kaikkia johtolähtöjä on suojattava mahdollisia vikoja vastaan. Relesuojauksella ei voida eikä ole tarkoituskaan poistaa mahdollisuutta vikojen syntyyn, vaan tarkoituksena on rajoittaa vian sattuessa niiden aiheuttamat vahingot ja käyttökeskeytykset todella vähäisiksi. Relesuojaukselta vaaditaan kuitenkin tiettyjä asioita, jotta suojaus toimii oikein. (Vedenjuoksu, 2016)

Lähes kaikki suojareleet liitetään nykyisin käytönvalvontajärjestelmään, jolloin suojauksesta ja verkon tilasta saadaan tietoja etänä. Viat kommunikaatioyhteyksissä releiden ja valvomon välillä eivät kuitenkaan saa vaikuttaa suojareleiden toimintaan. Suojareleet on myös voitava koestaa ja huoltaa ilman käyttökeskeytystä. (Vedenjuoksu, 2016)

Relesuojauksen on suojattava koko sähköverkkoa, mutta samalla suojauksen on toimittava mahdollisimman selektiivisesti, eli vain viallinen osa verkosta kytketään jännitteettömäksi. Releiden on myös toimittava riittävän nopeasti ja tarkasti, jotta erityisesti henkilövahingoilta, mutta myös materiaalivahingoilta vältyttäisiin. Lisäksi releissä on oltava riittävän kattava itsevalvonta, mikä tarkoittaa, että rele antaa hälytyksen, jos siinä tapahtuu sellainen sisäinen vika, joka voi aiheuttaa virhetoiminnon tai suojauksen toimimattomuuden. (Vedenjuoksu, 2016)

3.2 Suojareletyypit

Varhaisimmat suojareleet ovat sähkömekaanisia primäärireleitä eli ne kytketään suoraan päävirtapiiriin. Mitattavan suureen ylittäessä asetteluarvon rele vapauttaa katkaisijan laukaisujousen välitangon avulla. Sähkömekaaniset releet perustuvat tehollisarvojen mittaukseen, eivätkä ne pysty mittaamaan nopeita transientteja. Tämä tekee sähkömekaanisista releistä verrattain hitaita, ja lisäksi ne sisältävät paljon liikkuvia mekaanisia osia, jotka osaltaan hidastavat releen toimintaa ja vaativat paljon huoltoa. (Mörsky, 1992; Vedenjuoksu, 2016)

Primäärireleiden jälkeen kehitettiin sekundäärireleet eli mittamuuntajien kautta päävirtapiiriin liitettävät releet. Tällöin releet saavat mittaustiedot ja käyttövirtansa mittamuuntajien kautta ja niitä voidaan koestaa käytön aikana toisin kuin primäärireleitä. Sekundäärireleet voidaan myös sijoittaa mittamuuntajien ansiosta kauemmaksi päävirtapiiristä. (Mörsky, 1992; Vedenjuoksu, 2016)

Tasasuuntaajareleet ovat väliporras sähkömekaanisten ja staattisten releiden välillä. Tasasuuntaajareleessä mitattavan suureen virtaviesti tasasuunnataan ja ohjataan herkälle kiertokäämikelalle, joka toimii tasavirralla. Kiertokäämikela puolestaan ohjaa lähtörelettä, jolla katkaisijan aukiohjaus suoritetaan. Kiertokäämikela on herkkä komponentti, ja sen avulla tasasuuntaajareleet on saatu erittäin nopeiksi. Osa releen toiminnoista voidaan toteuttaa myös elektronisin komponentein. (Mörsky, 1992; Vedenjuoksu, 2016)

Staattiset releet ovat joko analogia- tai digitaalitekniikalla tehtyjä sekundäärireleitä, joissa elektroniikka ja logiikkapiirit hoitavat suojaustoiminnot. Katkaisijan ohjaus tapahtuu mekaanisesti kosketin-toiminnalla. Yhteen staattiseen releeseen voidaan koota useita eri suojaustoimintoja eri releyksiköillä ja releen tarkkuus sekä asettelualueet ovat huomattavasti parempia ja laajempia kuin sähkömekaanisissa releissä. Mittamuuntajien kautta tuotavat mittaustiedot ja apuenergia liitetään releen päässä sovitustuuntajiin, jotka muuntavat suureet elektroniikalle sopivaksi ja samalla suojaavat relettä termisiltä ja dynaamisilta rasituksilta, joita ylivirrat ja -jännitteet voivat aiheuttaa. Staattiset releet ovat myös hyvin nopeita. (Mörsky, 1992; Vedenjuoksu, 2016)

Uusimmat johdonsuojareleet ovat numeerisia releitä. Näissä releissä suojaustoiminnot voidaan integroida yhteen, jolloin mikroprosessori hoitaa suojaustoiminnot. Lisäksi releen merkittävä ominaisuus on sen kattava itsevalvonta. Katkaisijan ohjaus tapahtuu mekaanisesti kosketin-toiminnalla. Numeeriset releet toimivat myös kaksisuuntaisesti, eli niistä voidaan lukea tilatietoja sekä mittaus- että asettelu-arvoja ja toisaalta releelle voidaan syöttää ohjaus- ja asettelu-arvoja tiedonsiirtoväylää pitkin. Numeeriset releet ovat myös hyvin nopeita ja tarkkoja. (Mörsky, 1992; Vedenjuoksu, 2016)

3.3 Maasulun laukaisuehdot

Maasulkusuojaukseen käytetään nykyisin suunnattuja maasulkureleitä, jotka mittaavat maasulkuvirran ja nollajännitteen välistä kulmaa ja suorittavat laukaisun toimintakaraktéristikan perusteella. Tällöin maasulun sattuessa kolmen eri kriteerin on täyttyvä, jotta rele suorittaa laukaisun:

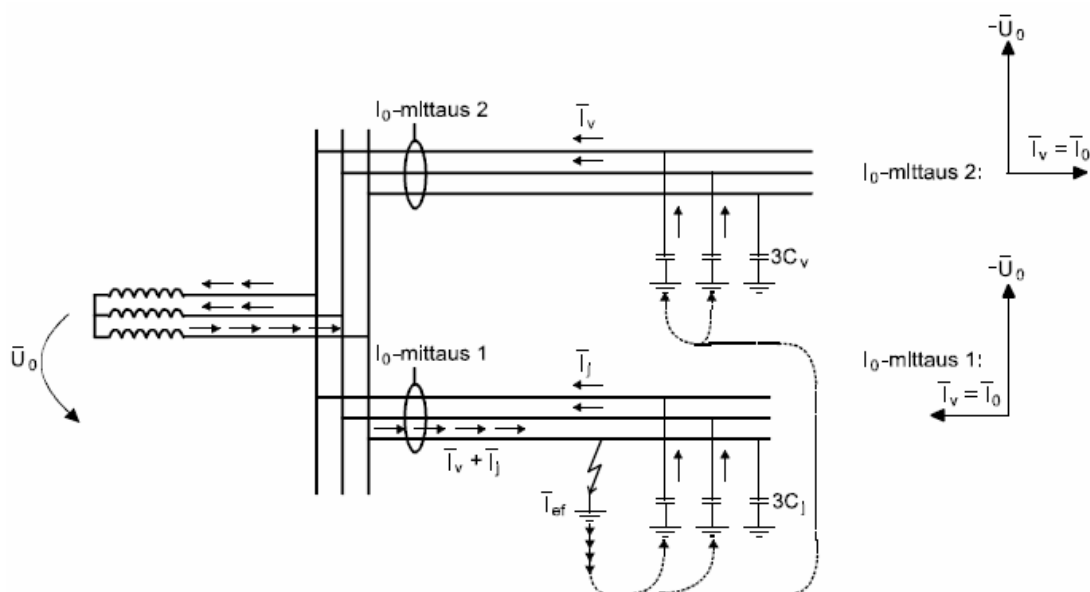
- Mitattu summavirta ylittää asetteluarvon.
- Mitattu nollajännite ylittää asetteluarvon.
- Summavirran ja nollajännitteen välinen kulma on asettelualueen rajoissa. (Lakervi & Partanen, 2012)

Myös maasulkuvirran lois- tai pätökomponentin mittaukseen perustuvia toimintakarakteristikoja käytetään suunnatuissa maasulkureleissä.

Maasulussa verkon kapasitanssien varausvirtojen välille tulee siis epäsymmetria ja varausvirtojen summa ei ole enää nolla, vaan osa virrasta kulkee vikapaikasta maahan muodostaen maasulkuvirran. Maasulussa myös verkon tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista ja muodostuu nollajännite. Nollajännite on sama, minkä maasulkuvirta saa aikaan kulkiessaan maakapasitanssien ja/tai vikavastuksen kautta (kuva 4). (ABB Oy, 2000)

3.3.1 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on osittain tai lähes puhtaasti kapasitiivista riippuen vikavastuksen suuruudesta. Johtolähtöjen aluissa sijaitsevat summavirtamuuntajat mittaavat jatkuvasti vaihevirtojen summaa, joka siis terveessä tilassa on lähes nolla, mutta maasulussa nollasta poikkeava. Viollisen lähdön maakapasitanssien kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta kulkee viollisen lähdön summavirtamuuntajassa molempiin suuntiin, joten sen osuus on nolla. Terveiden lähtöjen kautta kiertävä osuus maasulkuvirrasta kulkee puolestaan viollisen lähdön summavirtamuuntajan läpi vain toiseen suuntaan, lähdöltä vikapaikkaa kohti, joten siitä saadaan mittauksi tieto (kuva 12). (ABB Oy, 2000)

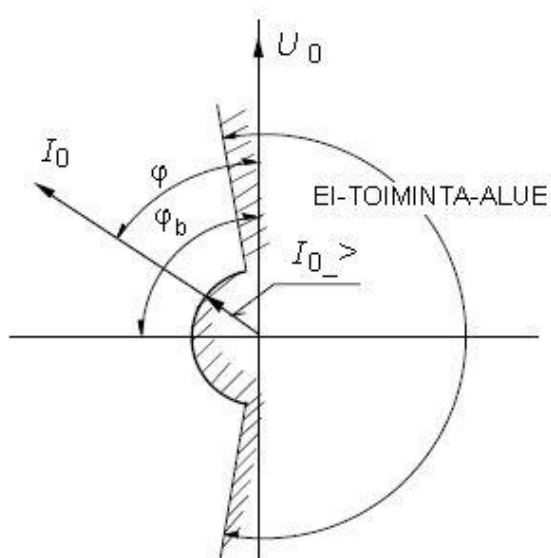


KUVA 12. Summavirta maasta erotetun verkon maasulussa (ABB Oy, 2000)

Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on siis nollajännitettä edellä. Maasulkureleen laukaisuehdoissa peruskulmaksi φ_0 valitaan siten 90 astetta ja vaihteluväliksi $\Delta\varphi$ yleensä ± 88 astetta. Näin ollen laukaisuehto täyttyy, kun summavirta on 90 astetta edellä nollajännitettä tai ainakin kapasitiivista. Lisäksi nollajännitteen ja summavirran amplitudien on ylitettävä asetteluarvot (kuva 13). (ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016; ABB Oy, 2002)

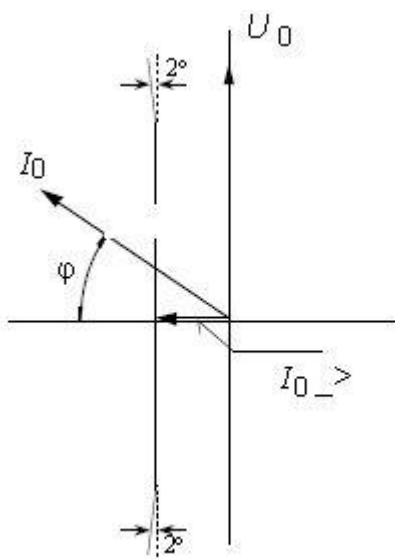
Muut kuin asettelualueella olevat kulmat eivät aiheuta releen toimintaa tai niitä käytetään lukituksiin esimerkiksi terveiden lähtöjen releissä. Lisäksi maasta erotetussa verkossa yli 90 asteen toiminta-

alueella ei ole käytännön merkitystä, vaan kyseinen alue tulee releen rakenteen vuoksi. Samaa toiminta-aluetta käytetään sammutetun verkon suojauksessa, jossa peruskulma on eri, mutta virran ja jännitteen välinen kulma voi vaihdella todella paljon. (ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016; ABB Oy, 2002)



KUVA 13. Maasta erotetun verkon maasulun vaihekulmaan perustuva toimintakarakteristika (ABB Oy, 2002)

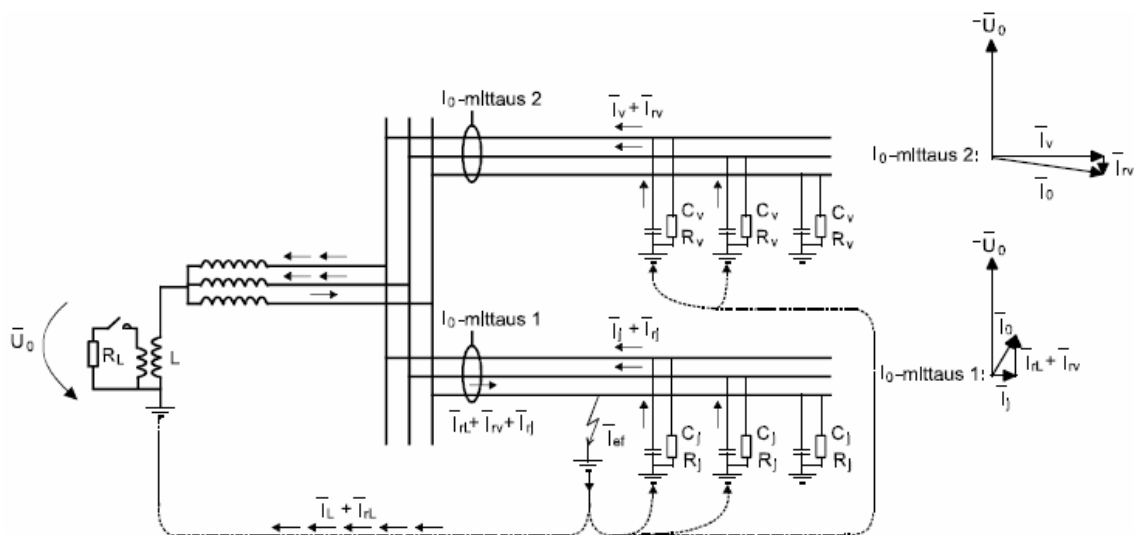
Vaihtoehtoisesti releen toiminta maasta erotetun verkon maasulussa voi perustua summavirran loiskomponentin mittaukseen eli $I \sin \varphi$ -toimintakarakteristikaan. Tällöin releen mittaaman summavirran loiskomponentin ylittäessä asetteluarvon, suorittaa rele laukaisun (kuva 14). (ABB Oy, 2002)



KUVA 14. $I \sin \varphi$ -toimintakarakteristika (ABB Oy, 2002)

3.3.2 Sammutettu verkko

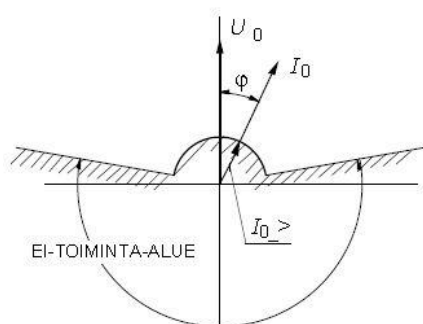
Sammutetussa verkossa suurin osa maasulkuvirrasta värähtelee sammutuskuristimen ja verkon maakapasitanssien välillä. Mitattava summavirta koostuu kuristimen rinnalla olevan vastuksen kautta kulkevasta virrasta sekä mahdollisesta kuristimen kautta tai terveiltä lähdöiltä saapuvasta maasulkuvirran kompensoimattomasta osasta. Mitatun summavirran kulma voi siis vaihdella paljon, vaikka pyrkimyksenä on saada lähes resistiivinen tai hieman induktiivinen virta. (kuva 15) (Lakervi & Partanen, 2012; ABB Oy, 2016)



KUVA 15. Summavirta sammutetun verkon maasulussa (ABB Oy, 2000)

Maasulkureleen laukaisuehdoissa peruskulmaksi φ_0 valitaan sammutetussa verkossa siis 0 astetta ja vaihteluväliksi $\Delta\varphi$ yleensä ± 88 astetta. Näin ollen laukaisuehto täyttyy, kun summavirta on samantyyppinen nollajännitteen kanssa, sitä jäljessä tai sitä edellä (kuva 16). Myös nollajännitteen ja summavirran amplitudien on ylitettävä asetteluarvot. (ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016; ABB Oy, 2002)

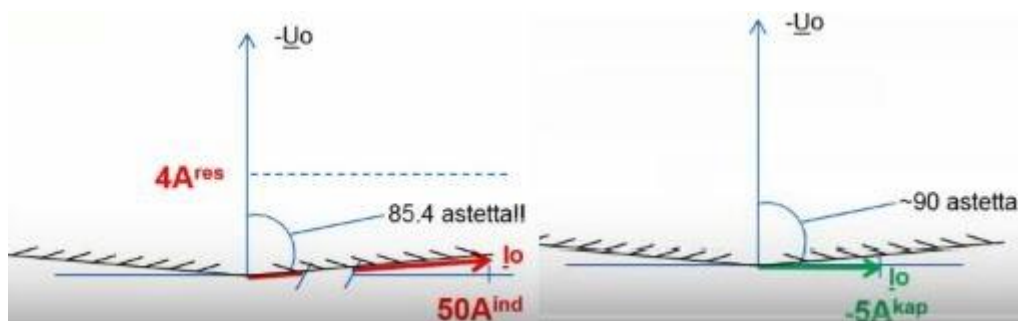
Tässäkään tapauksessa muut kuin asettelualueella olevat kulmat eivät aiheuta releen toimintaa tai niitä käytetään lukituksiin esimerkiksi terveillä lähdöillä. (ABB Oy, 2002)



KUVA 16. Sammutetun verkon maasulun vaihekulmaan perustuva toimintakaracteristika (ABB Oy, 2002)

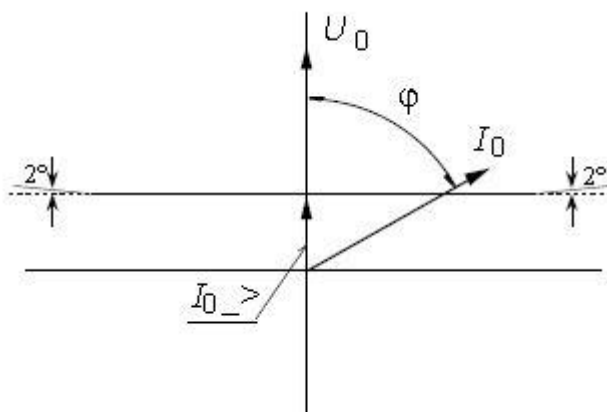
Riippuen verkon kompensointiasteesta ja lähdöstä, jolla maasulku tapahtuu, voi nollajännitteen ja summavirran välinen kulma vaihdella todella paljon. Esimerkiksi jos vika tapahtuu lähdöllä, jonka tuottama osuus maasulkuvirrasta on suuri ja sammutus on mitoitettu vastaamaan koko verkon tuottamaa maasulkuvirtaa, on mitattu viallisella lähdöllä mitattu summavirta vahvasti induktiivista. Jos sammutus ei riitä kompensoimaan koko maasulkuvirtaa, on mitattu summavirta puolestaan kapasitiivista. (ABB Oy, 2016; ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016)

Myös terveillä lähdöillä voi tulla ongelmia tilanteessa, jossa vika sattuu suuren maasulkuvirran tuottamalla lähdöllä. Tällöin terveiden lähdöiden releellä voi mitattu summavirta, joka on siis kapasitiivista ja 180 asteen vaihesiirrossa vialliseen lähtöön nähden, käydä releen toiminta-alueella ja aiheuttaa tarpeettoman poiskytkennän terveellä lähdöllä (kuva 17). Lähteissä mainittu ABB:n verkkoseminaari käsittelee näitä tapauksia tarkemmin. (ABB Oy, 2016)



KUVA 17. Esimerkki releen toiminta-alueesta sammutetun verkon viallisella lähdöllä (vasen) ja terveellä lähdöllä (oikea) (ABB Oy, 2016)

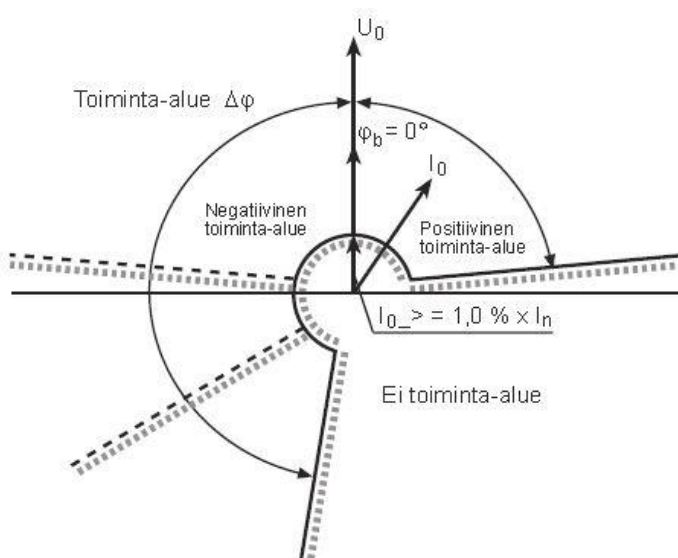
Eryisesti sammutetussa verkossa releissä käytetään peruskulman sijasta monesti summavirran päätöskomponentin mittausta eli $I_{\cos\varphi}$ -toimintakarakteristikkaa (kuva 18). Nollajännitteen ja summavirran välinen kulma voi siis vaihdella todella paljon sammutetussa verkossa, mutta päätöskomponentin mittauksessa vain summavirran resistiivinen osuus on merkitsevä. Kuristimen rinnalla olevan vastuksen lisäksi myös vikavastus, johtimien resistanssit ja verkon resistiiviset vuotovirrat vaikuttavat päätösvirran suuruuteen. (ABB Oy, 2002; ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016)



KUVA 18. $I_{\cos\varphi}$ -toimintakarakteristika (ABB Oy, 2002)

3.4 Muita maasulun suojausperiaatteita

Maasta erotetun ja sammutetun verkon laukaisuehtoja voidaan myös yhdistää tapauksissa, joissa sammutettua verkkoa joudutaan käyttämään jostain syystä hetkellisesti maasta erotettuna. Tällöin releessä voidaan käyttää vaihekulmaan perustuvassa toimintakarakteristikassa laajennettua toiminta-alueita, joka yhdistää 0 asteen ja 90 asteen peruskulmat (kuva 19). Releen toiminta-alueita voidaan siis vaihtaa verkon tilan mukaan, jolloin rele suojaa myös silloin kun sammutuskuristin joudutaan kytkemään irti. Joissain releissä myös vaihekulma- ja $I \sin \varphi / I \cos \varphi$ -toimintakarakteristikkoja voidaan yhdistää. (ABB Oy, 2002; ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016)



KUVA 19. Laajennettu vaihekulman toimintakarakteristika (ABB Oy, 2002)

Terveiden lähtöjen avokolmiomuuntajat havaitsevat maasulussa nollajännitteen nousun ja summavirtamuuntajat havaitsevat vikapaikasta johtolähdön alkuun palaavat maasulkuvirrat (kuva 12, kuva 15). Terveillä lähdöillä laukaisun ehdot eivät kuitenkaan täyty, koska mitattu summavirta kulkee päinvas-taiseen suuntaan kuin laukaisuehdoissa on määritelty. Virralla on siis 180 asteen vaihesiirto verrattuna laukaisuehdon virtaan (kuva 17). (Mörsky, 1992)

Terveiden lähtöjen mittaustiedoista kuitenkin saadaan selville, että jollain muulla johtolähdöllä on maasulku. Tätä voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi suuntaamattomassa maasulkusuojauksessa. Varsinkin kaksoismaasuluissa täydentämällä suunnattua maasulkusuojausta suuntaamattomalla suojausella varmistetaan ja nopeutetaan suojausten toiminta pienivirtaisissa kaksoismaasuluissa. (ABB Oy, 2000)

Ylipäätään maasuluissa maasulkuvirta on usein huomattavasti pienempi kuin normaali kuormitusvirta, jolloin virran mittaukselta vaaditaan herkkyyttä ja tarkkuutta. Nollajännite puolestaan syntyy aina maasulussa, joten nollajännitteen mittauksella saadaan aikaan yleishälytys ja tarvittaessa suuntaamaton maasulkusuojaus. Pääasia suojausten kannalta kuitenkin on, että maasulut saadaan kytkettyä pois niin nopeasti kuin mahdollista ja ettei vaarajännitteitä pääse syntymään. (ABB Oy, 2000)

4 LABORATORIOTYÖN LAITTEISTO

Savonia-ammattikorkeakoulun Opistotien kampuksen sähkölaboratoriossa voidaan simuloida keskijänniteverkon johtolähtöä, vikatilanteita sekä niiden suojausta yhden laitteiston avulla. Laitteistoon kuuluvat pyörillä varustettuun vaunuun kiinteästi asennetut vähäöljykatkaisija, kaksi eri valmistajan johdonsuojarelettä sekä mittamuuntajat (kuva 20). Tässä työssä käsiteltiin Strömberg Oy:n (nykyisin ABB) valmistamaa SPAA 322C -johdonsuojarelettä. Laitteisto käsittää myös VAMP Oy:n valmistaman VAMP 40 -johdonsuojareleen.



KUVA 20. Katkaisija ja laitteisto (Räsänen, 2016d)

Vaikka laitteiston sisältämät vähäöljykatkaisija ja johdonsuojareleet ovat oikeita keskijänniteverkon laitteita ja mitoitettu keskijännitteelle, voidaan niitä käyttää hyvin myös laboratorion pienjänniteverkossa, kun mittamuuntajat ovat oikein mitoitettuja.

4.1 Vähäöljykatkaisija

Laitteistoon kuuluu Strömberg Oy:n valmistama OSAM 24 A2 -vähäöljykatkaisija. Kyseisen katkaisijan nimellisjännite on 24 kV ja nimellisvirta 800 A. (.JJ/KA, 1974)

Vähäöljykatkaisijan toiminta perustuu katkaisupilarien sisällä olevaan verrattain pieneen määrään öljyä, joka katkaisutilanteessa syntyvän valokaaren vaikutuksesta höyrystyy. Öljyn höyrystyessä paine katkaisupilarien sisällä kasvaa ja samalla paineen vaikutuksesta öljy alkaa virrata. Paineen ja öljyn virtauksen yhteysvaikutuksesta valokaaret saadaan sammumaan tehokkaasti. Öljyn virtausta voidaan ohjata katkaisupilarien muotoilun lisäksi erillisillä pumppauslaitteistoilla, jolloin öljyn virtaus voidaan ohjata eri tavoin valokaarta kohti. Erityisesti pieniä virtoja katkaistaessa, jolloin paine jää pienemmäksi, on öljyn virtauksella suuri merkitys valokaaren sammuttamisessa. (Elovaara & Laiho, 2007)

Katkaisija sisältää viritysmoottorin, jolla tämä voidaan viritellä, mutta myös manuaalinen viritys on mahdollista. Katkaisijassa on viritysjouset ja laukaisumagneetit katkaisijan kärkien sulkemiselle sekä avaamiselle, mikä mahdollistaa jälleenkytkentöjen tekemisen. Releelle tuodaan tieto katkaisijan kärkien asennosta, minkä perusteella jälleenkytkentöjen tekeminen on ylipäätään mahdollista. (.JJ/KA, 1974)

Katkaisija sisältää myös alijännitelaukaisumagneetin, joka avaa katkaisijan kärjet, mikäli apujännite laskee liian alas (.JJ/KA, 1974).

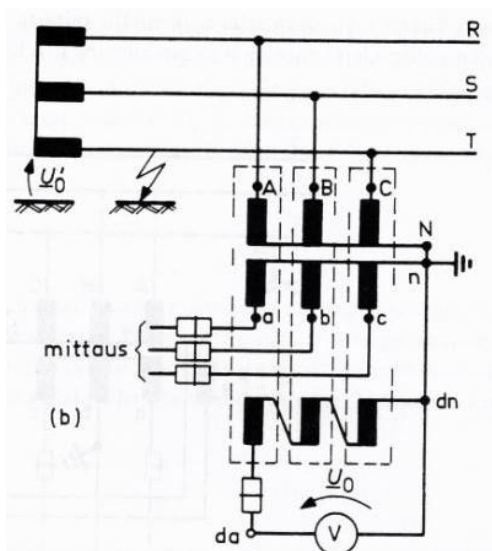
4.2 Mittamuuntajat

Mittamuuntajien pääasiallisena tarkoituksena on muuntaa päävirtapiirin jännite tai virta pienemmäksi eli turvalliselle, helpommin hallittavalle ja apulaitteille sopivalle tasolle. Vaihtoehtoisesti joissain tapauksissa päävirtapiirin mitattava suure on niin pieni, että sitä täytyy erottelukyvyn lisäämiseksi suurentaa mittamuuntajilla. Mittamuuntajilla saadaan myös mittaus- ja suojalaitteet standardoitua, koska mittamuuntajat mitoitetaan tietyille nimellisarvoille. (Elovaara & Laiho, 2007)

Mittamuuntajilla saadaan myös erotettua mittauspiiri galvaanisesti pääpiiristä ja suojattua mittauspiiriä ylikuormitukselta. Lisäksi mittamuuntajien avulla mittalaitteet voidaan sijoittaa etäälle mitattavasta piiristä. (Elovaara & Laiho, 2007)

4.2.1 Avokolmiomuuntaja

Kyseisessä laitteistossa on yksi jännitemittamuuntaja nollajännitteen mittausta varten. Mittamuuntaja koostuu tässä tapauksessa kolmesta yksivaiheisesta muuntajasta, joiden ensiöt on kytketty tähteen ja toisio avokolmioon. Avokolmiokytkentä tarkoittaa siis, että toisio- tai tertiäärikäämit on kytketty muuten normaalisti kolmioon mutta yksi haara jätetään auki. Tällöin käämit ovat siis kytkettyinä sarjaan (kuva 21). (Mörsky, 1992)

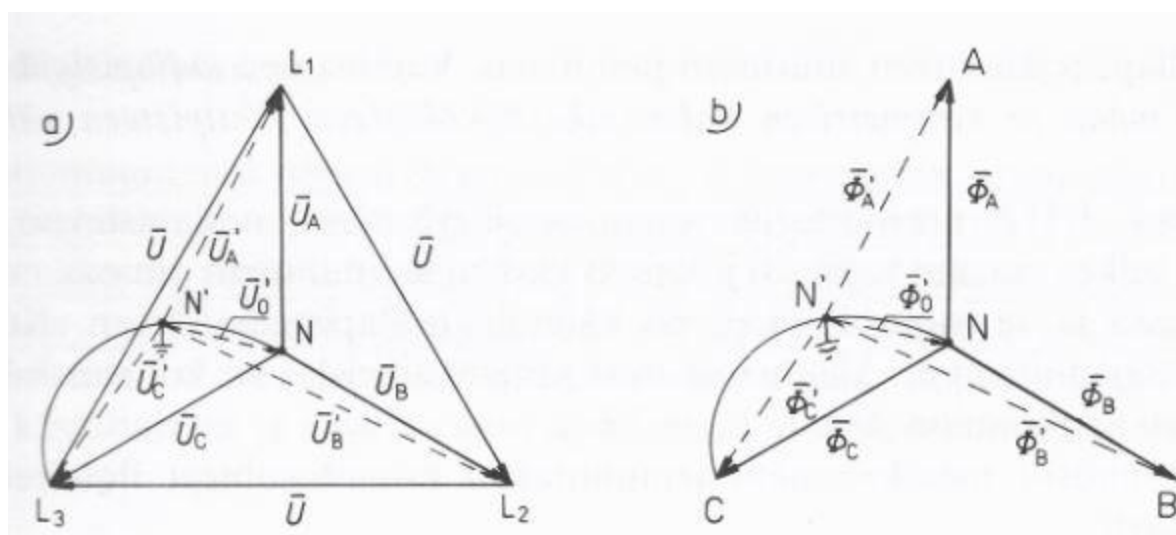


KUVA 21. Avokolmiomuuntaja (Elovaara & Laiho, 2007, s. 285)

Normaalissa tilanteessa muuntajan ensiössä vaikuttavat symmetriset vaihejännitteet ja tähtipisteen jännite maata vasten on nolla. Toision käämeihin indusoituvat myös symmetriset vaihejännitteet, jotka kumoavat toisensa, eli avokolmion päiden välillä ei ole jännitettä. (ABB Oy, 2000)

Maasulussa ensiön jännitteiden välille tulee epäsymmetria. Suorassa yksivaiheisessa maasulussa viallisen vaiheen jännite maata vasten laskee siis nolnaan ja terveiden vaiheiden jännitteet maata vasten nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Tämä maasulusta johtuva jännitteiden epäsymmetria saa aikaan yksivaiheisista muuntajista kasatussa avokolmiomuuntajassa nollapistevuon, φ_0 (kuva 22), joka on jokaisessa yksivaiheisen muuntajan rautapiirissä samanvaiheinen. (Aura & Tonteri, 1986)

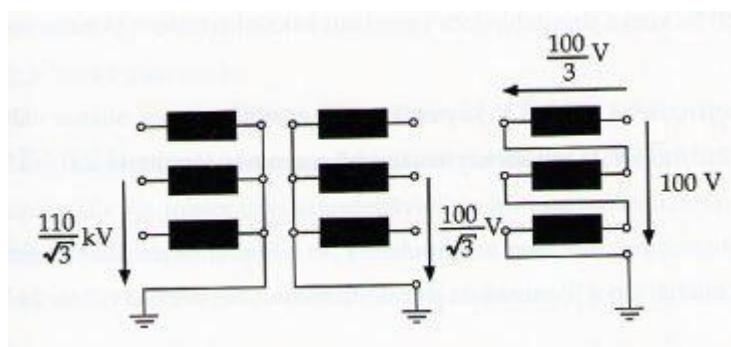
Nollapistevuo indusoi muuntajan jokaiseen käämiin samanvaiheisen nollapistejännitteen, joka avokolmion sarjaan kytkettyjen käämien tapauksessa summautuu. Avokolmion päiden väliltä on mitattavissa siten $3 * U'_0$ eli kolme kertaa tähtipisteen ja maan välinen jännite muuntosuhteen mukaisesti. Seuraava kuva (kuva 22) ja kaava (5) selventävät asiaa. (Aura & Tonteri, 1986)



KUVA 22. Jännite- ja vuovektorit normaalissa tilanteessa (ehyt viiva) ja maasulussa (katkoviiva) (Aura & Tonteri, 1986, s. 127)

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_o &= \underline{U}'_A + \underline{U}'_B + \underline{U}'_C \\
 &= (\underline{U}'_o + \underline{U}_A) + (\underline{U}'_o + \underline{U}_B) + (\underline{U}'_o + \underline{U}_C) \\
 &= \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C + 3\underline{U}'_o = 3\underline{U}'_o \\
 (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C &= 0)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Nollajännitteen mittaukseen tarkoitettujen muuntajien muuntosuhteet ovat hyvin pitkälle standardoidut. Oikeassa keskijänniteverkossa nollajännitteen mittauksen lisäksi samassa mittamuuntajassa voi olla kolmas käämitys jännitteen mittausta varten (kuva 21). Tällöin muuntajan merkintä voisi olla esimerkiksi $\frac{110000V}{\sqrt{3}}, \frac{100V}{\sqrt{3}}, \frac{100V}{3}$. Merkinnät tarkoittavat käämijännitteiden suhteita verkon terveessä tilassa (kuva 23). (Aura & Tonteri, 1986)



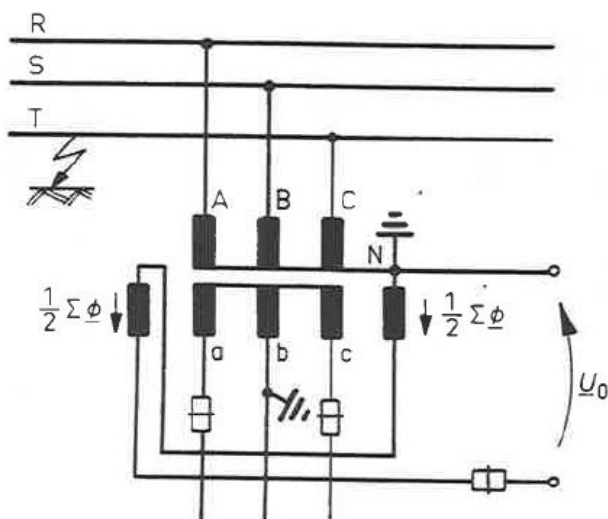
KUVA 23. Avokolmiomuuntajan käämijännitteiden suhde (Mörsky, 1992, s. 87)

Tässä laitteistossa olevien muuntajien muuntosuhteet ovat $\frac{400V}{\sqrt{3}}, \frac{100V}{3}$. Suorassa maasulussa pääpiirin nollapisteen jännite on vaihejännitteen suuruinen, jolloin avokolmion päiden väliltä on siis mitattavissa 100 V jännite. (Mörsky, 1992)

$$U_0 = 3 * \frac{100V}{3} = 100 V
 \tag{6}$$

Avokolmiomuuntajat tehdään pääsääntöisesti kolmesta erillisestä yksivaihemuuntajasta. Maasulun aiheuttama vaihejännitteiden epäsymmetria muodostaa nollapistevuon, joka siis yksivaiheisissa muuntajissa pääsee sulkeutumaan jokaisen muuntajan rautapiirissä erikseen. Tavallisessa kolmivaiheisessa muuntajassa muuntajan rautapiiri on kaikille vaiheille yhteinen, jolloin nollapistevuo joutuu sulkeutumaan ilmapääläisten ja muuntajan kuoren kautta. Tämä aiheuttaa muun muassa suuren tyhjäkäyntivirran ja mahdollisesti vaurioittaa muuntajaa. (Elovaara & Laiho, 2007)

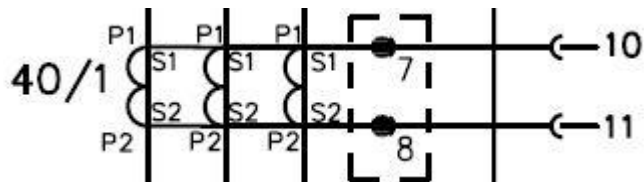
Mikäli nollajännite halutaan mitata kolmivaiheisella muuntajalla, pitää käyttää esimerkiksi viisipylväistä vaippamuuntajaa (kuva 24), jossa nollapistevuo saadaan sulkeutumaan haluttua reittiä pitkin. Sopivalla käämityksellä ja oikealla käämityssuunnalla saadaan nollapistevuo jakautumaan kahdelle lisäpylväälle tasan siten, että toision päiden välistä voidaan maasulussa mitata nollajännite \underline{U}_0 . (Elovaara & Laiho, 2007)



KUVA 24. Viisipylväinen vaippamuuntaja (Elovaara & Laiho, 2007, s. 286)

4.2.2 Summavirtamuuntaja

Laitteiston summavirtamuuntajina toimivat vaihekohtaiset virtamuuntajat, joille on tehty summakyt-kentä. Identtisten virtamuuntajien toisiot on siis kytketty rinnan, jolloin mittaustuloksena saadaan vaihevirtojen summa (ABB Oy, 2000). Summavirtamuuntajan muuntosuhde on tässä laitteistossa 40/1. (kuva 25)

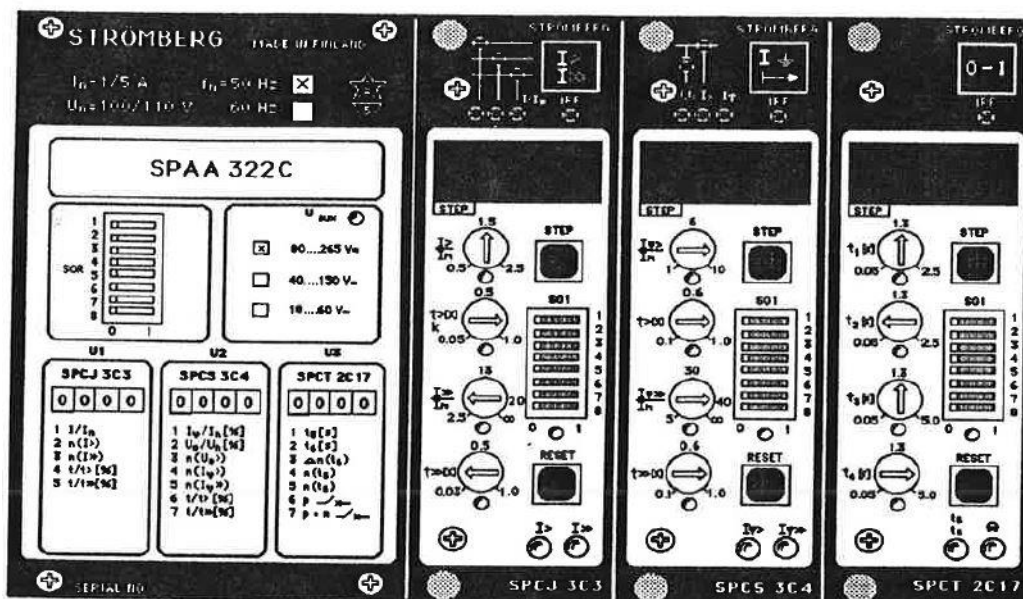


KUVA 25. Laitteiston virtamuuntajien summakytkentä (Räsänen, 2016)

Summavirtamittaus voidaan toteuttaa myös esimerkiksi kaapelivirtamuuntajilla tai vaihevirtasensorien avulla (ABB Oy, 2000).

4.3 SPAA 322C -johdonsuojarele

Aikaisemmin mainitut johdonsuojareleet ovat kehittyneet kovasti aina sähkömekaanisista releistä uuden aikaisiin numeerisiin releisiin. Testilaitteiston johdonsuojarele on Strömberg Oy:n valmistama SPAA 322C, joka on staattinen rele. Kyseinen rele (kuva 26) sisältää erilliset yksiköt ylivirta- ja maasulkusuo- jausta sekä jälleenkytkentöjä varten (Koiranen, 1987).



KUVA 26. SPAA 322C -johdonsuojarele (Koiranen, 1987)

Johdonsuojarele toimii siis niin sanottuna sekundäärisenä komponenttina, koska releen käyttövirtaa ei oteta pääpiiristä ja mittaustiedot tuodaan releelle mittamuuntajien kautta. Samoin katkaisijan aukiohjaus tapahtuu katkaisijan magneeteilla, joita releen kärjet ohjaavat päälle ja pois. (Koiranen, 1987)

Ylivirtayksiköllä on mahdollista suojata virtapiiriä yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisilta oikosuluilta tai ylikuormilta. Toiminnot on mahdollista valita ja asettaa erikseen niin sanotulle normaaliportaalle ja pikalaukaisuportaalle. (Koiranen, 1987)

Pikalaukaisuporras asetellaan yleensä suojaamaan johtolähdön alussa tapahtuvilta suurivirtaisilta oikosuluilta, jolloin releen havahtumiseen vaaditaan suuri virta, mutta samalla laukaisuaika on määritelty todella lyhyeksi. Normaaliporras puolestaan suojaa kauempana johtolähdöllä sattuvilta pienempivirtaisilta vioilta, jolloin normaaliportaan hitaampi laukaisuaika vähentää turhia katkoksia. Muun muassa tuulessa johtimiin osuvat oksat voivat aiheuttaa hetkellisesti oikosulun, mutta hitaamman laukaisuajan takia vika ehtii monesti hävitä, ennen kuin rele suorittaa katkaisijan aukiohjauksen. (Lakervi & Partanen, 2012)

Ylivirtayksikkö on myös mahdollista ohjelmoida toimimaan niin sanotulla vakioaika- tai käänteisaikatoiminnolla. Vakioaikatoiminnossa rele suorittaa laukaisun samassa ajassa havahtumisen ylittävillä vikavirran arvoilla riippumatta virran suuruudesta. Käänteisaikatoiminnolla puolestaan rele suorittaa laukaisun sitä nopeammin, mitä suuremmaksi vikavirta kasvaa. (Koiranen, 1987)

Maasulkuyksiköllä on mahdollista toteuttaa suuntaava suojaus maasta erotetulle ja sammutetulle verkolle. Rele mittaa nollajännitettä ja maasulkuvirtaa sekä näiden välistä kulmaa, jolloin saadaan selville maasulkuvirran suunta verkossa. Virran suunnan perusteella saadaan selville, missä johtolähdössä

maasulku on. Suuntaavalla suojauksella tarkoitetaan siis tätä releen ominaisuutta. Toimintakarakteristikaksi voidaan valita päätökomponentin mittaus eli $I_{cos\phi}$ tai loiskomponentin mittaus $I_{sin\phi}$. (Koiranen, 1987)

Jälleenkytkentäyksiköllä on mahdollista laatia erilaisia sekvenssejä, joilla johtolähtö kytketään jännitteettömäksi ja takaisin jännitteelliseksi eripituisten ajanjaksojen perusteella. Oikosulussa tyypillisesti tehdään yhdestä kahteen pikajälleenkytkentää, jolloin johtolähtö kytketään hyvin lyhyeksi aikaa jännitteettömäksi ja heti takaisin jännitteelliseksi. Tällöin monesti valokaarista johtuvat oikosulut saadaan sammutettua ja toiminta palautuu normaaliksi. Jos vika ei poistu pikajälleenkytkennöillä, tehdään yleensä yksi aikajälleenkytkentä, jolloin lähtö kytketään jännitteettömäksi pitemmäksi aikaa, esimerkiksi yhdestä kahteen minuuttia. Mikäli vika ei poistu aikajälleenkytkennän aikana, ohjaa rele katkaisijan lopullisesti auki ja vikaa lähdetään selvittämään tarkemmin. (Mörsky, 1992)

Maasulussa tehdään yleensä yksi pikajälleenkytkentä, jolloin valokaaresta johtuvat maasulut yleensä loppuvat. Mikäli vika jatkuu edelleen, ohjataan katkaisija auki ja vikaa lähdetään selvittämään. (Lakervi & Partanen, 2012)

5 MAASULUN SIMULOINTI

Maasulun simulointia varten tehty virtapiirin kaavio on nähtävissä liitteenä (liite 1: pääkaavio). Laboratorion pöydän syöttö tulee normaalin TN-S-järjestelmän kautta, joten virtapiirissä on käytettävä suojaerotusmuuntajaa, jotta saadaan aikaan maasta erotettu verkko.

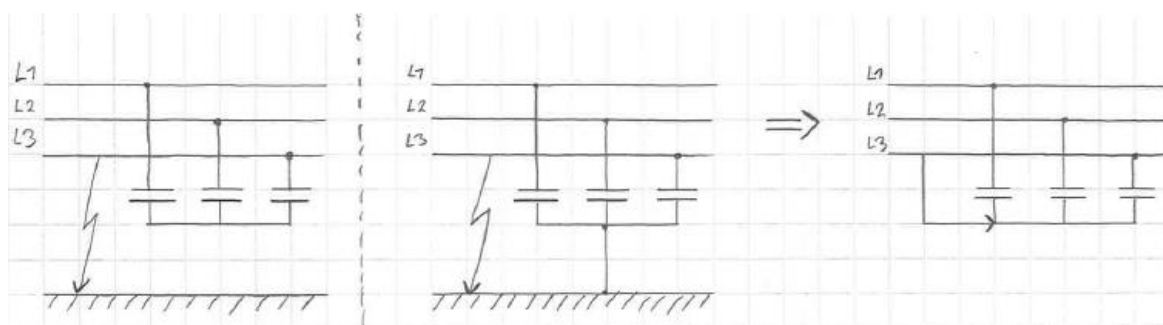
Tässä tapauksessa suojaerotusmuuntaja on muuntosuhteeltaan 400/400 V ja muuntajan ensiö on kytketty tähteen ja toisio kolmioon. Muuntajan syöttö otetaan laboratorion pöydän 10 A kolmivaiheisesta syötöstä, mutta välissä on käytettävä kolmivaiheista kytkintä, jonka rinnalle laitetaan kolmivaiheinen säätövastus. Säätövastuksella saadaan rajoitettua muuntajan tyhjäkäynnissäkin ottamaa suurta kytkentävirtasysäystä, joka muuten laukaisee laboratorion pöydän johdonsuojakatkaisijat. Kun muuntaja saadaan kytkettyä jännitteiseksi, ohitetaan säätövastus kytkimellä. Muuntajan toisiolta jatketaan 16 A jatkojohdolla katkaisijalle.

Katkaisijan laitteistossa on siis vaihekohtaiset virtamuuntajat vaihevirtojen mittausta varten, summavirtamuuntaja maasulkuvirran mittausta varten sekä avokolmiomuuntaja nolajännitteen mittausta varten. Katkaisijan kärkien jälkeen kytketään tähtikytketty kolmivaiheinen säätökondensaattori, jonka vaihekapasitanssiksi asetetaan noin 10,6 μF /vaihe mitattuna Fluke 175 -yleismittarilla. Tämä kondensaattoripaketti kuvaa viallista lähtöä, jonka katkaisija maasulussa kytkee jännitteettömäksi.

Ennen katkaisijaa tarvitaan kuitenkin adapteri, jossa on väliulosotto, koska mittamuuntajat sijaitsevat heti ensimmäisenä katkaisijan kojeille varatussa laatikossa. Väliulosotosta otetaan siis haara terveelle johtolähdölle. Tervettä lähtöä kuvaa samanlainen tähtikytketty kolmivaiheinen säätökondensaattori kuin viallista lähtöä.

Maasulun simuloinnissa tarvitaan kahta eri lähtöä, koska suojaarele toimii suuntaavana. Pelkästään yhdellä lähdöllä ei maasta erotetussa verkossa summavirtamuuntajalla saataisi mitattua maasulkuvirtaa, koska vikavirta kulkisi summavirtamuuntajassa molempiin suuntiin, jolloin summavirta olisi nolla. Sammutetussa verkossa summavirtamuuntajalla voitaisiin kenties mitata sammutuskuristimen ja sen rinnalle kytketyn vastuksen kautta vikapaikkaan kulkeva virta, koska se kulkee vain yhteen suuntaan summavirtamuuntajan läpi. Tässä työssä ei kuitenkaan perehdytty sammutetun verkon maasulkuun.

Maasulku tehdään kytkimellä, joka kytkee tässä tapauksessa vaiheen L1 viallisen lähdön kondensaattoripaketin tähtipisteeseen. Molempien lähtöjen kondensaattoripakettien tähtipisteet on yhdistetty johtimella toisiinsa, jolloin virtapiiriin saadaan keinotekoinen maapotentiaali. Ilman tähtipisteiden yhdistämistä jäisi terveen lähdön kondensaattoripaketin tähtipiste kellumaan (kuva 27), jolloin viallisen lähdön maasulku ei vaikuttaisi terveeseen lähtöön ja maasulkuvirta ei kulkisi terveen lähdön kapasitanssien kautta. Kuvassa (kuva 27) maadoitettu tähtipiste ja tähtipisteeseen yhdistetty vaihejohdin ovat siis toiminnallisesti sama asia.



KUVA 27. Kelluva tähtipiste (vasemmalla) ja maadoitettu tähtipiste sekä keinotekoinen maapotentiaali (oikealla) maasulussa (Räsänen, 2016a)

Laskentaa ja releen asettelua varten virtapiiristä mitattiin virrat ja jännitteet ilman maasulkua (taulukko 1) ja maasulussa (taulukko 2).

TAULUKKO 1. Mitatut suureet ennen maasulkua

<u>Suojaerotusmuuntajan ensiö</u>		<u>Suojaerotusmuuntajan toisio</u>	
Vaihevirta (A)		Vaihevirta (A)	
IL1	2,32	IL1	1,46
IL2	2,23	IL2	1,48
IL3	2,04	IL3	1,46
Pääjännite (V)		Pääjännite (V)	
U12	385	U12	393
U23	387	U23	396
U31	386	U31	393
<u>1. Terve lähtö</u>		<u>2. Viallinen lähtö</u>	
Vaihevirta (A)		Vaihevirta (A)	
IL1	0,77	IL1	0,71
IL2	0,77	IL2	0,74
IL3	0,75	IL3	0,73
Vaihekapasitanssi (μF)		Vaihekapasitanssi (μF)	
C1	10,7	C1	9,93
C2	10,7	C2	10,1
C3	10,4	C3	10,05
C1.ka.	10,6	C2.ka.	10,03
<u>Muut</u>			
Maasulkuvirta (A)			
If	0		
Summavirta (A)			
I0	0		
Nollajännite (V)			
U0	0,3		

TAULUKKO 2. Mitatut suureet maasulussa

<u>Suojaerotusmuuntajan ensiö</u>		<u>Suojaerotusmuuntajan toisio</u>	
Vaihevirta (A)		Vaihevirta (A)	
IL1	2,3	IL1	4,04
IL2	2,57	IL2	2,38
IL3	2,1	IL3	2,31
Pääjännite (V)		Pääjännite (V)	
U12	383	U12	393
U23	386	U23	394
U31	386	U31	391
<u>Terve lähtö</u>		<u>Viallinen lähtö</u>	
Vaihevirta (A)		Vaihevirta (A)	
IL1	0,03	IL1	0,02
IL2	1,34	IL2	1,25
IL3	1,3	IL3	1,26
<u>Muut</u>			
Maasulkuvirta (A)			
If	4,04		
Summavirta (A)			
I0	0,056		
Nollajännite (V)			
U0	98,3		

Ennen maasulkua mitatut suureet osoittavat, että verkko ja kuormitukset ovat melko symmetriset ja esimerkiksi mitattu summavirta on nolla. Samoin mitattu nollajännite on lähes nolla. Vaikka suojaerotusmuuntajan muuntosuhde on 400/400 V, nostavat toisio kuormana olevat kondensaattoripaketit muuntajan toisio pääjännitteet ensio jännitteitä suuremmiksi.

Maasulussa vaiheen L1 vaihejännite ja sen myötä kondensaattorin varausvirta laskee lähes nolliin. Sama tapahtuu myös terveessä lähdössä, koska kondensaattoripaketien tähtipisteet on siis yhdistetty. Vaiheiden L2 ja L3 virrat nousevat molemmilla lähdöillä, koska tähtipiste on nyt vaiheen L1 potentiaalissa ja vaiheiden L2 ja L3 kapasitanssit kytkeytyvät vaihetta L1 vasten. Vaiheiden L2 ja L3 kondensaattorien yli vaikuttaa nyt siis pääjännite. Alla oleva laskutoimitus todistaa asian, resistanssin oletetaan olevan nolla:

$$\begin{aligned}
 X_{CL2} &= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * \frac{1}{S} * 10,7 * 10^{-6} F} \approx 297 \Omega \\
 Z_{L2} &= \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0 \Omega)^2 + (297 \Omega)^2} = 297 \Omega \\
 I_{L2} &= \frac{U_{12}}{Z_{12}} = \frac{393 V}{297 \Omega} \approx 1,32 A
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Mitattu maasulkuvirta on sama kuin vaiheen L1 virta mitattuna heti suojaerotusmuuntajan jälkeen, koska maasulkuvirta kiertää molempien lähtöjen terveiden vaiheiden kautta muuntajalle ja sieltä takaisin vikapaikkaan viallista vaihetta pitkin. Laskennallisesti maasulkuvirran arvoksi saadaan:

$$\begin{aligned} \underline{E} &= \frac{U_{v1}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = \frac{393 \text{ V}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \approx 227 \text{ V} \angle 0^\circ \\ R_f &= 0 \Omega \\ C &= C_{1.ka.} + C_{2.ka.} \\ \underline{I}_f &= \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{227 \text{ V} \angle 0^\circ}{0 \Omega + \frac{1}{j * 3 * 2 * \pi * 50 * \frac{1}{s} * 20,63 * 10^{-6} F}} \approx \mathbf{4,41 \text{ A} \angle 90^\circ} \end{aligned} \quad (8)$$

Edellisessä laskussa oletetaan vikaresistanssin olevan nolla, joten saatu tulos on jonkin verran mitattua arvoa suurempi. Todellisuudessa piirissä on myös jonkin verran resistanssia. Kapasitanssina C käytetään verkon lähtöjen vaihekapasitanssien keskiarvojen summaa.

Mitattu summavirta oli siis 5,6 mA ja summavirtamuuntajan muuntosuhde on 40/1. Laskennallisesti summavirraksi muuntajan ensiössä saadaan:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{I1}{I2} = \frac{40}{1} = 40 \\ I1 &= \mu * I2 = 40 * 0,056 \text{ A} = \mathbf{2,24 \text{ A}} \end{aligned} \quad (9)$$

Koska viallisen lähdön osuus maasulkuvirrasta kulkee summavirtamuuntajan läpi molempiin suuntiin, kumoavat virrat toisensa. Summavirtamuuntajan mittaama virta on siis terveen lähdön osuus maasulkuvirrasta, joka kulkee summavirtamuuntajan läpi vain yhteen suuntaan, ja on näin ollen noin puolet koko maasulkuvirrasta.

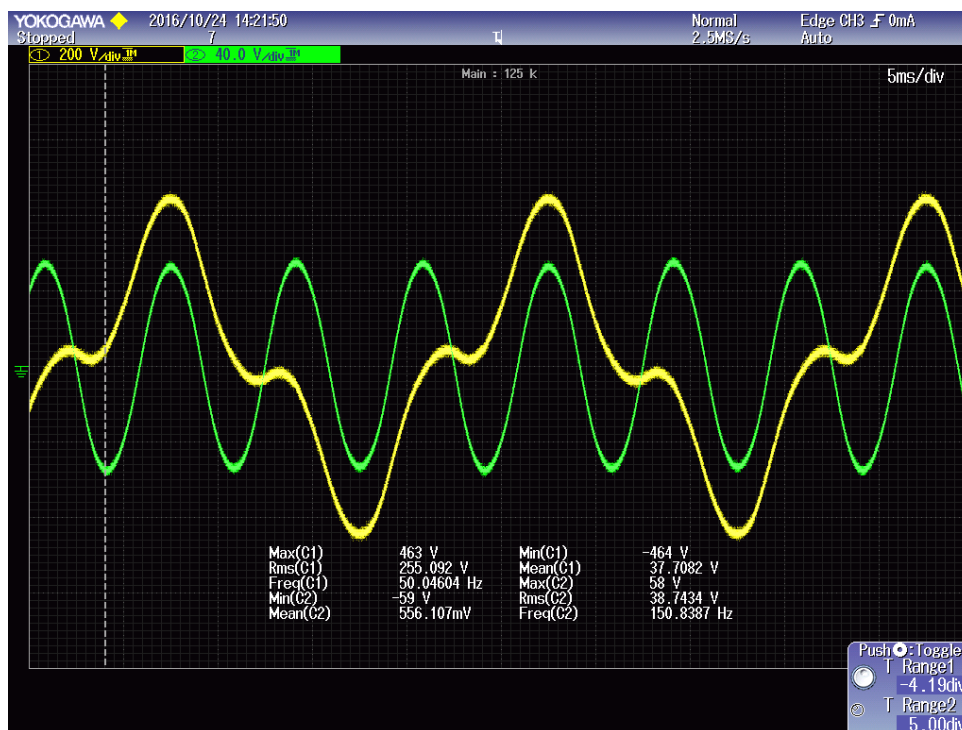
Laskennallisesti nollajännitteen arvoksi saadaan:

$$\begin{aligned} \underline{U}_o &= \frac{-1}{1 + j3\omega C R_f} * \underline{U}_v \\ &= \frac{-1}{1 + j * 3 * 2 * \pi * 50 * \frac{1}{s} * 20,63 * 10^{-6} F * 0 \Omega} * 227 \text{ V} \angle 0^\circ \\ &= \mathbf{227 \text{ V} \angle 180^\circ} \end{aligned} \quad (10)$$

Mitattu nollajännite vastaa myös sitä, mitä teoria sanoo avokolmiomuuntajasta. Avokolmion päiden välillä vaikuttaa siis lähes 100 V jännite suorassa maasulussa (taulukko 2).

Laitteiston yksivaiheisista muuntajista kasatun avokolmiomuuntajan kohdalla havaittiin mielenkiintoinen ilmiö liittyen yliaaltoihin. Avokolmiomuuntajan ensiön tähtipisteen ollessa maadoittamaton pystytettiin avokolmion päiden väliltä mittaamaan yleismittarilla noin 45 V jännite. Ensiön tähtipistettä ei aluksi siis vielä ollut yhdistetty kapasitanssien tähtipisteen muodostamaan keinomaahan (liite 1: pääkaavio).

Kun tilannetta tutkittiin oskilloskoopilla, havaittiin, että muuntajan ensiön jännite oli siniaallosta poikkeavaa. Toisiossa avokolmion päissä vaikutti 150 Hz kolmannen yliaallon jännite, jonka tehollisarvo oli hieman yli 40 V. Yksivaiheiset muuntajat siis jostain syystä kyllästyivät jo pelkässä tyhjäkäynnissä (Aura & Tonteri, 1986). (kuva 28)



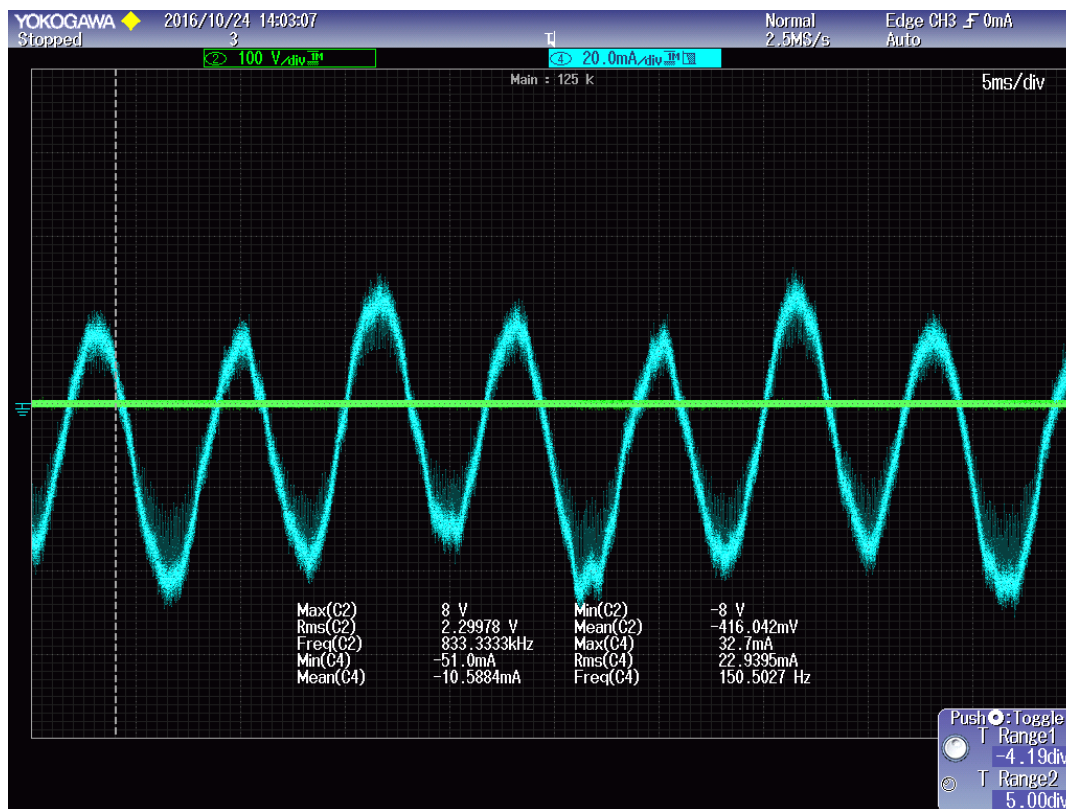
KUVA 28. Maadoittamattoman avokolmiomuuntajan ensiön jännite (keltainen) ja toisiosion jännite (vihreä) (Räsänen, 2016b)

Muuntajan ensiön ollessa tähteen kytketty ilman nolajohtoa ei tasoitusvirta pääse kulkemaan, mikä tasaisi ensiökäämeihin indusoituneet epäsymmetriset jännitteet. Tämä vaikutus puolestaan siirtyy toisiosion käämeihin magneettivuon välityksellä, joka on nyt siis pääasiassa kolmannen yliaallon taajuudella vaihtuva vuo. Muuntajan toisiosion käämeihin indusoituu siten siis 150 Hz vaihtojännite. (Savonia/Jari Ijäs, 2016)

Muuntajien ensiön tähtipiste piti mittauksenkin takia maadoittaa keinomaahan, koska muuten maasulun aikana ei kelluvan tähtipisteen potentiaali muutu mihinkään. Tällöin avokolmion päiden välillä ei olisi jännitettä. Myös muuntajan toisiosion yksi piste yhdistetään samaan potentiaaliin muuntajan ensiön tähtipisteen kanssa. Tämän tarkoitus on suojata henkilövahingoilta, jos muuntajan ensiön ja toisiosion välinen galvaaninen erotus sattuisi pettämään (Elovaara & Laiho, 2007).

Maadoittamisen jälkeen tilanne tasoittui ja avokolmion päiden välillä ei ollut juurikaan jännitettä. Pieni, alle voltin jännite johtui pienestä verkon tai kuormitusten epäsymmetriasta, jota käytännössä aina on. Oskilloskoopilla mitattuna muuntajan ensiön jännite oli nyt täysin sinimuotoista ja samoin toisiosion indusoitunut pieni jännite. Jännitteiden ollessa nyt symmetriset oli magneettivuo myös symmetrinen.

Kolmas yliaalto oli puolestaan havaittavissa muuntajan ensiön tähtipisteeseen yhdistetyssä nollajohdossa virran yliaaltona. Yliaaltopitoinen tasoitusvirta kulki nyt siis avokolmiomuuntajan ensiön tähtipisteestä kapasitanssien kautta verkkoon ja takaisin muuntajan ensiöön. Oskilloskoopin kuvasta on havaittavissa, että virrassa esiintyy myös tasakomponentti eli positiivinen ja negatiivinen puolijakso eivät ole yhtä suuret. (kuva 29)



KUVA 29. Maadoitetun avokolmiomuuntajan toisiojn jännite (vihreä) ja nollajohdon virta (sininen) (Räsänen, 2016c)

5.1 Releen asettelu

Johdonsuojareleen eri releyksiköiden piirikorteilla sekä etukansissa on DIP-kytkimiä (Dual-In-line Package), joilla releen sisäisiä signaaleja ohjataan. Etukansien potentiometreillä ja painonapeilla asettellaan eri havahtumisarvot ja -ajat (kuva 26). Rele tallentaa tietoja eri havahtumisista ja mitatuista arvoista, joita voi tarkastella releen rekistereistä.

Tässä työssä käytiin läpi releen asettelut maasulkusuojauksen kannalta ja esimerkiksi laukaisuajat aseteltiin tarkoituksella pitkiksi, jotta toiminnan ehti havainnoida hyvin. Todellisuudessa laukaisuajat olisivat joitain satoja millisekunteja, jolloin myös releen ja katkaisijan omat toimintaviiveet tulisi ottaa huomioon aikoja asettellessa.

5.1.1 Releen yleisosa ja ylivirtayksikkö

Releen vasemman laidan eli niin sanotun yleisosan DIP-kytkimet aseteltiin alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Releen yleisosan DIP-kytkimet

SGR1=0
SGR2=0
SGR3=0
SGR4=0
SGR5=1
SGR6=0
SGR7=1
SGR8=0

Kytin SGR5 ottaa jälleenkytkentäyksikön käyttöön ja SGR7 puolestaan maasulkuyksikön (Koiranen, 1987).

Ylivirtayksikköä ei tässä työssä käytetty, joten sen etupaneelissa olevat DIP-kytkimet sekä piirilevyllä olevat kytkimet asetettiin kaikki asentoon nolla.

5.1.2 Maasulkuyksikkö

Maasulkuyksikön piirilevyn SGB-kytkimistä SGB/1 asetettiin asentoon yksi, jolloin maasulkuyksikkö vei normaaliportaan $I_{\phi>}$ -havahtumissignaalin jälleenkytkentäyksikön käynnistyslinjaan AR3. Muut piirilevyn kytkimet asetettiin asentoon nolla.

Maasulkuyksikön etupaneelin DIP-kytkimet asetettiin alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Maasulkuyksikön DIP-kytkimet

SG1/1=0
SG1/2=1
SG1/3=0
SG1/4=0
SG1/5=1
SG1/6=1
SG1/7=1
SG1/8=1

Kytkimet SG1/1 ja SG1/6 liittyvät pikalaukaisuportaaseen $I_{\phi>>}$, jota ei tässä työssä käsitellä.

Kytkinten SG1/2 ja SG1/3 keskinäinen valinta vaikuttaa releen toimintakarakteristikaan (Koironen, 1987). Kyseisillä valinnoilla käytössä oli summavirran loiskomponentin mittausta eli $I_{\sin\phi}$ -toimintakarakteristika, koska maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta on pääosin kapasitiivista loisvirtaa. Sammutetun verkon suojauksessa puolestaan käytettäisiin $I_{\cos\phi}$ -toimintakarakteristikkaa.

Kytkimen SG1/4 ollessa asennossa nolla lähtöreleet eivät jää vetäneeksi, kun mittaussignaali laskee alle havahtumiskynnyksen (Koironen, 1987). Todennäköisesti oikeasti tilanne olisi päinvastainen eli havahtumisen ja laukaisun jälkeen lähtöreleet pitäisi aina kuitata joko manuaalisesti tai etäyhteydellä.

Kytkimen SG1/5 ollessa asennossa yksi voidaan normaaliportaan $I_{\phi>}$ laukaisuaika asetella välillä 1 ja 10 s. Kytkimen ollessa asennossa nolla voidaan asettelu tehdä välillä 0,1 ja 1 s. (Koironen, 1987)

SG1/7 ja SG1/8-kytkimillä valitaan nollajännitteen havahtumisarvo prosentteina pykälillä 2, 5, 10 tai 20 % releen sisäisen jännitemuuntajan nimellijännitteestä, joka on liittimistä riippuen 110 tai 100 V (Koironen, 1987). Tässä tapauksessa, jossa avokolmiomuuntaja oli nimellisarvoltaan 100 V, käytettiin myös releen päässä 100 V liittimiä.

Kyseisillä DIP-kytkimien valinnoilla rele havahtui, kun nollajännitteen suuruus ylitti 20 % nimellisarvosta eli 20 V. Kun kyseessä tässä tapauksessa oli suora maasulku ilman vikavastusta, kohosi nollajännite lähes 100 V:iin ja rele havahtui suurimmallakin asetteluarvolla väkisin. Asetteluarvolla 20 % estettiin, että rele ei kuitenkaan havahtunut vahingossa vähäisen epäsymmetrian aiheuttamasta pienestä nollajännitteestä.

Maasulkukyksikön ylimmäisellä potentiometrillä aseteltiin havahtumisarvo piiristä mitattavalle summavirralle maasulussa. Asettelu tapahtuu prosentteina releen sisäisen virtamuuntajan ensiön nimellisvirrasta 1 - 10 % välillä (Koiranen, 1987). Releen virtamuuntajan nimellisvirta on 1 A ja mitattu summavirta oli 5,6 mA, joten rele havahtui tässä tapauksessa arvoilla 1 - 5,6 %.

Seuraavalla potentiometrillä aseteltiin laukaisuaika havahtumisen jälkeen. Toiminnan seuraamisen ja paremman havainnollistavuuden takia laukaisuaika asetettiin 10 s:iin. Maasulkukyksikön $I_{\phi>}$ -merkkilamppu indikoi normaaliportaan havahtumisen palamalla keltaisena ja laukaisun palamalla punaisena (Koiranen, 1987).

Kolmas ja neljäs potentiometri ovat pikalaukaisuportaan asetteluja varten, mutta niitä ei tässä työssä käytetty.

Maasulkukyksikössä on yhdeksän rekisteriä, jotka tallentavat erilaisia tietoja releen mittaamista arvoista ja suoritetuista toiminnoista. Rekisteri 1 tallentaa mitatun summavirran prosenttiarvon, kun nollajännite ylittää havahtumiskynnyksen. Rekisteri 2 puolestaan tallentaa nollajännitteen prosenttiarvon. (Koiranen, 1987)

Rekisteri 3 tallentaa nollajännitteen havahtumisten lukumäärän, rekisteri 4 normaaliportaan summavirran havahtumisten lukumäärän ja rekisteri 5 puolestaan pikalaukaisuportaan summavirran havahtumisten lukumäärän. (Koiranen, 1987)

Rekisteri 6 tallentaa normaaliportaan havahtuneena oloajan prosenttiarvon asetellusta laukaisuajasta ja rekisteri 7 tallentaa saman pikalaukaisuportaasta. Mikäli laukaisu tapahtuu jommallakummalla portaalla, ilmoittavat rekisterit tämän arvolla 100. (Koiranen, 1987)

Rekisterit 0 ja A liittyvät ulkoisten ohjaus- ja lukitussignaalien käyttöön ja etäkäyttöön sarjaliikenteen avulla (Koiranen, 1987). Näitä ominaisuuksia ei tässä työssä käsitelty.

5.1.3 Jälleenkytkentäyksikkö

Jälleenkytkentäyksikön piirilevyllä ei ole DIP-kytkimiä. Etupaneelin kytkimet asetettiin alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Jälleenkytkentäyksikön DIP-kytkimet

SG1/1=0
SG1/2=0
SG1/3=1
SG1/4=0
SG1/5=0
SG1/6=0
SG1/7=0
SG1/8=0

Kytkimillä SG1/1 ja SG1/2 voidaan valita pikajälleenkytkentä käynnistymään releen sisäisestä signaalista AR1 tai AR2 (Koiranen, 1987).

Aikaisemmin mainitun maasulkuyksikön piirilevyn kytkimellä valittiin, että normaaliportaan $I_{\phi} >$ havahtumissignaali viedään jälleenkytkentäyksikön käynnistyslinjaan AR3. Jälleenkytkentäyksikön SG1/3 kytkimen ollessa asennossa yksi käynnistyy jälleenkytkentä juuri releen sisäisestä signaalista AR3 (Koiranen, 1987). Näillä valinnoilla maasulkuyksikkö antoi siis ohjat jälleenkytkentäyksikölle, kun maasulkuyksikön laukaisuehdot täytyivät.

Kytkimillä SG1/4, SG1/5 ja SG1/6 voidaan valita aikajälleenkytkentä käynnistymään signaaleista AR1, AR2 tai AR3 (Koiranen, 1987). Aikajälleenkytkentää ei kuitenkaan otettu käyttöön, koska todellisuudessa keski-jänniteverkon maasulut aiheutuvat usein valokaarista, jotka saadaan tehokkaasti sammuttamaan käyttämällä johtolähtö hetken aikaa jännitteettömänä pikajälleenkytkennällä.

Kytkimillä SG1/7 ja SG1/8 voidaan aikajälleenkytkentöjen lukumäärä valita yhdestä neljään (Koiranen, 1987).

Pika- ja aikajälleenkytkentöjen käynnistysajat eli aika ylivirta- tai maasulkuyksikön havahtumisesta jälleenkytkentään voidaan asettaa jälleenkytkentäyksikön potentiometreillä. Jälleenkytkentäyksikön Ω -merkkilamppu palaa punaisena aina, kun katkaisijan auki- tai kiinniohjaus on käynnissä, ja t5t6 -merkkilamppu palaa keltaisena jännitteettöminä väliaikoina indikoiden, että jälleenkytkentäsekvenssi on edelleen käynnissä. (Koiranen, 1987)

Ylimmäisellä potentiometrillä voidaan valita pikajälleenkytkennän käynnistysaika signaalista AR2 välillä 0,05 ja 2,5 s (Koiranen, 1987). Signaalia AR2 ei siis tässä tapauksessa käytetty.

Toiseksi ylimmäisellä potentiometrillä voidaan asettaa pikajälleenkytkennän käynnistysaika signaalille AR3 välillä 0,05 ja 2,5 s (Koiranen, 1987). Aika asetettiin tarkoituksella pitkäksi, 1,5 s, jotta jälleenkytkentäsekvenssin ehtii havainnoida paremmin.

Kahdella muulla potentiometrillä voitaisiin asettaa aikajälleenkytkennän käynnistysaika signaaleille AR2 ja AR3 välillä 0,05 ja 5 sekuntia (Koiranen, 1987). Aikajälleenkytkentää ei kuitenkaan siis tässä tapauksessa käytetty.

Myös jälleenkytkentäyksikössä on yhdeksän rekisteriä, joista näkee tallennettuja tietoja ja pääsee muuttamaan asetuksia. Rekisteristä 1 asetetaan pikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika välillä 0,1 ja 99,9 s. Jännitteetön väliaika on siis aika jälleenkytkentäyksikön suorittaman katkaisijan aukiohjauksen ja seuraavan kiinniohjauksen välillä (Koiranen, 1987). Tässäkin tapauksessa aika asetettiin tarkoituksella pitkäksi, 3 s, havainnointia helpottamaan.

Rekisteristä 2 voidaan aikajälleenkytkennän jännitteetön väliaika asetella välillä 2 ja 999 s. Rekisteristä 3 nähdään suoritettujen aikajälleenkytkentöjen lukumäärä edellisessä jälleenkytkentäsekvenssissä. (Koiranen, 1987)

Rekisterit 4 ja 5 kertovat suoritettujen pika- ja aikajälleenkytkentöjen kokonaismäärät. Rekisterien alavalikoista nähdään eri AR-signaalien aiheuttamien jälleenkytkentöjen määrä. (Koiranen, 1987)

Rekisterit 6 ja 7 liittyvät katkaisijan huoltolaskurin käyttöön, mikäli sellaista halutaan käyttää tai katkaisijassa ei itsessään sellaista ole. Rekisteristä 6 voidaan valita painokerroin eri AR-signaaleille ja rekisteri 7 toimii alaspäin laskevana laskurina painokertoimien mukaan. Jälleenkytkentäyksikkö aiheuttaa hälytyksen, kun laskuri laskee riittävän alas ja estää lopulta katkaisijan kiinniohjauksen, mikäli laskuria ei nollata ja katkaisijaa huolleta. (Koiranen, 1987)

Rekisteristä 0 nähdään, onko jälleenkytkentäyksiköllä aktiivisia ulkoisia ohjaus- ja lukitussignaaleja sekä erityisesti katkaisijan tilatieto (Koiranen, 1987). Jälleenkytkentäyksikkö tarvitsee oikean tilatiedon katkaisijalta, jotta jälleenkytkentöjä on mahdollista tehdä. Tilatietoa tarvitaan, että rele ei esimerkiksi yritä ohjata jo kiinni olevaa katkaisijaa kiinni tai päinvastoin.

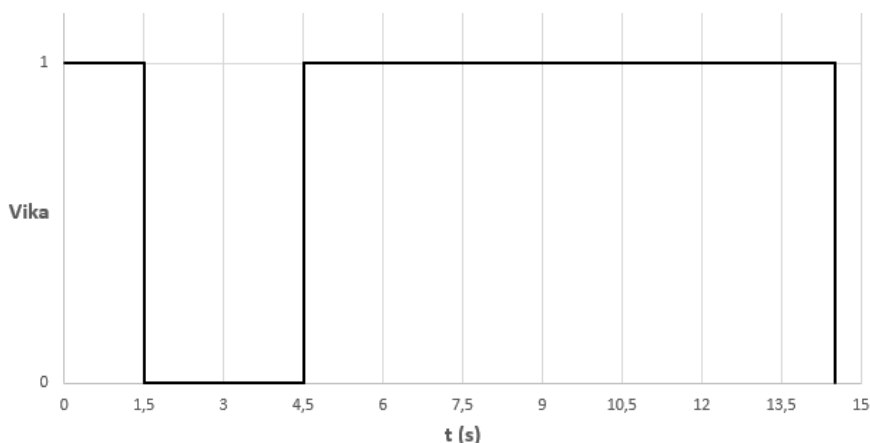
Rekisteri A liittyy maasulkuyksikön tavoin etäkäyttöön sarjaliikenteen avulla. Tätä ominaisuutta ei tässä työssä käsitelty.

5.2 Maasulku releen asettelujen jälkeen

Releen asettelujen jälkeen virtapiirissä tehtiin uudestaan maasulku. Tapahtumaketju oli nyt seuraava:

- Kytkimen S3 kääntäminen sai maasulkuyksikön havahtumaan, jolloin $I_{\phi>}$ -merkkilamppu paloi keltaisena.
- 1,5 s kulutta katkaisija ohjautui auki. Maasulkuyksikkö oli siis antanut käskyn jälleenkytkentäyksikölle suorittaa pikajälleenkytkentä ja jälleenkytkentäyksikön Ω -merkkivalo paloi punaisena.
- 3 s kuluttua katkaisija ohjautui takaisin päälle ja t5t6 -merkkivalo paloi jännitteettömänä aikana keltaisena.
- 10 s kuluttua katkaisija ohjautui lopullisesti auki ja maasulkuyksikön $I_{\phi>}$ -merkkilamppu jäi palaamaan punaisena merkinä siitä, että maasulkuyksikkö suoritti lopullisen laukaisun.

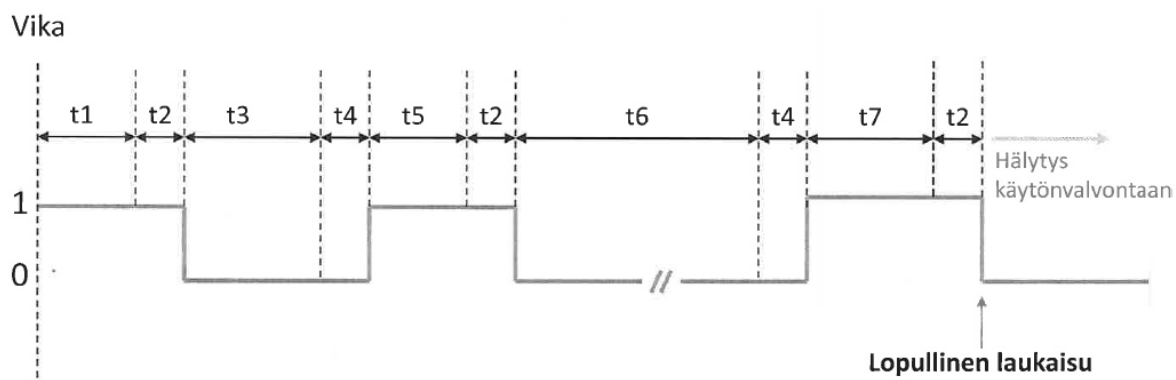
Alla oleva kuva esittää jälleenkytkentäsekvenssin graafisesti. (kuva 30)



KUVA 30. Releen suorittama jälleenkytkentäsekvenssi

Maasulun simulointi laboratorio-olosuhteissa kyseisellä laitteistolla onnistui siis odotusten mukaisesti. Releeseen tarkoituksella asetetut pitkät laukaisuajat auttoivat hahmottamaan jälleenkytkentäsekvenssin ja tätä silmällä pitäen laadittiin myös laboratoriotyöohje (liite 2: työohje).

Laitteistoa voisi jatkossa testata myös siten, että laukaisuajat aseteltaisiin todellisen keskijännitelähdön mukaisesti (kuva 31), jolloin esimerkiksi pikajälleenkytkennässä laukaisu aika olisi joitain satoja millisekunteja. Tällöin myös releen ja katkaisijan omat toimintaviiveet eri toimintoja suorittaessa pitäisi ottaa huomioon, eli tarkastettaisiin esimerkiksi, että katkaisija ehtii aueta ennen kuin rele antaa kiinnohjauskäskyn.



- $t_1 \rightarrow$ suojarelen havahtumisviive tai aseteltu polttoaika ennen pikajälleenkytkentää
- $t_2 \rightarrow$ katkaisijan aukiohjausviive
- $t_3 \rightarrow$ pikajälleenkytkentä (PJK), jännitteetön aika (tyypillisesti 0.3s)
- $t_4 \rightarrow$ katkaisijan kiinniohjausviive
- $t_5 \rightarrow$ suojarelen havahtumisaika tai aseteltu polttoaika ennen aikajälleenkytkentää
- $t_6 \rightarrow$ aikajälleenkytkentä (AJK), jännitteetön aika (tyypillisesti 30-60s)
- $t_7 \rightarrow$ suojarelen lopullisen laukaisun aika

KUVA 31. Esimerkki 1xPJK + 1xAJK jälleenkytkentäsekvenssistä (Vedenjuoksu, 2016)

6 LOPPUPÄÄTELMÄ

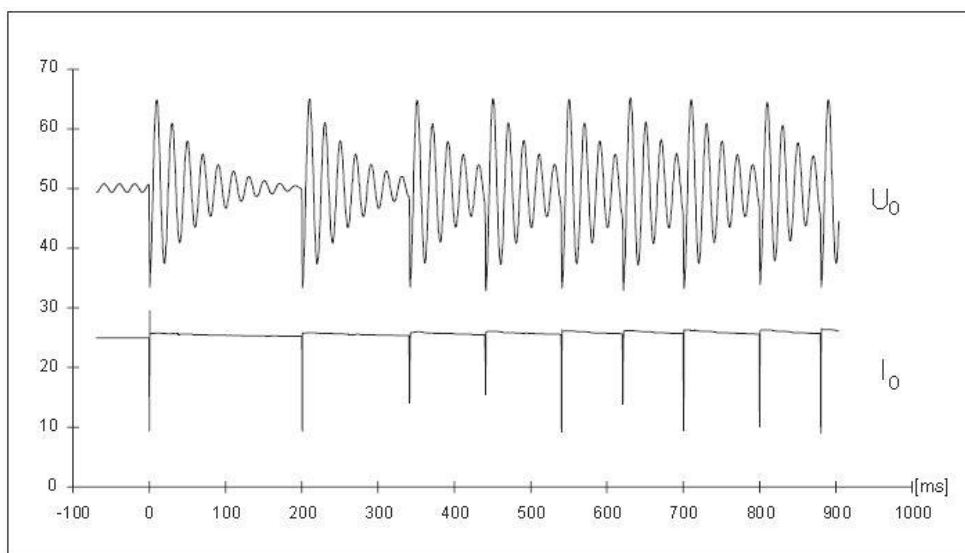
Tämä opinnäytetyö käsitteli maasulun teoriaa usean eri tilanteen sekä eri maadoitustapojen kannalta. Pääpaino oli kuitenkin maasta erotetun verkon maasulussa ja sen suojauksessa, minkä perusteella myös käytännön osuus tehtiin. Nykyisin ja tulevaisuudessa varsinkin sammutettu verkko on tärkeämpi osa Suomen keskijännitejakeluverkkoa.

Jakeluverkkoyhtiöt Suomessa kaapeloivat entistä enemmän uutta keskijännitejakeluverkkoa ja myös olemassa olevia avojohtoverkkoja muutetaan maakaapeliverkoiksi. Vaikka kaapelointi tuo varmuutta sähköjakeluun, asettaa kaapelointi haasteita maasulkusuojaukselle. (ABB Oy, 2016)

Maakaapelissa vaihejohtimien ja maadoitetun vaipan välinen etäisyys on vain joitain senttimetrejä verrattuna avojohdon ja maaperän usean metrin välimatkaan. Tällöin maakaapelin maakapasitanssi on moninkertainen verrattuna avojohtoon. Maakaapeliverkossa voikin maasulkuvirta olla monikymmenkertainen verrattuna samanpituisen avojohtoverkkoon juuri maakaapelin paljon suuremman maakapasitanssin takia. Suuria maasulkuvirtoja pyritään puolestaan pienentämään verkon sammutuksella. (ABB Oy, 2016)

Sammutetun verkon maasulku on hankalampi tunnistaa, koska mitattavat summavirrat jäävät pieniksi ja joissain tapauksissa myös nolajännite voi olla hankala mitata. Lisäksi kaapeliverkossa ilmenee huomattavasti enemmän niin sanottua katkeilevaa maasulkua. Katkeileva maasulku syntyy muun muassa, kun kaapelin eristemateriaali heikkenee ja tapahtuu hetkittäin läpilyöntejä vaihejohtimesta maadoitettuun kaapelin vaippaan. (ABB Oy, 2016)

Katkeileva maasulku synnyttää runsaasti transienteja ja yliaaltoja nolajännitteessä ja maasulkuvirrassa, jolloin maasulun tunnistaminen on vaikeampaa. Katkeileva maasulku ilmenee monesti lyhytketoisina peräkkäisinä pulsseina, jolloin mitattava nolajännite heilahtelee ja mitattava maasulkuvirta esiintyy terävinä piikkeinä (kuva 32). (ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016)



KUVA 32. Nolajännite ja maasulkuvirta katkeilevassa maasulussa (ABB Oy, 2002)

Suojareille tilanne on hankala, koska lyhytkestoisten virtapiikkien aikana rele kyllä havahtuu mutta ei ehdi antaa laukaisukäskyä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi käytetään releissä havahtumisen jälkeistä hidastusta, esimerkiksi 500 ms, jolloin seuraava virtapiikki ehtii mukaan releen ollessa edelleen havahtuneena ja rele antaa laukaisukäskyn. (ABB Oy/ Veikko Lehesvuo, 2016; ABB Oy, 2002)

Muun muassa ABB on kehittänyt uutena tuotteena monitaajuusadmittanssisuojan, jossa tavallisten toimintakarakteristikoiden lisäksi katkeilevan maasulun transientit ja yliaallot yhdistetään kumulatiivisesti. Tällöin hetkelliset vaihtelut mitattavien suureiden vektoreissa jäävät pois ja saadaan aikaan pysyvän tilan estimaatti nollajännitteen ja maasulkuvirran välisestä kulmasta. Suojauksesta saadaan siten tarkka ja herkkä kaikenlaisissa verkoissa. (ABB Oy, 2016)

7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin keskijänniteverkon maasulkua ja sen suojausta. Työn tavoitteiksi asetettiin aiheen käsittely teoriassa siten, että maasulusta ja sähkötekniikasta entuudestaan tietävä henkilö saisi lisätietoa työn luettuaan. Kohderyhmä on siis ammattikorkeakouluopintoja suorittavat opiskelijat. Käytännön työn tavoitteeksi asetettiin maasulun simulointi ja maasulkusuojaus laboratoriolaitteistolla siten, että muidenkin opiskelijoiden on mahdollista toteuttaa simulointi työn tuloksena laaditun työohjeen perusteella.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin maasulkusuojauksen periaatteiden lisäksi erilaisia maasulkuja, kuten yksivaiheisia maasulkuja, kaksoismaasulkua, johtimen katkeamista maakosketuksella sekä oikosulun ja maasulun yhdistelmää. Tarkemmassa käsittelyssä olivat yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa ja sammutetussa verkossa ja näiden tilanteiden osalta myös nollajännitteen sekä maasulkuvirran laskenta esitettiin sijaiskytkentöjen ja kaavojen muodossa.

Maasulkusuojauksen teoriassa keskityttiin maasta erotetun ja sammutetun verkon suojauksen periaatteisiin suunnatun maasulkusuojauksen osalta. Suunnatussa maasulkusuojauksessa suojarele mittaa nollajännitteen ja maasulkuvirran välistä kulmaa tai vaihtoehtoisesti maasulkuvirran pätö- tai loiskomponenttia ja suorittaa laukaisun asetteluarvojen perusteella. Näitä eri toimintakarakteristikoita käsiteltiin työn teoriaosuudessa.

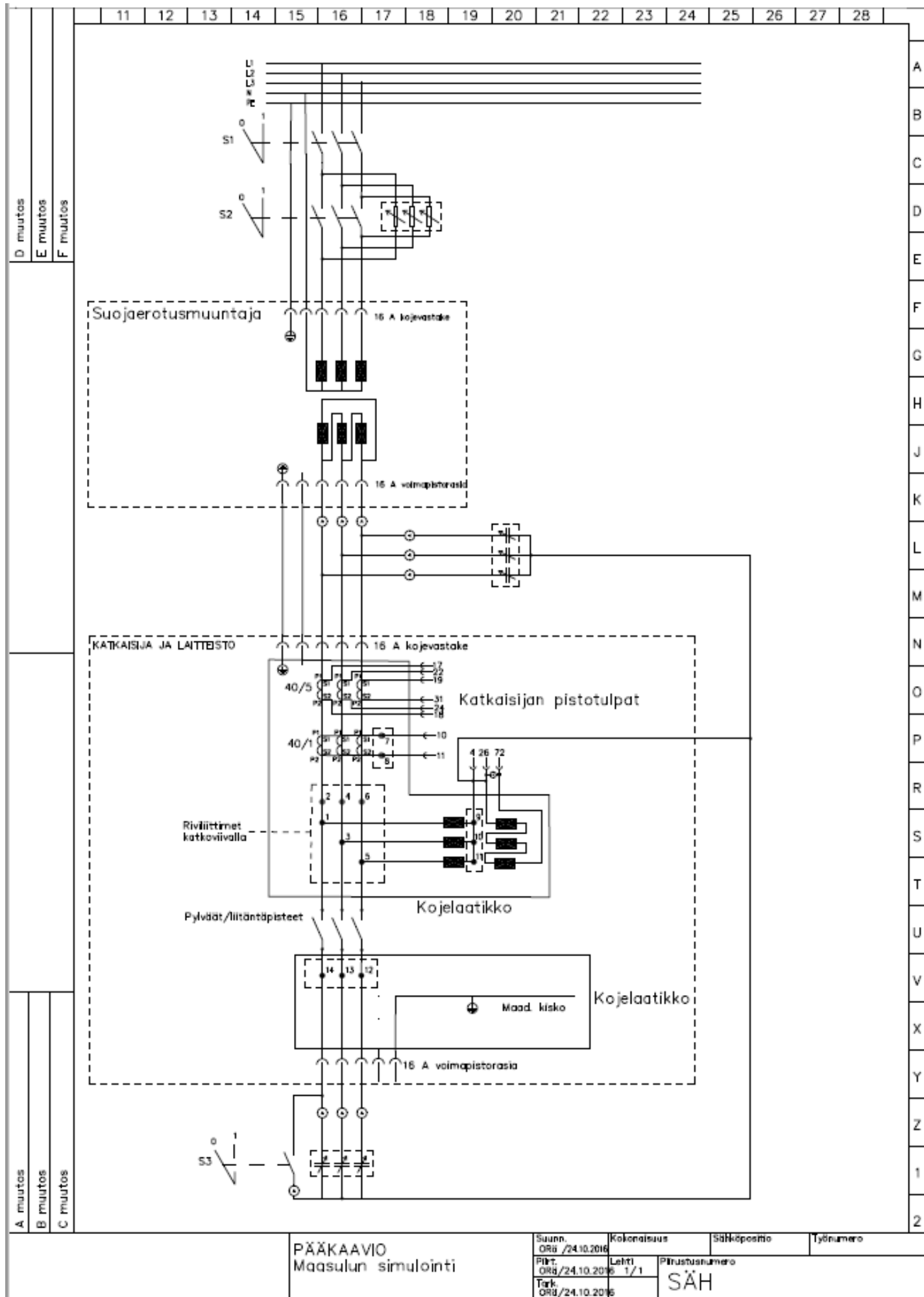
Teoriaosuuden aiheet pyrittiin avaamaan ja esittämään siten kuin ne monissa lähdemateriaaleissa on esitetty ja esimerkiksi maasulun todellinen luonne ja käyttäytyminen muutosilmiöiden aikana jäi tässä työssä käsittelemättä. Myös maasulkusuojauksen tarkemmat ja todellisuutta vastaavat selektiiviset asettelut jäivät tämän työn ulkopuolelle.

Työn käytännön osuudessa sähkölaboratorioon suunniteltiin ja rakennettiin virtapiiri, joka mallinsi kahta keskijänniteverkon johtolähtöä. Toista lähtöä suojasi johdonsuojakatkaisija ja suunnattu maasulkusuojarele. Johtolähdöt rakennettiin ja mallinnettiin siten, että tekemällä maasulku katkaisijan perässä olevaan lähtöön, ohjasi rele katkaisijan auki aseteltujen arvojen mukaisesti. Tällöin toinen johtolähtö jäi normaalisti käyttöön. Työ onnistui täysin suunnitelmien mukaan ja tuloksena saatiin toimiva kokonaisuus. Testauksen pohjalta laadittiin laboratoriotyö ja työohje Savonia-ammattikorkeakoulun käyttöön.

LÄHTEET

- .JJ/KA. (18. 10. 1974). Asennus- ja käyttöohje. *Katkaisijoiden OSAM, OSAN ja OSAO asennus- ja käyttöohje*. Helsinki: Oy Strömberg Ab.
- ABB Oy. (7. 2000). Teknisiä tietoja ja taulukoita. *Luku 8. Maasulkusuojaus*. Haettu 15. 11 2016 osoitteesta http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf
- ABB Oy. (21. 11. 2002). Käyttöohje ja tekninen selostus. *SPCS 2D26 - Suunnattu tai suuntaamaton maasulkurelemoduuli*. Vaasa. Haettu 29. 11 2016 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/d783a33597452106c2256c7e0040b3e1/SPCS2D26_FI_B.pdf
- ABB Oy. (21. 8. 2016). Verkkoseminaari. *Kompensoidun kaapeliverkon haasteet maasulkusuojuukselle*. Vaasa, Suomi. Haettu 25. 11 2016 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=hA-VKn71ShA>
- ABB Oy/ Veikko Lehesvuo. (29. 11. 2016). Puhelu. Kuopio.
- Aura, L.;& Tonteri, A. (1986). *Sähkömiehen käsikirja 1: Teoreettinen sähkötekniikka*. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.
- Aura, L.;& Tonteri, A. (1986). *Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet*. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.
- Elovaara, J.;& Laiho, Y. (2007). *Sähkölaitostekniikan perusteet* (Kuudes painos p.). Helsinki: Otatieto/Gaudeamus Helsinki University Press.
- Koiranen, A. (3. 6. 1987). Käyttöohje. *Johdonsuoja SPAA 322C*. Helsinki: Strömberg Oy.
- Lakervi, E.;& Partanen, J. (2012). *Sähkönjakelutekniikka* (Kolmas painos p.). Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press/Otatieto.
- Lehtonen, M. (1992). Thesis for the degree of Doctor of Technology. *Transient analysis for ground fault distance estimation in electrical distribution networks*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).
- Majanen, H. (1. 2016). Luentomonisteet. *Maasulkusuojuuksen toiminta*. Espoo.
- Mörsky, J. (1992). *Relesuojaustekniikka*. Espoo: Otatieto Oy.
- Räsänen, O. (10. 10. 2016). Pääkaavio. Kuopio.
- Räsänen, O. (2016a). *Tähtipisteen maadoitus*. Kuopio.
- Räsänen, O. (2016b). *Avokolmiomuuntajan jännitteet ilman nollajohtoa*. Kuopio.
- Räsänen, O. (2016c). *Avokolmiomuuntajan toisiojännite ja nollajohdon virta*. Kuopio.
- Räsänen, O. (2016d). *OSAM 24 A2 vähäjykykatkaisija*. Kuopio.
- Savonia/ Jari Ijäs. (24. 10. 2016). Keskustelu. Kuopio.
- SESKO ry. (2009). *SFS-käsikirja 601 - Suurjännitesähkösäennukset ja ilmajohdot* (Ensimmäinen painos p.). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SESKO ry. (2015). *SFS 6001 Suurjännitesähkösäennukset* (Neljäs painos p.). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Vedenjuoksu, T. (4. 1. 2016). Luentomonisteet. *Sähkönjakelujärjestelmien relesuojaus - Suojareleet*. Espoo, Suomi: ABB Oy.

LIITE 1: PÄÄKAAVIO



LIITE 2: TYÖOHJE



MAASULKUSUOJAUS SPAA 322C JOHDONSUOJARELEELLÄ

Sähkövoimatekniikan työt

Työohje

Selostuksen tekijä: **Olli Räsänen**

Sähköposti os.: Olli.M.Rasanen@edu.savonia.fi

Päivämäärä: 12.12.2016

Työ no:

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	3
2	ENNAKKOTEHTÄVÄT	3
3	MITTAUSKYTKENTÄ.....	4
4	MITTAUKSET	6
4.1	Johdonsuojareleen asettelut	7
4.1.1	Maasulkuyksikkö	8
4.1.2	Jälleenkytkentäyksikkö	9
5	KYSYMYKSET	11
	LÄHTEET	12
	LIITE 1: PÄÄKAAVIO.....	13
	LIITE 2: ETUPANEELIN LIITTIMET	14
	LIITE 3: KATKAISIJAN LIITTIMET	15
	LIITE 4: SPAA 322C LIITTIMET.....	16

1 JOHDANTO

Kuluttajien sähkökatkokset johtuvat pääasiassa keskijännitejakeluverkossa sattuvista vioista. Näitä vikoja ovat muun muassa erilaiset oikosulut sekä yleisimpänä vikana maasulku. Riippuen onko verkko maasta erotettu vai sammutettu, täytyy maasulkuvirta tunnistaa eri lailla, jotta suojaus toimii. Suunnattu maasulkusuojarele on kehitetty tätä varten.

2 ENNAKKOTEHTÄVÄT

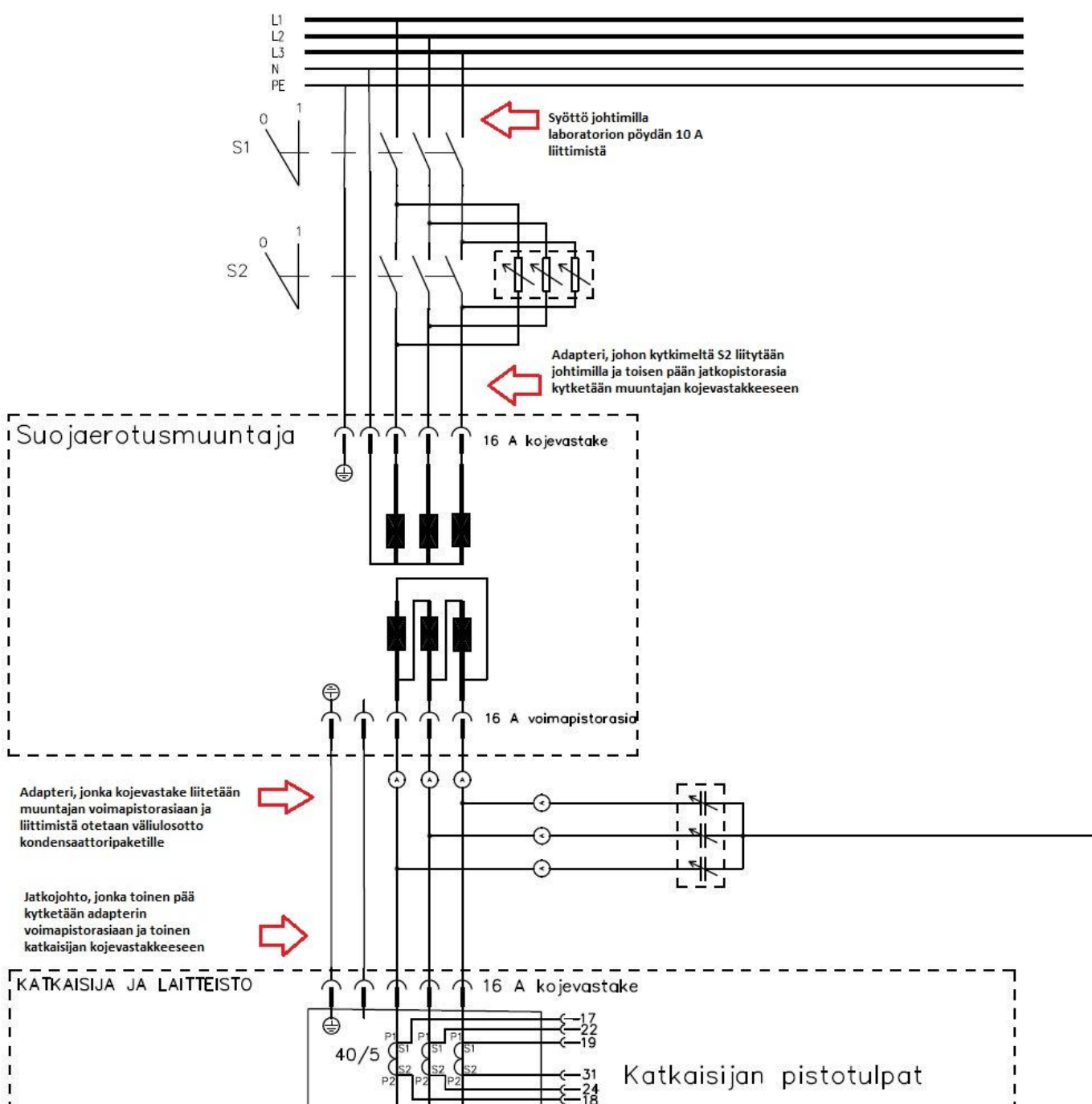
Suunnittele mittauskytkentä ennakkoon johdonsuojareleen ja katkaisijan kytkentäkaavioiden sekä pääkaavion avulla (liitteenä).

Mittauskytkennässä käytetään molempien säädettävien kondensaattoripakettien säätöarvona 1:stä. Mittaa kondensaattoripaketin vaihekapasitanssi Fluke 175 -yleismittarilla ennen työn aloitusta myöhempää laskentaa varten. Mittaa työtä tehdessäsi myös pääjännitteet suojaerotusmuuntajan toisios- ta laskentaa varten.

3 MITTAUSKYTKENTÄ

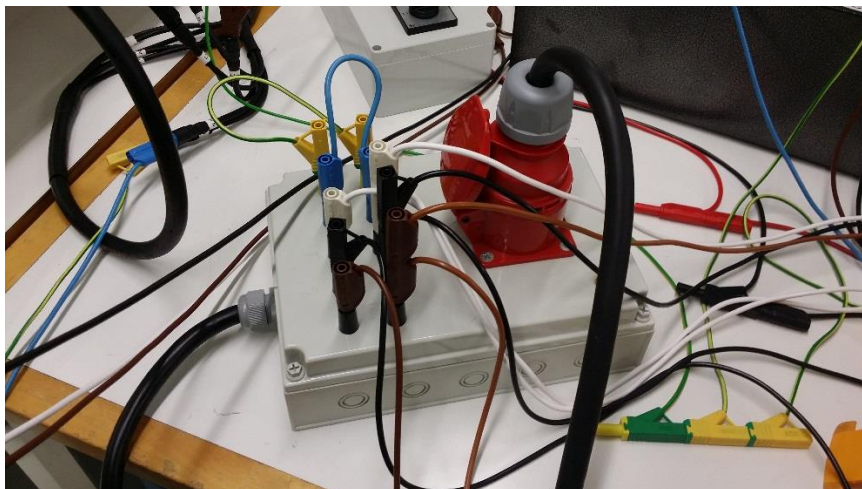
Työssä tarvittavien suojaerotusmuuntajan ja vähäöljykatkaisijan liitännät tapahtuvat voimapistorasioiden ja kojevastakkeiden avulla. Tässä työssä tarvitaan siis erilaisia 16 A jatkojohtoja sekä adaptereita, jotta tarvittavat väliulosotot saadaan käyttöön.

Laboratorion pöydän 10 A kolmivaiheisesta syötöstä liitytään johtimilla kytkimeen S1. Kytkimen S2 rinnalle tarvitaan kolmivaiheinen säätövastus rajoittamaan muuntajan ottamaa kytkentävirtapiikkiä. Ohituskytkimen S2 ja säätövastuksen jälkeen tarvitset yhtä adapttereista, jolla jatkat syötön rakentamista suojaerotusmuuntajalle. (kuva 1)



KUVA 1. Virtapiirissä tarvittavia adapttereita

Pääkaaviossa ensimmäinen tähteen kytketty säädettävä kondensaattoripaketti kuvaa keskijänniteverkon tervettä lähtöä eli lähtöä, jossa ei ole vikaa. Saadaksesi terveen lähdön rakennettua, tarvitset yhtä adaptereista (kuva 1, kuva 2), jotta saat väliulosoton ennen summavirtamuuntajaa.



KUVA 2. Adapteri terveen lähdön väliulosottoa varten

Toinen kondensaattoripaketti kuvaa tässä tapauksessa johtolähtöä, jossa maasulku tapahtuu. Tämä lähtö rakennetaan siis katkaisijan jälkeen, jolloin katkaisija voi erottaa lähdön vian sattua ja terve lähtö pysyy normaalisti toiminnassa.

Kytke ensimmäiseksi summavirtamuuntajan liittimiin normaali yleismittari, jotta näet summavirran lukuarvon myöhempää releen asettelua varten. Laita avokolmiomuuntajan liittimiin yleismittari rinnalle, niin näet nollajännitteen lukuarvon.

KYTKE MYÖS VAIHEVIRTOJA MITTAAVAT VIRTAMUUNTAJAT JOHDONSUOJARELEESEEN, VAIKKA NIITÄ EI TÄSSÄ TYÖSSÄ TARVITAKAAN. NÄIN VARMISTETAAN, ETTEIVÄT VIRTAMUUNTAJIEN TOISIOT JÄÄ AVOIMIKSI, KUN PÄÄPIIRISTÄ KATKAISTAAN VIRTAA.

Tee loput muuntajien/katkaisijan ja johdonsuojareleen väliset kytkennät liitteenä olevien kaavioiden perusteella.

4 MITTAUKSET

Tarkista ensimmäiseksi, että kaikki virtapiirissä olevat kytkimet ovat auki ja kondensaattoripakettien säätökytkimet asennossa 1. Tarkista myös, että kaikkien virtamuuntajien liittimet ovat käytössä ja liitettyinä joko johdonsuojareleeseen tai yleismittariin. **Tarkasta myös, että säätövastus on maksimissaan.**

Älä kytke johdonsuojareleen/katkaisijan apujännitteen johtoja pöydän tasajänniteliittimiin ennen kuin olet mitannut yleismittarilla, että liittimiin tulee pöydän säätömuuntajan kautta **110 VDC** jännite.

Kytke tämän jälkeen apujännitteen johdot pöydän liittimiin, niin että liittimiin ei tule jännitettä. Kytke tasajännite päälle, jolloin katkaisijan pitäisi virittyä automaattisesti. Myös johdonsuojareleen pitäisi käynnistyä samalla. Kytke katkaisija kiinni katkaisijan kotelon "I"-painonapilla. Kotelon aukoista pitäisi nyt näkyä indikointi, että katkaisija on viritetty ja se on kiinni.

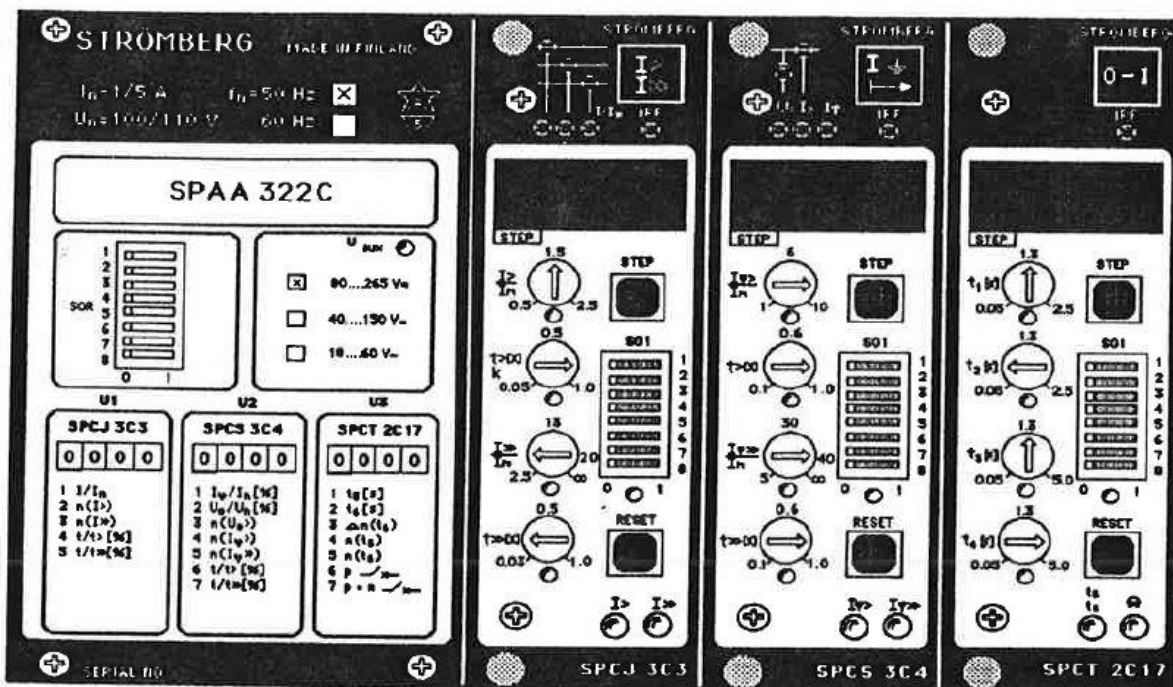
Kytke pöydästä johdonsuojakatkaisijat päälle, jotta saat 10 A liittimiin jännitteen. Kytke kytkin S1 päälle, jolloin johdonsuojakatkaisijoiden pitäisi pysyä päällä. Laita pihtiampeerimittari mittaamaan yhden vaiheen virtaa samalla, kun säädät säätövastusta pienemmälle. Kun pihtiampeerimittari näyttää noin 1,5 A, kytke ohituskytkin S2 päälle. Mikäli pöydän johdonsuojakatkaisijat eivät pysy päällä, kytke kytkin S2 nolllille, säädä säätövastus maksimiin ja aloita alusta säätäen nyt vastusta vielä pienemmälle. Kun johdonsuojakatkaisijat pysyvät päällä kytkimen S2 ollessa päällä, säädä säätövastus takaisin maksimiin. Tällöin suojaerotusmuuntajalle tulee syöttö suoraan ohituskytkimen kautta.

Kytke molempien kondensaattoripakettien kytkimet päälle. Virtapiirin eri haarojen vaihevirtojen pitäisi olla lähes symmetriset ja summavirran sekä nollajännitteen pitäisi olla lähes nolla. Kytke seuraavaksi kytkin S3 päälle, jolloin virtapiiriin tulee maasulku. Tarkkaile virtoja ja jännitteitä ja ota arvot ylös, varsinkin summavirran arvo. Poista tämän jälkeen maasulku kääntämällä kytkin S3 nolllille.

Kytke seuraavaksi kondensaattoripaketit pois päältä ja tee virtapiiri jännitteettömäksi katkaisemalla suojaerotusmuuntajalta syöttö. Katkaisijaa ei tarvitse avata. Kytke tämän jälkeen summavirtamuuntaja johtimilla johdonsuojareleeseen kiinni ja kytke virtapiiriin jännite aikaisemmin kuvattujen askelten mukaan. **ÄLÄ TEE VIELÄ MAASULKUA UUDESTAAN!**

4.1 Johdonsuojareleen asettelut

SPAA 322C -johdonsuojarele koostuu niin sanotusta yleisosasta sekä kolmesta releyksiköstä (kuva 3).



KUVA 3. SPAA 322C -johdonsuojareleen yleisosa, ylivirtayksikkö, maasulkukyksikkö ja jälleenkytkentäyksikkö (Koiranen, 1987)

Johdonsuojareleen eri releyksiköiden piirilevyillä oleviin DIP-kytkimiin ei tarvitse koskea. Johdonsuojareleen vasemman laidan niin sanotun yleisosan DIP-kytkimet asetetaan alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 1).

TAULUKKO 1. Releen yleisosan DIP-kytkimet

SGR1=0
SGR2=0
SGR3=0
SGR4=0
SGR5=1
SGR6=0
SGR7=1
SGR8=0

SGR5 kytkin ottaa jälleenkytkentäyksikön käyttöön ja SGR7 puolestaan maasulkukyksikön.

Ylivirtareleyksikköä ei tässä työssä käytetä, joten sen etupaneelissa olevat DIP-kytkimet (SG1/1-SG1/8) asetetaan kaikki asentoon nolla.

4.1.1 Maasulkuyksikkö

Maasulkuyksikön DIP-kytkimet asetetaan alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Maasulkuyksikön DIP-kytkimet

SG1/1=0
SG1/2=1
SG1/3=0
SG1/4=0
SG1/5=1
SG1/6=1
SG1/7=1
SG1/8=1

SG1/1 ja SG1/6 liittyvät pikalaukaisuportaaseen $I_{\phi > >}$, jota ei tässä työssä käsitellä.

SG1/2 ja SG1/3 keskinäinen valinta vaikuttaa releen toimintakarakteristikaan. Kyseisillä valinnoilla käytössä on summavirran loiskomponentin mittaus eli $I_{\text{sin}\phi}$ -toimintakarakteristika.

SG1/4 ollessa asennossa nolla lähtöreleet eivät jää vetäneeksi, kun mittaussignaali laskee alle havahtumiskynnyksen.

SG1/5 ollessa asennossa yksi normaaliportaan $I_{\phi >}$ laukaisu aika on aseteltavissa välillä 1 ja 10 s.

SG1/7 ja SG1/8 kytkimillä valitaan nollajännitteen havahtumisarvo prosentteina releen sisäisen jännitemuuntajan nimellisjännitteestä, joka on liittimistä riippuen 110 tai 100 V. Tässä tapauksessa, jossa avokolmiomuuntaja on nimellisarvoltaan 100 V, käytetään myös releen päässä 100 V liittimiä. Kyseisillä DIP-kytkimien valinnoilla rele havahtuu, kun nollajännitteen suuruus ylittää 20 % nimellisarvosta eli 20 V.

Aseta maasulkuyksikön ylimmäisellä potentiometrillä havahtumisarvo piiristä mitattavalle summavirralle maasulussa. Asettelu tapahtuu prosentteina releen sisäisen virtamuuntajan ensiön nimellisvirrasta 1 - 10 % välillä. Mittasit aikaisemmin yleismittarilla summavirran maasulussa, joten käytä mitattua tulosta apuna asettellessasi prosenttiarvon havahtumiselle.

Seuraavalla potentiometrillä voit asettaa laukaisuajan. Aseta ajaksi esimerkiksi 10 s, niin ehdit havainnoida, kuinka maasulkuyksikön $I_{\phi >}$ -merkkilamppu indikoi normaaliportaan havahtumisen palamalla keltaisena ja laukaisun palamalla punaisena. Voit myös mitata aikaa ja todeta asettelujen pitävän paikkansa.

Kolmas ja neljäs potentiometri ovat pikalaukaisuportaan asetteluja varten, mutta niitä ei tässä työssä käytetä.

Maasulkuyksikön rekistereistä voit tarkastella erilaisia tallennettuja tietoja. Releen käyttöohjeesta näet, mitä tietoja eri rekisterit tallentavat.

4.1.2 Jälleenkytkentäyksikkö

Jälleenkytkentäyksikön DIP-kytkimet asetellaan alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Jälleenkytkentäyksikön DIP-kytkimet

SG1/1=0
SG1/2=0
SG1/3=1
SG1/4=0
SG1/5=0
SG1/6=0
SG1/7=0
SG1/8=0

SG1/3 kytkimen ollessa asennossa yksi käynnistyy jälleenkytkentä releen sisäisestä signaalista AR3. Maasulkuyksikön piirikortin kytkimillä on valmiiksi määritelty, että maasulkuyksikkö käyttää laukaisuun juuri AR3 signaalia, joten näillä valinnoilla maasulkuyksikkö antaa ohjat jälleenkytkentäyksikölle, kun maasulkuyksikön laukaisun ehdot täyttyvät.

Tässä työssä käytetään yhtä pikajälleenkytkentää, koska todellisuudessa keski-jänniteverkon maasulut aiheutuvat usein valokaarista, jotka saadaan tehokkaasti sammumaan käyttämällä johtolähtö hetken aikaa jännitteettömänä.

Jälleenkytkentäyksikön toiseksi ylimmäisellä potentiometrillä voit asettaa pikajälleenkytkennän käynnistysajan signaalille AR3 välillä 0,05 ja 2,5 s. Laita ajaksi esimerkiksi 1,5 s, jolloin ehdit paremmin havainnoida tapahtumia. Muita potentiometrejä ei tarvita tässä työssä.

Jälleenkytkentäyksikön rekisteristä 1 pääset asettamaan pikajälleenkytkennän jännitteettömän väliajan välillä 0,1 ja 99 s. Aseta ajaksi esimerkiksi 3 s. Todellisuudessa käynnistysajat ja jännitteettömät väliajat olisivat paljon lyhempiä, mutta havainnointia helpottamaan ajat asetellaan tarkoituksella pitkiksi.

Jälleenkytkentäyksikön Ω -merkkilamppu palaa punaisena aina, kun katkaisijan auki- tai kiinniohjaus on käynnissä. t5t6 -merkkilamppu palaa keltaisena jännitteettöminä väliaikoina indikoiden, että jälleenkytkentäsekvenssi on edelleen käynnissä.

Rekisteristä 0 voit tarkastaa, että katkaisijan tilatieto tulee releelle oikein, koska muuten rele ei voi suorittaa jälleenkytkentöjä. Rekisterin 0 keskimäinen numero kertoo katkaisijan tilan (0 = auki, 1

= kiinni), joten tarkista, että se vastaa todellista katkaisijan tilaa. Muut rekisterin 0 numerot pitäisivät olla nolla.

Tee releen asettelujen jälkeen virtapiirissä uudestaan maasulku. Tapahtumaketjun pitäisi olla nyt seuraava:

- Kytkimen S3 kääntäminen saa maasulkukyksikön havahtumaan, jolloin $I\phi>$ -merkkilamppu palaa keltaisena.
- 1,5 s kuluttua katkaisija ohjautuu auki. Maasulkukyksikkö antaa siis käskyn jälleenkytkentäyksikölle suorittaa pikajälleenkytkentä ja jälleenkytkentäyksikön Ω -merkkivalo palaa punaisena.
- 3 s kuluttua katkaisija ohjautuu takaisin päälle ja t5t6 -merkkivalo palaa jännitteettömänä aikana keltaisena.
- 10 s kuluttua katkaisija ohjautuu lopullisesti auki ja maasulkukyksikön $I\phi>$ -merkkilamppu jää palamaan punaisena merkinä siitä, että maasulkukyksikkö on suorittanut lopullisen laukaisun.

Poista maasulku kääntämällä kytkin S3 nolville ja kuittaa maasulku painamalla maasulkukyksikön SET- ja RESET-painikkeita yhtä aikaa. Voit tämän jälkeen kytkeä virtapiirin jännitteettömäksi. Katkaise myös laboratorion pöydästä jännitteet pääkytkimellä. **Varmista katkaisijan kotelosta, että katkaisija on auki ja pura tämän jälkeen katkaisijan viritys painamalla katkaisijan kotelon "I"-painonappia.** Pura tämän jälkeen mittauskytkentä.

5 KYSYMYKSET

1. Miksi kyseisessä mittauskytkennässä, jossa simuloidaan maasta erotetun verkon maasulkua, täytyy olla sekä terve että viallinen lähtö, jotta johdonsuojarele saadaan ylipäätään havahtumaan? (Vihje: liittyy summavirtamuuntajaan)
2. Miksi maasta erotetussa verkossa johdonsuojareleen toimintakarakteristikana käytetään summavirran loiskomponentin mittausta eli I_{sinq} -toimintakarakteristikaa?
3. Mittasit työtä tehdessäsi kondensaattoripakettien vaihekapasitanssit ja verkon jännitteet. Saatko laskennallisesti maasulkuvirran ja nolajännitteen arvoksi suunnilleen samat, mitä mittausten perusteella?

Laske myös, tuleeko mitatun summavirran perusteella maasulkuvirran arvoksi sama, kuin viallisen vaiheen yleismittarin näyttämä heti suojaerotusmuuntajan jälkeen? Mistä mahdollinen ero laskennan ja yleismittarin näyttämän välillä voisi johtua?

LÄHTEET

.JJ/KA. (18. 10. 1974). Asennus- ja käyttöohje. *Katkaisijoiden OSAM, OSAN ja OSAO asennus- ja käyttöohje*. Helsinki: Oy Strömberg Ab.

Koiranen, A. (3. 6. 1987). Käyttöohje. *Johdonsuoja SPAA 322C*. Helsinki: Strömberg Oy.

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

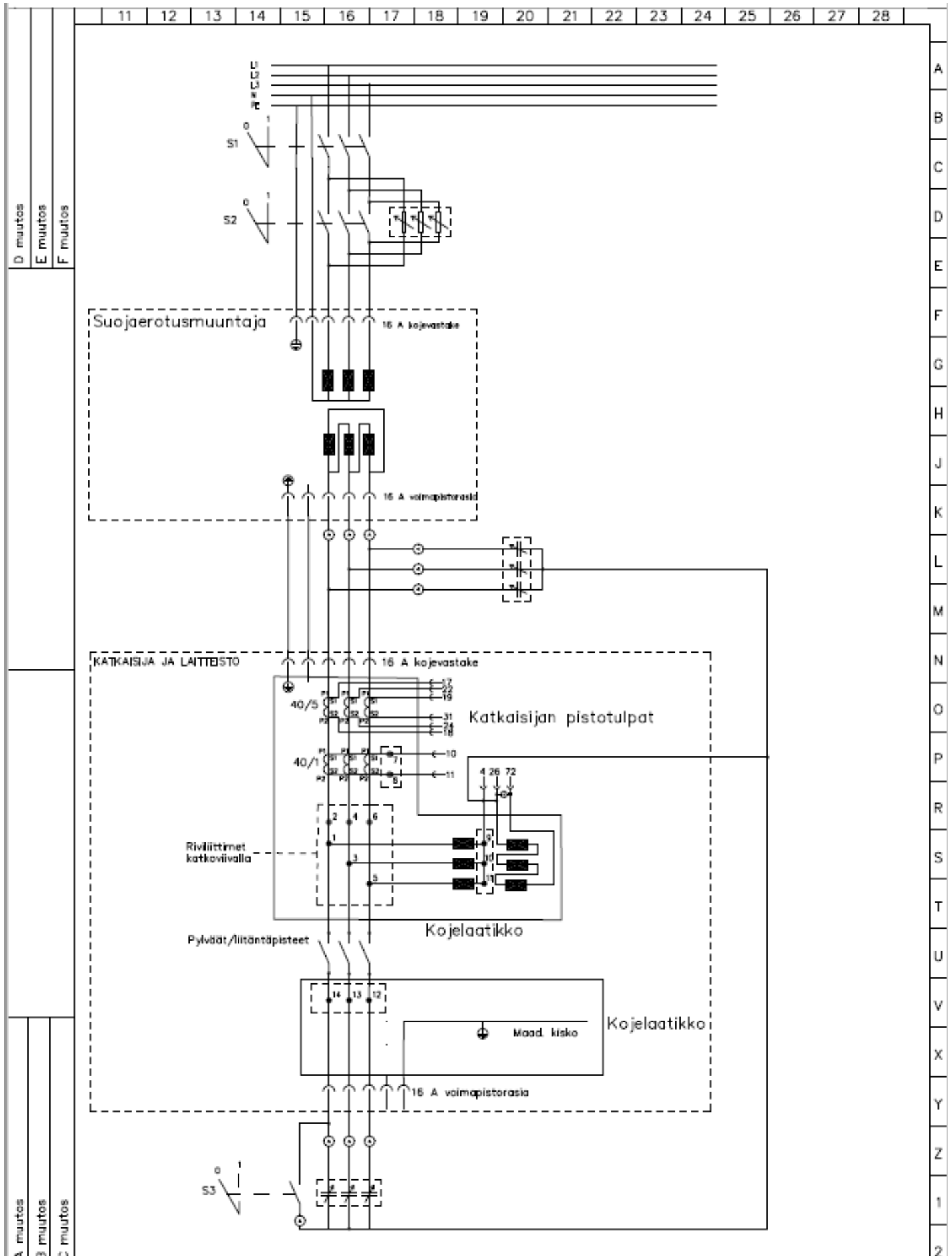
Putkonen, S.; & Räsänen, O. (19. 8. 2015). SPAA 322C liittimet. Kuopio.

Putkonen, S.; & Räsänen, O. (28. 7. 2015). Etupaneelin liittimet. Kuopio.

Putkonen, S.; & Räsänen, O. (19. 8. 2015). Katkaisijan liittimet. Kuopio.

Räsänen, O. (10. 10. 2016). Pääkaavio. Kuopio.

LIITE 1: PÄÄKAAVIO



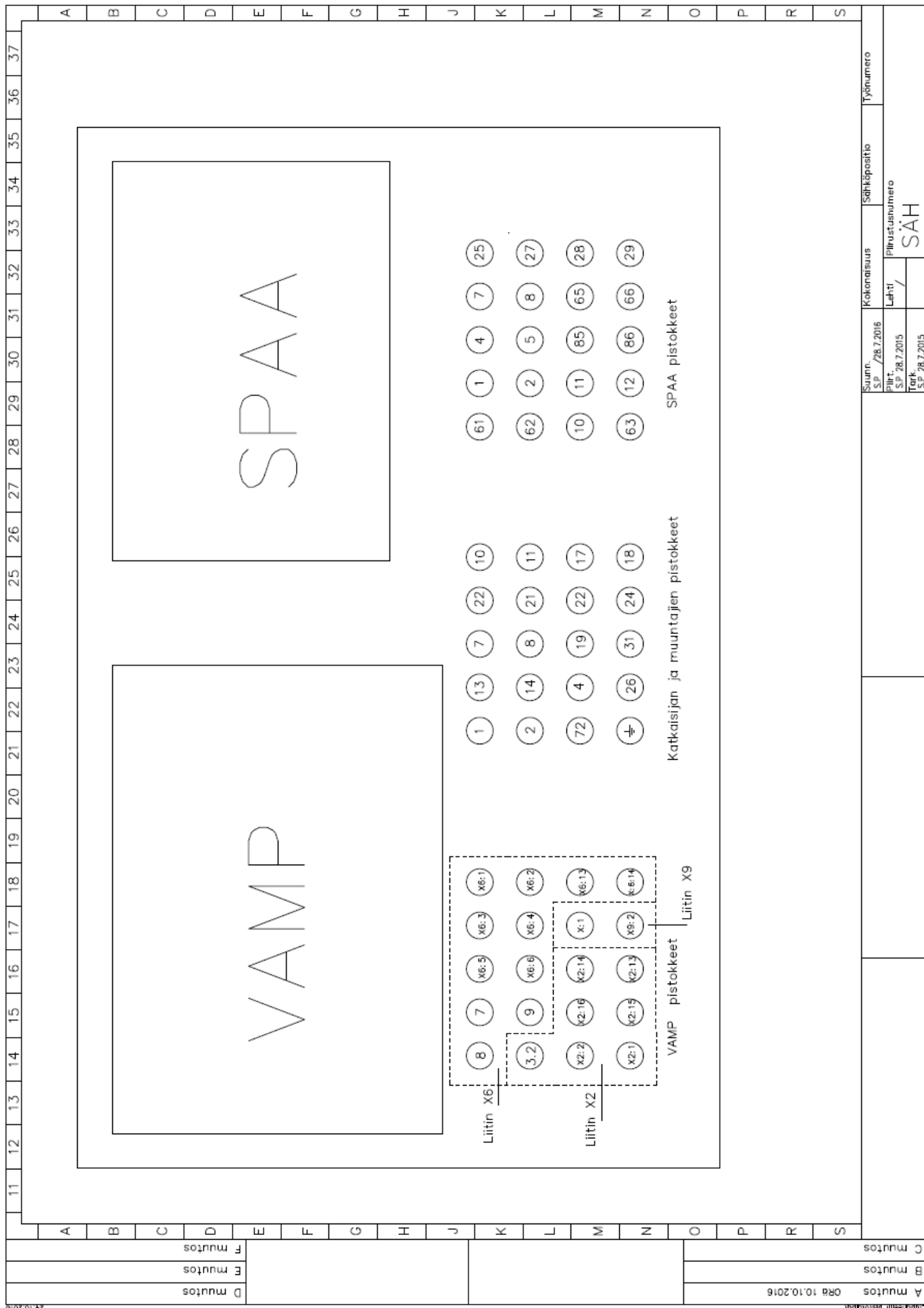
D muutos
E muutos
F muutos

A muutos
B muutos
C muutos

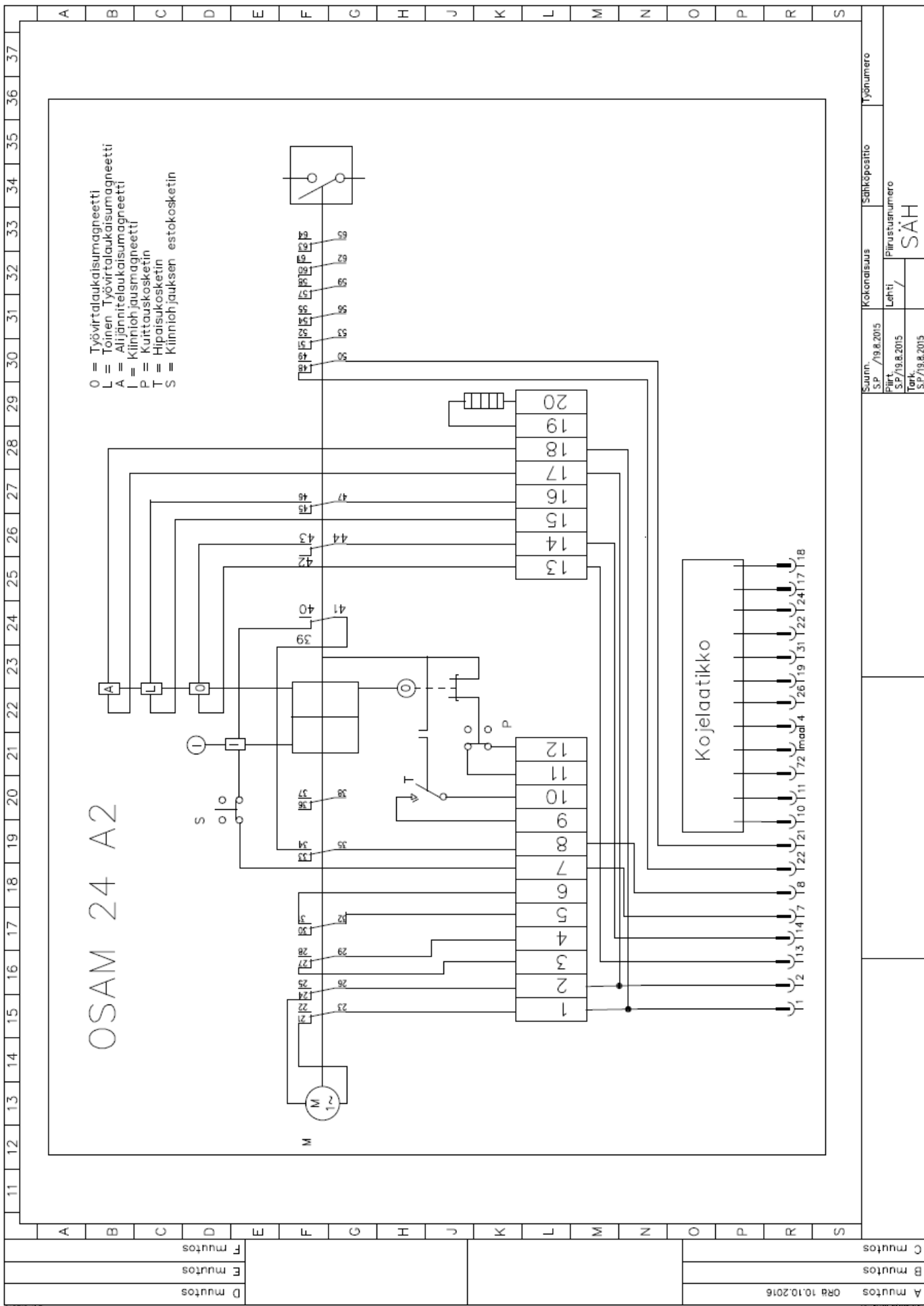
PÄÄKAAVIO
Maasulun simulointi

Suunn. ORR /24.10.2016	Kokonaisuus	Sähköpostio	Työnumero
Piirt. ORR /24.10.2016	Lehti 1/1	Piirustusnumero	
Tark. ORR /24.10.2016	SÄH		

LIITE 2: ETUPANEELIN LIITTIMET

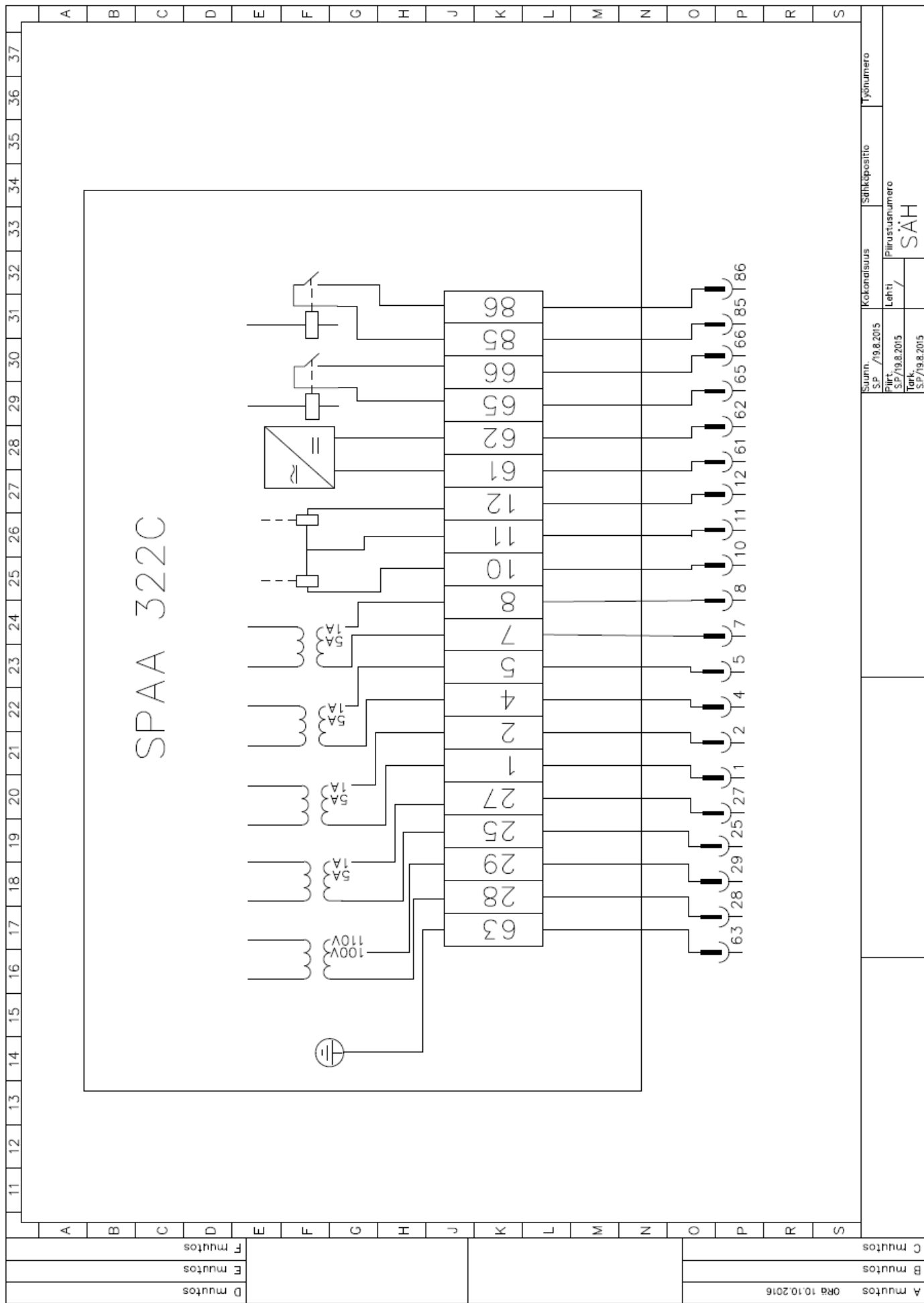


LIITE 3: KATKAISIJAN LIITTIMET



A muutokset	ORR 10.10.2016	D muutokset	
B muutokset		E muutokset	
C muutokset		F muutokset	
Suunn. SP /19.8.2015		Kokonaisuus	
Pirtt. SP/19.8.2015		Sähköposito	
Tarkk. SP/19.8.2015		Lehti	
		Pirustusnumero	
		SÄH	
		Työnnumero	

LIITE 4: SPAA 322C LIITTIMET



A muutokset	ORA 10.10.2016
B muutokset	
C muutokset	

Suunn. S.P./19.8.2015										Kokonaissuus										Sähköpostio										Työnnumero									
Piirt. S.P./19.8.2015										Lehti /										Piiustusnumero										SÄH									
Tark. S.P./19.8.2015																																							