



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Rami Kalevi Isomäki

SAMMUTETUN KESKIJÄNNITEVER-
KON KOMPENSOINTILAITTEISTON
LISÄVASTUKSEN OHJAUS

Tekniikka ja liikenne

2010

ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan osaston valvotuna Vaasa Engineering Oy:n Sähköistyksen ja Käytöt -yksikölle. Päättötyön aiheesta ja ohjauksesta ovat Vaasa Engineering Oy:n puolesta vastanneet suunnittelupäällikkö Ralf Söderholm ja projekti-insinööri Ari Pätsi. Vaasan ammattikorkeakoulun puolesta ohjauksesta on vastannut tekniikan yliopettaja Olavi Mäkinen. Edellä mainitut henkilöt ovat olleet vaikuttamassa opinnäytetyöni onnistumiseen ja siksi haluan osoittaa heille kiitoksen suuresta avusta. Haluan myös kiittää sähköyhtiöiden ja yritysten edustajia haastatteluista, joita olen suorittanut opinnäytetyöni yhteydessä.

Vaasassa 24.5.2010

Rami Isomäki

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Rami Isomäki
Opinnäytetyön nimi	Sammutetun keskijänniteverkon kompensointilaitteiston lisävastuksen ohjaus
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	79
Ohjaaja	Olavi Mäkinen

Opinnäytetyössä on tutkittu sammutuslaitteiston lisävastuksen ohjaustapoja ja selvitetty perusteita eri tavoille. Työ helpottaa ymmärtämään jakeluverkossa tapahtuvia ilmiöitä maasulun aikana ja niiden vaikutuksia eri vastuksen ohjaustapojen valintaan.

Työn toteuttamiseen on käytetty kirjallista lähdemateriaalia, eri henkilöiden haastatteluja ja PSCAD -nimistä ohjelmaa on käytetty maasulkuilmiöiden havainnollistamiseen. Kirjallinen materiaali koostuu sammutettuun jakeluverkkoon liittyvästä kirjallisuudesta ja laitevalmistajien manuaaleista. Haastattelut on suoritettu eri sähköyhtiöissä ja yrityksissä, joiden toiminta on keskittynyt sammutettuihin keskijänniteverkkoihin. PSCAD – ohjelmalla on simuloitu työn kannalta tärkeitä ilmiöitä keskijänniteverkossa.

Opinnäytetyön tuloksena on dokumentti, johon on kerätty yleisimmät vastuksen ohjaustavat ja perusteet niiden käyttämiseen. Työssä on myös tutkittu verkon kompensoinnin vaikutusta jakeluverkon suojaustoimintoihin. Dokumenttia tullaan käyttämään tulevaisuudessa asiakkaiden opastamisessa.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Rami Isomäki
Title	The Control of a Shunt Resistor in a Compensation System in a Compensated Medium Voltage Distribution Network
Year	2010
Language	Finnish
Pages	79
Name of Supervisor	Olavi Mäkinen

This thesis researches the control of a shunt resistor in a compensation system. The purpose was to find out different ways to control the resistor and how different electrical distribution companies have come to different conclusions of controlling the resistor.

The research methods used were based on interviews, written publications and a simulation program called PSCAD. The written publications were general publications concerning earth fault compensation systems and manufacturers manuals. Employees in electrical distribution companies and in other companies whose business works around earth fault compensation were subjects for the interviews. PSCAD was a great help of showing effects which occur at earth fault in a medium voltage network.

The result of this thesis consists of a document that collects the most typical ways to control the shunt resistor and the reasons for why it is controlled in different ways. There was also a little research of how the compensating affects the relay protection in networks. In the future this thesis will be used as a guidebook to the customers.

Keywords Earth Fault Compensation, Shunt Resistor

OPINNÄYTETYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET

A	Ampeeri
C_0	Maakapasitanssi
F	Faradi
H	Henry
I	Virta
I_C	Kapasitiivinen virta
I_e	Maasulkuvirta
I_L	Induktiivinen virta
I_{VP}	Vikapaikan virta
I_0	Nollavirta
L	Induktanssi
R_f	Vikaresistanssi
R_0	Häviöresistanssi
U	Jännite
U_0	Nollajännite
V	Voltti
Ω	Ohmi

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
OPINNÄYTETYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET	5
1 JOHDANTO	9
1.1 Työn tarkoitus	9
1.2 Yhtiön esittely	9
2 MAASULKU	11
2.1 Maasulun määrittäminen	11
2.2 SFS 6001 -standardin vaatimukset maasululle	12
2.3 Maasta erotettu verkko	15
2.4 Maadoitettu verkko	18
2.5 Kompensoitu verkko	19
3 KOMPENSOINNIN TOTEUTTAMINEN	22
3.1 Sähkönlaadun kehittäminen	22
3.2 Laitteiston rakenne	23
3.2.1 Maadoitusmuuntaja	23
3.2.2 Kompensointikuristin	24
3.2.3 Automaattisäätäjä	25
3.2.4 Lisävastus	25
3.3 Kompensointilaitteiston suojaus	27
3.4 Kompensoinnin hyödyt ja haitat	28
4 LISÄVASTUKSEN OHJAUS	30
4.1 Lisävastuksen eri ohjausperiaatteet	30
4.2 Lisävastuksen ohjaustavat Ruotsissa	31
4.3 Tampereen sähköverkon sammutettu jakeluverkko	31
4.4 E.ON Kainuun sähköverkko	33
4.5 Vaasan sähköverkko	34
5 SAMMUTETUN VERKON RELESUOJAUSASETTELUT	36
5.1 $I_0 \cos \varphi$ -karakteristika	36

5.2	Kulmakarakteristika	37
5.3	Maasulkusuojauksen suunnittelun periaatteita	37
6	PSCAD – SIMULOINTI KOMPENSOIDUSSA VERKOSSA	39
6.1	Mallinnettujen keskijänniteverkkojen tiedot.....	40
6.2	Simulointi maakaapeliverkossa	41
6.2.1	Kompensointilaitteiston viritys	41
6.2.2	Sammutuksen vaikutus palaavaan jännitteeseen.....	46
6.3	Täysin kompensoidun kaapeliverkon maasulku	48
6.3.1	Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä	48
6.3.2	Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä	49
6.3.3	Lisävastuksen poiskytketyminen maasulun syntyessä.....	50
6.3.4	5000 Ω :n maasulku täysin kompensoidussa verkossa	51
6.4	Alikompensoidun kaapeliverkon maasulku	53
6.4.1	Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä	54
6.4.2	Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä	54
6.4.3	5000 Ω :n maasulku alikompensoidussa verkossa.....	56
6.5	Ylikompensoidun kaapeliverkon maasulku	57
6.5.1	Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä	57
6.5.2	Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä	58
6.5.3	5000 Ω :n maasulku ylikompensoidussa verkossa.....	59
6.6	Simulointi sekaverkossa.....	60
6.7	Lisävastuksen vaikutus täysin kompensoidussa sekaverkossa	62
6.7.1	Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä	62
6.7.2	Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä	63
6.7.3	Lisävastuksen poiskytketyminen maasulun syntyessä.....	64
6.7.4	5000 Ω :n maasulku täysin kompensoidussa sekaverkossa	65
6.8	Alikompensoidun sekaverkon maasulku	66
6.8.1	Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä	67
6.8.2	Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä	68
6.8.3	Lisävastuksen poiskytketyminen maasulun syntyessä.....	69
6.8.4	5000 Ω :n maasulku alikompensoidussa sekaverkossa.....	69
6.9	Simulointi vinoviritetyssä sekaverkossa	71

6.9.1	Ylikompensoitu verkko.....	71
6.9.2	Alikompensoitu verkko.....	73
7	YHTEENVETO	76
	LÄHTEET.....	78

1 JOHDANTO

1.1 Työn tarkoitus

Maasulut aiheuttavat eniten keskeytyksiä sähkönjakeluverkoissa. Jakeluverkot halutaan entistä varmemmiksi ja täten käyttökeskeytysten määrää pienemmiksi. Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus tarkastella sammutetussa jakeluverkossa jäännösvirran kasvattamiseen käytettävää lisävastusta. Työ keskittyy vastuksen ajoperiaatteisiin ja ohjaukseen.

Kyseinen työ lähti liikkeelle Vaasa Engineering Oy:n Käytöt ja Sähköistyksen yksikössä syntyneestä tarpeesta saada selville eri sähköyhtiöiden tavat ohjata lisävastusta. Yksikössä on havaittu eroavaisuuksia eri sähköyhtiöiden kesken. Tässä työssä onkin tarkoituksena selvittää kyseisiä eroavaisuuksia ja syitä niihin.

1.2 Yhtiön esittely

Vaasa Engineering Oy perustettiin 6.12.1989. Vaasa Engineering – konsernin muodostaa emoyhtiö Vaasa Engineering Oy sekä tytäryhtiöt Vaasa Kojeistot Oy, Vaasa Service Oy, Vaasa Engineering Kiinteistöt Oy, Vaasa Engineering AS, Vaasa Engineering AB ja Wringley S.A. Konsernin palveluksessa on yli 400 henkilöä.

Vaasa Engineering Oy toimittaa automaatio- ja sähköistysratkaisuja energian tuotantoon, jakeluun, siirtoon ja käyttöön. Yritys toimii sekä kotimaassa että vientimarkkinoilla. Toimintaan kuuluu myös laitosten modernisoinnit, huollot ja sähkökojeistojen valmistukset. Vaasa Engineering Oy koostuu kolmesta liiketoimintayksiköstä: vesi- ja lämpövoimalaitokset, käytöt ja sähköistyksen sekä diesel- ja kaasumoottorilaitokset. Vesi- ja lämpövoimalaitokset -yksikkö toimittaa sähköistys- ja automatisointiratkaisuja pääosin uusiutuvia energialähteitä käyttäville voimalaitoksille. Diesel- ja kaasumoottorilaitokset -yksikkö toimittaa sähköistys- ja automatisointijärjestelmiä hajautetulle energiatuotannolle voimalamarkkinoille. Yksikkö toimittaa myös käyttöönottopalveluja ja varaosia diesel- ja kaasumoottorivoimalaitoksiin sekä laivaprojekteihin. Sähköistyksen ja Käytöt – yksikkö vastaa

sähköjakelun, prosessisähköistyksen, säädettyjen käyttöjen sekä VEKE 24 – keskijännitekojeistojen ja VEDA 5000 – pienjännitekeskusten osaamisesta. Sähköjakelun projektit ovat pieniä osaprojekteja tai avaimet käteen -periaatteella toimivia kokonaistoimituksia. Käyttöpuolen asiakkaat ovat raskaassa prosessiteollisuudessa, kuten paperin ja teräksen valmistuksessa.

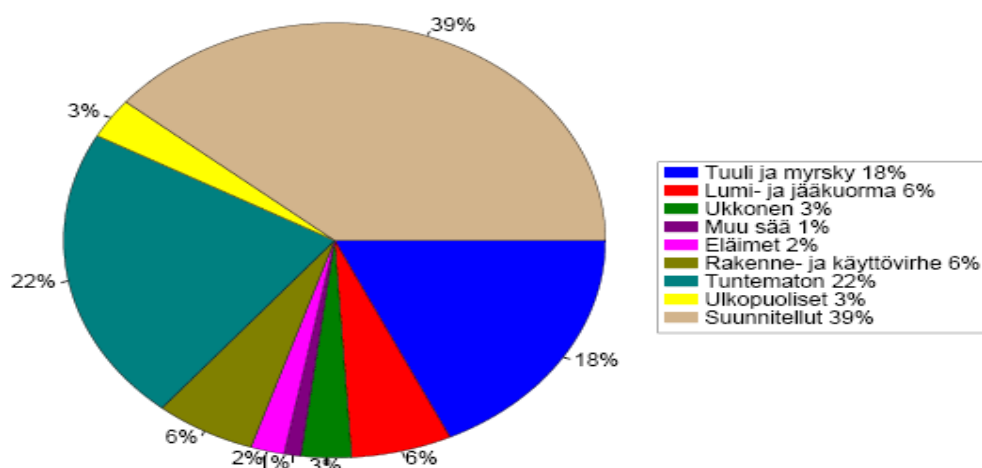
Yhtiön toimipaikat Suomessa sijaitsevat Vaasassa, Seinäjoella, Paimiossa ja Kuopiossa. Lisäksi VEO:lla on toimipaikat Ruotsissa, Norjassa ja Venäjällä. /20/

2 MAASULKU

2.1 Maasulun määrittely

Maasulku on sähköturvallisuusmääräyksissä määritelty käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi. Riippuen miten monessa verkon virtajohtimessa maasulku esiintyy, voi maasulku olla yksi- tai monivaiheinen. Mikäli monivaiheisen maasulun eristysviat sattuvat osumaan verkon samaan kohtaan siten, että vikapaikassa virtajohtimien välille syntyy johtava yhteys, kutsutaan tilannetta maaosulosulkuksi. Eristysvikojen osuessa verkossa eri kohtiin, jotka saattavat olla hyvinkin kaukana toisistaan, on tilanne tällöin kaksoismaasulku. Tällöin vikavirrat saattavat kasvaa jopa oikosulkuvirtojen tasolle. Suomessa keskijänniteverkot ovat joko maasta erotettu- ja tai sammutuskuristimen kautta maadoitettuja. Maasulusta aiheutuvia käyttökatkoksia voidaan pienentää maadoittamalla jakeluverkko sammutuskuristimen kautta.

Kuvassa 1 on esitetty keskeytykseen johtaneiden vikojen aiheuttajia. Suunnitellut keskeytykset aiheuttavat suurimman osan keskeytyksistä. Reilu viidesosa vian aiheuttajista jää hämärän peittoon. Diagrammin avulla voidaan todeta, että vikakeskeytyksistä noin puolet voi aiheutua maasulusta.



Kuva 1. Keskeytykseen johtaneiden vikojen aiheuttajat.

Jakeluverkon ollessa terveessä tilassa ovat sen vaihejännitteet maahan nähden symmetrisiä. Tämä tarkoittaa, että vaihejännitteiden summa on nolla jokaisella hetkellä. Myös maakapasitanssien kautta kulkevien varausvirtojen summa on nolla. Maasulun sattuessa kasvavat terveiden vaiheiden jännitteet ja varausvirrat, kun puolestaan viallisen vaiheen jännite sekä varausvirta pienenevät. Vaiheiden väliset jännitteet säilyvät ennallaan. Epäsymmetrian synnyttyä varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa varausvirrasta kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. Mikäli vikavastuksen arvo on nolla, on myös viallisen vaiheen jännite nolla ja tällöin terveiden vaiheiden jännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat maasulussa olevan verkon laajuus sekä johtojen maakapasitanssit. Avojohdot saavat aikaan maasulkuvirran, joka on suuruudeltaan noin 0,067A/km. Suurempien maakapasitanssien johdosta maakaapeleiden aiheuttamat maasulkuvirrat ovat kaapelityypistä riippuen 2,7 – 4 A/km. Maakaapeleiden kohdalla maakapasitanssien arvoihin vaikuttaa suuresti kaapeleiden rakenne.

Huolimatta maasulun aiheuttamasta keskijänniteverkon epäsymmetriasta on jakelumuuntajan toisipuolella eli pienjänniteverkossa olevat jännitteet normaalit, kun jakelumuuntajan ensiökäämit on kytketty kolmioon. Tällöin vikavirran arvo muodostuu niin pieneksi, ettei se aiheuta vahinkoa kotitalouksien kulutuslaitteille. Toisin sanoen jakeluverkon käyttö on periaatteessa mahdollista myös maasulun aikana. Suomessa maasulun aikaista verkon käyttöä rajoittaa liian korkeaksi muodostuvat kosketusjännitteet, jotka käytännössä estävät jakeluverkon käytön maasulun aikana. /1/ /3/ /9/ /14/

2.2 SFS 6001 -standardin vaatimukset maasululle

SFS 6001 -standardi antaa vaatimukset maadoitusjärjestelmälle siten, että järjestelmä on turvallinen kaikissa olosuhteissa ja että ihmisten turvallisuus on taattu kaikissa paikoissa, joissa henkilöillä on oikeus kulkea. Standardissa annetaan neljä vaatimusta, jotka kaikki maadoitusjärjestelmät tulee täyttää:

1. Riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys

2. Suurimman vikavirran kestävyys termisesti
3. Omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
4. Maasulun aikana maadoituksen läpi kulkeva suurin mahdollinen virta ei saa aiheuttaa henkilöturvallisuutta vaarantavia jännitteitä.

Maasulun satuttua, esimerkiksi muuntoasemalle, kulkee suojamaadoitusten kautta maasulkuvirta. Maadoitusresistanssin kautta kulkeva virta aiheuttaa jännitehäviön, jota kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Ihmisen joutuessa kosketukseen suojamaadoitettuun osaan maasulun aikana, vaikuttaa häneen kosketusjännite, joka voi korkeintaan saavuttaa maadoitusjännitteen suuruuden. Maadoituselektrodissa kulkeva maasulkuvirta aiheuttaa elektrodin ympäristöön maassa potentiaalienten. Tästä seuraa, että kahden jaloilla kosketeltavan kohdan välille maasulkupaikan läheisyydessä syntyy askeljännite. Kosketus- ja askeljännitteen kohottua liian suureksi, aiheuttavat ne hengenvaaraan maasulkukohdan ympäristössä. Kosketusjännitettä tai sen kestoajaa voidaan pienentää maadoituksia parantamalla, sammutuslaitteistoa käyttämällä tai käyttämällä hyväksi relesuojausta ja automaatiota.

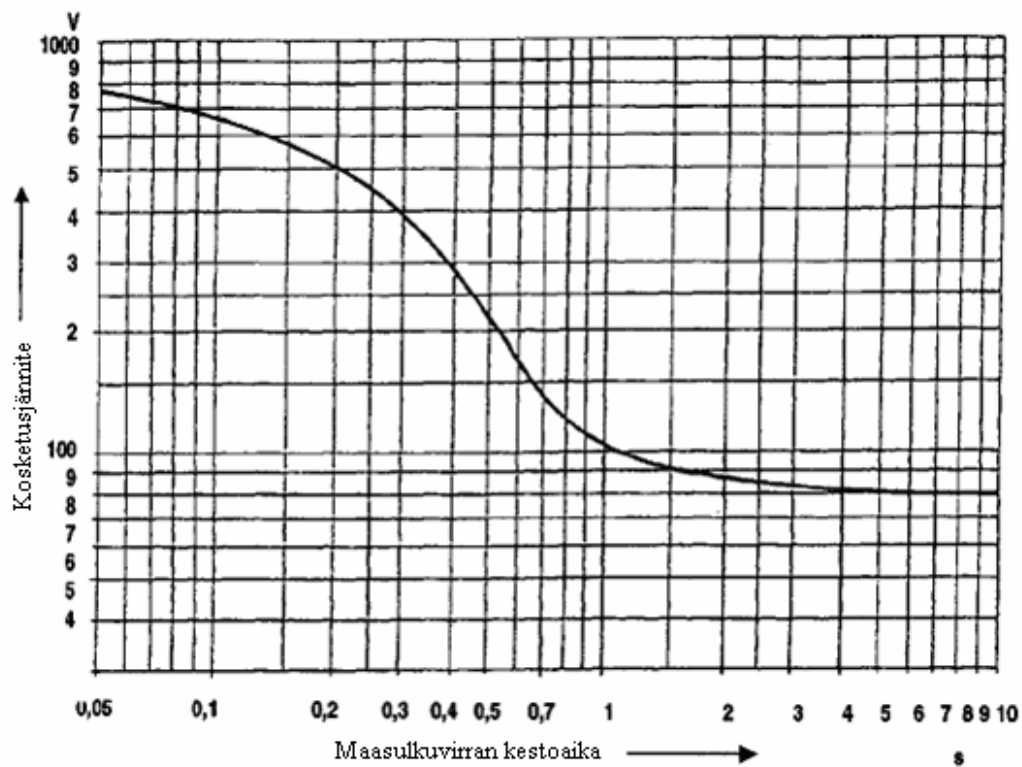
Verrattuna maadoitusjännitteeseen on kosketus- ja askeljännitteiden laskeminen hyvin hankalaa. Standardissa määritellään sallitut raja-arvot kosketusjännitteelle. Askeljännitteille ei ole välttämätöntä määritellä sallittuja arvoja. Askeljännitteiden sallitut arvot ovat kosketusjännitteen arvoja hieman suurempia. Mikäli maadoitusjärjestelmässä kosketusjännitteiden arvot toteutuvat, voidaan olettaa, että vaarallisia askeljännitteitä ei synny. Tunnetusti sähköiskun vaarallisuus riippuu sekä jännitteestä että virran kestoajasta. Mitä pidemmän aikaa virta ehtii vaikuttamaan sitä suuremman hengenvaaran virta aiheuttaa. Tämä on SFS 6001 – standardin lähtökohta. Sallittu kosketusjännite annetaan virran kestoajan funktiona kuvan 2 mukaisesti. Mikäli virran kestoajaksi on paljon pidempi kuin 10 sekuntia, voidaan kosketusjännitteelle käyttää arvoa 75V. Standardin mukaan kosketusjännite pysyy turvallisena, jos seuraavista ehdoista toinen toteutuu:

- ✓ Asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Tällainen tilanne useasti toteutuu laajojen teollisuusalueiden tonteilla.

- ✓ Mittauksilla tai laskemalla määritetty maadoitusjännite ei ole suurempi kuin sallitun kosketusjännitteen arvo **kaksinkertaisena**.

Mikäli kumpikaan yllä olevista ehdoista ei täyty, tulee toteuttaa standardin mukaiset erityistoimenpiteet M, jotka riippuvat maadoitusjännitteen suuruudesta ja vian kestoajasta. Erityistapauksissa, jotka standardissa määritellään, saa maadoitusjännite olla jopa nelin- ja viisinkertainen kosketusjännitteeseen verrattuna.

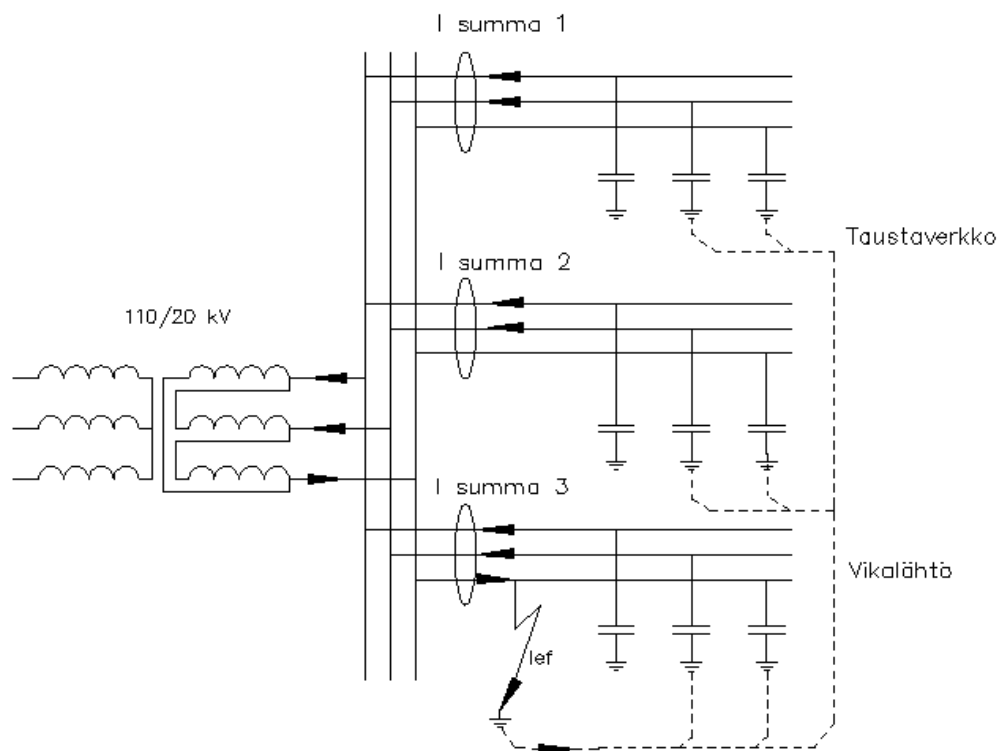
SFS 6001 -standardi määrittelee, että hyvin pitkäaikaista ja jatkuvaa kosketusjännitettä ei pääse syntymään, kun jokainen maasulku kytketään pois käsin tai automaattisesti. Yleisesti tulee käyttää maasulun automaattista poiskytkentää. Tapauksissa, joissa verkon käytön kannalta ei ole suotavaa käyttää automaattista poiskytkentää, voidaan käyttää maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää. Tällaisissa tapauksissa verkon rakenne tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkkoa saa käyttää maasulussa korkeintaan kahden tunnin ajan, jos voidaan todeta, että maasulusta ei aiheudu vaaraa ihmisille, omaisuudelle tai häiriöitä muille laitteille. Verkon käyttöä voidaan jatkaa maasulun aikana yli kahden tunnin, jos maasulku on paikannettu ja ollaan varmoja, että maasulusta ei aiheudu vaaraa. Maasulun sijaitessa jakelumuuntamalla, joka ei ole osaa laajaa maadoitusjärjestelmää, ei käyttöä saa verkossa jatkaa. Pitkäkestoisessa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa korkeintaan olla 150V, jolloin kosketusjännitteen suurin sallittu arvo on 75V.



Kuva 2. Sallittu kosketusjännite maasulkuvirran kestoajan funktiona./16/

2.3 Maasta erotettu verkko

Maasta erotetussa verkosta puuttuu kokonaan johtava yhteys maahan. Kyseisessä verkossa vaihejohtimen jouduttua suoraan tai vikaimpedanssin kautta yhteyteen maan kanssa, sulkeutuu vikavirtapiiri verkon terveiden johtimien ja maakapasitanssien kautta kuvan 3 mukaisesti. Jotta suojaus voidaan toteuttaa selektiivisesti releillä, pitää johtolähdöllä olla taustaverkko, jotta summavirtamittaus voidaan toteuttaa luotettavasti. Maasulkuvirran suuruus määräytyy maakapasitansseista. Maasulkuvirta, joka on suuruudeltaan 1-200A, on erittäin pieni verrattuna oikosulkuvirtaan.

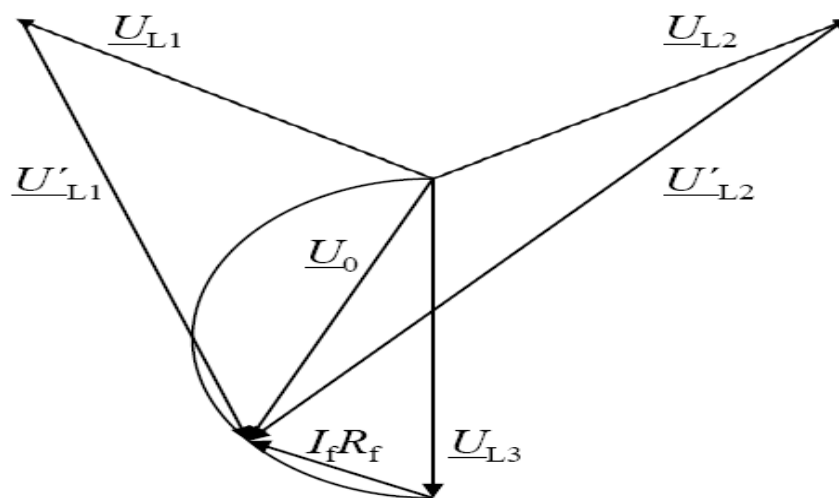


Kuva 3. Maasta erotetun verkon maasulkutilanne.

Maasta erotetussa järjestelmässä maasulun sattuessa verkon tähtipisteen jännite nousee maata vasten vikaresistanssista riippuen lähelle vaihejännitettä. Tätä tähtipisteen potentiaalipoikkeamaa kutsutaan nollajännitteeksi. Nollajännitettä voidaan mitata niin sanotulla avokolmiomittauksella, jossa jännitemuuntajien toisiokäämit kytkettynä sarjaan antaa nollajännitteeseen verrannollisen jännitteen. Avokolmiomittaus kykenee siis ilmoittamaan onko verkossa maasulku, mutta ei paikantamaan sitä. Summavirtamittauksella voidaan havaita jokaisessa johtolähdössä kulkeva maasulkuvirta. Kuitenkaan pelkän summavirtamittauksen avulla ei voida paikallistaa vikapaikkaa täydellä varmuudella. Erityisesti silloin, kun johtolähtöjen pituudet poikkeavat suuresti toisistaan ja vikakohdan resistanssi on suuri. Jotta johtolähtö saadaan suojattua edellisen lauseen tilanteissa, on käytettävä maasulun suuntarelettä. Maasta erotetuissa verkoissa on käytössä maasulkuvirran kapasitiivisen suunnan mittaukseen perustuva suuntarele.

Maasta erotetun verkon käyttöön on Suomessa selvä peruste. Maaperä johtaa pääsääntöisesti melko huonosti. Suojamaadoitukset jakelumuuntamoilla ja erotinasemilla sekä pienjänniteverkon käyttömaadoituksia on hankala saada pieniksi. Maasulkuvirta muodostuu pieneksi maasta erotetussa verkossa, mistä johtuen maadoitusjännitteet saadaan helpommin pidettyä sähköturvallisuusmääräysten vaatimina.

Kuvassa 4 on osoitettu miten jännitteiden osoittimet käyttäytyvät maasulkutilanteessa. Nollajännitteen osoitin U_0 piirtää vikaresistanssin funktiona puoliympyrän. Mitä pienempi vikaresistanssi on, sitä lähemmäksi vaihejännitteen suuruutta nollajännite siirtyy. Täysin vikaresistanssittomassa maasulussa nollajännite saavuttaa vaihejännitteen suuruuden. Vikaantuneen vaiheen jännite (tässä kuvassa U_{L3}) täydessä maasulussa tippuu nolnaan. Maasulku vaikuttaa myös terveisiin jännitteisiin U_{L1} ja U_{L2} . Ne nousevat pääjännitteen suuruiseksi täysin vikaresistanssittomassa maasulussa.



Kuva 4. Jännitteiden osoittimet yksivaiheisessa maasulussa maasta erotetussa verkossa.

Maasta erotetussa verkossa tulee käyttää suuntarelettä maasulun paikannukseen. Tässä tapauksessa suuntarele käyttää hyväkseen joko maasulkuvirran kapasitiivisen komponentin suunnan mittausta, mikä tunnetaan nimellä $I \sin \varphi$ – kytkentä tai suuntarele voi toimia niin sanotun kulmakriteerin perusteella. $I \sin \varphi$ – kytkennässä

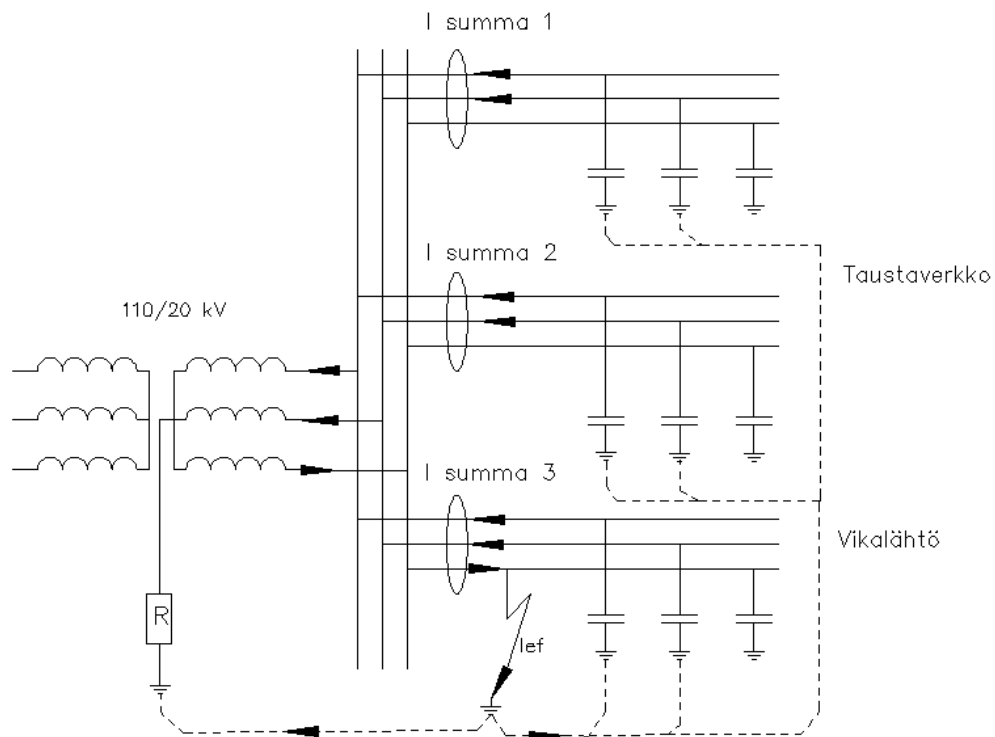
rele havahtuu, kun nollavirta ja nollajännite ylittävät releeseen asetellut arvonsa sekä nollavirran ja nollajännitteen osoittimet muodostavat tarpeeksi suuren vaiheeron. Kulmakarakteristikan perusteella toimiva rele mittaa niin ikään nollavirtaa ja – jännitettä. Kyseinen rele tarkastelee myös vikälähdön summavirran suuntaa. /7/ /9/ /10/

2.4 Maadoitettu verkko

Käyttömaadoitetussa jakeluverkossa verkon tähtipiste maadoitetaan suoraan tai pienen impedanssin kautta kuvan 5 mukaisesti. Jos verkko on kovin suppea ja siten maakapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta ei ole tarpeeksi suuri, voidaan tähtipisteen maadoittamisella helposti kasvattaa maasulkuvirran suuruutta. Kyseisessä järjestelmässä yksivaiheinen maasulku maan kautta tähtipisteeseen muistuttaa oikosulkua. Vikaresistanssin ollessa pieni kasvaa maasulkuvirta suureksi. Suomessa 110 kV:n jakeluverkko on tunnetusti maadoitettu. Jotta maasulkuvirrat eivät nousisi hallitsemattoman suuriksi, ei verkkoa ole maadoitettu jokaisesta tähtipisteestään. Lisäksi 110 kV:n verkossa käytetään pieni-impedanssisia kuristimia maasulkuvirtojen hallitsemiseen. Maasulkuvirrat 110 kV:n verkossa ovat tyypillisesti suurusluokaltaan 1 - 5kA.

Käyttömaadoitetussa verkossa esiintyvät maasulut on laukaistava nopeasti pois. Suuret maasulkuvirrat saavat aikaan sen, että oikosulkusuoja saa aikaan katkaisijan toiminnan. Katkaisijan laukaisuun kuluu tässä tapauksessa aikaa muutamia kymmenesosasekunteja. Mikäli vikapaikan resistanssi muodostuu niin suureksi, ettei oikosulkusuoja enää toimi, on verkko suojattava myös erillisellä maasulkusuojalla. Näin voi esimerkiksi käydä silloin, kun hyvin kuiva puu jää makamaan vaihejohtimen ja maan välille. Tällaisissa tapauksissa verkon maasulkusuojana toimii nollavirtarele tai maasulun suuntarele.

Suomen kantaverkot (400 ja 220 kV) ovat tehollisesti maadoitettuja. Maasulkukerroin tulee tehollisissa verkoissa olla korkeintaan 1,4, muuten verkkoa ei katsota tehollisesti maadoitetuksi. Maasulkukerroin kuvaa vikahetken ja normaalitilan vaihejännitteiden suhdetta. /7/ /14/

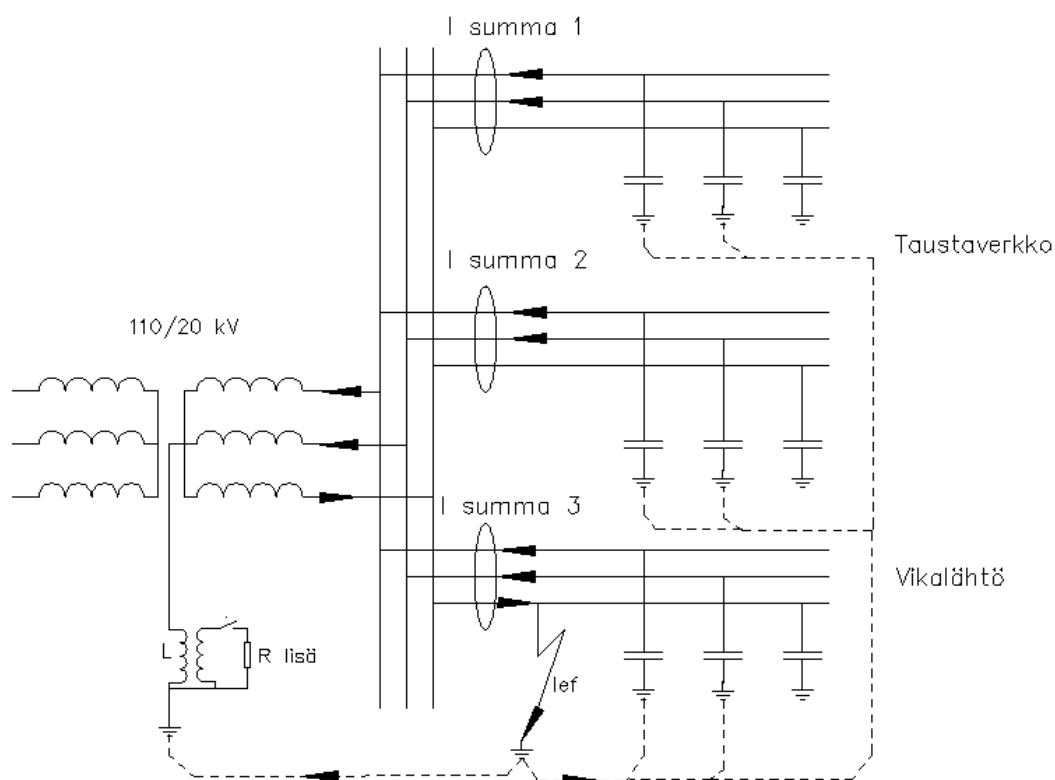


Kuva 5. Resistanssin kautta maadoitettu verkko.

2.5 Kompensoitu verkko

Kompensoidussa jakeluverkossa on yhteen tai useampaan muuntajan tähtipisteesseen kytketty kompensointikuristin kuvan 6 mukaisesti. Ajatuksena on, että kuristimen induktiivinen reaktanssi asetetaan siten, että se kompensoi jakeluverkon maakapasitanssien tuottaman kapasitiivisen loisvirran osittain tai kokonaan. Tällä tavalla saadaan maasulkuvirta pieneksi, koska induktiivinen ja kapasitiivinen virta ovat keskenään vastakkaisuuntaisia. Maasulun seurauksena syntynyt valokaari ei kykene palamaan kovin pitkään pienen maasulkuvirran takia ja tästä johtuen valokaari sammuu. Tästä tulevat nimitykset sammutettu verkko ja sammutuskuristin, joita myös yleisesti käytetään. Pienivirtaiset valokaaret saattavat sammua ilman sammutuskuristintakin. Sammutuskuristin pienentää myös maasulkuvirran suuruutta pysyvissä maasuluissa. Tämä mahdollistaa verkon tilapäisen käytön maasulun aikana.

Johtuen tehohäviöistä, jotka muodostuvat jakeluverkon ja kuristimen häviöistä, ei maasulkuvirta kompensoidu koskaan täydellisesti. Tällöin puhutaan yleensä jäännösvirrasta. Myös verkon yliaallot ja erityisesti viides yliaalto aiheuttaa järjestyksellään jäännösvirtaa. Kompensoidussa verkossa esiintyvä jäännösvirta on noin 3 – 15 % maasta erotetun verkon maasulkuvirrasta. Jäännösvirta jää suuruudeltaan niin pieneksi, ettei se aiheuta ongelmia sammutuksen suhteen. Toisaalta jakeluverkkoa ei tule käyttää täysin kompensoituna. Mikäli kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssit ovat yhtä suuret, saavuttaa nollajännite resonanssihuippunsa. Jos puolestaan jokin johtolähtö laukeaa verkosta, muuttuu verkko kohti täysin kompensoitua. Yleensä optimaalinen viritys sammutuslaitteistolle onkin hieman alikompensoituna.



Kuva 6. Kompensoitu keskijänniteverkko.

Keskijänniteverkon kompensointi voidaan toteuttaa kahdella eri periaatteella: keskitetyllä tai hajautetulla kompensoinnilla. Keskitetyssä ratkaisussa sähköase-

malle sijoitetaan yksi kompensointilaitteisto. Tämä ratkaisu on Suomessa yleisin. Mikäli sähköasemalla on kaksi päämuuntajaa ja ne molemmat syöttävät omaa verkkoa, voidaan säästää kustannuksissa käyttämällä molemmille verkoille yhteistä kompensointilaitteistoa. Kompensointikuristin tulee varustaa säädöllä, jotta sen oikea toiminta varmistetaan jokaisessa verkon kytkentätilanteessa.

Hajautettu kompensointi toteutetaan siten, että verkon eri johtolähdöille asennetaan kiinteitä kompensointikuristimia. Jokainen kuristin siis kompensoi oman johtolähtönsä kapasitiivisen maasulkuvirran. Hajautetun verkon etuna on, että säädetäviä kuristimia tai resonanssisäätäjiä ei tarvita. Mikäli jokin johtolähtö kytketään irti verkosta, kytkeytyy myös kompensointikuristin irti verkosta. Kytkeytyneeksi jäävässä verkossa kompensointi säilyy täten oikeana. /9/ /11/ /14/

3 KOMPENSOINNIN TOTEUTTAMINEN

3.1 Sähkönlaadun kehittäminen

Sähkönjakelun varmuutta parannettaessa tulee aina muistaa, että täysin luotettavaa jakeluverkkoa ei ole mahdollista rakentaa. Tämä ei olisi myöskään taloudellisesti järkevää. Tästä syystä tietty määrä käyttökeskeytyksiä tulee aina hyväksyä. Sähkömarkkinalain 9 §:ssä annetaan määräyksiä jakeluverkon haltijalle koskien kehittämisvelvollisuutta. Velvollisuus edellyttää, että verkkoa ylläpidetään, käytetään ja kehitetään kohtuullisten tarpeiden mukaisesti sekä turvataan riittävän laadukas sähkön saanti asiakkaalle. Tarpeeksi hyvälaatuinen sähkö tarkoittaa, että verkonhaltija pitää jakeluverkon käyttövarmuuden yleisesti hyväksytyllä tasolla. 27 §:ssä säädetään tarkemmin koskien sähkön laatua ja sallittujen sähkökatkokkien pituuksia.

Avojohtoisissa keskijänniteverkoissa noin 90 % vioista on lyhytkestoisia ohimeneviä vikoja. Näiden selvittämiseen käytetään releiden pikajälleenkytkentä (pjk) ja aikajälleenkytkentä (ajk) ominaisuuksia. Pjk:t selvittävät vioista noin 75 %. Ajk:t selvittävät puolestaan noin 15 % vioista, kun loput vioista vaativat muita toimenpiteitä niiden poistamiseksi. Vioittunut verkon osa pyritään paikantamaan ja erottamaan muusta verkosta mahdollisimman nopeasti. Koska pikajälleenkytkennät aiheuttavat suurimman osan lyhyistä käyttökeskeytyksistä, kannattaa sähköyhtiön panostaa niiden vähentämiseen. Suomen keskijänniteverkossa pjk:n jännitteetön aika on yleensä 0,3 s. Vaikka keskeytysaika ei ole pitkä ja pjk:n avulla voidaan ehkäistä pitempi sähkökatkos, saattaa katkos olla harmillinen, koska esimerkiksi nykypäivän elektroniikka on melko herkkä lyhyillekin käyttökatkoksille.

Yleispätevää keinoa pikajälleenkytkentöjen vähentämiseksi on mahdotonta sanoa. Kuitenkin Senerin tekemän tilastojen pohjalta voidaan huomata, kuinka maasulun kompensoinnilla saavutetaan huomattava pikajälleenkytkentöjen väheneminen. Jakeluverkko, jonka kompensointiaste on 70 % (alikompensoitu verkko) vähentää pjk:jen määrää 50 %. Täysin kompensoitu verkko automaattisäätäjällä saattaa jopa vähentää pjk:jen määrää 80 – 90 %. Kompensoinnilla saavutettava nopea maasulkuvalokaaren sammuminen vähentää myös oikosulkuriskiä. Pjk:ta ei voida koko-

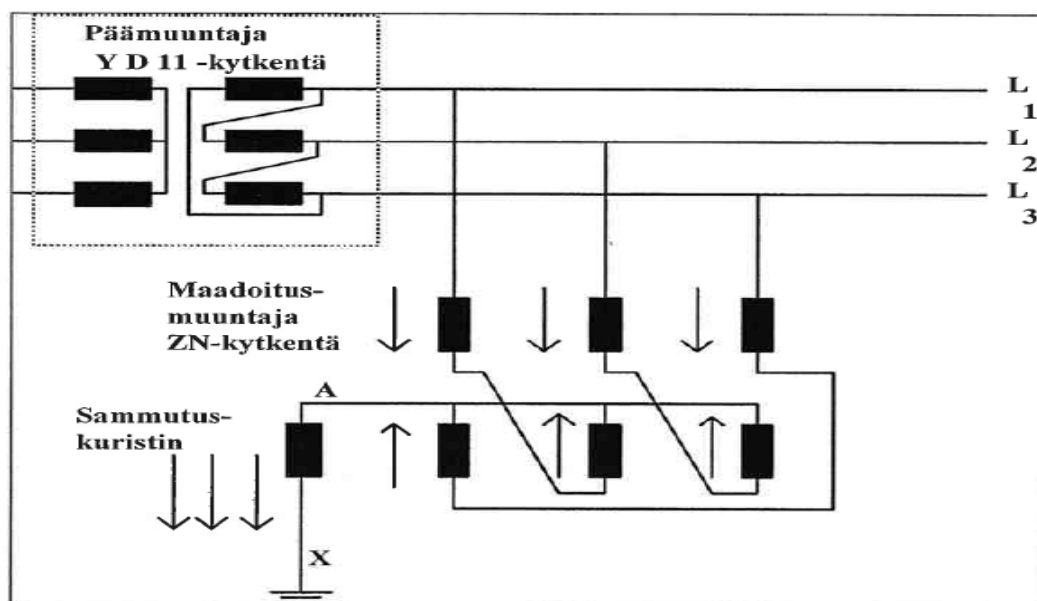
naan poistaa kompensoinnillakaan, koska esimerkiksi salamanisku aiheuttaa lähes aina oikosulun. Kompensointilaitteiston kompensointiasteella on tutkimusten mukaan merkittävä vaikutus siihen, miten hyvin maasulkuvalokaari sammuu. Tästä johtuen on tärkeää, että kompensointilaitteisto on viritetty optimaaliseksi verkon olosuhteisiin nähden. Muita tapoja vähentää pjk:n määrää on esimerkiksi lisätä maakaapeleiden määrää, käyttää päällysteisiä avojohtoja sekä huolehtia johdotkatujen raivauksista ja eläinsuojista. /2/ /4/

3.2 Laitteiston rakenne

3.2.1 Maadoitusmuuntaja

Suomessa on varsin yleistä, että 110/20 kV:n muuntajat ovat kytkentäryhmältään YNd11. Tämä tarkoittaa, että muuntajan toision ollessa kolmioon kytkettynä, puuttuu tähtipiste kokonaan ja kompensointikuristinta ei voida asentaa. YNyn0 kytkentäiset muuntajat ratkaisisivat tämän ongelman, mutta tällaisia muuntajia ei olisi mahdollista käyttää rinnan YNd11 -kytkentäryhmien muuntajien kanssa. Keinotekoinen tähtipiste YNd11-kytkentäisestä muuntajasta saadaan ZN-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla. Maadoitusmuuntajan kytkentä kompensoituun verkkoon on esitetty kuvassa 7. Itse rakenteeltaan maadoitusmuuntaja on aivan tavanomaisen jännitemuuntajan kaltainen. Maadoitusmuuntaja eroaa ainoastaan nollapisteen ulosotolla. Maadoitusmuuntajan nimellisvirta mitoitetaan niin, että se on 1/3 kuristimen nimellisvirrasta. Tällöin muuntajan ja kuristimen tehot ovat yhtä suuret.

Maadoitusmuuntaja varustetaan hyvin yleisesti omakäyttökäämillä. Tällä tavalla voidaan kätevästi välttää omakäyttömuuntajan hankintaa. Sähköasemalla säästetään myös yksi lähtökenttä maadoitusmuuntajan omakäyttökäämin ansiosta. Muuntajan tähtipisteen ja kuristimen väliin sijoitetaan erotin. Erottimen avulla kuristinta voidaan huoltaa ilman, että sähköasemalta katkeaa omakäyttöjännite. Tällöin erottimen asennosta tulee tulla apukosketintieto suuntareille. Sammutuskuristimen ollessa verkkoon kytkettynä, mittaa rele maasulkuvirran pätökomponenttia ($I_0 \cos \varphi$). Kun jakeluverkko on maasta erotettu, mittaa rele maasulkuvirran loiskomponenttia ($I_0 \sin \varphi$).



Kuva 7. Maadoitusmuuntajan ja kompensointikuristimen kytkentä. /11/ /12/ /18/

3.2.2 Kompensointikuristin

Kuristimet ovat rakenteeltaan rautasydämissä ja öljyjäähdytteisiä. Nykyään lähes kaikki kuristimet ovat jatkuvasääteisiä, koska ne toimivat kaikkein parhaiten verkon kytkentätilanteiden muuttuessa. Kompensoitavaa maasulkuvirtaa säädetään kuristimen induktanssia muuttamalla. Upposydämissä kuristimissa rautasydämen ilmarakoa voidaan ohjata automaattisäätäjän avulla. Rautasydämet ovat kiinni samassa epämagneettisesta aineesta tehdystä akselissa, joka on kierteistetty. Akseli pyörii moottorin avulla, jota automaattisäädin säätelee verkon olosuhteiden mukaisesti. Induktanssi muuttuu, kun rautasydämien etäisyyttä eli ilmapäliä muutetaan. Jatkuvasäätetyn kuristimen virransäätöalue on 10 – 100 %. Edelleen markkinoilla saatavissa olevia liukusydamisiä kuristimia voidaan säätää välillä 25 – 100 %. Heikomman säätöalueen ja yksinkertaisemman rakenteen johdosta ovat liukusydamiset kuristimet halvempia kuin jatkuvasäätetyt.

VEO:lla yleisesti käytettävä Swedish Neutralin valmistama sammutuskuristin poikkeaa edellä mainituista. Kyseisessä kuristimessa on sydän rakenteeltaan kiinteä. Säätö tapahtuu portaittain lisäämällä tai vähentämällä kondensaattoreita pienjännitepuolella ja täten säätöalueeksi saadaan 15 – 100 %. Itse kuristin sijaitsee

hermeettisesti suljetussa ja huolto vapaassa tankissa. Kuristimeen voidaan myös lisätä jäännösvirtakompensointilaitteisto. /15/ /18/

3.2.3 Automaattisäätäjä

Maasulkuvirran kompensoinnin on sovelluttava jokaiseen verkon kytkentätilanteeseen. Tästä johtuen on kompensointi varustettava jatkuvalla säädöllä. Tässä asiayhteydessä puhutaan automaattisäätäjästä tai resonanssisäätäjästä. Toiminta perustuu verkon terveen tilan nollajännitteen seuraamiseen. Nollajännite saavuttaa suurimman arvon, kun kuristimen induktiivinen reaktanssi ja jakeluverkon maakapasitanssien reaktanssi ovat yhtä suuret. Voidaan sanoa, että kompensointikuristin, joka myös tunnetaan nimellä Petersenin kela, on viritetty, kun reaktanssit ovat yhtä suuret. Kun verkossa tapahtuu esimerkiksi johtolähdön irtautuminen, tapahtuu nollajännitteen muutoksen seurauksena resonanssikohdan muutos, jonka automaattisäätäjä myös huomaa. Mikäli muutos on säätäjään aseteltua rajaa suurempi, antaa säätäjä ohjauskäskyn kompensointikuristimen moottorille. Maasulun ollessa aktiivinen, ei säätäjä toimi kompensointikuristimen mahdollisen vaurioitumisen takia. Kuristin viritetään yleensä hieman alikompensoiduksi. Tällöin saadaan nollajännite pidettyä matalana. Johtolähtöjen laukeaminen alikompensoidussa verkossa vie kompensointia kohti täydellistä viritystä. Nykyaikaiset resonanssisäätäjät, kuten esimerkiksi laitavalmistajien Swedish Neutralin tai Trenchin laitteistot ovat täysin mikroprosessoripohjaisia. Eri laskentaparametrien avulla ne pystyvät hyvin tarkkaan kompensointilaitteiston säätöön.

Trench -laitevalmistaja ei itse ota kantaa tuleeko jakeluverkon olla ali- vai yli-kompensoitu. Laitevalmistajan kannan mukaan verkko voi olla täysin kompensoitu, mikäli terveen tilan U_0 -jännite pysyy 1 %:ssa. /11/ /15/ /17/ /18/

3.2.4 Lisävastus

1920-luvulla oli jo tiedossa, että kompensointikuristimen avulla voidaan pienentää maasulkuvirtaa ja täten maasulkuvalokaaren itsestään sammuminen on hyvin todennäköistä. Kuristin itsessään ei kuitenkaan pysty kompensoimaan kaikkea sitä virtaa, joka maasulussa esiintyy. Kuristin pystyy kompensoimaan kapasitiivisen

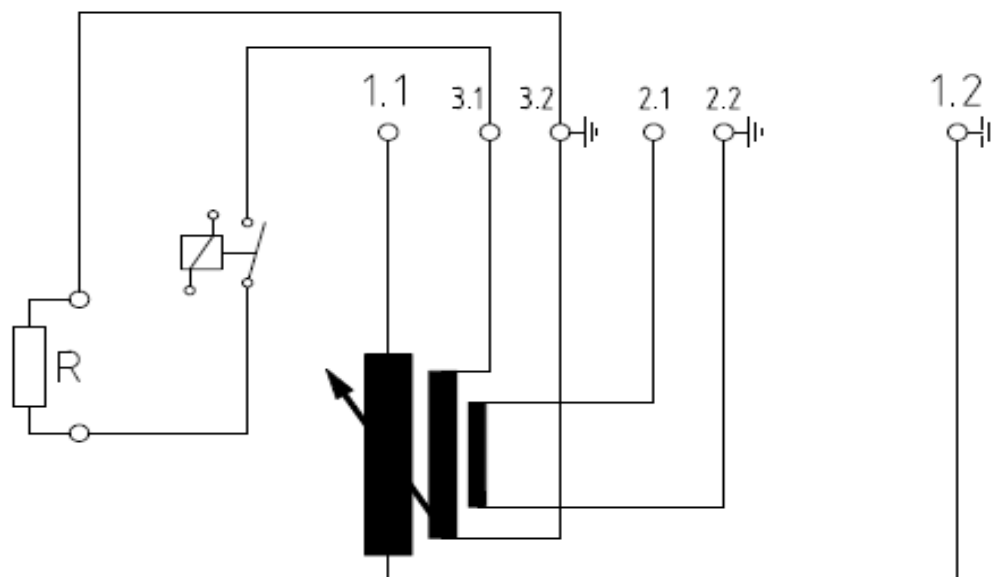
maasulkuvirran, mutta ei jäännösvirtaa, joka koostuu verkon häviöistä sekä kuristimen omista pätöhäviöistä. Tätä jäännösvirtaa käytetään hyväksi, kun pyritään selektiivisesti irrottamaan vikaantunut johtolähtö. Koska jäännösvirran suuruus riippuu monesti eri tekijästä, kuten verkon kytkentätilanteesta, säästä ja vikavastuksen suuruudesta, joudutaan jäännösvirtaa tietyissä vikatilanteissa keinotekoisesti suurentamaan, jotta releet laukaisisivat oikean johtolähdön irti verkosta. Teknisesti tämä toteutetaan siten, että kompensointikelan rinnalle sammutuslaitteiston tehokäämiin kytketään vastus, joka kasvattaa releen mittaamaa pätövirtaa.

Kokeet maasulkuvalokaaren sammumisesta osoittavat, että kompensoidussa verkossa valokaari sammuu muutamassa sadassa millisekunnissa, kun kipinäväli on 100 mm ja virta alle 20 A. Tämä rajavirta ei tietenkään ole ehdoton, koska valokaaren sammuminen johtuu monesta seikasta. Lisävastuksella on selvä vaikutus valokaaren sammumiseen. Koska vastus kasvattaa maasulkuvirtaa, on valokaarella huonommat olosuhteet sammumiseen. Vastuksen ollessa kytkettynä kasvaa palaava jännite vikapaikkaan nopeammin kuin ilman lisävastusta. Näin valokaaren jälleen syttyminen voi tapahtua herkemmin vastuksen ollessa päälle kytkettynä.

Verkon eri vaiheiden välinen kapasitanssiepäsymmetria aiheuttaa verkossa nollajännitteen. Nollajännite voi verkon terveessä tilassa kohota kymmeneen prosentteihin vaihejännitteestä. Terveessä tilassa nollajännite ei aiheuta ongelmia verkon toiminnassa. Suojareleet saattavat kuitenkin häiriintyä tästä nollajännitteestä ja aiheuttaa virhetoimintoja. Nollajännitettä voidaan terveessä tilassa pienentää lisävastuksen avulla. Niin suppeissa kuin laajoissa verkoissa, on vastuksen vaikutus nollajännitteen pienentämiseen merkittävä. Tällainen vastuksen käyttäminen edellyttää siis, että vastus on koko ajan kytkettynä. Tämä tulee tietenkin ottaa huomioon kun vastusta mitoitetaan käyttöolosuhteisiin.

Vastus kytketään normaalisti kuristimen tehoapukäämiin kuvan 8 mukaisesti pisteiden 3.1 ja 3.2 väliin. Trenchin sammutuslaitteistossa on yksi lisävastus, kun puolestaan Swedish Neutralilla on kaksi erillistä vastusta rinnan kytkettyinä. Kaksi rinnan kytkettyä vastusta antaa kolme eri vaihtoehtoa lisävastuksen ohmiarvolle. Vastuksen nimellisjännite on 500 V. Ohjaussignaalin vastus voi saada ku-

ristimen säätäjältä, kiskon U_0 -releeltä tai sitä voidaan ohjata käsin. Teholuokaltaan vastukset ovat 50 – 100 kW. Jopa 200 kW:n vastuksia voidaan käyttää joissakin sovelluksissa. Nimellisteholla vastusta voidaan käyttää joitain kymmeniä sekunteja ennen kuin vastus kuormittuu termisesti liikaa. Termisen ylikuormituksen estämiseksi vastus varustetaan ylikuormitussuojalla. Lisävastukset ovat kotelointiluokaltaan IP23, ja ne ovat ilma- tai öljyeristeisiä. /11//15//18/



Kuva 8. Lisävastuksen kytkentä kuristimen tehoapukäämiin.

3.3 Kompensointilaitteiston suojaus

Maadoitusmuuntaja on aivan tavanomainen muuntaja ja täten se tulee suojata aivan normaaliin tapaan. Kaasureleellä suojataan muuntajaa erilaisilta eristysvioilta. Lisäksi muuntaja varustetaan öljyn pinnan ja lämpötilan osoittimella. Osoittimet voidaan varustaa hälytyskoskettimilla. Itse sammutuslaitteisto suojataan ylivirtasuojalla ja katkaisijalla. Suunnattua maasulkusuojausta ei ole kovin järkipäristä toteuttaa, koska johtimen pituus muuntajan tähtipisteen ja kompensointilaitteiston välillä on ainoastaan kymmeniä metrejä.

3.4 Kompensoinnin hyödyt ja haitat

Päätarkoitus kompensoinnilla on pienentää maasulkuvirtaa ja täten saada kosketusjännitteet turvalliselle tasolle. Kompensoinnilla saavutetaan myös muita huomattavia etuja, joita muun muassa ovat:

- ✓ Avojohtoverkoissa esiintyvät valokaaret sammuvat itsestään jännitteen nollakohdan yhteydessä.
- ✓ Maasulkuvalokaaren sammuttua palaava jännite kasvaa hitaasti. Näin valokaaren uudelleen syttymisen riski vähenee huomattavasti.
- ✓ Pikajälleenkytkentöjen määrä vähenee jopa 90 %.
- ✓ Sähköasemilla sijaitsevien katkaisijoiden huollon tarve vähenee pikajälleenkytkentöjen vähenemisen myötä.
- ✓ Maasulkuvalokaaren aiheuttamat laite -, johdin-, ja eristinvauriot jäävät vähäisiksi.
- ✓ Yksivaiheisten maasulkujen kehittyminen oikosuluksi vähenee.
- ✓ Häätätapauksessa voidaan viallista johtoa käyttää. Suomessa maasulku saa esiintyä jakeluverkossa korkeintaan kahden tunnin ajan (SFS 6001 ehdot tulee täyttyä).

Kompensointi tuo mukanaan myös epäkohtia:

- ✓ Kompensoitu verkko on hankintakustannuksiltaan kalliimpi kuin maasta erotettu.
- ✓ Kuristimen käytön myötä vaatimukset maakapasitanssisymmetrialle kasvaa, koska muuten terveen tilan nollajännite saattaa kasvaa liian suureksi.
- ✓ Releistyksen ja selektiivisen suojauksen toteuttaminen on kompensoidussa verkossa jonkin verran vaikeampaa kuin maasta erotetussa verkossa. Hy-

vin suurivastuksinen maasulku voi aiheuttaa vaikeuksia vian paikantamiseen.

Mikroprosessipohjaisten automaattisäätäjien myötä ovat myös kompensoinnin epäkohdat vähentyneet. Jatkuva säätäjien sekä johdonsuojareleiden kehitys vahvistaa entisestään kompensoinnin tuomia hyötyjä. /12/ 15/

4 LISÄVASTUKSEN OHJAUS

Kompensointilaitteiston lisävastuksella on merkittävä asema maasulkusuojauksessa kompensoidussa verkossa. Kuitenkin lisävastuksen optimiohjaukseen ei ole yleisesti tunnettua menetelmää. Vaikuttaakin siltä, että eri sähköyhtiöt ohjaavat vastusta kokemusperäisten havaintojen mukaisesti. Jokainen löytää siis itse omaan verkkoon parhaiten sopivan ohjaustavan. Jakeluverkon rakenne tietysti vaikuttaa suuresti vastuksen ohjaukseen.

4.1 Lisävastuksen eri ohjausperiaatteet

Lisävastuksen ohjaus toteutetaan yleisesti kolmella eri periaatteella:

1. Vastus on kytkettynä verkkoon koko ajan. Ohjaustapa on helppo ja huoleton. Terveen tilan nollajännite pysyy paremmin hallinnassa ja täten pienennetään U_0 -varasuojauksen virheellistä laukaisua. Toisaalta kyseinen ohjaustapa häiritsee kompensoinnin perusajatusta. Kompensoinnissahan on tarkoitus, että valokaari sammuu itsestään ja näin vältetään jälleenkytkennöiltä. Mikäli vastusta pidetään päällä koko ajan, saavuttaa pätövirta aina suuremman arvon ja näin katkaisijatoiminnot ovat todennäköisempiä.
2. Vastus on poiskytkettynä verkon terveessä tilassa ja kytketään päälle viiveellä maasulun syntyessä. Täten annetaan maasulkuvalokaarelle mahdollisuus sammua itsestään. Tämä ohjausperiaate perustuu kompensoinnin varsinaiseen ideaan. Vastuksen ollessa poiskytkettyä terveen tilan aikana, saattaa nollajännite nousta melko korkealle riippuen verkon kompensointiasteesta ja kapasitanssiepäsymmetriasta.
3. Vastus on kytkettynä verkkoon koko ajan, lukuun ottamatta maasulun alun aikaista hetkeä. Tässä ohjausperiaatteessa on yhdistetty edellisten ohjausperiaatteiden edut: pienennetään terveen tilan nollajännitettä, mutta annetaan maasulkuvirralle mahdollisuus sammua itsestään maasulun synnyttyä. Lisävastuksesta otetaan kaikki hyöty irti tällä ohjaustoiminnolla.

4.2 Lisävastuksen ohjaustavat Ruotsissa

Ruotsissa on hyvin yleistä, että lisävastusta pidetään päällä koko ajan. Vielä 90 – luvun alkuun saakka oli hyvin yleistä, että vastus ohjattiin kiinni vasta maasulun syttyessä. Ruotsissa on kuitenkin määräys, että kaikki pieniresistanssiset maasulut tulee avojohtoverkosta poistaa 5 sekunnin aikana. Tästä johtuen on päädytty ratkaisuun, jossa vastus on päällä koko ajan. Täten varmistetaan, että vastus on varmasti päällä ja vikavirta nousee tarpeeksi suureksi, jotta selektiivinen maasulkusuojaus toimii. Vastuksen jatkuva päällä pitäminen pienentää samanaikaisesti verkon terveen tilan aikaista nollajännitettä. Vastuksen mitoituksessa tulee tietenkin ottaa huomioon jatkuva käyttö. Puhtaaseen kaapeliverkkoon ei Ruotsissa ole annettu määräyksiä siitä miten nopeasti vika tulee verkosta poistaa.

Esimerkiksi Uumajan energia ohjaa lisävastusta juuri edellisessä kappaleessa mainitulla tavalla. Heillä on keskitetty kompensointijärjestelmä, jossa jokaisessa nollapisteessä on 50 – 100 A suuri kompensointikuristin. Lisävastus on mitoitettu siten, että se antaa 5 A virtaa 10 kV:n jännitetasossa täydessä maasulussa. Jakeluverkko koostuu pääasiassa sekaverkosta. Varasuojana Uumajan energia käyttää U_0 -varasuojasta 10 kV:n puolella. /19/

4.3 Tampereen sähköverkon sammutettu jakeluverkko

Tampereen sähköverkko on Suomessa merkittävä sähköenergian toimittaja, joka toimii pääasiassa Tampereen kaupungin alueella. 110/20 kV:n sähköasemia on 11 kpl ja 20 kV:n johtolähtöjä on noin 120 kpl. 20 kV:n jakelujohtoja on yhteensä 925 km, josta maakaapelia on 55 %. Kaapelointi on luonnollisesti keskittynyt voimakkaasti keskustan alueelle. Avojohtoja puolestaan löytyy taajamista, mutta tulevaisuudessa on tarkoitus korvata kyseiset avojohdot mahdollisimman kattavasti maakaapeleilla. Jakeluverkko sisältää runsaasti paperieristeistä maakaapelia, joka viime vuosina on osoittanut vanhentumisen merkkejä.

Tampereen keskijänniteverkko on lähes kokonaan sammutettu. Ainoastaan terästehtaan syöttö tapahtuu maasta erotetussa verkossa. Tähän ratkaisuun on päädytty siitä syystä, että kyseinen terästehdas häiritsisi muuten liian paljon muuta verkkoa.

Ensimmäinen päämuuntaja Tampereelle hankittiin 1930-luvulla ja kompensointi on sähköverkossa ollut mukana alusta saakka. Tästä johtuen päämuuntajat ovat YNyn0 – kytkentäisiä, koska tällöin sammutuslaitteisto voidaan kytkeä suoraan toisioon nollapisteeseen. Haittapuolena tällaisissa muuntajissa on, että varayhteyksiä on vaikea toteuttaa, koska Suomessa päämuuntajat ovat yleisesti YNd11 – kytkentäisiä.

Sähköverkkoa käytetään normaalitilanteessa 2 % alikompensoituna. Ajatuksena on, että johtolähdön laukeamisen tapahduttua siirrytään kohti kokonaan kompensoitua verkkoa. Automaattista U_0 – varasuojasta ei ole toteutettu laisinkaan 20 kV:n verkossa, koska yhtiöllä on jatkuva kolmivuoroinen päivystys. Muutaman kerran vuoden aikana nollajännite nousee 100 %:iin ilman, että mikään johtolähtö laukeaa. Tällöin päivystyksen tehtävä on paikallistaa vika mahdollisimman nopeasti. Kompensointi toimii yleisesti erittäin hyvin verkossa ja pikajälleenkytkentöjen määrä vuodessa on ainoastaan 70 kpl. Aikajälleenkytkentää käytetään ainoastaan kahdella lähdöllä. Käyttöhenkilöstön mukaan aikajälleenkytkennöille ei ole tarvetta jatkuvan päivystyksen takia. Aikajälleenkytkennät toteutetaan käsin valvomohenkilöiden oman harkinnan mukaisesti

Kompensointi toteutetaan keskitetysti koko sähköverkon osalta. Verkon kompensointi koostuu usean eri yrityksen laitteista, koska kompensointia on rakennettu lisää ja kehitetty aina 1930-luvulta saakka. Uudet säätäjät kykenevät säätämään kompensointiasteen aina sopivaksi. Vanhat säätäjät puolestaan voivat alkaa heilua, mikäli nollajännite tippuu kovin matalaksi. Varsinkin kaapeliverkkojen symmetrisyys aiheuttaa ongelmia vanhoille säätäjille. Käyttöhenkilökunta saattaa joutua jopa säätämään käsin vanhoja säätäjiä. Ratkaisuna liialliselle symmetrisyydelle voidaan käyttää yksivaiheista kaapelia, jota asennetaan maahan muutama sata metriä.

Verkon terveessä tilassa lisävastus on pois kytkettynä. Käyttökokemusten perusteella lisävastuksen päälle pitämiseksi terveessä tilanteessa ei ole löytynyt perusteita. Nollajännite pysyy terveessä tilanteessa riittävän alhaalla nousten kesällä

korkeintaan 8 %:iin vaihejännitteestä, joten tämänkään takia ei ole tarvetta käyttää lisävastusta jatkuvasti päällä.

Kun nolajännite nousee 20 %:iin voidaan olettaa, että verkossa on maasulku. Tällöin vastus ohjataan kiinni 0,5 sekunnin viiveellä. Täten annetaan mahdolliselle maasulkuvalokaarelle mahdollisuus sammua. Vastusta pidetään päällä korkeintaan 10 sekunnin ajan. Vastuksen ollessa kytkettynä, siirtyvät säätäjät käsikäyttöle. Varsinkin vanhemmat säätäjät saattavat alkaa heilua kontrolloimattomasti, mikäli niitä ei kytketä käsiasentoon. Uudet säätäjät saattaisivat hyvinkin selvitä automaattisesti vastuksen ollessa päällä, mutta sähkölaitoksessa kaikki säätäjät siirtyvät käsitilaan kyseisessä käyttötilanteessa. Vastukset on myös mitoitettu siten, että ne eivät voi olla päällä verkon terveessä tilassa.

Tampereen sähköverkko käyttää samaa suojausmenetelmää lisävastuksen osalta riippumatta siitä millainen verkko on (ilma, seka, kaapeli). Käyttöhenkilöstö ei ole huomannut mitään eroavaisuuksia eri verkkorakenteiden osalta. /8/

4.4 E.ON Kainuun sähköverkko

E.ON toimittaa sähköä Kainuussa sekä Pyhännällä ja entisen Kestilän kunnan alueella Siikalatvan kunnassa Pohjois-Pohjanmaalla. 110/20 kV:n sähköasemia on yhteensä 22 kpl. Päämuuntajia on 25 kpl ja ne ovat kytkentäryhmältään YNd11 – kytkentäisiä, joten maadoitusmuuntajaa joudutaan käyttämään, kun sammutuslaitteisto liitetään verkkoon. Kompensoidun keskijänniteverkon pituus on 4310 km ja sen kaapelointiaste on ainoastaan 1,9 %. Voidaan siis sanoa, että kyseessä on puhdas avojohtoverkko. Kompensointia on Kainuussa käytetty vuodesta 1992 lähtien EBG:n ja Swedish Neutralin laitteistojen avulla. Kompensointi toteutetaan keskitetysti, ja jokainen päämuuntaja on varustettu omalla kelalla.

Sähköverkko on 5 % alikompensoitu. Tähän ratkaisuun on päädytty, koska on haluttu jättää kapasitiivista virtaa suojausta varten. Myös nolajännite terveessä tilassa pysyy näin matalampana. Johtolähdön irtautuminen verkosta ja säätäjän mahdollinen samanaikainen toimimattomuus eivät aiheuta liian suurta ylikompensoimista.

Sammutuslaitteiston lisävastus on jatkuvasti päälle ohjautuneena. Pääsääntöisesti jakeluverkossa on taso-orsirakenne. Vaihejohtimien vuorottelua on pyritty tekemään, mutta tyydyttäviin tuloksiin ei päästy kohtuullisin kustannuksin. Tästä syystä verkon terveen tilan nollajännite on huomattava. U_0 -varasuojaus on toteutettu hälyttävänä ja näin ollen terveessä tilassa ei voi tapahtua virheellistä laukaisua nollajännitteen takia. Ainoaksi vaihtoehdoksi jäi siis pitää lisävastusta päällä koko ajan, jotta nollajännite saadaan pidettyä kohtuullisella tasolla. Tulevaisuudessa lisävastuksen ohjausta pyritään muuttamaan siten, että vastus ohjataan päälle vasta maasulun synnyttyä. /5/

4.5 Vaasan sähköverkko

Vaasan sähköverkon jakeluverkossa on 13 kpl 110/20 kV:n sähköasemaa, joiden päämuuntajat ovat YNd11 – kytkentäisiä. Tällä hetkellä sähköasemista on 7 kpl kompensoitu ja kahteen suunnitellaan parasta aikaa kompensoinnin toteuttamista. Tällä hetkellä suunnitellaan myös uutta 110/20 kV:n sähköasemaa, johon myös asennetaan kompensointi. Näin ollen tulevaisuudessa on tarkoitus kompensoida 10:tä asemaa 14:stä.

Asemat, jotka tulevaisuudessa jäävät maasta erotetuiksi, koostuvat pääasiassa johtolähdöistä, jotka ovat maakaapelia. Jakeluverkossa on runsaasti avojohtoverkkoa, jossa viime vuosina on ollut runsaasti pikajälleenkytkentöjä. Tämä onkin ollut suurin syy kompensoinnin siirtymiseen. Kompensointi on toteutettu keskitetysti. Jokaisella asemalla on yksi kela muuntajaa kohden. Kelojen koot vaihtelet 100 A – 160 A. Huollon yhteydessä releet asettuvat maasta erotetun verkon parametrien mukaisesti. Kompensointi on toteutettu hieman alikompensoituna, jotta terveen tilan nollajännite pysyy matalampana. Myös johtolähdön laukeaminen vie kompensointia lähemmäs täyttä kompensointiastetta. Terveen tilan nollajännitteeseen on myös pyritty vaikuttamaan vaiheiden vuorottelun avulla. U_0 - varasuojaus on toteutettu laukaisevana 5 sekunnin viiveellä. Asetusrajaksi on aseteltu 25 %. Johtolähdöille on puolestaan aseteltu U_0 -rajaksi 20 %.

Lisävastusta ohjataan kahdella eri periaatteella. Vanhemmissa asemissa vastus on verkon terveessä tilassa pois päältä kytkettynä. Nollajännitteen ohjaamana vastus

tulee päälle viiveellä antaen maasulkuvalokaarelle mahdollisuuden sammua. Toisessa ohjaustavassa vastusta pidetään päällä myös verkon terveessä tilassa hillitsemässä nollajännitteen nousua. Maasulun synnyttyä vastus ohjautuu nollajännitteen ohjaamana hetkeksi pois päältä antaen jälleen mahdollisuuden valokaaren sammumiseen. /6/

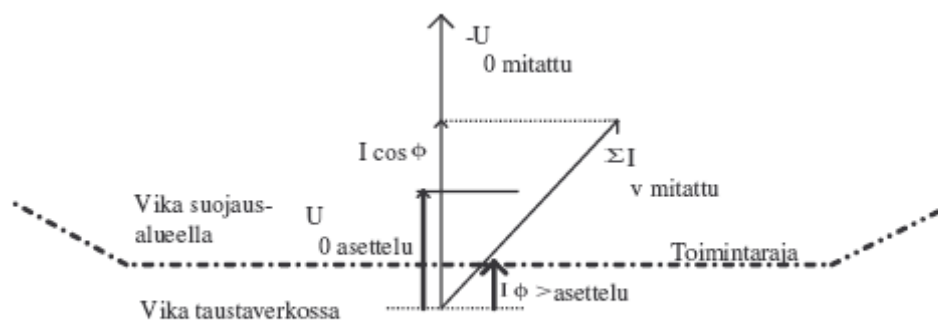
5 SAMMUTETUN VERKON RELESUOJAUSASETTELUT

Kompensoidun keskijänniteverkon selektiivinen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa ainoastaan maasulun suuntareleitä käyttäen. Releiden toiminta perustuu tällöin maasulkuvirran pätökomponentin suuruuteen ja suuntaan tai kulmamittausperiaatteeseen.

5.1 $I_0 \cos \varphi$ -karakteristika

Kun toimintakarakteristikaksi valitaan maasulkuvirran suuruutta ja suuntaa mittaava toimintaperiaate, on rele asetettava $I_0 \cos \varphi$ – asentoon. VAMPin releissä $I_0 \cos \varphi$ – asento tunnetaan nimellä $I_0 \text{Res}$. Tällöin rele laskee summavirran pätökomponentin nollajännitevektorille. Jotta rele laukaisee vioittuneen johtolähdön, pitää kolme eri ehtoa täytyä:

1. Summavirran pätökomponentin on oltava suurempi kuin releeseen aseteltu virta-raja.
2. Nollajännitteen on ylitettävä releeseen aseteltu jänniteraja.
3. Summavirtavektorin tulee olla toiminta-alueella.



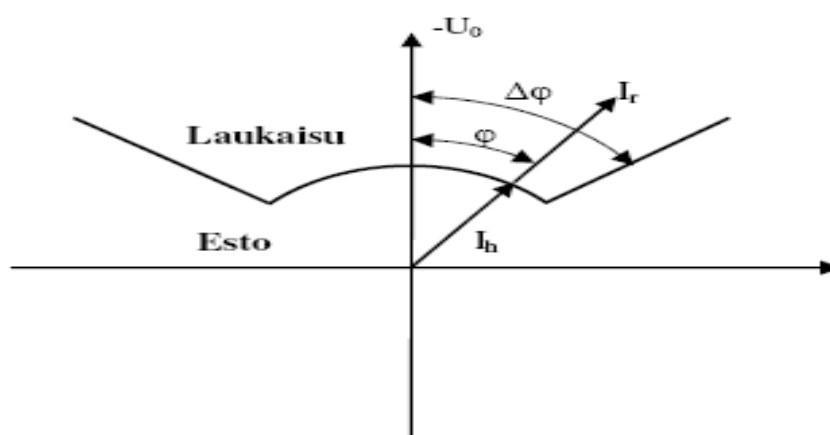
Kuva 9. $I_0 \cos \varphi$ toimintakarakteristika sammutetussa verkossa

Kuvassa 9 esitettyä toimintarajaa voidaan helposti muuttaa halutuksi releen virta-asetuksia muuttamalla. Terveet johtolähdöt eivät laukea virheellisesti, koska niiden summavirrat ovat 90 astetta jäljessä kuvan 9 nollajännitevektoria ja ovat näin

toiminta-alueen ulkopuolella. Vikaantuneen johtolähdön summavirran kulma puolestaan riippuu jakeluverkon kompensointikuristimen virityksestä.

5.2 Kulmakarakteristika

Johdonsuojareleen voi myös asettaa toimimaan kulmamittauksen avulla. Tällöin releelle tulee asettaa peruskulma φ_0 , joka kompensoidun verkon kohdalla on nolla astetta. Esimerkiksi ABB:n REF 543 – releessä tulee valita BasicAng & U_0 – toiminto. Summavirran peruskulmaksi tulee näin nollajännitevektorin suuntainen.



Kuva 10. Kompensoidun verkon kulmakarakteristikalla toimiva rele. I_h kuvaa haavatumisvirtajaa ja I_r pätövirtaa.

Kulmakarakteristikaan perustuvan releen laukaisu tapahtuu alueella $\pm \Delta\varphi$. Nollajännitteen ja virran kulmaero riippuvat kompensointiasteesta ja tästä johtuen vian aikainen kulmaero voi vaihdella suuresti. Kulmaeroksi voidaan asettaa esimerkiksi 80 astetta. Kulmakarakteristikan periaate on esitetty kuvassa 10.

5.3 Maasulkusuojauksen suunnittelun periaatteita

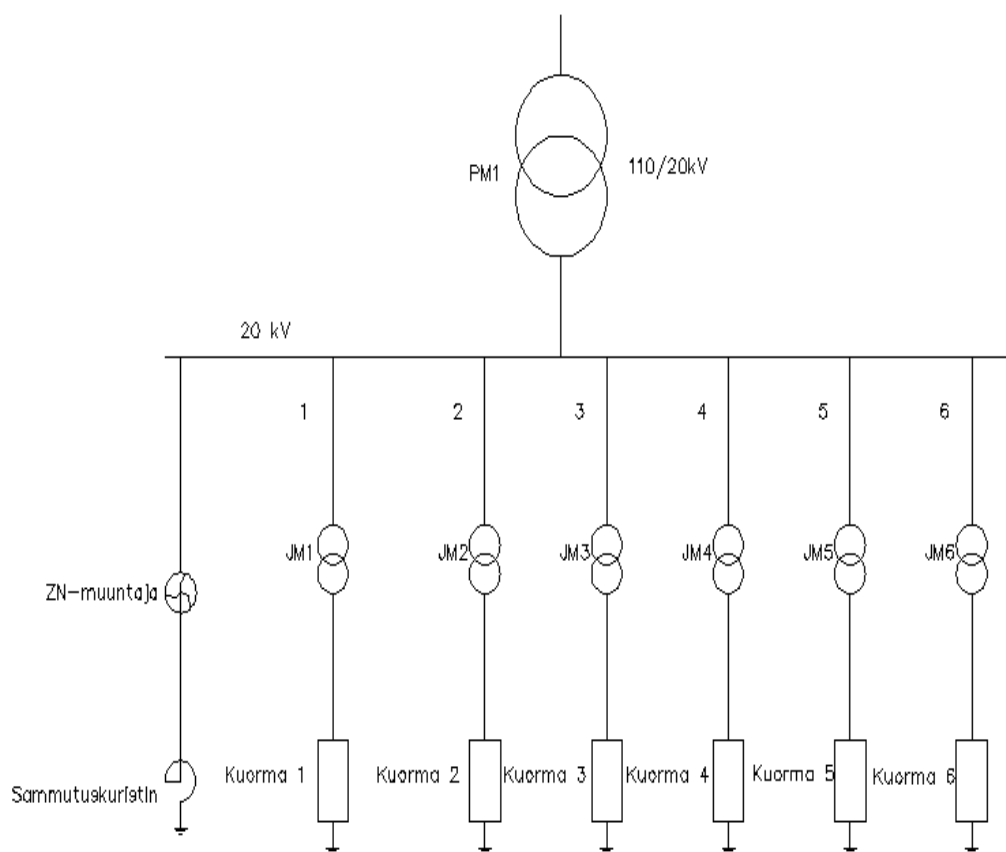
Asemille sijoitetut johtolähtökohtaiset releet saavat virta- ja jännitetiedot mittamuuntajien välityksellä. Summavirtamuuntajien toision nimellijännite on yleensä 1A. Jännitemuuntajien muuntosuhde on yleensä skaalattu siten, että verkon ollessa suorassa maasulussa, on jännitemuuntajan toisiossa 100 V.

Suojausta suunniteltaessa on tarkasteltava useita erilaisia maasulkuvirtalaskelmia. Mahdollisimman tehokkaan suojauksen kannalta kiinnostavimpia ovat pienimmät esiintyvät nollavirrat ja nollajännitteet. On tutkittava tilanteita, joissa mahdolliset varasyötöt syöttävät verkkoa, eli tilanteita jolloin verkko on mahdollisimman laaja. Toisaalta on haettava tilanteita, joissa verkko on mahdollisimman suppea. Laskelmia tehtäessä tulee miettiä myös millaista porrastusta käytetään releissä. Suurivirtaiset maasulut tulee poistaa käyttämällä nopeaa laukaisua. Pie-nivirtaisille maasuluille voidaan käyttää puolestaan hidastettua porrasta. Tällä voidaan saavuttaa maasulun itsestään sammuminen. Käyttämällä hidastettua por-rasta maasulku saattaa muuttua oikosuluksi valokaaren leviämisen ansiosta. Tämä tilanne on edullinen siinä mielessä, että oikosulku parantaa mahdollisuuksia vian automaattiseen paikannukseen.

Nollajännite ohjaa yleensä lisävastuksen päällekytkeytymistä. Nollajännitteen raja-arvo, jolla lisävastus kytkeytyy päälle, tulee valita huolella. Nollajännitteen tulee olla tarpeeksi suuri myös silloin, kun vastus on päällekytkettynä. Mikäli kytkeytymisjännitteen raja-arvo on valittu liian alhaiseksi, voi tästä seurata kytkentä-automatiikan pumppausilmiö. /10//13/

6 PSCAD – SIMULOINTI KOMPENSOIDUSSA VERKOS- SA

Tässä opinnäytetyössä on käytetty PSCAD- simulointiohjelmaa mallintamaan kompensoidun verkon maasulkutilanteita. Ohjelman avulla voidaan mallintaa muun muassa keskijänniteverkon maasulun aikaisia ilmiöitä. Työssä on mallinnettu maakaapeliverkko ja sekaverkko, jossa puolet johtolähdöistä on maakaapelia ja puolet avojohtoja. Kuvan 11 mukaisesti molemmat verkkomallit sisältävät kuusi johtolähtöä ja sammutuslaitteiston. Työssä simuloidaan läpi samanlaiset ilmiöt molemmissa verkkomalleissa. Työn päätteeksi tarkastellaan yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia verkkojen kesken.



Kuva 11. Mallinnetun keskijänniteverkon kytkentä

6.1 Mallinnettujen keskijänniteverkkojen tiedot

Taulukko 1. Muuntajien tekniset tiedot

Muuntaja	Nimellisteho (kVA)	Oikosulkuimpedanssi (%)	Kuormitushäviöt (kW)
PM1	16000	10	85
JM1	800	5,4	7,15
JM2	500	5	5
JM3	1000	6,3	8,85
JM4	800	5,5	8,5
JM5	800	5,5	8,5
JM6	500	5,4	5,7
ZN	1000	5,4	

Päämuuntaja ja jakelumuuntajat ovat kytkentäryhmiltään YNd11-kytkentäisiä. Tästä johtuen nolllapiste luodaan 1000 kVA:n suuruisen maadoitusmuuntajan avulla. Päämuuntajan ensiöpuolen jännite on 110 kV ja toisiopuolen 21 kV. Jakelumuuntajien ensiöjännitteet ovat 20 kV ja toisiojännitteet 0,4 kV.

Taulukko 2. Maakaapeliverkon johdintyytit

Lähtö	Johtolaji	Pituus (km)	Maakapasitanssi ($\mu\text{F}/\text{km}$)
1	APYAKMM 185	6	0,4
2	AHXAMK-W 240	6	0,29
3	AHXAMK-W 120	4	0,22
4	AHXAMK-W 185	7	0,25
5	AHXAMK-W 185	6	0,25
6	APYAKMM 185	4	0,4

Taulukko 3. Sekaverkon johdintyyppit

Lähtö	Johtolaji	Pituus (km)	Maakapasitanssi ($\mu\text{F}/\text{km}$)
1	APYAKMM 185	6	0,4
2	AHXAMK-W 240	6	0,29
3	AHXAMK-W 120	4	0,22
4	PAS 120	13	0,005
5	PAS 120	15	0,005
6	AL 132	13	0,0061

Pienjänniteverkon kuormat ovat puolet jakelumuuntajien nimellistehosta. Kuormat ovat induktiivisia ($\cos \phi = 0,9$) ja niiden tähtipiste on maadoitettu

6.2 Simulointi maakaapeliverkossa

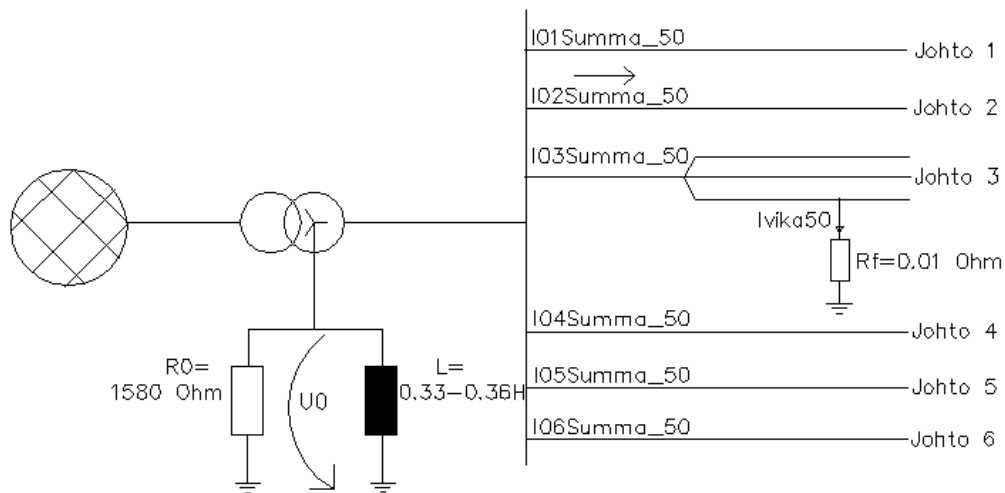
6.2.1 Kompensointilaitteiston viritys

Ensimmäisenä vaiheena simuloinnissa oli sammutuslaitteiston resonanssiin viritäminen kuvan 12 mukaisesti. Kelan reaktiivinen induktanssi pyrittiin asettelemaan yhtä suureksi kuin jakeluverkon kapasitiivinen reaktanssi. Verkon ollessa resonanssiin viritettynä on vikapaikan virta pienin mahdollinen ja nollajännitteen suhteen virta on puhdasta pätövirtaa. Simuloinnissa mallinnettu sammutuslaitteiston periaatekytkentä on kuvassa 13. Verkon vuotohäviöitä kuvaava vastus R_0 on aseteltu sammutuskuristimen rinnalle. Vastuksen R_0 :n suuruuteen vaikuttavat seuraavat seikat:

- ✓ verkon johtimien resistanssit
- ✓ verkon resistiiviset vuotovirrat
- ✓ maadoituskuristimen resistanssi
- ✓ nollavirran maassa kohtaama resistanssi

✓ kompensointilaitteiston lisävastuksen resistanssi

R_0 :n arvolla on suuri vaikutus, kun verkko on täysin kompensoitu. Kyseistä arvoa on vaikeaa määrittellä laskemalla ja täten kyseisen arvon saaminen edellyttää mittauksia. Tässä simuloinnissa vuotohäviön arvoksi aseteltiin kaavasta 1 saatava tulos. Sammutuskuristimeen aseteltava induktanssi voidaan laskea kaavasta 2. Kompensoitava maasulkuvirta saadaan simuloimalla suora maasulku ilman, että kompensointilaitteisto on kiinnikytettynä jakeluverkkoon. Suoran maasulun vikaresistanssi arvona R_f käytetään $0,01\Omega$. /13/



Kuva 12. Kompensointilaitteiston virittäminen

$$R_0 = 15 \times \frac{U}{\sqrt{3} I_{EM}}, \quad (1)$$

jossa R_0 kuvaa verkon vuotohäviötä, U verkon pääjännitettä ja I_{EM} verkon maasulkuvirtaa.

$$L = \frac{U}{I_{EM} \times 2 \times \pi \times 50}, \quad (2)$$

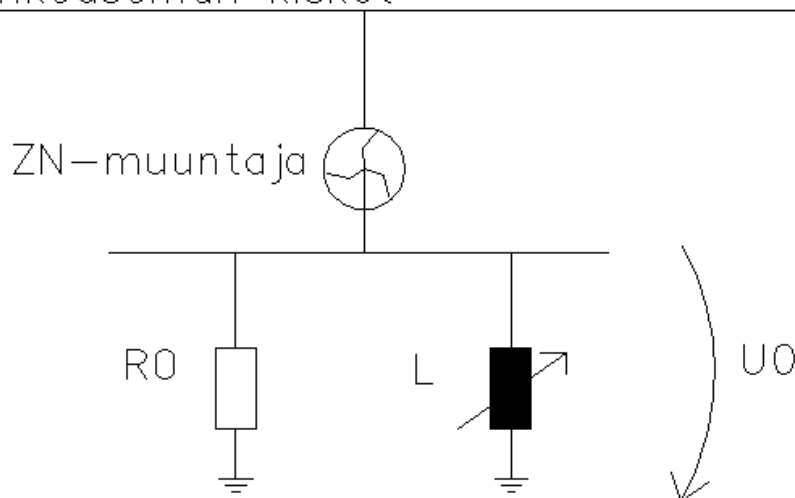
jossa L kuvaa sammutuslaitteiston induktanssia.

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
12366.6	-32.8234	115.077	56.8138	-89.6372	104.823	56.7078	89.5312

Mittaristo1. Kaapeliverkossa kompensoitavan virran suuruus on 115A (I_{vika_50}).

Kyseiset arvot sijoitettuna kaavaan 2 saadaan sammutuslaitteiston induktanssiksi 0,36 H kahden desimaalin tarkkuudella. Lähtökohdaksi otettiin 0,36 H ja tätä arvoa hieman muokkaamalla löydettiin resonanssikohta. Myös R_0 :n arvo voitiin laskea mittaristosta 1 saatavalla tuloksella. Arvoksi saatiin 1580 Ω .

Sähköaseman kiskot



Kuva 13. Sammutuskuristimen viritys resonanssiin

Simuloinnissa pidettiin käämilangan vastuksen R_s suhde induktanssiin vakiona kaavan 3 mukaisesti

$$\frac{2\pi \times 50 \times L}{R_s} = 50 \quad (3)$$

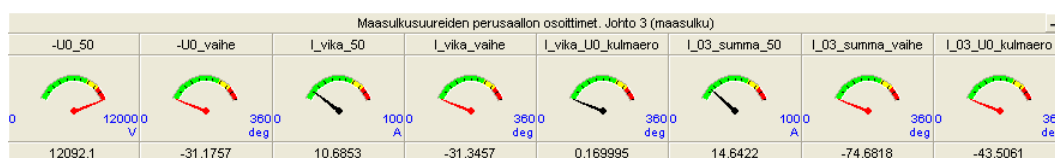


Mittaristo 2. Maasulkusuureet vikaantuneella johtolähdöllä kun L:n arvo 0,36H.

Mittaristosta 2 voidaan päätellä, että kuristin ei ole resonanssissa. I_vika_U0_kulmaero – mittari osoittaa, että vikavirran ja nollajännitteen kulmaero on -31,9 astetta. Maahan kulkevan vikavirran suuruus on 12 A.

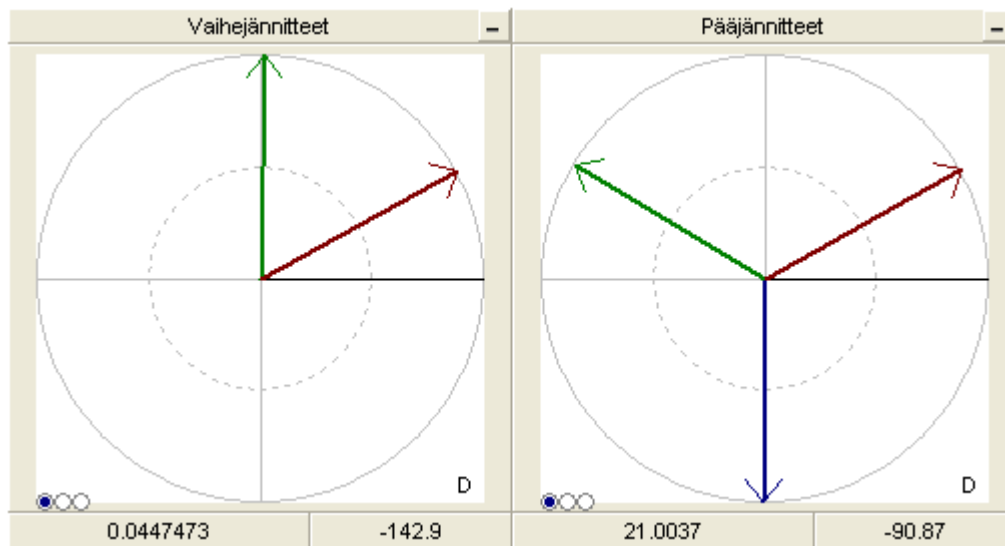


Mittaristo 3. Maasulkusuureet vikaantuneella johtolähdöllä kun L:n arvo 0,34H.



Mittaristo 4. Maasulkusuureet vikaantuneella johtolähdöllä kun L:n arvo 0,339H.

Mittaristojen 2-4 avulla voidaan havainnollistaa milloin sammutuslaitteisto on viritetty resonanssiin. Tarkastelemalla mittaria I_vika_U0_kulmaero huomataan, että mittaristossa 4 kelan ollessa viritetty arvoon $L=0,339$, on kulmaero ainoastaan 0,17 astetta. Tällöin vikavirta on lähes puhdasta pätövirtaa nollajännitteen suhteen ja vikavirta on 10,6 A. Summavirran (I_03_summa_50) suuruus on 14,6 A, kun kompensointilaitteisto on viritetty resonanssiin. Kuvassa 14 on osoitettu miten vaihe- ja pääjännitteiden osoittimet käyttäytyvät vikaresistanssittomassa maasulussa.



Kuva 14. Viallinen vaihejännite suorassa maasulussa tippuu maan potentiaalin, muut nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Pääjännitteet puolestaan pysyvät ennallaan.

Kompensoidun verkon maasulkuvirran (I_e) ja nollajännitteen (U_0) itseisarvot saadaan lasketuksi seuraavista kaavoista:

$$I_e = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \times \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{\left(R_f + R_0\right)^2 + R_f^2 R_0^2 \times \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{\sqrt{\left(R_f + R_0\right)^2 + R_f^2 R_0^2 \times \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Mikäli jakeluverkko on täysin kompensoitu, eli yhtälö 6 täyttyy, saadaan nollajännitteen ja maasulkuvirran kaavat hyvin yksinkertaiseen muotoon.

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_0} \quad (6)$$

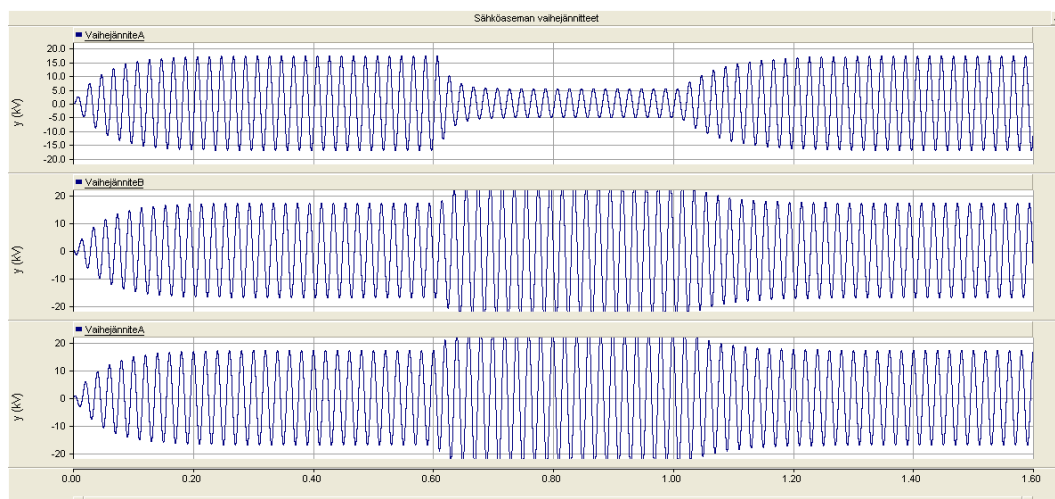
$$I_e = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{R_f + R_0} \quad (7)$$

$$U_0 = \frac{R_0}{R_f + R_0} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

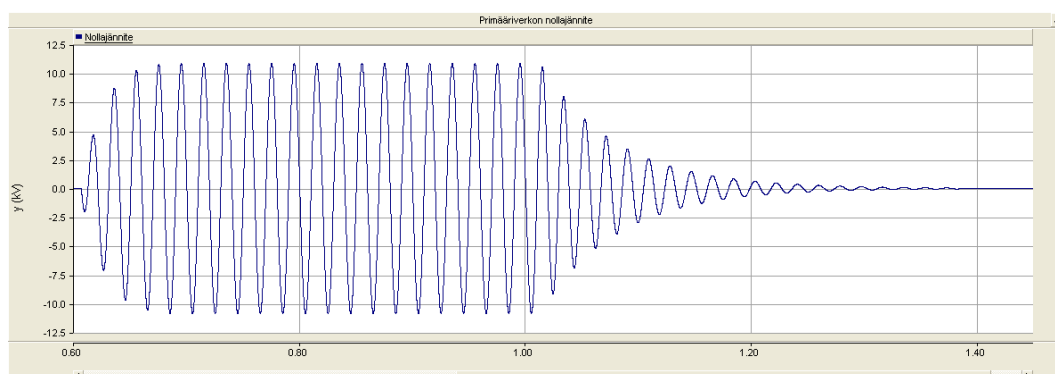
6.2.2 Sammutuksen vaikutus palaavaan jännitteeseen

Tässä simulointimallissa käytettiin yhtä lisävastusta. Lisävastuksen arvo 2,6 Ω mitoitettiin siten, että suorassa maasulussa päälle kytkettynä vastus lisää pätövirran arvoa 8,5 A:lla 20 kV:n verkossa. Vastus on liitetty sammutuskuristimen tehokäämiin, jonka teho 100 kVA.

Esimerkiksi Vaasan sähköverkon suurin syy kompensoituun verkkoon siirtymiseen on pikajälleenkytkentöjen vähentäminen. Alla olevalla mallinnuksella osoitetaan, miksi sammutus on tehokas keino vähentää jälleenkytkentöjen määrää. Maasulku, jonka vikavastus oli 500 Ω, simuloitiin A – vaiheeseen alkavaksi ajanhetkellä $t=0,607$ s. Vian kestoajaksi määriteltiin 0,4 s eli sammutuslaitteisto poisti vian itse ilman lisävastuksen apua. Ajanhetken 1 s ympäristössä ja siitä 0,2 s eteenpäin nähdään miten jännitteet palautuvat takaisin normaaliarvoihin. Vikavaiheen jännitteen palautuessa hitaasti takaisin normaaliarvoon pienennetään mahdollisuutta, että valokaari syttyisi uudelleen.



Kuva 15. Sähköaseman vaihejännitteet, kun $R_f=500 \Omega$, vian syntymishetki 0,607 s ja vian kesto 0,4 s.

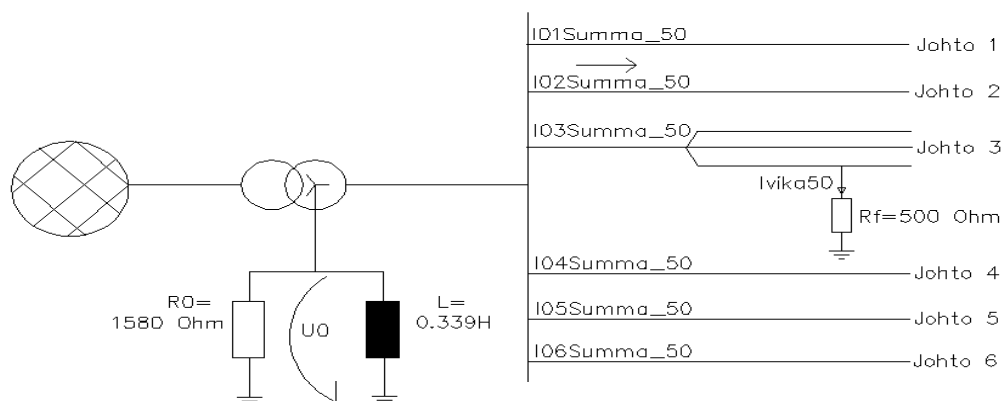


Kuva 16. Nollajännitteen käyttäytyminen, kun $R_f=500 \Omega$, vian syntymishetki 0,607 s ja vian kesto 0,4 s.

Valokaaren sammumisen onnistuminen riippuu vikakohtaan yli palaavan jännitteen huippuarvosta ja nousunopeudesta valokaarivirran katkettua. Myös katkaistavan virran suuruus, valokaaren palamisaika ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat valokaaren sammumiseen. Lisäksi valokaaren ja eristysvälin pituudella on sammumisen kannalta merkitystä. Mikäli verkko on täysin kompensoitu, ei palaava jännite nouse yleensä jatkuvuustilan vaihejännitettä suuremmaksi kuvan 15 mukaisesti. Myös verkon nollajännite vaimenee tasaisesti kuvan 16 esittämällä tavalla. Valokaari sammuu huomattavasti suuremmalla virralla kompensoidussa ver-

kossa kuin maasta erotetussa, jossa nopeasti nouseva palaava jännite vaikeuttaa valokaaren sammumista. /13/

6.3 Täysin kompensoidun kaapeliverkon maasulku



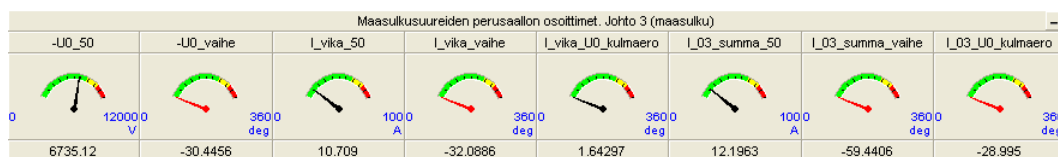
Kuva 17. 500 Ω vikavastuksen vaikutus maasulkusuureisiin täysin kompensoidussa verkossa

6.3.1 Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä

Tarkasteltiin tilannetta, jossa sammutuslaitteiston vastusta pidetään jatkuvasti kytkettynä täysin kompensoidussa verkossa, joka on mallinnettu kuvassa 17. Laittevalmistajat antavat useasti määräyksen, että vastusta saa kuormittaa jatkuvasti ainoastaan 0,3 x nimellisteho. Koska kaapeliverkko on hyvin symmetrinen ja näin nollijännite ei nouse terveessä tilassa juuri ollenkaan, ei vastus kuormitu verkon terveessä tilassa. Maasulku tapahtui ajanhetkellä $t=1,007 \text{ s}$.



Kuva 18. Vikakohdan virran tehollisarvo



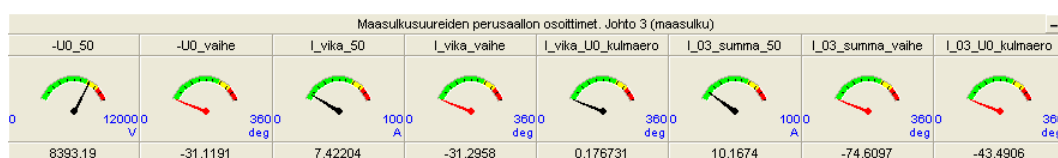
Mittaristo 5. Vikapaikan ja maasulussa olevan johtolähdön maasulkusuureet

Maasulussa olevan johtolähdön summavirta on 12,2A ja kulmaero nollajännitteen on laukaisualueella (-28,9°). Vikavirran pätökomponentti I_{VP} voidaan laskea kaavasta 9. Vikavirran pätökomponentin suuruudeksi muodostui 10,7 A ja sen trendi on kuvan 18 mukainen. Kiskoilta mitattu nollajännite oli 6,7kV. Relesuojausten kannalta näillä vika-arvoilla voidaan vioittunut johtolähtö irrottaa selektiivisesti.

$$I_{VP} = I_{03_summa_50} \times \cos(I_{03_U0_kulmaero}) \quad (9)$$

6.3.2 Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä

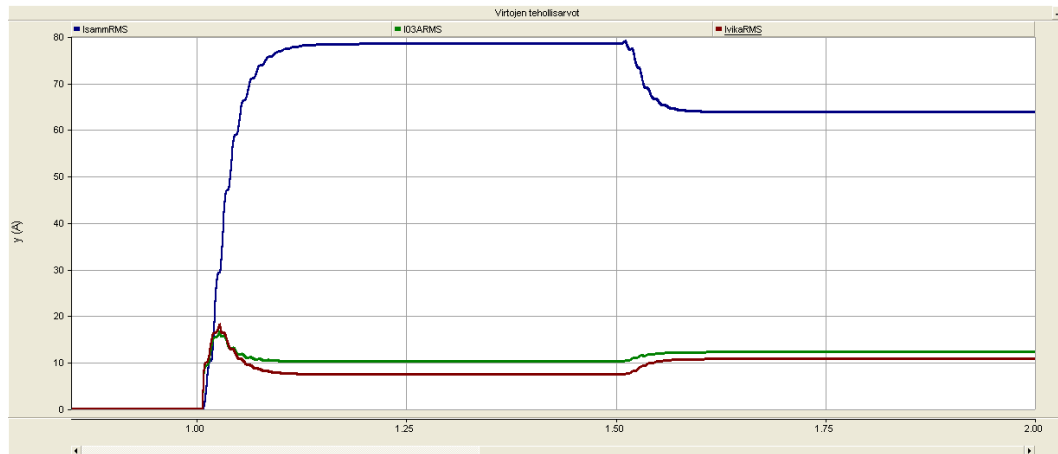
Vastus ei ole kytkettynä verkon terveessä tilassa ja maasulun synnyttyä se ohjataan päälle viiveellä. Maasulkuvalokaarelle annetaan mahdollisuus sammua käyttämällä viivettä lisävastuksen kytkemisessä. Tässä simuloinnissa käytettiin samaa viivettä kuin Tampereen sähköverkko käyttää omassa verkossaan eli 0,5 s. Maasulku syntyy ajanhetkellä 1,007 s ja vastus ohjautuu päälle ajanhetkellä 1,507 s.



Mittaristo 6. Maasulkusuureet ajanhetkellä $t=1,4$ s eli hetkeä ennen kuin lisävastus kytkeytyy päälle

Vikapaikan virta on 7,4 A sekä johdon 3 summavirta 10,2 A ennen kuin vastus kytkeytyy päälle. Vastuksen kytkeytymisen jälkeen maasulkusuureet muuttuvat mittariston 5 mukaisiksi. Lisävastus kasvattaa pätökomponentin suuruutta siis 3,3 A. Nollajännitettä vastus puolestaan pienentää 1,7 kV. Summavirran ja nollajän-

nitteen kulmaero on laukaisualueella. Kuvassa 19 on esitetty virroissa tapahtuvia muutoksia simuloinnin aikana.

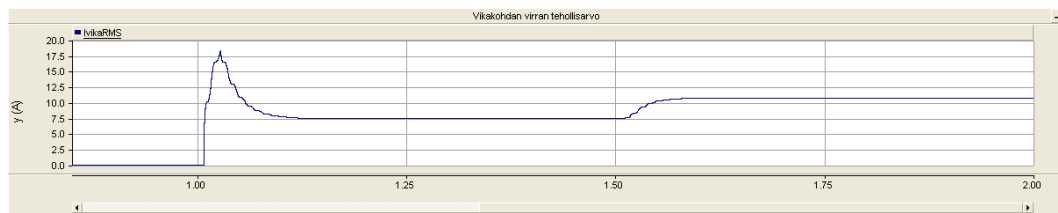


Kuva 19. Maasulun ja lisävastuksen vaikutukset johdon 3 summavirtaan (vihreä trendi), vikavirran tehollisarvoon (punainen trendi) ja sammutuslaitteen ottamaan virtaa (sininen trendi).

6.3.3 Lisävastuksen poiskykytyminen maasulun syntyessä

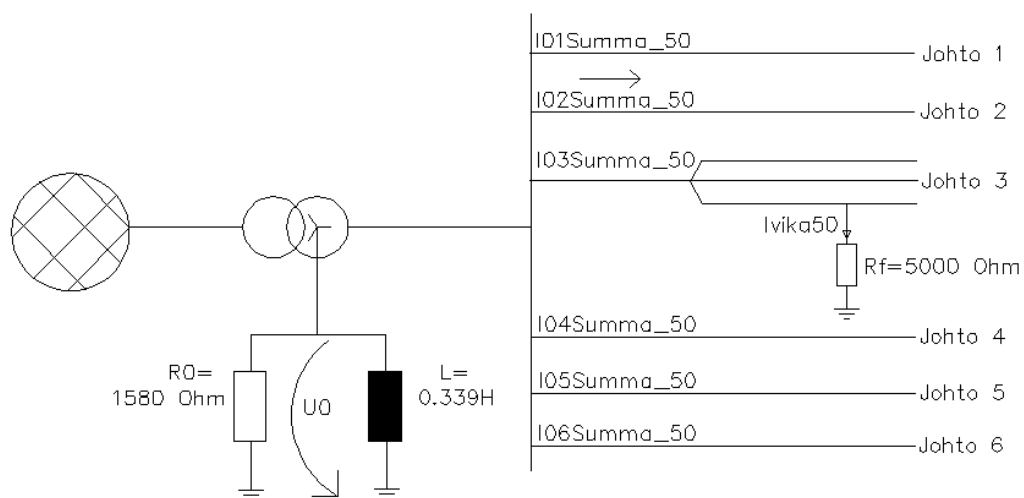
Vastusta pidettiin päällä verkon ollessa terveessä tilassa. Maasulun syntyessä vastus kytketään pois päältä 0,5 s ajaksi antaen näin valokaarelle mahdollisuuden sammua.

Ajanjaksolla 1,007 – 1,507 s jolloin maasulku on aktiivinen ja vastus ei ole kytkettyneenä on tilanne mittariston 6 kaltainen. Ajanhetken 1,507 s muuttuu tilanne mittariston 5 kaltaiseksi. Kuvan 20 trendistä voidaan selvästi huomata vikavirran kasvu ajanhetkellä 1,507 s. Koska nollajännitettä ei esiinny terveen tilan aikana, ei vastuksella ole oikeastaan mitään järkevää syytä olla päällä terveen tilan aikana. Tällä simuloinnilla osoitettiin, että kyseiselle vastuksen ohjaustavalle ei löydy mitään perusteita käyttää tällaisessa verkkomallissa, jossa terveen tilan nollajännite on merkityksettömän pieni.



Kuva 20. Vikavirran tehollisarvon käyttäytyminen maasulun aikana

6.3.4 5000 Ω :n maasulku täysin kompensoidussa verkossa



Kuva 21. 5000 Ω :n vikavastus täysin kompensoidussa verkossa

Maasulun syntyhetkeksi kuvan 21 mukaiseen verkkoon simuloitiin $t=1,007$ s. Vastus kytkettiin kiinni 0,5 s hidastuksella maasulun synnyn jälkeen. Tilannetta tarkasteltiin juuri ennen vastuksen kytkeytymistä ja tilannetta vastuksen ollessa päällä.



Mittaristo 7. Maasulkusuureet ajanhetkellä 1,4 s. Lisävastus irtikytkettynä.

Vikapaikan pätövirran suuruus oli ainoastaan 1,96 A ja nollajännite 2,2 kV, kun vastus ei ollut kytketty.

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U _{0_50}	-U _{0_vaihe}	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
1353.36	-29.7842	2.15384	-31.3515	1.56731	2.45118	-58.6993	-28.9151

Mittaristo 8. Maasulkusuureet, kun lisävastus on kytkettyyn päälle

Vikavirran suuruus kasvoi 2,15 A:iin eli vastus lisäsi pätövirran arvoa 0,18 A. Jos lisävastuksella halutaan saada tehokkaampi vaikutus aikaan, tulee vastuksen resistanssiarvoa hieman pienentää. Samalla tulee kuitenkin muistaa, että tehokäimin tehoraja saattaa tulla vastaan. Suuriresistanssisissa maasuluissa vikavirran suuruuden määrää vikaresistanssi. Lisäkuormitusvastuksen vaikutus pätövirran arvoon on hyvin vähäinen. Nollajännite puolestaan pienenee huomattavasti vastuksen kytketymisestä. Pahimmassa tapauksessa suuriresistanssisen vian ilmaisuherkkyys voi jopa huonontua lisävastuksen kytkettyä. Kuvassa 22 on osoitettu miten lisävastuksen lisäämä virta pienenee, kun vikaresistanssin suuruus kasvaa. /13/



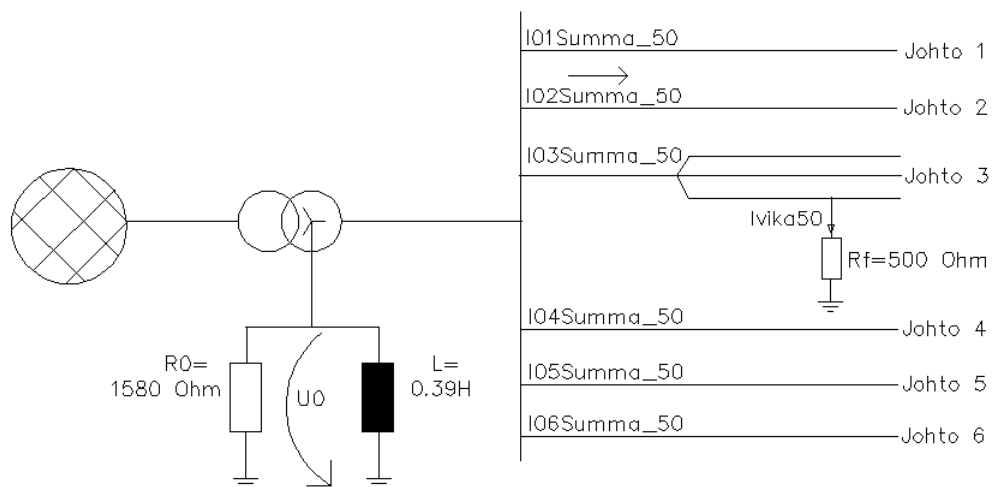
Kuva 22. Vikaresistanssin vaikutus lisävastuksen tuottamaan lisävirtaan

6.4 Alikompensoidun kaapeliverkon maasulku

Suomessa on varsin yleistä, että keskijänniteverkkoa pidetään hieman alikompensoituna kuvan 23 mukaisesti. Tällöin induktanssin virta on pienempi kuin maakapasitanssien kautta kulkeva virta. Simuloinnissa pyrittiin asettelemaan kompensointiasteeksi 85 %, jolloin induktanssin virraksi tulee 98 A. Tällöin induktanssin arvoksi tulee 0,39 H 115 A:n verkossa. Verkon kompensointiaste K voidaan laskea kaavasta 10.

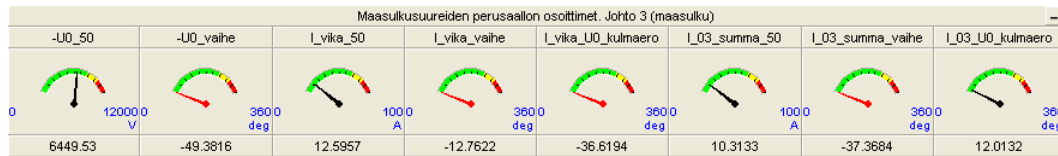
$$K = \frac{I_L}{I_C} \times 100\%, \quad (10)$$

jossa I_L on induktiivinen virta ja I_C kapasitiivinen virta.



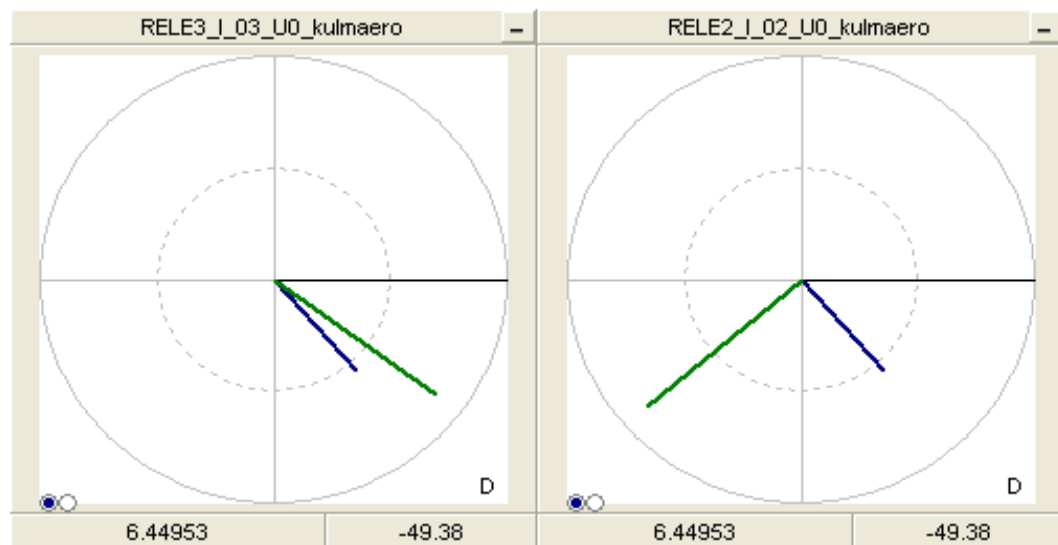
Kuva 23. 500 Ω :n vikavastus 85 % kompensoidussa verkossa

6.4.1 Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä



Mittaristo 9. Maasulkusuureet alikompensoidussa verkossa

Nollajännite pienenee hieman alikompensoidussa verkossa verrattuna täysin kompensoituun verkkoon. Summavirran pätökomponentiksi saadaan kaavan 9 avulla 10,08 A. Suunnattu maasulkusuojaus toimii releellä 3 selektiivisesti kuvan 24 mukaisesti. Vikalähdön summavirta on 12 astetta edellä nollajännitettä (Rele 3). Taustaverkossa summavirtavektori on 90 astetta nollajännitevektoria jäljessä (Rele 2). Vihreä vektori kuvaa johtolähdön summavirtaa ja sininen nuoli kuvaa verkon nollajännitettä.

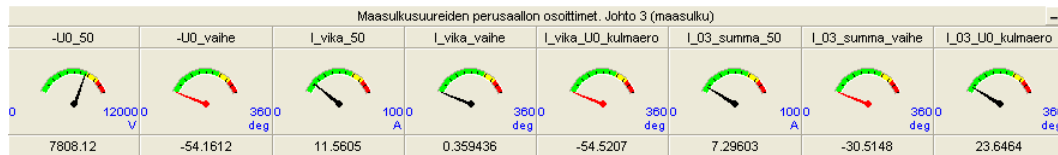


Kuva 24 . Releiden näkemät kulmaerot maasulussa alikompensoidussa verkossa

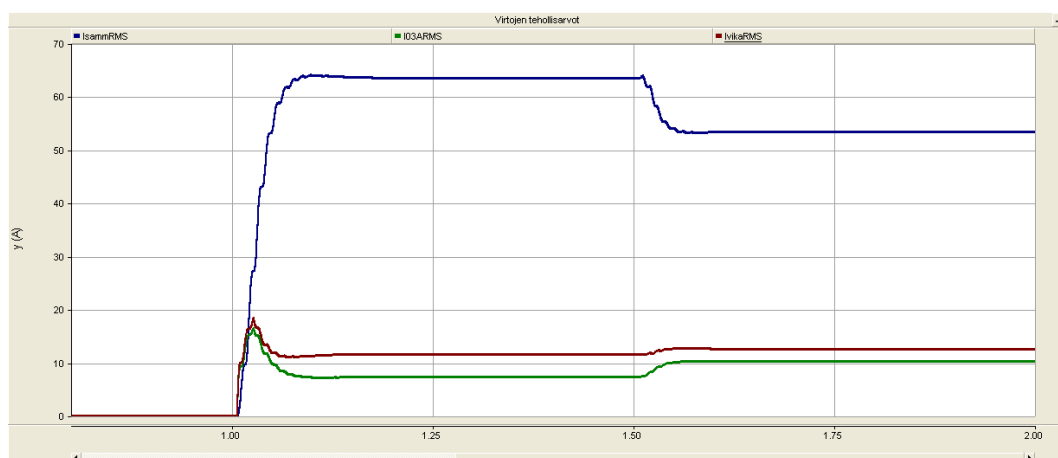
6.4.2 Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä

Mittaristosta 10 nähdään, millaiset ovat maasulkusuureet ennen kuin lisävastus kytkeytyy päälle. Nollajännite on noin 600V pienempi kuin täysin kompensoidun verkon vastaava tilanne. Summavirran pätökomponentin suuruus on 6,7 A eli 0,7

A pienempi kuin täysin kompensoidussa verkossa. Vastuksen kytkeytyessä päälle muuttuu tilanne mittariston 9 ja kuvan 24 kaltaiseksi. Eri virtojen käyttäytymistä on kuvattu kuvassa 25.

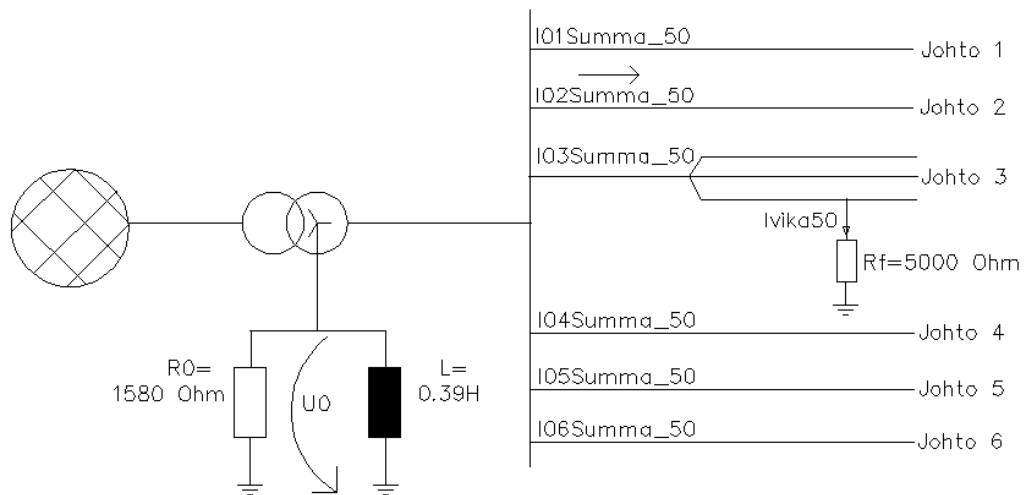


Mittaristo 10. Maasulkusuureet ennen vastuksen päälle kytkeytymistä



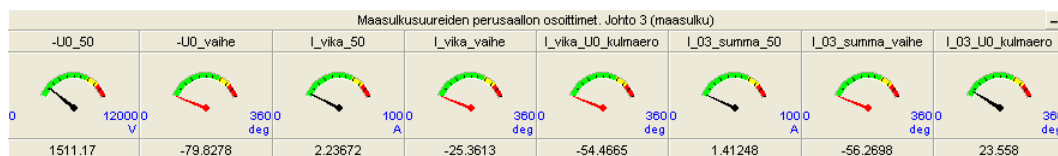
Kuva 25. Maasulun ja lisävastuksen vaikutukset johdon 3 summavirtaan (vihreä trendi), vikavirran tehollisarvoon (punainen trendi) ja sammutuslaitteen ottamaan virtaan (sininen trendi).

6.4.3 5000 Ω :n maasulku alikompensoidussa verkossa



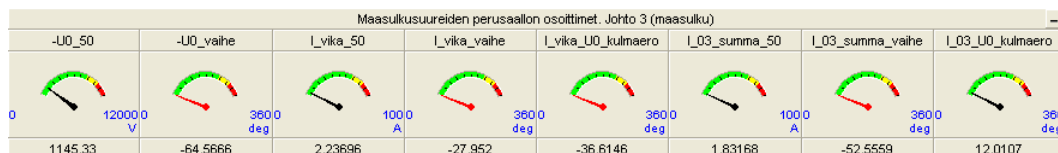
Kuva 26. 5000 Ω :n vikavastus 85 % kompensoidussa verkossa

5000 Ω :n maasulku kytkettiin kuvan 26 mukaisesti päälle ajanhetkellä $t=1,007$ s. Lisävastustus on verkon terveessä tilassa pois päältä ja maasulun syntyessä vastus kytkeytyy päälle 0,5 s viiveellä.



Mittaristo 11. Maasulkusuureet ajanhetkellä $t=1,4$ s eli lisävastus on pois päältä

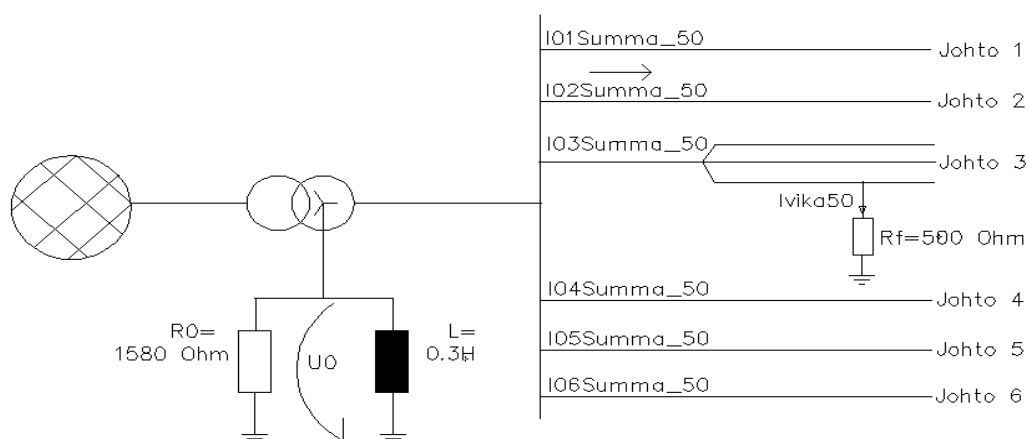
Vikapaikan nollajännite 1,5 kV ja vikavirran pätökomponentin suuruus 1,29 A. Nollajännite on 700 V pienempi ja vikavirran pätökomponentti 0,66 A pienempi kuin vastaava tilanne täysin kompensoidussa tilanteessa.



Mittaristo 12. Maasulkusuureet lisävastuksen ollessa kytkettynä

Lisävastuksen päälle kytkeytyminen lisää vikavirran pätökomponentin 1,79 A:iin. Nollajännite tippuu 1,1 kV:iin. Suunnatun maasulkusuojauksen kannalta tulee virta- ja jänniterajat asettaa tarpeeksi alas, jotta rele laukaisee. Lisävastuksen kytkeytyessä nollajännite on 9,2 % täydestä maasulusta.

6.5 Ylikompensoidun kaapeliverkon maasulku



Kuva 27. 500 Ω :n vikavastus 110 % kompensoidussa verkossa

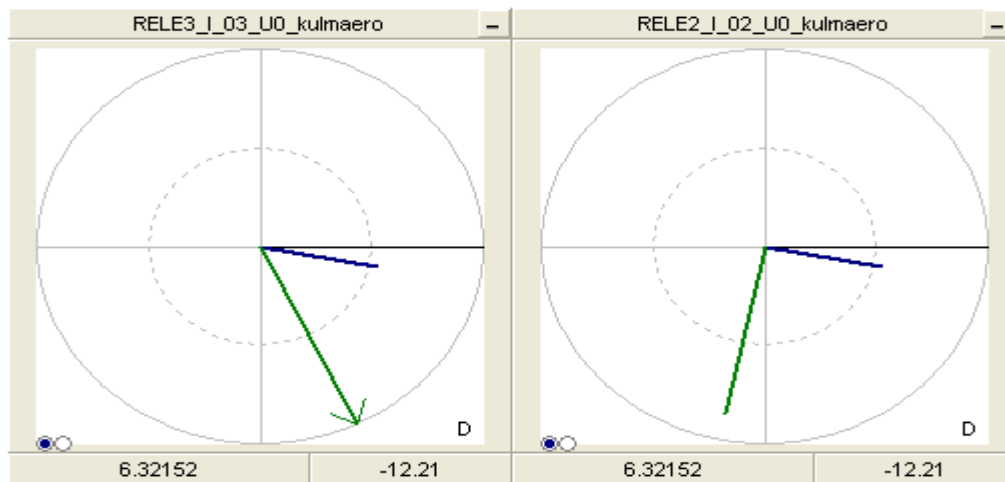
Jotkut sähköyhtiöt ohjaavat sammutuslaitteistoaan hieman ylikompensoituna. Suomessa tämä käytäntö on harvinainen, mutta ulkomailla jakeluverkot voivat olla ylikompensoituja. Myös tällä tavalla voidaan nollajännitettä pienentää verkon terveen tilan aikana. Simuloinnissa aseteltiin verkon kompensointiasteeksi 110 % kuvan 27 mukaisesti. Tällöin kaavan 4 perusteella induktiivisen virran suuruudeksi tulee 127 A. Käyttämällä tätä arvoa kaavassa 2, saadaan induktanssin arvoksi 0,3 H.

6.5.1 Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
6321.52	-12.2081	12.8717	-49.804	37.596	16.5838	-64.466	-52.2579

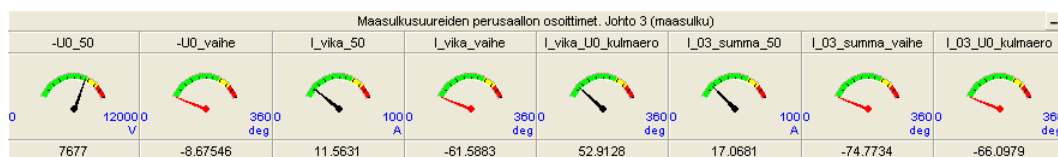
Mittaristo 13. Maasulkusuureet ylikompensoidussa verkossa

Nollajännite on suuruusluokaltaan samanlainen kuin alikompensoidussa verkossa. Suunnattu maasulkusuojaus toimii, koska kuvassa 28 esitetyn vikälähdön 3 kulmaero on laukaisualueella ja virran pätökomponentti on 10,1 A kaavan 9 mukaisesti. Ylikompensointi näkyy vikälähdön summavirrasta, joka on jäljessä nollajännitettä 52 astetta.



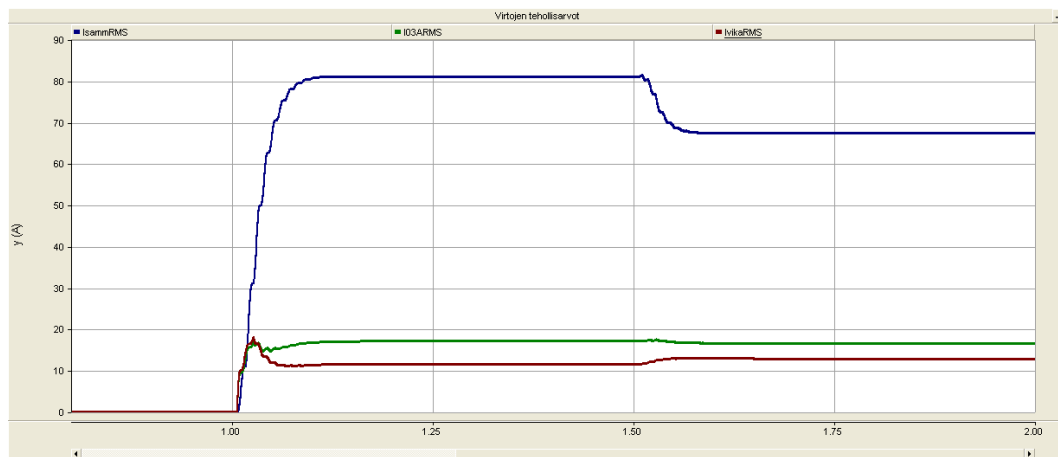
Kuva 28. Releiden näkemät kulmaerot maasulussa ylikompensoidussa verkossa

6.5.2 Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä



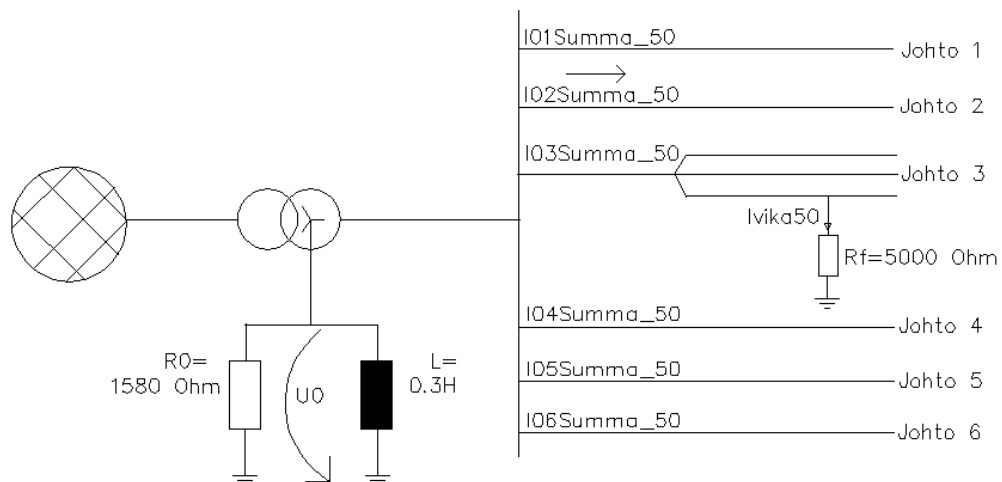
Mittaristo 14. Maasulkusuureet ennen vastuksen päälle kytkeytymistä

Lisävastuksen kytkeytyminen pienentää nollajännitettä 1,3 kV:iin. Virran pätökomponentti ennen vastuksen kytkeytymistä on 6,9 A eli vastus kasvattaa pätövirtaa 3,2 A:lla. Vastuksen tullessa päälle muuttuu maasulkusuureet mittariston 13 kaltaisiksi. Kuvasta 29 voidaan huomata kuinka sammutuslaitteen ottama virta ja johdon summavirta pienenevät vastuksen tullessa päälle.



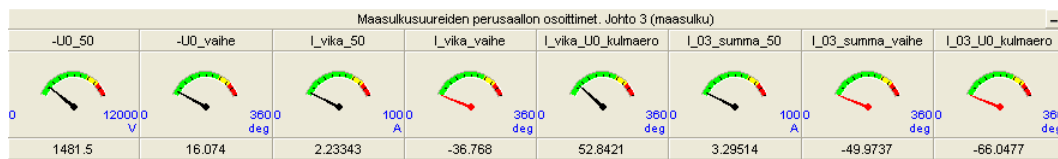
Kuva 29. Maasulun ja lisävastuksen vaikutukset johdon 3 summavirtaan (vihreä trendi), vikavirran tehollisarvoon (punainen trendi) ja sammutuslaitteen ottamaan virtaan (sininen trendi).

6.5.3 5000 Ω :n maasulku ylikompensoidussa verkossa



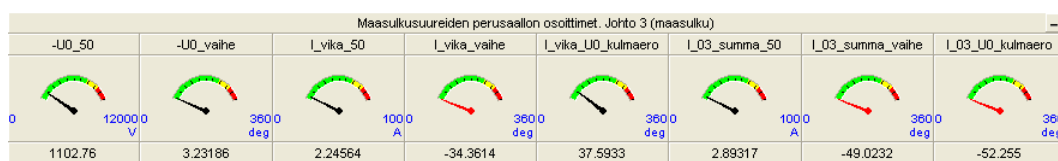
Kuva 30. 5000 Ω :n vikavastus 110 % kompensoidussa verkossa

Maasulku kytkettiin päälle ajanhetkellä $t=1,007$ s kuvan 30 mukaisessa verkossa. Lisävastustus on verkon terveessä tilassa pois päältä ja maasulun syntyessä vastus kytkeytyy päälle 0,5 s viiveellä.



Mittaristo 15. Maasulkusuureet ennen lisävastuksen kytkeytymistä

Vikapaikan nollajännite on 1,5 kV ja summavirran pätökomponentti on 1,33 A kaavan 9 mukaisesti. Summavirran ja nollajännitteen kulmaero on releen laukaisualueella.

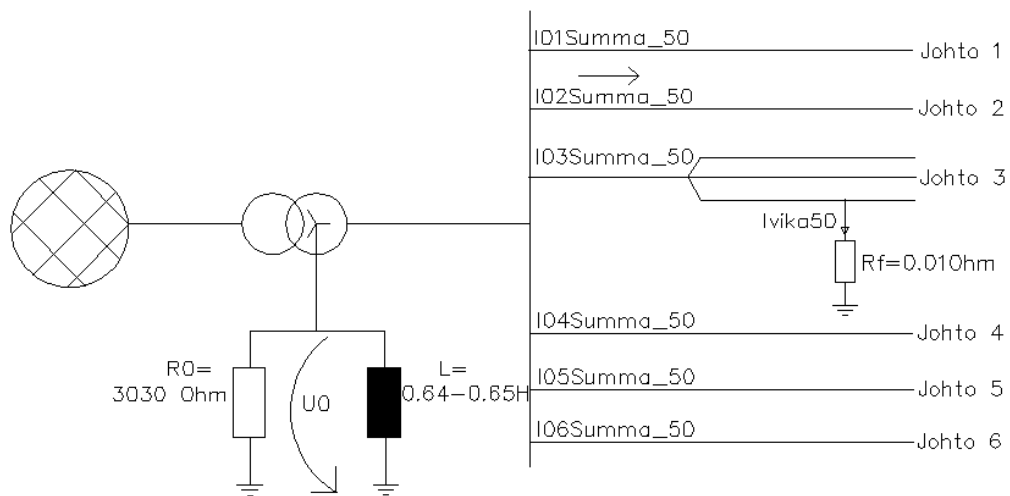


Mittaristo 16. Maasulkusuureet lisävastuksen ollessa kytkettynä

Vastuksen kytkeytyessä päälle tippuu nollajännite arvoon 1,1 kV. Summavirran pätökomponentti kasvaa puolestaan 0,44 A:lla arvoon 1,77 A. Summavirran ja nollajännitteen kulmaero säilyy releen laukaisualueella.

6.6 Simulointi sekaverkossa

Kuvan 31 mukaisen sekaverkon kompensointilaitteiston viritys perustuu aivan samaan menetelmään kuin kaapeliverkossa. Verrattuna kaapeliverkkoon on sekaverkon maakapasitanssi pienempi johtuen avojohdoista (taulukko 2 ja taulukko 3). Tästä johtuen sammutuslaitteisto on viritettävä uudelleen kaavojen 1 - 3 avulla. Mittariston 17 mukaan kompensoitavan maasulkuvirran suuruus on 60 A. Kaavan 2 avulla laskettu sammutuslaitteiston induktanssi on näin 0,64 H. Vuotohäviöitä kuvaavan resistanssin R_0 arvoksi saatiin 3030 Ω kaavan 1 mukaisesti.



Kuva 31. Sekaverkon kompensointilaitteiston virittäminen

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
12204.5	-31.9769	60.2953	57.3354	-89.3122	50.1745	57.1551	89.132

Mittaristo 17. Sekaverkon kompensoitavan maasulkuvirran suuruus

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
12059.2	-31.1084	5.95409	-32.1957	1.08726	11.713	269.065	300.173

Mittaristo 18. Maasulkuarvot, kun $L=0,64H$

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
12059.4	-31.1099	5.9549	-31.3067	0.196823	11.6338	269.299	300.409

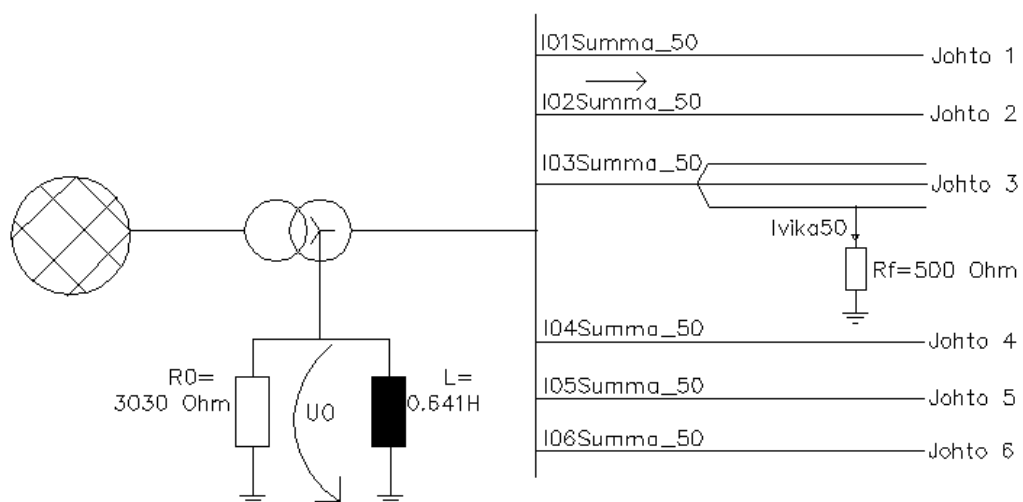
Mittaristo 19. Maasulkuarvot, kun $L=0,641H$

Arvolla 0,64 H sammutuslaitteisto on lähes resonanssiin viritetty (mittaristo 18). Pienellä hienosäädöllä kela virittyi resonanssiin mittariston 19 mukaisesti. Vika-

paikan virran suuruus oli 5,95 A ja kulma nollajännitteeseen nähden 0,19 astetta eli vikapaikan virta on lähes puhdasta pätövirtaa.

Sekaverkossa, joka siis sisältää avokaapelia, on hyvin yleistä, että verkon terveessä tilassa esiintyy nollajännitettä. Tässä simuloinnissa kyseinen nollajännite simuloitiin asettamalla yhteen pääkiskoston vaiheeseen kondensaattori maata vasten. Kondensaattorin suuruudeksi aseteltiin 122 nF:ia. Tällöin verkon terveen tilan nollajännite kohosi 936 V:iin eli 7,7 %:iin täyden maasulun nollajännitteestä.

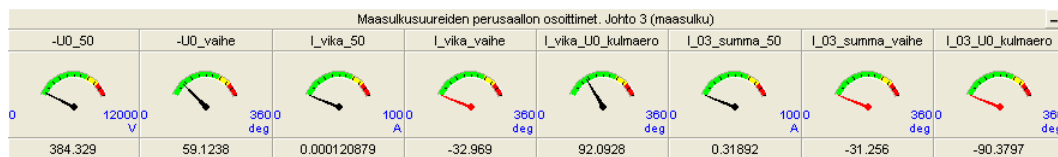
6.7 Lisävastuksen vaikutus täysin kompensoidussa sekaverkossa



Kuva 32. 500 Ω :n vikavastuksen vaikutus sekaverkossa

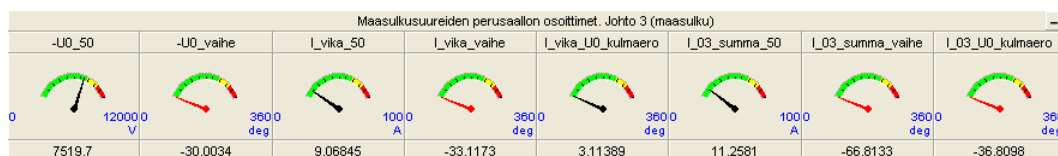
6.7.1 Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä

Tarkasteltiin verkon maasulun aikaisia ilmiöitä lisävastuksen ollessa jatkuvasti kytkettynä. Simuloinnit toteutettiin kuvan 32 mukaisessa verkossa. Maasulku simuloitiin alkavaksi ajanhetkellä $t=1,007 \text{ s}$. Koska sekaverkossa esiintyy myös terveessä tilassa nollajännitettä tuli tarkkailla, ettei vastus kuormitu liikaa ennen maasulun aikaista hetkeä.



Mittaristo 20. Maasulkusuureet ennen maasulun syntyä

Vastuksen ollessa jatkuvasti päällä, pienenee nollajännite jopa 550 V. Tällaisissa verkoissa lisävastuksen jatkuvalla päällepidolle löytyy selvä peruste. Verkon terveen tilan aikana vastuksen kuormitus oli ainoastaan 1 %:n nimellisestä, joten ylikuormitusta ei tapahtunut.

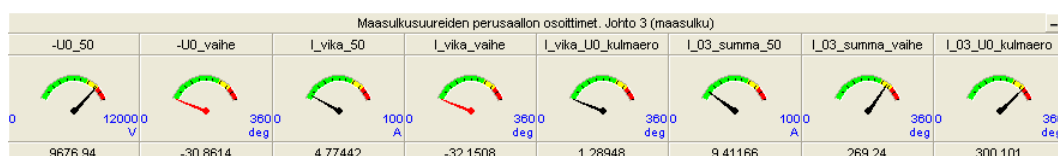


Mittaristo 21. Maasulkusuureet maasulun ollessa aktiivinen

Nollajännite nousi 7,5 kV:iin maasulun syntyessä. Summavirran pätökomponentin suuruus on 9 A ja kulmaero nollajännitteeseen on laukaisualueella.

6.7.2 Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä

Kytetään vastus viiveellä päälle ja tutkitaan valokaaren mahdollisuuksia sammua itsestään. Kytetään maasulku päälle ajanhetkellä $t=1.007$ s. Vastus kytkeytyy päälle 0,5 s viiveellä.



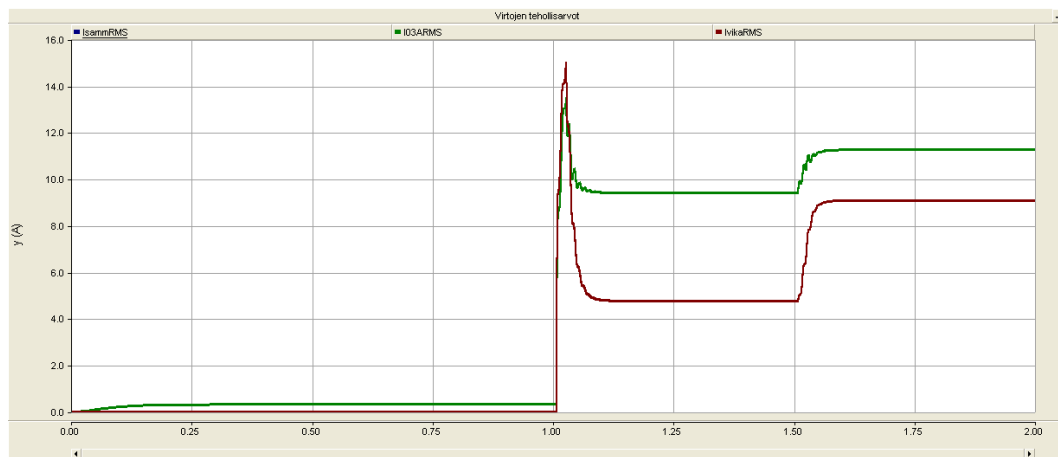
Mittaristo 22. Maasulkusuureet maasulun ollessa aktiivinen, mutta lisävastus irti kytkettynä.

Vikapaikan pätövirta on 4,7 A ennen kuin lisävastus kytkeytyy. Summavirran ja nollajännitteen kulmaero on 60 astetta. Lisävastuksen tullessa päälle muuttuu maasulkusuureet mittariston 21 mukaisiksi. Lisävastuksen vaikutus on siis 4,3A

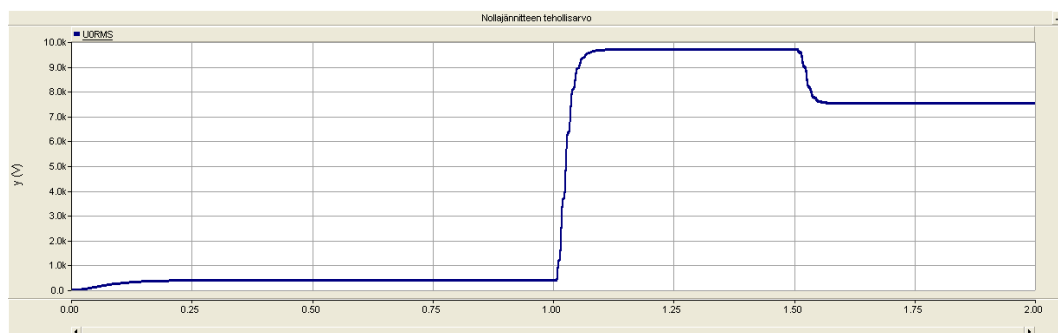
vikapaikan pätövirtaan. Lisävastus myös pienentää summavirran ja nollajännitteen välistä kulmaa.

6.7.3 Lisävastuksen poiskykytyminen maasulun syntyessä

Pidetään vastusta kytkeytyneenä verkon terveessä tilassa. Maasulun syntyessä ajanhetkellä 1.007 s vastus ohjautuu irti 0,5 s ajaksi. Näin vastusta ohjataan todella tehokkaasti tämän tyyppisessä jakeluverkossa.



Kuva 33. Vikavirran tehollisarvon (punainen trendi) ja summavirran(vihreä trendi) käyttäytyminen maasulun aikana

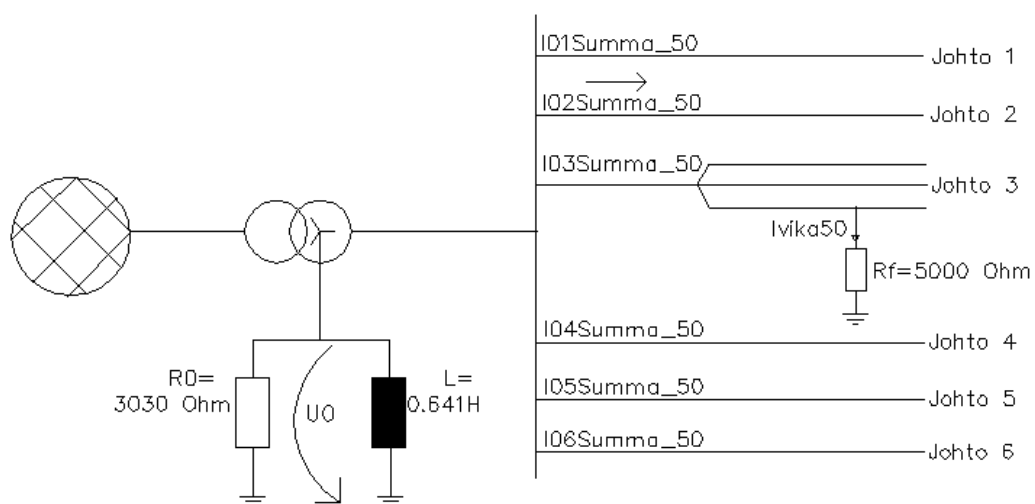


Kuva 34. Nollajännitteen muutokset maasulun aikana

Maasulun syntymiseen saakka vastusta on hyvä pitää päällä, jotta nollajännite pysyy mahdollisimman matalalla. Vastuksen kytkeytyessä pois ajanhetkellä $t=1,007$ s voidaan kuvasta 33 trendin avulla huomata, kuinka paljon pienempi vikavirta on

vastuksen ollessa pois kytkettynä. Kuva 34 havainnollistaa nollajännitteen tehollisarvon käyttäytymistä simuloinnin aikana. Vastuksen kytkeytyminen näkyy selvästi trendissä ajanhetkellä 1,507 s. Ajanhetkelle 1,007 s saakka maasulkusuureet ovat mittariston 20 mukaiset, ajanhetkellä 1,007 s – 1,507 s maasulkusuureet ovat kuten mittaristossa 22 ja ajanhetkestä 1,507 s eteenpäin tilanne muistuttaa mittaristoa 21.

6.7.4 5000 Ω:n maasulku täysin kompensoidussa sekaverkossa



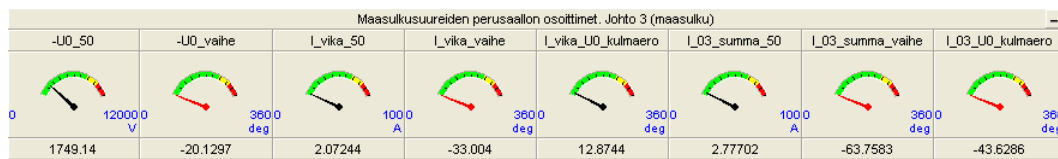
Kuva 35. 5000 Ω:n vikavastuksen vaikutus maasulkusuureisiin täysin kompensoidussa sekaverkossa

Maasulku simuloitiin kuvan 35 esittämässä verkossa alkavaksi kuten edellisissä simuloinneissa. Vastus kytetään 0,5 s viiveellä maasulun alkamisesta. Tarkasteltiin lisävastuksen vaikutusta pätövirran kasvattamiseen.

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
3538.02	-23.2757	1.71658	-34.3671	11.0914	3.66704	-86.2827	-63.007

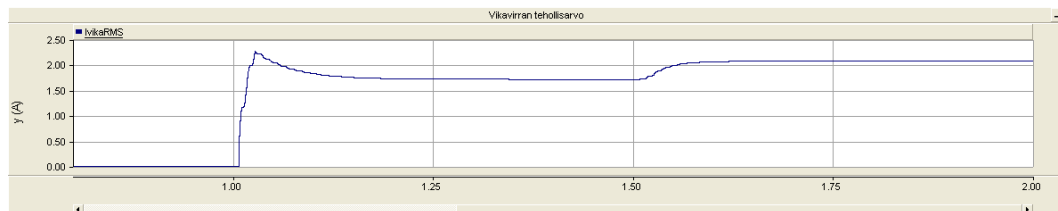
Mittaristo 23. Maasulkusuureet ajanhetkellä $t=1,3$ s

Vikapaikan virran suuruus on 1,66 A ja nollajännite 3,5 kV.



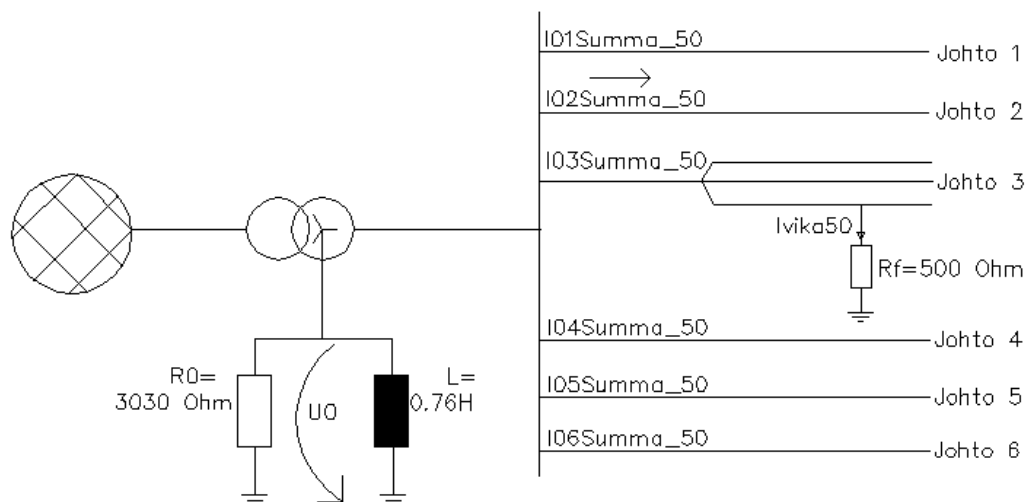
Mittaristo 24. Maasulkusuureet, kun lisävastus on kytkeytynyt päälle

Vikavirran suuruus kasvoi 2 A:iin eli kasvua tuli 0,33 A. Suunnattu suojaus toimii jälleen. Vikavirran tehollisarvo käyttäytyy kuvan 36 mukaisesti. Kuvan trendistä näkyy selvästi maasulun syntyhetki 1,007 s ja vastuksen kytkeytyminen ajanhetkellä 1,507 s.



Kuva 36. Vikavirran tehollisarvon käyttäytyminen 5000 Ω maasulun simuloinnissa

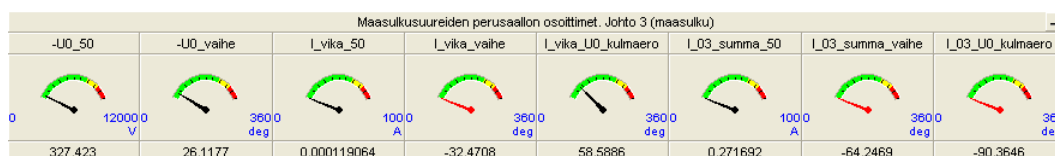
6.8 Alikompensoidun sekaverkon maasulku



Kuva 37. 500 Ω vikavastuksen vaikutus maasulkusuureisiin alikompensoidussa sekaverkossa.

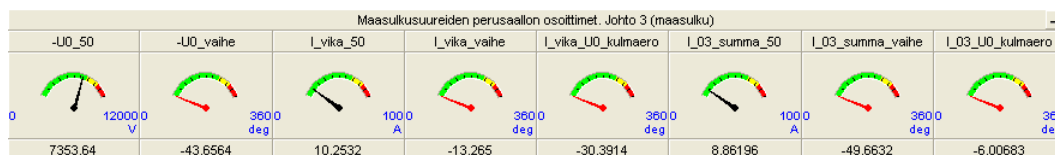
Verkko aseteltiin kuvan 37 mukaisesti alikompensoiduksi siten, että kompensointiasteeksi tuli 85 %. Verkon induktiivisen virran arvoksi tulee tällöin 51 A. Sammutuslaitteiston induktanssi aseteltiin arvoon 0,76 H. Edellä saadut arvot saadaan kaavojen 2, 3 ja 10 avulla.

6.8.1 Lisävastus jatkuvasti verkkoon kytkettynä



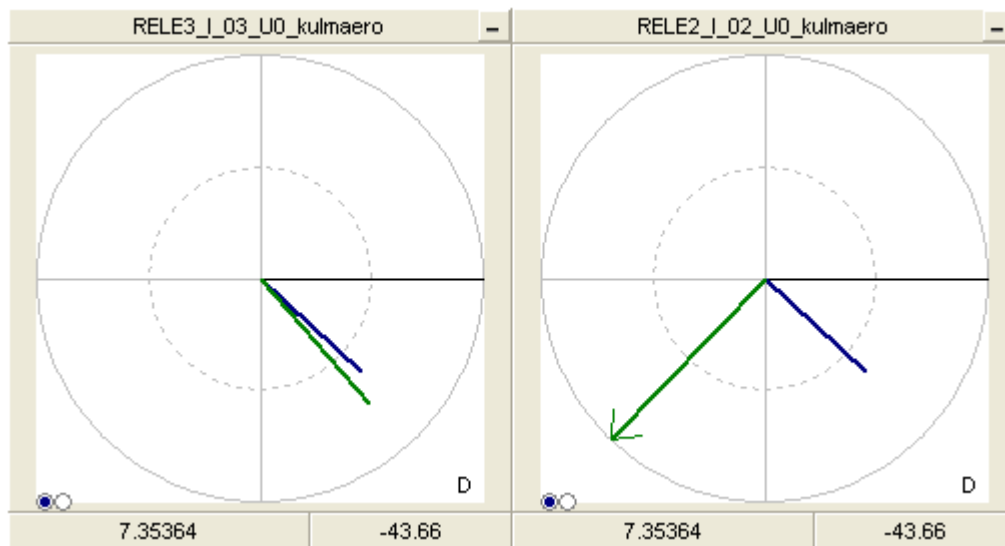
Mittaristo 25. Maasulkusuureet alikompensoidussa verkossa ennen maasulun syntymistä

Käyttämällä jakeluverkkoa hieman alikompensoituna ja pitämällä vastus jatkuvasti päällä voidaan nollajännitettä alentaa kaikkein tehokkaimmin. Nollajännite on nyt 327 V eli 60 V matalampi kuin täysin kompensoidussa sekaverkossa.



Mittaristo 26. Maasulkusuureet alikompensoidussa sekaverkossa

Vikavirran ollessa nollajännitettä jäljessä, tiedetään, että alikompensointi on onnistunut. Summavirran pätökomponentti on 8,8 A. Nollajännite tippui noin 200 V verrattuna täysin kompensoituu verkkoon. Suunnattu suojaus toimii releelle 3 kuvan 38 mukaisesti. Taustaverkon summavirta on 90 astetta nollajännitettä perässä.



Kuva 38. Alikompensoidun sekaverkon 500 Ω :n maasulku. Releiden näkemä kulmaero.

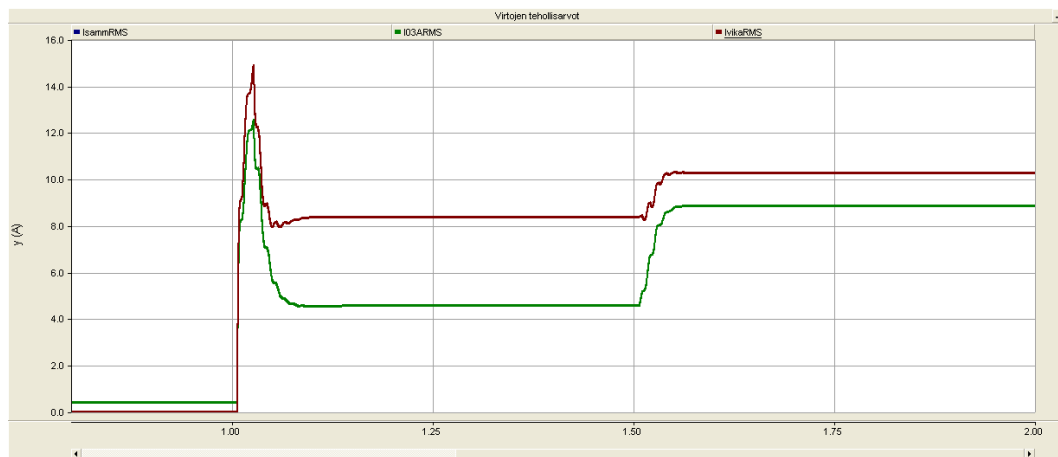
6.8.2 Lisävastuksen kytkeytyminen viiveellä

Käytettiin samoja aika-asetuksia kuin edellisissä simuloinneissa. Tarkasteltiin lisävastuksen vaikutusta vikavirran suuruuteen



Mittaristo 27. Maasulkusuureet ennen kuin lisävastus kytkeytyy päälle

Verrattuna mittariston 27 tilannetta vastaavaan tilanteeseen täysin kompensoidussa verkossa (mittari 22), on nolajännite noin 400 V pienempi. Pätökomponentti ennen lisävastuksen kytkentää on 4,5 A. Lisävastuksen vaikutus pätökomponenttiin on siis 4,3 A. Trendit kuvassa 39 osoittavat lisävastuksen vaikutuksen vikälähdön summavirtaa ja vikavirtaa.

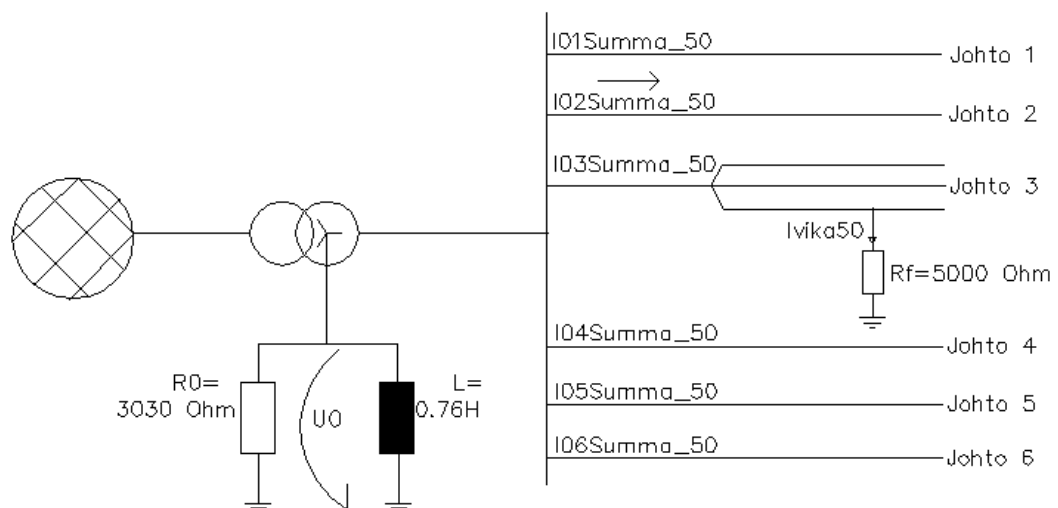


Kuva 39. Vikalähdön summavirran ja vikapaikan virran tehollisarvon kuvaajat

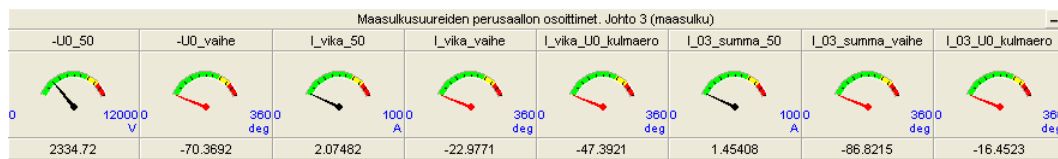
6.8.3 Lisävastuksen poiskytketyminen maasulun syntyessä

Pidettäessä vastusta päällä terveessä tilassa oli nollajännite 327 V. Vastus kestää hyvin tällaisen jatkuvan nollajännitteen. Maasulun syntyessä 4,5 A:in virta kulkee vikapaikasta, joka lisävastuksen päälle kytketyminen vaikutuksesta kasvaa melkein kaksinkertaiseksi. Tämä vastuksen ohjaustapa oli erittäin tehokas sekaverkossa.

6.8.4 5000 Ω :n maasulku alikompensoidussa sekaverkossa

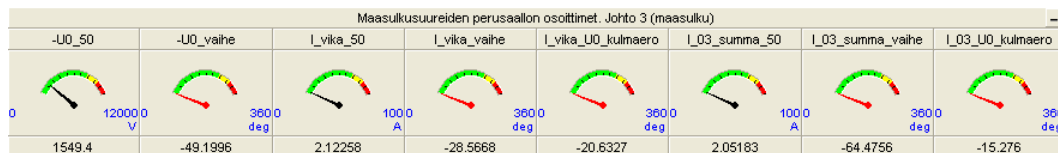


Kuva 40. 5000 Ω :n vikavastuksen vaikutus maasulkusuureisiin alikompensoidussa sekaverkossa.



Mittaristo 28. Maasulkusuureet ajanhetkellä 1,38 s. Maasulku syntynyt, mutta vastus ei vielä kytkeytynyt

Nollajännite on kuvan 40 mukaisessa alikompensoidussa verkossa 1,2 kV pienempi kuin täysin kompensoidussa verkossa 5000 Ω maasulussa ennen vastuksen kytkeytymistä. Summavirran pätökomponentin suuruus on 1,39 A eli 0,27 A pienempi kuin täysin kompensoidussa tilanteessa.

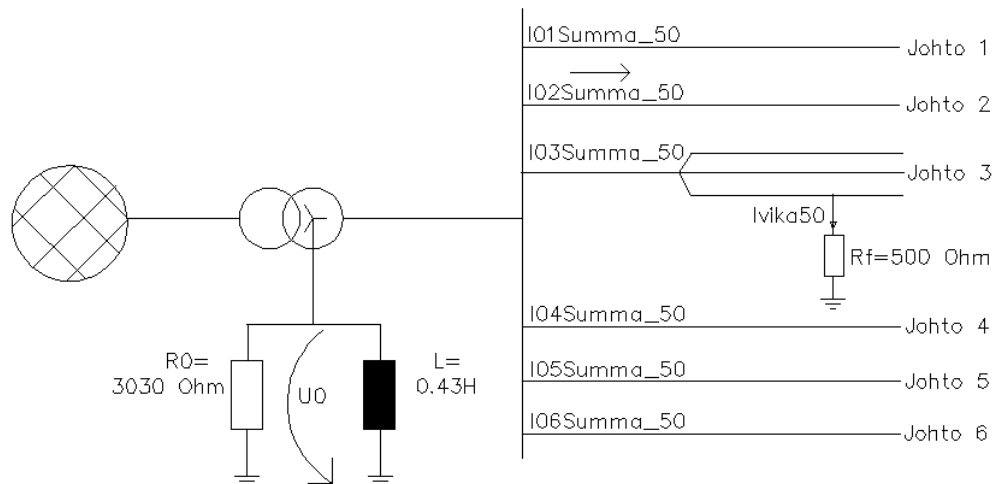


Mittaristo 29. Maasulkusuureet, kun lisävastus kytkeytynyt

Vikavastus kasvattaa pätökomponentin 1,97 A:iin. Vastuksen ansiosta virta kasvoi siis 0,58 A. Kulmaero on laukaisualueella.

6.9 Simulointi vinoviritetyssä sekaverkossa

6.9.1 Ylikompensoitu verkko



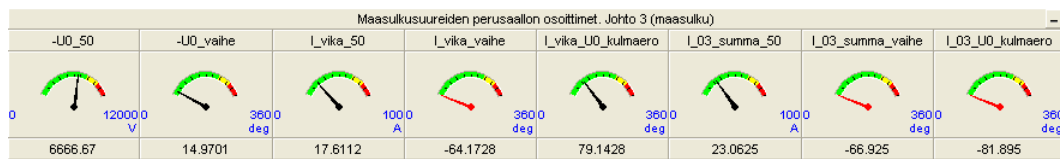
Kuva 41. 500 Ω vikavastuksen vaikutus 50 % ylikompensoidussa sekaverkossa

Simuloitiin kuvan 41 mukainen tilanne, jossa automaattisäätäjän virhetoiminto voisi viedä verkon kompensointiasteen vahvasti ylikompensoiduksi. Kompensointiasteeksi valittiin 150 %. Tarkasteltiin voiko suunnattu maasulkusuojaus toteutua tällaisessa ympäristössä. Maasulun vikaresistanssin suuruudeksi valittiin 500 Ω ja syntyhetkeksi $t=1,007$ s. Lisävastus kytketään päälle viiveellä maasulun syntyhetkestä.

Maasulkusuureiden perusaallon osoittimet. Johto 3 (maasulku)							
-U0_50	-U0_vaihe	I_vika_50	I_vika_vaihe	I_vika_U0_kulmaero	I_03_summa_50	I_03_summa_vaihe	I_03_U0_kulmaero
177.897	136.798	0.000122553	-31.3224	168.121	0.147593	46.3739	-90.4245

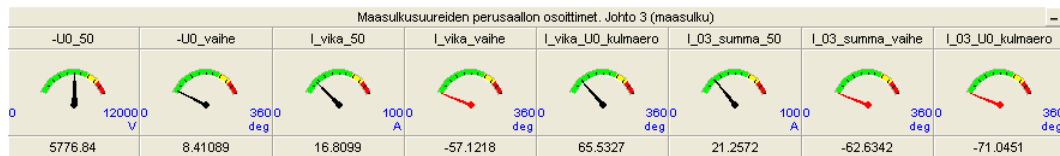
Mittaristo 30. Verkon suuret ennen maasulun syntyhetkeä

Vahvasti ylikompensoitu verkko pudottaa terveen tilan nollijännitettä täysin kompensoituun verkkoon verrattuna 759 V arvoon 177 V.



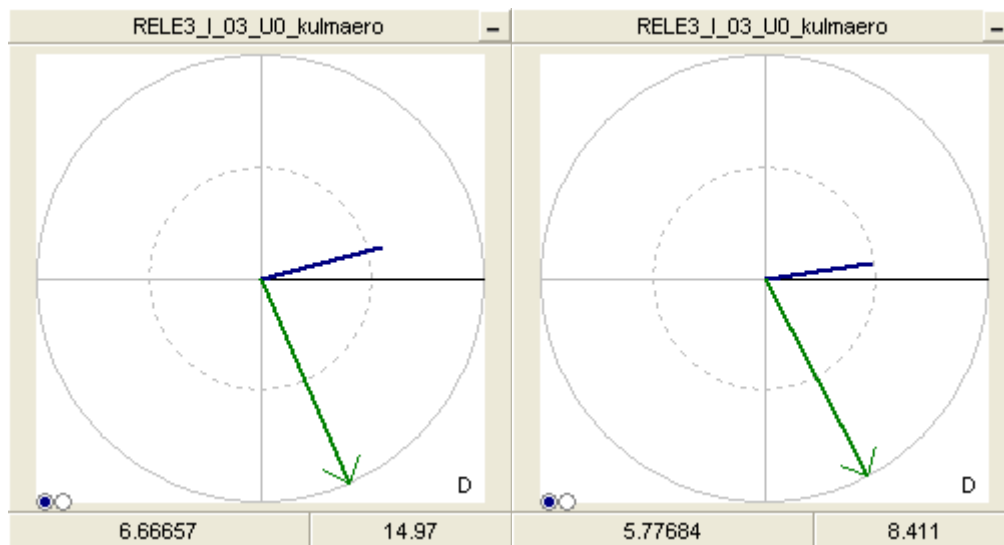
Mittaristo 31. Maasulun aikainen tilanne, vastus irti kytkettynä

Maasulun synnyttyä nousi nollajännite 6,6 kV:iin. Summavirran pätökomponentti oli 3,25 A. Summavirran kulmaero nollajännitteeseen nähden on -81,9 astetta. Mikäli rele toimii kulmamittauseriaatteella ja kulmaeroksi on aseteltu 80 astetta, ei johdonsuojarele irrota johtolähtöä. ABB:n releissä kulmaeroksi voidaan asettaa myös 88 astetta. Tällä asetteluarvolla rele laukaisisi jo ennen kuin vastus kytkeytyy.



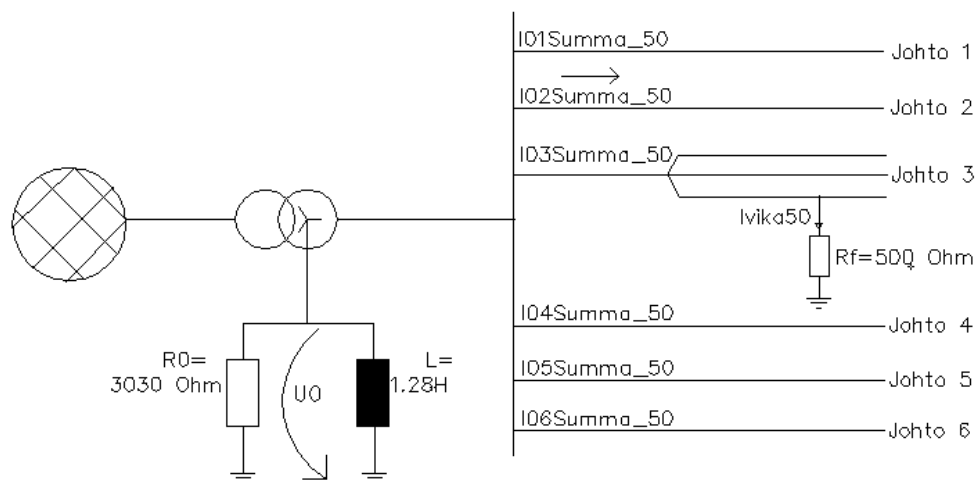
Mittaristo 32. Maasulunaikainen tilanne, kun lisävastus on kytkettynä

Tilanne korjaantui, kun lisävastus kytkeytyi päälle. Nollajännite tippui ja pätövirta nousi. Kulmaero pieneni 10,9 astetta ja täten kulmaeroksi tuli 71 astetta. Kuvasta 42 näkee jännite- ja summavirtaosoittimien muutokset lisävastuksen kytkeytymisen johdosta.



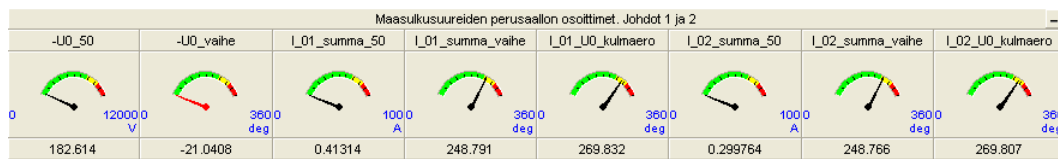
Kuva 42. Kulmaero ennen vastuksen kytkeytymistä (81 astetta) vasemmalla. Kulmaero vastuksen kytkeytymisen jälkeen (71 astetta).

6.9.2 Alikompensoitu verkko



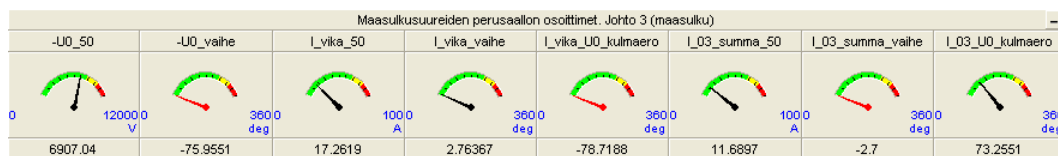
Kuva 43. 500 Ω vikavastuksen vaikutus 50% alikompensoidussa sekaverkossa

Automaattisäätäjän virhetoiminto voi tietysti myös siirtää verkon hyvin alikompensoiduksi, mitä kuva 43 esittää. Verkon kompensointiasteeksi aseteltiin 50 %. Seurattiin jälleen miten suunnattu maasulkusuojaus voidaan toteuttaa.



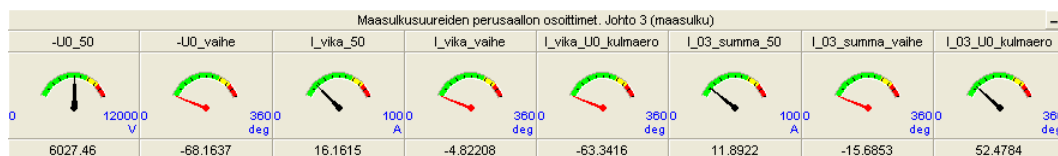
Mittaristo 33. Verkon suureet ennen maasulun syntymistä

Nollajännitteen suuruus on yhtä suuri kuin 50 % ylikompensoidussa verkossa.



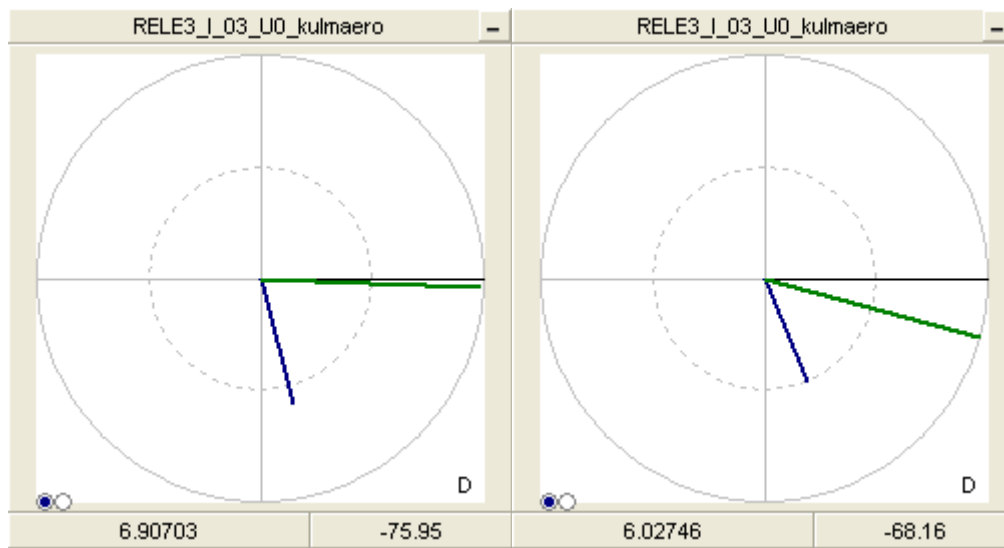
Mittaristo 34. Verkon maasulkusuureet, lisävastus irti kytkettynä

Summavirran pätökomponentin suuruus ennen lisävastuksen kytkeytymistä on 3,36 A eli samaa suuruusluokkaa kuin 50 % ylikompensoidussa verkossa. Summavirran ja nollajännitteen kulmaero on laukaisualueella, joten selektiivisyys toteutuu laukaisun suhteen.



Mittaristo 35. Verkon maasulkusuureet, lisävastus päälle kytkettynä

Ohjattaessa vastus kiinni, pienenee kulmaero 52 asteeseen. Virran pätökomponentti puolestaan kasvaa 7,24 A:iin. Verrattuna ylikompensoituu verkkoon, on alikompensoidussa verkossa summavirran kulma edellä nollajännitettä kuvan 44 mukaisesti.



Kuva 44. Kulmaero ennen vastuksen kytkeytymistä (73 astetta) vasemmalla. Kulmaero vastuksen kytkeytymisen jälkeen (52 astetta) oikealla.

7 YHTEENVETO

Maasulun sammutus kompensointikelan avulla on ollut tunnettu jo 1920 – luvulta lähtien keksijänsä Waldemar Petersenin toimesta. Kuitenkin vasta viime vuosikymmenen aikana kompensointi on alkanut yleistymään vauhdilla. Tästä johtuen myös kompensointiin liittyvät ongelmat ovat alkaneet hahmottua paremmin. Tutkimuksia ja kokeita aiheeseen liittyen on tehty, jotka osaltaan vahvistavat aiheeseen liittyvää teoriaa, mutta samanaikaisesti myös riitelevät teorian kanssa.

Lisävastuksen ohjaus on eräs mielenkiintoinen aihe koskien maasulun sammutusta. Valittuihin ohjaustapoihin sähköyhtiöissä on merkittävästi vaikuttaneet kokemukseräiset tiedot. Tietyt sähköyhtiöt ohjaavatkin vastustaan täysin sen perusteella miten muualla on hyväksi havaittu. Tässä työssä onkin pyritty selvittämään perusteita eri ohjaustavoille.

PSCAD- simulointimallissa pyrittiin mallintamaan mahdollisimman realistisia maasulkutilanteita jakeluverkossa. Havaitut ilmiöt ja saadut mittatulokset tukevat kirjallisuudesta saatavaa teoriaa. Tulee kuitenkin muistaa, että kyseessä on simulaattori ja täten todellisuudessa ilmiöt saattavat poiketa jonkin verran saaduista tuloksista. Kuitenkin simuloinnissa saatavat tulokset luovat perustan niille ohjaustavoille, joita sähköyhtiöt, varsinkin Suomessa, tänä päivänä käyttävät. Ehkä suurimpana ristiriitana todellisuuden ja simuloinnin välillä syntyy kuitenkin lisävastuksen vaikutuksesta valokaaren sammumiseen. Teoriassa on useasti väitetty, että lisävastuksen kytkeytyminen vaikeuttaa valokaaren sammumista. Simuloinnit myös selvästi osoittavat, että lisävastuksen kytkeytyminen lisää pätövirran suuruutta vikapaikassa ja täten oletetaan sen vaikeuttavan sammumisolosuhteita. Kuitenkin eräiden verkkokokeiden ja viimeaikaisten kokemusten perusteella ei voida osoittaa, että lisävastuksen kytkeytyminen vaikeuttaisi valokaaren sammumista. Tämä kokemus voi periaatteessa helpottaa tulevaisuudessa vastuksen ohjausta huomattavasti. Vastuksen ohjaukseen vaikuttaa tietysti myös sähköturvallisuusmääräykset. Esimerkiksi Ruotsissa, missä pieniresistanssiset viat tulee avojohtoverkosta poistaa 5 s aikana, pidetään vastusta aina päällä, jotta relesuojaus varmasti toimisi.

Nollajännitteen pienentämisessä lisävastus toimii tehokkaasti. Mikäli avojohtoverkon kapasitanssiepäsymmetrian poistaminen vaiheita vuorottelemalla tulee sähköyhtiöille kalliiksi, on lisävastuksen jatkuva päällä pitäminen hyvä ratkaisu. Puhtaassa kaapeliverkossa lisävastuksen jatkuvalla kytkeytymiselle ei löydy perusteita. Tämä osoitettiin myös simuloinneissa. Tilanne saattaa jopa vain pahentua, mikäli vastusta pidetään jatkuvasti päällä, koska maadoituskuristimen automaattisäätö edellyttää pientä epäsymmetriaa. Kytkemällä vastus päälle saattaa kaapeliverkon jo ennestään pieni nollajännite pienentyä liian pieneksi ja täten automaattisäätö voi alkaa heilumaan säätöalueella.

Selektiivisen suojauksen kannalta ei havaittu minkäänlaisia ongelmia, vaikka verkot olivat 15 % yli- tai alikompensoituja. Mikäli kompensointilaitteistoon tuli häiriö ja jakeluverkosta tuli huomattavasti ali- tai ylikompensoitu, ei suojauksen selektiivisyydestä voitu olla täysin varmoja. Lisävastuksella oli kuitenkin positiivinen vaikutus tähän. Nimittäin vastuksen kytkeytyminen pienensi molemmissa tapauksissa kulmaeroa ja näin selektiivisen suojauksen toiminta varmentui.

Simuloinnit havainnoivat myös erinomaisesti vikaresistanssin suuruuden vaikutuksesta lisäresistanssin lisäämään jäännösvirtaan. Jopa sellaisiin harhakuvitelmiin törmäsin työn aikana, että vastuksen uskottiin aina lisäävän vikavirtaa suurimmalla mahdollisella arvolla vastuksen kytkeydyttyä riippumatta siitä, kuinka suuri vikaresistanssi oli. Tässä työssä käytettiin 8,5 A:n lisävirtaa, kun kyseessä oli täysi maasulku. Hyvin useasti käytetään 5 A:n lisävirtaa, mikä tarkoittaa, että lisävastuksen synnyttämä lisävirta on pienempi kuin tässä työssä esitetty.

Tätä opinnäytetyötä on tarkoitus tulevaisuudessa käyttää asiakkaiden perehdyttämisessä ja koulutuksessa. Koska maasulun sammutus on melko uusi asia vielä monelle sähköyhtiölle, on tärkeää käydä läpi kompensoidun jakeluverkon maasulun aikaisia ilmiöitä.

LÄHTEET

- /1/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita, 2000.
- /2/ Energiamarkkinavirasto, Julkaisu 1/2003, Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa, 2003.
- /3/ Energiamarkkinavirasto, keskeytystilasto 2008.
- /4/ Energiamarkkinavirasto, Julkaisu 1/2005, Sähköverkon kehittämisvelvoitteen arviointi käyttövarmuuden näkökulmasta, 2005.
- /5/ Hartikainen, Vilho 13.4.2010. E.ON Kainuun sähköverkko. Haastattelu.
- /6/ Heino, Göran - Ingman, Stefan 22.4.2010. Vaasan sähköverkko. Haastattelu.
- /7/ Jokinen, Kari. Teollisuuden sähköverkot, opetusmateriaali.
- /8/ Järvensivu, Juha-Pekka - Vanhanarkaus Jouni 7.4.2010. Tampereen sähköverkko. Haastattelu.
- /9/ Lakervi, Erkki - Partanen, Jarmo. Sähkönjakelutekniikka, 2008.
- /10/ Mäkinen, Olavi. Relesuojaus, opetusmateriaali.
- /11/ Mäkinen, Olavi. Sähköverkot, opetusmateriaali.
- /12/ Mörsky, Jorma. Relesuojaustekniikka, 1992.
- /13/ Nikander, Ari. Licensiaattityö, Keski-jänniteverkon maasulkuvirran kompensoinnin kehittäminen maasulkukokeiden ja EMTP-verkkomallin avulla, 1998.
- /14/ Paavola, Markku. Halme, Heikki. Sähkölaitosten suojareleet, 1979.
- /15/ Sandvik, Jan 17.3.2010. VEO Academy. Koulutustilaisuus.

- /16/ SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset. Suomen standardisoi-
misliitto 2001.
- /17/ Sjöqvist, Olle 6.4.2010. Trench-laitteistokoulutus. Koulutustilai-
suus.
- /18/ Taimisto, Samuli 1993. Sähkö-ja telelehti, Maasulkuvirran kom-
pensointi keskijänniteverkossa.
- /19/ Viström, Krister 16.4.2010. Uumajan energia. Haastattelu.
- /20/ Vuosikatsaus 2008, Vaasa Engineering Oy.