

Kimmo Pylväs

**KAAPELIVERKON MAASULKUVIRRRAN
KOMPENSOINTI**

**Opinnäytetyö
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2015**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieskan yksikkö	Aika Huhtikuu 2015	Tekijä/tekijät Kimmo Pylväs
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi KAAPELIVERKON MAASULKUVIRRAN KOMPENSOINTI		
Työn ohjaaja Kaarlo Jylhä-Ollila	Sivumäärä 48 + 14	
Työelämäohjaaja Risto Pirinen		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kevään 2015 aikana kustannustehokkain tapa toteuttaa kasvava maasulkuvirran kompensoinnin tarve keskijänniteverkossa. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy. Työn sisältöön kuului toimeksiantajan vastuualueeseen kuuluvat keskijänniteverkot ja sähköasemat.</p> <p>Toimeksiantajalle täytyi selvittää nykyiset kompensointilaitteet ja niissä olevat kapasiteetit, selvitys täytyi tehdä myös tulevista maasulkuvirroista. Näiden pohjalta pystyttiin laskemaan tulevat kompensointilaitteet ja niistä aiheutuvat kustannukset.</p> <p>Opinnäytetyössä tehtiin laskelmia maasulkuvirran määrittämiseksi, jonka helpottamiseksi kehitettiin Microsoft Excel-pohjalle laskentatyökalu. Laskelmia tehtiin myös hintojen osalta, keskitetyille ja hajautetuille kompensoinneille.</p> <p>Opinnäytetyön aikana tutustuttiin laajasti sähköverkko kirjallisuuteen ja internet-lähteisiin, joiden pohjalta saatiin kattavasti tietoa maasulusta ja kompensoinnista.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin kokonaiskuva maasulkuvirrasta ja sen kompensoinnista keskijänniteverkossa. Lopputuloksena löydettiin myös kustannustehokkain ratkaisu maasulkuvirran kompensoimiseen.</p>		

Asiasanat kompensointi, kustannustehokas, maasulkuvirta

ABSTRACT

Unit Ylivieska unit	Date April 2015	Author/s Kimmo Pylväs
Degree programme Degree programme in electrical engineering		
Name of thesis THE EARTH FAULT CURRENT COMPENSATION IN THE CABLE NETWORK		
Instructor Kaarlo Jylhä-Ollila		Pages 48 + 14
Supervisor Risto Pirinen		
<p>The Aim of this study was to determine the most cost-effective way to implement a growing need for ground-fault compensation in medium voltage network during the spring 2015. The thesis was commissioned by the Oulu Regional Electricity Network Ltd. The content of the work consisted of the principal responsibilities of the medium voltage networks and substations.</p> <p>The client had to find out the current compensation devices and their capacity. In addition, the future earth fault current had to be studied. Based on these, it was possible to calculate the future compensation devices and their cost.</p> <p>The thesis was carried out to determine the earth fault current calculations. In order to facilitate this a calculation tool was developed using Microsoft excel. Calculations were also made in terms of prices, both for centralized and decentralized compensation.</p> <p>During the thesis literature on electric grids as well as Internet sources were studied extensively, which provided comprehensive information about the earth fault and compensation systems.</p> <p>As the final result an overall picture of the earth fault current and compensating it in a medium-voltage network was created. As the end result also the most cost effective solution for compensating the earth fault current was found.</p>		

<p>Key words Compensation, Cost-effective, Earth fault current</p>

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

C	Verkon kapasitanssi vaihetta kohti
C_j	Vaurioituneen lähdön maakapasitanssi
C_o	Johtojen yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden
C_{oj}	Suojattavan johdon maakapasitanssi vaihetta kohden
f	Taajuus
I_C	Verkon kapasitanssien kautta kulkeva virta
I_e	Verkon kapasitiivinen kokonismaasulkuvirta suorassa maasulussa
I_{ef}	Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta
I_{ej}	Johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa
I_{efp}	Vikavirran päätökomponentti
I_f	Maasulkuvirta
I_L	Sammutuskuristimen induktanssin kautta kulkeva virta
I_o	Nollavirta
I_r	Kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin aiheuttama päätövirta suorassa maasulussa
I_{rj}	Lähdön häviöiden aiheuttama päätövirta
k	Asennuksen mukaan määräytyvä kerroin
K	Kompensointiaste
kV	Kilovoltti
kVA	Kilovolttiampeeri
l	Yhteenlaskettu johto pituus
L	Sammutuskuristimen induktanssi
OSS	Oulun Seudun Sähkö
p	Maasulkuprosentti
R	Sammutuskuristimen resistanssia ja mahdollista lisävastus kuvaava resistiivinen osa

R_f	Vikaresistanssi
R_m	Maadoitusresistanssi
$R_{m,max}$	Suurin sallittu maadoitusresistanssi
R_o	(Sammutuskuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin) Tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi
t_f	Maasulun kesto aika
U	Pääjännite
U_a	Askeljännite
$U_{L1,L2,L3}$	Kolmivaihejärjestelmän L1, L2 tai L3 vaihejännite
U_m	Maadoitusjännite
U_o	Nollajännite eli tähtipistejännite
U_{tp}	Kosketusjännite (U_k)
U_v	Vaihejännite
ω	Kulmataajuus
ωL	Sammutuskuristimen reaktanssi
φ	Vaihekulma
ΣI_v	Vaihevirtojen summavirta

ESIPUHE

Mielenkiintoisesta ja kehittävästä opinnäytetyön aiheesta haluan kiittää Oulun Seudun Sähköä. Erityiskiitokset haluan esittää käytönjohtaja Risto Piriselle, lehtori Kaarlo Jylhä-Ollilalle sekä yliopettaja Jari Halmeelle neuvoista ja opastuksesta, joita matkan varrella olen saanut. Lisäksi haluan kiittää läheisiäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta opiskeluni aikana, ilman teitä urakka olisi ollut raskaampaa.

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
ESIPUHE
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 MAASULKU	2
3 MAADOITUSJÄNNITE, KOSKETUSJÄNNITE	4
3.1 Standardi SFS 6001	5
3.2 Sähköturvallisuusmääräykset (StM)	7
4 MAASULKUSUOJAUKSEN TOTEUTUS	9
4.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen mittaus	9
4.2 Maasulkusuojauksen suunnittelu	12
5 MAASULKU JA VERKON MAADOITUSTAVAT	14
5.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen	14
5.1.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa	14
5.1.2 Maasulku sammutetussa verkossa	20
6 MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI	26
6.1 Keskitetty kompensointi	27
6.2 Hajautettu kompensointi	28
6.3 Kompensoinnin hyödyt ja haitat	29
6.4 Kompensointilaitteisto	30
6.4.1 Maadoitusmuuntaja	30
6.4.2 Sammutuskuristin	31
6.4.3 Sammutuskuristimen säätäjä	32
6.4.4 Rinnakkaisvastus	32
7 MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI OULUN SEUDUN SÄHKÖ - VERKKOYHTIÖSSÄ	33
7.1 Nykytila-analyysi	33
7.2 Tulevan tilan analyysi	35
7.3 Kompensointilaitteet ja kustannukset	37
7.3.1 Keskitetty kompensointi	38
7.3.2 Hajautettu kompensointi	38
7.3.3 Keskitetty ja hajautettu kompensointi	39
7.3.4 Yhteenveto kompensoinneista	40
8 LASKENTATYÖKALU	43
8.1 Tavoite	43
8.2 Käyttö	43
8.2.1 Maasta erotettu verkko	43
8.2.2 Sammutettu verkko	44
8.2.3 Releen asetteluarvot	44

9 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
LÄHTEET	47
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Maasulkutapauksia	2
KUVIO 2. Maasulkuvirran reitti maasta erotetussa verkossa	2
KUVIO 3. Keskeytysmäärien osuudet lähteittäin	3
KUVIO 4. Askel- ja kosketusjännitteen synty maasulun aikana	5
KUVIO 5. Sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona	6
KUVIO 6. Maasulun ilmaisuun käytettyjä mittamuuntajakytkentöjä	10
KUVIO 7. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi	11
KUVIO 8. Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa	14
KUVIO 9. Jännitteet yksivaiheisen maasulun aikana maasta erotetussa verkossa	19
KUVIO 10. Tähtipistejännite maasta erotetussa verkossa erilaisilla vikaresistanssin arvoilla	20
KUVIO 11. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku	21
KUVIO 12. Maasulkupiirin sijaiskytkentä sammutetussa verkossa	22
KUVIO 13. Kompensoinnin toteuttamistavat	26
KUVIO 14. Maadoitusmuuntajan ja kompensointikelan kytkentä	27
KUVIO 15. Maadoitusmuuntaja	30
KUVIO 16. Sammutus- ts. kompensointikuristin	31
KUVIO 17. Swedish Neutral säätäjä	32
KUVIO 18. Kompensoinnin kokonaiskustannukset	41
KUVIO 19. Kompensoinnin kustannukset €/A	41
KUVIO 20. Jakelumuuntajien vaikutus laitekustannuksiin	42
TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Sallittujen kosketusjännitteiden arvot laukaisuajan funktiona	6
TAULUKKO 2. Maadoitusjännitteen enimmäisarvot maadoitusryhmittäin	8
TAULUKKO 3. 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja	17
TAULUKKO 4. Paituri -sähköaseman johto- ja johtojenpituudet	33
TAULUKKO 5. Paituri -sähköaseman maasulkuvirrat johtolähdöittäin	34
TAULUKKO 6. Paituri -sähköaseman maasulkuvirta arvoja eri vikaresistanssin arvoilla	34
TAULUKKO 7. Kompensoinnin pienentämä maasulkuvirta Paituri -sähköasemalla	35
TAULUKKO 8. Verkonrakennusstrategia kunnittain	36
TAULUKKO 9. Paituri -sähköaseman verkonrakennusstrategian mukaiset maakaapeloinnit	37
TAULUKKO 10. Keskitetysti toteutettu kompensointi	38
TAULUKKO 11. Hajautetusti toteutettu kompensointi	39
TAULUKKO 12. Keskitetysti ja hajautetusti toteutettu kompensointi	40

1 JOHDANTO

Maasulkutilanne tai maasuluista alkaneet viat ovat merkittävin vian aiheuttaja Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkossa. Maasulun aiheuttaja on tavallisesti luonnonilmiö tai eläin. Suurin osa maasuluista on kuitenkin ohimeneviä, jotka selviävät jälleenkytkentöjen avulla.

Vuonna 2013 astui voimaan uusi sähkömarkkinalaki, joka asettaa entistä haasteellisemmat toimintavarmuusvaatimukset sähköyhtiöille. Kiristyneiden vaatimusten myötä sähköyhtiöt joutuvat lisäämään jakeluverkon maakaapelointia. Maakaapeloinnit kasvattavat maasulkuvirtaa hyvin voimakkaasti verrattaessa avojohdoin. Avojohtoon tuottama maasulkuvirta on noin 0,07 A/km, kun maakaapeleiden tuottama virta on noin 2,5 A/km. Maakaapeleiden maakapasitansseissa syntyvä maasulkuvirta voidaan kompensoida esim. W. Petersenin vuonna 1916 kehittämällä sammutuskuristimella (Petersenin kela), jolla verkkoon tulevat maasulkuvirratt voidaan kompensoida lähelle nollaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kustannustehokkaimmat tavat toteuttaa kasvava maasulkuvirran kompensoinnintarve Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkossa. Työn perustana on edellisvuonna valmistunut verkonrakennusstrategia ja investointiohjelma, jolla täytettäisiin sähkömarkkinalain toimintavarmuusvaatimukset siirtymäkauden loppuun mennessä (vuoden 2028 loppuun). Sähköyhtiö lisää maakaapelointia noin 175 km siirtymäkauden aikana, mikä kasvattaa maasulkuvirtaa 440 ampeeria.

Opinnäytetyön alussa tutkitaan maasulkutilanteen syntymistä ja maasulkuvirran kompensointia teoreettisesti. Teoreettisessa osassa käsitellään myös keskijänniteverkon maadoitustapoja, koska nämä ovat yhteydessä maasulkuvirran kompensoimiseen.

Opinnäytetyön loppuosassa tarkastellaan Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkon nykytilannetta maasulkuvirran ja kompensoinnin kannalta. Loppuosassa selvitetään myös kasvava maasulkuvirta ja niistä aiheutuvat kompensoinnintarpeet, näiden pohjalta lasketaan eri kompensointi ratkaisuille kustannukset. Kustannuksien kautta löydetään Oulun Seudun Sähkölle sopiva kompensointi ratkaisu.

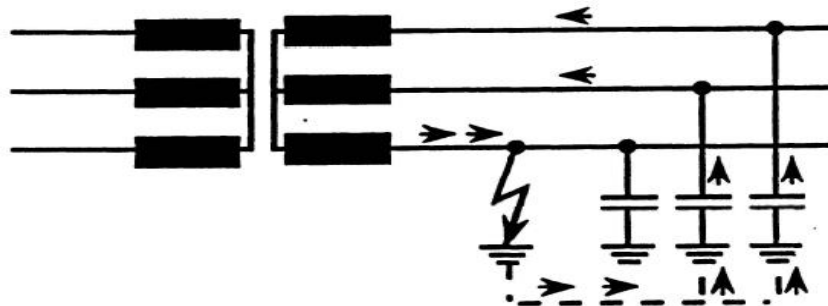
2 MAASULKU

Maasululla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa äärijohtimen ja maan tai muun johtavan materiaalin välille muodostuu johtava yhteys. Maasulkuja esiintyy yksi- tai monivaiheisena. Jos monivaiheinen vika tapahtuu samassa kohtaa järjestelmää, on kyseessä kaksi- tai kolmivaiheinen maaosulku. Jos viat taas ovat eri kohdassa järjestelmää, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku (KUVIO 1). Yleisin vika on yksivaiheinen maasulku. (Elovaara & Haarla 2011,340.)



KUVIO 1. Maasulku tapauksia (Partanen 2011)

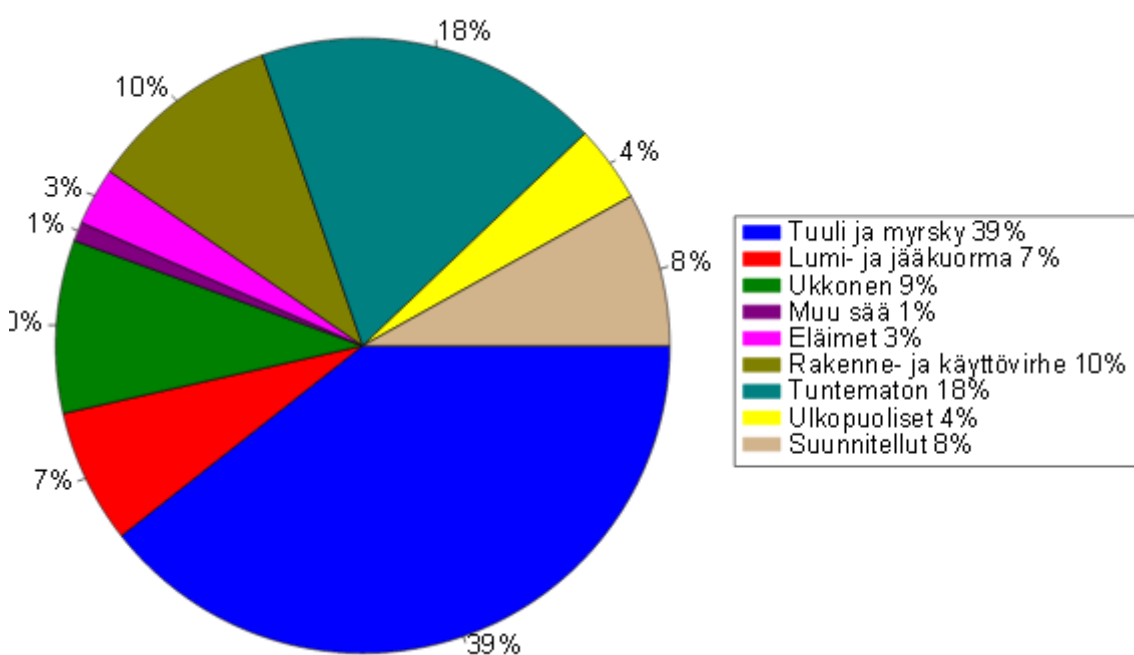
Vikatilanteessa (esim. eristysvika) virralle muodostuu yhteys maahan, ja ns. maasulkuvirta I_f alkaa virrata maadoitustavasta riippuen kohti muuntajaa (KUVIO 2).



KUVIO 2. Maasulkuvirran reitti maasta erotetussa verkossa (Partanen 2011)

Yleisimmät viat muodostuvat keskijänniteverkon maasuluista tai vioista jotka ovat alka-
neet maasuluista. Näistä suurin osa on yksivaiheisia maasulkuja. Keskijänniteverkkojen
maasulut ovat yleisempiä avojohto-osuuksilla. Yhdeksän kymmenestä on ohimeneviä maa-
sulkuja, jotka selviävät joko pikajälleenkytkentöjen tai aikajälleenkytkentöjen avulla.
(Energiateollisuus 2013.)

Maasulun aiheuttaja on yleensä luonnonilmiö, esimerkiksi puunoksien, eläinten tai sala-
man sähköjohdosta maahan aiheuttama valokaari tai sähköpurkaus (KUVIO 3). (Energi-
teollisuus 2013.)



KUVIO 3. Keskeytysmäärien osuudet lähteittäin (Energi.fi 2013)

3 MAADOITUSJÄNNITE, KOSKETUSJÄNNITE

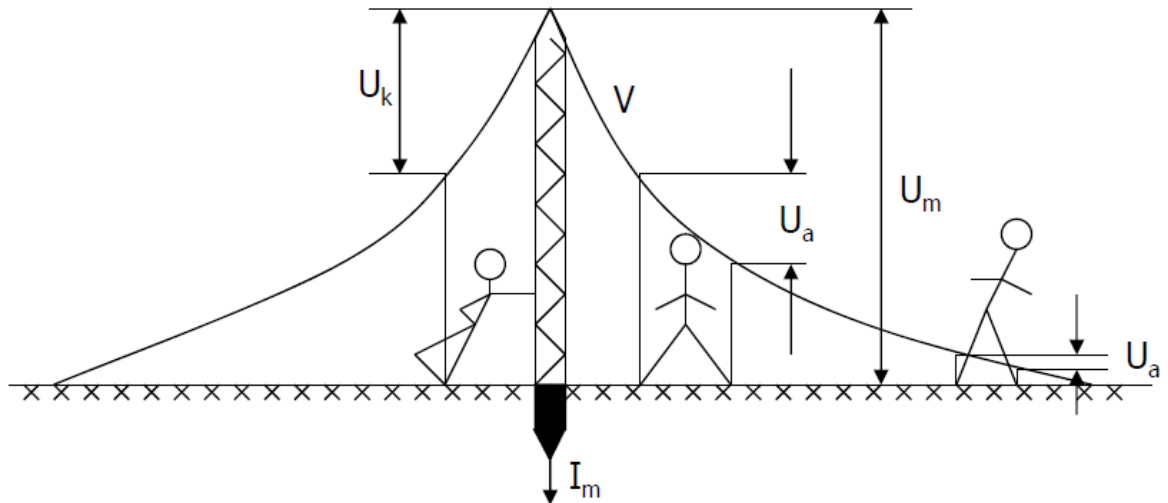
Maasulkusuojausta toteuttaessa on huomioitava sille asetetut kosketusjännitteen raja-arvot ja aika, minkä aikana suojausten on toimittava. Tällä varmistetaan, ettei käyttäjille ja ulkopuolisille aiheudu vaaraa.

Yli 1000 V järjestelmän suunnittelussa käytetään selvyuden vuoksi kosketusjännitearvoja. Standardissa SFS 6001 on ilmoitettu enimmäisarvot kosketusjännitteelle. Näitten raja-arvojen perusteena on kuinka vaarallista sähkö on ihmiselle, ja näistä syistä raja-arvot ovat riippumattomia verkon käyttöjännitteestä. Suomessa noudatettiin aikaisemmin sähköturvallisuusmääräystä, joka antoi sallitut raja-arvot maadoitusjännitteelle kosketusjännitteen kannalta. Näihin arvoihin vaikutti käyttöjännite ja millä todennäköisyydellä ihminen liikkuu tarkasteltavan kohteen lähellä ja kuinka usein. Sähköturvallisuusmääräykset on korvattu standardeilla, jotka perustuvat pääasiassa maailmanlaajuisiin (IEC) tai eurooppalaisiin (CENELEC) standardeihin. (Elovaara & Haarla 2011,429.)

Maasulkuvirran I_f mennessä maahan kohtaa se jonkin suuruisen maadoitusresistanssin R_m . Tämän seurauksena maasulkuvirta aiheuttaa maadoitusresistanssissa maadoitusjännitteen U_m . (Partanen 2011.)

$$U_m = I_f \cdot R_m \quad (1)$$

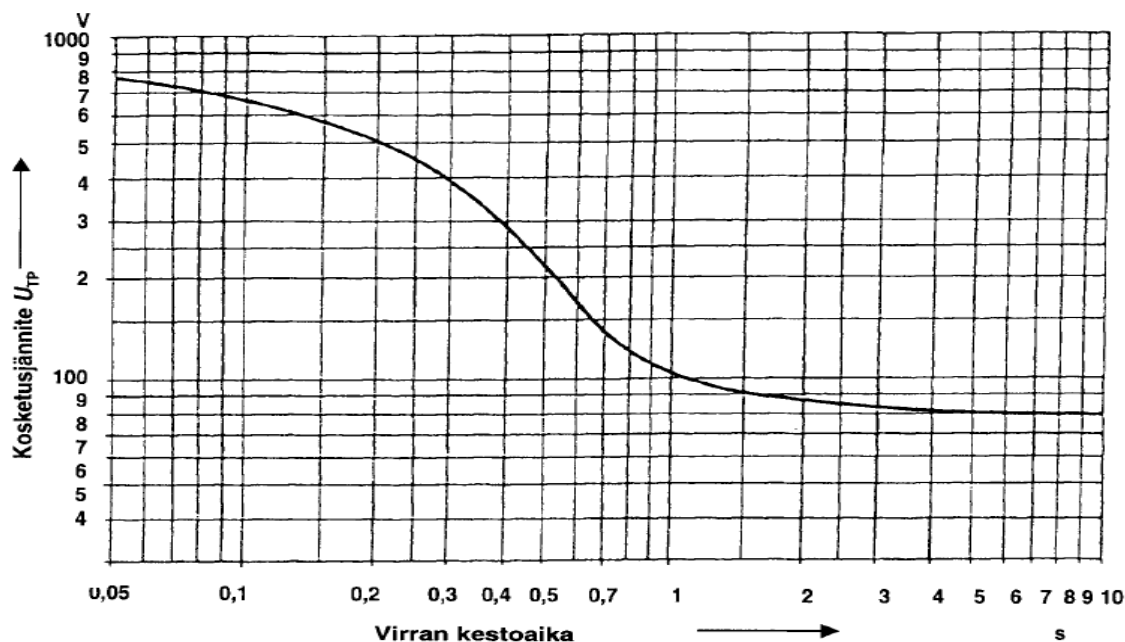
Maadoitusjännitteen ohessa mainitaan usein myös askel- ja kosketusjännite, jos ihminen koskettaa maasulun aikana suojamaadoitettuja osia vaikuttaa häneen silloin kosketusjännite U_{tp} . Askeljännitteellä U_a tarkoitetaan taas kosketusjännitettä, kun ihminen koskettaa kahdella jalalla samanaikaisesti, noin metrin etäisyydellä toisistaan olevan pisteen väliä (KUVIO 4) (Elovaara & Laiho 2007,414.)



KUVIO 4. Askel- ja kosketusjännitteen synty maasulun aikana, U_K = kosketusjännite, U_a = askeljännite. (Elovaara & Laiho 2007,414)

3.1 Standardi SFS 6001

Standardissa SFS 6001 on määritetty siis enimmäisarvot kosketusjännitteille. Sallittujen raja-arvojen lähtökohdana on se kuinka vaarallista sähkö on ihmiselle. Kosketusjännitteen sallitut raja-arvot riippuvat maasulun kestoajasta t_f sekä siitä kuinka helposti ihmiselle aiheutuu vaara kosketusjännitteestä (KUVIO 5). Kuviossa ei ole otettu huomioon lisäresistansseja joita aiheuttavat mm. jalkineet ja pintamateriaalit. (Elovaara & Haarla 2011,430.)



KUVIO 5. Sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona (SFS 6001 2001,78)

Kuvio 5 voidaan esittää myös taulukko muodossa (TAULUKKO 1).

TAULUKKO 1. Sallittujen kosketusjännitteiden arvot laukaisuajan funktiona (Lakervi & Partanen 2008,188)

Laukaisuaika [s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_{TP} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110

Standardissa SFS 6001 on määritetty myös kosketusjännitteet erilaisille asennuksille, näille asennuksille on määritetty k-kerroin. Suurimmat sallitut kosketusjännitearvot voidaan laskea yhtälön 2 avulla.

$$U_m \leq k \cdot U_{TP} \quad (2)$$

missä:

U_m = Maadoitusjännite

U_{TP} = Kosketusjännite

k = Asennuksen mukaan määräytyvä kerroin

Perustilanteessa kerroin k saa arvon 2, jolloin jakelumuuntamon maadoitukset tehdään standardin mukaan ja myös pienjänniteverkko maadoitetaan ohjeiden mukaan. Jos taloudellisten tai teknisten tapausten vuoksi ei voida tavoitetasoa saavuttaa, voidaan käyttää arvoa $k = 4$. Tällöin ehtona on että jokainen pienjännite johtohaara on maadoitettava sen pituudesta riippumatta ja muuntamolle on tehtävä potentiaalinojaus. Erityisen vaikeissa oloissa käytetään arvoa $k = 5$. Tämän arvon käytölle on ehtona, että muuntamalla on potentiaalinojaus ja jokaiselle liittymälle pitää tehdä maadoitus joka yhdistetään rakennuksen pääpotentiaalintasausjärjestelmään. (Lakervi & Partanen 2008,188-189.)

Standardi SFS 6001 määrittelee myös maasulun pois kytkemisen. Käytännössä kaikki maasulut tulee kytkeä pois automaattisesti tai käsin. Jos maasulkua ei kytketä pois automaattisesti, tulee tästä tulla hälytys verkon valvonnasta vastaavalle henkilölle. Toimenpiteet maasulkuvian selvittämiseksi ja paikantamiseksi tulee aloittaa välittömästi, sillä maasulussa olevaa verkkoa saa käyttää vain kahden tunnin ajan hälytyksestä. Käyttöä voidaan jatkaa pitempään maasulussa, vain jos sijaintikohta on tiedossa ja on varmistettu ettei siitä aiheudu vaaraa. (SFS 6001 2001,80.)

Pitkäkestoisissa maasuluissa maadoitusjännite saa olla sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin enintään 150 V, tällöin suurin sallittu kosketusjännitteen arvo on 75 V. (SFS 6001 2001,80.)

3.2 Sähköturvallisuusmääräykset (StM)

Ennen standardin SFS 6001 voimaantuloa Suomessa käytettiin sähköturvallisuusmääräyksen (StM) mukaisia sallittuja maadoitusjännitteen enimmäisarvoja, joka määräytyy maadoituskohteesta, maadoituksen toteuttamistavasta ja maasulun kestoajan mukaan.

Pienentämällä joko maadoitusresistanssia tai maasulkuvirtaa, saadaan näin ollen pienennettyä maadoitusjännitettä yhtälön 1 mukaan. (Verkostosuositus SA 5:94,25.)

Sähköturvallisuusmääräysten 10 § 2 kohdassa A:n perusteella maadoitusryhmät jaetaan kuuteen eri ryhmään a, b, c, d, e_1, e_2 , maadoitusjännitteestä johtuvan kosketusjännitteen

vaarallisuuden mukaan (LIITE 1). Vanhan standardin mukaisia laitteistoja on vielä laajassa käytössä ja niissä noudatetaan edelleen vanhoja standardeja. (Aura & Tonteri 1993,190.)

Taulukossa 2 on esitetty maadoitusjännitteet enimmäisarvot vanhojen sähköturvallisuus (StM) mukaan eri maadoitusryhmittäin.

TAULUKKO 2. Maadoitusjännitteen enimmäisarvot maadoitusryhmittäin, t = pisin yhtäjaksoinen maasulun kesto aika

Ryhmä	Maadoitusjännite [V]	
	Maasulku kytketään itsestomivasti pois ajassa t	Maasulkua ei kytketä itsestomivasti pois
a	$750/\sqrt{t}$	125
b	$2000/\sqrt{t}$	250
c	$3000/\sqrt{t}$	400
d	$500/\sqrt{t}$	100
e1	$750/\sqrt{t}$	125
e2	$1000/\sqrt{t}$	150

Suurin sallittu maadoitusresistanssin arvo saadaan yhtälön (3) avulla.

$$R_{m,max} = \frac{U_m}{I_f \cdot \sqrt{t_0}} \quad (3)$$

missä:

$R_{m,max}$ = Suurin sallittu maadoitusresistanssi

U_m = Maadoitusjännite

I_f = Maasulkuvirta

$\sqrt{t_0}$ = Laukaisuaika

4 MAASULKUSUOJAUKSEN TOTEUTUS

20 kV verkon eli keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toteuttamiseksi pitää selvittää sähköverkon maadoitustapa, maasulkuvirran suuruus ja varasyöttötilanteet tai muitten tilapäiskäyttöjen vaikutukset maasulkuvirtaan ja sen jakaantumiseen sähköverkossa.

Mahdollisia maasulun havainto kriteerejä on useita. Maasulun havaitsemiskeinoja on perustaajuinen tähtipiste-, vaihejännitteen muutoksen mittaus sekä perustaajuinen summavirta, virran ja jännitteen yliaallot, sekä suurtaajuiset muutosvirrat. (Lakervi & Partanen 2008,190.)

Yleisesti maasulkusuojaus on toteutettu maasulun suuntareleillä. Maasulkureleet on yleensä sijoitettu sähköasemille. Sähköverkon maasulkutilanteiden ilmaisuun voi osoittaa sekä jännite- että virtamittauksella. (KUVIO 6.) Maasulku aiheuttaa vaihevirtojen epäsymmetrian ja tähtipistejännitteen ts. nollajännitteen kohoamisen. Yleisesti käytössä on virtamittaukseen perustuva menetelmä. (Lakervi & Partanen 2008,190-191; Elovaara & Haarla 2011,221.)

4.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen mittaus

Verkon maasulkutilanteiden ilmaisuun käytetään maasulun aiheuttamaa virtaepäsymmetrian mittausta. Virtaepäsymmetria kuvaava nollavirta mitataan kolmen virtamuuntajan summa kytkennällä, kaapelivirtamuuntajalla tai vaihevirtasensoreilla. Kaapelivirtamuuntajia tulisi käyttää aina kuin mahdollista, koska se mittaa hyvin pieniä maasulkuvirtoja (< 0,5 A) nimellisvirroista riippumatta. (ABB 2000,12.)

Mikäli ollaan maasulkutilanteessa, vaurioituneen lähdön alussa sijaitsevassa summavirtamuuntajassa mitattu nollavirta on pienempi kuin vikapaikassa oleva maasulkuvirta I_f . Alkupään summavirtaa laskettaessa on vaurioituneen lähdön maakapasitanssien vaikutus vähennettävä, sillä summavirtamuuntajasta kulkee läpi vaurioituneen lähdön maakapasitanssien määräämä vikavirran komponentti molempiin suuntiin. (Lakervi & Partanen 2008,191.)

Maasta erotetussa verkossa vaurioituneen lähdön nollavirta voidaan laskea yhtälöllä 4. (ABB 2000,12; Lakervi & Partanen 2008,191.)

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} \cdot I_f \quad (4)$$

missä:

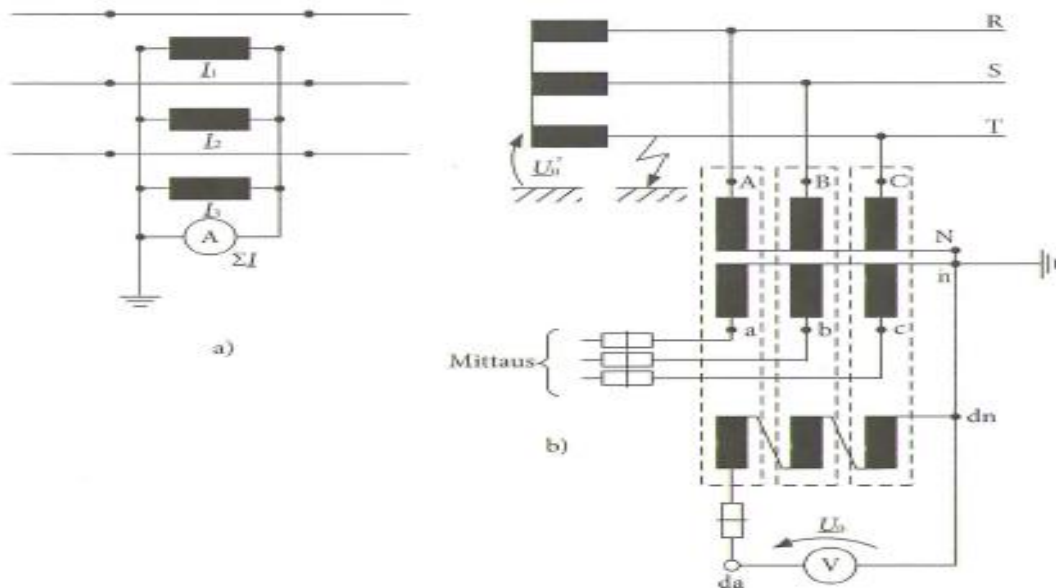
I_r = Vaurioituneen lähdön nollavirta [A]

C = Koko verkon maakapasitanssi [F]

C_j = Vaurioituneen lähdön maakapasitanssi [F]

I_f = Vikaresistanssin pienentämä maasulkuvirta [A]

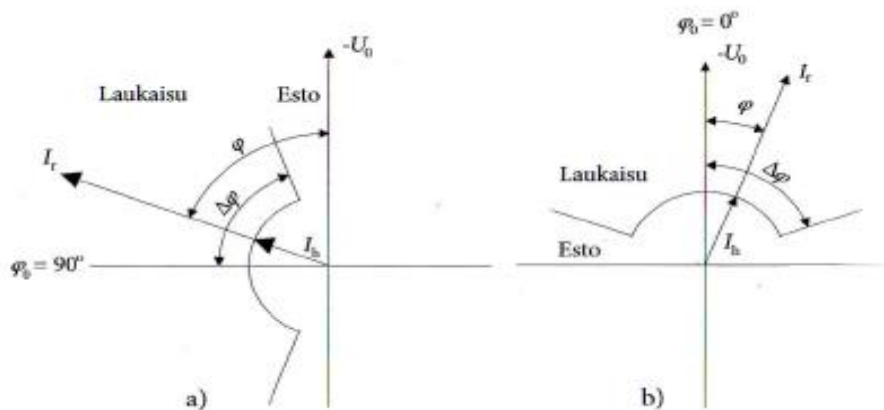
Toinen tapa määrittää maasulkutilanne on verkon tähtipistejännitteen mittaaminen. Tavallisesti tähtipistejännitteen mittaamiseen käytetään kolmesta yksivaihemuuntajasta toisiokäämiin muodostuvaa avokolmiokytkentää. (KUVIO 6.) Tästä avokolmiosta mitataan tähtipistejännitteeseen verrannollinen jännite U_o . (Elovaara & Haarla 2011,221.)



KUVIO 6. Maasulun ilmaisuun käytettyjä mittamuuntajakytkentöjä. a) Virtamuuntajien summakytkentä, b) Yksivaiheisista jännitemuuntajista muodostettu avokolmiokytkentä (Elovaara & Haarla 2011,221)

Maasulun suuntareleen toiminnan kannalta on tärkeää, että tähtipistejännite U_o sekä virta I_r ovat korkeampia kuin asetteluarvot. Maasulkutilanteessa kuvion 8 mukaisessa lähdössä II, suurin osa vikavirrasta kiertää lähdön I maakapasitanssien ja muitten vaurioitumattomien lähtöjen kautta takaisin lähtöön II ja sieltä edelleen vikapaikkaan. Mikäli lähdössä II käytetään maasulun suuntarelettä sen ehtona havahtumiselle täytyy olla, että nollavirta kulkee summavirtamuuntajan kautta vikapaikkaan ei kiskostoon päin. (Lakervi & Partanen 2008,192.)

Vikavirran kulkusuunnan tarkistamiseksi pitää verrata summavirtamuuntajan läpi kulkevan virran I_r osoittimen ja jänniteosoittimen $-U_o$ välistä kulmaa. Tähtipiste ja maan välinen jännite $-U_o$ pitää olla noin 90° jäljessä virtaa, ts. virta on 90° edellä tähtipiste ja maan välistä jännitettä $-U_o$ (KUVIO 7). Näin ollen releen kolmanneksi ja vian sijaintilähdön tunnistavaksi toimintaehdoksi saadaan $90^\circ - \Delta\varphi < \varphi < 90^\circ + \Delta\varphi$ (Lakervi & Partanen 2008,192.)



KUVIO 7. Vaihekulmasuuntareleen virtakulmadiagrammi a) maasta erotettu verkko, b) sammutettu verkko (Lakervi & Partanen 2008,192)

Johtoresistanssien ja vuotoresistanssien merkitys on mitätön, joten $\Delta\varphi$ toleranssi voisi olla melko pieni. Samaa relettä käytetään kumminkin myös sammutetussa verkossa, missä kulma muodostuu epämääräisemmin. (Lakervi & Partanen 2008,192.)

Maasulkuvalokaaren sammuttamiseen käytetään maasta erotetussa verkossa yleisesti pikajälleenkytkentää. Pikajälleenkytkentöjen haittapuolina ovat niistä aiheutuvat lyhyet sähkökatkokset. (Lakervi & Partanen 2008,192.)

Myös sammutetussa verkossa maasulun suuntareleen toiminnan kannalta on tärkeää, että sekä virta I_r ja tähtipistejännite U_o ylittävät tietyt asetteluvarot. (I_r muodostuu sammutetussa verkossa sammutuskuristimen rinnalle kytketyssä resistanssin R kautta menevästä muutaman ampeerin pätövirrasta.) Sammutetun verkon erona maasta erotettuun verkkoon on, että negatiivisena otetun tähtipistejännitteen ja nollavirran välinen kulmaero on maksimissaan $\pm \Delta\phi$. Vian aikainen kulmaero voi muuttua melkoisesti, resonanssitilanteen läheisyyden vuoksi. Tämän ansiosta toleranssi $\Delta\phi$ on tavallisesti verrattain suuri, esim. 80° . (Lakervi & Partanen 2008,193.)

Maasulkusuojauksessa tarvitaan tiedot eri lähtöjen summavirroista, jotka mitataan jokaisen lähdön alkupäähän kytketyllä summavirtamuuntajalla. Kaapelilähdöissä voidaan käyttää virtamuuntajien summakytkennän sijasta maasulkusuojauksessa kaapelivirtamuuntajia. Avojohtoverkossakin on tavallisesti lähtö sähköasemilta toteutettu kaapeleilla. Kaapelivirtamuuntajan muodostaa kaapelin ympärille asetettu virtamuuntajasydän, johon on käämitty toisiokäämi. Kaapeli muodostaa ensiöpuolen. Summavirtamuuntajat valitaan muuntosuhteen perusteella. Summavirtamuuntajien muuntosuhte voi olla esim. 20/5 A. Toision nimellisvirta on yleensä 5 A ja ensiökäämin nimellisvirta katsotaan maasulkuvirran mukaan. (Lakervi & Partanen 2008,193.)

Jännitemuuntajilla mitataan koko verkon nollapistejännite, jännitemuuntajat sijaitsevat sähköasemalla. Nollajännite mitataan avokolmiokytkennällä. (KUVIO 6.) Jännitemuuntajien muuntosuhteet on tavallisesti mitoitettu niin, että suoran maasulun aikana jännite on 100 V avokolmiossa (tähtipistejännite U_o ja vaihejännite U_v ovat samansuuruisia). (Lakervi & Partanen 2008,193.)

4.2 Maasulkusuojauksen suunnittelu

Maasulkusuojaukselta suunniteltaessa on otettava huomioon seuraavat tilanteet ja tavoitteet.

- Suojauksen toimivuuden kannalta kiinnostavampia ovat pienimmät esiintyvät:
 - nollavirrat (suuri vikaresistanssi, vähän verkkoa)
 - tähtipistejännitteet (suuri vikaresistanssi, paljon verkkoa)

Maadoitusjännitevaatimusten kannalta tärkeitä ovat:

- suurin maasulkuvirta
- maasulun kesto-aika (aikoja ei summata jälleenkytkennöissä)

Maasulun itsestään sammumisen ja vian paikannuksen helpottamiseksi:

- maasulun kestoajan tulisi olla mahdollisimman pitkä. (Lakervi & Partanen 2008,193-194.)

Maasulkusuojausten suunnittelun yhteydessä on tehtävä monia erilaisia maasulkuvirtalaskelmia. On etsittävä olosuhteita, jossa sähköverkko olisi mahdollisimman suppea (kaksi lähtöä, jossa toinen mahdollisimman lyhyt) ja on myös etsittävä olosuhteita, jossa sähköverkko olisi mahdollisimman laaja (varasyöttötilanteet tai muut tilapäistilanteet). Nykyisillä releillä on mahdollista käyttää porrastusta maasulun kestoajan asettelussa. Vikaresistanssittomissa ja isoja maadoitusjännitteitä tuottavat maasulut pystytään poistamaan nopeasti. Vähäisille maasulkuvirroille pystytään käyttämään hitaampaa laukaisua, tarkoituksena maasulun sammuminen itseksensä tai muuttuminen oikosuluksi. Automaattisen vian paikannuksen kannalta on parempi että, maasulku muuttuu oikosuluksi. (Lakervi & Partanen 2008,194.)

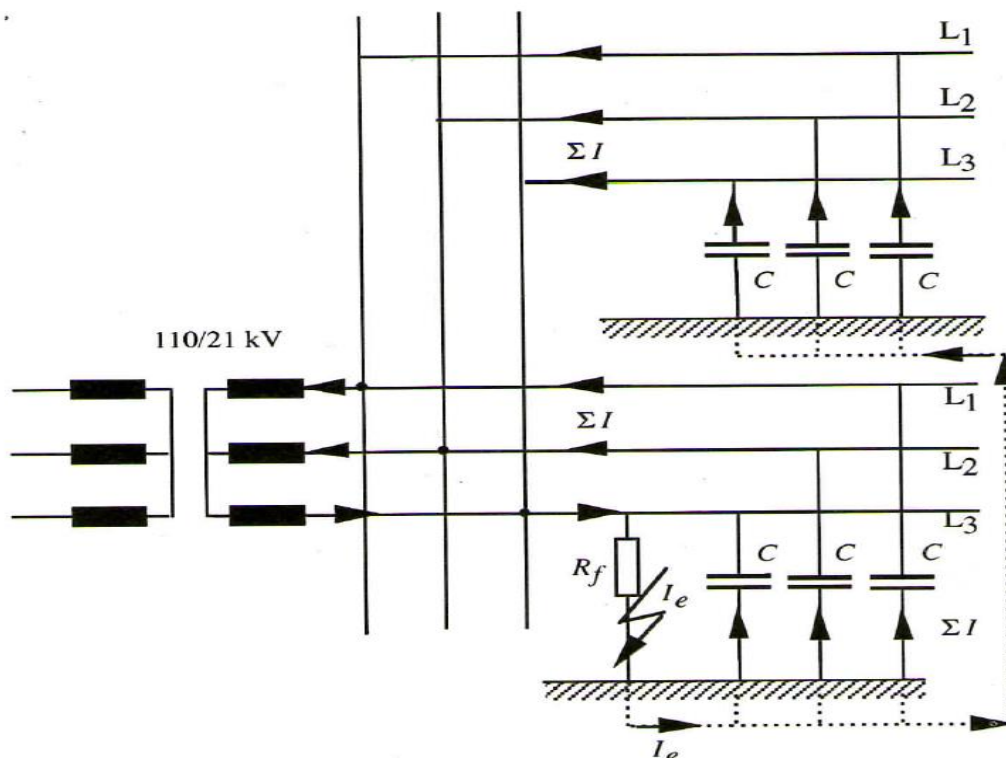
5 MAASULKU JA VERKON MAADOITUSTAVAT

Maasulkutilanteissa vian luonne riippuu maadoitustavasta. Suomessa keskijänniteverkot eli 20 kV verkot ovat joko maasta erotettuja tai sammutuskuristimen kautta maadoitettuja verkkoja eli kompensoituja verkkoja. (Partanen 2011.)

5.1 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskeminen

5.1.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa järjestelmässä tähtipistettä ei ole tai sitä ei ole maadoitettu. Maasulun aikana vikavirralla ei ole suoraa yhteyttä, joka oikosulkisi virtapiirin. Tästä johtuukin, että vikavirta on erittäin pieni (1-200 A). Vikavirralla on kulkureitti vain johtojen maaka-
pasitanssien kautta. (KUVIO 8.) (Partanen 2011.)



KUVIO 8. Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa (Aura & Tonteri 1993, 163)

Maasulkuvirta I_f riippuu päämuuntajan jälkeen olevan verkon johtopituudesta l , johtolajin maakapasitanssista c_o , jännitetasosta, taajuudesta sekä mahdollisesta vikaresistanssista. (Partanen 2011.)

Liitteessä 2 on esitetty ilmajohtojen 10 kV ja 20 kV johtotietoja ja 20 kV kaapelitietoja, joita tarvitaan maasulkuvirran määrittämisessä. (Verkostosuositus SA 5:94 2005).

Kun tarkastellaan yksivaiheista maasulkua maasta erotetussa verkossa, vikaresistanssin ollessa nolla voidaan vikavirta laskea yhtälön 5 mukaan.

$$I_f = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_o \cdot U \quad (5)$$

missä:

I_f = Maasulkuvirta [A]

ω = Kulmataajuus

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

U = Pääjännite [V]

Avojohto-osuuksien kohdalla maasulkuvirran likiarvo voidaan laskea kokempohjaisesti yhtälöllä 6.

$$I_f \approx \frac{U[kV] \cdot l[km]}{300} \text{ A} \quad (6)$$

missä:

U = Pääjännite [kV]

l = Yhteenlaskettu johtopituus [km]

Kuten edellä huomattiin, yhtälö ei huomioi vikaresistanssin vaikutusta, joten yhtälö pätee vain vikaresistanssittomaan maasulkuun. Huomioitavaa on myös, että vikaresistanssittoman maasulun maasulkuvirta on sama riippumatta siitä missä kohtaa maasulku tapahtuu.

Kun vikapaikassa on vikaresistanssia, pätee yhtälö 7. Vikaresistanssi pienentää jo entuudestaan pientä vikavirtaa.

$$I_{ef} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_o}\right)^2 + R_f^2}} = \frac{3\omega C}{\sqrt{1 + (3\omega C_o R_f)^2}} U_v \quad (7)$$

Yhtälö voidaan esittää myös (yhtälö 8) muodossa, joka on käyttökelpoinen kun tunnetaan maasulkuvirta suorassa maasulussa.

$$I_{ef} = \frac{I_f}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot I_f R_f}{U}\right)^2}} \quad (8)$$

missä:

I_{ef} = Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

U = Pääjännite [V]

U_v = Vaihdejännite [V]

ω = Kulmataajuus

C = Verkon vaiheen maakapasitanssi [F]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

R_f = Vikaresistanssi [Ω]

On myös olemassa käsikirjoja, joissa on valmiiksi laskettuja maasulkuvirtoja eri kaapelilajeille. Taulukoissa käy ilmi kaapelilajeittain maasulkuvirta pituusyksikköä kohden (TAULUKKO 3). Nämä tiedot löytyvät myös kaapelivalmistajien tuoteluetteloista. Maasulkuvirran tietämiseen ei tarvitse tietää kuin kaapelilaji ja sen pituus. (Aura & Tonteri 1993,164.)

TAULUKKO 3. 10, 15, 20 ja 30 kV kaapelien maasulkuvirtoja [A/km] (ABB 2000)

Poikki- pinta mm ²	10 kV voimakaapelit					15 kV voima- kaapelit	20 kV voimakaapelit				30 kV voima- kaapelit
	Paperi- eristeiset PLKVJ APAKM APLKPJJ	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WTC AHXCMK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLK AX-, FXPLK AX-, FXBTLK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLK AX-, FXPLK AX-, FXBTLK	Paperi- eristeiset PYLKVJ AHPLKPJJ APYAKMM	PEX- eristeiset HXCMK AHXCMK HXCMKM	XLPE- eristeiset AHXAMK-W AHXCMK- WP AHXCMK- WTC AHXCMK HXCMK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLK AX-, FXPLK AX-, FXBTLK	XLPE- eristeiset AX-, FXLJ AX-, FXKJ AX-, FXTLK AX-, FXPLK AX-, FXBTLK
3x25	0,6	1,3	1,0	-	-	-	2,1	1,6	1,5	-	-
3x35	0,8	1,4	1,1	-	-	-	2,3	1,7	-	-	-
3x50	0,9	1,7	1,3	-	1,3	1,6	2,5	1,9	-	1,7	2,1
3x70	1,0	1,9	1,4	-	1,4	1,7	2,8	2,0	2,0	2,0	2,4
3x95	1,1	2,3	1,6	-	1,6	2,0	3,2	2,2	2,3	2,3	2,6
3x120	1,2	2,5	1,7	1,8	1,8	2,2	3,5	2,3	2,4	2,5	2,8
3x150	1,3	2,7	1,8	-	2,0	2,4	3,7	2,5	2,6	2,7	3,1
3x185	1,4	3,0	1,9	2,1	2,2	2,5	4,0	2,6	2,8	2,9	3,3
3x240	1,5	3,2	2,2	2,4	2,4	2,9	4,5	2,9	3,2	3,2	3,6
3x300	1,5	3,4	2,4	2,6	2,7	3,1	4,9	3,1	3,5	3,5	3,9
3x1x35	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
3x1x50	-	-	-	-	1,3	1,6	-	-	-	1,7	2,1
3x1x70	-	-	1,4	-	1,4	1,7	-	2,0	-	2,0	2,4
3x1x95	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-	-	2,6
3x1x120	-	-	1,8	-	1,8	2,2	-	2,5	-	2,5	2,8
3x1x150	-	-	-	-	-	2,4	-	-	-	-	3,1
3x1x185	-	-	2,1	-	2,2	2,5	-	2,8	-	2,9	3,3
3x1x240	-	-	-	-	-	2,9	-	-	-	-	3,6
3x1x300	-	-	2,6	-	2,7	3,1	-	3,5	3,6	3,5	3,9
3x1x400	-	-	-	-	2,9	3,5	-	-	-	3,9	4,2
3x1x500	-	-	3,3	-	3,3	3,9	-	4,2	4,4	4,4	4,7
3x1x630	-	-	-	-	3,7	4,4	-	-	-	4,8	5,2
3x1x800	-	-	4,1	4,1	4,1	4,8	-	5,3	5,4	5,3	5,9
3x1x1000	-	-	-	-	4,6	5,3	-	-	-	6,0	6,5
3x1x1200	-	-	-	-	5,0	5,7	-	-	-	6,4	7,0

Edellä mainittujen yhtälöitten avulla laskettu virta on vikapaikassa vaurioituneesta vaiheesta maahan menevä virta. Johtolähdössä näkyy tässä vain taustaverkon eli terveiden johtojen syöttämä maasulkuvirta. Taustaverkon syöttämä maasulkuvirta eli vaihevirtojen summavirta saadaan yhtälöllä 9. (ABB 2000,4.)

$$\sum I_v = \frac{C_o - C_{oj}}{C_o} \cdot I_{ef} \quad (9)$$

missä:

$\sum I_v$ = Vaihevirtojen summavirta [A]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

C_{oj} = Suojattavan johdon maakapasitanssi/vaihe [F]

I_{ef} = Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

Mikäli suorassa maasulussa on jokaiselle johdolle laskettu johdon itsensä syöttämä maasulkuvirta, pystytään taustaverkon syöttämä maasulkuvirta laskemaan yhtälöllä 10.

$$\sum I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} \cdot I_{ef} \quad (10)$$

missä:

I_e = Verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ej} = Johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

I_{ef} = Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

Perustilanteessa vaihejännitteet ovat maahan nähden symmetrisiä eli vaihejännitteiden summa on nolla: $\overline{U_{L1}} + \overline{U_{L2}} + \overline{U_{L3}} = \overline{0}$. Terveessä tilanteessa myös tähtipistejännite on nolla $U_o = 0$. (Aura & Tonteri 1993,163.)

Maasulun aikana muuttuvat kaikki vaihejännitteet mukaan laskettuna tähtipistejännite U_o eli nollajännite. Viallisen vaiheen jännite laskee, mikäli vikaresistanssi R_f on nolla. Tästä seuraa, että viallisen vaiheen jännite on myös nolla. Maasulun aikana terveiden vaiheiden jännite voi kasvaa enimmillään 1,05-kertaiseksi pääjännitteeseen nähden, ja tähtipistejännite U_o on vaihejännitteen U_v suuruinen (KUVIO 9) (Elovaara & Haarla 2011,15.)

Tähtipistejännitteen suhdetta vaihejännitteeseen kutsutaan maasulkuprosentiksi p . Maasulkuprosentti on siis $p = \frac{U_o}{U_v} \cdot 100$ %. Vikaresistanssiton maasulku on 100 % maasulku. Helposti voidaan osoittaa, että maasulkuprosentti näyttää myös vikaresistanssillisen maasulun maasulkuvirran suhdetta vikaresistanssittoman maasulun maasulkuvirtaan.

Mikäli vikaresistanssi poikkeaa nollassa, voidaan tähtipistejännite ratkaista yhtälön (11) avulla.

$$\frac{U_o}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega C_o R_f)^2}} \quad (11)$$

missä:

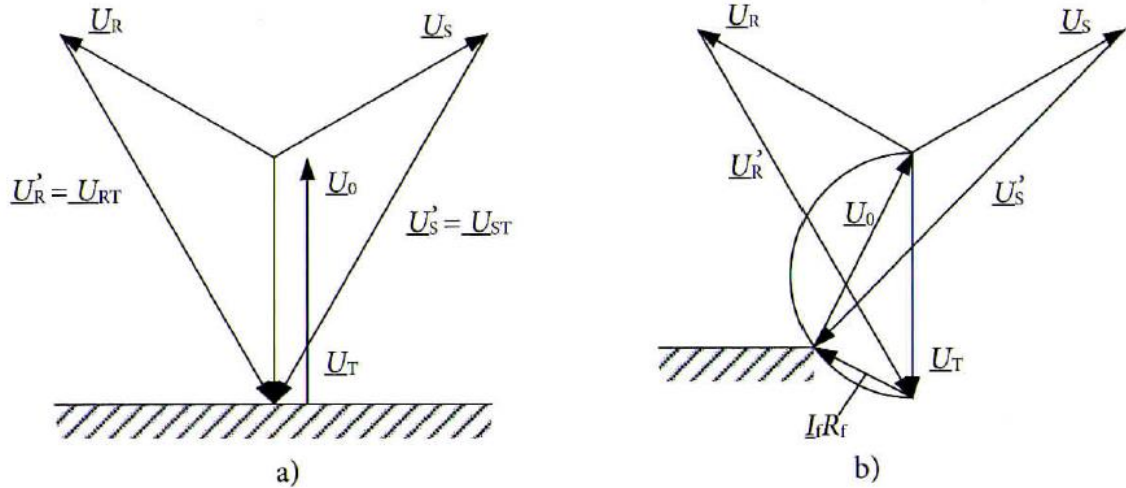
U_o = Tähtipistejännite [V]

U_v = Vaihejännite [V]

ω = Kulmataajuus

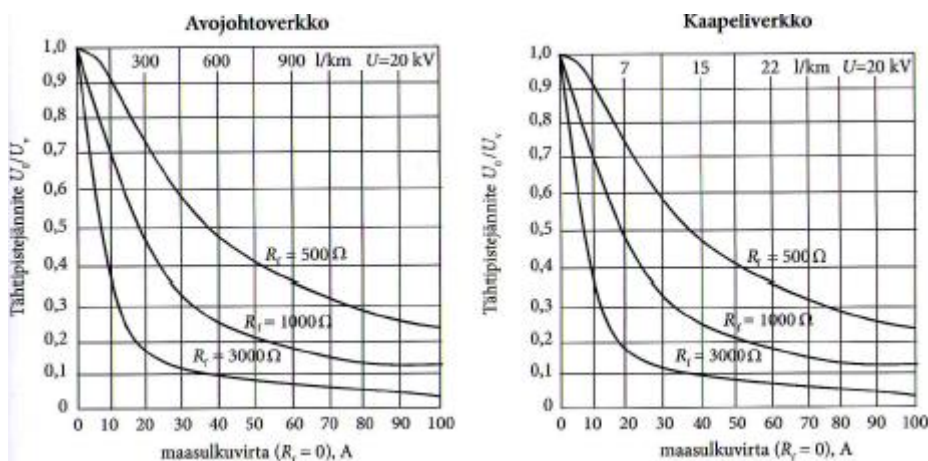
C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

R_f = Vikaresistanssi [Ω]



KUVIO 9. Jännitteet yksivaiheisen maasulun aikana maasta erotetussa verkossa a) $R_f = 0$, b) $R_f \neq 0$, $U'_{Smax} \approx 1.05 * \sqrt{3} * U_v$ (Elovaara & Haarla 2011,15)

Kuviossa 10 on valmiiksi laskettu 20 kV:n tähtipistejännite maasta erotetussa verkossa sekä avojohtoverkossa että kaapeliverkossa erilaisten vikaresistanssien R_f arvoilla maasulkuvirran I_f funktiona.



KUVIO 10. Tähtipistejännite maasta erotetussa verkossa erilaisten vikaresistanssien arvoilla (Lakervi & Partanen 2008,187)

Kaksoismaasulun aikana vikaresistanssien ollessa yhtä suuret on nollajännite pienimmillään. Kaksoismaasulkutilanteen nollajännite pystytään laskemaan yhtälöllä 12.

$$\frac{U_o}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{(R_f 3\omega C_o)^2 + 4}} \quad (12)$$

missä:

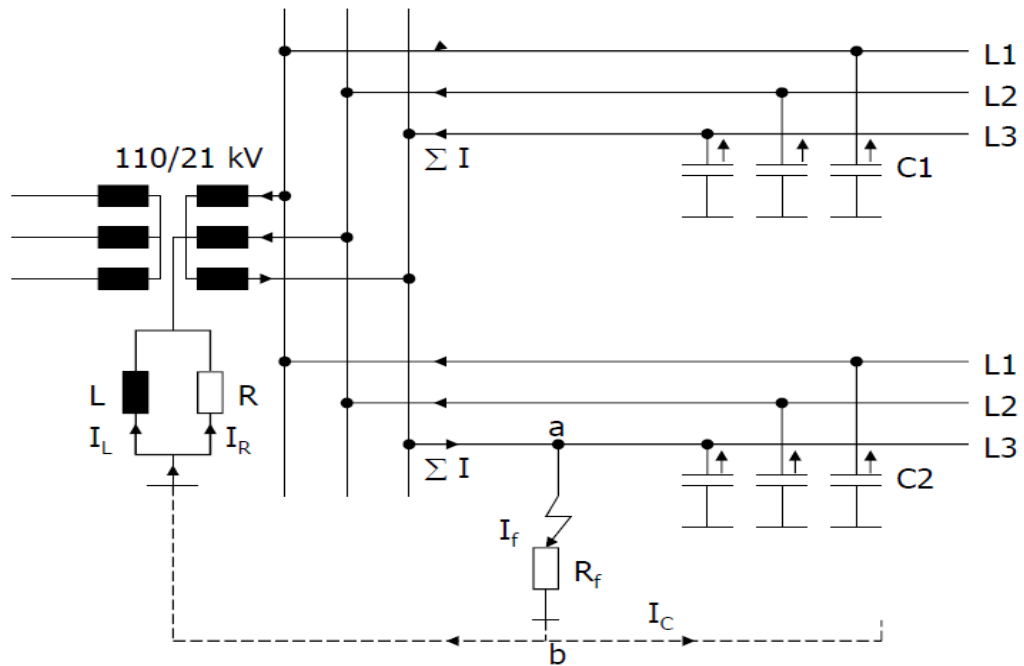
R_f = Vaurioituneiden vaiheiden vikaresistanssi [Ω]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

Suuren vikaresistanssin kautta tapahtuvissa kaksoismaasuluissa muodostuu nollajännite lähes yksivaiheisen maasulun nollajännitteen suuruiseksi. Samassa lähdössä tapahtuva kaksoismaasullussa, voidaan vaihevirtojen summavirta laskea yhtälöillä 9 ja 10. Kyseinen virta ei käsitä vikavirtaa, kun vika on vaiheiden välillä. Eri lähdöissä tapahtuvissa maasuluisa, summavirta sisältää myös vaiheiden välisen vikavirran. (ABB 2000,6.)

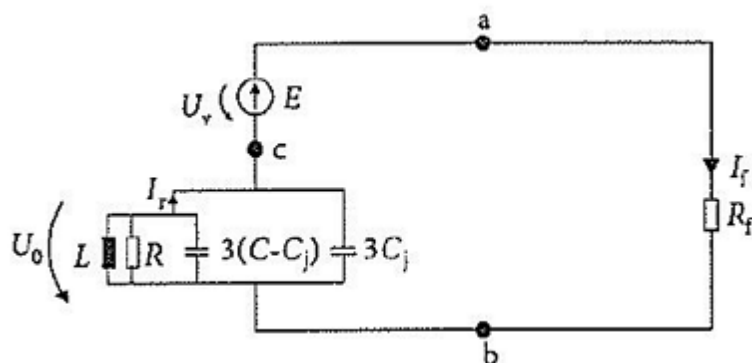
5.1.2 Maasulku sammutetussa verkossa

Kuten edellä on jo mainittu, keskijänniteverkko voi olla myös sammutettu verkko. Sammutetulla verkolla tarkoitetaan järjestelmää jossa, tähtipisteeseen kytketään maakapasitanssit kompensoiva reaktori eli sammutuskuristin. (KUVIO 11.) Näin saadaan pienennettyä maasulkuvirtaa, ja palaavaa vikapaikan jännitettä saadaan loivennettua. (Lakervi & Partanen 2008, 184.)



KUVIO 11. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku (Lakervi & Partanen 2008,185)

Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta on hiukan monimutkaisempaa sammutetussa verkossa kuin maasta erotetussa verkossa. Tarkastellaan kuvion 11 maasulkutilannetta. Tässä tapauksessa sijaiskytkentä muodostuu kuvion 12 kaltaiseksi. Tässä on lisätty maasta erotetusta verkosta poiketen sammutuskuristimen induktanssi L , sammutuskuristimen resistanssia ja mahdollista lisävastusta ilmaiseva resistanssi R . (Lakervi & Partanen 2008, 184.)



KUVIO 12. Maasulkupiirin sijaiskytkentä sammutetussa verkossa (Lakervi & Partanen 2008,185)

Sammutetun verkon maasulkuvirralle I_{ef} voidaan kirjoittaa sijaiskytkennän (KUVIO 12) mukaan yhtälö 13 tai yhtälö 14, kun vikapaikassa on vikaresistanssia.

$$I_{ef} = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (13)$$

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_o^2 \left(3 \cdot \omega \cdot C_o - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}}{\sqrt{(R_f + R_o)^2 + R_f^2 \cdot R_o^2 \left(3 \cdot \omega \cdot C_o - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

missä:

U_v = Vaihejännite [V]

R_f = Vikaresistanssi [Ω]

ωL = Sammutuskuristimen reaktanssi [Ω]

R = Kuristimen resistanssia ja mahdollista lisävastusta kuvaava resistiivinen osa

R_o = Sammutuskuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen redusoitu kokonaisresistanssi [Ω]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

Sammutetussa verkossa kelan ja kapasitanssien kautta menevä virrat I_c ja I_L ovat vastakaissuuntaisia ja vikavirta I_f muodostuu näitten summasta. Vikavirta kumoutuu lähes kokonaan sillä edellytyksellä, että virrat ovat yhtä suuret itseisarvoltaan. Näin on, mikäli sammutuskuristimen reaktanssi ωL on yhtä suuri kuin maakapasitanssien reaktanssi $1/3\omega C_o$. Tässä tapauksessa maasulkuvirta $I_f \approx 0$. Teoriassa voidaan siis laskea vikavirta täysin sammutetussa verkossa yhtälön (15) avulla. (Elovaara & Haarla 2011,210.)

$$I_{ef} = \frac{1}{R_o + R_f} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

Tähtipisteen jännite eli nollajännite määräytyy galvaanisesti yhteen liitetystä johtopituudesta. Johtopituuden muuttuessa kapasitanssikin C muuttuu, ja induktanssiarvoa L pitäisi

vastaavasti sen mukaan muuttua. Tähtipistejännite täysin sammutetussa verkossa voidaan laskea likimain yhtälöllä (16). (Elovaara & Haarla 2011,211.)

$$U_o = \omega \cdot L \cdot I_L = 3 \cdot \omega^2 \cdot L \cdot C \cdot U_v \quad (16)$$

Voidaan esittää myös yhtälön (17) muodossa:

$$\frac{U_o}{U_v} = \frac{R_o}{R_o + R_f} \quad (17)$$

missä:

U_o = Tähtipistejännite [V]

U_v = Vaihejännite [V]

ω = Kulmataajuus

I_L = Kelan kautta kulkeva virta [A]

L = Sammutuskelan induktanssi [H]

C = Verkon vaiheen kapasitanssi [F]

Tähtipistejännite U_o sammutetussa verkossa voidaan sijaiskytkennän (KUVIO 12.) mukaan johtaa yhtälö 18 ja yhtälö 19, kun tiedetään vikapaikan virta I_{ef} .

$$U_o = \frac{-R}{R_f + R + jR \cdot R_f \left(3\omega C_o - \frac{1}{\omega L}\right)} \cdot U_v \quad (18)$$

$$U_o = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_o}\right)^2 + \left(3\omega C_o - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} I_{ef} \quad (19)$$

missä:

ωL = Sammutuskuristimen reaktanssi [Ω]

R = Kuristimen resistanssia ja mahdollista lisävastusta kuvaava resistiivinen osa [Ω]

U_v = Vaihejännite [V]

R_f = Vikaresistanssi [Ω]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

R_o = Sammutuskuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin

sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen
reduoitu kokonaisresistanssi [Ω]

I_{ef} = Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta [A]

ω = Kulmataajuus

Kun tarkastellaan johtolähtöjen suojauksen toimintaa, on usein myös määritettävä vaihevirtojen summavirran sisältämä pätökomponentti. Vikapaikan virran Pätökomponentin I_{efp} suuruus pystytään likimain laskemaan yhtälöllä 20. (ABB 2000,9.)

$$I_{efp} = \frac{1}{\sqrt{(R_f + R_o)^2 + R_f^2 R_o^2 (3\omega C_o - \frac{1}{\omega L})^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

missä:

R_f = Vikaresistanssi [Ω]

R_o = Sammutuskuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin
sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteeseen
reduoitu kokonaisresistanssi [Ω]

ωL = Sammutuskuristimen reaktanssi [Ω]

C_o = Johtimien yhteenlaskettu maakapasitanssi vaihetta kohden [F]

U = Pääjännite [V]

ω = Kulmataajuus

Edellä mainittujen yhtälöitten avulla laskettu virta on vikapaikassa vaurioituneesta vaiheesta maahan menevä virta. Maasulkutilanteessa olevan johdon summavirran suuruuteen ja vaihekulmaan vaikuttaa myös johdon vuotohäviöresistanssien ja maakapasitanssien kautta menevä osa maasulkuvirrasta. Summavirran suuruus pystytään laskemaan yhtälöllä 21 sekä vaihekulma φ negatiivisena otettuun nollajännitteeseen nähden yhtälöllä 22. (ABB 2000,9.)

$$\Sigma I_v = \frac{\sqrt{((1-K)I_e - I_{ej})^2 + (I_r + I_{rj})^2}}{\sqrt{((1-K)I_e)^2 + I_r^2}} I_{ef} \quad (21)$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{(1-K)I_e - I_{ej}}{I_r - I_{rj}}\right) \quad (22)$$

missä:

I_e = Verkon kapasitiivinen kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa

I_{ej} = Johdon syöttämä kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa

K = Kompensointiaste

I_r = Kompensointikuristimen ja verkon häviöiden sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa

I_{rj} = Lähden häviöiden aiheuttama pätövirta suorassa maasulussa

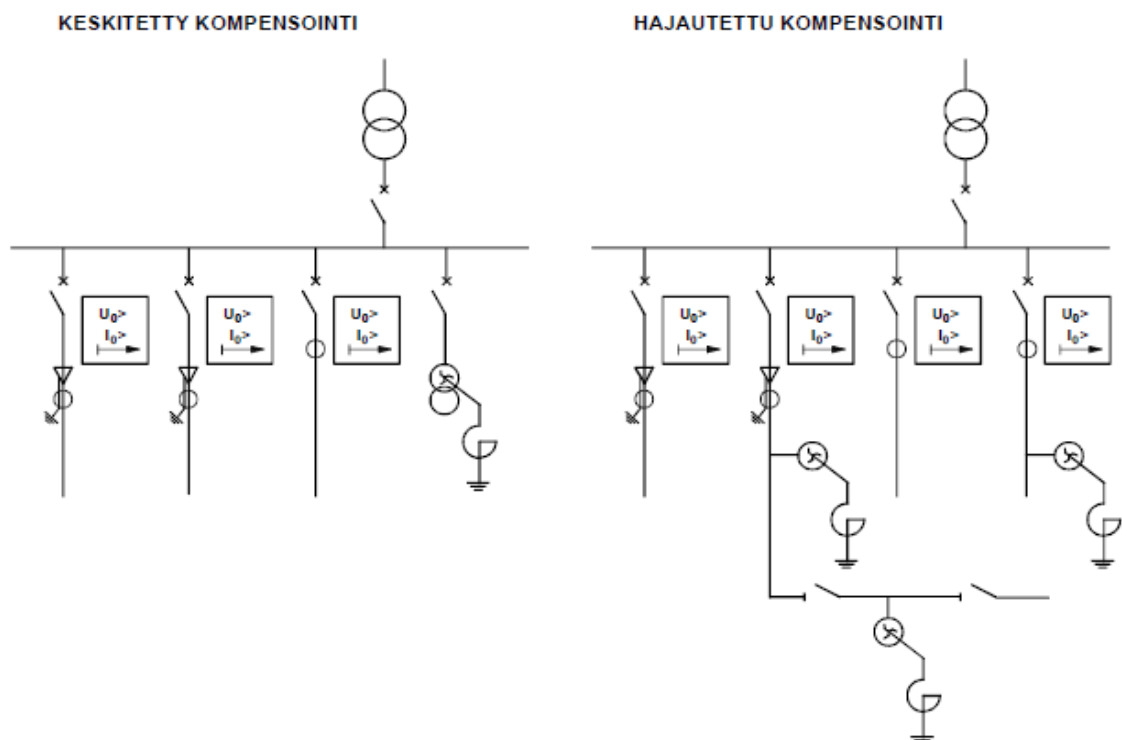
I_{ef} = Vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta

Edellä olevat yhtälöt ovat hyödyllisiä, jos kyseessä on osittain kompensoitu verkko.

6 MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI

Maasulkuvirran kompensoinnin tarve kasvaa reilusti sähköverkon maakaapeloinnin karttuessa, koska maakaapeloidun verkon kapasitanssi-arvot ja maasulkuvirta-arvot ovat suhteellisen isoja verrattuna avojohtojen kapasitanssi-arvoihin ja maasulkuvirta-arvoihin. (Multirel 2015.)

Maasulun kompensoinnin tarkoituksena on kompensoida sähköverkon maakapasitanssit yhtä suurella induktanssilla, tällä tavoin rajoitetaan maasulkuvirta lähelle nollaa. Kompensointiin käytetään keloja esim. W. Petersenin vuonna 1916 ideoimaa kompensointikuristinta. Kompensointikuristin asennetaan joko sähköasemille keskitetysti tai johtolähdöille hajautetusti (KUVIO 13). Kompensointiratkaisuun vaikuttavat mm. kompensointilaitteiston investointikustannukset, varasyöttö- ja muut tilapäiskäyttötilanteet. (Elovaara & Haarla 2011,210; Multirel.2015.)



KUVIO 13. Kompensoinnin toteuttamistavat (ABB 2000,7)

Kompensointiasteella K tarkoitetaan kompensoinnin määrää. K :n arvon ollessa suurempi kuin yksi verkko on tällöin ylikompensoitu, ja K :n arvon ollessa alle yhden on verkko alikompensoitu. Mikäli K :n arvo on yksi tai lähellä sitä, verkko on täysin kompensoitu. Kompensointiaste K saadaan yhtälön (23) avulla. (ABB 2000,7.)

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (23)$$

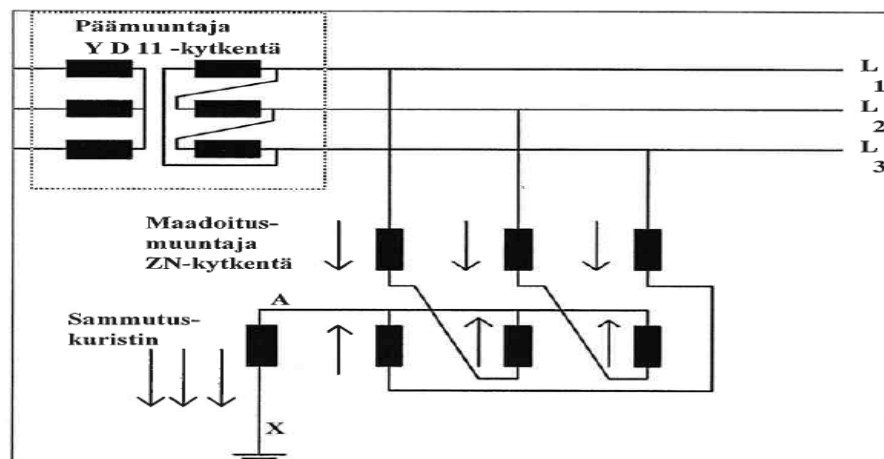
missä:

I_L = Kuristimen virta suorassa maasulussa [A]

I_C = Verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa [A]

6.1 Keskitetty kompensointi

Tavallisesti kompensointi toteutetaan sähköasemilla keskitetysti. Keskitetty kompensointi voidaan suorittaa joko kiinteällä tai säädettävällä kelalla. Keloja on saatavana eri standardikokoja tai kela voidaan hankkia tilaustyönä juuri kohdetta varten. Säädettävä kompensointikuristin eli kompensointikela kytketään verkon tähtipisteen ja maan välille. (KUVIO 14) (Multirel 2015.)



KUVIO 14. Maadoitusmuuntajan ja kompensointikelan kytkentä (Isomäki 2010)

Sammutuskuristin mitoitetaan siten, että kuristimen kautta kulkeva virta on lähes sama kuin maakapasitanssien kautta kulkeva virta. Näin ollen maasulkuvirta I_f jää pieneksi, sillä virrat I_c ja I_L ovat vastakkaissuuntaisia. (Lakervi & Partanen 2008,184-185.)

Keskijänniteverkossa on harvemmin käytössä muuntajan tähtipistettä vaan päämuuntajat ovat YNd11 kytkentäryhmältään ilman 20 kV tähtipisteulostuloa. Näin ollen joudutaan tekemään keinotekoinen tähtipiste. Taloudellisimmin tämä tapahtuu ensiöstään ZN-kytkentäryhmäisen maadoitusmuuntajan avulla, jonka tähtipisteeseen kompensointikuristin kytketään. (KUVIO 14). (Multirel 2015.)

Maasulkuvirran kompensoinnin säätäjä ohjaa kompensointikelaan keskitetyssä kompensoinnissa. Säättömootorin avulla säädetään induktanssia ja maasulkuvirran arvoa. Säättäminen tapahtuu verkon terveessä tilassa, ei maasulkutilanteen aikana. (Multirel 2015.)

Jos kaksi automaattisäädöllä olevaa kompensoitua verkkoa kytketään rinnan yhteen, voivat automaattisäätäjät ryhtyä säätämään eri suuntaan eivätkä näin ollen saavuta verkkojen yhteistä resonanssipistettä. Tämän estämiseksi voidaan toinen automaattisäätäjä lukita kiinteäksi, tällöin annetaan kyseisen säätäjän virityksen virta-arvo toiselle säätäjälle perusvirityksen arvona. (Taimisto, 1993,30.)

Mikäli kompensoitu verkko on pieni, voi maasulkuvirran pätkökomponentti jäädä niin pieneksi, ettei maasulkuvirran suuntaa voida määrittää luotettavasti. Näin on etenkin silloin, kun käytetään nollavirran mittauksessa summakytkentää tai laskennallista summamittausta. Tavallisesti pätkökomponenttia kasvatetaan kompensointikelan rinnalle asennetulla rinnakkaisvastuksella, jonka tehtävä on muuttaa vikapaikan pätkövirtakomponenttia. (ABB 2000,16.)

6.2 Hajautettu kompensointi

Kompensointi voidaan tehdä myös hajautettuna, jolloin tarvittava määrä kompensointikuristimia sijoitetaan verkkoon johtojen luokse. (KUVIO 13.) Hajautettua kompensointia käytetään tavallisesti haja-asutus alueella ja pitkillä johtolähdöillä. Johdon luona sijaitseva sammutuskuristin mitoitetaan kyseessä olevan johdon tuottaman kapasitiivisen maasulku-

virran mukaan. Kompensointi voidaan toteuttaa myös nk. kelamuuntajalla. Kelamuuntaja on varustettu jakelumuuntajakäämillä. Kelamuuntajan kompensointikelan tavallinen säätöalue on 5 – 15 A. Kelamuuntajan arvosta voidaan nähdä, minkä kokoista vikavirtaa ko. laitteella voidaan kompensoida. (ABB 2000,7; Multirel 2015.)

Tavallisesti hajautetussa kompensoinnissa vain osa verkon maasulkuvirrasta kompensoidaan. Tässä on otettava huomioon, etteivät yksittäiset johdot saa missään tilanteessa yli-kompensoitua. (ABB 2000,7)

6.3 Kompensoinnin hyödyt ja haitat

Kompensoinnin päätarkoitus on maasulkuvirran pienentäminen, se on 90 – 95 % pienempi kuin kompensoimattomassa verkossa. Tällä saavutetaan pienet askel- ja kosketusjännitteet, näin ollen myös maadoituskustannukset vähenevät. Näiden lisäksi maasuluista aiheutuvat reletoiminnot vähenevät. Osa maasulkuvalokaarista sammuu itsestään kompensoidussa verkossa, katkaisijoiden tekemättä verkkoa jännitteettömäksi. Kompensoinnin avulla pystytään täten pienentämään jälleenkytkentöjen määrää 70 – 90 %, jolloin sähkönlaatu paranee ja katkaisijoiden huollon tarve vähenee. Myös valokaaren aiheuttamat vauriot jäävät vähäisiksi ja oikosulut pienenevät. Ne kehittyvät yksivaiheisista maasuluista. (Autio 2005,2; ABB 2000,18.)

Maasulkuvirran kompensoinnin haittapuolina mainittakoon kompensointilaitteiden hankintakustannukset. Releistyksen toteuttaminen on hankalaa verrattuna maasta erotettuun verkkoon. Releasetuksia joudutaan muuttamaan, jos kompensointi on pois käytöstä jostain syystä. Verkon käytölle voi tulla rajoituksia virityksen epätarkkuudesta, jonka on pysyttävä kohtuullisissa rajoissa. (Autio 2005,12; ABB 2000,18.)

6.4 Kompensointilaitteisto

6.4.1 Maadoitusmuuntaja

Kuten jo tuli aikaisemmin mainittua, Suomessa 110/20 kV muuntajat ovat kytkentäryhmältään YNd11, niistä puuttuu alijännitepuolen tähtipiste kokonaan. Siihen kompensointikuristin tulisi kytkeä. Näin ollen keinotekoinen tähtipiste saadaan maadoitusmuuntajan (KUVIO 15) avulla. Maadoitusmuuntajan kytkentä on esitetty kuviossa 14 kompensoituun verkkoon.



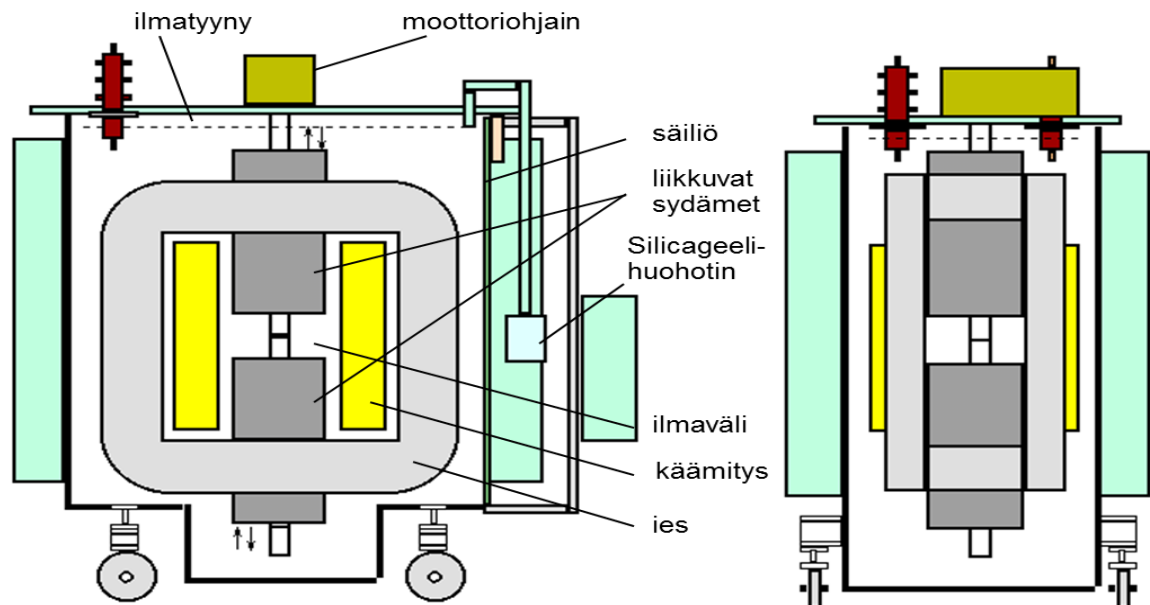
Kuvio 15. Maadoitusmuuntaja.

Tavallisesti maadoitusmuuntajaan lisätään omakäyttökäämitys. Joissakin tapauksissa lisätään myös erotinkoje kompensointikelan ja muuntajan välille, jonka avulla kompensointikela voidaan irrottaa verkosta ilman, että sähköasemalta katkeaa omakäyttäjännite. Tällöin erottimen asennosta pitää saada apukosketintieto suuntareille. Sammutuskuristimen ollessa kytkettynä verkkoon releellä saadaan mitattua maasulkuvirran pätökomponentti ($I_o \cos \varphi$). Jos verkko on maasta erotettu, saadaan mitattua loiskomponenttia ($I_o \sin \varphi$). (Isomäki 2010,23.)

6.4.2 Sammutuskuristin

Sammutuskuristin eli kompensointikuristin (KUVIO 16) on rakenteeltaan öljyristein sädettäväsydäminen induktanssikela. Sydän voi olla joko liuku- tai upposydäminen, säätötavasta riippuen. Sammutuskuristimen induktanssia muuttamalla säädetään kompensoitavaa maasulkuvirtaa, tämä säätö tapahtuu automaattisen säätäjän avulla. Automaattisäätäjän ohjaamana moottoriohjain liikuttaa rautasydämen osaa, joka muuttaa ilmaväliä. Induktanssi muuttuu ilmavälin muuttuessa, näin saadaan kompensoivaa maasulkuvirtaa säädettyä. Säädettäväsydäminen induktanssikela määritetään maasulkuvirran mukaan ja on asetettavissa 10 – 100 % suurimmalle mitoitusvirta-arvolle. Tavallisesti käytössä olevat kelat määritetään lyhytaikaista käyttöä varten (2h). (Multirel 2015; Isomäki 2010,24.)

Swedish neutral- yhtiön valmistama sammutuskuristin on erilainen kuin edellä mainittu. Sammutuskuristimessa sydän on rakenteeltaan kiinteä. Tämän säätö on portaittain tapahtuva, säätöalueeksi saadaan 15 – 100 % lisäämällä tai vähentämällä kondensaattoreita pienjännitepuolelle. Kuristin sijaitsee ilmatiiviissä, suljetussa huolto vapaassa säiliössä. Sammutuskuristimeen voidaan tarpeen vaatiessa lisätä jäännösvirtakompensointilaitteisto. (Isomäki 2010,24-25.)



Kuvio 16. Sammutus- eli kompensointikuristin (Autio 2005)

6.4.3 Sammutuskuristimen säätäjä

Säätäjän (KUVIO 17) tehtävänä on muuttaa kompensointikuristimen induktanssia, jotta sähköverkon kompensointi olisi säädetty mahdollisimman tarkasti haluttuun kohtaan. Kompensoinnin säätäjä tarkkailee sähköverkon nollajännitetasoa, joka on maksimissaan silloin, kun kelan induktiivinen reaktanssi ja sähköverkon maakapasitanssit ovat yhtä suuret. Tätä kutsutaan kompensointisäätäjän resonanssipisteeksi. Kun verkossa tapahtuu nollajännitteen muutos, seuraa siitä myös resonanssipisteen muutos, jonka säätäjä myös huomaa. Näin ollen säätäjä suorittaa säädön muuttuneen nollajännitteen perusteella, mikäli muutos on asetteluarvoa korkeampi. Maasulkutilanteessa ei säätäjä toimi, koska säätö pitää tehdä verkon terveessä tilanteessa. Tällä estetään kompensointikuristimen mahdollinen vaurioituminen. (Isomäki 2010,25.)



Kuvio 17. Swedish Neutral -säätäjä

6.4.4 Rinnakkaisvastus

Sammutuskuristin ei itsestään pysty kompensoimaan kaikkea virtaa, jota maasulkutilanteessa esiintyy. Sammutuskuristin kyllä pystyy kompensoimaan kapasitiivisen maasulkuvirran, ei kuitenkaan jäännösvirtaa. Jäännösvirta muodostuu sähköverkon häviöistä sekä sammutuskuristimen omista pätöhäviöistä ja näitä häviöitä käytetään hyväksi, kun tavoitellaan selektiivisesti irrottamaan vaurioitunut johtolähtö. Koska jäännösvirran suuruuteen vaikuttavat monenlaiset tekijät, tietyissä vikatilanteissa joudutaan suurentamaan jäännösvirtaa keinotekoisesti, sillä releiden pitää pystyä laukaisemaan oikea johtolähtö irti verkosta. Tämän toteutukseen käytetään sammutuskuristimen rinnalle kytkettyä vastusta, jolla kasvatetaan releen mittaamaa pätövirtaa. (Isomäki 2010,25-26.)

7 MAASULKUVIRRRAN KOMPENSOINTI OULUN SEUDUN SÄHKÖ - VERKKOYHTIÖSSÄ

Lähtökohtana Oulun Seudun Sähkö -verkkoyhtiössä oli selvittää kustannustehokkaimmat tavat toteuttaa kasvavan maasulkuvirran kompensoinnintarve. Työn perustana on edellisvuonna valmistunut investointiohjelma ja verkonrakennusstrategia, tällä tavoitetaan sähkömarkkinalain edellyttämät toimintavarmuusvaatimukset siirtymäkauden loppuun mennessä.

7.1 Nykytila-analyysi

Työn aloitin selvittämällä nykyiset maasulkuvirran kompensointilaitteet ja niissä käytössä olevat kapasiteetit. Oulun Seudun Sähkö -verkkoyhtiössä on käytössä sähköasemilla Swedish Neutral -yhtiön valmistavat keskitetysti asennetut automaattisäädöllä olevat maasulkuvirran kompensointilaitteet. Lumijoen tien sähköasemalla on kuitenkin Trench Austria -yhtiön valmistama automaattisäädöllä oleva kompensointilaitteisto. Yksi hajautetusti toteutettu kompensointi on asennettu Oulunsaloon.

Jotta pystyin laskemaan maasulkuvirtoja, täytyi tietää johtopituudet kaapelilajeittain, keskiännitejohtojen pituudet nykytilassa on esitetty liitteessä 8. Laskin sähköasemakohtaisesti nykyisten johtojen tuottaman maasulkuvirran, nämä tiedot pystyin myös lukemaan ABB DMS600 ohjelmasta. Taulukosta 4 näkee esim. Paituri -sähköaseman lähdöt ja johtimien pituudet, jotka on muutettu km:ksi liitteen 3 pohjalta.

TAULUKKO 4. Paituri -sähköaseman johtolähdöt ja johtojenpituudet

Lähdöt	Avojohtoa [km]		PAS-johtoa [km]		Maakaapelia [km]	
	Vanhaa	Uutta	Vanhaa	Uutta	Vanhaa	Uutta
J02 Ouluntulli	27,6	0	5,4	0	1,4	8,6
J04 Kokkokangas	2,6	0	11,7	0	1,7	1,4
J06 Kempele	1,8	0	2,6		0,6	1,2
J08 Matturi	1,9	0	1,1		0,4	3
J09 Vihiluoto	0,5	0	4,7		1,4	6,4

Maasulkuvirtaa laskettaessa täytyy tietää verkon pääjännite U ja johdon maakapasitanssi C_o , joka on liitteen (2) mukaan avojohdolla $0.0061 \mu\text{F}/\text{km}$, PAS -johdolla $0.005\mu\text{F}/\text{km}$ ja maakaapelilla $0.23\mu\text{F}/\text{km}$.

Lähdön J02 kokonaismaakapasitanssi on täten:

$$0.0061\mu\text{F}*27.6\text{km}+0.005\mu\text{F}*5.4\text{km}+0.23\mu\text{F}*1.4\text{km} \approx 5,2\mu\text{F} \quad (24)$$

Lähtöjen maasulkuvirrat vikaresistanssittomassa maasulussa voidaan laskea yhtälön 5 avulla.

TAULUKKO 5. Paituri -sähköaseman maasulkuvirrat johtolähdöittäin

Johtolähtö	Maasulkuvirta I_f [A]
J02 Ouluntulli	5,65
J04 Kokkokangas	5,06
J06 Kempele	1,75
J08 Matturi	1,19
J09 Vihiluoto	3,79
Yhteensä	17,44

Vikaresistanssin pienentämä maasulkuvirta lasketaan yhtälöllä 8.

TAULUKKO 6. Paituri -sähköaseman maasulkuvirta-arvoja eri vikaresistanssin arvoilla

Vikaresistanssi [Ω]	Maasulkuvirta [A]
0	17,44
500	13,9
1000	9,63
1500	7,04

Nykytilassa sähköaseman maasulkuvirrat ovat vikaresistanssittomassa maasulussa $17,44 \text{ A}$ ja 500Ω vikaresistanssisessa maasulussa $13,9 \text{ A}$. Maasulkuvirtoja voidaan verrata DMS:n antamiin arvoihin, jotka ovat $18,6 \text{ A}$ ja $14,5 \text{ A}$ (LIITE 4).

Paituri -sähköasemalla on käytössä 50 A automaattisäädöllä oleva kompensointilaitteisto, joka riittää kompensoimaan nykyisten johtimien maakapasitanssien tuottama n. 18 A maasulkuvirtaan. Kompensoinnin pienentämä maasulkuvirta vikaresistanssisessa maasulussa voidaan laskea yhtälöllä 15.

TAULUKKO 7. Kompensoinnin pienentämä maasulkuvirta Paituri -sähköasemalla

Sähköasema	Maasulkuvirta [A]
Paituri	3,81

Tätäkin arvoa voidaan verrata DMS:n antamaan arvoon 3.9A (LIITE 4).

Kaikkien kahdentoista sähköaseman nykyiset kompensoinnit ja maasulkuvirrat on esitetty liitteessä 4. Maasulkuvirta on laskennallinen arvo nykyisistä johtopituuksista. Kompensointilaitteistot on käyty tarkistamassa paikan päällä. Kuten liitteestä huomaamme kompensointi on ollut riittävää sähköasemilla, vain Utasen -sähköasemalla kompensointi on riittämätön.

7.2 Tulevan tilan analyysi

Investointiohjelman aikana, joka ulottuu vuoden 2028 loppuun asti, tarvitaan nykyisten kompensointilaitteiden lisäksi uusia kompensointilaitteita n. 340 A verran. Tämän toteuttamiseen on useita vaihtoehtoja. Joko asemille uusitaan isompia säädettäviä kompensointilaitteita tai kiinteitä kompensointilaitteita asennetaan hajautetusti kentälle tai asemille säädettävän kompensoinnin rinnalle. Kompensointi voi olla myös yhdistelmä säädettävistä sekä kiinteistä kompensointilaitteista. Koska tavoitteena on suunnitella kustannustehokkain tapa toteuttaa maasulkuvirran kompensointi, joudutaan vanhoja laitteita siirtämään toisille sähköasemille.

Oulun Seudun Sähkö -verkkoyhtiöllä verkonrakennusstrategia sisältää n. 175 km keskijänniteverkon maakaapelointia seuraavan 15 vuoden aikana, mistä 145 km on taajamissa ja 27 km haja-asutusalueella (TAULUKKO 8). Maakaapeloinnilla varmistetaan sähkömarkki-

nalain vaatimukset säävarmasta verkosta. Vaatimus astui voimaan 1.9.2013. 175 km:n maakaapelointi vastaa n. 440 A maasulkuvirtaa.

TAULUKKO 8. Verkonrakennusstrategia kunnittain (Räisänen M. 2014)

Kunta	Kj.kaapelointi Taajama	Kj-kaapelointi Muu	Pj-kaapelointi	puistomuuntamot
Ala-Temmes			2	1
Kempele	51		98	59
Liminka	14		28	20
Lumijoki	5		13	6
Muhos	17	3	34	33
Murto	4		3	6
Oulunsalo	17		32	21
Päivärinne	5		5	5
Rokua		13	3	3
Temmes	2	11	5	4
Tupos	9		7	15
Tyrnävä	6		19	17
Utajärvi	6		16	14
Vaala	9		20	14
Yhteensä	145 km	27 km	285 km	218 kpl

Tulevien kompensointilaitteiden mitoittamisessa on otettava huomioon asemakohtainen kompensoinnin tarve, varasyöttötilanteet, muut tilapäiskäyttötilanteet.

Jotta saamme tietoon tulevat kompensoinnit, täytyy ensin laskea maasulkuvirtalaskelmia. Tätä varten kehitettiin Microsoft Excel -pohjalla oleva laskentatyökalu. Laskentatyökalu on esitelty tarkemmin luvussa kahdeksan.

Otetaan esim. Paituri -sähköasema lähempään tarkasteluun. Asema sijaitsee Kempeleen luode-osassa. Verkonrakennusstrategian mukaan maakaapelointi tulee lisääntymään Paiturin -sähköasemalle johtolähdöittäin taulukon 9 mukaisesti.

TAULUKKO 9. Paituri -sähköaseman verkonrakennusstrategian mukaiset maakaapeloinnit

Johtolähtö	Maakaapelointia [km]
J02 Ouluntulli	8,6
J04 Kokkokangas	1,4
J06 Kempele	1,2
J08 Matturi	3
J09 Vihiluoto	6,4

AHXCMK 3x150 -maakaapelin maasulkuvirta on taulukon 3 mukaan 2,5 A/km, asemalle tarvitaan näin ollen lisää 51,5 A kompensointia. Asemakohtainen kompensointi kasvaa täten 69 ampeeriin. Paituriin täytyy asentaa 100 A säädettävä kompensointilaitteisto. Suositeltavaa on asentaa Vihiluotoon 5 – 15 A kiinteä kompensointi varasyöttötilanteiden varalle. Toinen vaihtoehto voisi olla, että asemalle asennetaan pelkästään n. 120 A säädettävä kompensointilaitteisto.

Liitteessä 6 on havainnollistettu tulevista maakaapeloinneista aiheutuvat laskennalliset maasulkuvirrat sekä tarvittava kompensointi sähköasemittain.

7.3 Kompensointilaitteet ja kustannukset

Kompensointi ratkaisuja Oulun Seudun Sähkö -verkkoyhtiöllä on mietitty kolmesta eri näkökulmasta, keskitetysti sähköasemille, hajautettuna kentälle ja edellisten yhdistelmänä. Ensimmäisessä vaihtoehdossa sijoitetaan automaattisäädöllä varustetut laitteet sähköasemille, ja vanhoja kompensointilaitteita siirretään toisille sähköasemille, jos tämä on mahdollista. Toisessa vaihtoehdossa toteutus hajautettuna kentälle, mikä toteutettaisiin kela-
muuntajilla ja rinnakkaiskuristimilla. Viimeinen vaihtoehto on edellisten yhdistelmä.

Vertailun pohjaksi on pyydetty kolmelta eri taholta kompensointilaitteiden tuotevalikoimaa sekä hinta-arvioita kyseisille laitteille. Asennuskustannukset arvioitiin seuraavasti:

- säädettävän kompensointilaitteiston asennus 10 000 €
- säädettävän kompensointilaitteiston siirto 5 000 €
- rinnakkaiskuristimen asennus 8 500 €

- kelamuuntajan asennus 4250 €

7.3.1 Keskitetty kompensointi

Keskitetyssä vaihtoehdossa sähköasemille asennetaan isompia automaattisäädöllä olevia kompensointilaitteita ja vanhoja laitteita kierrätetään, jos näitten kapasiteetti riittää. Investoitavien kompensointilaitteiden koot ovat 105 – 135 A. Näiden hinta on 50 000 € - 70 000 €, sisältäen kompensointikelan lisävastuksella, automaattisäätimen, laitesuojan ja maadoitusmuuntajan.

Taulukossa 10 on esitetty kompensointilaitteiden koot ja siirrot sähköasemittain. Taulukossa on myös eritelty hinnat. Vaihtoehdon kokonaiskustannukset tulevat olemaan n. 395 000 € tämä vastaa 575 €/A, josta laitekustannukset ovat n. 320 000 € eli 464 €/A

TAULUKKO 10. Keskitetysti toteutettu kompensointi.


Asemat	Uusi	Vanha	Laite	Hinnat		Työn hinta				
				Maad.muunt.	Laitteisto	Siirto	Asennus			
Oulunsalo uusi	ennallaan	80	---	---	---	---	---			
Oulunsalo vanha	105+30	60+30	105 A	---	50 000	---	10 000			
Kempele uusi	105	80	105 A	---	50 000	---	10 000			
Kempele vanha	135	50	135 A	---	60 000	---	10 000			
Paituri	105	50	105 A	---	50 000	---	10 000			
Muhos	ennallaan	50	---	---	---	5 000	---			
Tyrnävä	135	50	135 A	---	60 000	---	10 000			
Pyhäkoski	50	30	---	---	---	5 000	---			
Utanen	80	30	---	---	---	5 000	---			
Liminka	ennallaan	80	---	---	---	---	---			
Lumijoentie	ennallaan	80	---	---	---	---	---			
Jylhämä	105	60	105	---	50 000	---	10 000			
	690									
					0	320000	15000	60000		
			Laitteet	Yht.€	320000		Kaikki	Yht.€	395000	
				€/A	464			€/A	572	

7.3.2 Hajautettu kompensointi

Hajautetussa ratkaisussa käytetään kiinteitä kompensointilaitteita, joita asennetaan sopiva määrä kentälle. Tässä ratkaisussa maasulkuvirta kompensoidaan kelamuuntajilla (5 – 15 A) sekä rinnakkaiskuristimella (20 – 25 – 30 A). Kelamuuntajien koko on 50 – 315 kVA, ja

laitteiden hinnat ovat 9 990 – 20 000 €, toimittajasta riippuen. Rinnakkaiskuristin sisältää myös laitesuojan. Taulukossa 11 on havainnollistettu kyseisillä laitteilla toteutettu kompensointi. Laskennassa on käytetty 200 kVA kelamuuntajia.

TAULUKKO 11. Hajautetusti toteutettu kompensointi

Asemat	A	Kelamuuntaja	Rinnakkaiskuristin	Hinnat			
				Laite	Asennus		
Oulunsalo uusi	80	---	---	---	---		
Oulunsalo vanha	60+30	3 x 200kVA	---	42 600	12750		
Kempele uusi	80	200kVA	---	14 200	4250		
Kempele vanha	50	5 x 200kVA	---	71 000	21 250		
Paituri	50	4 x 200kVA	---	56 800	17 000		
Muhos	50	toinen 50A sääd.	---	---	---		
Tyrnävä	50	5 x 200kVA	---	71 000	21 250		
Pyhäkoski	30	200kVA	---	14 200	4250		
Utanen	30	3 x 200kVA	---	42 600	12750		
Liminka	80	200kVA	---	14 200	4250		
Lumijoentie	80	---	---	---	---		
Jylhämä	60	---	20 - 25 - 30	30400	8500		
		345	30	357000	106250		
		Laite	Yht.€	357 000	Kaikki	Yht.€	463250
	Siirto		€/A	952		€/A	1235

Hajautetulla kompensoinnilla toteutettu ratkaisu nostaa kokonaiskustannukset n. 463 000 € suuruiseksi. Tämä on noin 1235 €/A, josta laitekustannukset ovat n.357 000 € eli 952 €/A.

7.3.3 Keskitetty ja hajautettu kompensointi

Tässä vaihtoehdossa käytetään kompensointiin edellä olevien yhdistelmää, eli keskitettyä ja hajautettua kompensointia. Taulukosta 12 nähdään säädettävien/kiinteiden laitteiden koot sekä mihin muuntopiiriin kelamuuntaja tulisi asentaa.

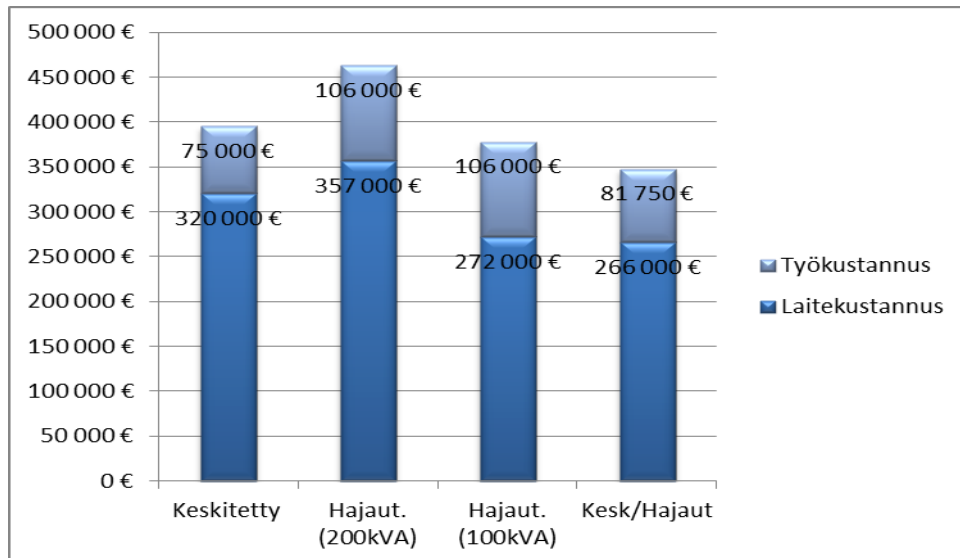
Taulukosta pystymme lukemaan ratkaisun kokonaiskustannukset, jotka ovat n. 338 000 € mikä vastaa 835 €/A, josta laitekustannukset ovat n. 266 000 € eli 657 €/A.

TAULUKKO 12. Keskitetysti ja hajautetusti toteutettu kompensointi

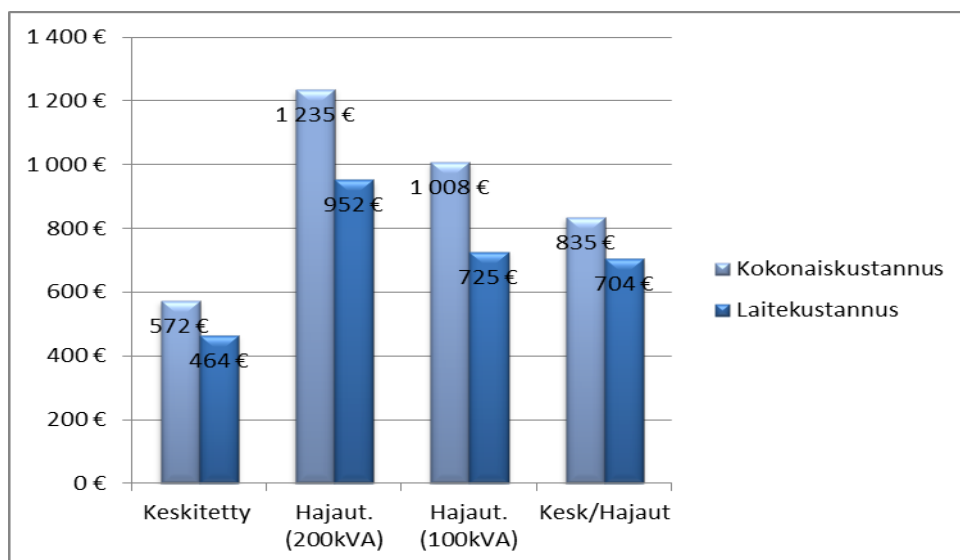
Asemat	Uusi	Vanha	Säädettävä	Kelamuuntaja	Rinnakkaiskuristin	Hinnat:		
						Laite	Työ	
Oulunsalo uusi	ennallaan	80	---	---	---	---	---	
Oulunsalo vanha	60+30+30	60+30	---	mp.8114.200kVA, mp.8010.315kVA	---	14200, 20000	4250, 4250	
Kempele uusi	80+30	80	---	mp.7070.200kVA, mp.7150.200kVA	---	14200, 14200	4250, 4250	
Kempele vanha	135	50	135	---	---	60 000	10 000	
Paituri	105	50	105	(Vihil. 200kVA)	---	50 000	10 000	
Muhos		50	---	---	---	---	5 000	
Tyrnävä		50	---	mp.3111.200kVA, mp.5200.50kVA, mp.4002.100kVA, mp.4020.200kVA	---	14 200, 9 990, 10 490, 14 200	4250, 4250, 4250, 4250	
Pyhäkoski		30	---	---	---	---	5 000	
Utanen	Varasto 80 A	30	---	---	---	---	5 000	
Liminka	80+15	80	---	mp.5080 200kVA	---	14 200	4250	
Lumijoentie	ennallaan	80	---	---	---	---	---	
Jylhämä	60+30	60	---	---	20 - 25 - 30 A	30 400	8 500	
			240	135	30	276	71 750	
			Laitteet	Yht. €	266 000	Kaikki	Yht.€	338 000
	Siirto			€/A	657		€/A	835

7.3.4 Yhteenveto kompensoinneista

Kuviossa 18 nähdään eri toteutustapojen kokonaiskustannukset. Keskitetyn kompensoinnin laitekustannukset ovat 320 000 €, johon lisätään vielä työkustannukset, jolloin kokonaiskustannukset nousevat arvoon 395 000 €. Kuviossa 19 on taas esitetty, kuinka paljon investoinnit ovat ampeeria kohden eri kompensointiratkaisuilla.



KUVIO 18. Kompensoinnin kokonaiskustannukset



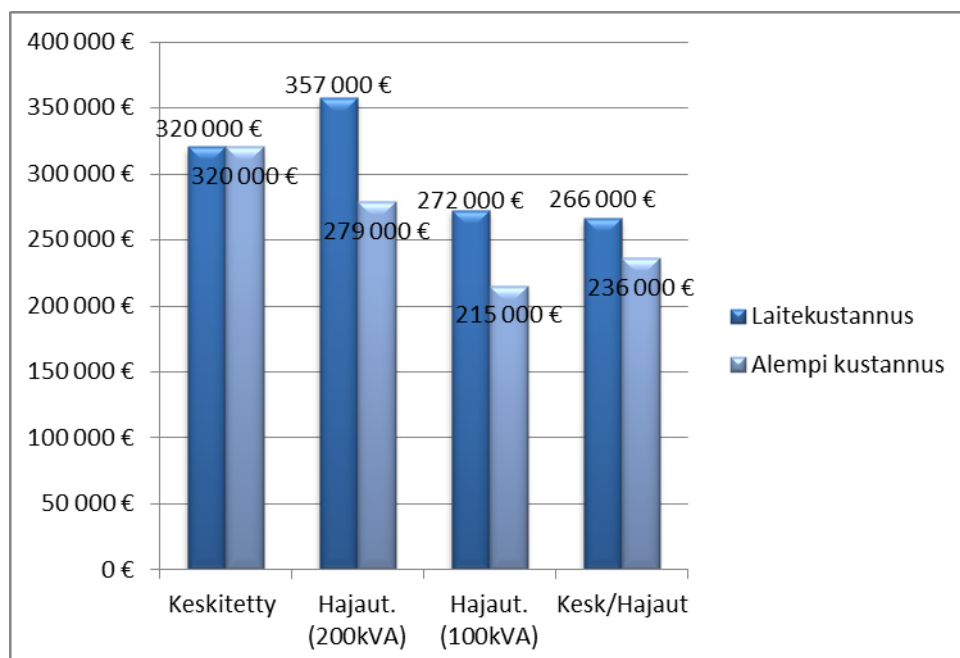
KUVIO 19. Kompensoinnin kustannukset €/A

Hajautetussa kompensointiratkaisussa käytettiin kelamuuntajien kokona 200 kVA ja 100 kVA, kun laskettiin kustannuksia. Vaihtoehdossa tulee vähiten investointiin nähden ampeereita. Ratkaisu on myös hankala toteuttaa, koska laskelmien mukaan laitteita tulisi laittaa jopa 24 kpl riittävän kompensoinnin saamiseksi. Laitteiden sijoituspaikat täytyisi olla myös tarkkaan harkittu, koska hajautetussa kompensoinnissa yksittäinen johto ei saa missään tilanteessa ylikompensoitua.

Koska laskelmassa käytettiin keskiarvona 200 kVA ja 100 kVA kelamuuntajia, täytyy kelamuuntajien koot tarkistaa asennuspaikan mukaan, mikä vaikuttaa myös kustannuksiin. Laskelmissa ei myöskään huomioitu suojarakennusten kustannuksia. Näin ollen tulee rakennusten kustannukset vielä lisätä laitekustannukseen.

Keskitetysti ja hajautetusti toteutettu kompensointi on näistä vaihtoehdoista halvin kustannuksiltaan ja euromääräinen hinta ampeeria kohden on järkevällä tasolla. Varasyöttötilanteissakin kompensointi tulee riittämään, kun kompensointi toteutetaan keskitetysti ja hajautetusti. Tämä on myös vaihtoehdoista kustannustehokkain.

Muuntopiiriin, johon on tarkoitus asentaa kompensointilaitteisto, voidaan asentaa kelamuuntaja, joka korvaa myös kyseisen muuntopiirin jakelumuuntajan. Kelamuuntajalla voidaan hoitaa sähkönjakelu ja maasulkuvirran kompensointi. Niinpä vaihtoehdoissa 2 ja 3 säästetään jakelumuuntajan ja kelamuuntajan erotuksen verran, koska muuntajat joka tapauksessa joudutaan asentamaan. Kun korvataan jakelumuuntajat kelamuuntajilla, on vaikutus kohtalaisen suuri laitekustannuksiin (KUVIO 20). Kelamuuntajan koko tulee mitoittaa kuormituksen mukaan.



KUVIO 20. Jakelumuuntajien vaikutus laitekustannuksiin

8 LASKENTATYÖKALU

8.1 Tavoite

Tavoitteena oli luoda helppokäyttöinen, selkeä ja toimiva Microsoft Excel -pohjalle rakennettu laskentatyökalu, joka avustaa keskijänniteverkon maasulkuvirran määrittämisessä (LIITE 7). Laskentatyökalulla haluttiin saada selville helposti johtojen tuottama maasulkuvirta ja muita maasulkuarvoja. Työkalulla haluttiin myös minimoida laskuvirheet.

8.2 Käyttö

Laskentatyökalu on jaettu kolmelle eri välilehdelle:

- maasta erotettuun
- kompensoituun verkkoon
- releasetteluun

Jokainen osio laskee syötettyjen arvojen perusteella laskentapohjaan sijoitettujen yhtälöiden avulla erinäisiä tuloksia.

8.2.1 Maasta erotettu verkko

Laskentapohjaan syötetään maasta erotetun verkon tapauksessa lähtöarvoiksi verkon pääjännite U , taajuus f , maadoitusresistanssi R_m , vikaresistanssi R_f ja lähtöjen johtojen pituudet l .

Tulokset voidaan lukea Excel-pohjan keltaisista kohdista, tuloksia ovat mm. maasulkuprosentti, lähtöjen maasulkuvirrat, taustaverkon syöttämät maasulkuvirrat, vikaresistanssin pienentämä maasulkuvirta sekä muutamia jännitearvoja. Laskelmista voidaan myös tehdä kuvaajat, joista nähdään vikaresistanssin vaikutus maasulkuvirtaan ja nollajännitteeseen.

8.2.2 Sammutettu verkko

Sammutetun eli kompensoidun verkon tapauksessa lähtöarvoiksi syötetään maasta erotetun verkon lähtöarvojen lisäksi sammutusresistanssi R_o ja kompensointiaste K .

Tuloksina saadaan maasta erotetun verkon arvojen lisäksi mm. kuristimen ja verkon reaktanssit, maasulkuvirran pätökomponentti, kuristimen induktanssi. Laskentatyökalu näyttää myös kompensoinnin vaikutuksen maasulkuvirtaan ja nollajännitteeseen. Tässäkin tapauksessa laskelmista voidaan tehdä kuvaajat, maasulkuvirta vikaresistanssin funktiona ja nollajännite vikaresistanssin funktiona.

8.2.3 Releen asetteluarvot

Maasulkusuojaukseen suunniteltaessa on huomioitava maasulkusuojauksen releistyksen asetteluarvot. Suojauksen tulee toimia selektiivisesti aina 500Ω vikaresistanssin kautta tapahtuvissa maasuluissa, kun ainakin kaksi lähtöä on kytketty. (Lakervi & Partanen 2008,194.)

Maasulkusuojauksen releistyksen asetteluarvojen saamiseksi kehitettiin myös Excel -pohjaan laskentatyökalu, joka laskee johtojen virta-arvot. Työkaluun syötetään lähtöarvoiksi pääjännite, taajuus, maadoitusresistanssi, vikaresistanssi ja johtojen pituudet. Lähtöön 7 valitaan johtolähtö jossa on vähiten maakapasitanssia, yleensä lyhin johto.

Tuloksena saadaan virta-asettelut pahimman tilanteen mukaan. Kytkettynä on vain lyhin johto ja tarkasteltava johto. Tällöin summavirtamuuntajan läpi kulkeva vikavirta on pienin mahdollinen. On huomioitavaa, että tulos on vaurioituneen lähdön releen näkemä virta.

Virta-asettelu täytyy olla:

- summavirta $>$ asetteluarvo ($I_r > I_h$)
- nollajännite $>$ asetteluarvo ($U_o > U_{oh}$).

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkon kasvava maasulkuvirta ja siitä aiheutuvan kompensoinnin tarpeet. Työn aihe oli ajankohtaista, sillä sähkömarkkinalain tiukentuneet vaatimukset vaativat sähköyhtiöiltä säävarmempaa verkkoa. Laki edellyttää Oulun Seudun Sähkö -yhtiön maakaapeloinnin lisäämistä, mikä kasvattaa maasulkuvirtaa. Työn lähtökohtana käytettiin verkonrakennusstrategiaa, joka valmistui edellisenä vuonna.

Opinnäytetyössä on tutkittu maasulkua ja maasulkusuojaukseen liittyviä keskeisiä asioita maasta erotetussa verkossa sekä sammutetussa verkossa. Keskeiset asiat on kuvattu teoreettisesti sekä laskennallisesti.

Työssä on laskettu maasulkuvirrat nykytilassa Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkossa sekä tulevista maakaapeloinneista aiheutuvat maasulkuvirrat. Kasvavista maasulkuvirroista on laskettu tulevaisuuden kompensoinnin tarve.

Lopputuloksista käyvät ilmi kustannustehokkaimmat tavat toteuttaa kompensointiratkaisut. Tulokset ilmaisevat myös toimenpiteet, joita täytyy tehdä riittävän kompensoinnin saavuttamiseksi.

Oulun Seudun Sähkön keskijänniteverkon kompensointi tulee riittämään sähkömarkkinalain asettaman siirtymäkauden loppuun saakka, jos verkkoyhtiö noudattaa verkonrakennusstrategiaa ja tämän työn kompensointiratkaisua. Mikäli verkkoon suunnitellaan verkonrakennusstrategiaan kuulumatonta lisäystä, tulee kompensoinnin riittävyys laskea uudelleen. Näin ei ajauduta tilanteeseen, jossa kompensointi olisi riittämätön.

Opinnäytetyöni aihe oli minulle melko tuntematon, maasulku ja maasulkuvirran kompensointi ei ollut tullut minulle työelämässäni vastaan ja opinnoissakin aihetta käsiteltiin hyvin vähän. Suosittelisinkin opettajia käsittelemään aihetta enemmän opetuksessaan. Aiheen ollessa vieras minun täytyi opiskella aihe alan kirjallisuudesta ja internetlähteistä, joista löytyi kohtalaisen hyvin tietoa aiheesta.

Opinnäytetyössäni mielestäni saavutin tavoitteet, joita oli asetettu. Tavoite oli löytää kustannustehokkain tapa toteuttaa maasulkuvirran kompensointi. Toivottavasti työn tilaajakin on tyytyväinen. Suurimpia haasteita opinnäytetyössä oli teoriaosan kirjoittaminen, mikä vei yllättävän paljon aikaa. Lukijalle oli tarkoitus saada kokonaiskuva maasulkuvirran kompensoimisesta. Haasteellista oli myös laskea kompensoinnin riittävyys varasyöttötilanteissa, koska jokaisen sähköaseman lähdöt piti saada korvattua varasyöttötilanteessa toisaalta.

LÄHTEET

ABB TTT-Käsikirja. 2000-07. Maasulkusuojaus. PDF-dokumentti. Saatavissa:

http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf

Luettu: 27.1.2015

ABB TTT-Käsikirja. 2000-07. Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot. PDF-dokumentti. Saatavissa:

http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/13_S%84hk%94asemat-kojaistot-muuntamot.pdf Luettu: 6.3.2015

Aura, L. & Tonteri, A. 1993. Sähkölaitostekniikka. Helsinki: WSOY

Autio K. 2005. Maasulkuvirran kompensointi. PowerPoint-diat. Saatu: Oulun seudun sähköiltä.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I. Järjestelmä tekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatiето

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Verkonsuunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatiето

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. 6 Painos. Helsinki: Otatiето

Energiateollisuus ry. Keskeytystilasto 2013. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkon-keskeytystilastot> Luettu: 3.1.2015

Isomäki, R. 2010. Sammutetun keskijänniteverkon kompensointilaitteiston lisävastuksen ohjaus. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. Saatavissa:

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16790/Isomaki_Rami.pdf?sequence=1 Luettu:27.1.2015

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3 Painos. Helsinki: Otatiето

Partanen, J. 2011. Maasulkusuojaus. Lappeenrannan yliopisto. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:vJUeILY0E3kJ:https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/maasulkusuojaus.pdf+&cd=1&hl=fi&ct=clnk&gl=fi> Luettu1.1.2015

Räisänen M. 2014. Sähköverkkoyhtiön suurihäiriövarmuuden kehittämissuunnitelma. Opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma.

Multirel. 2014. Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus. WWW-dokumentti.

Saatavissa: <http://www.multirel.fi/component/content/category/179-tuotteet>

Luettu:22.1.2015

Suomen standardisoimisliitto. 2009. SFS-Käsikirja 6001+A1+A2. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. Helsinki: Sesko

SFS 6001+A1+A2. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 2009. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS

Stm. A1 – 89. Sähköturvallisuusmääräykset. 1989. Helsinki. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ ja_hissit/ohjeet/sahkoturvamaaraykset%20A1_89.pdf
Luettu:27.1.2015

Taimisto S. 1993. Maasulkuvirran kompensointi keskijänniteverkoissa. Sähkö ja Tele 66,30.

Verkostosuositus SA 5:1994,25 Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Sähköenergialiitto ry. Helsinki: Sener

LIITTEET

- LIITE 1. Sähköturvallisuusmääräyksen mukaiset maadoitusryhmät
- LIITE 2. Johdintietoja johdinlajeittain
- LIITE 3. Johtopituuksia lähdöittäin OSS:n keskijänniteverkossa
- LIITE 4. Paituri -sähköaseman erinäisiä kompensointi arvoja
- LIITE 5. Maasulkuvirta ja kompensointi v. 2015
- LIITE 6. Maasulkuvirta ja kompensointi v. 2028
- LIITE 7. Laskentatyökalu

Sähköturvallisuusmääräyksen mukaiset maadoitusryhmät

A. Kosketusjännitteen kannalta sallittu maadoitusjännite

Maadoitusjännitteestä esiintyy *kosketusjännitteenä* tavallisesti vain osa.

Maadoitetuissa tai maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä olevissa osissa esiintyvistä *maadoitusjännitteestä* aiheutuvan kosketusjännitteen (askeljännite mukaan luettuna) vaarallisuuden kannalta jaotellaan nämä osat seuraaviin eri ryhmiin (*a . . . e*):

- a.* Laitteiston suojamaadoitettu osa (paljas maadoitusjohdin mukaan luettuna) tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa kuten rataakisko tai metalliputkisto, joka on *kosketeltavissa* (kosketusetäisyydellä) maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta.

Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka sijaitsee siten, että sitä ja erilliseen elektrodiin maadoitettua (nollattua) tai maahan muuten johtavassa yhteydessä olevaa toista metalliosaa voi *samanaikaisesti* koskettaa maasta, lattialta tai vastaavalta alustalta. Tässä tapauksessa lattia tai muu alusta voi olla eristävä tai johtava.

- b.* Laitteiston suojamaadoitettu osa (paljas maadoitusjohdin mukaan luettuna) tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka on kosketeltavissa *muualta* kuin maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta.

Laitteiston suojamaadoitettu osa tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosa, joka sijaitsee siten, että sitä ja erilliseen elektrodiin maadoitettua (nollattua) tai maahan muuten johtavassa yhteydessä olevaa toista metalliosaa voi *samanaikaisesti* koskettaa vain esim. pylvääseen nousten kuten pylväsmuuntamalla, *mutta ei* maasta, lattialta tai vastaavalta alustalta. Tällöin kuitenkin edellytetään sellaisten rakenteiden käyttämisestä, että kahden tässä tarkoitettun osan samanaikaisen kosketamisen mahdollisuus on vähäinen. Ellei vm. ehto ole täytetty, tämäkin tapaus kuuluu ryhmään *a*.

- c.* Maanpinnan alapuolella sijaitseva *maadoituselektrodi*.

- d.* Laitteiston suojamaadoitettu osa ja enintään 1000 V järjestelmän käyttömaadoitukseen yhdistetty osa silloin, kun näiden maadoittamiseen käytetään *yhteistä* elektrodia (tai elektrodien yhdistelmää) ja ko. enintään 1000 V järjestelmä on ainakin osittain ensiksi mainitun laitteiston (esim. kytkinlaitoksen) tai sen maadoituksen käsittämän alueen ulkopuolella. Tähän ryhmään rinnastetaan myös tapaus, jossa enintään 1000 V järjestelmän käyttömaadoituselektrodiin siirtyy yli 1000 V järjestelmän maadoituselektrodin aiheuttamasta potentiaalientästä maadoitusjännite (ks. kohta *B*).
- e.* Enintään 1000 V järjestelmän nollattu tai muuten suojamaadoitettu osa, joka on *alttiina* yli 1000 V järjestelmän jännitteelle. Jännite voi päästä ensiksi mainittuun järjestelmään lähinnä yli 1000 V johtimen koskettaessa yhteisiä pylväitä käytettäessä (ks. 10 § 1, tapaus *d*) siihen kuuluvaa johdinta, kannatusköyttä tai metallivaippaa (alaryhmä e_1) taikka eristysvian sattuessa järjestelmien välisessä muuntajassa suoraan käämityksestä toiseen (alaryhmä e_2). Jos jännitteelle altis enintään 1000 V järjestelmä on maadoitettu, sen (PEN-johtimen) maadoitusjännite on mainitunlaisessa eristysviassa maasulkupaikasta mitatun maadoitusimpedanssin (-resistanssin) ja ko. yli 1000 V järjestelmän maasulkuvirran tulo. Jos jännitteelle altis enintään 1000 V järjestelmä sen sijaan on maadoittamaton, jännite siinä nousee maahan nähden niin suureksi, että eristysvian vaara on ilmeinen. Vm. tapauksessa maadoitusjännite on vastaavan suojamaadoitusimpedanssin (-resistanssin) ja ko. yli 1000 V järjestelmän maasulkuvirran tulo.

Edellä alaryhmää e_2 koskevassa kohdassa tarkoitettu käämitysten välinen eristysvika ei ole mahdollinen muuntajassa, jossa käämitysten välissä on suojamaadoitettu, jännitteen pääsyn käämityksestä toiseen tehokkaasti estävä metallinen suoja ja paljaiden jännitteisten osien välinen ilmaväli muuntajan kannella täyttää taulukon 10.1–1 mukaiset vaatimukset. Tällaisesta rakenteesta on oltava merkintä muuntajassa.

Johdintietoja johdinlajeittain

Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaiheresistanssi Xv Ω/km 3)	Maakapasitanssi Cm μF/km 4)	Käyttökäpöstitanssi Ck μF/km 3)	Suurin sallittu kuormitusvirta In A 5)	Suurin sallittu 1 s aikovirta		Jäähymisaikavakio τ min
	Rv Ω/km						Ik kA	Ik kA	
	+20 °C 1)	+40 °C 2)							
Cu 16	1,14	1,23	0,412	0,0061	0,0088	145	2,2	2,3	3
Cu 25	0,718	0,774	0,398	0,0061	0,0092	195	3,5	3,7	4
Cu 35	0,526	0,567	0,387	0,0061	0,0094	240	4,8	5,1	5
Cu 50	0,365	0,394	0,377	0,0061	0,0097	305	6,9	7,3	7
Cu 70	0,266	0,287	0,365	0,0061	0,010	370	9,5	10,1	9
Cu 95	0,195	0,210	0,355	0,0061	0,010	485	13,1	13,8	11
Cu 120	0,150	0,162	0,348	0,0061	0,011	535	17,1	18	13
Al 25	1,16	1,25	0,397	0,0061	0,0082	170	2,1	-	3
Al 40	0,725	0,783	0,382	0,0061	0,0085	230	3,5	-	4
Al 62	0,458	0,486	0,368	0,0061	0,0089	305	5,5	-	6
Al 99	0,288	0,311	0,354	0,0061	0,010	415	8,7	-	8
Al 132	0,218	0,236	0,344	0,0061	0,011	495	11,6	-	10
Al 178	0,162	0,175	0,335	0,0061	0,011	600	15,6	-	13
Al 201	0,143	0,155	0,331	0,0061	0,011	645	17,7	-	15
AlMgSi 25	1,37	1,48	0,387	0,0061	0,0082	155	2,5	-	3
AlMgSi 40	0,834	0,901	0,382	0,0061	0,0085	210	3,5	3,7	4
AlMgSi 62	0,527	0,569	0,368	0,0061	0,0089	285	5,5	5,8	6
AlMgSi 99	0,332	0,369	0,354	0,0061	0,010	390	8,8	9,3	8
AlMgSi 132	0,251	0,271	0,344	0,0061	0,011	450	11,7	12,4	10
AlMgSi 178	0,189	0,203	0,335	0,0061	0,011	580	15,8	16,7	13
AlMgSiFe 21/4 Fersamal	1,55	1,68	0,398	0,0061	0,0082	145	1,9	2	3
AlMgSiFe 106/25	0,317	0,343	0,344	0,0061	0,011	400	8,4	9,9	10
Al/Fe 7/9 Bentam	4,31	4,66	0,413	0,0081	0,0088	80	0,6	0,7	2
Al 11/14 Megpic	2,71	2,93	0,397	0,0061	0,0082	110	1,1	1,2	3
Al/Fe 21/4 Swan	1,35	1,46	0,398	0,0061	0,0082	155	2	2,1	3
Al/Fe 34/6 Sparrow	0,847	0,915	0,383	0,0061	0,0085	210	3,2	3,3	4
Al/Fe 42/25 Sove	0,682	0,737	0,365	0,0061	0,010	250	4	4,2	7
Al/Fe 54/8 Raven	0,535	0,578	0,368	0,0061	0,010	280	5,1	5,3	6
Al/Fe 75/14 Lovise	0,380	0,411	0,357	0,0061	0,010	335	7,1	7,5	9
Al/Fe 85/14 Pigeon	0,337	0,384	0,354	0,0061	0,010	360	8	8,4	9
Al/Fe 88/52 Dotted	0,323	0,348	0,342	0,0061	0,011	400	8,4	8,8	13
Al/Fe 93/38 Imbra	0,310	0,335	0,344	0,0061	0,011	405	8,7	9,2	12
Al/Fe 106/25 Suuravo	0,279	0,301	0,344	0,0061	0,011	430	10	10,5	10
Al/Fe 108/23 Vessa	0,268	0,297	0,344	0,0061	0,011	420	10	10,5	10
Al/Fe 148/68 Kuopio	0,198	0,212	0,328	0,0061	0,011	550	13,9	14,5	16
Al/Fe 152/25 Ostrich	0,180	0,205	0,335	0,0061	0,011	550	14,3	15	15
Al/Fe 305/39 Duck	0,095	0,103	0,314	0,0061	0,012	845	28,7	30,2	22
Johdin	Vaiheresistanssi (DC)		Vaiheresistanssi Xv Ω/km 3)	Maakapasitanssi Cm μF/km 4)	Käyttökäpöstitanssi Ck μF/km 3)	Suurin sallittu kuormitusvirta In A 5)	Suurin sallittu 1 s aikovirta		Jäähymisaikavakio τ min
Rv Ω/km		Ik kA					Ik kA		
+20 °C 1)	+40 °C 2)							T1-linjat	
PAS 35	0,980	1,065	0,324	0,005	0,011	200	-	3,2	7
PAS 50	0,720	0,778	0,312	0,005	0,012	245	-	4,3	8
PAS 70	0,493	0,533	0,302	0,005	0,012	310	-	6,4	10
PAS 95	0,363	0,392	0,292	0,005	0,013	370	-	8,6	13
PAS 120	0,288	0,311	0,284	0,005	0,013	430	-	11	15
PAS 150	0,236	0,255	0,277	0,005	0,013	485	-	13,5	18
PAS 185	0,189	0,203	0,270	0,005	0,014	560	-	17	20
20 kV RIIPPUJOHDOT									
SAMKA 3x70	0,446	0,482	0,140	0,21	0,21	180	5	5	42
SAMKA 3x120	0,256	0,277	0,130	0,25	0,25	250	8,5	8,5	60
SAMKA 3x185	0,168	0,182	0,120	0,30	0,30	310	13	13	65
SAMI 3x57	0,428	0,462	0,272	-	-	250	6	6	20
SAMI 3x107	0,268	0,290	0,257	-	-	378	9,7	9,7	20
SAXKA 3x70	0,446	0,482	0,140	0,18	0,18	235	5,7	6,7	42
SAXKA 3x120	0,256	0,277	0,130	0,23	0,23	330	9,8	11,4	60
SAXKA 3x185	0,168	0,182	0,120	0,26	0,26	425	15	17,5	65
AHMCMKK 3x16	1,89	2,04	0,147	0,12	0,12	60	0,84	0,84	18
AHMCMKK 3x25	1,21	1,31	0,135	0,14	0,14	78	1,46	1,46	30
AHMCMKK 3x35	0,867	0,937	0,129	0,15	0,15	96	2,05	2,05	25
AHMCMKK 3x50	0,608	0,657	0,119	0,17	0,17	117	2,9	2,9	30
AHMCMKK 3x70	0,435	0,470	0,116	0,18	0,18	144	4,1	4,1	35
AHMCMKK 3x95	0,322	0,348	0,110	0,20	0,20	171	5,6	5,6	55

Johdin	Vaiheresistanssi		Vaihe- reaktanssi XV Ω/km	Maaka- pitanssi Cm $\mu\text{F}/\text{km}$	Käyttöka- pitanssi Ck $\mu\text{F}/\text{km}$	Suurin sallittu kuormitusvirta		Suurin sallittu 1 s oikosulkuvirta		Jäähdytys- alkavakio τ min	Maasulku- virta Ie A
	Rv Ω/km +20 °C 1) +40 °C 2)	In A maassa 4) ilmassa 3)				T1-lititimet Ik kA	T2-lititimet Ik kA				
AHMCMK 3x70	0,444	0,480	0,116	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	35	2,1
AHMCMK 3x120	0,254	0,274	0,107	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	55	2,4
AHMCMK 3x185	0,165	0,178	0,097	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	80	2,7
AHMCMK 3x300	0,103	0,111	0,091	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	105	3,2
AHMDMK 3x70	0,446	0,482	0,127	0,18	0,18	150	170	5,4	5,4	30	2,1
AHMDMK 3x120	0,256	0,277	0,111	0,21	0,21	200	225	9,1	9,1	50	2,4
AHMDMK 3x185	0,169	0,183	0,100	0,24	0,24	265	285	14,1	14,1	75	2,7
AHMDMK 3x300	0,105	0,113	0,101	0,28	0,28	350	375	22,1	22,1	100	3,2
AHXAMK-W 3x70	0,446	0,482	0,138	0,18	0,18	235	200	5,7	6,7	42	2,1
AHXAMK-W 3x120	0,256	0,277	0,129	0,23	0,23	325	265	9,8	11,4	47	2,6
AHXAMK-W 3x185	0,169	0,183	0,119	0,26	0,26	425	330	15	17,5	53	3,0
AHXAMK-W 3x240 + 70	0,130	0,140	0,116	0,30	0,30	510	375	19,4	22,6	60	3,4
AHXAMK-W 3x300	0,106	0,115	0,113	0,32	0,32	585	435	24,2	28,2	65	3,7
AHXCCK 3x1x70	0,456	0,493	0,190	0,18	0,18	255	215	5,7	6,7	25	2,1
AHXCCK 3x1x120	0,266	0,287	0,180	0,23	0,23	350	280	9,8	11,4	30	2,6
AHXCCK 3x1x185	0,184	0,199	0,172	0,26	0,26	440	350	15	17,5	35	3,0
AHXCCK 3x1x300	0,120	0,130	0,163	0,32	0,32	580	440	24,2	28,2	44	3,7
AHXCCK 3x1x500	0,088	0,095	0,157	0,39	0,39	755	550	40,3	47	55	4,5
AHXCCK 3x1x800	0,073	0,079	0,154	0,49	0,49	950	650	63,9	74,4	67	5,6
AHXCCKM 3x70	0,446	0,482	0,132	0,18	0,18	190	175	5,7	6,7	45	2,1
AHXCCKM 3x120	0,256	0,277	0,121	0,23	0,23	265	230	9,8	11,4	65	2,6
AHXCCKM 3x185	0,169	0,183	0,114	0,26	0,26	340	290	15	17,5	84	3,0
AHXCCKM 3x300	0,106	0,115	0,107	0,32	0,32	460	380	24,2	28,2	90	3,7
APYAKMM 3x25	1,21	1,31	0,145	0,20	0,20	85	94	2,3	2,5	18	2,3
APYAKMM 3x35	0,876	0,947	0,138	0,22	0,22	105	115	3,3	3,7	20	2,5
APYAKMM 3x50	0,649	0,701	0,131	0,25	0,25	125	140	4,6	5,25	25	2,9
APYAKMM 3x70	0,451	0,487	0,124	0,29	0,29	155	170	6,5	7,3	30	3,3
APYAKMM 3x95	0,329	0,356	0,118	0,32	0,32	190	205	8,7	9,9	40	3,7
APYAKMM 3x120	0,262	0,283	0,115	0,35	0,35	210	225	11	12,5	50	4,0
APYAKMM 3x150	0,216	0,233	0,111	0,38	0,38	240	255	13,7	15,6	60	4,3
APYAKMM 3x185	0,175	0,189	0,107	0,41	0,41	270	290	16,9	19,2	65	4,7
APYAKMM 3x240	0,138	0,149	0,104	0,45	0,45	315	335	21,9	24,8	80	5,1
APYAKMM 3x300	0,114	0,123	0,101	0,49	0,49	360	375	27,3	31	90	5,6

Johtopituuksia lähdoittain OSS:n keskijänniteverkossa

Asema	Johtolähtö	Kj yhteispituus [km]	Johtotyyppi			Sijainti			Suurhäiriövarmuus
			Avojohto	PAS	Maakaapeli	Metsä	Pelto	Tienvarsi	
Jylhämä	J07 Vaala 2	18,1	96 %	3 %	1 %	64 %	19 %	17 %	20 %
Jylhämä	J08 Vaala 1	12,3	98 %	0 %	2 %	54 %	20 %	24 %	22 %
Jylhämä	J09 Utanen	70,8	72 %	27 %	1 %	75 %	7 %	17 %	10 %
Kempele	J07 Honkanen	5,3	28 %	9 %	62 %	21 %	9 %	8 %	73 %
Kempele	J09 Ristisuo	6,3	38 %	38 %	24 %	48 %	3 %	25 %	35 %
Kempele	J11 Lentokenttä	2,9	34 %	14 %	52 %	17 %	0 %	31 %	55 %
Kempele	J12 Oulunsalo	1,8	17 %	33 %	50 %	33 %	11 %	6 %	64 %
Kempele	J13 Koskela	9,1	43 %	29 %	29 %	37 %	19 %	15 %	52 %
Kempele Uusi	J06 Linnakangas	13,7	44 %	27 %	29 %	59 %	4 %	8 %	35 %
Kempele Uusi	J07 Liminka	13,6	75 %	18 %	7 %	16 %	63 %	14 %	70 %
Kempele Uusi	J08 Kokko	5,6	27 %	41 %	32 %	16 %	27 %	25 %	69 %
Kempele Uusi	J10 Santamäki	5,9	22 %	39 %	39 %	51 %	0 %	10 %	42 %
Liminka	J05 Ketunmaa	13,3	52 %	38 %	11 %	8 %	68 %	14 %	86 %
Liminka	J06 Liminka	5,7	25 %	53 %	23 %	28 %	47 %	2 %	71 %
Liminka	J07 Kempele	18,7	76 %	20 %	4 %	16 %	65 %	16 %	70 %
Liminka	J08 Temmes	14,9	64 %	35 %	1 %	6 %	91 %	3 %	91 %
Liminka	J10 Lumijoki	13,8	82 %	17 %	1 %	26 %	71 %	1 %	72 %
Liminka	J11 Tyrnävä Parras	33,9	94 %	3 %	3 %	12 %	79 %	6 %	83 %
Lumijoen tie	J09 Liminka	5,7	37 %	35 %	28 %	0 %	47 %	25 %	82 %
Lumijoen tie	J10 Tupos	22,7	79 %	19 %	1 %	58 %	17 %	24 %	20 %
Lumijoen tie	J11 Ketunmaa	50	90 %	9 %	0 %	21 %	33 %	46 %	33 %
Lumijoen tie	J14 Lumijoki	57,8	95 %	5 %	0 %	25 %	70 %	4 %	72 %
Lumijoen tie	J16 Rantakylä	24,9	78 %	21 %	1 %	34 %	62 %	2 %	64 %
Muhos	J02 Kirkko	4,4	41 %	20 %	39 %	45 %	16 %	0 %	55 %
Muhos	J04 Jokirinne	18,7	90 %	6 %	3 %	14 %	75 %	8 %	78 %
Muhos	J06 Rova	21,4	47 %	53 %	0 %	14 %	84 %	2 %	85 %
Muhos	J07 Vaara	35,1	94 %	5 %	1 %	23 %	38 %	37 %	40 %
Muhos	J08 Tyrnävä	24,3	86 %	14 %	0 %	44 %	55 %	0 %	56 %
Muhos	J10 Lakkapäätä	14,9	67 %	11 %	21 %	33 %	35 %	11 %	58 %
Oulunsalo	J08 Juurikastie	5,3	0 %	19 %	81 %	0 %	15 %	4 %	98 %
Oulunsalo	J09 Matturi	17,8	41 %	31 %	28 %	13 %	46 %	13 %	77 %
Oulunsalo	J12 Koulutie	14,2	35 %	38 %	27 %	38 %	16 %	18 %	46 %
Oulunsalo Uusi	J10 Kempele	5,5	91 %	5 %	4 %	71 %	15 %	11 %	21 %
Oulunsalo Uusi	J11 Kyläpuoli	26,9	57 %	42 %	1 %	68 %	23 %	9 %	24 %
Oulunsalo Uusi	J12 Niemenranta	40,2	23 %	42 %	35 %	39 %	20 %	6 %	56 %
Oulunsalo Uusi	J13 Kivennapa	5,7	39 %	7 %	54 %	0 %	35 %	11 %	91 %
Paituri	J02 Ouluntulli	34,1	82 %	15 %	3 %	64 %	21 %	11 %	25 %
Paituri	J04 Kokkokangas	11,2	9 %	79 %	13 %	57 %	20 %	11 %	38 %
Paituri	J06 Kempele	5	36 %	52 %	12 %	32 %	56 %	0 %	68 %
Paituri	J08 Matturi	5	68 %	24 %	8 %	36 %	36 %	20 %	50 %
Paituri	J09 Vihiluoto	6,6	0 %	79 %	21 %	24 %	45 %	9 %	71 %
Pyhäkoski	J02 Muhos	9,7	31 %	59 %	10 %	15 %	68 %	6 %	79 %
Pyhäkoski	J03 Montta	7,2	100 %	0 %	0 %	75 %	22 %	3 %	22 %
Pyhäkoski	J04 Sanginjoki	23,4	100 %	0 %	0 %	67 %	19 %	14 %	19 %
Pyhäkoski	J05 Utajärvi	39,6	100 %	0 %	0 %	65 %	35 %	0 %	35 %
Pyhäkoski	J09 Lehtoselkä	26,4	76 %	24 %	0 %	32 %	66 %	2 %	67 %
Tyrnävä	J02 Temmes	80,2	98 %	1 %	0 %	49 %	31 %	20 %	32 %
Tyrnävä	J04 Liminka	10,2	49 %	49 %	2 %	2 %	91 %	5 %	94 %
Tyrnävä	J06 Murto	43,5	90 %	10 %	0 %	24 %	75 %	1 %	75 %
Tyrnävä	J08 Muhos	63,5	84 %	15 %	0 %	39 %	54 %	7 %	55 %
Tyrnävä	J09 Kantola	7,7	66 %	29 %	5 %	9 %	83 %	3 %	89 %
Tyrnävä	J11 KK	15	82 %	5 %	13 %	27 %	55 %	5 %	69 %
Utanen	J05 Jylhämä	92,7	65 %	34 %	1 %	66 %	29 %	4 %	30 %
Utanen	J06 Särkijärvi	181,5	100 %	0 %	0 %	74 %	13 %	13 %	13 %
Utanen	J07 Kylmälä	57,7	98 %	1 %	1 %	58 %	37 %	4 %	37 %
Utanen	J08 Utajärvi	13,3	82 %	9 %	9 %	47 %	17 %	26 %	29 %
Utanen	J09 Mustikkakangas	1,5	13 %	73 %	13 %	53 %	0 %	33 %	27 %
Yhteensä		1396,2	77 %	16 %	6 %	46 %	37 %	12 %	49 %

Paituri -sähköaseman erinäisiä kompensointi arvoja

18.MAASULKULASKENTA - Oulun seudun sähkö
SÄHKÖASEMA: PAITURI

Maasta erotettu tai hajautettu sammutus.

Laskennan vikaresistanssi 500 ohm

***** PÄÄMUUNTAJA PM6 (Laskentajännite:20.0 kv) *****
VIKARESISTANSSI MAASULKUVIRTA
0 OHM 18.6 A
500 OHM 14.5 A

Lähtö	JOHTOPITUUS TYPPEITTÄIN					VIKA MUU OMA VIKKA					ASETTELUARVOT					HAVAHTUMINEN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
NIMI	YHT	AVO	PAS	ILMK	Maak	Vesik	IO	Ires	IO	Ires	U0	U0>	IO>	U0>>	IO>>	P0	Q0	T>	T>	U0>	IO>	U0>>	IO>>	M	
	km	km	km	km	km	km	A	A	A	A	kv	kv	kv	kv	kv	kw	kvar	s	s	%	%	%	%	%	
Kompensointi	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6	14.5	9.0	2.3	1.0	2.3	0.0	--	3.0	0.0	389	1448	389	--	--	*
Vihiluoto	6.6	0.5	0.0	4.7	1.3	0.0	4.0	3.1	14.6	11.4	9.0	2.9	1.0	2.9	0.0	--	--	0.6	0.0	311	1135	311	--	--	*
Matturi	3.5	1.9	0.0	1.1	0.4	0.0	1.4	1.1	17.2	13.4	9.0	2.3	1.0	2.3	0.0	--	--	0.6	0.0	389	1339	389	--	--	*
Kempele	5.0	1.8	0.0	2.6	0.6	0.0	1.8	1.4	16.8	13.1	9.0	2.3	1.0	2.3	0.0	--	--	0.6	0.0	389	1311	389	13	--	*
Kokkokangas	16.1	2.6	0.0	11.7	1.7	0.0	5.5	4.3	13.0	10.2	9.0	2.9	1.0	2.9	100.0	--	--	0.6	0.0	311	1016	311	10	--	*
Ouluntulli	34.4	27.6	0.0	5.4	1.4	0.0	5.9	4.6	12.7	9.9	9.0	2.9	1.0	2.9	100.0	--	--	0.6	0.0	311	992	311	9	--	*

Lähtö MAADOITUSRESISTANSSI (OHM)

	A	B	D	2	4	5
Kompensointi	23	62	15	9	18	22
Vihiluoto	52	138	34	17	34	43
Matturi	52	138	34	17	34	43
Kempele	0	0	0	0	0	0
Kokkokangas	0	0	0	0	0	0
Ouluntulli	0	0	0	0	0	0

Huom. Sarakkeiden 10 ja 11 arvot laskettu suuntakulmalla 0°.

MAASULKULASKENTA - oulun seudun sähkö
SAHKOASEMA: PAITURI

Sammutettu verkko. Sammutusresistanssi 2527 ohm
Autom. säätävä sammutusaste 4.0 %
Laskennan vikaresistanssi 500 ohm

***** PÄÄMUUNTAJA PM6 (Laskentajännite:20.0 kv) *****
VIKARESISTANSSI MAASULKUVIRTA
0 OHM 4.6 A
500 OHM 3.9 A

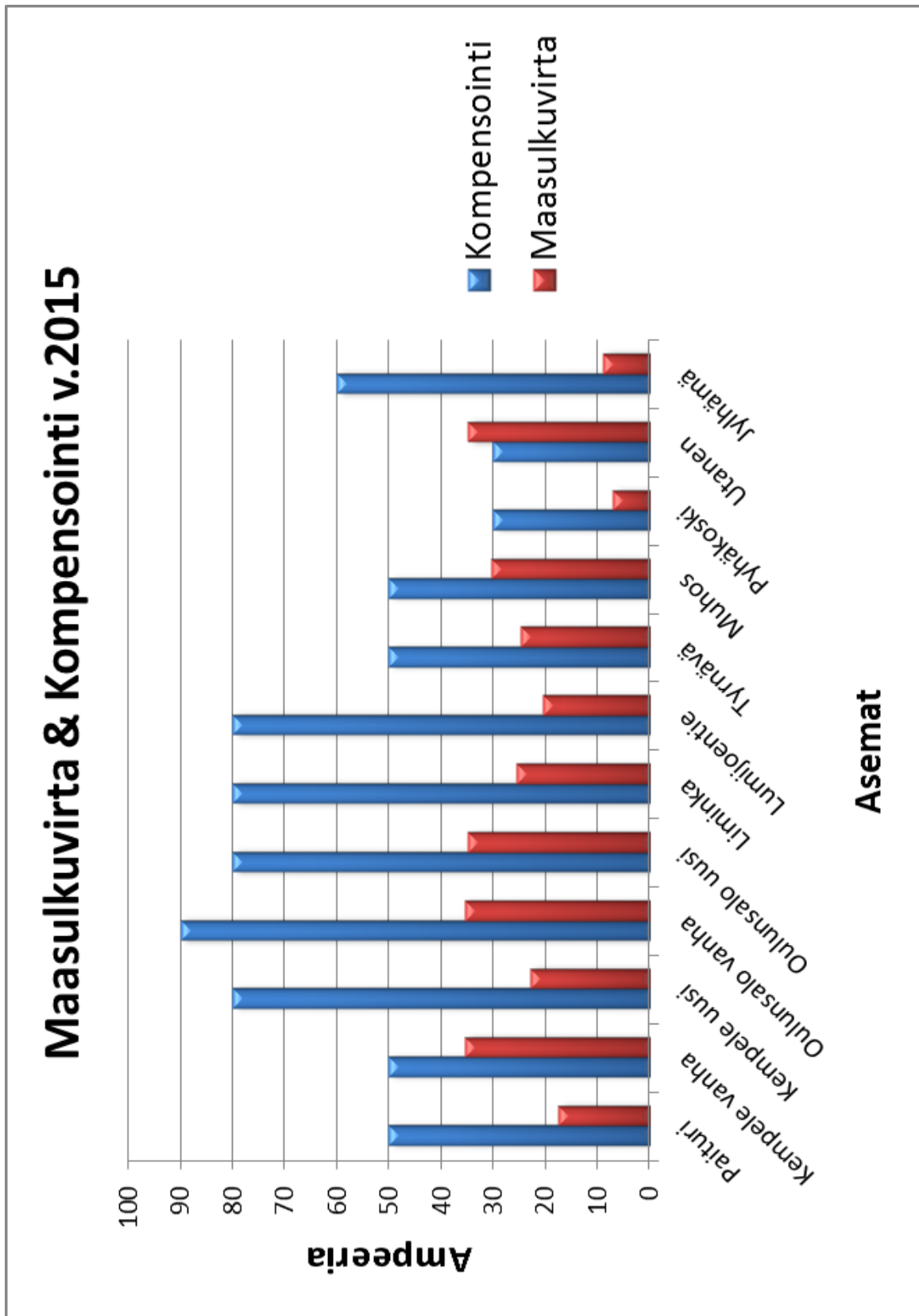
Lähtö	JOHTOPITUUS TYPPEITTÄIN					VIKA MUU OMA VIKKA					ASETTELUARVOT					HAVAHTUMINEN									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
NIMI	YHT	AVO	PAS	I1mk	Maak	Vesik	I0	Ires	I0	Ires	U0	U0>	I0>	U0>>	I0>>	P0	Q0	T>	T>>	U0>	I0>	U0>>	I0>>		
	km	km	km	km	km	km	A	A	A	A	kv	kv	A	kv	A	kw	kvar	s	s	%	%	%	%		
Kompensointi	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	3.9	9.6	2.3	1.0	2.3	0.0	--	--	3.0	0.0	417	386	417	--	--	*
Vihiluoto	6.6	0.5	0.0	4.7	1.3	0.0	1.0	0.8	3.6	3.0	9.6	2.9	1.0	2.9	0.0	--	--	0.6	0.0	333	302	333	--	--	*
Matturi	3.5	1.9	0.0	1.1	0.4	0.0	0.3	0.3	4.2	3.6	9.6	2.3	1.0	2.3	0.0	--	--	0.6	0.0	417	357	417	--	--	*
Kempelle	5.0	1.8	0.0	2.6	0.6	0.0	0.4	0.4	4.1	3.5	9.6	2.3	1.0	2.3100.0	0.0	--	--	0.6	0.0	417	349	417	3	--	*
Kokkokangas	16.1	2.6	0.0	11.7	1.7	0.0	1.4	1.2	3.2	2.7	9.6	2.9	1.0	2.9100.0	0.0	--	--	0.6	0.0	333	271	333	2	--	*
Ouluntulli	34.4	27.6	0.0	5.4	1.4	0.0	1.5	1.2	3.2	2.6	9.6	2.9	1.0	2.9100.0	0.0	--	--	0.6	0.0	333	264	333	2	--	*

Lähtö	MAADOITUSRESISTANSSI (OHM)				
	A	B	D	2	4
Kompensointi	93	249	62	36	73
Vihiluoto	209	557	139	69	138
Matturi	209	557	139	69	138
Kempelle	0	0	0	0	0
Kokkokangas	209	557	139	69	138
Ouluntulli	209	557	139	69	138

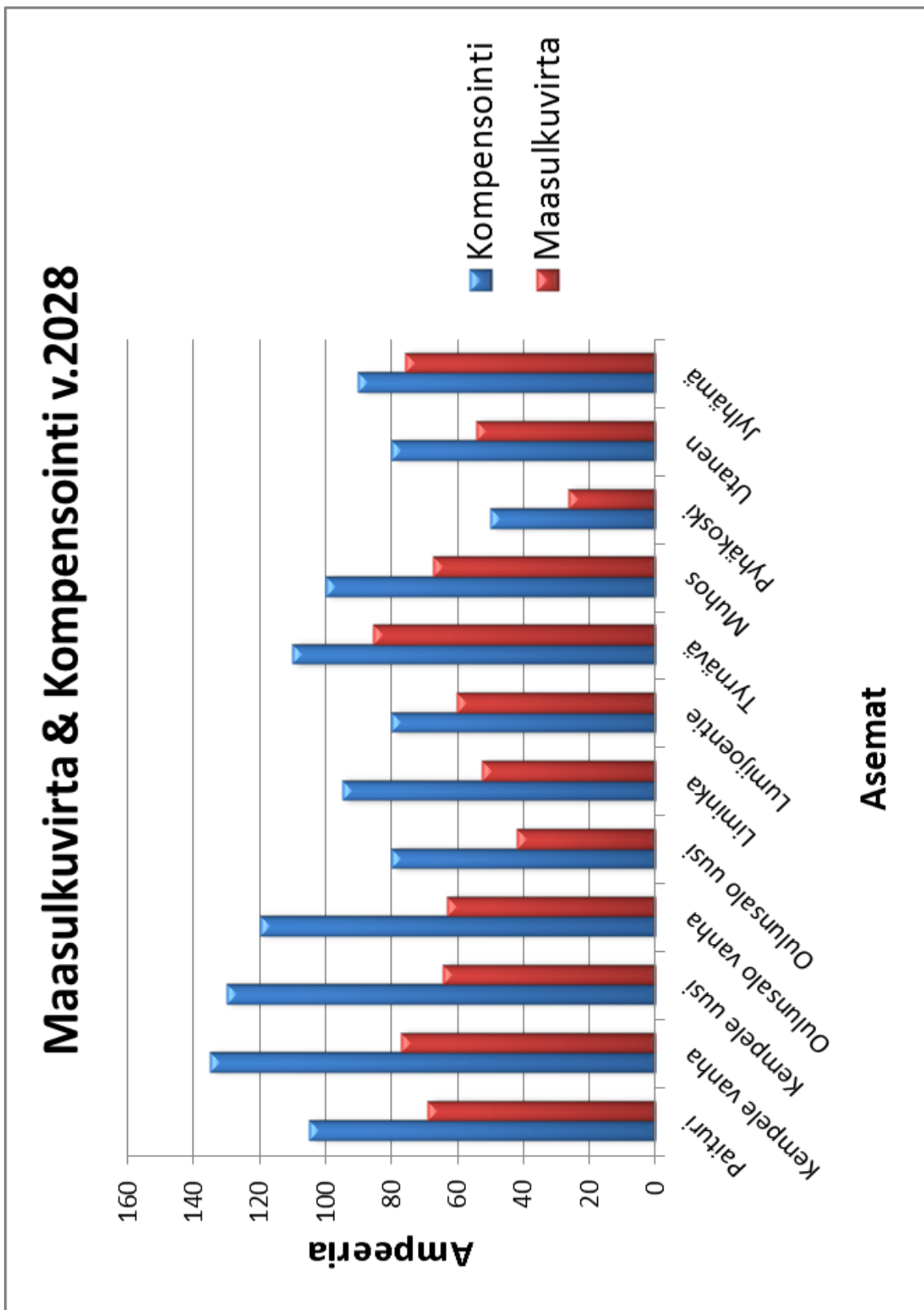
Maadoituksissa puutteita!
Maadoituksissa puutteita!
Maadoituksissa puutteita!


Huom. Sarakkeiden 10 ja 11 arvot laskettu suuntakulmalla 0°.

Maasulkuvirta ja kompensointi v. 2015



Maasulkuvirta ja kompensointi v. 2028



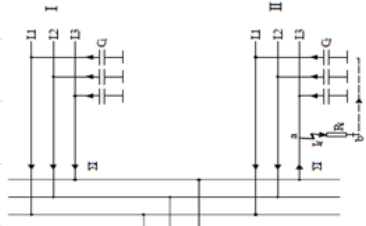


OULUN SEUDUN SÄHKÖ

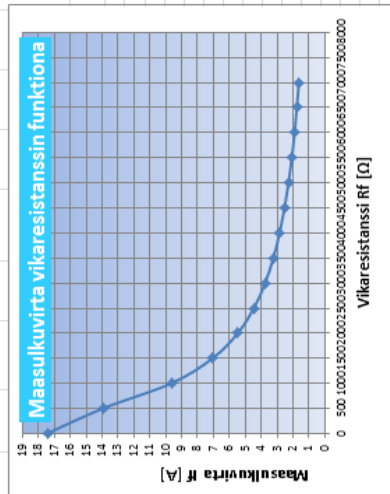
Maasta erotettu verkko
Syyliä arvot harmaisiin ruutuihin!

Syötä arvot:

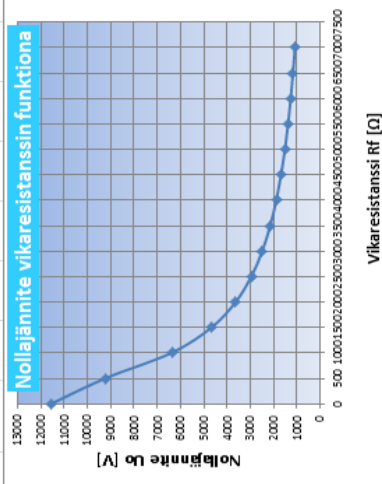
Verkon pääjännite U _{JKV} :	20
Verkon taajuus f [Hz]:	50
Maadoitusresistanssi R _m [Ω]:	16
Vikaresistanssi R _f [Ω]:	500



Maasulkuvirta vikaresistanssin funktiona




Nollajännite vikaresistanssin funktiona



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
Kaapeliähdet:											
Lähdön nro:	1,4	1,7	0,6	0,4	1,4	0	0	0	0	0	5,5
Kaapelin pituus [km]:	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0
Kaapelin maapositanssivaihe [nF/km]:	27,6	2,6	1,8	1,9	0,5	0	0	0	0	0	34,4
Avojohton pituus [km]:	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
Avojohton maapositanssi [nF/km]:	5,4	11,7	2,6	1,1	4,7	0	0	0	0	0	25,5
PAS johdon pituus [km]:	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
PAS johdon maapositanssi [nF/km]:	517,36	465,36	161,98	109,09	348,55	0	0	0	0	0	1602,34
Lähdön maapositanssivaihe C _o [nF]:											
Lasketutuja virtoja-arvoja:											
Lähdön suora maasulkuvirta I _f [A]:	5,63	5,06	1,76	1,19	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,44
Taustaverkon syöttämä maasulkuvirta I _r [A]:	9,42	9,87	12,51	12,97	10,89	13,32	13,32	13,32	13,32	13,32	13,32
Vikaresistanssin pienentämä maasulkuvirta I _{ef} [A]:	13,92										
Lasketutuja jännite-arvoja:											
Lähdön jännite U _o [kV]:	9,215										
Maasulkuprosentti U _o /U _{JKV} [%]:	79,80										
Maadoitusjännite U _{em} [V]: (R _f huomioitu)	208,74										

En vikaresistanssin aiheuttamia arvoja:

R _f [Ω]	I _f [A]	U _o [V]
0	17,44	11547
500	13,92	9215
1000	9,63	6375
1500	7,04	4663
2000	5,48	3629
2500	4,46	2957
3000	3,76	2489
3500	3,24	2147
4000	2,85	1886
4500	2,54	1681
5000	2,29	1516
5500	2,08	1380
6000	1,91	1267
6500	1,77	1170
7000	1,64	1087



OULUN SEUDUN SAHKKO

Kompensoituvu verkko

Syötä arvot harmaisiin ruutuihin!

Lähtöarvot:

Verkon pääjännite U [kV]:	20,00
Verkon taajuus f [Hz]:	50
Maadoitusresistanssi Rm [Ω]:	15
Verkon kompensointiaste K [%]:	100
Vikaresistanssi Rf [Ω]:	500
Sammutusresistanssi [Ω]:	2527

Käspelliähdöt:

Lähdön nro:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ	
Kaapelin pituus [km]:	1,4	1,7	0,6	0,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5
Lähdön nro:	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0
Kaapelin maaparasitanssivaihe [nF/km]:	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0
Avojohton pituus [km]:	27,6	2,6	1,8	1,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	34,4
Avojohton maaparasitanssi	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
PAS johdon pituus [km]:	5,4	11,7	2,6	1,1	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,5
PAS johdon maaparasitanssi	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Lähdön maaparasitanssivaihe Co [nF]:	517,4	485,4	162,0	109,1	348,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1602,3
Lähdön maaparasitanssi C [nF]:	1552,1	1396,1	485,9	327,3	1045,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4907,0

Laskettuja arvoja:

Lähdön suoramassukuvitta If [A]:	5,63	5,06	1,76	1,19	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,44
Taustaverkon syöttämä massukuvitta I ₀	9,42	9,87	12,51	12,97	10,89	13,92	13,92	13,92	13,92	13,92	13,92	13,92
Verkon kapasitiivinen reaktanssi ωC [Ω]:	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18
Vaihereaktanssi 1/3ωC [Ω]:	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73	220,73
Maasulkuvirran päätökomponentti [A]:	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Kokonaisresistanssi Ro lisävastuksella [Ω]	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00	2527,00
Maadoitusjännite U _{em} suorassa maasulk												

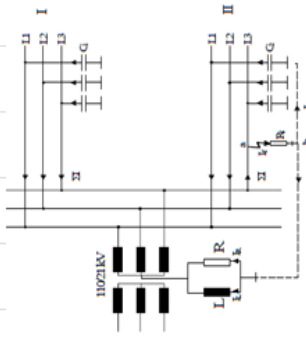
Lasketut kuristimen arvot:

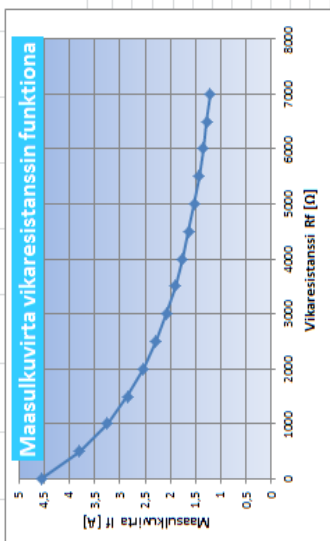
Kuristimen induktiivinen reaktanssi ωL [Ω]	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18	662,18
Kuristimen induktanssi L [H]:	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108	2,108
Kuristimen virta I _L suorassa maasulussa	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44
Kuristimen teho [Kvar]	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36	201,36

Kompensoinnin vaikutus:

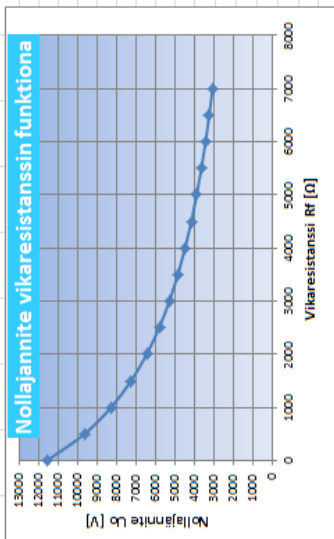
Maasulkuvirta I _{ef} [A]:	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81
Nollajännite U ₀ [kV]:	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640	9,640
Maasulkuprosentti U ₀ /U ₀ [%]:	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48	83,48

III






Maasulkuvirta vikaresistanssin funktiona



Nollajännite vikaresistanssin funktiona

$I_{efp} = 1/\sqrt{((R_f + R_m) \wedge 2 + R_f \wedge 2 \cdot R_m \cdot C_0 \cdot (3\omega C_0 - 1/\omega L) \wedge 2)} \cdot U_0/\sqrt{3}$

1											
2	Maasulku suojauksen releistuksen										
3	Syytö arvot harmaitiin ruutuihin!										
4											
5	Lähtöarvot:		Syötö arvo								
6	Verkon pääjännite U[kV]:		20							U _v 2mf	
7	Verkon taajuus f[Hz]:		50							11547 314,16	
8	Maadoitusresistaassi R_m[Ω]:		15								
9	Vikaresistaassi R_f[Ω]:		500								
10											
11			Lähtöön 7 lyhin lähtö: (väkäten maakapasitaanssia)								
12	Lähtöjen arvot:									Lyhin:	
13											
14	Lähdön ero:		1 2 3 4 5 6 7								
15	Maakapasitaanssi nF/km A		6,1 6,1 6,1 6,1 6,1 6,1 6,1								
16	Avojohtoa pituus km		80 0 0 0 0 0 0								
17	Maakapasitaanssi nF/km P		5 5 5 5 5 5 5								
18	PAS Johtimen pituus km		0 0 0 0 0 0 0								
19	Maakapasitaanssi nF/km M		230 230 230 230 230 230 230								
20	Kaapelin pituus km		0 14 21 0 0 0 0,7								
21	Johtimen yhteenlaskettu maakapasitaanssi nF		488 3220 4830 0 0 0 161								
22											
23											
24	Johtoon 1 virta-asettele, johdot 1 ja 7 kytketty									Asetteluarvot esim	
25	Maasulkuvirta I_f [A]		6,75							I _{oh} U _{oh} φ	
26	johdon 1 virta-asettele [A]		1,68							Lähtö 1 1,5A 20 % 90	
27	johdon 7 virta-asettele [A]		5,08							Lähtö 2 0,5A 20 % 90	
28										Lähtö 3 0,5A 20 % 90	
29										Lähtö 7 1,5A 20 % 90	
30	Johtoon 2 virta-asettele, johdot 2 ja 7 kytketty										
31	Maasulkuvirta I_f [A]		19,56								
32	johdon 2 virta-asettele [A]		0,93								
33											
34											
35	Johtoon 3 virta-asettele, johdot 3 ja 7 kytketty										
36	Maasulkuvirta I_f [A]		21,25								
37	johdon 3 virta-asettele [A]		0,63								
38											
39	Johtoon 4 virta-asettele, johdot 4 ja 7 kytketty										
40	Maasulkuvirta I_f [A]		1,75								
41	johdon 4 virta-asettele [A]		1,75								
42											
43	Johtoon 5 virta-asettele, johdot 5 ja 7 kytketty										
44	Maasulkuvirta I_f [A]		1,75							Maasulun suuntareleiden toiminta-alue	
45	johdon 5 virta-asettele [A]		1,75								
46											
47	Johtoon 6 virta-asettele, johdot 6 ja 7 kytketty										
48	Maasulkuvirta I_f [A]		1,75							$I_s > I_{sh}$ I_{sh} = havahtumisvirta	
49	johdon 6 virta-asettele [A]		1,75							$U_s > U_{sh}$ U_{sh} = havahtumisjännite	
50										$\varphi_s - \Delta\varphi < \varphi < \varphi_s + \Delta\varphi$ $\varphi_s = 90^\circ$, maasta erotettu verkko	
51	Nollajännite									$= 0^\circ$, sammutettu verkko	
52	Jännite U_o [kV]		2,74							I_s = releen tuntema maasulkuvirta, kun vika on tutkittavalla lähdöllä	
53	Maasulkuprosentti [%]		23,70							U_s = nollajännite	
54											

