



KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUSTARKASTELU

Ville-Petteri Koivumäki

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2012
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikan
suuntautumisvaihtoehto
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

VILLE-PETTERI KOIVUMÄKI:
Keskijänniteverkon suojaustarkastelu

Opinnäytetyö 39 sivua, josta liitteitä 3 sivua
Kesäkuu 2012

Opinnäytetyössä tehdään Keminmaan Energia Oy:n keskijänniteverkon suojaustarkastelu. Suojaustarkasteluun kuuluu uusien maastokatkaisijoiden asetteluarvojen tekeminen, sekä vanhojen releasetteluiden muuttaminen tarpeen vaatiessa. Suojausasetteluja tarkasteltaessa on käytetty verkkotietojärjestelmää suojattavan verkon sähkötekniisten tietojen laskemiseen, sekä asettelujen kannalta tärkeiden arvojen selvittämiseen.

Työn alussa kerrotaan suojausasetteluihin liittyvä keskeinen teoria, jonka pohjalta asetteluita on ryhdytty tarkastelemaan. Teoriaosuudessa on myös esimerkki suojausasettelujen tekemisestä, jossa otetaan huomioon suojattavan verkon sähkötekniiset ominaisuudet mahdollisimman kattavasti. Työssä on esitetty sähköverkon jokaisen johtolähdön keskeisimmät arvot, joiden mukaan asettelut on tehty. Koska Keminmaan Energian verkkoa syötetään kahdelta sähköasemalta, on jokaiselle maastokatkaisijalle laadittu kahdet eri asetteluarvot. Työn lopussa on esitetty tulokset, joita Keminmaan Energia voi jatkossa hyödyntää.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical engineering
Electric power engineering

VILLE-PETTERI KOIVUMÄKI:

Analysis of circuit breaker settings for medium voltage distribution network

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 3 pages

June 2012

The aim of this thesis is to analyze settings of medium voltage distribution network protection. This examination is done for Keminmaan Energia Ltd. Thesis includes settings for new pole mounted circuit breakers. It includes also new protection settings for substation circuit breakers if needed. Examination of grid is done with network modeling program. It is used for calculations and as information resource for power lines specs which is needed in this thesis.

In the beginning of the thesis are theories, which are needed when you analyze protection settings. There is also an example how to determine settings for circuit breaker. Example shows as much aspects as possible, what is needed to know when you determine protection settings for medium voltage network. In this thesis is shown important values for every power line network. Keminmaan Energia has two substations. Network, which is fed from Taivalkoski substation is un-earthed. Network, which is fed from Isohaara is coil compensated. All automatic circuit breakers can be fed from both substations. By this reason, automatic circuit breakers must have two different settings for earth faults. In last part of this thesis are results, which are done specially for Keminmaan Energia.

Key words: circuit breaker, fault protection

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SUOJAUSASETTELUIEN LÄHTÖTIEDOT.....	7
	2.1 Maastokatkaisijoiden hyödyt.....	7
	2.2 Mitoituksen lähtötiedot	7
3	OIKOSULKUSUOJAUS	9
	3.1 Selektiivisyys	12
	3.2 Jälleenkytkentäsekvenssit.....	12
	3.3 Oikosulkuvirtojen laskeminen.....	13
	3.4 Käsin laskenta	14
	3.5 Laskenta verkkotietojärjestelmällä.....	17
	3.6 Oikosulkusuojauksen määrittämisen esimerkki	18
4	MAASULKUSUOJAUS	22
	4.1 Kosketusjännitteet maasulkutilanteen aikana.....	22
	4.2 Suojauksen perusteet	23
	4.3 Maasta erotettu verkko	24
	4.4 Sammutettu verkko	25
	4.5 Tarkasteltavan verkon rakenne.....	27
	4.6 Maasulkuvirrat	27
	4.7 Kosketusjännitteiden tarkastelu.....	28
	4.8 Isohaaran suojaustarkastelu vuonna 2009	29
5	SUOJAUSASETTELUIEN TARKASTELU.....	31
	5.1 Taivalkosken suojausasettelut	31
	5.2 Isohaaran suojausasettelut	32
	5.3 Maastokatkaisijoiden asettelut	34
6	LOPPUSANAT	35
	LÄHTEET.....	36
	LIITTEET	37

LYHENTEET JA TERMIT

AJK	aikajälleenkytkentä
KME	Keminmaan Energia Oy
PJK	pikajälleenkytkentä
SAIDI	vikojen keskimääräinen kesto per asiakas per vuosi
SAIFI	vikojen keskimääräinen määrä per asiakas per vuosi
VTJ	verkkotietojärjestelmä

C	kapasitanssi
I	virta
R	resistanssi
r	ominaisresistanssi
t	aika
U	jännite
X	reaktanssi
x	ominaisreaktanssi
Z	impedanssi
z	ominais-/oikosulkuimpedanssi
φ	vaihesiirtokulma
ω	kulmataajuus

Alaindeksit

e	maa
f	vika
k	oikosulku, kuormitus
m	maadoitus
max	maksimi, suurin sallittu
n	nimellinen
r	rele
t	muuntaja
TP	kosketus
v	vaihe
0	alkuhetki, tyhjäkäynti, nollajohdin

1 JOHDANTO

Tämän työn aiheena on keskijänniteverkon suojaustarkastelu. Suojaustarkasteluun kuuluu nykyisten asetusten tarkastelu mahdollisine asettelumuutoksineen sekä uusien maastokatkaisijoiden suojausasettelujen laatiminen. Työn teoriaosuuden olen laatinut tiiviiksi, jotta työn kannalta tärkeimmät asiat olisivat mahdollisimman helposti löydettävissä. Työn teoriaosuudessa olenkin keskittynyt siihen, että lukijalle jäisi mahdollisimman selkeä kuva suojausasettelujen määrittämisestä, sekä siinä huomioon otettavista asioista.

Opinnäytetyön lopullinen aihe tuli ajankohtaiseksi, kun Keminmaan Energia Oy (myöhemmin KME) aloitti verkostostrategian mukaisen maastokatkaisijaprojektin. Alun perin tehtävänäni olisi ollut maastokatkaisijoiden ominaisuuksien vertailu KME:n tarpeiden mukaisesta näkökulmasta. Ensin oli määritettävä maastokatkaisijoiden asetukset, ennen kuin niiden ominaisuuksia pystyi vertailemaan. Jotta koko verkon suojaus saadaan toimimaan luotettavasti, täytyy suojareleiden asetteluissa ottaa huomioon myös selektiivisyysvaatimukset. Kun aloin selvittämään maastokatkaisijoille tarvittavia asetuksia, ilmeni, että johtolähtöjen alkupään katkaisijoiden asettelujen tarkastelu olisi syytä tehdä ennen maastokatkaisijoiden asettelujen määrittelyjä.

Työn tavoitteena on tarkastella KME:n keskijännitesuojauksen asetteluja, sekä määrittää tarvittaessa uudet asetusarvot. Lisäksi työssä tehdään selvitys KME:n suojauksessa huomioon otettavista asioista. Toimeksiantaja haluaa, että työtä voidaan käyttää käsikirjana uusia asetteluja tehtäessä. Olen tehnyt tämän työn palvelemaan mahdollisimman hyvin toimeksiantajaa. Työn tuloksia tullaan siis hyödyntämään jatkossa. Osa työssä tehdyistä asetteluista on jo käytössä.

2 SUOJAUSASETTELUJEN LÄHTÖTIEDOT

Maastokatkaisijoiden lisääminen on osa Keminmaan Energialle laadittua verkostostrategiaa. Verkostostrategiassa on otettu huomioon sähköverkkoliiketoiminnan toimintaympäristön kehitys, uusien verkkotekniikkojen tuomat mahdollisuudet sekä verkkoinvestointien kannattavuus. (Asset Vision Oy)

Maastokatkaisijoiden lisäämisen kannattavuus on arvioitu käyttäen SAIFI- ja SAIDI-tunnuslukuja. SAIFI tarkoittaa vikojen keskimääräistä määrää per asiakas vuotta kohden. SAIDI tarkoittaa vastaavasti vikojen keskimääräistä kestoja per asiakas vuoden ajalta. Ala on voimakkaasti reguloitu ja riskipitoisuutta on lisätty mm. käyttökeytysten seurannalla ja sanktioilla. (Lakervi & Partanen s.45)

2.1 Maastokatkaisijoiden hyödyt

Maastokatkaisijoiden lisääminen parantaa verkon käyttövarmuutta, sekä vähentää vikamääriä ja -kestoja. Ilman maastokatkaisijaa olevassa lähdössä vian ilmetessä kaikki kyseisen johtolähdön kautta sähkönsä saavat asiakkaat kokevat sähkökatkon. Kun verkkoon lisätään maastokatkaisija, maastokatkaisijan takana tapahtuvan vian aiheuttama käyttökatko näkyy vain osalle saman johtolähdön asiakkaista. Näin ollen SAIFI ja SAIDI - tunnusluvut paranevat huomattavasti. Verkostostrategiassa on arvioitu, että maastokatkaisijoiden lisäämisen ansiosta SAIFI putoaisi 1,35:tä 0,28:an ja SAIDI 1,01:stä 0,38:an. (Asset Vision Oy)

2.2 Mitoituksen lähtötiedot

Mitoituksen lähtötietoina on käytetty Isohaaran ja Taivalkosken taustaverkon syöttämistä, sekä generaattoreiden tuottamista oikosulkuvirroista laskettuja 20 kV:n verkkoon tulevia oikosulkuvirtoja. Lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Taustaverkkojen alkuoikosulkuvirrat generaattoreiden jänniteportaissa. Isohaaran generaattoreiden jännitetaso on 10,5 kV ja Taivalkosken generaattoreilla 13,8 kV.

	Isohaara	Taivalkoski G1	Taivalkoski G3
I_k'' [A]	22727	59600	46800
R_k'' [Ω]	0,0263	0,0056	0,0075
X_k'' [Ω]	0,2654	0,1340	0,171

Käsin laskentaa varten arvot tuli redusoida haluttuun jännitetasoon, joka on 20 kV.

Muuntajien kilpiarvot on esitetty taulukossa 2. AT4 on Isohaaran ja PM1 on Taivalkosken päämuuntaja.

TAULUKKO 2. Muuntajien kilpiarvot.

	Isohaara AT4	Taivalkos- ki PM1
Nimellisteho [MVA]	20	10
oikosulkuimpedanssi [%]	8,89	7,9
oikosulkuresistanssi [%]	0,43	0,61

Johtimien arvot ovat syötettyinä verkkotietojärjestelmään. Käsin laskentaa varten johtimien resistanssit ja kapasitanssit on luettu VTJ:n oikosulkuvirta laskelmista.

Isohaaran ja Taivalkosken sähköasemilta syötetään myös muiden verkkoyhtiöiden johtolähtöjä. Maasulkuvirtojen laskennassa piti ottaa huomioon muiden yhtiöiden johtolähtöjen tuottamat maasulkuvirrat niiden johtolähtöjen osalta, jotka ovat normaalitilanteessa kytkettyinä samalle muuntajalle KME:n johtolähtöjen kanssa.

3 OIKOSULKUSUOJAUS

Viat voivat aiheutua eristysviasta tai ulkoisesta kosketuksesta, esimerkiksi puun kaatuessa linjalle. Jakeluverkon virtapiiri voi sulkeutua suoraan, valokaaren, tai muun viikaimpedanssin kautta. Viat voivat aiheuttaa henkilövahinkoja, johtojen liiallista kuumentamista, sekä häiriöitä ja keskeytyksiä sähköjakelussa. Näistä seikoista johtuen, vioittunut virtapiirin osa pyritään kytkemään pois sähkönsyötöstä suojauksen avulla. (Lakervi & Partanen s.28)

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta on mitoittava tekijä johtimen oikosulkukestoisuutta tarkasteltaessa. Oikosulkuvirran suuruus on usein 10...40 -kertainen kuormitusvirtaan verrattuna. Oikosulkusuojauksen tehtävänä on suojata johtimia liialta lämpenemiseltä ja katkaista vaarallinen kosketusjännite pois vialliselta lähdöltä. Suojauksen on toimittava riittävän nopeasti, jottei mikään verkon osa ehdi vaurioitumaan. Valmistajat antavat johtimille suurimman sallitun yhden sekunnin oikosulkuvirran arvon I_{k1s} . Koska nykyaikaiset releet ja katkaisijat pystyvät katkaisemaan jopa 0,1 sekunnissa, niihin voidaan käyttää aikahidastusta peräkkäisten suojalaitteiden selektiivisyyden varmistamiseksi. Aikahidastusta ei saa olla liikaa, jotta johdin ei lämpene liikaa vikatilanteessa. (Elovaara & Laiho s. 74; Simonen s. 18-19)

Oikosulkuvirran suuruus saadaan laskettua, kun vikapaikan jännite ja verkon impedanssi tiedetään. Hajautettu tuotanto muuttaa verkon luonteen kahdesta suunnasta syötetyksi verkoksi. Usein kuitenkin riittää, että verkkoa käsitellään säteittäisenä ja saatuun virtaan lisätään läheisen generaattorin aiheuttama vikavirran lisäys. Oikosulkuvirtalaskennan tuloksia tarvitaan määritettäessä verkon johdinten oikosulkukestoisuutta ja oikosulkusuojauksen asetteluarvoja. Vikavirtalaskelmissa tärkein suure on oikosulkuvirran suuruus. Kaavalla 1 saadaan laskettua vikavirran suuruus. Vaikka laskennassa käytetään osoitinsuureita, tämän työn katkaisijoiden asetteluarvoja valittaessa käytetään virtojen itseisarvoja. (Lakervi & Partanen s. 28,29)

$$I_f = \frac{U_v}{Z_f + Z_j} \quad (1)$$

, jossa

\underline{I}_f on vikavirta

\underline{U}_v on vaihejännite

\underline{Z}_f on vikaimpedanssi

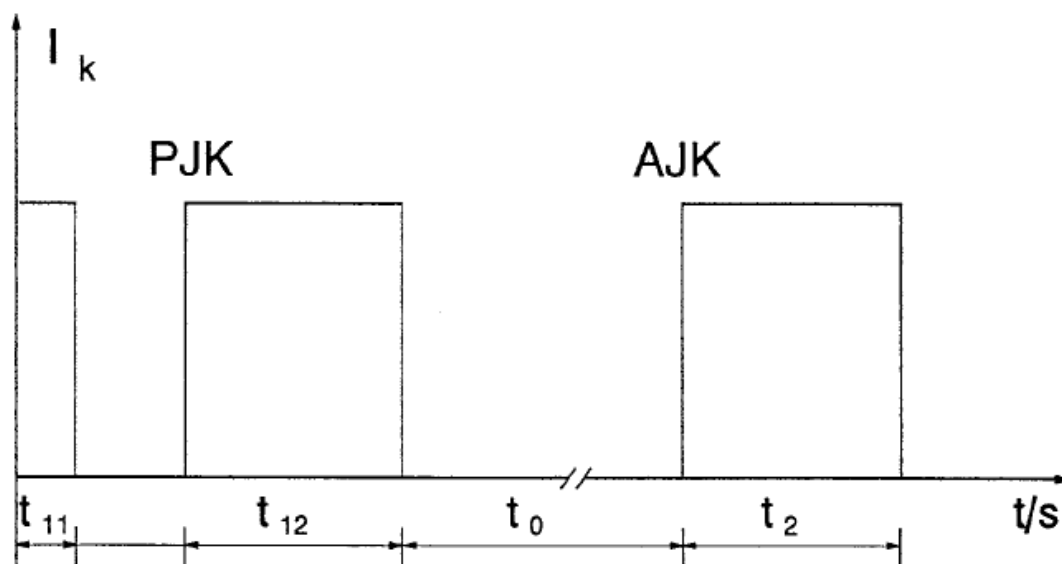
\underline{Z}_i on verkon impedanssi vikakohdasta laskettuna

Oikosulkusuojauksen mitoituksessa pitää ottaa huomioon seuraavat asiat:

- Suurin mahdollinen kuormitusvirta. Suojalaite ei saa toimia tällä virralla
- Pienin mahdollinen oikosulkuvirta. Suojalaitteen tulee toimia vähintään tällä virralla
- Johtimien terminen kestoisuus: ekvivalenttinen suurin oikosulkuvirta ei saa ylittää suurinta sallittua 1 sekunnin oikosulkuvirtaa.

(Lakervi & Partanen s. 180,181)

Oikosulkukestoisuutta tarkasteltaessa on otettava huomioon mahdollisen jälleenkytkentäsekvenssin vaikutus. Kuviossa 1 on esitetty jälleenkytkentäsekvenssi periaatteellinen kuva. Johtimia lämmittävä aika on pikajälleenkytkentöjä ja sen jälkeisen oikosulkujen kestoajojen summa. Ajk:n jännitteettömänä aikana tapahtuva jäähtyminen otetaan huomioon (t_0). Myös releen toiminta-aika, sekä valokaaren sammumiseen tarvittava aika huomioidaan laskennassa lisäämällä asetusajkaan 0,1 sekuntia. Ekvivalentin vaikutusajan saa laskettu kaavalla 2. (Lakervi & Partanen 2009 s. 177)



KUVIO 1. Jälleenkytkentäsekvenssi. (SENER s. 19)

$$t = (t_{11} + t_{12}) * e^{-t_0/\tau} + t_2 \quad (2)$$

, jossa

t on oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika,

t_{11} on PJK:ta edeltävän oikosulkuvirran kesto aika

t_{12} on PJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kesto aika

t_0 on AJK:ta edeltävä jännitteetön aika

t_2 on AJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kesto aika

τ on johdon lämpenemän aikavakio.

Kun oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika tiedetään, voidaan laskea kyseisen vaikutusajan mukainen oikosulkukestoisuus kaavalla 3. (Lakervi & Partanen s. 177)

$$I_{k_{max}} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

, jossa

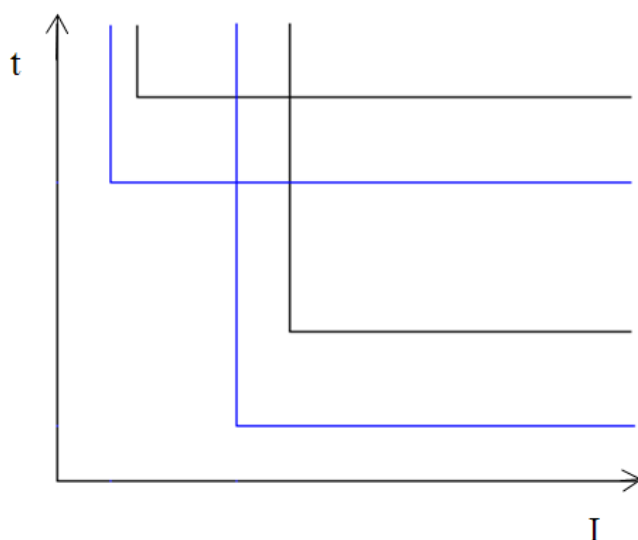
$I_{k_{max}}$ on suurin sallittu oikosulkuvirta

I_{k1s} on suurin sallittu oikosulkuvirta yhden sekunnin ajan

t on virran ekvivalenttinen vaikutusaika

3.1 Selektiivisyys

Aikahidastuksella tulee varmistaa releiden selektiivinen toiminta. Selektiivisyyden varmistamiseksi nykyisillä releillä minimi aikaeron on oltava 150 ms, elektronisilla releillä 300 ms ja mekaanisilla releillä 500 ms. Olen päätenyt käyttämään aikahidastuksena vähintään 200 ms, jolloin selektiivisyys toimii. Lyhyellä aikaerolla on myös se etu, etteivät alkupään katkaisijoiden toiminta-ajat kasva kovin pitkiksi. Kuviossa 2 on esitetty releiden selektiivisen asettelun periaate. (Lakervi & Partanen)



KUVIO 2. Releiden selektiivisen asettelujen periaate

Kuviosta 2 nähdään releiden periaatteellinen selektiivisyyden asettelu. Sininen toimintakäyrä kuvaa maastokatkaisijan asetteluja ja musta toimintakäyrä kuvaa johtolähdön alkupään katkaisijan asetteluja. Selektiivisyys toimii, sillä maastokatkaisija toimii kaikilla vikavirran arvoilla ennen johtolähdön alkupään katkaisijaa.

3.2 Jälleenkytkentäsekvenssit

Automaattisia jälleenkytkentöjä tehdään yleensä vain avojohtovikojen jälkeen, sillä kaapeleilla on pidemmät jäähtymisaikavakiot, jolloin ne voivat kuumentua liikaa. Koska suurin osa avojohtojen vioista on salaman aiheuttamia ohimeneviä valokaarivikoja, voidaan automaattisella jälleenkytkennällä nopeuttaa käytön palautusta. Pikajälleenkytkentä tehdään yleensä vain pikalaukaisujen jälkeen. Aikajälleenkytkentä tehdään, jos pikajälleenkytkentä epäonnistuu tai jos rele on lauennut hidastetulla laukaisulla. Ennen pika-

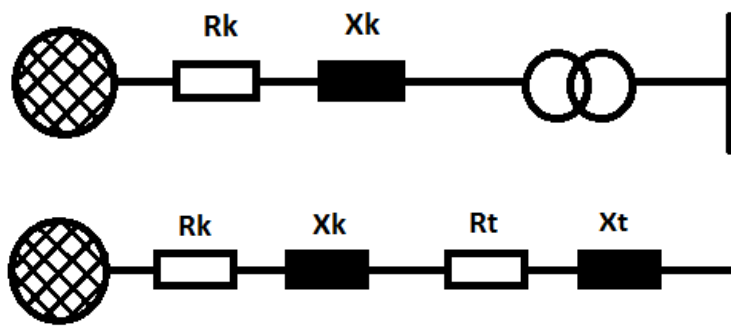
jälleenkytkentää tarvitaan lyhyt jännitteetön aika, koska heti valokaaren loputtua ionisoituneen ilman jännitelujuus ei ole välttämättä riittävä. Näin ollen johtoa pidetään jonkun aikaa jännitteettömänä, jotta ilma saisi normaalin jännitelujuutensa takaisin. (Elovaara & Haarla 2011, s. 371 - 372)

KME:n verkossa on myös kaapeleita sisältäviin johtolähtöihin asetettu jälleenkytkennät, koska suurin osa verkosta on ilmajohtoverkkoa. Jälleenkytkennöissä on näin ollen huomioitava myös kaapeleiden oikosulkukestoisuudet ja lämpenem. Oikosulkukestoisuuden määrittäminen tehdään samalla periaatteella, kuin tässä työssä on aiemmin esitetty.

3.3 Oikosulkuvirtojen laskeminen

Oikosulkulaskelmat on tehty sekä käsin, että verkkotietojärjestelmällä. Käsin laskennan tarkoituksena oli määrittää VTJ:n taustaverkon asetukset oikeiksi. Taustaverkon asetuksilla tarkoitetaan VTJ:n parametria, joka ottaa laskuissa huomioon syöttävän verkon impedanssin ennen muuntajaa sekä muuntajan oikosulkuimpedanssin. Kun käsin laskentaa ja VTJ:llä laskettuja tuloksia verrattiin, voitiin olla varmoja tuloksen oikeellisuudesta, jos tulokset olivat samoja. Laskuissa johtimien tiedot on otettu suoraan verkkotietojärjestelmästä.

Keskijänniteverkkoa syöttävästä sähköverkosta on tehty yksinkertainen sijaiskytkentä. Sijaiskytkennässä taustaverkon oikosulkuresistanssi ja $-$ reaktanssi on esitetty komponentteina R_k ja X_k . Muuntajan vastaavat arvot ovat R_t ja X_t . Sijaiskytkentä on esitetty kuviossa 3. Taustaverkon laskut on tehty kyseisen sijaiskytkennän perusteella.



KUVIO 3. Yksinkertaistettu sijaiskytkentä.

Käsin laskentaa varten arvot on redusoitu 20 kV:n jännitetasoon.

3.4 Käsin laskenta

Käsin laskennassa on määritettävä ensin sijaiskytkennän komponenttien arvot. Laskenta aloitetaan redusoimalla taustaverkon oikosulkuimpedanssit 20 kV:n tasoon. Reaktanssin redusointi tehdään kaavalla 4. Myös impedanssin ja resistanssin redusointi tapahtuu samalla periaatteella. Esimerkkilaskut on tehty Taivalkosken generaattorin 1 syöttämään verkkoon. (Lakervi s. 46)

$$X_{k_{20kV}} = X_{k_{13,8kV}} * \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}}\right)^2 \quad (4)$$

, jossa

$X_{k_{20kV}}$ on reaktanssi 20 kV:n jänniteportaassa

$X_{k_{13,8kV}}$ on reaktanssi 13,8 kV:n jännitetasossa

U_{n2} on toisiosion nimellinen jännite

U_{n1} on ensiosion nimellinen jännite

$$X_{k_{20kV}} = 0,1340 \Omega * \left(\frac{20}{13,8}\right)^2 = 0,2815 \Omega$$

Virran redusointi tapahtuu kaavalla 5.

$$I_{k_{20kV}} = I_{k_{13,8kV}} * \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}}\right) \quad (5)$$

Taulukossa 3 on esitetty muuntajia syöttävien verkkojen sijaiskomponenttien arvot 20 kV:n jännitetasossa.

TAULUKKO 3. Taustaverkon sijaiskytkennän arvot 20 kV jännitetasossa.

	Isohaara	Taivalkoski G1	Taivalkoski G3
$I_{k''}$ [A]	11932	41124	32292
$R_{k''}$ [Ω]	0,0953	0,0118	0,0158
$X_{k''}$ [Ω]	0,9631	0,2815	0,3592

Valmistaja antaa muuntajalle suhteelliset impedanssi- ja reaktanssiarvot. Kaikissa muuntajissa on ollut toisiosion jännitteen säätö portaikolla 1...20. Olen käyttänyt laskuissa 9. portaan arvoja, jotka ovat muuntajien keskitasot. Esimerkkilaskut on laskettu Taival-

kosken muuntajasta PM1. Kaavat 6 - 9 on esitetty Leena Korpisen luentomateriaalissa sivuilla 8 - 9.

Valmistajan ilmoittaman suhteellisen oikosulkuimpedanssia käyttämällä saadaan lasketua muuntajan oikosulkuimpedanssi kaavalla 6.

$$Z_k = \frac{z_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (6)$$

, jossa

z_k on suhteellinen oikosulkuimpedanssi

U_n on muuntajan nimellinen jännite

S_n on muuntajan nimellinen teho

$$Z_k = \frac{7,9}{100} * \frac{(20000 V)^2}{10 * 10^6 VA} = 3,160 \Omega$$

Kun suhteellinen impedanssi ja resistanssi tunnetaan, saadaan laskettua suhteellinen reaktanssi Pythagoraan lauseella.

Muuntajan yksinkertaistetussa sijaiskytkennässä käytetyt arvot voidaan laskea kaavoilla 7 ja 8.

$$R_k = \frac{r_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (7)$$

, jossa

R_k on oikosulkuresistanssi

r_k on suhteellinen oikosulkuresistanssi

$$R_k = \frac{0,61}{100} * \frac{(20000 V)^2}{10 * 10^6 VA} = 0,244 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (8)$$

, jossa

X_k on oikosulkureaktanssi

Z_k on oikosulkuimpedanssi

R_k on oikosulkuresistanssi

$$X_k = \sqrt{3,16^2 - 0,244^2} \Omega = 3,150 \Omega$$

Taulukossa 4 on esitetty muuntajien sijaiskytkentöjen arvot toisiojännitetasossa.

TAULUKKO 4. Muuntajien sijaiskytkentöjen arvot toisiojännitetasossa.

	z_k [%]	r_k [%]	Z_k [Ω]	R_k [Ω]	X_k [Ω]
Isohaara AT4	8,89	0,431	1,778	0,086	1,776
Taivalkoski PM1	7,9	0,61	3,160	0,244	3,150

Kun taustaverkon sekä muuntajien sijaiskytkentäkomponentit tiedetään, voidaan laskea impedanssit yhteen osoitinmuodossa. Excel -taulukkolaskentaohjelmalla tämä käy helppoa summaamalla erikseen resistanssit ja reaktanssit yhteen. Kokonaisresistanssin ja reaktanssin avulla voidaan laskea kokonaisimpedanssi Pythagoraan lauseella.

$$Z_k = \sqrt{X_k^2 + R_k^2} \quad (9)$$

, jossa

t on oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika,

t_1 on PJK:ta edeltävän ja PJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kestoajojen summa

t_2 on AJK:ta edeltävä jännitteetön aika

t_3 on AJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kesto aika

τ on johdon lämpenemän aikavakio.

Taulukossa 5 on esitetty Isohaaran ja Taivalkosken keskijännitemuuntajan toisiojännitetasossa vaikuttavat verkon impedanssit 20 kV:n tasossa.

TAULUKKO 5. Verkon kokonaisimpedanssit keskijännitemuuntajien toision navoissa 20 kV:n jännitetasossa.

	Isohaara AT4	Taivalkoski PM1
Z_{tot} [Ω]	2,7450	3,4415
R_{tot} [Ω]	0,1815	0,2558
X_{tot} [Ω]	2,7390	3,4320

Kun oikosulkuimpedanssi tiedetään, saadaan muuntajan toision napojen oikosulkuvirta laskettua kaavalla 10. Jännitekerroin c määräytyy sen mukaan, lasketaanko minimi- vai maksimioikosulkuvirtaa. Keskijänniteverkossa minimioikosulkua laskettaessa käytetään kerrointa 1 ja maksimioikosulkuvirtaa laskettaessa kerrointa 1,1. (ABB Oy, 2000a. s.1)

$$I_k'' = \frac{c * U_n / \sqrt{3}}{Z_{tot}''} \quad (10)$$

, jossa

c on jännitekerroin

U_n on syöttävän verkon jännite

Z_{tot} on impedanssi vikapaikasta katsottuna

$$I_k'' = \frac{1,05 * 20 \text{ kV} / \sqrt{3}}{3,4415} = 3523 \text{ A}$$

3.5 Laskenta verkkotietojärjestelmällä

VTJ:llä laskettaessa tarvitsee tietää taustaverkon oikosulkuutilanteen resistanssi ja reaktanssi ensiön jänniteportaassa, sekä muuntajan oikosulkuresistanssi ja –impedanssi maksimi-, keski- ja minimiarvot. Kyseisillä muuntajan arvoilla tarkoitetaan säädettävän muuntajan impedanssin vaihteluväliä. Muuntajan tiedot löytyvät muuntajan arvokilvestä. Kuviossa 4 on esitetty oikosulkulaskentaa varten tehtävä muuntajan parametrien määrittäminen VTJ:ään.

Liitteet	Huomautus	Kunnossapitotiedot	Mittauserä
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Impedanssit	Sijainti
Vapaat attribuutit -lista			
Minimioikosulkuresistanssi (%)	0.580	Minimioikosulkuimpedanssi (%)	7.400
Keskioikosulkuresistanssi (%)	0.610	Keskioikosulkuimpedanssi (%)	7.900
Maksimioikosulkuresistanssi (%)	0.650	Maksimioikosulkuimpedanssi (%)	8.400
Nollaresistanssi (ohm)	0.000	Nollareaktanssi (ohm)	0.000
Kuormitushäviöt (kW)	61.000		
Ensiön tähtipiste		Toision tähtipiste	
Maadoitustapa	Maasta erotettu	Maadoitustapa	Maadoitettu
Resistanssi (ohm)	0.000	Sammutus	Ei sammutusta
Reaktanssi (ohm)	0.000	Resistanssi (ohm)	0.000
		Reaktanssi (ohm)	0.000
Syöttävä alueverkko			
Resistanssi (ohm)	0.016	Nollaresistanssi (ohm)	0.000
Reaktanssi (ohm)	0.359	Nollareaktanssi (ohm)	0.000

KUVIO 4. VTJ:n taustaverkon parametointi.

VTJ:n verkostolaskentaohjelma ei ymmärtänyt 10,5 kV:n ja 13,8 kV:n jännitetasoja, jotka ovat käytössä Isohaaran ja Taivalkosken sähköasemilla. Tästä syystä ensiöiden jännitetasoiksi jouduttiin asettamaan 105 kV ja 138 kV. Redusoin samalla myös syöttävän verkon resistanssin ja reaktanssin samaan jännitetasoon. Tulokset olivat samoja, kuin mitä olin käsin laskemalla saanut. VTJ:ään tulee siis määrittää taustaverkon arvot samassa jännitetasossa, kuin ensiön laskennassa käytetty arvo on, jolloin toision oikosulkuarvoja laskettaessa VTJ redusoi arvot toision jännitetasoon.

3.6 Oikosulkusuojauksen määrittämisen esimerkki

Tässä kappaleessa on esitetty laskuesimerkki oikosulkusuojauksen suojausasettelusta. Työn kaikki suojaustarkastelut on tehty tämän esimerkin mukaisesti. Esimerkissä määritetään asettelut Taivalkosken Itäkoski-lähdölle.

Tarkastellaan ensin teoreettinen maksimikuormitusvirta Itäkosken lähdöllä. Taivalkosken sähköasemalta syötetään KME:n johtolähtöjä poikkeustilanteessa maksimissaan

noin seitsemällä megavolttiampeerilla. Kun virta jakaantuu kahdelle johtolähdölle, saadaan virta laskettua kaavalla 11.

$$I_{max} = \frac{7 \text{ MVA}}{2 * \sqrt{3} * 20 \text{ kV}} \approx 101 \text{ A} \quad (11)$$

, jossa

t on oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika,

t_1 on PJK:ta edeltävän ja PJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kestoajojen summa

t_2 on AJK:ta edeltävä jännitteetön aika

t_3 on AJK:n jälkeisen oikosulkuvirran kesto aika

τ on johdon lämpenemän aikavakio.

Katsotaan VTJ:n tuloksista pienin kaksivaiheinen oikosulkuvirta suojattavassa verkossa, kun verkkoa syötetään yhdellä generaattorilla. Kaksivaiheista oikosulkuvirtaa käytetään siitä syystä, että se on kolmivaiheista oikosulkuvirtaa pienempi. Tuloksista voidaan lukea arvon olevan 390 A. Näin ollen asettelurajaksi saadaan 0,1 – 0,39 kA. Swan johdon suurin sallittu kuormitettavuus on 155 A. Asetteluksi käy hyvin 150 A, joka on sama, kuin nykyinen asettelu. Maastokatkaisijalle riittää huomattavasti pienempikin asettelu, sillä maastokatkaisijan kautta kulkeva kuormitusvirta jää pieneksi.

Itäkosken lähdössä oikosulkuvirta on lähimpänä 1 s oikosulkukestoisuutta Swan johdolla erottimen E086 jälkeen (liite 3). Kolmivaiheinen alkutilan oikosulkuvirta kyseisessä pisteessä on 1,17 kA. Swan johdon yhden sekunnin oikosulkukestoisuus T1- liittimillä on 2,0 kA.

Tarkastellaan nykyisten asetusten mukaisia ekvivalentteja oikosulkujen kestoajoja Swan johdolle. Ekvivalentin oikosulkuvirran vaikutusajan saa laskettu kaavalla 2. Ensin lasketaan 150 A aikahidastuksen mukainen aika. Aikahidastus on kyseisellä virralla 1 sekunti.

$$t = (2 * 1,1 \text{ s}) * e^{-1,5/3} + 1,1 \text{ s} = 2,23 \text{ s}$$

Lasketaan suurin sallittu oikosulkuvirta 2,23 sekunnilla kaavan 3 mukaan.

$$I_{k_max} = \frac{2,0 \text{ kA}}{\sqrt{2,23 \text{ s}}} = 1,34 \text{ kA}$$

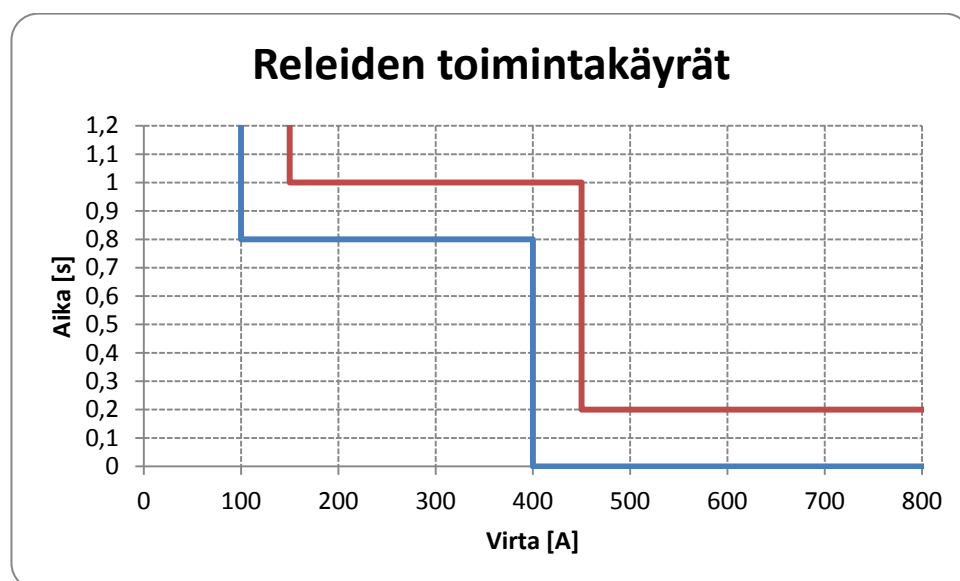
Tämän jälkeen verrataan tulosta, sekä suurinta mahdollista virtaa, joka pystyy olemaan päällä sen ajan, jolla on ekvivalenttinen polttoaika laskettu. Koska 150 ampeerista seuraava asetusarvo on 450 ampeeria, käytetään vertailussa tätä arvoa. Tästä voidaan todeta nykyisenkin asetuksen riittävän sillä 450 A on huomattavasti pienempi kuin 1,34 kA.

Tarkastellaan myös oikosulkusuojauksen toimivuus pikalaukaisulla. Pikalaukaisun hidastukseksi on laitettu johdon alkupäässä 0,2 sekuntia. Näin ollen kaavalla 1 saadaan laskettua oikosulkuvirran ekvivalenttiseksi kestoajaksi 0,664 sekuntia. Suurin sallittu oikosulkuvirta kaavan 2 mukaan on 2,45 kA. Koska suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta swan johdolle oli 1,17 kA, myös pikalaukaisulla suojaus on riittävä.

Kappaleessa esitettyjen tietojen perusteella on päädytty taulukon 6 mukaisiin releasetteihin. Releiden toimintakäyrät on havainnollistettu kuviossa 5.

TAULUKKO 6. Oikosulkusuojauksen asettelut.

	Lähdön katkaisija	Maastokatkaisija
$I_{k>>}$ [A]	450	400
$I_{k>}$ [A]	150	100
$t_{>>}$ [s]	0,2	0
$t_{>}$ [s]	1	0,8



KUVIO 5. Releiden toimintakäyrät

Kuviosta 5 voidaan todeta selektiivisyyden toimivan luotettavasti erisuuruksilla vikavirroilla.

4 MAASULKUSUOJAUS

Yksivaiheinen maasulku aiheuttaa vikapaikassa maadoitusjännitteen. Jännitteen suuruus on ohmin lain mukaan vikavirran ja vikaresistanssin tulo. Maadoitusjännite saattaa muodostaa ihmisille ja eläimille vaarallisen kosketusjännitteen. Standardi SFS 6001 määrittää maasulkusuojaukselle asetetut vaatimukset. (Lakervi, Partanen s. 187,188)

Maasulkuvirran suuruuden määrää sähköasemalle kytkettyjen lähtöjen yhteenlaskettu pituus, sekä kaapelointiaste. Maakaapeleilla on moninkertainen kapasitanssi verrattuna ilmajohtoihin. Maasulkuvirta saattaa olla pienempi kuin kuormitusvirta, mutta se aiheuttaa vaarallisia kosketusjännitteitä. Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät suojauksien toimivan vähintään 500 ohmin vikaresistanssiin saakka. Maasulkureleissä on yleensä myös tähtipistejännitteen mittausta, joka perustuu jännitemuuntajien avokolmio-kytkentään. (Simonen s. 21)

4.1 Kosketusjännitteet maasulkutilanteen aikana

Maasulkuvirta aiheuttaa maasulkupaikassa ns. maasulkujännitteen. Maadoitusjännitteen voi laskea kaavalla 12. (Lakervi, Partanen 2009 s. 188)

$$U_m = I_f \cdot R_m \tag{12}$$

, jossa

U_m on maadoitusjännite

I_f on vikavirta

R_m on

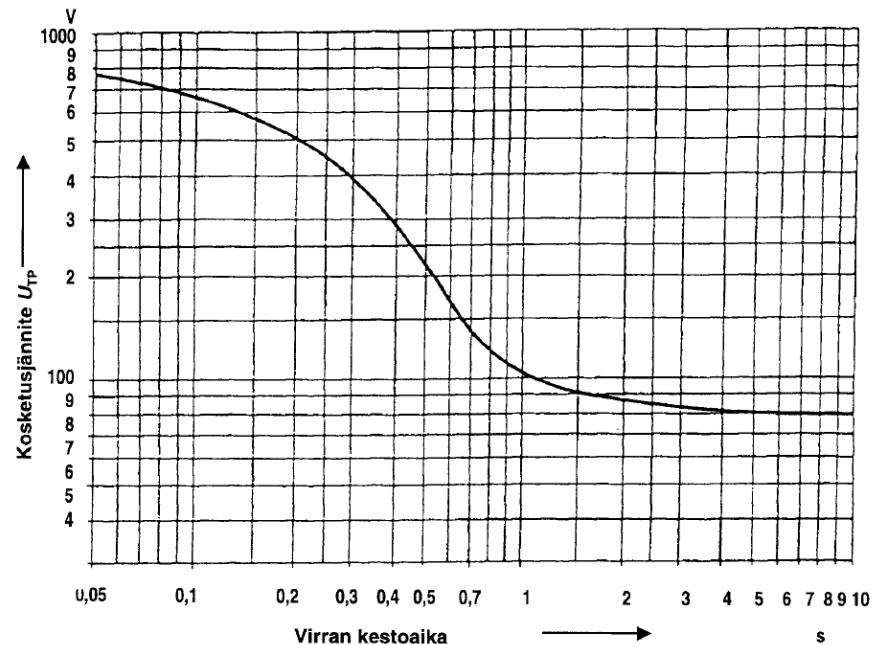
Maadoitusjännitteestä aiheutuu ihmisen tai eläimen kosketeltavissa oleva kosketusjännite. Standardissa SFS 6001 on määritelty suurimmat sallitut kosketusjännitteet. Asennustavasta riippuen, kosketusjännite saa erilaisia kertoimia laskettaessa maadoitusjännitettä. Kertoimen suuruus riippuu saennustavasta. Kaavalla 13 voidaan laskea suurimmat sallitut maadoitusjännitteet. Kuviossa 6 on esitetty suurimmat sallitut kosketusjännitteet virran kestoajan kasvaessa. (Lakervi, Partanen 2009 s. 188)

$$U_m \leq k \cdot U_{TP} \quad (13)$$

, jossa

k on asennuksen mukaan määräytyvä kerroin

U_{TP} on sallittu kosketusjännite



HUOM. 1 Jos virran kestoaika on paljon pitempi kuin kaaviossa esitetty, U_{TP} :lle voidaan käyttää arvoa 75 V.

KUVIO 6. Suurimmat sallitut kosketusjännitteet U_{TP} virran kestoajan funktiona. (Suomen standardisoimisliitto SFS s.78)

Jos tavoitearvoon ei päästä, standardin vaatimukset voidaan täyttää maasulkusuojauksen hidastusaikaa lyhentämällä tai maasulkuvirtaa pienentämällä. Käytännössä maasulkuvirran pienentäminen tarkoittaa sammutuksen käyttämistä. (Lakervi, Partanen s.189)

4.2 Suojauksen perusteet

Maasulkusuojauksen asetteluarvot määräytyvät oman vian maasulkuvirran perusteella. Oma vika tarkoittaa tässä yhteydessä VTJ:n ”oma vika” saraketta, jossa on esitetty johtolähtöjen kehittämä maasulkuvirta vähennettynä viallisen johtolähdön maasulkuvirralla. Tämä arvo on siis sama, jonka voi laskea kaavalla 15.

Maasulkuvirrat tulee laskea pienimmällä ja suurimmalla maakapasitanssilla, jotta voidaan määrittää suurin ja pienin mahdollinen maasulkuvirta. Lähdön maasulkureleen ase-

tus I_{as} tulee olla pienempi kuin laskennasta saatu pienin releen havaitsema maasulkuvirta 500 ohmin vikaresistanssilla, jotta määräykset toteutuvat. (Simonen s. 28)

4.3 Maasta erotettu verkko

Normaalissa tilanteessa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on koko aika nolla. Maasulkutilanteessa terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat maahan nähden. Näin ollen syntyy epäsymmetrinen tilanne, jossa varausvirtojen summa poikkeaa nolasta, jolloin nolasta poikkeava varausvirta kulkee vikapaikan kautta maahan muodostaen maasulkuvirran. (ABB Oy, 2000b s. 1)

Maasulkulaskujen kaavat on esitetty kompleksimuodossa, sillä maasulun mittaamiseen käytetään suunnattuja releitä, jotka tarkkailevat summavirran ja tähtipistejännitteen välistä kulmaa. Kuvioista 7 nähdään maasulkuvirtojen muodostuminen. Maasulkuvirran saa laskettua kaavalla 14 ja tähtipistejännitteen kaavalla 15. (Lakervi s. 51)

$$\underline{I}_{ef} = \frac{j3\omega C_0}{1 + j3\omega C_0 R_f} * \underline{U}_v \quad (14)$$

, jossa

\underline{I}_{ef} on maasulkuvirta

ω on kulmataajuus

C_0 on maakapasitanssi vaihetta kohden

R_f on vikaresistanssi

\underline{U}_v on vaihejännite

$$\underline{U}_0 = \frac{-\underline{U}_v}{1 + j3\omega C_0 R_f} \quad (15)$$

, jossa

\underline{U}_0 on tähtipiste- eli nollajännite

Releen mittaaman maasulkuvirran saa laskettua kaavalla 16. (Lakervi, Partanen s.191)

$$I_r = \frac{C - C_j}{C} * I_{ef} \quad (16)$$

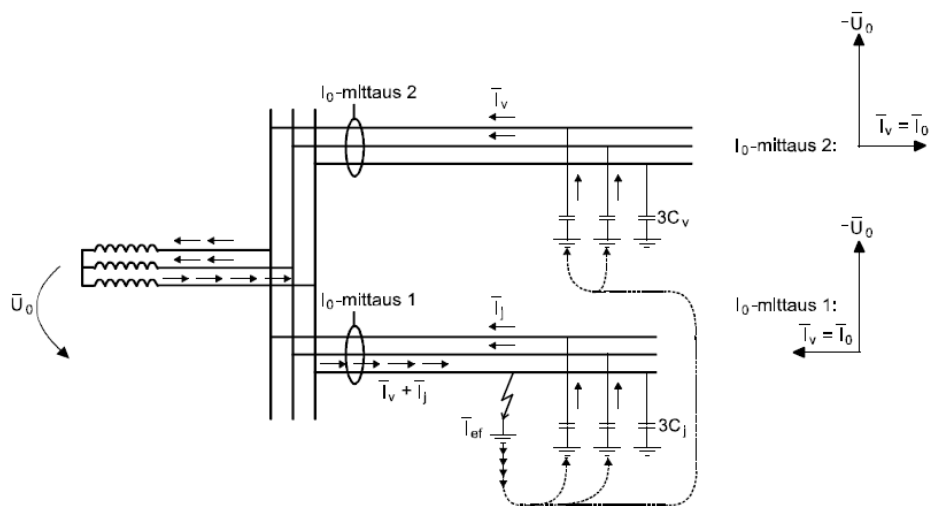
, jossa

I_r on viallisen johtolähdön kapasitanssi

C on koko verkon kapasitanssi

C_j on viallisen johtolähdön kapasitanssi

Kuviossa 7 on esitetty maasulkuvirran muodostuminen vikatilanteessa.



KUVIO 7. Maasulkuvirta sekä osoitinpiirroksen maasta erotetussa verkossa. (ABB Oy, 2000b s. 5)

Kuviosta voidaan havaita johtolähdöllä 1 tapahtuvan vian aiheuttavan johtolähdölle 2 epäsymmetrisen, vastakkaisuuntaisen nollavirran johtolähtöön 1 verrattuna. Jos johtolähdön 2 releellä ei ole käytössä suuntausta, se saattaa lauaeta johtolähdön 1 vian aikana. Myös maastokatkaisijalla rele saattaa lauaeta, jos maastokatkaisijan takana oleva johtosuus synnyttää releen asetteluarvoa suuremman nollavirran. Näin ollen myös maastokatkaisijalle on asetettava suunta ominaisuus.

4.4 Sammutettu verkko

Keskeisin syy sammutetun verkon käyttöön on huonoissa maadoitusolosuhteissa kosketusjännitteen pienentäminen. Sammutetuissa verkoissa käytetään maasulkuvirran rajoittamiseen kompensointi kuristimia. Kuristimilla pyritään kompensoimaan kapasitiivinen maasulkuvirta mahdollisimman tarkasti. Kompensointi kuristimen sijaitessa sähköasemalla, siitä käytetään nimitystä keskitetty kompensointi. Vastaavasti eri puolille verk-

koa sijoitetuista laitteista käytetään nimitystä hajautettu kompensointi. Sammutuskuristimen induktiivisesta ominaisuudesta johtuen maasulkuvirran kulma kääntyy 90 astetta. Maasulkuvirta sammutetussa verkossa jää yleensä niin pieneksi, että valokaari sammuu itsestään ilman jälleenkytkentöjä. Näin ollen voi verkon sammutus vähentää PJK ja AJK määriä verrattuna maasta erotettuun verkkoon. (Simonen s.24)

Kuviosta 8 nähdään maasulkuvirtojen muodostuminen sammutetussa verkossa. Sammutetun verkon maasulku virta voidaan laskea kaavalla 17. (Lakervi s.54)

$$I_{ef} = \frac{\underline{U}_y}{R_f + jR \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)} \quad (17)$$

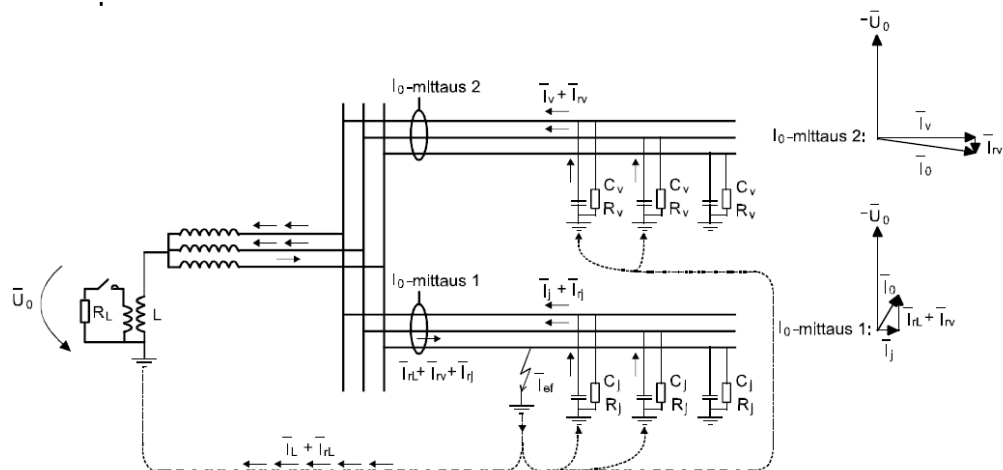
, jossa

R on sammutuskuristimen resistanssi

L on sammutuskuristimen induktanssi

Tähtipistejännite voidaan laskea kaavalla 18. (Lakervi s.54)

$$\underline{U}_0 = \frac{-R}{R_f + R + jR + R_f \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)} * I_{ef} \quad (18)$$



KUVIO 8. Maasulkuvirta sekä osoitinpiirroksat sammutetussa verkossa. (ABB Oy, 2000b s. 8)

Kuvion osoitinpiirrosten perusteella voidaan todeta, että myös sammutetussa verkossa tarvitaan suuntausta.

4.5 Tarkasteltavan verkon rakenne

KME:n keskijänniteverkossa on käytössä sekä maasta erotettu, että sammutettu verkko. Taivalkosken sähköasemalta syötettävä verkko on maasta erotettu ja Isohaaran sähköasemalta syötettävässä verkossa on käytössä keskitetty kompensointi. Liitteessä 1 on esitetty suojattava verkko.

Isohaaran sähköasemalta syötettävä verkko on sammutettu TRENCKH:n ENK 20/200/2500 kuristimella jota säätää EFC20-automaattisäädin. Isohaaran sammutuskuristin on ohjelmoitu niin, että maasulkutilanteessa kompensointilaitteen sammutusvastus poistetaan käytöstä 0,5 sekunniksi. Tällä toiminnolla halutaan antaa maasulkuvirralle mahdollisuus sammua itsestään. Vastus kytketään takaisin päälle 0,5 sekunnin kuluttua.

Osa maastokatkaisijoista sijaitsee sellaisella alueella, että niitä voidaan syöttää tarpeen mukaan kummalta tahansa sähköasemalta. Näin ollen joudutaan tilanteeseen, jossa maastokatkaisijalle pitää määrittää kahdet eri asetteluarvot. Useimmilla maastokatkaisijoilla on mahdollista asettaa kahdet eri arvot valmiiksi, joista toinen on ensisijainen ja toinen on vaihtoehtoinen. Maastokatkaisijoiden sijainnit on esitetty liitteessä 2.

4.6 Maasulkuvirrat

Työssä esitetyt maasulkuvirrat on laskettu VTJ:llä. Taivalkosken sähköasemalta syötetään myös Tervolan verkkoyhtiön johtolähtöjä. Koska Tenergia Oy:n johtolähtöjä on samalla muuntajalla, myös niiden vaikutus maasulkuvirtaan oli selvitettävä. Tenergian johtolähtöjen kehittämät maasulkuvirrat on kysytty Tenergian verkostosuunnittelijalta.

Lasketaan Taivalkosken johtolähtöjen maasulkuvirrat yhteen, kun $R_f = 0 \Omega$

$$10,6 \text{ A} + 9,3 \text{ A} = 19,9 \text{ A}$$

Lasketaan Taivalkosken johtolähtöjen maasulkuvirrat yhteen, kun $R_f = 500 \Omega$.

$$9,7 \text{ A} + 8,6 \text{ A} = 18,3 \text{ A}$$

KME haluaa, että maasulkusuojaus toimii, kun muuntajan perään on kytkettynä vain kaksi johtolähtöä. VTJ:llä tehdyistä laskuista voidaan katsoa, että KME:n johtolähdöistä

pienemmän maasulkuvirran kehittää länsikosken lähtö (3,5 A). Jotta otetaan huomioon mahdollinen minimikytkentätilanne, joudutaan asetusarvo asettelemaan vieläkin alemmaksi. Entinen virran asetusarvo on 2 A.

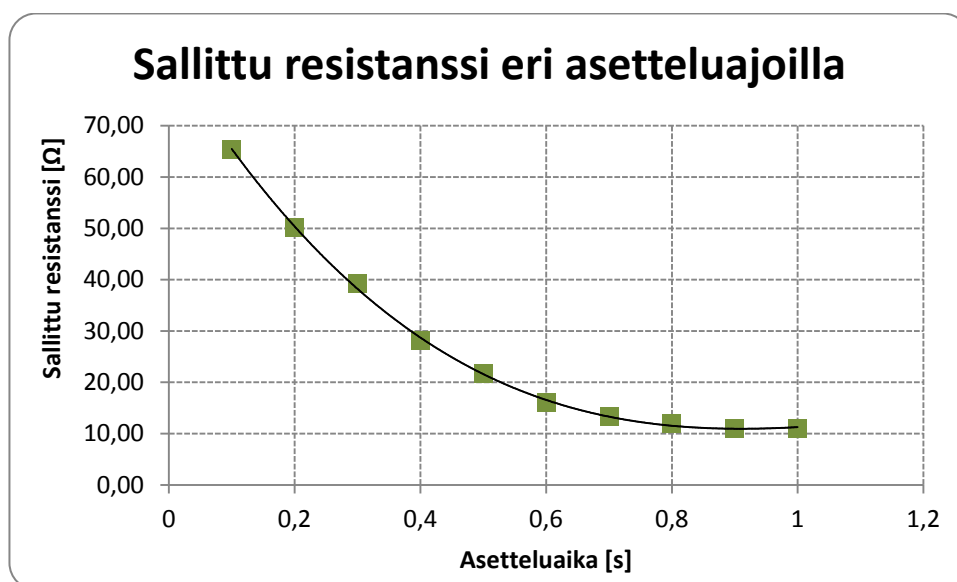
4.7 Kosketusjännitteiden tarkastelu

Laskettujen maasulkuvirtojen perusteella on tehty kosketusjännitetarkastelut. Kosketusjännitetarkastelussa selvitettiin muuntajien maadoitusten vaikutusta kosketusjännitteisiin.

Taulukossa 7 on esitetty suurimmat sallitut maadoitusresistanssit kosketusjännitteen näkökulmasta Taivalkosken verkkoon. Taulukon perusteella on tehty myös kuvio 9, josta voidaan havaita helposti, kuinka maadoituksen vaatimukset muuttuvat asetteluarvon funktiona.

TAULUKKO 7. Suurimmat sallitut maadoitusresistanssit eri laukaisuajoilla.

Laukaisuaika [s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
U_{TP} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110
Max R_e ($R_f=0\Omega$) [Ω]	39,20	28,14	21,61	16,08	13,27	12,06	11,06	11,06



KUVIO 9. Maadoituksen sallittu resistanssi asetteluajan funktiona

Kompensoinnin ollessa pois päältä Isohaaran maksimi maasulkuvirta on noin 100 A. Arvon epätarkkuus johtuu siitä, että samalta muuntajalta voidaan syöttää kolmen eri

yhtiön lähtöjä. Arvo on saatu Pohjolan Voima Oy:ltä, jonka omistuksessa Isohaaran voimalaitos on. Tarkastelen kosketusjännitteitä vain kompensoimattomana, sillä kompensoinnin ollessa päällä, virta pienenee alle viiteen ampeeriin. Tällöin kosketusjännite putoaa hyvin pieneksi.

Sadalla ampeerilla kosketusjännite U_{tp2} saa olla 430 voltia 0,5 sekunnin ajan. Kun saadun jännitteen jakaa maasulkuvirralla (430V/100A), saadaan suurimmaksi sallituksi resistanssiksi 4,3 Ω . Edellä mainitun arvon perusteella kompensointi on erittäin tarpeellinen Isohaaran verkossa. Käytännössä kompensointi on jatkuvasti käytössä, joten en tarkastele enempää Isohaaran sähköasemalta syötettävää verkkoa kompensoimattomana.

4.8 Isohaaran suojaustarkastelu vuonna 2009

Isohaaran voimalaitoksen maasulkusuojauksen toimintaa tarkasteltiin vuonna 2009, koska aikaisemmin oli tapahtunut epäselektiivisiä laukaisuja maasulkutilanteissa. Suojareleiden asettelut tarkastettiin sekä niitä verrattiin vuonna 2008 tehtyihin primäärikokeisiin. Lisäksi asetteluja tarkasteltiin kahden häiriötilanteen dokumenttien perusteella. Tarkastelussa selvitettiin myös sammutuslaitteen säätäjän toiminta. (Määttä)

Kompensointilaitteen säätäjän todetaan toimivan seuraavalla tavalla: Toisiovastus on kytkettynä koko ajan päälle, kunnes nollajännite ylittää 35 %. Tämän jälkeen toisiovastus kytketään pois 0,5 sekunniksi, jotta maasulku sammuisi. Tämän jälkeen vastus kytketään takaisin päälle, ja suunnattu maasulkusuojaus voi toimia. (Määttä)

Ongelmaksi todettiin liian suuri nollavirran asetteluarvo, koska nollavirta ei riittänyt laukaisemaan suunnattuja maasulkureleitä suuri ohmisissa vikatilanteissa ($>1 \text{ k}\Omega$). Tällöin varamaasulkusuoja laukaisi releitä epäselektiivisesti nollajännitteen perusteella. (Määttä)

Sähköasemalla releiden asettelujen valinta tapahtuu automaattisesti riippuen siitä, onko sammutus käytössä vai ei. Kun verkon sammutus ei ole käytössä, releillä käytetään tausta-asetteluja. (Määttä)

Tarkastelun perusteella on päädytty herkistämään nollavirran asettelua yhteen ampeeriin, sekä laittamaan varsinaiselle suojaukselle pienemmät nollajännitteen laukaisuarvot, kuin varasuojaukselle. (Määttä)

Uusien asettelujen jälkeen Isohaaran voimalaitoksella ei ole havaittu epäselektiivistä toimintaa, joten voin todeta suojausasettelujen olevan kunnossa.

5 SUOJAUSASETTELUIEN TARKASTELU

Oikosulkulaskentaa varten pitää VTJ:ään laittaa oikeat taustaverkon asetukset. Taustaverkkojen asettelu tapahtuu redusoimalla taustaverkon impedanssit muuntajan ensiön jänniteportaaseen. Taustaverkon asetteluarvot laitetaan muuntajan tietoihin. Taulukossa 8 on esitetty redusoidut taustaverkon asetteluarvot.

TAULUKKO 8. Taustaverkon asetteluarvot VTJ:ään.

	Isohaara	Taivalkoski G1	Taivalkoski G3
Rk'' [Ω]	2,627	0,560	0,750
Xk'' [Ω]	26,545	13,400	17,100

5.1 Taivalkosken suojausasettelut

Oikosulkusuojauksen asetusten mitoittamista varten on määritetty suojausasettelujen rajat. Asetteluiden perusteena on käytetty taulukossa 9 esitettyjä tietoja, sekä otettu huomioon muut verkon ominaisuudet.

TAULUKKO 9. Taivalkosken oikosulkuvirtasuojauksen perusteena käytetyt sähköverkon tiedot.

	itäkoski	länsikoski
suurin kuormitusvirta [kA]	0,1	0,1
pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta [kA]	0,39	0,6
lähinnä 1s suurin sallittu Ik (3-v.) [kA]	1,17	2,26
johtotyyppi	swan	swan

Oikosulkusuojauksen asettelu ehdotus on esitetty taulukossa 10 ja maasulkusuojauksen asettelu ehdotus on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 10. Oikosulkusuojauksen asettelu.

	Lähdön katkaisija	Maastokatkaisija
Ik >> [A]	450	400
Ik > [A]	150	100
t >> [s]	0,2	0
t > [s]	1	0,8

TAULUKKO 11. Maasulkusuojauksen asettelut

	Lähdön katkaisija	Maastokatkaisija
U_0 [V]	2000	2000
I_0 [A]	2	1,5
t [s]	0,5	0,3

Maastokatkaisijan läpi menevä kuormitusvirta jää alle kymmeneen ampeeriin. Näin ollen on vaikea kuvitella että virtaepäsymmetriaa pääsisi tulemaan normaalissa kuormitustilanteessa yli 15 %, joka tarvittaisiin laukaisemaan rele. Voidaan siis todeta että virran asetusarvo on riittävä. Näillä asetuksilla päästään kosketusjännitteille sallittuihin arvoihin (taulukko 7).

5.2 Isohaaran suojausasettelut

Taulukossa 12 on esitetty Isohaaran lähtöjen oikosulkusuojauksen nykyiset asetteluarvot.

TAULUKKO 12. Oikosulkusuojausten asettelut.

	laurila 1	laurila 2	laurila 3	laurila 4	teol.kylä	lautiosaari	lautiosaari 2	jokisuu 1
$I_{k>>>}$ [A]	1000	1200	1400	1000	1400	1400	1000	1600
$I_{k>>}$ [A]	600	800	800	600	800	800	600	800
$I_{k>}$ [A]	150	150	150	150	150	150	150	260
$t_{>>>}$ [s]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$t_{>>}$ [s]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$t_{>}$ [s]	2	2	2	2	2	2	2	2

Taulukoissa 13 ja 14 on esitetty suojaustarkastelussa huomioitavat taustatiedot.

TAULUKKO 13. Asettelyn kannalta tärkeät lähtötiedot

	laurila 1	laurila 2	laurila 3	laurila 4
suurin kuormitusvirta [A]	50	70	100	30
pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta [kA]	2,34	2,23	0,43	2,18
lähinnä 1s suurin sallittu I_k (3-v.) [kA]	4,36	3,06	2,38	3,72
johtotyyppi	sax120	raven	swan	swan
Maakaapelia	on	on	on	on
suurin sallittu 1s oikosulku [kA]	9,8	5,1	2,0	2,0

TAULUKKO 14. Asettelyn kannalta tärkeät lähtötiedot

	teol.kylä	lautiosaari	lautiosaari 2	jokisuu 1
suurin kuormitusvirta [kA]	130	120	70	100
pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta [kA]	1,85	0,68	0,29	1,53
lähinnä 1s suurin sallittu Ik (3-v.) [kA]	4,04	2,19	2,62	3,35
johtotyyppi	sparrow	swan	sparrow	AI 132
Maakaapelia	on	on	on	on
suurin sallittu 1s oikosulku [kA]	3,2	2,0	3,2	11,6

Asetteluja ja asettelyn rajoja vertaamalla voidaan huomata lähimpänä johtimen sallittua kuormitettavuutta olevan tilanne, kun oikosulkuvirta on hieman alle 800 ampeeria. Tällöin oikosulkuvirran päällä olo aika on 2 sekuntia. Kun kahden sekunnin ekvivalenttinen vaikutusaika lasketaan kaavan 2 mukaan, sekä lasketaan saadulle ajalle suurin sallittu oikosulkuvirta swan -johdolle kaavalla 3, saadaan suurimmaksi sallituksi oikosulkuvirraksi 927 ampeeria. Näin ollen voidaan todeta suojauksen toimivan riittävän nopeasti.

Seuraavaksi tarkastellaan nykyisten asettelujen aikahidastusta selektiivisyyden kannalta maastokatkaisijaan nähden. Voidaan todeta nykyisillä asetteluilla olevan mahdollista tehdä selektiivistä suojausta lähdön alkupään katkaisijan sekä maastokatkaisijan välillä. Pikalaukaisuun ja nopeaan laukaisuun on tehtävä siis hidastusta, jotta suojaus olisi selektiivinen.

Äskeisen tarkastelun perusteella tein uudet suojausasettelut jokaiselle johtolähdölle. Virta-arvoja ei tarvitse muuttaa. Ainoastaan aikoja muutetaan. Taulukossa 15 on esitetty uudet aikahidastukset äskeisiin virta-asetteluihin.

TAULUKKO 15. Uudet aika-asettelut

	laurila 1	laurila 2	laurila 3	laurila 4	teol.kylä	lautiosaari	lautiosaari 2	jokisuu 1
t>>> [s]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
t>> [s]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
t> [s]	2	2	2	2	2	2	2	2

Isohaaran kaikissa lähdöissä on samat asetteluarvot ensisijaiselle maasulkusuojukselle. Maasulkusuojuksen arvot on esitetty taulukossa 16.

TAULUKKO 16. Maasulkusuojauksen asettelut

U_0 [V]	1600
I_0 [A]	1
t [s]	0,5

Näiden asettelujen perusteella on tehty maastokatkaisijoille asetteluarvot, jotka täyttävät selektiivisyyden ehdot.

5.3 Maastokatkaisijoiden asettelut

Taulukoissa 17 ja 18 on esitetty maastokatkaisijoille tehdyt asetteluarvot. Asetteluarvot valitaan sen mukaan, kummalta sähköasemalta maastokatkaisijan takana olevaa verkkoa syötetään.

TAULUKKO 17. Maastokatkaisijoiden oikosulkuasettelut.

	Isohaara	Taivalkoski
$I_{k>>}$ [A]	400	400
$I_{k>}$ [A]	100	100
$t_{>>}$ [s]	0	0
$t_{>}$ [s]	1,0	0,8

TAULUKKO 18. Maastokatkaisijoiden maasulkuasettelut.

	Isohaara	Taivalkoski
U_0 [V]	1600	2000
I_0 [A]	1,0	1,5
t [s]	0,3	0,3

Asetteluarvoja tehtäessä on otettu huomioon sähköasemalla sijaitsevan sekä maastokatkaisijan välinen selektiivisyys. Oikosulkuvirtoja aseteltaessa on päädytty jättämään $I_{>>}$ virrasta aikahidastus pois, jotta selektiivisyys toimisi. Aikahidastuksen pois jättämiseen on myös se peruste, ettei johtolähdön alkupään katkaisijan pikalaukaisun hidastus kasva liian pitkäksi.

6 LOPPUSANAT

Työ oli hyvin mielenkiintoinen ja haastava. Opin työn aikana erittäin paljon uutta keski-jänniteverkon suojauksesta, sekä suojauksen määrittämisen periaatteista. Hyvänä lisänä toimi uusien maastokatkaisijoiden lisääminen verkkoon. Maastokatkaisijoiden lisääminen herätti monta uutta kysymystä suojausasettelujen selektiivisyydestä, sekä maasulkuvirran käyttäytymisestä. Lisäksi Isohaaran maasulkuvirran sammutus toi lisää haasteita maastokatkaisijoiden suojausasetteluille. Oli hienoa päästä toteuttamaan melko vapaasti suojausasetusten määrittelyä, sekä siinä huomioon otettavia asioita. Haastetta lisäsi myös se, että tein työtä suurimmaksi osaksi itsenäisesti, jolloin minun piti ottaa itse selvää monista asioista suojaukseen liittyen, ja raportoida selvittämiäni asioita työn toimeksiantajalle.

Haluan kiittää Keminmaan Energian toimitusjohtajaa Janne Rouvista mielenkiintoisen aiheen antamisesta opinnäytetyöhön, sekä hyvistä neuvoista opinnäytetyön aikana. Kiitokset sujuvasta yhteistyöstä kuuluvat myös ABB Oy:n, Pohjolan Voima Oy:n, Tenergia Oy:n ja Kemijoki Oy:n yhteyshenkilöille, sekä Keminmaan Energia Oy:n henkilökunnalle.

LÄHTEET

ABB Oy. 2000a. Teknisiä tietoja ja taulukoita.7. oikosulkusuojaus. Luettu 5.6.2012
http://moodle.tamk.fi/file.php/4416/Aineisto_ja_linkit/TTT-kasikirja_2000/7%20Oikosulkusuojaus.pdf

ABB Oy. 2000b. Teknisiä tietoja ja taulukoita.8. maasulkusuojaus. Luettu 5.6.2012
http://moodle.tamk.fi/file.php/4416/Aineisto_ja_linkit/TTT-kasikirja_2000/8%20Maasulkusuojaus.pdf

Asset Vision Oy. 2010. Sähköverkkotoiminnan verkostostrategia 2030. Tilaustutkimus. Ei julkinen.

Elovaara, Laiho. 1996. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki, 2001, Yliopistokustannus / Otatieto Oy

Korpinen, L. 2007. Muuntajat ja sähkölaitteet. Luettu 13.4.2012.
www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

Lakervi, E. 1996. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Helsinki, Otatieto Oy

Lakervi, E. Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki, Otatieto Oy

Määttä, H. 2009. Isohaaran voimalaitoksen 20kV maasulkusuojausten tarkastelu. Muis-tio. Ei julkinen.

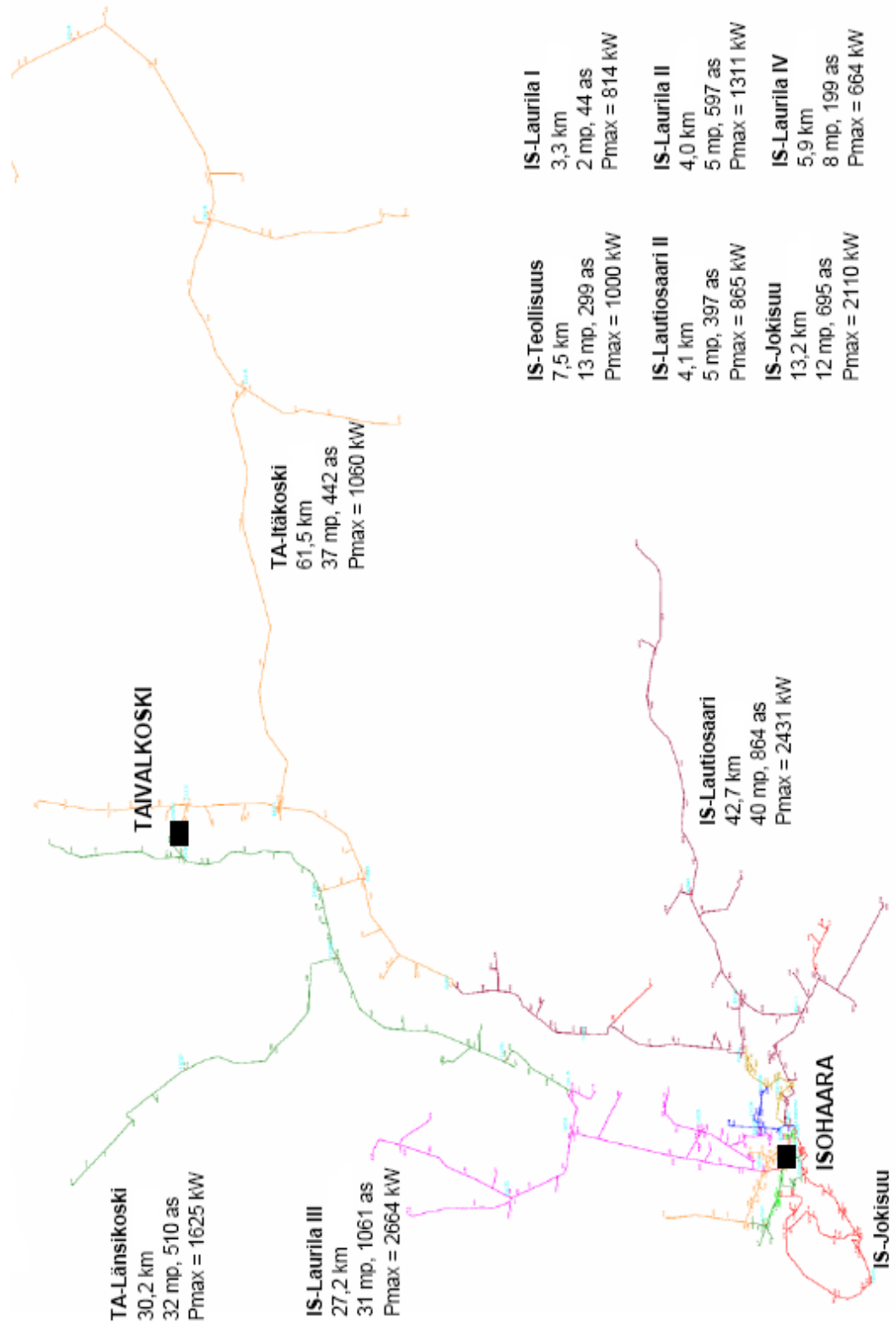
SENER. 1994. Verkostosuositus SA 5:94 – Keskijänniteverkon sähköinen mitoittami-nen. Luettu 13.4.2012. <http://ekstra.adato.fi/ekstranet/sahkoverkosto/kansio5verkon-suunnittelu-ohjeet>

Simonen, M. Sähkönjakeluverkon suunnitteluperusteet. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

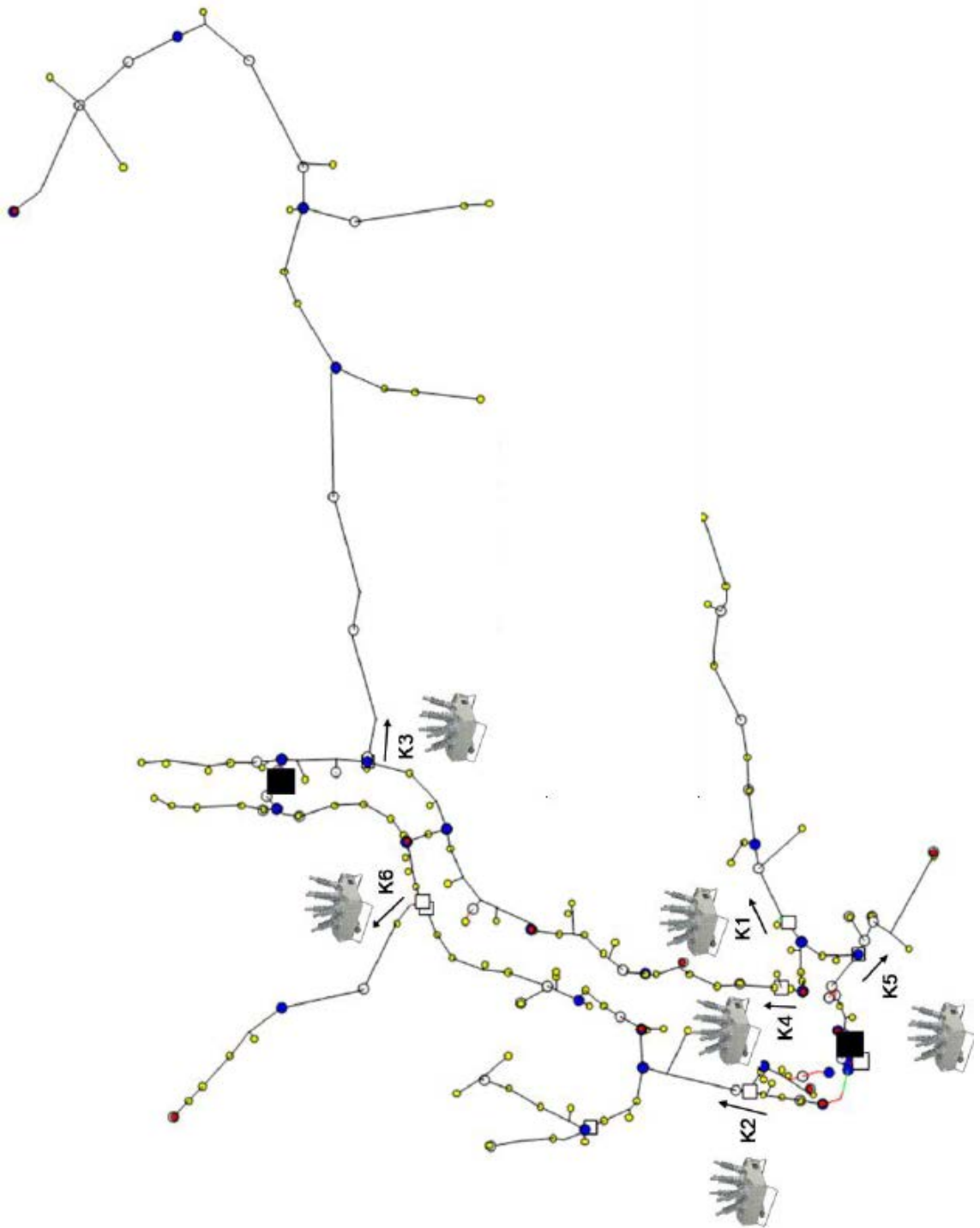
Suomen standardisoimisliitto SFS. 2009. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki.

LIITTEET

Liite 1. Keminmaan Energian sähköverkko



Liite 2. Maastokatkaisijoiden sijoituspaikat



Liite 3. 20 kV:n jakeluverkon kytkentäkaavio

