



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VARAVOIMAKONEEN SUO- JAUKSEN SUUNNITTELU

TEKIJÄ: Ville Mielonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Ville Mielonen			
Työn nimi Varavoimakoneen suojauksen suunnittelu			
Päiväys	11.5.2019	Sivumäärä/Liitteet	34/2
Ohjaaja(t) yliopettaja Juhani Rouvali, lehtori Timo Savallampi			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Enerke Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena on tuottaa toimiva suojausratkaisu varavoimakoneille, kun nittä käytetään syöttämään keskijänniteverkkoa, jotta varavoimakoneita voidaan käyttää turvallisesti parantamaan ongelma-kohteiden sähkötoimitusvarmuutta. Työssä käsitellään myös toimintatapaa varavoiman toimittamiselle, kun varavoimaa tarvitaan keskijänniteverkon vikatilanteessa. Työn tilaaja on Enerke Oy.</p> <p>Työssä tarkastellaan oiko- ja maasulkusuojauksien teoriaa ja tehdään laskelmia oikosulkuvirroille ja maasulun aikaisille nolajännitteille. Laskelmiin käytetään mahdollisten käyttökohteiden verkkoja. Laskennat suoritetaan laskentataulukolla käyttäen työssä esitettyjä kaavoja ja lähtötietoja. Työssä käydään läpi varavoimakoneiden sijoittaminen kohdeverkkojen alueella sekä muutokset verkkojen kytkennöissä, jotta varavoimaa voidaan syöttää verkkoon.</p> <p>Työn tuloksena saatiin ehdotus suojausten toteuttamiselle sekä suojausten asetteluille. Myös varavoiman toimittamisen eri vaiheet on esitelty tässä työssä.</p>			
Avainsanat varavoima, keskijännite, maasulku, sähkötoimitusvarmuus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Ville Mielonen			
Title of Thesis Protection Designing of Reserve Power Generator			
Date	11 May 2019	Pages/Appendices	34/2
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr. Timo Savallampi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Enerke Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to design functional electrical protection for reserve power generators when they are used to feed medium voltage network. The purpose of this is to make the use of the generators safe. Another purpose was to analyze the procedure of delivering reserve power in fault situations in a medium voltage network.</p> <p>The theory on short circuits and ground faults was studied. Calculations for currents in a short circuit and voltages in a ground fault situation were made. Values for the calculations were obtained from the grids where reserve power could be used. Calculations were made with spreadsheet using the formulas and values that are presented in the thesis. The positioning of the generators in the target networks and also the changes in the networks switches were explained in the thesis.</p> <p>As a result of this thesis, a suggestion for the implementation of the protection and settings for the relays was made. Also the different phases of delivering reserve power were gone through.</p>			
<p>Keywords reserve power, medium voltage, ground fault, security of energy supply</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	ENERKE OY.....	6
2.1	Sähkömarkkinalaki ja sähkönlaatu.....	6
3	VARAVOIMAKONE	7
3.1	Enerke Oy:n varavoimalaitteet.....	7
4	VARAVOIMAKONEIDEN KÄYTTÖPAIKAT	10
4.1	Varavoimakoneiden sijoittaminen	12
5	VARAVOIMALAITTEIDEN SUOJAUKSET	14
5.1	Suojausjärjestelmä.....	14
5.1.1	Oikosulkusuojaus	14
5.1.2	Oikosulkuvirtojen tarkastelu	15
5.1.3	Maasulkusuojaus.....	21
5.1.4	Maasulkujännitteiden tarkastelu	24
5.2	Suojausten toteutus	26
6	TOIMINTAMALLI	28
7	YHTEENVETO.....	30
	LÄHDELUETTELO.....	31
	LIITE 1: 529 KVA GENERAATTORIN TEKNISET TIEDOT	32
	LIITE 2: 1000 KVA GENERAATTORI TEKNISET TIEDOT	33
	LIITE 3: SHUNT REAKTORIN TEKNISET TIEDOT	34

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni tarkoituksena on suunnitella varavoimakoneille suojaus, kun niitä käytetään syöttämään 20 kV verkkoa. Työn tarkoituksena on tuottaa toimiva suojausratkaisu, jotta varavoimakoneita voidaan käyttää turvallisesti parantamaan ongelmakohteiden sähkön toimitusvarmuutta. Suojauksien ratkaisuihin vaikuttavat käytettävä varavoimakone sekä muuntaja.

Toimeksiantaja työlle on Enerke Oy. Sain aiheen työlle otettuani yhteyttä yritykseen, ja he tarjosivat mahdollisia vaihtoehtoja työlle, joista tämä valikoitui aiheekseni. Enerke Oy tarjoaa varavoimapalveluita eri asiakkaille esimerkiksi sähköverkkoyhtiöille. Varavoimapalveluilla pyritään turvaamaan asiakkaan sähköverkon toimitusvarmuus poikkeusolosuhteissa tai vikatilanteissa. Varavoimakoneita käytetään myös sähkönkäytön huippujen tasaamiseen, tilaisuuksien sähköntuotantoon esimerkiksi messuilla sekä eri yritysten muihin tilapäisiin sähköistyksiin.

Aihe on kiinnostava sen ajankohtaisuuden vuoksi. Vuonna 2013 voimaan tulleen sähkömarkkinalain myötä sähkönjakelu on ollut kovan tarkastelun kohteena, ja verkkoyhtiöt ovat joutuneet investoimaan paljon verkkojen rakenteisiin ja etenkin toimitusvarmuuden parantamiseen. Varavoimakoneet ovat vaihtoehto toimitusvarmuuden parantamiseen hankalissa kohteissa.

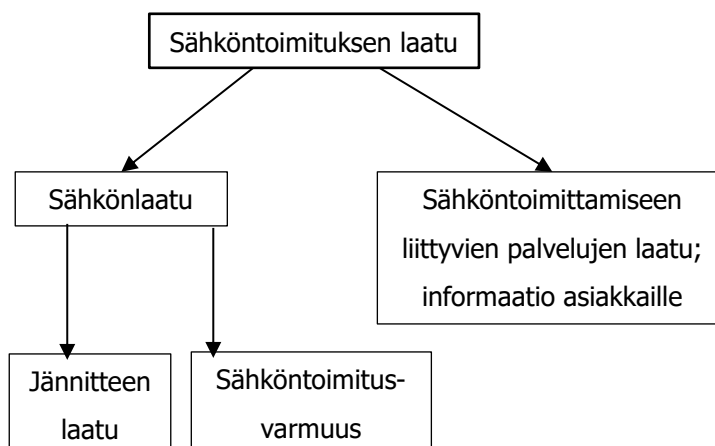
2 ENERKE OY

Enerke Oy on Pohjois-Karjalan Sähkön omistama yhtiö, joka tuottaa monipuolisia palveluja sähköverkkojen osalta koko elinkaaren ajalle suunnittelusta aina rakentamiseen sekä kunnossapitoa ja peruskorjausta 0,4 – 110 kV jännitteille. Yrityksellä on 60 vuoden kokemus sähköverkoista. Yrityksen palveluihin kuuluu myös varavoiman tuottaminen asiakkaille, esimerkiksi verkkoyhtiöille. Laitteisto on laaja ja siihen kuuluu 10 siirreltävää varavoimakonetta, joiden koot vaihtelevat 100 kVA aina 1000 kVA. (Enerke oy)

2.1 Sähkömarkkinalaki ja sähkönlaatu

Sähkönlaatua määritetään standardissa SFS-EN 50160 ja siinä annetaan raja-arvot hyvälle sähkön laadulle, myös sähkönjakelun keskeytysten määrälle. Vuonna 2013 voimaan tullut sähkömarkkinalaki käytännössä määrittelee pisimmän yhtäjaksoisen ajan sähkönjakelun keskeytykselle. Taajama-alueilla sähkönjakelun keskeytys ei saa olla yli kuuden tunnin mittainen ja muilla alueilla se ei saa ylittää 36 tuntia. Uusi sähkömarkkinalaki laittoi myös muita velvoitteita jakeluyhtiöille. (Sähkömarkkinalaki, 2013, §51)

Verkkoyhtiöt määrättiin kehittämään ja ylläpitämään verkkojaan niin, että ne täyttävät laissa annetut vaatimukset. Verkkojen täytyy siis toimia luotettavasti, kun niihin kohdistuu odotettavissa olevia häiriöitä. Myös valmiuslaissa tarkoitetuissa poikkeusoloissa verkon tulee toimia mahdollisimman luotettavasti. Jos sähkönjakelussa tapahtuu virhe, on loppukäyttäjä oikeutettu hinnanalennukseen. Loppukäyttäjä on myös oikeutettu vahingonkorvaukseen, mikäli kärsii virheen vuoksi. Virhe on tapahtunut, jos sähkön laatu tai toimitustapa poikkeaa siitä, mitä on sovittu. Riittävän pitkäaikaisesta yhtäjaksoisesta keskeytyksestä kuluttaja on oikeutettu vakiokorvaukseen. (Sähkömarkkinalaki, 2013, §97-100)



KUVA 1. Sähkötoimituksen laatu ja sen osa-alueet (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I, 2011)

3 VARAVOIMAKONE

Varavoimakone on osa varavoimajärjestelmää. Varavoimajärjestelmä voi olla erillinen varavoimalaitos, joka koostuu yhdestä tai useammasta varavoimakoneesta tai erillinen siirreltävä varavoimakone, jollaisia tässä opinnäytetyössä käsitellään. Varavoimakone koostuu moottorista ja generaattorista sekä muista oheislaitteista ja apujärjestelmistä, joita sen käyttämiseen tarvitaan, kuten moottorinohjain, suojalaitteet ja muu automaatiikka. (Hakala, ym., 2013)

Varavoimaa voidaan käyttää joko rinnankäytössä normaalin verkon kanssa tai saarekekäytössä, jolloin yhteyttä muuhun verkkoon ei ole. Jotta varavoimaa voitaisiin käyttää rinnan muun verkon kanssa, täytyy se tahdistaa muuhun verkkoon. Tässä työssä käsiteltäviä varavoimakoneita käytetään ainoastaan saarekkeessa, joten rinnankäyttöä ei tarkastella työssä tarkemmin. (Hakala, ym., 2013)

Varavoimakoneita voidaan käyttää parantamaan toimitusvarmuutta tietyillä alueilla, joilla sähköverkkoa ei ole vielä parannettu tai verkkoon muodostuu jakelun kannalta ongelmallinen pullonkaula. Tällaisissa kohteissa tässä työssä tarkastelun alla olevia varavoimakoneita käytetään. Tämän työn myötä laitteistojen käyttäminen on turvallista myös mahdollisten vikatilanteiden aikana ja vaaratilanteiden syntyminen ehkäistään tai niiden riski minimoidaan.

3.1 Enerke Oy:n varavoimalaitteet

Yrityksellä on varavoimalaitteita eri kokoluokissa, mutta tässä työssä keskitytään kahteen suurimpaan koneeseen, eli 1000 kVA ja 529 kVA varavoimakoneisiin. 1000 kVA kone on sijoitettu kuorma-auton perävaunuun, jonka kanssa samalla lavalla on kiinteästi asennettu puistomuuntamo, jossa on sisällä 800 kVA muuntaja. Pienemmän koneen kanssa käytetään siirreltävää 500 kVA lavamuuntamo. Myös 529 kVA kone täytyy siirtää kuorma-autolla yhdessä muuntajan kanssa, koska ne on rakennettu vaihtolavoille.

TAULUKKO 1. 1000 kVA generaattori Alstom-Unelec AT400 LB91 tekniset tiedot

teho, kVA	1050
rpm	1500
tehokerroin, $\cos \varphi$	0,8
jännite Y, V	380

TAULUKKO 2. 529 kVA generaattori Newage Stamford HC534E tekniset tiedot

teho, kVA	556
rpm	1500
tehokerroin, $\cos \varphi$	0,8
jännite Y, V	400



KUVA 2. 1000 kVA varavoimakone kontissa, vasemmalla muuntaja

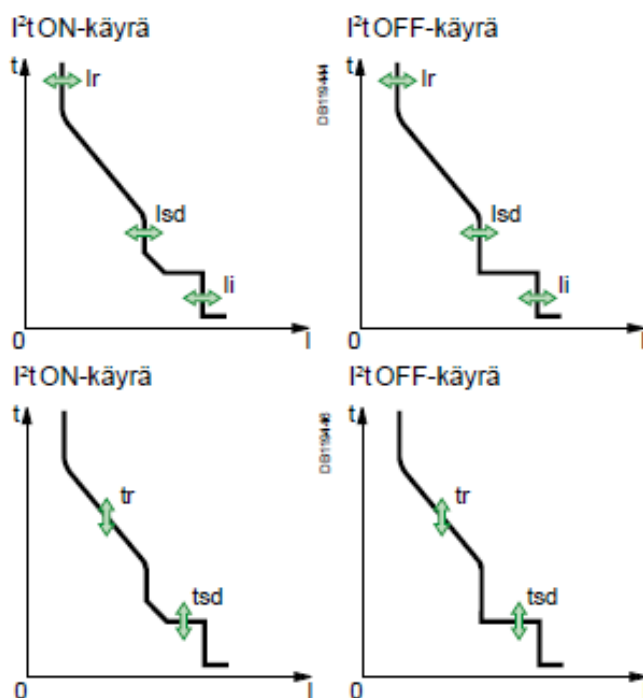


KUVA 3. 800 kVA muuntaja

Generaattoreita suojaamassa on Schneiderin Masterpact NT -ilmakatkaisija, jota ohjaa Micrologic 5.0E-rele. Releellä voidaan tehdä ylivirta-, oikosulku- ja pikalaukaisu. Releen asettelut tehdään kiertämällä releessä olevia kytkimiä, joilla säädetään asetteluarvoja nimellisvirran kertoimilla sekä viiveitä sekunteina. Asettelu arvojen näkyvät digitaalinen näyttö. Kuvan 4 releen nimellisvirta I_N on 1600 A ja sen ylivirta-asettelu I_r on lähes 1600 A, oikosulkuasettelu I_{sd} noin 4400 A ja pikalaukaisu I_i 6400 A. Oikosulkusuojaus viive t_{sd} on 0,4 s ja ylivirtasuojan viive t_r 8 s. Kuvassa 5 on esitetty releen laukaisukäyrät. Kyseinen rele on suojaamassa 1000 kVA varavoimakonetta, joka on esitetty kuvassa 2.



KUVA 4. Masterpact NT16 H1 katkaisija ja Micrologic 5.0 E rele

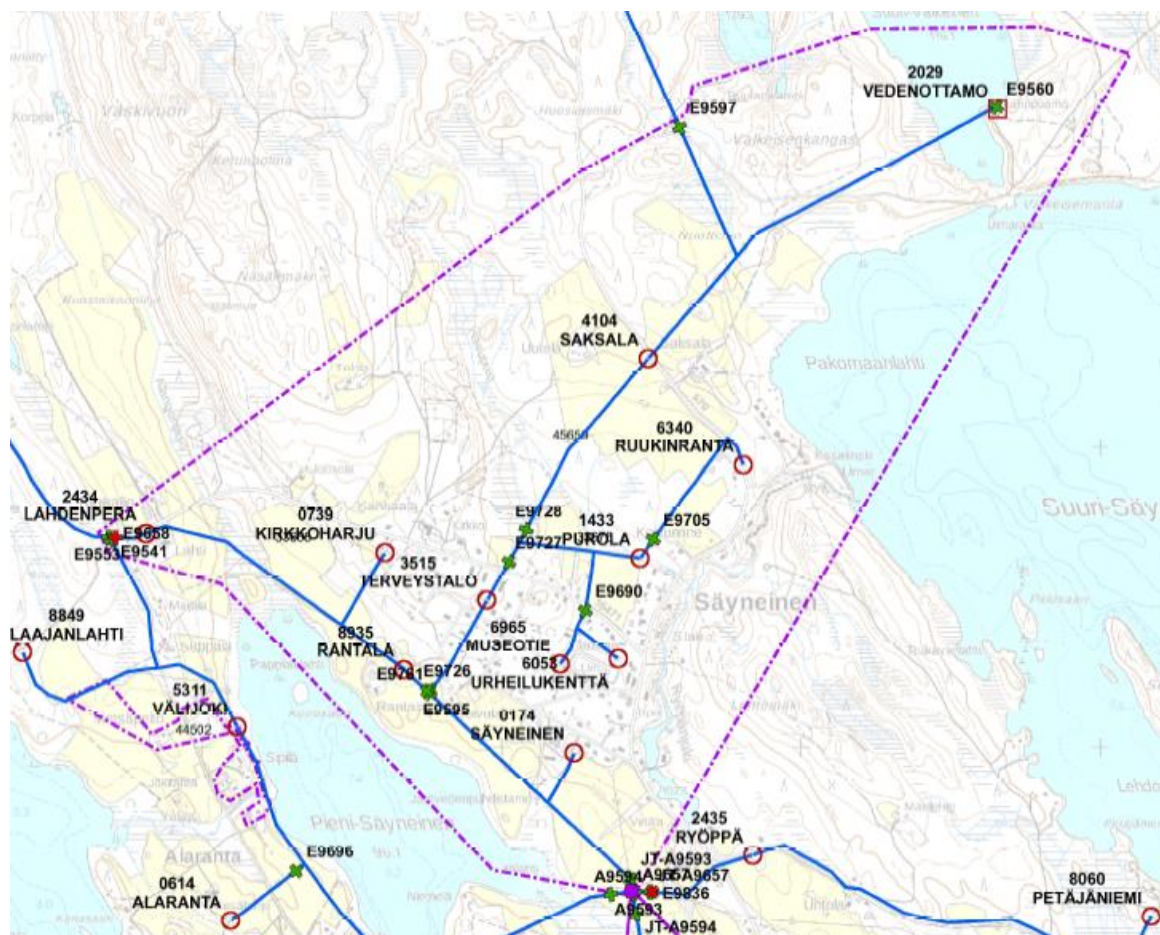


KUVA 5. Micrologic-releen laukaisukäyrät (Schneider Electric, 2011)

4 VARAVOIMANKONEIDEN KÄYTTÖPAIKAT

Työhön on valittu kaksi kohdetta Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n verkkoalueelta, joissa varavoimakoneita käytetään sähköntoimitukseen ongelmatilanteissa 20 kV keskijänniteverkkon syötettyinä. Nämä valitut kohteet sijaitsevat Juankoskella Säyneisen taajamassa Kuopion kaupungissa ja Kesälahdella Sarvisalon saarella Kiteen kaupungissa.

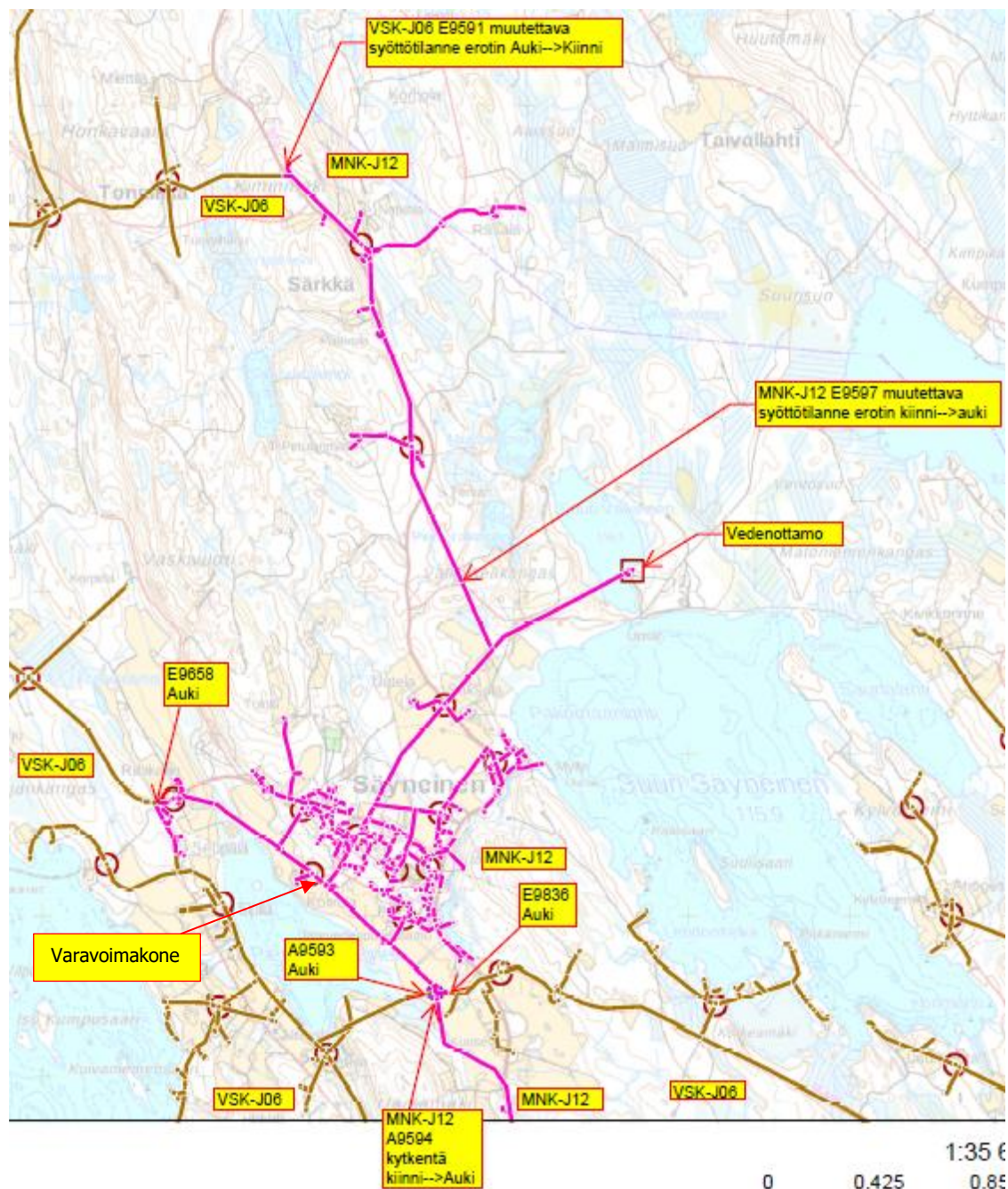
Säyneisen taajaamaa pystytään syöttämään kahdesta eri keskijännitelähdöstä, eli toisen vikaantuessa pystytään taajaman syöttö kääntämään toiselle lähdölle. Johdot kuitenkin kulkevat lähellä toisiinsa ja pitkän matkan maastossa ennen Säyneistä, joten on mahdollista, että molemmat lähdöt voivat vikaantua yhtä aikaa esimerkiksi myrskyssä. Tällaisessa tilanteessa varavoimaa voidaan käyttää syöttämään taajaamaa. Kuvassa 6 on rajattu syötettävän verkon alue katkoviivalla.



KUVA 6. Säyneisen taajaman keskijänniteverkko

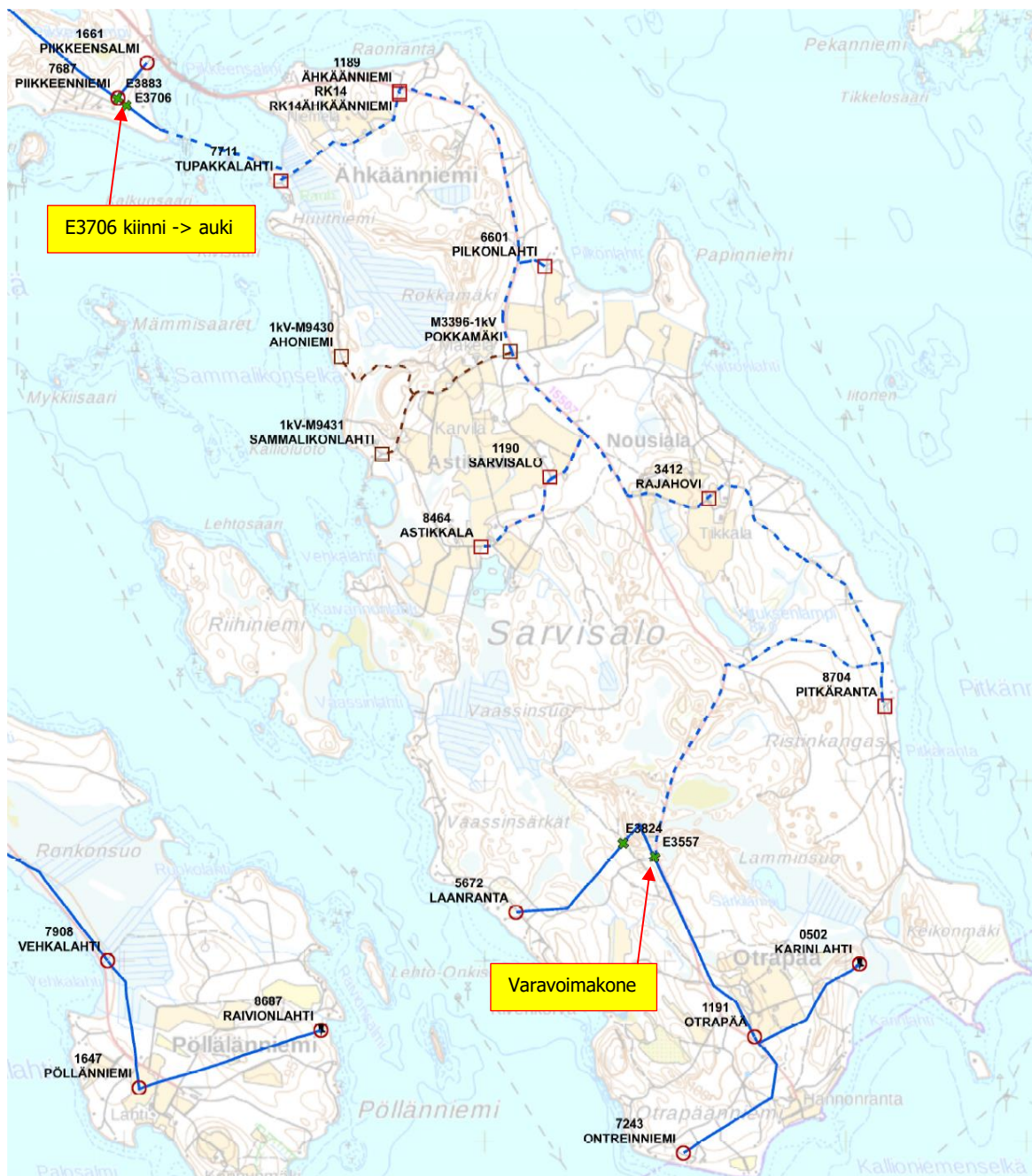
Jotta taajaama voitaisiin syöttää varavoimalla, täytyy taajaman verkko tehdä saarekkeeksi eli erottaa se muusta ympäröivästä verkosta. Saarekkeen rajaamiseksi on verkon kytkennöissä tehtävä muutoksia, eli verkossa olevia erottimia on joko avattava tai suljettava. Verkossa on yhteensä kolme erotinta, joiden tilaa on muutettava: kaksi käsikäyttöistä erotinta, E9597 ja E9591, sekä yksi etäkäytettävä erotin A9594. Erottimet E9597 ja A9594 avataan, jolloin saareke saadaan rajattua ja erotettua muusta verkosta. Sulkemalla erotin E9591 saadaan sen ja erottimen E9597:n väliin jäävä alue

kytkettyä ympäröivään verkkoon, jolloin vian korjaamisen jälkeen myös tälle alueelle saadaan sähköä. Muiden kuvassa 7 merkittyjen erottimien tilaa ei muuteta.



KUVA 7. Verkon kytkentöjen muutokset Säyneisessä

Sarvisalon saarta syötetään vesistökaapelilla ja esimerkiksi tämän kaapelin vikaantuessa ei vikaa pystytä välttämättä korjaamaan nopeasti. Sarvisalon muodostamiseksi saarekkeeksi ei verkossa tarvitse muuttaa kuin yhden erottimen tilaa eli erotin E3706 on avattava. Kuvassa 8 on esitetty Sarvisalon verkon rakenne.

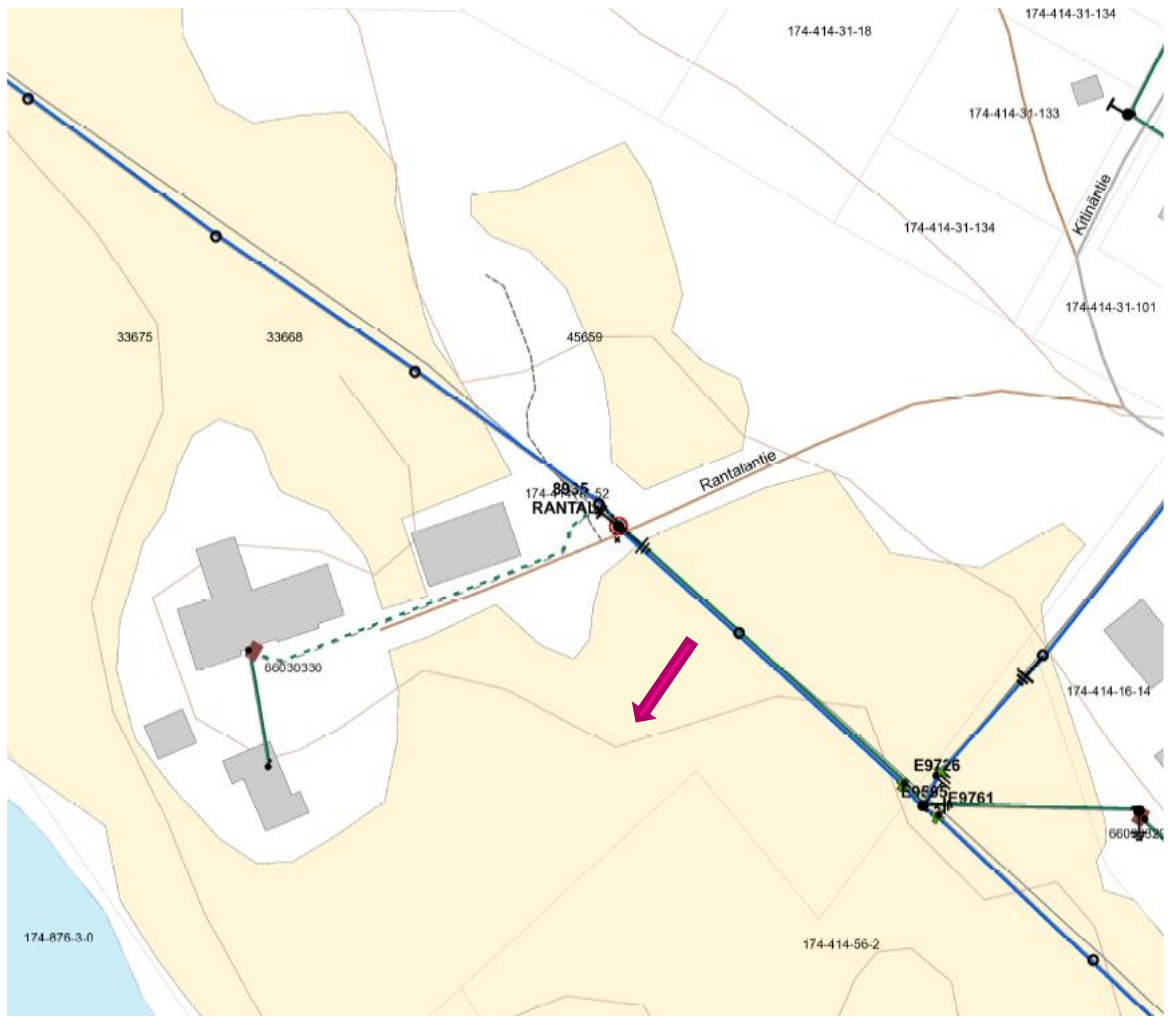


KUVA 8. Sarvisalon keskijänniteverkko

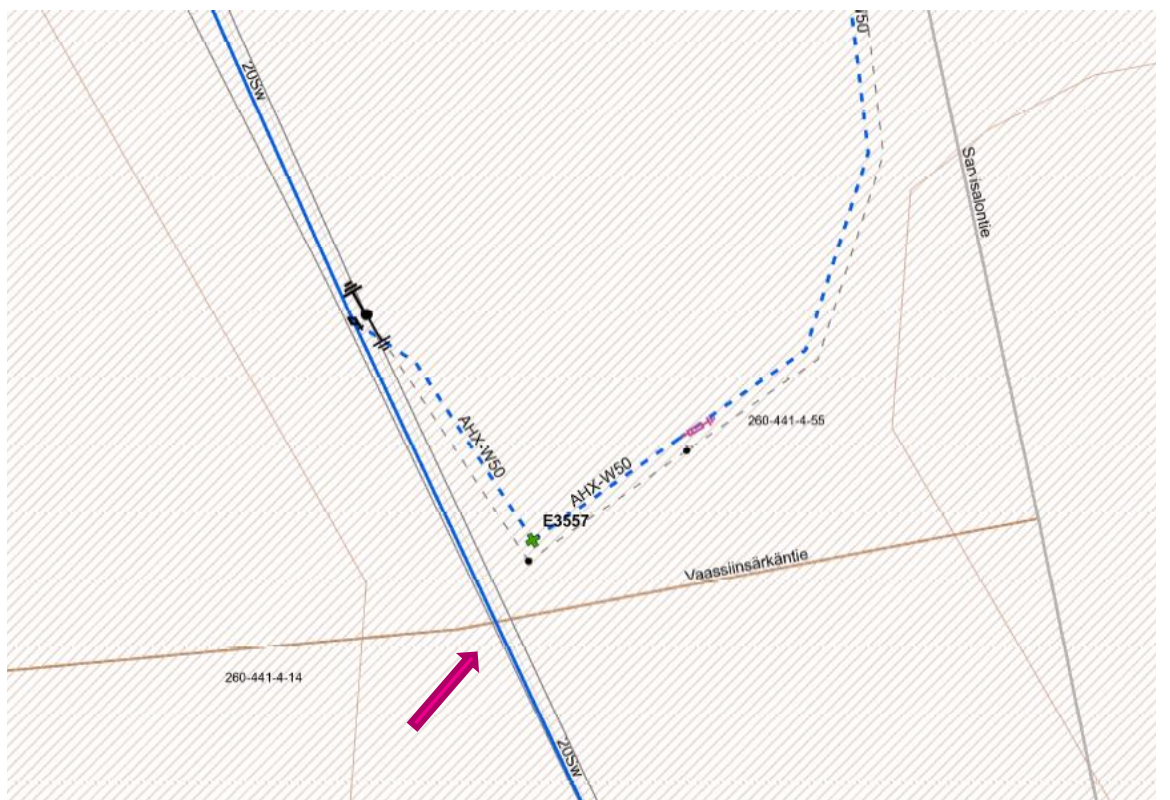
4.1 Varavoimakoneiden sijoittaminen

Varavoimakoneiden mahdollisia sijoituspaikkoja on mietitty etukäteen. Koneiden ollessa fyysisesti suurikokoisia ne tarvitsevat paljon tilaa paikassa, jossa ne kytketään verkkoon. Koneet voivat olla kytkettyinä verkkoon suhteellisen pitkiä aikoja, joka omalta osaltaan antaa lisää aihetta tarkastella sijoituspaikkaa. Koneet tuottavat käydessään melua, joten asutuksen viereen sijoittamisista tulisi välttää. Näkyvällä ja yleisellä paikalla laitteet voivat kohdata myös ilkeävaltaa tai muuta väärinkäyttöä.

Kuva 9 esittää mahdollisen paikan Säyneisen taajamassa. Paikka voisi olla Rantalantien varressa muuntajan 8935 välittömässä läheisyydessä. Sarvisalossa varavoimakone voitaisiin sijoittaa kuvan 10 osoittamaan paikkaan, jossa kaapeliverkko vaihtuu ilmajohtoksi Vassinsärkätien varressa.



KUVA 9. Varavoimakoneen sijoituspaikka, Säyneinen



KUVA 10. Varavoimakoneen sijoituspaikka, Sarvisalo

5 VARAVOIMALAITTEIDEN SUOJAUKSET

Jotta varavoimalaitteita voitaisiin käyttää jakeluverkossa, pitää suojauksien niissä olla asianmukaisia ja täyttää standardien ja lakien asettamat vaatimukset sekä sähkötekniset ominaisuudet.

5.1 Suojausjärjestelmä

Suojausjärjestelmän tarkoitus on havaita verkossa tapahtuvat viat ja erottaa vikaantuneet verkon osat verkosta, jotta normaalissa tilassa oleva verkko voi jatkaa toimintaansa eivätkä vikavirrat tuhoa laitteistoa tai aiheuta muuta vahinkoa. Standardissa SFS 60050-448 suojausjärjestelmällä tarkoitetaan suojauslaitteita, mittamuuntajia, johdotuksia, laukaisupiiriä, teholähteitä, tiedonsiirtoa sekä jälleenytkentäautomaatiikka. Katkaisijat eivät kuulu standardissa suojausjärjestelmään. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II, 2011)

5.1.1 Oikosulkusuojaus

Maasta erotetussa verkossa oikosulut ovat vaiheiden välisiä vikoja, joihin ei liity maakosketusta. Maasta erotetussa verkossa niitä voi esiintyä kaksi- tai kolmivaiheisena, kun taas yksivaiheinen oikosulku on niin sanottu maasulku, joka poikkeaa oikosulkutilanteesta. Kolmivaiheinen oikosulku on symmetrinen, kun taas kaksi- tai yksivaiheiset ovat epäsymmetrisiä. Suurimmat oikosulkuvirrat kolmivaiheisessa järjestelmässä tulevat kolmivaiheisista oikosuluista. (Elovaara & Haarla, Sähköverkot I, 2011)

Kolmivaiheinen oikosulkuvirran arvo lasketaan kaavalla 1 (Huotari & Partanen, 1998)

$$I_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z} \quad (1)$$

jossa I_{k3} on kolmivaiheinen oikosulkuvirta, c jännitekerroin, U_N nimellisjännite ja Z oikosulkupiirin impedanssi.

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran kaavassa kerroin c saa arvons taulukon 3 mukaan:

TAULUKKO 3. Jännitekerroin c (Huotari & Partanen, 1998)

Nimellisjännite U_N	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa C_{maks}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa C_{min}
Pienjännite 100 – 1000 V		
a. 230/400 V	1,00	0,95
b. muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 – 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 – 230 kV	1,10	1,00

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan arvioida kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta kaavalla 2

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3} \quad (2)$$

jossa I_{k2} on kaksivaiheinen oikosulkuvirta.

Oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa useilla eri menetelmillä, kuten releillä tai sulakkeilla, mutta keskiännitteellä käytetään pääasiassa releitä, varsinkin jakeluverkoissa. Säteittäisessä verkossa käytetään yleensä vakioaikaylivirtarelettä. Sitä voidaan käyttää, jos suurin kuormitusvirta on pienintä oikosulkuvirtaa pienempi. Se ei kuitenkaan pysty havaitsemaan virran suuntaa, joten silmukoidussa verkossa se ei ole paras vaihtoehto. (Mörsky, 1993) (Elovaara & Haarla, Sähköverkot II, 2011)

5.1.2 Oikosulkuvirtojen tarkastelu

Syötettäessä verkkoa varavoimakoneella poikkeavat oikosulkuvirrat normaalista syöttötilanteesta. Pääasiassa tämä johtuu varavoimakoneesta, joka ei pysty tuottamaan yhtä paljon oikosulkuvirtaa kuin normaali sähköverkko. Tarkastellaan oikosulkuvirtoja tilanteessa, jossa verkkoa syötettäisiin 529 kVA varavoimakoneella 500 kVA syöttömuuntajan kautta. Taulukoissa 4 ja 5 on laskennassa tarvittavia generaattorin ja muuntajan sähköteknisiä arvoja.

TAULUKKO 4. Generaattorin teknisiä arvoja

Generaattori 529 kVA	
x_d	2,83
x'_d	0,15
x''_d	0,11
Un/kV	0,4
S_N kVA	600

TAULUKKO 5. Syöttömuuntajan arvoja

Muuntaja 0,4/20 kV 500kVA	
S_n /kVA	500
U1/kV	0,41
U2/kV	20,5
zk/%	4,09
Pk/kW	5,5
P0/kW	0,51
Un/kV	20,5
rk/%	1,1
xk/%	4,09
μ	0,02

Generaattorille annetut oikosulkureaktanssit x_d ovat suhteellisia arvoja. Taulukossa olevalla perusyksiköllä S_{Nperus} ja kaavalla 3 ne voidaan muuttaa absoluuttisiksi arvoiksi

$$X_d = x_d * \frac{U_N^2}{S_N} \quad (3)$$

jossa X_d on oikosulkureaktanssi ohmeina, x_d oikosulkureaktanssi suhteellisena arvona ja S_N perusarvo näennäisteholle. Tehon perusarvona ei ole generaattorin näennäisteho, vaan datalehdessä on annettu erillinen arvo sille.

TAULUKKO 6. Generaattorin reaktanssit

	pienjännitteellä	keskijännitteelle reduoituna
$X'd/\Omega$	0,04	100
$X''d/\Omega$	0,0293	73,3

Oikosulkulaskennassa näistä arvoista tarvitaan alkuoikosulkuvirran reaktanssia X''_d ja muutostilan reaktanssia X'_d , joilla lasketaan alkuoikosulkuvirta I''_k ja muutostilan oikosulkuvirta I'_k . Taulukossa 6 on esitetty näille reaktansseille todelliset ja keskijännitteelle redusoidut arvot. Jatkuvan tilan oikosulkuvirralla I_k on annettu generaattorin datalehdessä oikosulkukäyrällä arvo, joka on generaattorin navoissa 2600 ampeeria 50 hertsin taajuudella. Tästä arvosta voidaan laskea jatkuvan tilan oikosulkuimpedanssi kaavalla 4, jonka arvoksi saadaan $0,088 \Omega \angle 90^\circ$ tai $0,084 \Omega \angle 90^\circ$ riippuen kertoimen c arvosta, joka saa arvonsa taulukosta 3.

$$\underline{Z} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}I_{k3}} \quad (4)$$

Taulukon 5 yläosassa olevista muuntajan kilpiarvoista täytyy laskea taulukon alaosassa oleva suhteellinen oikosulkuresistanssi r_k sekä -reaktanssi x_k kaavoilla 5 ja 6

$$r_k = \frac{P_k}{S_N} \quad (5)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (6)$$

joissa P_k on oikosulkuteho, S_N näennäisteho ja z_k suhteellinen oikosulkuimpedanssi.

Saaduilla arvoilla voidaan laskea muuntajan oikosulkuimpedanssi \underline{Z}_T kaavalla 7. Kaavassa on otettava huomioon, että r_k ja x_k ovat prosenttiarvoja, joten ne on muutettava murtoluvuiksi, jotta tulos olisi oikea.

$$\underline{Z}_T = (r_k + ix_k) * \frac{U_N^2}{S_N} \quad (7)$$

Muuntajan impedanssiksi keskijännitepuolelle saadaan $34,37\Omega \angle 74,4^\circ$ ja pienjännitteellä $0,014\Omega \angle 74,4^\circ$. Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat lasketaan kaavalla 8

$$I_{k3} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}(Z_{Xd} + Z_T + Z_j)} \quad (8)$$

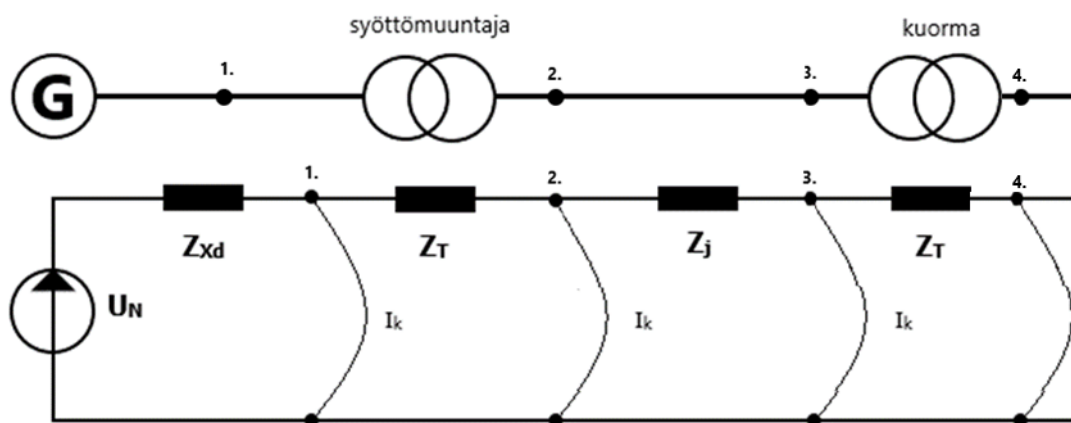
jossa oikosulkuimpedanssi koostuu kolmesta eri osasta: Z_{Xd} generaattorin, Z_T muuntajan ja Z_j johtimien oikosulkuimpedansseista. Kaava on johdettu kaavasta 1.

Kaavassa olevia impedansseja ei voi summata suoraan yhteen, koska ne sijaitsevat eri jänniteportaisissa. Eri jännitteissä olevat impedanssit täytyy redusoida siihen portaaseen, jossa laskenta suoritetaan. Jos halutaan laskea oikosulkuvirrat pienjännitteellä, täytyy keskijännitejohtimien impedanssit redusoida. Laskettaessa oikosulkuvirtoja keskijännitteelle täytyy generaattorin impedanssi redusoida tähän portaaseen. Redusoidut arvot lasketaan jakamalla haluttu impedanssi muuntosuhteen neliöllä kaavassa 9 esitetyllä tavalla

$$Z' = \frac{Z}{\mu^2} \quad (9)$$

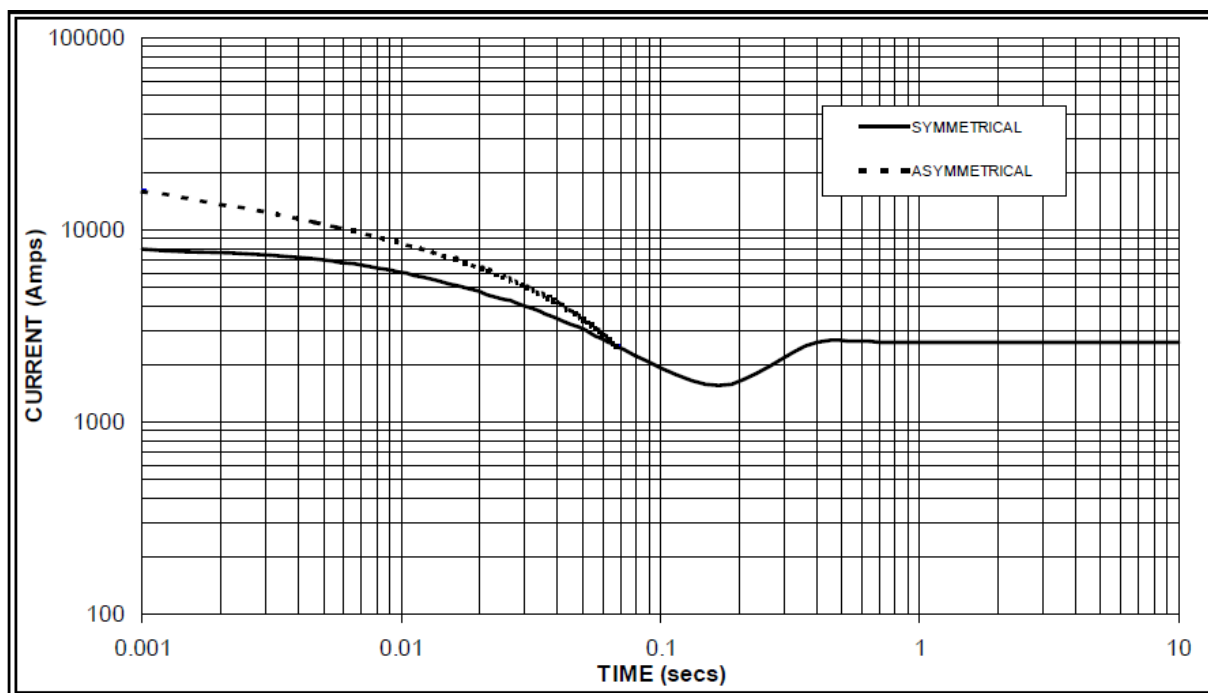
jossa Z' on redusoitu impedanssi ja μ muuntosuhde.

Tarvittavia arvoja oikosulkuvirroista on kolme kappaletta: ennen syöttömuuntajaa ja heti sen jälkeen sekä verkon kauimmaisessa pisteessä generaattorista nähdessä. Kuvassa 11 on esitetty vikapaikat, joista oikosulkuvirran arvoja lasketaan. Virtoja voidaan tarkastella myös pienjännitepuolelta jakelumuuntajan jälkeen, jotta voidaan varmistua oikosulkuvirtojen riittävydestä siellä sijaitsevan suojien toiminnan kannalta. Jakelumuuntaja on kuvassa 11 merkitty kuormana.



KUVA 11. Vikapaikat varavoimalla käytettävässä verkossa

Generaattorilta muuntajalle olevien johtojen pituudet ovat niin lyhyet, että niitä ei oteta laskennassa huomioon. Tällöin muuntajaa ennen tapahtuvan oikosulun laskennassa on otettu huomioon vain generaattorin impedanssit. Molemmista verkoista on etsitty generaattorista katsottuna kauimmainen piste, jolta saadaan pienin oikosulkuvirran arvo. Tämä on kuvassa 11 esitetty piste 3. Säyneisen taa- jamassa piste sijaitsee vedenottamon luona ja Sarvisalossa erottimen E3706 luona.



KUVA 12. 529kVA generaattorin oikosulkukäyrä (Stamford AVK, 2010)

Ennen muuntajaa lasketut oikosulkuvirran arvot noudattavat hyvin kuvassa 12 esitettyä oikosulkukäyrää. Alkuoikosulkuvirran arvoksi I''_k saatiin 7479 - 7873 A ja muutostilan I'_k arvoksi 5485 - 5774 A. Alkuoikosukuvirta vaimenee aikavakion T''_d mukaisessa ajassa muutostilan virraksi. Aikavakio T''_d on 0,012 s.

Taulukoissa 7 ja 8 on oikosulkuvirtojen suuruudet eri vikatilanteissa. Taulukon 7 vikavirrat mitattaisiin kuvan 11 pisteessä 1, eli pienjännitepuolella, ja taulukon 8 vikavirrat mitattaisiin pisteessä 2 eli keskijännitepuolella. Sarvisalon epäedullisimpaan pisteeseen Tupakkalahteen on kaapeleita seuraavien määrien verran: 8,9 km AHX-W150, 0,1 km AHX-W95 ja 0,7 km AHX-W120. Näiden impedanssiksi saadaan $6,08\Omega \angle 12,9^\circ$. Säyneisessä vastaavaan pisteeseen, eli vedenottamolle, on 2,8 km Sparrow ilmajohtoa, jonka impedanssi on $2,78\Omega \angle 22,7^\circ$. Pienjännitteelle redusoituna nämä impedanssit ovat $2,43\text{m}\Omega \angle 12,9^\circ$ ja $1,11\text{m}\Omega \angle 22,7^\circ$.

TAULUKKO 7. Oikosulkuvirtojen suuruudet pisteessä 1

vikapaikka		$I''_{k \max} / \text{A}$	$I'_{k \max} / \text{A}$	$I_{k \max} / \text{A}$	$I_{k2 \min} / \text{A}$
piste 2		5400	4330	2600	2040
piste 3	Sarvisalo	5300	4260	2530	1990
	Säyneinen	5340	4280	2570	2020

TAULUKKO 8. Oikosulkuvirtojen suuruudet pisteessä 2

vikapaikka		$I''_{k \max} / \text{A}$	$I'_{k \max} / \text{A}$	$I_{k \max} / \text{A}$	$I_{k2 \min} / \text{A}$
piste 2		119	95	52	39
piste 3	Sarvisalo	117	94	52	39
	Säyneinen	117	94	52	39

Oikosulkulaskennasta havaitaan, että syötettävien verkkojen ollessa suppeita ja niissä olevien johtopituuksien ollessa lyhyitä, ei johtimilla ole huomattavaa merkitystä oikosulkuvirtojen suuruuteen. Johtimien impedanssiin verrattuna generaattorin ja muuntajan oikosulkuimpedanssit ovat huomattavan suuria ja oikosulkuvirtojen suhteen määrääviä. Johtopituuksien kasvaessa kymmeneen kilometriin alkavat niiden vaikutukset olla riittäviä, jotta ne täytyisi ottaa huomioon suojausten asetteluissa. Käsiteltävien verkkojen ja laitteistojen tapauksessa näin ei kuitenkaan ole, joten releiden asettelut määräytyvät käytännössä generaattorin ja käytettävän muuntajan mukaan.

Laskelmista saimme myös selvillä, että oikosulkuvirrat ovat suurempia kuin verkossa esiintyvät kuormitusvirrat. Säyneysissä kuormitusvirta on alle 30 A ja Sarvisalossa alle 15 A keskijännitteellä, kun taas jatkuvan tilan kaksivaiheinen oikosulkuvirta on 39 A molemmissa verkoissa. Tämä arvo ylittää molemmat kuormitusvirrat selvästi. Huomioitava on myös se, että 529 kVA generaattoria ei käytettäisi Säyneysissä, koska sen kuormitusteho ei riittäisi syöttämään verkossa olevaa kuormaa. Siellä käytettäisiin isompaa 1000 kVA generaattoria, joka tuottaa myös suurempia oikosulkuvirtoja.

Oikosulkuvirtojen tarkastelua ei voitu suorittaa 1000 kVA koneelle, koska kyseisen koneen tarkkoja teknisiä tietoja ei ollut saatavilla. Sen suojausien toimivuutta voidaan kuitenkin arvioida käyttämällä jonkun muun koneen teknisiä tietoja, jotka olisivat suuruusluokaltaan samat kuin yrityksen käytössä olevan 1000 kVA koneen. Laskentoihin otettiin Stamford HCI 634J generattorin ja 800 kVA syöttömuuntajan tekniset tiedot, jotka on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Generattorin jatkuvantilan oikosulkuvirran arvo 3600 A, josta voimme laskea impedanssiksi $0,061 \Omega \angle 90^\circ$ tai $0,064 \Omega \angle 90^\circ$.

TAULUKKO 9. Generattorin teknisiä arvoja

Generaattori 1000 kVA	
x_d	2,81
x'_d	0,23
x''_d	0,15
U_n/kV	0,4
S_N kVA	1030

TAULUKKO 10. Syöttömuuntajan arvoja

Muuntaja 0,4/20 kV 800 kVA	
S_n/kVA	800
U_1/kV	0,41
U_2/kV	20,5
$z_k/\%$	4,09
P_k/kW	7,029
P_0/kW	0,941
U_n/kV	20,5
$r_k/\%$	0,879
$x_k/\%$	3,995
μ	0,02

Oikosulkuvirrat laskettiin näillä arvoilla, jolloin saatiin taulukoiden 11 ja 12 mukaisia arvoja. Arvot eivät ole täysin paikkansa pitäviä, johtuen mahdollisista eroista generaattorien välillä, mutta ne antavat hyvän arvion vikavirtojen suuruudesta käytettäessä yrityksen 1000 kVA varavoimakonetta.

TAULUKKO 11. Oikosulkuvirtojen suuruudet pisteessä 1

vikapaikka		$I''_{k \max} / A$	$I'_{k \max} / A$	$I_{k \max} / A$	$I_{k2 \min} / A$
piste 2		7270	5230	3660	2870
piste 3	Sarvisalo	7100	5150	3520	2770
	Säyneinen	7160	5170	3600	2820

TAULUKKO 12. Oikosulkuvirtojen suuruudet pisteessä 2

vikapaikka		$I''_{k \max} / A$	$I'_{k \max} / A$	$I_{k \max} / A$	$I_{k2 \min} / A$
piste 2		160	115	74	55
piste 3	Sarvisalo	156	113	73	55
	Säyneinen	158	114	73	55

Verrattaessa taulukoiden 11 ja 12 arvoja taulukoissa 7 ja 8 oleviin, voidaan niiden todeta olevan huomattavasti suuremmat kuin pienemmällä varavoimakoneella.

5.1.2.1 Oikosulkuvirrat jakelumuuntajan jälkeen

Oikosulkuvirtoja voidaan tarkastella vielä jakelumuuntajien jälkeen kuvan 11 pisteessä 4, jotta voidaan todeta siellä sijaitsevien suojien toimivan riittävän nopeasti. Laskennassa käytetään pienjännitteelle redusoituja arvoja ja laskuihin lisätään vielä jakelumuuntajan impedanssi. Säyneisellä kauimmaisella pisteellä, eli vedenottamalla, sijaitsee 50 kVA jakelumuuntaja ja Sarvisalossa kauimmaisella pisteellä, eli Tupakkalahdessa, on 30 kVA muuntaja.

TAULUKKO 13. 50 kVA jakelumuuntajan tekniset tiedot (ABB, 2000-07)

Muuntaja 50kVA	
S_n/kVA	50
U_1/kV	20
U_2/kV	0,4
$z_k/\%$	4
P_k/kW	0,885
P_0/kW	0,14
$r_k/\%$	1,77
$x_k/\%$	3,587074
Z_t/Ω	$0,128 \angle 63,7^\circ$
μ	50

TAULUKKO 14. 30 kVA jakelumuuntajan tekniset tiedot (ABB, 2000-07)

Muuntaja 20/0,4	
S_n /kVA	30
U_1 /kV	20
U_2 /kV	0,4
z_k /%	4
P_k /kW	0,585
P_0 /kW	0,1
r_k /%	1,95
x_k /%	3,492492
Z_t/Ω	0,213 $\angle 60,8^\circ$
μ	50

Taulukossa 15 on laskettu jakelumuuntajien jälkeen olevat oikosulkuvirrat. Virrat ovat kolmivaiheisia. Yksivaiheisten oikosulkuvirtojen laskemiseen tarvittaisiin lisäksi verkossa olevat vasta- ja nollaimpedanssit. Voimme kuitenkin arvioida kolmivaiheisista oikosulkuvirroista, että myös yksivaiheiset oikosulkuvirrat ovat riittävän suuria pienjännitepuolella laukaisemaan siellä olevat suojat. Esimerkiksi 40 A gG-sulake vaatii 5,0 sekunnin laukaisuajalla 190 A oikosulkuvirran ja 80 A gG-sulake 425 A.

TAULUKKO 15. Oikosulkuvirrat jakelumuuntajien jälkeen

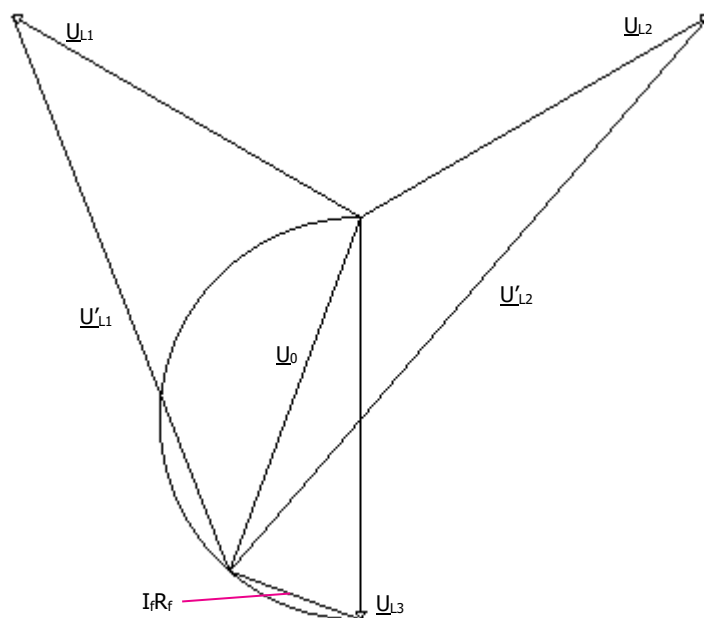
	I''_k / A	I'_k / A	I_k / A
Säyneinen vedenottamo	1274	1205	1093
Sarvisalo Tupakkalahti	846	816	763

Tupakkalahdessa normaalissa verkkokäytössä kolmivaiheinen oikosulkuvirta on 1630 A ja vedenottamalla 670 A. Varavoimakäytössä olevat oikosulkuvirrat eivät siis vastaa verkkosyötössä tulevia oikosukuvirtoja. Tämä johtuu osaltaan oikosulkuvirrasta, jota varavoimakone kykenee tuottamaan, mutta myös varavoimakoneen sijoituspaikasta. Esimerkiksi Tupakkalahti on varavoimakäytössä huonoin piste oikosulkuvirtoja ajatellen, mutta normaalissa verkkosyötössä sieltä löytyisi huomattavasti parempi oikosulkuvirta verrattaessa saaren loppupäässä sijaitsevaan Ontreinniemeen, josta löytyisi huonoin oikosulkuvirta. Vedenottamalla oikosulkuvirta on toisaalta varavoimakäytössä parempi kuin normaalissa verkkokäytössä.

5.1.3 Maasulkusuojaus

Maasta erotetussa verkossa maasulussa vikavirta kulkeutuu vikapistestä maahan, josta se kulkeutuu johtimien kapasitanssien ja impedanssien kautta päämuuntajalle jatkaen edelleen vian aiheuttaneen johtimen impedanssia pitkin takaisin vikapaikkaan. Sammutetussa verkossa johtimien maakapasitanssien rinnalle tulee muuntajan tähtipisteeseen kytketyn sammutuskuristimen induktanssi, joka pienentää vikapistestä kulkevaa virtaa. Usein vikapistessä vaikuttaa myös vikaresistanssi R_f . Laskennassa muuntajan ja johtimien impedansseilla ei ole merkitystä niiden ollessa hyvin pieniä verrattuna johtimien maakapasitansseihin. (Lakervi & Partanen, 2008)

Vikaantuneen vaiheen jännitteen poikkeama riippuu vikaresistanssista R_f . Vikaresistanssin ollessa nolla putoaa vikaantuneen vaiheen jännite nolnaan, terveiden vaiheiden jännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi ja muuntajan tähtipistejännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi. Vikaresistanssin kasvaessa tähtipisteen ja terveiden vaiheiden jännitteet alenevat ja vikaantuneen vaiheen jännite nousee. Suuret vikaresistanssit vaikeuttavat maavuodon havaitsemista. Kuvassa 13 on esitetty jännitteet maasulun aikana. (Lakervi & Partanen, 2008)



KUVA 13. Jännitteet maasulussa (Lakervi & Partanen, 2008)

Vaikka maasulkutilanteessa keskijänniteverkon jännitteissä voi olla suurikin epäsymmetria, pysyvät pienjännitepuolen jännitteet kuitenkin normaaleina, jos jakelumuuntajan ensiöpuoli on kytketty kolmioon. Näin ollen verkkoa voisi periaatteessa käyttää maasulkutilanteessakin, mutta Suomen huonoissa maadoitusolosuhteissa kosketusjännitteet nousevat vikatilanteissa liian suuriksi, jolloin verkon käyttäminen ei ole mahdollista. Kosketusjännitteen suuruus riippuu vikavirrasta I_f ja maadoitusresistanssista R_m ja sen suurimmat arvot on määritelty standardissa SFS 6001. (Lakervi & Partanen, 2008)

Kaavalla 10 lasketaan maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa

$$I_f = \frac{3\omega C R_f}{1 + j3\omega C R_f} U_v \quad (10)$$

jossa I_f on maasulkuvirta, ω kulmataajuus, C yhden vaiheen maakapasitanssi, R_f vikaresistanssi ja U_v vaihejännite. Kaavalla 11 lasketaan maasulkuvirta sammutetussa verkossa

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{R + jR(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (11)$$

jossa R on sammutuskuristimen resistanssi ja L sammutuskuristimen induktanssi.

Maasulku voidaan todeta useilla eri menetelmillä, kuten summavirroista tai muuntajan nollapistejännitteestä. Summavirtamittaus vaatii kuitenkin vähintään kaksi lähtöä, jotta summavirtoja pystytään mittaamaan, sillä yhdellä lähdöllä virrat summautuvat nolllaksi. Varavoimakoneella verkkoa syötetään vain yhdestä lähdöstä, joten summavirtojen mittaaminen ei onnistu. Vaihtoehdoksi jää siis nollajännitteen mittaaminen. Pienissä verkoissa nollajännitteen mittaaminen voi olla kuitenkin ongelmallista johtuen maakapasitanssien erilaisuudesta, joka myös aiheuttaa epäsymmetriaa nollajännitteeseen. (Mörsky, 1993)

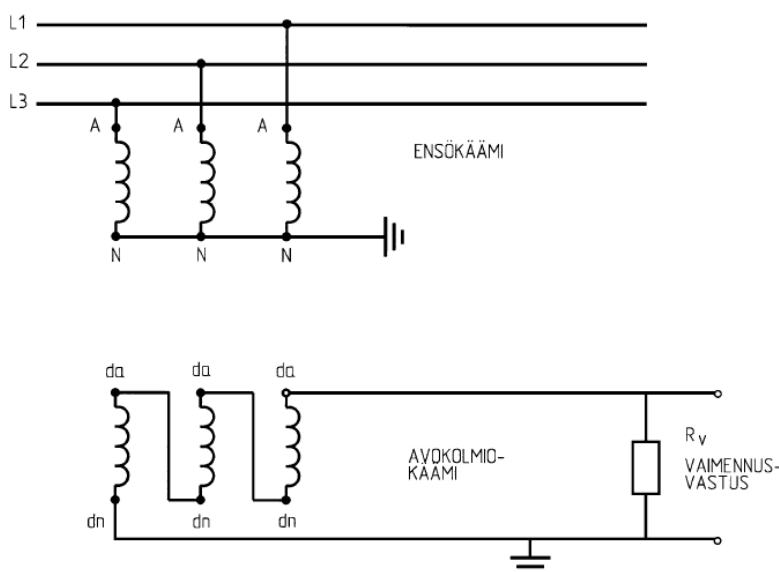
Kaavalla 12 lasketaan nollajännite maasta erotetussa verkossa

$$\underline{U}_0 = \frac{-1}{1 + j3\omega CR_f} \underline{U}_v \quad (12)$$

jossa U_0 on nollajännite. Nollajännite sammutetussa verkossa lasketaan kaavalla 13

$$\underline{U}_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega}L)} \underline{U}_v \quad (13)$$

Nollajännitteen mittaaminen voidaan toteuttaa muuntajan tähtipisteestä, jännitemuuntajien toisiosta avokolmiokytkennästä tai jännitesensoreilla ja laskennallisella summamittauksella. Avokolmiökäämistä käyttäessä voidaan joissain kytkentätilanteissa päätyä tilanteeseen, jossa jännitemuuntajan induktanssi ja verkon maakapasitanssi muodostavat resonanssipiirin, joka aiheuttaa kippivärähtelyä. Jännitesensoreja käyttämällä kippivärähtelyriski poistuu. Kuvassa 14 esitettyssä avokolmiokytkennässä oleva vaimennusvastus R_v vähentää myös kippivärähtelyn riskiä. (ABB, 2000-07)



KUVA 14. Avokolmiokytkentä vaimennusvastuksella (ABB, 2000-07)

5.1.4 Maasulkujännitteiden tarkastelu

Kaavoista 12 ja 13 voidaan todeta, että maasulussa nollajännitteeseen vaikuttavat kompensoimattomassa verkossa vikavastus ja verkon kapasitanssi, johon vaikuttaa verkon pituus. Lisäksi kompensoidussa verkossa nollajännitteeseen vaikuttaa kompensointireaktorin vastus ja induktanssi.

Säyneisen verkossa on vain ilmajohtoa. Ilmajohdon maakapasitanssi on pieni kaapeliverkkoon nähden ja verkko on myös hyvin suppea, jolloin nollajännitteet nousevat korkeiksi maasulun aikaina, kuten taulukosta 16 nähdään.

TAULUKKO 16. Säyneisen nollajännitteet eri vikaresistansseilla

R_f / Ω	U_0 / V
0	11547
100	11547
500	11544
1000	11536
5000	11288
10000	10603

Sarvisalossa verkko on suurimmaksi osaksi kaapeliverkkoa ja näin ollen siinä on huomattavasti suurempi maakapasitanssi. Verkko on myös kompensoitu, joka vaikuttaa osaltaan nollajännitteisiin.

Taulukossa 17 on esitetty Sarvisalon verkon nollajännitelaskennan tulokset kompensoinnin kanssa ja ilman sitä.

TAULUKKO 17. Sarvisalon nollajännitteet eri vikaresistansseilla ja kompensoinnilla

R_f / Ω	U_0 / V kompensointi	U_0 / V maasta erotettu
1	11544	11548
100	4733	11397
500	1034	8955
1000	519	6044
5000	104	1408
10000	52	708

Kompensoinnin arvoina on käytetty resistanssille 63100 Ω ja induktanssille 7,5 H. Arvot laskettu liitteessä 2 olevista kompensointireaktorin teknisistä arvoista. Laskuissa oletetaan, että reaktori on asennossa 5, jolloin saadaan parhaimmat tulokset. Tällöin reaktorin loisteho on 178 kVar, virta on 1,67 A ja impedanssi on 7088 Ω . Liitteessä on myös kerrottu, että resistanssin suhde reaktanssiin on 1,25% eli $R/X=1,25\%$. Arvoista täytyy laskea induktanssin ja resistanssin arvot, joita nollajännitteiden laskennassa tarvitaan. Reaktanssiin voidaan olettaa vastaavan suoraan impedanssia. Tällöin kaavalla 14 voidaan laskea induktanssi

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (14)$$

jossa L on induktanssi ja X reaktanssi. Resistanssin arvo saadaan kaavalla 15 eli kertomalla reaktanssi suhdeluvulla

$$R = X * 0,0125 \quad (15)$$

jossa R on resistanssi. Tätä resistanssin arvoa ei kuitenkaan suoraan käytetä maasulkulaskennassa, koska laskumallissa vastus on liitetty tähtipisteen ja maan väliin. Tämän resistanssin arvo voidaan arvioida häviötehon kautta. Teho lasketaan kaavalla 16

$$P = 3RI^2 \quad (16)$$

jossa P on pätöteho ja I reaktorin virta. Tästä häviötehosta saamme laskentaan käytettävän resistanssin kaavalla 17

$$R = \frac{U_v^2}{P} \quad (17)$$

jossa U_v on vaihejännite.

Maasulkutilanteesta voidaan myös tarkastella maasulkuvirtoja, jotka eivät ole oleellisia mittauksien kannalta. Maasulkuvirrat aiheuttavat kuitenkin maadoitusjännitteen, joka määrää maasulkusuojauksen toiminta-ajan. Taulukoissa 18 ja 19 on esitetty Säyneisen ja Sarvisalon maasulkuvirrat eri vikaresistansseilla.

TAULUKKO 18. Säyneisen maasulkuvirrat

R_f / Ω	I_f / A
1	0,498
100	0,498
500	0,498
1000	0,497
5000	0,487
10000	0,457

TAULUKKO 19. Sarvisalon maasulkuvirrat

R_f / Ω	I_f / A kompensoitu	I_f / A maasta erotettu
1	13,8	18,8
100	13,7	18,6
500	11,7	14,6
1000	8,8	9,8
5000	2,3	2,3
10000	1,1	1,2

Maadoitusjännite määritetään kaavalla 18

$$U_m = I_f * R_m \quad (18)$$

jossa U_m on maadoitus jännite ja R_m maadoitusresistanssi. Maadoitusjännite ei saa ylittää kaavalla 19 määritettyä arvoa

$$U_m \leq k * U_{TP} \quad (19)$$

jossa k on kerroin ja U_{TP} kosketusjännite. Näille suureille on määritelty arvot SFS 6001 standardissa. Kertoimen k arvo on tavoitetasolla 2, mutta jos tavoitetasoa ei voida saavuttaa voidaan sille antaa arvoksi 4 tietyillä ehdoilla. Erikoistapauksessa kertoimelle voidaan antaa arvoksi 5, mutta tällöin koko muuntopiiriin tulee olla huonosti johtavalla alueella. (Lakervi & Partanen, 2008)

Taulukko 20. Sallittu kosketusjännite ja laukaisuaika (Lakervi & Partanen, 2008)

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

Taulukoissa 18, 19 ja 20 esitetyillä arvoilla sekä kaavoilla 18 ja 19 voidaan määrittää eri maadoitusresistanssin arvoja, joilla saavutetaan tietty laukaisuaika. Jos lasketaan maadoitusresistanssi 1 sekunnin laukaisuajalla, kertoimen k arvolla 2 ja Sarvisalosta saadulla suurimmalla vikavirran arvolla, eli 18,8 A, maadoitusresistanssin arvoksi saadaan 11,7 Ω . Jos laukaisuaika lasketaan 0,3 s arvolla, saadaan maadoitusresistanssiksi 41,5 Ω . Kompensoinnin kanssa virta olisi 13,8 A, jolloin 1 s laukaisuajalle resistanssiksi saadaan 15,9 Ω ja 0,3 s laukaisuajalle 56,5 Ω . Säyneysessä 1 s laukaisuajalle riittäisi 440 Ω maadoitusresistanssi.

5.2 Suojausten toteutus

Suojausten toteuttamiseen on kaksi pääasiallista vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa erottamiseen käytetään varavoimakoneen katkaisijaa, joka sijaitsee pienjännitepuolella. Maasulun havaitsemiseksi on muuntajan keskijännitepuolelle asennettava mittamuuntajat, joista nollajännitteen mittaustieto on vietävä erilliselle nollajännitereleelle, koska katkaisijaan sijoitettavalla Micrologic-releellä ei ole mahdollista tehdä nollajännitteeseen perustuvaa maasulkusuojausta. Rele voidaan sijoittaa joko muuntajan koppiin tai sitten varavoimakoneen sähkökeskukseen. Sijoitusratkaisusta riippumatta täytyy muuntajalta viedä tietoa varavoimakoneen sähkökeskukseen, joko releen antama laukaisutieto tai mittamuuntajista saatava nollajännitteen mittaustieto. 529 kVA koneen kohdalla tämä tarkoittaa sitä, että muuntajan ja varavoimakoneen välille on rakennettava liitinkeskus, koska varavoimakone ja muuntaja eivät kulje samalla alustalla. 1000 kVA koneen kohdalla voidaan tehdä kiinteät johdotukset laitteiden ollessa samalla alustalla.

Toinen vaihtoehto suojausten toteuttamiseen on lisätä muuntajapakettiin keskijännitekatkaisija, jonka kanssa on rele, joka pystyy hoitamaan niin oikosulku- kuin maasulkusuojaustenkin. Tämä ratkaisu vaatisi muuntamolta tilaa uusille laitteille ja enemmän muutostöitä kuin toinen vaihtoehto. Toisaalta muuntajalta ei tarvitsisi viedä tietoa varavoimakoneen katkaisijalle vaan keskijännitepuolen

katkaisija toimisi itsenäisesti ja generaattorin katkaisija suojaisi ennen muuntajaa syntyviltä vikatilanteilta. Tämä ratkaisu voisi olla varteenotettava vaihtoehto uutta muuntajalavaa rakennettaessa.

Nykyisiin laitteistoihin paras ratkaisu on ensimmäinen vaihtoehto, jolloin muuntajien keskijännitepuolelle sijoitetaan mittamuuntajat ja nollajännitettä mittaavat releet sijoitettaisiin varavoimakoneiden sähkökeskuksiin. Tällöin muuntajapakettiin ei tule ylimääräisiä osia. Ratkaisu on laitteistohankinnoiltaan edullisin ja muutostöiden määrä on myös pienempi kuin toisessa vaihtoehdossa.

Laskettujen oikosulkuvirtojen ja maasulkujännitteiden perusteella voidaan releille miettiä asettelut. Oikosulkusuojaus on nykyisellään toimiva, eikä näiden releiden asetteluihin ole syytä puuttua. Maasulkusuojauksessa on taas paljon asioita, jotka vaikuttavat suojaukseen. Työssä käsiteltävät verkot ovat johdinrakenteeltaan hyvin erilaiset toisen ollessa kokonaan ilmajohtoa ja toisen pääasiassa kaapeliverkkoa. Tällä on vaikutusta maasulkusuojaukseen, koska kompensointi muuttaa maasulkutilanteen suureita.

Nollajännitereleen asettelussa on eroa riippuen siitä, onko verkko kompensoitu vai ei. Kompensoidussa verkossa nollajännitteet nousevat myös terveessä tilassa korkeammalle kuin kompensoimattomassa. Kaapeliverkossa on kuitenkin huomattavasti vähemmän epäsymmetriaa, joka tasoittaa terveen tilan eroa tässä työssä käsitellyissä verkoissa. Kompensoimattomassa verkossa releen havahtuminen voi olla 1-2% vaihejännitteestä, kun taas kompensoidussa verkossa se tulisi olla suurempi. (ABB, 2000-07) (Mörsky, 1993)

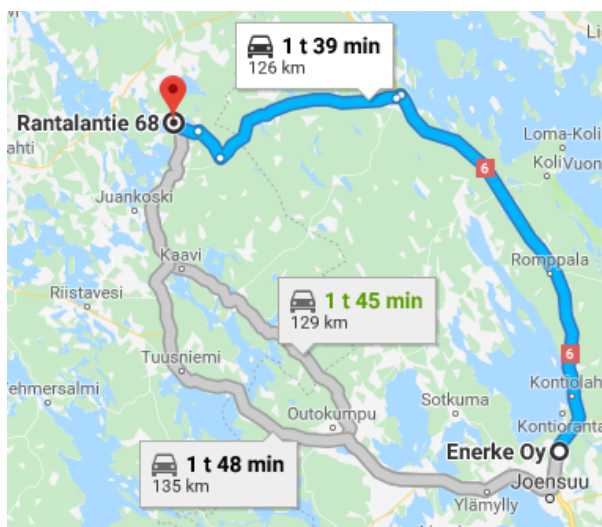
Asettelua tehdessä täytyy miettiä, kuinka suuria vikaresistansseja releellä pitää pystyä havaitsemaan. Säyneisellä ongelmaa ei ole, koska jännitteet nousevat isoillakin vikaresistansseilla korkeiksi, joten asettelu ei ole niin tarkka. Sarvisalossa 5000 Ω vikaresistanssilla saatu 104 V nollajännite on kuitenkin vain hieman alle 1 % vaihejännitteestä. Tämän havaitseminen on mahdollista, jos terveentilan nollajännite on matala. Kompensointi voi kuitenkin aiheuttaa tilanteen, jossa terveentilan jännite on korkea, jolloin varavoimakäytössä on syytä miettiä kompensoinnin poiskytkemistä. Tällöin myös Sarvisalon nollajännitteet nousisivat huomattavasti vikatilanteen aikana, joka helpottaisi releasettelujen tekemistä.

Releen laukaisuajan asettelu on täysin riippuvainen maadoitusresistanssista. Säyneisellä päästään helposti 1 s toiminta-aikaan, mutta Sarvisalossa olevat vikavirrat vaativat huomattavasti paremmat maadoitukset. Jos maadoitukset ovat hyvät, voidaan asetteluksi laittaa 1 s. 0,5 s laukaisuajalla saadaan myös toimiva suojaus ja siihen päästään heikommalla maadoituksella.

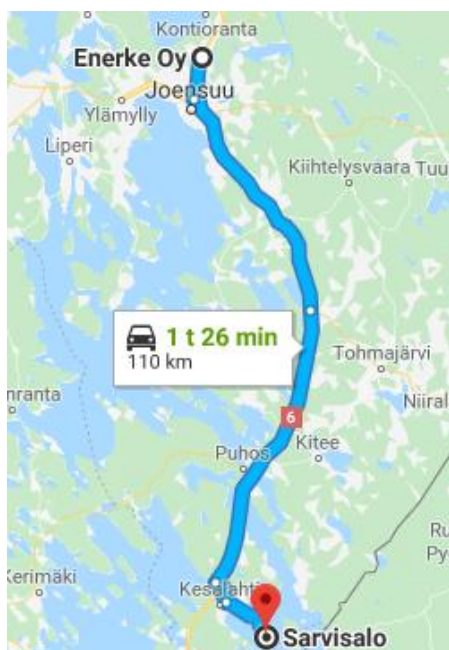
6 TOIMINTAMALLI

Varavoiman käyttöönotossa on useita eri vaiheita ennen kuin varavoimaa voidaan syöttää verkkoon. Tapahtumaketju saa alkunsa verkon vikaantumisesta jossakin. Kun vikatieto saadaan, alkaa vian paikantaminen sekä vian laajuuden selvittäminen. Selvityksen perusteella täytyy tehdä päätös varavoiman käytöstä: saadaanko vika korjattua tarpeeksi nopeasti vai onko se liian laajaa, jolloin varavoima täytyy ottaa käyttöön. Päätös tulisi tehdä mahdollisimman nopeasti, jotta sähkötön aika saataisiin minimoitua.

Päätöksen teon jälkeen alkaa varavoimalaitteiston siirtäminen paikalle. Molemmat käyttökohteet sijaitsevat pitkän matkan päässä laitteiden varastointi paikasta. Jos oletetaan että asentaja olisi päivystämässä varikolla, niin varavoimakoneen siirtäminen Säyneiseen vie liki kaksi tuntia, Sarvisaloon hieman vähemmän.



KUVA 15. Reittivaihtoehdot ja ajoajat Säyneiseen (Google, 2019)



KUVA 16. Reitti ja ajoaika Sarvisaloon (Google, 2019)

Ennen kuin varavoima syötetään verkkoon, täytyy verkko muuttua saarekkeeksi tekemällä kappa-
leessa 4 esitetyt toimenpiteet joillekin erottimille. Koska osa erottimista on käsikäyttöisiä, täytyy
asentajan käydä niiden luona tekemässä kytkentä muutokset.

Kun laitteisto on saatu kohteeseen, täytyy se sijoittaa paikkaan, josta se kytketään kiinnii jakeluverk-
koon. Kuvat 9 ja 10 esittävät tarkemmat sijainnit varavoimakoneiden sijoituspaikoille. Sijoittamisen
ja verkon saarekkeeksi erottamisen jälkeen varavoimakone kytketään verkkoon ja kone käynniste-
tään. Mahdolliset muutokset releasetteluihin täytyy tehdä, jonka jälkeen verkkoon saadaan jälleen
sähköä. Aiemmin esitettyjen laskentatulosten pohjalta voidaan releille kuitenkin määritellä kiinteät
asettelut, jotka toimivat näissä verkoissa. Koneen pitkäaikainen käyttö ilman keskeytyksiä vaatii
myös toimivan huollon, muun muassa polttoaineen riittämiseksi.

7 YHTEENVETO

Tämän työn lähtökohtana oli suunnitella suojaukset varavoimakoneille maasulku tilanteeseen. Työssä tarkasteltiin olemassa olevia suojauksia ja laitteistoja, sekä sitä miten niitä täytyisi kehittää, jotta varavoimakoneiden käyttäminen olisi turvallista ja suojaukset olisivat vaaditulla tasolla. Tavoitteena työllä oli saada toimiva suojausratkaisu.

Työssä käydään ensin läpi käsiteltävät varavoimakoneet, sekä verkot, joissa varavoimaa voitaisiin käyttää. Teoriaosassa kerrotaan oiko- ja maasulkutilanteista sekä niihin liittyvästä laskennasta. Työhön valituista keskijänniteverkoista lasketaan oikosulkuvirrat ja maasulkutilanteessa syntyvät nollajännitteet ja vikavirrat. Näiden pohjalta mietitään suojaksien toimivuutta sekä kuinka niitä tulisi kehittää. Lopuksi työssä käydään läpi eri vaiheita, joita varavoiman toimittamisessa on vikatilanteen sattuessa.

Työn tuloksena saatiin ehdotus, jolla varavoimakoneiden suojausta voidaan parantaa. Oikosulkusuojauksen ollessa asianmukainen oli maasulkusuojaus ainut, joka täytyy varavoimakoneissa laittaa vastamaan vaatimuksia. Työn aikana selvisi, että toimiva ratkaisu suojaukselle olisi nollajännitettä mittaava rele. Suojausten asetteluille on myös annettu ehdotukset työssä.

LÄHDELUETTELO

- ABB. (2000-07). Luku 10: Mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot. Teoksessa *TTT-käsikirja*.
- ABB. (2000-07). Luku 11: Tehomuuntajat. Teoksessa *TTT-käsikirja*.
- ABB. (2000-07). Luku 8: Maasulkusuojaus. Teoksessa *TTT-käsikirja*.
- Elovaara, J.;& Haarla, L. (2011). *Sähköverkot I*. Helsinki: Otatieto.
- Elovaara, J.;& Haarla, L. (2011). *Sähköverkot II*. Helsinki: Otatieto.
- Enerke oy. (ei pvm). *Tietoa meistä: Enerke Oy*. Haettu 7. 2 2019 osoitteesta Enerke Oy:n sivusto:
<http://www.esitteemme.fi/enerke/WebView/>
- Google. (2019). *Google kartat*. Haettu 13. 3 2019 osoitteesta <https://www.google.com/maps/>
- Hakala, P.;Hakanen, P.;Kortelainen, T.;Kousa, P.;Laaksonen, M.;Nurmi, M.;& Piippo, E. (2013). *ST-käsikirja 31*.
Espoo: Sähkötieto ry.
- Huotari, K.;& Partanen, J. (1998). *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen*. Lappeenranta.
- Lakervi, E.;& Partanen, J. (2008). *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto.
- Mörsky, J. (1993). *Relesuojaustekniikka*. Hämeenlinna: Otatieto.
- Schneider Electric. (4 2011). Micrologic käyttöohje.
- Stamford AVK. (2010). *Technical Data Sheets*. Haettu 13. 3 2019 osoitteesta Stamford AVK: https://stamford-avk.com/sites/default/files/literature/all/HCI5E-311-TD-EN_Rev_A.pdf
- Stamford AVK. (2010). *Technical Data Sheets*. Haettu 25. 5 2019 osoitteesta Stamford AVK: https://stamford-avk.com/sites/default/files/literature/all/HCI6J-311-312-TD-EN_Rev_A.pdf
- Sähkömarkkinalaki. (9. 8 2013). *Finlex*. Haettu 11. 12 2018 osoitteesta
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp446904480>

LIITE 1: 529 KVA GENERAATTORIN TEKNISET TIEDOT

**HCI534E/544E****WINDING 311**

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.							
A.V.R.	MX321	MX341						
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 %	± 1.0 %	With 4% ENGINE GOVERNING					
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)							
CONTROL SYSTEM	SELF EXCITED							
A.V.R.	SX440	SX421						
VOLTAGE REGULATION	± 1.0 %	± 0.5 %	With 4% ENGINE GOVERNING					
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	SERIES 4 CONTROL DOES NOT SUSTAIN A SHORT CIRCUIT CURRENT							
INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	12							
STATOR WDG. RESISTANCE	0.0043 Ohms PER PHASE AT 22°C SERIES STAR CONNECTED							
ROTOR WDG. RESISTANCE	1.96 Ohms at 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min							
BEARING DRIVE END	BALL. 6220 (ISO)							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6314 (ISO)							
	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	1543 kg				1535 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	722 kg				722 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	617 kg				588 kg			
WR ² INERTIA	8.9828 kgm ²				8.7049 kgm ²			
SHIPPING WEIGHTS in a crate	1635 kg				1625 kg			
PACKING CRATE SIZE	166 x 87 x 124(cm)				166 x 87 x 124(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	1.035 m ³ /sec 2202 cfm				1.312 m ³ /sec 2780 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127	240/120	254/127	266/133	277/138
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	600	600	600	600	681	713	731	750
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	3.14	2.83	2.63	2.34	3.53	3.30	3.10	2.92
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.17	0.15	0.14	0.12	0.17	0.16	0.15	0.14
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.12	0.11	0.10	0.09	0.12	0.11	0.11	0.10
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	2.45	2.21	2.05	1.82	2.82	2.64	2.48	2.33
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.26	0.24	0.22	0.20	0.34	0.32	0.30	0.28
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.18	0.16	0.15	0.13	0.23	0.22	0.20	0.19
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.08	0.08	0.07	0.06	0.10	0.09	0.09	0.08
REACTANCES ARE SATURATED				VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED				
T _d TRANSIENT TIME CONST.	0.08s							
T' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.012s							
T _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	2.5s							
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.019s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d							

(Stamford AVK, 2010)

LIITE 2: 1000 KVA GENERAATTORI TEKNISET TIEDOT

HCI634J**STAMFORD****WINDING 311 and 312**

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.		
A.V.R.	MX321		
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 %	With 4% ENGINE GOVERNING	
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)		

INSULATION SYSTEM	CLASS H		
PROTECTION	IP23		
RATED POWER FACTOR	0.8		
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP		
WINDING PITCH	TWO THIRDS		
WINDING LEADS	6 (Wdg 312) or 12 (Wdg 311)		
STATOR WDG. RESISTANCE	0.002 Ohms PER PHASE AT 22°C STAR CONNECTED		
ROTOR WDG. RESISTANCE	2.09 Ohms at 22°C		
EXCITER STATOR RESISTANCE	17 Ohms at 22°C		
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.079 Ohms PER PHASE AT 22°C		
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others		
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%		
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min		
BEARING DRIVE END	BALL. 6224 (ISO)		
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6317 (ISO)		

	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	2279 kg				2300 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	1120 kg				1120 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	962 kg				916 kg			
WR ² INERTIA	22.9287 kgm ²				22.3814 kgm ²			
SHIPPING WEIGHTS in a crate	2328kg				2329kg			
PACKING CRATE SIZE	183 x 92 x 140(cm)				183 x 92 x 140(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	1.614 m ³ /sec 3420 cfm				1.961 m ³ /sec 4156 cfm			
VOLTAGE STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
VOLTAGE PARALLEL STAR (*)	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138
VOLTAGE DELTA	220	230	240	254	240	254	266	277
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	1000	1030	1030	1000	1150	1200	1250	1300
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	3.02	2.81	2.61	2.25	3.49	3.25	3.10	2.96
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.24	0.23	0.21	0.18	0.28	0.26	0.25	0.24
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.17	0.15	0.14	0.12	0.19	0.18	0.17	0.16
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	1.78	1.66	1.54	1.33	2.05	1.91	1.82	1.74
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.21	0.20	0.19	0.16	0.25	0.23	0.22	0.21
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.09	0.08	0.07	0.07	0.10	0.10	0.09	0.09
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.21	0.20	0.19	0.16	0.25	0.23	0.22	0.21
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03

REACTANCES ARE SATURATED

VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED

T' _d TRANSIENT TIME CONST.	0.185
T'' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.025
T' _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	3.03
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.046
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d

LIITE 3: SHUNT REAKTORIN TEKNISET TIEDOT

TEKNINEN ERITTELY SHR-8 20,5 kV**5 – 15 A**

1	Valmistaja	KKM PRODUCTION d.o.o, Serbia				
2	Loisteho [kVAr]	178				
3	Nimellisjännite [kV]	24				
4	Jännite [kV]	20,5				
5	Kytöntäryhmä	YN				
		Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5
6	Maasulkuvirta I _c [A]	15	12,5	10	7,5	5
7	Loisteho [kVAr]	178	147	118	89	59
8	Impedanssi [W]	2367	2852	3555	4735	7088
9	Loisvirta per vaihe [A]	5	4,15	3,33	2,5	1,67
10	Tyhjäkäyntihäviöt P _o [W]	220				
11	Kuormitushäviöt P _k [W]	2216				
12	R/X [%]	<1.25(kaikilla virta-arvoilla)				
13	Mitat					
	pituus [mm]	883				
	leveys [mm]	903				
	korkeus [mm]	1299				
14	Öljyn massa [kg]	226				
15	Kokonaismassa [kg]	1210				
16	Asennuskorkeus [masl]	1000				
17	Äänitaso normaali käyttö [dbA]	62				
18	Äänitaso maasulku [dbA]	64				
19	Jäähdytys	ONAN				
20	Eristystaso	LI125AC50				
21	Thermal class of insulation	A				
22	Läpiviennit	Posliinieristimet				
23	Snro	57 090 00				