



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Eero Kokko

MAASULUN AIKAISTEN VAARAJÄNNITTEI-
DEN SIMULOINTIMALLIN KEHITTÄMINEN
JA KÄYTTÖ

Tekniikka
2023

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Eero Kokko
Opinnäytetyön nimi	Maasulun aikaisten vaarajännitteiden simulointimallin kehittäminen ja käyttö
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Mikko Västi

Opinnäytetyön aiheena on luoda PSCAD-simulaatiomalli olemassa olevalle 20 kV kompensoidulle jakeluverkolle. Mallilla tutkitaan maasulkujen aikaisia vaarajännitteitä erilaisissa maasulkutilanteissa ja tuloksia verrataan oikean verkon mittaus-
tuloksiin.

Simulaatiomalli perustuu Carunalta saatuun verkkodataan ja verkon komponenttien sähköisiin arvoihin. Työssä tutustutaan maasulkuvikoihin ja niiden aikaisten vaarajännitteiden teoriaan ja kaapelien mallinnukseen PI-sijaiskytkennällä. Lisäksi tutkitaan taustaverkon johtolähtöjen mallinnusta ekvivalenttikomponenteilla.

Simulaation tulokset saatiin vastaamaan verkon mittauksien tuloksia ja taustaverkon mallinnus ekvivalenttisilla malleilla toimi hyvin. Tuloksista nähdään, että maasulkuvian voi periaatteessa paikantaa maadoitusjänniteprofiilin avulla vikaresistanssista riippumatta. Simulaatiomallin avulla pystyttiin määrittämään muuntamokohtaiset F-kertoimet (maadoitus- ja kosketusjännitteen välinen suhteellisuus kerroin) muuntamoille, joista oli mittaustulokset käytettävissä. Simulointitulosten mukaan F-kertoimet vaihtelivat paljonkin muuntamoiden välillä, joka osoittaa kosketusjännitteen estimoinnin käytännön vaikeuden muuntamoilla.

ABSTRACT

Author	Eero Kokko
Title	Development and Use of a Simulation Model for Hazardous Voltages during Earth Faults
Year	2023
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Mikko Västi

The subject of this thesis was to create a PSCAD simulation model for an existing 20 kV compensated distribution network. The model was used to study hazard voltages during earth faults in varying earth fault situations and the results of the simulations were compared to the measurements of the real network.

The simulation model is based on the network data provided by Caruna and the technical specification of the components. This thesis introduces the theory of earth faults and the hazard voltages created by them and the modeling of cables using the PI equivalent. Additionally, the modelling of the background networks using equivalent components is investigated.

The simulation results matched well with the measurements of the network and the modelling of the background network using equivalent models worked well. The results show that it is technically possible to locate an earth fault by using an earth fault profile regardless of the fault resistance. Using the simulation model, it was possible to determine the substation specific F-factors (coefficient between earth voltage and touch voltage) for the stations that had measurements available. The simulation results showed that the F-factors varied greatly between the substations, which demonstrates the practical difficulty of estimating touch voltages at the substations.

Keywords Simulation, distribution network, and hazardous voltages

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
2	MAASULKUJEN TEORIA.....	10
	2.1 Maasulut	10
	2.2 Vaarajännitteet	11
	2.3 Verkon maadoitus.....	13
3	VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTIMALLI	16
	3.1 Kaapelit	16
	3.2 Taustaverkkoa kuvaava ekvivalenttilähtökomentti	17
	3.3 Maasulkuvirran kompensointi	20
	3.4 Jakelumuuntamot	22
	3.5 Mittaukset.....	23
4	VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTIMALLIN RAKENNUS.....	25
	4.1 Sähköasema, syöttäväpäämuuntaja ja keskitetty kompensointi	25
	4.2 Tutkittava lähtö (J06)	26
	4.3 Taustaverkko.....	26
	4.4 Verkon maadoitusrakenne	27
5	SIMULOINTIMALLIN VERIFIOINTI	29
	5.1 Oikosulkuvirta	29
	5.2 Maasulkuvirta	29
	5.3 Normaalin käytön arvot	30
	5.4 F-kertoimien määrittäminen.....	31
6	MAASULUN AIKAISTEN VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTITULOKSET.....	35
	6.1 Kompensoinnin muutosten vaikutusten simuloinnit	35
	6.2 Vikapaikan siirtymisen vaikutus.....	39

6.3	Maadoitusyhteyden katkaisun simulointi	41
6.4	Vikavastuksen muutoksen vaikutus.....	42
6.5	Maadoitusresistanssien suuruuden vaikutusten simuloinnit.....	44
7	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	49

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Maasulkuviat maasta erotetussa verkossa. /1/.....	11
Kuva 2. Esimerkki maan potentiaaliprofiilista ja jännitteistä, kun maadoituselektrodeissa kulkee virta. /2/	13
Kuva 3. Maasulkuvirta maasta erotetussa järjestelmässä. /2/	14
Kuva 4. Maasulkuvirta kompensoidussa järjestelmässä. /2/	15
Kuva 5. Kaapelimalli PI-sijaiskytkennällä.	17
Kuva 6. Ekvivalenttikomponentin sijaiskytkentä. /8/	18
Kuva 7. Esimerkki ekvivalenttilähdön maadoitusresistanssin laskentaa varten käytetystä sijaiskytkennästä.	19
Kuva 8. Taustalähdön mallintamisessa käytetty ekvivalenttikomponentti.....	20
Kuva 9. Kompensointilaitteen simulaatiomalli.	21
Kuva 10. Keskitetyn kompensointikelan simulointimalli.	22
Kuva 11. 50 kVA Jakelumuuntamon simulaatiomalli.	23
Kuva 12. Nollavirran jako resistiiviseen (I_d) ja reaktiiviseen (I_v) komponenttiin. .	24
Kuva 13. Lähtöjen J06 ja J07 rakenne.	26
Kuva 14. Maadoitusjännitteet taustaverkon maadoitusresistanssin funktiona. Maadoitusresistanssi 100 % tarkoittaa 8Ω	28
Kuva 15. Verkon kosketusjännitteiden [V] vertailu muuntamoiden sijainnin funktiona normaalikytkentätilassa, kun kerroin F on 2,5, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.	32
Kuva 16. Verkon kosketusjännitteiden [V] vertailu muuntamoiden sijainnin funktiona normaalikytkentätilassa, kun kerroin F on 3,35, vikavastus 500Ω , vika muuntamolla 27.	32
Kuva 17. Muuntamokohtaisesti optimoiduilla F-kertoimilla lasketut kosketusjännitteet verrattuna mitattuihin kosketusjännitteisiin muuntamoiden sijainnin funktiona, vikavastus 0Ω	34
Kuva 18. Muuntamokohtaisesti optimoiduilla F-kertoimilla lasketut kosketusjännitteet verrattuna mitattuihin kosketusjännitteisiin muuntamoiden sijainnin funktiona, vikavastus 500Ω	34

Kuva 19. Simuloidut maadoitusjännitteet verkon normaalissa kompensointitilanteessa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω	36
Kuva 20. Simuloidut maadoitusjännitteet maastaerotetussa verkossa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω	36
Kuva 21. Simuloidut maadoitusjännitteet hajautetusti kompensoidussa verkossa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω	37
Kuva 22. Simuloidut maadoitusjännitteet keskitetysti kompensoidussa verkossa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω	37
Kuva 23. Simuloidut maadoitusjännitteiden [V] maksimit muuntamoiden sijainnin funktiona eri kompensointitilanteissa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω	38
Kuva 24. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 20.	39
Kuva 25. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 59.	40
Kuva 26. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 51.	40
Kuva 27. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika sähköasemalla.	41
Kuva 28. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.	41
Kuva 29. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, kun maadoitusyhteys J06 ja J07 välillä on poikki, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.	42
Kuva 30. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 20.	43
Kuva 31. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 500Ω , vika muuntamolla 20.	43
Kuva 32. Simuloidut maadoitusjännitteet verrattuna laskettuihin maadoitusjännitteisiin vikaresistanssin funktiona.	44
Kuva 33. Simuloidut maadoitusjännitteet [V] lähdöllä J06 resistanssin funktiona.	45

Kuva 34. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöllä J06 resistanssin funktiona ja käyräsovitukset.	46
Taulukko 1. Kaapeleiden taulukkoarvot.	17
Taulukko 2. Johtolähtöjen maasulkuvirrat ja maakaapeleiden pituudet.	19
Taulukko 3. Taustaverkon johtolähtöjen ekvivalenttikomponenttien arvot.	19
Taulukko 4. Kompensointilaitteen parametrit viidellä eri kompensointiarvolla.	20
Taulukko 5. Simuloinneissa käytetyt lähdön J06 muuntamoiden tehoprosentit.	23
Taulukko 6. Maasulkuvirran komponentit johtolähdöittäin, simulointitulosten vertailu mittaustuloksiin. I_E :llä tarkoitetaan tässä lähdön tuottamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa.	30
Taulukko 7. Muuntamokohtaiset F-kertoimet.	33

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda simulaatiomalli olemassa olevalle 20 kV kompensoidulle sähköverkolle ja tarkastella vaarajännitteitä erilaisissa maasulkutilanteissa. Mallilla pyritään ymmärtämään, miten verkon maadoitukset ja kytkentätilanne vaikuttavat vaarajännitteisiin verkon eri kohdissa maasulun aikana.

Työssä luodaan aluksi simulaatiomallin rakentamiseen tarvittavat komponentit. Komponenteista rakennetaan malli, joka vastaa olemassa olevaa verkkoa mahdollisimman tarkasti. Mallin vastaavuus oikeaan verkkoon testataan vertaamalla mallin antamia tuloksia olemassa olevan verkon oikeisiin mittatuloksiin oikosulku- ja maasulkukokeissa.

Mallinnettava verkko on kokonaisuudessaan suuri ts. se koostuu useista johtolähdöistä. Vain osa johtolähdöistä mallinnetaan tarkasti, joten osa työstä kohdistuu taustaverkon toteutukseen ekvivalenttisenä verkkona, jotta simulaatioajat pysyisivät kohtuullisina.

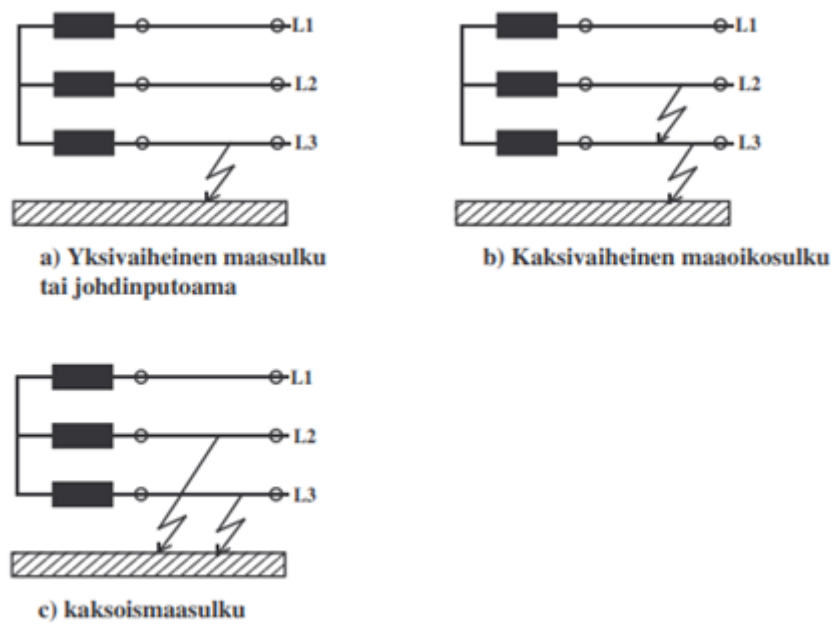
2 MAASULKUJEN TEORIA

2.1 Maasulut

Yksivaiheisessa maasulussa yksi vaihejohtimista on yhteydessä maahan. Maasulku voi syntyä esimerkiksi, kun puu kaatuu linjan päälle tai johtimen eriste rikkoontuu. Maasta erotetussa ja kompensoidussa verkossa maasulun virta riippuu vikayhteyden resistanssista ja verkon tuottamasta maasulkuvirrasta. Suorassa maasulussa, kun vikaresistanssi on nolla, maasulkuvirta on suurimmillaan, kun taas suuri ohmissa viassa vikavirta voi jäädä hyvin pieneksi. Kuvan 1 ensimmäisessä kohdassa on esitetty yksivaiheinen maasulku.

Maaosulku tapahtuu, kun kaksi tai useampi vaihe on kosketuksissa toisiinsa ja maahan samanaikaisesti. Maaosulussa vikavirta on oikosulkua vastaava. Kuvan 1 toisessa kohdassa on esitetty kaksivaiheinen maaosulku.

Kaksoismaasulussa kaksi eri vaihetta on kosketuksissa maahan samanaikaisesti. Yksivaiheinen maasulku voi kehittyä kaksoismaasuluksi, koska maasulussa terveiden vaiheiden jännite nousee, jolloin läpilyönnin mahdollisuus kasvaa. Kuvan 1 viimeisessä kohdassa on esitetty kaksoismaasulku.



Kuva 1. Maasulkuviat maastaerotetussa verkossa. /1/

2.2 Vaarajännitteet

Maasulun aikana maan potentiaali nousee vikapaikassa ja sen ympärillä. Maasulussa vikavirran kulkiessa vikapaikan maadoituksen läpi maahan, nousee kyseisen maadoituksen ja kaikkien siihen johtavassa yhteydessä olevien osien potentiaali ns. neutraalia maata vasten. Samoin käy myös maadoituksen ympärillä olevan maanpinnan potentiaalille. Maasulun aiheuttamia potentiaalieroja kutsutaan vaarajännitteiksi.

Maadoitusjännite U_E on maadoitusjärjestelmän ja referenssinmaan välinen jännite. Referenssimaaalla tarkoitetaan tarkasteltavasta järjestelmästä riittävän kaukana olevaa pistettä, jonka potentiaali on nolla. Maadoitusjännite voidaan laskea kaavasta:

$$U_E = I_E \cdot R_E \cdot r \quad (1)$$

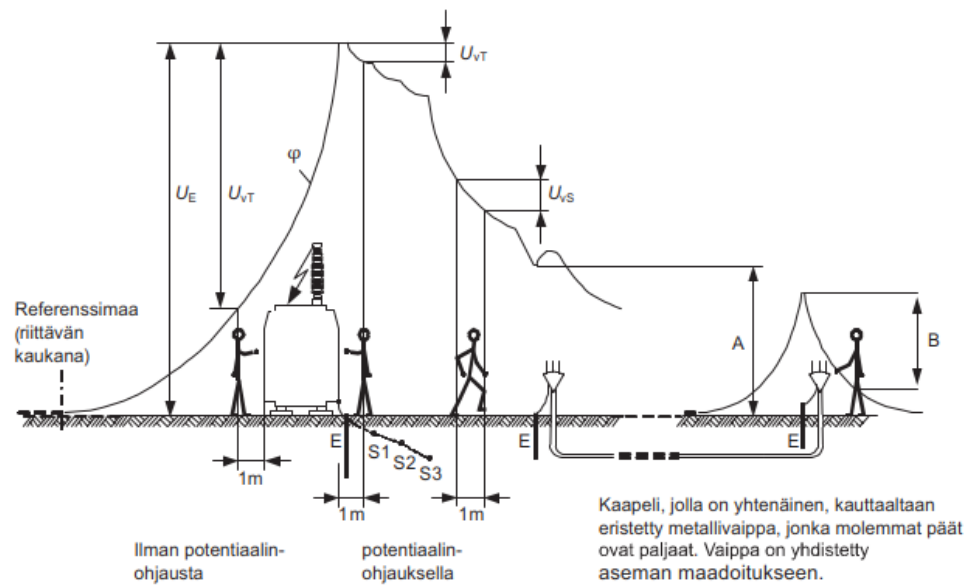
jossa I_E on maasulkuvirran suuruus [A], R_E on maadoitusvastus [Ω] ja r on ns. reduktiokerroin. Reduktiokerroin kuvaa kuinka suuri osa solmupisteeseen tulevasta vikavirrasta kulkee maahan. Reduktiokerroin on 1, jos koko maasulkuvirta palaa maan kautta. Jos taas osa maasulkuvirrasta palaa esim. maakaapeleiden kosketussuojien kautta, reduktiokertoimen arvo on nollan ja yhden välillä.

Maasulun aiheuttama maan potentiaali laskee vikapaikasta poispäin. Tällöin maanpinnan eri pisteiden välillä syntyy potentiaalieroja, joista syntyy askeljännite. Askeljännite U_S on määritelty olemaan kahden toisistaan metrin etäisyydellä olevan pisteen potentiaaliero.

Tehollinen kosketusjännite tai kosketusjännite U_T on samanaikaisesti kosketeltavissa olevien osien välinen jännite, kun niitä kosketetaan. Kosketusjännitteen arvoon vaikuttaa koskettavan henkilön impedanssi.

Prospektiivinen kosketusjännite U_{VT} on samanaikaisesti kosketeltavissa olevien osien välinen jännite, kun niitä ei kosketeta. Prospektiivinen kosketusjännite muuttuu teholliseksi, kun osia kosketetaan.

Maasulussa syntyviä vaarajännitteitä on havainnollistettu kuvassa 2.



Selite

E	Maadoituselektrodi	U_E	Maadoitusjännite
S1, S2, S3	Maadoituselektrodiin E yhdistetyt potentiaaliohjauselektrodit (esim. rengasmaadoituselektrodit)	U_{vS}	Suurin askeljännite
		U_{vT}	Suurin kosketusjännite
		A	Siirtyvästä potentiaalista johtuva suurin kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästään
		B	Siirtyvästä potentiaalista johtuva suurin kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu molemmista päistään
		φ	Maanpinnan potentiaali

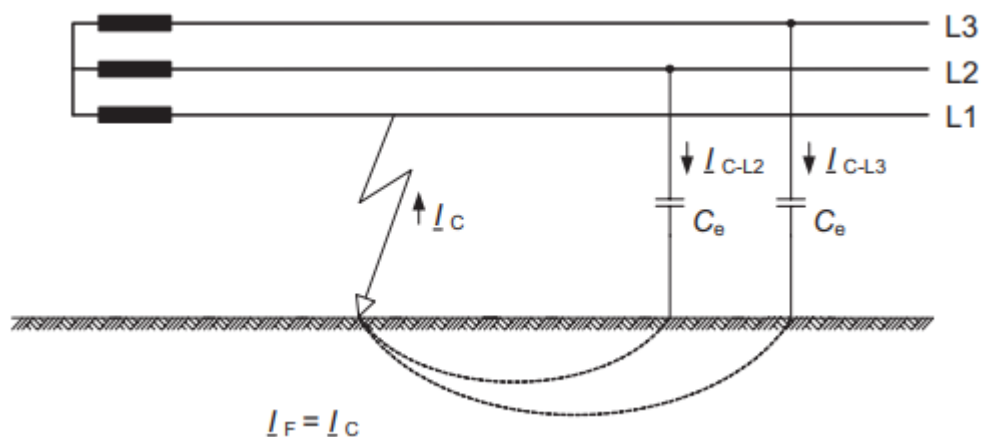
Kuva 2. Esimerkki maan potentiaaliprofiilista ja jännitteistä, kun maadoituselektrodeissa kulkee virta. /2/

2.3 Verkon maadoitus

”Standardin SFS 6001 (Suurjänniteasennukset) mukaan maadoitus voidaan käsitellä kokonaisuutena, johon kuuluvat kaikki maadoittamiseen liittyvät asiat ja toimenpiteet. Käytännössä maadoituksen tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiiriin osa maahan mahdollisimman tehokkaasti metallisen kappaleen eli maadoituselektrodin välityksellä. Maadoituksen toimivuuden mittana käytetään yleensä maadoituselektrodin maadoitusresistanssia R_m .” /3/

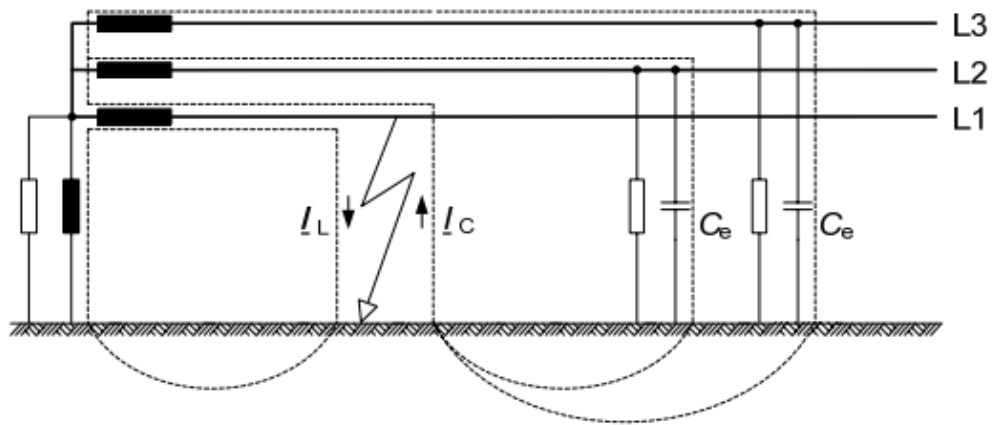
Maadoituksen tarkoituksena voi olla suojamaadoitus, jolloin sillä pyritään estämään ihmisille aiheutuvia vaaratilanteita yhdistämällä jännitteelle alttiit osat maahan. Maadoituksen tarkoituksena voi olla myös käyttömaadoitus, joka tarkoittaa virtapiirin jonkin pisteen yhdistämistä maahan suoraan tai pienen impedanssin kautta, jolla pyritään estämään jännitteen liiallinen nousu, josta voisi aiheutua vahinkoja. /3/

Maasta erotetussa verkossa verkon tähtipiste ei ole galvanisesti yhdistetty maan referenssipotentiaaliin. Tällöin maasulkutilanteessa maasulkuvirta kulkee vikapaikan ja johtimien maakapasitanssien kautta. Kuvassa 3 on yksinkertainen maasta erotetun verkon malli. Maasulkuvirran suuruus määräytyy maakapasitanssien ja vikaimpedanssin mukaan. Vian ollessa nolla ohminen, verkon nolajännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi.



Kuva 3. Maasulkuvirta maasta erotetussa järjestelmässä. /2/

Kompensoidussa verkossa muuntajan tähtipiste on maadoitettu induktanssin kautta, joka kompensoi johtimien tuottamaa kapasitanssia. Kuvassa 4 on yksinkertainen kompensoidun verkon malli. Kompensoinnin ansiosta maasulkuvirta jää pienemmäksi, jolloin maasulusta aiheuttava valokaari voi sammua itsestään. Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti, jolloin kompensointi on vain yhdessä paikassa tai hajautetusti, jolloin kompensointi on levitetty johtolähtöjen varsille.



$$|I_F| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2}$$

Kuva 4. Maasulkuvirta kompensoidussa järjestelmässä. /2/

3 VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTIMALLI

Työssä kehitetty vaarajännitteiden simulointimalli kuvaa todellista kompensoitua maakaapeloitua 20 kV jakeluverkkoa. Malli koostuu syöttävästä verkosta, 110/20 kV päämuuntajasta, jonka tähtipiste on kompensoitu, tutkittavasta lähdöstä (J06) sekä taustaverkosta. Taustaverkko koostuu kahdesta tarkasti mallinnetusta johtolähdöstä (J05 ja J07), muut taustaverkon johtolähdöistä on mallinnettu yksinkertaisemmin, ns. ekvivalenttimallin avulla. Seuraavaksi käydään läpi simulointimallin eri komponentteja.

Tässä luvussa esitetään, kuinka verkon mallinnukseen käytettävät komponentit on rakennettu ja miten niiden parametrit on laskettu.

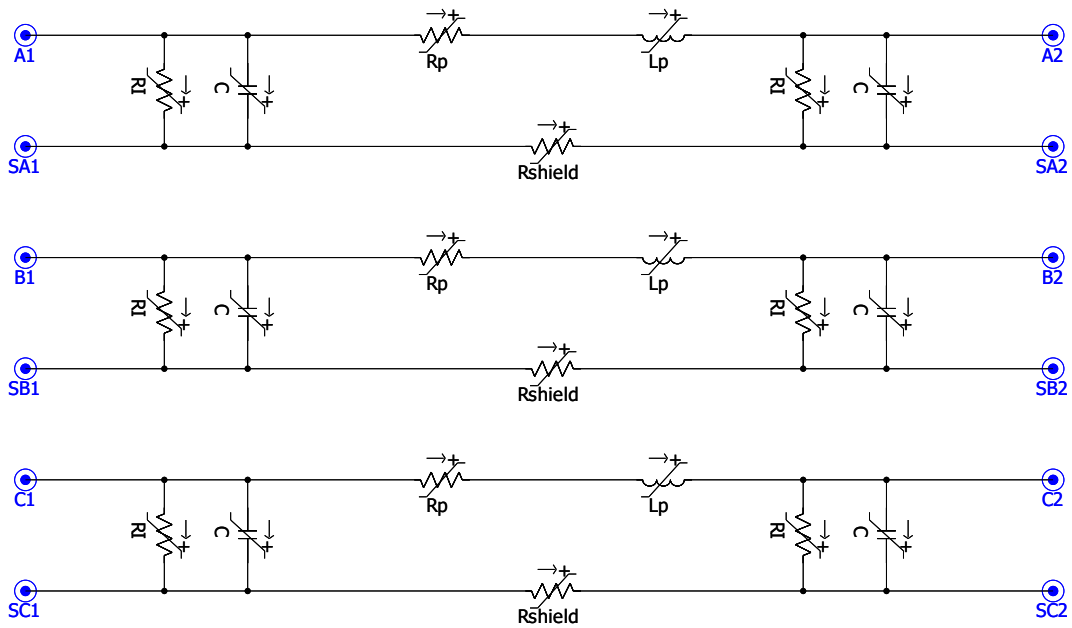
3.1 Kaapelit

Kaapelit mallinnetaan käyttäen PI-sijaiskytkentää, joka on esitetty kuvassa 5. Kaapelin pitkäjäisärsivot, eli resistanssi (R_p) ja induktanssi (L_p), asetetaan malliin suoraan. Kaapelin maakapasitanssi (C) ja vuotoresistanssi (R_l) jaetaan puoliksi mallin päihin. Kapasitanssi jaetaan kahdella ja resistanssi kerrotaan kahdella, jotta lopullinen impedanssi pysyy samana.

Vuotoresistanssi R_l on laskettu kaavan 2 mukaan. Kaavassa $\tan \delta$ on 0.001, joka on standardin /4/ maksimi häviökerroin KJ-kaapeleille.

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R_l}}{\frac{U}{X_C}} = \frac{X_C}{R_l} \rightarrow R_l = \frac{X_C}{\tan \delta} \quad (2)$$

Mallinnettavassa verkossa käytetään seitsemää eri kaapelityyppiä. Käytettävien kaapeleiden tiedot löytyvät taulukosta 1. APY150 kaapeli korvataan mallissa sitä vastaavalla AHXWP150 kaapelilla, koska siihen ei löytynyt tarpeeksi tietoja mallinnusta varten.



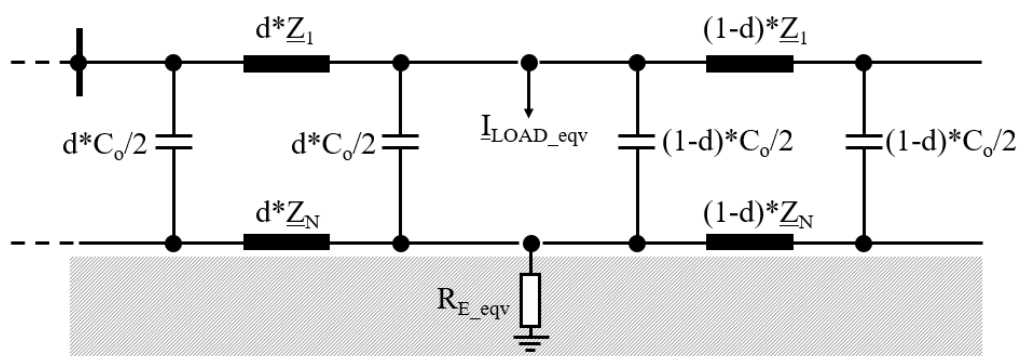
Kuva 5. Kaapelimalli PI-sijaiskytkennällä.

Taulukko 1. Kaapeleiden taulukkoarvot.

Kaapelityyppi	R (Ω/km)	L (mH/km)	C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	RI (M Ω/km)	Kosketussuoja (Ω/km)	Keskusköysi (Ω/km)
AHXWP150 /5/	0,250	0,370	0,260	12,243	1,700	-
AHXWP95 /5/	0,380	0,400	0,220	14,469	1,900	-
AHXWP50 /5/	0,760	0,440	0,170	18,724	2,100	-
AHXW150 /6/	0,250	0,370	0,260	12,243	1,700	0,524
AHXW95 /6/	0,380	0,400	0,220	14,469	1,900	0,524
AHXCM120 /7/	0,256	0,385	0,230	13,840	1,800	0,524

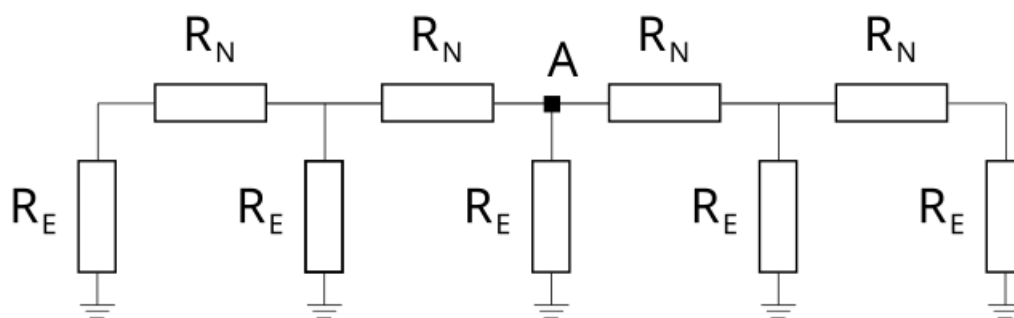
3.2 Taustaverkkoa kuvaava ekvivalenttilähtökomponentti

Taustaverkon lähdöt mallinnetaan ekvivalenttikomponenteilla. Ekvivalenttikomponentti yksinkertaistaa lähdön johto-osioksi, jossa kuorma ja maadoitukset on sijoitettu yhteen pisteeseen. Kuormien sijainti voidaan määrittää d muuttujan avulla. Kuvassa 6 on ekvivalenttikomponentin mallinnuksen pohjana käytetty sijaiskytkentä.



Kuva 6. Ekvivalenttikomponentin sijaiskytkentä. /8/

Lähdön tuottaman maasulkuvirran avulla voidaan määrittää kuinka pitkää kaapelia se vastaisi. Kaapelin arvoista voidaan laskea mallille resistanssit, induktanssit ja kapasitanssit. Lähdön teho voidaan ottaa suoraan ekvivalenttimallin tehoksi. Maadoitusresistanssi R_E saadaan laskemalla lähdön kaikkien muuntamoiden maadoitusten ja kaapeleiden suojavaippojen resistanssien muodostaman kytkennän kokonaisarvon. Kuvassa 7 on esimerkki maadoitusresistanssin määrittämisestä. Kuvan R_E arvot ovat jakelumuuntamoiden maadoitusresistanssit ja R_N arvot ovat koko lähdön kosketussuojien resistanssit jaettuna muuntamoiden välien määrällä. Ekvivalenttikomponentissa käytetty R_E arvo on kuvan 7 pisteen A ja maan välinen resistanssi, kun muuntamoita on yhdeksän kappaletta.



Kuva 7. Esimerkki ekvivalenttilähdön maadoitusresistanssin laskentaa varten käytetystä sijaiskytkennästä.

Taulukossa 2 on laskettu johtolähtöjen keskimääräinen maakapasitanssi lähdön tuottamasta maasulkuvirrasta ja kaapeloinnin pituudesta. Maakapasitanssilla valitaan kaapeli, jonka kapasitanssi on lähimpänä laskettua. Valitulle kaapelille lasketaan pituus, jolla se tuottaa johtolähdön maasulkuvirran.

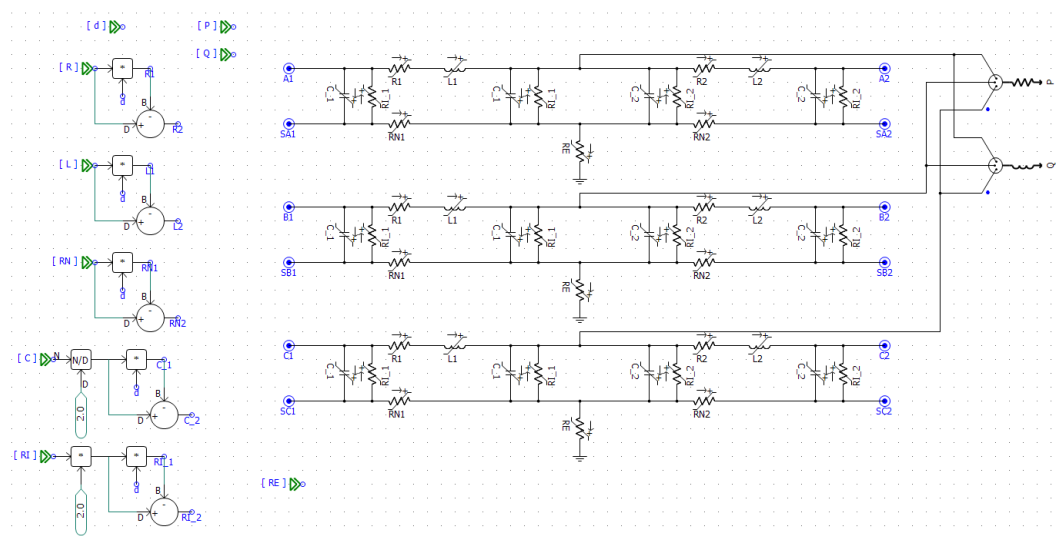
Taulukko 2. Johtolähtöjen maasulkuvirrat ja maakaapeleiden pituudet.

	IE (A/km)	Pituus (km)	C (μF/km)	Poikkipinta (mm ²)	Arv. Pituus (km)
J05	9,1	3,366	0,2366	95	3,6198
J06	117,1	48,048	0,2133	95	46,5805
J07	42,7	17,428	0,2144	95	16,9854
J08	41,5	15,418	0,2356	95	16,5080
J10	75	27,007	0,2430	150	25,2440
J11	32,2	11,118	0,2535	150	10,8381

Taulukkoon 3 on laskettu johtolähtöjen ekvivalenttikomponenttien parametrit valitun kaapelin ja lasketun pituuden avulla. R_N on laskettu kaapelin kosketussuojan arvosta.

Taulukko 3. Taustaverkon johtolähtöjen ekvivalenttikomponenttien arvot.

	R (Ω)	C (μF)	L (mH)	R _N (Ω)	R _E (Ω)	R _I (kΩ)
J08	6,27	3,63	6,60	28,06	1,60	464
J10	6,31	6,56	9,34	42,91	1,90	370
J11	2,71	2,82	4,01	18,42	1,39	1129,6



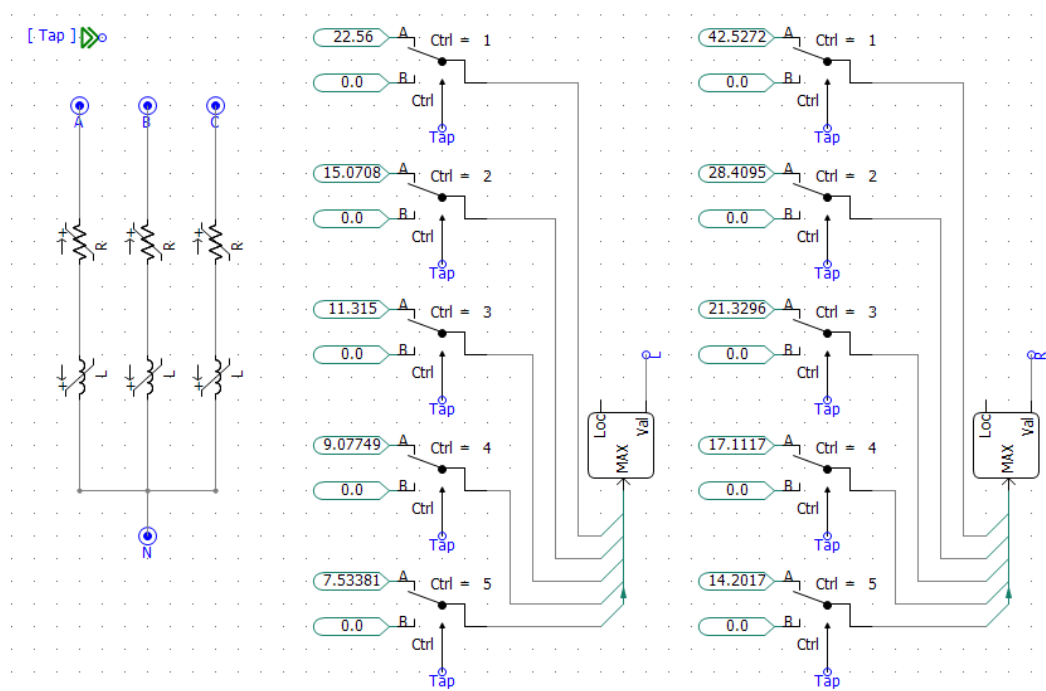
Kuva 8. Taustalähdön mallintamisessa käytetty ekvivalenttikomponentti.

3.3 Maasulkuvirran kompensointi

Verkon johtolähdöillä oleva hajautettu kompensointi on toteutettu kolmivaiheisilla keloilla ("shuntti reaktori"), joiden tähtipisteet ovat maadoitettu. Laitteella on viisi eri asentoa 2,5 A portain, joilla kompensoidaan 5–15 A maasulkuvirtaa. Sama laite kompensoi myös lähdön tuottamaa loistehoa. Kelan parametreit voidaan laskea datalehden /9/ annetuista impedanssiarvoista ja resistanssin ja reaktanssin suhteesta eri kelan asennoissa. Taulukossa 4 on kirjattu lasketut resistanssin ja reaktanssin arvot, kun niiden suhde on 0,6 %. Saadusta reaktanssista on laskettu edelleen induktanssin arvo, jota käytetään simulaatiomallissa. Kuvassa 9 tehty simulaatiomalli kompensointilaitteelle.

Taulukko 4. Kompensointilaitteen parametrit viidellä eri kompensointiarvolla.

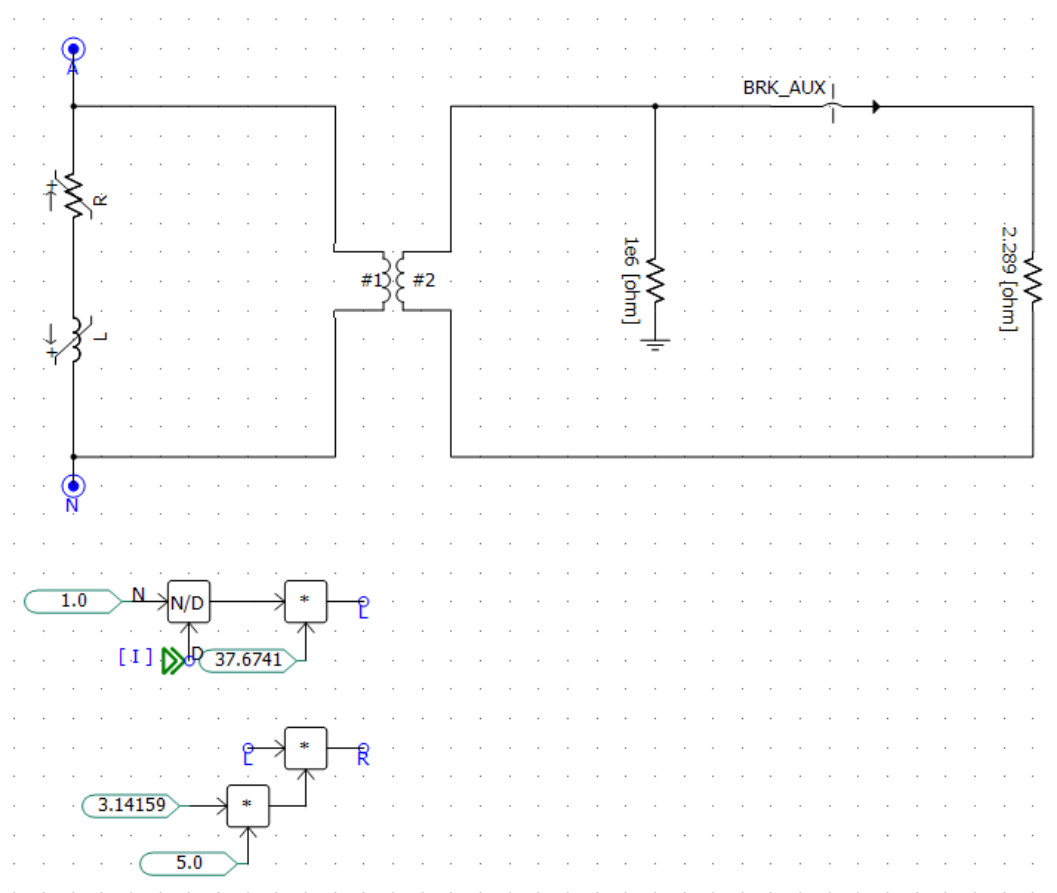
	1	2	3	4	5
Z [Ω]	7088,0	4735,0	3555,0	2852,0	2367,0
R [Ω]	42,5	28,4	21,3	17,1	14,2
X [Ω]	7087,9	4734,9	3554,9	2851,9	2367,0
L [Ω]	22,6	15,1	11,3	9,1	7,5



Kuva 9. Kompensointilaitteen simulaatiomalli.

Verkossa on myös kaksi keskitetyn kompensoinnin kela sähköasemalla, toinen kiinteällä arvolla, ja toinen säädettävällä. Kiinteä kela kompensoi maksimissaan 87 A ja säädettävä kompensoi 170 A maasulkuvirtaa. Säädettävässä kelassa on lisävastus, joka voidaan kytkeä lisäämään resistiivistä maasulkuvirtaa. Lisävastus tuottaa resistiivistä maasulkuvirtaa 8,6 A. Kompensointi on kytketty päämuuntajan tähtipisteen ja maan välille.

Kuvassa 10 on säädettävän kompensointilaitteen malli. Mallille annetaan kelan asetusarvo virtana, josta lasketaan tarvittava induktanssi ja resistanssi kelalle. Kelan rinnalle on kytketty lisävastus 500 V tasolle käyttäen muuntajaa. Kiinteä kompensointikela on muuten samanlainen, mutta siinä ei ole lisävastusta.



Kuva 10. Keskitetyn kompensointikelan simulointimalli.

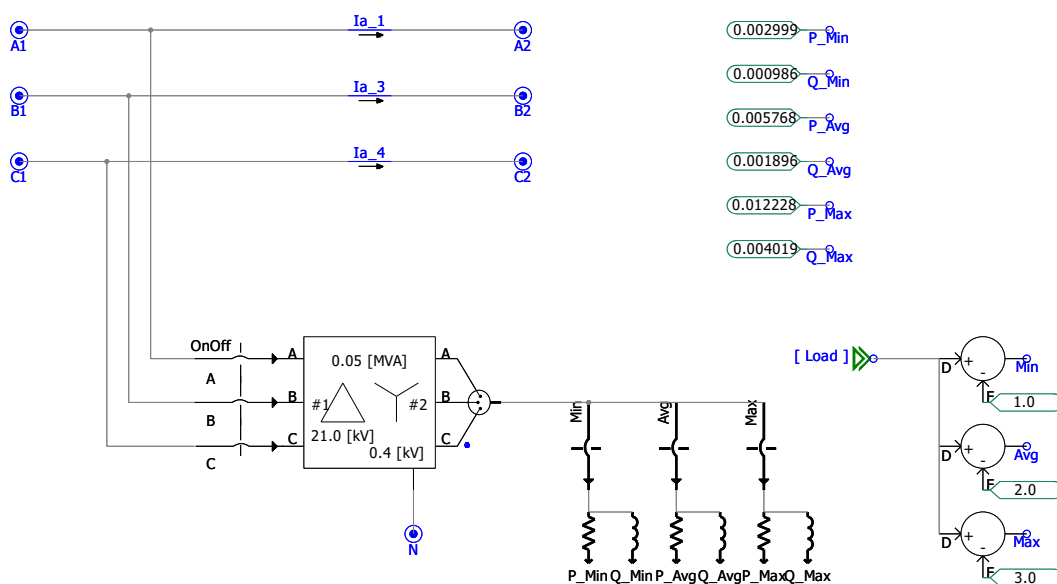
3.4 Jakelumuuntamot

Mallinnettavilla lähdöillä on kuutta eri tehoista jakelumuuntajaa: 50, 100, 200, 315, 500 ja 800 kVA. Yksinkertaisuuden vuoksi kulutuksen arvioidaan jakautuvan tasaisesti muuntamoille nimellistehon mukaan eli muuntamoiden kuormat mallinnetaan prosentuaalisena osana muuntajan nimellistehosta. Tehot mallinnetaan kolmessa eri tilanteessa, minimi, keskiarvo ja maksimi. J06 lähdölle on annettu virrat näissä tilanteista, joista voidaan laskea tehot. Lähdön kaikkien muuntajien nimellistehojen summa on 7310 kVA. Näitä arvoja käyttämällä on laskettu simuloinneissa käytetyt minimi-, keskiarvo- ja maksimitehot prosenttiosuutena muuntajien nimellistehojen summasta taulukkoon 5.

Taulukko 5. Simuloinneissa käytetyt lähdön J06 muuntamoiden tehoprocentit.

	I (A)	P (kW)	%
Min	13,0	461,6	6,3
Avg (ka.)	25,0	887,7	12,1
Max	53,0	1881,9	25,7

Jakelumuuntajat on sijoitettu johtolähdölle todellisen sijaintitiedon perusteella. Haluttu tehoasetus (jakelumuuntajan kuormitus) voidaan valita tuomalla 1, 2 tai 3 porttiin Load, jotka vastaavat tehoasetuksia min, avg ja max. Kuorma mallinnetaan passiivisella RL-mallilla.

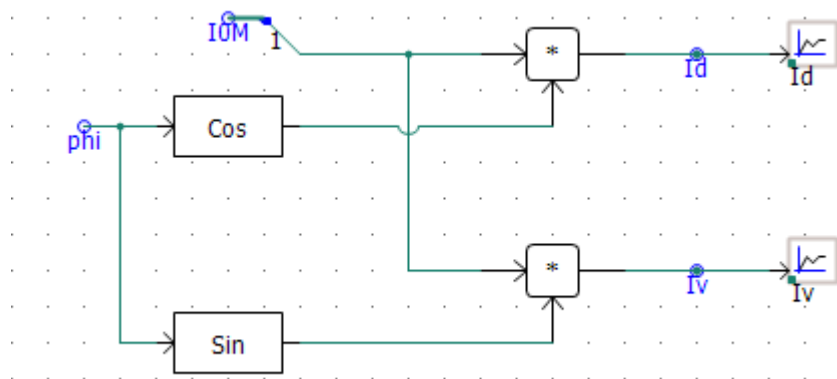
**Kuva 11.** 50 kVA Jakelumuuntamon simulaatiomalli.

3.5 Mittaukset

Sähköaseman keskijännitekiskoista mitataan verkon vaihejännitteet, joista lasketaan verkon nolajännite. Jokaisen johtolähdön katkasijalta mitataan vaihevirrat. Vaihevirroista lasketaan nolavirta, josta nähdään lähdön tuottama maasulkuvirta (maasulun ollessa ko. lähdön ulkopuolella). Nollavirta ja nolajännite syötetään FFT-komponenttiin, joka laskee suureiden perustaajuisten komponenttien suuruudet sekä niiden välisen vaihekulman. FFT-muunnoksen avulla mitattu nolavirta

jaetaan resistiiviseen komponenttiin I_d ja reaktiiviseen komponenttiin I_v , käyttämällä nollavirran ja nollajännitteen välistä kulmaa sekä suureiden amplitudia.

Kuvassa 12 on esitetty mitatun nollavirran jako komponentteihinsa I_d ja I_v käyttäen FFT-komponentista saatua nollavirran suuruutta I_{0M} ja nollavirran ja nollajännitteen kulmista laskettua vaihekulmaeroa ϕ .



Kuva 12. Nollavirran jako resistiiviseen (I_d) ja reaktiiviseen (I_v) komponenttiin.

4 VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTIMALLIN RAKENNUS

Tässä luvussa on esitetty, miten edellä kuvatuilla komponenttimalleilla rakennetaan vaarajännitteiden tutkimista varten kehitetty todellista verkkoa kuvaava simulointimalli.

4.1 Sähköasema, syöttäväpäämuuntaja ja keskitetty kompensointi

Simulointimallin verkkomalli koostuu syöttävästä verkosta, johtolähdöistä ja keskitetystä kompensoinnista.

Sähköaseman päämuuntajana on 115/21 kV, 25 MVA, YNyn6 kytkentäinen muuntaja. Muuntajakomponentille on laskettava parametrit simulaatiota varten. Tätä varten käytetään päämuuntajasta saatuja kilpiarvoja. Parametrit annetaan pu (Per-unit) arvoina, eli ne suhteutetaan nimellisiin arvoihin. Seuraavaksi käydään läpi päämuuntajamallin kupari- sekä pyörrevirtahäviöiden laskenta.

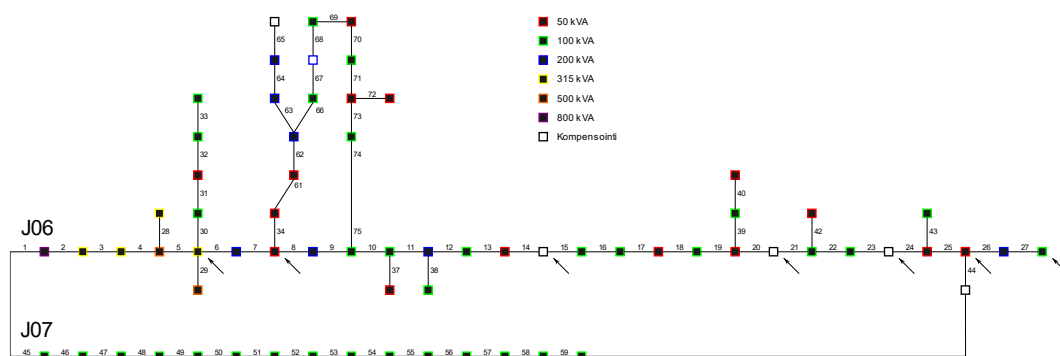
Muuntajan tyhjäkäyntihäviöistä saadaan laskettua kuparihäviöt ("Copper losses"). Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ovat 15,5 kW ja nimellinen teho on 25 MVA, joiden jakolaskusta saadaan "Copper losses" suuruudeksi 0,00062 pu. Toinen laskettava parametri on "Eddy current losses" eli pyörrevirtahäviöt. Pyörrevirtahäviöt saadaan määritettyä käyttämällä kuormitushäviöitä. Muuntajan kuormitushäviöissä on mukana kuparihäviöt, joten vähentämällä tyhjäkäyntihäviöt kuormitushäviöistä ja jakamalla tulos nimellisteholla saadaan pelkän pyörrevirtahäviön suuruus. Muuntajan kuormitushäviöt ovat 100 kW, joten pyörrevirtahäviöksi tulee 0,00338 pu.

Keskitetty kompensointi kytketään päämuuntajan keskijännitepuolen tähtipisteen ja maan välille. Kiinteä ja säätyvä kela kytketään rinnakkain. Verkon ollessa normaalitilassa kiinteä kompensointi kela on asetettu kompensoimaan 87 A ja säätyvä kela 54 A.

4.2 Tutkittava lähtö (J06)

Tutkittavalla lähdöllä (J06) on 50 muuntamoita ja noin 48 kilometriä maakaapelia. Lähdöllä on myös kuusi hajautetun kompensoinnin asemaa. Lähdön topologia nähdään kuvassa 13. Numeroidut viivat kuvaavat muuntamoiden välisiä kaapeleita. Kuvan vasemmassa laidassa oleva kaapeli lähtee sähköasemalta. Muuntamot on numeroitu aina kyseistä muuntamoita edeltävän kaapelin mukaan.

Muuntamovälit koostuvat yhdestä tai useammasta kaapelimallista, joille annetaan parametriksi kaapelin pituus. Lähdöllä J06 on useita haaroja ja se yhdistyy J07 lähdön päähän runkolinjan päässä ja J05 lähtöön muuntamon 34 kohdalla. Mallissa jokaisen muuntamon kohdalla on maadoitusjännitemittaus. Oikeassa verkossa mittaukset sijaitsevat muuntamoilla 5, 7, 14, 20, 23, 25 ja 27.



Kuva 13. Lähtöjen J06 ja J07 rakenne.

4.3 Taustaverkko

Taustaverkon lähdöt J05 ja J07 on mallinnettu tarkasti, kuten tutkittavakin lähtö J06. Kummallakaan lähdöllä ei ole hajautettua kompensointia. J07 lähdön mallintaminen perustuu vain ns. ”runkolinjan” tietoihin. Lähtöön on tämän vuoksi lisätty haaroja niiden suurin piirteisiin sijainteihin niin, että mittaustulokset vastaavat lähtöarvoja. Myös näiden kahden taustaverkon lähtöjen varrelta mitataan maadoitusjännitteet.

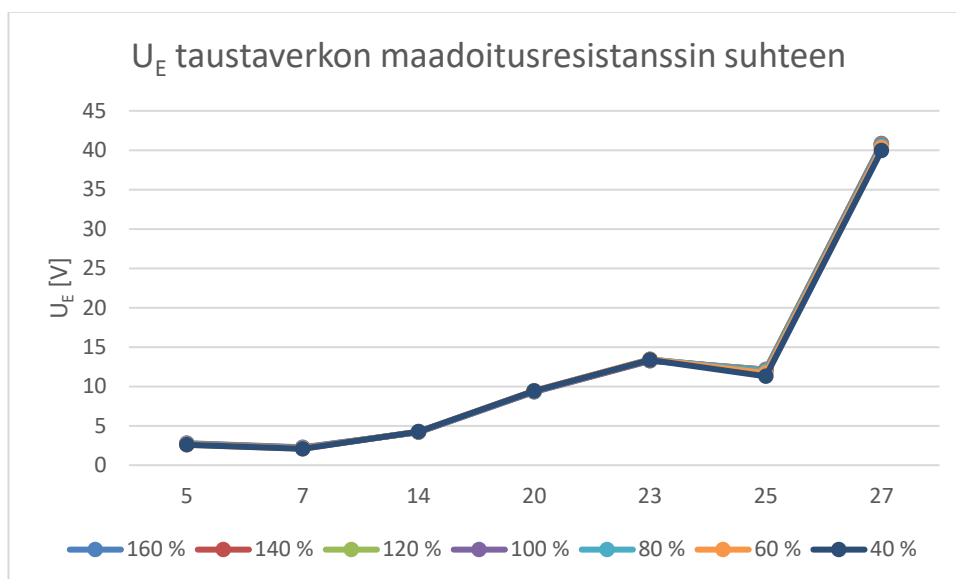
Taustaverkon lähdöt J08, J10 ja J11 on mallinnettu kappaleessa 3 kuvatuilla ekvivalenttikomponenteilla. Ensisijaisena oletuksena on, että lähtöjen kuorma on tasanaisesti jakautunut eli mallinnusmielessä todellinen kuorma kuvataan pistemäisenä keskitettynä keskelle johtolähtöä, joten ekvivalenttikomponenttien parametri d on asetettu arvoon 0,5. Lähdöillä J08 ja J10 on maasulkuvirran kompensointia, joten niiden vuotoresistanssia on säädetty, jotta ne tuottaisivat oikean määrän resistiivistä maasulkuvirtaa.

Jokaiselta taustalähdöltä on samat mittaukset, kuin tutkittavalta lähdöltä pois lukien maadoitusjännitemittaukset.

4.4 Verkon maadoitusrakenne

Koko verkko on pääasiassa maakaapelia, joten se muodostaa yhden ison maadoitusverkon kaapeleiden kosketussuojien ja muuntamoiden maadoitusten kautta. Eri lähtöjen kaapelien maadoitukset yhdistyvät toisiinsa jakorajoilla, joissa muuten yhteys on normaalisti poikki, esimerkiksi lähdön J07 päässä maadoitus on yhteydessä lähellä J06:n pään maadoitukseen.

Taustaverkon maadoitusten välisiä yhteyksiä ei ole mallinnettu, koska niiden vaikutus tutkittavan lähdön kannalta oletetaan olevan hyvin vähäinen ja myös simuloititulokset vahvistivat tämän oletuksen, vrt. kuva 14. Maadoitusresistanssien muutokset vaikuttavat tuloksiin hyvin paikallisesti.



Kuva 14. Maadoitusjännitteet taustaverkon maadoitusresistanssin funktiona. Maadoitusresistanssi 100 % tarkoittaa 8 Ω.

Verkon muuntamoiden maadoitusresistanssin tavoitearvo on 8 Ω ja kompensointi asemien 30 Ω. Oikean verkon muuntamoiden maadoitusresistanssi saattaa poiketa simulaatiosta, koska moni tekijä vaikuttaa muuntamoiden maadoitukseen. Jokaisen muuntamon maadoitus ja sen ympäröimän maan resistiivisyys on erilainen ja myös esim. maan kosteus saattaa vaihdella eri vuodenaikojen välillä.

5 SIMULOINTIMALLIN VERIFIOINTI

Tehdään simulointimallille seuraavat testit ja verrataan tuloksia todellisen verkon testeistä saatuihin arvoihin. Testeillä varmennetaan mallin vastaavuus simuloitavaan verkkoon.

5.1 Oikosulkuvirta

Oikealle verkolle on tehty oikosulkukoe J06 lähdön päässä muuntamalla 27 kahden ohmin vikavastuksella. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta oli tällöin 1082 A /10/. Simulaatiomallilla sama koe antoi tulokseksi 1038 A. Tulos poikkeaa noin 4 prosenttia oikeasta arvosta, jonka mukaan mallin pitkittäsimpedanssi asemalta vikaan paikkaan on riittävän tarkasti mallinnettu. Tulee kuitenkin huomata, ettei mallin pitkittäiset komponentit vaikuta paljoakaan maasulussa.

5.2 Maasulkuvirta

Koko verkko tuottaa verkkotietojen mukaan 318 A maasulkuvirtaa (kompensoimaton kapasitiivinen maasulkuvirta). Malli tuottaa 320 A maasulkuvirtaa, eli verkon kokonaismaakapasitanssi on hyvin lähellä oikeaa. Taulukossa 6 on johtolähtökohtainen vertailu maasulkuvirran komponenteista. Lähtöjen J05, J07 ja J11 tuottama pätövirta (I_d) ei saatu mitattua tarkasti oikeasta verkosta. Tämä johtuu siitä, että näillä lähdöillä ei ole hajautettua kompensointia, joten niiden tuottama resisitiivinen maasulkuvirta on hyvin pientä ja mittaustulos altistuu mm. mittaustarkuudelle.

Taulukko 6. Maasulkuvirran komponentit johtolähdöittäin, simulointitulosten vertailu mittaustuloksiin. I_E :llä tarkoitetaan tässä lähdön tuottamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa.

	I_d (Mitattu)	I_E (Mitattu)	I_d (Malli)	I_E (Malli)
J05	-	8,5	0	8,43
J06	0,8	27	0,79	28,02
J07	-	43	0,11	42,96
J08	0,3	11	0,3	10,42
J10	0,4	28	0,43	27,98
J11	-	33	0,15	31,16
Summa	1,5	150,5	1,78	148,97

Verkkomallin maasulkuvirran komponentit verkon normaalissa kytkentätilassa ovat noin 17–18 A resistiivistä virtaa (I_d) ja 10 A kapasitiivistä virtaa (I_v) (eli alikompensoitu). Malli tuotti 17,6 A resistiivistä ja 10 A kapasitiivistä virtaa.

Säädettävän kompensointikelan lisävastus tuottaa 8,6 A pätövirtaa. Mallin tuottama pätövirta I_d ennen lisävastuksen kytkentää oli 9,039 A ja kytkennän jälkeen 17,601 A. Lisävastus tuottaa mallissa siis 8,562 A virtaa, joka vastaa hyvin todellisuutta.

5.3 Normaalin käytön arvot

Suurimman kulutuksen aikana lähdön J06 vaihevirratt olivat mittausten mukaan noin 53 A. Mallissa vaihevirratt samassa tilanteessa ovat 51,6 A. Lähdön kulutuksella ei ole teorian mukaan suurta merkitystä maasulkujen tapauksessa. Pääasiassa kuormituksen vaikutus näkyy jännitteen aleneman kautta.

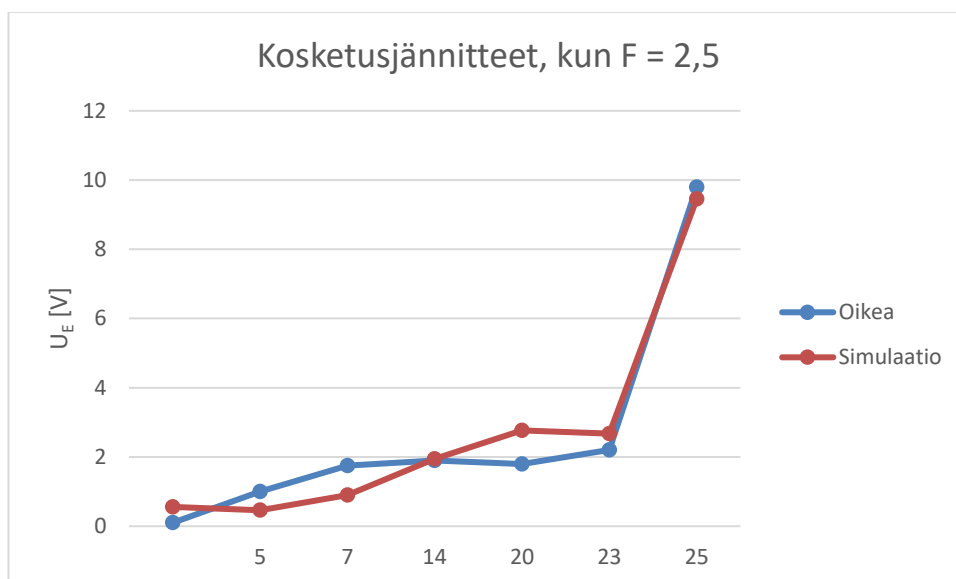
Maksimikuormituksen aikana verkon jännite sähköaseman kiskon ja J06 lähdön pään välillä laskee mittausten mukaan 0,25 kV. Mallissa jännite sähköaseman kiskolla oli 20,642 kV ja lähdön päässä 20,425 kV eli jännite aleni noin 0,22 kV. Jännitteen ero saattaa vaikuttaa maasulun komponentteihin hieman, mutta kokonaisuudessa 0,03 kV ero on hyvin pieni, kun verkon pääjännite on 20 kV.

5.4 F-kertoimien määrittäminen

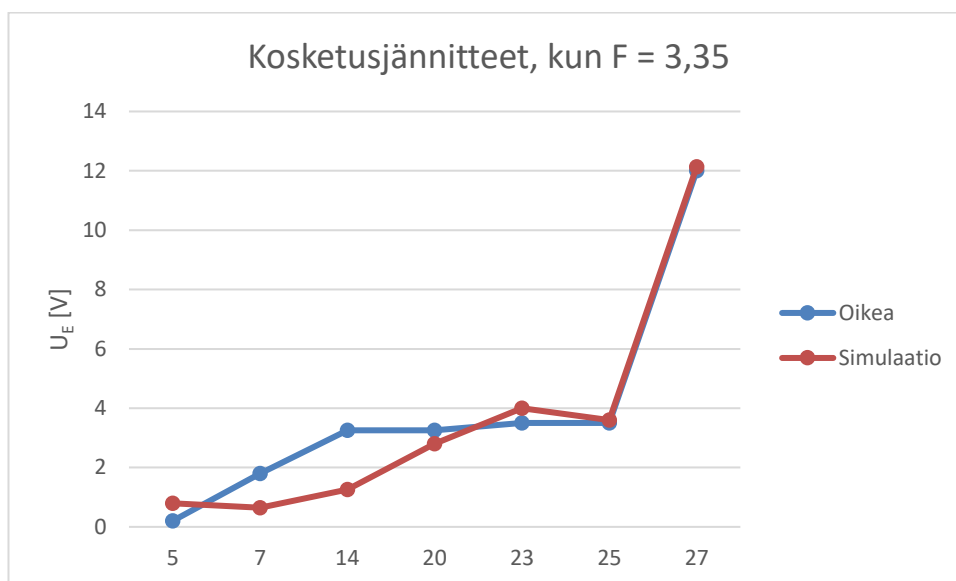
Maadoitusjännitteen (U_E) ja kosketusjännitteen (U_{Tp}) välinen suhde F saadaan standardin [2] mukaan kaavasta 3. Kertoimen F suuruus riippuu mm. maadoituksen toteutuksesta ja sitä ympäröivästä maaperästä.

$$U_E \leq F \cdot U_{Tp} \quad (3)$$

Vertaillen simulaatiotuloksia ja mittaustuloksia, tulee huomioida, ettei kertoimen F arvoa verkolle suoraan tiedetä, ja se voi vaihdella muuntamokohtaisesti. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden mittaus käytännön verkosta on haastavaa, koska ei voida olla varmoja onko mittauksen referenssipiste verkon todellinen neutraali maa, koska verkon ympärillä olevan maan potentiaali nousee maadoitusten kautta palaavan maavirran takia. Simuloinneilla saatujen maadoitusjännitteiden muoto muuntamoiden sijainnin funktiona on samankaltainen, kuin oikeiden mittausten kosketusjännitteiden, joten kertoimen F suuruutta voidaan arvioida sovittamalla käyrät yhteen. Oletusarvoisesti kertoimen suuruus tulisi olla kahden ja viiden väliltä. Kuvissa 15 ja 16 on simulaation maadoitusjännitteet muunnettuna kosketusjännitteiksi kahdella eri vikavastuksella käyttäen kyseisiin käyriin parhaiten sopivia kertoimia. Kerrointen keskiarvoksi tulee 2,92. Mitattujen ja simuloitujen jännitteiden ero johtunee siitä, että oikeassa verkossa F -kerroin ei ole sama kaikille muuntamoille.



Kuva 15. Verkon kosketusjännitteiden [V] vertailu muuntamoiden sijainnin funktiona normaalikytkentätilassa, kun kerroin F on 2,5, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.

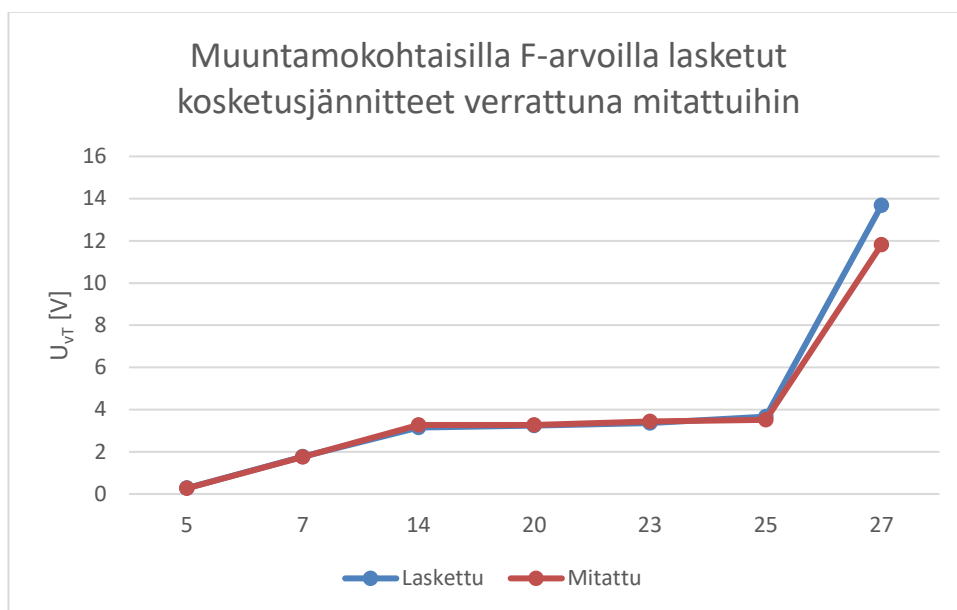


Kuva 16. Verkon kosketusjännitteiden [V] vertailu muuntamoiden sijainnin funktiona normaalikytkentätilassa, kun kerroin F on 3,35, vikavastus 500Ω , vika muuntamolla 27.

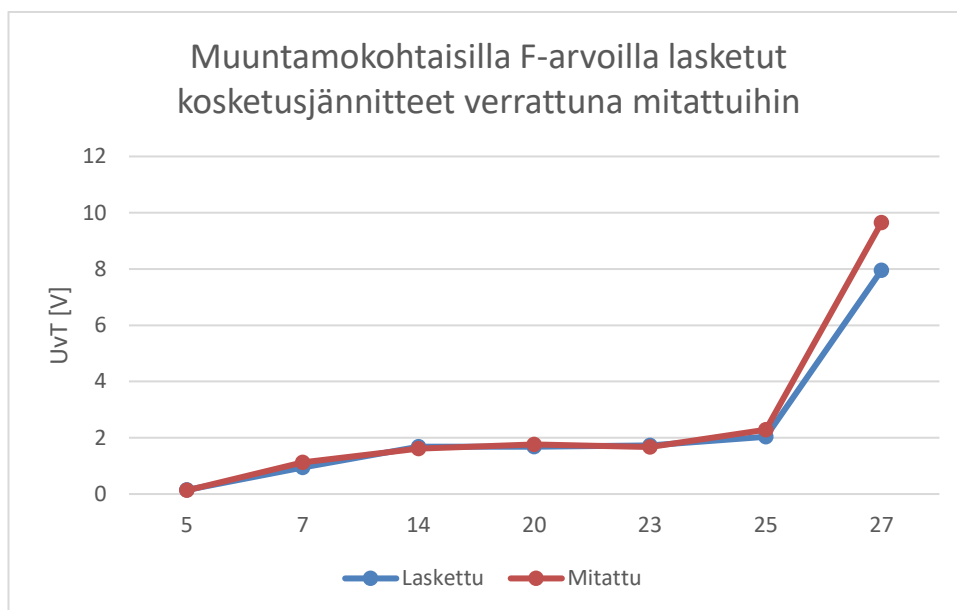
Muuntamoille, joilla on mittaukset, voidaan laskea muuntamokohtainen F-kerroin. Taulukossa 7 on laskettu viiden eri mittauksen tuloksista pienimmän neiliosumman menetelmällä optimoidut /11/ muuntamokohtaiset F-kertoimet. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty mitattujen kosketusjännitteiden ja näitä kertoimia käyttäen laskettujen kosketusjännitteiden sopivuus kahdella eri vikavastuksella.

Taulukko 7. Muuntamokohtaiset F-kertoimet.

5	7	14	20	23	25	27
9,574451	1,219315	1,338457	2,892581	3,989161	3,275872	2,970245



Kuva 17. Muuntamokohtaisesti optimoiduilla F-kertoimilla lasketut kosketusjännitteet verrattuna mitattuihin kosketusjännitteisiin muuntamoiden sijainnin funktiona, vikavastus 0Ω .



Kuva 18. Muuntamokohtaisesti optimoiduilla F-kertoimilla lasketut kosketusjännitteet verrattuna mitattuihin kosketusjännitteisiin muuntamoiden sijainnin funktiona, vikavastus 500Ω .

6 MAASULUN AIKAISTEN VAARAJÄNNITTEIDEN SIMULOINTITULOKSET

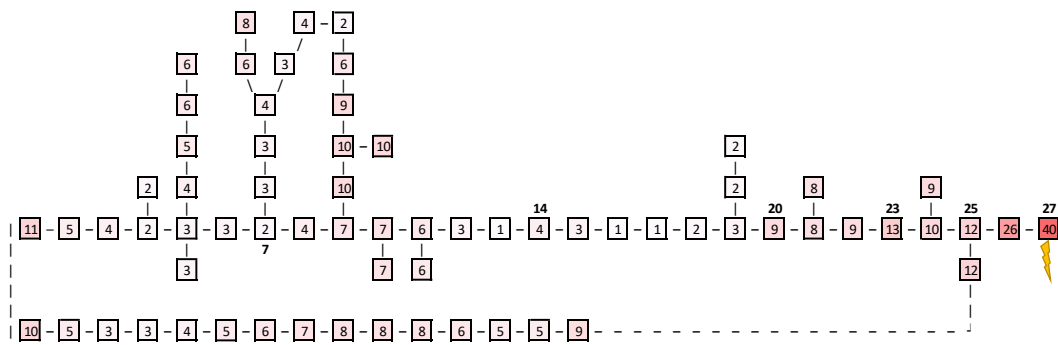
Tehdyllä verkkomallilla simuloidaan yksivaiheisia maasulkuja verkossa varioiden maasulun paikkaa, vikavastusta ja verkon kompensointiastetta. Simulointiajoista tallennetaan maadoitusjännitteet kaikilla muuntamoilla ja näitä arvoja verrataan oikeissa maasulkukokeissa mitattuihin kosketusjännitteisiin.

6.1 Kompensoinnin muutosten vaikutusten simuloinnit

Verkon kompensointiasteen muutosten vaikutusta maasulun aikaisiin vaarajännitteisiin simuloitiin neljässä eri verkon kompensointitilanteessa. Tilanteet olivat verkon normaalitila, eli hajautettu- ja keskitetty kompensointi kytkettynä, maasta erotettu verkko (kaikki maasulkuvirran kompensointi pois päältä), pelkkä hajautettu kompensointi kytkettynä ja pelkkä keskitetty kompensointi kytkettynä.

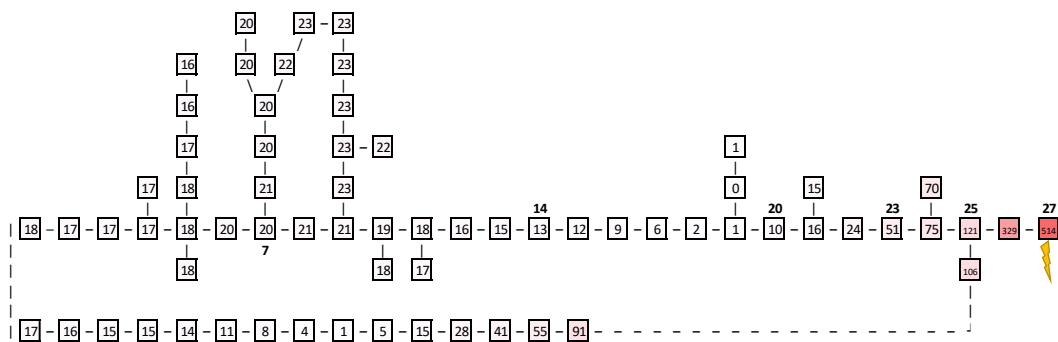
Näissä simulointisarjoissa verkon kaikki lähdöt ovat kytkettyinä. Kuvissa esitetään verkon maadoitusjännitteet muuntamokohtaisesti, jossa punainen on suurin ja valkoinen pienin jännite. Numero muuntamossa on simuloitu maadoitusjännite ensiövoltteina. Kuvissa salamalla esitetään vikakohta. Kuvien rakenne vastaa kuvan 13 verkon rakennetta.

Ensimmäisessä simulointisarjassa verkko on sen normaalissa kytkentätilassa, jolloin verkossa on kytkettynä kaikki hajautettu kompensointi ja keskitetty kompensointi on säädetty vinoviritysarvoon -10 A. Kuvassa 19 on verkon simuloitujen maadoitusjännitteiden jakauma muuntamokohtaisesti verkon normaalikytkentätilassa 0 Ω vikavastuksella.



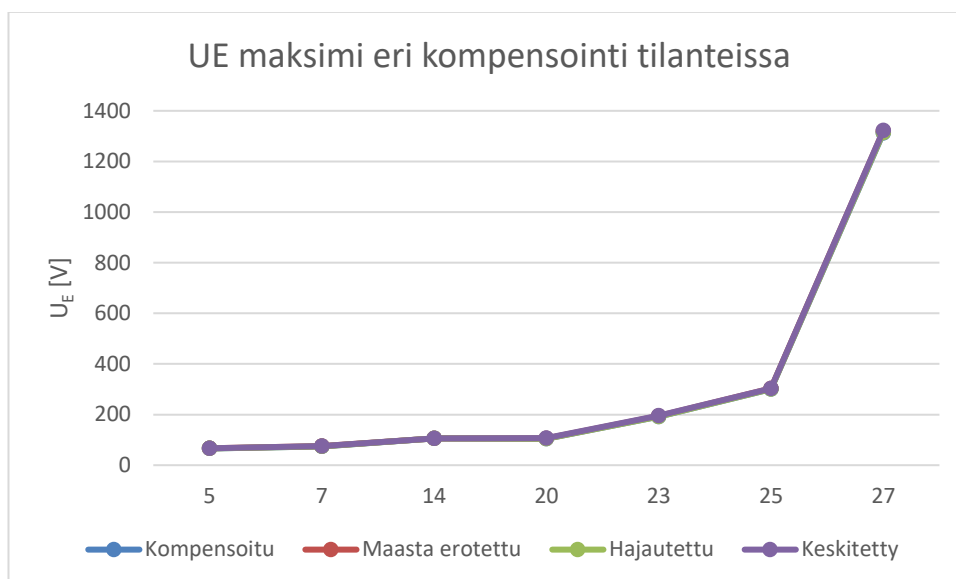
Kuva 19. Simuloidut maadoitusjännitteet verkon normaalissa kompensointitilanteessa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω .

Kuvan 20 maasta erotetun verkon maadoitusjännitteet ovat selkeästi suurimmat, koska kompensoimattoman verkon maasulkuvirta on suurin, jolloin myös jännitteet ovat suuremmat.



Kuva 20. Simuloidut maadoitusjännitteet maasta erotetussa verkossa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω .

Kuvan 21 hajautetun kompensoinnin tapauksessa kompensoitiin 165 A maasulkuvirtaa ja kuvan 22 keskitetyn kompensoinnin tapauksessa kompensoitiin 257 A, joten tässä tapauksessa hajautetulla kompensoinnilla maadoitusjännitteet ovat



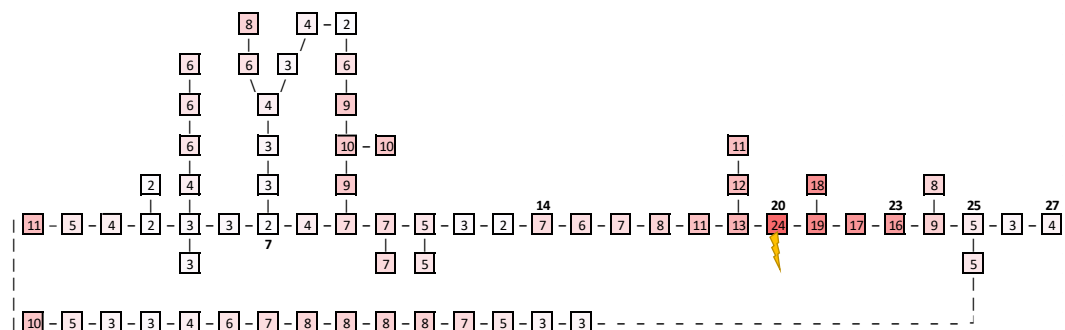
Kuva 23. Simuloidut maadoitusjännitteiden [V] maksimit muuntamoiden sijainnin funktiona eri kompensointitilanteissa, vika asemalla 27, vikavastus 0Ω .

Simulointi ja mittaustulosten mukaan, maksimi hetkellinen maadoitusjännite syntyy heti maasulun alkaessa, kun verkon kapasitanssit purkautuvat ja luovat vian alkuun korkea amplitudisen virtapiikin. Virtapiikin taajuus on suuri, jolloin verkossa mahdollisesti olevat kompensoinnit eivät pienennä virtapiikkiä. Tämä johtuu siitä, että korkeilla taajuuksilla kompensointikelat toimivat suurina impedansseina, koska induktanssi johtaa korkeita taajuuksia huonosti.

Vian alussa maadoitusjännitteet ovat simuloinnin mukaan riippumattomia verkon kompensointiasteesta ja vasta kun vika saavuttaa jatkuvan tilansa, verkon kompensointi alkaa toimimaan suunnitellusti ja kompensoi osan maasulkuvirrasta, jolloin maadoitusjännitteet vaikuttavat verkon kompensointiasteesta. Simulointitulokset vastaavat hyvin todellisia mittaustuloksia.

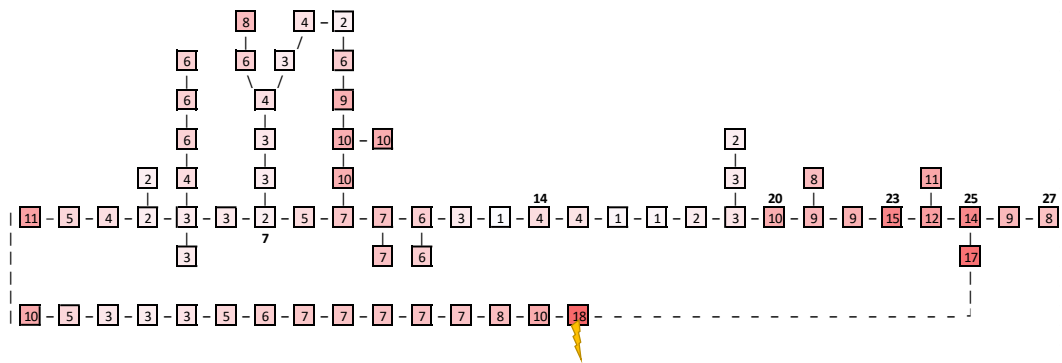
6.2 Vikapaikan siirtymisen vaikutus

Vikapaikan muuttuessa maadoitusjännitteiden jakauma muuntamoiden sijainnin funktiona muuttuu. Kuvissa 24-27 on neljän eri vikapaikan simulointien maadoitusjännitteet eri muuntamoilla. Simulointitulosten mukaan maadoitusjännitteet ovat miltei samat kaikilla muuntamoilla vikapaikkaa ja sen lähistöä lukuunottamatta. Noin 5-8 km päässä vikapaikasta maadoitusjännitteet ovat samassa arvossa kuin muissakin vikapaikkojen mittauksissa ts. maadoitusjännite kasvaa simulointien mukaan vain lähellä vikapaikkaa. Tämä johtuu siitä, että kaapelien tuottama maasulkuvirta palaa kosketussuojien ja maadoitusten kautta samalla tavalla, joten maadoitusjännite muodostuu aina samalla tavalla, kun vika on kaukana, jolloin se ei vaikuta mitattuun maadoitusjännitteeseen. Toisaalta, kun vika on lähellä, kaikki vikavirta kerääntyy vikaa kohti, jolloin vikaa lähimpien muuntamoiden maadoitusten kautta kulkeva virta kasvaa ja samalla maadoitusjännite.

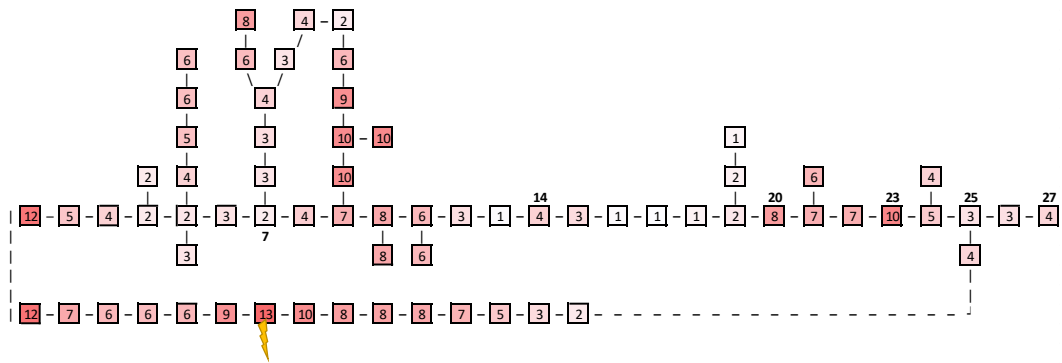


Kuva 24. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 20.

Verrattaessa esimerkiksi kuvan 24 ja 25 maadoitusjännitteitä, nähdään kuinka lähdön J06 alkupään maadoitusjännitteet pysyvät melkein samoina molemmissa vi-oissa. Maadoitusjännitteen suurin arvo on muuntamolla, jonka luona vika on, joten periaatteessa vika voidaan paikantaa maadoitusjänniteprofiilin avulla.

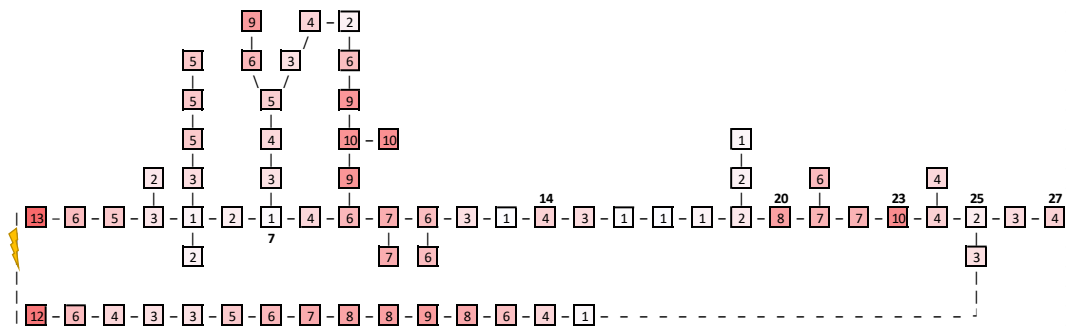


Kuva 25. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 59.



Kuva 26. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 51.

Vian ollessa sähköasemalla, kuvasta 27 nähdään, että maadoitusjännitteet vikaa lähellä olevilla muuntamoilla eivät juurikaan nouse verrattuna tilanteeseen, jossa vika on kaukana sähköasemasta, kuten kuvan 24 tapauksessa. Tämä johtuu siitä, että sähköaseman maadoitus on paljon parempi kuin jakelumuntamoiden.

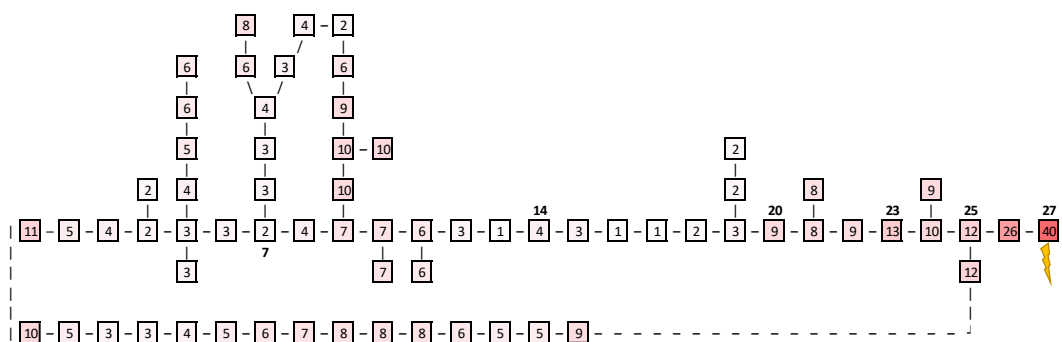


Kuva 27. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika sähköasemalla.

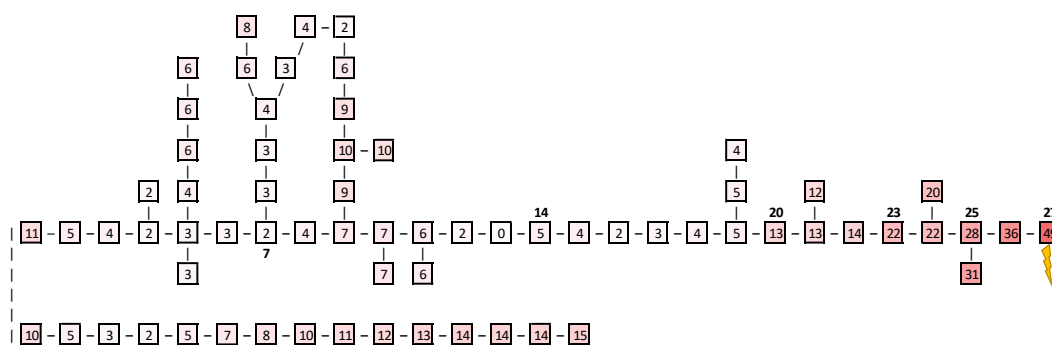
6.3 Maadoitusyhteyden katkaisun simulointi

Tutkittavan lähdön J06 ja taustalähdön J07 päässä on jakoraja. Rajalla lähtöjen maadoitukset ovat galvaanisesti toisissaan kiinni kaapelien kosketussuojien kautta. Seuraavissa simuloinneissa tämä yhteys on katkaistu.

Kuvassa 28 ja kuvassa 29 on simuloidut maadoitusjännitteet, kun maadoitusyhteys J06 ja J07 lähtöjen välillä on paikallaan ja katkaistu. Muuntamot 25 ja 59 ovat jakorajalla.



Kuva 28. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.

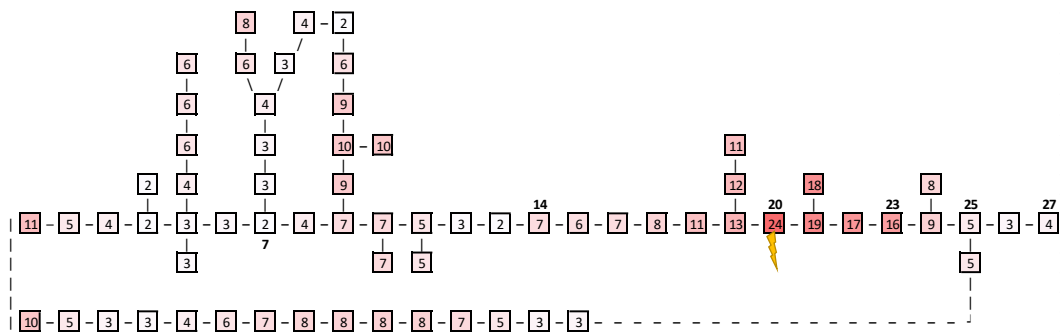


Kuva 29. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, kun maadoitusyhteys J06 ja J07 välillä on poikki, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 27.

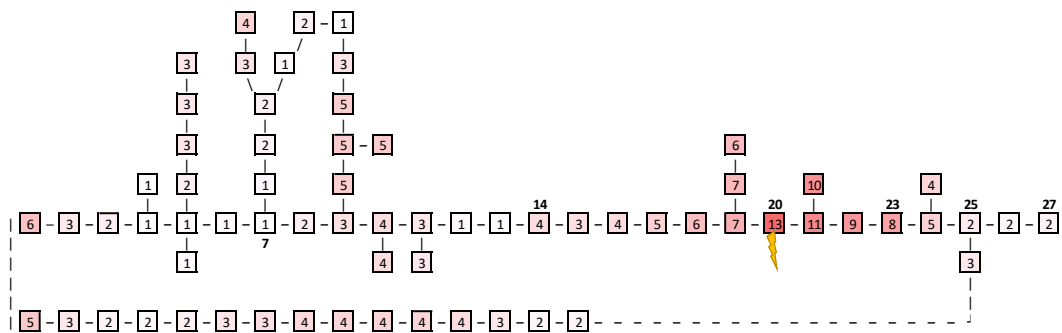
Simulointitulosten mukaan yhteyden ollessa poikki, vikapaikan kosketusjännitteet kasvavat, koska vikavirta ei enää kulje osittain J07 lähdön kautta, vaan tulee kokonaan J06 kautta vikaan. Samoin myös viasta nyt kaukana olevan muuntamon 59 kosketusjännite on noussut, koska sen maadoitus on huonontunut yhteyden katkettua.

6.4 Vikavastuksen muutoksen vaikutus

Vikavastusta kasvattaessa maadoitusjännitteet näyttävät laskevan samassa suhteessa verkon eri kohdissa, kuten nähdään kun verrataan kuvia 30 ja 31, joissa maadoitusjännitteet on värjätty suhteutettuna suurimman ja pienimmän arvon välille. Vikapaikka näyttää säilyttävän saman suhteisen piikin vikaresistanssista riippumatta.



Kuva 30. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 0Ω , vika muuntamolla 20.



Kuva 31. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöillä J06 ja J07, normaali tilanteessa, vikavastus 500Ω , vika muuntamolla 20.

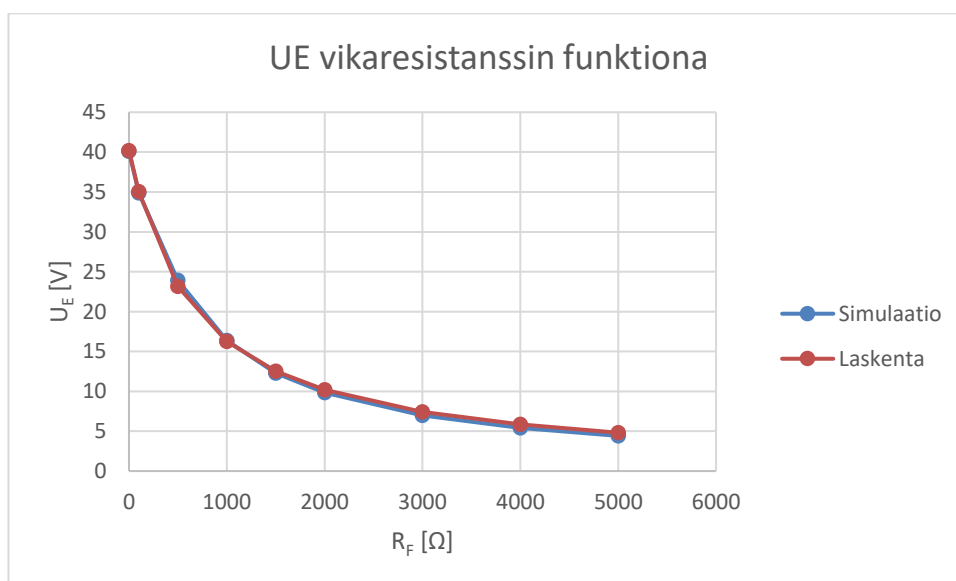
Maasulkuvirran laskukaava saadaan symmetrisistä komponenteista. Kaavalla 4 /12/ lasketaan yksivaiheisen maasulun maasulkuvirta. Kaava voidaan yksinkertaistaa kaavaksi 5 yhdistämällä symmetriset komponentit yhdeksi ja supistamalla yhtälön oikean puolen kolmella. Muun verkon impedanssi pysyy vakiona riippumatta vikaresistanssista, joten optimoinnin kannalta sen arvolla ei ole merkitystä.

$$I_F = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_F} \quad (4)$$

Maasulkuvirta voidaan laskea kaavalla 5, jossa Z on muun verkon impedanssi.

$$I_F = \frac{U}{Z + R_F} \quad (5)$$

Kaavaa käyttäen voidaan sovittaa laskennallinen käyrä saatujen simulaatiotuloksien käyrään. Kuvassa 32 on simulaatioiden käyrä, johon on sovitettu pienimmän neliösumman menetelmällä /11/ laskennallinen käyrä, vikaresistanssin funktiona. Käyrät sopivat todella hyvin yhteen, joten voidaan todeta, että maadoitusjännite käyttäytyy kääntäen verrannollisesti vikaresistanssiin. Tämä voidaan todeta myös kaavojen 1 ja 5 avulla. Kaava 5 määrittää kuinka vikavirta lasketaan. Osa tästä vikavirrasta kulkee maadoituksen kautta maahan, jonka osuus nähdään kaavan 1 reduktiokerroimesta. Reduktiokerroin on vakio maadoituskohtaisesti, joten maadoitusjännitteen arvo muuttuu lineaarisesti maadoitusvirran mukaan, joka muuttuu käänteisesti vikaresistanssin mukaan, jolloin maadoitusjännite on kääntäen verrannollinen vikaresistanssiin.

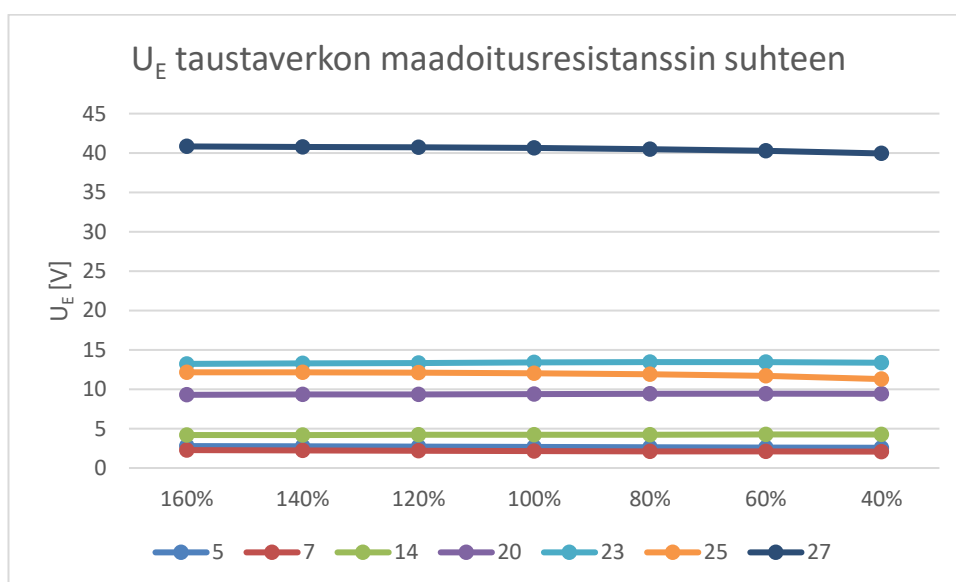


Kuva 32. Simuloidut maadoitusjännitteet verrattuna laskettuihin maadoitusjännitteisiin vikaresistanssin funktiona.

6.5 Maadoitusresistanssien suuruuden vaikutusten simuloinnit

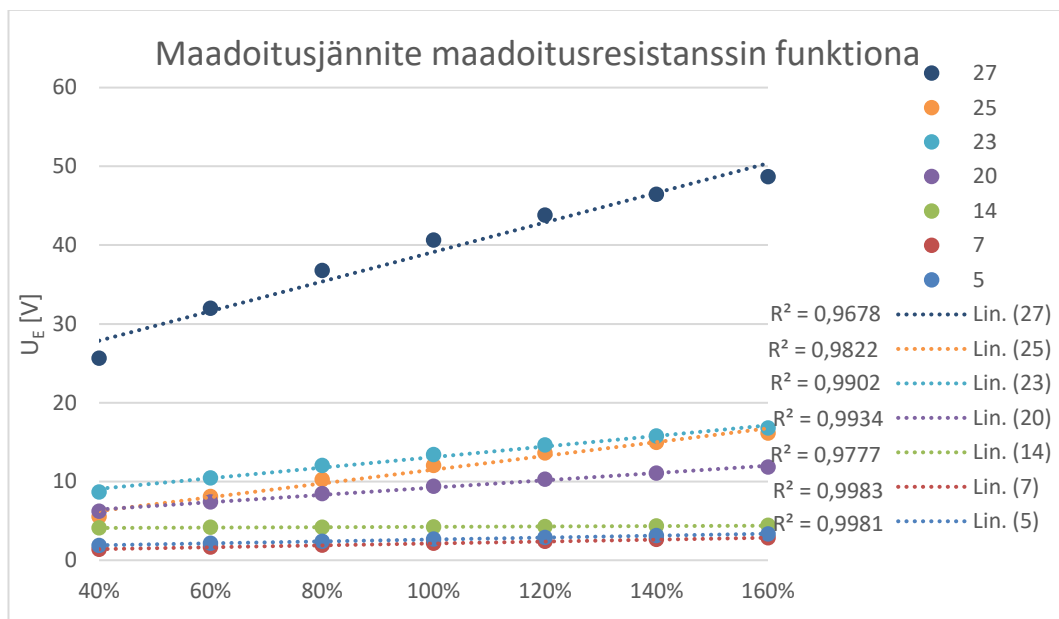
Seuraavaksi tutkitaan, millainen vaikutus maadoitusresistanssien muutoksilla on verkon maadoitusjännitteisiin. Ensiksi muutetaan vain taustaverkon maadoitus-

resistanssia ja katsotaan, millainen vaikutus niillä on tutkittavan lähdön maadoitusjännitteisiin. Kuvassa 33 on J06 lähdön maadoitusjännitteet, kun taustaverkon maadoitusresistanssien arvo on tietty prosenttimäärä normaalista kahdeksan ohmin tilanteesta. Taustaverkon muutokset eivät juurikaan vaikuta tutkittavan lähdön maadoitusjännitteisiin. Vain muuntamon 25 kohdalla on pieni muutos, koska se on noin 700 metrin päässä jakorajasta, eli sillä on galvaaninen yhteys lähellä oleviin muutettuihin maadoituksiin. Eli maadoitusresistanssin muutos vaikuttaa vain hyvin paikallisesti kosketusjännitteisiin. Tämä nähtiin osittain jo aikaisemmassa kappaleessa maadoitusjännitteiden kautta, koska maadoitusjännitteet kaukana viasta pysyivät melko vakioina, kun vika paikkaa muutettiin, jolloin niiden maadoituksen vaikutus kaukana olevaan vikaan ei ole suuri.



Kuva 33. Simuloidut maadoitusjännitteet [V] lähdöllä J06 resistanssin funktiona.

Seuraavaksi kokeiltiin muuttaa tutkittavan lähdön maadoitusresistanssia. Kuvassa 34 on maadoitusjännitteet maadoitusresistanssin muuttuessa. Maadoitusjännitteet näyttävät muuttuvan lineaarisesti lähdön maadoitusresistanssiin nähden, joka vastaa standardin /2/ teoreettista oletusta.



Kuva 34. Simuloidut maadoitusjännitteet lähdöllä J06 resistanssin funktiona ja käyräsovitukset.

7 YHTEENVETO

Työssä luotiin PSCADilla todellisen 20 kV kompensoidun jakeluverkon simulaatiomalli, jolla tutkittiin maasulun aikaisia vaarajännitteitä. Malli saatiin vastaamaan oikeaa verkkoa maasulkutapauksissa hyvin tarkasti.

Mittaus- ja simulaatiotuloksia vertaamalla nähtiin verkon eri muuntamoiden F-kertoimien poikkeavan paljonkin toisistaan, jonka perusteella on hyvin vaikeaa arvioida minkään yksittäisen muuntamon maadoitusjännitteen ja kosketusjännitteen suhdetta ilman mittauksia kyseiseltä muuntamolalta.

Tuloksista nähdään myös, miten maadoitusjännite riippuu vian sijainnista. Maadoitusjännitteen arvo on suurimmillaan vikapaikassa ja sen ympärillä laskien siirtyessä kauemmas vikapaikasta. Maadoitusjännitteen arvoon vaikuttaa erityisesti vikavirran suuruus (vikaresistanssi) sekä vikapaikan maadoitusvastus. Tämän perusteella lähdön maadoitusjänniteprofiilista voidaan nähdä vian sijainti.

Mielenkiintoinen ilmiö sinänsä on maadoitusyhteyden katkaisu johtolähtöjen väliltä, kun vika on toisen johtolähdön päässä. Simulointitulosten mukaan maadoitusyhteyden ollessa poikki, vikapaikan kosketusjännitteet kasvavat, koska vikavirta kulkee kokonaan viallisen lähdön kautta vikaan. Samoin myös viasta nyt kaukana olevan muuntamon kosketusjännite on noussut, koska sen maadoitus on huonontunut yhteyden katkettua.

Työhön voisi jatkotutkimuksena selvittää maasulkuvirran paluureittejä, eli mitä kautta maasulkuvirran eri komponentit kulkevat vian ja sähköaseman välillä. Tarkoituksena olisi tutkia, miten virta jakautuu maapiirin eri osiin eli kaapeleiden kosketussuojiin ja muuntamoiden maadoitukseen, joista voitaisiin nähdä, miten maadoitusjännitteet muodostuvat verkon eri osissa.

Lisäksi tehdyllä mallilla voisi ajaa maasulkukokeita useammassa erilaisissa tilanteissa, kuten esimerkiksi kaksoismaasulussa, jolloin maasulkuvirta voi olla hyvin

suuri ja maasulun paluuvirtojen reitit saattavat olla hyvinkin mielenkiintoisia tässä tapauksessa.

LÄHTEET

/1/ Västi, M. 2021. Lehtori. Vaasan ammattikorkeakoulu. Relesuojaus kurssi, MaasulkusuojausME.pdf.

/2/ SFS 6001:2018. Suurjänniteasennukset. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 2018. 156 s.

/3/ Viljamaa, E. 2022. 110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta.

/4/ IEEE 400.2-2013. Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency. New York: IEEE Standards Association. 2013. 60 s.

/5/ Prysmian Group, 2018. AHXAMK-WP 20kV maakaapeli datalehti. Viitattu 28.8.2022. https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXAMK-WP%2020kV_170418.pdf.

/6/ Prysmian Group, 2018. AHXAMK-W 20kV maakaapeli datalehti. Viitattu 28.8.2022. https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXAMK-W%2020kV_170418.pdf.

/7/ Sener, 1994. Verkostosuositus SA 5: 94, Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen.

/8/ Altonen, J. 2022. ABB sisäinen materiaali. Ekvivalenttikomponentti.

/9/ KKM Power, TEKNINEN ERITTELY SHR-8. Viitattu 28.8.2022. http://static.kkmpower.com/2015/06/TEKNINEN-ERITTELY-930656-SHR8_V3.pdf

/10/ Altonen, J. Noormarkun oikosulkukoe. Email janne.altonen@fi.abb.com 9.1.2023.

/11/ Milton, J. & Arnold, J. 1995 Introduction to Probability and Statistics. London. McGraw Hill Education Europe.

/12/ Elovaara, J. & Haarla, L. 2011 Sähköverkot 1, Helsinki. Gaudeamus.

/13/ Caruna, 2022. Noormarkku verkkotietoja 25.6.2022_v2 excel tiedosto.

/14/ Caruna, 2019. Noormarkku_verkkotietoja_5.7.2019 pdf tiedosto.