



Keskijännitesähköverkkomallin simulointi ja mittaukset vikatilanteiden mallintamisessa

Pauli Hytölä

Opinnäytetyö, AMK

Kesäkuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Hytölä, Pauli

Keskijännitesähköverkkomallin simulointi ja mittaukset vikatilanteiden mallintamisessa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Kesäkuu 2024, 121 sivua

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö, AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Jyväskylän ammattikorkeakoulun KOESTUS-projektissa perustettiin sähköverkkojen suojausten tutkimus-, kehitys ja innovaatiotoiminnan laiteympäristö. Laiteympäristöön toteutettiin sähköverkkomalli, joka oli eräänlainen tyyppilinen keskijännitejakeluverkon pienoismalli. Laiteympäristön verkkomallin tehtävänä oli toimia sähköverkkojen suojauslaitteiden ja -funktioiden koestuskäytössä. Kehitystyön osana tutkittiin suunnitellun verkkomallin sekä vastaavan todellisen sähköverkon käyttäytymistä vikatilanteissa Matlab Simulink Simscape -ohjelmistolla. Tavoitteina oli selvittää, miten sähköverkkoa voitaisiin simuloida Simscapea käyttäen sekä lopuksi mittauksin varmentaa simulaatioiden onnistuminen.

Simulaatioissa sähköverkkoa ja laiteympäristön verkkomallia tarkasteltiin kolmen keskijänniteverkoille tyyppilisen vikatapauksen aikana: kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku ja yksivaiheinen maasulku. Maasulkuja simuloitiin sekä verkon ollessa maasta erotettu että sammutettu. Simulaatioiden tuloksista kerättiin sekä numeerista dataa vikavirtojen tehollisarvoista vian saavutettua jatkuvan tilansa että virta- ja jännitekuvaajia. Suunnitellun verkkomallin valmistuttua laiteympäristössä tehtiin myös suppeat mittaukset, joissa vikatilanteiden virta- ja jännitetiedot kerättiin verkkomallin kennotermiinaliin häiriötal-
lentimelta.

Simulaatioiden tuloksia vertailtiin vastaavilta osin verkon ja verkkomallin Neplan-laskelmiin sekä mittaustuloksiin. Vertailujen perusteella havaittiin, että kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa simulaatiot vastasivat hyvin Neplan-laskelmia, mittauksia ja tietoperustaa. Yksivaiheisten maasulkujen simulaatioissa kohdattiin ns. kapasitanssiongelma, jonka ratkaisuehdotuksen laatiminen ja testaaminen olivat osa tavoitteita. Vertailujen perusteella kuitenkin jouduttiin toteamaan, etteivät simulaatiot pääsääntöisesti toimi yksivaiheisissa maasuluissa. Poikkeuksen tekivät päämuuntajan alajännitepuolen maasta erotetun verkon yksivaiheiset maasulkuvirrat, jotka vastasivat Neplan-laskelmia erittäin hyvin. Tulosten perusteella todellisen verkon ja verkkomallin Simscape-simulaatioiden katsottiin olevan toimiva työkalu verkon kolmi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen mallintamisessa. Jatkokehityskohteiksi mainittiin kapasitanssiongelman ratkaiseminen maasulkusimulaatioiden korjaamiseksi sekä muiden vikatyyppeiden, esimerkiksi yhdistelmävikojen, simulointi. Simscape-simulaatioiden hyödyntämistä ehdotettiin sähkövoimatekniikan opetuksessa ja laiteympäristön verkkomallin mittaustulosten varmentamisessa.

Avainsanat (asiasanat)

Sähköverkot, kehitystutkimus, verkkomalli, mallintaminen, simulointi, mittaus, oikosulku, maasulku

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

–

Hytölä, Pauli

Simulation and measurements of a medium-voltage electric power network model in the modelling of fault situations

Jyväskylä: Jamk University of Applied Sciences, June 2024, 121 pages.

Degree programme in Electrical and Automation Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The KOESTUS project at Jamk University of Applied Sciences developed an equipment environment for the research, development, and innovation activities of electric power network protection. A model of a typical medium-voltage power distribution network was implemented in the equipment environment. The model acted as the testing platform of network protection devices and functions. The behaviour of the designed power network model and the corresponding real power network in failure situations was studied in the Matlab Simulink Simscape software. The goals were to find out how the power network could be simulated using Simscape and to verify the success of the simulations with measurements at the end.

In the simulations, the power network was examined during three typical medium-voltage network fault cases: three-phase short-circuit, two-phase short-circuit, and single-phase ground fault. Ground faults were simulated both when the neutral point was isolated and when the network was compensated for ground faults. Both numerical data on the fault currents and current and voltage graphs were collected from the simulations. Some compendious measurements were also made in the device environment; the data was collected from the disturbance recorder of the network model's feeder terminal.

The results of the simulations were compared to Neplan calculations of the network and to the measurements. Both three- and two-phase short-circuits corresponded well to the Neplan calculations, measured data, and theory. In single-phase ground faults, the so-called capacitance problem came up. The preparation and testing of a solution proposal were tried. Despite this the simulations generally performed poorly in single-phase ground faults. Only the ground fault currents of the isolated neutral system of the low-voltage side of the power transformer matched the Neplan calculations very well. The Simscape simulations of the network were considered a valid tool for modelling both three-phase and two-phase short circuits. Solving the capacitance problem and simulating other types of faults, for example combined faults, were left as topics for further development. The use of Simscape simulations was proposed in the teaching of electrical engineering and in the verification of the measurement results of the power network model.

Keywords/tags (subjects)

Electric power network, development research, network model, modelling, simulation, measurement, short-circuit, earth fault

Miscellaneous (Confidential information)

–

Sisältö

Lyhenteet ja symbolit	6
1 Johdanto	8
2 Kehittämistyön kuvaus	10
2.1 Työn tavoitteet ja aiheen rajaus	10
2.2 Tutkimuskysymykset	11
2.3 Tiedonhaku.....	12
2.4 Eettisyys.....	13
2.5 Tutkimuksellisesta kehittämistoiminnasta	14
3 Keskijänniteverkon viat ja vikasuojaus	17
3.1 Vikatyypit.....	17
3.1.1 Vikatyypien luokittelua	17
3.1.2 Oikosulku	19
3.1.3 Maasulku.....	21
3.1.4 Katkos.....	23
3.2 Ylijännitesuojaukset	23
3.3 Oikosulkusuojaukset.....	24
3.4 Maasulkusuojaukset.....	25
4 Keskijänniteverkon mallintaminen	29
4.1 Esimerkkejä aikaisemmista verkkomalleista.....	29
4.2 Keskijänniteverkkojen yleispiirteet	29
4.3 Verkon komponenttien mallinnus	32
4.3.1 Johdot ja kaapelit.....	32
4.3.2 Muuntajat	39
4.3.3 Verkon kuormitukset	41
5 Kehittämistyön toteutus	42
5.1 Kehittämistyön menetelmät	42
5.2 Laiteympäristön ja simulaatioiden kehittämisen lähtökohdat	44
5.2.1 Todellisesta verkosta verkkomalliksi	44
5.2.2 Todellisen verkon mallintamisen lähtökohdat	46
5.2.3 Verkkomallin lähtökohdat	48
5.3 Matlab Simulink Simscape -simulaatiot	52
5.3.1 Todellisen verkon ja verkkomallin yhteiset lohkot.....	52
5.3.2 Todellisen verkon simulaatioiden lohkot	55
5.3.3 Verkkomallin simulaatioiden lohkot.....	58

5.4	Mittaukset	61
6	Tulokset.....	63
6.1	Simulaatioaineiston analysointi	63
6.2	Mittausaineiston analysointi.....	65
6.3	Keskeiset simulaatiotulokset.....	67
6.3.1	Johtomallien 3PPI ja 3PPlyks vertailu	67
6.3.2	Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat	69
6.3.3	Kaksivaiheiset oikosulkuvirrat	70
6.3.4	Yksivaiheiset maasulkuvirrat maasta erotetuissa verkoissa	70
6.3.5	Yksivaiheiset maasulkuvirrat sammutetuissa verkoissa	71
6.4	Keskeiset mittaustulokset	72
7	Tulosten arviointi ja pohdinta	74
7.1	Tulosten luotettavuuden arviointi	74
7.1.1	Johtomallien vertailu toisiinsa	74
7.1.2	Todellisen verkon simulaatiotulosten vertailu vastaaviin Neplan-laskelmiin	76
7.1.3	Verkkomallin simulaatiotulosten vertailu vastaaviin Neplan-laskelmiin	78
7.1.4	Verkkomallin simulaatiotuloksien vertailu vastaaviin mittaustuloksiin	79
7.2	Keskeisten tulosten tarkastelu suhteessa tietoperustaan	80
7.2.1	Simulaatioiden kaksi johtomallia	80
7.2.2	Simulaatiot oikosulkujen mallinnuksessa	81
7.2.3	Simulaatiot yksivaiheisten maasulkujen mallinnuksessa	82
7.3	Johtopäätökset ja kehittämisehdotukset.....	82
	Lähteet	85
	Liitteet	88
	Liite 1. Verkkomallin kansilayout	88
	Liite 2. Johto-osuuksien kolmivaiheisen π -sijaiskytkennän yksinkertaistaminen Simscape-simulaatioissa	89
	Liite 3. Simscape-lohkojen parametrit eri simulaatioissa	95
	Liite 4. Johtomallien 3PPI ja 3PPlyks vikavirtojen vertailu	102
	Liite 5. Vikatilanteiden simulaatiotulokset.....	109
	Liite 6. Mittaustulokset	116
	Kuviot	
	Kuvio 1. Tutkimuksellisen kehittämistoiminnan sijainti tutkimuksen ja kehittämistoiminnan leikkauskohdassa.....	15

Kuvio 2. Eri näkökulmat tutkimukselliseen kehittämistoimintaan	16
Kuvio 3. Joitain keskijänniteverkon tyypillisiä vikoja: a) yksivaiheinen maasulku, b) kaksivaiheinen maaosikosulku, c) kaksoismaasulku, d) kaksivaiheinen oikosulku, e) kolmivaiheinen oikosulku, f) yksivaiheinen johdinkatkos, g) kaksivaiheinen johdinkatkos, h) yksivaiheinen johdinkatkos ja maasulku kuorman puolella, i) kaksivaiheinen johdinkatkos ja maasulku kuorman puolella ...	18
Kuvio 4. Yhden vaiheen induktiivisen oikosulkuvirran käyttäytyminen ajan funktiona: a) epäsymmetrinen oikosulkuvirta, b) symmetrinen oikosulkuvirta	19
Kuvio 5. Maasulkuvirran I_f kulkureitti vikapaikasta verkon tähtipisteelle: a) maasta erotetussa verkossa, b) sammutetussa verkossa	21
Kuvio 6. Virtamuuntajien summakytkeä ja kaapelivirtamuuntaja summavirran I_0 mittauksessa sekä jännitemuuntajan avokolmiokytkentä tähtipistejännitteen U_0 mittauksessa	26
Kuvio 7. Periaatekuva suunnatun maasulkureleen havahtumisasetteluista a) maasta erotetussa verkossa, b) sammutetussa verkossa	27
Kuvio 8. Johdon tai kaapelin yksivaiheinen a) π -, b) T-sijaiskytkentä.....	32
Kuvio 9. Kolmivaihejohdon a) maa- ja keskinäiskapasitanssit, b) käyttökapasitanssit	34
Kuvio 10. Symmetristen komponenttien menetelmällä a) vaiheiden ja maan välisiä maakapasitansseja vastaa nollajärjestelmän kapasitanssi C_0 , b) käyttökapasitansseja vastaa myötäjärjestelmän kapasitanssi C_1	35
Kuvio 11. Yksittäisen johto-osuuden kolmivaiheinen π -sijaiskytkentä kahdella eri ominaiskapasitanssilla.....	37
Kuvio 12. Yksittäisen johto-osuuden yksinkertaistettu kolmivaiheinen π -sijaiskytkentä ilman erillistä maakapasitanssia	38
Kuvio 13. Verkostolaskennassa käytettävä kaksikäätymismuuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä redusoituna ensiön jännitetasoon: a) tyhjäkäyntihaara jakaa oikosulkuimpedanssin ensiöön ja toisioon, b) oikosulkuimpedanssi on yhdistetty tyhjäkäyntihaaran toisiopuolelle	39
Kuvio 14. Simulaatioiden pohjana oleva todellisen verkon rakenne	46
Kuvio 15. Simulaatioiden pohjana olevan verkkomallin verkon rakenne	49
Kuvio 16. Johto-osuuden simulaatiolohkot: a) Three-Phase PI Section Line -lohko "3PPI", b) 3PPI:n sijaiskytkentä, c) yksinkertaistettu lohko "3PPIyks" ja d) 3PPIyks:n sijaiskytkentä.....	53
Kuvio 17. Esimerkki: johto-osuuden BJ02B lopussa oleva jännite- ja virtamittari sekä vikapaikka	54
Kuvio 18. Three-Phase Fault -lohkon sisäinen kytkentäkaavio.....	55
Kuvio 19. Todellinen taustaverkko Three-Phase Source -blokkina Simscapessa	55
Kuvio 20. YNyn0-kytketty päämuuntaja T1 Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals -lohkona sekä ensiön sammutuskuristin ja maasta erotettu toision tähtipiste	56
Kuvio 21. Dyn11-kytketty erotusmuuntaja T0 sekä toision ei-ideaalinen sammutuskuristin TOL9 ja toision kolmivaiheinen sarjakuristin TOL11	59
Kuvio 22. Vikatilanteen jäljittely laiteympäristössä: Tässä oltiin tekemässä kaksivaiheista oikosulkua varayhteyden puolivälissä. Alhaalla vasemmalla oikosulun käsinkytkentään käytetty	

johdonsuojakatkaisija ja oikealla kolme säätövastusta, jotka toimivat johto-osuuden BJ01D lopussa olevana kuormituksena.....	61
Kuvio 23. Ylhäällä todellisen kaupunkiverkon simulaatiossa vikapaikassa BJ02B tapahtuneen kolmivaiheisen oikosulun aikana mitatut vaihevirratt ja alhaalla vaihejännitteet esitettyinä scope-näytöllä.....	63
Kuvio 24. Scope-näyttöön yhdistetyt Peak Finder ja Signal Statistics -työkalut.....	64
Kuvio 25. Sigralla piirretty verkkomallin kaupunkiverkon johdon BJ01B lopussa tapahtuvan kaksivaiheisen oikosulun yhden vikaantuneen vaiheen virta ylhäällä ja BJW1-kiskon vastaava vaihejännite alhaalla	66
Kuvio 26. Wavewinillä piirretty vaihevektoridiagrammi verkkomallin kaupunkiverkon johdon BJ01B lopussa tapahtuvan kaksivaiheisen oikosulun aikana: Vektorit 1, 2 ja 3 ovat virtaosoittimia ja vektorit 4, 5 ja 6 vaihejännitteiden osoittimia.....	66
Kuvio 27. Matlabin varoitusikkuna, jossa huomautettiin sähkömagneettisen aallon etenevän simulaatiossa johto-osuudella valoa nopeammin ominaisparametrien asettelun takia	68
Kuvio 28. Verkkomallin kaupunkiverkon vikapaikan BJ01D yksivaiheisessa maasulussa simuloitut virrat ja vaihejännitteet: Ylhäällä nollavirta vikapaikassa, keskellä tähtipistejännite päämuuntajan toisiossa ja alhaalla vaihejännitteet vikapaikassa.....	71
Kuvio 29. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihevirratt kaksivaiheisessa oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat.....	72
Kuvio 30. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihejännitteet kaksivaiheisessa oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat.....	73
Kuvio 31. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihevirratt kolmivaiheisessa vikaa vasten kytketyssä oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat. .73	
Kuvio 32. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihejännitteet kolmivaiheisessa vikaa vasten kytketyssä oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat. .74	

Taulukot

Taulukko 1. Tiedonhaun keskeiset osakokonaisuudet, käsitteet ja niihin liittyvät hakusanat... 12	
Taulukko 2. Todellisen maaseutuverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot.....	48
Taulukko 3. Todellisen kaupunkiverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot.....	48
Taulukko 4. Verkkomallin maaseutuverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot	51
Taulukko 5. Verkkomallin kaupunkiverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot	51
Taulukko 6. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen maaseutuverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa	67
Taulukko 7. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa todellisessa maaseutuverkossa.....	69
Taulukko 8. Kilpailevien johtomallien keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteiden simulaatioissa.....	75

Taulukko 9. Todellisen verkon simulaatioiden ja Neplan-laskelmien keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteissa pelkässä keskijänniteverkossa.....	76
Taulukko 10. Verkkomallin Neplan-laskelmien ja simulaatioiden keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteissa pelkässä keskijänniteverkossa.....	78
Taulukko 11. Miten hyvin kehitystyön tavoitteisiin päästiin eri näkökulmista	83

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenne tai symboli	Selitys
A	ampeeri, sähkövirran SI-yksikkö
C	kapasitanssi, käyttökapasitanssi
c	ominais(käyttö)kapasitanssi
C_0	nollajärjestelmän kapasitanssi
C_0	nollajärjestelmän ominaiskapasitanssi
C_1	myötäjärjestelmän kapasitanssi
C_1	myötäjärjestelmän ominaiskapasitanssi
$C_g, C_{g1}, C_{g2}, C_{g3}$	maakapasitanssi
$C_g, C_{g1}, C_{g2}, C_{g3}$	ominaismaakapasitanssi
$C_m, C_{12}, C_{23}, C_{13}$	keskinäiskapasitanssi
F	faradi, kapasitanssin SI-yksikkö
f	taajuus
G	konduktanssi
H	henry, induktanssin SI-yksikkö
Hz	hertsi, taajuuden SI-yksikkö
I	sähkövirta (tehollisarvo, ellei toisin mainita)
i	sähkövirran hetkellisarvo
\hat{i}	sähkövirran amplitudi
I''_k	alkuoikosulkuvirta (tehollisarvo)
I'_k	muutosoikosulkuvirta (tehollisarvo)
I_k	jatkuvan tilan oikosulkuvirta (tehollisarvo)
I_{k3v}	kolmivaiheisen oikosulun jatkuvan tilan oikosulkuvirta
I_{k2v}	kaksivaiheisen oikosulun jatkuvan tilan oikosulkuvirta
I_{k1v}	yksivaiheisen maasulun jatkuvan tilan maasulkuvirta
i_s	sysäyoikosulkuvirta
I_f	maasulkuvirta, vikavirta (tehollisarvo)
I_0	summavirta eli nollavirta (tehollisarvo)
\underline{I}_0	summavirta eli nollavirta (kompleksiluku)
j	imaginaariyksikkö
L	induktanssi
l	ominaisinduktanssi
L1, L2, L3	kolmivaihejärjestelmän vaihejohtimet
lim	raja-arvo
km	kilometri, pituuden SI-kerrannaisyksikkö
μ	muuntajan muuntosuhde
P_k	oikosulkupätöteho
P_0	tyhjäkäyntipätöteho
p.u.	per unit eli dimensioton suhteellisarvo
Q_k	oikosulkuloisteho
Q_0	tyhjäkäyntiloisteho
R	resistanssi
r	ominaisresistanssi
R_k	oikosulkuresistanssi
r_k	suhteellinen oikosulkuresistanssi

Lyhenne tai symboli	Selitys
R_f	vikaresistanssi
R_{Fe}	muuntajan rautahäviöresistanssi
RMS	<i>root mean square</i> eli tehollisarvo
S_{kQ}	taustaverkon oikosulku(näennäis)teho
S_N	nimellinen näennäisteho
s	pituus, välimatka
U	pääjännite (tehollisarvo, ellei toisin mainita)
u	jännitteen hetkellisarvo
\hat{u}	jännitteen amplitudi
U_V	vaihejännite (tehollisarvo, ellei toisin mainita)
U_0	tähtipistejännite eli nollajännite (tehollisarvo)
\underline{U}_0	tähtipistejännite eli nollajännite (kompleksiluku)
V	voltti, jännitteen SI-yksikkö
VA	volttiampeeri, näennäistehon SI-yksikkö
X	reaktanssi
x	ominaisreaktanssi
X_C	kapasitiivinen reaktanssi
X_k	oikosulkureaktanssi
x_k	suhteellinen oikosulkureaktanssi
X_m	muuntajan magnetointireaktanssi
\underline{Y}	admittanssi (kompleksiluku)
\underline{Z}	impedanssi (kompleksiluku)
\underline{Z}_k	oikosulkuimpedanssi (kompleksiluku)
Z_k	oikosulkuimpedanssi (itseisarvo)
\underline{z}_k	suhteellinen oikosulkuimpedanssi (kompleksiluku)
z_k	suhteellinen oikosulkuimpedanssi (itseisarvo)
ΔI	virtaero (tehollisarvo)
δI	suhteellinen virtaero prosentteina
$\langle \delta I \rangle$	suhteellisten virtaerojen aritmeettinen keskiarvo
ϕ	virran ja jännitteen vaihe-ero (tasokulma)
$\Delta\phi$	vaihe-eron toleranssi
Ω	ohmi; resistanssin, reaktanssin ja impedanssin SI-yksikkö
°	aste, vaihe-eron yksikkö
°C	celsiusaste, lämpötilan SI-johdannaisyksikkö
∞	ääretön

1 Johdanto

Sähkömarkkinalaki velvoittaa jakeluverkon haltijan ylläpitämään ja kehittämään sähköverkkoaan siten, että sähkön siirto ja jakelu sekä ovat että pysyvät hyvänlaatuisina, luotettavina ja varmoina myös ennalta odotettavissa häiriötilanteissa (588/2013, 19 §). Laadulla, luotettavuudella ja varmuudella tarkoitetaan käytännössä sitä, että jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumen takia ei saa aiheuttaa verkon käyttäjille yli kuuden tunnin keskeytystä asemakaava-alueilla tai yli 36 tunnin keskeytystä muilla alueilla (588/2013, 51 §). Lisäksi sähkömarkkinalaissa asetetaan jakeluverkon haltijalle velvollisuus laatia kehittämissuunnitelma verkon siirtokapasiteetin ylläpitämiseen ja kasvattamiseen vaadittavista toimenpiteistä ja investoinneista (588/2013, 52 §). Sähkömarkkinalain 51 §:n vaatimusten tuli täytyä vuoden 2023 loppuun mennessä vähintään kolmella neljästä jakeluverkon haltijan vastuualueen sähkökäyttäjistä pois lukien vapaa-ajan asunnot. Siirtymäaika voi olla pidempikin, vuoden 2036 loppuun, mikäli verkonhaltijan vastuualueen keskijänniteverkon maakaapelointiaste oli vuoden 2018 lopussa enintään 60 %. Tällöinkin lain vaatimusten tulee täytyä 75 %:lla sähkökäyttäjistä vapaa-ajan asunnot pois lukien vuoden 2028 loppuun mennessä. (588/2013, 119 §.) Nimenomaan keskijänniteverkon viat edustavat suurinta osuutta sähkönjakelun häiriöistä: yli yhdeksässä tapauksessa kymmenestä sähkökäyttäjien kokeman keskeytyksen syy on keskijänniteverkossa tapahtunut vika (Lakervi & Partanen 2009, 125).

Jakeluverkon kehittäminen lain vaatimaan suuntaan on johtanut erityisesti maakaapeloinnin suosion kasvuun siirtoyhteyksissä. Esimerkiksi keskijänniteverkkojen maakaapelointiaste, eli maakaapeloidun verkon suhteellinen osuus verkon kokonaispituudesta, liki kaksinkertaistui Suomessa vuosina 2016–2020. (Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus 2020 2021, 40–43.) Maakaapeleiden suojaustoiminnot ja -laitteet ovat kuitenkin monimutkaisempia ja haastavampia kuin ilmajohdoilla. Kaapeloidun verkon suojaus vaatii suurempaa herkkyyttä kuin vastaavan ilmajohdon. Lisäksi tulotaan tekevät älykkäät sähköverkot, energiantuotannon hajautuminen ja tehonsyötön suunnan vaihtelut aiheuttavat jakeluverkon suojaukselle paitsi paljon uusia haasteita myös mahdollisuuksia. (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 1.)

Jyväskylän ammattikorkeakoulun hankkeena vuosina 2021–2023 oli sähköverkkojen suojausten **tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoimintaympäristön**, lyhyesti **TKI**, perustaminen. Tämän TKI-ympäristön tarkoituksena oli toimia sähköverkkojen suojauksessa käytettävien suojalaitteiden ja

suojausfunktioiden tutkimisessa ja koestamisessa, niihin liittyvien data-analytiikkaratkaisujen kehittämisessä sekä aihealueen osaamisen parantamisessa. (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 1.) Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja sen edustajana myös työn käytännön toteutusta ohjannut lehtori Pasi Puttonen.

TKI-ympäristön oleellinen osa oli laiteympäristön verkkomalli, joka on eräänlainen todellisenkaltaisen 110/20 kV:n jakeluverkon pienoismalli. Verkkomallin tarkoituksena oli toimia ja käyttäytyä samalla tavalla kuin vastaava todellinen jakeluverkko. Mallin avulla verkon tilan havainnointi, erilaiset mittaukset, suojausten tutkiminen ja koestaminen sekä data-analytiikka voidaan kaikki toteuttaa turvallisesti yhdessä paikassa ilman syötön keskeytymisen aiheuttamista todellisiin verkkoihin.

TKI-ympäristö tuo Jyväskylän ammattikorkeakoululle sekä hankkeen yhteistyökumppaneille käyttöön laitteiston ja osaamisen sähköverkon suojalaitteiden testaamiseen, tietoa ja tuloksia suojauksista ja niiden koestuksesta, tietoa ja tuloksia suojalaitteiden keräämän häiriötilanteiden datan hyödyntämisestä häiriötilanteissa sekä verkostoitumista yritys- ja osaajatasolla. Työelämän kehittämisen kannalta erityisen merkittävää on TKI-ympäristön tuoma helpotus Keski-Suomen alueen osaajapulaan ja nopeasti kasvuun lähtevä osaamisomavaraisuus sähköverkon suojauksen ja häiriötilanteiden analysoinnin alalla. (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 1.)

Sähköverkkojen suojausmenetelmät etenevät yhä enenevässä määrin ja yhä monimutkaisempiin laitteistoihin ja teknisiin toteutuksiin. Kokonaishankkeen tarkoituksena on ratkaista valtakunnallisen tasolla havaittu osaamisvaje ammattitaitoisessa sähköjakelun suojausten suunnittelussa, ohjelmoinnissa ja koestuksessa (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 2). Ei pelkästään Keski-Suomen, vaan koko Suomen osaamisomavaraisuuden kasvattaminen on korostunut viime aikoina maailmanlaajuisen energiapolitiikan kiristymisen ja Euroopan muuttuneen turvallisuustilanteen myötä. Erityisesti kriisitilanteessa on tärkeää, että myös sähköteknisen osaamisen omavaraisuudella voidaan kattaa koko Suomen tarve. Ulkomaiseen osaamiseen ja tuontiteknologian hyödyntämiseen nojaaminen epävakaa maailmantilanteessa voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta.

2 Kehittämistyön kuvaus

2.1 Työn tavoitteet ja aiheen rajaus

TKI-ympäristön hanke koostui neljästä työpaketista, joista ensimmäinen piti sisällään laiteympäristön perustamisen. Työpaketin tavoitteena oli saada aikaan valmis ja testattu sähköverkon TKI-ympäristö laitteineen ja osaamisineen. Loput kolme työpakettia sisälsivät TKI-ympäristön hyödyntämistä suojalaitteiden koestuksessa, suojalaitteiden keräämän datan analysointia ja hyödyntämistä sähköverkkojen suojauksessa, tietopakettien laatimista, yritys- ja asiantuntijaverkoston muodostamista sekä hankkeen yleistä hallinnointia. Seuraavassa listassa on lueteltu eri työpaketit sisältöineen. (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 5–7.) Opinnäytetyöprojektin aikaiset ja työn aiheeseen liittyvät kohdat on tummennettu:

1. Työpaketti 1: ”laiteympäristön perustaminen”
 - a. **laiteympäristön määrittely**
 - b. **laiteympäristön suunnittelu ja integrointi toimivaksi kokonaisuudeksi**
 - c. laiteympäristön rakentaminen ja integraation toteutus
 - d. JYVSECTECin RGCE kyberturvallisuuden testausympäristön ja TKI-laitteiston yhteiskäytön tarpeen ja teknisten mahdollisuuksien selvittäminen
 - e. laiteympäristön käyttöönotto
 - f. **laiteympäristön monipuolinen testaus ja pilotointi; puutteiden havaitseminen ja korjaaminen**
 - g. kehitetyn laiteympäristön esittely alan toimijoille
 - h. **laiteympäristön hyödynnettävyyden ja jatkokehityskohteiden arviointi**
2. Työpaketti 2: ”data-analytiikka”
 - a. vikatallenteiden data-analyysin tutkimussuunnitelman laatiminen
 - b. analysoitavan tiedon valinta ja kerääminen
 - c. yrityskumppaneilta saadun todellisten normaali- ja vikatilanteiden datan tutkimus ja analysointi; data-analyysin kehittäminen
 - d. datan rikastamisen mahdollisuuksien selvittäminen häiriötilanteiden nopeampaan selvittämiseen tai ennakointiin
 - e. data-analytiikan ja tiedonkeruun käytännön toteutusmahdollisuuksien selvittäminen
3. Työpaketti 3: ”osaamisen kasvattaminen”
 - a. uusien suojalaitteiden, niiden ominaisuuksien, ohjelmoinnin ja koestamisen tietopakettien laatiminen
 - b. vikatilanteiden analysoinnin tietopakettien laatiminen
 - c. alan toimijoille tiedottaminen eri vaiheiden tuloksista ja tietopaketeista
4. Työpaketti 4: ”hallinnointi”
 - a. hankkeen johtaminen, seuranta ja hallinnointi
 - b. ohjausryhmän kokoukset
 - c. projektin toteutumisen raportointi rahoittajalla ja ohjausryhmälle
 - d. yritysysteistyön edistäminen ja verkostoituminen yritysten kanssa

- e. projektiryhmien muodostaminen ja kokoukset
- f. tiedottaminen hankkeesta ja sen toiminnasta
- g. tulosten ja hyvien käytänteiden levittäminen
- h. palautteen kerääminen ja hankkeen arviointi
- i. loppuraportin laatiminen jatkotoimenpide-ehdotuksineen

Opinnäytetyön aihetta rajattiin siten, että siihen sisältyi TKI-hankkeen neljästä työpaketista vain ensimmäinen ja siitäkin vain osia; ensimmäistä työpakettia rajattiin lisäksi siten, että laiteympäristön rakentaminen, käyttöönotto, monipuolinen testaus ja pilotointi sekä esittely alan toimijoille jätettiin kokonaan opinnäytetyön ulkopuolelle. Rajauksen perusteena olivat hankkeen aikataulu ja laajuus: Pelkästään ensimmäisen työpaketin kokonaisuuden valmistumiseen arvioitiin projektin alussa kuluvan kaksi vuotta siten, että se ajoittuisi keväälle 2023 (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 6). Rajauksen sisäpuolelle jääneet aiheet, eli laiteympäristön suunnittelu ja integroiminen toimivaksi kokonaisuudeksi, olivat aikataulullisesti saavutettavissa vuodessa tai kahdessa, ja niiden sisältö oli tutkinto-ohjelman osaamiskuvaukseen sopiva ja riittävä (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 5–6; Sähkö- ja automaatiotekniikka (AMK) n.d.). Myös laiteympäristön rakentaminen rajattiin opinnäytetyön ulkopuolelle, sillä se oli enemmänkin valmista suunnitelmaa ja piirustuksia seuraavaa käytännön työtä kuin tutkimus- tai kehittämistoimintaa.

2.2 Tutkimuskysymykset

TKI-hankkeen ensimmäisestä työpaketista muodostui luvussa 2.1 kuvatuin rajauksin opinnäytetyö, joka oli tyypiltään kehittämistyö. Sen päätavoitteina oli tutkia, miten TKI-ympäristöön rakennettava verkkomalli simuloidaan tietokoneohjelmistoa käyttäen. Välissä verkkomalli rakennettiin ja saatettiin käyttökuntoon, mikä siis rajattiin opinnäytetyön ja sen raportoinnin ulkopuolelle. Valmiin ja toimivan verkkomallin avulla viimeisteltiin kehittämisiongelman tutkiminen mittauksilla. Tulosten perusteella muodostettiin johtopäätökset siitä, miten hyvin tavoitteisiin päästiin eli vastasivatko simulaatioiden tulokset mitattuja tuloksia ja laskelmia. Edellä lueteltujen työvaiheiden perusteella muodostuivat opinnäytetyön kehittämisiongelman **tutkimuskysymykset**:

- Miksi TKI-laiteympäristöä tarvitaan?
- Mitä laiteympäristöllä saavutetaan?
- Miten laiteympäristön simulointi ja mittaukset toteutetaan?
- Miten hyvin tulosten perusteella tavoitteisiin päästiin?

Opinnäytetyön konkreettisina tuloksina syntyivät tietokonesimulaatiot laiteympäristön verkkomallista, simulaation tuottamat tulokset verkosta eri vikatilanteissa, valmiista verkkomallista saadut mittaustulokset verkon eri vikatilanteista sekä johtopäätökset simulaatiotulosten vertailusta vastaaviin mitattuihin tuloksiin ja laskelmiin.

2.3 Tiedonhaku

Taulukko 1. Tiedonhaun keskeiset osakokonaisuudet, käsitteet ja niihin liittyvät hakusanat

Osakokonaisuus	keskeiset käsitteet	hakusanat
TKI-hankkeen tavoitteet, tarpeet ja motivaatio	osaamisvajeen parantaminen	- osaaminen* - ammattitaito* - kehitys*
	lait ja asetukset: sähköverkot ja -markkinat	- sähkömarkkinalaki*
Tutkimuksellinen kehittämistoiminta	kehittämisprosessi	- kehittämisprojektit* - kehittäminen* - tutkimus- ja kehittämistoiminta* - innovaatiotoiminta*
	ongelmanasettelun ratkaisumenetelmät	- ongelmanratkaisu*
Sähkövoimatekniikka	keskijänniteverkon laitteet ja komponentit	- vaihtosähkö* - voimansiirto* - sähkönsiirto*
	keskijänniteverkon vikatyypit	- sähkötekniikka* - sähkölaitostekniikka* - sähköverkkotekniikka - vikasuojaus - keskijännite
	suojaukset	- suojaus*
	laitteiden ja komponenttien mallinnus	- mallintaminen* - sähköverkkomalli
Eettisyys ja luotettavuus	eettisten periaatteiden toteutuminen	- eettisyys*
	tulosten luotettavuuden arviointi	- luotettavuusanalyysi* - reliabiliteetti* - validiteetti*

Asteriskilla (*) merkityt asiasanat ovat YSO-hakusanoja.

Sekä teoreettisen että käytännöllisen tietoperustan luotettava rakentaminen vaati alkutietoja ja tiedonhankintaa. Tässä opinnäytetyössä tiedonhaku toteutettiin prosessimaisesti. Tiedonhaun prosessi on kuvattu esimerkiksi Tampereen yliopiston kirjaston tiedonhaun oppaassa (2022). Tiedonhaun ensimmäinen askel, aiheen valinta, oli jo valmis luvun 2.1 mukaisesti. Seuraava askel oli hakusanojen muotoilu aiheen jäsentelyn perusteella. Hakusanojen avulla tehtiin hakuja jatkuvalla reflektoinnilla: hakujen onnistumista ja tuloksia arvioitiin ja sen perusteella tarvittaessa muokattiin hakusanoja. Kun sopiva aineisto oli löytynyt ja paikallistettu, se oli valmis hyödynnettäväksi opinnäytetyössä. Aineiston hyödyntämisessä oli ehdottomasti noudatettava eettisiä periaatteita, joihin

palataan luvussa 2.4. Tiedonhaku ei välttämättä edennyt koko ajan edellä kuvatussa järjestyksessä; vaiheet saattoivat limittyä toisiinsa ja edetä eri järjestyksessä. Lisäksi tiedonhauille oli ominaista prosessissa esiintyvä epävarmuus ja siitä johtuva peruutusaskeleiden ottaminen. (Tiedonhaun opas: Tiedonhaku prosessina 2022.)

Opinnäytetyön aihe jäseneltiin tiedonhaun näkökulmasta taulukossa 1 esitettyihin osakokonaisuuksiin: hankkeen tavoitteet, tarve ja motivaatio, tutkimuksellinen kehittämistoiminta, sähkövoimatekniikka sekä eettisyyden ja luotettavuuden arviointi. Eri osakokonaisuudet jakautuivat edelleen tiedonhaun kannalta keskeisiin käsitteisiin, joiden perusteella hakusanat muotoiltiin. Myös osakokonaisuuksien tiedonhaun kannalta keskeiset käsitteet ja niihin liittyvät hakusanat on listattu taulukossa 1. YSO-hakusanat ovat Kansalliskirjaston Finto-palvelun yleisen suomalaisen ontologian mukaisia asiasanoja (Finto: YSO - Yleinen suomalainen ontologia 2022). Hakusanoista muodostettiin edelleen monipuolisempia hakulausekkeita esimerkiksi yhdistelemällä hakusanoja toisiinsa.

Oleellisena osana simulaatioiden luotettavuuden arviointia olivat Neplan-ohjelmistolla tehdyt verkon vikavirtojen laskelmat. Nämä Neplan-laskelmat toimivat vertailukohtina simulaatiotuloksille. Todellisen verkon laskelmat olivat toimeksiantajan edustajan Pasi Puttosen tekemät (Puttonen 2022). Verkkomallin laskelmien viimeisimmät tulokset olivat Rejlers Finland Oy:n Ismo Ahon laatimat ja toimeksiantajan edustajan kautta toimitetut (Puttonen 2024).

2.4 Eettisyys

Kehittämistyön tavoitteiden asettamisessa oli käytettävä korkeaa moraalialia (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2015, 48). Moraalikysymykset ovat kuitenkin luonteeltaan lähtökohtaisesti jokaisen omia subjektiivisia kokemuksia. Oli siis perusteltua pohtia moraalikysymyksiä vain ns. yleisesti hyväksytyissä tavoitteissa pysymisen osalta. Ammattitaitoisen osaamisen vajetta paikkaavan ja sähkönsäätelyn luotettavuuden parantamiseen tähtäävän TKI-ympäristön kehittämistavoitteita voitaneen yleisesti pitää tällaisena suuntana.

Eettisesti kestävä kehittäminen, siitä laadittava raportti sekä työn arviointi piti toteuttaa rehellisesti, huolellisesti ja tarkasti (Ojasalo ym. 2015, 48; Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet 2018, 4). Rehellisyys toteutui, kun huolehdittiin siitä, että kehittämistyössä ja sen raportoinnissa vältettiin sekä toisten että omien tekstien plagiointia, tulosten kritiikitöntä yleistämistä,

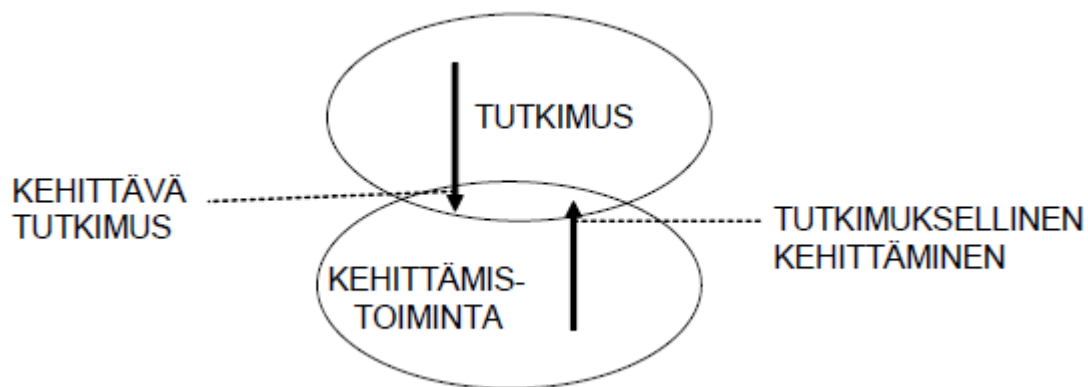
puutteellista tai harhaanjohtavaa raportointia ja määrärahojen väärinkäyttöä (Ojasalo ym. 2015, 49). Lisäksi osana rehellisyyden toteutumista oli muiden tutkijoiden ja asiantuntijoiden töiden ja saavutusten asianmukainen tunnustus, arvostus ja huomiointi sekä ohjeen mukainen viittaaminen niihin työn tulosten raportoinnissa. Opinnäytetyön tulokset julkaistiin TKI-toiminnan luonteen avoimuutta ja vastuullista viestintää noudattaen. (Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet 2018, 4.) Kehittämistoiminnan ollessa tyypillisesti inhimillistä toimintaa suhtauduttiin mukana olevien muiden osapuolien rajoitteisiin ja vajavaisuuksiin armollisesti (Ojasalo ym. 2015, 48).

Ennen kehittämistyön aloittamista sovittiin yhdessä eri osapuolten oikeudet, vastuut ja velvollisuudet, tekijyyttä koskevat periaatteet sekä aineiston säilyttämisen vastuut ja käyttöoikeudet. Mikäli kehittämistyöhön olisi liittynyt rahoituslähteiden asettamia sidonnaisuuksia, niistä olisi ilmoitettu ja raportoitu tuloksia julkaistaessa. Jos sidonnaisuuksien olisi epäilty asettaneen kehittämistyön tekijöille esteitä TKI-hankkeen mahdolliselle arvioinnille tai päätöksenteolle, myös niistä olisi pidetty. Mahdolliset toimeksiantajan tai hankkeen yhteistyöyritysten liiketoimintoihin liittyneet luottamukselliset tiedot pidettiin salassa. Lopuksi kaikkien sidosryhmien antama palaute otettiin vastaan ja huomioitiin kehittämistyön jatkokehityksessä. (Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet 2018, 4–5.)

2.5 Tutkimuksellisesta kehittämistoiminnasta

Ennen kehittämistyön raportoimista määriteltiin, mitä tarkoitetaan **tutkimuksellisella kehittämistoiminnalla**. Sekä Toikko ja Rantanen (2009, 21) että Ojasalo ja muut (2015, 17) kuvaavat tutkimuksellista kehittämistoimintaa käsitteenä, joka kuuluu tieteellisen tutkimuksen ja kehittämistoiminnan väliin. Toikon ja Rantasen (2009, 21) mukaan tutkimuksellinen kehittämistoiminta on paljon liikkumavaraa sisältävä yleiskäsite, joka kuvaa kuvion 1 mukaista tutkimuksen ja kehittämistoiminnan risteyskohtaa. Tutkimukselliseksi kehittämistoiminnaksi voidaan siis tätä ajatusta ja kuvion 1 Venn-diagrammia tulkiten lukea kaikki sellainen toiminta, jossa on elementtejä sekä tutkimuksesta että kehittämistoiminnasta. Tutkimuksen ja kehittämistoiminnan risteystä voidaan lähestyä kummastakin suunnasta: joko tutkimuksen suunnasta, jolloin puhutaan kehittävästä tutkimuksesta tai kehittämistoiminnan suunnasta, jolloin puhutaan tutkimuksellisesta kehittämisestä (Toikko & Rantanen 2009, 21). Kehittävän tutkimuksen suuntauksessa ajattelun logiikka lähtee liikkeelle sekä tutkimuskysymysten asettelusta että menetelmien perusteiden ja oletusten tutkimisen

tarkasteluista päätyen lopulta konkreettiseen kehittämistoimintaan. Tutkimuksellisen kehittämisen tapauksessa puolestaan käytännön ongelmat ja kysymykset ovat tiedontuotannon ohjaajia siten, että pääpaino pysyy kehittämistoiminnassa ja tutkimukselliset periaatteet ovat vain apuvälineitä. (Toikko & Rantanen 2009, 21–22.) Tässä opinnäytetyössä kallistuttiin enemmän tutkimuksellisen kehittämisen suuntaukseen, sillä työn keskiössä olleet TKI-hankkeen ensimmäisen työpakettin tavoitteet ohjasivat vahvasti tarvetta tiedontuotannolle. Tutkimuksellisten periaatteiden toteutuminen tuotiin ilmi tutkimuskysymysten tarkalla määrittelyllä, tiedonhaun kuvaamisella ja vastaamalla asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

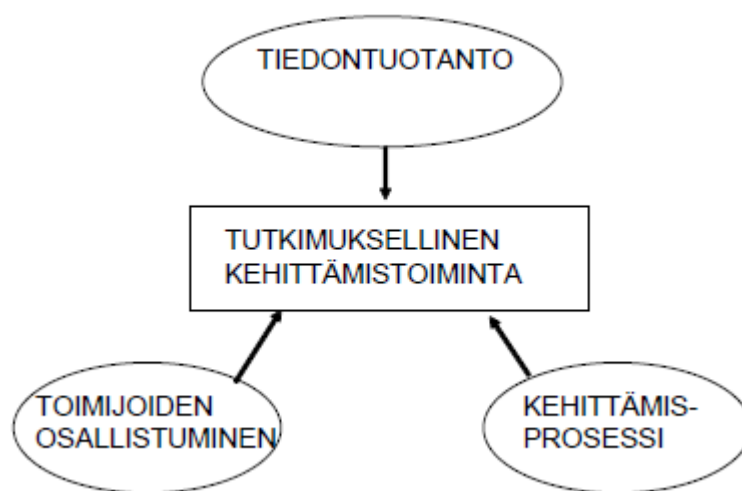


Kuvio 1. Tutkimuksellisen kehittämistoiminnan sijainti tutkimuksen ja kehittämistoiminnan leikkauskohdassa (Toikko & Rantanen 2009, 21)

Ojasalo ja muut (2015, 17–18) käyttävät tutkimuksellisesta kehittämistoiminnasta nimitystä **tutkimuksellinen kehittämistyö**. Käsite asetetaan välimalliksi jatkumoon, jonka yhtä ääripäätä edustaa tieteellinen tutkimus ja toista arkiajatteluun perustuva kehittäminen (Ojasalo ym. 2015, 17). Tämä määritelmä siis kertoo tutkimuksellisesta kehittämistyöstä myös sen kautta, mitä se ei ole: Se ei ole puhtaasti vailla kritiikkiä olevaa henkilökohtaista mielipidekeskustelua eikä toisaalta myöskään täysin käytännön arkielämän sovellukset unohtavaa mittausdatan systemaattista hankintaa.

Ojasalon ja muiden (2015, 18) mukaan tieteellinen tutkimus on teoreettista, uutta tietoa luovaa, tieteenfilosofisia kysymyksiä pohtivaa, yleisesti hyväksytyjä menetelmiä käyttävää ja teoreettisen viitekehysten sanelemaa. Siinä tutkijan ja tutkittavan kohteen välinen vuorovaikutus tutkimuskohteeseen jää samalla vähäiseksi. Arkiajatteluun perustuva kehittäminen taas lähtee liikkeelle käytännön ongelmasta tai käytänteiden päivittämisestä, kerää tietoa sattumanvaraisesti käytännöstä

ja teoriasta ja päätyy ratkaisuihin, jotka ovat heikosti, jos ollenkaan, perusteltuja ideoita, joihin suhtaudutaan vain vähäisellä kritiikillä. Myös arkiajatteluun perustuvassa kehittämisessä vuorovaikutus toimijoiden ja käytännön ongelman välillä on vähäistä. Tutkimuksellinen kehittämistyö puolestaan lainaa piirteitä kummastakin ääripäästä: Lähtökohtana on useimmiten käytännön ongelman tai uudistamistarpeen ratkaisu, mutta samalla luodaan uutta tietoa työelämän käytännöistä. Tietoa haetaan sekä käytännöstä että teoriasta arvioiden sitä samalla systemaattis-kriittisesti. Menetelmien käyttö on monipuolista. Tutkimuksellinen kehittämistyö eroaa em. ääripäistä siten, että se korostaa aktiivista vuorovaikutusta eri tahojen välillä. (Ojasalo ym. 2015, 18.)



Kuvio 2. Eri näkökulmat tutkimukselliseen kehittämistoimintaan (Toikko & Rantanen 2009, 10)

Tutkimuksellisen kehittämistoiminnan kuvauksen lisäksi oli syytä perustella opinnäytetyön näkökulma tutkimukselliseen kehittämistoimintaan. Toikko ja Rantanen (2009, 10–11) listaavat kuviossa 2 esitetysti kolme vaihtoehtoista näkökulmaa: tiedontuotanto, toimijoiden osallistuminen tai kehittämisprosessi. Tämän opinnäytetyön näkökulmaksi tutkimukselliseen kehittämistyöhön valikoitui nimenomaan kehittämisprosessi. Toikko ja Rantanen (2009, 10) kuvailevat kehittämisprosessin näkökulmaa vaihemallien avulla. Ensimmäisenä vaiheena kehittämisprosessissa on toiminnan perustelu ja organisointi, joiden jälkeen siirrytään toteutusvaiheeseen. Viimeisessä vaiheessa projekti arvioidaan. (Toikko & Rantanen 2009, 10.) Opinnäytetyöprojektin kehittämistoiminnan lähtökohtana oli toiminnan perustelu ja projekti eteni prosessimaisesti toteutusvaiheesta toiseen päätyen lopulta arviointiin. Kehittämisiongelman mukaiset, luvussa 2.2 esitetyt tutkimuskysymykset vastasivat siis lähes täsmälleen kehittämisprosessin eri vaiheita.

Toisaalta uutta luoville prosesseille on ominaista jonkinasteinen ennalta-arvaamattomuus, minkä vuoksi kehittämisprosessin kulkua on jatkuvasti ohjailtava (Toikko & Rantanen 2009, 10). Ei siis ollut aiheellista tuudittautua prosessin kulun järkähtämättömyyteen pelkästään näkökulman valitsemisen jälkeen tai suunnitelmien valmistuttua. Kehittämisprosessi vaati myös joitain suunnan ja sisällön muutoksia projektin edetessä.

Toimijoiden osallistumisen näkökulmalle ominaista on tekijän osallistuminen konkreettiseen toimintaan ja dialogiin käytännön toimijoiden kanssa (Toikko & Rantanen 2009, 10–11). Opinnäytetyön rajauksen vuoksi tämä ei kuitenkaan olisi toteutunut, vaikka projektin aikana ja sen tuloksena syntyikin hankkeen kehittämisen kannalta hyödynnettävää tietoa hankkeen käytännön toimijoille. Sen vuoksi toimijoiden osallistumista ei valittu tämän kehittämistyön näkökulmaksi.

Tiedontuotannon näkökulmasta tutkiva työote, tutkimusmenetelmien ja -asetelmien hyödyntäminen sekä kehittämisen ilmiöiden käsitteellistäminen tuovat lisäarvoa kehittämistoiminnan tulosten käyttökelpoisuudelle ja siirrettävyydelle (Toikko & Rantanen 2009, 11). Tiedontuotannon näkökulma on siis sitä, että tutkimuksellinen kehittämisprojekti voidaan toistaa tarvittaessa seuraavissa projekteissa. Tätä näkökulmaa ei valittu opinnäytetyöhön, vaikka se olikin yksi kokonaishankkeen kuvauksessa määritellyistä yleishyödyllisistä tavoitteista (KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö 2021, 4). Suurin osa hankkeen eri toimijoita kiinnostavasta ja hyödyttävästä kehitystoiminnasta nimittäin jäi opinnäytetyön aiheen rajauksen ulkopuolelle. Lisäksi opinnäytetyön tavoitteena ei ollut saada aikaan käyttöohjetietoa tai mallisuoritusta, joilla vastaavia kehitysprojekteja voitaisiin jatkossa toteuttaa.

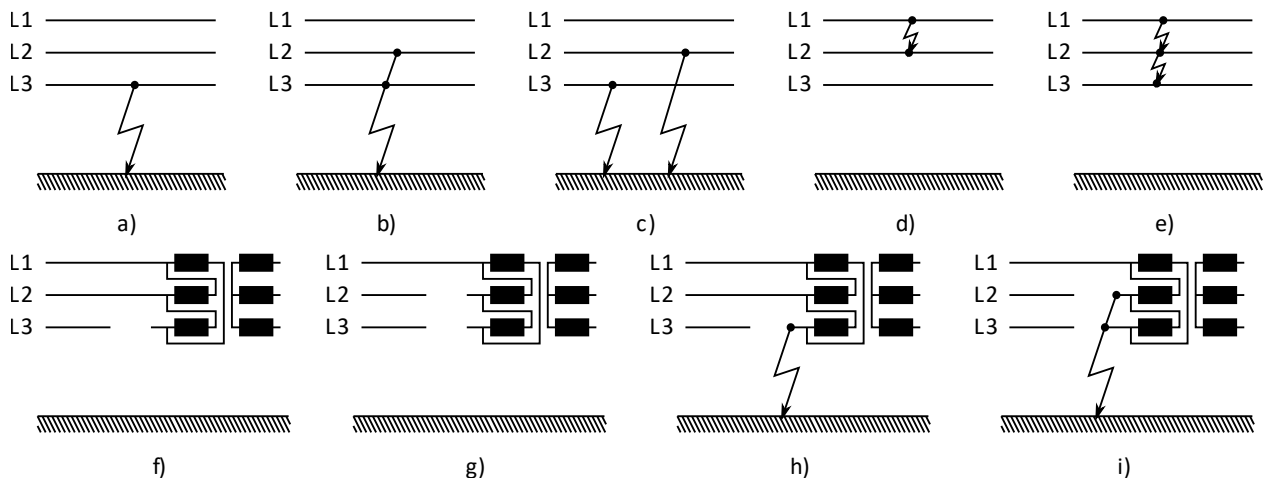
3 Keskijänniteverkon viat ja vikasuojaus

3.1 Vikatyypit

3.1.1 Vikatyypien luokittelua

Sähköverkkoon saattaa syntyä vika esimerkiksi salamaniskun tai verkon sisäisen syyn aiheuttamasta ylijännitteestä, laitteiden toimintahäiriöistä ja virhetoiminnoista tai verkkoon kuuluvien osien eristyskyvyn huonontumisen takia. Verkon vika johtaa pahimmillaan häiriötilanteeseen, joka havaitaan sähkönjakelun katkeamisena joko osittain tai täysin. Sähkönjakelun täydellinen katkeaminen on valitettavan mahdollista säteittäisissä verkoissa, jollaisia keskijänniteverkot yleensä ovat.

(Elovaara & Haarla 2011a, 166; Lakervi & Partanen 2009, 125.) Sähköverkkojen tavallisimmat viat voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: **oikosulkuihin**, **maasulkuihin** ja **katkoksiin**. Viat voivat olla myös näiden päätyyppien yhdistelmävikoja. (Elovaara & Haarla 2011a, 166–167.) Erilaisia keskijänniteverkon vikatapauksia on havainnollistettu kuviossa 3.



Kuvio 3. Joitain keskijänniteverkon tyypillisiä vikoja: a) yksivaiheinen maasulku, b) kaksivaiheinen maa-oikosulku, c) kaksivaiheinen maasulku, d) kaksivaiheinen oikosulku, e) kolmivaiheinen oikosulku, f) yksivaiheinen johdinkatkos, g) kaksivaiheinen johdinkatkos, h) yksivaiheinen johdinkatkos ja maasulku kuorman puolella, i) kaksivaiheinen johdinkatkos ja maasulku kuorman puolella

Salamanisku itsessään ei ole vikatilanne, mutta se saattaa aiheuttaa useamman tyyppisiä muita vikoja ilmajohtoilla. Tyypillisin salamaniskun aiheuttama vika on yksivaiheinen maasulku avojohdolla. Tällainen vika saattaa myös levitä edelleen kaksi- tai kolmivaiheiseksi maasuluksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 339.)

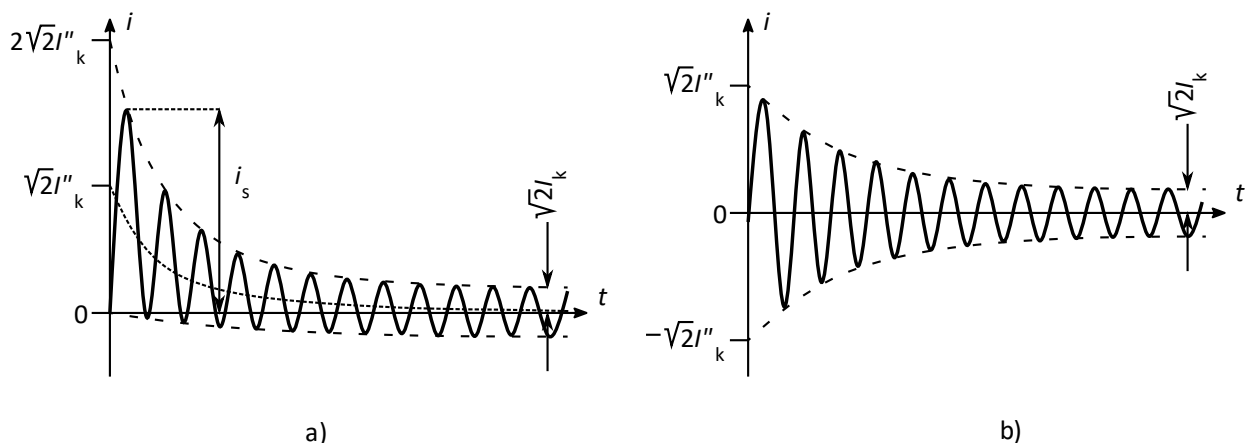
Sähköverkon muuntajat, generaattorit, kondensaattorit, reaktorit ja moottorit suojataan ylikuormitusta vastaan, sillä ylikuormitus voi aiheuttaa verkon komponenttien ylikuumentumista ja vaurioitumista. (Elovaara & Haarla 2011b, 342.) Ylikuormitus ei kuitenkaan varsinaisessa mielessä ole vikatilanne, joten sen käsittely sivuutetaan tässä työssä.

Vikatapaukset voidaan edellisten lisäksi luokitella joko **rinnakkais-** tai **sarjavioiksi**. Rinnakkaisvikoja ovat oiko- ja maasulut, ja sarjavikojä ovat johdinkatkokset ilman maasulkua (Elovaara & Haarla

2011b, 340–341). Rinnakkaisviat voidaan edelleen luokitella joko **symmetrisiksi** tai **epäsymmetrisiksi vioiksi**. Vika on symmetrinen, jos sen pääasialliset vaikutukset kohdistuvat kaikkiin kolmeen vaiheeseen samalla tavalla. Symmetrisiä vikoja ovat esimerkiksi kolmivaiheiset oikosulut. Epäsymmetrisessä viassa vian vaikutukset puolestaan kohdistuvat eri tavoin eri vaiheissa. Tällaisia vikoja ovat esimerkiksi yksi- ja kaksivaiheiset oikosulut ja maasulut sekä niiden yhdistelmäviat. (Elovaara & Haarla 2011a, 166–167.)

3.1.2 Oikosulku

Oikosulut ovat kolmivaihejärjestelmän eri vaiheiden välisiä vikoja, joissa johtimet eivät kosketa tai ole muussa johtavassa yhteydessä maahan. Johtimien välinen oikosulku voi syntyä esimerkiksi valokaaren kautta. Oikosulkujen tyypillinen piirre ovat suuret vikavirrat ja jännitteen pieneneminen vikakohdassa. Oikosulkuun joutunut komponentti tai verkon osa on erotettava muusta verkosta. (Elovaara & Haarla 2011b, 339–340.)



Kuvio 4. Yhden vaiheen induktiivisen oikosulkuvirran käyttäytyminen ajan funktiona: a) epäsymmetrinen oikosulkuvirta, b) symmetrinen oikosulkuvirta

Oikosulun aikana sähköverkkoa voidaan yleisesti, joitakin kapasitanssin avulla sarjakompensoituja verkkoja lukuun ottamatta, pitää induktiivisena impedanssina, jolloin oikosulkuvirta on lähes puhtaasti induktiivista loisvirtaa. Ajallisesti oikosulkuvirta käyttäytyy kuvion 4 mukaisesti. Jännitteen hetkellisarvosta riippuen oikosulun syntymishetkellä sähkövirtaan jää tasavirtakomponentti, joka vaimenee eksponentiaalisesti verkon ominaisuuksien määräämän aikavakion mukaisesti. Tällöin puhutaan epäsymmetrisestä oikosulusta. Tätä vaimenevaa tasavirtakomponenttia kuvaa kuviossa

4a laskeva pisteiviiva, jonka ympärillä oikosulkuvirta vaihtelee sinimuotoisesti. Mikäli tasavirtakomponentti on nolla, virta käyttäytyy kuvion 4b mukaisesti, ja puhutaan symmetrisestä oikosulkuvirrasta. Kolmivaihejärjestelmän oikosuluissa ainakin kahden vaiheen virroissa on aina mukana tasavirtakomponentti. (Elovaara & Haarla 2011a, 171.) Molemmissa kuviossa 4a ja 4b katkoviivalla piirretyt käyrät kuvaajien ylä- ja alapuolella ovat ns. verhoikäyriä, jotka kuvaavat virran hetkellisiä maksimi- ja minimiarvoja.

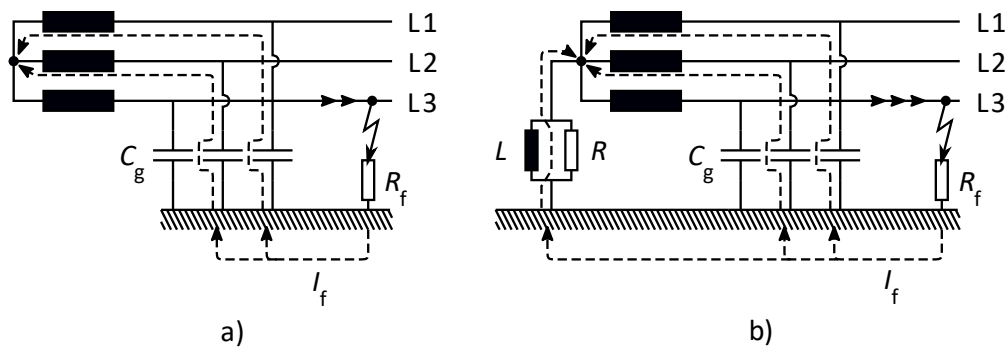
Oikosulkuvirran aikariippuvuuden tarkastelussa tavallisimmat tarkkailuarvot ovat **alkuoikosulkuvirran** tehollisarvo I''_k , **muutosoikosulkuvirran** tehollisarvo I'_k , **jatkuvan tilan oikosulkuvirran** tehollisarvo I_k sekä **sysäyoikosulkuvirta** i_s , joka on muista edellä mainituista poiketen oikosulkuvirran hetkellinen arvo. (Elovaara & Haarla 2011a, 171–174.) Kuvioon 4 on merkitty nuolin alkuoikosulkuvirran ja jatkuvan tilan oikosulkuvirran tehollisarvot sekä sysäyoikosulkuvirta siten, kuin ne voi graafisen esityksen avulla selvittää.

Oikosulkuvirran lisäksi mielenkiintoinen suure on verkon **oikosulkuteho** S_{kQ} . Mikäli tiedetään esimerkiksi verkon jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_k , määritetään verkon jatkuvan tilan oikosulkuteho normaalin kolmivaiheisen näennäistehon tapaan:

$$S_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k, \quad (1)$$

jossa U on verkon pääjännitteen tehollisarvo ennen vian alkua vallinneessa tilanteessa. U on siis useimmiten verkon nimellijännite. (Elovaara & Haarla 2011a, 177.)

3.1.3 Maasulku



Kuvio 5. Maasulkuvirran I_f kulkureitti vikapaikasta verkon tähtipisteelle: a) maasta erotetussa verkossa, b) sammutetussa verkossa

Ennen maasulun määrittämistä on paikallaan selvittää ternejä, joilla kuvataan eri tavoin maadoitettuja sähköverkkoja. Mikäli valtaosa sähköverkon generaattorien ja muuntajien tähtipisteistä on kytketty maahan joko suoraan tai virtaa rajoittavan impedanssin kautta, on kyseessä **maadoitettu verkko**. Tähtipisteiden suoraa maadoittamista käytetään Suomessa kuitenkin vain pienjänniteverkoissa. (Elovaara & Haarla 2011a, 211.) Suomen maaperän suhteellisen heikkojen maadoitusolosuhteiden vuoksi yleisimmät keskijänniteverkon maadoitustavat ovat joko **maasta erotettu verkko** tai ns. **sammutettu verkko** (Elovaara & Haarla 2011a, 210; Lakervi & Partanen 2009, 182). Kuviossa 5 on havainnollistettu näiden kahden maadoitustavan eroja. Vaihejohtimien ja maan välissä olevat kondensaattorit, joiden jokaisen kapasitanssi on C_g , kuvaavat johtimien **maakapasitansseja**. (Elovaara & Haarla 2011a, 210–211; Lakervi & Partanen 2009, 183–185.) Vaihejohtimien ja maan välisten kapasitanssien määrittämiseen palataan myöhemmin luvussa 4.3.1.

Maasulut ovat vikoja, joissa maa joutuu osaksi virtapiiriä joko suoraan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan laitteiston osan kautta. Maasulku voi syntyä esimerkiksi johtimen eristysvian seurauksena. Maasulussa vikavirran, eli **maasulkuvirran**, haitallisuus riippuu paljolti verkon maadoitustavasta ja koosta. Maadoitetuissa verkoissa maasulun aiheuttama valokaari ei sammu itsestään, ja vikapaikkaan maahan muodostuu hengenvaarallisia jännitteitä. Myös tulipalon mahdollisuus on suuri maadoitetun verkon maasulkupaikassa. Tämän vuoksi maadoitetun verkon maasulussa viikaantunut komponentti tai verkon osa on erotettava muusta verkosta. Sammutettujen verkkojen ja pienten maasta erotettujen verkkojen maasulkuvirrat puolestaan jäävät niin pieniksi, ettei vikaa tarvitse laukaista pois välttämättä ollenkaan ja verkkoa voidaan yhä käyttää normaalisti. (Elovaara

& Haarla 2011b, 339–340.) Tämä aiheuttaa kuitenkin kaksoismaasulun riskin: Yksivaiheinen maasulku saa vaihejännitteet nousemaan terveissä vaiheissa, mikä puolestaan voi saada aikaan eristykseen pettämisen verkon muussa osassa ja edelleen uuden maasulun eri vaihejohtimessa kuin ensimmäinen maasulku. Näin syntynyt kaksoismaasulku on erityisen haitallinen, sillä sen seurauksena maassa alkaa kulkea suuria, jopa oikosulkuvirran suuruusluokkaa olevia virtoja arvaamattomia reittejä pitkin. Etenkin huonosti sähköä johtavassa maaperässä vikavirta pyrkii kulkeutumaan johtavien kanavien, kuten vesijohtoputkien ja telekaapeleiden vaippojen, kautta ja voi tällöin saada aikaan suuriakin vahinkoja. (Elovaara & Haarla 2011b, 342; Lakervi & Partanen 2009, 198.)

Maasta erotetussa verkossa kolmivaihejärjestelmän tähtipisteet ovat kaikkialla verkon alueella eristetty maasta. Maasulkuvirta jää maasta erotetuissa verkoissa hyvin pieneksi, yleensä 5–100 A suuruiseksi. Maasulkuvirran suuruus riippuu päämuuntajan perässä olevan galvaanisesti yhtenäisen verkon maakapasitanssista, joka puolestaan riippuu galvaanisesti yhteen kytkettyjen johtimien pituuksista. (Elovaara & Haarla 2011a, 210; Lakervi & Partanen 2009, 186.) Kuviossa 5a on katkovivoin esitetty vikavirran kulkureitti maasta terveiden vaiheiden L1 ja L2 sekä maan välisten maakapasitanssien kautta päämuuntajan tähtipisteelle ja siitä edelleen vikaantuneen vaiheen L3 kautta vikapaikkaan ja maahan. Usein vikavirta kulkee **vikaresistanssin** R_f kautta. (Lakervi & Partanen 2009, 183.)

Sammutetussa verkossa kolmivaihejärjestelmän tähtipisteen ja maan väliin kytketään **sammutuskuristin** eli **-kela**. Sammutuskuristimen induktanssi L mitoitetaan siten, että verkon maakapasitanssien kautta kulkevien kapasitiivisten virtojen summa on yhtä suuri kuin kuristimen kautta kulkeva induktiivinen virta. Kapasitiivinen ja induktiivinen virta ovat vastakkaisvaiheisia, joten kokonaisvikavirta jää pieneksi tai kumoutuu lähes täysin ja maasulku sammuu itsestään. (Elovaara & Haarla 2011a, 210; Lakervi & Partanen 2009, 184–185.) Sammutuskuristimen on lisäksi hyvä olla säädettävä, jotta verkon maakapasitanssin muuttuessa eri käyttötilanteissa myös induktanssiarvoa voidaan korjata sen mukaisesti. Tällaista säädettävää sammutuskuristinta kutsutaan myös **Petersenin kelaksi**. (Elovaara & Haarla 2011a, 210–211.) Kuviossa 5b sammutuskuristin on kuvattu kelalla, induktanssi L , ja mahdollisella rinnakkaisvastusta kuvaavalla resistanssilla R tähtipisteen ja maan välissä (Lakervi & Partanen 2009, 185).

3.1.4 Katkos

Katkos on vikatilanne, jossa vähintään yhdestä kolmivaihejärjestelmän vaiheesta puuttuu jännite. Katkos voi johtua esimerkiksi johtimen katkeamisesta ilman maasulkua tai katkaisijan toimimisesta vajaanapaisesti eli vain yhden tai kahden vaiheen kytkeytyessä auki. Katkos aiheuttaa kuormituksen epäsymmetrisen virran, joka on useimmiten haitallista kulutuslaitteille. (Elovaara & Haarla 2011b, 341.)

Avojohton johdinkatkoksessa johtimen päät saattavat pudota maahan, jolloin sähköverkon suo-
jauksen näkökulmasta tapaus on sama kuin maasulku vikaresistanssin kautta. Mikäli avojohtimen
pää jää roikkumaan ilmaan tai kytkinlaitteessa tapahtuu yhden vaiheen katkos, ei tilanne ole sen
enempää oikosulku kuin maasulkukaan, joten syöttävän verkon suojaus ei aina toimi. Katkosta var-
ten suojaus toteutetaan kuorman puolella käyttämällä esimerkiksi kolmivaiheista alijänniterelettä.
(Elovaara & Haarla 2011b, 341.) Tässä työssä keskitytään sähköverkkojen oikosulku- ja maasulkuti-
lanteisiin, joten katkosten ja niiden suojausten syvempi tarkastelu sivuutetaan.

3.2 Ylijännitesuojaus

Keskijänniteverkoissa jakelumuuntajat, maakaapelit ja päällystetyt avojohdot, eli ns. PAS-johdot,
suojataan ylijännitteitä vastaan ylijännitesuojilla. Keskijänniteverkon ylijännitesuojina käytetään
joko kipinävälejä tai venttiilisuoja. Venttiilisuoja on yleisin ylijännitesuoja kaikilla jännitetasoilla, ja
modernit metallioksidiventtiilisuoja tai -varistorit ovat suurelta osin syrjäyttäneet vanhat ki-
pinävälisuoja. On olemassa myös ns. yhdistelmäsuojia, joissa on sekä metallioksidisuoja että erilli-
nen kipinäväli. (Elovaara & Haarla 2011b, 237–239; Lakervi & Partanen 2009, 149.)

Kipinävälisuoja käytetään kuitenkin niiden edullisuuden ja yksinkertaisuuden takia yhä jakeluver-
koissa jännitelujuuden koordinointiin alle 200 kVA:n pylväsmuuntamoissa. Kipinävälien yksi suuri
haittapuoli on kipinävälin toiminnasta seuraava maasulku, joka puolestaan aiheuttaa verkon kyt-
kinlaitteiden toiminnan ja etenkin sähkön laatua heikentävän jännitekuopan. (Elovaara & Haarla
2011b, 35–36; Lakervi & Partanen 2009, 149.)

Metallioksidisuoja käytetään alentamaan erityisesti transienttiylijännitteiden, esimerkiksi ukkosen tai kytkentätoimenpiteiden aiheuttamien, voimakkaasti vaimenevien ja lyhytkestoisten jännitteiden suuruutta paikallisesti. Laajemmalla tasolla transienttiylijännitteiden alentaminen on tehokkaampaa panostamalla verkon järjestelmäsuunnitteluun. Venttiilisuojat eivät yleensä myöskään sovi käyttötaajuisten ylijännitteiden rajoittamiseen niiden rajallisen energianpurkamiskyvyn takia. (Elovaara & Haarla 2011b, 11, 237.)

3.3 Oikosulkusuojaus

Sähköverkon oikosulkusuojauksen tavoitteina on estää oikosulkuvirran johdoille ja laitteille aiheuttamat lämpövauriot ja erottaa vikaantunut johto-osa muusta verkosta sekä varmistaa sähköjärjestelmän turvallisuus sen käyttäjille ja ulkopuolisille henkilöille myös vikatilanteissa (Lakervi & Partanen 2009, 176).

Kolmivaihejärjestelmän vioista kolmivaiheinen, vastukseton oikosulku saa aikaan suurimman vikavirran. Tällaisen vian aikana vikavirran suuruus voi olla jopa 10–40-kertainen normaalitilanteen kuormitusvirtaan nähden. (Elovaara & Haarla 2011a, 170.) Tämän vuoksi vian nopea poiskytkentä on ehdottoman tärkeää ihmisten turvallisuuden säilyttämiseksi ja laitteiden rikkoutumisen estämiseksi. Keskijännitejohdoilla suojaus toteutetaan katkaisijalla, jota ohjaa **ylivirtarele, maasulku-rele** ja **jälleenkytkentäreleet** (Lakervi & Partanen 2009, 125).

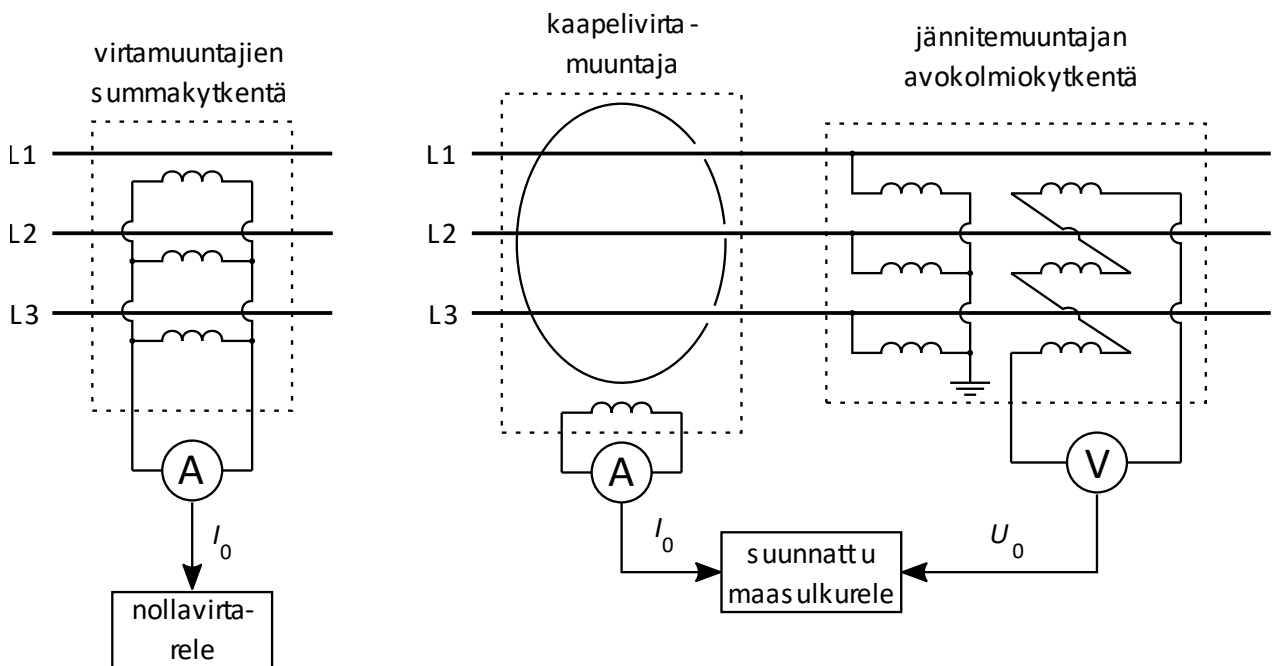
Ylivirtareleen vaihtoehtoina oikosulkusuojauksessa voivat olla myös **distanssirele** tai **differentiaali-rele** (Elovaara & Haarla 2011b, 340). Ylivirtarele sopii käytettäväksi säteittäisissä sähköverkoissa, joissa pienin mahdollinen vikavirta on suurempi kuin suurin kuormitusvirta. Ylivirtarele voi olla toiminnaltaan joko vakioaikahidasteinen tai käänteisaikahidasteinen. Ensin mainitulla toiminnolla rele havahtuu, kun mitattu virta ylittää asetellun arvon ja toimii eli antaa laukaisukäskyn oltuaan havahtuneena tietyn asetetun ajan. Jälkimmäisessä toiminnossa toiminnan hidastusaika on kääntäen verrannollinen mitatun virran suuruuteen. (Elovaara & Haarla 2011b, 346.) Ylivirtarele toimii oikosulkusuojauksen lisäksi keskijännitejohtojen ylikuormitussuojana. Avoijohdoilla havahtumisvirta on tällöin aseteltava siten, että rele havahtuu noin kaksinkertaisella kuormitusvirralla ja verkon loppupään kaksivaiheisen oikosulun vikavirralla. Maakaapeleilla havahtumisvirraksi on aseteltava kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta, paitsi jos kuormittumista valvotaan kaukomittauksen

avulla. Ylikuormitussuojaus ei tietenkään saa häiritä oikosulkusuojauksen toimintaa. (Lakervi & Partanen 2009, 176.)

Distanssireleitä käytetään silmukoiduissa verkoissa havaitsemaan vian lisäksi sen suunta (Elovaara & Haarla 2011b, 348). Näin ollen säteittäiset keskijänniteverkot eivät varsinaisesti kuulu distanssireleiden oikosulkusuojaussovelluksiin. Differentiaali- eli erovirtareleet sitä vastoin ovat erityisen tärkeitä muuntajien suojauksessa ja niitä käytetään myös yksinkertaisten kiskojärjestelmien suojaamiseen. Differentiaalireleellä havaitaan muuntajassa tapahtuvat käämien sisäiset ja väliset oikosulut. Lisäksi se toimii myös muuntajan maasulkusuojauksen osana. Differentiaalireleen toiminta perustuu suojattavaan kohteeseen tulevien ja siitä lähtevien mitattujen virtojen erotukseen. Jos tulo- ja lähtövirtoja mittaavien mittamuuntajien välisellä johdinosuudella tapahtuu vika, ovat mitatut virrat erisuuret. Kun tämä erotus ylittää releen asetteluarvon, rele antaa laukaisukäskyn. Mikäli differentiaalirelettä käytetään johtojen suojaamiseen, vaaditaan johdon päiden mittamuuntajien ja releen välille erillinen viestiyhteys. (Elovaara & Haarla 2011b, 354–355.)

3.4 Maasulkusuojaus

Oikosulkusuojauksen tavoin myös maasulkusuojaus toteutetaan keskijänniteverkoissa katkaisijoilla. Katkaisijan toimintaa ohjaa yleensä sähköasemalla sijaitseva maasulkurele. Toisin kuin oikosulkusuojauksessa, maasulkusuojauksessa ei voida rakentaa yksinomaan ylivirtasuojien käytön varaan. Tämä johtuu siitä, että maasulussa vikavirta jää yleensä hyvin pieneksi. Maasta erotetussa verkossa maasulkuvirta saattaa olla jopa pienempi kuin normaali kuormitusvirta. Maasulun aikana voidaan kuitenkin havaita muita ilmiöitä, jotka kielivät vian olemassaolosta: verkon tähtipisteen ja maan välisen **tähtipiste-** eli **nollajännitteen** U_0 perustaajuinen muutos, vaihejännitteen U_V perustaajuinen muutos, **summa-** eli **nollavirran** I_0 syntyminen, virran ja jännitteen yliaallot sekä suuritaajuiset muutosvirrat. Varsinkin viidennen harmonisen yliaallon esiintyminen on maasulun aikana tyypillistä. Suuritaajuiset muutosvirrat puolestaan syntyvät maasulun alkuhetkillä. (Lakervi & Partanen 2009, 190.)

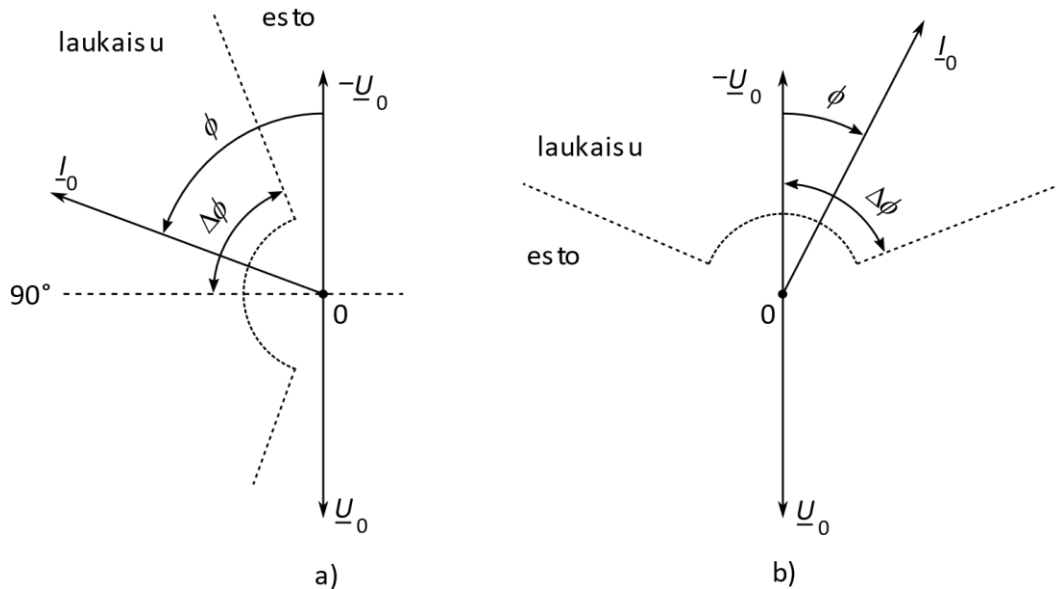


Kuvio 6. Virtamuuntajien summakytkenä ja kaapelivirtamuuntaja summavirran I_0 mittauksessa sekä jännitemuuntajan avokolmiokytkentä tähtipistejännitteen U_0 mittauksessa

Maasulkureleen toiminta voi perustua joko pelkästään kaikkien kolmen vaiheen vaihevirtojen summavirran tai summavirran ja tähtipistejännitteen mittaamiseen. Summavirta voidaan mitata kuvion 6 mukaisesti joko kolmen eri vaiheen virtamuuntajien summakytkenällä tai kaapelivirtamuuntajalla. Virtamuuntajien summakytkenää käytetään erillisistä johtimista koostuvan johdon, kuten avojohdon, summavirran mittaamiseen. Yleensä avojohtoverkoissakin sähköaseman johtolähtöjä syötetään kaapelin kautta, jolloin voidaan summakytkenän sijaan käyttää kaapelivirtamuuntajaa. Tähtipistejännite mitataan yleisimmin käyttämällä kuvion 6 mukaista jännitemuuntajien avokolmiokytkentää. (Elovaara & Haarla 2011b, 353; Lakervi & Partanen 2009, 191–193.)

Nollavirtareleen toiminta perustuu pelkästään nollavirran suuruuden mittaamiseen. Nollavirtarele vastaa siis toiminnaltaan tavallista ylivirtarelettä. Nollavirtarele ei myöskään havaitse vian suuntaa, vaan se antaa virta-asettelun ylittyessä laukaisukäskyn riippumatta siitä, kummalla puolella relettä vika tapahtuu. (Elovaara & Haarla 2011b, 340–341.) Johtoja suojaavissa nykyaikaisissa prosessorireleissä käytetään nollavirralle kahta eri virta-aika-porrasasettelua: Herkässä asettelussa havahtumisvirta asetellaan pieneksi ja aikahidastus suureksi. Karkeassa asettelussa puolestaan käytetään vikavirtalaskelmien mukaisia, herkkää asettelua suurempia havahtumisvirta-asetteluja ja lyhyttä aikahidastusta. Nollavirtareleitä käytetään myös muuntajien maasulkusuojauksessa varasuojina

muun verkon vikatapauksissa. Lisäksi nollavirtareleet havaitsevat differentiaalireleitä paremmin pienet virtaepäsymmetriat, joten niitä voidaan käyttää myös verkon tähtipisteen lähellä olevien vikojen laukaisuun. (Elovaara & Haarla 2011b, 353–354.)



Kuvio 7. Periaatekuva suunnatun maasulkureleen havahtumisasetteluista a) maasta erotetussa verkossa, b) sammutetussa verkossa

Suunnatun maasulkureleen toiminta puolestaan perustuu nollavirran ja tähtipistejännitteen sekä näiden osoittimien välisen vaihe-eron ϕ mittaamiseen. Suunnattu maasulkurele havaitsee nimensä mukaisesti vian lisäksi sen, kummalla puolella relettä vika on tapahtunut. (Elovaara & Haarla 2011b, 354.) Maasta erotetun verkon suunnatun maasulkusuojausten havahtumisasettelut ovat seuraavat: summavirran I_0 pitää olla suurempi kuin asetteluarvo, tähtipistejännitteen U_0 pitää olla suurempi kuin asetteluarvo sekä summavirtaosoittimen I_0 ja tähtipistejänniteosoittimen vastavektorin $-U_0$ välisen kulman ϕ pitää olla välillä $90^\circ - \Delta\phi < \phi < 90^\circ + \Delta\phi$. Tässä $\Delta\phi$ on toleranssi, jolla otetaan huomioon verkolle ominaisten vuotovastusten ja johtoresistanssien vaikutus vaihe-eroon. Sammutetun verkon suunnatun maasulkusuojausten havahtumisasettelut ovat muutoin samat kuin maasta erotetussa verkossa, mutta kulman ϕ pitää olla välillä $-\Delta\phi \leq \phi \leq \Delta\phi$. Koska sammutettu verkko on maasulussa lähellä resonanssitilaa, vian aikana kulman ϕ vaihtelu voi olla suurta. Sen vuoksi sallittu toleranssi $\Delta\phi$ on yleensä suuri, esimerkiksi 80° . Kuviossa 7 on esitetty suunnatun maasulkusuojausten havahtumisasettelut katkoviivoin piirrettyinä sektoreina. Rele havahtuu, kun tähtipistejännite ylittää asetteluarvon ja summavirtaosoitin I_0 on "laukaisu"-sektorilla. (Lakervi & Partanen 2009, 192–193.)

Periaatteessa myös distanssireleitä voidaan käyttää suunnattuun maasulkusuojaukseen, sillä ne havaitsevat vian suunnan. Rajoitukseksi nousee kuitenkin distanssireleen liian pieni herkkyys pienivirtaisen maasulun havaitsemisessa. Suomessa perinteisesti voimassa ollut vaatimus on ollut, että maasulku pitää pystyä laukaisemaan 500 Ω vikaresistanssiin saakka. Kuitenkin distanssirele havaitsee maasulkuvirran vain noin 20 Ω vikaresistanssiin saakka. (Elovaara & Haarla 2011b, 341.)

Suurin osa Suomen 20 kV keskijännitejakeluverkoista on maadoitustyyppiltään maasta erotettuja. Näissä verkoissa yksivaiheinen maasulkuvirta jää hyvin pieneksi. Tällöin etuna on se, ettei vikaantunutta järjestelmää ole pakko kytkeä jännitteettömäksi automaattisesti heti, vaan se voidaan siirtää etukäteen sovitun ohjeen mukaisesti sopivampaan ajankohtaan manuaalisesti poiskytkettäväksi. Tällöin maasulusta on kuitenkin tultava hälytys verkon käyttöä valvovalle henkilöstölle, valokaarimaasulun todennäköisyyden pitää olla pieni ja maadoitusjännitteen on pysyttävä sallituissa rajoissa. Lisäksi on otettava huomioon mahdollisten tietoliikenneverkkojen omat vaatimukset. Mikäli maasulku on tai muuttuu kaksoismaasuluksi, ei verkon käyttöä enää vian aikana sallita. (Elovaara & Haarla 2011b, 338; SFS 6001:2018, 140.)

Sammutetuissa verkoissa tavoitteena on saada valokaarimaasulku sammumaan itsestään. Keski-jänniteverkon rakentaminen sammutetuksi asettaa taloudellisia lisähaasteita maasta erotettuun verkkoon nähden. Ensinnäkin suojauksen näkökulmasta katsottuna sammutetun verkon käyttö on taloudellista ainoastaan säteittäisissä verkoissa, sillä rengasmaiset verkot vaatisivat johdon kummankin pään suojausten väliin viestiyhteyden suojauksen selektiivisyyden toteutumiseksi. Toiseksi keskijänniteverkon muuntajien 20 kV:n käämitykset ovat usein kytketty kolmioon, jolloin sammutuskuristin voidaan kytkeä verkkoon vain erillisenä hankittavan tähtikytketyn maadoitusmuuntajan välityksellä. Sammutettu verkko on siis verrattain kallis investointi keskijänniteverkossa. (Elovaara & Haarla 2011b, 338.)

Maasulkusuojauksen näkökulmasta erityisen vaikeita vikatapauksia ovat suuren vikaimpedanssin kautta tapahtuvat maasulut. Tällaisia ovat esimerkiksi PAS-johtojen katkokset, joissa johdon pää putoaa maahan, kuivan puunoksan nojaaminen ilmajohtoon tai johdinkatkos ja maasulku kuorman puolella. Näissä vioissa vikaresistanssi saattaa olla jopa 100 k Ω , jolloin maasulkua ei voi edes havaita tavanomaisilla suunnatuilla maasulkureleillä. Maasulkurelettä ei voi asetella tarpeeksi her-

käksi, sillä se saisi releen havahtumaan jo terveinkin verkon normaaleissa epäsymmetriatilanteissa. Esimerkiksi 20 kV:n avojohdoilla keskimmäisen johdon reaktanssi on normaalitilanteessa hieman erisuuri kuin reunimmaisten johtojen, mikä aiheuttaa em. epäsymmetriaa. Menetelmät suuren vikaimpedanssin kautta tapahtuvien maasulkujen havaitsemiseen ovatkin olleet suosittu tutkimuskohde. (Lakervi & Partanen 2009, 197.)

4 Keskijänniteverkon mallintaminen

4.1 Esimerkkejä aikaisemmista verkkomalleista

Keskijänniteverkkoa simuloivan mallin rakentaminen opinnäytetyönä ei ollut suinkaan ensimmäinen laatuaan. Vastaavasta aiheesta oli viimeisen reilun vuosikymmenen aikana tehty ainakin kolme kappaletta opinnäytetöitä: yksi Savonia-ammattikorkeakoulussa, yksi Tampereen ammattikorkeakoulussa ja yksi Vaasan ammattikorkeakoulussa. Oleellisin ero tämän työn ja kolmen aiemman välillä oli tietokonesimulaatioiden tekeminen verkkomallista.

Jalkasen (2019) opinnäytetyö oli aiheeltaan tätä opinnäytetyöprojektia lähimpänä, sillä siinä keskityttiin uuden keskijänniteverkkomallin luomiseen olemassa olevan mallin pohjalta. Kyseisen työn aihe oli vain hiukan suppeampi, sillä siinä ei tehty tietokonesimulaatioita mallista tai toteutettu mittauksia valmiilla verkkomallilla. (Jalkanen 2019.) Sekä Hannulan (2017) että Kontion (2013) opinnäytetöissä keskijänniteverkkomalli liittyi hajautettuun sähköntuotantoon ja mallit sisälsivät sekä tuuli- että aurinkosähkön tuotannon mallinnusta. Kummassakaan näistä opinnäytetöistä ei tehty mallin tietokonesimulointeja tai mittauksia valmiilla mallilla. Hannulan työhön sisältyi myös itse verkkomallin rakentamisvaihe. (Hannula 2017; Kontio 2013.)

4.2 Keskijänniteverkkojen yleispiirteet

Tästä eteenpäin jännitteellä tarkoitetaan **pääjännitteen** eli kolmivaihejärjestelmän kahden äärijoh-timen välisen jännitteen **tehollisarvoa**, eli **RMS-arvoa**, ellei erikseen toisin mainita. Keskijännite, lyhennettynä KJ, terminä tarkoittaa standardin SFS-EN 50160 (2022, 19) mukaan jakeluverkon **nimellistä jännitettä**, jonka tehollisarvo on suurempi kuin 1 kV, mutta korkeintaan 36 kV. (SFS-EN 50160:2022, 19.) Standardi SFS 6001 (2018, 13) puolestaan määrittelee keskijännitteeksi kaikki jännitteet, jotka ovat yli 1 000 V ja alle 110 kV (SFS 6001:2018, 13). Standardi SFS-EN 60038 (2011,

12) suosittelee, että 1–35 kV nimellisjännitevälillä sähköjärjestelmän nimellisjännite valittaisiin joko vaihtoehtoista 3,3 kV, 6,6 kV, 11 kV, 22 kV tai 33 kV tai vaihtoehtoista 3 kV, 6 kV, 10 kV, 20 kV, 30 kV tai 35 kV. Kuitenkaan pienimpiä arvoja 3 kV, 3,3 kV, 6 kV ja 6,6 kV ei suositella käytettäväksi uusissa yleisissä jakeluverkoissa. (SFS-EN 60038:2011, 12.) Nimellisjännitteestä käytetään joissain yhteyksissä myös nimitystä **mitoitusjännite**. Näiden termien lisäksi tärkeä käsite on **suurin sallittu käyttöjännite**, jota käytetään sähkölaitteiden jännitetasojen valinnassa. Suurin käyttöjännite on suurin pääjännitteen tehollisarvo, jolla sähkölaitte on eristyksensä puolesta suunniteltu toimimaan (SFS 6001:2018, 12). Suurimmat käyttöjännitteet ja nimellisjännitteet kytkeytyvät toisiinsa. Jos keskijänniteverkon suurin sallittu käyttöjännite on esimerkiksi 12 kV tai 24 kV, ovat nimellisjännitteet tällöin 10 kV tai 20 kV vastaavasti (Elovaara & Haarla 2011a, 57).

Suomessa keskijänniteverkkojen tyypillinen nimellisjännite on 20 kV, mutta kaupungeissa saateen käyttää myös 10 kV nimellisjännitettä. 10 kV jännite on nykyisin lähinnä jääne ajalta, jolloin 20 kV käyttöjännite ei ollut vielä valtakunnallinen suositus ja kustannusten erotus 20 ja 10 kV maakaapeleiden välillä oli hyvin suuri. (Lakervi & Partanen 2009, 69.) Keskijänniteverkoissa sähkön siirto tapahtuu säteittäisesti, mutta jotkin verkot tai niiden osat on rakennettu silmukoiduiksi (Lakervi & Partanen 2009, 125). Jälkimmäisellä tavalla toteutetuissa jakeluverkoissa silmukat pidetään normaalitilanteissa avonaisina ja suljetaan vain verkon kytkentää muutettaessa tai vianetsinnässä (Elovaara & Haarla 2011a, 57).

Maadoitustavaltaan keskijänniteverkot ovat joko maasta erotettuja tai sammutettuja. Suomen maaperällä on keskimäärin pieni ominaisjohtavuus, minkä vuoksi maadoitusresistanssin saaminen tarpeeksi pieneksi on yleensä haastavaa. Tyypillisesti maadoitusresistanssi on kertaluokkaa kymmeniä ohmeja. Maasta erotetun verkon maasulkuvirta on pieni, joten se saa aikaan vain pienen maadoitusjännitteen, ja sähköturvallisuusmääräysten vaatimukset toteutuvat. Erittäin haastavissa maadoitusolosuhteissa, kuten hiekkaisilla harjualueilla, maadoitusjännitteitä voidaan pienentää joko maadoitusresistanssin kautta lisäämällä maadoituksissa käytettävän kuparin määrää tai vaihtoehtoisesti pienentämällä maasulkuvirtaa kompensoinnilla eli sammutuksella. Keskijänniteverkon maasulkuvirtojen kompensointi toteutetaan Suomessa joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä kompensoinnissa sammutuskela asennetaan sähköasemalle keskijänniteverkon tähtipisteen ja maan väliin. Hajautetussa kompensoinnissa keskijännitejohtolähtöihin kytketään 5 tai 10 A maa-

doitusmuuntajat. Hajautetulla kompensoinnilla saavutetaan maasulkuvirran ja siten maadoitusjännitteen pienentäminen, mutta tällainen kiinteä kompensointi ei yleensä riitä maasulun syyttämän valokaaren sammuttamiseen. (Lakervi & Partanen 2009, 72.)

Keskijänniteverkon alkupäässä oleva verkkoa syöttävä **sähköasema** on sähkönjakeluverkon tärkein yksittäinen osa. Sähköasemalla verkon jännite muunnetaan **päämuuntajan** tai -muuntajien avulla suurjännitteestä, usein 110 kV, keskijännitteeksi. Päämuuntajien lisäksi sähköasemalle on keskitetty suurin osa verkon suojarleistä ja muusta automaatiosta sekä suur- ja keskijänniteverkon kytkentälaitteista. (Lakervi & Partanen 2009, 119.)

Päämuuntajat suojataan monipuolisesti: pääasialliset suojalaitteet ovat ylivirtarele ja differentiaalirele. Differentiaalireleen tehtävänä on suojata muuntajaa sen sisäisten vikojen vaikutuksilta.

Muuntajan sisäisiä vikoja ovat oikosulku ja maasulku sekä käämien sisäiset ja väliset oikosulut. (Lakervi & Partanen 2009, 121.) Nykyisissä suuritehoisissa muuntajissa on em. suojalaitteiden lisäksi yleensä jatkuva muuntajaöljyn kaasupitoisuuden valvonta, jonka avulla voidaan jo etukäteen arvioida muuntajassa mahdollisesti kehittyvän vian laatu ja kuinka ajankohtaisia korjaustoimenpiteet ovat (Elovaara & Haarla 2011b, 147).

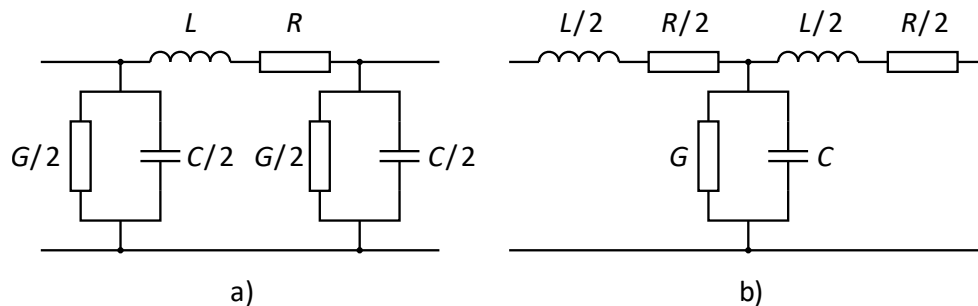
Päämuuntajan yläjännitekäämitykseen kytketyllä **käämikytkimellä** pidetään alajännitepuolen jännite vakiona muuntajan kuormituksesta riippumatta myös muuntajan ollessa kuormitettuna. Käämikytkin säätää muuntajan muuntosuhdetta yleensä ensiön eli yläjännitepuolen kierrosmäärää muuttamalla. Tyypillinen muuntosuhteen säätöalue on ± 15 %. (Elovaara & Haarla 2011b, 146; Lakervi & Partanen 2009, 121.) Pienemmissä muuntajissa jännitettä puolestaan säädetään **väliottokytkimellä**, jolla muuntosuhdetta voidaan muuttaa ± 5 %. Toisin kuin käämikytkimellä, väliottokytkimen asettelu tehdään vain muuntajan ollessa kuormittamaton. (Elovaara & Haarla 2011a, 376–377.) Maaseutuverkoissa päämuuntajilla käytetään usein ns. kompondointia, eli muuntajan alajännitepuolen jännitteen korottamista kuormituksen kasvaessa. Kompoundoinnin tarkoituksena on kompensoida keskijännitejohtojen jännitteenalenemaa. (Lakervi & Partanen 2009, 121.)

4.3 Verkon komponenttien mallinnus

Sähköverkon simulaatiossa ja mallissa verkon rakenneosat, eli johdot, kaapelit, muuntajat ja kuormat, mallinnettiin yksinkertaistettummin resistanssin, induktanssin, kapasitanssin ja erilaisten sijaiskytkentöjen avulla. Työssä mallinnettu todellinen sähköverkko oli suurimmalta osin keskijänniteverkkoa, mutta myös päämuuntaja ja sen yläpuolinen suurjännitteinen taustaverkko ja johto-osuus mallinnettiin. Suurjänniteverkon mallintaminen ei simulaatiomenetelmien osalta eronnut keskijänniteverkon mallinnuksesta.

Tässä luvussa esitetään em. rakenneosien mallintaminen siten, kuin se toteutettiin simulaatiossa, verkkomallissa tai molemmissa. Sähköverkon muita osia, esimerkiksi generaattoreita ja kompensointilaitteita, ei käsitellä tässä, sillä verkkomalli ei sisältänyt sellaisia projektin tässä vaiheessa.

4.3.1 Johdot ja kaapelit



Kuvio 8. Johdon tai kaapelin yksivaiheinen a) π -, b) T-sijaiskytkentä

Alle 200 km pituisten johtojen ja kaapeleiden mallintamisessa johto-osuudet voidaan kuvata kuvion 8 mukaisilla π - tai T-sijaiskytkennöillä (Haginomori, Koshiduka, Arai & Ikeda 2016, luku 2.1.1.3; Elovaara & Haarla 2011a, 97–100). Mallintamisessa lasketaan johto-osuuksien impedanssit \underline{Z} ja admittanssit \underline{Y} , jotka koostuvat johtimien resistansseista R , induktansseista L , kapasitansseista C ja konduktansseista G yhtälöiden

$$\underline{Z} = R + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L \quad (2)$$

ja

$$\underline{Y} = G + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (3)$$

mukaisesti. Yhtälöissä (2) ja (3) j on imaginaariyksikkö ja f on vaihtojännitteen taajuus. (Elovaara & Haarla 2011a, 97.) Yli 200 km johtopituuksilla mallintaminen vaatii lisäksi johtojen aaltoimpedanssien ja etenemiskertoimien määrittämistä (Elovaara & Haarla 2011a, 95–96). Tässä työssä käsiteltävän verkkomallin johtopituudet jäivät kuitenkin pisimmilläänkin reilusti alle 200 km, joten monimutkaisempi mallinnus sivuutetaan.

Kuviossa 8 esitetyistä vaihtoehdoista π -sijaiskytkentä on yleisemmin käytetty. Lisäksi alle 220 kV jännitteillä konduktanssi G on yleensä merkityksettömän pieni. Pienjännitejohdoilla johtimien resistanssin vaikutus impedanssiin ja admittanssiin on suurempi kuin reaktanssin, mutta suurjännitejohdoilla tilanne on päinvastainen. (Elovaara & Haarla 2011a, 97–100.) 110 ja 20 kV johto-osuuksia mallinnettaessa on siis syytä asettaa painoa sekä resistanssin, induktanssin että kapasitanssin vaikutuksille.

Yhtälöitä (2) ja (3) käytettäessä on käytännöllisempää käyttää koko johto-osuuden kokonaisresistanssin, -induktanssin ja -kapasitanssin sijaan johto-osuuden pituutta s sekä johdon tai kaapelin **ominaisresistanssia** r , **-induktanssia** l ja **-kapasitanssia** c , eli resistanssia, induktanssia ja kapasitanssia pituusyksikköä kohden, vastaavasti:

$$R = r \cdot s, \quad (4)$$

$$L = l \cdot s \quad (5)$$

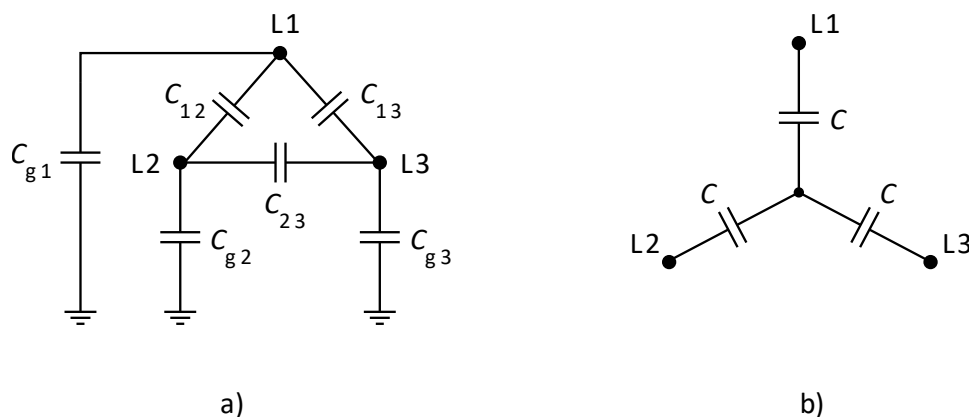
ja

$$C = c \cdot s. \quad (6)$$

Eri johdintyyppien ominaisarvot löytyvät useimmiten johdon tai kaapelin valmistajan julkaisemilta datalehdiltä tai johtimien ominaisuuksia käsittelevistä standardeista (Elovaara & Haarla 2011a, 98).

Ominaisresistanssin suuruus riippuu johtimen kuormitusvirran ja lämpötilan lisäksi virran taajuudesta; tasavirtaresistanssi on tyypillisesti pienempi kuin vaihtovirtaresistanssi, sillä vaihtovirralla esiintyvät virranajoitus ja läheisyysvaikutus aiheuttavat sähkövirran epätasaisen jakautumisen johtimen poikkipinnalle. Merkittävin ominaiskapasitanssin suuruuteen vaikuttava tekijä puolestaan on johdon rakenne. Ilmajohdon ominaiskapasitanssi on tyypillisesti paljon pienempi kuin maakaapelin. (Elovaara & Haarla 2011a, 98–99.) Johto-osuuden muuttaminen ilmajohdosta maakaapeliksi vaikuttaa siis erityisesti maasulkusuojauksen ja loistehon kompensoinnin suunnitteluihin.

Johdon tai kaapelin matemaattinen mallinnus edellä kuvatulla tavalla antaa tarvittavat tiedot kyseisen johto-osuuden toteuttamiseksi sijaiskytkentänä verkkomallissa. Kun tiedetään johdon tai kaapelin tyyppi ja pituus, lasketaan ominaisarvojen r , l ja c sekä johto-osuuden pituuden s avulla johdon resistanssi, induktanssi ja kapasitanssi yhtälöillä (4), (5) ja (6). Kun näiden kolmen suureen arvot ovat tiedossa, voidaan johto-osuuden malli rakentaa kytkemällä vastaavan suuruiset vastukset, kelat ja kondensaattorit kuvion 8a tai 8b mukaisesti. Kolmivaihejohtoa kuvaavassa mallissa tämä tietenkin toistetaan jokaisen kolmen vaiheen kohdalla.



Kuvio 9. Kolmivaihejohtoon a) maa- ja keskinäiskapasitanssit, b) käyttökapasitanssit

Kuvion 8 sijaiskytkennöissä kapasitanssi C kuvaa tarkalleen ottaen vain yhden vaihejohtimen maakapasitanssia C_g , mutta myös vaihejohtimien väliset **keskinäiskapasitanssit** vaikuttavat ominaiskapasitanssiin. Kuvio 9a selventää eroja maa- ja keskinäiskapasitanssien välillä: Kolmivaihejohtoon keskinäiskapasitanssit C_{12} , C_{23} ja C_{13} ovat vaihejohtimien L1, L2 ja L3 väliset keskinäiskapasitanssit ja ne voidaan mallintaa kahden ideaalisen vaihejohtimen väliin kytkettyinä kondensaattoreina. Maakapasitanssit C_{g1} , C_{g2} ja C_{g3} puolestaan ovat vaihejohtimien ja maan väliset kapasitanssit, jotka

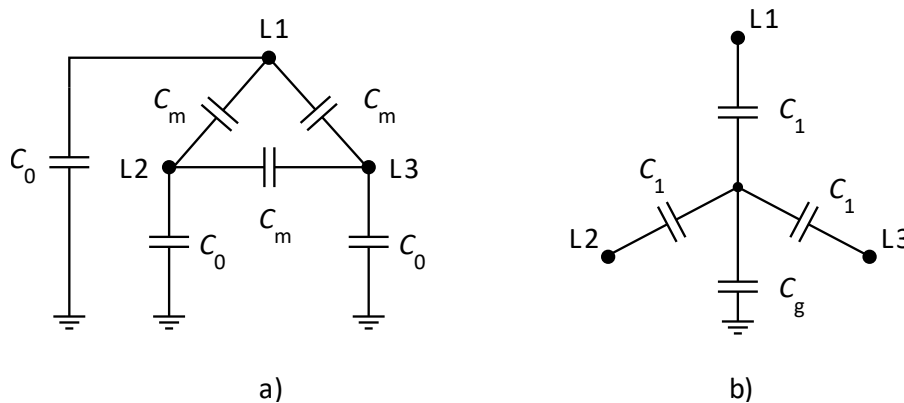
voidaan mallintaa vaihejohtimien ja maan väliin kytkettyinä kondensaattoreina. (Elovaara & Haarla 2011a, 118–119.)

Kahden eri kapasitanssin sijaan todellisten kolmivaihejohtojen yhteydessä on käytännöllisempää puhua kuvion 9b mukaisesta **käyttökapasitanssista** C , joka tarkoittaa johdon tai kaapelin kokonaiskapasitanssia yhtä vaihetta kohti. Käyttökapasitanssi siis on johtimien välisen keskinäiskapasitanssin ja sen kanssa sarjaan kytkeytyvien maakapasitanssien yhteiskapasitanssi. Symmetrisellä kolmivaihejohdolla sekä keskinäiskapasitanssit että maakapasitanssit ovat keskenään suuret: $C_{12} = C_{23} = C_{13} = C_m$ ja $C_{g1} = C_{g2} = C_{g3} = C_g$. Tällöin käyttökapasitanssi liittyy maa- ja keskinäiskapasitansseihin yhtälön

$$C = C_g - C_m \quad (7)$$

mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011a, 118–119.)

Mielivaltaisen, epäsymmetrisen kolmivaihejohtimen käyttökapasitanssin lauseke on paljon monimutkaisempi kuin yhtälössä (7) (Elovaara & Haarla 2011a, 118–119). Myös tämä yleisempi tapaus sivuutetaan, sillä tässä työssä mallinnetaan ainoastaan symmetrisiä kolmivaiheisia johtoja ja -kaapeleita.



Kuvio 10. Symmetristen komponenttien menetelmällä a) vaiheiden ja maan välisiä maakapasitansseja vastaa nollajärjestelmän kapasitanssi C_0 , b) käyttökapasitansseja vastaa myötäjärjestelmän kapasitanssi C_1

Kuvion 9b mukainen sijaiskytkentä ei kuitenkaan riitä kaapelin maakapasitanssin mallintamiseen, sillä siitä puuttuu kokonaan yhteys maahan. Tarkastellaan sen sijaan kuviossa 10 esitettyjä vaihtoehtoja. Kuvio 10a vastaa kuviota 9a symmetrisellä kolmivaihejohdolla. Kuvion 9b sijaiskytkentään kuitenkin lisätään puuttuva yhteys maahan: se mallinnetaan esimerkiksi kytkemällä yksi yhteinen maakapasitanssi C_g käyttökapasitanssien väliin muodostuvan tähtipisteen ja maan väliin, kuten kuviossa 10b. (Haginomori ym. 2016, luku 2.1.1.1.2.1.) Tällä tavoin tarkasteltuna hyödynnetään ns. **symmetristen komponenttien menetelmää**, joka perustuu myötä-, vasta- ja nollajärjestelmiin ja on hyödyllinen työkalu erityisesti epäsymmetristen vikojen laskennallisessa käsittelyssä (Elovaara & Haarla 2011a, 177).

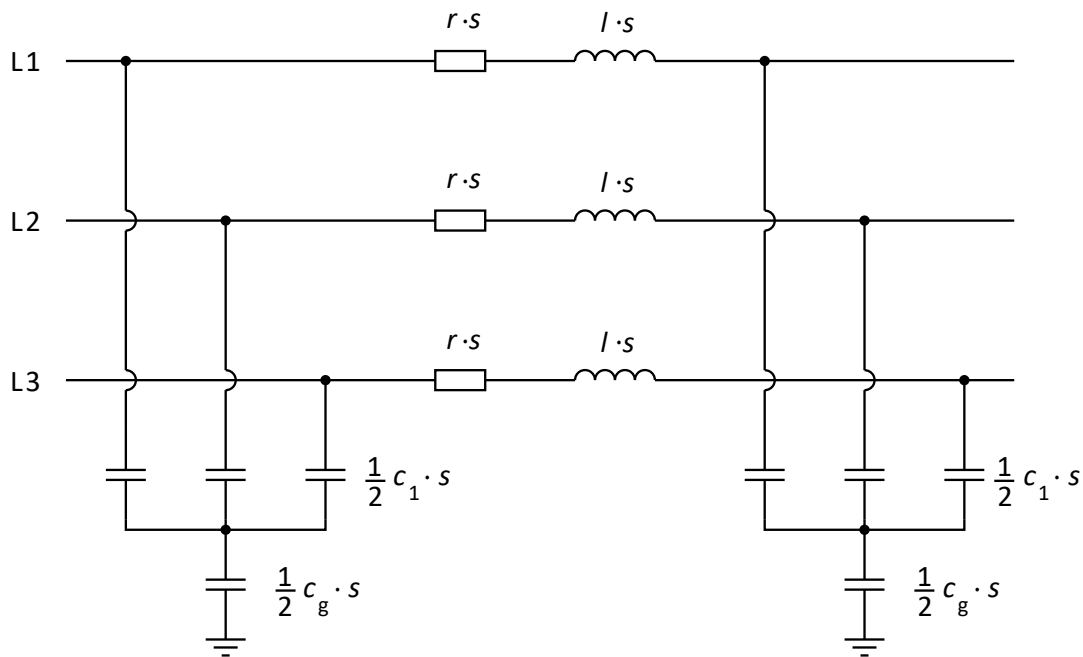
Sovelletaan symmetristen komponenttien menetelmää kuvion 10 symmetriseen kolmivaihejohtoon: Käyttökapasitanssia C vastaa myötäjärjestelmän kapasitanssi C_1 , jonka suuruus on

$$C_1 = C_0 + 3C_m. \quad (8)$$

Maakapasitanssille C_g puolestaan pätee

$$C_g = \frac{3C_1 \cdot C_0}{C_1 - C_0}. \quad (9)$$

(Haginomori ym. 2016, luku 2.1.1.1.2.1.) Yhdistetään kuvioiden 8a ja 10b johtomallit, jolloin saadaan kuvion 11 mukainen π -sijaiskytkentä. Johto-osuuden pituus s sekä ominaisparametrit r , l ja c määrittävät sijaiskytkentään tarvittavien vastusten, käämien ja kondensaattorien arvot yhtälöiden (4), (5) ja (6) mukaisesti.



Kuvio 11. Yksittäisen johto-osuuden kolmivaiheinen π -sijaiskytkentä kahdella eri ominaiskapasitanssilla

Kapasitanssiongelma

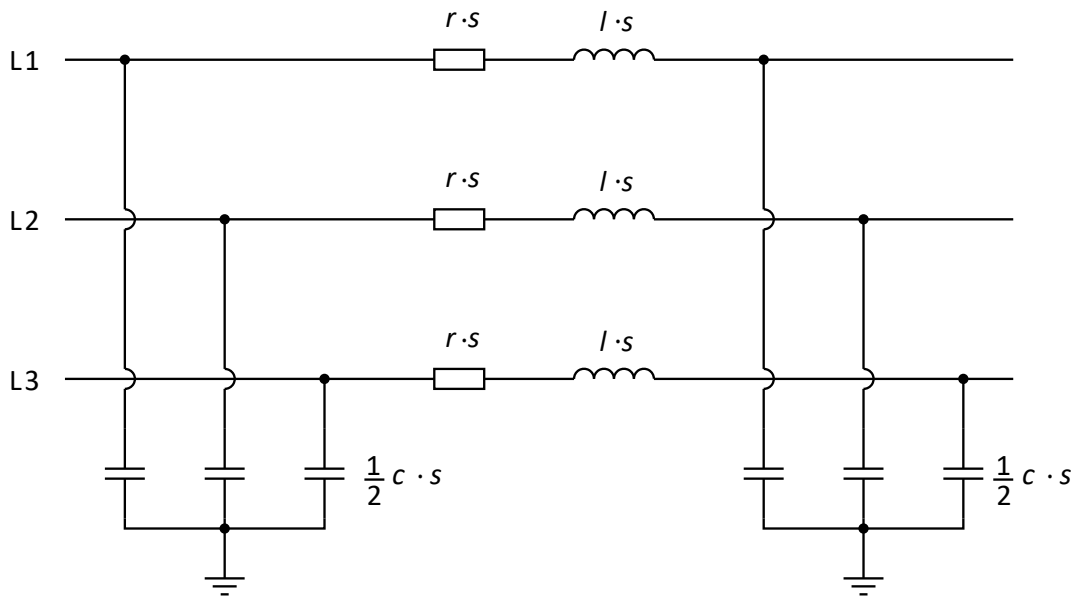
Mikäli johdon tai kaapelin valmistaja on ilmoittanut ainoastaan ominaiskäyttökapasitanssin c , jota symmetristen komponenttien menetelmässä vastaisi ominaiskapasitanssi c_1 , ei erillistä ominaismaakapasitanssia, eli joko c_g :tä tai c_0 :aa, pystytään määrittämään johtimien datalehden perusteella. Tällöin johtimien mallinnuksessa joudutaan muokkaamaan koko johtomallia siten, että c_g ikään kuin yhdistetään ominaiskäyttökapasitanssin c kanssa. Vaihtojännitteeseen kytketyn kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi on suuruudeltaan

$$X_C = \left| -\frac{j}{2\pi \cdot f \cdot C} \right| = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (10)$$

jossa f on vaihtojännitteen taajuus (Grant & Phillips 1990, 263). Tarkastellaan seuraavaksi tilannetta, jossa kondensaattori korvataan ideaalisella johtimella; johtimen impedanssi on nolla, joten voidaan olettaa, että sen kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi ovat myös nollia. Samaa lopputulokseen päädytään antamalla kondensaattorin kapasitanssin C kasvaa rajatta. Yhtälön (10) perusteella

$$\lim_{C \rightarrow \infty} X_C = \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = 0, \quad (11)$$

kunhan $f > 0$. Yhtälöstä (11) nähdään, että on mahdollista mallintaa kuvion 11 π -sijaiskytkentä esimerkiksi simulaatioissa yksinkertaisemmin: Ominaiskapasitanssi c_1 korvataan suoraan johdon tai kaapelin valmistajan ilmoittamalla ominaiskäyttökapasitanssilla c ja annetaan ominaismaakapasitanssin c_g kasvaa rajatta, käytännössä asettamalla se mielivaltaisen suureksi. Johtomallit vastaavat tällöin toisiaan kapasitanssien osalta sitä paremmin, mitä suuremmaksi parametri c_g asetetaan.

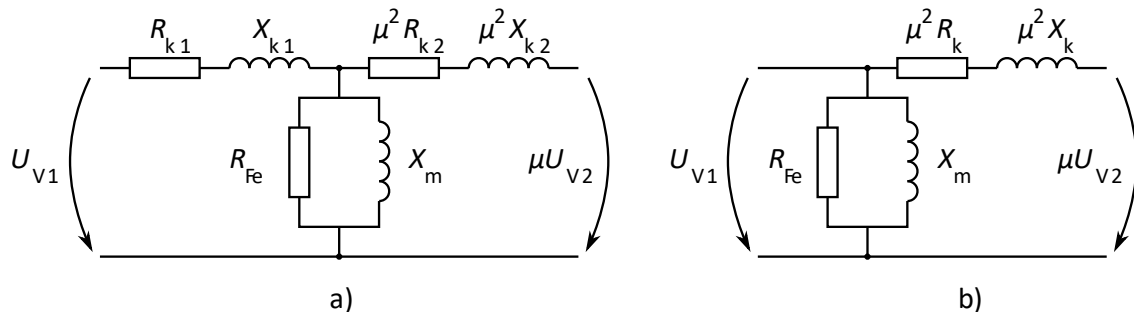


Kuvio 12. Yksittäisen johto-osuuden yksinkertaistettu kolmivaiheinen π -sijaiskytkentä ilman erillistä maakapasitanssia

Kapasitanssiongelman ratkaisun yksi vaihtoehto on siis korvata π -sijaiskytkennässä käyttökapasitanssien tähtipisteisiin kytketyt maakapasitansseja kuvaavat kondensaattorit ideaalisilla johtimilla. Tällöin johtomalli yksinkertaistuu kuviossa 12 esitettyyn muotoon. Nyt johtimien kapasitanssi maahan ja toisiinsa nähden koostuu puhtaasti käyttökapasitansseista, mutta sähköä johtava yhteys maahan säilyy. Kapasitanssiongelmaa käsitellään vielä synteesiaineiston puolella luvuissa 5.3.2 ja

5.3.3. Tarkemmin perusteltu kuvaus kapasitanssiongelman ratkaisuehdotuksesta on esitetty liitteessä 2.

4.3.2 Muuntajat



Kuvio 13. Verkostolaskennassa käytettävä kaksikäymysmuuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä redusoituna ensiön jännitetasoon: a) tyhjäkäyntihaara jakaa oikosulkuimpedanssin ensiöön ja toisioon, b) oikosulkuimpedanssi on yhdistetty tyhjäkäyntihaaran toisiopuolelle

Muuntajat mallinnetaan tehonjako-, vikavirta- ja dynamiikkalaskelmissa yksinkertaisuudessaan niiden **oikosulkuimpedanssin** \underline{Z}_k kautta. Tällöin muuntajan sijaiskytkennässä huomioidaan ainoastaan sen **oikosulkuresistanssi** R_k ja **-reaktanssi** X_k :

$$\underline{Z}_k = R_k + j \cdot X_k. \quad (12)$$

Mikäli muuntaja on tarkoituksenaan mallintaa myös kytkentävirtasysäyksen tai jännitteenannon osalta, on sijaiskytkennässä otettava huomioon myös ns. **tyhjäkäyntihaara**. Tyhjäkäyntihaaraa kuvataan **rautahäviöresistanssilla** R_{Fe} ja **magnetointireaktanssilla** X_m . Oikosulkuimpedanssi ja tyhjäkäyntihaara muodostavat yhdessä kuvion 13 mukaisen sijaiskytkennän. Kuviossa 13a oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi on jaettu muuntajan ensiöön ja toisioon siten, että se koostuu muuntajan ensiö- ja toisiokäämien resistansseista ja reaktansseista vastaavasti. Tämä symmetria on kuitenkin muuntajan ulkopuolelta katsottuna tarpeeton, eikä oikosulkuimpedanssin jakamisella ensiöön ja toisioon ole varsinaista fysikaalista perustetta. Siksi voikin olla käytännöllisempää mallintaa muuntaja kuvion 13b mukaisesti; tyhjäkäyntihaara mallinnetaan kytkettynä siihen liittimeen, jossa muuntajaa magnetoiva käämitys todellisuudessa on, ja oikosulkuimpedanssi jää kokonaan omaksi haarakseen. (Elovaara & Haarla 2011a, 130–131.)

Muuntajan sijaiskytkennässä resistanssit R_k ja R_{Fe} sekä reaktanssit X_k ja X_m lasketaan joko muuntajan arvokilvessä ilmoitetuista tiedoista tai muuntajan oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeiden tuloksista:

$$R_k = r_k \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{P_k}{3I_k^2}, \quad (13)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_0^2}{P_0}, \quad (14)$$

$$X_k = x_k \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{Q_k}{3I_k^2} \quad (15)$$

ja

$$X_m = \frac{U_0^2}{Q_0}, \quad (16)$$

jossa U_N on muuntajan ensiön tai toision nimellisjännite pääjännitteenä, S_N on muuntajan nimellinen näennäisteho, r_k on **suhteellinen oikosulkuresistanssi**, x_k on **suhteellinen oikosulkureaktanssi**, P_k on muuntajan oikosulkupätöteho, Q_k on oikosulkuloisteho, I_k on oikosulkuvirta, U_0 on muuntajan tyhjäkäyntikokeessa käytetty ensiön tai toision pääjännite, P_0 on tyhjäkäyntipätöteho ja Q_0 on tyhjäkäyntiloisteho. (Elovaara & Haarla 2011a, 131–132; Lakervi & Partanen 2009, 26–27.) Muuntajan suhteellista oikosulkuresistanssia tai -reaktanssia ei yleensä ilmoiteta suoraan sen arvokilvessä. Sen sijaan yleensä ilmoitetaan **suhteellinen oikosulkuimpedanssi** z_k , joka on kompleksilukuna ilmaistuna

$$\underline{z}_k = r_k + j \cdot x_k. \quad (17)$$

(Elovaara & Haarla 2011a, 143; Lakervi & Partanen 2009, 27.) Suhteellisen oikosulkuimpedanssin itseisarvolle pätee näin ollen tuttu neliöllinen riippuvuus:

$$z_k^2 = r_k^2 + x_k^2. \quad (18)$$

Yhtälöistä (13) ja (15) havaitaan, että oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi riippuvat siitä, käytetäänkö laskennassa muuntajan ensiön vai toision pääjännitettä. Muuntajan aiheuttamasta epäjatkuvuus-

kohdasta päästään yli **redusoimalla** kaikki sähkötekniset suureet samaan jännitetasoon. Redusointi tarkoittaa muuntajan ja muun verkon jännitteiden, virtojen, resistanssien, reaktanssien ja impedanssien skaalaamista tarkasteltavaan jännitetasoon käyttämällä muuntajan **muuntosuhdetta**

$$\mu = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad (19)$$

skaalauskerroimeksi. U_{1N} ja U_{2N} ovat muuntajan nimelliset ensiö- ja toisiäjännitteet. (Elovaara & Haarla 2011a, 134–135.) Kuviossa 13 muuntajan toisiopuolen resistanssit, reaktanssit ja vaihejännitteet on esitetty redusoituina ensiön jännitetasoon. Jännite redusoidaan käyttämällä skaalauskerroimeksi suoraan muuntosuhdetta μ , sähkövirta redusoidaan käyttämällä skaalauskerroimeksi muuntosuhteen käänteislukua $1/\mu$ ja impedanssi redusoidaan käyttämällä skaalauskerroimeksi muuntosuhteen neliötä μ^2 . Redusointi koskee muuntajan lisäksi myös kaikkia muita verkon komponentteja, jotka ovat muuntajan 'takana' eli tarkasteltavasta jännitetasosta katsottuna eri puolella muuntajaa. (Elovaara & Haarla 2011a, 135.)

Kolmikäämitysmuuntajissa on ensiö- ja toisiökäämien lisäksi kolmansio- eli tertiäärikäämit. Kolmikäämitysmuuntajan sijaiskytkentä eroaa kuviossa 13 esitetystä, ja sen oikosulkuimpedanssi voidaan määrittää vain käämiparien väliltä. (Elovaara & Haarla 2011a, 133.) Tässä työssä käsitelty verkkomalli sisälsi ainoastaan kaksikäämitysmuuntajia, joten kolmikäämitysmuuntajien mallintaminen sivuutetaan tässä.

4.3.3 Verkon kuormitukset

Sähköverkkoon kytketyt kuormitukset mallinnetaan joko jännitteestä tai vaihtovirran taajuudesta riippuvina suureina tai riippumattomina vakiotehokuormina. Mikäli kuormitus on likimain puhtaasti pätötehoa, kuvataan kuorma tavallisesti joko jännitteestä riippumattomana vakiotehokuormana, jännitteestä riippuvana vakiovirtakuormana tai jännitteen neliöstä riippuvana vakioimpedanssikuormana. Loistehokuorma puolestaan mallinnetaan yleensä pelkästään jännitteestä riippuvana vakiovirtakuormana. (Elovaara & Haarla 2011a, 139.) Verkon toiminnan kannalta haitallisin tilanne simuloidaan yleensä mallintamalla kaikki sen kuormitukset jännitteestä riippumattomina vakiotehokuormina, mutta toisena äärimahdollisuutena voidaan käyttää myös vakioimpedanssikuormaa (Elovaara & Haarla 2011a, 140).

Tässä työssä simulaatioiden tuottamat tulokset tuotettiin vain tyhjäkäyvästä verkkoa vastaavissa tilanteissa. Verkon kuormitusten mallinnusta ei siis tarvittu simulaatioissa, joten sen tarkempi käsittely sivuutetaan.

5 Kehittämistyön toteutus

5.1 Kehittämistyön menetelmät

Kehittämistyön ja tutkimuksen leikkauskohtaa tarkasteltiin samasta suunnasta kuin Toikko ja Rantanen (2009, 22) lähestyivät teoksessaan tutkimuksellista kehittämistoimintaa: kehittämistoimintaa korostettiin käytännön kehittämisprojekteina, ja tutkimustyölle tyypillisiä periaatteita ja tutkimuksen logiikkaa hyödynnettiin aina tarvittaessa. Näin saavutettiin ensisijaisesti käytännön tutkimusongelman ratkaisu, mutta myös tulosten ja johtopäätösten jonkinasteinen yleistettävyyden ja laajennettavuus. (Toikko & Rantanen 2009, 22.)

Kehittämisiongelma ja sen perusteella muotoillut tutkimuskysymykset asetettiin luvussa 2.1. Tutkimuskysymykset järjestettiin **miksi–mitä–miten–miten hyvin -kaavan** mukaan: Ensin selvitettiin, mitkä ovat kehittämistyön motivaatio ja perustelut, niiden jälkeen toteutettiin kehittämistyön konkreettisten tulosten tuottaminen ja lopuksi näitä tuloksia arvioitiin. Menetelmät valittiin siten, että päätavoitteena oli saada tutkimusongelmaan konkreettisia vastauksia ja ratkaisuja: suunnitelmia, laskelmia, piirustuksia, ohjeita ja muita dokumentteja. Toimintatapojen valinnassa pidettiin silmällä myös hyvän tieteellisen tutkimuksen periaatteita; tuotetun tiedon piti olla luotettavaa, avointa, eettistä, hyvin dokumentoitua ja kokeellisten menetelmien piti olla tarvittaessa toistettavissa.

Miksi tehtiin se, mitä tehtiin?

Ennen kuin voitiin alkaa suunnittelemaan laiteympäristön mallintamista, toteuttamaan simulointeja tai muutakaan aineiston keräämistä, piti luoda tutkimukselle oikeutus: mitkä olivat ne lähtökohdat, jotka perustelivat kehittämistyön tarkoituksen ylipäätään ja mitä lisäarvoa kehittämistyö toisi työelämään. Nämä kohdat vastasivat jo oikeastaan kahteen ensimmäiseen tutkimuskysymykseen: Miksi TKI-laiteympäristöä tarvittiin ja mitä laiteympäristöllä saavutettaisiin. Vastaus ja perustelut näihin kahteen tutkimuskysymykseen annettiin johdannossa, luvussa 1, joten niitä ei tässä

luvussa enää erikseen käsitellä. Menetelmällisesti miksi–mitä-vaihe oli puhtaasti tiedonhakuja, tiedon jäsentelyä, sen tiivistämistä ja raportointia. Tiedonhaun menetelmät on kuvattu tarkemmin luvussa 2.3.

Miten tehtiin?

Laiteympäristön toteuttamista edeltävä simulaatioiden rakentaminen, simulaatioiden ajaminen ja verkkomallin valmistumisen jälkeiset mittaukset olivat opinnäytetyöprojektin ns. synteisivaihetta. Menetelmät olivat siksi lähes puhtaasti synteesiaineiston tuottamiseen keskittyviä. Synteesiaineiston tuottaminen jaettiin karkeasti kolmeen osaan: simulaatioaineiston tuottamiseen, mittausaineiston tuottamiseen ja viestintään.

Simulaatioaineiston tuottamisen menetelmät koostuivat erilaisten tietokonesimulaatioiden tekemisestä, niiden vertailusta keskenään ja muuhun aineistoon sekä simulaatioiden muokkaamisesta ja ongelmanratkaisusta sitä mukaa, kun ongelmia kohdattiin – tulosten asianmukaista dokumentointia tietenkään unohtamatta. Vastaavasti mittausaineisto tuotettiin suunnitteleamalla käytönotetulla laiteympäristöllä tehtävät mittaukset, toteuttamalla suunnitellut mittaukset ja tallettamalla mittaus tulokset. Mittaukset olivat samalla myös opinnäytetyön käytännönläheisin osa. Simulaatio- ja mittausaineiston kehitysmenetelmiä kuvaillaan tarkemmin luvuissa 5.3 ja 5.4.

Viestintä oli oleellinen osa sekä simulaatio- että mittausaineistojen kehittämisessä, minkä vuoksi se oli syytä mainita kehittämistyön menetelmissä. Viestintä oli opinnäytetyöprojektin osapuolten, eli tekijän ja toimeksiantajan edustajan sekä tekijän ja työn ohjaajan, välistä tiedonvaihtoa, raportointia ja projektin etenemisen seuranta. Käytännössä viestintä toteutettiin sähköpostikeskustelujen, Teams-palaverien ja tapaamisten avulla. Laiteympäristön valmistuttua palaverit ja tiedonvaihto siirtyivät sähköisiltä alustoilta enemmän paikan päällä keskusteluihin.

Miten hyvin onnistuttiin?

Synteesiaineiston keruu tuotti simulaatio- ja mittausdataa, joka analysoitiin luvuissa 6.1 ja 6.2 kuvatuin menetelmin. Aineiston analysoinnin jälkeen voitiin tehdä johtopäätöksiä verkkomallin simulaatioiden, laiteympäristön fyysisen verkkomallin ja todellisen keskijänniteverkon vastaavuuksista.

Tässä vaiheessa päästiin varsinaiseen reflektivaan kehittämistyöhön: Analysoidusta aineistosta tehtyjen johtopäätösten perusteella simulaatioita pystyttiin muokkaamaan enemmän verkkomallia ja todellista verkkoa vastaaviksi. Tämän jälkeen simulaatioaineisto kerättiin tarvittavilta osin ja analysoitiin uudelleen.

Analysoitu synteesiaineisto ja tutkimustulokset avasivat työn kannalta kenties tärkeimmän mahdollisuuden: pohtia, mitata tai muilla tavoin arvioida työn tuloksia ja jatkotoimenpiteitä. Tämä vastasi lopulta viimeiseen tutkimuskysymykseen: Miten hyvin tulosten perusteella päästiin työn tavoitteisiin? Tulosten arviointi jakautui edelleen luvun 7 mukaisesti luotettavuusarviointiin, tulosten ja tietoperustan vertailuun sekä johtopäätöksiin ja kehitysehdotusten esittämiseen.

5.2 Laiteympäristön ja simulaatioiden kehittämisen lähtökohdat

5.2.1 Todellisesta verkosta verkkomalliksi

Lähtökohtana kehitystyössä toimi liitteessä 1 esitetty suunnitelma laiteympäristöön kuuluvan verkkomallin kansilayoutista. Mallin yläjännitepuoli kuvasi 110 kV suurjänniteverkkoa ja alajännitepuoli säteittäistä 20 kV keskijänniteverkkoa. Samalla verkkomallirakenteella haluttiin mallintaa kahta erilaista jakeluverkkoa: tyypillistä maaseutuverkkoa sekä tyypillistä kaupunkiverkkoa. Molemmissa verkoissa johto-osuuksissa oli sekä maakaapeleita että ilmajohtoja. Maaseutuverkossa johtimet olivat tyypillisesti pidempiä ja niiden poikkipinta-alat olivat pienempiä kuin kaupunkiverkossa. Verkkotyyppin valinta maaseutu- ja kaupunkiverkon välillä tapahtui omalla valintakytkimellä. Yläjännitepuoli pysyi kuitenkin samana verkkotyyppin valinnasta riippumatta.

Ylä- ja alajännitepuolten väliin mallinnettiin päämuuntaja. Muuntajan tähtipisteet voitiin erottimin joko kokonaan erottaa maasta, maadoittaa suoraan tai maadoittaa sammutuskuristimen kautta. Yläjännitepuolella sammutuskuristimen induktanssi oli kiinteästi aseteltu. Alajännitepuolella sammutuskuristimen on määrä olla säädettävä, minkä lisäksi sen rinnalle oli kaavailtu kytkettäväksi erillisellä katkaisijalla sammutusvastus. Alajännitepuolen sammutuskuristinta ei ollut vielä tätä työtä tehtäessä hankittu, mutta sille oli tehty Neplan-laskelmat.

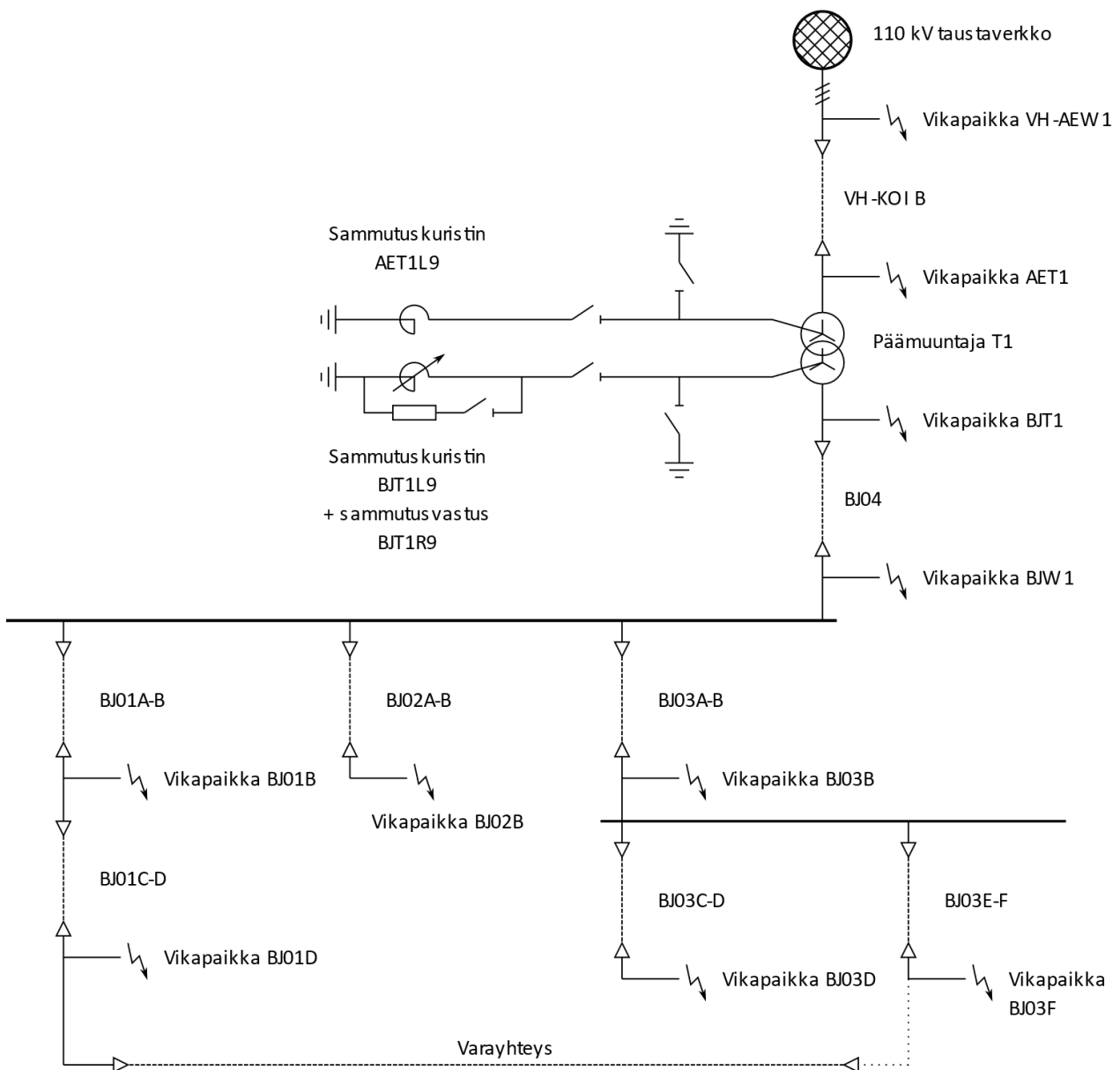
Luonnollisestikaan laiteympäristössä ei voitu käyttää todellisia 110 kV tai 20 kV jännitetasoja tilavuuden asettamien rajoitusten ja sähköturvallisuuden takia. Sen sijaan verkkomallissa syöttöjännitteenä toimi tavanomainen 400 V 3-vaiheinen pienjännite, ja koko verkkomallia syötettiin erotusmuuntajan kautta. Jännitetasot skaalattiin siten, että mallin alajännitepuolella jännite oli noin 1 % mallinnettavan keskijänniteverkon jännitteestä.

Johtoja ja kaapeleita kuvattiin simulaatioissa kuviossa 12 esitetysti vastuksilla, käämeillä ja kondensaattoreilla korvattuina. Fyysisessä laiteympäristön verkkomallissa tehtiin tästäkin vielä yksinkertaistus, eräänlainen puolikas π -johtomalli: Jokaista vaihejohtinta vastasi oma sarjaan kytketty vastus ja käämi, kuten π -johtomallissa, mutta yhden vaiheen kapasitanssit oli yhdistetty johdon yhteen päähän. Vertailun vuoksi kuvion 12 mukaisessa π -johtomallissa kapasitanssit oli jaettu johdon eri päihin tasan puoliksi.

Kokonaisresistanssit, -induktanssit ja -kapasitanssit mitoitettiin siten, että ne olivat yhtä suuret kuin vastaavien todellisten johtojen tai kaapeleiden. Koska jännite oli nyt kertaluokkaa 1/100 todellisesta jännitteestä, oli lähtökohtana se, että myös kaikki mitatut virrat olisivat samoin noin 1 % todellisista virroista. Jotta fyysisestä verkkomallista mitatut jännitteet ja sähkövirrat olisivat vertailukelpoisia todellisen verkon kanssa, ne skaalattiin mittamuuntajien kytkennöin takaisin mittalaitteille sopivalle tasolle. Esimerkiksi virtamittauksissa verkkomallista tuleva ensiöjohdin käämittiin virtamuuntajan mittaussydämen läpi tarpeeksi monella kierroksella, jotta toisiovirran suuruusluokka vastasi virtamuuntajan nimellistä toisiovirtaa.

Termeinä ”verkkomalli”, ”verkon mallinnus” ja pelkkä ”verkko” sekoittuvat helposti toisiinsa, joten määritellään tässä vaiheessa, mikä mihinkin viittaa: Mallinnuksen pohjana ollutta tyypillistä sähköverkkoa kutsutaan tästä eteenpäin **todelliseksi verkoksi**, vaikkakaan täsmälleen vastaavaa fyysistä jakeluverkkoa ei ole olemassa. **Verkkomallin sähköverkolla** puolestaan tarkoitetaan nimenomaan laiteympäristön sisällä olevaa verkkomallia, eli todellisen verkon ’pienoismallia’. Nämä kaksi verkkoa ovat luonnollisestikin hyvin samankaltaiset, mutta niissä on myös paljon eroavaisuuksia.

5.2.2 Todellisen verkon mallintamisen lähtökohdat



Kuvio 14. Simulaatioiden pohjana oleva todellisen verkon rakenne

Todellisen verkon tekniset tiedot saatiin opinnäytetyön toimeksiantajan laatimista Neplan-laskelmista ja -parametreista. Mallinnettavia todellisen verkon komponentteja olivat kuviossa 14 esitetyt 110 kV taustaverkko, päämuuntaja, sammutuskuristimet ja -vastukset sekä johto-osuudet VH-KOI B, BJ01, BJ02, BJ03, BJ04 ja varayhteys. BJ01, BJ02 ja BJ03 koostuivat lisäksi erillisistä vaihtoehdoisista johto-osuuksista. Johto-osuuksien tyypit riippuivat verkkotyypin valinnasta joko maaseutuverkoksi tai kaupunkiverkoksi. Johto-osuuksilla BJ01C-D ja BJ02A-B tyyppi voitiin erikseen valita joko maakaapeliksi tai ilmajohdoksi erillisillä valintakytkimillä. Vikapaikat sijoitettiin simulaatioissa

yksinkertaisuuden vuoksi johto-osuuksien alku- ja loppupäihin. Varayhteys oli kaikissa simulaatioissa kytketty kiinni ainoastaan johdon BJ01C-D päästä, eli verkko pysyi säteittäisenä.

110 kV taustaverkko

Taustaverkko mallinnettiin kolmivaiheisena jännitelähteenä, jossa oli kuormasta riippumaton sisäinen impedanssi. Verkon pääjännitteen tehollisarvo oli $U = 118$ kV, vaihtojännitteen taajuus $f = 50$ Hz ja resistanssi-reaktanssisuhde $R/X = 0,10$. Kolmivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan tehollisarvo oli $I_{k3V} = 13\,840,90$ A. Taustaverkon tähtipiste oli kytketty maahan 207 mH sammutuskuristimen kautta.

Päämuuntaja T1

Päämuuntajan kytkentäryhmä oli YNyn0. Muuntajan nimellisjännitteet olivat $U_{1N} = 118$ kV ja $U_{2N} = 20,5$ kV ja sen muuntosuhde oli käämikytkimellä muutettavissa ± 9 kertaa 1,67 % suhteellisella porrastuksella. Muuntajan nimellisteho oli $S_N = 25$ MVA, suhteellinen oikosulkuresistanssi $r_k = 0,4$ % sekä suhteellinen oikosulkuimpedanssi $z_k = 10,0$ %. Tässä työssä keskityttiin vain jatkuvan tilan ilmiöiden tarkasteluun, joten rautahäviöresistanssia ja magnetointireaktanssia ei tarvittu.

Sammutuskuristimet ja -vastukset

Päämuuntajan T1 yläjännitepuolen sammutuskuristin AET1L9 koostui puhtaasta induktanssista. Kuristimen induktanssi oli sekä maaseutu- että kaupunkiverkossa 200 mH. Alajännitepuolen kuristimen BJT1L9 induktanssi oli maaseutuverkossa 186 mH ja kaupunkiverkossa 473 mH. Sen rinnalla olevan sammutusvastuksen BJT1R9 resistanssi oli maaseutuverkossa 1,0 k Ω ja kaupunkiverkossa 3,0 k Ω .

Johdot ja kaapelit

Maaseutuverkon johtojen ja kaapeleiden tyypit, pituudet, ominaisresistanssit, ominaisinduktanssit ja käyttökapasitanssit on esitetty taulukossa 2. Kaupunkiverkon johtojen ja kaapelien vastaavat tiedot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Todellisen maaseutuverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot

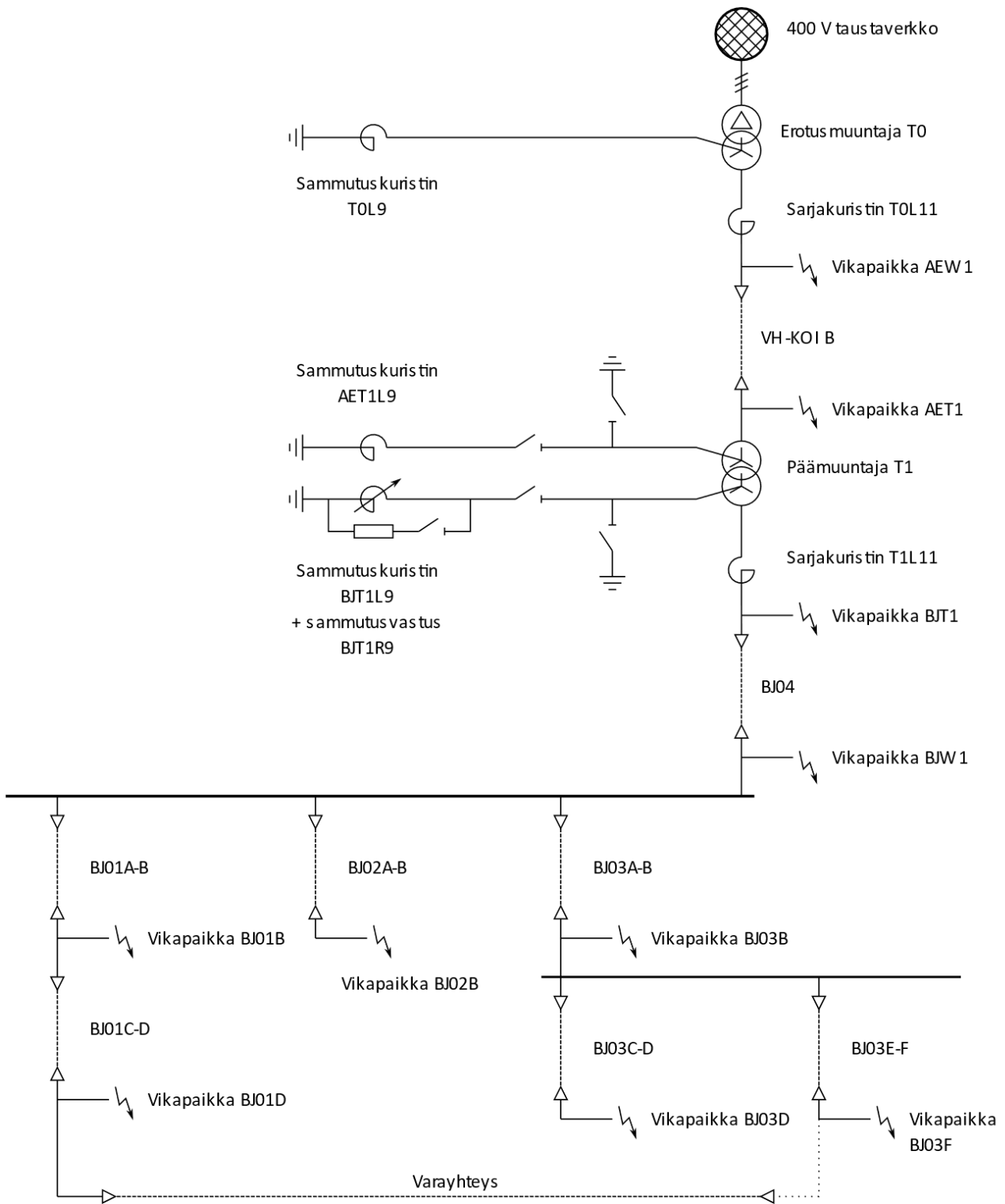
johto-osuus	tyyppi	s [km]	r [Ω /km]	l [mH/km]	c [μ F/km]
VH-KOI B	2 x Duck	25,886	0,049	0,917	0,0379
BJ01A-B	AHXAMK-W 3x150/35	20,0	0,206	0,369	0,2400
BJ01C-D maakaapelina	AHXAMK-W 3x150/35	15,0	0,206	0,369	0,2400
BJ01C-D ilmajohtona	ACSR 54/9 Raven	15,0	0,535	1,171	0,0061
BJ02A-B maakaapelina	AHXAMK-W 3x185/35	5,0	0,164	0,360	0,2600
BJ02A-B ilmajohtona	ACSR 54/9 Raven	50,0	0,535	1,171	0,0061
BJ03A-B	AHXAMK-W 3x240/35	15,0	0,125	0,350	0,3000
BJ03C-D	AHXAMK 3x150/35	15,0	0,206	0,369	0,2400
BJ03E-F	ACSR 54/9 Raven	40,0	0,535	1,171	0,0061
BJ04	AHXCMK 3 x 1 x 800	0,030	0,076	0,490	0,4900
Varayhteys	ACSR 34/6 Sparrow	15,0	0,848	1,219	0,0061

Taulukko 3. Todellisen kaupunkiverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot

johto-osuus	tyyppi	s [km]	r [Ω /km]	l [mH/km]	c [μ F/km]
VH-KOI B	2 x Duck	25,886	0,049	0,917	0,0379
BJ01A-B	AHXAMK-W 3x185/35	7,0	0,164	0,360	0,2600
BJ01C-D maakaapelina	AHXAMK-W 3x120/35	3,0	0,253	0,392	0,2300
BJ01C-D ilmajohtona	ACSR 54/9 Raven	3,0	0,535	1,171	0,0061
BJ02A-B maakaapelina	AHXAMK-W 3x240/35	3,0	0,125	0,350	0,3000
BJ02A-B ilmajohtona	ACSR 85/14 Pigeon	3,0	0,340	0,331	0,0080
BJ03A-B	AHXAMK-W 3x240/35	3,0	0,125	0,350	0,3000
BJ03C-D	AHXAMK 3x185/35	8,0	0,164	0,360	0,2600
BJ03C	ACSR 54/9 Raven	2,0	0,535	1,171	0,0061
BJ04	AHXCMK 3 x 1 x 800	0,030	0,076	0,490	0,4900
Varayhteys	AHXAMK-W 3x150/35	3,0	0,206	0,369	0,2400

5.2.3 Verkkomallin lähtökohdat

Kuviossa 15 esitetty verkkomalli oli rakenteeltaan luonnollisesti hyvin samankaltainen kuin todellisen verkon mallinnus. Eroavaisuuksia olivat vain lisänä oleva erotusmuuntaja T0 sekä lisänä olevat sarjakuristimet T0L11 ja T1L11. Lisäksi eri jännitetaso vuoksi muuntajien ja johto-osuuden VH-KOI B tekniset tiedot olivat erilaiset kuin todellisen verkon mallinnuksessa. Mallinnettavia verkkomallin komponentteja olivat kaikki vastaavat komponentit kuin edellä todellisessa verkossa, lisänä erotusmuuntaja ja sarjakuristimet. Näiden kaikkien tekniset parametrit saatiin jälleen opinnäytetyön toimeksiantajan suunnitelmista sekä Neplan-laskelmista.



Kuvio 15. Simulaatioiden pohjana olevan verkkomallin verkon rakenne

400 V taustaverkko

Laiteympäristön verkkomallia syöttävän verkon pääjännitteen tehollisarvo oli $U = 406,2$ V, taajuus $f = 50$ Hz ja resistanssi-reaktanssisuhde $R/X = 3,8954$. Kolmivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan

tehollisarvo oli $I_{k3V} = 4\,515,22$ A. Taustaverkon tähtipiste oli suoraan maadoitettu. Taustaverkon maadoituksella ei tosin tässä ollut vaikutusta, koska verkkomallia syötettiin Dy-kytketyn erotusmuuntajan kautta.

Erotusmuuntaja T0

Erotusmuuntajan kytkentäryhmä oli Dyn11. Muuntajan nimellisjännitteet olivat $U_{1N} = U_{2N} = 0,4$ kV, nimellisteho $S_N = 2,50$ kVA, suhteellinen oikosulkuresistanssi $r_k = 2,61$ % sekä suhteellinen oikosulkuimpedanssi $z_k = 2,68$ %, molemmat $+20$ °C lämpötilassa.

Päämuuntaja T1

Päämuuntajan kytkentäryhmä oli YNyn0. Muuntajan nimellisjännitteet olivat $U_{1N} = 0,4$ kV ja $U_{2N} = 0,205$ kV ja sen muuntosuhde oli käämikytkimellä muutettavissa ± 4 kertaa $1,67$ % suhteellisella porrastuksella. Muuntajan nimellisteho oli $S_N = 2,00$ kVA, suhteellinen oikosulkuresistanssi $r_k = 2,54$ % sekä suhteellinen oikosulkuimpedanssi $z_k = 2,61$ %, molemmat $+20$ °C lämpötilassa.

Sammutuskuristimet ja -vastukset

Erotusmuuntajan T0 alajännitepuolen tähtipiste oli kytketty maahan kiinteään sammutuskuristimen TOL9 kautta. Kuristimen mitattu induktanssi oli $45,7$ mH, ja mitattu resistanssi oli $0,374$ Ω. Päämuuntajan T1 yläjännitepuolen kiinteä sammutuskuristin AET1L9 oli induktanssiltaan ja resistanssiltaan sama kuin TOL9. T1:n alajännitepuolen simuloidun sammutuskuristimen BJT1L9 induktanssi oli maaseutuverkossa 186 mH ja kaupunkiverkossa 473 mH. Sen rinnalla olevan sammutusvastuksen BJT1R9 resistanssi oli maaseutuverkossa $1,0$ kΩ ja kaupunkiverkossa $3,0$ kΩ.

Sarjakuristimet TOL11 ja T1L11

Erotusmuuntajan T0 jälkeisen 3-vaiheisen sarjakuristimen TOL11 mitattu induktanssi oli $1,33$ mH, ja mitattu resistanssi oli $0,016$ Ω. Erotusmuuntajan T1 jälkeisen 3-vaiheisen sarjakuristimen T1L11 mitattu induktanssi oli $0,95$ mH, ja mitattu resistanssi oli $0,015$ Ω.

Johdot ja kaapelit

Taulukko 4. Verkkomallin maaseutuverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot

johto-osuus	s [km]	r [Ω /km]	l [mH/km]	c [μ F/km]
VH-KOI B	25,886	0,017	0,289	0,1136
BJ01A-B	20,0	0,206	0,318	0,2400
BJ01C-D maakaapelina	15,0	0,206	0,318	0,2400
BJ01C-D ilmajohtona	15,0	0,535	1,105	0,0060
BJ02A-B maakaapelina	5,0	0,166	0,331	0,2868
BJ02A-B ilmajohtona	50,0	0,535	1,105	0,0060
BJ03A-B	15,0	0,127	0,377	0,3133
BJ03C-D	15,0	0,206	0,318	0,2400
BJ03E-F	40,0	0,535	1,105	0,0060
BJ04	0,030	0,076	0,490	0,4900
Varayhteys	15,0	0,848	1,056	0,0063

Taulukko 5. Verkkomallin kaupunkiverkon johtojen ja kaapelien tekniset tiedot

johto-osuus	s [km]	r [Ω /km]	l [mH/km]	c [μ F/km]
VH-KOI B	25,886	0,017	0,289	0,1136
BJ01A-B	7,0	0,166	0,331	0,2686
BJ01C-D maakaapelina	3,0	0,253	0,411	0,2200
BJ01C-D ilmajohtona	3,0	0,535	1,105	0,0060
BJ02A-B maakaapelina	3,0	0,127	0,377	0,3133
BJ02A-B ilmajohtona	3,0	0,340	1,053	0,0080
BJ03A-B	3,0	0,127	0,377	0,3133
BJ03C-D	8,0	0,166	0,331	0,2686
BJ03C	2,0	0,535	1,105	0,0060
BJ04	0,030	0,076	0,490	0,4900
Varayhteys	3,0	0,206	0,318	0,2400

Verkkomallin johto-osuuksien resistanssit, induktanssit ja kapasitanssit olivat toimeksiantajan edustajan laiteympäristön todellisista komponenteista mittaamia, joten niiden arvot poikkesivat jonkin verran todellisen verkon vastaavista parametreista. Lisäksi oli otettava huomioon, että erotusmuuntajan T0 ja päämuuntajan T1 välisen verkon pääjännite oli 400 V, eli se ei verkkomallissa vastannut 1 %:a todellisen verkon vastaavasta jännitteestä. Näin ollen 400 V jännitetasossa olevan johto-osuuden, VH-KOI B:n, ominaisresistanssi, -induktanssi ja -kapasitanssi olivat skaalatut siten, että vikavirrat olisivat yhä 1 % todellisen suurjänniteverkon vastaavista. Maaseutuverkkomallin tekniset tiedot ovat taulukossa 4 ja kaupunkiverkkomallin vastaavat tiedot taulukossa 5. Kaikki parametrit olivat peräisin Neplan-laskelmista.

5.3 Matlab Simulink Simscape -simulaatiot

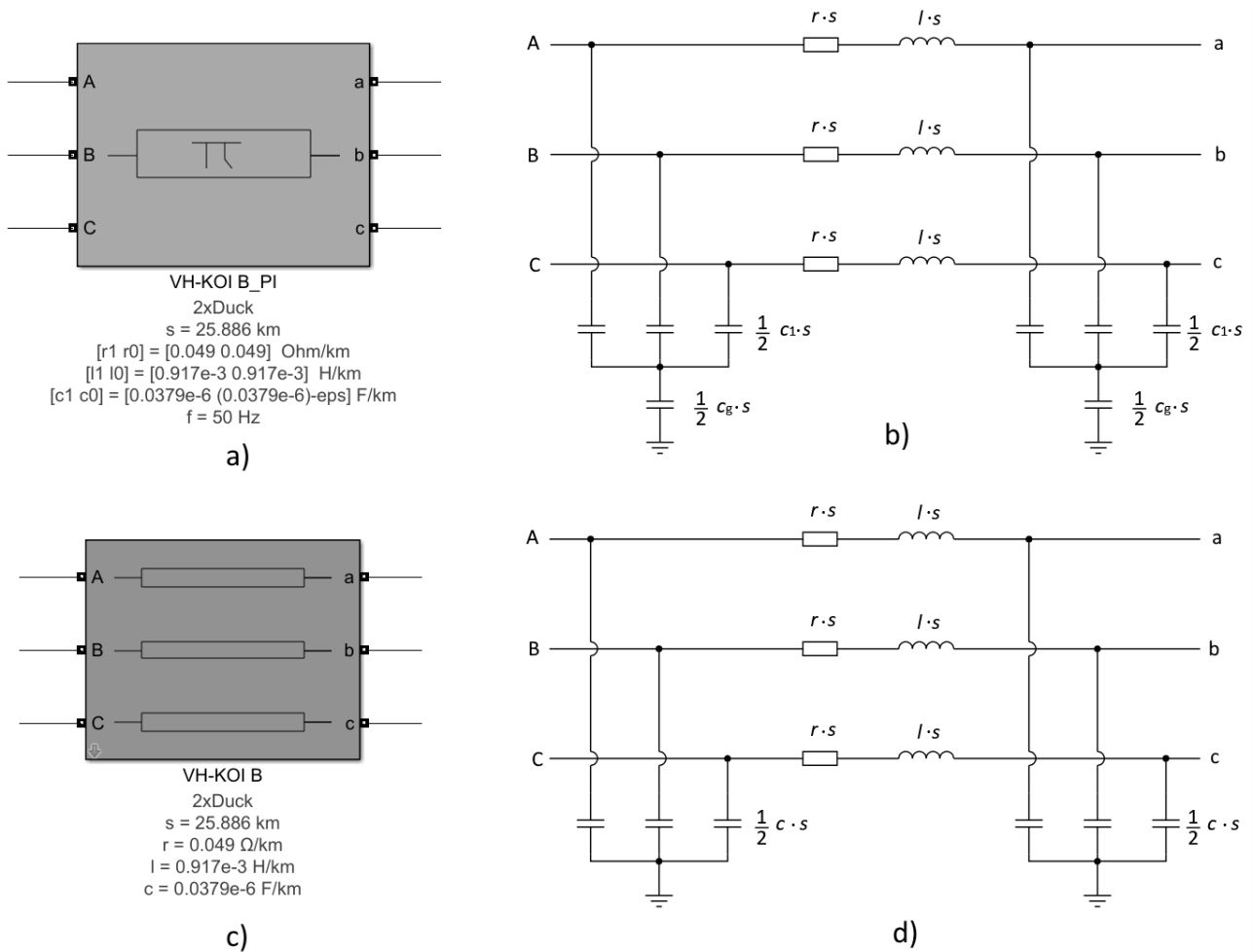
5.3.1 Todellisen verkon ja verkkomallin yhteiset lohkot

Matlab Simulink Simscape Electrical -simulaatioissa sähköverkko rakennettiin graafiseen Simulink-käyttöliittymään käyttäen Simscape Electrical -kirjaston blokkeja eli lohkoja. Simulaatio vaati toimintaan *Powergui*-lohkon sijoittamisen simulaation päätasolle. Tässä lohkossa määriteltiin simulaation sähköverkosta muodostaman yhtälöryhmän ratkaisutyyppi. Kaikille simulaatioille valittiin epäjatkuva eli diskreetti simulaatiotyyppi $10 \mu\text{s}$ näytteenottoajalla. Muut *powergui*-lohkon parametrit on lueteltu liitteessä 3.

Vikapaikkoihin tarvittavat resistanssiparametrit asetettiin *Model Workspace* -valikossa, jotta ne pysyivät varmasti samoina kaikissa vikapaikoissa eri puolilla simuloitua verkkoa. Oikosulkuresistanssiksi asetettiin $R_F = 0,001 \Omega$ ja maasulun maadoitusresistanssiksi asetettiin $R_g = 0,1 \Omega$. Nämä parametrit pysyivät samoina sekä todellisen verkon että verkkomallin kaikissa simulaatioissa.

Johdot ja kaapelit

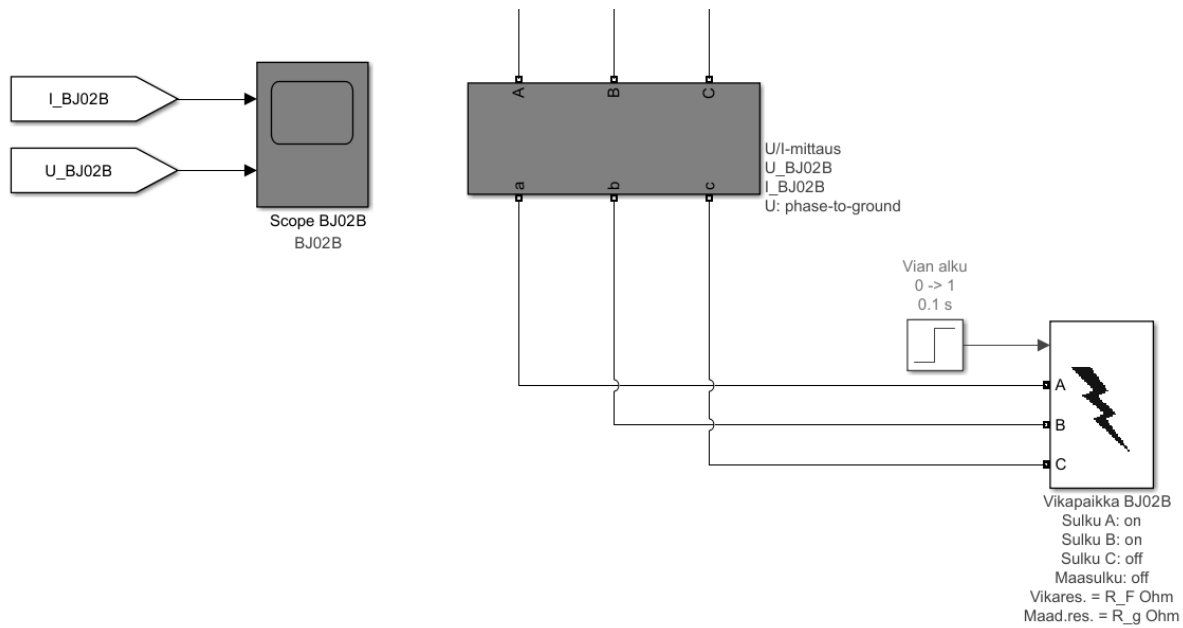
Johtojen ja kaapeleiden simuloinnissa käytettiin aluksi kuviossa 16a esitettyä Simscape Electrical -kirjaston valmista *Three-Phase PI Section Line* -lohkoa, jota jatkossa merkitään lyhenteellä **3PPI**. Simulaatioiden ongelmiksi muodostui ensi alkuun se, että kyseinen lohko vaati parametreikseen sekä myötä- että nollajärjestelmän ominaisresistanssit, -induktanssit ja kapasitanssit. Johto-osuuksista oli kuitenkin tiedossa vain yhden ominaisparametrit, joten kehitystutkimukseen avautui uusi tutkimusongelma. Tämän ongelman teoreettiseen ratkaisuun perehdyttiin jo luvussa 4.3.1 sekä liitteessä 2. Ratkaisun perusteella laadittiin kuviossa 16c esitetty yksinkertaistettu *Three-Phase PI Section Line* -lohko, jatkossa lyhyesti **3PPIyks**. Johto-osuuksien ominaisparametrit todellisen verkon simulaatioihin otettiin suoraan taulukoista 2 ja 3 sekä verkkomallin simulaatioihin taulukoista 4 ja 5. Simulaatiolohkojen 'taakse kätkeytyvät' sijaiskytkennät on esitetty kuvioissa 16b ja 16d.



Kuvio 16. Johto-osuuden simulaatiolohkot: a) Three-Phase PI Section Line -lohko "3PPI", b) 3PPI:n sijaiskytkentä, c) yksinkertaistettu lohko "3PPIyks" ja d) 3PPIyks:n sijaiskytkentä

Vikapaikat ja mittarit

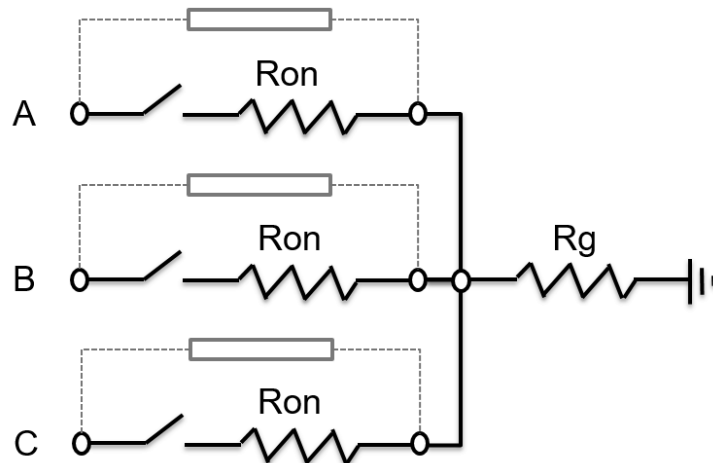
Vikatilanteiden simulointia varten käytettiin Simscape Electrical -kirjaston valmista *Three-Phase Fault* -lohkoa, joka on esitetty kuvion 17 oikeassa alareunassa. Lohkon parametrien valinnalla vaihejohtimien A, B ja C välille voitiin luoda mikä tahansa oiko- tai maasulku. Vika ohjattiin alkamaan lohkon ulkopuolisella porraskommuilla "Vian alku, 0 -> 1". Esimerkiksi kuvion 17 tilanteessa johto-osuuden BJ02B loppuun simuloitiin kaksivaiheinen oikosulku vaiheiden A ja B väliin 0,1 sekuntia simulaation käynnistymisestä. Vika- ja maadoitusresistanssien suuruudet voitiin syöttää joko erikseen jokaisen vikapaikan parametreihin tai käyttää Model Workspaceen asetettuja parametreja R_F ja R_g vastaavasti.



Kuvio 17. Esimerkki: johto-osuuden BJ02B lopussa oleva jännite- ja virtamittari sekä vikapaikka

Simscape simuloi vikatilanteen kuvion 18 mukaisella kytkennällä. Lohkon parametreista valittiin, mitkä kytkimistä A, B ja C sulkeutuvat vian alkaessa. Pelkästään yhden kytkimen sulkeminen ei tietenkään aiheuttanut mitään vikatilannetta. "Ron" tarkoitti vikaresistanssia ja "Rg" maadoitusresistanssia. Mikäli maasulku ei ollut valittuna, asettui maadoitusresistanssi automaattisesti 1 MΩ suuriseksi. Maasulun ollessa valittuna korvautui maadoitusresistanssi käyttäjän asettamalla, nolaa suuremmalla arvolla. Kytkimien ja vikaresistanssia kuvaavien vastusten yläpuolella olevat 'vastukset' kuvasivat RC-suodattimia, engl. *snubber*, jotka olivat valinnaisia. (Three-Phase Fault n.d.). Tässä työssä ei käytetty kyseisiä suodattimia, vaan viat oletettiin puhtaasti vikaresistanssin "Ron" ja mahdollisesti maadoitusresistanssin "Rg" kautta syntyviksi. Vikapaikkalohkon parametrien tarkempi asettelu on taulukoitu liitteessä 3.

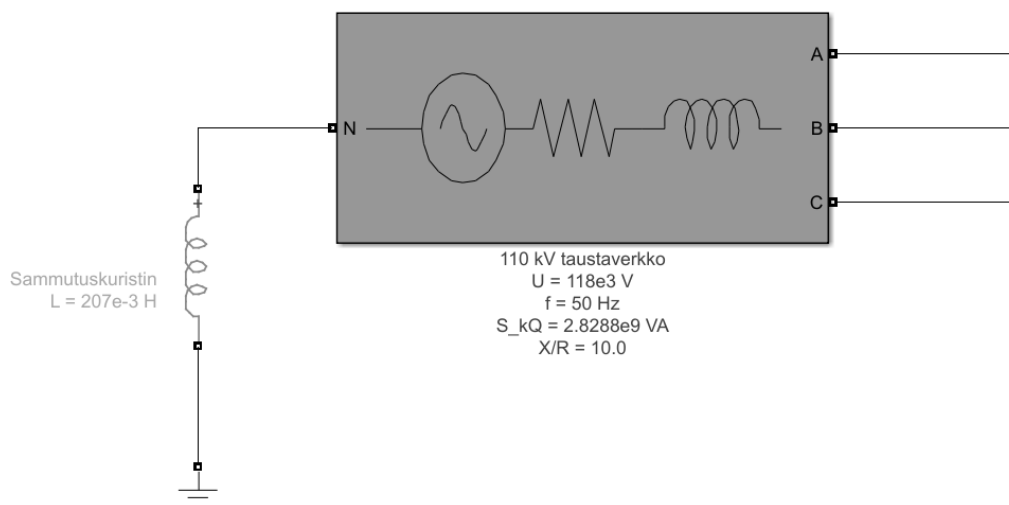
Tuloksia varten verkon simulaatioista oli kerättävä jännite- ja virtatietoa vikatilanteissa. Tähän käytettiin Simscape Electrical -kirjaston valmista *Three-Phase VI Measurement* -lohkoa ja siihen yhdistettyä *scope*-näyttöä. Nämä on esitetty kuvion 17 yläosassa. Se, miten simulaatiotulokset määritettiin scope-näyttöjen jännite- ja virtakuvaajista, käsitellään aineiston analysoinnin yhteydessä luvussa 6.1.



Kuvio 18. Three-Phase Fault -lohkon sisäinen kytkentäkaavio (Three-Phase Fault n.d.)

5.3.2 Todellisen verkon simulaatioiden lohkot

110 kV Taustaverkko



Kuvio 19. Todellinen taustaverkko Three-Phase Source -blokkina Simscapessa

Taustaverkko simuloitiin Matlab Simulink -ohjelmalla käyttäen Simscape Electrical -kirjastosta valmiiksi löytyvää, kuviossa 19 esitettyä *Three-Phase Source* -lohkoa. Taustaverkon oikosulkuteho määritettiin Neplan-parametreista käyttämällä kolmivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan oikosulkuvirran tehollisarvoa $I_{k3v} = 13\,840,90$ A. Yhtälön (1) mukaisesti jatkuvan tilan oikosulkuteho oli:

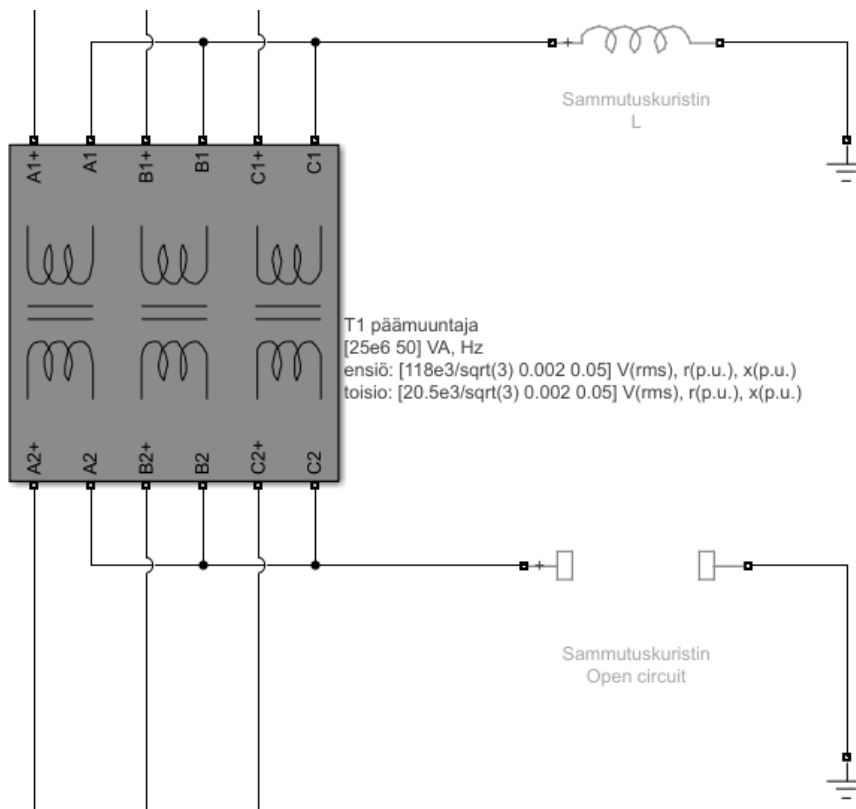
$$S_{kQ} = \sqrt{3} U I_{k3v} = \sqrt{3} \cdot 118\,000 \text{ V} \cdot 13\,840,90 \text{ A} \approx 2,8288 \text{ GVA.}$$

Taustaverkon resistanssi–reaktanssisuhde oli 0,10. Simscapessa verkolle asetetaan sen käänteisluku, eli reaktanssi–resistanssisuhde:

$$\frac{X}{R} = \frac{1}{R/X} = \frac{1}{0,10} = 10,0.$$

Verkon kolmivaiheiseksi konfiguraatioksi valittiin 'Yn', eli tähtikytkentä, jossa tähtipisteen liitin on saavutettavissa lohkon N-portissa. N-porttiin oli kytketty kuvion 19 mukaisesti taustaverkon tähtipisteen sammutuskuristin, joka simuloitiin ideaalisena 207 mH kelana. Simscape käytti vaiheiden L1, L2 ja L3 symboleina kirjaimia A, B ja C vastaavasti. Loput lohkon syötettävät parametrit ovat taulukoituina liitteessä 3.

Päämuuntaja T1



Kuvio 20. YNyn0-kytketty päämuuntaja T1 Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals -lohkona sekä ensiön sammutuskuristin ja maasta erotettu toisioin tähtipiste

Päämuuntaja T1 simuloitiin Simscape Electrical -kirjastosta valmiiksi löytyvällä *Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals* -lohkolla. Lohkon liittimet on nimetty siten, että A1+, B1+ ja C1+ tarkoittavat yläjännitepuolen vaiheiden L1, L2 ja L3 liittimiä ja A2+, B2+ ja C2+ vastaavia alajännitepuolen liittimiä. Muuntajan kytkentäryhmä YNyn0 määritettiin lohkon ulkopuolella yhdistämällä muuntajan käämien liittimet A1, B1 ja C1 sekä A2, B2 ja C2 kuvion 20 mukaisesti. Lohkossa ei ollut mahdollista simuloida valmista käämikytkintä, mutta sen voisi toteuttaa yhtä hyvin muuttamalla muuntajan nimellisjännitteitä lohkon parametreissa.

Muuntajan ensiön nimellisjännite oli 118 kV ja toision 20,5 kV. Lohkon Matlab-dokumentaation mukaan ensiön ja toision jännitteiksi on syötettävä nimenomaan nimellisjännitteiden tehollisarvot, mutta käyttöliittymässä lohkon parametreiksi halutaan kuitenkin vaihejännitteiden tehollisarvot (*Three-Phase Transformer 12 Terminals* n.d.). Lohkon parametrien asettelu ei itsessään pitänyt sisällään mitään tietoa käämien kytkentäryhmästä, joten oli oletettava, että ensiön ja toision jännitteiksi vaadittiin nimellisjännitteiden sijaan **käämijännitteiden** tehollisarvot. Siispä ensiö- ja toisiojännitteiksi asetettiin tähtikytkennän vaihejännitteet, eli $118 \text{ kV} / \sqrt{3}$ ja $20,5 \text{ kV} / \sqrt{3}$ vastaavasti.

Muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi annettiin suhteellisina p.u.-arvoina. Lohko käsitti muuntajan mallinnuksen kuvion 13a mukaisesti, joten suhteellinen oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi jaettiin yksinkertaisesti tasan kahtia ensiölle ja toisiolle. Oikosulkureaktanssi x_k laskettiin oikosulkuresistanssin r_k ja -impedanssin z_k kautta yhtälöstä (18).

$$r_{k1} = r_{k2} = \frac{r_k}{2} = \frac{0,4 \%}{2} = 0,2 \% = 0,002 \text{ (p.u.)}$$

$$x_{k1} = x_{k2} = \frac{x_k}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(10,0 \%)^2 - (0,4 \%)^2} \approx 5,0 \% = 0,05 \text{ (p.u.)}$$

Simulaatioissa ei oltu kiinnostuneita transientti-ilmiöistä, joten muuntajan rautahäviöresistanssi ja magnetointireaktanssi olivat sinällään merkityksettömiä parametreja. Niiden arvot jätettiin oletusarvoihinsa: $r_{Fe} = 200$ (p.u.) ja $x_m = 200$ (p.u.) (*Three-Phase Transformer 12 Terminals* n.d.).

Muuntajan tähtipisteisiin kytketyt sammutuskuristimet simuloitiin Matlabin Simscape Electrical -kirjastosta valmiiksi löytyvinä komponentteina. Ensiön sammutuskuristin AET1L9 oli tyypiltään

Series RLC Branch -lohko asetettuna puhtaaksi 200 mH induktanssiksi. Toision sammutuskuristin BJT1L9 ja sen rinnakkaisvastus BJT1R9 olivat yhdessä *Parallel RLC Branch* -lohkossa. Lohkon parametreista voitiin valita sammutuskuristimen tyyppi. Esimerkiksi kuviossa 20 alajännitepuolen verkkoa käytetään maasta erotettuna, joten toision sammutuskuristimen tyyppi on valittu ”*open circuit*” eli avoin piiri. Loput muuntajan ja sammutuskuristimien lohkoihin syötettävät parametrit ovat taulukoituina liitteessä 3.

5.3.3 Verkkomallin simulaatioiden lohkot

Verkkomalli simuloitiin Matlab Simulinkin Simscape Electrical -työkalulla pitkälti samalla tavalla kuin todellinen verkko luvussa 5.3.2. Tässä luvussa käsitellään sen vuoksi vain eroavaisuudet simuloitun todellisen verkon ja simuloitun verkkomallin välillä. Verkkomallin simulaatiot perustuivat laiteympäristöön rakennettuun fyysiseen verkkomalliin, joten suureiden arvoina käytettiin luvussa 5.2.3 lueteltuja todellisista komponenteista mitattuja arvoja. Siksi esimerkiksi kuristimille on ideaalisista keloista poiketen asetettu parametreiksi myös sarjaresistanssit.

400 V taustaverkko

Taustaverkko simuloitiin *Three-Phase Source* -lohkona likimain samoin kuin kuviossa 19. Ainoat eroavaisuudet olivat verkon jännite, oikosulkuteho, reaktanssi–resistanssisuhde sekä tähtipisteen suora maadoitus. Toisaalta, kuten luvussa 5.2.3 todettiin, simuloitun taustaverkon tähtipisteen maadoituksella ei pitäisi olla väliä, sillä se syöttää verkkomallia erotusmuuntajan T0 kautta. Taustaverkon oikosulkuteho määritettiin Neplan-parametreista käyttämällä kolmivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan oikosulkuvirran tehollisarvoa $I_{k3v} = 4\,515,22$ A. Yhtälön (1) mukaisesti jatkuvan tilan oikosulkuteho oli:

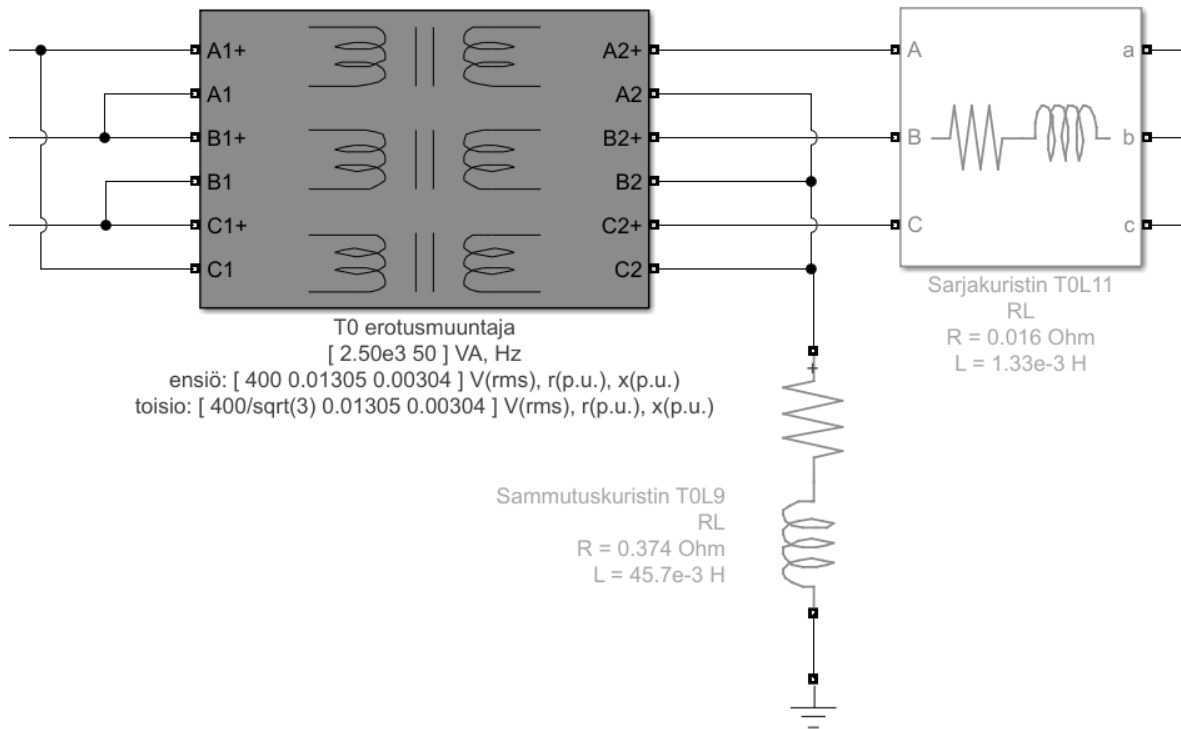
$$S_{kQ} = \sqrt{3}U I_{k3v} = \sqrt{3} \cdot 406,2 \text{ V} \cdot 4\,515,22 \text{ A} \approx 3,1767 \text{ MVA}.$$

Taustaverkon resistanssi–reaktanssisuhde oli Neplan-parametrien mukaan 3,8954. Reaktanssi–resistanssisuhde oli siis:

$$\frac{X}{R} = \frac{1}{R/X} = \frac{1}{3,8954} \approx 0,2567.$$

Verkon kolmivaiheiseksi konfiguraatioksi valittiin 'Yn', eli tähtikytkentä, jossa tähtipisteen liitin on saavutettavissa lohkon N-portissa. N-porttiin oli kytketty suoraan maapotentiaaliin. Loput lohkon syötettävät parametrit ovat taulukoituina liitteessä 3.

Erotusmuuntaja T0



Kuvio 21. Dyn11-kytketty erotusmuuntaja T0 sekä toision ei-ideaalinen sammutuskuristin TOL9 ja toision kolmivaiheinen sarjakuristin TOL11

Erotusmuuntaja T0 simuloitiin *Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals* -lohkolla, kuten T1 todellisen verkon simulaatioissa. Muuntajan kytkentäryhmä Dyn11 määritettiin lohkon ulkopuolella yhdistämällä muuntajan käämien liittimet A1, B1 ja C1 sekä A2, B2 ja C2, kuten kuviossa Kuvio 21. Sekä ensiön että toision nimellisjännite oli 0,4 kV. Kytkentäryhmän takia ensiö- ja toisiojännitteiksi asetettiin nimellisjännitettä vastaavat käämijännitteet, eli 400 V ja $400 \text{ V} / \sqrt{3}$ vastaavasti. Muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi annettiin suhteellisina p.u.-arvoina. Oikosulkureaktanssi x_k laskettiin oikosulkuresistanssin r_k ja -impedanssin z_k kautta yhtälöstä (18).

$$r_{k1} = r_{k2} = \frac{r_k}{2} = \frac{2,61\%}{2} = 1,305\% = 0,01305 \text{ (p.u.)}$$

$$x_{k1} = x_{k2} = \frac{x_k}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(2,68\%)^2 - (2,61\%)^2} \approx 0,304\% = 0,00304 \text{ (p.u.)}$$

Muuntajan lämpötilan oletettiin pysyvän +20 °C:ssa kaikissa simulaatioissa. T0:n rautahäviöresistanssi ja magnetointireaktanssi jätettiin oletusarvoihinsa: $r_{Fe} = 200$ (p.u.) ja $x_m = 200$ (p.u.).

Erotusmuuntajan ensiön sammutuskuristin TOL9 oli tyypiltään *Series RLC Branch* -lohko asetettuna RL-sarjakytkenäksi, joka kuvasi käämiä, jolla oli induktanssin lisäksi sarjaresistanssi. Toisioon kytketty kolmivaiheinen sarjakuristin TOL11 simuloitiin niin ikään RL-tyyppisenä *Three-Phase Series RLC Branch* -lohkona. Loput muuntajan T0 ja siihen liittyvien kuristimien simulaatiolohkoihin syötettävät parametrit ovat taulukoituina liitteessä 3.

Päämuuntaja T1

Verkkomallin päämuuntaja T1 simuloitiin myös vastaavalla tavalla kuin T1 todellisen verkon simulaatioissa. Nyt muuntajan ensiön nimellisjännite oli 0,4 kV ja toisioon 0,205 kV. Kytkentäryhmän YNyn0 takia ensiö- ja toisiojännitteiksi asetettiin nimellisjännitettä vastaavat käämijännitteet, eli $400 \text{ V} / \sqrt{3}$ ja $205 \text{ V} / \sqrt{3}$ vastaavasti. Oikosulkureaktanssi x_k laskettiin jälleen oikosulkuresistanssin r_k ja -impedanssin z_k kautta yhtälöstä (18).

$$r_{k1} = r_{k2} = \frac{r_k}{2} = \frac{2,54\%}{2} = 1,27\% = 0,0127 \text{ (p.u.)}$$

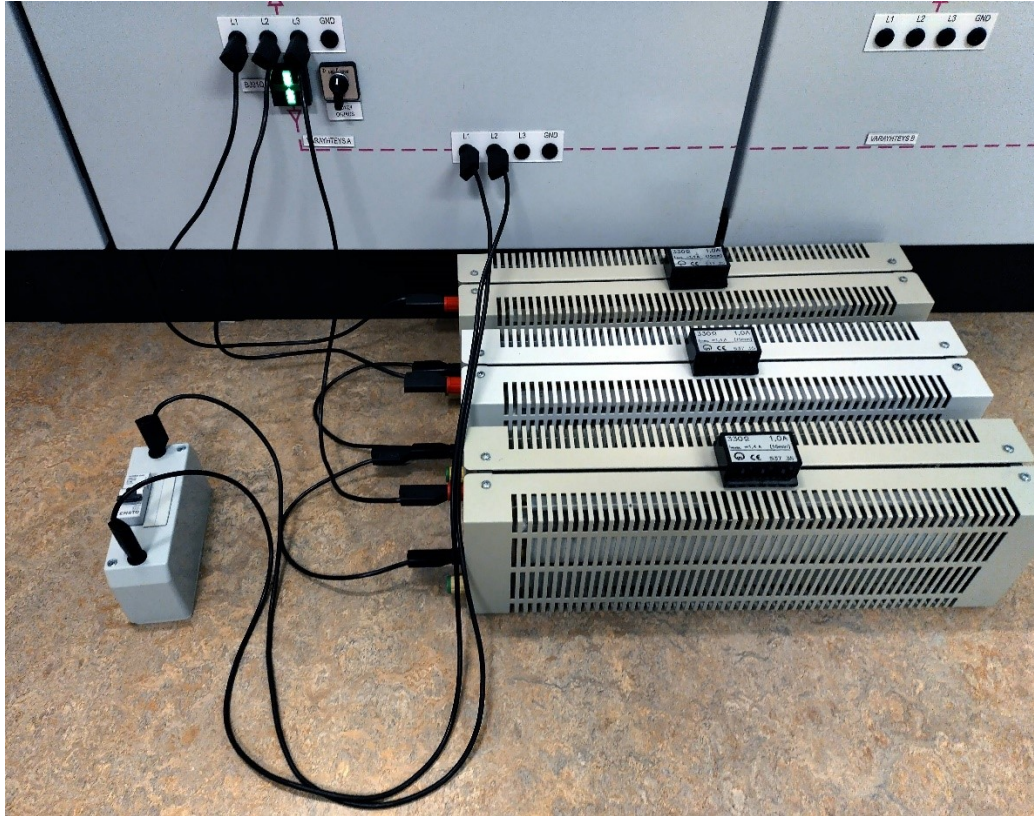
$$x_{k1} = x_{k2} = \frac{x_k}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(2,61\%)^2 - (2,54\%)^2} \approx 0,300\% = 0,00300 \text{ (p.u.)}$$

Myös T1:n rautahäviöresistanssi ja magnetointireaktanssi jätettiin oletusarvoihinsa: $r_{Fe} = 200$ (p.u.) ja $x_m = 200$ (p.u.), ja muuntajan lämpötilan oletettiin pysyvän +20 °C:ssa kaikissa simulaatioissa.

Ensiön sammutuskuristin AET1L9 oli tyypiltään *Series RLC Branch* -lohko asetettuna RL-sarjakytkenäksi. Toisioon sammutuskuristin BJT1L9 ja sen rinnakkaisvastus BJT1R9 olivat yhdessä *Parallel RLC Branch* -lohkossa. Lohkon parametreista voitiin valita sammutuskuristimen tyyppi maasta

erotettu avoin piiri, puhdas induktanssi, puhdas resistanssi tai rinnankytketty induktanssi ja resistanssi. Loput muuntajan ja sammutuskuristimien lohkoihin syötettävät parametrit ovat taulukoituina liitteessä 3.

5.4 Mittaukset



Kuvio 22. Vikatilanteen jäljittely laiteympäristössä: Tässä oltiin tekemässä kaksivaiheista oikosulkua varayhteyden puolivälissä. Alhaalla vasemmalla oikosulun käsinkytkentään käytetty johdonsuojakatkaisija ja oikealla kolme säätövastusta, jotka toimivat johto-osuuden BJ01D lopussa olevana kuormituksena.

Verkkomallin laiteympäristössä toteutettiin simulaatioiden jälkeen suppea mittaussosuus, jossa johdolla BJ01 ja sen perässä olevalla varayhteydellä testattiin kolmi- ja kaksivaiheisia oikosulkuja. Verkkomallin muut johtolähdöt olivat vielä koestamattomia, joten niitä ei käytetty mittauksissa. Myös maasulkujen koestus oli vielä kesken, joten mittauksissa keskityttiin ainoastaan kaksi- ja kolmivaiheisten oikosulkujen mallintamiseen. Oikosulut aiheutettiin joko käsikäyttöisellä suojakatkaisijalla, joka samalla toimi lisävarmistusta antavana suojalaitteena, tai pelkin johtimin kytkemällä

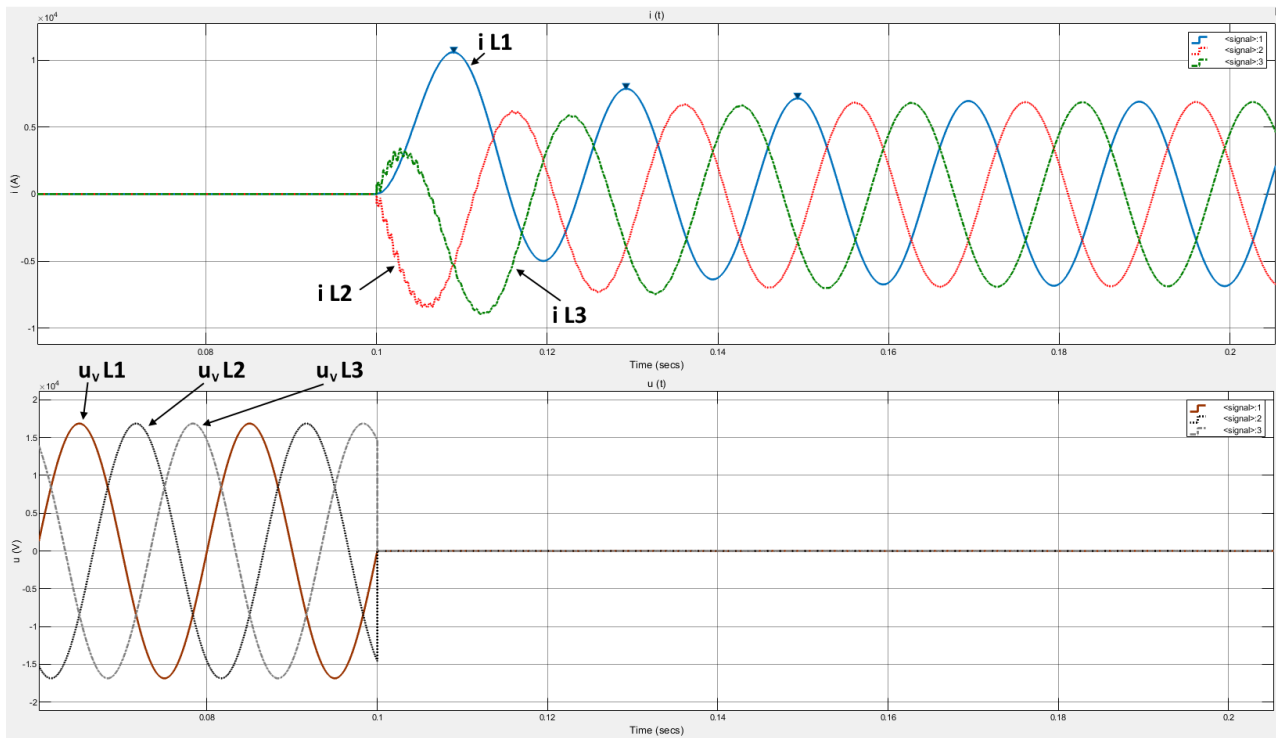
johtolähtö jännitteiseksi ns. vikaa vasten. Esimerkiksi kuvion 22 kytkennässä varayhteyden puolivälissä olevaan vikapaikkaan luotiin kaksivaiheinen oikosulku C16A-johdonsuojakatkaisijan kautta. Kun katkaisija suljettiin, syntyi oikosulku, joka sai laiteympäristön oman suojauskeinoon toimimaan suojauskeinojen mukaisesti.

Kaksivaiheiset oikosulut luotiin kuvion 22 mukaisesti siten, että verkko oli aluksi terveessä tilassa ja vika aiheutettiin manuaalisesti sulkemalla vaiheiden väliin asennettu yksinapainen johdonsuojakatkaisija. Kolmivaiheista oikosulkuä yritettiin ensin vastaavalla tavalla käyttämällä kolminapaista moottorinsuojakatkaisijaa. Se ei kuitenkaan onnistunut, sillä moottorinsuojakatkaisija itse toimi ennen kuin johdon BJ01 suojaus ehti havahtua. Tätä kokeiltiin useammankin kerran yhtä huonolla menestyksellä; välillä saatiin aikaan epäselektiivisiäkin laukaisuja kauempana verkkomallin verkossa. Lopulta kolmivaiheinen oikosulku toteutettiin vikaa vasten laukaisuna varayhteyden puolivälissä. Vikaa vasten laukaisussa koko johto-osuus oli alussa jännitteetön, kiinteä oikosulku rakennettiin vikapaikkaan pelkillä johtimilla ja johto-osuus kytkettiin jännitteiseksi. Tämä voisi vastata esimerkiksi tilannetta, jossa työmaadoitettuun johtoon kytketään vahingossa jännite kesken työn.

Mittauksia tehtiin yhteensä kolme kappaletta: Kaksivaiheinen oikosulku vikapaikassa BJ01B, kaksivaiheinen oikosulku varayhteyden puolivälissä sekä kolmivaiheinen oikosulku vikaa vasten varayhteyden puolivälissä. Kaikissa mittauksissa verkkotyyppiä oli valittu kaupunkiverkko ja johto-osuus BJ01C–D oli valittu maakaapeliksi. Mittausdata kerättiin verkkomallin ABB:n REX640-kennotermiälin häiriötallentimelta. Tallentimen data siirrettiin edelleen PC:lle ABB:n PCM600-ohjelmalla. Vikojen aikana kennotermiälin häiriötallennin keräsi dataa keskijännitekiskoa mallintavan BJW1-kiskon vaihejännitteistä sekä johdon BJ01 vaihevirroista. Vikatallenteiden jännite- ja virtatietojen analysointiin palataan luvussa 6.2.

6 Tulokset

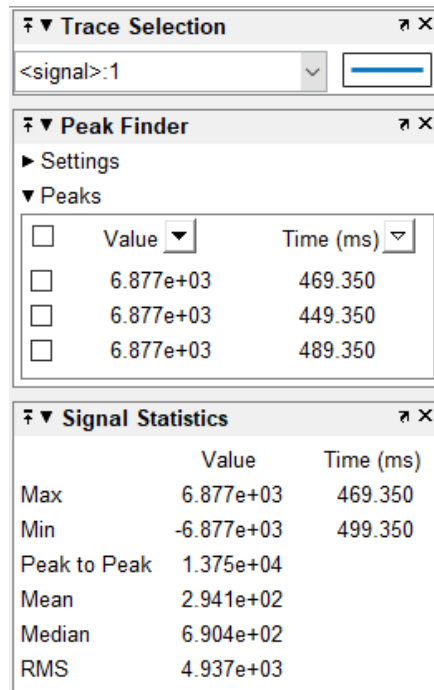
6.1 Simulaatioaineiston analysointi



Kuvio 23. Ylhäällä todellisen kaupunkiverkon simulaatiossa vikapaikassa BJ02B tapahtuneen kolmivaiheisen oikosulun aikana mitatut vaihevirrat ja alhaalla vaihejännitteet esitettyinä scope-näytöllä

Vikatilanteet simuloitiin todellisille kaupunki- ja maaseutuverkoille jokaisessa kuvion 14 mukaisessa vikapaikassa sekä verkkomallin kaupunki- ja maaseutuverkoille jokaisessa kuvion 15 mukaisessa vikapaikassa. Jokaisessa vikapaikassa simuloitiin kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku, yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa sekä yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa. Yhdellä simulaation ajokierroksella simuloitiin yhden verkon yhden vikapaikan yksittäinen vika. Esimerkiksi kaikkien vikapaikkojen kolmivaiheisia vikatilanteita ei siis voinut simuloida yhdellä kertaa, sillä Simulink olisi tulkinut sen tilanteeksi, jossa verkon joka kohdassa olisi yhtä aikaa oikosulku. Simulaation ajokertoja kertyi projektin aikana yhteensä pitkälle toista tuhatta kappaletta. Yhden simulaation pituus, *stop time*, simulaation omassa ajassa oli vikatyyppin mukaan 2,0 sekunnista 60 sekuntiin. Tietokoneelta meni yhden simulaation ajamiseen aikaa vastaavasti parista sekunnista muutamaan minuuttiin. Lyhyempi simulaatio riitti kolmi- ja kaksivaihei-

sille oikosuluille sekä maasta erotetun verkon yksivaiheisille maasuluille. Sammutetun verkon yksivaiheisille maasuluille simulaatioaikaa oli pidennettävä, jotta vikavirran tasavirtakomponentin vaimeneminen lähes nolnaan tuli näkyviin.



Kuvio 24. Scope-näyttöön yhdistetyt Peak Finder ja Signal Statistics -työkalut

Jokaisen vikapaikan yhteydessä olevasta mittarin scope-näytöstä saatiin kuvion 23 mukainen kuvaajapari, josta nähtiin eri vaiheiden virtojen ja vaihejännitteiden ajallinen käyttäytyminen vikatilanteessa. Scope-näytön yhteydessä oli käytettävissä erilaisia signaalin analysoinnin työkaluja. Niistä käyttöön valittiin kuviossa 24 esitetyt *Peak Finder*, eli huippuarvon näyttö ja *Signal Statistics*, eli signaalin tilastolliset tunnusluvut. Huippuarvon näyttö osoitti, millä ajanhetkillä valittu virta tai jännite saavutti hetkellisen huippuarvonsa. Tilastotunnuslukuista puolestaan nähtiin mm. valitun virran tai jännitteen amplitudit ja RMS-arvo. Jälkimmäinen tosin osoittautui hankalaksi työkaluksi, sillä sen laskema RMS-arvo riippui voimakkaasti valitun aikavälin pituudesta.

Vertailukohtina oli käytössä toimeksiantajan edustajan toimittamat todellisten verkkojen ja verkkomallien Neplan-laskelmat vikapaikkojen jatkuvan tilan vikavirroista. Alku- tai muutostilan oikosulkuvirtoja ei siis analysoitu, vaan simulaatioissa keskityttiin vain jatkuvan tilan vikavirtoihin. Jatkuva tila etsittiin Simscapessa vikaantuneen vaiheen tai -vaiheiden virtasignaalista kohdentamalla

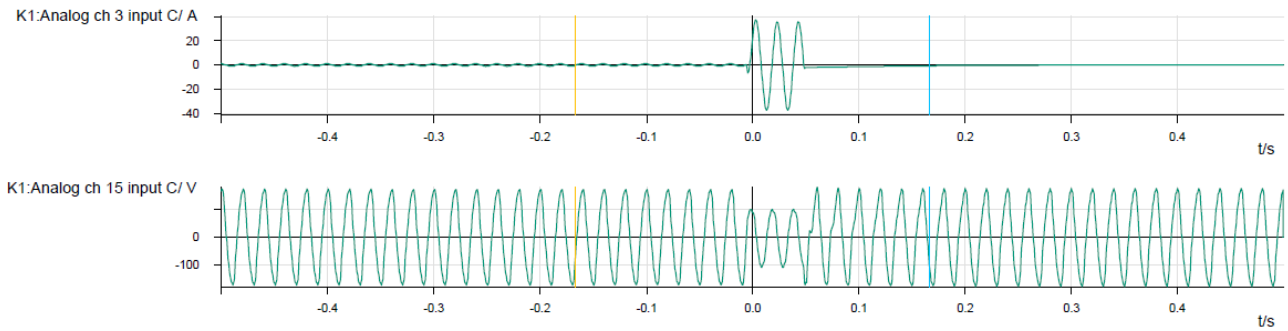
kuvaaja sellaiselle aikavälille, jossa virran peräkkäiset maksimi- ja minimiarvot olivat itseisarvoiltaan yhtä suuret, itseisarvojen summa oli yhtä suuri kuin *Peak to Peak* -arvo ja kolme peräkkäistä huippuarvoa ovat samat, kuten kuvion 24 tilanteessa. Mikäli nämä ehdot eivät toteutuneet, vikavirran tasavirtakomponentti ei vaimentunut nollaan simulaation loppuun mennessä. Tällöin simulaatioaikaa pidennettiin, kunnes jatkuva tila löytyi. Kuten edellä todettiin, tilastollisten tunnuslukujen RMS-laskelma ei ollut tarpeeksi luotettava käytettäväksi. Sen sijaan vikavirran jatkuvan tilan tehollisarvo laskettiin valitun vaihevirran amplitudista sinimuotoisen vaihtovirran tehollisarvon laskukaavalla $I_k = \hat{i} / \sqrt{2}$, jossa \hat{i} on sähkövirran amplitudi (Grant & Phillips 1990, 267). Esimerkiksi kuvion 24 arvoilla vikavirran tehollisarvo oli

$$I_k = \frac{6,877 \cdot 10^3 \text{ A}}{\sqrt{2}} \approx 4\,862,77 \text{ A}.$$

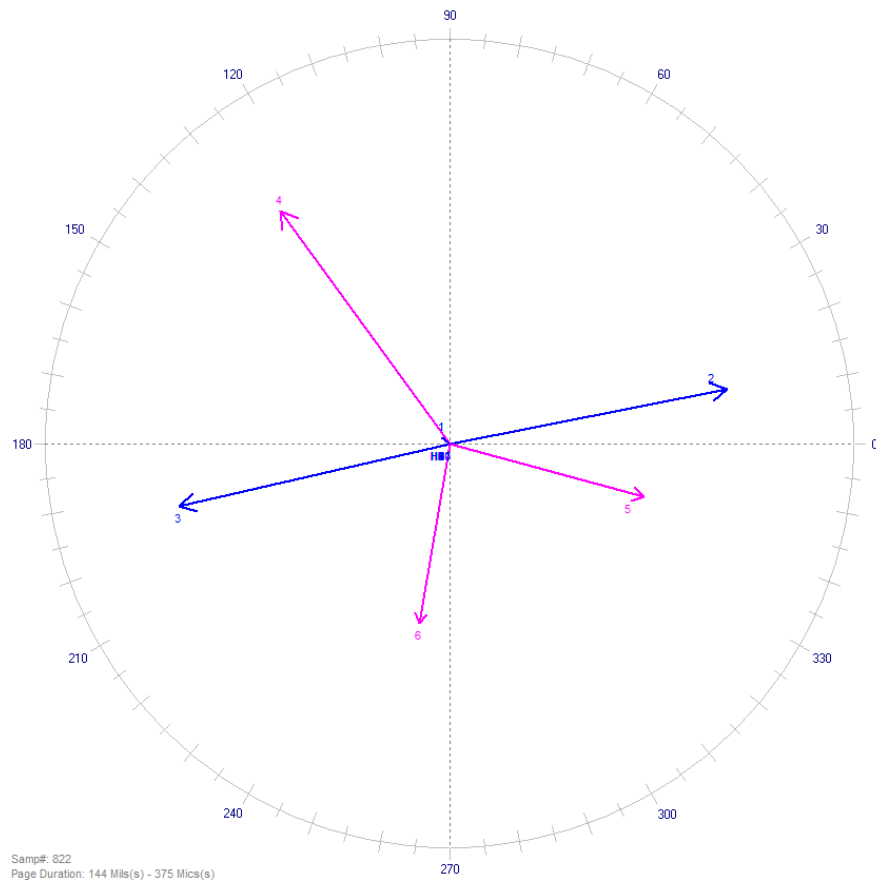
Simscapen huippuarvon näyttö ja tilastotunnusluvut ilmoittivat kaikki lukemat samalla kolmen desimaalin tarkkuudella riippumatta virran suuruuden kertaluokasta. Neplanin laskemat vikavirrat puolestaan olivat kaikki kahden desimaalin tarkkuudella ilmoitettuja. Kompromissina ja tulosten vertailun mahdollistamiseksi kaikki virrat esitetään jatkossa kahden desimaalin tarkkuuteen pyöristettyinä, vaikka merkitsevien numeroiden määrä muuttuisikin.

6.2 Mittausaineiston analysointi

Häiriötallentimelta tietokoneelle siirretty data muutettiin .dat-tiedostoista visuaaliseen muotoon Siemensin Sigran ja Schneider Electricin Wavewin -ohjelmilla. Ensin mainitulla ohjelmalla tuotettiin vaihejännitteiden ja -virtojen kuvaajia, kuten kuviossa 25. Jälkimmäisellä ohjelmalla tarkasteltiin kuvion 26 mukaisia vaihevektoridiagrammeja. Verkkomallin suojalaitteiden toiminnan takia häiriötallentimien keräämän datan mielenkiintoinen osuus jäi käytännössä vaihtojännitteen kahdenkolmen jaksonajan mittaiseksi, eli vikatilanteista voitiin tarkastella vain alkuhetken ilmiöitä. Koska mittaustilanteissa vikavirrat eivät ehtineet välttämättä saavuttaa jatkuvan tilan arvoja, ei mittaustuloksista tehty simulaatiotulosten tavoin numeerista analyysiä vertailuun. Mittaustuloksia käytettiin vain simulaatioiden käyrämuotojen silmämääräiseen luotettavuusarviointiin ja laadullisella tasolla tietoperustaan vertailuun.



Kuvio 25. Sigralla piirretty verkkomallin kaupunkiverkon johdon BJ01B lopussa tapahtuvan kaksivaiheisen oikosulun yhden vikaantuneen vaiheen virta ylhäällä ja BJW1-kiskon vastaava vaihejännite alhaalla



Kuvio 26. Wavewinillä piirretty vaihevektoridiagrammi verkkomallin kaupunkiverkon johdon BJ01B lopussa tapahtuvan kaksivaiheisen oikosulun aikana: Vektorit 1, 2 ja 3 ovat virtaosoittimia ja vektorit 4, 5 ja 6 vaihejännitteiden osoittimia

6.3 Keskeiset simulaatiotulokset

6.3.1 Johtomallien 3PPI ja 3PPIyks vertailu

Taulukko 6. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen maaseutuverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k3V,3PPI}$ [A]	$I_{k3V,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	13 774,44	13 774,44	0,00	0,00
AET1	5 451,79	5 451,09	0,70	0,01
BJT1	5 764,33	5 764,33	0,00	0,00
BJW1	5 751,61	5 750,90	0,71	0,01
BJ01B	1 957,27	1 956,56	0,71	0,04
BJ01D maakaapeli	1 252,99	1 252,29	0,70	0,06
BJ01D ilmajohto	759,43	759,43	0,00	0,00
BJ02B maakaapeli	4 265,98	4 265,98	0,00	0,00
BJ02B ilmajohto	355,11	354,97	0,14	0,04
BJ03B	2 827,72	2 827,72	0,00	0,00
BJ03D	1 604,43	1 603,72	0,71	0,04
BJ03F	403,76	403,69	0,07	0,02

Jokaisesta simulaatiosta oli kaksi versiota, jotka poikkesivat toisistaan vain johto-osuuksia mallintavien lohkojen osalta. Mallinnukseen oli valittavissa joko Simscape Electrical -kirjaston valmis lohko Three-Phase PI Section Line, lyhyemmin 3PPI, tai tätä työtä varten laadittu yksinkertaistettu lohko 3PPIyks. Näiden lohkojen ominaisuudet ja erot käsiteltiin luvussa 5.3.1 sekä liitteissä 2 ja 3. Johtomallien vertailua varten ajettiin erilaiset vikatilanteet eri puolilla verkkoa molemmilla johtomallivaihtoehdoilla todellisen maaseutuverkon, todellisen kaupunkiverkon, verkkomallin maaseutuverkon sekä verkkomallin kaupunkiverkon simulaatioissa. Tarkoituksena oli saada vertailtavaksi numeerista dataa, joiden avulla johtomalleja voitaisiin vertailla keskenään.

Data kerättiin simulaatioista luvussa 6.1 esitetyn menetelmän jokaisesta vikapaikasta. Esimerkin vuoksi todellisen maaseutuverkon kolmivaiheisten oikosulkujen simulaatioista määritetyt vikavirrat on esitetty taulukossa 6. Muiden vika- ja verkkotyypin vastaavat tulokset ovat liitteessä 4.

Johtomallien keskinäisen vertailun helpottamiseksi eri johtomallien tuloksista laskettiin **virtaero ΔI** eli vikavirtojen erotus siten, että jokaisesta 3PPI-johtomallin vikavirrasta on vähennetty vastaava 3PPIyks-mallin vikavirta. Lisäksi jokaisesta erotuksesta laskettiin **suhteellinen virtaero δI** , joka on

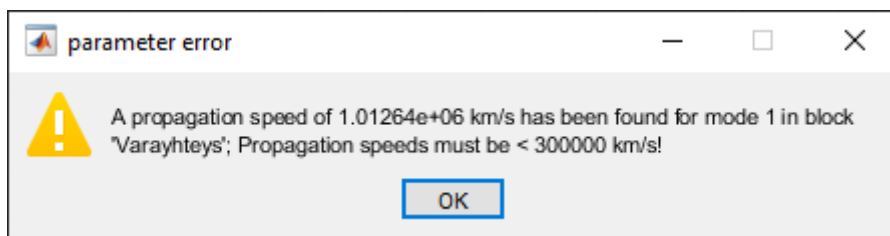
em. erotuksen suhde 3PPI-vikavirtaan prosentteina. Esimerkiksi taulukon 6 alimmalla rivillä virtaero laskettiin seuraavasti:

$$\Delta I = I_{k3V,3PPI} - I_{k3V,3PPIyks} = 403,76 \text{ A} - 403,69 \text{ A} = 0,07 \text{ A}.$$

Vastaava suhteellinen virtaero oli

$$\delta I = \frac{\Delta I}{I_{k3V,3PPI}} \cdot 100 \% = \frac{0,07 \text{ A}}{403,76 \text{ A}} \cdot 100 \% \approx 0,02 \%$$

Johtomallien vertailuun tulosten valossa palataan luvussa 7.1.1. Kuitenkin tässä vaiheessa voitiin jo tehdä eräs tärkeä havainto työn jatkon kannalta: suhteellisista virtaeroista huomattiin, että simulaatioiden tulosten ero eri johtomalleilla oli yleisesti ottaen mitättömän pieni; suhteellinen erotus vaihteli 0 %:sta vain reiluun 3 %:iin. Koska johto-osuuksien tyypillä, 3PPI vai 3PPIyks, ei näyttänyt olevan oleellista merkitystä saatuihin tuloksiin, päätettiin loput simulaatiot ja vertailut tehdä pelkillä 3PPIyks-johtomalleilla. Samalla tarvittavien simulaatiokierrosten määrä pieneni puoleen.



Kuvio 27. Matlabin varoitusikkuna, jossa huomautettiin sähkömagneettisen aallon etenevän simulaatiossa johto-osuudella valoa nopeammin ominaisparametrien asettelu takia

3PPI-johtomallin simulaatioissa havaittiin viitteitä siitä, ettei luvussa 4.3.1 ja liitteessä 2 kuvattu ominaisparametrien asettelu välttämättä ollut toimivin mahdollinen ratkaisu. Simscape simuloi myös transientti-ilmiöitä, joissa se havaitsi johtomallin rikkovan fysiikan lakeja pahan kerran: Simulaatioiden alussa Matlab tuotti useasti kuvion 27 mukaisen virheviestin, jonka mukaan sähkömagneettinen aalto etenisi johto-osuudella noin kolminkertaisella valonnopeudella.

Koska transientti-ilmiöiden tutkiminen ei ollut tämän työn aiheena, eivätkä simulaatiot kaatuneet tähän – kieltämättä fysiikan lakeja räikeästi rikkovaan – käyttäytymiseen, sivuutettiin tämä yksityiskohta ilman jatkotutkimusta. Vertailun vuoksi sanottakoon kuitenkin, että 3PPIyks-johtomallin simulaatioiden aikana kyseisiä varoituksia ei tullut – eikä ihmekään, sillä 3PPIyks-lohkoihin ei ollut transientti-ilmiöiden laskentaa edes ohjelmoitu.

6.3.2 Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat

Taulukko 7. Simscape ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa todellisessa maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k3v,Simscape}$ [A]	$I_{k3v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	13 774,44	13 840,90	66,46	0,48
AET1	5 451,09	5 622,25	171,16	3,04
BJT1	5 764,33	5 895,71	131,38	2,23
BJW1	5 750,90	5 881,58	130,68	2,22
BJ01B	1 956,56	1 937,11	-19,45	-1,00
BJ01D maakaapeli	1 252,29	1 236,40	-15,89	-1,29
BJ01D ilmajohto	759,43	–	–	–
BJ02B maakaapeli	4 265,98	4 285,05	19,07	0,45
BJ02B ilmajohto	354,97	–	–	–
BJ03B	2 827,72	2 818,06	-9,66	-0,34
BJ03D	1 603,72	1 585,31	-18,41	-1,16
BJ03F	403,69	397,06	-6,63	-1,67

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan tehollisarvot määritettiin simulaatioista vastaavin menetelmin kuin luvussa 6.1 kerrottiin. Johto-osuuksien mallinnuksessa simulaatioissa käytettiin yksinomaan tätä työtä varten kehitettyä yksinkertaistettua 3PPIyks-mallia. Tulokset on taulukoitu taulukossa 7 ja liitteessä 5. Simulaatioista saatujen tulosten ja toimeksiantajan laatimien Neplan-laskelmien vertailun helpottamiseksi laskettiin jälleen virtaero ΔI eli vikavirtojen erotus siten, että jokaisesta Neplanin laskemasta vikavirrasta on vähennetty vastaava simulaatiosta määritetty vika-virta. Lisäksi jokaisesta erotuksesta laskettiin suhteellinen virtaero δI , joka on em. erotuksen suhde Neplanin-vikavirtaan prosentteina. Esimerkiksi taulukon 7 alimmalla rivillä virtaero laskettiin seuraavasti:

$$\Delta I = I_{k3v,Neplan} - I_{k3v,Simscape} = 397,06 \text{ A} - 403,69 \text{ A} = -6,63 \text{ A}.$$

Vastaava suhteellinen virtaero oli

$$\delta I = \frac{\Delta I}{I_{k3v, Neplan}} \cdot 100 \% = \frac{-6,63 \text{ A}}{397,06 \text{ A}} \cdot 100 \% \approx -1,67 \%$$

Todellisen maaseutuverkon ja todellisen kaupunkiverkon Neplan-laskelmat johto-osuuksien BJ01C–D ja BJ02A–B ilmajohtoversioille puuttuivat, joten niiden lopussa oleviin vikapaikkoihin ei laskettu virtaeroja.

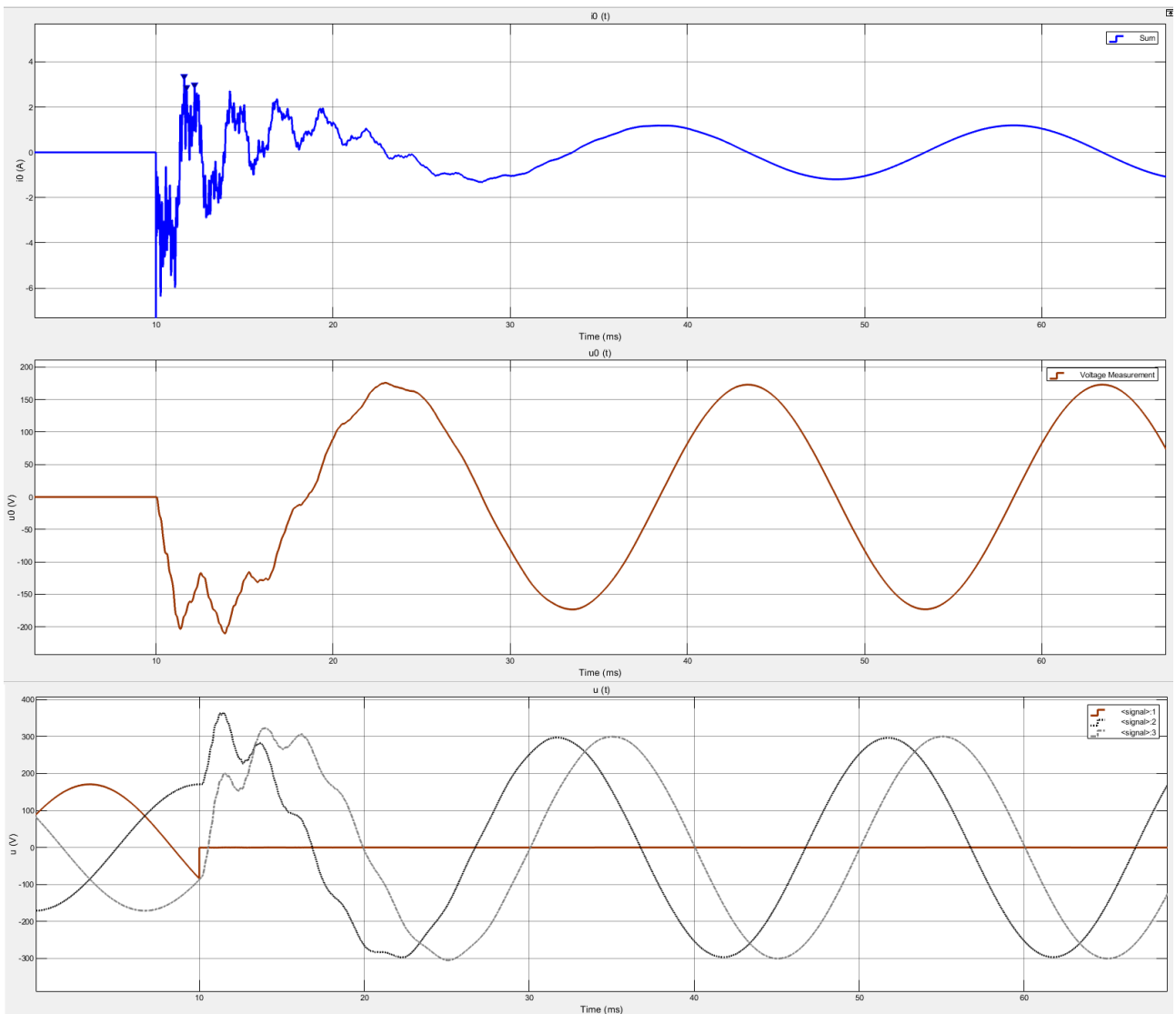
6.3.3 Kaksivaiheiset oikosulkuvirrat

Kaksivaiheisen oikosulkuvirran jatkuvan tilan tehollisarvot, Simscapen tulosten ja Neplanin virtaero ΔI ja suhteellinen virtaero δI määritettiin samalla tavalla kuin luvuissa 6.1 ja 6.3.2. Tulokset on esitetty liitteessä 5. Todellisen maaseutuverkon ja todellisen kaupunkiverkon Neplan-laskelmat johto-osuuksien BJ01C–D ja BJ02A–B ilmajohtoversioille puuttuivat, joten niiden lopussa oleviin vikapaikkoihin ei laskettu virtaeroja.

6.3.4 Yksivaiheiset maasulkuvirrat maasta erotetuissa verkoissa

Maasta erotetun verkon yksivaiheisen maasulkuvirran jatkuvan tilan tehollisarvot, Simscapen tulosten ja Neplanin virtaero ΔI ja suhteellinen virtaero δI määritettiin samalla tavalla kuin luvuissa 6.1 ja 6.3.2. Tulokset on taulukoitu liitteessä 5. Johto-osuuksille BJ01C–D ja BJ02A–B simuloitiin pelkät maakaapelivaihtoehdot siten, että molemmat olivat valittuina maakaapeleiksi. Todellisen maaseutuverkon vikapaikan BJ03F maasulkuvirrat poikkesivat toisistaan epäilyttävän paljon. Tämän epäiltiin johtuvan virheellisestä Neplan-tuloksesta.

Verkkomallin kaupunkiverkossa vikapaikkaan BJ01D simuloitiin yksivaiheinen maasulku nollavirran ja tähtipistejännitteen ajallisen käyttäytymisen tarkkailua varten. Nämä kuvaajat on esitetty kuviossa 28. Nollavirta mitattiin simulaatiossa vikapaikasta ja tähtipistejännite päämuuntajan T1 toisison tähtipisteen ja maan väliltä. Lisäksi kuviossa 28 on esitetty vaihejännitteiden käyttäytymisen vian aikana.



Kuvio 28. Verkkomallin kaupunkiverkon vikapaikan BJ01D yksivaiheisessa maasulussa simuloidut virrat ja vaihejännitteet: Ylhäällä nollavirta vikapaikassa, keskellä tähtipistejännite päämuuntajan toisiossa ja alhaalla vaihejännitteet vikapaikassa

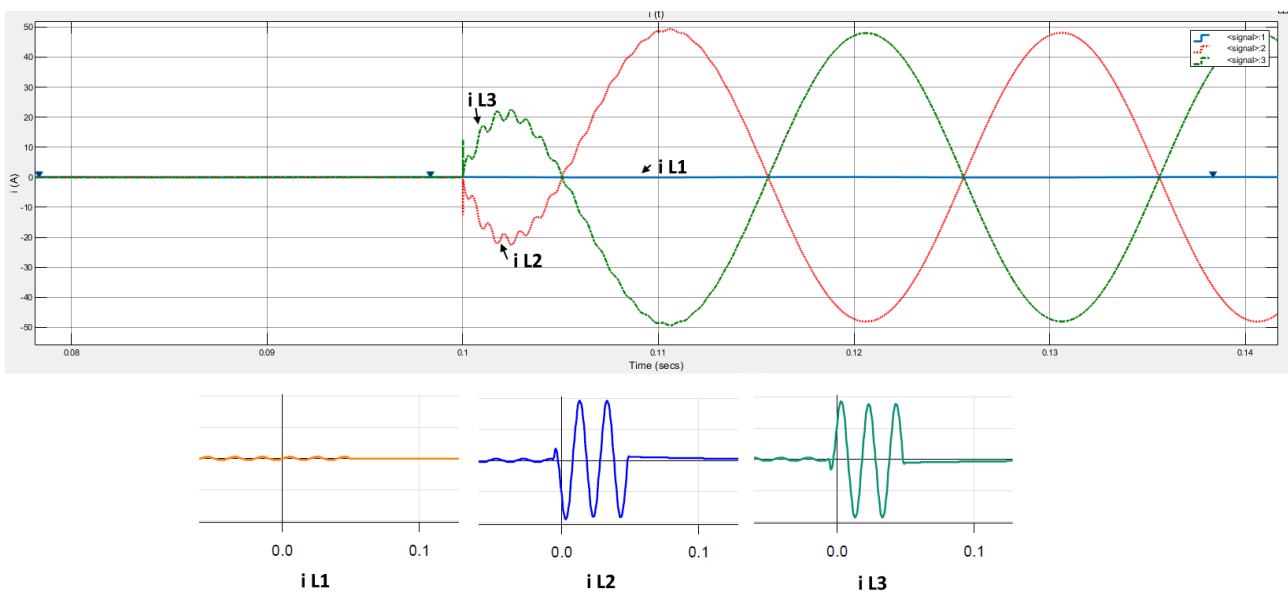
6.3.5 Yksivaiheiset maasulkuvirrat sammutetuissa verkoissa

Sammutetun verkon yksivaiheisen maasulkuvirran jatkuvan tilan tehollisarvot, Simscapen tulosten ja Neplanin virtaero ΔI ja suhteellinen virtaero δI määritettiin samalla tavalla kuin luvuissa 6.1 ja 6.3.2. Tulokset on esitetty liitteessä 5. Johto-osuuksille BJ01C–D ja BJ02A–B simuloitiin pelkät maakaapelivaihtoehdot siten, että molemmat olivat valittuina maakaapeleiksi. Verkkomallin maaseutuverkolle ja verkkomallin kaupunkiverkolle ei ollut saatavilla Neplan-laskelmia, joten näille verkotyypeille on esitetty pelkät simulaatiotulokset.

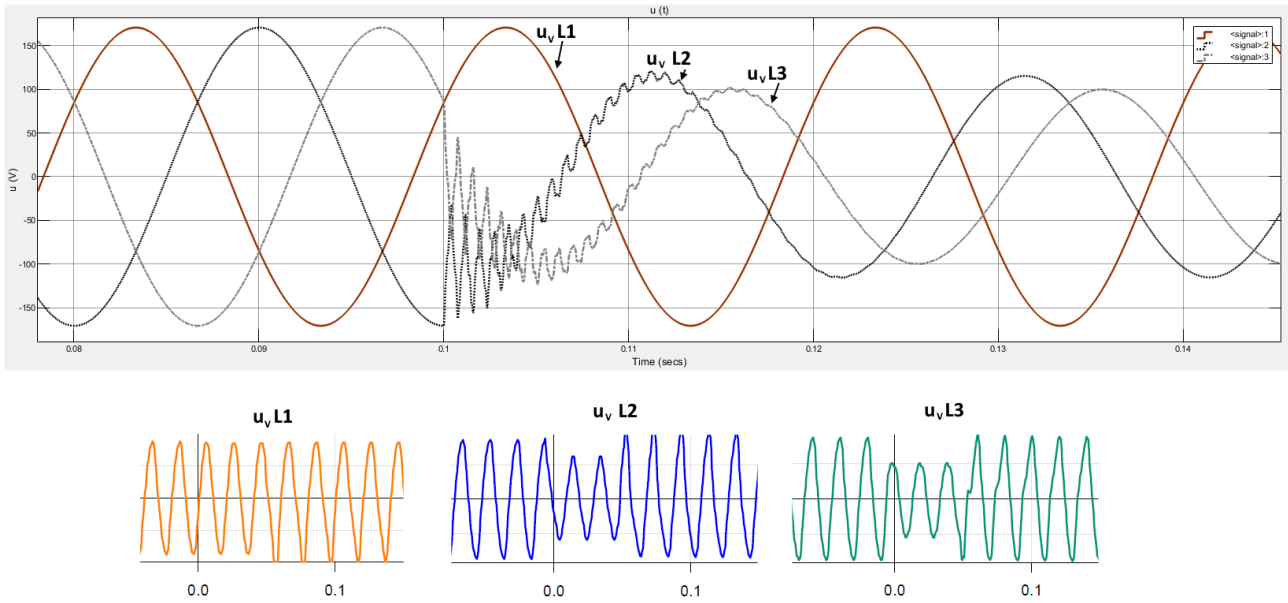
6.4 Keskeiset mittaustulokset

Mittaukset tehtiin verkkomallilla kahdelle kaksivaiheiselle oikosulkutilanteelle ja yhdelle kolmivaiheiselle oikosulkutilanteelle luvussa 5.4 kerrotuin menetelmin. Näistä vikatilanteista kerättiin vaihejännite- ja virtakuvaajat ajan funktioina sekä vaihevektoridiagrammit.

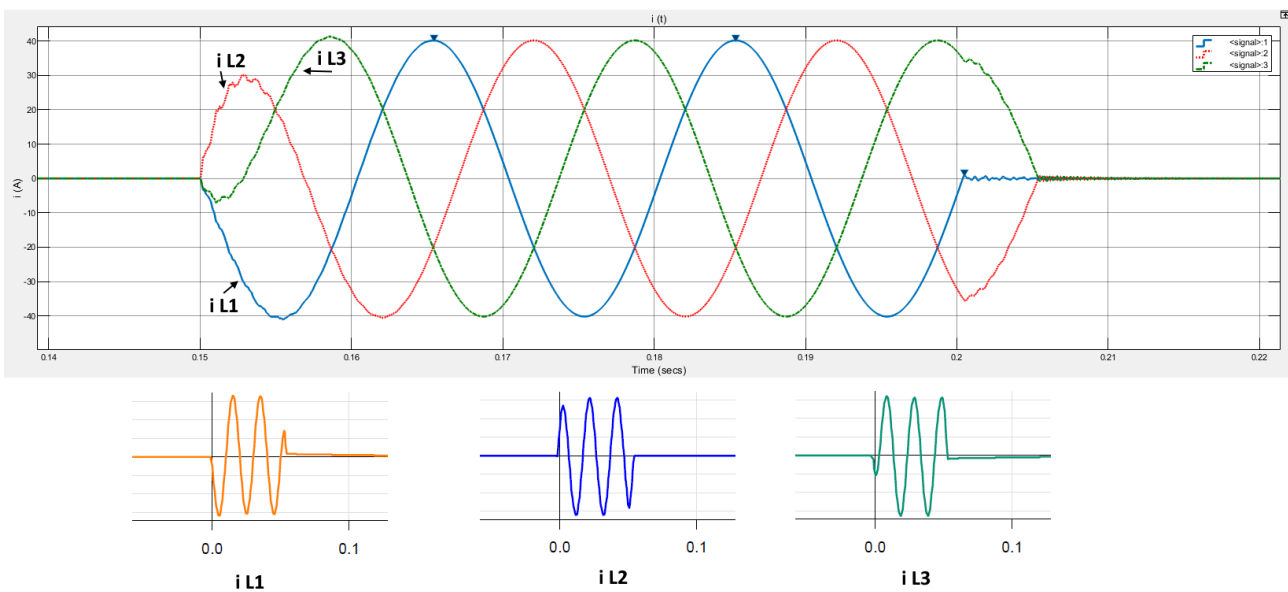
Kuviossa 29 on vertailun helpottamiseksi esitetty allekkain johto-osuuden BJ01B lopussa tapahtuneen kaksivaiheisen oikosulun simuloitut ja mitatut vaihevirrat. Vastaavat vaihejännitteet on puolestaan esitetty kuviossa 30. Myös varayhteyden puolivälissä vikaa vasten kytketyn kolmivaiheisen oikosulun vastaavat virta- ja jännitekuvaajat on kerätty kuvioihin 31 ja 32. Varayhteyden puolivälin kaksivaiheisen oikosulun mittausten kuvaajia ei ole tässä luvussa erikseen kootusti esitetty, sillä ne ovat muodoltaan hyvin samanlaiset kuin kuvioissa 29 ja 30. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 6.



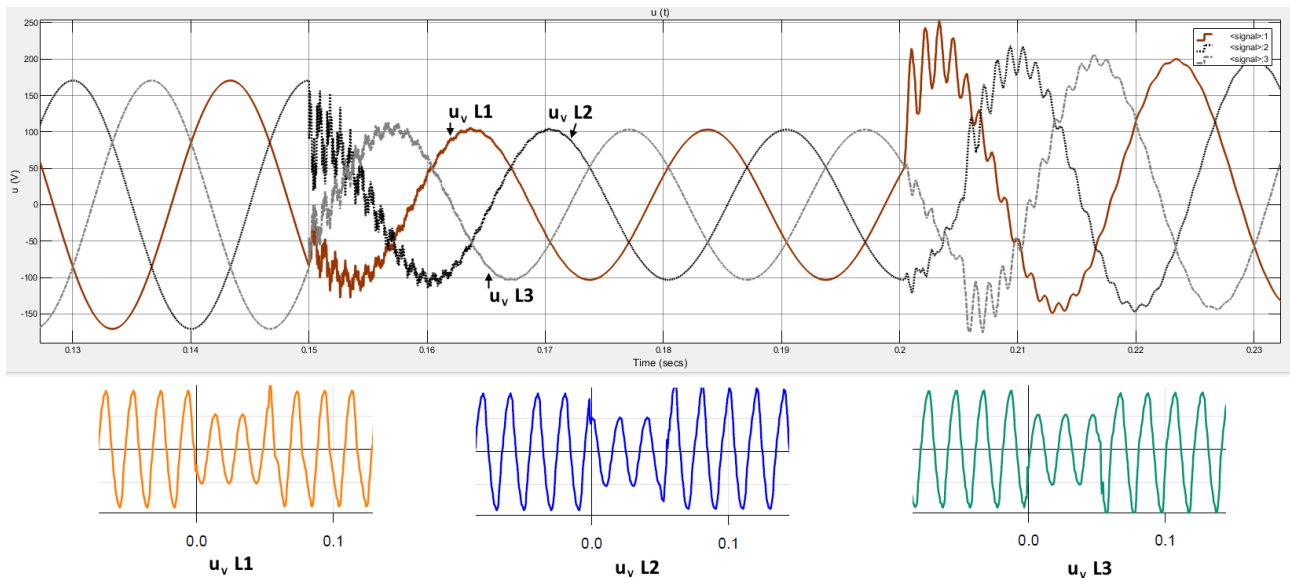
Kuvio 29. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihevirrat kaksivaiheisessa oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat



Kuvio 30. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihejännitteet kaksi-vaiheisessa oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat



Kuvio 31. Ylhäällä Simscapella simuloitut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihevirrat kolmivaiheisessa vikaa vasten kytketyssä oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat



Kuvio 32. Ylhäällä Simscapella simuloidut ja alhaalla verkkomallista mitatut vaihejännitteet kolmivaiheisessa vikaa vasten kytketyssä oikosulussa; kuvaajien aikaskaalat eivät ole samat

Mitattujen virtojen ja jännitteiden kuvaajissa on alalaitaan merkitty tallennuksen todellinen aika sekunteina. Häiriötallennin asetti aika-akselin nollokohdan jälkikäteen vian alkuun siihen hetkeen, kun virran suuruus sai suojauksen havahtumaan. Tämän vuoksi tallennuksissa on dataa myös negatiiviselta ajalta. Vikaantuneen johto-osuuden alussa ollut katkaisija jäi vian poiskytkennän jälkeen auki, minkä vuoksi vaihevirratt romahtavat noltaan ja katkaisijan yläpuolelle jääneen BJW1-kiskon vaihejännitteet palautuivat terveeseen tilaan.

7 Tulosten arviointi ja pohdinta

7.1 Tulosten luotettavuuden arviointi

7.1.1 Johtomallien vertailu toisiinsa

Matlabin Simulink Simscape Electrical -kirjastosta valmiiksi löytynyttä 3PPI-johtomallia vertailtiin simulaatioiden avulla työn aikana laadittuun yksinkertaistettuun 3PPIyks-malliin. Simulaatiotuloksia vertailtiin toisiinsa laskemalla luvussa 6.3.1 esitetyt absoluuttiset ja suhteelliset virtaerot johtomallien välillä. Johtomallien keskinäisten erojen hahmottamista varten taulukkoon 8 on laskettu suhteellisten virtaerojen keskiarvot eri vikatyypeittäin eri verkoille. Esimerkiksi ylimmällä rivillä todellisen maaseutuverkon kolmivaiheisen oikosulun **keskimääräinen suhteellinen virtaero** $\langle \delta I \rangle$ on taulukon Taulukko 6 δI -sarakkeen tulosten aritmeettinen keskiarvo:

$$\langle \delta I \rangle = \frac{0,00 \% + 0,01 \% + 0,00 \% + \dots + 0,04 \% + 0,02 \%}{12} \approx 0,02 \%$$

Taulukko 8. Kilpailevien johtomallien keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteiden simulaatioissa

Vikatilanne	Verkon tyyppi	$\langle \delta I \rangle$ [%]
Kolmivaiheinen oikosulku	Todellinen maaseutuverkko	0,02
	Todellinen kaupunkiverkko	0,00
	Verkkomallin maaseutuverkko	0,02
	Verkkomallin kaupunkiverkko	0,01
Kaksivaiheinen oikosulku	Todellinen maaseutuverkko	0,02
	Todellinen kaupunkiverkko	0,00
	Verkkomallin maaseutuverkko	0,02
	Verkkomallin kaupunkiverkko	0,01
Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa	Todellinen maaseutuverkko	0,02
	Todellinen kaupunkiverkko	0,00
	Verkkomallin maaseutuverkko	0,02
	Verkkomallin kaupunkiverkko	0,00
Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa	Todellinen maaseutuverkko	0,13
	Todellinen kaupunkiverkko	0,02
	Verkkomallin maaseutuverkko	0,89
	Verkkomallin kaupunkiverkko	0,00

Kaikki laskelmat tehtiin Excel-ohjelmalla. Edellä esitettyssä laskutoimituksessa suhteelliset virtaerot eivät siis todellisuudessa olleet taulukosta 6 poimitut kahteen desimaaliin pyöristetyt välitulokset vaan simulaatiotuloksista lasketut tarkat arvot. Sama päti myös muihin suhteellisten virtaerojen keskiarvojen laskuihin.

Keskimääräisten suhteellisten virtaerojen perusteella voitiin tehdä saman suuntainen päätelmä kuin luvussa 6.3.1 jo alustettiin: Kaikissa vikatilanteissa ja kaikilla verkkotyypeillä johtomallien 3PPI ja 3PPIyks tuottamat tulokset erosivat toisistaan keskimäärin alle yhden prosentin verran. Suurin eroavaisuus havaittiin verkkomallin maaseutuverkossa maasta erotetun verkon yksivaiheisen maasulun simulaatioissa, joissa keskimääräinen suhteellinen virtaero oli 0,89 %; siis kertaluokkaa suurempi kuin muissa vertailuissa. Tämä johtui simulaatiotuloksien tarkkuudesta: Tarkkuus oli kaksi desimaalia myös niissä tuloksissa, joissa simulaatioiden absoluuttinen virtaero oli alle yhden ampeerin. Sen takia suhteellinen virtaero oli em. simulaatioissa paikka paikoin jopa kolme prosenttia. Suhteellisen virtaeron keskiarvoa olisi voinut yrittää pienentää käyttämällä simulaatiotulok-

sisä enemmän desimaaleja. Kaksi desimaalia oli kuitenkin valittu kompromissina kiinteäksi esitystarkkuudeksi tulosten keskinäisen vertailun mahdollistamiseksi. Lisäksi Matlab esitti kaikki numeeriset tulokset neljän merkitsevän numeron tarkkuudella, joten desimaalien lisääminen olisi johtanut pienimmillä virroilla epäloogiseen tilanteeseen, jossa laskutulokset olisivat olleet tarkempia kuin simulaatiotulokset.

Yhteenvedon voidaan siis todeta, että toisiinsa verrattuina johtomallien 3PPI ja 3PPlyks simulaatiotulokset olivat erittäin luotettavia. Simulaatioiden tulosten luotettavuuden arviointi pelkästään toistensa avulla ei kuitenkaan ole mielekästä. Simulaation johtomallien todellinen luotettavuus punnitaankin luvuissa 7.1.2, 7.1.3 ja 7.1.4, joissa simulaatioiden tuloksia vertaillaan Neplan-laskelmiin ja mittaustuloksiin. Koska 3PPI- ja 3PPlyks-johtomallit tuottivat lähes samat simulaatiotulokset, riittää jatkossa, että laskelmia ja mittaustuloksia vertaillaan vain jälkimmäisen johtomallin simulaatiotuloksiin. 3PPlyks-vaihtoehto valittiin simulaatioiden pääasialliseksi johtomalliksi, sillä se oli nimenomaan tätä työtä varten kehitetty oma versio Simscape Electrical -kirjaston valmiista lohokosta.

7.1.2 Todellisen verkon simulaatiotulosten vertailu vastaaviin Neplan-laskelmiin

Taulukko 9. Todellisen verkon simulaatioiden ja Neplan-laskelmien keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteissa pelkässä keskijänniteverkossa

Vikatilanne	Verkon tyyppi	$\langle \delta I \rangle$ [%]
Kolmivaiheinen oikosulku	Maaseutuverkko	-0,07
	Kaupunkiverkko	0,91
Kaksivaiheinen oikosulku	Maaseutuverkko	-0,13
	Kaupunkiverkko	0,89
Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa	Maaseutuverkko	-0,43
	Kaupunkiverkko	-0,48
Yksivaiheinen maasulku sammutetussa verkossa	Maaseutuverkko	-103,56
	Kaupunkiverkko	-290,27

Luvussa 6.3.2 kerrottiin, miten todellisen verkon Neplan-laskelmista ja simulaatiotuloksista laskettiin vertailua varten suhteelliset virtaerot eri vikapaikoissa ja vikatilanteissa. Näistä virtaeroista laskettiin keskiarvot samaan tapaan kuin luvussa 7.1.1 tehtiin johtomallien välisille virtaeroille. Nämä keskimääräiset suhteelliset virtaerot on esitetty taulukossa 9. Keskiarvojen laskennassa ei kuitenkaan otettu huomioon kaikkia simulaatiotuloksia. Vertailussa huomattiin, että yksivaiheisissa maa-

suluissa todellisen verkon suurjännitepuolella vikapaikoissa suhteelliset virtaerot poikkesivat merkittävästi alajännitepuolen virtaeroista. Esimerkiksi todellisessa maasta erotetussa maaseutuverkossa yksivaiheisen maasulun suhteellinen virtaero päämuuntajan T1 ensiossa, vikapaikassa AET1, oli jopa 62,71 %, kun samaisen muuntajan toisiossa, vikapaikassa BJT1, se oli vain -0,91 %. Koska muuntajan T1 yläjännitepuolen maasulkuvirtojen virtaerot olisivat vääristäneet kaikkien virtaerojen keskiarvoa, ne jätettiin maasuluissa keskiarvon laskennan ulkopuolelle. Jotta keskiarvot olisivat vertailukelpoisia myös oikosuluille, jätettiin vastaavat virtaerot pois myös niiden laskuista. Toisin sanoen taulukon 9 keskiarvot on laskettu sekä maaseutu- että kaupunkiverkolle vain muuntajan T1 alajännitepuolelta, eli todellisen keskijänniteverkon simulaatioista. Myös todellisen maasta erotetun maaseutuverkon vikapaikan BJ03F yksivaiheisessa maasulkuvirrassa epäilty karkea virhe jätettiin keskiarvon ulkopuolelle.

Esimerkiksi taulukon 9 ylimmällä rivillä todellisen maaseutuverkon kolmivaiheisen oikosulun keskimääräinen suhteellinen virtaero on taulukon 7 δI -sarakkeen tulosten aritmeettinen keskiarvo vikapaikoista BJT1–BJ03F:

$$\langle \delta I \rangle = \frac{2,23 \% + 2,22 \% + (-1,00 \%) + \dots + (-1,16 \%) + (-1,67 \%)}{8} \approx -0,07 \%$$

Kuten luvussa 7.1.1, kaikki laskelmat tehtiin Excelissä. Laskutoimituksissa ei siis todellisuudessa käytetty taulukoissa esitettyjä kahteen desimaaliin pyöristettyjä välituloksia vaan simulaatiotuloksista laskettuja tarkkoja arvoja.

Neplan-laskelmien ja simulaatiotulosten suhteellisista virtaeroista havaittiin joitain yhteispiirteitä tulosten luotettavuuden näkökulmasta:

- Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa suhteellinen virtaero oli koko verkossa (myös SJ-verkko) itseisarvoltaan alle 5 %, joten kolmi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen vikavirrat vastasivat toisiaan hyvin.
- Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa suhteellinen virtaero oli suurimmillaan päämuuntajan T1 lähellä olevissa vikapaikoissa ja pieneni kauemmas alajännitepuolelle mentäessä. Simulaatioiden luotettavuus siis oli hieman heikompi päämuuntajan lähellä olevissa vikapaikoissa.

- Yksivaiheisissa maasuluissa muuntajan T1 yläjännitepuolen simuloidut vikavirrat olivat 57... 66 % pienempiä kuin Neplanin vastaavat virrat. Simulaatioiden luotettavuus suurjännitepuolen verkossa oli näin ollen huono.
- Maasta erotetun keskijänniteverkon yksivaiheisissa maasuluissa virtaerot olivat, maaseutuverkon BJ03F:n karkeaa virhettä lukuun ottamatta, alle prosentin päässä toisistaan. Maasta erotetun keskijänniteverkon yksivaiheisissa maasuluissa simulaatioiden luotettavuus oli siis erinomainen.
- Sammutetun keskijänniteverkon yksivaiheisissa maasuluissa simulaatiotulokset olivat maaseutuverkossa keskimäärin noin kaksinkertaiset ja kaupunkiverkossa keskimäärin lähes nelinkertaiset Neplaniin verrattuna. Simulaatioiden luotettavuus sammutetun keskijänniteverkon yksivaiheisissa maasuluissa oli siis erittäin huono.

Edellä luetelluissa luotettavuusarvioissa oletettiin, että toimeksiantajan toimittamat Neplan-laskelmat olivat täysin luotettavia ja todenmukaisia.

7.1.3 Verkkomallin simulaatiotulosten vertailu vastaaviin Neplan-laskelmiin

Taulukko 10. Verkkomallin Neplan-laskelmien ja simulaatioiden keskimääräinen suhteellinen virtaero eri vikatilanteissa pelkässä keskijänniteverkossa

Vikatilanne	Verkon tyyppi	$\langle \delta I \rangle$ [%]
Kolmivaiheinen oikosulku	Maaseutuverkko	-0,60
	Kaupunkiverkko	-0,77
Kaksivaiheinen oikosulku	Maaseutuverkko	-0,82
	Kaupunkiverkko	-0,83
Yksivaiheinen maasulku maasta erotetussa verkossa	Maaseutuverkko	-4,15
	Kaupunkiverkko	-2,51

Verkkomallin sähköverkon Neplan-laskelmista ja simulaatiotuloksista laskettiin suhteellisten virtaerojen keskiarvot samaan tapaan kuin edellä luvussa 7.1.2. Nämä keskimääräiset suhteelliset virtaerot on esitetty taulukossa 10. Keskiarvojen laskennassa ei tässäkään otettu huomioon kaikkia simulaatiotuloksia, sillä yksivaiheisissa maasuluissa muuntajan T1 yläjännitepuolella suhteelliset virtaerot poikkesivat merkittävästi alajännitepuolen virtaeroista ja kyseiset virtaerot olisivat vääristäneet kaikkien virtaerojen keskiarvoa merkittävästi. Vastaavasti, jotta keskiarvot pysyisivät vertailukelpoisina myös oikosulkuvirtojen keskimääräisille virtaeroille, jätettiin T1:n yläjännitepuolen virtaerot pois myös niiden laskuista. Taulukon 10 keskiarvot on siis laskettu sekä maaseutu- että kaupunkiverkon verkkomalleille vain muuntajan T1 alajännitepuolelta. Esimerkki keskimääräisen

suhteellisen virtaeron laskemisesta on esitetty luvussa 7.1.2. Myös nämä laskelmat tehtiin Excelissä, kuten aiemmatkin virtaerojen laskelmat. Sammutetun verkon yksivaiheisen maasulun Neplan-laskelmia verkkomallille ei ollut vielä toteutettu, joten vastaavia virtaeroja, eikä näin ollen myöskään niiden keskiarvoja, laskettu.

Neplan-laskelmien ja simulaatiotulosten suhteellisista virtaeroista havaittiin seuraavat tulosten luotettavuudesta kertovat asiat:

- Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa suhteellinen virtaero oli koko verkossa (myös T1:n yläjännitepuolen verkossa) itseisarvoltaan alle 5 %, joten kolmi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen vikavirrat vastasivat toisiaan hyvin.
- Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa suhteellinen virtaero oli suurimmillaan muuntajien T1 ja T0 lähellä olevissa vikapaikoissa ja pieneni kauemmas T1:n alajännitepuolelle mentäessä. Simulaatioiden luotettavuus siis heikkeni lähempänä muuntajia olevissa vikapaikoissa.
- Maasta erotetun verkon yksivaiheisissa maasuluissa T1:n yläjännitepuolen simuloitut vikavirrat olivat 45... 49 % pienempiä kuin Neplanin vastaavat virrat. Maasulkusimulaatioiden luotettavuus suurjänniteverkkoa mallintavassa verkkomallin osassa oli näin ollen huono.
- Maasta erotetun verkon yksivaiheisissa maasuluissa T1:n alajännitepuolella virtaerot olivat verkkomallin maaseutuverkossa alle 5 % ja verkkomallin kaupunkiverkossa alle 3 % päässä toisistaan. Verkkomallin maasta erotetun verkon maasulkusimulaatioiden luotettavuus keskijänniteverkkoa mallintavassa verkkomallin osassa oli siis hyvä.
- Verkkomallin sammutetun verkon yksivaiheisista maasuluista ei ollut vertailudataa Neplaniin nähden, joten niiden suhteen simulaatiotulosten luotettavuudesta ei voitu esittää varmoja arvioita.

Kuten todellisen verkon simulaatioissa, myös verkkomallin simulaatioiden luotettavuusarvioissa oletettiin, että toimeksiantajan toimittamat Neplan-laskelmat olivat täysin luotettavia ja todenmukaisia.

7.1.4 Verkkomallin simulaatiotuloksien vertailu vastaaviin mittaustuloksiin

Luotettavuusanalyysin näkökulmasta mittaustuloksiin suhtauduttiin tässä työssä todenmukaisina vertailukohtina. Vaikka mittausedatalle ei laskettukaan minkäänlaisia virhearvioita, oli data kuitenkin

kin peräisin todellisista sähkömagneettisista ilmiöistä. Lisäksi mittaus- ja simulaatiodataa ei vertailtu numeerisesti vaan ainoastaan seuraavaksi kuvattavin laadullisin menetelmin. Näin ollen mittausdataa voitiin perustellusti pitää 'totuutena' ja hyvänä vertailutasona simulaatioille.

Sigralla piirrettyjen häiriötallentimien mittaustulosten graafiset esitykset olivat jokseenkin epätarkkoja muuhun kuin jännitteiden ja virtojen käyrämuotojen silmämääräiseen vertailuun. Liitteen 6 mittausdatan, vaihevektoridiagrammien sekä simulaatioista ja mittausdatasta koostettujen kuvioiden 29, 30, 31 ja 32 perusteella tehtiin seuraavat johtopäätökset:

- Kaksivaiheisissa oikosuluissa terveen vaiheen virta ja vaihejännite eivät eronneet vikaa edeltävästä tilanteesta. Tämä päti sekä simulaatioissa että mittauksissa.
- Kaksivaiheisissa oikosuluissa vikaantuneiden vaiheiden vaihejännitteet pienenevät ja yliaalloit säröttivät vaihejännitteitä vian alussa. Jännitesärö näkyi paremmin simulaatiotuloksissa, mutta samat ilmiöt olivat havaittavissa myös mittauksista.
- Kaksivaiheisissa oikosuluissa vikaantuneiden vaiheiden virrat säröytyivät vian alussa ja kokivat vaihesiirron siten, että niissä oli 180° vaihesiirto. Virtasärö erottui paremmin simulaatiotuloksista, mutta samat ilmiöt pätevät myös mittauksissa. Vikaantuneiden vaiheiden virroissa oli vian alussa pystysuorat piikit, joita ei ollut mitatuissa virroissa.
- Kolmivaiheisessa oikosulussa sekä virrat että vaihejännitteet käyttäytyivät vian aikana symmetrisesti. Virrat kasvoivat verrattain suuriksi ja vaihejännitteet ylempänä verkossa pienenevät kaikissa vaiheissa. Sekä virroissa että vaihejännitteissä oli voimakasta säröä vian alussa katkaisijan sulkeutuessa vikaa vasten ja lopussa katkaisijan auetessa. Samat ilmiöt havaittiin sekä simulaatio- että mittaustuloksista; jännite- ja virtasärö erottuivat paremmin simulaatiotuloksista.

7.2 Keskeisten tulosten tarkastelu suhteessa tietoperustaan

7.2.1 Simulaatioiden kaksi johtomallia

Todellisen verkon ja verkkomallin johtojen ja kaapeleiden mallintaminen lähti liikkeelle luvussa 4.3.1 ja liitteessä 2 kuvatuista teoreettisista lähtökohdista. Simulaatioissa johto-osuuksia mallinnettiin luvussa 5.3 kuvatuin menetelmin aluksi Simscape Electrical -kirjaston valmiilla kolmivaiheisen johto-osuuden π -sijaiskytkentälohkolla 3PPI. Simulaatioiden edettyä maasulkuihin kävi tuloksien kautta selväksi, että kapasitanssiparametrit eivät olleet kohdallaan. Tähän kapasitanssi-ongelmaksi nimettyyn haasteeseen etsittiin ratkaisua luvussa 4.3.1 ja liitteessä 2. Tuloksena syntyi

ns. kapasitanssiongelman ratkaisuehdotus, jossa johto-osuuksien simulaatiolohkojen parametreja yhdistettiin mallin yksinkertaistamiseksi. Lisäksi parametrien yhdistelyn avulla luotiin Simscapen valmista lohkoa yksinkertaisempi lohkotyyppi: 3PPlyks.

Näillä kahdella eri johtomallilla tehtyjen simulaatioiden tuloksia vertailtiin numeerisesti toisiinsa luvussa 6.3.1. Havaittiin, että suuressa osassa vikapaikoista ja -tyypeistä molemmat johtomallit tuottivat jopa identtisiä tuloksia. Keskimääräinen suhteellinen ero johtomallien tuottamille tuloksille oli suurimmillaankin alle prosentin. Tästä voitiin päätellä, että kapasitanssiongelman teoreettisessa ratkaisussa onnistuttiin luomaan alle 100 km pitkille johto-osuuksille yksinkertaistettu simuloitu johtomalli, joka toimi samalla tavalla kuin Simscape Electrical -kirjaston valmis lohko. Itse kapasitanssiongelmaan ei tulosten valossa kuitenkaan voida katsoa löydetyksi luotettavaa simulaatorratkaisua; tätä väitettä analysoidaan tarkemmin luvussa 7.2.3.

7.2.2 Simulaatiot oikosulkujen mallinnuksessa

Verkkomallista saatuja mittaustuloksia verrattiin vastaaviin simulaatioihin luvussa 6.4. Simuloidut vaihejännitteet ja virrat ajan funktiona olivat käyrämuodoiltaan hyvin samanlaiset mitattuihin käyriin nähden. Sekä mitatut että simuloidut virtakäyrät vastasivat induktiivisen oikosulkuvirran teoreettista aikakehitystä. Esimerkiksi kuviossa 23 esitetyt simuloidut vaihevirit kolmivaiheisessa oikosulussa olivat simulaatiossa havaittuja yliaaltoja lukuun ottamatta samanmuotoiset kuin kuvion 4a vaimeneva induktiivinen epäsymmetrinen oikosulkuvirta. Oikosulkuvirran kertaluokaltaan monikymmenkertainen suuruus verkon tyhjäkäyntivirtaan kävi selvästi ilmi simulaatioiden virtakuvaajista. Myös vaihejännitteiden pieneneminen oikosulkuun joutuneissa vaiheissa oli havaittavissa simulaatioiden jännitekuvaajista: Vikaantuneiden vaiheiden jännitteet pienenivät vikapaikan yläpuolisessa verkossa ja vikapaikassa ne putosivat nolnaan.

Simuloiduissa virroissa havaittiin toisaalta epäkohta, joka ei vastannut sen enempää teoreettista kuin mitattuakaan käyttäytymistä: Esimerkiksi kuviossa 29 kaksivaiheisen oikosulun alkuhetkellä vikaantuneiden vaiheiden virroissa näkyivät pystysuorat piikit. Todennäköinen selitys piikeille piilee simulaation matematiikassa: Simulaatioissa oikosulun synty oli hetkellinen tapahtuma, jossa vikaantuneiden vaiheiden jännitteet putosivat pystysuoraan nolnaan. Ilmeisesti Matlab 'kompastui' vaihejännitteiden epäderivoituvuuskohtaan, josta seurasi epäsymmetrisissä oikosuluissa vika hetkellä virran pystysuorat piikit.

7.2.3 Simulaatiot yksivaiheisten maasulkujen mallinnuksessa

Yksivaiheiset maasulkuvat osoittautuivat luvuissa 7.1.2 ja 7.1.3 tehtyjen luotettavuusarvioiden perusteella simulaatioiden heikoimmiksi lenkeiksi. Tietoperustaan verrattuna simulaatiotulokset eivät kuitenkaan olleet aivan niin heikkotasoisia kuin virtaerojen perusteella voitiin päätellä. Kuviossa 28 esitetyt nollavirran, tähtipistejännitteen ja vaihejännitteiden ajallisessa käyttäytymisessä voitiin selkeästi havaita maasululle tyypilliset ilmiöt: tähtipistejännitteen perustaajuinen muutos, vaihejännitteen perustaajuinen muutos, nollavirran syntyminen, virran ja jännitteen yliaallot sekä suuritaajuiset muutosvirrat.

Kapasitanssiongelman ratkaisun kannalta maasulkusimulaatioiden tulokset puhuivat sekä puolesta että vastaan. Simulaatio- ja Neplan-tulokset poikkesivat toisistaan vain vähäisessä määrin, kun vertailtiin maasta erotettujen verkkojen maasulkuja muuntajan T1 alajännitepuolella. Toisaalta tämä virtaero oli merkittävä T1:n yläjännitepuolella. Sammutettujen verkkojen maasuluissa suhteellinen virtaero simulaatioiden ja Neplanin välillä kasvoi jopa kolminkertaiseksi. Kapasitanssiongelman ratkaisu johtomallin parametrien asettelulla oli siis oikeilla jäljillä, mutta mallin toimivuus rajoittui vain maasta erotettuihin keskijänniteverkkoihin. Ilmeisesti simulaatioissa muuntajan T1 yläpuolisessa verkossa ja sammutetuissa verkoissa koko verkon alueella maasulkuvirralla muodostui jokin muu reitti, minkä takia simulaatioissa virta kasvoi niin suureksi. Tämän asian selvittäminen olisi selkeä jatkotutkimuksen aihe.

7.3 Johtopäätökset ja kehittämissuhteet

Viimeinen tutkimuskysymys kuului, miten hyvin tulosten perusteella saavutettiin työlle asetetut tavoitteet. Tätä kysymystä lähestyttiin kolmesta näkökulmasta: Luvussa 7.1 tehdyn luotettavuusarvion ja mittaustuloksien näkökulmista sekä luvussa 7.2 tehdyn tietoperustaan vertailun näkökulmasta. Luotettavuusarvio piti sisällään simulaatioiden tulosten numeerisen vertailun toisiinsa tai vastaaviin Neplan-tuloksiin. Mittaustulosten näkökulma vertaili simulaatiotuloksia vastaaviin mittaustuloksiin. Tietoperustan näkökulma pohti sitä, kuinka hyvin simulaatiot noudattivat luvuissa 3 ja 4 käsiteltyä teoriaa.

Taulukko 11. Miten hyvin kehitystyön tavoitteisiin päästiin eri näkökulmista

	Luotettavuus- arvion näkö- kulma	Mittaustulos- ten näkö- kulma	Tietoperus- tan näkö- kulma
Simulaation johtomallien 3PPI ja 3PPlyks vas- taavuus	++	x	0
Simulaatiot kolmi- ja kaksivaiheisten oikosulku- jen mallinnuksessa	+	+	+
Simulaatiot maasta erotetun verkon yksivai- heisten maasulkujen mallinnuksessa (KJ-verkko tai KJ-verkkomalli)	++	x	++
Simulaatiot maasta erotetun verkon yksivai- heisten maasulkujen mallinnuksessa (SJ-verkko tai SJ-verkkomalli)	-	x	x
Simulaatiot sammutetun verkon yksivaiheisten maasulkujen mallinnuksessa (KJ-verkko tai KJ- verkkomalli)	--	x	x
Simulaatiot sammutetun verkon yksivaiheisten maasulkujen mallinnuksessa (SJ-verkko tai SJ- verkkomalli)	-	x	x

Johtopäätöksiä simulaatioiden toimivuudesta edellä mainituista näkökulmista on havainnollistettu taulukossa 11. Simulaatioiden arviointi on jaettu edelleen omiin osa-alueisiinsa: johtomallien 3PPI ja 3PPlyks keskinäiseen vertailuun sekä simulaatioiden arviointiin oikosuluissa, maasta erotettujen verkkojen maasuluissa ja sammutettujen verkkojen maasuluissa. Maasulkujen osa-alueissa on erikseen otettu huomioon simulaatioiden toiminta sekä päämuuntajan yläjännitepuolella, eli suurjänniteverkossa tai verkkomallin suurjänniteverkkoa kuvaavassa osuudessa että alajännitepuolella, eli keskijänniteverkossa tai verkkomallin keskijänniteverkko-osuudessa. Taulukon 11 symbolien merkitys on seuraava: Merkintä ”++” tarkoittaa, että kyseisellä osa-alueella simulaatiot onnistuivat sanallisesti arvioiden ”erinomaisesti” tai numeerisesti arvioituna silloin, jos keskimääräinen suhteellinen virtaero on itseisarvoltaan alle 1 %:n. Merkintä ”+” tarkoittaa sanallista arviota ”hyvin” tai numeerisesti korkeintaan 5 %:n keskimääräistä suhteellista virtaeroa. Merkintä ”-” tarkoittaa sanallista arviota ”välttävästi” tai numeerisesti yli 5 %:n keskimääräistä suhteellista virtaeroa. Merkintä ”--” tarkoittaa sanallista arviota ”huonosti” tai numeerisesti yli 100 %:n keskimääräistä suhteellista virtaeroa. Merkintä ”0” tarkoittaa, että kyseisellä osa-alueella näkökulma sisältää sekä simulaatiota puoltavia että vastustavia päätelmiä. Merkintä ”x” tarkoittaa, että kyseistä osa-alueetta ei voitu mielekkäästi arvioida siitä näkökulmasta.

Olenneisimmat johtopäätökset olivat seuraavat: Johtomallien 3PPI ja 3PPIyks tulokset vastasivat toisiaan erinomaisesti, joten pelkän 3PPIyks:n käyttäminen simulaatioissa oli perusteltua. 3PPIyks toimi kapasitanssiongelman ratkaisussa yhtä hyvin tai huonosti kuin 3PPI:kin. Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa simulaatioiden luotettavuus oli hyvä. Luotettavuus parani mitä kauempana vika paikka oli muuntajasta. Maasta erotetun verkon yksivaiheisissa maasuluissa simulaatioiden luotettavuus oli T1:n yläjännitepuolella huono ja alajännitepuolella erinomainen. Sammutetun verkon yksivaiheisissa maasuluissa simulaatioiden luotettavuus oli osin välttävä ja osin jopa huono. Simulaatiotulokset kaksi- ja kolmivaiheisissa oikosuluissa vastasivat silmämääräisellä tarkastelulla mittaustuloksia erinomaisesti. Kolmi- ja kaksivaiheisissa oikosuluissa simulaatiot vastasivat pääosin tietoperustaa. Ainoastaan kaksivaiheisen oikosulun alussa havaitut vikaantuneiden vaiheiden pysytorat virtapiikit eivät vastanneet mittaustuloksia tai teoriaa. Sammutetun verkon yksivaiheisissa maasuluissa simulaatioissa havaitut ilmiöt vastasivat muodollisesti tietoperustaa erinomaisesti.

Työssä kehitettyjä todellisen verkon ja verkkomallin simulaatioita voidaan kolmen edellä mainitun näkökulman perusteella pitää varsin toimivana työkaluna tyyppillisen keskijännitejakeluverkon kolmi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen mallinnuksessa. Yksivaiheisten maasulkujen osalta simulaatiot eivät toistaiseksi ole luotettava työkalu maasta erotettua keskijänniteverkkoa lukuun ottamatta. Kapasitanssiongelman ratkaisu sekä maasulkusimulaatioiden toiminnan selvittäminen jäävät työn merkittävimmiksi kehitys- ja jatkotutkimuskohteiksi. Muita jatkokehityskohteita ovat yhdistelmävikojen, kuten maaosulkujen tai kaksoismaasulkujen, sekä katkosten simulointi.

Oikosulkusimulaatioita voisi hyödyntää esimerkiksi sähkövoimatekniikan opetuksessa turvallisena tapana havainnollistaa sähköverkon vikoja tai harjoitustehtävien tukena. Simuloiduista virtakuvaajista voi helposti määrittää jatkuvan tilan oikosulkuvirran lisäksi vian alkuhetkillä mielenkiintoisen alkuoikosulkuvirran ja sysäysoikosulkuvirran. Toinen ehdotettava käyttötarkoitus voisi olla simulaatioiden tulosten käyttö laiteympäristön verkkomallin mittaustulosten arvioinnin osana. Simscape antaa mahdollisuuden myös erilaisten suojausfunktioiden testaukseen ja kehittämiseen simulaatioympäristössä ilman laiterikon vaaraa tai sähköturvallisuuden vaarantumista.

Lähteet

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

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 2. painos. Helsinki: Otatiето.

Eps. N. d. Matlab-funktion dokumentaatio MathWorksin Help Center -sivustolla. Viitattu 18.10.2023. <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/eps.html>.

Finto: YSO - Yleinen suomalainen ontologia. 2022. Kansalliskirjaston suomalainen asiasanasto- ja ontologiapalvelu. Viitattu 15.9.2022. <https://finto.fi/yso/fi/>.

Grant, I. S. & Phillips, W. R. 1990. Electromagnetism. 2nd ed. Chichester: Wiley.

Haginomori, E., Koshiduka, T., Arai, J. & Ikeda, H. 2016. Power system transient analysis: Theory and practice using simulation programs (ATP-EMTP). Chichester: Wiley. Viitattu 23.8.2023. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central Academic Complete International Edition.

Hannula, J. 2017. Hajautetun energiantuotannon verkkomalli. Opinnäytetyö, AMK. Tampereen ammattikorkeakoulu, sähkötekniikan koulutusohjelma, sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto. Viitattu 23.11.2021. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705239584>.

Jalkanen, M. 2019. KJ-verkkomallin suunnittelu. Opinnäytetyö, AMK. Savonia-ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen ala, sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 23.11.2021. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019061116458>.

Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet. 2018. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, opintoasioiden lautakunta. Ohje Elmo-intrassa. Vahvistettu 11.12.2018.

KOESTUS - Sähköverkon suojausten TKI-ympäristö. 2021. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Hankekuvaus.

Kontio, J. 2013. Hajautetun sähköntuotannon verkkomalli. Opinnäytetyö, AMK. Vaasan ammattikorkeakoulu, tekniikka ja liikenne, sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 27.10.2021. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013090514982>.

L 588/2013. Sähkömarkkinalaki. Annettu 9.8.2013. Viitattu 3.12.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2009. Sähkönjakelutekniikka. 2. uudistettu painos. Helsinki: Otatiето Helsinki University Press.

Ojasalo, K., Moilanen, T. & Ritalahti, J. 2015. Kehittämistyön menetelmät: Uudenlaista osaamista liiketoimintaan. 3.–4. painos. Helsinki: Sanoma Pro. Viitattu 17.11.2021. <https://janet.finna.fi>, Elibs.

Powergui. N. d. Simscape-lohkon dokumentaatio MathWorksin Help Center -sivustolla. Viitattu 6.3.2024. <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/powergui.html>.

Puttonen, P. 2022. Simscapen tuloksia maaseutuverkosta, verkkomalli. Sähköpostiviesti 7.3.2022. Vastaanottaja Pauli Hytölä. Toimeksiantajan edustajan toimittamat todellisen verkon Neplan-laskelmat

Puttonen, P. 2023. Verkkomallin layout, revisio D, 20.3.2023.

Puttonen, P. 2024. Verkkomalli. Sähköpostiviesti 14.2.2024. Vastaanottaja P. Hytölä. Ismo Ahon laatimat verkkomallin Neplan-laskelmat.

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 15.6.2018. Viitattu 19.7.2022. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 50160:2022. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 30.12.2022. Viitattu 10.5.2024. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN 60038:2011. CENELECin standardijännitteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 23.1.2012. Viitattu 23.11.2021. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Sähkö- ja automaatiotekniikka (AMK). N.d. Opinto-oppaan opetussuunnitelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 12.8.2022. <https://opetussuunnitelmat.peppi.jamk.fi/fi/49/fi/5288>.

Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus 2020. 2021. Energiaviraston raportti. Viitattu 3.12.2021. <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>.

Three-Phase Fault. N. d. Simscape-lohkon dokumentaatio MathWorksin Help Center -sivustolla. Viitattu 7.3.2024. <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephasefault.html>.

Three-Phase PI Section Line. N. d. Simscape-lohkon dokumentaatio MathWorksin Help Center -sivustolla. Viitattu 18.10.2023. <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephasepisectionline.html>.

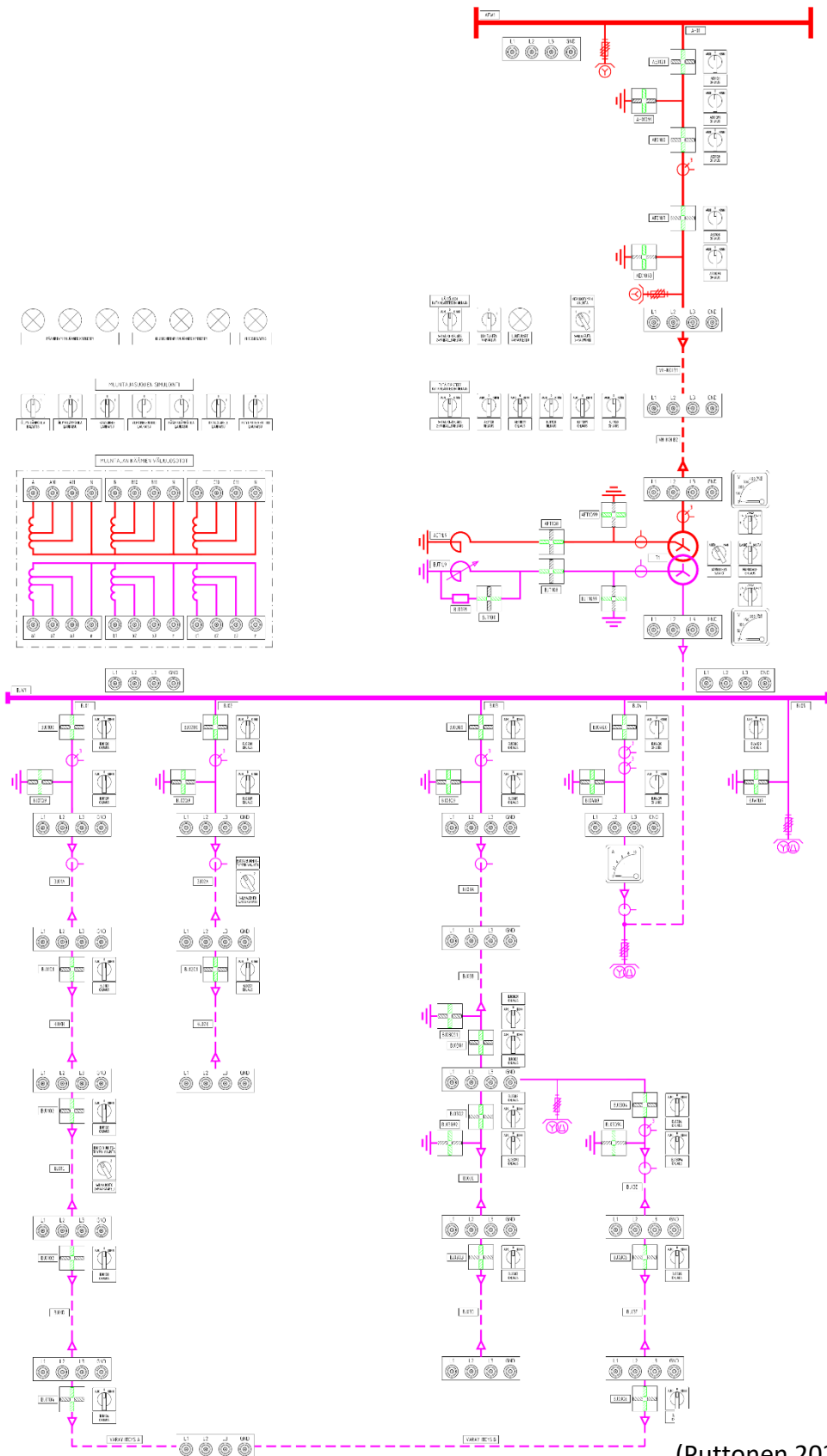
Three-Phase Transformer 12 Terminals. N. d. Simscape-lohkon dokumentaatio MathWorksin Help Center -sivustolla. Viitattu 6.3.2024. <https://se.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephasetransformer12terminals.html>.

Tiedonhaun opas: Tiedonhaku prosessina. 2022. Tampereen yliopiston kirjaston tiedonhakuopas. Tampereen yliopisto. Viitattu 26.8.2022. <https://libguides.tuni.fi/tiedonhaun-opas>.

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. 3. korjattu painos. Tampere: Tampereen yliopistopaino. Viitattu 17.11.2021. <https://janet.finna.fi>, Trepo.

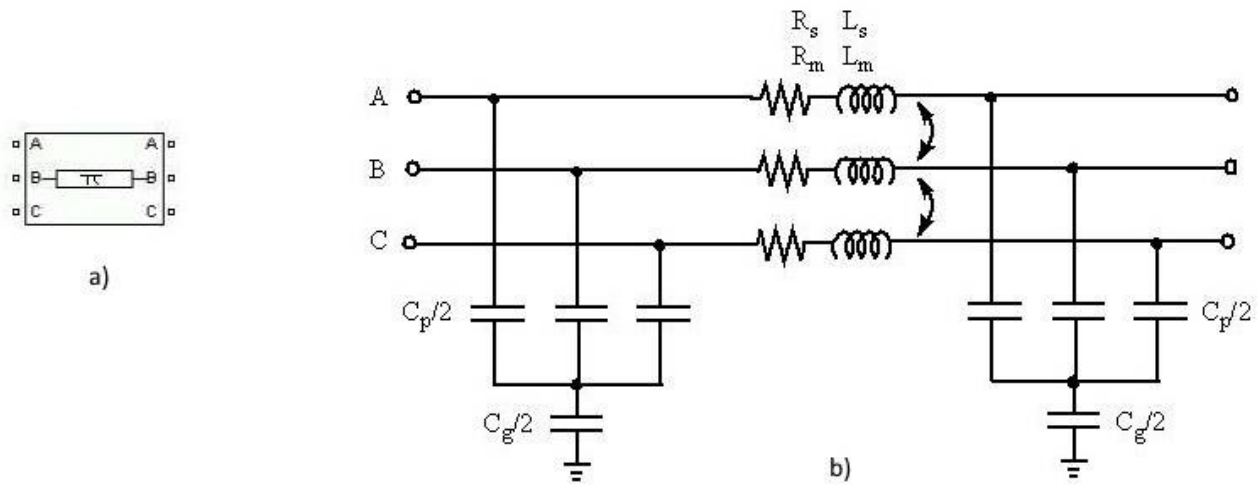
Liitteet

Liite 1. Verkkomallin kansilayout



(Puttonen 2023, muokattu)

Liite 2. Johto-osuuksien kolmivaiheisen π -sijaiskytkennän yksinkertaistaminen Simscape-simulaatioissa



Kuvio I. Three-Phase PI Section Line -lohkon a) symboli ja b) sijaiskytkentä (Three-Phase PI Section Line n.d.)

Matlabin Simscape-simulaatioissa kolmivaiheiset johto-osuudet voidaan mallintaa mm. valmiina *Three-Phase PI Section Line* -lohkoina eli -blokkeina, jollainen on esitetty kuviossa Kuvio Ia. Kyseinen lohko löytyy Simscape-kirjastosta polusta Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Grid Elements. Lohko käyttää kuvion Ib mukaista sijaiskytkentää. Vaiheita L1, L2 ja L3 merkitään A:lla, B:llä ja C:llä vastaavasti. Simulaatio perustuu symmetristen komponenttien menetelmään, ja lohkon hyödyntäminen simulaatiossa vaatii seuraavat tiedot syötettyinä lohkon parametreiksi:

r_1 = myötäjärjestelmän ominaisresistanssi (Ω/km)

r_0 = nollajärjestelmän ominaisresistanssi (Ω/km)

l_1 = myötäjärjestelmän ominaisinduktanssi (H/km)

l_0 = nollajärjestelmän ominaisinduktanssi (H/km)

c_1 = myötäjärjestelmän ominaiskapasitanssi (F/km)

c_0 = nollajärjestelmän ominaiskapasitanssi (F/km)

f = vaihtovirran taajuus (Hz)

s = johto-osuuden pituus (km)

(Three-Phase PI Section Line n.d.)

Syötettyjen parametrien perusteella simulaatio laskee myötä- ja nollajärjestelmän kokonais-RLC-parametrit:

$$R_1 = r_1 \cdot s \cdot k_{r1} \quad (\text{i})$$

$$L_1 = l_1 \cdot s \cdot k_{l1} \quad (\text{ii})$$

$$C_1 = c_1 \cdot s \cdot k_{c1} \quad (\text{iii})$$

$$R_0 = r_0 \cdot s \cdot k_{r0} \quad (\text{iv})$$

$$L_0 = l_0 \cdot s \cdot k_{l0} \quad (\text{v})$$

$$C_0 = c_0 \cdot s \cdot k_{c0} \quad (\text{vi})$$

Yhtälöissä (i)–(vi) olevat kertoimet k_{r1} , k_{l1} , k_{c1} , k_{r0} , k_{l0} ja k_{c0} ovat myötä- ja nollajärjestelmän hyperboliset korjauskertoimet, jotka ottavat huomioon pitkien siirtojohtojen transienttiaaltojen etenemisen johtimissa. Alle 50 km pituisilla siirtojohtoilla nämä korjauskertoimet ovat kuitenkin lähes merkityksettömiä ja jokaisen arvo on likimain 1. (Three-Phase PI Section Line n.d.)

Yhtälöissä (i)–(vi) esiintyvät myötä- ja nollajärjestelmän RLC-parametrit ovat apulausekkeita, joiden avulla simulaatio yhdistyy kuvion Ib sijaiskytkentään; RLC-parametrien avulla lasketaan sijaiskytkennän itseisresistanssi (engl. *self resistance*) R_s , keskinäisresistanssi (*mutual resistance*) R_m , itseisinduktanssi (*self inductance*) L_s , keskinäisinduktanssi (*mutual inductance*) L_m , yhden vaiheen kapasitanssi (*phase capacitance*) C_p ja maakapasitanssi (*ground capacitance*) C_g seuraavasti:

$$R_s = \frac{2R_1 + R_0}{3} \approx s \cdot \left(\frac{2}{3}r_1 + \frac{1}{3}r_0 \right) \quad (\text{vii})$$

$$L_s = \frac{2L_1 + L_0}{3} \approx s \cdot \left(\frac{2}{3}l_1 + \frac{1}{3}l_0 \right) \quad (\text{viii})$$

$$R_m = \frac{1}{3}(R_0 - R_1) \approx \frac{s}{3} \cdot (r_0 - r_1) \quad (\text{ix})$$

$$L_m = \frac{1}{3}(L_0 - L_1) \approx \frac{s}{3} \cdot (l_0 - l_1) \quad (\text{x})$$

$$C_p = C_1 \approx c_1 \cdot s \quad (\text{xi})$$

$$C_g = \frac{3C_1 \cdot C_0}{C_1 - C_0} \approx \frac{3s \cdot c_1 \cdot c_0}{c_1 - c_0} \quad (\text{xii})$$

(Three-Phase PI Section Line n.d.)

Yhtälöiden (vii)–(xii) oikeanpuolimmaisiet lausekkeet on johdettu sijoittamalla myötä- ja nollajärjestelmän RLC-parametrien lausekkeet yhtälöistä (i)–(vi) ja olettamalla, että k_{r1} , k_{l1} , k_{c1} , k_{r0} , k_{l0} ja $k_{c0} \approx 1$, eli johto-osuuden pituus on pienempi kuin 50 km.

Simuloitavien johtojen ja kaapeleiden tekniset datalehdet antavat useimmiten vain yhden parametrin ominaisresistanssille, -induktanssille ja -kapasitanssille. Merkitään näitä suureita tästä eteenpäin yksinkertaisesti symbolein r , l ja c :

r = johdon tai kaapelin ominaisresistanssi (Ω/km)

l = johdon tai kaapelin ominaisinduktanssi (H/km)

c = johdon tai kaapelin ominais(käyttö)kapasitanssi (F/km)

Yhtälöitä (vii)–(xii) pyritään nyt yksinkertaistamaan siten, että käytetään vain parametreja r , l ja c .

Jos asetetaan $r_1 = r_0 = r$, saadaan yhtälöistä (vii) ja (ix) vastaavasti

$$R_s \approx s \cdot \left(\frac{2}{3}r + \frac{1}{3}r \right) = r \cdot s \quad (\text{xiii})$$

ja

$$R_m \approx \frac{s}{3} \cdot (r - r) = 0. \quad (\text{xiv})$$

Jäljelle jää ainoastaan itseisresistanssi R_s , joka on yhtä suuri kuin johdon tai kaapelin yhden vaiheen kokonaisresistanssi. Kaksi erillistä resistanssia kuvaavaa parametria voidaan siis korvata yksinkertaisesti yhdellä ja samalla ominaisresistanssilla r . Mikäli asetetaan myös $l_1 = l_0 = l$, muokkautuvat yhtälöt (viii) ja (x) samalla tavalla:

$$L_s \approx s \cdot \left(\frac{2}{3}l + \frac{1}{3}l \right) = l \cdot s \quad (\text{xv})$$

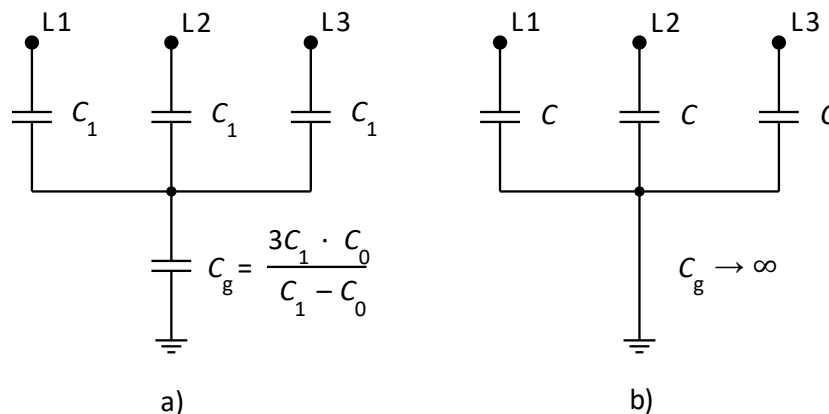
ja

$$L_m \approx \frac{s}{3} \cdot (l - l) = 0. \quad (\text{xvi})$$

Jälleen jää vain itseisinduktanssi L_s , joka on yhtä suuri kuin johdon tai kaapelin yhden vaiheen konaisinduktanssi.

Kapasitanssiongelman ratkaisuehdotus

Kapasitanssien suhteen ei päästä yhtä helpolla kuin resistanssi- ja induktanssiparametrien yksinkertaistuksissa. Yhtälöstä (xii) havaitaan, että asettamalla $c_1 = c_0$ päädytään nolllalla jakoon, eli maakapasitanssin C_g lauseketta ei ole määritelty. Yksinkertaisin vaihtoehto olisi asettaa $c_1 = c$ ja $c_0 = 0$, jolloin päädyttäisiin samankaltaisiin lausekkeisiin kuin resistanssilla ja induktanssilla. Parametrien c_0 asettaminen nolllaksi on kuitenkin simulaatiossa kielletty (Three-Phase PI Section Line n.d.). Maa- ja vaihekapasitanssien korvaaminen pelkällä käyttökapasitanssilla vaatii siis hieman syvempää tarkastelua.



Kuvio II. Kapasitanssien sijaiskytkentä a) myötä- ja nollajärjestelmän kapasitansseilla C_1 ja C_0 , b) yksinkertaistetusti pelkällä käyttökapasitanssilla C

Otetaan lähtökohdaksi yhtälö (xi). Asettamalla $c_1 = c$ päästään tulkintaan, jossa myötäjärjestelmän ominaiskapasitanssi vastaa johtimen ominaiskäyttökapasitanssia yksi yhteen. Käyttökapasitanssia

mallintavien kondensaattoreiden tähtipisteen ja maan välinen maakapasitanssi C_g pitää vielä 'pöytä' lottaa'. Kuten edellä todettiin, parametrin c_0 asettaminen nolaksi on Simscapessa kiellettyä. Mikäli näin voitaisiin tehdä, olisi C_g yhtälön (xii) perusteella myös nolla. Koska kondensaattorin kapasitiivisen reaktanssin suuruus on kääntäen verrannollinen kapasitanssiin,

$$X_{C_g} = \left| -\frac{j}{2\pi \cdot f \cdot C_g} \right| = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_g}, \quad (\text{xvii})$$

johtaisi kapasitanssin asettaminen nolaksi määrittelemättömään tilanteeseen (Grant & Phillips 1990, 263). Korvataan sen sijaan maakapasitanssia mallintava kondensaattori ideaalisella johtimella, kuten kuviossa II on esitetty. Koska ideaalisen johtimen reaktanssi on nolla, voidaan sen kuvitella olevan kondensaattori, jonka kapasitanssi on äärettömän suuri:

$$\lim_{C_g \rightarrow \infty} X_{C_g} = \lim_{C_g \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_g} = 0. \quad (\text{xviii})$$

Vielä on perusteltava, miten kapasitanssi C_g saadaan kasvamaan äärettömän suureksi parametrien c_1 ja c_0 asettelulla. Edellä otettiin lähtökohdaksi $c_1 = c$, eli myötäjärjestelmän kapasitanssin on pysyttävä vakiona. Tarkastelemalla yhtälöä (xii) huomataan, että

$$\lim_{\substack{c_0 \rightarrow c_1 \\ c_0 < c_1}} C_g(c_0) = \lim_{\substack{c_0 \rightarrow c_1 \\ c_0 < c_1}} \frac{3c_1 \cdot c_0}{c_1 - c_0} = \infty. \quad (\text{xix})$$

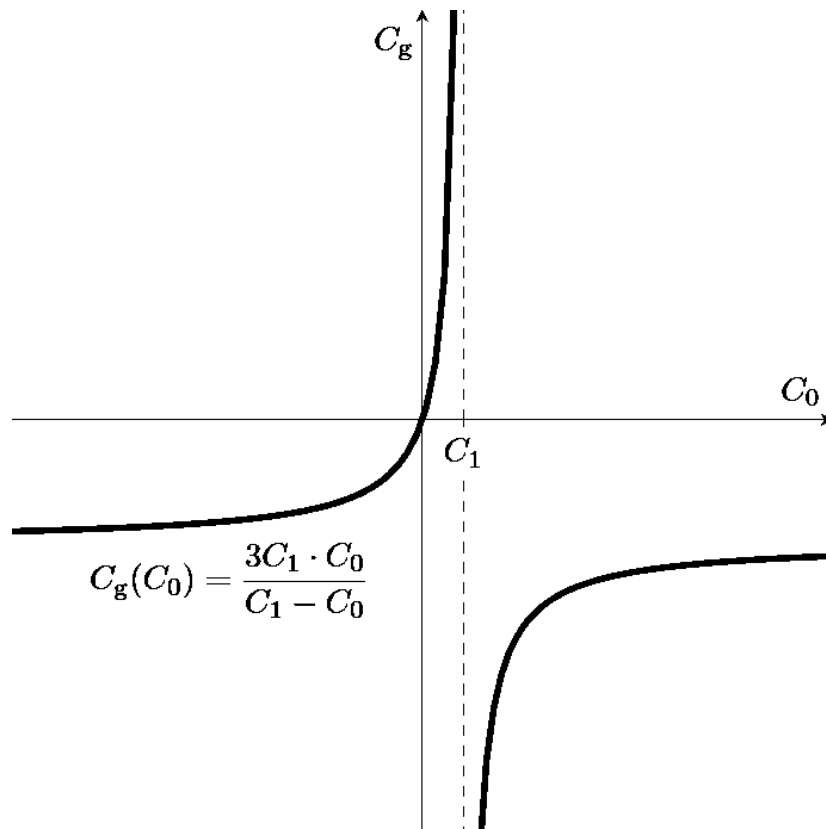
Toisin sanoen C_g saadaan kasvamaan rajatta, jos c_0 asetetaan mielivaltaisen lähelle c_1 :tä, kuitenkin niin, että $0 < c_0 < c_1$. Tämä käy selkeämmin ilmi kuvioista III, jossa maakapasitanssin riippuvuus nolajärjestelmän kapasitanssista on esitetty kuvaajan avulla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että parametri c_0 asetetaan niin lähelle c_1 :tä kuin mahdollista, kunhan $c_0 < c_1$. Matlabista löytyy tarkoitusta varten valmis funktio "eps". Eps on pienin sellainen double-tyyppinen luku, jonka Matlab erottaa kahden erisuuren luvun erotukseksi. Numeerisesti esitettynä $\text{eps} = 2^{-52} \approx 2,2204 \cdot 10^{-16}$. (Eps n.d.) Three-Phase PI Section Line -lohkoon aseteltavat ominais-RLC-parametrit ovat siis:

$$r_1 = r_0 = r$$

$$l_1 = l_0 = l,$$

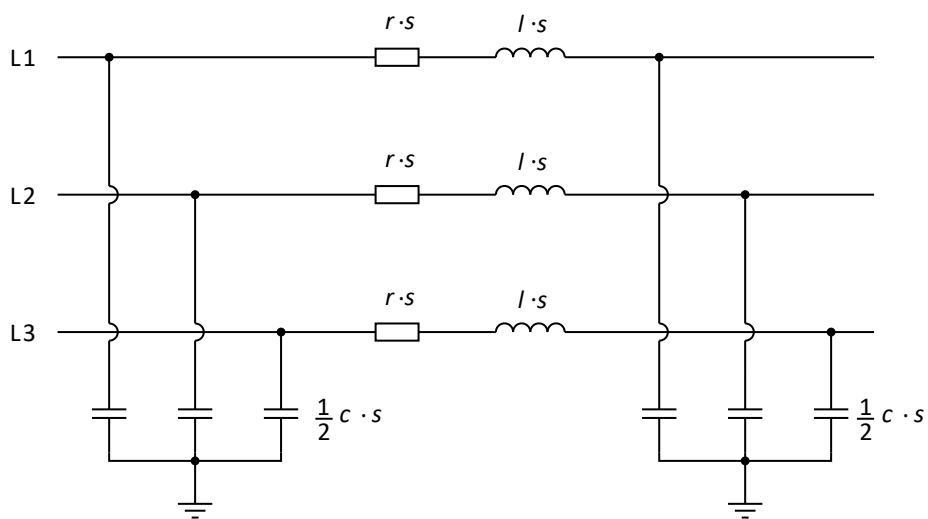
$$c_1 = c \text{ ja}$$

$$c_0 = c - \text{eps}.$$



Kuvio III. Maakapasitanssi C_g nollajärjestelmän kapasitanssin C_0 funktiona, kun myötäjärjestelmän kapasitanssi C_1 pysyy vakiona.

Näin asetelluin parametrein Three-Phase PI Section Line -lohkon sijaiskytkentä yksinkertaistuu kuvion IV mukaiseksi, mutta sen pitäisi vastata silti toiminnaltaan alkuperäisen lohkon toimintaa.



Kuvio IV. Three-Phase PI Section Line -lohkon yksinkertaistettu sijaiskytkentä

Liite 3. Simscape-lohkojen parametrit eri simulaatioissa

Seuraavissa taulukoissa ”kyllä” tarkoittaa, että kyseinen valintaruutu (*checkbox*) on valittu ja ”ei”, että kyseistä valintaruutua ei ole valittu.

Kaikille simulaatioille yhteiset parametrit:

Taulukko i. *Powergui*

Parametri	Arvo
<i>Solver</i>	
Simulation type:	Discrete
Sample time (s):	1.0e-5
<i>Tools</i>	
–	–
<i>Preferences</i>	
Disable Specialized Power Systems warnings	ei
Display Specialized Power Systems compilation messages	ei
Use TLC file when Accelerator Simulation Mode and for code generation	ei
<i>Solver</i>	
Automatically handle Discrete solver and Advanced tab solver settings of blocks	ei
Discrete solver	Tustin/Backward Euler (TBE)
Store switching topologies	ei
Start simulation with initial electrical states from:	blocks
Solver tolerance	1e-4
Maximum number of iterations	100
Continue Simulation if maximum number of iterations is reached	ei

Taulukko ii. U/I-mittaus (*Three-Phase VI Measurement*)

Parametri	Arvo
Voltage measurement	phase-to-ground
Use a label	kyllä
Signal label (use a From block to collect this signal)	(jännitesignaalin yksilöivä nimi)
Voltages in pu, based on peak value of nominal phase-to-ground voltage	ei
Current measurement	yes
Use a label	kyllä
Signal label (use a From block to collect this signal)	(virtasignaalin yksilöivä nimi)
Currents in pu	ei

Taulukko iii. Vikapaikat (*Three-Phase Fault*)

Parametri	Arvo
Initial status:	0
Fault between:	(valitaan oikosuljetut vaiheet ja/tai maasulku)
Switching time (s):	External
Fault resistance R_{on} (Ohm):	R_F (arvo asetetaan Model Workspacessa)
Ground resistance R_g (Ohm):	R_g (arvo asetetaan Model Workspacessa)
Snubber resistance R_s (Ohm):	inf
Snubber capacitance C_s (F):	0
Measurements	None

Todellinen maaseutuverkko:Taulukko iv. 110 kV taustaverkko (*Three-Phase Source*)

Parametri	Arvo
<i>Parameters</i>	
Configuration:	Yn
<i>Source</i>	
Specify internal voltages fo each phase	ei
Phase-to-phase voltage (Vrms):	118e3
Phase angle of phase A (degrees):	0
Frequency (Hz):	50
<i>Impedance</i>	
Internal	kyllä
Specify short-circuit level parameters	kyllä
3-phase short-circuit level at base voltage (VA):	2.8288e9
Base voltage (Vrms ph-ph):	118e3
X/R ratio:	10.0
<i>Load Flow</i>	
Generator type:	swing

Taulukko v. Muuntaja T1 (*Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals*)

Parametri	Arvo
[Three-phase rated power (VA) Frequency (Hz)]	[25e6 50]
Winding 1 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[118e3/sqrt(3) 0.002 0.05]
Winding 2 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[20.5e3/sqrt(3) 0.002 0.05]
Magnetizing branch: [Rm (pu) Xm (pu)] :	[200 200]

Taulukko vi. T1:n ensiön sammutuskuristin AET1L9 (*Series RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	Open circuit (maasta erotettu), L (ideaalisen kelan kautta maadoitettu), RL (resistiivisen kelan kautta maadoitettu)
Resistance (Ohms):	(kelan sarjaresistanssi)
Inductance (H):	200e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Taulukko vii. T1:n toision sammutuskuristin BJT1L9 ja -vastus BJT1R9 (*Parallel RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	Open circuit (maasta erotettu), L (ideaalisen kelan kautta maadoitettu), RL (ideaalisen kelan ja rinnakkaisvastuksen kautta maadoitettu)
Resistance (Ohms):	1.0e3
Inductance (H):	186e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Taulukko viii. Johto-osuudet (*Three-Phase PI Section Line (3PPI)*)

Parametri	Arvo
Line length (km):	s (= johto-osuuden pituus, ks. taulukko Taulukko 2)
Frequency used for rlc specification (Hz):	50
Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r_1 r_0]:	[r r] (r = ominaisresistanssi, ks. taulukko Taulukko 2)
Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l_1 l_0]:	[l l] (l = ominaisinduktanssi, ks. taulukko Taulukko 2)
Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c_1 c_0]:	[c c -eps] (c = käyttökapasitanssi, ks. taulukko Taulukko 2)

Taulukko ix. Johto-osuudet (*Three-Phase PI Section Line (simplified) (3PPlyks)*)

Parametri	Arvo
Line section length (km):	s (= johto-osuuden pituus, ks. taulukko Taulukko 2)
Resistance (Ohms/km):	r (= ominaisresistanssi, ks. taulukko Taulukko 2)
Inductance (H/km):	l (= ominaisinduktanssi, ks. taulukko Taulukko 2)
Capacitance (F/km):	c (= käyttökapasitanssi, ks. taulukko Taulukko 2)

Todellinen kaupunkiverkko:

- 110 kV taustaverkko: ks. taulukko iv.
- Muuntaja T1: ks. taulukko v
- T1:n ensiön sammutuskuristin AET1L9: ks. taulukko vi
- Johto-osuudet: ks. taulukko viii (3PPI), taulukko ix (3PPIyks) ja taulukko 3.

Taulukko x. T1:n toision sammutuskuristin BJT1L9 ja -vastus BJT1R9 (*Parallel RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	Open circuit (maasta erotettu), L (ideaalisen kelan kautta maadoitettu), RL (ideaalisen kelan ja rinnakkaisvastuksen kautta maadoitettu)
Resistance (Ohms):	3.0e3
Inductance (H):	473e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Verkkomallin maaseutuverkko:

Taulukko xi. 400 V taustaverkko (*Three-Phase Source*)

Parametri	Arvo
<i>Parameters</i>	
Configuration:	Yn
<i>Source</i>	
Specify internal voltages fo each phase	ei
Phase-to-phase voltage (Vrms):	406.2
Phase angle of phase A (degrees):	0
Frequency (Hz):	50
<i>Impedance</i>	
Internal	kyllä
Specify short-circuit level parameters	kyllä
3-phase short-circuit level at base voltage (VA):	3.1767e6
Base voltage (Vrms ph-ph):	406.2
X/R ratio:	0.2567
<i>Load Flow</i>	
Generator type:	swing

Taulukko xii. Muuntaja T0 (*Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals*)

Parametri	Arvo
[Three-phase rated power (VA) Frequency (Hz)]	[2.50e3 50]
Winding 1 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[400 0.01305 0.00304]
Winding 2 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[400/sqrt(3) 0.01305 0.00304]
Magnetizing branch: [Rm (pu) Xm (pu)] :	[200 200]

Taulukko xiii. TO:n toision sammutuskuristin TOL9 (*Series RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	RL
Resistance (Ohms):	0.374
Inductance (H):	45.7e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Taulukko xiv. TO:n toision sarjakuristin TOL11 (*Three-Phase Series RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	RL
Resistance (Ohms):	0.016
Inductance (H):	1.33e-3
Measurements	None

Taulukko xv. Muuntaja T1 (*Three-Phase Linear Transformer 12-Terminals*)

Parametri	Arvo
[Three-phase rated power (VA) Frequency (Hz)]	[2.00e3 50]
Winding 1 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[400/sqrt(3) 0.01270 0.00300]
Winding 2 : [phase voltage (Vrms) R (pu) X (pu)] :	[205/sqrt(3) 0.01270 0.00300]
Magnetizing branch: [Rm (pu) Xm (pu)] :	[200 200]

Taulukko xvi. T1:n ensiön sammutuskuristin AET1L9 (*Series RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	RL
Resistance (Ohms):	0.374
Inductance (H):	45.7e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Taulukko xvii. T1:n toision sammutuskuristin BJT1L9 ja -vastus BJT1R9 (*Parallel RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	Open circuit (maasta erotettu), L (ideaalisen kelan kautta maadoitettu), RL (ideaalisen kelan ja rinnakkaisvastuksen kautta maadoitettu)
Resistance (Ohms):	1.0e3
Inductance (H):	186e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Taulukko xviii. T1:n toision sarjakuristin T1L11 (*Three-Phase Series RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	RL
Resistance (Ohms):	0.015
Inductance (H):	0.95e-3
Measurements	None

Taulukko xix. Johto-osuudet (*Three-Phase PI Section Line (3PPI)*)

Parametri	Arvo
Line length (km):	s (= johto-osuuden pituus, ks. taulukko Taulukko 4)
Frequency used for rlc specification (Hz):	50
Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r_1 r_0]:	[r r] (r = ominaisresistanssi, ks. taulukko Taulukko 4)
Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l_1 l_0]:	[l l] (l = ominaisinduktanssi, ks. taulukko Taulukko 4)
Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c_1 c_0]:	[c c -eps] (c = käyttökapasitanssi, ks. taulukko Taulukko 4)

Taulukko xx. Johto-osuudet (*Three-Phase PI Section Line (simplified) (3PPIyks)*)

Parametri	Arvo
Line section length (km):	s (= johto-osuuden pituus, ks. taulukko Taulukko 5)
Resistance (Ohms/km):	r (= ominaisresistanssi, ks. taulukko Taulukko 5)
Inductance (H/km):	l (= ominaisinduktanssi, ks. taulukko Taulukko 5)
Capacitance (F/km):	c (= käyttökapasitanssi, ks. taulukko Taulukko 5)

Verkkomallin kaupunkiverkko:

- 400 V taustaverkko: ks. taulukko xi.
 - Muuntaja T0: ks. taulukko xii.
 - Sammutuskuristin TOL9: ks. taulukko xiii.
 - Sarjakuristin TOL11: ks. taulukko xiv.
 - Muuntaja T1: ks. taulukko xv.
 - Sammutuskuristin AET1L9: ks. taulukko xvi
 - Sarjakuristin T1L11: ks. taulukko xviii.
 - Johto-osuudet: ks. taulukko xix
- Taulukko xix (*3PPI*), taulukko xx (*3PPIyks*) ja taulukko 5.

Taulukko xxi. T1:n toision sammutuskuristin BJT1L9 ja -vastus BJT1R9 (*Parallel RLC Branch*)

Parametri	Arvo
Branch type:	Open circuit (maasta erotettu), L (ideaalisen kelan kautta maadoitettu), RL (ideaalisen kelan ja rinnakkaisvastuksen kautta maadoitettu)
Resistance (Ohms):	3.0e3
Inductance (H):	473e-3
Set the initial inductor current	ei
Measurements	None

Liite 4. Johtomallien 3PPI ja 3PPIyks vikavirtojen vertailu

Todellinen maaseutuverkko

Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen maaseutuverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa on esitetty taulukossa 6 luvussa 6.3.1. Loput vertailutulokset ovat seuraavissa taulukoissa xxii–xxxvi.

Taulukko xxii. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen maaseutuverkon simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k2v,3PPI}$ [A]	$I_{k2v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	11 928,89	11 928,89	0,00	0,00
AET1	4 722,77	4 721,35	1,42	0,03
BJT1	4 994,30	4 994,30	0,00	0,00
BJW1	4 982,98	4 982,98	0,00	0,00
BJ01B	1 699,88	1 699,18	0,70	0,04
BJ01D maakaapeli	1 085,41	1 084,70	0,71	0,07
BJ01D ilmajohto	657,89	657,82	0,07	0,01
BJ02B maakaapeli	3 694,63	3 693,93	0,70	0,02
BJ02B ilmajohto	307,52	307,45	0,07	0,02
BJ03B	2 452,25	2 452,25	0,00	0,00
BJ03D	1 389,46	1 388,76	0,70	0,05
BJ03F	349,66	349,59	0,07	0,02

Taulukko xxiii. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen, maasta erotetun maaseutuverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	908,63	908,63	0,00	0,00
AET1	825,19	825,19	0,00	0,00
BJT1	210,93	210,93	0,00	0,00
BJW1	211,00	210,93	0,07	0,03
BJ01B	218,35	218,28	0,07	0,03
BJ01D maakaapeli	223,94	223,87	0,07	0,03
BJ02B maakaapeli	213,05	212,98	0,07	0,03
BJ03B	216,45	216,37	0,08	0,04
BJ03D	222,39	222,31	0,08	0,04
BJ03F	255,83	255,76	0,07	0,03

Taulukko xxiv. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen, sammutetun maaseutuverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPlyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	1 086,82	1 086,82	0,00	0,00
AET1	975,81	975,10	0,71	0,07
BJT1	19,92	19,88	0,04	0,20
BJW1	19,91	19,88	0,03	0,15
BJ01B	19,29	19,25	0,04	0,21
BJ01D maakaapeli	19,25	19,23	0,02	0,10
BJ02B maakaapeli	19,41	19,40	0,01	0,05
BJ03B	19,34	19,31	0,03	0,16
BJ03D	19,30	19,27	0,03	0,16
BJ03F	19,29	19,25	0,04	0,21

Todellinen kaupunkiverkko

Taulukko xxv. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen kaupunkiverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k3v,3PPI}$ [A]	$I_{k3v,3PPlyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	13 774,44	13 774,44	0,00	0,00
AET1	5 451,79	5 451,09	0,70	0,01
BJT1	5 764,33	5 764,33	0,00	0,00
BJW1	5 751,61	5 750,90	0,71	0,01
BJ01B	3 804,23	3 803,53	0,70	0,02
BJ01D maakaapelina	3 121,17	3 121,17	0,00	0,00
BJ01D ilmajohtona	2 431,03	2 431,03	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	4 863,48	4 862,77	0,71	0,01
BJ02B ilmajohtona	4 509,93	4 509,93	0,00	0,00
BJ03B	4 862,07	4 862,07	0,00	0,00
BJ03D	3 161,47	3 161,47	0,00	0,00
BJ03F	3 398,36	3 398,36	0,00	0,00

Taulukko xxvi. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen kaupunkiverkon simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k2v,3PPI}$ [A]	$I_{k2v,3PPlyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	11 928,89	11 928,89	0,00	0,00
AET1	4 722,06	4 721,35	0,71	0,02
BJT1	4 992,88	4 992,88	0,00	0,00
BJW1	4 981,57	4 981,57	0,00	0,00
BJ01B	3 295,12	3 295,12	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	2 703,27	2 703,27	0,00	0,00
BJ01D ilmajohtona	2 105,76	2 105,76	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	4 211,53	4 211,53	0,00	0,00
BJ02B ilmajohtona	3 906,06	3 905,35	0,71	0,02
BJ03B	4 211,53	4 211,53	0,00	0,00
BJ03D	2 737,92	2 737,92	0,00	0,00
BJ03F	2 942,98	2 942,98	0,00	0,00

Taulukko xxvii. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen, maasta erotetun kaupunkiverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPlyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	915,00	915,00	0,00	0,00
AET1	830,85	830,85	0,00	0,00
BJT1	80,96	80,96	0,00	0,00
BJW1	80,96	80,96	0,00	0,00
BJ01B	81,32	81,32	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	81,53	81,53	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	81,11	81,11	0,00	0,00
BJ03B	81,11	81,11	0,00	0,00
BJ03D	81,60	81,60	0,00	0,00
BJ03F	81,53	81,53	0,00	0,00

Taulukko xxviii. Johtomallien vikavirtojen vertailu todellisen, sammutetun kaupunkiverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPlyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	972,27	972,27	0,00	0,00
AET1	878,23	878,23	0,00	0,00
BJT1	5,03	5,02	0,00	0,00
BJW1	5,01	5,01	0,00	0,00
BJ01B	4,52	4,52	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	4,52	4,51	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	4,59	4,58	0,00	0,00
BJ03B	4,58	4,58	0,00	0,00
BJ03D	4,52	4,52	0,00	0,00
BJ03F	4,52	4,52	0,00	0,00

Verkkomallin maaseutuverkko

Taulukko xxix. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin maaseutuverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k3v,3PPI}$ [A]	$I_{k3v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	112,43	112,43	0,00	0,00
AET1	54,25	54,24	0,01	0,02
BJT1	66,20	66,19	0,01	0,02
BJW1	66,02	66,01	0,01	0,02
BJ01B	18,45	18,44	0,01	0,05
BJ01D maakaapelina	11,94	11,94	0,00	0,00
BJ01D ilmajohtona	7,36	7,36	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	42,87	42,86	0,01	0,02
BJ02B ilmajohtona	3,49	3,49	0,00	0,00
BJ03B	27,75	27,74	0,01	0,04
BJ03D	15,35	15,34	0,01	0,07
BJ03F	3,96	3,96	0,00	0,00

Taulukko xxx. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin maaseutuverkon simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k2v,3PPI}$ [A]	$I_{k2v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	97,58	97,58	0,00	0,00
AET1	47,08	47,07	0,01	0,02
BJT1	57,55	57,54	0,01	0,02
BJW1	57,39	57,39	0,00	0,00
BJ01B	16,04	16,03	0,01	0,06
BJ01D maakaapelina	10,34	10,34	0,00	0,00
BJ01D ilmajohtona	6,38	6,38	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	37,12	37,12	0,00	0,00
BJ02B ilmajohtona	3,02	3,02	0,00	0,00
BJ03B	24,08	24,07	0,01	0,04
BJ03D	13,29	13,29	0,00	0,00
BJ03F	3,43	3,43	0,00	0,00

Taulukko xxxi. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin maasta erotetun maaseutuverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	14,21	14,21	0,00	0,00
AET1	12,13	12,13	0,00	0,00
BJT1	2,08	2,08	0,00	0,00
BJW1	2,08	2,08	0,00	0,00
BJ01B	2,15	2,15	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	2,21	2,21	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	2,10	2,10	0,00	0,00
BJ03B	2,13	2,13	0,00	0,00
BJ03D	2,19	2,19	0,00	0,00
BJ03F	2,51	2,51	0,00	0,00

Taulukko xxxii. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin sammutetun maaseutuverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	18,79	18,79	0,00	0,00
AET1	15,66	15,66	0,00	0,00
BJT1	0,30	0,29	0,01	3,33
BJW1	0,30	0,29	0,01	3,33
BJ01B	0,28	0,28	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	0,28	0,28	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	0,29	0,28	0,01	0,00
BJ03B	0,28	0,28	0,00	0,00
BJ03D	0,28	0,28	0,00	0,00
BJ03F	0,28	0,28	0,00	0,00

Verkkomallin kaupunkiverkko

Taulukko xxxiii. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin kaupunkiverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k3v,3PPI}$ [A]	$I_{k3v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	112,43	112,43	0,00	0,00
AET1	54,25	54,24	0,01	0,02
BJT1	66,20	66,19	0,01	0,02
BJW1	66,02	66,01	0,01	0,02
BJ01B	37,48	37,48	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	29,82	29,81	0,01	0,03
BJ01D ilmajohtona	23,26	23,26	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	51,75	51,75	0,00	0,00
BJ02B ilmajohtona	43,06	43,06	0,00	0,00
BJ03B	51,74	51,74	0,00	0,00
BJ03D	30,72	30,72	0,00	0,00
BJ03F	33,25	33,25	0,00	0,00

Taulukko xxxiv. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin kaupunkiverkon simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa

Vikapaikka	$I_{k2v,3PPI}$ [A]	$I_{k2v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	97,51	97,51	0,00	0,00
AET1	47,02	47,02	0,00	0,00
BJT1	57,41	57,41	0,00	0,00
BJW1	57,25	57,25	0,00	0,00
BJ01B	32,47	32,47	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	25,83	25,83	0,00	0,00
BJ01D ilmajohtona	20,16	20,15	0,01	0,05
BJ02B maakaapelina	44,82	44,81	0,01	0,02
BJ02B ilmajohtona	37,29	37,29	0,00	0,00
BJ03B	44,83	44,83	0,00	0,00
BJ03D	26,61	26,61	0,00	0,00
BJ03F	28,79	28,79	0,00	0,00

Taulukko xxxv. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin maasta erotetun kaupunkiverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	14,40	14,40	0,00	0,00
AET1	12,28	12,28	0,00	0,00
BJT1	0,80	0,80	0,00	0,00
BJW1	0,80	0,80	0,00	0,00
BJ01B	0,81	0,81	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	0,81	0,81	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	0,81	0,81	0,00	0,00
BJ03B	0,81	0,81	0,00	0,00
BJ03D	0,81	0,81	0,00	0,00
BJ03F	0,81	0,81	0,00	0,00

Taulukko xxxvi. Johtomallien vikavirtojen vertailu verkkomallin sammutetun kaupunkiverkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa pelkillä maakaapelivaihtoehdoilla

Vikapaikka	$I_{k1v,3PPI}$ [A]	$I_{k1v,3PPIyks}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	16,44	16,44	0,00	0,00
AET1	13,87	13,87	0,00	0,00
BJT1	0,06	0,06	0,00	0,00
BJW1	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ01B	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ01D maakaapelina	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ02B maakaapelina	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ03B	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ03D	0,06	0,06	0,00	0,00
BJ03F	0,06	0,06	0,00	0,00

Liite 5. Vikatilanteiden simulaatiotulokset

Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat todellisen maaseutuverkon simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa on esitetty taulukossa 7 luvussa 6.3.2. Loput simulaatiotulokset ovat seuraavissa taulukoissa xxxvii–xxxix. Todellisen maaseutuverkon ja todellisen kaupunkiverkon Neplan-laskelmat johto-osuuksien BJ01C–D ja BJ02A–B ilmajohtoversioille puuttuivat, joten niiden lopussa oleviin vikapaikkoihin ei ole laskettu virtaeroja.

Taulukko xxxvii. Simscape ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa todellisessa kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k3v,Simscape}$ [A]	$I_{k3v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	13 774,44	13 840,90	66,46	0,48
AET1	5 451,09	5 622,25	171,16	3,04
BJT1	5 764,33	5 895,71	131,38	2,23
BJW1	5 750,90	5 881,58	130,68	2,22
BJ01B	3 803,53	3 816,71	13,18	0,35
BJ01D maakaapeli	3 121,17	3 115,32	-5,85	-0,19
BJ01D ilmajohto	2 431,03	–	–	–
BJ02B maakaapeli	4 862,77	4 927,53	64,76	1,31
BJ02B ilmajohto	4 509,93	–	–	–
BJ03B	4 862,07	4 927,53	65,46	1,33
BJ03D	3 161,47	3 159,90	-1,57	-0,05
BJ03F	3 398,36	3 400,24	1,88	0,06

Taulukko xxxviii. Simscape ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa verkkomallin maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k3v,Simscape}$ [A]	$I_{k3v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	113,00	118,52	5,52	4,66
AET1	59,17	60,98	1,81	2,97
BJT1	70,01	71,96	1,95	2,71
BJW1	69,81	69,65	-0,16	-0,23
BJ01B	19,43	18,90	-0,53	-2,80
BJ01D maakaapeli	12,55	12,11	-0,44	-3,63
BJ01D ilmajohto	7,67	7,37	-0,30	-4,07
BJ02B maakaapeli	44,99	44,63	-0,36	-0,81
BJ02B ilmajohto	3,61	3,53	-0,08	-2,27
BJ03B	27,90	28,62	0,72	2,52
BJ03D	15,80	15,71	-0,09	-0,57
BJ03F	4,08	4,00	-0,08	-2,00

Taulukko xxxix. Simscape ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kolmivaiheisissa oikosuluissa verkkomallin kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k3v,Simscape}$ [A]	$I_{k3v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	113,00	118,52	5,52	4,66
AET1	59,17	60,98	1,81	2,97
BJT1	70,01	71,96	1,95	2,71
BJW1	69,81	69,65	-0,16	-0,23
BJ01B	39,27	38,71	-0,56	-1,45
BJ01D maakaapeli	30,89	30,36	-0,53	-1,75
BJ01D ilmajohto	24,25	23,94	-0,31	-1,29
BJ02B maakaapeli	53,67	53,33	-0,34	-0,64
BJ02B ilmajohto	38,30	37,91	-0,39	-1,03
BJ03B	53,66	53,33	-0,33	-0,62
BJ03D	31,86	31,09	-0,77	-2,48
BJ03F	34,46	33,88	-0,58	-1,71

Kaksivaiheinen oikosulku

Todellisen maaseutuverkon ja todellisen kaupunkiverkon Neplan-laskelmat johto-osuuksien BJ01C–D ja BJ02A–B ilmajohtoversioille puuttuivat, joten niiden lopussa oleviin vikapaikkoihin ei ole laskettu virtaeroja.

Taulukko xl. Simscape ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa todellisessa maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k2v,Simscape}$ [A]	$I_{k2v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	11 928,89	11 986,57	57,68	0,48
AET1	4 721,35	4 869,01	147,66	3,03
BJT1	4 994,30	5 105,83	111,53	2,18
BJW1	4 982,98	5 093,60	110,62	2,17
BJ01B	1 699,18	1 677,59	-21,59	-1,29
BJ01D maakaapeli	1 084,70	1 070,75	-13,95	-1,30
BJ01D ilmajohto	657,82	–	–	–
BJ02B maakaapeli	3 693,93	3 710,96	17,03	0,46
BJ02B ilmajohto	307,45	–	–	–
BJ03B	2 452,25	2 440,51	-11,74	-0,48
BJ03D	1 388,76	1 372,92	-15,84	-1,15
BJ03F	349,59	343,86	-5,73	-1,67

Taulukko xli. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa todellisessa kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k2v,Simscap}$ [A]	$I_{k2v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	11 928,89	11 986,57	57,68	0,48
AET1	4 721,35	4 869,01	147,66	3,03
BJT1	4 992,88	5 105,83	112,95	2,21
BJW1	4 981,57	5 093,60	112,03	2,20
BJ01B	3 295,12	3 305,37	10,25	0,31
BJ01D maakaapeli	2 703,27	2 697,95	-5,32	-0,20
BJ01D ilmajohto	2 105,76	-	-	-
BJ02B maakaapeli	4 211,53	4 267,36	55,83	1,31
BJ02B ilmajohto	3 905,35	-	-	-
BJ03B	4 211,53	4 267,36	55,83	1,31
BJ03D	2 737,92	2 736,56	-1,36	-0,05
BJ03F	2 942,98	2 944,69	1,71	0,06

Taulukko xlii. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloituissa kaksivaiheisissa oikosuluissa verkkomallin maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k2v,Simscap}$ [A]	$I_{k2v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	98,15	102,64	4,49	4,37
AET1	51,35	52,81	1,46	2,76
BJT1	60,86	62,32	1,46	2,34
BJW1	60,69	60,31	-0,38	-0,63
BJ01B	16,89	16,37	-0,52	-3,18
BJ01D maakaapeli	10,88	10,49	-0,39	-3,72
BJ01D ilmajohto	6,65	6,38	-0,27	-4,23
BJ02B maakaapeli	38,96	38,65	-0,31	-0,80
BJ02B ilmajohto	3,13	3,05	-0,08	-2,62
BJ03B	24,22	24,78	0,56	2,26
BJ03D	13,68	13,61	-0,07	-0,51
BJ03F	3,54	3,46	-0,08	-2,31

Taulukko xliii. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu simuloiduissa kaksivaiheisissa oikosuluissa verkkomallin kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k2v,Simscape}$ [A]	$I_{k2v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	98,08	102,64	4,56	4,44
AET1	51,29	52,81	1,52	2,88
BJT1	60,72	62,32	1,60	2,57
BJW1	60,54	60,31	-0,23	-0,38
BJ01B	34,02	33,52	-0,50	-1,49
BJ01D maakaapeli	26,76	26,29	-0,47	-1,79
BJ01D ilmajohto	21,01	20,73	-0,28	-1,35
BJ02B maakaapeli	46,48	46,18	-0,30	-0,65
BJ02B ilmajohto	33,17	32,83	-0,34	-1,04
BJ03B	46,49	46,18	-0,31	-0,67
BJ03D	27,59	26,93	-0,66	-2,45
BJ03F	29,85	29,34	-0,51	-1,74

Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

Taulukossa xliv todellisen maaseutuverkon vikapaikan BJ03F maasulkuvirrat poikkesivat toisistaan epäilyttävän paljon. Virheelliseksi epäilty Neplan-tulos on merkitty taulukkoon asteriskilla (*).

Taulukko xliv. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloiduissa yksivaiheisissa maasuluissa todellisessa maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Simscape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	908,63	2 212,99	1 786,85	66,29
AET1	825,19	209,04	1 387,80	62,71
BJT1	210,93	209,03	-1,89	-0,90
BJW1	210,93	216,82	-1,90	-0,91
BJ01B	218,28	223,84	-1,46	-0,67
BJ01D maakaapeli	223,87	212,35	-0,03	-0,01
BJ02B maakaapeli	212,98	212,35	-0,63	-0,30
BJ03B	216,37	215,04	-1,33	-0,62
BJ03D	222,31	223,20	0,89	0,40
BJ03F	255,76	353,34*	97,58	27,62

Taulukko xlvi. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa todellisessa kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Sim scape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	915,00	2 695,48	1 780,48	66,05
AET1	830,85	2 212,99	1 382,14	62,46
BJT1	80,96	80,42	-0,54	-0,67
BJW1	80,96	80,42	-0,54	-0,67
BJ01B	81,32	80,87	-0,45	-0,56
BJ01D maakaapeli	81,53	81,15	-0,38	-0,47
BJ02B maakaapeli	81,11	80,71	-0,40	-0,50
BJ03B	81,11	80,60	-0,51	-0,63
BJ03D	81,60	81,30	-0,30	-0,37
BJ03F	81,53	81,56	0,03	0,04

Taulukko xlvi. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa verkkomallin maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Sim scape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	14,41	28,13	13,72	48,77
AET1	12,54	23,49	10,95	46,62
BJT1	2,14	2,06	-0,08	-3,79
BJW1	2,14	2,06	-0,08	-3,79
BJ01B	2,20	2,11	-0,09	-4,27
BJ01D maakaapeli	2,25	2,16	-0,09	-3,94
BJ02B maakaapeli	2,16	2,08	-0,08	-3,70
BJ03B	2,20	2,10	-0,10	-4,62
BJ03D	2,25	2,15	-0,10	-4,47
BJ03F	2,54	2,43	-0,11	-4,65

Taulukko xlvii. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa verkkomallin kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Sim scape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	14,60	28,13	13,53	48,10
AET1	12,70	23,49	10,79	45,93
BJT1	0,84	0,82	-0,02	-2,10
BJW1	0,84	0,82	-0,02	-2,10
BJ01B	0,84	0,82	-0,02	-2,62
BJ01D maakaapeli	0,84	0,82	-0,02	-2,88
BJ02B maakaapeli	0,84	0,82	-0,02	-2,35
BJ03B	0,84	0,82	-0,02	-2,35
BJ03D	0,84	0,82	-0,02	-2,88
BJ03F	0,84	0,82	-0,02	-2,79

Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku

Verkkomallin maaseutuverkolle ja verkkomallin kaupunkiverkolle ei ollut saatavilla Neplan-laskelmia, joten näille verkkotyypeille on esitetty pelkät simulaatiotulokset.

Taulukko xlviii. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa todellisessa maaseutuverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Simscape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	1 086,82	2 788,85	1 702,03	61,03
AET1	975,10	2 278,30	1 303,20	57,20
BJT1	19,88	9,71	-10,17	-104,74
BJW1	19,88	9,71	-10,17	-104,74
BJ01B	19,25	9,44	-9,81	-103,92
BJ01D maakaapeli	19,23	9,38	-9,85	-105,01
BJ02B maakaapeli	19,40	9,70	-9,70	-100,00
BJ03B	19,31	9,52	-9,79	-102,84
BJ03D	19,27	9,46	-9,81	-103,70
BJ03F	19,25	9,61	-9,64	-100,31

Taulukko xlix. Simscapen ja Neplanin vikavirtojen vertailu maasta erotetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa todellisessa kaupunkiverkossa

Vikapaikka	$I_{k1v,Simscape}$ [A]	$I_{k1v,Neplan}$ [A]	ΔI [A]	δI [%]
VH-AEW1	972,27	2 788,85	1816,58	65,14
AET1	878,23	2 296,71	1418,48	61,76
BJT1	5,02	1,20	-3,82	-318,67
BJW1	5,01	1,20	-3,81	-317,67
BJ01B	4,52	1,19	-3,33	-280,17
BJ01D maakaapeli	4,51	1,19	-3,32	-279,33
BJ02B maakaapeli	4,58	1,20	-3,38	-281,92
BJ03B	4,58	1,19	-3,39	-285,13
BJ03D	4,52	1,19	-3,33	-279,50
BJ03F	4,52	1,19	-3,33	-279,83

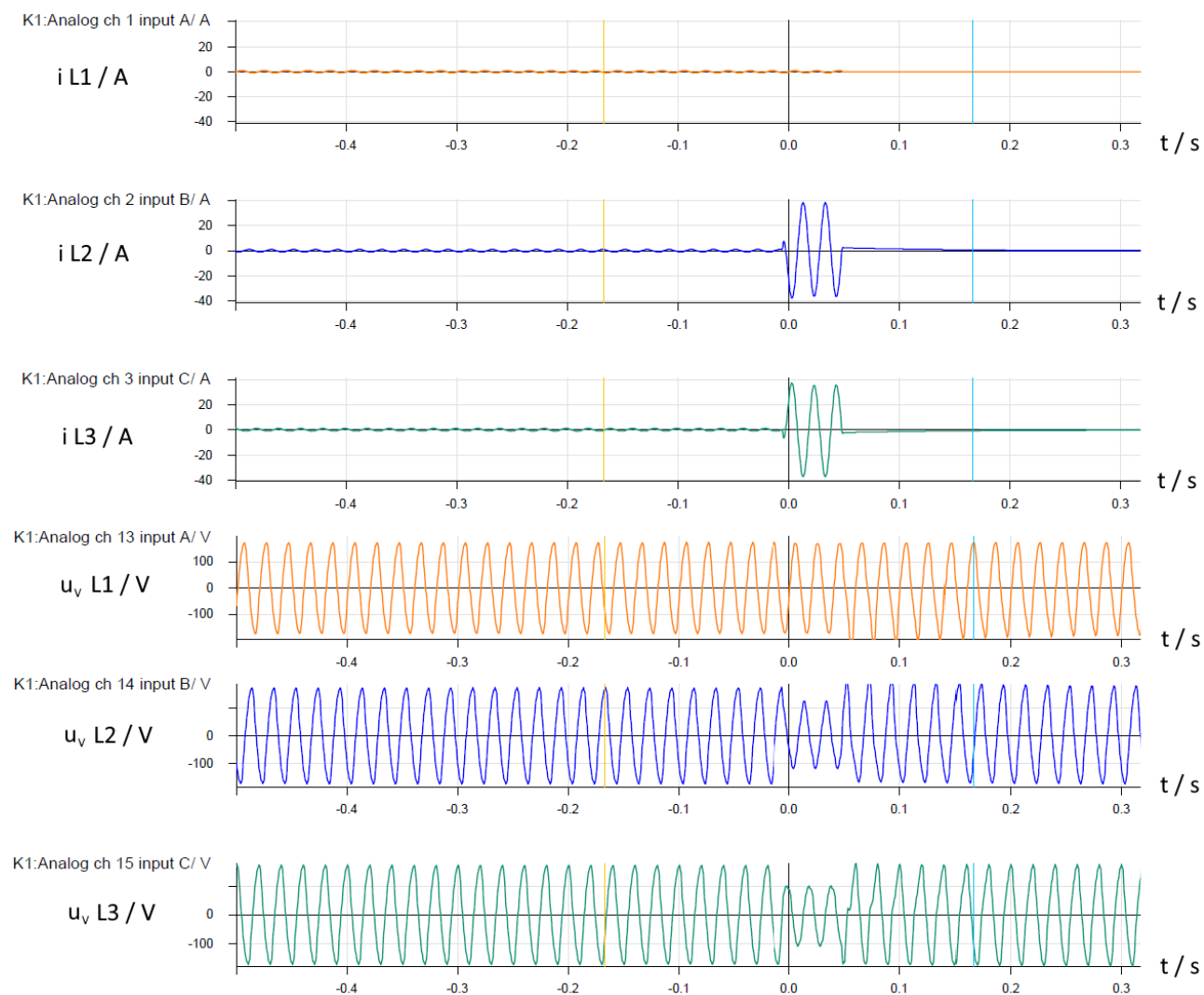
Taulukko I. Simscapen vikavirrat sammutetun verkon simuloituissa yksivaiheisissa maasuluissa verkkomallin maaseutu- ja kaupunkiverkoissa

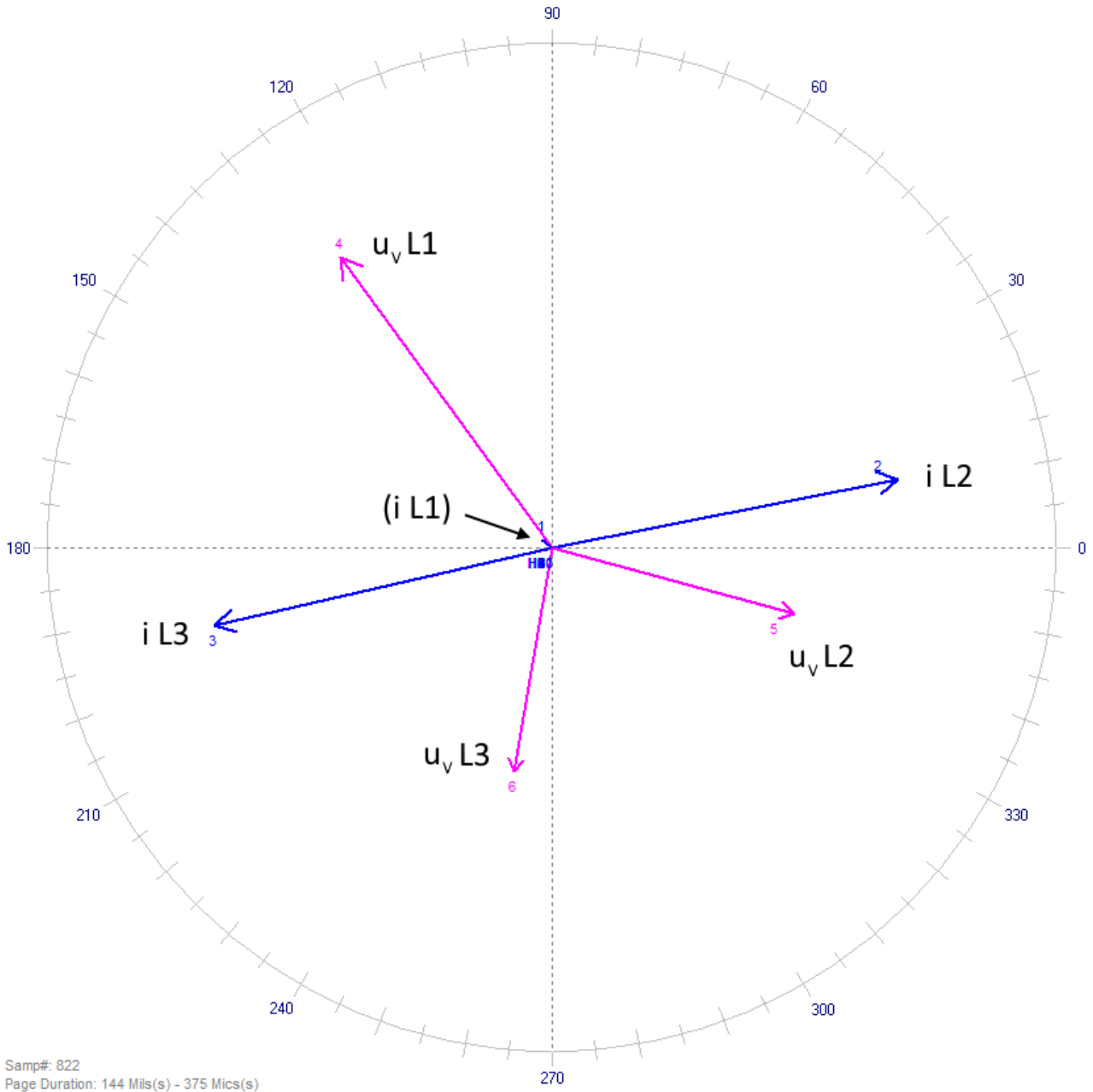
Vikapaikka	$I_{k1v,maaseutu}$ [A]	$I_{k1v,kaupunki}$ [A]
VH-AEW1	18,89	16,96
AET1	16,10	14,57
BJT1	0,32	0,08
BJW1	0,32	0,08
BJ01B	0,31	0,07
BJ01D maakaapeli	0,31	0,07
BJ02B maakaapeli	0,31	0,08
BJ03B	0,31	0,08
BJ03D	0,31	0,07
BJ03F	0,31	0,07

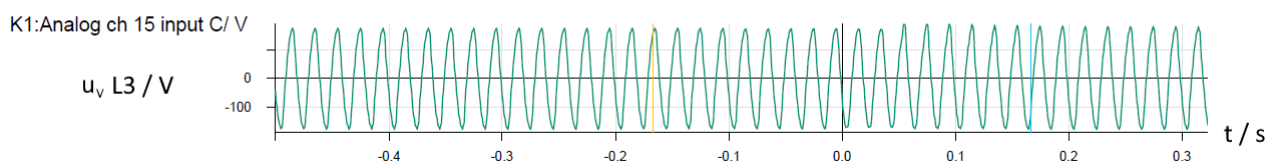
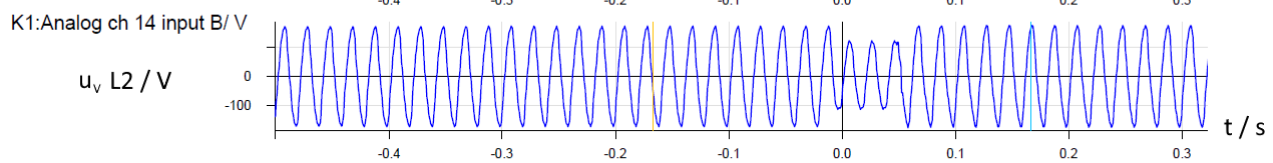
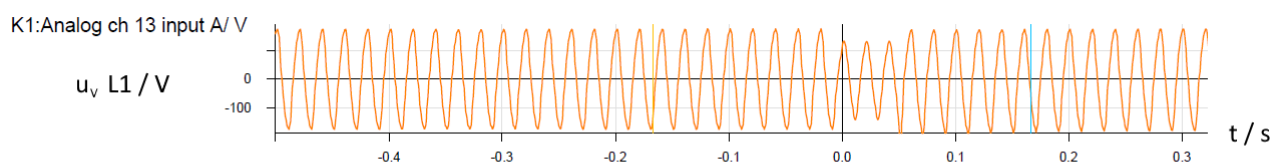
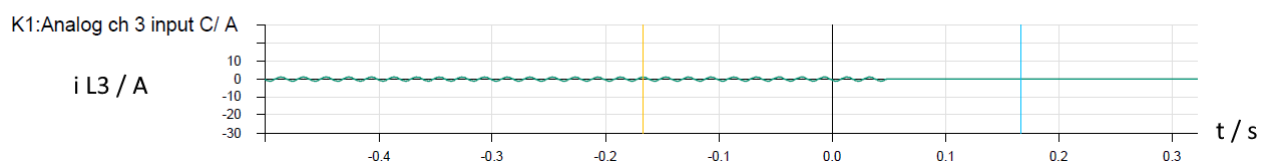
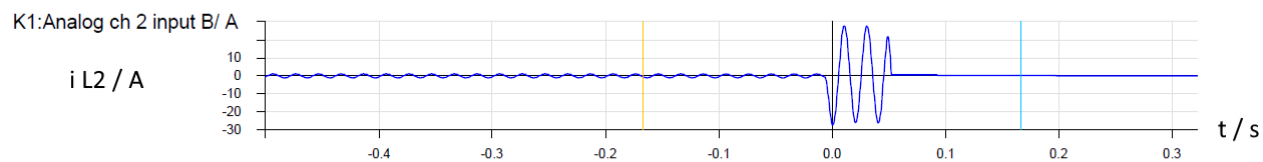
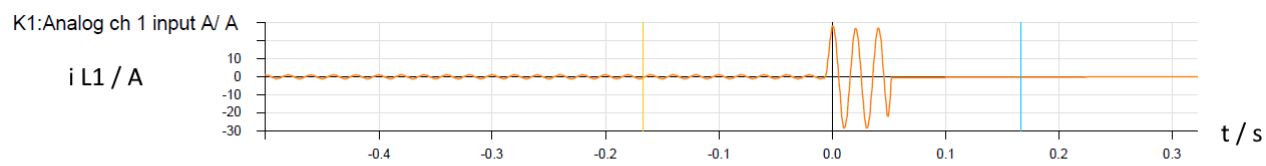
Liite 6. Mittaustulokset

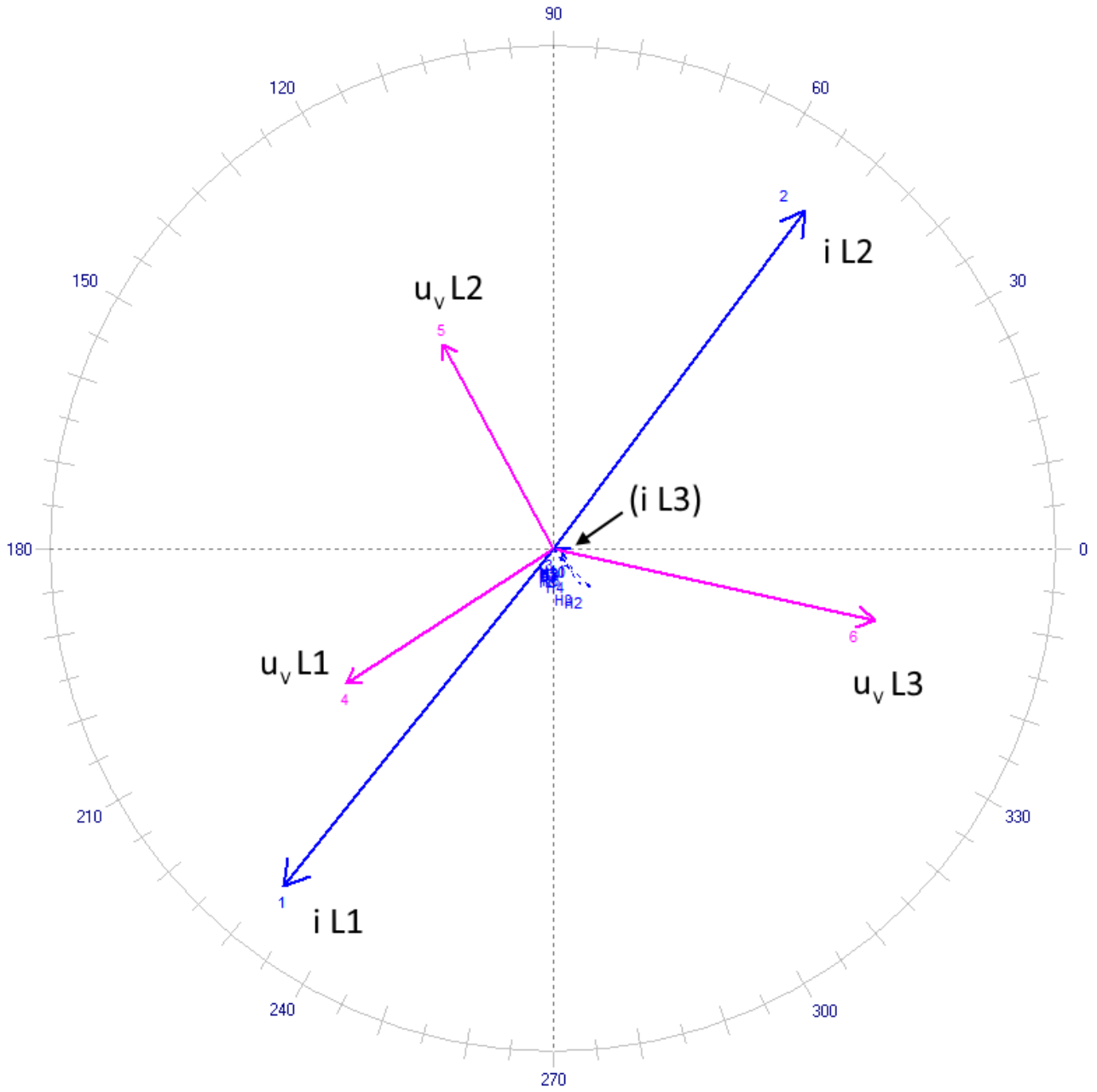
Seuraavissa kuvioissa ovat verkkomallin häiriötallenteista koostetut vaihevirrat ja -jännitteet ajan funktiona eri vikatilanteiden mittauksissa sekä vian aikaiset vaihevektoridiagrammit. Kaikki vaihevirrat on mitattu johdon BJ01 alussa ja kaikki vaihejännitteet on mitattu kiskolta BJW1.

Kaksivaiheinen oikosulku L2–L3 verkkomallin kaupunkiverkon vikapaikassa BJ01B





Kaksivaiheinen oikosulku L1–L2 verkkomallin kaupunkiverkon varayhteiden puolivälissä



Samp#: 822
Page Duration: 445 Mils(s)

Kolmivaiheinen oikosulku vikaa vasten kytkettynä verkkomallin kaupunkiverkon varayhteyden puolivälissä

