

Kaasueristeisten kytkinlaitosten ylijännitesuojaus selvitysten tarpeellisuus

Juhani Tammi

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 31.7.2017.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Tuomas Laitinen

Tekijä: Juhani Tammi		
Työn nimi: Kaasueristeisten kytkinlaitosten ylijännitesuojauksellisten tarpeellisuus		
Päivämäärä: 31.7.2017	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 10+79
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka		
Työn valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Työn ohjaaja: DI Tuomas Laitinen		
<p>Kaasueristeisten kytkinlaitosten määrä kantaverkossa lisääntyy tulevaisuudessa merkittävästi erityisesti korvausrakentamisen myötä. Kaasueristeinen kojeisto on herkkä ylijännitteille ja aiheuttaa vikaantuessaan pitkän keskeytyksen sähkönsiirtoon sekä suuret korjauskustannukset. Tämän vuoksi sen ylijännitesuojaukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota.</p> <p>Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj on aikaisemmissa kytkinlaitoshankkeissaan tilannut kojeistovalmistajilta erillisen ylijännitesuojauksellisen, jossa tarkastellaan tarvetta tehostaa kytkinlaitosten ylijännitesuojauksia kaasueristeisillä ylijännitesuojilla. Selvityksissä annetaan kuitenkin usein liikaa painoarvoa epätodennäköisille kytkinlaitoksen käyttötilanteille, mikä voi lopulta johtaa erittäin kalliiden kaasueristeisten ylijännitesuojien hankkimiseen ilman todellista tarvetta. Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena oli selvittää, onko kaasueristeisille ylijännitesuojille tarvetta ilmaeristeisten ylijännitesuojien lisäksi kantaverkon 110 kV:n kaasueristeisten kytkinlaitosten ylijännitesuojauksessa. Toisena tavoitteena oli määrittellä kytkinlaitoksen todelliset käyttötilanteet, joihin on perustelua jatkossa vaatia kojeistojen valmistajilta ylijännitesuojaukselliset. Työssä laadittiin simulointimalli, jolla simuloitiin salamaniskun aiheuttamia ylijännitteitä eri käyttötilanteissa. Työn lopussa määritettiin suojauriskitaso, jonka perusteella tehtiin päätelmät kaasueristeisten ylijännitesuojien tarpeesta.</p> <p>Johtopäätöksenä voidaan todeta, ettei kaasueristeisiä ylijännitesuojia tarvita ilmaeristeisten suojien lisäksi 110 kV:n kaasueristeisten kytkinlaitosten yhteydessä. Ylijännitesuojauksellisyksistä voidaan siten luopua tällä jännitetasolla. Lisäksi suositellaan, että jatkossa 220 ja 400 kV:n ylijännitesuojauksellisyksissä vaaditaan selvityksen laatijaa ottamaan huomioon kytkinlaitoksen käyttötilanteiden todennäköisyydet.</p>		
Avainsanat: GIS, ylijännitesuojaus, kaasueristeinen ylijännitesuoja, simulointi, PSCAD		

Author: Juhani Tammi

Title: Necessity of overvoltage protection studies for gas-insulated switchgear

Date: 31.7.2017

Language: Finnish

Number of pages: 10+79

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Power systems and High Voltage Engineering

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisor: M.Sc. (Tech.) Tuomas Laitinen

The number of substations with gas-insulated switchgear in the Finnish main grid will increase significantly in the future in particular due to renewal construction. Gas-insulated switchgear is sensitive to overvoltages and damages in it cause a long interruption in power transmission as well as large repair costs. Therefore, its overvoltage protection requires special attention.

The Finnish transmission system operator Fingrid Oyj has ordered a separate overvoltage protection study from the switchgear manufacturers in earlier gas-insulated switchgear projects to examine the need to enhance the overvoltage protection of the switchgear with gas-insulated surge arresters. However, these studies often give too much weight to unlikely switchgear operation situations, which may eventually lead to the purchase of highly expensive gas-insulated surge arresters without actual need.

The primary purpose of this thesis was to find out whether a need for overvoltage protection of 110 kV gas-insulated switchgear by gas-insulated surge arresters in addition to air-insulated surge arresters exists. Another objective was to define realistic switchgear operating situations, in which overvoltage protection studies should be required from the manufacturer in the future. A model was developed to simulate overvoltages caused by lightning surges in different operating situations. At the end of the thesis, a protection risk level was established and based on that, conclusions on the need for gas-insulated surge arresters were made.

In conclusion, it is stated that no gas-insulated surge arresters are needed in addition to air-insulated surge arresters for 110 kV gas-insulated switchgear. Overvoltage protection studies can thus be given up at this voltage level. Moreover, it is recommended that taking probabilities of switching situations into account should be required from the manufacturer in the future overvoltage protection studies at voltage levels of 220 and 400 kV.

Keywords: GIS, overvoltage protection, gas-insulated surge arrester, simulation, PSCAD

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:ssä opinnäytteeksi Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoululle. Työn tekeminen on ollut ennen kaikkea mielenkiintoinen ja omaa osaamista syventävä kokemus.

Haluan kiittää työni ohjaajaa DI Tuomas Laitista kannustavasta ohjauksesta sekä mielenkiintoisista keskusteluista työhön liittyen. Kiitokset myös työni valvojalle, professori Matti Lehtoselle opastuksesta ja kommenteista. Lisäksi haluan kiittää ohjausryhmäni jäseniä sekä kaikkia muita työtovereitani, jotka ovat antaneet neuvoja ja opastusta sekä vastanneet kysymyksiini erilaisissa haastavissakin tilanteissa.

Suuret kiitokset perheelleni ja ystäväilleni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua koko opintojeni ajan. Erityiskiitos Tarulle työn oikoluvusta sekä kärsivällisyydestä ja tuesta tämän työn ja aiempien opintojen aikana.

Helsingissä, 31.7.2017

Juhani Tammi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Kaasueristeiset kytkinlaitokset	3
2.1 GIS-kojeiston rakenne	3
2.2 GIS-laitoksen liitynnät	4
2.3 GIS-laitoksen ominaisuudet	5
3 Ylijännitteet siirtoverkossa	7
3.1 Ylijännitteiden luokittelu	7
3.2 Pientaajuiset ylijännitteet	8
3.3 Loivat transienttiylijännitteet	9
3.4 Jyrkät transienttiylijännitteet	9
3.4.1 Ukkosen syntymekanismi ja salamalajit	10
3.4.2 Ukkos- ja salamatilastot Suomessa	12
3.4.3 Suora salamanisku vaihejohtimeen	16
3.4.4 Takaisku	16
3.5 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet	17
3.6 Kulkuaaltojen ominaisuudet	18
4 Ylijännitteiden rajoittaminen	20
4.1 Ukkosjohtimet	20
4.2 Pylväsmaadoitukset	23
4.3 Ylijännitesuojat	23
4.3.1 Kipinävälitön metallioksidisuoja	24
4.3.2 Kaasueristeinen ylijännitesuoja	25
4.3.3 GIS-laitoksen ylijännitesuojaus	27
5 Simulointimallin laatiminen	29
5.1 Yleistä	30
5.1.1 Aikaisemmat ylijännitesuojausselvitykset	30
5.1.2 PSCAD/EMTDC	30
5.2 GIS-laitos	31
5.3 Pylväät ja maadoitukset	32
5.3.1 Pylväät	32
5.3.2 Eristinketjut	35

5.3.3	Pylväsmaadoitukset	37
5.4	Avojohdot	39
5.5	Kaapelit	41
5.6	Muuntajat ja jännitelähteet	43
5.7	Ylijännitesuojat	43
5.8	Salamaniskujen generoiminen	48
5.8.1	Syöksyvirtageneraattori	48
5.8.2	Suorat salamaniskut	49
5.8.3	Takaiskut	50
6	Simulointi ja tulosten tarkastelu	52
6.1	Simulointien määrittely ja simulointitulokset	52
6.1.1	Simulointitulokset suorille salamaniskuille	53
6.1.2	Simulointitulokset takaiskuille	55
6.1.3	Herkkyystarkastelu tietyille parametreille	59
6.2	Suojausriskitason määrittäminen	61
6.2.1	KytKentätilanteiden todennäköisyyksiä ei huomioitu	63
6.2.2	KytKentätilanteiden todennäköisyyksien huomioon ottaminen .	65
6.3	Johtopäätökset ja suositukset	67
7	Yhteenveto	69
	Lähdeluettelo	70
A	Simulointimalli PSCAD:ssa	75
B	Kolmivaiheisesti koteloidun GIS-putken impedanssi- ja admittanssimatriisit	76

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	iskuetäisyyden yhtälön vakio
A_0	ylijännitesuojamallin epälineaarinen vastus
A_1	ylijännitesuojamallin epälineaarinen vastus
A_c	johtimen poikkipinta-ala
b	iskuetäisyyden yhtälön vakio
b_{+1}	GIS-putken myötäverkon susceptanssi pituutta kohti
b_{01}	GIS-putken nollaverkon susceptanssi pituutta kohti
b_d	äärimmäisten johtimien välinen etäisyys
b_c	susceptanssi pituutta kohti
c	valonnopeus tyhjiössä
C_0	ylijännitesuojamallin kapasitanssi
c_c	kapasitanssi pituutta kohti
c_n	impedanssimatriisien laskennassa käytetty muuttuja
d	ylijännitesuojan korkeus
D_1	impedanssimatriisien laskennassa käytetty apumuuttuja
d_d	ukkos- ja vaihejohtimen välinen lyhin etäisyys
$d_{g,sag}$	ukkosjohtimien riippuma
d_h	ukkos- ja vaihejohtimen välinen etäisyys vaakatasossa
d_j	GIS-johtimen etäisyys koteloinnin keskipisteestä
E_0	maan ionisoitumiseen johtava kentänvoimakkuus
f_c	johtimen riippuma jänteen keskikohdassa
g	putoamiskiihtyvyyys
h_1	pylvään keskikohdan korkeus
h_2	pylvään keskikohdan ja orren välinen etäisyys
h_c	ukkosjohtimien asennuskorkeus
$h_{c,avg}$	ukkosjohtimien keskimääräinen asennuskorkeus
H_T	pylväiden keskimääräinen korkeus johdolla
H_{TO}	pylvään korkeus orteen saakka
$I_0(x)$	ensimmäisen lajin muokattu Besselin funktio
$I_1(x)$	ensimmäisen lajin muokattu Besselin funktio
i_1	saapuvan aallon virta
i_{1r}	heijastuvan aallon virta
i_2	jatkavan aallon virta
i_{cr}	kriittinen salamavirta
$i_{d,max}$	suurin vaihejohtimiin iskevän salaman virta
i_g	maan ionisoitumiseen johtava virta
i_{max}	suurin salamavirta
i_{min}	pienin jännitelujuuden ylittymisen aiheuttava salamavirta
i_s	salamavirta
i_T	pylvään maadoitusvastuksen läpi kulkeva virta
$K_0(x)$	toisen lajin muokattu Besselin funktio
$K_1(x)$	toisen lajin muokattu Besselin funktio
K_1	eristinketjun ylilyöntijännitteen yhtälön muuttuja
K_2	eristinketjun ylilyöntijännitteen yhtälön muuttuja
K_s	varmuuskerroin

L_0	ylijännitesuojamallin induktanssi
L_1	ylijännitesuojamallin induktanssi
l_c	induktanssi pituutta kohti
$l_{\text{jänne}}$	jänteen pituus kilometreinä
l_{ketju}	suojaosien välinen etäisyys
m_c	johtimen massa pituutta kohti
n	rinnakkaisten metallioksidipilareiden lukumäärä
N_g	salamatiheys
N_L	johdolle osuvien salamoiden vuotuinen lukumäärä
$[P]$	putkeen asennetun 3-vaihesen kaapelin potentiaalikerroinmatriisi
$[P_i]$	kaapelin sisäinen potentiaalikerroinmatriisi
$[P_p]$	kaapeliputken sisäinen potentiaalikerroinmatriisi
$P_{p,ij}$	kaapeliputken sisäisen potentiaalikerroinmatriisin itseisimpedanssi
$P_{p,jk}$	kaapeliputken sisäisen potentiaalikerroinmatriisin keskinäisimpedanssi
Q_{jj}	impedanssimatriisien laskennassa käytetty muuttuja
Q_{jk}	impedanssimatriisien laskennassa käytetty muuttuja
r_{+1}	GIS-putken myötäverkon resistanssi pituutta kohti
R_0	ylijännitesuojamallin resistanssi
r_{01}	GIS-putken nollaverkon resistanssi pituutta kohti
$R_{0,T}$	pylvään maadoitusresistanssi pienellä virralla
R_1	ylijännitesuojamallin resistanssi
r_{1t}	pylvään säde orren kohdalla
r_2	GIS-johtimen säde
r_{2t}	pylvään säde keskikohdassa
r_{3t}	pylvään säde juuressa
R_a	salamoita puoleensa vetävä säde
r_{avg}	pylvään keskimääräinen säde
r_c	iskuetaisyys johtimeen
$r_{c,\text{max}}$	suurin iskuetaisyys johtimeen
r_g	iskuetaisyys maahan
r_{p1}	GIS-koteloinnin sisäsäde
r_{p2}	GIS-koteloinnin ulkosäde
R_T	pylvään maadoitusresistanssi
s_c	jänteen pituus metreinä
$S_{m,1}$	pääpurkauksen jyrkkyys
$S_{m,2}$	osapurkausten jyrkkyys
$[T]$	muunnosmatriisi
T_1	pulssin rinnan kesto aika
T_2	pulssin selän puoliarvonaika
T_{10}	pulssin 10 %:n aika
T_{90}	pulssin 90 %:n aika
T_d	ukkospäiväluku
t_s	salamaniskusta kulunut aika
t_t	kulkuaallon kulkuaika pituutta kohti
u_1	saapuvan aallon jännite
U_{10}	ylijännitesuojan nimellisjännösjännite
u_{1r}	heijastuvan aallon jännite
u_2	jatkavan aallon jännite
U_{AKAT}	jännite johtolähdön A katkaisijan kohdalla

U_{AKP}	jännite johtolähdön A GIS-kojeiston kaapelipäättteen kohdalla
U_{BKAT}	jännite johtolähdön B katkaisijan kohdalla
U_{CFO}	eristinketjun jännitelujuus
U_m	laitteen suurin käyttöjännite
U_{MUU}	jännite muuntajan kohdalla
u_s	salamaniskun synnyttämä jännite
U_{YJS}	jännite ylijännitesuojan kohdalla
v	kulkuaallon etenemisnopeus
V_{ref}	jännitteen skaalaustekijä
V_{v-t}	eristinketjun ylilyöntijännite
x_{+1}	GIS-putken myötäverkon reaktanssi pituutta kohti
x_{01}	GIS-putken nollaverkon reaktanssi pituutta kohti
x_1	impedanssimatriisien laskennassa käytetty apumuuttuja
x_2	impedanssimatriisien laskennassa käytetty apumuuttuja
x_c	reaktanssi pituutta kohti
x_t	epälineaarisen siirtofunktion sisäänmeno
$[Y]$	putken asennetun 3-vaihesen kaapelin admittanssimatriisi
y_c	vaihejohtimien asennuskorkeus
$y_{c,avg}$	vaihejohtimien keskimääräinen asennuskorkeus
$[Y_{seq}]$	symmetristen komponenttien admittanssimatriisi
y_t	epälineaarisen siirtofunktion ulostulo
$[Z]$	putken asennetun 3-vaihesen kaapelin impedanssimatriisi
z_{11}	kaapelin sisäisen impedanssimatriisin alkio
$[Z_c]$	kaapeliputken sisä- ja ulkopinnan välinen impedanssimatriisi
$[Z_i]$	putken asennetun kaapelin sisäinen impedanssimatriisi
$[Z_o]$	paluupiirin sisäinen impedanssimatriisi
$[Z_p]$	kaapeliputken sisäinen impedanssimatriisi
Z_{pjj}	kaapeliputken sisäisen impedanssimatriisin itseisimpedanssi
Z_{pjk}	kaapeliputken sisäisen impedanssimatriisin keskinäisimpedanssi
$[Z_{seq}]$	symmetristen komponenttien impedanssimatriisi
Z_T	pylvään aaltoimpedanssi
Z_w	johdon aaltoimpedanssi
ε	permittiivisyys
ε_0	tyhjiön permittiivisyys
ε_r	suhteellinen permittiivisyys
ε_{rp}	SF ₆ -kaasun suhteellinen permittiivisyys
λ_f	vikataajuus
$\lambda_{j\ddot{a}nne}$	jänteen salamavikataajuus
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ_{r1}	GIS-johtimen suhteellinen permeabiliteetti
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti
μ_{rp}	GIS-koteloinnin suhteellinen permeabiliteetti
ρ_1	GIS-johtimen resistiivisyys
ρ_m	maan ominaisresistanssi
ρ_p	GIS-koteloinnin resistiivisyys
σ_H	jänteen kiristysvoima
θ	suojauskulma
θ_{jk}	kahden GIS-johtimen välinen kulma

Lyhenteet

1H	harustettu kannatuspylväs
AIS	<i>air-insulated switchgear</i> , ilmaeristeinen kytkinlaitos
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i> , kansainvälinen suuriin sähköjärjestelmiin keskittynyt järjestö
GIS	<i>gas-insulated switchgear</i> , kaasueristeinen kytkinlaitos
EMTDC	<i>Electromagnetic Transients with DC</i> , elektromagneettisten transienttien simulointimoottori
HDPE	<i>high density polyethylene</i> , suurtiheyspolyeteeni
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , kansainvälinen tekniikan alan järjestö
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
MATLAB	numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto
MTBF	<i>mean time between failures</i> , keskimääräinen aika vikaantumiseen
NORDLIS	<i>Nordic Lightning Information System</i> , yhteispohjoismainen salamapaikannusjärjestelmä
PSCAD	<i>Power Systems Computer Aided Design</i> , elektromagneettisten transienttien simulointiohjelma
PSS-E	verkostolaskentaohjelmisto
SF ₆	rikkiheksafluoridi
TEV	<i>transient enclosure voltage</i> , koteloinnin ylijännitetransientti
TOV	<i>temporary overvoltages</i> , pientaajuiset ylijännitteet
VFTO	<i>very fast front transient overvoltages</i> , erittäin jyrkät transienttiylijännitteet
v-t	<i>voltage-time</i> , jännite-aika
XLPE	<i>cross-linked polyethylene</i> , ristosilloitettu polyeteeni
YJS	ylijännitesuoja
ZnO	sinkkioksidi

1 Johdanto

Kaasueristeisten 110 kV kytkinlaitosten (gas-insulated switchgear, GIS) määrä kantaverkossa tulee lisääntymään lähivuosina ikääntyneiden ilmaeristeisten kytkinlaitosten (air-insulated switchgear, AIS) korvaamisen sekä uudisrakentamisen myötä. Pääsyytä GIS-teknologiaan siirtymisessä ovat kustannustason lasku, GIS-kojeistojen korkea luotettavuus sekä toisaalta mahdollisuus korvata olemassa oleva kytkinlaitos vähemmän tilaa vievällä kojeistoratkaisulla.

GIS-kojeistojen laitekomenttien huoltaminen on kuitenkin kallista ja hidasta. Lisäksi harvinaiset kojevauriot saattavat aiheuttaa epäkäytettävyyttä myös muille kojeiston osille, kiskoille tai johtolähdöille kaasutilariippuvuuksien vuoksi. Näistä syistä myös kojeistojen eristyskoordinaatiotarkasteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota.

110 kV:n jännitetasolla suurimpana ulkoisena uhkana GIS-laitokselle voidaan pitää salamaniskun aiheuttamaa kojeiston sisällä ilmenevää ylijänniterasitusta, joka saattaa pahimmassa tapauksessa aiheuttaa kojeiston sisäisen läpilyönnin. Läpilyönnin seurauksena kojeiston vikaantuneeseen osaan on yleensä otettava käyttökeskeytys korjausten suorittamiseksi. GIS-laitokset on siksi suojattava riittävän tehokkaasti erityisesti ilmastollisia ylijännitteitä vastaan.

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n (jatkossa Fingrid) GIS-laitosten ylijännitesuojaus on perinteisesti toteutettu kaapelipäätteiden tai läpivientien yhteyteen asennettavilla AIS-ylijännitesuojilla. Vallitsevan käytännön mukaisesti kojeistovalmistajat laativat hankintojen yhteydessä erillisen kojeiston sisäiseen ylijännitesuojaukseen liittyvän selvityksen. Fingridin tehtävänä on arvioida selvityksen soveltuvuus sekä tehdä tämän perusteella päätökset mahdollisesti tarvittavista kojeiston sisäisistä kaasueristeisistä ylijännitesuojista. Tähän toimitusmalliin liittyy kuitenkin haasteita, joiden ratkaisemiseen tässä työssä pyritään löytämään menetelmiä.

Lähtökohtaisesti laitevalmistajien intresseissä on suojella kojeistoaan, tuotemerkkiään ja näin ollen myös kojeistoon liittyviä eristyskoordinaatoriskejä hyvin kokonaisvaltaisesti. Voidaan myös olettaa, että laitevalmistajilla on vähintään herkkyyssuosittelua lisähankintoja osaksi kojeistotoimitustaan. Ylijännitesuojaukselliset toimitetaan projekteissa hyvin tiiviillä aikataululla, eikä perusteelliseen analyysiin tai laskelmien korjaamiseen aina ole toimitukseen liittyvien reunaehtojen johdosta mahdollisuuksia. Käyttötilanteet, joihin laskelmat on tehty, eivät välttämättä edusta sitä, miten kojeistoa tullaan lopulta käyttämään. Muun muassa näiden syiden vuoksi laskelmien soveltuvuus ylimääräisten suojalaitteiden hankintoihin voi olla kyseenalainen.

Tämän työn ensijaisena tavoitteena on selvittää, onko GIS-laitoksen sisäisille ylijännitesuojille ylipäätään tarvetta ilmaeristeisten ylijännitesuojien lisäksi Suomen olosuhteissa, ja voitaisiinko näin luopua valmistajien tekemistä ylijännitesuojauksellisista kokonaan. Vaihtoehtoisesti työssä pyritään määrittämään sellaiset GIS-laitoksen todelliset käyttötilanteet, joihin ylijännitesuojaukselliset vaaditaan jatkossa valmistajien osalta laadittavaksi.

Selvitys tehdään laatimalla simulointimalli, jonka avulla tarkastellaan GIS-laitoksessa esiintyviä ylijännitteitä eri käyttötilanteissa. Yhdistämällä simulointitulokset to-

dennäköisyysperusteiseen tarkasteluun ylijännitteiden alkuperän ja käyttötilanteiden osalta saadaan niin sanottu suojausriskitaso eli keskimääräinen aika GIS-kojeiston vikaantumiseen. Tämän perusteella esitetään johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet kaasueristeisten ylijännitesuojien hankinnalle ja ylijännitesuojaus selvitysten tilaamiselle.

Työssä käsitellään ensisijaisesti 110 kV:n jännitetasoa, sillä valtaosa tulevaisuudessa rakennettavista kantaverkon GIS-laitoksista kuuluu siihen. Tästä huolimatta monet työssä esitetyt periaatteet soveltuvat myös 220 kV:n ja 400 kV:n jännitetasoille. Yleisesti ilmastolliset ylijännitteet ovat mitoittava tekijä ylijännitesuojauksessa 110 kV:n jännitetasolla, joten riittävä suojaus niitä vastaan takaa riittävän suojaustason myös muita ylijännitelajeja vastaan. Tämän vuoksi simuloinnit rajoitetaan koskemaan ainoastaan ilmastollisia eli salamaniskun aiheuttamia transienttiylijännitteitä.

Työn alussa, luvussa 2, esitellään GIS-laitoksen rakenne ja ominaisuudet. Luvussa 3 esitetään lyhyesti siirtoverkossa esiintyvät eri ylijännitelajit syventyjen jyrkkiin transienttiylijännitteisiin. Luvussa 4 esitetään tärkeimmät ja tavallisimmat keinot suojautua erilaisilta ylijännitteiltä. Luvussa 5 selostetaan, miten simulointimalli rakennettiin, ja miten sen komponenttien parametrit valittiin. Luvussa 6 esitetään simulointitulokset ja kokonaisriskitaso simulointimallin mukaiselle GIS-laitokselle. Lisäksi tässä luvussa annetaan johtopäätökset ja suositukset. Lopuksi luvussa 7 tehdään työn yhteenveto.

2 Kaasueristeiset kytkinlaitokset

Kaasueristeisen kytkinlaitosten (gas-insulated switchgear, GIS) käyttö on lisääntynyt lähinnä niiden tuoman tilansäästön ja pienten elinkaarikustannusten myötä. GIS-laitoksia rakennetaan nyt runsaasti elinkaarensa loppuun tulevien avokytkinlaitosten tilalle. Niitä käytetään jännitealueella 12–1100 kV ja mitoitusvirroilla 630–8000 A. Suomessa GIS-laitoksia on käytössä kaikilla siirtoverkon jännitetasoilla. [1, s. 120, 128]

GIS-laitoksen toimintaperiaate ei sinänsä eroa ilmaeristeisestä kytkinlaitoksesta (air-insulated switchgear, AIS). Molempiin ratkaisuihin sisältyvät katkaisijat, mitamuuntajat, erottimet sekä maadoituskytkimet. GIS-laitoksen tapauksessa ainoa tarvittava lisälaitte on mittari, jolla valvotaan kaasun tiheyttä ja painetta. GIS-laitoksen laitteiden rakenteet kuitenkin poikkeavat monilta osin AIS-laitoksen vastavista. Niiden suunnittelussa tulee kiinnittää esimerkiksi erityistä huomiota erittäin jyrkkien jännitetransienttien syntymiseen, sillä ne voivat GIS-putkessa edetä lähes vaimenemattomina. [1, s. 132]

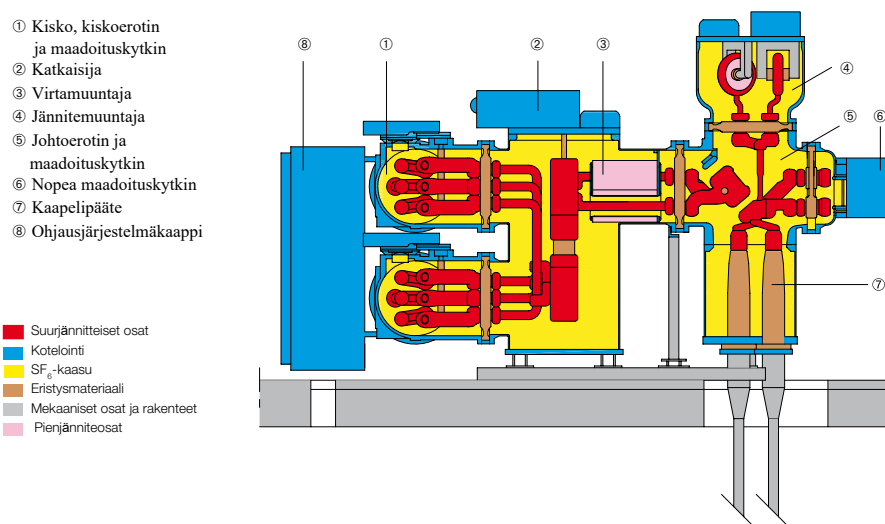
Tässä luvussa tutustutaan lyhyesti GIS-laitoksen rakenteeseen, sen ominaisuuksiin sekä liityntätapoihin muuhun sähköverkkoon.

2.1 GIS-kojeiston rakenne

GIS-kojeistojen jännitteelliset osat sijaitsevat hermeettisesti suljetussa, maadoitetussa alumiinista tai teräksestä valmistetussa kotelossa. Kotelon sisällä eristeaineena toimii SF₆-kaasu (rikkiheksafluoridi), joka on yleensä paineistettu 3–6 barin ylipaineeseen ulkoilmaan nähden. GIS-kojeistot jaetaan erillisiin kaasutiloihin, joiden välillä on kaasutiivis läpivientieristin. Kaasutilajalla voidaan rajoittaa vikojen vaikutusta sekä helpottaa huoltotoimenpiteiden suorittamista. Kytkinlaitos koostuu tehtaalla kootuista moduuleista, jotka kuljetetaan sellaisinaan asennuspaikalla ja kytketään siellä toisiinsa laippaliitoksella. Moduulirakenteen ansiosta GIS-kojeiston asennus on nopeaa ja monipuoliset konfiguraatiot mahdollisia. Tällaisen moduulin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 1. [1, s. 129]

GIS-kojeistot ovat joko yksi- tai kolmivaiheisesti koteloituja. Nykyään kolmivaihekoteloitua käytetään 170 kV:n jännitteelle saakka ja siitä ylöspäin kojeistot ovat tyypillisesti yksivaiheisesti koteloituja. Kolmivaihekoteloinnilla saavutetaan pienempi tilantarve, pienempi määrä kaasutiloja ja edullisuus verrattuna yksivaihekotelointiin. Lisäksi kojeiston sisäiset viat kehittyvät todennäköisesti kolmivaihevioiksi, mikä pienentää kotelon läpipalamisen mahdollisuutta. Koteloinnin materiaalina voidaan käyttää terästä, koska siihen ei indusoidu häviöitä ja kuumentumista aiheuttavia pyörrevirtoja. [1, s. 131–132]

Yksivaihekoteloinnin etuina ovat puolestaan pienemmät vikavirrat ja pienemmän kokoiset liitokset. Yksivaihekoteloinnin tapauksessa koteloon indusoituu pyörrevirtoja, minkä vuoksi koteloinnin materiaalina on käytettävä alumiinia. Alumiinista valmistettu kotelo täytyy tehdä paksummaksi kuin teräskotelo, sillä alumiinin läpipalamiskestoisuus on alhaisempi kuin teräksen. [1, s. 131–132]



Kuva 1: ABB ELK-04 -tyyppisen 72,5–170 kV:n GIS-kenttämoduulin rakenne [2, muokattu].

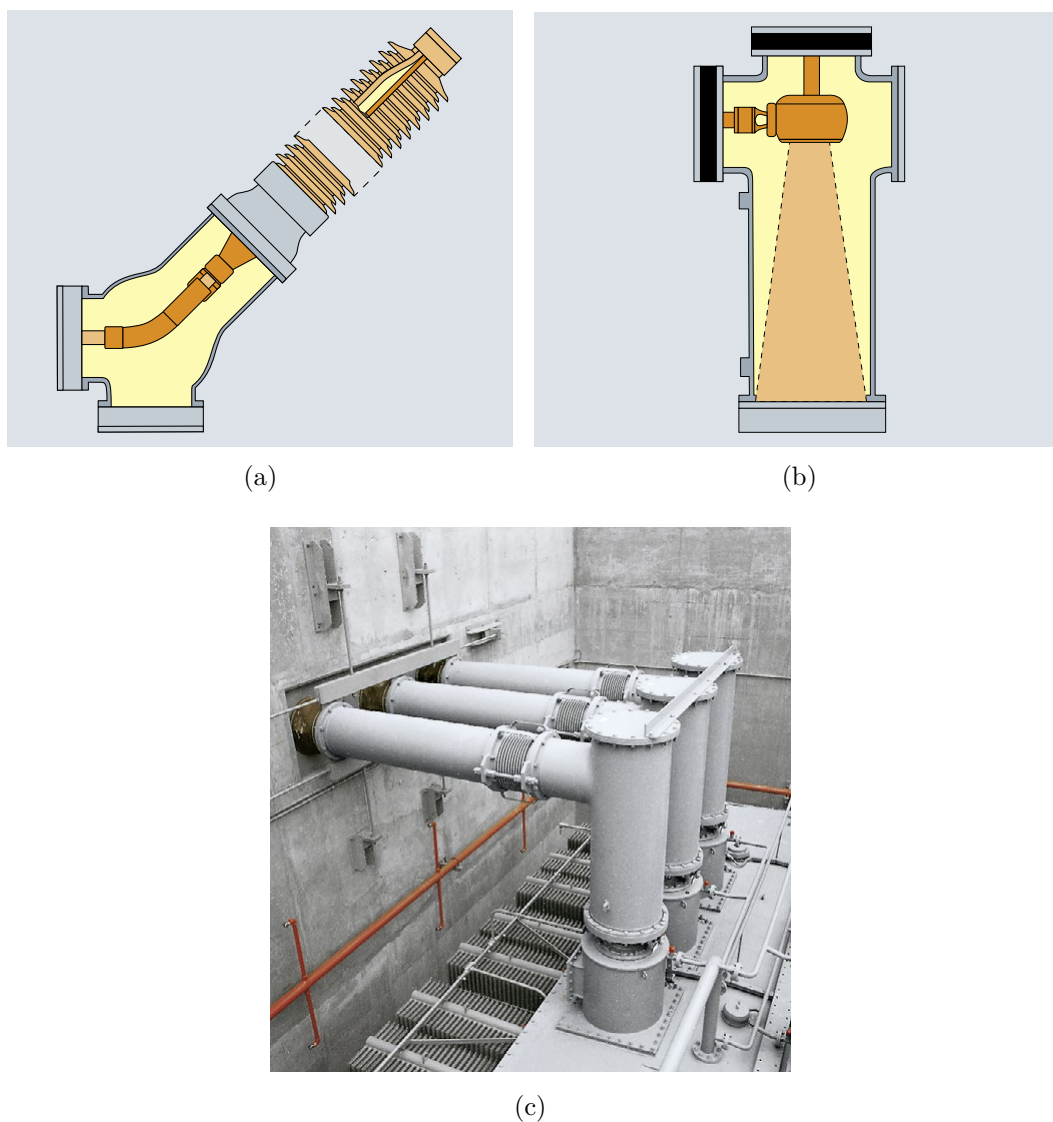
GIS-kojeistoissa käytettävät tyypillisimmät kiskojärjestelmät ovat K-, KK- ja 1 1/2-K-järjestelmät. Apukiskoja ei tavallisesti käytetä, koska niiden tuoma lisähinta vie yleensä GIS-laitoksen kaupallisen kilpailukyvyn verrattuna avokytkinlaitokseen. [1, s. 135–136] Suomen kantaverkossa kaikki uudet GIS-laitokset pyritään pääsääntöisesti toteuttamaan kaksikiskojärjestelmällä.

2.2 GIS-laitoksen liitynnät

GIS-laitokset liittyvät laitosta ympäröivään verkkoon tavallisimmin kaapeli- tai avojohtoliitynnällä, mutta myös koteloituja liityntöjä käytetään. Näistä kaapeliliityntä on yleensä paras vaihtoehto, sillä se tuo vapautta laitoksen rakenteiden suunnittelussa ja säästää tilaa. [1, s. 133] GIS-laitoksen liitynnöissä käytettäviä läpivientimahdollisuuksia on havainnollistettu kuvassa 2.

Avojohtoliitynnät tehdään kaapeli- tai SF₆/ilma-läpivientieristimiä käyttäen. Jos laitokseen liittyy useampia avojohtoja, eivät kaikki liitynnät mahdu suoraan GIS-rakennuksen seinään. Tällöin GIS-laitoksesta on tuotava pidennetyt SF₆-putket etäämmälle laitoksesta tai on käytettävä avojohtoliityntää kalliimpaa kaapeliliityntää. [1, s. 133–134]

Muuntajaliitynnät voidaan tehdä kaapeli- ja avojohtoliityntöjen ohella myös SF₆/öljy-läpivientieristimellä suoraan muuntajaan. Tällainen liityntä on kuitenkin kilpailukykyinen vasta 245 kV:n jännitetasosta ylöspäin. Suomessa ei ole käytetty SF₆/öljy-liityntöjä, koska varamuuntajat on varustettu SF₆/ilma-läpivientieristimillä, jolloin niitä ei voida liittää suoraan GIS-laitokseen alkuperäisen muuntajan vikaantuessa. [1, s. 134]



Kuva 2: GIS-laitoksen liittynöissä käytettävät läpivientieristimet: a) SF₆/ilmäläpivientieristin, b) kaapeliliityntä ja c) SF₆/öljyläpivientieristin. [3]

2.3 GIS-laitoksen ominaisuudet

Kaasueristeisillä kytkinlaitoksilla on monia sellaisia ominaisuuksia, jotka ovat tehneet niistä entistä suosittumia ja kilpailukykyisempiä. Tämän päivän GIS-laitokset ovat kompaktimpia, yksinkertaisempia, edullisempia, suorituskykyisempiä ja luotettavampia kuin aikaisemmin [4]. GIS-laitosten tärkein hyöty on niiden tuoma tilasäästö verrattuna ilmaeristeiseen kytkinlaitokseen. Esimerkiksi 123 kV:n GIS-laitokset vaativat jopa 98% vähemmän rakennustilavuutta kuin AIS-laitokset [1, s. 120]. Kaupunkimaastossa GIS-laitokset ovatkin usein välttämättömiä ratkaisuja tilanpuutteen vuoksi.

Toinen merkittävä GIS-laitokseen liittyvä etu on pienet elinkaarikustannukset. Niiden elinikä voi olla jopa yli 50 vuotta ja tyypillisesti niille suoritetaan ainoastaan

yksi merkittävä avaavahuolto elinkaaren puolivälissä. Lisäksi GIS-laitosten vikataajuus on pienempi ja siten käyttövarmuus suurempi kuin avokytkinlaitosten, koska kotelointi suojaa niitä esimerkiksi ulkoisilta haitoilta, kuten lialta ja sääilmiöiltä. Muita GIS-laitosten etuja ovat kevyt rakenne, lyhyt asennusaika, korroosiokestävyys ja turvallisuus. [1, s. 128–136], [4]

Eräs merkittävä tekijä GIS-laitosten rakentamisen lisääntymisessä on niiden käyttäminen korvausrakentamisessa. Rakentamalla GIS-laitos vanhan purettavan AIS-laitoksen viereen voidaan minimoida siirtokeskeytykset. Tämä onnistuu siten, että GIS-laitoksen valmistuttua käännettään vanhalle asemalle menevät voimajohdot GIS-laitokselle ja vasta sen jälkeen aloitetaan vanhan aseman purkutyöt. Saavutetut edut siirtokeskeytysten minimoitumisesta tekevät GIS-laitoksista entistä kilpailukyysisempiä. [5]

Suurimpia kaasueristeisten kytkinlaitosten käyttöön liittyviä haittoja on laitoksen valmistajaan sitoutuminen koko laitoksen eliniän ajaksi. Esimerkiksi laitoksen laajentamisessa on pakko käyttää alkuperäisen valmistajan osia, ellei haluta maksaa erittäin kalliista liitososista, joiden avulla on mahdollista liittää laitokseen myös muiden valmistajien laitteita. Toinen haittapuoli liittyy vikojen korjaamisaikoihin. Vaikka GIS-kojeiston sisäiset viat ovat harvinaisia, toteutuneiden vikojen korjausajat ovat pitkiä. Lisäksi vikaantuminen tiettyssä kojeiston osassa voi kojeiston kaasutijajasta riippuen aiheuttaa käyttökeskeytyksiä myös laitoksen ehjiin osiin, kuten kiskoihin tai johtolähtöihin. Tämän vuoksi GIS-kojeistot on pyrittävä suojaamaan esimerkiksi ulkoisia ylijännitteitä vastaan mahdollisimman tehokkaasti, jotta kojeiston sisäisen läpilyönnin riski minimoituu. [1, s. 134–136]

3 Ylijännitteet siirtoverkossa

Ylijännitteeksi kutsutaan jännitettä, joka ylittää tarkasteltavalle eristysrakenteelle ominaisen referenssiarvon. Siirtoverkossa vaihe-maa-eristyksen referenssiarvona pidetään laitteen suurimmasta käyttöjännitteestä U_m laskettua vaihejännitteen huippuarvoa $U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$. Vastaavasti vaihevälän ylijännitteiden referenssiarvona käytetään vastaavan pääjännitteen huippuarvoa $U_m\sqrt{2}$. [6, s. 253]

Tässä luvussa esitellään siirtoverkossa esiintyvät ylijänniteluokat, mutta syvenytään tarkemmin ainoastaan jyrkkiin transienttiylijännitteisiin eli salamaniskun aiheuttamiin ylijännitteisiin. Muita ylijännitetyyppejä ei tarkastella tarkemmin, sillä niiden vaikutus 110 kV:n kaasueristeisten kytkinlaitosten sisäisten ylijännitesuojien tarpeeseen tai ylijännitesuojaukseen ylipäätään on paljon vähäisempi.

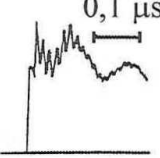
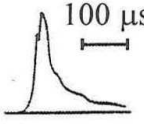
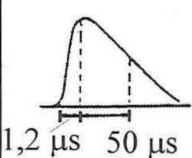
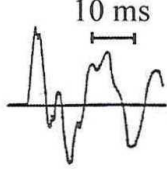
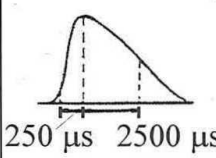
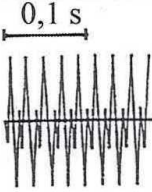
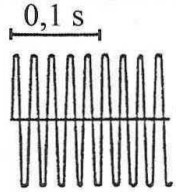
3.1 Ylijännitteiden luokittelu

Sähköverkossa esiintyy erityyppisiä ylijännitteitä, jotka rasittavat verkon osien ja laitteiden eristysrakenteita. Aikaisemmin ylijännitteiden luokittelu perustui ylijännitteiden aiheuttajiin tai ne jaettiin joko sisäisiin tai ulkoisiin ylijännitteisiin. Näistä sisäiset ylijännitteet ovat järjestelmän itsensä kehittämiä, kun taas ulkoiset ylijännitteet syntyvät ulkoisesta syystä, kuten salamaniskusta. Eri ylijännitelajit eroavat toisistaan huippuarvonsa ja ajallisen vaihtelun eli muotonsa perusteella. Ylijännitteiden luokittelu aiheuttajaperusteisesti tai jako ulkoisiin ja sisäisiin ylijännitteisiin ei korreloi ylijännitteen muodon kanssa, joten tällaisista luokitteluista on luovuttu ja siirrytty käyttämään muotoon perustuvaa luokittelua [1, s. 12]. Ylijännitteet luokitellaan nykyisin seuraavasti (suluissa englannin kielinen luokittelu sekä aikaisemmin käytössä ollut luokittelu) [6, s. 253]:

- pientaajuiset ylijännitteet (temporary overvoltages TOV, käyttötaajuiset ylijännitteet),
- loivat transienttiylijännitteet (slow-front overvoltages, kytkentäylijännitteet),
- jyrkät transienttiylijännitteet (fast-front overvoltages, ilmastolliset ylijännitteet) ja
- erittäin jyrkät transienttiylijännitteet (very-fast-front overvoltages VFTO, uusi luokka).

Eristysten jännitelujuutta tarkasteltaessa merkittävimmät tekijät ovat jännitetasituksen kestoaika sekä jännitteen muoto. Pientaajuiset ylijännitteet ovat tyypillisesti pitkäkestoisempia ja jännitemuodoltaan jaksollisia. Transienttimuotoiset ylijännitteet puolestaan vaimenevat nopeasti ja ovat jyrkempiä. Loivat transienttiylijännitteet saavuttavat huippuarvonsa yleensä satojen mikrosekuntien kuluessa ja vaimenevat joidenkin millisekuntien kuluessa. Jyrkät transienttiylijännitteet ovat paljon lyhytkestoisimpia ja saavuttavat huippuarvonsa jo muutamassa mikrosekunnissa sekä vaimenevat joidenkin kymmenien mikrosekuntien aikana. Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet puolestaan nousevat huippuarvoonsa joidenkin nanosekuntien aikana. [1, s. 11–12]

Kuvassa 3 esitellään kullekin ylijänniteluokalle tyypillistä karakteristiikkaa. Kuvaan on lisäksi piirretty IEC 60071 -standardin mukaiset koejännitteet. Koejännitteillä voidaan testata eristysten jännitelujuutta tietyn tyyppistä ylijännitettä vasten. Erittäin jyrkkien transienttiylijännitteiden koejännitteen muodosta ei vallitse yksimielisyyttä vaan siitä sovitaan tapauskohtaisesti [6, s. 253].

Nimi		Ylijännitteen muoto	Koejännitteen muoto
transienttiylijännite	erittäin jyrkkä		sovitaan laitekohtaisesti
	jyrkkä		
	loiva		
pientaajuinen ylijännite			

Kuva 3: Ylijänniteluokat ja koejännitemuodot [6, s. 254].

Seuraavaksi käydään läpi kunkin ylijänniteluokan ominaisuuksia ja aiheuttajia. Tarkemmin syvennytään ainoastaan salaman aiheuttamiin eli jyrkkiin transienttiylijännitteisiin, koska ne ovat merkittävimmät ylijännitesuojaukseen vaikuttavat tekijät 110 kV:n jännitetasolla.

3.2 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttavat useimmiten verkon tilanmuutokset, joita ovat esimerkiksi kytkentäoperaatiot ja vikojen syntymiset. Myös resonanssilla ja

epälineaarilla verkon osilla on vaikutusta pientaajuisten ylijännitteiden suuruuteen ja syntymiseen. Tyypillisimpiä pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttajia ovat [6, s. 255]:

- verkon maasulku,
- kuorman äkillinen irtikytkeminen,
- resonanssit ja ferresonanssit,
- Ferranti-ilmiö eli johdon jännitteen nousu kapasitiivisen virran aiheuttamana,
- vajaanapainen toiminta tai katkos ja
- generaattoreiden itseisherätys.

Pientaajuisten ylijännitteiden rajoittamiseen ei yleensä käytetä ylijännitesuojia, koska suojilta vaadittaisiin erittäin korkeaa energianpurkauskykyä ylijännitteiden pitkän keston vuoksi. Pientaajuisia ylijännitteitä kannattaakin rajoittaa esimerkiksi verkon ja sen käytön suunnittelulla, kuten verkon tehokkaalla maadoituksella. [6, s. 343]

3.3 Loivat transienttiylijännitteet

Loivia transienttiylijännitteitä syntyy pääosin samoista syistä kuin pientaajuisia ylijännitteitä. Syynä ovat siis verkon tilanmuutokset, joita aiheuttavat erilaiset vikatapaukset ja kytkentäoperaatiot. Tällaisia transientteja voi esimerkiksi syntyä, kun kuormaa kytketään verkkoon, suoritetaan jännitteen anto tai jälleenkytkentä johdolle tai katkaistaan kuormavirta. Loivien ylijännitetransienttien muoto ja suuruus riippuvat virran katkaisuun tai kytkentään käytetystä kytkinlaitteesta ja ympäröivästä verkosta. Ylijännitteen amplitudi määräytyy jännitteen ja virran hetkellisarvosta kytkentähetkellä ja verkon vaimennusominaisuuksista sekä itse kytkinlaitteen ominaisuuksista. Ylijännitteen värähtelytaajuuden puolestaan määrää kytkinlaitteen kummallakin puolella olevien verkkojen induktanssit ja kapasitanssit. [6, s. 274–286]

110 kV:n jännitetasolla loivat transienttiylijännitteet eivät yleensä vaikuta eristysmitoitukseen, koska mitoitus perustuu salamasyöksyjännitteen kestotasoon, mikä takaa eristysrakenteelle riittävän lujuuden myös loivia transienttiylijännitteitä vastaan. Vasta käyttöjännitteillä $U_m \geq 300$ kV loivat transienttiylijännitteet vaikuttavat merkittävästi eristysmitoitukseen. [1, s. 27–28]

3.4 Jyrkät transienttiylijännitteet

Jyrkät transienttiylijännitteet, joita aikaisemmin kutsuttiin ilmastollisiksi ylijännitteiksi, syntyvät alkuperäisen nimityksenä mukaisesti pääosin salamaniskujen seurauksena. Salamanisku voi aiheuttaa ylijännitetransientin iskemällä joko suoraan voimajohdon vaihejohtimiin, takaiskuna salaman osuessa johdon maadoitettuun

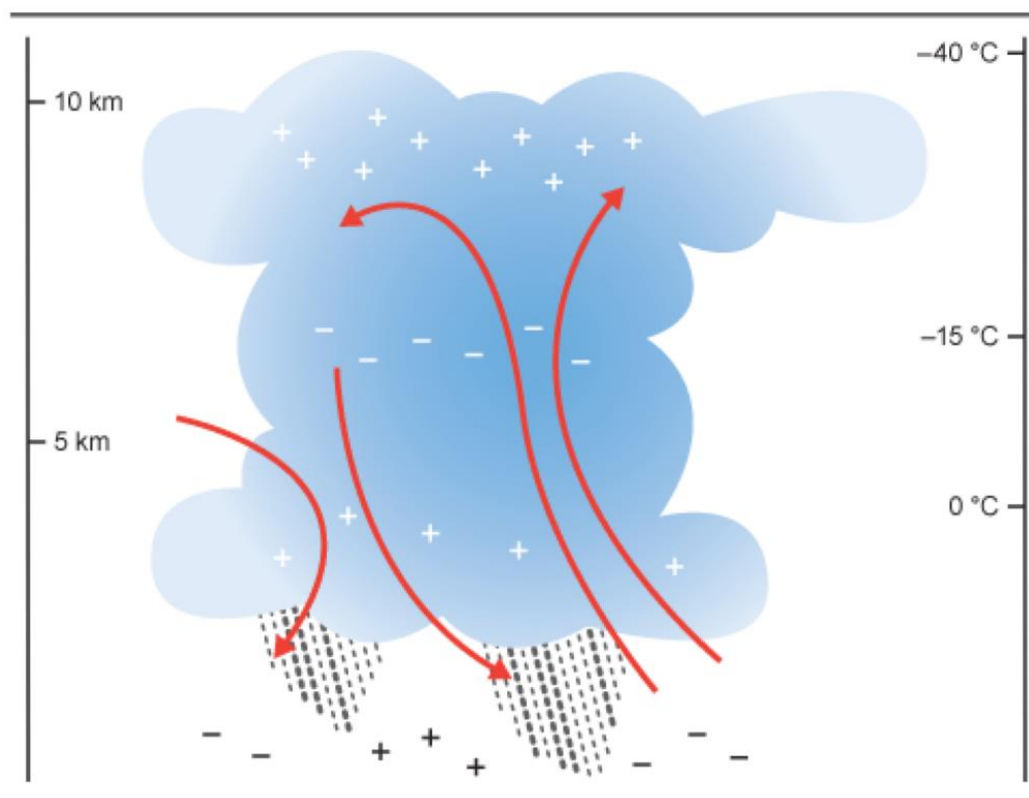
osaan tai induktion kautta salaman osuessa voimajohdon välittömään läheisyyteen [6, s. 287]. Näistä vain suorat salamaniskut ja takaiskut ovat merkityksellisiä siirtoverkon jännitetasoilla [6, s. 303].

Jyrkillä transienttilyijännitteillä on olennainen vaikutus eristysmitoituksiin kaikilla käyttöjännitteillä, koska ylijännitteiden muoto ja suuruus riippuvat lähinnä salamavirrasta, johon ei voida juurikaan vaikuttaa verkon mitoituksella ja suunnittelulla. Alle 300 kV:n käyttöjännitteillä salamasyökyjännitteelle mitoitettut eristykset käytännössä takaavat eristyslujuuden myös muita ylijännitteitä vastaan. [1, s. 27]

Seuraavassa käydään läpi ukkosten ja salamoiden syntymekanismit, ukkostilastot Suomessa sekä käsitellään suoraan salamaniskuun ja takaiskuun liittyviä ominaisuuksia.

3.4.1 Ukkosen syntymekanismi ja salamalajit

Kuuropilven kehittyneempää muotoa kutsutaan ukkospilveksi, jossa sähköistyminen purkautuu lopulta salamoina. Sähköistyminen on tapahtuma, jossa ilmassa olevat hiukkaset varautuvat erimerkkisillä vaurauksilla ja kertyvät eri kohtiin pilveä. [7]

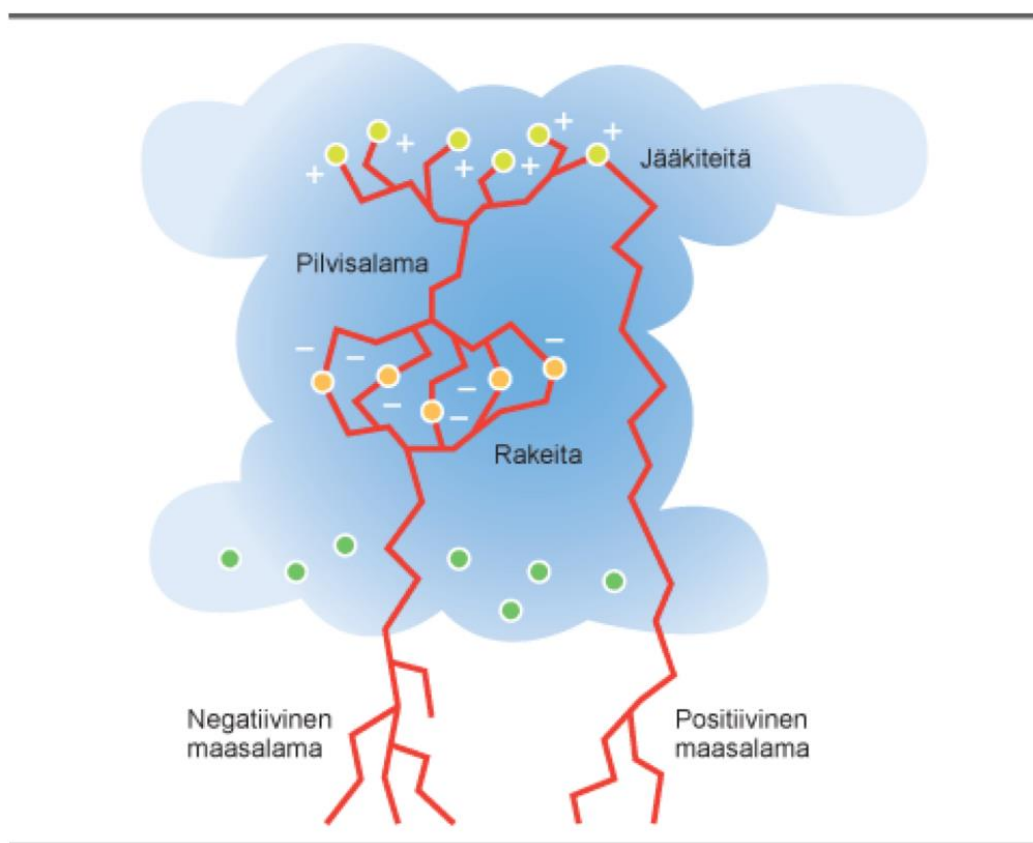


Kuva 4: Ukkospilven rakenne. Nuolet kuvaavat nousu- ja laskuvirtauksia. Positiiviset varauskeskukset sijaitsevat pilven ylä- ja alaosissa ja negatiivinen varauskeskus pilven keskiosassa. [7]

Ukkospilvi syntyy, kun ilmassa vallitsee voimakkaita pystyvirtauksia, jotka

kuljettavat kosteutta ylöspäin. Edellytykset kostealle ilmalle ja voimakkaille pysyvirtauksille syntyvät joko lämpimän ja kylmän ilmassan kohdatessa säärintamissa tai auringon lämmittämän ilman kohotessa ylöspäin. Pilven yläosiin syntyy lumirakeita, joita nousuvirtaus kannattelee. Lisäksi nousuvirtaus kuljettaa ylöspäin pieniä jääkiteitä, jotka törmäilevät lumirakeisiin. Törmäysten seurauksena lumirakeet varautuvat negatiivisilla ja jääkiteet positiivisilla varauksilla. Koska jääkiteet ovat kevyempiä kuin lumirakeet, ne kulkeutuvat pilven yläosiin muodostaen positiivisen varausalueen. Vastaavasti raskaammat lumirakeet jäävät pilven keskiosiin muodostaen negatiivisen varausalueen. Näiden lisäksi pilven alaosaan syntyy usein toinen positiivinen varausalue. [7] Ukkospilven tyypillinen rakenne on esitetty kuvassa 4.

Ukkospilvessä syntyneiden varausalueiden välillä sekä niiden ja maan välillä vallitsee potentiaaliero, joka voi olla jopa gigavoltin suuruusluokkaa. Kohdassa, jossa varausalueiden aiheuttama kentänvoimakkuus ylittää ilman läpilyöntilujuuden, syntyy salamapurkaus. [6, s. 287] Salamapurkauksen etenemistapa ja rakenne riippuu siitä, minkä lajin salama on kyseessä. Kuva 5 havainnollistaa eri salamalajeja, joita ovat pilvisalamat ja negatiiviset sekä positiiviset maasalamat.



Kuva 5: Salamoiden lajit: Pilvisalamat ja positiiviiset sekä negatiiviset maasalamat. [7]

Pilvisalamat alkavat ukkospilven varausalueiden välisestä alueesta niin sanottuna streamer-purkauksena kasvaen alaspäin positiivisena ja ylöspäin negatiivisena.

Alemman pään löydettyä tarpeeksi negatiivista varausta, varausta syöksyy purkauskanaavaan ja edelleen sen yläpäähän neutraloimaan positiivista varausaluetta. Tällaisia nopeita purkauksia esiintyy peräkkäin noin kymmenen kappaletta, jolloin pilvisalaman kesto on noin puoli sekuntia. Pilvisalamat voivat tapahtua myös eri pilvien välillä. Ne ovat yleisin salamatyyppeä $2/3$ osuudella kaikista salamoista. [7]

Negatiiviset maasalamat alkavat purkauksen syttymisellä ukkospilven negatiivisen varausalueen reunalta. Aluksi pilvestä etenee maata kohti jaksoittain etenevä leader-purkaus, jota kutsutaan esipurkaukseksi tai -salamaksi. Salaman lopullinen iskukohta määräytyy vasta noin 100–150 m etäisyydellä maasta, mikä on erityisen tärkeä ominaisuus johtojen ukkossuojauksen kannalta. [6, s. 287–290], [7]

Salaman lähestyessä maata maan kentänvoimakkuus kasvaa. Tämän seurauksena maasta voi nousta vastakkaismerkinen leader-kanava kohti negatiivista esisalamaa. Jos nämä erimerkkiset purkauskanavat kohtaavat, muodostuu niin sanottu salamakanava pilven ja maan välille. Tätä kanavaa pitkin lähtee etenemään pääpurkaus maasta pilveen. Pääpurkauksen virta vaihtelee noin kiloampeerista satoihin kiloampeereihin. Tämä aiheuttaa purkauskanavan ilman räjähdysmäisen kuumenemisen jopa 20 000 °C:een, mikä kuullaan ukkosen jyrähdyksenä ja nähdään valoilmiona eli salamana. Kun koko negatiivinen varausalue on tyhjentynyt, sen tilalle syntyy positiivinen varausalue. Pilven muiden negatiivisten varausalueiden ja syntyneen positiivisen varausalueen välille voi syntyä uusia purkauksia, jotka johtavat uuteen negatiiviseen purkaukseen vanhaa salamakanavaa pitkin. Tällaisia purkauksia kutsutaan jälkipurkauksiksi ja niitä tapahtuu 10–100 ms väliajoin. [6, s. 287–290], [7]

Positiivinen maasalama puolestaan saa alkunsa pilven positiivisesta varausalueesta. Se ei haaroitu eikä ole askelmainen, minkä vuoksi se etenee negatiivista maasalamaan nopeammin. Lisäksi suurin osa positiivisista maasalamoista on yksi-iskuisia eli niihin ei sisälly jälkipurkauksia. Ne ovat kuitenkin huomattavasti harvinaisempia kuin negatiiviset maasalamat, joiden osuus on noin 85–90 % kaikista maasalamoista. [6, s. 287–290], [7]

Negatiivisista maasalamoista vain noin puolet ovat yksi-iskuisia, mutta lopuissa jälkipurkausten määrä vaihtelee suuresti siten, että jälkipurkauksia esiintyy keskimäärin 2–3 kappaletta. Salamoiden iskujen lukumäärää kutsutaan kerrannaisuudeksi. [6, s. 287–290], [7]

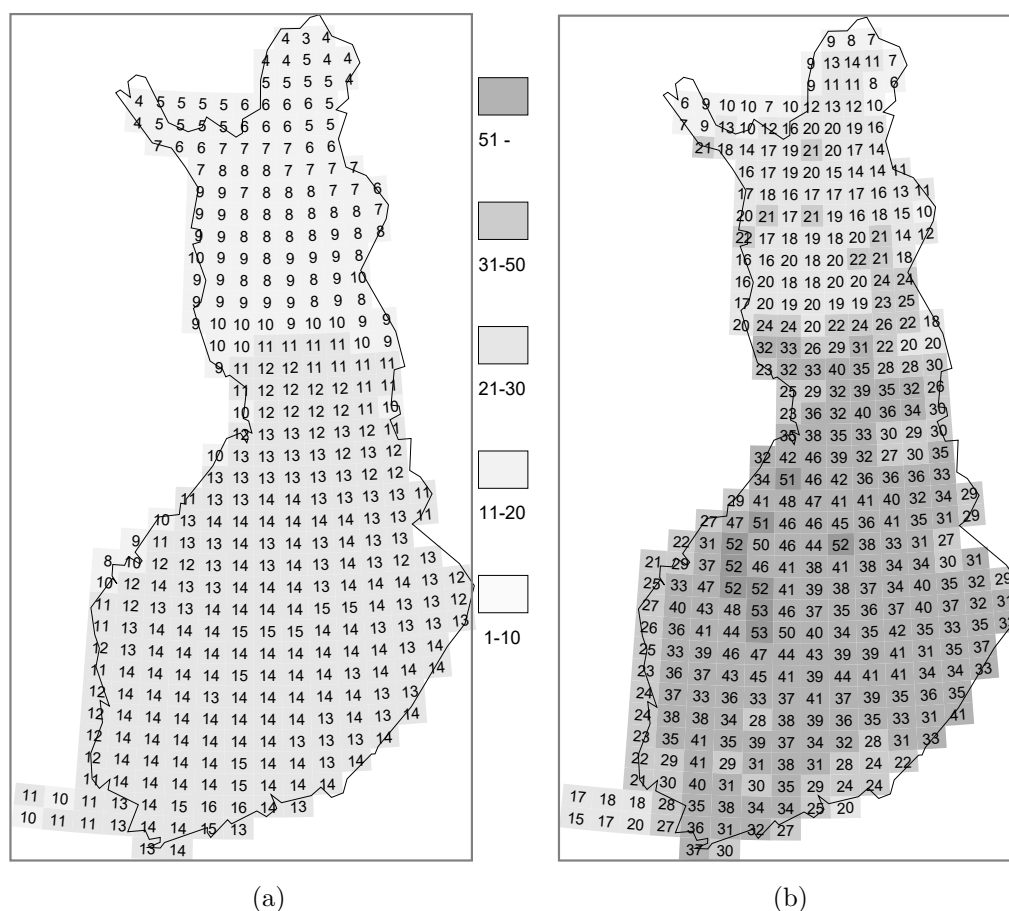
Edellä kuvatun lisäksi salamapurkaukset voivat suuntautua ylöspäin maasta. Tällaiset purkaukset ovat tyypillisiä korkeille rakenteille, kuten TV-torneille. Suomessa ei kuitenkaan sijaitse sähkölinjoja korkeissa paikoissa, joten ylöspäin suuntautuvia salamoita ei yleensä tarvitse ottaa ukkossuojauksessa huomioon [6, s. 290].

3.4.2 Ukkos- ja salamatilastot Suomessa

Suomessa ukkos- ja salamahavaintoja tilastoi Ilmatieteenlaitos. Havaintoja on kerätty aina vuodesta 1887 lähtien. Aluksi tiedot perustuivat ihmisten tekemiin havaintoihin ja vuonna 1960 näiden rinnalle tulivat automaattiset salamanlaskijat. Nykyinen salamapaikannusjärjestelmä hankittiin vuonna 1997. [8] Nykyisin Suomen paikantimet ja järjestelmä ovat osa pohjoismaista NORDLIS-järjestelmää (Nordic Lightning Information System), mikä koostuu eri maissa olevista salamapaikannusantureista.

Paikannusjärjestelmä havaitsee elektromagneettisen säteilyn, jonka salama synnyttää. Tämän perusteella järjestelmä pystyy erottelemaan toisistaan maasalamat ja pilvisalamat. Lisäksi se kertoo minne salama iski, millä hetkellä isku tapahtui, oliko salama positiivinen vai negatiivinen ja mikä sen huippuvirta oli. [9]

Kaksi yleistä käytössä olevaa ukkossuuretta ovat ukkospäiväluku ja salamaniskutiheys. Ukkospäivälukua merkitään yleensä symbolilla T_D (Thunderstorm day), ja sillä tarkoitetaan sellaisten vuotuisten vuorokausien lukumäärää, jolloin ukkosia on esiintynyt. Salamaniskutiheys puolestaan määritellään vuotuiseksi maasalamoitten iskumääräksi tietylle pinta-alalle seurantajakson aikana. Yleensä yksikkönä käytetään vuotuista iskumäärää 100 neliökilometriä kohden ($1/100 \text{ km}^2$, a). Kuvasa 6 on esitetty kummankin ukkossuureen vuosikeskiarvoja eri sijainneissa vuosilta 1998–2015. [8, 9]

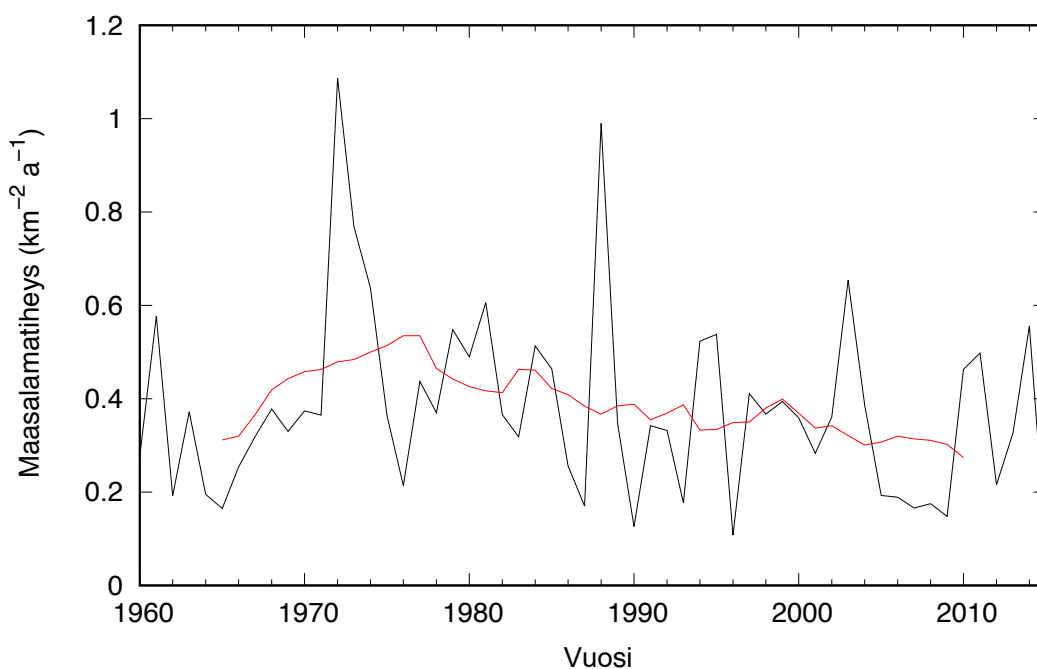


Kuva 6: Salamoiden ja ukkosten vuosikeskiarvoja jaksolta 1998–2015: a) Ukkospäivien lukumäärä vuodessa. b) Salamatiheys ($1/100 \text{ km}^2$, a). [10]

Kuvasta 6 havaitaan, että sekä ukkospäiväluku että salamaniskutiheys vaihtelevat maantieteellisesti paikoin paljonkin; Pohjois-Suomessa esiintyy paljon vähemmän ukkosia ja salamaniskuja kuin esimerkiksi Pohjanmaan alueella. Toisaalta maailmanlaajuisesti ukkospäivien lukumäärä ja vastaavasti salamatiheyksien suuruudet vaihe-

televat vielä enemmän; Suomessa ukkospäivien keskimääräinen lukumäärä liikkuu välillä 5–10, kun taas tropiikissa lukumäärä on noin 80 eli lähes kymmenkertainen [9]. Kummankin ukkossuureen vuosikeskiarvot vaihtelevat myös suuresti. Salamaniskutiheyden osalta kuva 7 havainnollistaa tätä vuosittaista vaihtelua. Koko Suomen osalta pitkän aikavälin keskiarvo salamaniskutiheydelle on noin $38/100\text{km}^2$, a [8].

Ukkospäiväluku on siinä mielessä huono suure, että sen perusteella ei voi kovin luotettavasti päätellä esimerkiksi salamaniskutiheyttä yleisesti, koska yksittäisen ukkospäivän aikana salamoiden määrä voi vaihdella välillä 1–1000 [9]. Kuvasta 6 on kuitenkin havaittavissa silmämääräisesti jonkinlainen korrelaatio ukkospäiväluvun ja salamatiheyden välillä. Tietyillä alueilla ukkospäiväluvun ja salamatiheyden välillä vallitseekin lineaarinen riippuvuus [9].

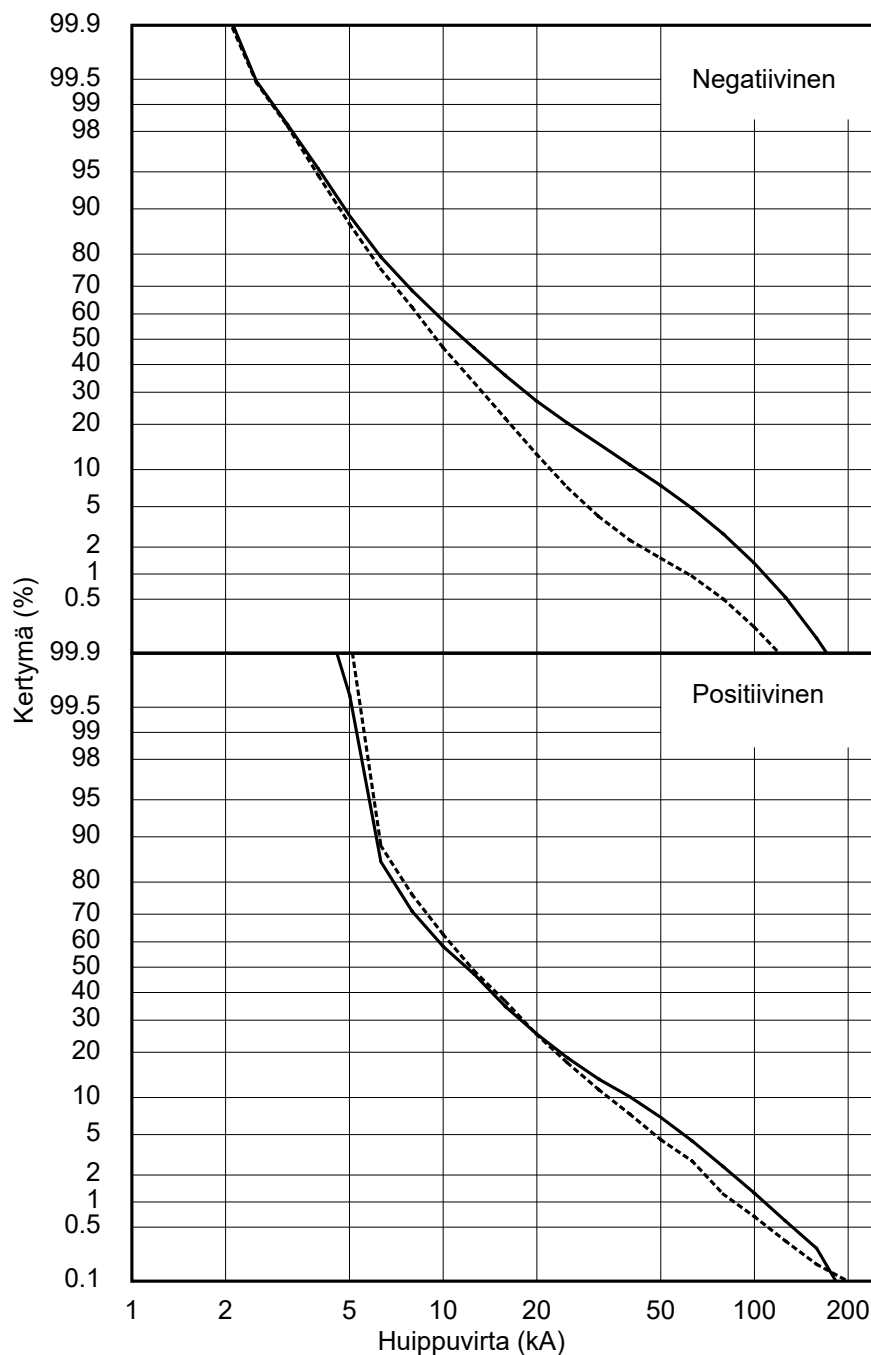


Kuva 7: Keskimääräinen salamaniskutiheys Suomessa vuosina 1960-2015. Punainen viiva kuvaa 10-vuoden liukuvaa keskiarvoa. [10]

Edellä kuvattujen ukkospäiväluvun ja salamaniskutiheyden lisäksi eräät keskeisesti salamoihin liittyvät suureet ovat salaman huippuvirta sekä syöksyvirtapulssin muoto. Huippuvirta kuvaa salaman voimakkuutta ja se vaihtelee välillä 1–200 kA [7]. Erittäin suurivirtaiset salamoiden ensimmäiset osaiskuista ylitti 100 kA:n huippuvirran [10]. Jälkipurkauksien huippuarvot taas jäivät vain noin 0,7-kertaisiksi verrattuna ensimmäisiin osaiskuihin [10].

Kuva 8 esittää positiivisten ja negatiivisten maasalamoiden virtojen huippuarvojen kertymäjakauman. Jakaumaa voidaan tulkita siten, että pystyakseli kuvaa todennäköisyyttä ylittää vaakarivillä oleva virran huippuarvo. Kuvaan on merkitty ehyellä viivalla ensimmäisten osaiskujen jakauma ja katkoviivalla seuraavien osaiskujen jakauma. Jakaumat perustuvat vuoden 2015 tietoihin, mutta itse asiassa

vuosittaiset huippuvirran jakaumat eivät merkittävästi eroa toisistaan, minkä voi todeta vertailemalla Ilmatieteenlaitoksen Salamahavainnot XXXX -raporttisarjan (XXXX tarkoittaa vuosilukua) vuosittaisia raportteja. Tämän vuoksi tässä työssä käsitellään ainoastaan vuoden 2015 jakaumia.



Kuva 8: Negatiivisten ja positiivisten salamoiden huippuvirtojen kertymäjakaumat vuoden 2015 salamapaikannusten perusteella. Ehyt viiva kuvaa ensimmäistä osaiskua ja katkoviiva jälkipurkauksia eli myöhempiä osaiskuja. [10]

Eri salamoiden virtapulssien muodot poikkeavat toisistaan, mutta yleisesti voidaan sanoa, että salamavirran alkuosa on muodoltaan sellainen, että suurin jyrkkyys saavutetaan yleensä virran huippuarvon tienoilla. Tavallisesti pulssin rinnan kestoaika on luokkaa 2,5 μs ja se koostuu jyrkästi nousevasta suurivirtaisemmasta osasta sekä tätä seuraavasta pidemmän ajan pienivirtaisesta osasta. Negatiivisten maasalamoiden ensimmäisten osaiskujen maksimijyrkkyuden mediaaniarvo on 24,3 kA/ μs , mutta keskimääräisen jyrkkyuden mediaaniarvo on vain 7,2 kA/ μs . [1, s. 24]

Hyvin usein ilmastollisiin ylijännitteisiin liittyvissä ylijännitesuojaustutkimuksissa käytetään tutkimusjärjestö CIGREn (Conseil International des Grands Réseaux Électriques) keräämiä salamajakaumia [11]. Ne perustuvat muun muassa korkeista mastoista mitattuihin aineistoihin. [6, s. 291] Koska mittaukset perustuvat korkeisiin kohteisiin, jollaisia Suomen sähköverkossa ei juurikaan esiinny, CIGREn jakaumat eivät välttämättä edusta Suomen olosuhteissa esiintyviä salamoita. Lisäksi, kun saatavilla on Ilmatieteenlaitoksen tuoreempia tilastoja, jotka ovat kohtuullisen tarkkoja, on järkevää käyttää niitä CIGREn epävarmemman jakauman sijaan.

3.4.3 Suora salamanisku vaihejohtimeen

Salaman iskiessä suoraan vaihejohtimeen salamavirta jakautuu kahteen yhtä suureen kulkuaaltoon, jotka etenevät kumpaankin suuntaan johtimessa. Syntyvän ylijänniteaallon suuruus on

$$u_s = \frac{1}{2} Z_w i_s, \quad (1)$$

missä i_s on salamavirta ja Z_w on johdon aaltoimpedanssi. [6, s. 295]

Avojohtojen aaltoimpedanssit vaihtelevat välillä 250–500 Ω , mikä johtaa suoran salamaniskun tapauksessa useiden megavolttien suuruisiin ylijännitteisiin. Ylijännitteitä kuitenkin rajoittaa merkittävästi johtojen jännitelujuus. Sen ylittyessä tapahtuu ylilyönti johtimesta avojohdon maadoitettuun osaan. Lisäksi ylijänniteaaltoa vaimentavat ja loiventavat korona avojohdolla sekä häviöt johtimessa ja maapiirissä. [6, s. 295] Toisaalta ukkosjohtimet estävät sellaiset suorat salamaniskut, joiden virran huippuarvo ylittää tietyn, avojohdon geometrian määräämän arvon. Tätä ukkosjohtimien suojausvaikutusta käsitellään luvussa 4.

3.4.4 Takaisku

Takaiskuksi kutsutaan tilannetta, jossa avojohdon maadoitettuun osaan eli pylvääseen tai ukkosjohtimeen osuva salamanisku saa aikaan ylilyönnin johdon jännitteiseen osaan. Takaisku voi tapahtua joko pylvään kohdalla vaihejohtimen eristinketjun yli tai jänteellä ukkosjohtimesta vaihejohtimeen. [6, s. 295], [11] Näistä kuitenkin jänteellä tapahtuvat takaiskut ovat huomattavasti harvinaisempia kuin pylväällä tapahtuvat [11], joten jatkossa oletetaan takaiskun tapahtuvan aina pylväällä.

Kun salama iskee pylvääseen tai ukkosjohtimiin, pylvään läpi kulkeva salamavirta aiheuttaa pylvään ja maadoitusten impedansseissa jännitehäviön, joka ilmenee pylvään potentiaalin nousuna. Kun tämä nousut potentiaali ylittää pylvään ja vaihejohtimen välisen jännitelujuuden, tapahtuu takaisku. Takaiskun vaihejohtimeen

synnyttämä jännitepulssi on usein varsin jyrkkä. Sen vuoksi takaisku on erityisen vaarallinen käämityksiä sisältäville laitteille. [1, s. 26], [6, s. 297]

Takaiskun tapahtumistodennäköisyyttä kasvattavat suuri salamavirta sekä huonot maadoitusolosuhteet eli suuri maadoitusvastus. Takaisku kohdistuu todennäköisemmin siihen vaihejohtimeen, jonka vaihejännite on suurin ja vastakkaismerkkinen salamavirran aikaansaaman jännitteeseen verrattuna. Takaisku tapahtuu siis todennäköisemmin lähellä vaihejännitteen huippuarvoa. Toisaalta takaiskun todennäköisyyteen vaikuttaa myös salamavirran jyrkkyys; mitä jyrkempi salamavirta on, sitä pienemällä pylvään maadoitusresistanssin arvolla takaisku voi tapahtua. Tämä johtuu pylvään induktanssista, ja koska pylvään induktanssi kasvaa pylväskorkeuden kasvaessa, takaisku tapahtuu todennäköisemmin korkeammilla pylväillä. [1, s. 26], [6, s. 295–297]

Salamaniskun synnyttämän ylijänniteaallon muotoon ja suuruuteen vaikuttavat merkittävästi aallon heijastumiset ja taittumiset verkon epäjatkuvuuskohdissa. Pylvääseen iskevä salamavirtapulssi jakautuu haaroituskohdissa pylväsalkoihin, ukkosjohtimiin ja haruksiin kääntäen verrannollisena aaltoimpedanssin suuruuteen. Komponentin edestakaisen kulkuajan kuluttua epäjatkuvuuskohdasta saapuu takaisin heijastunut aalto. Heijastuneen aallon suuruus riippuu epäjatkuvuuskohdan eri puolilla olevien impedanssien suuruksien suhteesta. Ensimmäinen heijastuminen tapahtuu pylvään tyvestä ja vasta tämän jälkeen viereisistä pylväistä. Suurin vaikutus on salamaniskun kohteena olevan pylvään maadoitusvastuksella. Viereiset pylväät vaikuttavat lähinnä ylijänniteaallon selkäosaan. [6, s. 295–296]

Sähköasemilla esiintyvät salaman aiheuttamat ylijännitteet syntyvät joko suorista salamaniskuista sähköaseman osiin tai kulkeutuvat sinne avojohdoja pitkin. Suorat salamaniskut asemarakenteisiin ovat kuitenkin harvinaisia, sillä sähköasemat suojataan tyypillisesti mastoilla ja ukkosköysillä. Asemalle saapuvat ylijänniteaallot poikkeavat usein muodoltaan ja huippuarvoltaan avojohdolla esiintyvistä ylijänniteaalloista. Ylilyönnit, korona ja tehohäviöt virtajohtimissa ja maapiirissä sekä loiventavat että vaimentavat ylijänniteaaltoja. Merkittävimmät tällaiset avojohdolta peräisin olevat ylijänniteaallot syntyvät yleensä takaiskun seurauksena, sillä suorien salamaniskujen aiheuttamat ylijännitteet rajoittuvat suurimmillaan johdon jännitelujuuden mukaiseen arvoon. Takaiskun aiheuttamat ylijänniteaallot tosin vaimenevat melko nopeasti, joten yleensä riittää, kun tarkastellaan vain lähellä asemaa tapahtuvia takaiskuja. [6, s. 304]

3.5 Erittäin jyrkät transienttilylijännitteet

Erittäin jyrkkiä transienttilylijännitteitä synnyttävät pääasiassa erotointoiminnot. Ylijännitteet syntyvät erotinta avattaessa syntyvän valokaaren katkeamisesta ja jälleensyttymisestä. Tällaisia jälleensyttymisiä tapahtuu kymmeniä kertoja erottimen avausvälissä. Jokaisesta jälleensyttymisestä seuraa 100 kHz - 10 MHz:n taajuuksista värähtelyä verkkoon, johon erotin liittyy. Ilmaeristeisissä kytkinlaitoksissa erittäin jyrkät transientit eivät ole erityisen vaarallisia, sillä ne vaimenevat nopeasti. Toisaalta erottimien välittömässä läheisyydessä oleviin laitteisiin, kuten virtamuuntajiin, voi syntyä sisäisiä resonansseja tai laitteiden sisäisissä eristyksissä voi tapahtua purkauksia. Erotointoiminnot GIS-laitoksessa puolestaan ovat yleensä haitallisempia,

sillä GIS-putken ulkokuori toimii MHz-alueella kuin aaltoputki, joka kykenee siirtämään syntyneet transientit pitkälle syntypaikasta niitä vaimentamatta. Lisäksi GIS-laitoksen erotintoiminnot synnyttävät tyypillisesti taajuudeltaan suurempia transientteja kuin avokytkinlaitoksen erottimet. [6, s. 311–312]. Näiden syiden vuoksi erittäin jyrkistä transienttiylijännitteistä puhutaan usein vain GIS-laitosten yhteydessä.

GIS-laitoksien erotintoiminnoista syntyvien transienttijännitteiden amplitudia nostaa verkon tai GIS-kojeiston erotettuihin osiin mahdollisesti jäänyt jäännösvaraus [12]. GIS-kojeiston jännitelujuus saattaa myös heikentyä, jos kojeiston sisälle on jäänyt liikkuvia metallihiukkasia, mikä johtaa läpilyönteihin normaalia pienemmillä yli-jännitteillä [13].

GIS-laitoksessa syntyneet yli-jännitetransientit voivat siirtyä taittumalla tietyissä laitoksen epäjatkuvuuskohdissa, kuten SF₆/ilma-rajapinnassa, GIS-kojeiston koteloointiin. Tällöin puhutaan niin sanotusta koteloinnin yli-jännitetransientista (TEV, transient enclosure voltage). Tällöin GIS-kojeiston koteloinnin ja maan välille syntyy hetkellisesti jännite. Jännitteen nousu johtuu siitä, että koteloa maadoitukset, jotka on yleensä suunniteltu normaaleille käyttöjännitteille, näkyvät erittäin jyrkkäreunaiselle transientille suurempina suuren induktanssin vuoksi. TEV-ylijännitteistä ei ole kuitenkaan osoitettu olevan suoraa varaa ihmisille, mutta ne voivat aiheuttaa häiriöitä sähköaseman toisiojärjestelmiin tai jopa rikkoa niitä. [14] Ongelmien korjaamiseksi on ehdotettu toimenpiteitä, joilla voidaan parantaa GIS-kojeiston maadoituksia ja pienentää TEV-ylijännitteitä [15].

Kaasueroiteisessa kytkinlaitoksessa syntyvien erittäin jyrkkien transienttiyli-jännitteiden on kokeellisesti todettu jäävän usein niin alhaiselle tasolle, että yli-jännitesuojat eivät siirry johtavaan tilaan [16, s. 181]. Tämän vuoksi myöskään erittäin jyrkillä transienttiyli-jännitteillä ei ole merkittävää vaikutusta GIS-laitoksen sisäisten yli-jännitesuojien tarpeen arviointiin.

3.6 Kulkuaaltojen ominaisuudet

Verkossa esiintyvien nopeasti kasvavien yli-jännitteiden eli transienttien tarkastelussa verkkoa ei voida kuvata keskitetyillä verkkokomponenteilla, vaan on otettava käyttöön kulkuaaltoilmiöiden tarkasteluun soveltuva tekniikka. Kulkuaaltojen laskennassa johdon resistanssit, induktanssit, kapasitanssit ja konduktanssit ajatellaan jakautuneiksi pitkin johtoa. Tämä johtaa yhtälöihin, joista voidaan ratkaista eri suuntiin etenevien virta- tai jänniteaaltokomponenttien superpositio ajan ja paikan funktiona. [6, s. 215–217]

Vääristymättömällä johdolla jännite- ja virta-aallot ovat samanmuotoisia ja niiden keskinäisen suhteen määrää aaltoimpedanssi. Aaltoimpedanssi Z_w riippuu vain johdon rakenteesta, mutta ei sen pituudesta. Se ja aallon etenemisnopeus riippuvat lisäksi johdon eristeenä olevan väliaineen permeabiliteetista μ ja permittiivisyydestä ε . Häviöttömän ja vääristymättömän johdon aaltoimpedanssi määritellään yhtälöllä

$$Z_w = \sqrt{\frac{x_c}{b_c}} = \sqrt{\frac{l_c}{c_c}}, \quad (2)$$

jossa x_c on reaktanssi, b_c on susceptanssi, l_c on induktanssi ja c_c on kapasitanssi johdon pituutta kohti. Aallon etenemisnopeus puolestaan määritellään yhtälöllä

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}, \quad (3)$$

missä c on valonnopeus tyhjiössä. [6, s. 216–220]

Todellisuudessa johdolla etenevät kulkuaallot vääristyvät ja vaimenevat erilaisten häviöiden seurauksena. Kulkuaallon amplitudi pienenee ja rinta loivenee. Avoijohdolla etenevää aaltoa vääristävät häviöiden ja koronan lisäksi virranahto johtimessa ja maapiirissä. Kaapeleissa kulkuaaltoja vääristävät lisäksi häviöt eristemateriaalissa. [6, s. 224–225]

Kulkuaaltojen eräs tärkeä ominaisuus on aaltojen heijastuminen verkon epäjatkuvuuskohdissa. Kulkuaallon saapuesssa johdon epäjatkuvuuskohtaan osa aallosta heijastuu takaisin ja osa jatkaa etenemistään johdolla. Heijastumiskohdassa sekä virta- ja jänniteaaltojen jatkavat osat ovat yhtä suuret kuin tulevien ja heijastuvien aattojen summat. Tätä tasapainoa kuvaavat yhtälöt

$$u_1 + u_{1r} = u_2 \quad (4)$$

$$i_1 + i_{1r} = i_2, \quad (5)$$

missä alaindeksillä 1 ja 2 viitataan alkuperäiseen ja jatkavaan aaltoon ja alaindeksi 1r tarkoittaa takaisin tulosuuntaan heijastunutta aaltoa. Edellisten yhtälöiden virtojen ja jännitteiden suhteet määrää kyseisessä kohdassa vaikuttava aaltoimpedanssi. [6, s. 225]

Aaltoimpedanssin muutoskohdasta heijastuva aalto on merkittävästi negatiivinen, mikäli aaltoimpedanssi pienenee ja positiivinen, jos aaltoimpedanssi kasvaa. Mikäli kulkuaalto saapuu avoimen johdon päähän, se heijastuu täysimääräisesti takaisin, jolloin resultoiva jännite on heijastumiskohdassa kaksinkertainen alkuperäiseen verrattuna. Mikäli johto on puolestaan oikosuljettu maahan, heijastuva aalto on alkuperäisen suuruinen, mutta negatiivinen. [6, s. 228]

Kulkuaaltojen heijastumiset kaikissa niiden tielle osuvissa epäjatkuvuuskohdissa tekevät syntyvien aaltomuotojen ja eri kohdissa vaikuttavien ylijännitteiden arvioimisesta vaikeaa. Oman haasteellisuutensa tuo kolmivaihejärjestelmässä eri vaiheiden ja maapiirin kytkeytyminen toisiinsa. Lisäksi kulkuaaltojen vääristymiset, verkon komponenttikuvausten riippuvuus taajuudesta ja verkon epälineaariset komponentit, kuten ylijännitesuojat monimutkaistavat laskentaa edelleen. Tämän vuoksi ylijännitetarkasteluissa käytetään apuna simulointiohjelmia, jotka pystyvät ottamaan edellä kuvatut ominaisuudet huomioon laskennassaan.

4 Ylijännitteiden rajoittaminen

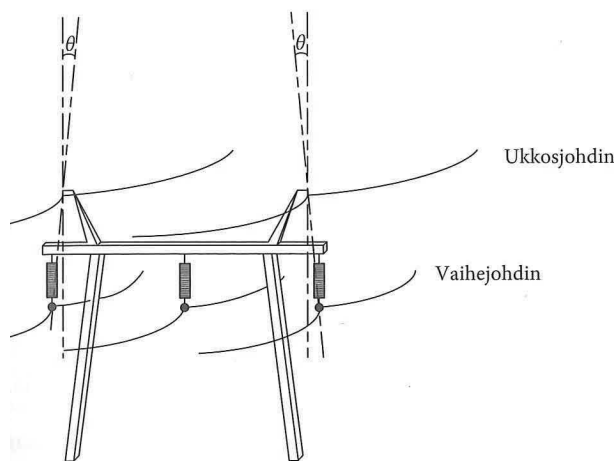
Ylijännitesuojauksen tehtävänä on rajoittaa verkossa esiintyvät ylijännitteet sellaiselle tasolle, ettei niistä aiheudu häiriötä verkon käytölle eikä vahinkoa sähköasemilla sijaitseville laitteille tai verkon eristysrakenteille. Suurin ylijännitesuojauksen tarve liittyy yleensä erittäin kalliisiin tai pitkän korjausajan omaaviin laitteisiin, kuten tehomuuntajiin, GIS-laitoksiin tai kaapeleihin päätteineen. Ylijännitteiden rajoittamiseen soveltuvat keinot riippuvat tarkasteltavasta ylijännitelajista.

[1, s. 29–31], [6, s. 333] Tässä luvussa keskitytään kuitenkin käsittelemään ylijännitesuojausta siirtoverkkotasolla vain jyrkkien eli ilmastollisten ylijännitteiden näkökulmasta.

4.1 Ukkosjohtimet

Ukkosjohtimien päätehtävänä on suojata avojohdon vaihejohtimia suorilta salamaiskuilta. Ne myös kytkevät pylväiden maadoitukset rinnakkain, jolloin rezultoiva maadoitusvastus pienenee erityisesti huonoissa maadoitusolosuhteissa, mikä puolestaan pienentää takaiskujen riskiä. Ukkosjohtimilla saavutettava suojausvaikutus riippuu niiden lukumäärästä ja sijoituksesta, mutta myös pylväismaadoitusten maadoitusresistanssiarvoista. [1, s. 32–34], [6, s. 304–305]

Suomen siirtoverkossa kaikki 400 ja 220 ja suurin osa 110 kV:n avojohdoista on varustettu kahdella ukkosjohtimella. Imatran Voima Oy:n tekemän tutkimuksen mukaan ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon ukkoshäiriöiden määrä on 7-kertainen verrattuna ukkosköysillä ja pylväismaadoituksilla varustetun avojohdon häiriömääriin. [1, s. 32]



Kuva 9: Suojauskulman θ määritelmä [1, s. 33].

Ukkosjohtimet pyritään sijoittamaan niin, että tiettyä arvoa suurempivirtaiset salamat eivät pääse osumaan vaihejohtimiin. Keskeinen parametri sijoituksessa on niin kutsuttu suojauskulma θ , jonka määritelmä on esitetty kuvassa 9. Suomessa käytetään tavallisesti 15° – 25° suojauskulmia, mutta erityisesti vanhemmilla voimajohdoilla

esiintyy suurempiakin kulma-arvoja. Suojauskulman eräs ominaisuus on sen pieneneminen pylväskorkeuden kasvaessa. Tämän vuoksi myös negatiiviset kulma-arvot ovat mahdollisia pylväskorkeuden kasvaessa riittävästi. [1, s. 34], [6, s. 306–307]

Luvussa 3.4.1 todettiin negatiivisten salamoiden lopullisen iskukohdan määräytyvän vasta noin 100–150 metrin etäisyydellä maasta. Tätä etäisyyttä kutsutaan iskupituudeksi tai -etäisyydeksi r_j ja sen on todettu riippuvan salamapurkausvirran huippuarvosta yhtälön (6) mukaisesti [11]. Tämän yhtälön mukaan iskuetäisyys kasvaa salamavirran kasvaessa eli mitä suurempi salaman huippuvirta on, sitä kauempana salaman iskukohta määräytyy.

$$r_j = A i_s^b, \text{ missä } j = c, g. \quad (6)$$

Yhtälössä (6) virta i_s annetaan kiloampeereina, jolloin iskuetäisyys saadaan metreinä. Iskuetäisyyden alaindeksi c viittaa ukkos- ja vaihejohtimiin ja g puolestaan maahan. Vakioille A ja b on esitetty erilaisia arvoja eri tutkimuksissa [11]. Tässä työssä käytettiin Brown-Whitehead-mallin arvoja, koska se on laajimmin käytössä oleva malli. Suurin osa malleista ei myöskään eroa toisistaan suuresti, minkä vuoksi mallin valinnalla ei liene merkittävää vaikutusta lopputuloksiin. Brown-Whitehead-mallin mukaiset vakiot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Brown-Whitehead-mallin vakiot, joita käytetään iskuetäisyyden laskemiseen yhtälössä (6) [11].

Iskuetäisyys	A	b
maahan r_g	6,4	0,75
johtimeen r_c	7,1	0,75

Käyttämällä iskuetäisyyden riippuvuutta salamavirrasta on mahdollista määrittää avojohdon suojauskulma ja suurin mahdollinen salamavirta, joka voi osua vaihejohtimiin. Tähän tarkoitukseen on kehitetty niin sanottu sähkögeometrinen malli, jonka periaate on esitetty kuvassa 10. Malli laaditaan siten, että korkeudelle h_c ja y_c asennettujen ukkos- ja vaihejohtimien ympärille piirretään iskuetäisyyttä vastaavat r_c -säteiset kaaret ja korkeudelle r_g maatasoon suuntainen suora. Näin syntyy käyrä ABCBA, jonka kohdalla avojohtoa lähestyvä salama valitsee lopullisen iskukohtansa. [6, s. 306], [11]

Kun oletetaan salaman lähestyvän avojohtoa kohtisuorasti maatasoon nähden, se voi lävistää kaaren AB, BC tai osua maahan. Jos salama lävistää kaaren AB ja päätyy projektiolle D_c , isku osuu vaihejohtimiin. Vastaavasti salaman lävistäessä kaaren BC eli projektion D_g , isku osuu ukkosjohtimiin. Projektoiden leveydet riippuvat iskuetäisyyksistä r_c ja r_g , jotka puolestaan riippuvat salamavirran huippuarvosta. Jana D_c lyhenee, kun iskuetäisyydet r_c ja r_g kasvavat virran i kasvaessa. Onkin löydettävissä sellainen salamavirran suuruus, jolla janan D_c pituus on nolla. Tätä suurempi virtaiset salamamat eivät siis pääse osumaan vaihejohtimiin. [6, s. 306–307], [11]

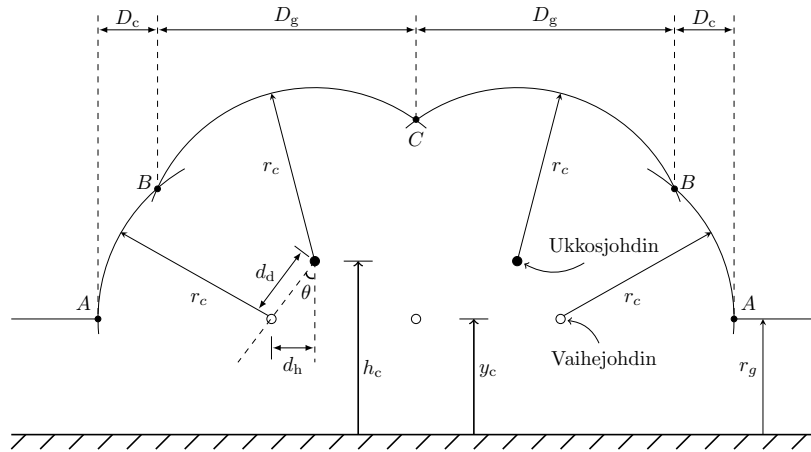
Kun janan D_c pituus on nolla, tätä vastaava iskuetäisyys $r_{c,\max}$ lasketaan, kuvan 10 merkinnöillä, yhtälöllä

$$r_{c,\max} = \frac{d_d^2(h_{c,\text{avg}} + y_{c,\text{avg}}) + 2 d_d d_h \sqrt{h_{c,\text{avg}} y_{c,\text{avg}}}}{2(h_{c,\text{avg}} - y_{c,\text{avg}})^2}, \quad (7)$$

missä $h_{c,\text{avg}}$ ja $y_{c,\text{avg}}$ ovat ukkos- ja vaihejohtimien keskimääräiset korkeudet [17, 18]. Esimerkiksi ukkosjohtimien keskimääräinen korkeus lasketaan yhtälöllä

$$h_{c,\text{avg}} = \frac{2}{3} h_c - d_{g,\text{sag}}, \quad (8)$$

missä h_c on ukkosjohtimien asennuskorkeus pylväällä ja $d_{g,\text{sag}}$ niiden riippuma jännevälän keskikohdassa. Vaihejohtimien keskimääräinen korkeus voidaan laskea samalla tavalla käyttämällä yhtälössä (8) vaihejohtimia vastaavaa asennuskorkeutta ja riippumaa. [11].



Kuva 10: Avojohton rakenteeseen liittyvä sähkögeometrinen malli [11, muokattu].

Iskuetäisyyttä $r_{c,\max}$ etäämmälle iskevät salamot ovat aina lähempänä maata tai ukkosjohtimia kuin vaihejohtimia, joten ne osuvat joko ukkosjohtimiin tai maahan [18]. Sitä vastaava suurin mahdollinen suoraan vaihejohtimiin iskevän salaman huippuvirta $i_{d,\max}$ voidaan yksinkertaisesti ratkaista yhtälöstä (6). Sijoittamalla Brown-Whitehead-mallin vakiot ja suurin iskuetäisyys $r_{c,\max}$ yhtälöön (6) saadaan

$$r_{c,\max} = 7,1 i_{d,\max}^{0,75} \iff i_{d,\max} = \left(\frac{r_{c,\max}}{7,1}\right)^{\frac{1}{0,75}} \quad (9)$$

Edellä esitetty sähkögeometrinen malli pätee sellaisenaan vain tasaiseen maastoon. Suurten korkeuserojen maastossa on siten käytettävä muita menetelmiä [1, s. 34]. Suomessa on kuitenkin verraten pienet korkeuserot, joten edellä kuvattu malli antaa hyviä tuloksia eri sijainneissa ympäri maata. Lisäksi on huomattava, että salamapurkauksen viimeisen portaalan pituus on tilastollisesti keskiarvonsa ympärille jakautunut suure [6, s. 307]. Sen vuoksi yhtälön (9) salamavirtaa suurempia salamoita saattaa satunnaisesti iskeä vaihejohtimiin.

4.2 Pylväsmaadoitukset

Pylväsmaadoitusten tehtävänä on vähentää takaiskujen määrää rajoittamalla pylvään potentiaalın kasvua salaman iskiessä siihen tai ukkosjohtimiin. Lisäksi pylväsmaadoitukset parantavat relesuojauksen toimintaa ja pienentävät pylvään maadoitus- ja kosketusjännitteitä. Pylväsmaadoitus koostuu perusmaadoituksesta ja mahdollisista lisämaadoituksista. Pylvään maadoitusvastus on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin, mikä on tyypillisesti Suomessa erittäin suuri. Tämän vuoksi pylväsmaadoitukset vaativat usein perusmaadoituksen lisäksi lisämaadoituksia, jotta pylvään maadoitusvastus saadaan riittävän pieneksi. [1, s. 432–445]

Ukkosjohtimilla varustetun avojohdon pylväiden tehokas maadoittaminen on erityisen tärkeää takaiskujen määrän vähentämisessä. Takaiskujen todennäköisyys kasvaa huonojen maadoitusolosuhteiden tai suuren maadoitusvastuksen seurauksena. Onkin havaittu, että pylväiden maadoittamatta jättäminen lisää ukkoshäiriöiden määrän kaksinkertaiseksi Suomessa 110 kV:n jännitetasolla. Tämän vuoksi pylvää t ulisi maadoittaa niin hyvin kuin taloudellisesti on järkevää. Erityisesti sähköasemien läheisyydessä pylvää t ulisi maadoittaa tehokkaasti tärkeiden laitteiden suojaamiseksi takaiskujen synnyttämiltä ylijännitteiltä. [1, s. 34, s. 445]

4.3 Ylijännitesuojat

Verkon ylijännitteitä rajoitetaan tehokkaimmin venttiilisuojoilla, joka onkin tavallisin ylijännitteiden rajoittamiseen käytetty komponentti kaikilla jännitetasoilla. Niitä käytetään erityisesti transienttiluonteisten ylijännitteiden rajoittamiseen. Venttiilisuojo t voidaan jakaa kahteen ryhmään: kipinävälittömiin ja kipinävälillisiin. Kipinävälillisiä venttiilisuojoja saattaa edelleen tulla vastaan verkossa, mutta nykyisin asennettavat venttiilisuojo t ovat lähes poikkeuksetta kipinävälittömiä metallioksidisuojoja, minkä vuoksi tässä luvussa keskitytään vain niiden käsittelyyn. [1, s. 237], [6, s. 343]

Suomessa ylijännitesuojoilla suojataan pääasiassa vain kaikkein tärkeimmät verkon laitteet kuten tehomuuntajat, GIS-laitokset ja kaapelit. Avokytkinlaitosten johtolähtöjä ei ole taloudellisesti järkevää varustaa ylijännitesuojoilla, sillä salamaniskutiheys on Suomessa verraten alhainen, jolloin laitteiden vikaantumisriski salamaylijännitteen johdosta jää muutenkin alhaiseksi. [1, s. 37–38], [6, s. 343]

Ylijännitesuojo t asennetaan pääasiassa vaiheen ja maan välille kaikkiin kolmeen vaiheeseen, mutta myös vaiheiden välille asennettuja suojoja on käytössä. Tehomuuntajien tapauksessa asennetaan ylijännitesuojo t myös tähtipisteisiin. Nyrkkisääntönä on, että suojo t tulisi sijoittaa mahdollisimman lähellä suojattavaa kohdetta, sillä suojo t ja kohteen etäisyyden kasvattaminen nostaa kohteen luona saavutettavissa olevaa suojaustasoa. [1, s. 36–38]

Fingridillä on käytössä oma tekninen eritelmä ylijännitesuojojen hankkimista varten. Siinä on määritelty ulosasetettavien tavallisten metallioksidisuojojen minimivaatimukset, jotka perustuvat IEC 60099-4 -standardiin [19]. Sähköasemaprojektin toimittaja puolestaan vastaa ylijännitesuojojen sijoittamisesta oikeaoppisesti siten, että vaadittavat suojaustasot täyttyvät. Tämän vuoksi tässä ei käsitellä tarkemmin ylijännitesuojojen mitoitus- ja valintaprosessia. Ylijännitesuojojen valintaprosessi on

kuvailtu kattavasti esimerkiksi standardissa IEC 60099-5 [20].

Seuraavaksi tarkastellaan perinteisten ilma- ja kaasueristeisten ylijännitesuojien ominaisuuksia. Lisäksi käsitellään GIS-laitosten ylijännitesuojauksen periaatteita ja erikoispiirteitä.

4.3.1 Kipinävälitön metallioksidisuoja

Kipinävälittömät metallioksidisuojaat koostuvat posliini- tai polymeerikuoreen hermeettisesti suljetuista sylinterimäisistä metallioksidielementeistä eli niin sanotuista vastuselementeistä. Suojan haluttu suojaustaso ja energianpurkauskyky saavutetaan kytkemällä vastuselementtejä päällekkäin pilareiksi ja asentamalla näitä pilareita rinnakkain. Eristinkuoren pinnan muotoon ja pintamatkaan vaikuttaa muun muassa suojan sijoituspaikan likaisuus. Polymeerikuoriset suojat sietävät paremmin kosteutta ja likaisuutta kuin posliinikuoriset suojat. Lisäksi niillä on parempi terminen kestävyys ja ne eivät pirstoudu tuhoutuessaan. [1, s. 239], [6, s. 347–349]

Vastuselementtien keskeinen rakennusaine on sinkkioksidi (ZnO). ZnO-hiukkasten ympärille lisätään lisäksi muita metallioksidihiuksia. Näillä hiukkasilla on keskeinen vaikutus suojan sähköisiin ominaisuuksiin, kuten suojan syttymisvaiheeseen. Koska suojien valmistajat käyttävät erilaisia metallioksidiseoksia, voivat eri valmistajien suojien ominaisuudet olla hyvinkin erilaiset. Metallioksidihiuksista koostuva massa sintrataan lieriömäisiksi vastuselementeiksi, jotka päällystetään kosteudelta ja kemiallisilta vaikutuksilta suojaavalla kerroksella. Lisäksi vastuselementtien päädyt metalloidaan kosketusvastuksen pienentämiseksi. [1, s. 239], [6, s. 347]



Kuva 11: Tyypillinen kipinävälitön sinkkioksidisuoja ohjauselektrodilla varustettuna, ABB Exlim P [21].

Siirtoverkon jännitetasojen metallioksidisuoja koostuvat päällekkäin kasatuista moduuleista, joiden määrä vaihtelee haluttujen ominaisuuksien mukaan. Lisäksi jännitteenjakauma suojan yli tulisi olla mahdollisimman lineaarinen suojan oikeanlaisen toiminnan turvaamiseksi. Tähän tarkoitukseen ylijännitesuojan jännitteeseen päähän asennetaan jännitteenohjauselektrodi, joka ohjaa jännitteenjakautumaa kapasitiivisesti. [1, s. 239–240] Kuvassa 11 on esitetty esimerkki metallioksidisuojusta. Siinä on nähtävissä päällekkäin kasatut kolme moduulia sekä renkaan muotoiset jännitteenohjauselektrodit.

Venttiilisuoja toimii nimensä mukaisesti kuin venttiili: Se päästää purkausvirran kulkemaan lävitsensä vasta, kun jännite ylittää tietyn kynnyksen. Tämä ilmiö johtuu siitä, että metallioksidoista valmistetut vastuselementit ovat hyvin epälineaarisia. Ideaalinen venttiilisuoja asennettuna suojattavan kohteen rinnalle toimisi täydellisenä eristeenä normaalioloissa. Kun jännite nousisi käyttöjännitteen huippuarvon yläpuolelle, suoja muuttuisi äkillisesti erittäin pieneksi vastukseksi ja näin purkaisi ylijännitteen energian ilman jännitteen nousua suojattavassa kohteessa. Energian purkaututtua suoja palautuisi välittömästi eristemäiseen tilaan.

[1, s. 237–239], [6, s. 343–347]

Todelliset ylijännitesuojat eivät kuitenkaan käyttäydy edellä kuvatulla tavalla. Niillä on rajallinen energianpurkauskyky, minkä vuoksi ne eivät sovellu kovin hyvin pitkäaikaisten ylijännitteiden, kuten pientaajuisten ylijännitteiden, rajoittamiseen. Suojat eivät myöskään kykene siirtymään äkillisesti johtamattomasta tilasta johtavaan tai päinvastoin. Lisäksi niiden läpi kulkee aina pieni milliampeerin suuruusluokkaa oleva vuotovirta. [6, s. 345]

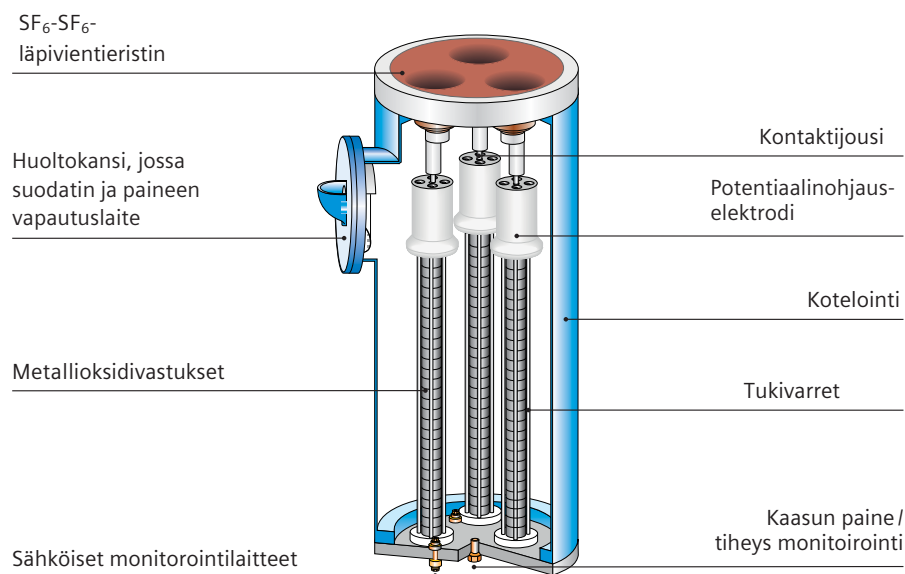
On tärkeää, että ylijännitesuojat pysyvät hyvässä kunnossa, koska niiden tehtävänä on suojata tärkeitä verkon laitteita. Metallioksidisuojuille ongelmia aiheuttaa erityisesti niiden läpi kulkeva vuotovirta. Pienillä virroilla ZnO-vastuksella on negatiivinen lämpötilakerroin, minkä vuoksi sen vastus pienenee lämpötilan kasvaessa. Vastuksen pienentyessä vuotovirta kasvaa ja lämpötila nousee edelleen, minkä seurauksena vuotovirta kasvaa edelleen. Lopulta vastuselementeissä tapahtuu terminen läpilyönti. Tämä vuotovirran jatkuva kasvu voidaan ehkäistä riittävällä suojan jäähtytyksellä. Lisäksi ylijännitesuojien sisään pääsevä kosteus tai ulkoiselle eristinpinnalle kertyvä lika aiheuttaa ongelmia suojan toiminnalle. [1, s. 240], [6, s. 348–349]

4.3.2 Kaasueristeinen ylijännitesuoja

Kaasueristeisten ylijännitesuojien rakenne on periaatteessa hyvin samankaltainen kuin perinteisten venttiilisuojien rakenne. Molemmissa suojatyypeissä on ladottuna riittävä määrä vastuselementtejä sarjaan ja rinnan sopivien sähköisten ominaisuuksien saavuttamiseksi. Myös kaasueristeisen suojan tapauksessa vastuselementtien pääraaka-aineena on ZnO. Perinteisten ilmaeristeisten venttiilisuojien tapaan, kaasueristeisillä suojilla käytetään jännitteenohjauselektrodia jännitteenjakautumaa linearisoimiseksi. [22, 23]

Kuva 12 esittää tyypillisen kaasueristeisen 3-vaiheisesti koteloidun ylijännitesuojan rakenteen. Suojan vastuselementit on ladottu pilareiksi ja tuettu tukivarsien avulla. Vastuspilarit on suljettu hermeettisesti alumiini- tai teräskoteloon, jonka

sisällä eristeaineena toimii SF₆-kaasu [23]. Kaasueristeiset ylijännitesuojat ovat varsinainen GIS-kojeistojen tapaan 3-vaiheisesti koteloitua 170 kV:n jännitetasolle saakka. Suuremmilla jännitetasoilla jokainen vaihe on suljettu omaan metallikuoreensa.



Kuva 12: Kaasueristeinen 3-vaiheinen ylijännitesuoja, Siemens 3ES5-C [24, muokattu].

Kaasueristeiset ylijännitesuojat voidaan liittää suoraan suojattavaan kohteeseen, kuten GIS-kojeistoon tai muuntaajaan, jolloin etäisyys suojattavaan kohteeseen minimoituu. Lisäksi ne rajoittavat paremmin jyrkästi nousevia jännitetransientteja, koska niiden sisäinen induktanssi on pienempi kuin perinteisillä ylijännitesuojilla. Kaasueristeisten ylijännitesuojien suojaava vaikutus onkin tällaisissa tilanteissa paljon parempi verrattuna perinteisiin ylijännitesuojiiin. Kaasueristeisten suojien etuna on lisäksi se, että niitä voidaan käyttää erittäin likaisissa ja saastuneissa kohteissa, koska niiden pinnalle ei pääse kerääntymään likaa, joka heikentäisi suojan ulkoista jännitelujuutta, kuten tavanomaisilla ylijännitesuojilla. Myöskään kosteus ei yleensä pääse tunkeutumaan kaasueristeisten suojien sisälle. [23, 25]

Suurimpana esteenä kaasueristeisten suojien hankinnalle on niiden erittäin korkea hinta, joka voi olla jopa kymmenkertainen verrattuna perinteisiin avokytkinlaitoksen venttiilisuojiin [6, s. 359]. Tästä syystä kaasueristeisten ylijännitesuojien hankintaa pyritään välttämään ja suojaamaan GIS-kojeistot niiden ulkopuolelle asennettavilla perinteisillä venttiilisuojilla. Kaasueristeisten ylijännitesuojien asentaminen tarkoittaa lisäksi kaasutilojen määrän kasvamista, mikä voi johtaa korkeampaan kaasuvuotoriskiin.

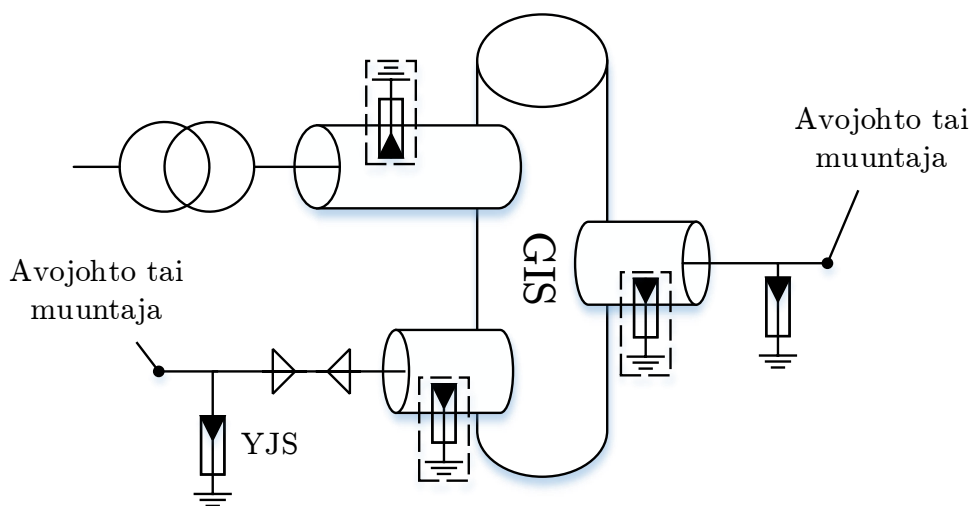
Huolta on myös aiheuttanut kaasueristeisten ylijännitesuojien luotettavuus. Koska kyseessä on GIS-komponentti, vikaantumiset johtavat usein pitkiin keskeytysaikoihin ja korkeisiin korjauskustannuksiin. GIS-ylijännitesuojat valmistetaan kuitenkin laadukkaammista komponenteista kuin tavalliset ilmaeristeiset suojat. Tämän vuoksi niiden vikaantumistodennäköisyys on merkittävästi tavallisia ylijännitesuojia pienempi. Li-

säksi testaamalla jokainen GIS-ylijännitesuojan komponentti erikseen varmistetaan niiden kestävyys. Näin voidaan olettaa GIS-ylijännitesuojan eliniän olevan yli 30 vuotta. [23]

4.3.3 GIS-laitoksen ylijännitesuojaus

Kaasueristeiset kytkinlaitokset ovat arvokkaita laitteita, ja niiden vaurioituminen johtaa pitkiin käyttökeskeytyksiin. Tämän vuoksi on erityisen tärkeää, etteivät laitoksen sisällä vaikuttavat ylijännitteet pääse nousemaan GIS-kojeiston jännitelujuutta suuremmiksi. Suomessa GIS-laitosten kaikki avojohto- ja muuntajalähdöt varustetaan venttiilisuojilla. Lisäksi GIS-laitosten läheisyydessä avojohtojen tulee olla suojattuna ukkosjohtimin, jolloin kriittiseksi mitoitustilanteeksi muodostuu yleensä takaisku laitoksen läheisyydessä. [6, s. 359]

Muuntajan liittyessä avojohtimien välityksellä tai avojohdon liittyessä suoraan GIS-laitokseen ylijännitesuojat liitetään mahdollisimman lähelle SF₆/ilma-läpivientiä. Jos taas muuntaja tai avojohdin liittyvät kaapelin välityksellä GIS-laitokseen, ylijännitesuojat sijoitetaan kaapelipäätteen välittömään läheisyyteen. Näitä tyypillisiä GIS-laitoksen suojaustilanteita on havainnollistettu kuvassa 13.



Kuva 13: Gis-kojeiston ylijännitesuojauksen toteutus ylijännitesuojien (YJS) avulla eri tilanteissa. Katkoviivalla merkitty mahdollisten kaasueristeisten ylijännitesuojien sijainti karkeasti.

Joissakin tilanteissa GIS-laitosta ei pystytä suojaamaan tehokkaasti pelkästään ilmaeristeisillä ylijännitesuojilla. Tällöin on harkittava kaasueristeisten ylijännitesuojien käyttöä. GIS-ylijännitesuojien tarvetta kasvattaa esimerkiksi tilanne, jossa GIS-laitos liittyy avojohtoverkkoon pitkän kaapelin välityksellä. Tällöin pelkästään kaapelipäätteellä sijaitseva ylijännitesuoja ei välttämättä riitä rajoittamaan ylijännitteitä GIS-kojeistossa. Tämän johtuu siitä, että ylijännitteet heijastuvat kaapelin alkupään lähellä tapahtuneen takaiskun aiheuttamasta valokaaresta kaapelia pitkin

kohti GIS-laitosta ja kaksinkertaistuvat GIS-kojeiston päädyssä, mikäli kyseisen johd-
tolähdön katkaisija on avoinna. [6, s. 234–236] Varsinaisiin kaapeliverkkoihin liittyviä
GIS-laitoksia ei puolestaan ole välttämättä tarpeellista suojata GIS-ylijännitesuojilla,
koska ilmastolliset ylijännitteet eivät pääse tunkeutumaan sinne helposti [26].

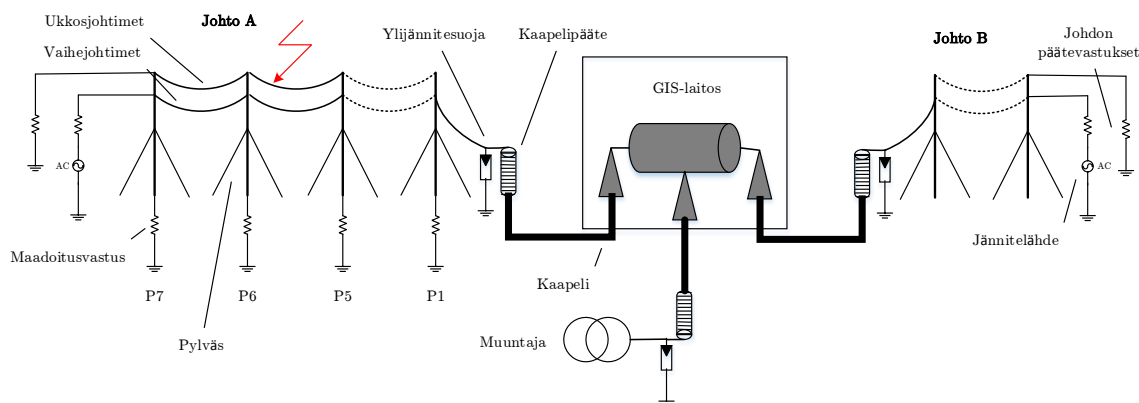
GIS-ylijännitesuojien tarve korostuu myös tilanteissa, joissa GIS-laitosten kiskorat-
kaisut on suunniteltu siten, että niihin sisältyy avoimena olevia pitkittäiserottimia tai
-katkaisijoita, jotka merkitsevät ylimääräisiä heijastumiskohtia kytkinlaitoksen sisällä
ja jännitelujuuden ylittymisen riskin kasvua GIS-laitoksen sisällä. Myös tilanne, jossa
muuntaja liitetään suoraan GIS-kojeistoon SF₆/öljy-läpivientieristimin, voi vaatia
GIS-ylijännitesuojien asentamista, koska tällöin ei voida käyttää perinteisiä ilmaeris-
teisiä ylijännitesuojia. Myös tämä tilanne on havainnollistettu kuvassa 13. [6, s. 359]

Vaikka kaasueristeisen kytkinlaitosten sisäisistä ylijännitesuojista on käyty paljon
keskustelua, vieläkään ei ole kattavia todisteita niiden tarpeesta, etenään alle 230
kV:n jännitetasolla ja hyvin suunniteltujen GIS-laitosten tapauksessa [27]. Koska
GIS-laitosten ylijännitesuojaus on erityisen tärkeää ja toisaalta koska sisäiset ylijän-
nitesuojat ovat varsin arvokkaita investointeja, on syytä tutkia tarkasti ja varmistaa
simuloinnein sisäisten ylijännitesuojien tarve ennen kuin päätös niiden hankkimisesta
tehdään.

5 Simulointimallin laatiminen

Kuten edellä esitetystä voidaan todeta, ylijännitteiden laskeminen on varsin monimutkaista aaltojen lukuisten heijastumisien, verkon epälineaaristen komponenttien ja muun muassa komponenttiarvojen taajuusriippuvuuden vuoksi. Laskennasta tulee siis hyvin haastavaa ja paljon aikaa vievää. Täten ainut järkevä tapa tällaisen laajemman salamaylijännitetarkastelun suorittamiseen on tietokonesimulointi.

Kuva 14 esittää yleisellä tasolla simulointimallin rakenteen. Malli koostuu kahdesta avojohdosta, yhdestä muuntajasta ja GIS-laitoksesta, ylijännitesuojista ja johtojen päädyissä olevista jännitelähteistä. Kummatkin avojohdot on lisäksi päätetty johtimien aaltoimpedansseja vastaavilla vastuksilla heijastusten estämiseksi jännitelähteistä. Avojohdolle A mallinnettiin 7 pylvästä maadoitusvastuksineen sekä 8 jännettä. Salamoiden aiheuttamia ylijännitteitä tutkittiin kohdistamalla salamaniskut avojohdon A pylväisiin tai vaihejohtimiin. Avojohto B puolestaan mallinnettiin pelkästään johtona ilman erillisiä pylväsmalleja, koska sen tehtävänä on vain kuvata muuta GIS-laitokseen liittyvää verkkoa eikä siihen kohdistettu siten salamaniskuja. Kaikki liittynät GIS-laitokseen tapahtuvat kaapelin välityksellä. Avojohdolla A tutkittiin kuitenkin myös tapaus, jossa avojohto liittyy suoraan GIS-laitokseen SF₆/ilma-läpiviennin kautta.



Kuva 14: Yleiskuva simulointimallista.

Tässä luvussa käydään läpi kuvan 14 mukaisen simulointimallin rakentaminen ja sen jokaisen komponentin mallintaminen. Tässä työssä malli simuloinnit suoritettiin PSCAD/EMTDC-simulointiohjelmistolla. Koska työssä on tarkoituksena selvittää kaasueristeisten ylijännitesuojien tarvetta 110 kV:n jännitetasolla yleisesti ja todellisuudessa verkon rakenteet sekä muun muassa maadoitusolosuhteet vaihtelevat paljon maantieteellisesti, on simulointikomponenttien parametrit pyritty valitsemaan aina mahdollisuuksien mukaan pahinta tilannetta vastaaviksi. Tällä pyritään varmistamaan se, että työn tulokset soveltuvat kaikkiin tilanteisiin 110 kV:n jännitetasolla. Liitteessä A on esitetty kokonaiskuva PSCAD:ssa toteutetusta simulointimallista.

5.1 Yleistä

5.1.1 Aikaisemmat ylijännitesuojausselvitykset

Erilaisia ylijännitesuojausselvityksiä on tehty lukuisia muun muassa verkkoyhtiöiden ja yliopistojen tutkijoiden toimesta, esimerkiksi [28–40]. On kuitenkin syytä huomata, että nämä tutkimukset ja selvitykset ovat usein keskittyneet koskemaan jotakin tiettyä verkon osaa ja GIS-laitosta tietyssä sijainnissa. Lisäksi tutkimuksissa on painotettu eri tavalla eri komponenttien mallintamista, jolloin lopputulokset voivat olla senkin puolesta erilaiset. Näistä syistä muiden suorittamista selvityksistä ei voi vetää suoria johtopäätöksiä esimerkiksi siitä, miten GIS-laitokset pitäisi suojata ylijännitteiltä Suomen kantaverkossa. Aikaisemmat ylijänniteselvitykset toimivat toki hyvinä vertailukohtina uusille selvityksille.

CIGRE:n [11, 41] ja IEEE:n [42] työryhmät ovat julkaisseet kattavat yleisohjeet ylijännitesuojausselvityksen periaatteista ja komponenttien mallintamisesta. Myös IEC:n eristyskoordinaatio-standardisarjaan kuuluvassa teknisessä raportissa on käyty läpi komponenttien mallintamista ja laskentamenetelmiä [43]. Lisäksi aiheesta on kirjoitettu useita kirjoja, esimerkiksi [16, 44], ja ainakin yksi diplomityö [45], joka ei kuitenkaan päädy selkeään lopputulokseen GIS-laitoksen sisäisten ylijännitesuojien tarpeesta.

Edellä mainitut lähteet ovat toimineet hyvänä taustamateriaalina tätä työtä tehdessä. Lisäksi GIS-laitosten valmistajien tekemät aiemmat ylijännitesuojausselvitykset Fingridin jo rakennetuille GIS-laitoksille toimivat hyvänä vertailukohtana tämän työn tuloksia arvioidessa.

5.1.2 PSCAD/EMTDC

EMTDC (electromagnetic transients with DC) on alunperin kanadalaisen Manitoba Hydro -nimisen yhtiön 1970-luvulla kehittämä simulointimoottori transienttilaskentaa varten. PSCAD (power system computer aided design) on puolestaan 1980-luvulla kehitetty graafinen käyttöliittymä EMTDC-ohjelmaa varten. Ohjelmistoa kehitetään jatkuvasti käyttäjien toiveiden mukaisesti, ja se on tärkeä työkalu monille sähköjärjestelmien parissa työskenteleville insinööreille. [44, s. 135–138]

PSCAD:n vahvuuksiin kuuluu kaapeleiden ja avojohtojen tarkka mallintaminen taajuudesta riippuvina komponentteina. Taajuusriippuvuudella tarkoitetaan, että komponenttien vaste eri taajuuksia sisältäviin transientteihin voidaan laskea tarkasti. Lisäksi PSCAD sisältää rajapinnat muun muassa Siemensin PSS-E verkostolaskentaohjelmistoon sekä MATLAB-ohjelmistoon, mikä mahdollistaa monitmutkaisempien ja raskaampien simulointimallien rakentamisen. Muita etuja ovat helppo käytettävyys ja omien mallien rakentaminen sekä rinnakkaissimulointi, mikä mahdollistaa raskaiden simulointien jakamisen useammalle prosessorille tai tietokoneelle. [44, s. 138–153]

5.2 GIS-laitos

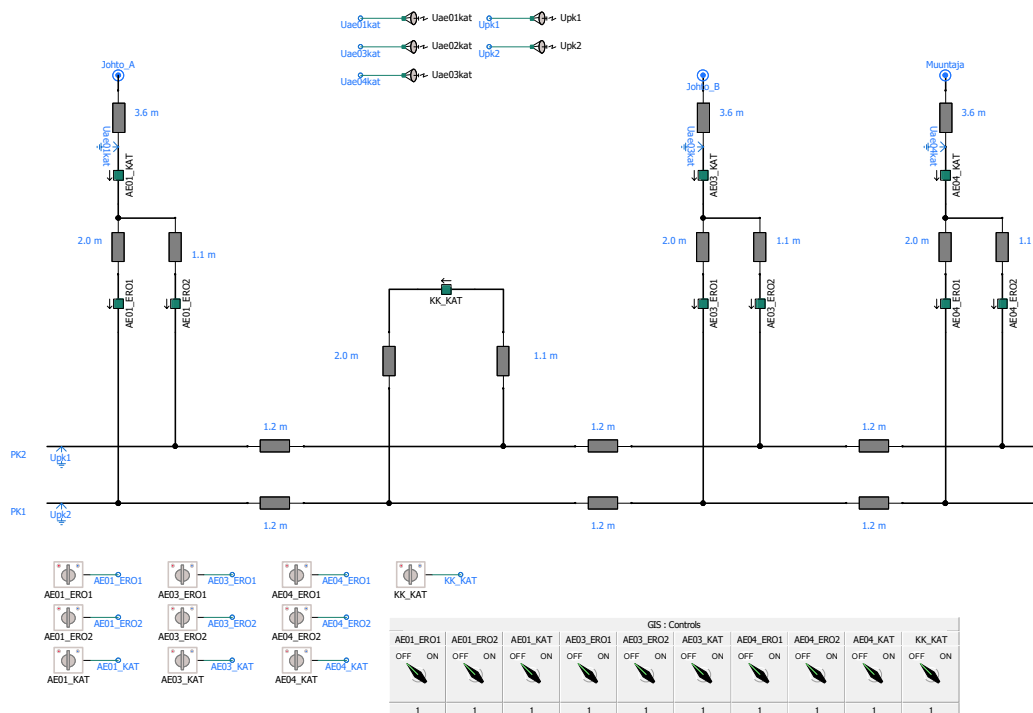
Ylijännitetarkasteluissa GIS-laitokset mallinnetaan tavallisesti häviöttöminä voimajohtoina eli aaltoimpedansseina. Mallinnukseen saa lisää tarkkuutta ottamalla huomioon muun muassa läpivientien ja kojeiston laitteiden kapasitanssit. [16, s. 180–181], [46] GIS-laitosten valmistajien tekemissä ylijännitesuojausselvityksissä on kuitenkin aina tyydytty mallintamaan laitokset yksinkertaisesti pelkillä häviöttömillä voimajohdoilla. Samaa menetelmää noudatettiin tässä työssä, koska kapasitansseista ei ole olemassa mittauksia ja niitä on hankala arvioida erityisesti 3-vaiheisesti koteloidun GIS-laitoksen tapauksessa.

Yksivaiheisesti koteloitujen GIS-laitosten aaltoimpedanssin laskeminen on helppoa, sillä laitoksen rakenteet voidaan ajatella koaksiaalisiksi sylintereiksi. Kolmivaiheisesti koteloidun GIS-laitoksen mallintaminen puolestaan on paljon hankalampaa, sillä kaikki vaiheet on suljettu samaan koteloon. Vaiheet eivät siten asemoidu koaksiaalisesti koteloon nähden ja lisäksi ne kytkeytyvät toisiinsa sähköisesti. Tämän vuoksi aaltoimpedanssin laskeminen 110 kV:n GIS-rakenteille ei ole yksinkertaista.

3-vaiheisesti koteloidun GIS-laitoksen aaltoimpedansseista tai niiden laskemisesta ei juurikaan löydy tietoja kirjallisuudesta. Eräs keino lähestyä tätä ongelmaa on käyttää putkeen asennetun kolmivaiheisen kaapelin (pipe type cable) mallia, joka muistuttaa rakenteeltaan 3-vaiheisesti koteloitua GIS-putkea. Tätä menetelmää käytettiin tässä työssä ajatteleamalla GIS-laitoksen koostuvan tällaisista lyhyistä putkista. Tarkkoja GIS-kojeiston mittoja ei ollut tätä työtä kirjoittaessa saatavilla, joten mitat jouduttiin arvioimaan karkeasti erään GIS-valmistajan käyttöoppaista sekä laitosten sijoituskaavioista. Mitat arvioitiin GIS-kojeiston kiskosta, jossa vaihejohtimet sijaitsevat kolmiomuodossa symmetrisesti toisiinsa nähden. Todellisuudessa GIS-kojeiston sisäinen rakenne on paljon monimutkaisempi, vaihejohtimien sijainti suhteessa toisiinsa ei esimerkiksi ole joka puolella kojeistoa sama. Tällä yksinkertaistuksella ei liene kuitenkaan merkittävää vaikutusta simulointien lopputuloksiin, ja toisaalta parempaakaan mallia ei ollut tätä kirjoittaessa saatavilla.

Liitteessä B on johdettu yhtälöt GIS-laitoksen impedanssi- ja admittanssimatriiseille putkeen asennettujen kaapelien mallia käyttäen, ja laskettu arvioitujen GIS-putken mittojen perusteella arvot matriisien alkioille. GIS-laitos rakennettiin PSCAD:ssa siten, että laitoksen osat mallinnettiin haarautumiskohtien välillä yksinkertaisina pii-sijaiskytkentöinä, joille syötettiin impedanssi- ja admittanssimatriiseista ratkaistut johdinparametrit. Mitat laitoksen eri osille arvoitiin olemassa olevista GIS-laitoksista. Mallinnettu GIS-laitos koostuu yhteensä kahdesta pääkiskosta ja neljästä kentästä, joista kaksi on johtolähtökenttiä, yksi muuntajakenttä ja yksi kiskokatkaisijakenttä. Lisäksi mallinnettiin erottimet ja katkaisijat PSCAD:n ideaalista katkaisijaa käyttäen, jotta voitiin simuloida erilaisia kytkentätilanteita. PSCAD:ssa toteutettu malli on esitetty kuvassa 15.

Simuloitaessa tilannetta, jossa avojohto A liittyy GIS-kojeistoon suoraan kaapeliiliitynnän sijaan, pidennettiin johtolähtökentän ensimmäistä osuutta 4 metrillä kuvasta 15 poiketen. Tämän tarkoituksena oli ottaa huomioon kojeiston ja laitoksen seinässä olevan läpiviennin välinen GIS-osuus.



Kuva 15: GIS-laitoksen malli PSCAD:ssa. Harmaat komponentit edustavat kyseisen GIS-osuuden resistanssia, reaktanssia ja susceptanssia.

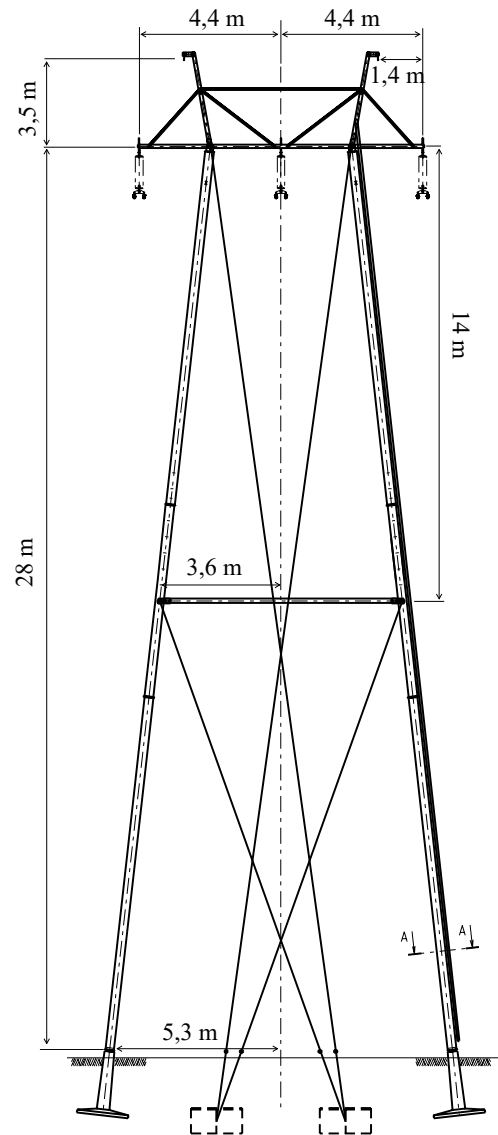
5.3 Pylväät ja maadoitukset

Voimajohtopylväiden ja niiden maadoitusten mallintaminen mahdollistaa pylvään potentiaalinen nousun huomioon ottamisen salaman iskiessä pylvääseen tai ukkosjohdtimeihin. Näin simuloinneista tulee paremmin todellisuutta vastaavia. Tässä työssä voimajohtopylväitä mallinnettiin yhteensä 7 kappaletta avojohdolle A. Sähköasemalla sijaitsevaa portaalipylvästä ei mallinnettu, sillä salamaniskut siihen ovat epätodennäköisiä aseman omien ukkosköysien tuoman suojan myötä.

Seuraavaksi tarkastellaan, miten voimajohtopylväät sekä niihin liittyvät pylväsmaadoitukset mallinnettiin PSCAD:ssa. Lisäksi käydään läpi eristinketjujen ja erityisesti niiden jännitelujuuden mallintaminen.

5.3.1 Pylväät

Mallinnettavaksi pylvääksi valittiin Fingridin pylväskerheeseen kuuluva teräksinen, 1H-tyyppinen harustettu kannatinpylväs. Tämä pylväs valittiin sillä perusteella, että se on korkein pylväskerheen pylväistä, mikä tekee siitä kaikkein altteimman salamaniskuille. Lisäksi 1H-tyyppiset pylväät ovat erittäin paljon käytettyjä kantaverkossa 110 kV:n jännitetasolla. Mallinnettavan 1H-pylvään mittakuva on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16: Harustettu 110 kV:n kannatinpylväs 1H [47].

Pylväs rakenne mallinnettiin PSCAD:ssa lyhyenä yksijohtimisena voimajohtona käyttäen niin sanottua Bergeron-mallia. Bergeron-malliin syötettiin parametreina aaltoimpedanssi, johdon pituus eli pylvään korkeus ja aallon kulkuaika yhtä metriä kohden. Aaltoimpedanssi laskettiin CIGREN suosittamalla, kartiomaiselle rakenteelle pätevällä yhtälöllä

$$Z_T = 60 \ln(\cot(0,5 \tan^{-1}(r_{\text{avg}}/H_{\text{TO}}))), \quad (10)$$

missä H_{TO} on pylvään korkeus orteen asti (28 m) ja r_{avg} on pylvään keskimääräinen säde, joka lasketaan yhtälöllä

$$r_{\text{avg}} = \frac{r_{1t}h_2 + r_{2t}(h_1 + h_2) + r_{3t}h_1}{h_1 + h_2}, \quad (11)$$

missä r_{1t} on pylvään säde orren kohdalla (4,4 m), r_{2t} pylvään säde keskikohdassa (3,6 m), r_{3t} on säde pylvään juuressa (5,3 m), h_1 on pylvään korkeus juuresta keskikohtaan (14 m) ja h_2 on pylvään korkeus keskikohdan ja orren välillä (14 m) [11].

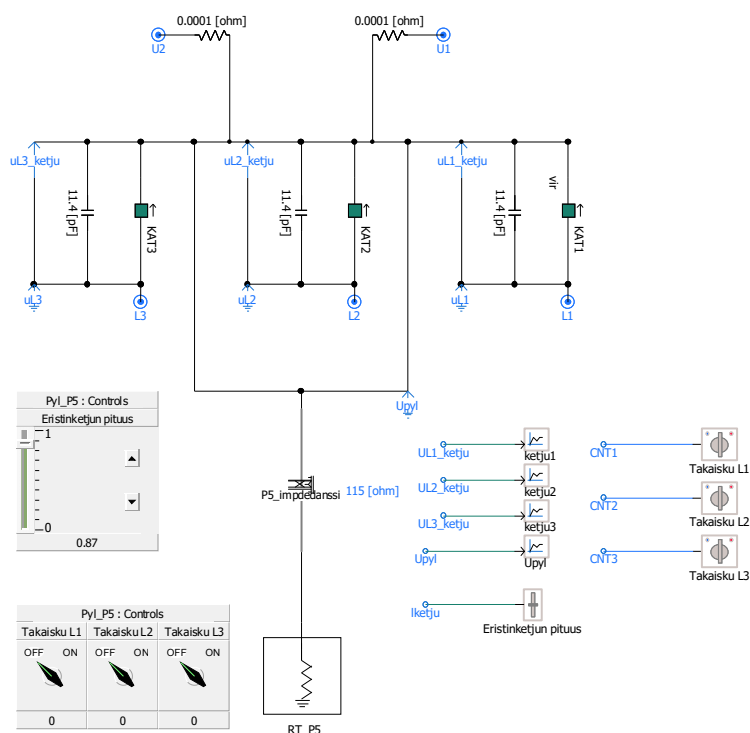
Kuvan 16 mitoilla saadaan pylvään keskimääräiseksi säteeksi 8,45 m yhtälöllä 11 ja aaltoimpedanssiksi 115Ω yhtälöllä 10. Todellisuudessa harustetun pylvään aaltoimpedanssi on pienempi, sillä harukset tarjoavat virralle rinnakkaisia kulkureittejä maahan pienentäen näin pylvään kokonaisaalloimpedanssia [11]. Simuloinnit suoritettiin kuitenkin edellä lasketulla aaltoimpedanssilla, sillä se johtaa suurempiin eristinketjujen jänniterasituksiin ja siten enemmän turvallisuutta tuottavaan lopputulokseen.

Bergeron-malliin syötettävä kolmas parametri, kulkuaika pituutta kohti laskettiin yksinkertaisesti aallon kulkunopeuden käänteislukuna:

$$t_t = 1/v, \quad (12)$$

missä t_t on aallon kulkuaika pylväessä ja v on aallon kulkunopeus. Kun aallon nopeudeksi oletettiin valonnopeus, saatiin kulkuajaksi pituutta kohti $3,34 \cdot 10^{-9}$ s/m.

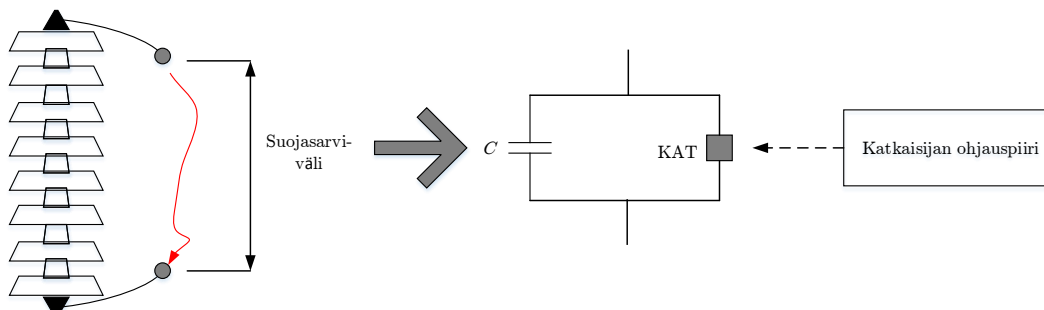
PSCAD:ssa mallinnettu pylväk on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 17, jossa näkyy lisäksi eristinketjujen mallit sekä pylväsmadoituskomponentti.



Kuva 17: PSCAD:ssa toteutettu voimajohtopylvään malli eristinketjuilla ja pylväsmadoituksella varustettuna.

5.3.2 Eristinketjut

Eristinketjujen mallintaminen on tärkeää, jotta voidaan simuloida takaiskuja eli eristinketjujen ylilyönnejä pylväistä vaihejohtimiin. Yleisesti käytössä oleva menetelmä on mallintaa eristinketjut kondensaattorin ja katkaisijan rinnankytkentänä [42], kuten kuvissa 17 ja 18.



Kuva 18: Eristinketjun mallintaminen kondensaattorin ja katkaisijan rinnankytkentänä. Katkaisijaa ohjataan erillisellä logiikkapiirillä.

Kuvan 18 kondensaattorin tehtävä on mallintaa eristinketjun kapasitanssia, joka kuvaa vaihejohtimen ja pylväsrakenteen sähköistä kytkeytymistä. Tyypillinen kapasitanssiarvo lautaseristimistä koostuvalle eristinketjulle on 80 pF/lautanen [42]. Suomessa 110 kV:n eristinketjuissa on yleensä noin 7 lautaseristintä kytkettynä sarjaan [1, s. 274]. Näin ollen koko eristinketjua vastaava kapasitanssi on $80 \text{ pF}/7 = 11,4 \text{ pF}$.

Normaalitilanteessa eristinketjun mallissa oleva ideaalinen katkaisija on auki-tilassa eli vastaa täysin avointa piiriä. Pylväeseen tai ukkosjohtimiin osuva salamanku aiheuttaa iskupaikkaa lähellä olevissa pylväissä potentiaalinosun, mikä voi tietyllä hetkellä johtaa ilman jännitelujuuden ylittymiseen eristinketjun suojarvien välissä. Tällöin katkaisija ohjataan kiinni-tilaan, jolloin salamavirta alkaa kulkea pylvästä vaihejohtimeen.

Suojasarvivälin jännitelujuuden mallintamiseen on useita erilaisia menetelmiä, kuten yksinkertainen jännite-aika-ominaiskäyrä (v - t -ominaiskäyrä), integroimismenetelmä ja leader-purkaus-malli [11, 42]. Tässä työssä eristinketjun ylilyönnin mallintamiseen käytettiin yksinkertaista jännite-aika-ominaiskäyrää, jota kuvaa yhtälö

$$V_{v-t} = K_1 + \frac{K_2}{t_s^{0,75}}, \quad (13)$$

missä V_{v-t} (kV) on eristinketjun ylilyöntijännite, t_s (μs) on salamankusta kulunut aika ja kertoimet K_1 ja K_2 määritellään yhtälöistä

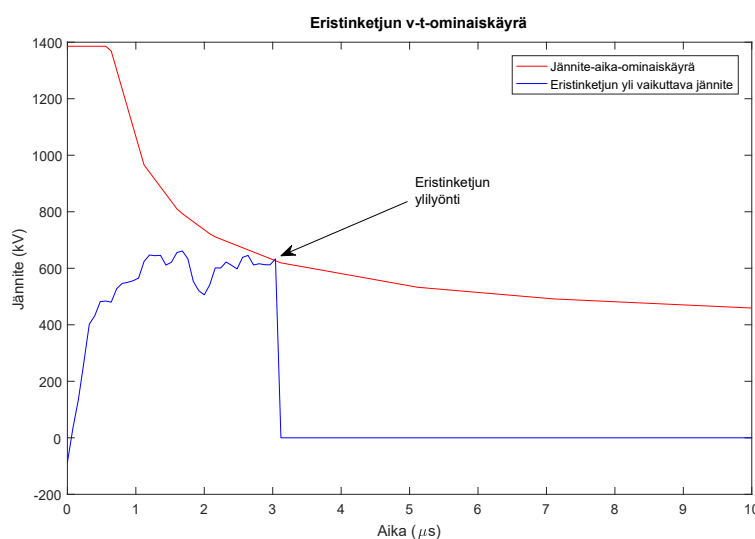
$$K_1 = 400 l_{\text{ketju}} \quad (14)$$

$$K_2 = 710 l_{\text{ketju}}, \quad (15)$$

missä l_{ketju} (m) on suojarvien välinen etäisyys [42]. Suojarvien välisellä etäisyydellä on annettu Fingridin teknisessä eritelmässä arvot 0,87 m kannatusketjuille

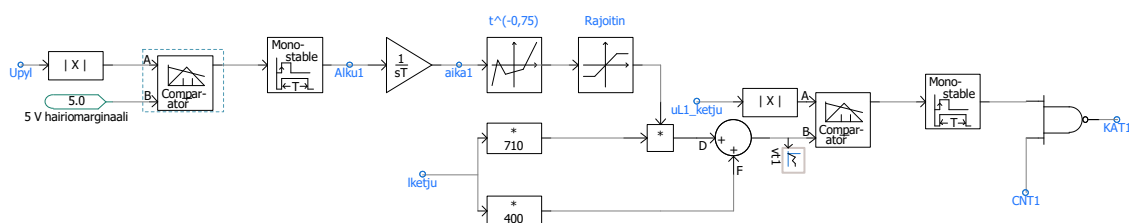
ja 1,0 m kiristysketuille [48]. Tässä työssä kiristysketjun suojarviväliä käytettiin ainoastaan pylväällä 1 ja muilla pylväillä käytettiin arvoa 0,87 m.

Yhtälö (13) perustuu havaintoihin siitä, että läpilyöntiin kaasussa vaaditaan aina tietty aika. Tästä johtuu, että pulssimaisilla ylijännitteillä ylilyönnit tapahtuvat sitä aikaisemmin, mitä suurempi on pulssin amplitudi [6, s. 105]. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 19, jossa on esitetty 0,87 metrin suojarvivälillä varustetun 110 kV:n kannatusketjun v-t-ominaiskäyrä. Kuvaan on piirretty eristinketjun yli vaikuttava jännite, kun pylvääseen kohdistettiin 100 kA:n 8/20 μ s syöksyvirtapulssi. Kun ketjun yli vaikuttava jännite ja v-t-ominaiskäyrä kohtaavat, tapahtuu eristinketjun ylilyönti ja ketjun yli vaikuttava jännite tippuu nolnaan. V-t-ominaiskäyrän muodosta on selvästi havaittavissa, että eristinketjun yli vaikuttavan jännitteen amplitudin pitää olla paljon suurempi, jotta ylilyönti voisi tapahtua aikaisemmin kuin kuvaan 19 merkitty ylilyönti.



Kuva 19: 110 kV:n eristinketjun jännite-aika-ominaiskäyrä ja ylilyönti.

Ylilyöntien toimintalogiikka toteutettiin PSCAD:ssa soveltamalla yhtälöä (13) katkaisijan ohjauspiirissä, joka on esitetty kuvassa 20. Tällainen ohjauspiiri toteutettiin jokaiselle vaiheelle jokaisen pylväsmallin sisällä. Ohjauspiiri perustuu PSCAD:n sovellusohjeessa esitettyyn malliin [49].



Kuva 20: PSCAD:ssa toteutettu eristinketjun ylilyöntin ohjauslogiikka.

Kuvan 20 piirin toiminta alkaa siitä, kun Comparator-komponentti havaitsee pylvään potentiaalin nousevan yli 5 V:n häiriömarginaalin, mikä tarkoittaa salaman iskeneen pylvääseen tai sen lähistölle. Tällöin Comparator-komponentin ulostulo saa arvon 1 ja Monostable-komponentti ylläpitää tätä arvoa 1 sekunnin ajan. Integraattori, jonka aikavakio on 1 μ s, käynnistyy ja alkaa laskemaan aikaa, kun siihen saapuu nollasta poikkeava signaali. Seuraavaksi aikasignaali kulkee epälineaariseen siirtofunktiokomponentin sisäänmenoon, jonka ulostulona on yhtälön (13) $t_s^{-0,75}$ -tekijä. Siirtofunktiokomponentin karakteristiikka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Epälineaarisen siirtofunktion karakteristiikka. x_t on integraattorilta tuleva aika ja komponentista ulostuleva arvo y_t vastaa yhtälön (13) tekijän $t_s^{-0,75}$ arvoa. Mikäli komponenttiin sisään tuleva arvo osuu kahden x_t -arvon väliin, interpoloidaan ulostulon arvo lineaarisesti näiden kahden x_t -arvon väliltä.

x_t	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	50,0
y_t	3,34	1,68	1,0	0,738	0,594	0,439	0,299	0,232	0,178	0,053

Siirtofunktiokomponentin ulostulon signaali kulkee rajoittimeen, jolla arvot rajoitetaan korkeintaan arvoon 1,68, minkä jälkeen signaali saapuu piirin seuraavaan lohkon, jossa lasketaan ylilyöntijännite V_{v-t} yhtälön (13) mukaisesti. Tämän jälkeen laskettua jännitettä verrataan eristinketjun yli vaikuttavaan jännitteeseen. Mikäli eristinketjun yli vaikuttava jännite on suurempi kuin laskettu ylilyöntijännite, lähtee toisesta Comparator-komponentista nollasta poikkeava signaali toisen Monostable-komponentin läpi AND-portille. Jos käyttäjä on lisäksi sallinut takaiskun (ylilyönnin) tapahtumisen eli kuvan 20 signaalin CNT1 arvo on 1, on AND-portin ulostulo 0 (ulostulo käännetty 1:stä nollaksi). Tällöin ylilyöntiä mallintava katkaisija ohjautuu kiinni eli oikosulkee vaihejohtimen pylvääseen.

On huomattava, että jännite-aika-ominaiskäyrien käyttämiseen jännitelujuuden määrittämisessä liittyy paljon epävarmuutta. Ne esimerkiksi soveltuvat hyvin jännitelujuuden määrittämiseen standardimuotoisilla salamasyöksyjännitteillä, mutta tästä ei voi päätellä jännitelujuutta ei-standardimuotoisilla jännitteillä. Myöskään ilmavälin ylilyönti ei välttämättä todellisuudessa tapahdu juuri silloin, kun ilmavälin yli vaikuttava jännite ylittää jännite-aika-ominaiskäyrän arvon. [42] Tässä työssä käytetty jännite-aika-ominaiskäyrä kuitenkin todennäköisesti johtaa suuruusluokaltaan oikeisiin ylijännitteisiin GIS-kojeistossa, vaikka takaiskun ajoitus ja muut ominaisuudet eivät täysin vastaisikaan todellisuutta. Takaiskun tarkempi mallinnus vaatisi käytännössä suojarvivälin valokaariprosessin mallintamista leader-purkas-mallilla [11, 42], mutta tällaisen mallin rakentaminen olisi melko työlästä eikä sen vaikutus simulointimalliin kokonaisuutena olisi todennäköisesti kovinkaan merkittävä.

5.3.3 Pylväsmaadoitukset

Kuten aikaisemmin todettiin, pylväsmaadoituksilla on erittäin suuri vaikutus takaiskujen todennäköisyyteen. Tämän vuoksi niiden mallintaminen mahdollisimman

tarkasti on tärkeää. Tässä työssä jokaisen pylväskomponentin juureen liitettiin oma malli maadoitusvastukselle.

Pylväiden maadoitusresistanssi ei ole vakio, vaan riippuu pylvään ja sen maadoitusvastuksen läpi kulkevan virran suuruudesta. Resistanssi on sitä pienempi, mitä suurempi virta maahan kulkee. Tämä johtuu siitä, että maaperä ionisoituu tietyn kriittisen kentänvoimakkuuden ylittyessä. Tällaista maadoitusvastuksen läpi kulkevasta virrasta riippuvaa resistanssia kuvaa yhtälö

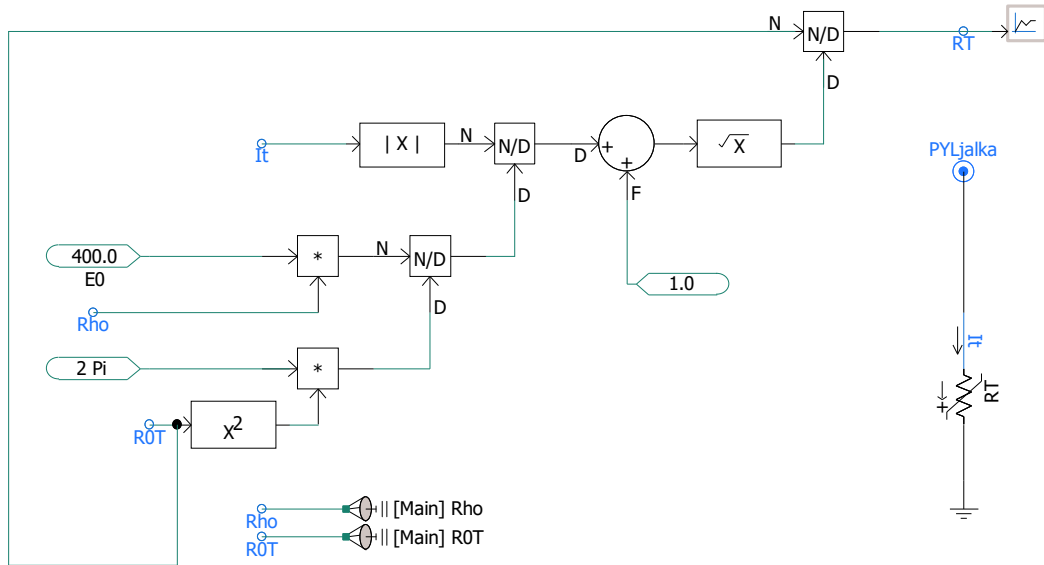
$$R_T = \frac{R_{0,T}}{\sqrt{1 + \frac{i_T}{i_g}}}, \quad (16)$$

missä $R_{0,T}$ on pylvään maadoitusresistanssi pienellä virralla ja taajuudella mitattuna, i_T on pylvään ja maadoitusvastuksen läpi kulkeva virta ja i_g on niin sanottu ionisoitumiseen johtava virta, joka puolestaan lasketaan yhtälöllä

$$i_g = \frac{E_0 \rho_m}{2\pi R_{0,T}^2}, \quad (17)$$

missä E_0 on maan ionisoitumiseen johtava kentänvoimakkuus, jolle käytettiin tässä työssä arvoa 400 kV/m, ja ρ_m on maan ominaisresistanssi. [11]

Pylväsmaadoitukset mallinnettiin PSCAD:ssa säädettävänä vastuksina, joiden resistansseja säätää yksinkertainen, yhtälöihin (16) ja (17) perustuva laskentapiiri. Se laskee maadoitusresistanssin arvon jokaisella simuloinnin aika-askeleella. Pylvään maadoitusvastuksen malli on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21: PSCAD:ssa toteutettu pylväσμαadoituksen malli.

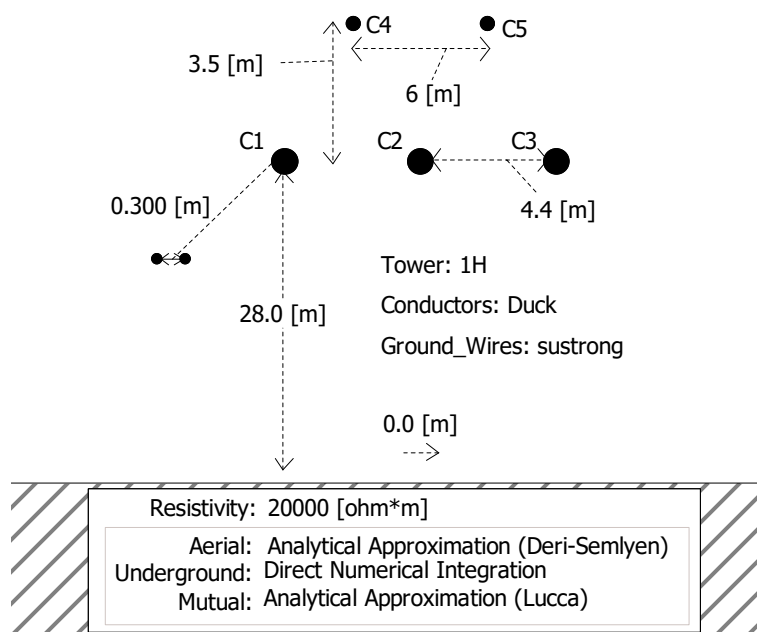
Maan ominaisresistanssi on Suomessa tyypillisesti erittäin korkea vaihdellen kuitenkin savimaan 40 Ω m:n ja graniittikallion 20000 Ω m:n välillä [1, s. 432]. Koska

vaihtelevuus maan ominaisresistanssin osalta on niin suurta, suoritettiin varsinaiset simuloinnit pahimman tilanteen mukaan eli käytettiin arvoa $20000 \Omega\text{m}$. Maan ominaisresistanssille tehtiin lisäksi herkkyystarkastelu, jolla tutkittiin sen vaikutusta GIS-laitoksella esiintyviin ylijännitteisiin.

Maan ominaisresistanssin suuren vaihtelevuuden seurauksena myös pylväiden maadoitusresistanssit vaihtelevat suuresti ja voivat olla suuruudeltaan jopa useita satoja ohmeja [50]. Asemien lähellä, noin 10 pylvään laajuudella, voimajohtopylväät pyritään kuitenkin maadoittamaan mahdollisimman hyvin [1, s. 445]. Fingridin omaisuusrekisterin tietojen mukaan enintään 2 km:n etäisyydellä kantaverkon sähköasemista pylväsresistanssien keskiarvo on noin 50Ω . Lisäksi noin 95 % pylväsmaadoitusten resistansseista on alle 200Ω :a ja noin 50 % on alle 20Ω :a [50]. Varsinaiset simuloinnit suoritettiin resistanssien keskiarvoalla 50Ω , mutta myös tälle parametrille suoritettiin herkkyystarkastelu käyttäen resistanssiarvoja väliltä $20\text{--}200 \Omega$.

5.4 Avojohdot

Kaikki avojohdot mallinnettiin käyttäen PSCAD:n taajuusriippuvaa voimajohtomallia. Mallinnus suoritettiin tarkastelun kohteena olevalle avojohdolle (johto A) siten, että jokainen jänne mallinnettiin omana voimajohtonaan. Kahden jännteen väliin pystytettiin siten lisäämään pylvälle oma malli. GIS-laitokseen liittyvä toinen voimajohto (johto B) mallinnettiin ainoastaan yhtenä jännteenä ilman erillisiä pylväs-komponentteja. Kuvassa 22 on esitetty tämän työn simuloinneissa käytetty avojohdomalli.



Kuva 22: PSCAD:n taajuusriippuva avojohdomalli.

Taajuusriippuvalle avojohdon mallille syötettiin seuraavat parametrit:

- johdon geometria eli johdinten ripustuskorkeudet ja etäisyydet toisistaan (katso kuvat 16 ja 22),
- johdinten ominaisuudet eli säteet, resistanssit ja suhteelliset permeabiliteetit,
- johdon pituus,
- johdinten riippuma jänteen keskikohdassa ja
- maaperän resistiivisyys.

Simuloinneissa käytettiin avojohtojen virtajohtimina kahdesta, toisistaan 0,3 m:n etäisyydellä olevasta, osajohtimesta koostuvaa 2-Duck ACSR -johdinta ja ukkosjohtimina Sustrong AACSR -johdinta. Nämä johdinlajit valittiin, koska ne edustuvat merkittävää osaa kantaverkon johdinlajeista ja pääsääntöisesti kakki uudet kantaverkon 110 kV:n avojohdot pyritään rakentamaan niitä käyttäen [51]. Taulukkoon 2 on koottu tarvittavia johdinominaisuuksia Duck- ja Sustrong-johtimille.

Taulukko 3: Simuloinneissa käytettyjen johdinten ominaisuuksia [50].

Johdin	DC-resistanssi (Ω/km)	Säde (m)	Suhteellinen permeabiliteetti
Duck	0,096	0,01205	1,0
Sustrong	0,308	0,0074	1,0

Kantaverkossa sähköasemalla sijaitsevien portaalipylväiden ja varsinaisten asemalta katsottuna ensimmäisten avojohtopylväiden väliset jänneet ovat tavallisesti lyhyempiä kuin johtojen muut jänneet. Keskimäärin tällaiset jänneet ovat noin 130 m pitkiä, kun taas muut jänneet ovat pituudeltaan keskimäärin 250 m [50]. Tämän vuoksi simuloinneissa johdon A ensimmäisen jänteen pituudeksi asetettiin 130 m ja muiden jänneiden pituudeksi 250 m. Myös johdon B ainoan jänteen pituudeksi valittiin 250 m.

Virta ja ukkosjohtimien riippumat jänteen keskikohdassa laskettiin yhtälöllä

$$f_c = \frac{m_c g s_c^2}{8A_c \sigma_H}, \quad (18)$$

missä m_c on johtimen massa pituutta kohti, g on putoamiskiihtyvyys, s_c on jänteen pituus, A_c on johtimen poikkipinta-ala ja σ_H on jänteen kiristysvoima [1, s. 292]. Taulukon 4 arvoilla ja yhtälöllä (18) johdon A ensimmäisen jänteen keskikohdan riippumaksi ukkosjohtimille saatiin 1,9 m ja virtajohtimille 2,3 m. Muiden jänneiden virtajohtimille saatiin riippumaksi 4,3 m ja ukkosjohtimille 3,5 m.

Taulukosta 4 havaitaan, että johdon A ensimmäinen jänne on kiristetty pienemmillä kiristysvoimilla kuin muut jänneet. Tämä on yleinen käytäntö telinepylväisin

liittyvillä jänteillä. Todellisuudessa riippumat saattavat olla jonkin verran suuremmat kuin yhtälöllä (18) lasketut, sillä johtimet venyvät jonkin verran lämmitessään.

Taulukko 4: Johtimien riippumalaskennan parametrit johdon A ensimmäiselle jännteelle sekä muille mallissa käytetyille jännteille [50].

Jänne	Johdin	σ_H (N/mm ²)	A_c (mm ²)	s_c (m)	m_c (kg/m)
1. Jänne	Virtajohtimet	30	344	130	1,151
1. Jänne	Ukkosjohtimet	40	131	130	0,486
Muut jänteet	Virtajohtimet	60	344	250	1,151
Muut jänteet	Ukkosjohtimet	80	131	250	0,486

Sekä johto A että johto B päätettiin johtimien aaltoimpedansseja vastaavilla resistansseilla, jotka estävät johtimia pitkin etenevien kulkuaaltojen heijastumiset johtojen päistä [16, s. 156]. Johdon A viimeisen jännteen impedanssi- ja admittanssimatriisi ratkaistiin PSCAD:n line constants -ohjelmalla. Matriisien diagonaalien reaktanssi- x_c ja susceptanssiarvoista b_c laskettiin ukkos- ja virtajohtimille häviöttömän johtimen aaltoimpedanssit Z_w yhtälöllä (2). Lisäksi johdon A ukkosjohtimet päätettiin 1 ohm:n vastuksilla sähköaseman päädyssä. Sama laskenta suoritettiin myös johdolle B, mutta koska sillä käytettiin ukkosjohtimien matemaattista eliminointia, poikkeavat sen aaltoimpedanssiarvot johdon A vastaavista, vaikka kummankin johdon rakenne on sama. Johdon B ukkosjohtimia ei siten tuotu näkyviin, jolloin niitä ei myöskään tarvinnut päättää aaltoimpedansseilla. Kummankin johdon aaltoimpedanssit, reaktanssit ja susceptanssit on esitetty taulukossa 5.

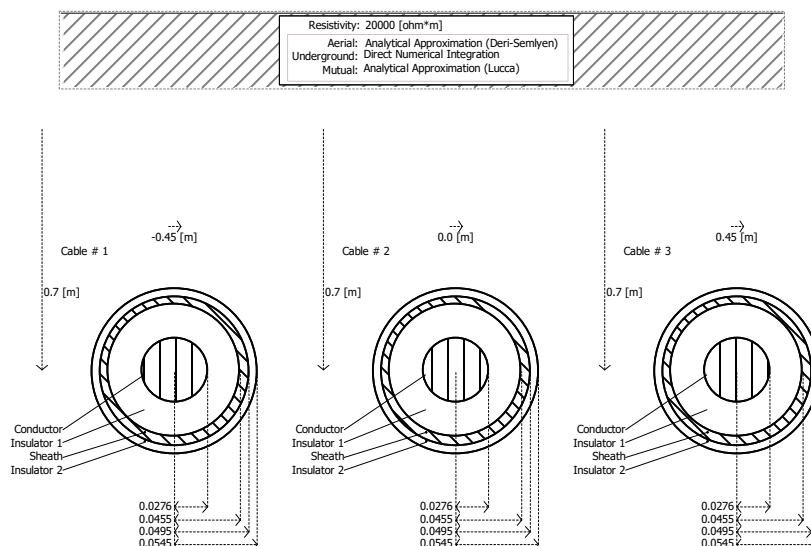
Taulukko 5: Johtojen A ja B virta- ja ukkosjohtimien PSCADilla ratkaistut itseisimpedanssien ja -admittanssien imaginääriosat (reaktanssit ja susceptanssit) sekä niistä lasketut aaltoimpedanssit.

Johto	Johdin	x_c (Ω/m)	b_c (S/m)	Z_w (Ω)
Johto A	Virtajohtimet	$0,621 \cdot 10^{-3}$	$0,327 \cdot 10^{-8}$	436
Johto A	Ukkosjohtimet	$0,761 \cdot 10^{-3}$	$0,233 \cdot 10^{-8}$	571
Johto B	Virtajohtimet	$0,431 \cdot 10^{-3}$	$0,329 \cdot 10^{-8}$	362

Jokaisen avojohtokomponentin maan ominaisresistanssina käytettiin aina samaa arvoa kuin pylväsmaadoituksilla eli 20000 Ωm varsinaisissa simuloinneissa.

5.5 Kaapelit

Simulointimallissa käytettiin yhteensä kolmea kaapelia GIS-laitoksen ja avojohtojen sekä muuntaajan välillä. Ne mallinnettiin yksivaiheisina koaksiaalikaapeleina PSCAD:n taajuusriippuvaa kaapelimallia käyttäen. Kaapelit asetettiin maahan 0,7 m:n syvyyteen 0,45 m:n etäisyydelle toisistaan, kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 23: PSCADin taajuusriippuva kaapelimalli ja kaapelien mitat.

Mallinnettavaksi kaapeliksi valittiin erään valmistajan 2000 mm²:n kuparikaapeli, jollaisia käytetään paljon kantaverkon GIS-laitosten liittynnoissä [47]. Kaapelista ei mallinnettu jokaista kerrosta, vaan vain kaikkein oleellisimmat salamaylijännitetarkestelun osalta. Mallinnetut kerrokset ovat kuparijohdin, XLPE-eristys (cross-linked polyethylene, ristosilloitettu polyeteeni), lyijyvaippa ja HDPE-ulkovaippa (high density polyethylene, suuritiheyspolyeteeni). Kerrokset mittoineen näkyvät kuvassa 23, ja taulukossa 6 on esitetty niiden sähköiset arvot.

Taulukko 6: Kaapelikerrosten sähköiset arvot. Eristeiden suhteelliselle permittiivisyydelle käytetty polyeteenin arvoa. [52].

Kerros	ϵ_r	μ_r	Resistiivisyys (Ωm)
kuparijohdin	-	1,0	$1,678 \cdot 10^{-8}$
XLPE-eriste	2,3	1,0	-
lyijyvaippa	-	1,0	$20,65 \cdot 10^{-8}$
HDPE-eriste	2,3	1,0	-

GIS-laitoksen ja muuntajan sekä avojohdon B välisten kaapeleiden pituudeksi asetettiin 100 m. Myös avojohdon A ja GIS-laitoksen välisen kaapelin pituudeksi asetettiin 100 m varsinaisissa simuloinneissa. Kaapelin pituudelle tehtiin lisäksi herkkyytarkastelu pituuksilla 0–2000 m. Jokaisen kaapelikomponentin maan ominaisresistanssille käytettiin samaa arvoa kuin pylväasmaadoituksilla ja avojohdoilla.

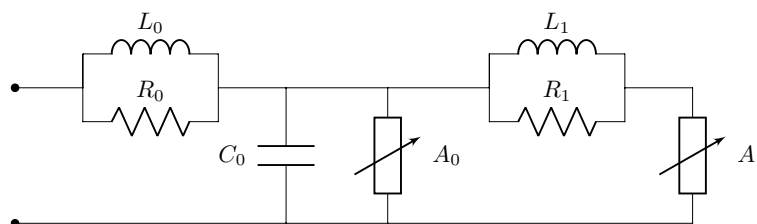
5.6 Muuntajat ja jännitelähteet

Salamaylijännitetutkimuksissa muuntajat suositellaan mallintamaan avoimena piirinä kaikkein konservatiivisimman tuloksen saavuttamiseksi. Mallinnuksen tarkkuutta voidaan kuitenkin parantaa ottamalla huomioon muuntajan käämien kapasitanssit maata vasten [16, s. 160]. Kantaverkon 400 MVA:n tehomuuntajien 110 kV:n käämien kapasitanssien havaittiin vaihtelevan yleensä välillä 5–6 nF/vaihe [47]. GIS-laitokseen liittyvä muuntaja mallinnettiin siten maan ja vaiheiden välisinä kondensaattoreina, joiden kapasitansseiksi valittiin 5,5 nF.

Jännitelähteinä käytettiin PSCAD:n ideaalisia 50 Hz:n 3-vaiheisia jännitelähdekomponentteja, jotka syöttävät verkkoon suurimman käyttöjännitteen 123 kV. Jännitelähteet sijoitettiin sekä johdon A että johdon B päähän. Lisäksi jännitelähteisiin asetettiin vaihesiirrot, jotta salamaniskut pystyttiin kohdistamaan vaihejännitteen negatiivisen tai positiivisen huippuarvon kohdalle.

5.7 Ylijännitesuojat

Ylijännitesuojan mallinnuksessa tulee ottaa huomioon suojan dynaamiset ominaisuudet, joilla on erittäin suuri merkitys jyrkkien ylijännitetransienttien tapauksessa. Ylijännitesuojien jäännösjännite nimittäin riippuu suojan läpi kulkevan virran riittäosan jyrkkyydestä. Mitä jyrkempi virtapulssi on, sitä suurempi on suojan yli vaikuttava jäännösjännite. Lisäksi jäännösjännite saavuttaa todellisuudessa huippuarvonsa ennen virtapulsseja. Näin ollen ylijännitesuojan jäännösjännite ei ole ainoastaan virran huippuarvon vaan myös virran jyrkkyyden funktio. Näitä ylijännitesuojan niin sanottuja taajuusriippuvia ominaisuuksia ei siten ole mahdollista mallintaa pelkästään epälineaarisen vastuksen jännite-virta-ominaisuuksilla. [53] Tämän vuoksi mallintamiseen ei voida käyttää pelkästään PSCAD:n omaa ylijännitesuojan mallia, koska se on käytännössä epälineaarinen vastus, jolle syötetään ainoastaan oikean ylijännitesuojan jännite-virta-ominaiskäyrän arvot.



Kuva 24: Taajuusriippuvan ylijännitesuojan malli [53, muokattu].

Virtapulssin taajuudesta eli jyrkkyydestä riippuvia ylijännitesuojamalleja on kehitetty useita. Viime vuosina eniten käytössä ovat olleet IEEE-malli [53] ja sen pohjalta kehitetyt Pinceti-malli [54] ja Fernández-Díaz-malli [55]. Kaikki kolme mallia ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia, mutta niiden parametrien määrittämisessä on joitakin eroja. Tässä diplomityössä ylijännitesuojat mallinnettiin IEEE-työryhmän kehittämällä mallilla, joka on esitetty kuvassa 24.

Ylijännitesuojan malli rakentuu kahdesta epälineaarista vastuksesta, kondensaattorista sekä kahdesta RL-suodattimesta. Ensimmäisen induktanssin L_0 tarkoituksena on mallintaa magneettikenttä ylijännitesuojan välittömässä läheisyydessä. Vastus R_0 puolestaan parantaa numeerisen integroinnin stabiiliutta ja kondensaattori C_0 kuvaa ylijännitesuojan kapasitanssia sen terminaalien välillä. Mallin oleellisin komponentti, epälineaaristen vastusten A_0 ja A_1 ohella, on kuitenkin vastuksesta R_1 ja induktanssista L_1 koostuva suodatin. Loivempi rintaisilla virtapulsseilla suodatin näkyy pienenä impedanssina, jolloin epälineaariset vastukset ovat käytännössä rinnakkain, mikä johtaa pienempään suojan yli vaikuttavaan jännitteeseen. Jyrkempi reunaisilla virroilla suodattimen impedanssi puolestaan näkyy suurempana induktanssin L_1 takia, jolloin suurin osa purkausvirrasta kulkee epälineaarisen vastuksen A_0 kautta. Epälineaarinen vastus A_0 näkyy suurempana vastuksena kuin A_1 samalla virralla, minkä seurauksena jyrkkä reunaisilla virta-aalloilla suojan yli vaikuttaa suurempi jännite. [53]

Alkuarvot mallin komponenteille lasketaan yhtälöistä

$$R_0 = 100 \, d/n \, (\Omega) \quad (19)$$

$$L_0 = 0,2 \, d/n \, (\mu\text{H}) \quad (20)$$

$$C_0 = 100 \, n/d \, (\text{pF}) \quad (21)$$

$$R_1 = 65 \, d/n \, (\Omega) \quad (22)$$

$$L_1 = 15 \, d/n \, (\mu\text{H}) \quad (23)$$

missä n on rinnakkaisten metallioksidipilareiden lukumäärä ja d on ylijännitesuojan korkeus metreinä [53]. Viitteessä [53] esitettyjä epälineaaristen vastusten jännite-virta-käyriä ei ole mahdollista käyttää PSCAD:ssa, sillä ne eivät täytä ohjelman vaatimusta epälineaarisen vastuksen peräkkäisten linearisointisegmenttien jyrkkyyksistä. Taulukkoon 7 on sen sijaan poimittu toisesta lähteestä PSCAD:lle soveltuvat epälineaaristen vastusten jännite-virta-ominaiskäyrien pisteet.

Taulukko 7: Epälineaaristen vastusten A_0 ja A_1 jännite-virta-ominaiskäyrien arvot [49].

Virta (kA)	A_0 , jännite (pu)	A_1 , jännite (pu)
0,01	1,42	1,18
0,1	1,52	1,22
1	1,65	1,32
3,816	1,75	1,40
10	1,9	1,55
100	3,8	1,95

Taulukon 7 arvot syötettiin PSCAD:n ylijännitesuoja- eli epälineaarinen vastus-komponenteille, jotka muuttavat pu-arvot todellisiksi jännitteiksi kertomalla ne

skaalaustekijällä

$$V_{\text{ref}} = U_{10}/1,6, \quad (24)$$

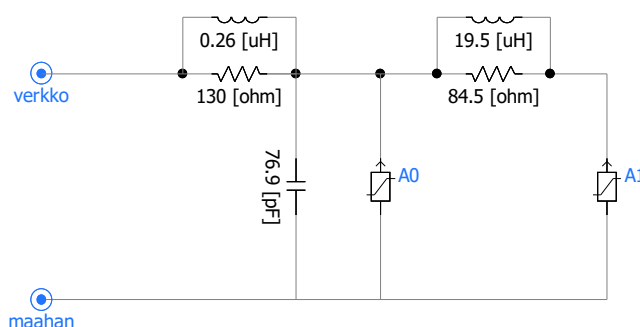
missä U_{10} on suojan yli vaikuttava jännite 10 kA syöksyvirtapulsilla (8/20 μs) [49,53].

Mallinnettavaksi ylijännitesuojaksi valittiin ABB:n PEXLIM R132-YV123 -tyyppinen ulkokytkinlaitokselle asennettava metallioksidisuoja, koska se on ominaisuuksiltaan tyypillinen 110 kV:n GIS-laitoksen ylijännitesuojauksessa ja siitä oli saatavissa riittävät tiedot julkisista lähteistä. Kyseinen suoja sisältää vain yhden metallioksidipilarin, on noin 1,3 metriä korkea ja sen U_{10} -arvo on 342 kV [21]. Näiden tietojen perusteella taulukkoon 8 on laskettu alkuarvot ylijännitesuojamallin parametreille yhtälöillä (19–24).

Taulukko 8: Ylijännitesuojamallin parametrien alkuarvot.

Parametri	Alkuarvot
R_0	130 Ω
R_1	84,5 Ω
L_0	0,26 μH
L_1	19,5 μH
C_0	76,9 pF
V_{ref}	213,8 kV

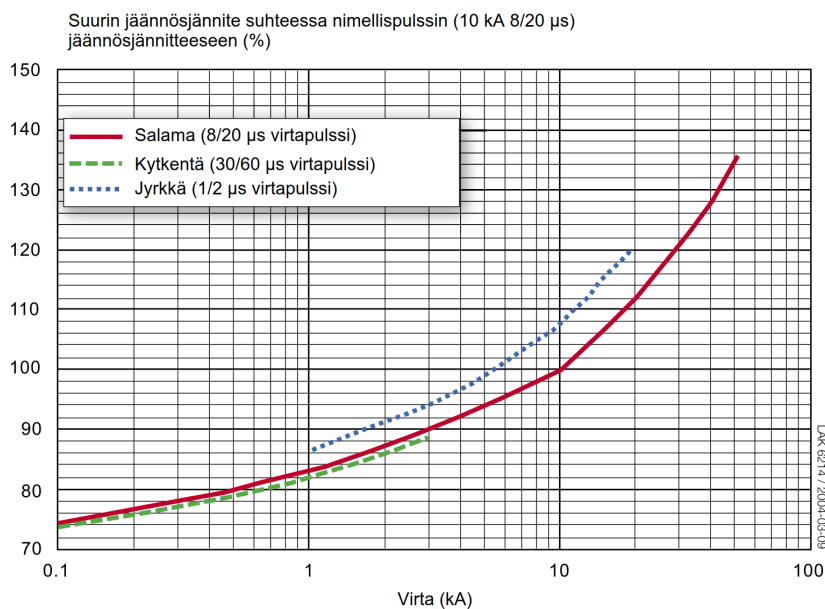
Kuvassa 25 on esitetty PSCAD:lla toteutettu ylijännitesuojan malli. Taulukossa 9 puolestaan on esitetty tällä mallilla simuloitujen ylijännitesuojan yli vaikuttavat jännitteet eli jäännösjännitteet erilaisilla virtapulsseilla. Siihen on lisäksi merkitty PEXLIM R -tyyppisen ylijännitesuojan todelliset jäännösjännitteet, jotka on poimittu kuvasta 26, ja laskettu simuloitujen ja todellisten arvojen välinen virhe. Kuten taulukon arvoista havaitaan, mallin virheet jäävät melko pieniksi ja toisaalta niistä suurimmat ovat positiivisia eli suojan jäännösjännite on näissä tapauksissa suurempi kuin todellisuudessa, mikä johtaa enemmän turvallisuutta tuottavaan lopputulokseen.



Kuva 25: PSCAD:ssa toteutettu, IEEE-malliin perustuva taajuudesta riippuva ylijännitesuojan malli.

Taulukko 9: Simuloidut ja valmistajan ilmoittamat jäännösjännitteet syöksyvirtapulsilla ($8/20 \mu\text{s}$) ja jyrkällä virtapulsilla ($1/2 \mu\text{s}$). pu-arvot on muunnettu kilovolteiksi kertomalla ne tarkastelussa olevan ylijännitesuojan jäännösjännitteellä 342 kV, mikä saavutetaan suojan nimellisyyöksyvirtapulsilla (10 kA $8/20 \mu\text{s}$).

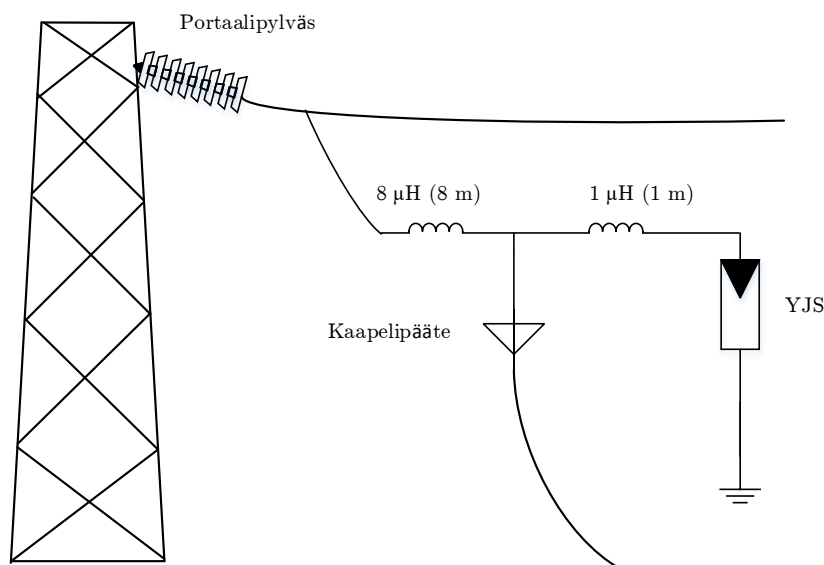
	Huippuvirta (kA)	Valmistajan ilmoittama jännite (pu)	Valmistajan ilmoittama jännite (kV)	Simuloitu jännite (kV)	Virhe (%)
8/20 μs -pulsssi	1	0,83	283,86	282,23	-0,6
	3	0,897	306,77	298,50	-2,7
	5	0,935	319,77	313,10	-2,1
	7	0,964	329,69	326,95	-0,8
	10	1,00	342,00	343,97	0,6
	20	1,12	383,04	379,57	-0,9
	30	1,21	413,82	405,13	-2,1
	40	1,28	437,76	428,25	-2,2
	50	1,35	461,70	451,32	-2,2
1/2 μs -pulsssi	1	0,86	294,12	297,93	1,3
	3	0,94	321,48	333,95	3,9
	5	0,985	336,87	353,95	5,1
	7	1,03	352,26	361,10	2,5
	10	1,075	367,65	373,64	1,6
	20	1,21	413,82	403,90	-2,4



Kuva 26: ABB:n PEXLIM R -tyyppisen ylijännitesuojan jännite-virta-ominaiskäyrät erilaisilla virtapulsseilla [57, muokattu].

On huomattava, että ylijännitesuojalle laskettavien parametrien alkuarvoilla mallin ominaisuudet eivät aina vastaa todellisen ylijännitesuojan käyttäytymistä riittävän hyvin [53]. Sen vuoksi komponenttien arvoja pitää usein säätää sopivammiksi. Paremmat arvot voi löytää joko kokeilemalla tai käyttämällä jotain erityistä algoritmia kaikkein optimaalisimpien arvojen löytämiseksi. Yksi esimerkki optimointialgoritmistä on kuvailtu viitteessä [56]. Tällaisen algoritmin toteuttaminen on kuitenkin suhteellisen työlästä. Tällä kertaa mallin alkuarvot johtivat kuitenkin riittävän tarkkaan lopputulokseen, joten parametreja ei tarvinnut viritellä.

Ylijännitesuojan mallissa tulee lisäksi ottaa huomioon suojan liitosjohtimet portaalipylvääseen ja kaapelipäätteeseen tai GIS-laitokseen. Ne mallinnettiin keskitetyillä induktansseilla siten, että liitosjohtimen yhtä metriä vastasi yksi μH [16, s. 161]. Kantaverkon olemassa olevien asennusten perusteella liitosjohtimen pituus kaapelipäätteen ja portaalipylvään välillä on noin 8 metriä ja kaapelipäätteen ja suojan välillä noin 1 metri. Tätä tilannetta on havainnollistettu kuvassa 27. Myös ylijännitesuojan maadoitusjohdin tulisi ottaa huomioon. Se päätettiin kuitenkin jättää pois, tämän työn tarkastelussa, koska simuloitaessa havaittiin, että suojan yli vaikuttava jännite kasvoi huomattavasti suuremmaksi kuin aikaisemmissa Fingridille tehdyissä ylijänniteselvityksissä. Tämän seurauksena GIS-laitoksen jännitelujuus ylittyi huomattavasti alhaisemmilla takaiskuvirroilla kuin aikaisemmissa selvityksissä. Syynä voi olla se, että taajuusriippuvan ylijännitesuojan malli sisältää jo valmiiksi paljon induktanssia, ja jos sitä lisätään entisestään suojan ja maan välille ei malli enää anna oikeanlaisia tuloksia.



Kuva 27: Ylijännitesuojaan liittyvien liitosjohtimien mallintaminen induktansseilla. Yksi metri liitosjohdinta vastaa 1 μH induktanssia.

Tapauksessa, jossa avojohto liittyy suoraan GIS-kojeistoon, ylijännitesuojan oletetaan sijaitsevan suoraan GIS-avojohto-liitoskohdan alapuolella. Tällöin ylijännitesuojan ja liitoskohdan välinen johdin mallinnettiin edelleen 8 metrin mittaisena.

Muuntajaliittymän tapauksessa liitosjohtimet mallinnettiin yksinkertaisuuden vuoksi samalla periaatteella kuin kaapelin välityksellä GIS-kojeistoon liittyvä avojohto.

5.8 Salamaniskujen generoiminen

Tässä luvussa esitetään simuloinneissa käytettyjen salamasyöksyvirtojen mallintaminen ja parametrit. Lisäksi määritetään suoriin salamaniskuihin sekä takaiskuihin liittyvät kriittiset virrat.

Simulointien yksinkertaistamiseksi jatkossa tarkastellaan ainoastaan negatiivisia maasalamoita. Positiivisten maasalamoiden tarkastelu voidaan jättää pois, koska ne ovat paljon harvinaisempia kuin negatiiviset maasalamat, kuten salamoita ja ukkosia käsitelleessä luvussa todettiin.

Mallinnusteknisistä syistä kaikki salamasyöksyvirrat on simuloitu positiivisina, mikä johtaa positiivisiin ylijännitekulkuaaltoiin. Todellisuudessa negatiivisten maasalamoiden virrat ja niistä aiheutuvat jännitetransientit olisivat negatiivisia, mutta kuvaajista tulee helpommin luettavia, kun jänniteaallot ovat positiivisia. Lisäksi ylijännitesuojan mallintaminen oli yksinkertaisempaa positiivisilla jännitteillä.

Jännitteiden ja virtojen polariteetin kääntämisellä ei ole vaikutusta simuloinneista saataviin lopputuloksiin, virrat ja jännitteet on vain ajateltava vastakkaismerkkisinä. Tätä tukee myös se seikka, että polariteettien kääntäminen vaikuttaisi olevan yleinen käytäntö tämän tyyppisissä salamaylijännitetarkasteluissa.

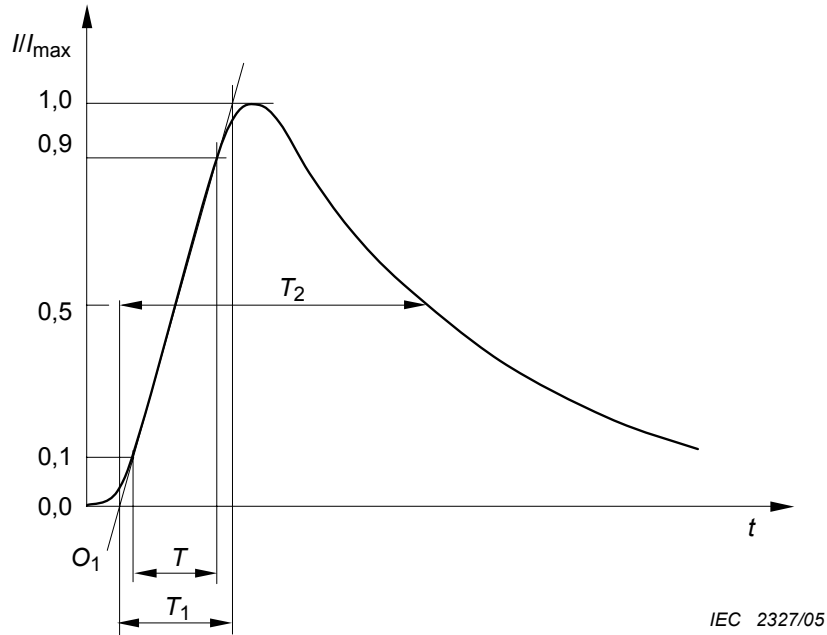
5.8.1 Syöksyvirtageneraattori

Salamaniskujen generointiin käytettiin PSCAD:n omaa syöksyvirtageneraattoria. Tällä komponentilla pystytään generoimaan sekä standardimuotoisia että niistä poikkeavia syöksyvirtapulseja. Käytännössä komponentin parametreiksi annetaan vain haluttu pulssin rinnan kestoaika T_1 , selän puoliarvonaika T_2 sekä salaman huippuvirran suuruus. Näiden lisäksi voidaan asettaa virtapulssin alkamisajanhetki.

Syöksyvirtapulssin selän puoliarvonaika määritellään ajaksi, kun pulssin selkäosa on laskenut 50 % pulssin huippuarvosta. Rinnan kestoajalle on puolestaan olemassa erilaisia määritelmiä. Tämän työn simuloinneissa käytetään seuraavaa määritelmää rinnan kestolle

$$T_1 = 1,25(T_{90} - T_{10}), \quad (25)$$

missä T_{10} vastaa aikaa, kun pulssi on saavuttanut 10 % huippuarvostaan ja vastaavasti T_{90} vastaa aikaa, kun pulssi on saavuttanut 90 % huippuarvostaan [58]. Näitä määritelmiä havainnollistaa kuva 28.



Kuva 28: Syöksyvirtapulssin rinnan kestoajan ja selän puoliarvonajan määritelmät [58].

Salamavirran jyrkkyyden on havaittu riippuvan virtapulssin huippuarvosta. Maksimijyrkkyyden ja virran huippuarvon välistä riippuvuutta kuvaavat yhtälöt

$$S_{m,1} = 3,9 i_{\max}^{0,55} \quad (26)$$

$$S_{m,2} = 3,8 i_{\max}^{0,93} \quad (27)$$

Näistä ensimmäinen pätee ensimmäisille salamapurkauksille ja jälkimmäinen seuraaville salamaiskuille eli osapurkauksille. Yhtälöihin sijoitetaan virran huippuarvo kiloampeeraina, jolloin jyrkkyyksien yksikkö on kA/ μ s. [59] Jyrkemmat virtapulssit ovat vaarallisempia, sillä ne aiheuttavat suuremmat ylijännitteet, kuten ylijännitesuojien yhteydessä todettiin. Tämän vuoksi tämän työn simuloinneissa käytettiin yhtälön (27) mukaista syöksyvirran jyrkkyyttä.

Lyhin syöksyvirtapulssin rinnan kestoaika puolestaan saadaan yksinkertaisesti yhtälöstä

$$T_1 = \frac{i_{\max}}{S_{m,2}} \quad (28)$$

5.8.2 Suorat salamaniskut

Suurin suoraan vaihejohtimiin iskevän salaman virta ratkaistiin luvussa 4.1 esitetyn sähkögeometrisen mallin, simuloinneissa käytetyn 1H-pylvään geometrian ja laskettujen johdinriippumien perusteella. Suurin suoran salamaniskun virta $i_{d,\max}$ on siten 11,1 kA. Tämän suuruisen salamavirran aiheuttama ylijänniteaalto ei kuitenkaan

todellisuudessa pysty etenemään vaihejohtinta pitkin, sillä se aiheuttaa ylilyönnin eristinketjun yli.

Niin sanottu kriittinen salamavirta eli suurin virta, joka ei aiheuta ylilyöntiä, määritellään yhtälöllä

$$i_{\text{cr}} = 2 \frac{U_{\text{cfo}}}{Z_{\text{w}}}, \quad (29)$$

missä Z_{w} on johtimen aaltoimpedanssi ja U_{cfo} on kriittinen ylilyöntijännite eli eristinketjun jännitelujuus [11]. Kriittiseen salamavirtaan vaikuttaa lisäksi vaihejännitteen arvo.

Tässä työssä kriittinen salamavirta määritettiin simuloimalla, koska kuten aikaisemmin todettiin eristinketjun jännitelujuus eli kriittinen ylilyöntijännite U_{cfo} riippuu muun muassa ylijännitteen muodosta. Pylvään 2 kohdalle kohdistettiin 0,38/140 μs -muotoisia salamaniskuja ja sallittiin ylilyönnin tapahtuminen luvussa 5.3.2 esitetyn eristinketjun ylilyöntimallin mukaisesti. Havaittiin että ylilyönti tapahtuu salamavirralla 4,48 kA ja sitä suuremmilla virroilla, kun vaihejännite on negatiivisessa huippuarvossaan. Positiivisella vaihejännitteen huippuarvolla ylilyönti tapahtuu pienemmällä salamavirralla, mutta kaikki suoran salamaniskun simuloinnit suoritettiin kriittisellä 4,47 kA:n virralla sekä positiivisen että negatiivisen vaihejännitteen huippuarvolla.

Salamatilastojen (kuva 8) perusteella suurin realistinen negatiivinen salamavirta i_{max} on 165 kA, sillä tilastossa ei ole esitetty tätä suurempia lukuja ja todennäköisyys tämän arvon ylittymiselle on vain noin 0,1 %. Tätä arvoa käyttäen suurimmaksi salamavirran jyrkkyydeksi $S_{\text{m},2}$ saadaan 438,6 kA/ μs yhtälöllä (27), ja tällä arvolla rinnan kestoajaksi T_1 saadaan 0,38 μs yhtälöllä (28). Selän puoliarvonajaksi T_2 valittiin IEC 60071 -standardin suosittelema 140 μs [60] ja tätä arvoa käytettiin kaikissa simuloinneissa.

Simuloinnit suoritettiin siten, että pylväiden 1–5 kohdalla avojohdon A ensimmäiseen vaiheeseen kohdistettiin salamasyöksyvirtapulssi. Salamaniskut ajoitettiin siten, että ne tapahtuvat joko vaihejännitteen negatiivisessa tai positiivisessa huipussa.

5.8.3 Takaiskut

Useimmissa aikaisemmissa ylijännitesuojaustarkasteluissa on tarkasteltu salamaniskuja vain 4–5 ensimmäiselle pylväälle. Yleensä oletetaan, että tätä kauempana tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet vaimenevat ja loivenevat muun muassa koronan vaikutuksesta sellaiselle tasolle, ettei niistä ole vaaraa GIS-laitokselle. Myöskään tässä työssä ei mallinnettu koronaa, vaan oletettiin että pylvästä 5 kauempana tapahtuvien takaiskujen synnyttämät kulkuvaallot ovat vaimentuneet sähköasemalle saapuessaan vaarattomiksi. Salamaniskut kohdistettiin siis vain pylväisiin 1–5, ja pylväät 6–7 toimivat ainoastaan heijastumiskohtina. Salamavirran rinnan kestoajana ja selän puoliarvonaikana käytettiin edellisessä luvussa määritettyjä arvoja.

Takaiskutarkastelut simuloitiin käyttäen kahta erilaista ylilyöntimekanismia. Ensimmäisessä simuloinnissa takaiskun sallittiin tapahtuvan vain sillä pylväällä, johon salamaisku kohdistettiin. Toisessa simuloinnissa sallittiin ylilyönnit ja takaiskut kai-

killä pylväillä. Jälkimmäisellä simulointikerralla pyrittiin ottamaan huomioon tilanne, jossa esimerkiksi pylväeseen 5 osuva salamanisku aiheuttaa takaiskun, minkä seurauksena kulkuaalto lähtee etenemään vaihejohtinta pitkin kohti sähköasemaa. Mikäli tämän kulkuaallon jännite on riittävän suuri, se voi aiheuttaa ylilyönnin esimerkiksi pylvään 2 tai 3 eristinketjuissa, minkä seurauksena sähköasemalle saapuu vain pieni osa alkuperäisestä kulkuaallosta. Molemmissa simuloinneissa takaiskujen ja yliyöntien sallittiin tapahtuvan vain vaihejohtimen 1 ja pylvään välillä. Todellisuudessaan ylilyöntejä voi tapahtua samanaikaisesti useampaan vaiheeseen, mutta tällaisen skenaarion simuloiminen vaatisi tarkemman mallin pylvälle ja eristinketjujen jännitelujuudelle.

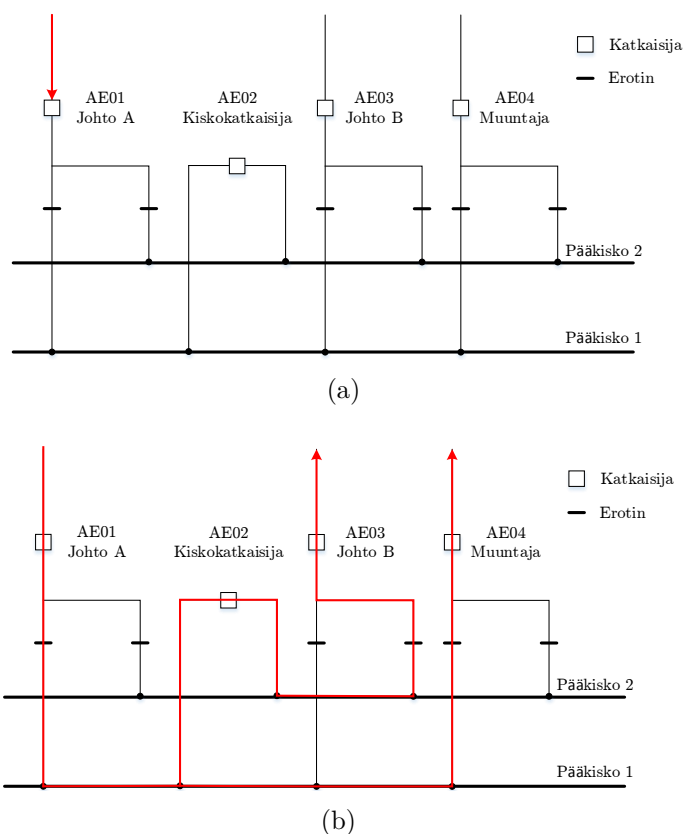
6 Simulointi ja tulosten tarkastelu

Tässä luvussa määritellään simuloinneissa käytetyt GIS-laitoksen kytkentätilanteet sekä esitetään simulointitulokset suorille salamaniskuille ja takaiskuille näissä kytkentätilanteissa. Lisäksi tehdään niin sanottu herkkyystarkastelu pylväiden maadoitusvastuksille, maan ominaisvastukselle ja avojohdon A ja GIS-laitoksen välisen kaapelin pituudelle eli tutkitaan, mikä on näiden parametrien vaikutus GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen.

Luvun lopussa määritetään simulointitulosten perusteella keskimääräinen aika GIS-kojeiston vikaantumiseen eli suojausriskitaso, jossa on huomioitu salamoihin sekä kytkentätilanteisiin liittyvät todennäköisyydet. Lopuksi tehdään johtopäätökset ja annetaan suositukset kaasueristeisten ylijännitesuojien hankkimiseen ja ylijännitesuojaus selvityksiin liittyen.

6.1 Simulointien määrittely ja simulointitulokset

Suurille salamaniskuille vaihejohtimiin ja takaiskuille suoritettiin omat simulointikierrokset. Kummassakin tapauksessa simuloinneissa käytettiin kahta erilaista GIS-laitoksen kytkentätilannetta, jotka on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29: GIS-laitoksen kytkentätilanteet. Kulkuaallon reitti on merkitty punaisilla nuolilla. a) Kytkentätilanne 1: avonainen katkaisija kentässä AE01 Johto A ja b) kytkentätilanne 2: normaali käyttötilanne, kaikki kentät käytössä.

Ensimmäisessä kytkentätilanteessa avattiin katkaisija siinä kentässä, johon avojohto A liittyy. Tämä edustaa pahinta mahdollista GIS-laitoksen käyttötilannetta salamaniskun synnyttämien ylijännitteiden tapauksessa, koska ylijänniteaalto kaksinkertaistuu heijastuessaan avoimesta katkaisijasta. Toinen kytkentätilanne edustaa GIS-laitoksen normaalia käyttötilannetta, jossa kaikki kentät ovat käytössä. Lisäksi suoritettiin takaiskutarkastelu kytkentätilanteessa 1, jossa avojohto A on maadoitettu maadoituskytkimen kautta GIS-kojeiston katkaisijan kohdalla.

Kaikkien 110 kV:n sähköasemakomponenttien salamasyöksyjännitteen kestotason oletettiin olevan IEC 60071-1-standardin mukainen 550 kV. Tavallisesti kestotason yhteydessä käytetään varmuuskerrointa K_s , jolla otetaan huomioon laiteasennuksissa syntyvät erot, eristysten vanheneminen sekä muut mahdollisesti tuntemattomat vaikutukset. [61] Varmuuskertoimeksi sisäiselle eristykselle suositellaan arvoa $K_s = 1,15$ [60]. Komponenttien kestotaso varmuuskerroin huomioituna on siten $550 \text{ kV}/1,15 = 479 \text{ kV}$. Mikäli tämä arvo ylittyi simuloinneissa jossakin kohtaa GIS-kojeistoa tai muiden laitteiden kohdalla, sen katsottiin automaattisesti tarkoittavan laitteen vikaantumista.

Simulointien aika-askeleena käytettiin arvoa 1 ns. Simulointiajaksi valittiin 100 μs , jonka aikana ilmenivät kaikki suurimmat ylijännitepiikit.

6.1.1 Simulointitulokset suorille salamaniskuille

Suorat salamaniskut kohdistettiin jokaisen pylvään kohdalla avojohdon A vaiheeseen L1 suurimman käyttöjännitteen U_m ollessa joko positiivisessa (+) tai negatiivisessa (-) huippuarvossaan. Salamavirran huippuarvona käytettiin kriittistä salamavirtaa 4,47 kA, jonka rinnan kestoajaksi asetettiin 0,38 μs ja selän puoliarvonajaksi 140 μs . GIS-kojeiston ja avojohdon A välisen kaapelin pituudeksi asetettiin 100 m ja maan ominaisvastukseksi 20000 Ωm . Simuloinnit suoritettiin kummassakin kytkentätilanteessa.

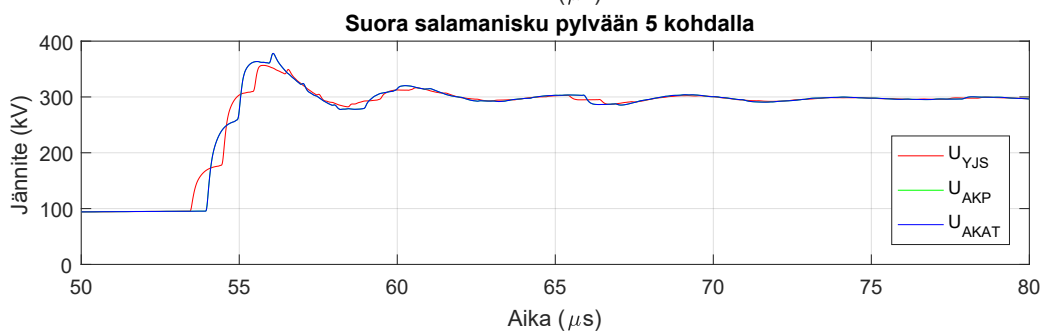
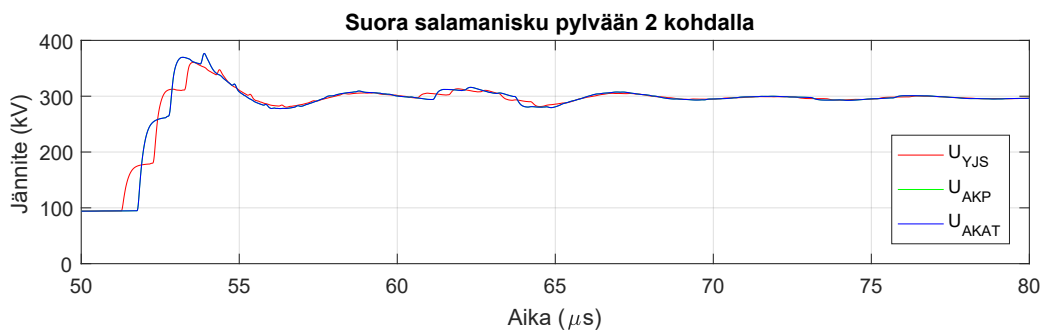
Simulointitulokset on esitetty taulukossa 10. Siihen on merkitty vaiheesta L1 mitattujen jännitteiden suurimmat arvot eri kohdista sähköasemaa ja GIS-kojeistoa molemmissa kytkentätilanteissa ja käyttöjännitteen positiivisella ja negatiivisella huippuarvolla. Lisäksi joidenkin mitattujen jännitteiden kuvaajat on esitetty kuvissa 30 ja 31. Taulukon Kuvaaja-sarakkeeseen on merkitty mikä kuvaaja vastaa mitäkin tilannetta.

Taulukossa 10 ja kuvissa 30 ja 31 esitetyt jännitteet mitattiin ylijännitesuojan (U_{YJS}), muuntajan (U_{MUU}), GIS-kojeiston avojohtoa A vastaavasta johtolähtökentästä kaapelipäätteen (U_{AKP}) ja katkaisijan (U_{AKAT}) kohdalta ja avojohtoa B vastaavasta johtolähtökentästä katkaisijan (U_{BKAT}) kohdalta. Jännitteitä mitattiin myös muista kohdista GIS-kojeistoa, mutta ne olivat aina pienempiä tai yhtä suuria kuin edellä mainitut.

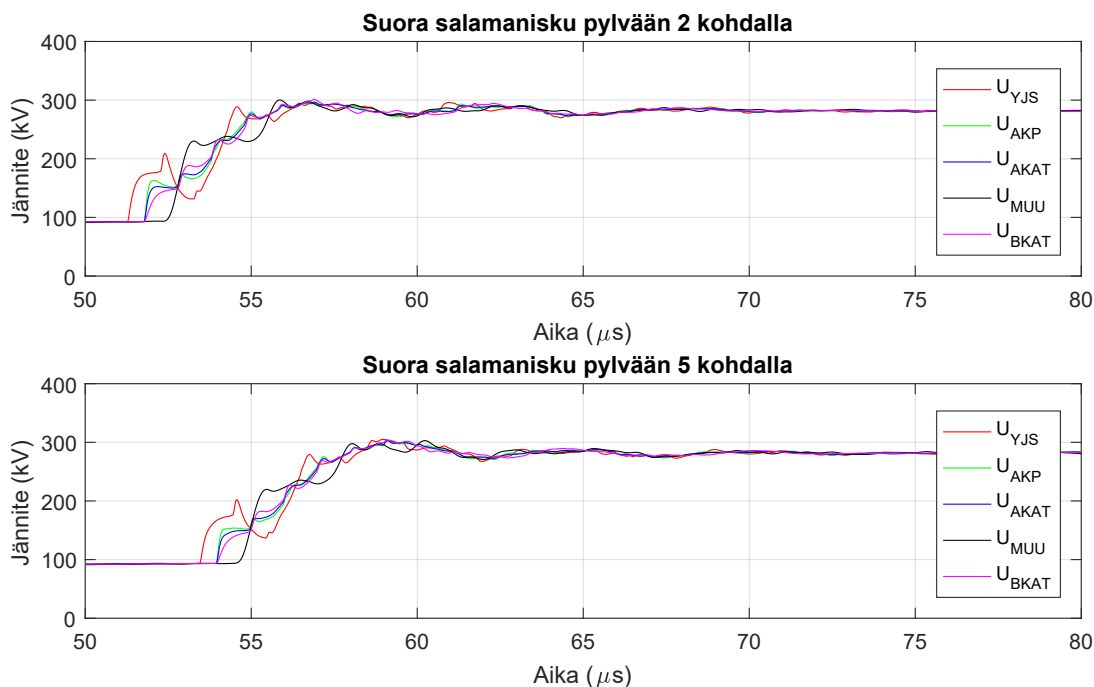
Suoraan vaihejohtimeen osuvan salamaniskun synnyttämät ylijännitteet sähköasemalla ovat tulosten perusteella kaikkialla alle 400 kV. Ylijännitteet on reilusti laitteiden 479 kV:n jännitelujuuden alapuolella, joten suorat salamaiskut eivät ole riski GIS-kojeiston sisäiselle läpilyönnille.

Taulukko 10: Suorien salamaiskujen synnyttämien ylijännitteiden huippuarvot GIS-laitoksen eri kytkentätilanteissa.

			Mitatut jännitteet (kV)					
	Iskukohta	U_m	U_{YJS}	U_{AKP}	U_{AKAT}	U_{MUU}	U_{BKAT}	Kuvaaja
KytKentätilanne 1	Pylväs 1	+	363	378	378	0	101	kuva 30
		-	349	372	372	0	101	-
	Pylväs 2	+	361	377	377	0	101	-
		-	348	371	371	0	101	-
	Pylväs 3	+	359	377	377	0	101	-
		-	347	370	370	0	101	-
	Pylväs 4	+	357	377	377	0	101	-
		-	346	368	368	0	101	-
	Pylväs 5	+	357	378	378	0	101	kuva 30
		-	347	368	368	0	101	-
KytKentätilanne 2	Pylväs 1	+	295	294	296	301	301	-
		-	296	291	288	291	287	-
	Pylväs 2	+	296	295	297	300	301	kuva 31
		-	295	291	291	290	295	-
	Pylväs 3	+	295	296	297	299	301	-
		-	288	291	292	291	294	-
	Pylväs 4	+	300	299	297	299	301	-
		-	295	290	290	293	292	-
	Pylväs 5	+	305	303	303	303	304	kuva 31
		-	295	291	291	294	292	-



Kuva 30: Suoran salamaniskun synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 1.



Kuva 31: Suoran salamaniskun synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 2.

6.1.2 Simulointitulokset takaiskuille

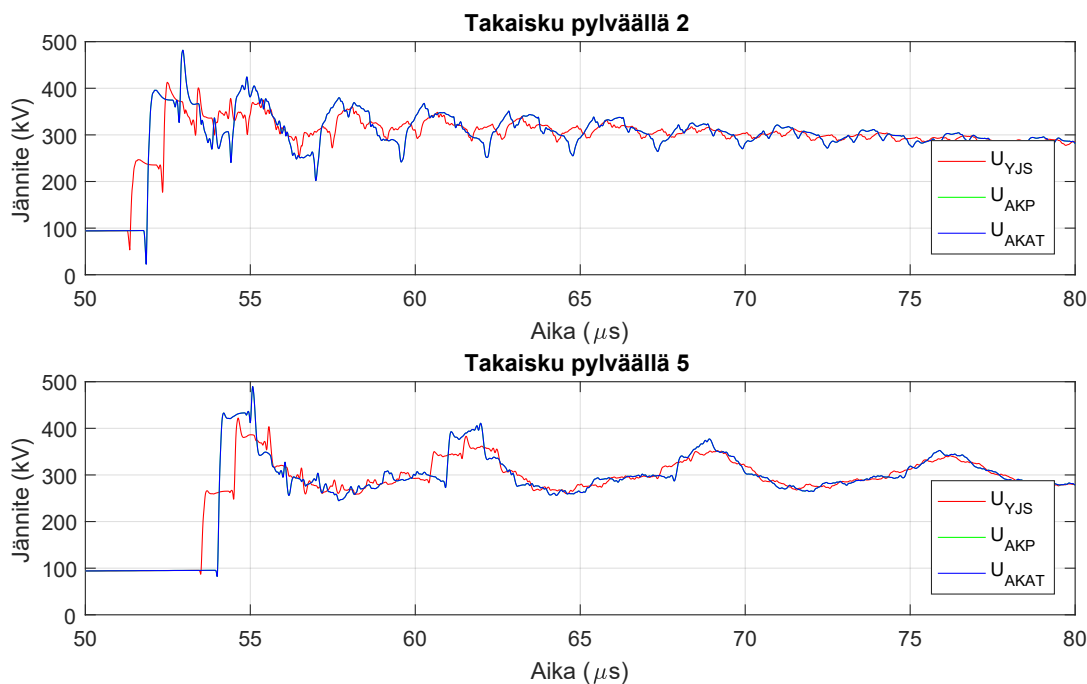
Takaiskutarkastelussa suoritettiin kaksi simulointikierrosta, joissa kummassakin salamaniskut kohdistettiin pylväisiin 1–5. Ensimmäisellä kierroksella takaiskun sallittiin tapahtuvan ainoastaan sillä pylväällä, johon salamanisku kohdistettiin. Toisella kierroksella takaiskujen ja eristinketjujen ylilyöntien sallittiin tapahtuvan jokaisella tarkasteltavalla pylväällä. Kummallakin simulointikierroksella takaiskujen ja ylilyöntien sallittiin tapahtuvan kuitenkin vain pylvään ja vaiheen L1 välillä. Suorien salamaniskujen tapaan simuloinnit suoritettiin molemmissa GIS-laitoksen kytkentätilanteissa käyttöjännitteen negatiivisella ja positiivisella huippuarvolla. Salamavirralle käytettiin arvoja väliltä 50–165 kA, pylväiden maadoitusresistanssiksi $R_{0,T}$ asetettiin 50Ω , ja muiden komponenttien arvot olivat samat kuin suorien salamaiskujen tapauksessa.

Taulukossa 11 on esitetty simulointitulokset takaiskujen synnyttämille ylijännitteille eri kohdissa sähköasemaa, kun takaiskun sallittiin tapahtuvan vain yhdellä pylväällä. Jokaisen pylvään kohdalle on merkitty pienin salamavirta i_{\min} , joka aiheutti jännitelujuuden ylittymisen jossakin kohtaa sähköasemaa. Mitatuista ylijännitteiden huippuarvoista on korostettu ne, jotka ovat suurempia kuin laitteen jännitelujuus. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty mitattujen jännitteiden kuvaajat tietyissä simulointitilanteissa.

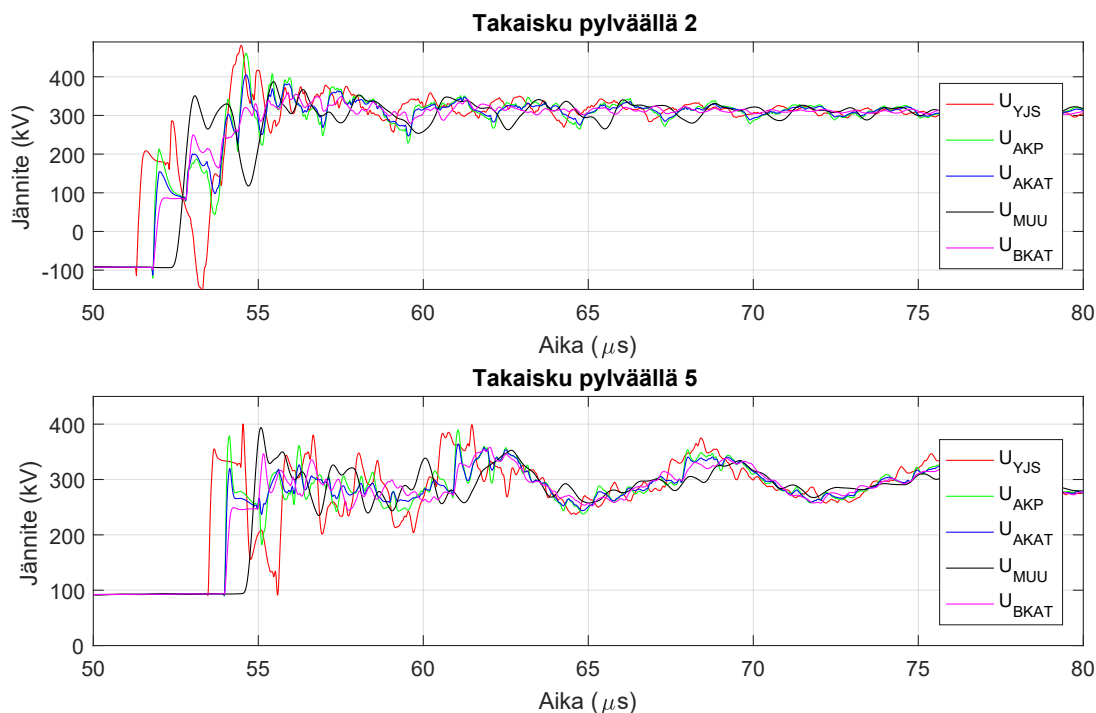
Vastaavasti taulukossa 12 on esitetty simulointitulokset takaiskujen synnyttämille ylijännitteille, kun takaiskun sallittiin tapahtuvan jokaisella pylväällä, ja kuvissa 34 ja 35 on esitetty jännitteiden kuvaajat tietyissä tilanteissa.

Taulukko 11: Takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-laitoksen eri kytkentätilanteissa. Takaisku sallittu tapahtuvan vain sillä pylvällä, johon salama iski.

		Mitatut jännitteet (kV)							
	Iskukohta	i_{\min} (kA)	U_m	U_{YJS}	U_{AKP}	U_{AKAT}	U_{MUU}	U_{BKAT}	Kuvaaja
Kytkenätilanne 1	Pylväs 1	50	+	114	118	118	0	101	-
			-	459	525	525	0	101	-
	Pylväs 2	80	+	413	482	482	0	101	kuva 32
			-	415	465	465	0	101	-
	Pylväs 3	85	+	410	490	490	0	101	-
		-	407	462	462	0	101	-	
Pylväs 4	95	+	414	486	486	0	101	-	
		-	399	448	448	0	101	-	
Pylväs 5	100	+	422	490	490	0	101	kuva 32	
		-	411	443	443	0	101	-	
Kytkenätilanne 2	Pylväs 1	105	+	447	480	453	375	415	-
			-	459	471	452	383	447	-
	Pylväs 2	145	+	461	424	387	387	357	-
			-	481	461	405	387	358	kuva 33
	Pylväs 3	165	+	422	424	382	393	371	-
		-	439	461	416	366	378	-	
Pylväs 4	165	+	409	424	388	391	370	-	
		-	420	426	389	358	369	-	
Pylväs 5	165	+	400	389	364	394	358	kuva 33	
		-	396	381	358	361	362	-	



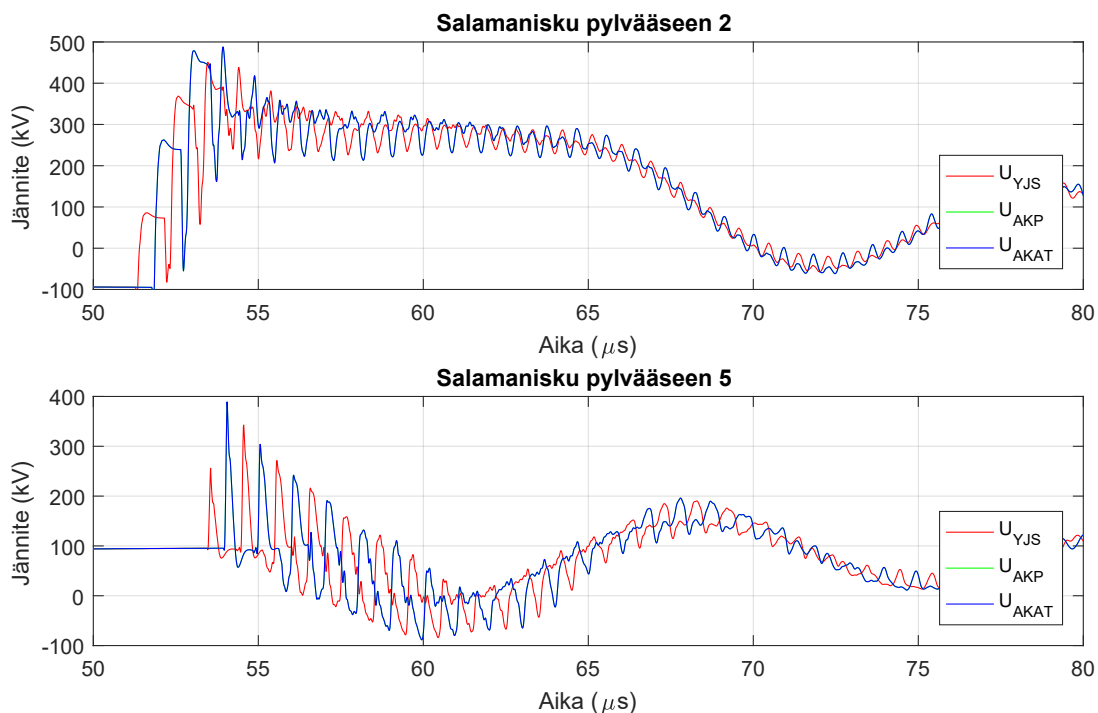
Kuva 32: Pylvällä 2 ja 5 tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 1.



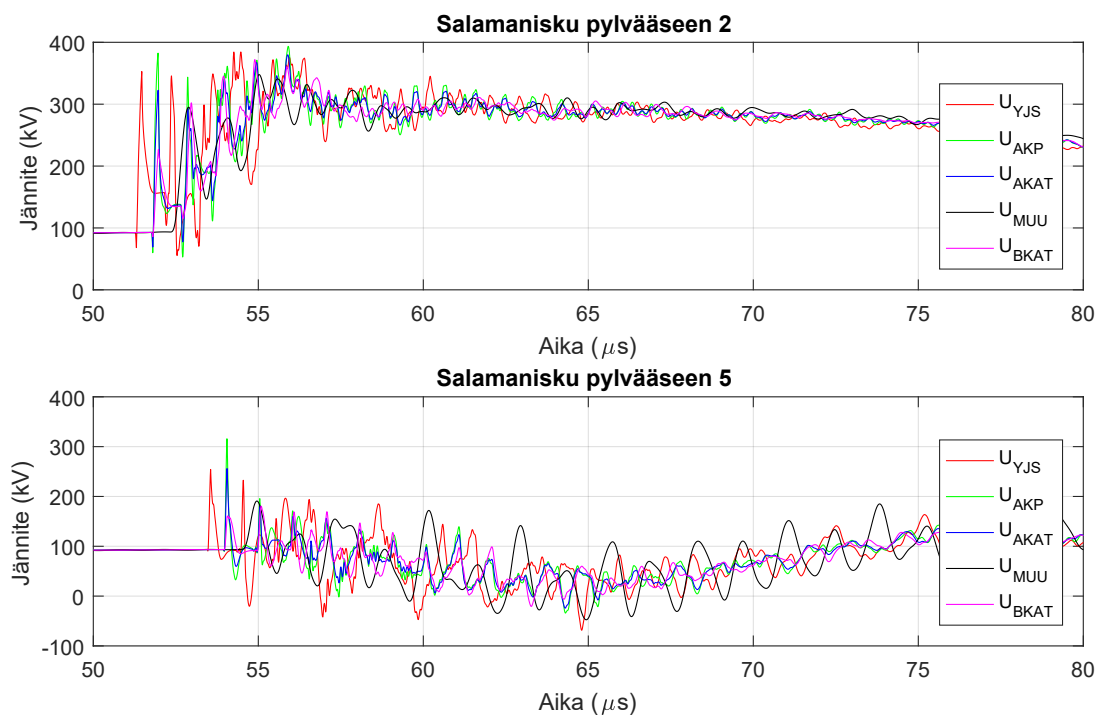
Kuva 33: Pylväillä 2 ja 5 tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 2.

Taulukko 12: Takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-laitoksen eri kytkentätilanteissa. Takaiskun sallittu tapahtuvan jokaisella pylväällä.

		Mitatut jännitteet (kV)							
	Iskukohta	i_{\min} (kA)	U_m	U_{YJS}	U_{AKP}	U_{AKAT}	U_{MUU}	U_{BKAT}	Kuvaaja
Kytkenätilanne 1	Pylväs 1	60	+	505	571	572	0	101	-
			-	532	569	570	0	101	-
	Pylväs 2	85	+	433	466	466	0	101	-
			-	451	488	488	0	101	kuva 34
	Pylväs 3	165	+	357	369	370	0	101	-
		-	396	411	411	0	101	-	
Kytkenätilanne 2	Pylväs 4	165	+	288	296	296	0	101	-
			-	275	278	278	0	101	-
	Pylväs 5	165	+	338	339	339	0	101	kuva 34
			-	352	372	372	0	101	-
	Pylväs 1	110	+	452	483	455	375	415	-
-			466	486	463	386	443	-	
Pylväs 2	165	+	384	394	380	348	372	kuva 35	
		-	402	420	402	359	394	-	
Pylväs 3	165	+	335	345	305	326	309	-	
		-	353	347	329	332	326	-	
Pylväs 4	165	+	297	340	283	264	260	-	
		-	286	277	249	278	239	-	
Pylväs 5	165	+	270	316	266	276	266	kuva 35	
		-	248	243	241	247	239	-	



Kuva 34: Pylväillä 2 ja 5 tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 2.



Kuva 35: Pylväillä 2 ja 5 tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeistossa ja sähköasemalla GIS-laitoksen kytkentätilanteessa 2.

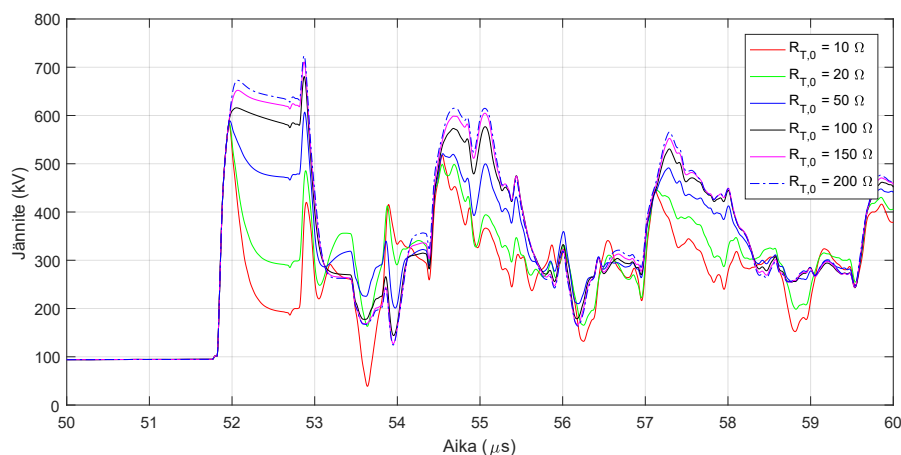
Taulukon 11 tuloksista havaitaan, että mitä kauempaan sähköasemasta takaisku tapahtui, sitä suurempi täytyi salamavirran olla, jotta sähköasemalaitteiden jännitelujuudet ylittyivät. KytKentätilanteessa 1 laitteiden jännitelujuudet ylittyivät jo kohtuullisen pienillä salamavirroilla. KytKentätilanteessa 2 salamaiskut pylvääseen 3 tai kauemmas eivät aiheuttaneet jännitelujuuden ylittymistä sähköasemalla edes suurimmalla 165 kA:n salamavirralla. Toisaalta taulukon 12 tuloksista havaitaan, että kun takaiskun tapahtuminen sallittiin kaikilla pylväillä, pylvääseen 3 tai kauemmas kohdistettu salamaisku ei aiheuttanut laitteiden jännitelujuuden ylittymistä edes suurimmalla salamavirralla kytKentätilanteessa 1. Ylipäätään takaiskun salliminen kaikilla pylväillä johti merkittävästi pienempiin ylijännitteisiin sähköasemalla kuin tilanteessa, jossa takaisku tapahtui vain yhdellä pylväällä.

Lisäksi simuloitiin tapaus, jossa kytKentätilanteessa 1 avojohto A on maadoitettu GIS-kojeiston katkaisijan edessä sijaitsevalla maadoituskytkimellä, joka mallinnettiin yksinkertaisesti vaiheen ja maan välissä olevalla 1Ω :n vastuksella. Pylvääseen 1 kohdistettiin 165 kA:n salama, joka aiheutti kyseisellä takaiskun kyseisellä pylväällä. Suurin kojeistosta mitattu jännite oli 215 kV. Tuloksesta voidaan päätellä, että salamaiskut eivät aiheuta minkäänlaista riskiä GIS-kojeiston ylijännitekestoisuuden ylittymiselle tilanteessa, jossa tarkasteltava johto on maadoitettu GIS-laitoksen päädystä.

6.1.3 Herkkyystarkastelu tietyille parametreille

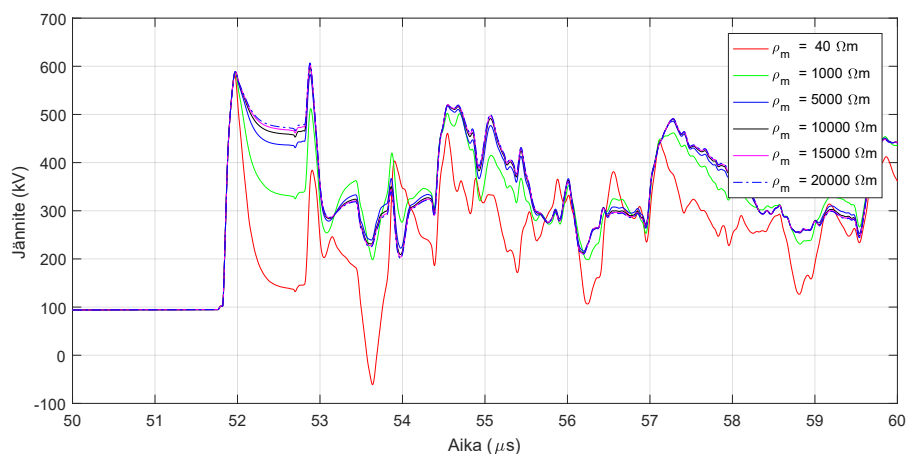
Pylväiden maadoitusvastukselle $R_{T,0}$, maan ominaisvastukselle ρ_m ja kaapelin pituudelle suoritettiin herkkyystarkastelu. Tarkastelu suoritettiin siten, että tarkasteltavaa parametria muutettiin ja muut simulointimallin parametrit pidettiin vakioina. Kaikissa tarkasteluissa jännite mitattiin GIS-kojeiston johtolähdön katkaisijan kohdalla. Salamaiskut (100 kA 0,38/140 μ s) kohdistettiin avojohdon A pylväälle 2 ja kaapelin pituuden tarkastelussa lisäksi pylväälle 5. GIS-laitoksen kytKentätilanteena käytettiin kytKentätilannetta 1 eli avojohtoa A vastaavan johtolähdön katkaisija oli auki-tilassa.

Pylväiden maadoitusvastuksen vaikutusta GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen tutkittiin resistanssiarvoilla 10 – 200 Ω . Kaapelin pituus pidettiin 100 metrissä ja maan ominaisvastukselle käytettiin arvoa 20000 Ω m. Simulointitulokset on esitetty kuvassa 36. Tuloksista havaitaan, että pylvään maadoitusvastuksella on merkittävä vaikutus GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen. Ensimmäinen ylijännitepiikki on noin 100 kV suurempi suurimmalla resistanssiarvolla (200 Ω) verrattuna pienimpään resistanssiarvoon (10 Ω). Toisen ylijännitepiikin kohdalla ero on jo noin 300 kV. Tästä syystä on erittäin tärkeää, että sähköaseman lähellä sijaitsevat pylväät maadoitetaan mahdollisimman hyvin.



Kuva 36: Pylväällä 2 tapahtuneen takaiskun synnyttämä ylijännite GIS-kojeiston katkaisijan kohdalla pylvään maadoitusresistanssiarvoilla 10–200 Ω .

Maan ominaisvastuksen vaikutusta GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen tutkittiin resistiivisyysarvoilla 40 – 20000 Ω . Kaapelin pituus pidettiin 100 metrissä ja pylvään maadoitusvastukselle käytettiin arvoa 50 Ω . Simulointitulokset on esitetty kuvassa 37. Tuloksista havaitaan, että maan ominaisvastuksella on merkitystä GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen. Vaikutus ei ole kuitenkaan yhtä merkittävä kuin pylvään maadoitusvastuksella, sillä ensimmäinen ylijännitepiikki on lähes saman suuruinen kaikilla resistiivisyysarvoilla. Merkittävin ero näkyy pienimmän (40 Ω m) ja suurimman (20000 Ω m) resistiivisyysarvon välillä toisen jännitepiikin kohdalla, ja ylijännitteet muilla simuloituilla resistiivisyysarvoilla ovat suuruusluokaltaan suurinta resistiivisyysarvoa vastaavia.

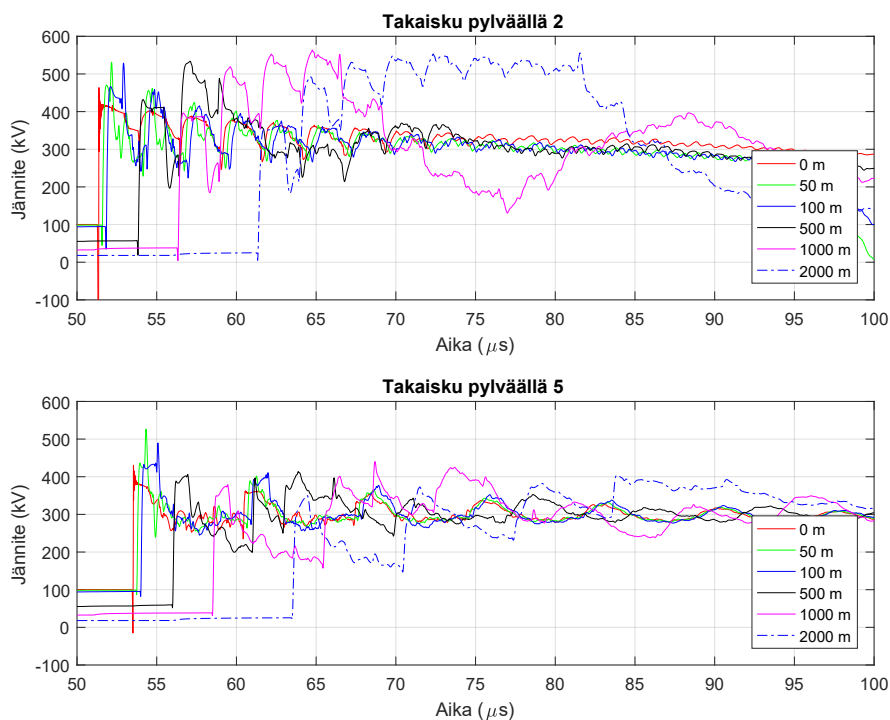


Kuva 37: Pylväällä 2 tapahtuneen takaiskun synnyttämä ylijännite GIS-kojeiston katkaisijan kohdalla maan ominaisvastuksen arvoilla 40–20000 Ω .

Kaapelin pituuden vaikutusta GIS-kojeistossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen tutkittiin avojohdon A ja GIS-kojeiston välisen kaapelin pituuksilla 0–2000

m. Maan ominaisvastukselle käytettiin arvoa $20000 \Omega\text{m}$ ja pylväiden maadoitusvastukselle arvoa 50Ω . Salamaisku kohdistettiin ensin pylvääseen 2 ja tämän jälkeen pylvääseen 5. Simulointitulokset on esitetty kuvassa 38. Tuloksista havaitaan, että takaiskun tapahtuessa lähempänä asemaa (pylväällä 2) ovat GIS-kojeistossa esiintyvät ylijännitteet sitä suurempia, mitä pidempi on kaapelin pituus. Toisaalta, mikäli takaisku tapahtuu kauempana (pylväällä 5) ovat GIS-kojeistossa esiintyvät jännitteet pienempiä tai lähes yhtä suuria riippumatta kaapelin pituudesta. Kuvasta 38 havaitaan lisäksi, että käyttöjännite ei ehtinyt suurimmilla kaapelipituuksilla nousta huippuarvoonsa takaiskun tapahtuessa. Tämän vuoksi ylijännitteet ovat todellisuudessa hieman suurempia kuin kuvassa 38 esitetyt.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että mikäli GIS-kojeisto liittyy yli kilometrin pituisella kaapelilla avojohtoon, läpilyönnin riski GIS-kojeistossa kasvaa silloin, jos kaapelipäätteen läheisyydessä tapahtuu takaisku. Tällainen tilanne on kuitenkin harvinainen, sillä usein pitkien kaapelien toiseen päähän liittyy suoraan toinen GIS-laitos tai avokytkinlaitos, jolloin takaisku kaapelipäätteen läheisyydessä on käytännössä mahdoton. Toisaalta, jos takaisku tapahtuu kauempana kaapelipäätteestä, pidempi kaapeli rajoittaa GIS-laitokselle saapuvia ylijännitteitä lyhyempää kaapelia enemmän.



Kuva 38: Pylväillä 2 ja 5 tapahtuneiden takaiskujen synnyttämät ylijännitteet GIS-kojeiston katkaisijan kohdalla kaapelipituuden arvoilla 0–2000 m.

6.2 Suojausriskitason määrittäminen

Ulos asennettavien, perinteisten ylijännitesuojien riittävyys GIS-laitoksen ylijännitesuojauksessa voidaan arvioida määrittämällä niin sanottu suojausriskitaso. Suojaus-

riskitasolla tarkoitetaan tässä keskimääräistä aikaa GIS-kojeiston vikaantumiseen (mean time between failures, MTBF) salamaylijännitteiden seurauksena. MTBF lasketaan vikataajuuden λ_f käänteislukuna. IEC 60071-2 -standardin mukaan laitteiden suurimmat sallitut vikataajuudet vaihtelevat välillä $0,001/a - 0,004/a$ riippuen laitteen korjausajasta [60]. Näitä vastaavat keskimääräiset ajat vikaantumiseen ovat 400–1000 vuotta. GIS-kojeiston suurimman sallitun MTBF:n voidaan ajatella olevan lähellä ylärajaa eli 1000 vuotta, koska sen korjausajat ovat tyypillisesti pitkiä. Mikäli simulointitulosten perusteella laskettu MTBF alittaa merkittävästi 1000 vuoden rajan, on kaasueristeisten ylijännitesuojien hankintaa harkittava GIS-kojeiston vikaantumisriskin pienentämiseksi.

On huomattava, että tässä tapauksessa suojausriskitaso määritellään johtolähtökohtaisesti, koska kaasueristeiset ylijännitesuojatkin asennetaan rajoittamaan vain tietyn johtolähdön ylijännitteitä. Tämän vuoksi laskettava vikataajuus ei edusta koko GIS-kojeiston vikataajuutta eikä siten eri johtolähtöjen vikataajuuksia tule summata yhteen. GIS-kojeiston johtolähtöjen määrä ei siis sinänsä vaikuta suojausriskitasoon. Näistä syistä arvio kaasueristeisten ylijännitesuojien tarpeesta voidaan tehdä pelkästään määrittämällä avojohdtoa A vastaavan johtolähdön vikataajuus ja keskimääräinen aika vikaantumiseen.

Simulointitulosten perusteella suoran salamaniskun tapauksessa GIS-kojeiston ylijännitteen kestotaso ei ylity edes pahimmassa tapauksessa. Siten suorat salamaniskut eivät vaikuta suojausriskitason arviointiin, ja sen vuoksi tässä keskitytäänkin pelkästään takaiskujen aiheuttamien vikaantumisten arviointiin.

Jotta suojausriskitaso voidaan määrittellä, on aluksi arvioitava keskimääräistä vuosittaista salamoiden iskumäärää avojohdolle. Arvio johdolle osuvien salamaniskujen määrästä N_L (1/km, a) saadaan yhtälöstä

$$N_L = N_g(2R_a + b_d)/1000, \quad (30)$$

missä N_g (1/km², a) on salamaniskutiheys, b_d (m) johdon äärimmäisten johtimien välinen etäisyys ja R_a (m) salamoita puoleensa vetävä säde, mikä puolestaan lasketaan yhtälöstä

$$R_a = 14H_T^{0,6}, \quad (31)$$

missä H_T (m) on avojohdon pylväiden keskimääräinen korkeus [11]. Pylväiden keskimääräisen korkeuden sijaan tässä työssä käytetään kuitenkin ukkosjohtimien ripustuskorkeutta ja äärimmäisten johtimien välisenä etäisyytenä ukkosjohtimien välistä etäisyyttä enemmän turvallisuutta tuottavan lopputuloksen saavuttamiseksi. Yhtälön (31) mukaan, avojohdtoa vetää salamoita puoleensa sitä kauempaa, mitä korkeampi sen rakenne on. Yhtälö perustuu havaittuihin salamaniskuihin ja yksinkertaiseen Leader-purkauksen malliin [11].

Sijoittamalla yhtälöön (31) ukkosjohtimien asennuskorkeus 31,5 m saadaan salamoita puoleensa vetäväksi säteeksi 111 m. Salamaniskutiheytenä käytetään kuvan 7 perusteella arvoa $0,53$ 1/km²,a, joka on suurin keskimääräinen salamatiheys Suomessa. Sijoittamalla nämä arvot ja ukkosjohtimien välinen etäisyys 6 m yhtälöön (30) saadaan avojohdolle A iskevien salamoiden vuotuisiksi määräksi $0,121$ /km. Seuraa-

vaksi on selvitettävä, kuinka moni näistä johdolle osuvista salamoista on kriittisiä eli aiheuttaa takaiskun välityksellä sähköaseman komponenttien jännitelujuuden ylittymisen.

Luvussa 6.1.2 esitettiin jokaisen pylvään kohdalla pienimmät salamavirrat i_{\min} , jotka aiheuttavat laitteiden jännitelujuuden ylittymisen takaiskun seurauksena. Mikäli tällaisen tai suuremman salamavirran omaava salama osuu kyseessä olevalle pylvälle tai lähemmäs sähköasemaa eli jännteelle tarkasteltavan ja sitä edeltävän pylvään väliin tapahtuu GIS-kojeistossa läpilyönti tai joku muu laite vaurioituu jännitelujuuden ylittymisen seurauksena. Kun lisäksi tiedetään todennäköisyydet näille pienimmille ja niitä suuremmille salamavirroille, voidaan määrittää kullekin jännteelle osuvien kriittisten salamoiden vuotuinen lukumäärä eli salamavikataajuus yhtälöllä

$$\lambda_{\text{jänne}} = l_{\text{jänne}} \cdot N_L \cdot P(i_s \geq i_{\min}), \quad (32)$$

missä $l_{\text{jänne}}$ (km) on jänteen pituus, N_L (1/km, a) on johdolle osuvien kaikkien salamoiden vuotuinen lukumäärä ja $P(i_s \geq i_{\min})$ on todennäköisyys sille, että salamavirta i_s on yhtä suuri tai suurempi kuin pienin salamavirta i_{\min} .

Seuraavaksi tarkastellaan avojohtoa A vastaavan GIS-kojeiston johtolähdön suojausriskitason laskemista kahdella menetelmällä. Ensimmäisessä menetelmässä ei huomioida kytkentätilanteiden todennäköisyyksiä vaan lasketaan suoraan yhteen kytkentätilanteiden salamavikataajuudet. Toisessa menetelmässä otetaan huomioon kytkentätilanteen 1 todennäköisyys.

6.2.1 Kytkentätilanteiden todennäköisyyksiä ei huomioitu

Taulukkoon 13 on laskettu yhtälöllä (32) kullekin jännteelle osuvien kriittisten salamoiden vuotuinen lukumäärä eli salamavikataajuus tilanteessa, jossa takaisku on sallittu vain sillä pylvällä, johon salama iski. Salamavirtojen todennäköisyydet on arvioitu kuvasta 8, jossa on esitetty salamavirtojen jakaumat. Yli 165 kA olevien salamavirtojen todennäköisyyden arvioitiin olevan 0.

Summaamalla kytkentätilanteen 1 (KT1) jänneiden salamavikataajuudet saadaan tämän kytkentätilanteen kokonaisvikataajuudeksi 0,00383 1/a. Vastaavasti kytkentätilanteen 2 (KT2) kokonaisvikataajuudeksi saadaan 0,000264 1/a. Havaitaan, että kytkentätilanteen 1 vikataajuus on noin kymmenkertainen verrattuna kytkentätilanteeseen 2. Jättämällä kytkentätilanteiden todennäköisyydet huomiotta saadaan kokonaissalamavikataajuus laskemalla kytkentätilanteiden vikataajuudet yhteen. Kokonaisvikataajuus on siten 0,004094 1/a ja sitä vastaava keskimääräinen aika GIS-kojeiston vikaantumiseen (MTBF) on 244 vuotta. Tämä jää standardin suosittelemman rajan alle, joten GIS-kojeistoon tulisi tällä perusteella hankkia kaasueristeiset ylijännitesuojat MTBF:n suurentamiseksi.

Taulukko 13: Avojohtodon A jännekohtaiset kriittisten salamoiden vuotuiset lukumäärät, kun takaisku sallittiin vain yhdellä pylvällä.

	Iskualue	$l_{\text{jänne}}$ (km)	i_{min} (kA)	$P(i_s \geq i_{\text{min}})$	$\lambda_{\text{jänne}}$ (1/a)
KT 1	GIS-P1	0,13	50	0,08	0,001258
	P1-P2	0,25	80	0,03	0,000908
	P2-P3	0,25	85	0,025	0,000756
	P3-P4	0,25	95	0,018	0,000545
	P4-P5	0,25	100	0,012	0,000363
KT 2	GIS-P1	0,13	105	0,011	0,000173
	P1-P2	0,25	145	0,003	0,000091
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0

Taulukossa 14 on esitetty kullekin jänneelle osuvien kriittisten salamoiden vuotuisen lukumäärä eli salamavikataajuus tilanteessa, jossa takaisku on sallittu kaikilla pylvällä. KytKentätilanteiden 1 ja 2 salamavikataajuuksiksi saadaan 0,001621 1/a ja 0,000157 1/a. Laskemalla nämä yhteen saadaan kokonaissalamavikataajudeksi 0,001778 1/a ja GIS-kojeiston MTBF:ksi 562 vuotta.

Todennäköisesti takaiskut eivät tapahdu ainoastaan yhdellä pylvällä tai kaikilla pylvällä, joten realistinen tilanne lienee jotain näiden kahden ääripään väliltä. Ottamalla keskiarvo näiden kahden tilanteen kokonaissalamavikataajuuksista saadaan vikataajudeksi 0,0029 1/a ja MTBF:ksi 341 vuotta. Tämä on edelleen alle standardin suositteleman arvon. MTBF muuttuu kuitenkin realistisemmaksi, kun otetaan huomioon kytkentätilanteiden todennäköisyydet.

Taulukko 14: Avojohtodon A jännekohtaiset kriittisten salamoiden vuotuiset lukumäärät, kun takaisku sallittiin kaikilla pylvällä.

	Iskualue	$l_{\text{jänne}}$ (km)	i_{min} (kA)	$P(i_s \geq i_{\text{min}})$	$\lambda_{\text{jänne}}$ (1/a)
KT 1	GIS-P1	0,13	60	0,055	0,000865
	P1-P2	0,25	85	0,025	0,000756
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0
KT 2	GIS-P1	0,13	110	0,01	0,000157
	P1-P2	0,25	>165	0	0
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0

GIS-kojeistojen valmistajien tekemissä ylijännitesuojauksellisyksissä eri kytkentä-

tilanteiden salamavikataajuudet on laskettu yhteen ilman kytkentätilanteiden todennäköisyyksien huomioon ottamista. Tämän vuoksi tämän työn kytkentätilannetta 1 vastaava tilanne on usein nostanut selvityksissä kokonaisvikataajuuden kohtuuttoman suureksi. Valmistajien selvityksissä on siis laskettu samalla tavalla kuin edellä eli tässä tapauksessa MTBF:n ollessa 341 vuotta eli reilusti alle 1000 vuoden suosituksen ylijännitesuojausselvityksen tekijä suosittelee kaasueristeisten ylijännitesuojien hankintaa. Suositus olisi kuitenkin epärealistinen, sillä kytkentätilanne 1 eli avoin katkaisija salamaniskun hetkellä on melko epätodennäköinen.

6.2.2 Kytkentätilanteiden todennäköisyyksien huomioon ottaminen

Kytkentätilanne 1 on käytännössä hyvin epätodennäköinen. Katkaisija voi olla auki-tilassa silloin, kun johdolla tehdään esimerkiksi kunnossapitotöitä tai käynnissä on pika- tai aikajälleenkytkentä vian seurauksena. Mikäli johdolla tehdään kunnossapitotöitä on johto tyypillisesti maadoitettu kummastakin päästä maadoituskytkimen kautta. Edellä tarkasteltiin simuloimalla, että mitkään salamaniskut eivät aiheuta tällaisessa tilanteessa jännitelujuuden ylittymistä GIS-kojeistossa, joten ainoaksi tarkasteltavaksi tilanteeksi jää salamaniskut johdolle silloin, kun katkaisija on avoimena pika- tai aikajälleenkytkennän aikana.

Tyypillisesti jälleenkytkennän aiheuttaa maasulku johdolla. Maasuluista valtaosa johtuu salamaiskujen aiheuttamista takaiskuista tai eristinketjujen ylilyönneistä. Sen vuoksi oletetaan, että kaikki jälleenkytkennät ovat salamaiskun aiheuttamia. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että johdolle osunut salaman pääpurkaus aiheuttaa katkaisijan jälleenkytkennän, minkä jälkeen pääpurkauksen purkauskanavaa pitkin etenevät jälkipurkaukset synnyttävät uudet kulkuaallot, jotka lähtevät etenemään kohti GIS-laitosta. Kulkuaaltojen saapuessa GIS-kojeistoon on katkaisija ehtinyt avautua, jolloin kyseessä on jälkipurkausten synnyttämien jännitetransienttien näkökulmasta aikaisemmin määritelty kytkentätilanne 1.

Aikaisemmin todettiin, että vain noin puolet negatiivisista maasalamoista on yksi-iskuisia ja puolet sisältävät jälkipurkauksia. Siten jälkipurkauksia sisältäviä salamoita osuu avojohdolle A keskimäärin $0,5 \cdot N_L = 0,605$ 1/km, a. Jälkipurkausten virran kertymäjakauma on kuvan 8 perusteella erilainen kuin pääpurkausten. Suurivirtaiset jälkipurkaukset ovat epätodennäköisempiä kuin vastaavat pääpurkaukset. Taulukoissa 15 ja 16 on esitetty sama tarkastelu jänteen salamavikataajuudelle kuin edellisessä luvussa. Nyt on vain käytetty jälkipurkausvirran todennäköisyyksiä ja johdolle osuvista salamoista on huomioitu vain jälkipurkauksia sisältävät salamat. Toisin sanoen on otettu huomioon kytkentätilanteen 1 todennäköisyys. Kytkentätilanteen 2 arvot ovat edelleen samat kuin edellisessä luvussa.

Taulukko 15: Avojohtoon A jännekohtaiset kriittisten salamoiden vuotuiset lukumäärät kytkentätilanteen 1 todennäköisyys huomioituna, kun takaisku sallittiin vain yhdellä pylvällä.

	Iskualue	$l_{\text{jänne}}$ (km)	i_{min} (kA)	$P(i_s \geq i_{\text{min}})$	$\lambda_{\text{jänne}}$ (1/a)
KT 1	GIS-P1	0,13	50	0,019	0,000149
	P1-P2	0,25	80	0,005	0,000076
	P2-P3	0,25	85	0,0048	0,000073
	P3-P4	0,25	95	0,004	0,000061
	P4-P5	0,25	100	0,003	0,000045
KT 2	GIS-P1	0,13	105	0,011	0,000173
	P1-P2	0,25	145	0,003	0,000091
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0

Nyt tilanteessa, jossa takaisku sallitaan vain yhdellä pylvällä kytkentätilanteiden 1 ja 2 salamavikataajuuksiksi saadaan 0,000404 1/a ja 0,000264 1/a. Laskemalla nämä yhteen saadaan kokonaissalamavikataajudeksi 0,000668 1/a ja MTBF:ksi 1497 vuotta. Ero on merkittävä verrattuna tilanteeseen, jossa kytkentätilanteen 1 todennäköisyyttä ei huomioitu.

Taulukon 16 tiedoista eli tilanteesta, jossa takaiskun sallitaan tapahtuvan kaikilla pylvällä, saadaan kytkentätilanteiden 1 ja 2 salamavikataajuuksiksi 0,000156 1/a ja 0,000157 1/a. Laskemalla nämä yhteen saadaan kokonaissalamavikataajudeksi 0,000313 1/a ja MTBF:ksi 3195 vuotta.

Taulukko 16: Avojohtoon A jännekohtaiset kriittisten salamoiden vuotuiset lukumäärät kytkentätilanteen 1 todennäköisyys huomioituna, kun takaisku sallittiin kaikilla pylvällä.

	Iskualue	$l_{\text{jänne}}$ (km)	i_{min} (kA)	$P(i_s \geq i_{\text{min}})$	$\lambda_{\text{jänne}}$ (1/a)
KT 1	GIS-P1	0,13	60	0,0105	0,000083
	P1-P2	0,25	85	0,0048	0,000073
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0
KT 2	GIS-P1	0,13	110	0,01	0,000157
	P1-P2	0,25	>165	0	0
	P2-P3	0,25	>165	0	0
	P3-P4	0,25	>165	0	0
	P4-P5	0,25	>165	0	0

Ottamalla keskiarvo kahden eri takaiskutilanteen kokonaissalamavikataajuuksista saadaan 0,0004905 1/a ja ottamalla tästä käänteisluku saadaan lopulliseksi GIS-kojeiston avojohtoa A vastaavan johtolähdön suojausriskitasoksi eli keskimääräiseksi ajaksi vikaantumiseen 2039 vuotta. Koska MTBF on standardin suosittelman 1000 vuoden ylärajan yläpuolella, ei kaasueristeisille ylijännitesuojille ole 110 kV:n jännitetasolla.

6.3 Johtopäätökset ja suositukset

Tuloksien perusteella voidaan päätellä, että suora salamanisku vaihejohtimeen ei aiheuta GIS-kojeiston ylijännitekestoisuuden ylittäviä jännitteitä. Myöskään takaiskut sellaisessa tilanteessa, jossa johto on maadoitettu GIS-kojeiston maadoituskytkimen kautta, eivät aiheuta ylijännitekestoisuuden ylittymistä. Toisaalta havaitaan, että takaiskut aiheuttavat erittäin suuria ylijännitetransientteja GIS-laitoksen muissa kytkentätilanteissa. Erityisen suuria ylijännitteitä esiintyy jo pienillä salamavirroilla GIS-kojeiston johtolähdön katkaisijan ollessa avoimena.

Takaiskujen tapauksessa simuloimalla saadut tulokset poikkeavat jonkin verran aikaisemmista Fingridille tehdyistä ylijännitesuojausselvityksistä. Aikaisemmissa selvityksissä takaiskun synnyttämät ylijännitteet ovat olleet lähes poikkeuksetta paljon pienempiä kuin tässä työssä simuloidut ylijännitteet. Tätä selittää erot mallinnuksessa ja simulointiohjelmissä sekä se seikka, että tässä työssä parametrit pyrittiin valitsemaan siten, että saadaan aikaan pahin mahdollinen tilanne. Lisäksi tuloksiin tuo varmasti jonkin verran epätarkkuutta GIS-kojeiston mallinnus ja eristinketjujen ylilyöntimekanismi.

Aikaisemmissa Fingridille tehdyissä ylijännitesuojausselvityksissä ei ole otettu huomioon GIS-laitoksen kytkentätilanteiden todennäköisyyksiä. Tällöin kytkentätilanne, jossa johtolähdön katkaisija on avoimena, on dominoinut laskettua suojausriskitasoa. Tässä työssä GIS-kojeiston keskimääräiseksi ajaksi vikaantumiseen eli suojausriskitasoksi saatiin 341 vuotta, kun kytkentätilanteen 1 todennäköisyyttä ei otettu huomioon. Tässäkin tapauksessa suojausriskitaso määräytyy lähes yksinomaan kytkentätilanteen 1 perusteella. Eli, jos tämä olisi ollut GIS-kojeiston valmistajan suorittama selvitys, olisi valmistaja päätenyt suosittelemaan kaasueristeisten ylijännitesuojien hankkimista. Jos tällä perusteella hankittaisiin kaasueristeiset ylijännitesuojat, GIS-kojeiston ylijännitesuojaus olisi ylimitoitettu merkittävästi. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, GIS-kojeistoon asennetut kaasueristeiset ylijännitesuojat eivät todennäköisesti menisi johtavaan tilaan kertaakaan koko kojeiston eliniän aikana.

Kun otetaan huomioon todennäköisyys, että salaman synnyttämä kulkuaalto saapuu GIS-kojeistoon juuri silloin, kun johtolähdön katkaisija on avoinna, saadaan suojausriskitasoksi 2039 vuotta. Suojausriskitaso on yli standardin suosittelman arvon vaikka suurin osa simulointimallin parametreista valittiin pahimman tilanteen mukaan. Tämän vuoksi ylimääräistä GIS-laitoksen ylijännitesuojausta ei tarvita eli kaasueristeisten ylijännitesuojien hankkimista ei suositella.

Herkkyystarkastelun tulosten perusteella voidaan päätellä, että GIS-laitoksen läheisyydessä olevat pylväät tulee maadoittaa mahdollisimman hyvin takaiskujen synnyttämien ylijännitteiden rajoittamiseksi GIS-kojeistossa. Lisäksi havaitaan, että

avojohdon ja GIS-kojeiston välisen kaapelin pituudella on merkitystä silloin, jos avojohdon puoleisen kaapelipäätteen välittömässä läheisyydessä voi tapahtua takaisku. Jännite nousee pitkässä kaapelissa tällöin jännitetransienttien heijastuessa takaiskun valokaaresta ja GIS-kojeiston avonaisesta katkaisijasta. Tämä on hyvä tiedostaa, mikäli suunnitellaan GIS-kojeiston liittämistä avojohtoihin esimerkiksi yli kilometrin pituisilla kaapeleilla.

Saatu tulos on linjassa aikaisempien 110 kV:n GIS-projektien ylijännitesuojaus-selvitysten kanssa. Pelkät ilmaeristeiset ylijännitesuojat ovat siis riittäviä 110 kV:n GIS-laitoksen ylijännitesuojauksessa, eikä kaasueristeisille ylijännitesuojille ole tällä jännitetasolla tarvetta. Tämän vuoksi suositellaan ylijännitesuojaus-selvityksistä luopumista tulevissa 110 kV:n GIS-projekteissa. Mahdollisesti tulevaisuudessa rakennettavien 220 tai 400 kV:n GIS-laitosten yhteydessä tulisi edelleen teettää ylijännitesuojaus-selvitys, sillä tässä työssä ei oteta kantaa näiden jännitetasojen ylijännitesuojaukseen. Selvityksissä on kuitenkin jatkossa otettava huomioon GIS-laitosten kytkentätilanteiden todennäköisyydet.

7 Yhteenveto

Kaasueristeinen kojeisto on varsin herkkä ylijännitteille, ja sen vaurioituminen aiheuttaa pitkän ja kalliin keskeytyksen sähkönsiirtoon. Sen vuoksi GIS-kojeiston riittävä ylijännitesuojaus on erittäin tärkeää. Paras ylijännitesuojaustaso saavutettaisiin käyttämällä perinteisten ilmaeristeisten ylijännitesuojien ohella GIS-kojeiston yhteyteen asennettavia kaasueristeisiä ylijännitesuojia. Ne ovat kuitenkin noin 10 kertaa kalliimpia kuin perinteiset ylijännitesuojat. Aikaisemmissa GIS-hankkeissa Fingrid on tilannut GIS-kojeiston valmistajalta erillisen ylijännitesuojaus selvityksen, jossa on tutkittu perinteisten, ilmaeristeisten ylijännitesuojien riittävyttä GIS-kojeiston suojauksessa. Selvitysten laskelmat ovat kuitenkin perustuneet epätodennäköisiin käyttötilanteisiin. Tällaisten selvitysten perusteella hankitut kaasueristeiset ylijännitesuojat johtavat siten suurella todennäköisyydellä ylijännitesuojauksen merkittävään ylimitoitamiseen.

Tämän työn ensisijaisena tavoitteena oli selvittää, onko kaasueristeisille ylijännitesuojille tarvetta kantaverkon 110 kV:n GIS-laitosten ylijännitesuojauksessa ja voitaisiinko GIS-kojeistojen valmistajien suorittamista ylijännitesuojaus selvityksistä luopua. Toisena tavoitteena oli määrittellä GIS-kojeiston realistiset käyttötilanteet, joihin mahdolliset ylijännitesuojaus selvitykset vaadittaisiin jatkossa tehtäviksi. Työssä suoritettiin ylijännitesuojauks tarkastelu laatimalla simulointimalli GIS-laitokselle ja sitä ympäröivälle verkolle. Mallin komponentit pyrittiin mallintamaan siten, että lopputuloksena olisi pahin mahdollinen tilanne. Tällä pyrittiin varmistamaan se, että työn tulokset soveltuisivat kaikkiin tilanteisiin Suomessa. Työn lopussa määritettiin simulointitulosten pohjalta GIS-laitoksen johtolähdölle suojausriskitaso, jossa on otettu huomioon salamoiden ja käyttötilanteiden todennäköisyydet.

Simulointitulosten perusteella voidaan päätellä, että suorien salamaniskujen kannalta GIS-kojeiston ylijännitesuojausta ei ole tarpeen tehostaa. Takaiskujen kannalta tilanne on kuitenkin vakavampi, sillä ne synnyttivät kojeiston jännitekestoisuuden ylittäviä jännitteitä jo suhteellisen pienillä salamavirroilla erityisesti sellaisessa käyttötilanteessa, jossa GIS-kojeiston katkaisija on avoimena.

Takaiskujen simulointitulosten pohjalta tehtiin todennäköisyystarkastelu, jossa laskettiin GIS-kojeiston jännitekestoisuuden ylittymisen aiheuttavien salamoiden keskimääräinen vuotuinen lukumäärä. Laskenta suoritettiin ensin samalla tavalla kuin aikaisemmissa Fingridin tilaamissa ylijännitesuojaus selvityksissä eli ei otettu huomioon käyttötilanteiden todennäköisyyksiä. Tämän menetelmän lopputuloksena oli suojausriskitaso, joka oli alitti standardin asettamat vaatimukset, mikä puoltaisi kaasueristeisten ylijännitesuojien hankintaa. Seuraavaksi suoritettiin sama laskenta, mutta otettiin huomioon avoimen katkaisijan todennäköisyys. Tällä kertaa lopputuloksena oli standardin vaatimukset täyttävä, realistinen suojausriskitaso.

Työn lopputuloksena suositellaan ylijännitesuojaus selvityksistä luopumista tulevissa 110 kV:n GIS-projekteissa, koska kaasueristeisille ylijännitesuojille ei tämän työn tulosten perusteella ole tarvetta ilmaeristeisten suojien lisäksi Suomen olosuhteissa. Lisäksi suositellaan, että tulevaisuudessa mahdollisesti rakennettavien, 220 ja 400 kV:n kaasueristeisten kytkinlaitosten ylijännitesuojaus selvityksissä otetaan GIS-laitoksen käyttötilanteiden todennäköisyydet huomioon.

Lähdeluettelo

- [1] Elovaara, J. ja Haarla, L. *Sähköverkot II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki, Otatieto, 2011.
- [2] ABB AG. *Gas-insulated Switchgear ELK-04 - Modular system up to 170 kV, 4000 A, 63 kA*. 2009. Verkkodokumentti. Viitattu 10.6.2017. Saatavissa: <http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-04>
- [3] Siemens AG. *GIS in the power engineering Guide*. Versio 7.1. Verkkodokumentti. Viitattu 10.6.2017. Saatavissa: <https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/energy-topics/powerengineeringguide/71/05-Switchgear-and-Substations.pdf#page=20>
- [4] Arora, A., Koch, H. Design features of GIS *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. San Francisco, 2005, s. 927–929.
- [5] Laitinen, T. Erikosiasiantuntija, kytkinlaitteet. Fingrid Oyj. Keskustelu 6.2.2017.
- [6] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. ja Palva, V. *Suurjännitetechniikka*. 4. painos. Helsinki, Otatieto, 2015.
- [7] Ilmatieteenlaitos. *Perustietoa ukkosesta*. Verkkosivu. Viitattu 3.5.2017. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/perustietoa-ukkosesta>
- [8] Ilmatieteenlaitos. *Suomen ukkosilmasto*. Verkkosivu. Viitattu 3.5.2017. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ukkosilmasto>
- [9] Mäkelä, A., Laurila, T. ja Haapalainen J. Salamahavainnot 2015. *Ilmatieteenlaitoksen raportteja*, 2016, nro 5.
- [10] Mäkelä, A. Thunderstorm climatology and lightning locations applications in northern Europe. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, fysiikan laitos, 2011.
- [11] CIGRE WG33.01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. *Cigré Technical Brochure 63*, 1991.
- [12] Kumar, V. V., Thomas, J. M. ja Naidu, M. S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, vol. 16, nro 4, s. 539–544.
- [13] Purnomoadi, A. P., Al-Suhaily, M. A. G., Meijer, S., Smit, J. J., Burow, S. ja Tenbohlen, S. The influence of free moving particles on the breakdown voltage of GIS under different electrical stresses. *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Bali, 2012, s. 383–386.
- [14] CIGRE WG33.13.09. Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations. *Cigré International Conference on Large High Voltage Electric Systems*. Pariisi, 1988.

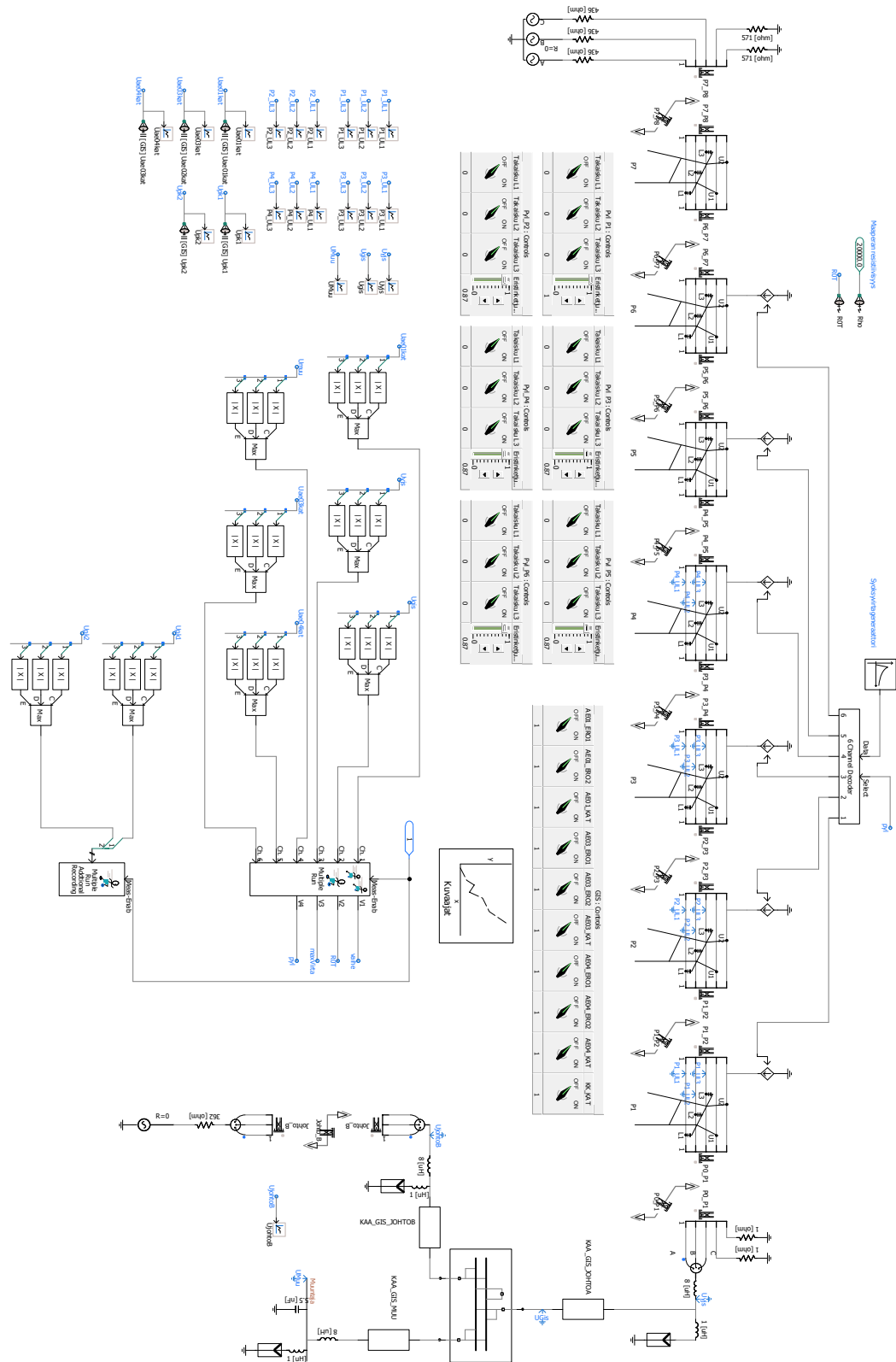
- [15] Aanestad, H., Deter, O., Röhsler, H., Lewis, J. ja Strnad, A. Substation earthing with special regard to transient ground potential rise design aims to reduce associated effects. *Cigré International Conference on Large High Voltage Electric Systems*. Pariisi, 1988.
- [16] Martinez-Velasco, J., A. *Transient analysis of power systems: solution techniques, tools and applications*. Iso-Britannia, Wiley & Sons, 2015.
- [17] Brown, G. W. Lightning performance – I shielding failures simplified. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, nro 1, s. 33–38.
- [18] Brown, G. W. ja Thuander, S. Frequency of distribution arrester discharge currents due to direct strokes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1976, vol. 95, nro 5, s. 1571–1578.
- [19] IEC 60099-4. *Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*. International standard, versio 2.0, 2004.
- [20] IEC 60099-5. *Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations*. International standard, versio 1.1, 2000.
- [21] ABB Ab. *High Voltage Surge Arresters. Buyer's Guide*. 2017. Verkkodokumentti. Viitattu 3.5.2017. Saatavissa: <http://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/high-voltage-arresters>
- [22] Imataki, M., Ujita, K., Fujiwara, Y., Ishibe, S. ja Nitta, T. Advanced metal oxide surge arrester for gas insulated switchgear (GIS) *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, vol. PAS-103, nro 10, s. 2290–2998.
- [23] Göhler, R. ja Klingbeil, L. Special requirements on gas-insulated metal-oxide surge arresters *IEEE International Conference on Power System Technology*. Chongqing, 2006, s. 1–6.
- [24] Siemens AG. *3ES surge arresters*, 2008. Verkkodokumentti. Viitattu 3.5.2017. Saatavissa: <https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/downloads/h51-catalogue-3es-english.pdf>
- [25] Richter, B. GIS-MO-surge arresters for 145 kV-systems *Fourth International Conference on Trends in Distribution Switchgear*. Lontoo, 1994, s. 178–182.
- [26] Richter, B. ja Pryor, B. M. Overvoltage protection in open air terminal and GIS in the 145 kV distribution system *Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400V-145kV for Utilities and Private Networks (Conf. Publ. No. 459)*. Lontoo, 1998, s. 139–144.
- [27] IEEE Std C62.22-2009. *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*. 2009.

- [28] Bak, C. L., Kessel, J., Atlason, V. ja Lund, J. Risk assessment of 170 kV GIS connected to combined cable/OHL network. *Proceedings of the Nordic Insulation Symposium*. Chalmersin teknillinen korkeakoulu, 2006.
- [29] Bakar, A. H. A., Ling, A. L., Mokhlis, H. ja Ping, H. W. Insulation co-ordination studies for 400kV GIS in a hydroelectric project in India. *International Conference on Power System Technology*. Hangzhou, 2010, s. 1–7.
- [30] Sarkar, B. N., Meera, K. S., Thomas, J., Garg, G., Ramnath, M., Tripathy, A. K. ja Mishra, S. C. Lightning Over voltage performance of 132kV GIS Substation in Malaysia. *Cigré paper 33-105*, 2002.
- [31] Meirelles, M. P., Vaisman, R., Junqueira, A. J. S., Azecedo, R., Lacorte, M. ja Hofbauer, W. Insulation coordination for GIS - new aspects. *Cigré paper 21-101*, 1998.
- [32] Rouco, L., Sigrist, L., Gago, H., Palazuelos, E., Bernal, J. ja Jimeno, M., A. Protection of power transformers connected to GIS against lightning overvoltages. *Cigré paper C4-205*, 2014.
- [33] Malek, Z. A. Surge arrester requirements study for transformer protection in 132 kV GIS substation. *International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*. Singapore, 2007, s. 494–499.
- [34] Okabe, S. ja Takami, J. Occurrence probability of lightning failure rates at substations in consideration of lightning stroke current waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, vol. 18, no. 1, s. 221–231.
- [35] Takami, J., Okabe, S. ja Zaima, E. Lightning Surge Overvoltages at Substations Due to Backflashover With Assumed Lightning Current Waveforms Based on Observations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 4, s. 2958–2969.
- [36] Mobarakei, S. T., Sami, T. ja Porkar, B. Back Flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination. *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Venetsia, 2012, s. 170–174.
- [37] Travakoli, A., Gholami, A. ja Parizad, A. Approaches for Suppressing of Lightning Overvoltage in the Gas-Insulated Substation (GIS). *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Chengdu, 2010, s. 1–5.
- [38] Chabrol, A. ja McDonagh, N. Calculation of lightning overvoltage failure rates for a gas insulated substation. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*. Tukholma, 2013, s. 1–4.
- [39] Chu, J. ja Vaddeboina, V. Probabilistic determination of the impact of lightning surges on 145kV GIS equipment – A comprehensive ATP/EMTP study. *47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Lontoo, 2012, s. 1–6.

- [40] Thanasaksiri, T. Studies of lightning overvoltages of 115 kV CMU GIS substation. *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Phetchaburi, 2012, s. 1–4.
- [41] CIGRE WG33.02. Guidelines for representation of network elements when calculating transients. *Cigré Technical Brochure 39*, 1990.
- [42] IEEE Fast front transient task force. Modeling guidelines for fast front transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 1, s. 493–506.
- [43] IEC 60071-4. *Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks*. Technical report, versio 1, 2004.
- [44] Ametami, A. *Numerical analysis of power system transients and dynamics*. Iso-Britannia, IET The institution of Engineering and Technology, 2014.
- [45] Tervo, J. Kaasueristeisen sähköaseman ylijännitesuojaus. Diplomityö, Vaasan yliopisto, teknillinen tiedekunta, 2013.
- [46] IEEE Task force on Very Fast Transients. Modelling and analysis guidelines for very fast transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 4, s. 2028–2035.
- [47] Fingrid Oyj, dokumenttihallintajärjestelmä. Viitattu 24.5.2017. Rajoitettu saatavuus.
- [48] Fingrid Oyj, tekninen eritelmä eristinketjuista. Viitattu 24.5.2017. Rajoitettu saatavuus.
- [49] Manitoba HVDC Research Centre. *Applications of PSCAD/EMTDC*, 2008. Verkkodokumentti. Viitattu 24.5.2017. Saatavissa: https://hvdc.ca/uploads/knowledge_base/application_20guide_202008_1.pdf?t=1470241744
- [50] Fingrid Oyj, omaisuusrekisteri. Viitattu 24.5.2017. Rajoitettu saatavuus.
- [51] Fingrid Oyj, tekninen eritelmä johtimista. Viitattu 24.5.2017. Rajoitettu saatavuus.
- [52] Maol. *Maol-taulukot*. Otava, 2007.
- [53] IEEE WG 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, vol. 7, no. 1, s. 302–309.
- [54] Pinceti, P. ja Giannettoni, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 2, s. 393–398.
- [55] Fernández, F. ja Díaz, R. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations. *Int. Conf. Power System Transients (IPAT'01)*. Rio de Janeiro, 2001.

- [56] Christodoulou, C. A., Ekonomou, L., Fotis, G. P., Karampelas, P. ja Stathopoulos, I. A. Parameters' optimisation for surge arrester circuit models. *IET Science, Measurement and Technology*, 2010, vol. 4, no. 2, s. 86–92.
- [57] ABB Ab. *TOV and protective characteristics for surge arrester - section PEXLIM R*. 2004. Verkkodokumentti. Viitattu 24.5.2017. Saatavissa: <http://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/high-voltage-arresters>
- [58] IEC 61000-4-5. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. International standard, versio 2, 2005.
- [59] Anderson, R. B. ja Eriksson, A. J. Lightning parameters for engineering application. *Electra* 1980, vol. 69, s. 65–102.
- [60] IEC 60071-2. *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*. International standard, versio 3, 1996.
- [61] IEC 60071-1. *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*. International standard, versio 8, 2006.
- [62] Ametami, A. A general formulation of impedance and admittance of cables. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980, vol. PAS-99, no. 3, s. 902–910.

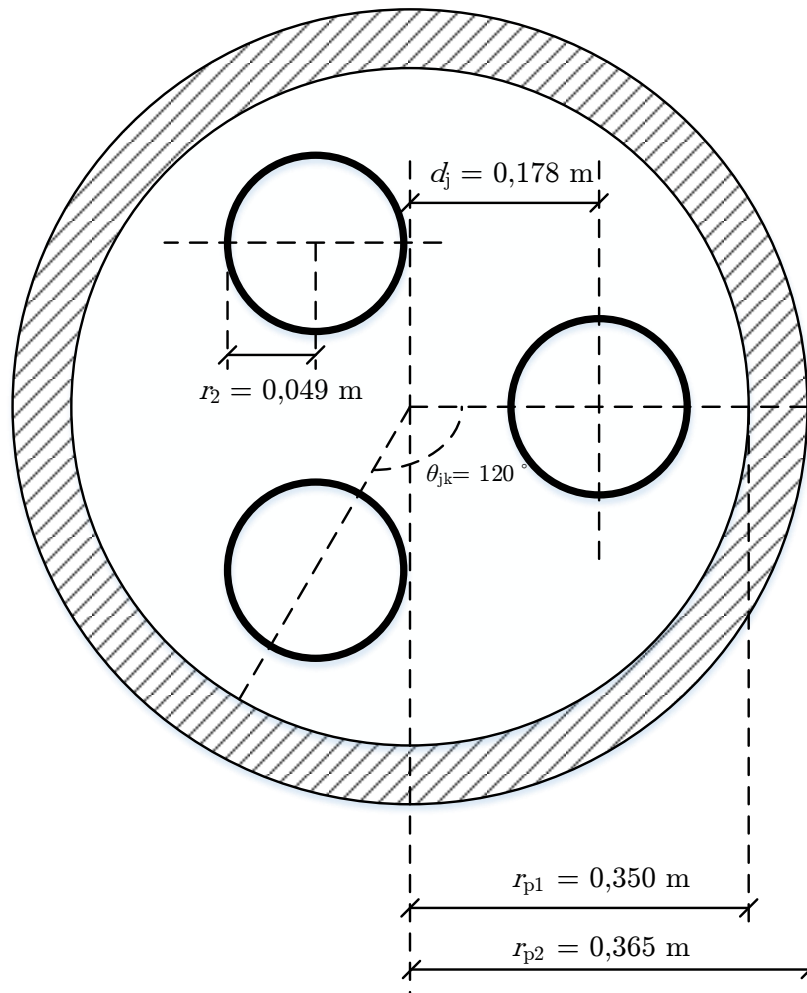
A Simulointimalli PSCAD:ssa



Kuva A1: PSCAD:ssa toteutettu simulointimalli kokonaisuudessaan.

B Kolmivaiheisesti koteloitun GIS-putken impedanssi- ja admittanssimatriisit

Kuvassa B1 on esitetty GIS-putken arvioidut mitat kojeiston pääkiskon kohdalta.



Kuva B1: Kolmivaiheisen GIS-putken mitat pääkiskon kohdalta arvioituna.

Sekä putken kuoren eli koteloinnin, että johtimien oletetaan olevan alumiinia, jolloin niiden resistiivisyys on $\rho_p = \rho_1 = 2.66 \cdot 10^{-8}$ [52] ja suhteellisen permeabiliteetti on $\mu_{rp} = \mu_{r1} = 1$. Eristeineenä toimivan SF₆ kaasun suhteellisen permittiivisyyden oletetaan olevan $\varepsilon_{rp} = 1$.

Putken asennetun 3-vaiheisen kaapelin impedanssimatriisi voidaan laskea yhtälöllä

$$[Z] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] + [Z_o], \quad (\text{B1})$$

missä $[Z_i]$ on putkessa olevan koaksiaalikaapelin sisäinen impedanssimatriisi, $[Z_p]$ on putken sisäinen impedanssimatriisi, $[Z_c]$ on putken ulko- ja sisäpinnan välinen impedanssimatriisi ja $[Z_o]$ on paluupiirin impedanssimatriisi.

Olettamalla putken kuori äärettömän paksuksi, yhtälö (B1) menee muotoon

$$[Z] = [Z_i] + [Z_p] \quad (\text{B2})$$

Kolmivaiheisen kaapelijärjestelmän tapauksessa kaapelin sisäinen impedanssimatriisi on

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & 0 & 0 \\ 0 & [Z_{i2}] & 0 \\ 0 & 0 & [Z_{i3}] \end{bmatrix}, \quad (\text{B3})$$

missä matriisit $[Z_{i_i}]$ ($i = 1, 2, 3$) redusoituvat yksittäisiksi alkioksi, kun tarkastellaan pelkästään johtimesta koostuvaa kaapelia (GIS-putken johdinta):

$$[Z_{i_i}] = z_{11} = \frac{j\omega}{2\pi} \cdot \frac{I_o(x_2) \cdot K_1(x_1) + K_0(x_2) \cdot I_1(x_1)}{x_2 D_1}, \quad (\text{B4})$$

missä I_0 ja I_1 ovat ensimmäisen lajin muokattuja Besselin funktiota, K_0 ja K_1 ovat toisen lajin muokattuja Besselin funktiota, j on imaginääriyksikkö, ω on kulmataajuus ja x_1 , x_2 , D_1 lasketaan yhtälöistä

$$x_1 = r_{p1} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_{rp}}{\rho_p}} \quad (\text{B5})$$

$$x_2 = r_{p2} \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_{rp}}{\rho_p}} \quad (\text{B6})$$

$$D_1 = I_1(x_2) \cdot K_1(x_1) - I_1(x_1) \cdot K_1(x_2), \quad (\text{B7})$$

missä r_{p1} on putken sisäsäde, r_{p2} on putken ulkosäde, ρ_p on putken resistiivisyys ja μ_{rp} on putken suhteellinen permeabiliteetti.

Putken sisäinen impedanssimatriisi on muotoa

$$[Z_p] = \begin{bmatrix} [Z_{p11}] & [Z_{p12}] & [Z_{p13}] \\ [Z_{p12}] & [Z_{p22}] & [Z_{p23}] \\ [Z_{p13}] & [Z_{p23}] & [Z_{p33}] \end{bmatrix}, \quad (\text{B8})$$

missä matriisit $[Z_{p_{jk}}]$ redusoituvat yksittäisiksi alkioksi kaapelien koostuessa pelkistä johtimista:

$$Z_{p_{jk}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_{rp} K_0(x_1)}{x_1 K_1(x_1)} + Q_{jk} + 2\mu_{rp} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{n(1 + \mu_{rp}) + x_1 K_{n-1}(x_1)/K_n(x_1)} \right), \quad (\text{B9})$$

missä

$$Q_{jj} = \ln \left(\frac{r_{p1}}{r_2} \left(1 - \left(\frac{d_j}{r_{p1}} \right)^2 \right) \right) \quad (\text{B10})$$

$$Q_{jk} = \ln \left(\frac{r_{p1}}{\sqrt{2d_j^2 - 2d_j^2 \cos(\theta_{jk})}} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} c_n/n \quad (\text{B11})$$

$$c_n = (d_j^2/r_{p1}^2)^n \cos(n\theta_{jk}), \quad (\text{B12})$$

missä alaindeksillä jk tarkoitetaan kahden vaiheen välistä parametria ja alaindeksillä j mitä tahansa vaihetta.

Admittanssimatriisin laskemiseksi on ensin ratkaistava potentiaalikertoimet. Putkeen, jonka kuori on jälleen oletettu äärettömän paksuksi, asennetuille 3-vaiheisille kaapeleille pätee

$$[P] = [P_i] + [P_p], \quad (\text{B13})$$

missä $[P_i]$ on koaksiaalikaapelin sisäinen potentiaalikerroinmatriisi ja $[P_p]$ on putken sisäinen potentiaalikerroinmatriisi.

Kaapelin sisäinen potentiaalikerroinmatriisi on muotoa

$$[P_i] = \begin{bmatrix} [P_{i_1}] & 0 & 0 \\ 0 & [P_{i_2}] & 0 \\ 0 & 0 & [P_{i_3}] \end{bmatrix}, \quad (\text{B14})$$

missä matriisit $[P_{i_i}]$ ($i = 1, 2, 3$) redusoituvat yksittäisiksi alkioksi, kun tarkastellaan pelkästään johtimesta koostuvaa kaapelia:

$$[P_{i_i}] = 0, \quad (\text{B15})$$

koska kaapeli ei sisällä eristinkerrosta vaan vain pelkän johtimen.

Putken sisäinen potentiaalikerroinmatriisi on muotoa

$$[P_p] = \begin{bmatrix} [P_{p_{11}}] & [P_{p_{12}}] & [P_{p_{13}}] \\ [P_{p_{12}}] & [P_{p_{22}}] & [P_{p_{23}}] \\ [P_{p_{13}}] & [P_{p_{23}}] & [P_{p_{33}}] \end{bmatrix}, \quad (\text{B16})$$

missä matriisit $[P_{p_{jk}}]$ ja $[P_{p_{jj}}]$ redusoituvat yksittäisiksi alkioksi kaapelien koostuessa pelkistä johtimista:

$$P_{p_{jk}} = \frac{Q_{jk}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rp}} \quad (\text{B17})$$

$$P_{p_{jj}} = \frac{Q_{jj}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{rp}} \quad (\text{B18})$$

Potentiaalikerroinmatriisi muutetaan admittanssimatriisiksi yhtälöllä

$$[Y] = j\omega \cdot [P]^{-1} \quad (\text{B19})$$

[62]

Impedanssi- ja admittanssimatriisi ratkaistiin MATLAB:ssa ja tulokseksi saatiin 50 Hz:n taajuudella:

$$[Z] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,0022 + j0,1068 & 0,0012 + j0,0371 & 0,0012 + j0,0371 \\ 0,0012 + j0,0371 & 0,0022 + j0,1068 & 0,0012 + j0,0371 \\ 0,0012 + j0,0371 & 0,0012 + j0,0371 & 0,0022 + j0,1068 \end{bmatrix}$$

$$[Y] = 10^{-9} \cdot \begin{bmatrix} 0,0000 + j0,2538 & 0,0000 - j0,0647 & 0,0000 - j0,0647 \\ 0,0000 - j0,0647 & 0,0000 + j0,2538 & 0,0000 - j0,0647 \\ 0,0000 - j0,0647 & 0,0000 - j0,0647 & 0,0000 + j0,2538 \end{bmatrix}$$

Lopuksi impedanssi- ja admittanssimatriisit muutetaan symmetristen komponenttien matriiseiksi käyttämällä muunnosmatriisia:

$$[Z_{\text{seq}}] = [T]^{-1}[Z][T] \quad (\text{B20})$$

$$[Y_{\text{seq}}] = [T]^{-1}[Y][T], \quad (\text{B21})$$

missä

$$[T] = 1/\sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 \\ 2 & -1 - j\sqrt{3} & -1 + j\sqrt{3} \\ 2 & -1 + j\sqrt{3} & -1 - j\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{B22})$$

$$[Z_{\text{seq}}] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,0047 + j0,1809 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0010 + j0,0697 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0010 + j0,0697 \end{bmatrix}$$

$$[Y_{\text{seq}}] = 10^{-9} \cdot \begin{bmatrix} 0 + j0,1245 & 0 & 0 \\ 0 & 0 + j0,3185 & 0 \\ 0 & 0 & 0 + j0,3185 \end{bmatrix}$$

Yllä olevista matriiseista saadaan poimittua suoraan PSCAD:n pii-sijaiskytkentäkomponentille tarvittavat nolla- ja myötäverkon resistanssit, reaktanssit ja suskeptanssit. Poimitut arvot ovat

$$r_{01} = 0,0047 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$x_{01} = 0,1809 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$b_{01} = 0,1245 \text{ nS/m}$$

$$r_{+1} = 0,0697 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$x_{+1} = 0,0010 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$b_{+1} = 0,3185 \text{ nS/m}$$