



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALEKS TUKIAINEN  
KAAPELIVERKKOON VARASTOITUNEEN ENERGIAN VAIKU-  
TUKSET KYTKENTÄYLIJÄNNITTEISIIN

Diplomityö

Tarkastajat: Prof. Pertti Järventausta  
ja TkT Ari Nikander  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty Tieto-  
ja sähkötekniikan tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 31.10.2018

## TIIVISTELMÄ

**ALEKS TUKIAINEN:** Kaapeliverkkoon varastoituneen energian vaikutukset kytkentäylijännitteisiin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 73 sivua, 2 liitesivua

Marraskuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot- ja markkinat

Tarkastajat: Prof. Pertti Järventausta ja TkT Ari Nikander

**Avainsanat:** Kaapeli, kaapeliverkko, kapasitanssi, sähkökenttä, kytkentäylijännite, jäännösvaraus

Tiukentuneiden toimitusvarmuusvaatimuksien vuoksi sähköverkkoyhtiöiden maakaapelointi on yleistynyt huomattavasti. Maakaapeleiden avulla vältetään myrskyjen ja lumi-kuormien aiheuttamilta sähkökatkoilta. Kaapeleiden sähköiset arvot poikkeavat perinteisistä avojohdoista, jonka vuoksi kaapelit vaikuttavat eri tavoin sähköverkon suunnitteluun ja käyttöön. Kaapelin kapasitanssi on huomattavasti suurempi kuin avojohdon, jonka seurauksena sähkökenttään varastoitunut energia kasvaa. Tässä diplomityössä on tutkittu, kuinka kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu verkkoon eri kytkentätilanteissa ja miten se vaikuttaa verkon kytkentäylijännitteisiin.

Työssä on rakennettu PSCAD-mallit Elenian Vilppulan sähköasemasta sekä yksinkertaistettu verkkomalli kuvitteellisesta täysin kaapeloidusta keskijänniteverkosta ja sähköasemasta. Simulointimalleilla tutkittuja kytkentätoimenpiteitä olivat kuormitetun ja tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön kytkennät, tyhjäkäyvän kaapelin kytkennät, tyhjäkäyvän kaapelin ja avojohdon yhdistelmän kytkennät, reaktorilla kompensoidun kaapelin kytkennät ja 1-vaiheisen maasulun kytkennät. Simuloinneissa on tutkittu lähinnä kaapeliverkkoon varastoituneen energia purkautumista irtikytkennän jälkeen ja palaavan jännitteen huippuarvolla tapahtuvia jälleenkytkentöjä.

Yleisesti kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu irtikytkennän jälkeen verkkoon aiheuttamatta merkittäviä ylijännitteitä. Ylijännitteitä voi kuitenkin esiintyä, jos kaapelin on kytkettynä induktiivinen kuorma tai varastoitunut energia ei ole kerennyt purkautua täysin ja verkkoon tulee jälleenkytkentä palaavan jännitteen huippuarvolla. Simulointien mukaan pahimpia kytkentäylijännitteitä aiheuttavia kaapeliverkon kytkentätoimenpiteitä ovat jäännösvarauksellisen tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmän jälleenkytkentä sekä reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkentä. Reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennästä aiheutuvat ylijännitteet riippuvat kuitenkin enemmän reaktorin magneettikenttään varastoituneesta energiasta ja lisäksi niitä vastaan voidaan suojautua tehokkaasti reaktorin napoihin asennettujen ylijännitesuojien avulla. Jäännösvarauksellisen tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmän jälleenkytkentä voi puolestaan aiheuttaa kriittisiä ylijännitteitä, koska kaapelin ja ilmajohdon kiinnityskohtaan asennetut ylijännitesuojat eivät vaikuta lainkaan syntyviin ylijännitteisiin. Kaikissa simuloinneissa kytkentäylijännitteet jäivät kuitenkin alle komponenttien jännitekestoisuuksien, mutta edellä mainitut kytkentätoimenpiteet vaativat erityishuomiota. Simuloinneista tulee lisäksi muistaa, että tuloksia ei olla verifioitu kenttämittausten perusteella, jonka vuoksi niitä ei voi soveltaa suoraan todellisuuden sähköverkkoihin.

## ABSTRACT

**ALEKS TUKIAINEN:** Cable network stored energy effects to the switching over-voltages

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 73 pages, 2 Appendix pages

November 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiners: Professor Pertti Järventausta ja D.Sc. (Tech.) Ari Nikander

Keywords: cable, cable network, capacitance, electric field, switching overvoltage, trapped charge

Due to restricted supply continuity criteria many distribution network companies have started to build their networks with underground cables. Underground cables protect network from outages caused by storms and snow loads. Cables electric characteristic values differs a lot from traditional overhead lines which affects a lot to the network designing and usage. Cable capacitance is much higher than overhead line and therefore the energy stored to the electric field increases. The topic of this master's thesis was to study how cable network capacitance stored energy discharges after the disconnection of different network combinations and how trapped charge affects to the switching overvoltages.

In the thesis two cable network models have been built with PSCAD -simulation software. Models consisted of Elenia's real 110/20 kV substation model and simplified substation model. The switching operations studied in the simulations were loaded and no-loaded 20 kV feeder switchings, no-load cable switchings, no load cable and overhead line segment switchings, reactor compensated cable switchings and switchings during line-to-ground earth fault. The cable capacitance stored energy discharge after the disconnection and switching overvoltages of auto-reclosings which occur at the transient recovery voltage maximum points have been studied in the simulations.

Generally, the cable capacitance stored energy discharges to the network after disconnection without causing any critical overvoltages. Although, the overvoltages may appear, if inductive load is connected to the cable or there is trapped charge in the cable at the auto-reclosing instant. From the simulation results it can be noticed that biggest switching overvoltages appeared at the reactor compensated cable switchings and no-load cable and overhead line segment with trapped charge switchings. The reactor compensated cable disconnection can cause overvoltages close to withstand level, but from the simulations can be seen that the overvoltages are more dependent on reactor stored energy and you can limit the overvoltages with surge arresters. No-load cable and overhead line segment with trapped charge auto-reclosing can be critical, because surge arresters connected to the cable and overhead line attachment point do not limit the overvoltages at all. In all simulations, the overvoltages were below components withstand voltage levels, but above switching operations requires special attention. It should be remembered from the simulations that they weren't validated with the field measurements, so they can't be directly adapted to the real networks.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty sähköverkkoyhtiö Elenia Oy:lle Verkko-omaisuus ja investoinnit -tiimissä. Työn ohjaajana Elenia Oy:ltä toimi DI Jarkko Peltola ja haluaisin erityisesti kiittää häntä asiantuntevasta ohjauksesta, loistavista kommentteista ja saamastani avusta työn aikana. Työn tarkastajina puolestaan toimivat Tampereen teknillisestä yliopistosta professori Pertti Järventausta ja TkT Ari Nikander, joita tahtoisin kiittää työn tarkastuksesta ja kommentoinnista. Kiitos kuuluu myös työkavereilleni, jotka ovat mahdollistaneet erittäin hyvän ja mielekkään työympäristön.

Haluaisin osoittaa kiitokseni myös opiskelujen aikaisille kavereilleni, jotka ovat tehneet opiskeluajoistani ikimuistoisia. Lopuksi haluaisin kiittää vielä perhettäni ja tyttöystävääni Jenniä saamastani tuesta opintojen ja diplomityön aikana.

Tampereella, 21.11.2018

Aleks Tukiainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KAAPELIN SÄHKÖISET OMINAISUUDET JA MALLINTAMINEN .....	2
	2.1 Kaapelin rakenne .....	2
	2.2 Kaapelin sähkömagneettisiin kenttiin varastoitunut energia.....	5
	2.3 Kaapelin mallintaminen .....	6
	2.3.1 $\pi$ -sijaiskytkentä .....	6
	2.3.2 Taajuusriippuva mallintaminen.....	8
3.	YLIJÄNNITTEIDEN LUOKITTELU JA YLIJÄNNITESUOJAUS .....	9
	3.1 Ylijännitteiden luokittelu ja niiden aiheuttajat .....	10
	3.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet .....	11
	3.1.2 Loivat transienttiylijännitteet .....	12
	3.1.3 Jyrkät transienttiylijännitteet.....	13
	3.1.4 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet .....	13
	3.2 Keskijänniteverkkojen ylijännitesuojaus.....	13
	3.2.1 Kipinävälisuojaus .....	14
	3.2.2 Metallioksidisuojaus.....	15
	3.3 Eristyskoordinaatio.....	15
4.	KYTKENTÄYLIJÄNNITTEIDEN SYNTYMEKANISMIT .....	18
	4.1 Kulkuaaltojen teoria .....	18
	4.1.1 Aaltoimpedanssi ja kulkuaaltojen etenemisnopeus.....	20
	4.1.2 Heijastukset ja vaimeneminen .....	21
	4.2 Kaapelin energisointi.....	23
	4.2.1 Jäännösvarauksen vaikutus .....	25
	4.3 Kaapelin irtikykentä .....	26
	4.3.1 Palaava jännite .....	30
	4.3.2 Jälleensyntyminen.....	31
5.	SIMULOINTIMALLIT .....	32
	5.1 Komponenttien mallinnus .....	32
	5.1.1 Kaapelit .....	32
	5.1.2 Avojohtot.....	35
	5.1.3 Syöttävä verkko.....	36
	5.1.4 Muuntajat .....	36
	5.1.5 Kytkinlaitteet.....	38
	5.1.6 Rinnakkaisreaktori .....	42
	5.1.7 Maasulkuvirran kompensointilaitteistot.....	43
	5.2 Vilppulan sähköaseman verkkomalli .....	44
	5.3 Yksinkertaistettu verkkomalli .....	46
	5.4 Mallien verifiointi .....	47
6.	SIMULOINTIEN TULOKSET JA TARKASTELU.....	52
	6.1 Simulointitulokset .....	52

6.1.1	Kuormitettu 20 kV johtolähtö .....	53
6.1.2	Tyhjäkäyvä 20 kV johtolähtö.....	57
6.1.3	Tyhjäkäyvä kaapeli .....	60
6.1.4	Reaktorilla kompensoitu kaapeli.....	62
6.1.5	1-vaiheinen maasulku .....	65
6.1.6	Ylijännitesuojien vaikutus.....	68
6.2	Tulosten arviointi ja kehitystarpeet .....	70
7.	YHTEENVETO .....	72
	LÄHTEET.....	74

LIITE A: VILPPULAN SÄHKÖASEMAN KOTINIEMEN LÄHDÖN RAKENNE

LIITE B: YKSINKERTAISTETUN VERKKOMALLIN PSCAD-MALLI

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AHXAMK-WP	Keskijänniteverkoissa käytetty kaapelityyppi
AXAL-TT	Keskijänniteverkoissa käytetty kaapelityyppi
CCL	Current Chopping Level, siirtymävirtataso
GIS	Gas-Insulated Switchgear, kaasueristeinen kytkinlaitos
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
MO	Metallioksidi
PAS	Päällystetty avojohto
PE	Polyeteeni
PEX, XPE, XPLE	Ristisilloitettu polyeteeni
PSCAD	Power System Computer Aided Design, sähkömagneettisten transienttien simulointiin tarkoitettu ohjelma
PP	Polypropeeni
PVC	Polyvinyylikloridi
Raven 54/9 Al/Fe	Keskijänniteverkoissa käytetty avojohtotyyppi
RLC-piiri	Virtapiiri, joka koostuu resistanssin R, induktanssin L ja kapasitanssin C sarjaankytkennästä
SF6	Rikkiheksafluoridi
TRV	Transient Recovery Voltage, Palaava transienttijännite
VTJ	Verkkotietojärjestelmä

# 1. JOHDANTO

Vuonna 2013 voimaan tullut sähkömarkkinalaki tiukensi sähköverkkoyhtiöiden toimitusvarmuusvaatimuksia entisestään. Uuden sähkömarkkinalain mukaan sähköverkko on suunniteltava ja rakennettava siten, että sähköverkossa ei esiinny myrskyn tai lumikuorman seurauksena yli 6 tuntia kestäviä sähkönjakelun keskeytyksiä asemakaava-alueella eikä yli 36 tuntia kestäviä sähkönjakelun keskeytyksiä asemakaava-alueen ulkopuolella [1]. Tiukentuneiden toimitusvarmuusvaatimusten johdosta sähköverkkojen maakaapelointi on yleistynyt huomattavasti. Laajamittainen maakaapelointi aiheuttaa kuitenkin myös omat haasteensa sähköverkolle. Maakaapelointi vaikuttaa huomattavasti muun muassa verkon loistehotaseeseen sekä maasulkusuojaukseen [2]. Kaapelin käyttökapasitanssi on huomattavasti suurempi kuin avojohdon, jonka vuoksi kaapelit tuottavat verkkoon suuria määriä kapasitiivista loistehoa, jota on yleensä tarpeen myös kompensoida. Suuremman kapasitanssinsa vuoksi kaapeliverkkoihin varastoituu myös huomattavasti enemmän energiaa kuin perinteisiin avojohtoverkkoihin.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, miten kaapeliverkkoon varastoinut energia purkautuu verkon eri kytkentätilanteissa ja miten se vaikuttaa verkon kytkentäylijännitteisiin. Syntyviä kytkentäylijännitteitä verrattiin komponenttien jännitekestoisuuksiin ja tutkittiin voiko kaapeliverkkoon varastoitunut energia aiheuttaa komponenttien rikkoutumisia tai toimintahäiriöitä. Tutkimus rajattiin keskijännitteisiin jakeluverkkoihin ja niissä tyypillisesti käytettyihin muovieristeisiin kaapeleihin. Työssä tehty tutkimus suoritettiin PSCAD -simulointiohjelmistolla, joka on tarkoitettu sähkömagneettisten transienttien tutkimiseen. Työssä PSCAD:lla rakennettiin verkkomalli Elenian Vilppulan sähköasemasta sekä yksinkertaistettu verkkomalli, jolla pystyttiin tutkimaan eri parametrien vaikutuksia.

Työn alussa käydään yleisesti läpi kaapeleiden rakenteeseen ja mallintamiseen liittyviä asioita sekä perehdytetään lukija kaapelin sähkömagneettisiin kenttiin varastoituneen energian teoriaan. Seuraavaksi käydään yleisesti läpi, kuinka ylijännitteitä luokitellaan ja miten niitä vastaan voidaan suojautua verkon eristyskoordinaation ja ylijännitesuojauksen avulla. Tämän jälkeen käydään läpi tarkemmin kaapeliverkon kytkentäylijännitteiden syntymismekanismit. Alkupään teorian jälkeen selitetään tarkemmin, miten eri komponentteja on työssä mallinnettu ja esitetään verkkomallien verkkorakenteet sekä niiden verifiointit. Viimeisessä kappaleessa ennen yhteenvetoa käydään läpi ja arvioidaan simulointien tuloksia sekä pohditaan simulointimallien kehitystarpeita.

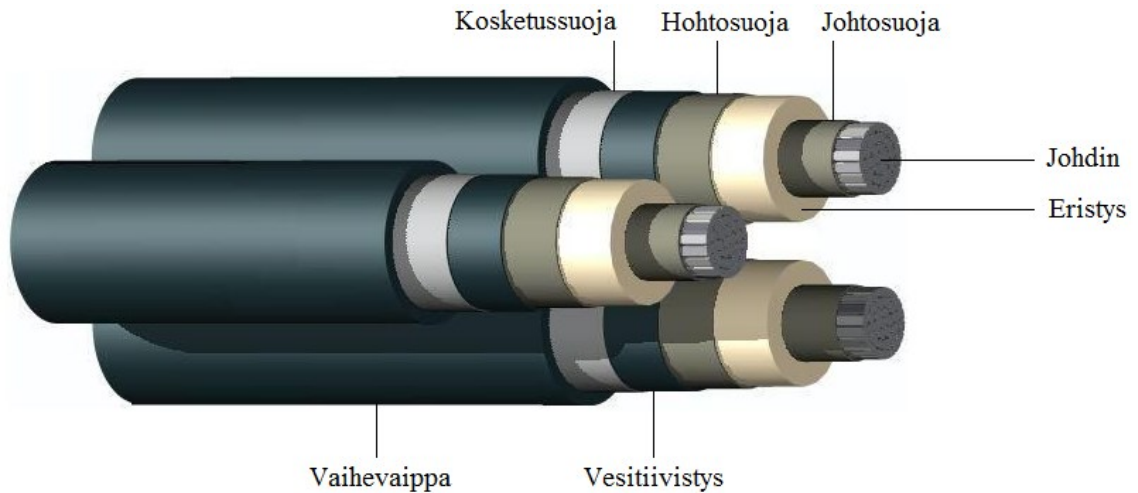


## 2. KAAPELIN SÄHKÖISET OMINAISUUDET JA MALLINTAMINEN

Kaapelin rakenne ja sähköiset ominaisuudet eroavat huomattavasti avojohdoista. Sähköisten suureiden eroavaisuudet johtuvat kaapelin asennustavasta ja rakenteesta. Keski-jänniteverkoissa tyypillisesti käytetyissä maakaapeleissa vaihejohtimet ovat kierretty yhteen toistensa ympärille, kun taas avojohdoissa vaihejohtimet ovat asennettuina pylväiden orsarakenteille tietyn välimatkan päähän toisistansa. Johtimen induktanssi on suoraan verrannollinen vaihejohtimien väliseen etäisyyteen, jonka seurauksena kaapelin induktanssi on pienempi kuin samalla jännitetasolla käytetyn avojohdon. Johtimen kapasitanssi on puolestaan kääntäen verrannollinen vaihejohtimien väliseen etäisyyteen, jonka seurauksena kaapelin kapasitanssi on suurempi kuin avojohdon. Kaapelin kapasitanssi on tyypillisesti 10-20 kertaa suurempi kuin samassa käyttötarkoituksessa olevan avojohdon [3]. Keski-jänniteverkoissa käytettyjen kaapeleiden kapasitanssi voi olla jopa yli 30 kertaa suurempi kuin avojohdojen. Suuremman kapasitanssinsa vuoksi kaapelit tuottavat verkoon suuria määriä kapasitiivista loistehoa, jonka seurauksena kaapeliverkoissa tarvitaan yleensä myös loistehon kompensointia. Suuremman kapasitanssin seurauksena myös johtimen sähkökenttään varastoitunut energia kasvaa, johon palataan tarkemmin alaluvussa 2.3. [4]

### 2.1 Kaapelin rakenne

Maakaapelin rakenne eroaa paljolti avojohdosta, koska kaapeli tarvitsee huomattavasti paremman eristyksen sijaintinsa vuoksi. Kaapeleiden rakenteet voivat olla erilaisia eri jännitetasoilla ja käyttötarkoituksissa, koska esimerkiksi kaivoksissa tai syvässä vedessä käytetyissä kaapeleissa vaaditaan usein parempi eristys kuin tavallisissa maahan asennetuissa kaapeleissa. Myöskin käytettävä eristysmateriaali vaikuttaa kaapelin rakenteeseen. Kaapeleille tyypillisiä rakenteita ovat johdin, johdinsuoja, eristys, hohtosuoja, kosketussuoja ja ulkoiset eristyskerrokset. Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen muovieristeisen AHXAMK-WP keskijännitekaapelin rakenne. Kuvasta nähdään, että kaapeli koostuu kolmesta identtisestä vaihejohtimesta, jotka on laitettu tiiviisti yhteen. Todellisuudessa kaapeli on lisäksi kierremäinen eli vaihejohtimet on punottu toistensa ympärille, jota ei kuvasta ilmene. [2]



**Kuva 1: AHXAMK-WP kaapelin rakenne. [5]**

Keskijännitekaapelin vaihejohdon sisimmän osan eli johtimen tehtävänä on toimia sähkövirran kulkutienä [6]. Johdin koostuu useista ohuista osajohtimista, jotka on punottu yhteen. Osajohtimien tarkoituksena on tehdä kaapelista taipuisampi ja helpommin liikutteltava. Johdin onkin rakennettu sitä ohuemmista osajohtimista, mitä enemmän liikkuvuutta ja taipuisuutta kaapeli vaatii. Johtimen eristyksen osittaispurkauksien estämiseksi ja pintakentänvoimakkuuden minimoimiseksi johdin rakennetaan pyörölangasta pyöröään muotoon sekä valssataan. Johtimen materiaalina käytetään joko alumiinia tai kuparia. Alumiini on enemmän käytössä suurjännitteillä, jolloin johtimelta vaaditaan suurempaa poikkipinta-alaa. Alumiini on myös kupariin verrattuna kevyempää ja halvempaa. Kuparilla on kuitenkin alumiinia pienempi resistiivisyys, jonka vuoksi kuparia käytettäessä päästään pienempiin poikkipinta-aloihin kuin alumiinia käytettäessä kaapelin virranjohtokyvyn pysyessä samana. [2]

Johdin- ja hohtosuoja tulevat eristyksen molemmille puolille siten, että johdinsuoja on eristyksen sisäpuolella ja hohtosuoja ulkopuolella. Johdin- ja hohtosuojan tarkoituksena on rajata johtimen aiheuttama sähkökenttä kahden sylinteripinnan väliin. Johdin- ja hohtosuojaa käytettäessä kentänvoimakkuus homogeeniselle eristeelle voidaan laskea yhtälöstä (1)

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_u}{r_s}} \quad (1)$$

, jossa  $r$  on etäisyys keskipisteestä,  $r_u$  on ulkoelektrodin eli vaipan tai hohtosuojan säde ja  $r_s$  on sisäelektrodin eli johtimen tai johdinsuojan säde. Yhtälöstä (1) voidaan päätellä, että kentänvoimakkuus on suurimmillaan johtimen pinnalla. Johdin- ja hohtosuojat valmistetaan yleensä puolijohtavasta materiaalista, mutta hohtosuoja voidaan valmistaa myös johtavista metallinauhoista. Johdinsuojan tarkoitus on lisäksi tasoittaa johtimen pinnan epätasaisuuksia ja siten pienentää johtimen aiheuttamia kentänvoimakkuuden huippuja. Johdin- ja hohtosuojien tarve riippuu pitkälti käyttöjännitteestä ja niitä käytetäänkin

ainoastaan keski- ja suurjännitekaapeleilla. Varsinkin suurjännitteisillä muovieristeisillä kaapeleilla johdinsuojan käyttö on välttämätöntä, koska muovieristeet eivät kestä osittaispurkauksien aiheuttamia rasituksia. [2]

Johdin- ja hohtosuojan välissä on varsinainen eristys. Eristyskerroksen tavoitteena on antaa kaapelille riittävä jännitekestoisuus ja siirtää johtimen häviöistä aiheutuva lämpö ulos kaapelista. Eristys määrää kaapelin kuormitettavuuden, koska liiallinen lämpö vanhentaa eristystä ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa läpilyönnin tai jopa oikosulun, jos eristys siirtyy lämmön vaikutuksesta pois paikoiltaan. Eristyksessä käytettäviä materiaaleja ovat öljykyllästeinen paperi, erilaiset muovit tai edellä mainittujen yhdistelmät. Nykyään eristyksen valmistuksessa on siirrytty lähes kokonaan muovieristeisiin, mutta öljypaperieristeisiäkin kaapeleita on edelleen laajalti käytössä. Muovieristeen materiaalina käytetään esimerkiksi polyeteeniä (PE), polypropeenaa (PP) ja etyleeni-propeenikumia. Varsinkin ristosilloitettu polyeteeni (PEX, XPE tai XLPE) on ollut erityisen suosittu kaapeleiden valmistajien keskuudessa. Eristystä valmistettaessa on tavoitteena saada eristeestä mahdollisimman puhdas, homogeeninen ja kuplaton, jotta kaapelille saavutettaisiin mahdollisimman pitkä elinikä. Eristykseen voi valmistettaessa jäädä myös kosteutta, jonka vuoksi kaapelivalmistajat ovat panostaneet valmistusteknologian kehittämiseen. Suomessa onkin kehitetty vedetön valmistustapa, joka on nykyään vallitseva tapa polyeteenikaapeleiden valmistuksessa. [2]

Kosketussuojan on tarkoitus toimia varaus- ja vikavirtojen kulkutienä, häiriösuojana sekä turvallisuuslaitteena. Kosketussuoja valmistetaan metallista ja käytettäviä metalleja ovat lyijy, alumiini, kupari tai teräs. Kaapelityypillä ja käyttötarkoituksella on vaikutusta kosketussuojan rakenteeseen. Kosketussuoja voi olla esimerkiksi rakennettu erikseen jokaiselle vaihejohtimelle tai kaikille vaiheille yhteiseksi. Kosketussuoja estää myös veden pääsyn kaapeliin poikittaissuunnassa. Pitkittäissuuntaisen veden etenemisen estämiseksi kaapeleissa on käytetty veden vaikutuksesta paisuvia materiaaleja, kuten esimerkiksi kuvan 1 mukaisessa AHXAMK-WP kaapelissa on käytetty puolijohtavaa veden vaikutuksesta paisuvaa nauhaa, joka on sijoitettu kosketussuojan alapuolelle. Kaapelin valmistusvaiheessa myös kaapelin osajohtimien väliin sijoitetaan pulveria, joka turpoaa veden vaikutuksesta, ja näin estää veden kulkeutumisen kaapelin sisällä. [2]

Kaapelin ulkoisimmasta eristekerroksesta käytetään yleensä nimeä vaippa. Vaipan tarkoituksena on antaa kaapelille riittävä mekaaninen suoja ulkoisille rasituksille. Vaippa voi olla rakennettu metallista, muovista tai kumista. Metallivaippojen haittana kuitenkin on se, että ne tarvitsevat erikseen vielä korroosiosuojan. Korroosiosuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi bitumilla tai muovivaipalla. Muovivaipoissa käytettäviä materiaaleja ovat polyeteenit, mutta myös polyvinyylidikloridi (PVC) on ollut käytössä lähinnä pienjännitekaapeleissa. Kaapeli voidaan myöskin suojata vaativissa olosuhteissa kuten syvissä vesissä tai kaivoksissa armeeraamalla. Armeerauksessa kaapeli päällystetään teräsnauhoilla, jotta riittävä mekaaninen kesto saavutettaisiin. [2]

## 2.2 Kaapelin sähkömagneettisiin kenttiin varastoitunut energia

Johtoja käytetään sähköenergian siirtämiseen tuotannosta kuluttajille. Johdolla tehoa ei siirretä itse johdossa, vaan sen ympärillä vaikuttavissa sähkömagneettisissa kentissä, joita ovat sähkö- ja magneettikentät. Johdon tehtävänä on ohjata kenttiä ja mahdollistaa tarvittun tehon siirtäminen. Täten voidaan päätellä, että johdolla myös energia on sitoutuneena sähkö- ja magneettikenttiin. Sähkökenttään sitoutunut energia saadaan laskettua yksinkertaisimmillaan kaavalla (2)

$$W_e = \frac{1}{2} C u^2 \quad (2)$$

, jossa  $C$  on johtimen kapasitanssi ja  $u$  on johtimessa vaikuttava jännite [7]. Magneettikenttään sitoutunut energia saadaan puolestaan laskettua kaavalla (3)

$$W_m = \frac{1}{2} L i^2 \quad (3)$$

, jossa  $L$  on johtimen induktanssi ja  $i$  on johdolla kulkeva virta. Sähkökenttään sitoutuneen energian kaavasta voidaan päätellä, että sähkökenttään on sitoutuneena energiaa, kun johdolla on jännite. Magneettikenttään sitoutuneen energian kaavasta puolestaan voidaan päätellä, että magneettikenttään on sitoutuneena energiaa, kun johdolla kulkee virta. Kun jännite ja virta ovat sinimuotoisia, sähkö- ja magneettikenttiin sitoutuneet energiat vaihtelevat ajan funktiona. Kolmivaihejärjestelmässä vaiheiden jännitteiden ja virtojen välillä on  $120^\circ$  vaihe-ero, jonka seurauksena energia jakautuu eri ajanhetkellä vaiheiden välille eri tavoin. Tällöin tietyn vaiheen sähkö- ja magneettikenttiin varastoituneet hetkelliset energiat voidaan laskea kaavoilla (4) ja (5)

$$W_e = \frac{1}{2} C (\sqrt{2} V \sin(\omega t - \alpha))^2 \quad (4)$$

$$W_m = \frac{1}{2} L (\sqrt{2} I \sin(\omega t - \alpha))^2 \quad (5)$$

, joissa  $V$  on vaihejännitteen tehollisarvo,  $I$  virran tehollisarvo,  $\omega$  verkon kulmataajuus ja  $\alpha$  vaiheiden välinen kulmaero radiaaneina [7]. Kaavoista (4) ja (5) nähdään, että yhteen vaiheeseen sitoutuneen energian määrä voi olla hetkellisesti myös nolla. Tällöin energia on sitoutuneena kahteen muuhun vaiheeseen. Kuten aiemmin mainittiin, kaapelin kapasitanssi on huomattavasti suurempi kuin avojohtojen. Kapasitanssi voi olla jopa 10-30 kertainen verrattuna avojohtoon, jonka seurauksena kaapelin sähkökenttään varastoituu myös enemmän energiaa. Kaapeleiden induktanssi puolestaan on pienempi kuin avojohtojilla, jonka vuoksi tässä diplomityössä on keskitytty tarkastelemaan lähinnä kaapelin sähkökenttään varastoitunutta energiaa ja sen vaikutuksia verkon kytkentäylijännitteisiin. [4] [7] [8]

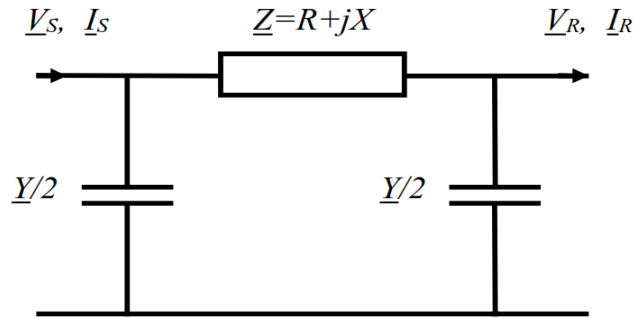
## 2.3 Kaapelin mallintaminen

Kaapeleita voidaan mallintaa siirtojohtojen tavoin keskitetyillä sijaiskytkennöillä tai jakautuneilla vakioilla. Keskitetyissä sijaiskytkennöissä kaapelin sähköiset suureet on kuvattu keskitettyinä vakioina, kun taas jakautuneita vakioita hyödyntävissä malleissa sähköisten suureiden ajatellaan jakautuneiksi tasaisesti pitkin johtoa. Keskitetyt sijaiskytkennät soveltuvat jatkuvan tilan mallintamiseen, joissa taajuuden voidaan olettaa pysyvän vakiona. Tällaisia tehtäviä ovat esimerkiksi tietyn verkon tehonjaon selvitykset. Johtopituuden kasvaessa johtoja tulisi kuvata pitkän siirtojohtoon yhtälöillä jakautuneilla vakioilla virran ja jännitteen aaltoluonteen vuoksi. Tehonsiirtotehtävissä pitkiä johtoja voidaan kuitenkin mallintaa nk. tarkoilla keskitetyillä sijaiskytkennöillä, joissa aaltoluonne otetaan huomioon korjaamalla johdon sähköisiä suureita pitkän siirtojohtoon yhtälöistä johdetuilla vakioilla. Vakiot saadaan johdettua, kun ratkaistaan sijaiskytkennästä alkuun jännitteet ja virrat loppupään jännitteen ja virran yhtälöiden avulla ja verrataan tulosta pitkän siirtojohtoon yhtälöiden ratkaisuihin. [3] [9]

Keskitettyjä sijaiskytkentöjä ovat  $\pi$ - ja T-sijaiskytkennät. Näistä T-sijaiskytkentä ei ole tietokonelaskennan kannalta kovinkaan edullinen, koska se tuottaa  $\pi$ -sijaiskytkentään verrattuna yhden ylimääräisen solmupisteen, joka hidastaa turhaan laskentaa. T-sijaiskytkentää voidaan kuitenkin käyttää käsin laskennassa. Keskitettyjä sijaiskytkentöjä käytettäessä verkon taajuuden oletettiin olevan vakio koko tarkastelujakson ajan. Verkon kytkennöistä ja salamaniskuista aiheutuneet transienttiylijännitteet eivät kuitenkaan esiinny enää verkkotaajuudella, jonka vuoksi niitä mallinnettaessa tarvitaan taajuusriippuvia malleja. Taajuusriippuvissa malleissa johdon sähköiset suureet ovat kuvattu jakautunein vakioin pitkin johtoa, ja ne ottavat tarkasti huomioon virran ja jännitteet aaltoluonteen eri taajuuksilla. Pitkän siirtojohtoon mallien ja taajuusriippuvien mallien ero on, että pitkän siirtojohtoon yhtälöissä tarkastellaan tehollisarvoja ja liikutaan aina ajan ja paikan määrittämässä tasossa, kun taas taajuusriippuvissa malleissa tarkastellaan hetkellisarvoja Laplace-tasossa. [2] [9]

### 2.3.1 $\pi$ -sijaiskytkentä

Johdon  $\pi$ -sijaiskytkennässä kaapelia kuvataan keskitetyllä impedanssilla ja admittanssilla. Impedanssin ja admittanssin arvot lasketaan kertomalla kilometriä kohden ilmoitetut arvot johtopituudella. Sijaiskytkennässä kaapelin kokonaisadmittanssi on jaettu kahdella ja sijoitettu kaapelin alku- ja loppupäihin, joiden väliin on mallinnettu kaapelin kokonaisimpedanssi. Kuvassa 2 on esitetty kaapelin 1-vaiheinen  $\pi$ -sijaiskytkentä. [10]



**Kuva 2: Kaapelin  $\pi$ -sijaiskytkentä. [11]**

Kuvassa  $V_S$  ja  $I_S$  ovat alkupään jännite ja virta,  $V_R$  ja  $I_R$  loppupään jännite ja virta,  $Z$  johtimen impedanssi ja  $Y$  johtimen admittanssi.  $\pi$ -sijaiskytkennän alku- ja loppupään jännitteet voidaan ratkaista siirtovakioiden avulla matriisiyhtälöparista (6). [10]

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

Siirtovakiot A, B, C ja D puolestaan voidaan ratkaista yhtälöiden (7), (8), (9) ja (10) avulla.

$$A = 1 + \frac{1}{2} * YZ \quad (7)$$

$$B = Z \quad (8)$$

$$C = Y \left( 1 + \frac{1}{4} * YZ \right) \quad (9)$$

$$D = A \quad (10)$$

Perinteisesti siirtovakiot voidaan laskea yllä olevien kaavojen perusteella, jos kyseessä on alle 250 kilometriä pitkä avojohdo. Kaapeleilla ei kuitenkaan voida soveltaa samaa pituuden arvoa, koska kaapelin sähköiset arvot eroavat huomattavasti avojohdoista [9]. Jännitteen ja virran aaltoluonne voidaan ottaa huomioon korjaamalla sijaiskytkennän impedanssin ja admittanssin arvoja yhtälöiden (11) ja (12) mukaisesti. [9]

$$Z' = Z * \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (11)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} * \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (12)$$

Yhtälöissä  $\gamma$  on mallinnettavan johdon etenemiskerroin ja  $l$  on johtimen pituus. Korjattuja impedanssin ja admittanssin arvoja käytettäessä puhutaan tarkasta  $\pi$ -sijaiskytkennästä.  $\pi$ -sijaiskytkentä soveltuu parhaiten malleihin, joissa taajuus pysyy vakiona. Täten transienttiylijännitteitä tutkittaessa tulisi mieluummin käyttää taajuusriippuvia malleja. [3] [9]

### 2.3.2 Taajuusriippuva mallintaminen

Kaapeleissa esiintyviä transienttiylijännitteitä tutkiessa tulee käyttää taajuusriippuvia malleja. Tämä johtuu siitä, että transienttiylijännitteet eivät esiinny verkkotaajuudella, jolloin kaapelin tarkka mallintaminen monimutkaistuu. Kuten aiemmin mainittiin, keskitettyjen sijaiskytkentöjen avulla johtoa voidaan mallintaa ainoastaan vakiotaajuudella, jolloin myös verkkoparametrit pysyvät vakioina. Taajuusriippuvassa mallissa johdon impedanssi ja admittanssi on kuvattu jakautunein vakioin ja malli on taajuusriippuva kaikkien parametrien osalta. [12]

Taajuusriippuvassa mallissa verkkoparametrien määrittelyssä joudutaan käyttämään kulkuaaltoilmiöihin soveltuvaa laskentaa taajuuserosta johtuen. Kulkuaaltoilmiötä käsitellään tarkemmin luvussa 4.1. Taajuusriippuvan mallin tarkoituksena on laskea verkkoparametrit uudelleen taajuuden muuttuessa. Malli antaa virran ja jännitteen käyttäytymisestä huomattavasti tarkemman kuvan kuin keskitettyjä parametreja käyttävät mallit. PSCAD-sovelluksessa on valmiina kaapelin taajuusriippuva malli (Frequency Dependent Phase Model), joka on tällä hetkellä tarkin saatavilla oleva kaapelin malli. Mallissa kaapelin sähköiset suureet lasketaan taajuustasossa, jonka jälkeen ratkaisut muutetaan aikatasoon käyttäen Fourier- tai Z-muunnosta. Ratkaisut on muutettu takaisin aikatasoon, koska tällöin on helpompi tutkia jännitteen ja virran käyttäytymistä ajan muuttuessa. [3] [12] [13]

### 3. YLIJÄNNITTEIDEN LUOKITTELU JA YLIJÄNNITESUOJAUS

Sähköverkon ylijännitteellä tarkoitetaan jännitettä, joka ylittää eristysrakenteelle spesifisen referenssiarvon. Sähkön siirtoverkoissa referenssiarvo on sama kuin verkon suurin käyttöjännite  $U_m$ . Eristysrakenteen referenssiarvo on esimerkiksi vaiheiden väliselle eristykselle kyseessä olevan jänniteportaan laitteen suurimman käyttöjännitteen  $U_m$  huippuarvo  $\sqrt{2}U_m$  ja vaiheen ja maan välille vaihejännitteen huippuarvo  $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U_m$ . Alle 72,5 kV verkoissa laitteen suurin käyttöjännite voi kuitenkin olla suurempi kuin verkon suurin käyttöjännite, jolloin laitteiden suurimmat käyttöjännitteet tulee selvittää laitteiden teknisistä tiedoista. Suurimmalla käyttöjännitteellä tarkoitetaan yleisesti jännitettä, joka voi esiintyä normaaleissa käyttöolosuhteissa, milloin tahansa ja missä tahansa järjestelmän kohdassa [14]. Taulukossa 1 on esitetty eri nimellisjännitteille määriteltyjä suurimpia sallittuja käyttöjännitteitä. [13]

**Taulukko 1: Nimellisjännitteitä ( $U_N$ ) vastaavat suurimmat käyttöjännitteet ( $U_m$ ) [15].**

$U_m$ (kV)	3,6	7,2	12	24	36	52	123	245	420
$U_N$ (kV)	3	6	10	20	30	45	110	220	400

Ylijännitteet rasittavat sähköverkon komponentteja normaalin käyttöjännitteen lisäksi. Ylijännitteille on ominaista, että ne poikkeavat aaltomuodoltaan ja taajuudeltaan normaalista verkkotaajuudesta jännitteestä. Ylijännitteitä havainnollistetaan niiden huippuarvolla ja ne esitetään suhteellisina tai absoluuttisina arvoina. Ylijännitteiden suhteellisarvot voidaan ilmoittaa kahdella tavalla, jakamalla ylijännitteen huippuarvo kyseisen jänniteportaan referenssiarvolla tai ennen ylijännitettä vaikuttaneen jännitteen huippuarvolla. Jälkimmäisestä tavasta käytetään yleisemmin nimeä ylijännitekerroin. Suhteellisarvoja käytettäessä tulee ilmoittaa myös vertailujännite. Katkaisijoita ja erottimia suunniteltaessa on tärkeää tutkia myös pitkittäisiä ylijännitteitä, jotka vaikuttavat kytkinlaitteiden avausväleissä ja rasittavat niiden eristyksiä. [13]

Ylijännitteillä voi olla merkittäviä vaikutuksia sähköverkon laitteiden eristysrakenteisiin. Ylijännitteet voivat aiheuttaa toimintahäiriöitä tai komponenttien rikkoontumisia, jotka voivat pahimmillaan johtaa sähkönjakelun keskeytymiseen. Verkossa esiintyviä ylijännitteitä vastaan voidaan suojautua kuitenkin riittävällä ylijännitesuojauksella ja eristyskoordinaatiolla. [13]



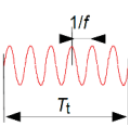
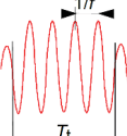
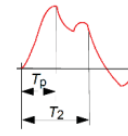
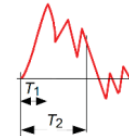
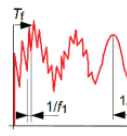
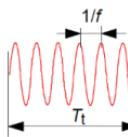
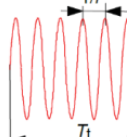
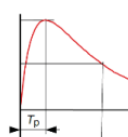
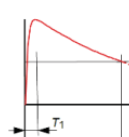
### 3.1 Ylijännitteiden luokittelu ja niiden aiheuttajat

Ylijännitteitä voi aiheutua sähköverkossa monista syistä. Ylijännitteen aiheuttaja voi olla esimerkiksi salamanisku, verkossa oleva vika, kuorman irtoaminen verkosta, kytkentätoimenpide tai resonanssi. Syntyvät ylijännitteet ovat aaltomuodoltaan ja kestoaltaan erilaisia, jonka vuoksi niitä on tarpeen luokitella. Ylijännitteitä luokiteltiin aikaisemmin niiden aiheuttajan perusteella, mutta nykyään tärkeämpi luokittelutapa perustuu ylijännitteen aaltomuotoon. Nykyisin ylijännitteet luokitellaan neljään kategoriaan:

- pientaajuiset ylijännitteet
- loivat transienttiylijiännitteet
- jyrkät transienttiylijiännitteet
- erittäin jyrkät transienttiylijiännitteet.

Näistä pientaajuiset ylijännitteet, jotka aiemmin tunnettiin nimellä käyttötaajuiset ylijännitteet, ovat jaksollisia ja hitaasti vaimenevia, kun taas transienttiylijiännitteet ovat transienttiluonteisia ja nopeasti vaimenevia. Ylijännitemuotoja on havainnollistettu tarkemmin taulukossa 2. [13] [16]

**Taulukko 2: Ylijännitelajit ja niitä vastaavat koejännitemuodot [17].**

Luokka	Pientaajuiset ylijännitteet		Transienttiylijiännitteet		
	Jatkuva	Hetkellinen	Loivat	Jyrkät	Erittäin jyrkät
Jännitteen tai ylijännitteen muoto					
Jännitteen tai ylijännitteen kestoajan vaihteluväli	$f = 50 \text{ Hz}$ tai $60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standardikoejännitteen muoto	 $f = 50 \text{ Hz}$ tai $60 \text{ Hz}$ $T_t^a$	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Standardin mukainen jännitekestoisuuskoete	a	Lyhytkestoinen käyttötaajuinen testi	Kytkentäsyöksypulssi	Salama-syöksypulssi	a

<sup>a</sup> Kyseisestä laitetypistä vastaava toimikunta määrittelee erikseen.

Taulukossa 2 on esitetty myös eri ylijännitelajeja vastaavat koejännitemuodot, joita käytetään laitteiden jännitelujuuksia määriteltäessä. Koejännitemuodot ovat olleet tarpeellisia määrittää, koska jännitelujuus riippuu rasituksen muodosta. Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet ovat uusi luokka, jonka vuoksi niiden osalta ei olla päästy yksimielisyyteen koejännitteen muodosta ja testaustarpeesta. Koejännitelajit eivät kuitenkaan pysty täysin havainnollistamaan kaikkia verkossa esiintyviä jänniterasituksia, koska rasitukset voivat muuttua esimerkiksi uuden laitetekniikan tai suuremman siirtojännitteen käytön johdosta. [13] [2]

### 3.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuiset ylijännitteet syntyvät kytkentätoimenpiteiden ja verkon tilanmuutoksien yhteydessä. Pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttavien tapahtumien yhteydessä syntyy tyypillisesti myös loivia transienttiylijännitteitä. Syntyvän pientaajuisen ylijännitteen suuruuteen ja keston vaikuttaa huomattavasti jännitteensäätöön osallistuvien laitteiden ominaisuudet sekä verkossa olevien generaattoreiden pyörimisnopeuden säätö. Myös verkon epälineaarisilla osilla ja resonansseilla voi olla vaikutusta pientaajuisen ylijännitteen syntyämisessä. Tavallisimpia pientaajuisen ylijännitteen aiheuttajia ovat maasulut, kuorman äkilliset irti kytkemiset, Ferranti-ilmiö, vajaanapaiset toiminnot tai katkokset, generaattoreiden itseherätykset ja erilaiset resonanssit. [13] [2]

Yleisin pientaajuisen ylijännitteen aiheuttaja on yksivaiheinen maasulku. Yksivaiheisessa maasulussa kahden terveen vaiheen vaihejännite alkaa nousta. Syntyvä ylijännite esiintyy tavallisesti samalla taajuudella kuin verkon perustaajuus ja sen suuruus riippuu verkon maadoitustavasta ja vikaimpedanssista. Suomessa keskijänniteverkot ovat sammutettuja tai maasta erotettuja. 110 kV verkko puolestaan on suurimmaksi osin osittain maadoitettu, mutta myös sammutettuja 110 kV verkkoja löytyy jonkin verran. Maasulun yhteydessä tapahtuvaa terveen vaiheen jännitteen nousua kuvataan maasulkukertoimella  $k$ , joka saadaan maasulun aiheuttaman terveen vaiheen ylijännitteen huippuarvon ja ennen vikaa vaikuttaneen jännitteen huippuarvon suhteena. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa 20 kV verkoissa maasulkukertoimen arvo on yleensä  $k \approx 1,8$  ja osittain maadoitetuissa 110 kV verkoissa  $k \approx 1,7$ . [13] [2]

Kuorman äkillinen irti kytkeminen saa johdon loppupään jännitteen nousemaan jännitehäviön kadotessa johdolta. Kuorman irti kytkeytyminen kasvattaa myös generaattoreiden pyörimisnopeutta, joka nostaa verkon jännitettä. Loppupään jännitteen nousulla voi olla suuri merkitys, jos tyhjäkäynnille jäävä johto on pitkä kaapeli tai suurjänniteajojohto. Tyhjäkäynnillä olevan kompensoimattoman pitkän kaapelin tai suurjännitejohdon kapasitiivinen varausvirta aiheuttaa jännitteen nousemisen johdon loppupäätä kohti mentäessä. Tästä ilmiöstä käytetään yleisemmin nimeä Ferranti-ilmiö. Ferranti-ilmiö voi aiheutua myös kevyellä kuormituksella, jolloin johdon kapasitiivinen varausvirta on suurempi

kuin kuormitusvirta. Ferranti-ilmiön vaikutus saadaan eliminoitua riittävällä kapasitiivisen varausvirran kompensoinnilla. Ferranti-ilmiötä esiintyy enemmän kaapeleissa kuin avojohdoissa niiden suuremman kapasitanssin vuoksi. [2] [18]

Resonansseja ja niistä aiheutuneita ylijännitteitä voi esiintyä esimerkiksi tilanteessa, jossa verkossa oleva värähtelypiiri on resonanssissa yliaaltolähteen syöttämällä taajuudella. Tällainen tilanne voi esimerkiksi syntyä, kun vaihtojännitteellä syötetty kyllästynyt muuntaja tai tyristorisuuntaaja syöttää verkkoon yliaaltoja, ja verkossa on samalla taajuudella yliaallon kanssa oleva rinnakkaisresonanssi. Rinnakkaisresonanssi voi syntyä esimerkiksi syöttävän verkon ja kompensointikondensaattorin välille. Resonanssi voi syntyä myös epälineaarisen induktanssin ja pienen kapasitanssin välille, jolloin puhutaan ferresonanssista. Ferresonanssia on havaittu etenkin maasta erotetuissa järjestelmissä. Resonanssien aiheuttamia ylijännitteitä vastaan voidaan kuitenkin suojautua hyvin jo ennakkoon verkostosuunnittelun avulla ja resonansseja aiheuttavia käyttötilanteita välttämällä. [13] [2]

### 3.1.2 Loivat transienttiylijännitteet

Loivat transienttiylijännitteet syntyvät tavallisesti verkon tilanmuutosten seurauksena tasoitusilmiöinä. Tilanmuutos voi aiheutua erilaisten kytkentätoimenpiteiden tai vikojen seurauksena. Tavallisemmin loivia transienttiylijännitteitä esiintyy kytkentätoimenpiteiden yhteydessä ja niitä kutsuttiinkin aiemmin nimellä ”kytkentäylijännitteet”. Verkon tilanmuutos jatkuvuustilasta toiseen aiheuttaa tasoitusvärähtelyn, jonka taajuus määräytyy virran katkaisuun käytetyn katkaisijan molempien puolien verkkojen induktansseista ja kapasitansseista. Loivia transienttiylijännitteitä aiheutuu mm. kuormien kytkemisestä, moottorin kytkennästä, tyhjäkäyvän johdon kytkemisestä jännitteiseksi, jälleenkytkennöistä, maa- ja oikosulkuvioista sekä kuormitusvirran katkaisusta. [13] [2]

Syntyvän ylijännitteen amplitudi riippuu virran ja jännitteen arvosta katkaisuhetkellä sekä verkon vaimennusominaisuuksista. Myös käytetyn kytkinlaitteen ja ulkoisen verkon ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus syntyvien ylijännitteiden suuruuteen. Loivien transienttiylijännitteiden suuruuteen ja syntymiseen voidaan täten vaikuttaa valitsemalla tilanteeseen sopivat katkaisijat ja suojalaitteet. Loivien transienttiylijännitteiden merkitys kasvaa verkon käyttöjännitteen kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että ylijännitteiden suhteellisarvot pysyvät lähes saman suuruisina, kun tietyn verkon käyttöjännitettä nostetaan verkon kytkentätilanteen ja ominaisuuksien pysyessä muuttumattomina. [13] [2]

Tyhjäkäyvän johdon jännitteiseksi kytkeminen ja jälleenkytkentä aiheuttavat loivia transienttiylijännitteitä, joiden suuruus riippuu kytkentähetkestä sekä katkaisijan ominaisuuksista. Merkittäviä loivia transienttiylijännitteitä voi aiheuttaa myös kapasitiivisen ja pienen induktiivisen virran katkaisut. Kapasitiivisia virtoja joudutaan katkaisemaan, kun verkosta erotetaan kaapeli tai kondensaattoriparisto. Induktiivisia virtoja puolestaan voidaan

joutua katkaisemaan, kun verkosta erotetaan kompensointireaktori tai tyhjäkäyvä muuntaja. Varsinkin kapasitiivisia ja induktiivisia virtoja katkaistaessa suuri merkitys ylijännitteiden syntymiselle on katkaisijan jälleensyttymisominaisuuksissa. Jälleensyttymisellä tarkoitetaan tapahtumaa, jossa katkaisijan aukeamisen jälkeen avausvälin yli vaikuttava jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden ja tapahtuu läpilyönti. Loivien transienttiylijännitteiden syntymekanismeihin palataan tarkemmin luvussa 4. [2] [13]

### 3.1.3 Jyrkät transienttiylijännitteet

Jyrkät transienttiylijännitteet ovat lähes aina salamaniskujen aiheuttamia ja ne tunnettiinkin aiemmin nimellä ”ilmastolliset ylijännitteet”. Salama voi joko osua suoraan johtoon, jolloin syntyvät ylijännitteet voivat olla jopa megavolttien suuruisia, mutta kestoaltaan lyhyitä. Suoraan johtoon osunut salamanisku aiheuttaa lähes aina ylilyönnin, joka johtaa hetkittäiseen verkon maasulkuun. Salama voi myös vaihejohtimen sijasta osua maadoitusjohtimeen, jolloin voi tapahtua niin kutsuttu takaisku, jossa salaman aiheuttama ylijännite ylittää maadoitusjohtimen ja vaihejohtimen välisen jännitelujuuden [19]. Salamanisku voi aiheuttaa ylijännitteitä myös indusoitumalla, jolloin salama ei osu suoraan johtoon vaan sen läheisyyteen. Indusoitumalla aiheutuneet ylijännitteet voivat olla suuruudeltaan 100-300 kV luokkaa, jonka vuoksi ne aiheuttavat vahinkoja vain verkoissa, joissa suurin käyttöjännite  $U_m$  on alle 52 kV. [2] [13]

### 3.1.4 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet ovat uusi luokka, jonka vuoksi niille ei ole vielä standardeissa määritelty koejännitemuotoa. Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet aiheutuvat tavallisesti, kun erottimella suoritetaan kytkentätoimenpiteitä. Erottimen koskettimet avautuvat huomattavasti hitaammin kuin katkaisijan, jonka vuoksi avausvälissä tapahtuu enemmän jälleensyttymisiä. Erottimen ohjauksista aiheutuvat jälleensyttymiset generoivat erottimen ympäröivän verkon RLC-piiriin korkeataajuuden värähtelyn, jonka on mitattava aiheuttavan jopa 3 p.u. suuruisia ylijännitteitä. Erottimia avattaessa erittäin jyrkät transienttiylijännitteet vaimenevat kuitenkin nopeasti, jonka vuoksi ne vaurioittavat ainoastaan laitteita, jotka sijaitsevat erottimen läheisyydessä tai joissa ne voivat synnyttää laitteen sisäisiä resonansseja. Toistuessaan erittäin jyrkät transienttiylijännitteet voivat vaurioittaa laitteen sisäisiä eristyksiä ja aiheuttaa purkauksia. Erotinkytkennät ovat toistuva ja tyypillinen toimenpide keskijänniteverkoissa. [13]

## 3.2 Keskijänniteverkkojen ylijännitesuojaus

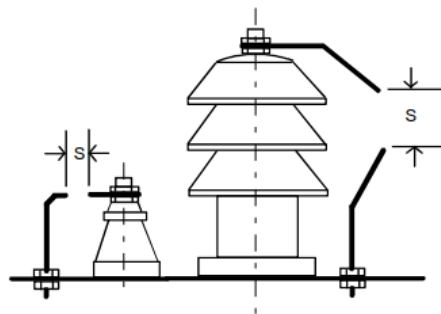
Ylijännitesuojauksen tarkoituksena on rajoittaa sähköverkossa esiintyvät ylijännitteet sellaiselle tasolle, että ne eivät vaurioita suojattavaa kohdetta. Ylijännitesuojat suojaavat komponentteja pulssimuotoisilta lyhytkestoisilta ylijännitteiltä. Pientaajuisten ylijännitteiden suojaukseen ylijännitesuojat eivät sovellu, koska tällöin suoja joutuu purkamaan

suuren määrän energiaa, joka johtaa suojan tuhoutumiseen. Pientaajuisia ylijännitteitä voidaan rajoittaa huolellisella verkon ja sen käytön suunnittelulla [2]. Ylijännitesuojia mitoitettaessa tulee tietää suojattavan kohteen kestotaso eli se jännitearvo, jolla kohteen eristysrakenteen yli- tai läpilyönnin todennäköisyys on hyvin pieni. Ylijännitesuojat tulee sijoittaa aina mahdollisimman lähelle arvokkainta suojattavaa kohdetta. Näin sijoitettuna ylijännitesuoja suojaa myös tarpeeksi hyvin muut kohteet, jos suoja on valittu oikein [15]. Hyvin toteutettu ylijännitesuojaus parantaa myös verkon käyttövarmuutta ja sähkönlaatua, koska laitevauriot vähenevät. [20]

Keskijänniteverkoissa jakelumuuntajat, kaapelit ja PAS-johdot on tyypillisesti varustettu ylijännitesuojilla. Keskijänniteverkoissa käytetyt ylijännitesuojat ovat joko perinteisiä kipinävälejä tai metallioksidisuoja (MO-suoja). Kipinävälejä on tyypillisesti käytetty PAS-johdoilla ja pienten jakelumuuntajien yhteydessä, kun taas MO-suoja on käytetty suurempien ja kriittisten muuntajien sekä kaapeleiden yhteydessä. Nykyään käytetään myös kipinävälien ja MO-suojien yhdistelmiä ns. yhdistelmäsuojia. Yhdistelmäsuoja on toteutettu siten, että kipinä- ja MO-suojat on kytketty sarjaan ja kipinävälin syttyessä MO-suoja johtaa ylijännitteen maahan. Yhdistelmäsuojissa ei kulje normaalissa tilassa lainkaan vuotovirtaa eikä sen läpi kulje johtavassa tilassa käyttötaajuista jälkivirtaa. Näin vältetään kipinävälin aiheuttamilta maasuluilta eikä suoja aiheuta jälleenkytkentää. [20]

### 3.2.1 Kipinävälisuoja

Alle 200 kVA muuntajat ja PAS-johdot suojataan tavallisesti kipinäväleillä. Kipinävälisuoja tarkoitusena on alentaa suojattavan kohteen ulkoisen eristyksen jännitelujuus sisäisen eristyksen esim. käänityksen jännitekeston alapuolelle. Kipinävälin toiminta perustuu siihen, että kipinävälin elektrodien välillä tapahtuu ylilyönti, kun jännite kasvaa riittävän suureksi. Ylilyöntijännitettä voidaan säätää muuttamalla kipinävälin elektrodien välistä etäisyyttä. Yleinen periaate on valita elektrodien välinen etäisyys niin suureksi, että pientaajuiset ylijännitteet tai loivat transienttiyljännitteet eivät aiheuta ylilyöntiä. Kipinävälisuoja kytketään muuntajien yhteydessä läpivientieristimien rinnalle. Kuvassa 3 on esitetty pylväsmuuntamoiden yhteydessä käytettyjä kipinävälisuoja. [2]

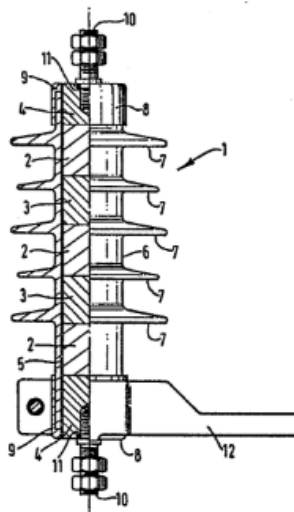


*Kuva 3: Pylväsmuuntamoilla käytettyjen kipinävälisuojujen rakenteita. [15]*

Kipinävälisuojiin etuna on niiden halpuus verrattuna muihin ylijännitesuojoihin. Kipinävälisuojiin huonona puolesta on, että ne aiheuttavat toimiessaan maa- tai oikosulun, jotka aiheuttavat verkkoon jälleenkytkentöjä suojalaitteiden toimiessa. Kipinävälisuoja ei myöskään ole yhtä luotettava kuin metallioksidisuoja, koska kipinävälisuojiin ylilyöntijännitteessä voi olla suuri hajonta. Hajonta johtuu lähinnä syöksyjännitteen polariteetista sekä elektrodien välisistä eroista. Elektrodien ominaisuuksiin vaikuttavat lisäksi ulkoiset olosuhteet kuten kosteus ja saasteet. [20]

### 3.2.2 Metallioksidisuoja

Metallioksidisuoja käytetään keskijänniteverkoissa yli 200 kVA muuntajien ja kaapeleiden yhteydessä. MO-suojat toimii tietyn jännitetason alapuolella kuin eriste, mutta tämän jännitteen yläpuolella pienenä vastuksena tai impedanssina. Tällainen toiminta voidaan toteuttaa epälineaarisilla vastuksilla. Yleisimmin käytetty epälineaarinen vastusmateriaali on sinkkioksidi. MO-suojat asennetaan yleensä suojattavan laitteen rinnalle vaiheen ja maan väliin. Joskus MO-suojia kytetään myös suoraan vaihejohtimien väliin. Kuvassa 4 on esitetty tyypillisen MO-suojan rakenne. [2]



*Kuva 4: Metallioksidisuojan rakenne. [21]*

MO-suojat ovat käyttövarmuuden kannalta katsottuna kipinävälisuoja edullisempia, koska ne eivät aiheuta katkoa toimiessaan. MO-suojilla on myös kipinävälisuoja suurempi energian purkauskyky. Lisäksi MO-suojat mahdollistavat kipinävälisuoja alemman suojaustason käyttämisen. [2]

### 3.3 Eristyskoordinaatio

Eristyskoordinaatiolla tarkoitetaan, että sähköverkon laitteiden eristysrakenteiden jännitelujuudet mitoitetaan suhteessa esiintyviin ylijännitteisiin. Mitoitus suoritetaan siten, että

sähköverkon ylijännitteistä aiheutuneet keskeytykset ja vauriot alenevat taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. Toisin sanoen eristyskoordinaatio pyritään toteuttamaan optimaalisesti siten, että jännitekestoisuuden parantamisesta aiheutuvat kustannukset ovat yhtä suuret kuin niiden käytöllä saavutetut säästöt. Ylijännitesuojaus on oleellinen osa eristyskoordinaatiota, koska ylijännitesuojien avulla ylijännitteet voidaan rajata riittävän alhaisiksi, jotta ylijännitteet eivät pääse vaurioittamaan suojattavaa kohdetta. Koska ylijännitteitä esiintyy verkoissa suhteellisen harvoin ja niiden suuruudet vaihtelevat, ei ole taloudellisesti järkevää mitoittaa eristysrakenteita suojautumaan kaikilta verkossa esiintyviltä ylijännitteiltä. [2] [13]

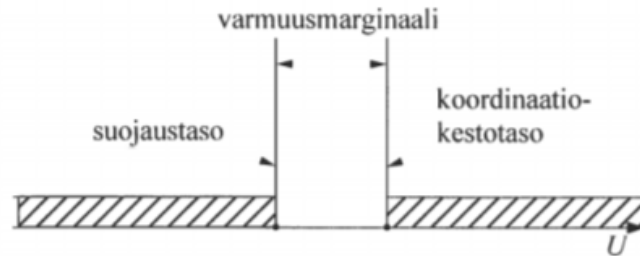
Eristyskoordinaatiota suunniteltaessa on tärkeää tietää kohteena olevan verkon ylijännitteiden suuruudet ja määrät. Kun nämä tiedetään, voidaan määrittää kohteiden eristystasot. Eristystasot tulee määrittää siten, että kohteessa oleva laite kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Eri jännitetasojen laitteiden eristystasot määritellään standardien mukaisilla salamasyöksyjännite ja yhden minuutin vaihtojännitekokeilla. Taulukossa 3 on esitetty standardin IEC 60071-1 suosittamat kestokoejännitteet verkon suurimman käyttöjännitteen mukaan. Lisäksi yli 245 kV jännitetasoilla on määritelty erikseen koejännitteet kytkentäsyöksyjännitteille, mutta niitä ei ole esitetty taulukossa 3. [2] [13] [15]

***Taulukko 3: IEC:n määrittelemät koejännitteet Suomessa tavallisimmin käytetyille käyttöjännitteille. Alleviivattu arvo tarkoittaa, että sitä sovelletaan käytännössä. [2]***

Laitteen suurin käyttöjännite $U_m$ (kV)	Käyttötaajuinen kestokoejännite $U_w$ (kV)	Syöksyjännite kestokokeissa $\hat{u}_w$ (kV)
12	<u>28</u>	60, <u>75</u>
24	<u>50</u>	95, <u>125</u>
52	95	250
123	185, <u>230</u>	450, <u>550</u>
245	360, <u>395</u> , 460	850, <u>950</u> , 1050
420	520	<u>1300</u> , <u>1425</u>

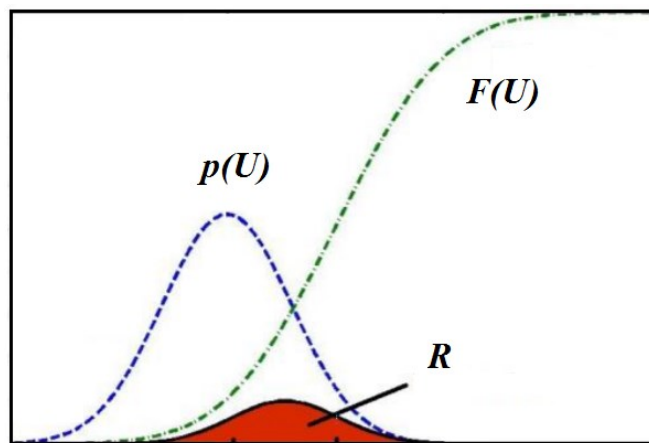
Eristyskoordinaatiota suunniteltaessa tärkeitä käsitteitä ovat kestotaso ja suojaustaso. Kestotasolla tarkoitetaan jännitetasoa, jolla yli- tai läpilyönnin todennäköisyys eristysrakenteessa on erittäin pieni. Suojaustasolla puolestaan tarkoitetaan jännitetasoa, jonka ylitettäessä ylijännitesuojat toimivat ja sitä suurempia ylijännitteitä esiintyy verkossa harvoin. Eristyskoordinaatio voidaan toteuttaa joko marginaaliajatteluun perustuvalla menetelmällä tai tilastollisella menetelmällä. Marginaaliajattelu perustuu siihen, että kestotason ja suojaustason väliin jätetään marginaali. Marginaalilla otetaan huomioon eristyksen jännitelujuuden aleneminen vanhetessa sekä ylijännitesuojien suojaustason nousu purkausvirtojen ollessa suuria. Kestotason ja suojaustason suhdetta kutsutaan varmuusker-

toimeksi, jonka miniarvoiksi on määritelty suurilla käyttöjännitteillä salamasyöksyjännitteillä 1,2 ja kytkentäsyöksyjännitteillä 1,1-1,2. Kuvassa 5 on esitetty marginaalin käyttö eristyskoordinaatiossa. [2] [13] [15]



**Kuva 5: Marginaalijatteluun perustuva menetelmä, jossa suojaustason ja kestotason väliin on jätetty varmuusmarginaali. [13]**

Tilastollinen menetelmä huomioi ylijännitteiden ja jännitelujuuden satunnaisuuden ja sitä käytetään ainoastaan järjestelmissä, joissa verkon suurin käyttöjännite  $U_m$  on alle 300 kV. Tilastollisessa menetelmässä kohteessa esiintyvät ylijännitteet ja jännitelujuus ovat esitettyinä tilastollisina jakaumina  $p(U)$  ja  $F(U)$ . Näiden perusteella voidaan laskea vaurioitumisriski  $R$  eli todennäköisyys, jolla ylijänniterasitus ylittää eristysrakenteen jännitelujuuden ja yli- ja läpilyöntejä voi tapahtua. Vaurioitumisriskiä  $R$  voidaan pienentää rajoittamalla ylijännitteitä ylijännitesuojauksen avulla tai parantamalla jännitelujuutta. Kuvassa 6 on esitetty tilastollisen menetelmän  $p(U)$  ja  $F(U)$  jakaumat sekä vaurioitumisriski  $R$ .



**Kuva 6: Tilastollinen menetelmä, jossa punainen pinta-ala kuvaa ylijännitteiden tilastollisen jakauman  $p(U)$  ja jännitelujuuden tilastollisen jakauman  $F(U)$  avulla laskettua vaurioitumisriskiä  $R$ . [22]**

Marginaaliin perustuva menetelmä soveltuu käytettäväksi verkoissa, joissa ylijännitteiden esiintymisestä tai jännitelujuudesta ei ole saatavilla tilastotietoja. Tilastollinen menetelmä puolestaan soveltuu parhaiten, kun tavoitteena on suojautua loivia transienttiylijännitteitä vastaan. [13]

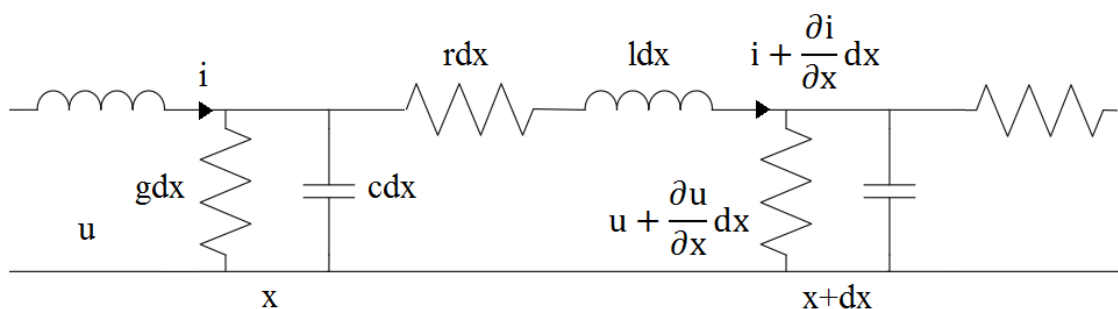


## 4. KYTKENTÄYLIJÄNNITTEIDEN SYNTYMEKANISMIT

Kaapeliverkon kytkentäylijännitteiden syntymekanismit ovat hyvin samanlaisia kuin ilmajohtoverkkojen. Kaapeliverkkojen kytkennöistä aiheutuneet värähtelyt ja resonanssit esiintyvät kuitenkin avojohtoverkkoja matalammilla taajuuksilla johtuen kaapeleiden suuremmasta kapasitanssista [23]. Matalataajuisille värähtelyille on myös ominaista, että ne vaimenevat korkeataajuisia värähtelyjä hitaammin. Kytkentätoimenpiteen seurauksena sähköverkon tila ei voi muuttua toiseen tilaan välittömästi, vaan muutokset aiheuttavat sähköverkkoon transientteja, jotka voivat olla haitallisia sähköverkon komponenteille [24]. Kaapeliverkoissa kytkentäylijännitteitä voi siis syntyä tavallisten kytkentätoimenpiteiden seurauksena, joita ovat virtapiirin energisointi ja katkaisu. Kaapelin energisoinnista aiheutuneita transienttiylijännitteitä voidaan selittää kulkuaaltoilmiön avulla. Kaapelin irtikytkennästä aiheutuneita ylijännitteitä voidaan puolestaan selittää erilaisilla värähtely- ja resonanssipiireillä. [23]

### 4.1 Kulkuaaltojen teoria

Kulkuaaltojen teorian avulla on helpompi ymmärtää transienttiylijännitteitä aiheuttavia ilmiöitä sekä saada käsitys siitä, miten simulointiohjelmat laskevat ja mallintavat kulkuaaltoja [25]. Kulkuaaltoja mallinnettaessa johtovakiot eli johdon resistanssin  $r$ , induktanssin  $l$ , konduktanssin  $g$  ja kapasitanssin  $c$  ajatellaan jakautuneiksi tasaisesti pitkin johtoa. Tällöin johtoa voidaan käsitellä kuvan 7 mukaisilla differentiaalisilla johtoalkioilla, jossa johtovakiot on ilmoitettu pituusyksikköä kohden. [13]



Kuva 7: Jakautunein vakion kuvatun johdon 1-vaiheinen sijaiskytkentä. [25]

Kuvasta 7 voidaan johtaa jännitteen ja virran muutoksille x-akselia pitkin positiiviseen suuntaan kuljettaessa lausekkeet (12) ja (13).

$$-du = -\frac{\partial u}{\partial x} dx = \left(ri + l \frac{\partial i}{\partial t}\right) dx = \left(r + l \frac{\partial}{\partial x}\right) idx \quad (12)$$

$$-di = -\frac{\partial i}{\partial x} dx = \left(gu + c \frac{\partial u}{\partial t}\right) dx = \left(g + c \frac{\partial}{\partial x}\right) udx \quad (13)$$

Differentiaaliyhtälöparin ratkaisun helpottamiseksi yhtälöille tulee suorittaa Laplace-muunnos, jolloin ei olla enää aikatasossa, vaan Laplace-operaattorin määrittelemässä ta-  
sossa. Lopuksi yhtälöt kuitenkin muunnetaan takaisin aikatasoon, jotta yhtälöiden tulkitseminen olisi yksinkertaisempaa. Yhtälöparin ratkaisu on monimutkainen prosessi, jonka vuoksi tässä diplomityössä päädytään tarkastelemaan vain ratkaisun lopputulosta. Olettaen, että johdolla ei tapahdu yhtään kulkuaallon vääristymisiä, saadaan yhtälöparin ratkaisuksi seuraavat yhtälöt. [13]

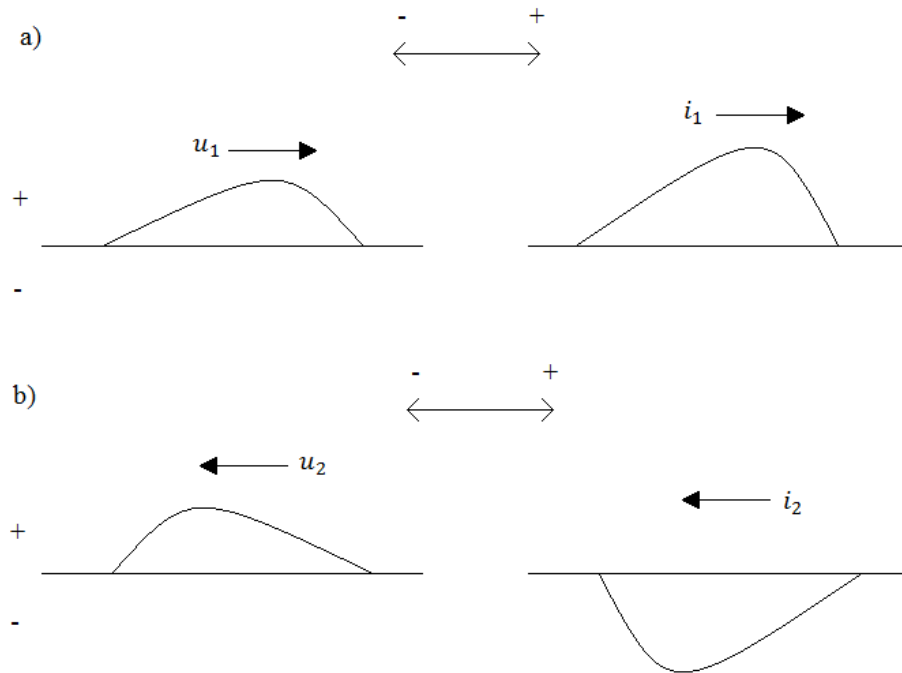
$$u(t, x) = e^{-a\frac{x}{v}} f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + e^{a\frac{x}{v}} f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (14)$$

$$i(t, x) = \frac{1}{Z_w} \left[ e^{-a\frac{x}{v}} f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - e^{a\frac{x}{v}} f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] \quad (15)$$

$$a = \frac{r}{2l} + \frac{g}{2c} \quad (16)$$

Yhtälöissä  $Z_w$  on häviöttömän johdon aaltoimpedanssi ja  $v$  on kulkuaallon etenemisnopeus johdolla.  $f_1$  ja  $f_2$  ovat puolestaan differentiaaliyhtälöiden reunaehdoista riippuvia funktioita. Näiden funktioiden muuttujat  $t \pm \frac{x}{v}$  voidaan esittää myös muodossa  $x \pm vt$ .

Tällöin myös kulkuaallon vaimenemista kuvaavan eksponenttilausekkeen  $e^{\pm a\frac{x}{v}}$  muotoa pitää muuttaa. Jos funktioiden muuttujat vaihdetaan edellä esitettyyn muotoon, saadaan itse funktiot muotoihin  $f_1(x - vt)$  ja  $f_2(x + vt)$ . Nyt differentiaaliyhtälöiden ratkaisusta nähdään, että funktio  $f_1(x - vt)$  esittää positiiviseen suuntaan liikkuvaa kulkuaaltoa ja funktio  $f_2(x + vt)$  negatiiviseen suuntaan liikkuvaa kulkuaaltoa. Kuvassa 8 on havainnollistettu jännitteen ja virran yhtälöiden mukaisia kulkuaaltoja. [13]



**Kuva 8: Differentiaaliyhtälöiden mukaiset positiiviseen (a) ja negatiiviseen (b) suuntaan liikkuvat kulkuaallot. [13]**

Kuvassa 8 jännitteen positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan liikkuvia aaltoja on merkattu muuttujilla  $u_1$  ja  $u_2$ , kun taas virran positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan liikkuvia aaltoja on merkattu muuttujilla  $i_1$  ja  $i_2$ . Kuvasta 8 ja jännitteen yhtälöstä (14) nähdään, että jännitteen positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan liikkuvat aallot ovat molemmat positiivisia. Virralla puolestaan negatiiviseen suuntaan liikkuva aalto on myös polariteetiltään negatiivinen. Jänniteaalto tarkoittaa käytännössä sitä, että johdon kapasitansseissa on varaus. Tämä varaus liikkuu johtoa pitkin aiheuttaen johtimeen virran. Positiivisen ja negatiivisen aallon fysikaalinen merkitys on käytännössä melko yksinkertainen. Kuvitellaan esimerkiksi tilannetta, jossa jännitelähde syöttää jännitepulssin avoimelle tyhjäkäyvälle johdolle. Jännitelähteen syöttämä jännitepulssi on positiiviseen suuntaan liikkuva kulkuaalto ja avoimen johdon päästä heijastunut takaisinpäin liikkuva aalto on negatiiviseen suuntaan liikkuva kulkuaalto. [13] [25]

#### 4.1.1 Aaltoimpedanssi ja kulkuaaltojen etenemisnopeus

Johdon aaltoimpedanssiin vaikuttaa ainoastaan johtimen rakenne. Johtimen pituudella, jännitteellä tai virralla ei ole täten vaikutusta aaltoimpedanssin suuruuteen. Johtimen aaltoimpedanssi vääristymättömälle johdolle voidaan laskea häviöttömän johdon kaavalla (17)

$$Z_w = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (17)$$

, jossa  $l$  ja  $c$  ovat johtimen kilometriä kohden ilmoitetut induktanssin ja kapasitanssin arvot. Kaavaa (17) voidaan käyttää, vaikka itse johto ei olisikaan häviötön. Yksivaiheisen kaapelin tai koteloidun GIS-putken aaltoimpedanssi voidaan myös laskea kaavasta (18)

$$Z_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (18)$$

, jossa  $\mu$  on eristeen väliaineen permeabiliteetti,  $\varepsilon$  väliaineen permittiivisyys,  $r_1$  johtimen säde ja  $r_2$  vaipan tai kuoren sisäsäde. Kaavasta (17) nähdään, että vääristymättömällä johdolla kaapelin aaltoimpedanssi on huomattavasti pienempi kuin avojohdon. Kaapelin aaltoimpedanssi on tavallisesti noin kymmenen kertaa pienempi kuin ilmajohdon. Tyypillisiä arvoja aaltoimpedanssille on  $40 \Omega$  kaapelille ja  $400 \Omega$  avojohdolle. Aaltoimpedanssien arvoissa on otettu huomioon maaperän ominaisresistanssi. Tämän vuoksi maakaapeleille ilmoitettuihin aaltoimpedansseihin tulee aina suhtautua varauksellisesti, koska maaperän ominaisresistanssin arvot vaihtelevat suuresti. Kulkuaallon etenemisnopeus johdolla voidaan laskea kaavalla (19)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \quad (19)$$

, missä  $c$  on valonnopeus tyhjiössä eli  $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ,  $\mu_r$  suhteellinen permeabiliteetti ja  $\varepsilon_r$  suhteellinen permittiivisyys. Kaavasta (19) voidaan päätellä, että ilmaeristeisellä ja häviöttömällä johdolla kulkuaalto etenee valon nopeudella. Häviöt ja kulkuaallon yhteydessä esiintyvä korona kuitenkin todellisuudessa pienentävät etenemisnopeutta. [13]

#### 4.1.2 Heijastukset ja vaimeneminen

Kulkuaallon heijastumisia tapahtuu verkon epäjatkuvuuskohdissa. Epäjatkuvuuskohta voi olla esimerkiksi kaapelin ja ilmajohdon kiinnitys, tyhjäkäyvän johdon pää, muuntaja tai kuorma. Epäjatkuvuuskohdassa tapahtuu aaltoimpedanssin muutos, jonka vuoksi virta ja jännite muuttuvat. Tällöin kulkuaalto jakautuu epäjatkuvuuskohdassa heijastuneeseen ja jatkavaan kulkuaaltoon. Kulkuaallon energian tasapainon säilymisen vuoksi epäjatkuvuuskohdasta jatkava aalto on yhtä suuri kuin johdolle syötetyn aallon ja heijastuneen aallon summa, jolloin jännitteen ja virran arvot ovat saman suuruisia epäjatkuvuuskohdan molemmin puolin. Jos kyseessä on tyhjäkäyvän johdon avoin pää, kulkuaalto heijastuu kokonaan, jolloin jännite johdolla kaksinkertaistuu. Virran kulkuaalto heijastuu tällöin negatiivisena kuten aiemmin todettiin, jolloin virran arvo on joka hetkellä 0. Epäjatkuvuuskohdasta heijastuneiden ja jatkavien kulkuaaltojen suuruudet jännitteille ja virroille voidaan laskea yhtälöiden (20), (21), (22) ja (23) avulla. [25]

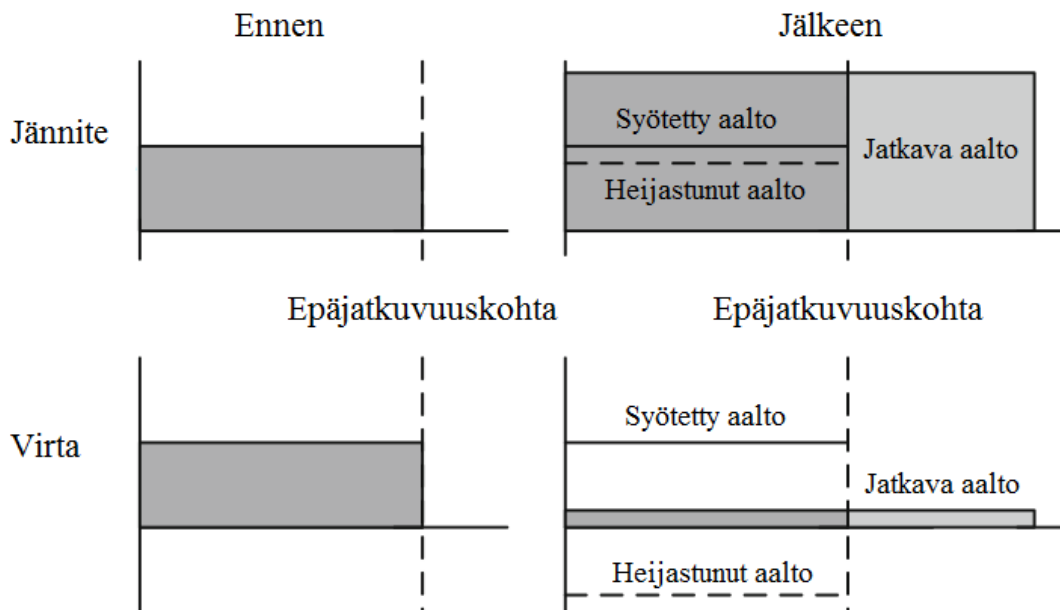
$$V_3 = V_1 \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (20)$$

$$V_2 = V_1 \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (21)$$

$$I_3 = I_1 \frac{2Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (22)$$

$$I_2 = I_1 \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (23)$$

Edellä esitetyissä yhtälöissä  $V_3$  ja  $I_3$  kuvaavat jatkavaa kulkuaaltoa,  $V_2$  ja  $I_2$  heijastunutta kulkuaaltoa,  $V_1$  ja  $I_1$  johdolle syötettyä kulkuaaltoa ja  $Z_A$  ja  $Z_B$  johtojen aaltoimpedansseja. Yhtälöiden avulla voidaan laskea esimerkki tilanteelle, jossa kaapelista ja ilmajohdosta koostuvaa johto-osaa syötetään kaapelin päästä DC askelaallolla, jonka suuruus on 1 p.u. Käytetään johtojen aaltoimpedansseille aikaisemmin ilmoitettuja arvoja, jotka olivat  $40 \Omega$  kaapelille ja  $400 \Omega$  ilmajohdolle. Jänniteaaltojen suuruuksiksi saadaan edellä esitetyillä arvoilla ja kaavoilla 0,82 p.u. heijastuneelle aallolle ja 1,82 p.u. jatkavalle jänniteaallolle. Virta-aaltojen suuruuksiksi puolestaan saadaan -0,82 p.u. heijastuneelle virta-aallolle ja 0,18 p.u. jatkavalle virta-aallolle. Esimerkistä nähdään, että aaltoimpedanssin muutos pienemmästä suurempaan aiheuttaa jännitteen nousemisen ja virran pienemisen. Kuvassa 9 on esitetty esimerkin mukaisten DC-aaltojen heijastumiset kaapelin ja ilmajohdon kiinnityskohdassa. [25]



**Kuva 9: Jännitteen ja virran DC-aaltojen heijastumiset epäjatkuvuuskohtassa. [25]**

Vaihtosähköllä kulkuaaltojen heijastuminen on huomattavasti monimutkaisempaa, koska aalto muuttuu ajan muuttuessa. Verkkotaajuudella ja tavallisilla johtopituuksilla vaihtosähkön kulkuaaltoja voidaan kuitenkin mallintaa vakioina kulkuaaltoilmiön esiintymisen ajan, koska kulkuaaltojen etenemisnopeudet ovat niin suuria. Näin ei kuitenkaan

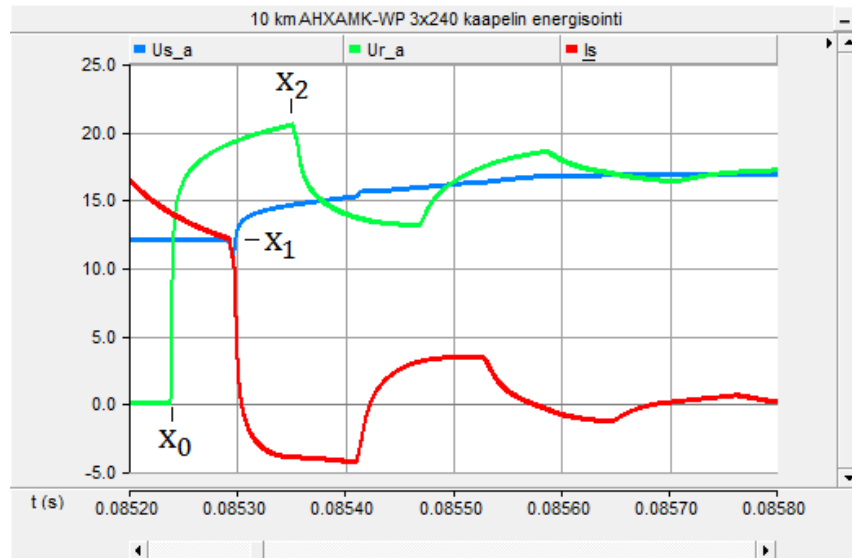
voida tehdä suurilla taajuuksilla, vaan kulkuaallon aikavaihtelu tulee ottaa huomioon. Edellä esitetty teoria antaa kuitenkin hyvän pohjan kulkuaaltojen heijastumiselle. [25]

Todellisuudessa kulkuaallon amplitudi ei säily samansuuruisena johtoa pitkin kuljettaessa. Johdolla tapahtuvien häviöiden vuoksi kulkuaallon energia pienenee eli aalto vaimenee. Kulkuaallon vaimenemista kuvaa differentiaaliyhtälöiden ratkaisuisissa oleva kerroin  $e^{\pm a \frac{x}{v}}$ . Kertoimen mukaan kulkuaallot siis vaimenevat eksponentiaalisesti johtoa pitkin kuljettaessa. Differentiaaliyhtälöiden ratkaisujen oletuksena oli, että johdot ovat väärityttömiä. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, sillä kulkuaallon amplitudin pienenemisen lisäksi aallon rinta loivenee. Kaapelilla rinnan loiveneminen riippuu mm. eristeen tehohäviöistä ja taajuudesta. Avojohdolla rinnan loivenemista puolestaan aiheuttaa johdolla tapahtuvat häviöt, koronailmiö sekä virranahto. [13]

## 4.2 Kaapelin energisointi

Kaapelin energisointi on tapahtuma, joka voi aiheuttaa verkkoon ylijännitteitä. Ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa moni tekijä, joita ovat muun muassa syöttävän verkon oikosulkuteho, virran kytkentähetki, kaapelin pituus, kaapelin jäännösvaraus, kytkinlaitteen ominaisuudet ja kaapelin varaustehon kompensoimisaste. Merkittävimpiä näistä ovat kaapelin pituus, kytkentähetki ja jäännösvaraus. Myös syöttävän verkon oikosulkuteholla on merkitystä energisoinnista aiheutuvien ylijännitteiden suuruuteen, mutta Suomessa sähköasemien päämuuntajat ovat yleensä liitettynä verrattain jäykkiin verkkoihin, joten sen vaikutus on vähäinen. [13] [26]

Kun tarkastellaan kaapelin energisoinnista aiheutuneita ylijännitteitä ilmiönä, tulee tukeutua kulkuaaltoihin liittyvään teoriaan. Ylijännitteet johtuvat kulkuaaltojen heijastumisista verkon epäjatkuvuuskohdissa. Epäjatkuvuuskohta voi olla esimerkiksi tyhjäkäyvän johdon avoin pää, kaapelin ja avojohdon kiinnityskohta, muuntaja tai kuorma. Energisoinnista aiheutuneet ylijännitteet ovat suurimmillaan tyhjäkäyvillä johdoilla, koska tällöin kulkuaalto heijastuu täysin johdon avoimesta päästä. Todellisuudessa johtojen resistanssit vaimentavat kulkuaaltoja, jonka vuoksi johdon loppupäässä esiintyvät ylijännitteet eivät ole yhtä suuria kuin kaavojen (20) ja (21) avulla lasketut ylijännitteet. Tarkastellaan ilmiötä tarkemmin kytkemällä 15 km pitkä 3-vaiheinen AHXAMK-WP 3x240 kaapeli verkkoon hetkellä, jolloin A vaiheen jännite on maksimissaan. Kuvassa 10 on esitetty kaapelin A-vaiheen loppupään ja alkupään jännitteet sekä alkupään virta kytkemishetkellä. [25]



**Kuva 10: Tyhjäkäyvän 10 km AHXAMK-WP kaapelin energisoinnin aikaiset loppupään jännite  $U_r$ , alkupään jännite  $U_s$  ja alkupään virta  $I_s$ . Kuva on verifioitu viitteen [25] kanssa.**

Kuvassa 10 esitetty kaapelin energisointi on verifioitu viitteen [25] kanssa, jossa kaapelin energisoinnista aiheutuneet kulkuaallot käyttäytyvät samalla tavalla. Kuvassa 10 kaapeli energisoidaan ajanhetkellä  $t = 0,0852s$  A-vaiheen syöttävän vaiheen jännitteen ollessa huippuarvossaan. Lisäksi kuvassa virran arvo on skaalattu siten, että se mahtuu kuvaajaan eikä täten vastaa todellista virran arvoa. Kuvassa ajanhetkellä  $x_0$  jännitteen kulkuaalto saavuttaa johdon loppupään ensimmäisen kerran, jonka seurauksena kaapelin loppupään jännite alkaa nousta, koska kulkuaalto heijastuu kaapelin avoimesta päästä ja summautuu tulevan aallon kanssa. Ajanhetkellä  $x_1$  virran heijastunut kulkuaalto saavuttaa kaapelin alkupään ensimmäisen kerran. Tällöin virta alkaa laskea, koska johdon loppupäästä heijastunut aalto on polariteetiltään negatiivinen, kuten aiemmin todettiin. Huomataan, että jännitteen ja virran arvot eivät muutu välittömästi kulkuaaltojen superponoitumisen jälkeen, vaan pienellä viiveellä. Tämä johtuu kaapelin jakautuneen kapasitanssin ja induktanssin vaikutuksesta. Ajanhetkellä  $x_1$  myös kaapelin loppupäästä heijastunut jänniteaalto saavuttaa kaapelin alkupään, jonka vuoksi kaapelin alkupään jännite vääristyy ja heijastuu negatiivinen jänniteaalto. Ajanhetkellä  $x_2$  negatiivinen jänniteaalto saavuttaa kaapelin loppupään, jonka seurauksena loppupään jännite laskee. Kulkuaaltojen heijastukset jatkuvat niin kauan, kunnes transientit vaimenevat kaapelin resistanssin vaikutuksesta. Syntyvän transienttiylijännitteen ominaistuuus määräytyy johdon pituudesta ja kulkuaallon etenemisnopeudesta johdolla. [13] [25]

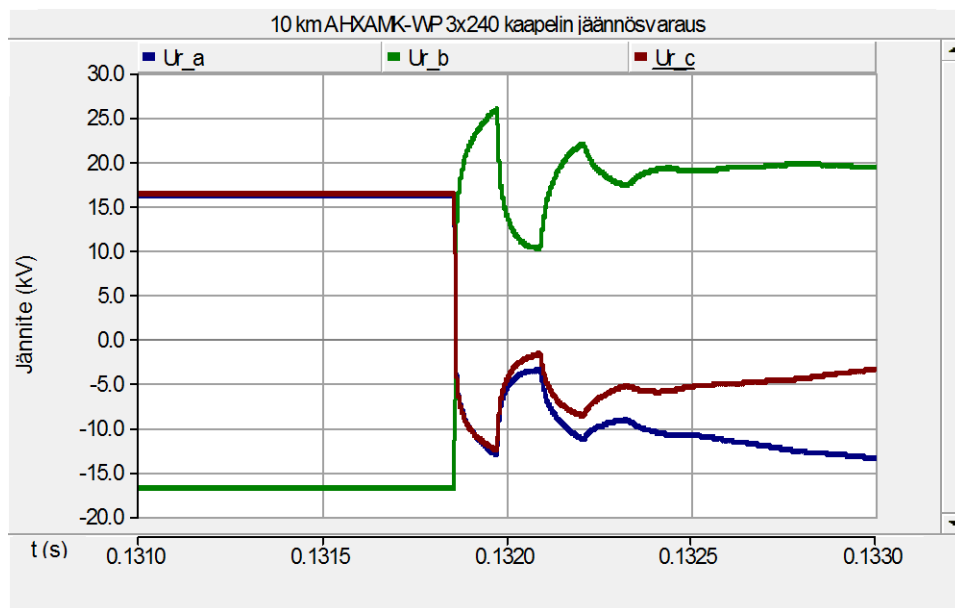
Kaapelin energisoinnista aiheutuneet ylijännitteet riippuvat kytkentähetkestä siten, että suurimmat ylijännitteet aiheutuvat kytkentähetkellä, jolloin kaapelin ja syöttävän verkon välinen jännite on suurimmillaan. Jos kaapelissa ei ole jäännösvarausta, pahin tilanne on kytkeä kaapeli jännitteiseksi syöttävän verkon jännitteen huippuarvolla. Tällöin kaapelin ja syöttävän verkon välinen jännite saa arvon  $\pm 1$  p.u. Katkaisijat voivat kytkeä virran joko

kaikkiin vaiheisiin yhtä aikaa tai käyttäen tahdistettua kytkentää. Jos kaikki vaiheet kytkeytyvät yhtä aikaa, on ylijännitteiden riski suurempi, koska virta voidaan kytkeä tietyn vaiheen jännitteen huippuarvolla tai sen lähetyvillä. Tahdistettua kytkentää käyttävät katkaisijat pyrkivät kytkemään vaiheisiin virrat jännitteiden nollakohdissa. Tällöin kaikkien vaiheiden jännitemuodot ovat samankaltaiset eikä ylijännitteitä esiinny. Tahdistettua kytkentää käytettäessä voi esiintyä kuitenkin muita ongelmia kuten resonansseja. [25]

#### 4.2.1 Jäännösvarauksen vaikutus

Jos kaapelissa on energisoitaessa jäännösvarausta eli sen kapasitansseissa on varastoituneena energiaa, ovat syntyvät ylijännitteet suurempia, jos kytkentä tapahtuu epäedullisella hetkellä. Varauksellisen kaapelin energisointi voi tapahtua esimerkiksi jälleenkytkennän yhteydessä, jolloin kaapelin jäännösvaraus ei ole ehtinyt purkaantua täysin ennen jälleenkytkentää. Jäännösvarauksen vaikutus on yleensä merkittävin tyhjäkäyvillä kaapeleilla, koska tällöin jäännösvarauksen purkautuminen kestää kauemmin verrattuna kuormitettuun kaapeliin. [25]

Varauksellisen kaapelin energisointi on samankaltainen tapahtuma kuin varauksittoman kaapelin energisointi, mutta kaapelin ja syöttävän verkon jännite-ero voi olla suurempi, jos virran kytkentä tapahtuu epäedullisella hetkellä. Pahin tilanne syntyy, kun virran kytkentä tapahtuu hetkellä, jolloin syöttävän verkon jännite on maksimissaan, mutta polariteetiltaan vastakkainen kaapelissa vaikuttavaan jännitteeseen nähden. Jos kytkentä tapahtuu hetkellä, jolloin syöttävän verkon ja kaapelin jännitteet ovat yhtä suuret, ei ylijännitteitä esiinny [25]. Kuvassa 11 on esitetty 10 km pitkän tyhjäkäyvän AHXAMK-WP 3x240 kaapelin loppupään jännitteet, kun kaapeli kytketään varauksellisenä. [27]



**Kuva 11: Jäännösvarauksellisen tyhjäkäyvän 10 km AHXAMK-WP 3x240 kaapelin energisointi.**

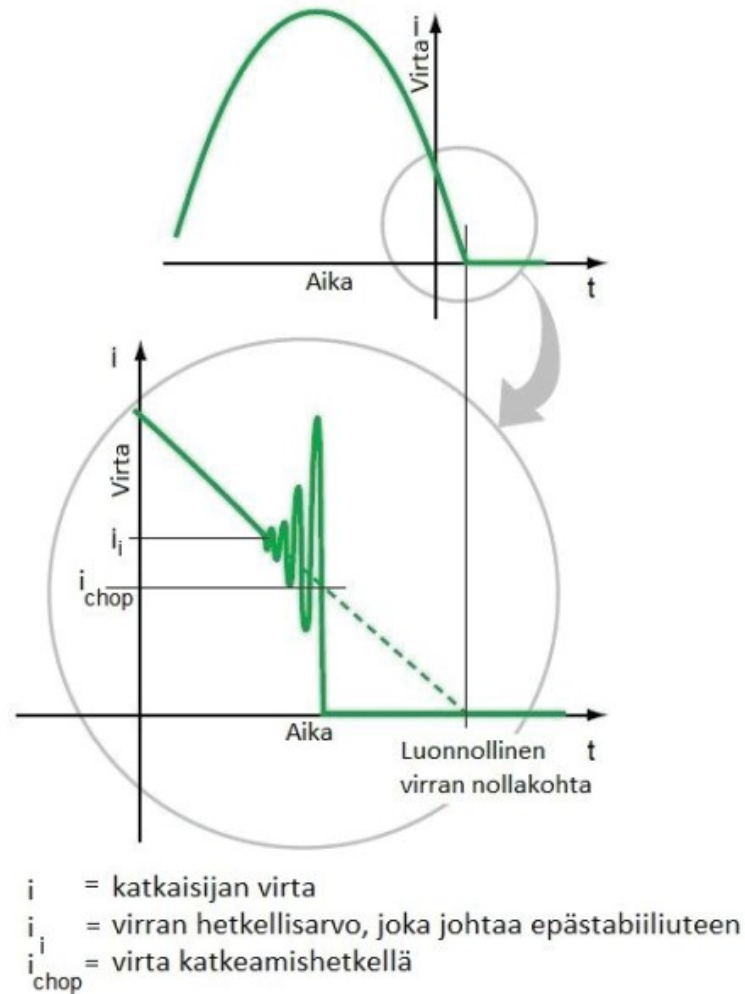


Kaapelin kytkentä tapahtuu hetkellä, jolloin syöttävän verkon puolella vaikuttaa jännitteen huippuarvo, joka on vastakkaismerkkinen kaapelin B-vaiheen jäännösvarauksen aiheuttamaan jännitteeseen nähden. Kuvasta nähdään, että energisoinnista syntyvä transienttiylijännite vaimenee nopeasti ja esiintyy käyttötaajuuteen nähden huomattavasti korkeammilla taajuuksilla. Lisäksi syntyvän ylijännitteen suuruus on suurempi kuin varauksettoman kaapelin tilanteessa.

### 4.3 Kaapelin irtikytkentä

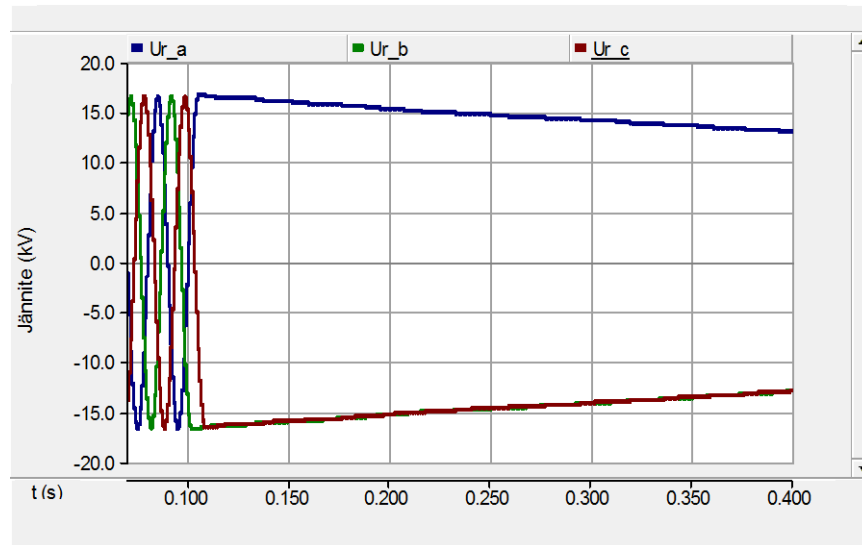
Kaapelin irtikytkennässä kaapelin sähkökenttään jää varastoituneeksi energiaa, joka aikaansaa jännitteen kaapelin napoihin eli jäännösvarauksen. Kaapelin sähkökenttään varastoitunut energia riippuu jännitteen arvosta irtikytkentähetkellä. Jos irtikytkentä tapahtuu jännitteen huippuarvolla, on kaapelin sähkökenttään varastoituneena irtikytkentähetkellä suurin määrä energiaa. Jos irtikytkentä puolestaan tapahtuu jännitteen nollakohdassa, ei sähkökenttään jää varastoituneeksi lainkaan energiaa, jolloin myöskään johdolle ei jää jäännösvarausta. Katkaisijat pyrkivät toimimaan siten, että virta katkeaa aina nollakohdassansa. Täten voidaan sanoa, että kaapeliin varastoituneen energian kannalta epäedullisin tilanne syntyy täysin kapasitiivisilla tai induktiivisilla kuormitusvirroilla. Puhtaasti kapasitiivisissa ja induktiivisissa piireissä jännitteellä ja virralla on  $90^\circ$  -asteen kulmaero, jolloin jännite saa huippuarvonsa virran nollakohdassa [28]. [25]

Aina virta ei kuitenkaan katkea nollakohdassansa, vaan katkaisijassa voi tapahtua virran enneaikainen katkeaminen hieman ennen nollakohtaa. Ilmiö tunnetaan yleisemmin nimellä ”current chopping”. Virran enneaikainen katkeaminen voi tapahtua pienillä kapasitiivisilla tai induktiivisilla virroilla, jolloin virran arvo alittaa huomattavasti katkaisijan katkaisukyvyn. Tällöin katkaisijan avausvälissä palava valokaari tulee epästabiiliksi ja aiheuttaa korkeataajuisen värähtelyn, joka johtaa virran enneaikaiseen nollakohtaan verkkotaajuiseen virtaan verrattuna. Kuvassa 12 on havainnollistettu ilmiön syntymistä. Virran enneaikaisella katkeamisella on täysin kapasitiivisia virtapiirejä katkaistessa jäännösvarauksen kannalta heikentävä vaikutus, koska tällöin jännite ei ole enää katkeamishetkellä huippuarvossaan eli kaapelin sähkökenttään jää varastoituneeksi vähemmän energiaa [29]. Virran enneaikaisella katkeamisella voi olla puolestaan suuri vaikutus syntyviin ylijänniteisiin, jos kaapeliin on kytkettynä induktiivinen kuorma kuten tyhjäkäyvä jakelumuuntaja tai reaktori. [25]



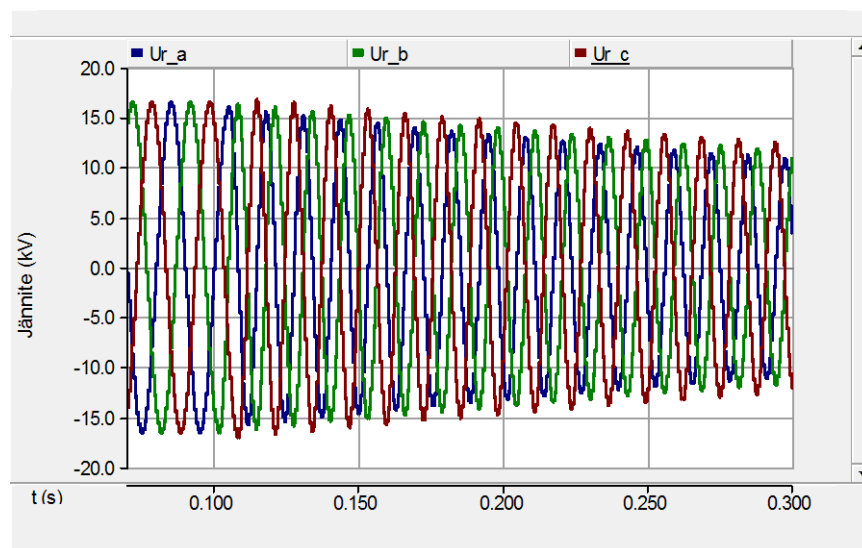
**Kuva 12: Virran enneaikainen katkeaminen eli current chopping. [17]**

Kaapeliverkon irtikytkennän jälkeen sähkökenttään varastoitunut energia purkautuu eri tavalla eri kytkentätilanteissa, mutta yleensä se purkautuu kaapelin eristeiden läpi maahan tai kuormitukseen. Jos kaapeli on tyhjäkäyvä, energia pyrkii purkautumaan ainoastaan kaapelin eristeiden läpi, jolloin varaus voi säilyä kaapelissa pitkiäkin aikoja [30]. Avojohdoilla jäännösvaraus purkautuu eristimien ja pylväiden kautta maahan huomattavasti nopeammin kuin kaapeleilla [31]. Tyhjäkäyvän kaapelin irtikytkentä on varsin samankaltainen tapahtuma kuin kondensaattorin irtikytkentä [25]. Kuvassa 13 on esitetty 3-vaiheisen tyhjäkäyvän 5 km pitkän AHXAMK-WP 3x150 kaapelin irtikytkennän jälkeinen jäännösvaraus.



**Kuva 13: Tyhjäkäyvän kaapelin jäännösvaraus, kun virta katkeaa nollakohdassa.**

Kuvasta 13 nähdään, että kaapelin sähkökenttään varastoitunut energia aiheuttaa tyhjäkäyvällä kaapelilla irtikytkennän jälkeen vaimenevan DC-jännitteen kaapelin napoihin. Jos kaapeliin on kytkettyä kuormia, ei jäännösvaraus välttämättä ole enää vaimeneva DC-komponentti. Sopivan kokoinen induktiivinen kuorma voi aiheuttaa värähtelypiirin kaapelin kapasitanssin kanssa, jolloin varastoitunut energia jää värähtelemään kapasitanssin ja induktanssin välille [3]. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi, kun irti kytkettävään kaapeliin on liitetty reaktori, jota on havainnollistettu kuvassa 14.



**Kuva 14: Kaapelin ja reaktorin yhdistelmän irtikytkennästä aiheutuva värähtely.**

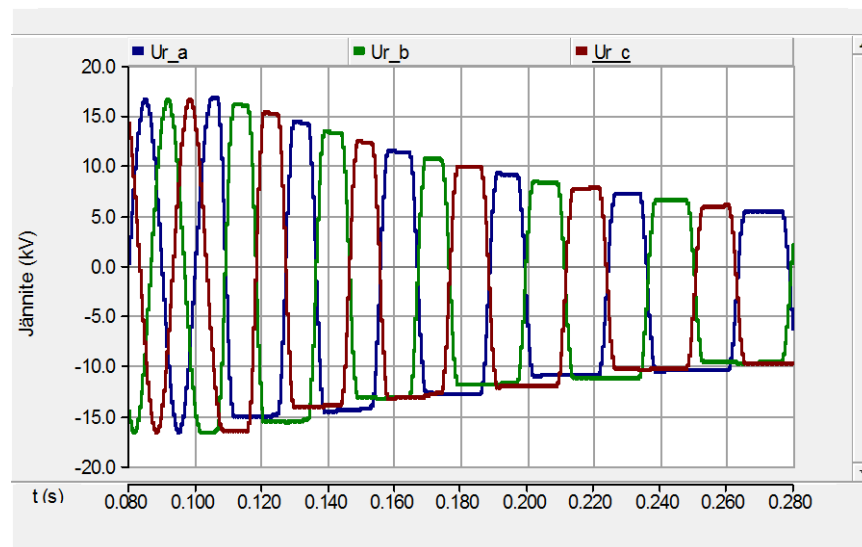
Kuvassa 14 syntyvä värähtely on verifioitu viitteen [25] kanssa, jossa kaapelin ja reaktorin irtikytkennästä aiheutuva värähtely on aaltomuodoltaan hyvin samankaltainen. Kuvasta 14 nähdään, että irtikytkennän jälkeinen jäännösvaraus ei ole enää vaimeneva DC-komponentti, vaan vaimeneva AC-komponentti. Kaapelin kapasitanssiin varastoitunut

energia jää siis värähtelemään reaktorin induktanssin kanssa. Värähtelyn resonanssitaajuus saadaan laskettua yhtälöstä (24)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{rr}C_{kaapeli}}} \quad (24)$$

, jossa  $L_{rr}$  on rinnakkaisreaktorin induktanssi ja  $C_{kaapeli}$  kaapelin kapasitanssi [3]. Jos rinnakkaisreaktori kompensoi kokonaan kaapelin tuottaman kapasitiivisen loistehon, on irtikytkennän jälkeisen energian värähtelytaajuus sama kuin verkon taajuus eli 50 Hz [25]. Tyypillisesti näin ei kuitenkaan ole vaan johto on yleensä ali- tai ylikompensoitu. Reaktorin ja kaapelin irtikytkennässä virran enneaikaisella katkeamisella voi olla suuri vaikutus syntyviin ylijänniteisiin. Tällöin kaapelin sähkökenttään varastoitunut energia on pienempi, mutta energiaa jää varastoituneeksi myös reaktorin induktanssiin, jonka seurauksena värähtelyn aiheuttama jännite kasvaa. [32]

Jos kaapeliin on kytkettynä tyhjäkäyvä muuntaja, voi irtikytkentä aiheuttaa ferroresonanssin. Ferroresonanssi syntyy yleensä kapasitanssin ja epälineaarisen induktanssin välille. Epälineaarinen induktanssi syntyy, kun muuntajan rautasydän saturoituu eli kyllästyy. Ferroresonanssia on havainnollistettu kuvassa 15, jossa kytketään irti kaapeli ja tyhjäkäyvä muuntaja.

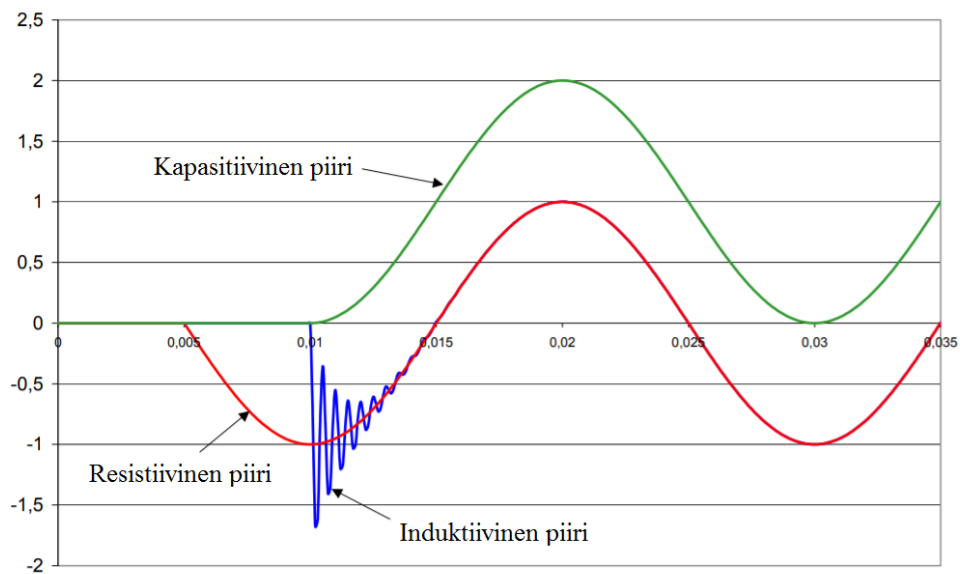


**Kuva 15: Kaapelin ja tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkennästä aiheutuva ferroresonanssi.**

Kuvasta 15 nähdään, kuinka kaapelin kapasitanssiin varastoitunut energia jää värähtelemään tyhjäkäyvän muuntajan epälineaarisen induktanssin välillä muodostaen ferroresonanssin. Värähtelyn aaltomuoto ei ole enää symmetrinen, kuten kaapelin ja reaktorin irtikytkennässä. Tämä johtuu epälineaarisen induktanssin vaikutuksesta. Kuvassa 15 syntävä ferroresonanssi on verifioitu viitteen [25] kanssa, jossa esitetty RLC-piirin ferroresonanssi on aaltomuodoltaan hyvin samanlainen. [25]

### 4.3.1 Palaava jännite

Palaavalla jännitteellä tarkoitetaan virran katkaisun jälkeen kytkinlaitteen avausvälin yli vaikuttavaa jännitettä [15]. Kaapelin irtikytkennän jälkeen palaava jännite on täten syöttävän verkon puoleisen jännitteen ja kaapelissa vaikuttavan jäännösvarauksen aiheuttaman jännitteen välinen erotus. Voidaan siis sanoa, että palaavan jännitteen suuruuteen ja aaltomuotoon vaikuttaa huomattavasti irti kytkettävän verkon jäännösvarauksen aiheuttama jännite. Jäännösvarauksen aiheuttama jännite ja sen aaltomuoto puolestaan riippuvat kuormituksesta kuten edellisessä kappaleessa todettiin. Kuvassa 16 on esitetty palaavan jännitteen tyypilliset aaltomuodot, kun virran katkaisu suoritetaan resistiiviselle, induktiiviselle ja kapasitiiviselle piirille. [13]

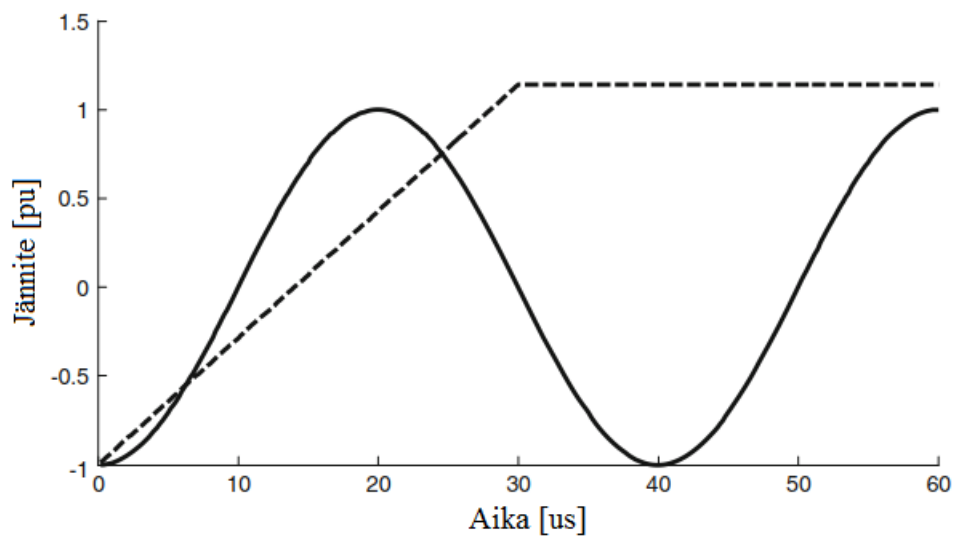


**Kuva 16: Resistiivisen, kapasitiivisen ja induktiivisen piirien katkaisujen palaavat jännitteet. [33]**

Kuvasta 16 nähdään, että resistiivisen piirin katkaisun aiheuttama palaava jännite on sama kuin syöttävän verkon jännite, koska puhtaasti resistiivisissä piireissä virralla ja jännitteellä ei ole lainkaan kulmaeroa. Induktiivisen ja kapasitiivisen piirin katkaisussa virralla ja jännitteellä on puolestaan  $90^\circ$ -asteen kulmaero, jonka vuoksi piiriin jää varastoineeksi energiaa, joka aikaansaa jännitteen erotettavaan piiriin. Kuvassa 16 oleva induktiivisen piirin katkaisu sisältää lisäksi myös hajakapasitanssin, jonka kanssa induktanssiin varastoitunut energia alkaa värähtelemään. Kapasitiivisessä piirissä kapasitanssin jäännösvarauksen vuoksi palaava jännite saa huippuarvonsa puolen jaksonajan päästä virran katkaisun jälkeen, jolloin syöttävän verkon jännite on huipussaan, mutta vastakkaismerkkinen jäännösvaraukseen nähden. Tällöin palaavan jännitteen teoreettinen maksimiarvo on 2 p.u. Todellisuudessa jäännösvaraus alkaa vaimenemaan irtikytkennän jälkeen ja palaava jännite saa alle 2 p.u. suuruisia arvoja. [33]

### 4.3.2 Jälleensyntyminen

Kytinlaitteen toimiessa koskettimet eivät avaudu välittömästi, vaan tietyn ajan kuluessa tietyllä avausnopeudella. Koskettimien avautuessa koskettimien välinen jännitelujuus alkaa kasvaa ja on verrannollinen koskettimien väliseen etäisyyteen. Jos palaavan jännitteen suuruus ylittää katkaisijan koskettimien avausvälin jännitelujuuden, voi avausvälissä tapahtua jälleensyntyminen. Jälleensyntymisessä katkaisijan koskettimien välillä tapahtuu läpilyönti ja syttyy valokaari. Jälleensyntymisestä aiheutuvan valokaaren seurauksena katkaisijan läpi alkaa kulkea virta ja palaava jännite menee nolllaksi. Kuvassa 17 on esitetty katkaisijan avausvälin jännitelujuuden ja palaavan jännitteen kuvaajat ajan funktiona katkaisijan toimimisen jälkeen. [25] [29]



**Kuva 17: Avasvälin jännitelujuus (katkoviiva) ja palaava jännite (yhtenäinen viiva). [25]**

Kuvasta 17 nähdään, että noin ajanhetkellä 6  $\mu$ s palaavan jännitteen suuruus ylittää katkaisijan avausvälin jännitelujuuden, jolloin jälleensyntyminen on mahdollinen [3]. Jos jälleensyntyminen tapahtuu  $\frac{1}{4}$  jaksonaikana katkaisijan aukeamisen jälkeen, ilmiöstä käytetään nimeä uudelleensyntyminen. Jos jälleensyntyminen puolestaan tapahtuu  $\frac{1}{4}$  jaksonajan jälkeen, kyseessä on varsinainen jälleensyntyminen [13]. Jälleensyntymiset voivat aiheuttaa merkittäviä transienttiylijännitteitä ja pahin tilanne syntyy, jos jälleensyntyminen tapahtuu palaavan jännitteen huippuarvolla. Jälleen- ja uudelleensyntymiset ovat samankaltaisia tapahtumia kuin jäännösvarauksellisen kaapelin energisointi eli ylijäännitteiden syntyä voidaan selittää kulkuaaltoihin perustuvan teorian avulla [25]. Jälleensyntyminen aiheuttaa korkeataajuisen transienttivirran, joka superponoituu verkkotaajuisen virtaan. Katkaisijoilla on yleensä kyky katkaista jälleensyntymisten aiheuttamia korkeataajuisia transienttivirtoja niiden nolllakohdissa, muuten virta katkeaa verkkotaajuisen virran nolllakohdassa. [25]

## 5. SIMULOINTIMALLIT

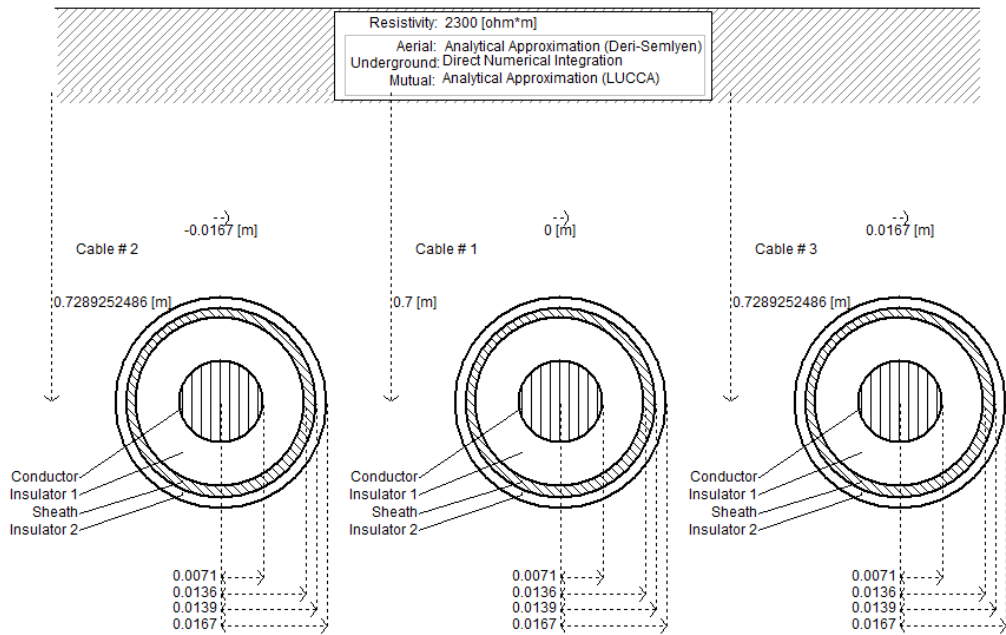
Työssä tehdyt simuloinnit on suoritettu PSCAD -simulointiohjelmistolla. PSCAD -simulointiohjelmisto soveltuu etenkin nopeita transientteja synnyttävien ilmiöiden mallintamiseen ja tutkimiseen. Tässä kappaleessa on pyritty selvittämään, miten verkkoa ja sen komponentteja tulee kyseisessä sovelluksessa mallintaa, jotta päästään riittävän tarkkoihin ja verkon todellista luonnetta kuvaaviin simulointituloksiin. Kappaleessa on lisäksi esitetty työssä PSCAD:lla rakennettujen verkkomallien rakenteet sekä niiden verifiointit. Simulointimallien verifiointilla pyritään varmistumaan siitä, että mallit toimivat ja kuvaavat sähköverkkoa ja sen komponentteja todenmukaisesti. [13]

### 5.1 Komponenttien mallinnus

Komponenttien mallintamisella voi olla merkittävä vaikutus tutkittavien simulointien kannalta. Tämän vuoksi on tärkeää, että komponentteja mallinnetaan tutkittavasta tilanteesta riippuen riittävän tarkasti. Esimerkiksi komponenttien taajuusriippuvuus ei ole tärkeä seikka tehonjakoon liittyvissä tehtävissä, mutta kytkentäylijännitteitä tutkittaessa se on tarpeen ottaa huomioon, jotta syntyvän ylijännitteen amplitudi saadaan vastaamaan todellista arvoa. Kytkentäylijännitteitä tutkittaessa vaikeutena on kuitenkin ottaa huomioon eri komponenttien taajuusriippuvuudet ja impedanssit, sillä komponentit voivat käyttäytyä hyvinkin eri tavoilla taajuuden muuttuessa [13].

#### 5.1.1 Kaapelit

Kaapeleita on pyritty mallintamaan PSCAD:n taajuusriippuvalla mallilla (Frequency Dependent Phase Model), joka on PSCAD:n mukaan tällä hetkellä tarkin saatavilla oleva kaapelin malli. Taajuusriippuva malli ottaa huomioon kulkuaaltojen ominaisuudet ja se soveltuu kaikille taajuuksille. Taajuusriippuva malli ei kuitenkaan voi kuvata tarkasti kaikkia kaapelin yksityiskohtia ja kerroksia, jonka vuoksi kaapelin mallia suunniteltaessa tulee tehdä erilaisia yksinkertaistuksia ja korjauksia, jotta päästään simulointien kannalta riittävän tarkkoihin tuloksiin. Kuvassa 18 on esitetty PSCAD:ssa käytetyn kaapelin mallin näkymä, johon syötetään kaapelin esitiedot. Kuvasta 18 nähdään, että mallissa kaapeli koostuu yksinkertaisesti neljästä kerroksesta, jotka ovat sisältäpäin lueteltuna johdin, eriste-kerros, kosketussuoja ja vaippa. Kaapelin vaihejohtojen väliset etäisyydet on puolestaan määriteltä siten, että vaihejohtimet ovat kolmiossa ja kiinni toisissaan. Lisäksi mallissa kaapeli on asennettu 0,7 m syvyydelle ja maaperän keskimääräisenä resistiivisyytenä on käytetty Suomessa tyypillistä arvoa  $2300 \Omega\text{m}$  [34]. [3]



**Kuva 18: PSCAD:n taajuusriippuvaan malliin syötetyt kaapelin geometriatiedot. Kuvassa mallinnettu kaapeli on AHXAMK-WP 3x150.**

Lähdetään liikkeelle kaapelin sisimmän osan eli johtimen mallintamisesta. PSCAD:ssa kaapelin taajuusriippuvaan malliin ei pysty mallintamaan säikeisiä johtimia, vaan ainoastaan sylinterimäisiä umpinaisia tai onttoja johtimia. Jos halutaan mallintaa säikeisiä johtimia, tulee johtimen resistiivisyyttä korjata sopivan kertoimen avulla. Johtimen DC-resistanssi saadaan laskettua kaavalla (25), kun tiedetään johtimen pituus  $l$ , johtimessa käytetyn materiaalin resistiivisyys  $\rho$  ja johtimen poikkipinta-ala  $A$ . [3]

$$R_{DC} = l \frac{\rho}{A} \quad (25)$$

Säikeisen johtimen kaapelin datalehdessä ilmoitettu poikkipinta-ala ei ole sama kuin johtimen säteen avulla laskettu poikkipinta-ala. Datalehdessä ilmoitetun poikkipinta-alan ja johtimen säteen avulla lasketun poikkipinta-alan eroa käytetään hyväksi korjattua resistiivisyyttä laskettaessa. Korjattu resistiivisyys saadaan täten johdettua DC-resistanssin kaavoista seuraavasti. [3]

$$R_{DC} = l \frac{\rho}{A} = l \frac{\rho'}{\pi r^2} \quad (26)$$

$$\Rightarrow \rho' = \rho \frac{\pi r^2}{A} \quad (27)$$

Kaavoissa (26) ja (27)  $\rho'$  on johtimen korjattu resistiivisyys ja  $r$  johtimen säde. Datalehdessä ilmoitettu poikkipinta-ala on pienempi kuin johtimen halkaisijan avulla laskettu, joka johtaa siihen, että korjattu resistiivisyys on suurempi kuin alkuperäinen. Tämä taas



johtuu siitä, että todellisuudessa johtimessa on säikeiden välissä tyhjää tilaa eikä todellinen poikkipinta-ala ole yhtä suuri, jonka vuoksi johtimen resistiivisyyttä tulee kasvattaa. [25]

Johtimen ja eristekerroksen päällä olevia puolijohtavia kerroksia eli johdin- ja hohtosuojaa ei voi mallintaa PSCAD:ssa erikseen, vaan siinä voi mallintaa ainoastaan johtimen päällä olevan eristekerroksen. On kuitenkin todettu, että puolijohtavilla kerroksilla on vaikutusta aaltomuotoihin, kun tutkitaan transienttiylijännitteitä aiheuttavia ilmiöitä [3]. Puolijohtavat kerrokset voidaan ottaa huomioon eristekerroksen ominaisuuksissa, lisäämällä ne eristekerroksen paksuuteen. Tällöin tulee olettaa, että kaapelin kapasitanssi on vakio koko puolijohtavien kerrosten ja eristekerroksen yli. Eristekerroksen ominaisuuksiin ilmoitetaan PSCAD:ssa eristekerroksen paksuus ja eristeenä käytetyn väliaineen suhteellinen permittiviteetti. Eristekerroksen ja puolijohtavien kerrosten yhteinen suhteellinen permittiviteetti  $\varepsilon_r$  saadaan johdettua kaapelin kapasitanssin kaavasta seuraavasti.

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (28)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_r = \frac{C \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi\varepsilon_0} \quad (29)$$

Kaavoissa (28) ja (29)  $\varepsilon_0$  on tyhjiön permittiviteetti,  $R_1$  johtimen ulkosäde,  $R_2$  hohtosuojan ulkosäde ja  $C$  kaapelin pituutta kohti ilmoitettu kapasitanssi. Keskijänniteverkoissa tyypillisesti käytetyissä kaapeleissa eristekerros koostuu PEX-muovista, jonka suhteellinen permittiviteetti yksin on 2,3. [3]

Eristekerroksen ja puolijohtavien kerrosten jälkeen tulee kosketussuoja. Kosketussuojan mallintaminen riippuu pitkälti kaapelityypistä, koska kaapeleiden kosketussuojien rakenne ja materiaali vaihtelee huomattavasti eri käyttötarkoituksiin ja jännitetasoille tarkoitetuilla kaapeleilla. Työssä mallinnetussa AHXAMK-WP kaapelissa kosketussuoja on valmistettu yhtenäisestä alumiinimuovilaminaatista, kun taas AXAL-TT kaapelissa kosketussuoja on valmistettu alumiinifoliosta ja alumiinilangoista. Yksinkertaistuksen vuoksi kosketussuoja on mallinnettu sylinterin muotoisena onttona johtimena, joka koostuu pelkästään alumiinista. Kosketussuojan paksuutena on käytetty kosketussuojan todellista paksuutta ja resistiivisyytenä alumiinin resistiivisyyttä. Jos kosketussuoja koostuu säikeisestä johdosta, joudutaan käytetyn materiaalin resistiivisyyttä korjaamaan samalla tavalla kuin kaapelin johdinta mallinnettaessa. [3]

Kaikista lyhyimpiä kaapeleita ei ole tarpeen mallintaa taajuusriippuvilla malleilla, koska tämä johtaisi liian lyhyisiin simulointiaskeleisiin, joka puolestaan olisi liian aikaa vievää. Laskenta-askeleen tulee nimittäin taajuusriippuvilla malleilla olla pienempi kuin simuloinnissa olevan lyhyimmän johdon kulkuaallon kaapelin päästä päähän kulkeman ajan [17]. Simuloinneissa alle 100 metriä pitkiä johtoja ja joitakin haarajohtoja on tämän vuoksi mallinnettu  $\pi$ -malleilla. Johtojen  $\pi$ -malleina on käytetty PSCAD:n ”Coupled PI

SECTION” -mallia, joka ottaa lisäksi huomioon vaihejohtojen välisen keskinäiskytkytymisen. Coupled PI -malliin tulee syöttää erikseen johdon myötä- ja nollaverkon impedanssit, kun taas taajuusriippuvassa mallissa ne määräytyvät johtimen geometrian ja materiaalien perusteella. Kuvassa 19 on esitetty Coupled PI-malliin syötetyt AXAL TT-150 kaapelin myötä- ja nollaverkon impedanssien arvot.

<b>Positive Sequence</b>	
+ve Sequence Resistance	0.206 [ohm/km]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.1005309649 [ohm/km]
+ve Sequence Capacitive Reactance	0.0138395603 [Mohm*km]
<b>Zero Sequence</b>	
Zero Sequence Resistance	0.944 [ohm/km]
Zero Sequence Inductive Reactance	0.38 [ohm/km]
Zero Sequence Capacitive Reactance	0.0117826586 [Mohm*km]

**Kuva 19: Coupled PI -malliin syötetyt AXAL TT-150 kaapelin myötä- ja nollaverkon impedanssit. Kuvassa esitetyt nollaverkon impedanssin arvot perustuvat kaapelivalmistajalta saatuihin arvoihin.**

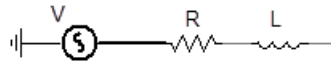
Myötäverkon impedanssit sekä nollaverkon kapasitiivisen reaktanssin saa laskettua kaapeleiden datalehdissä ilmoitettujen tietojen perusteella. Nollaverkon resistanssi ja induktiivinen reaktanssi ovat puolestaan vaikeammin määritettävissä, koska ne riippuvat kaapelin sähköisistä ominaisuuksista, asennuksesta sekä maadoituksesta [35]. Kaapeli nollaverkon resistanssi ja induktiivinen reaktanssi saadaan parhaiten mittaamalla, mutta niitä voidaan kuitenkin arvioida eri menetelmillä. Esimerkiksi viitteessä [36] on esitetty menetelmä, jolla voidaan arvioida kaapelin nollaverkon impedanssia verkossa olleiden yksivaiheisten maasulkujen perusteella. [36]

### 5.1.2 Avojohdot

Avojohtoja on mallinnettu kaapeleiden tavoin taajuusriippuvilla malleilla ja  $\pi$ -malleilla. Toisin kuin kaapelin mallissa, PSCAD:n avojohdon taajuusriippuvalla mallilla voidaan mallintaa säikeisiä johtimia. Malliin voidaan syöttää johtimen säikeiden kokonaismäärä, yksittäisen säikeen säde, ulko- ja sisäsäikeiden lukumäärät, johtimen DC-resistanssi sekä johtimen säde. Edellä mainitut arvot saadaan suoraan avojohdojen teknisistä tiedoista. Yksinkertaistuksen vuoksi kaikki työssä mallinnettavat avojohdot ovat Raven 54/9 Al/Fe -avojohdoja, koska työssä tarkastelun kohteena ovat pääasiassa kaapelit. Taajuusriippuvaan malliin tulee syöttää myös vaihejohtimien välinen etäisyys, pylväiden korkeus maasta, johtimen riippuma sekä maaperän resistiivisyys. Vaihejohtimien välisenä etäisyytenä on käytetty 0.5 m, pylväiden korkeutena 10 m, johtimen riippumana 2 m ja maaperän resistiivisyytenä 2300  $\Omega$ m.

### 5.1.3 Syöttävä verkko

Syöttävää 110 kV verkkoa on mallinnettu ekvivalentin verkon menetelmällä. Ekvivalentti verkko koostuu yksinkertaisesti jännitelähteen, keskitetyn resistanssin ja keskitetyn induktanssin sarjankytkennästä, jota on havainnollistettu kuvan 20 mukaisella 1-vaiheisella sijaiskytkennällä. [25]

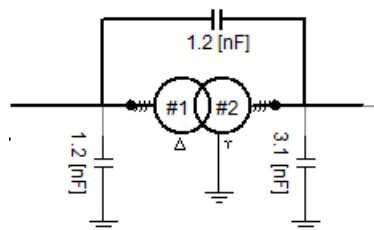


*Kuva 20: Ekvivalentin verkon 1-vaiheinen sijaiskytkentä.*

Resistanssi ja induktanssi kuvaavat syöttävän verkon oikosulkuimpedanssia liittymispisteessä. Oikosulkuimpedanssia kuvaavat resistanssin ja induktanssin arvot on saatu verkotietojärjestelmästä (VTJ) tyypillisen 110/20 kV sähköaseman päämuuntajan tiedoista. Kaikissa työssä tehdyissä simuloinneissa syöttävä verkko pyrittiin mallintamaan vähintään kahden solmupisteen päähän tarkasteltavasta katkaisijasta, koska tällöin verkon kuluaaltojen heijastumisia saadaan kuvattua tarkemmin [13].

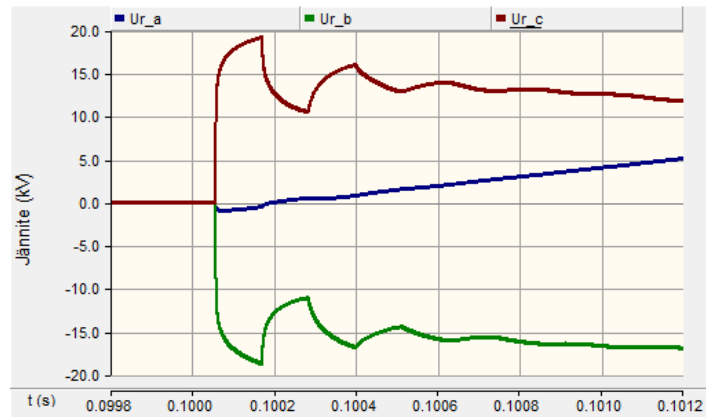
### 5.1.4 Muuntajat

Muuntaja on kokonaisuudessaan erittäin kompleksinen komponentti ja se käyttäytyy eri tavalla jatkuvassa tilassa ja transienttiylijännitteitä aiheuttavissa tilanteissa. Muuntajia on mallinnettu PSCAD:n valmiilla muuntajan 3-vaiheisella mallilla. Malli soveltuu sellaiseen jatkuvan tilan simulointeihin, joissa taajuus pysyy vakiona. Jos malliin otetaan lisäksi mukaan muuntajan saturoituminen, se soveltuu myös matalille taajuuksille. Saturoitumisen voi laittaa päälle suoraan valmiin muuntajan mallista ja lisätä siihen sopivat saturoitumista kuvaavat tiedot. PSCAD:n muuntajan malli ei kuitenkaan ota huomioon muuntajan käyttäytymistä korkeilla taajuuksilla. Muuntajan käyttäytymistä korkeilla taajuuksilla voidaan kuitenkin mallintaa riittävän tarkasti lisäämällä PSCAD:n muuntajan malliin kondensaattorit kuvaamaan muuntajan hajakapasitanssia [37]. Hajakapasitanssia kuvaavat kondensaattorit tulee mallintaa muuntajan ylä- ja alajännitepuolille vaiheen ja maan väliin, sekä ylä- ja alajännitepuolen väliin kuvan 21 mukaisesti. [38]

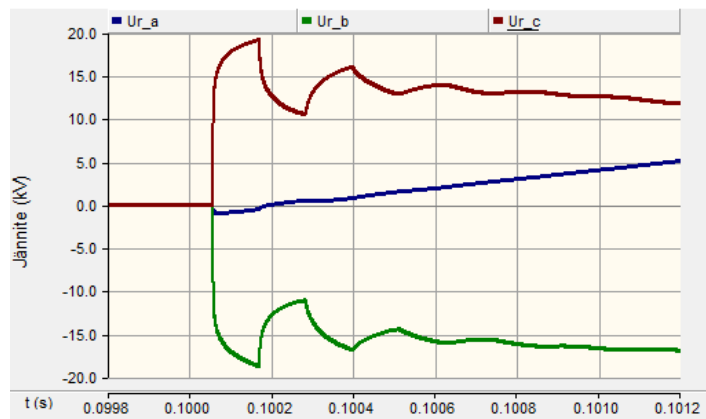


*Kuva 21: PSCAD:n muuntajan malliin lisätyt hajakapasitanssit.*

Viitteessä [38] on esitetty muuntajille tyypillisiä hajakapasitanssien arvoja nimellistehoitain. Tarkat hajakapasitanssit arvot ovat yleensä vain muuntajan valmistajilla tiedossa ja ne riippuvat paljolti muuntajan tyypistä ja nimellistehosta. Työssä tehdyissä simuloinneissa hajakapasitanssin mallintamisella ei ollut kuitenkaan juuri lainkaan vaikutusta syntyvien ylijännitteiden suuruuteen, jonka vuoksi muuntajia mallinnettiin PSCAD:n valmiilla muuntajan mallilla, jossa on otettu huomioon myös muuntajan saturoituminen. Kuvassa 22 on esitetty kuormitetun muuntajan energisoinnista aiheutuvaa kytkentäylijännitettä ilman hajakapasitanssia ja hajakapasitanssin kanssa. [38]



a) Hajakapasitanssi mallinnettuna



b) Ilman hajakapasitanssia

**Kuva 22: Muuntajan hajakapasitanssin vaikutus muuntajan energisoinnista syntyvään kytkentäylijännitteeseen.**

Kuvasta 22 nähdään, että muuntajan energisoinnista aiheutuva kytkentäylijännite on lähes identtinen ilman hajakapasitanssin mallintamista ja hajakapasitanssin kanssa. Tämän vuoksi hajakapasitanssin vaikutusta ei ole työssä mallinnettu lainkaan. Samaan lopputulokseen on päästy myös viitteessä [38], jossa on mallinnettu tuulivoimaloiden yhteydessä esiintyviä kytkentäylijännitteitä.

PSCAD:n muuntajan malliin käyttäjän tulee syöttää muuntajan nimellisteho, oikosulku-reaktanssi, kuormitushäviöt ja tyhjäkäyntihäviöt. Kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt tulee

ilmoittaa suhteellisina arvoina, jolloin suhteellisarvot saadaan jakamalla häviöt muuntajan nimellisteholla. Kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöiden arvot on tyypillisesti ilmoitettu muuntajan teknisissä tiedoissa. Teknisissä tiedoissa on yleensä ilmoitettu myös muuntajan oikosulkuimpedanssin suhteellisarvo. Muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi  $x_k$  saadaan laskettua kaavalla (30)

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (30)$$

, jossa  $z_k$  on suhteellisarvona ilmoitettu muuntajan oikosulkuimpedanssi ja  $r_k$  suhteellisarvona ilmoitettu muuntajan kuormitushäviö. Saturaatiota on puolestaan mallinnettu PSCAD:n ilmoittamien ohjearvojen mukaan.

### 5.1.5 Kytkinlaitteet

Työssä mallinnettavat kytkinlaitteet ovat pääasiassa ideaalisia katkaisijoita tai tyhjiökatkaisijan malleja. Keskijänniteverkoissa käytettävät katkaisijat ovat pääsääntöisesti vähäljy-, tyhjiö- tai SF6- katkaisijoita. Uusissa asennuksissa käytetään nykyään lähinnä tyhjiökatkaisijoita [39]. Tyhjiökatkaisijan sähköiset ilmiöt ovat hyvin tunnettuja ja niitä voidaankin mallintaa riittävän tarkasti transienttiyljännitteiden tutkimiseen tarkoitetuille ohjelmilla [40]. Tyhjiökatkaisijoiden hyvän tuntemuksen sekä laajan käytön vuoksi tyhjiökatkaisijoita mallinnettiin myös työssä tehdyissä simuloinneissa. PSCAD:n kotisivuilta löytyy valmiita tyhjiökatkaisijan malleja, joilla voidaan mallintaa irtikytkennän jälkeisiä uudelleen- ja jälleensyöttymisiä [41]. Kyseiset mallit soveltuvat siis ainoastaan irtikytkentöihin, eikä niillä voi mallintaa verkon energisoinnista aiheutuneita kytkentäyljännitteitä.

Energisoinnin aikana katkaisijan avausvälissä voi tapahtua useita esisyttymisiä, joka on käänteinen tapahtuma jälleensyöttymiselle. Toisin sanoen katkaisijaa kiinni ohjattaessa katkaisijan koskettimet lähtevät liikkumaan toisiaan kohti tietyllä kulmanopeudella, jolloin myös avausvälin jännitelujuus lähtee laskemaan. Kun katkaisijan yli oleva jännite ylittää katkaisijan avausvälin laskevan jännitelujuuden, voi katkaisijassa tapahtua läpilyönti eli esisyttyminen ja katkaisijan avausvälissä alkaa palamaan valokaari. Tyhjiökatkaisijoilla on yleensä myös kyky katkaista esi- ja jälleensyöttymisten aiheuttamia korkeataajuisia transienttivrtoja. Työssä on rakennettu itse tyhjiökatkaisijan malli, jolla voidaan mallintaa katkaisijan avausvälin esisyttymisiä. Ideaalisella katkaisijalla työssä tarkoitetaan PSCAD:n valmista katkaisijan mallia, joka voi kytkeä tai katkaista virrat käyttäjän määrittämällä ajanhetkellä ilman esi- tai jälleensyöttymisiä. [40]

Tyhjiökatkaisijan toimintaan oleellisesti liittyviä suureita eli avausvälin jännitelujuutta ja korkeataajuisen virran katkaisukykyä voidaan mallintaa riittävän tarkasti yhtälöiden (31), (32) ja (33) avulla. Tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuutta voidaan arvioida auki- ja kiinniohjauksissa kaavoilla (31) ja (32). [42]

$$U_b = A(t - t_{auki}) + B \quad (31)$$

$$U_b = TRV_{KESTO} - A(t - t_{kiinni}) + B \quad (32)$$

Kaavoissa (31) ja (32)  $A$  on avausvälin jännitelujuuden muutosnopeus,  $t_{auki}$  ja  $t_{kiinni}$  ovat katkaisijan ohjauksien ajanhetket,  $B$  on katkaisijan palaavan jännitteen suuruus juuri ennen virran nollakohtaa ja  $TRV_{KESTO}$  on katkaisijan avausvälin jännitelujuus, kun koskettimet ovat täysin auki. Tyhjiökatkaisijoilla muuttujien  $A$  ja  $B$  arvoina voidaan käyttää taulukossa 4 esitettyjä arvoja [40]. Avausvälin jännitelujuuden muutosnopeus  $A$  riippuu lineaarisesti katkaisijan koskettimien välisestä etäisyydestä, kun taas katkaisijan palaavan jännitteen suuruutena juuri ennen virran nollakohtaa  $B$  käytetään yleensä arvoa 0. [40]

**Taulukko 4: Tyypillisiä arvoja tyhjiökatkaisijan toimintaa kuvaaville vakioille  $A$  ja  $B$ . [40]**

A (V/ $\mu$ s)	B (V)
2	0
20	0
30	1000
50	0

Täysin avoimena olevan katkaisijan avausvälin jännitelujuutena  $TRV_{KESTO}$ , voidaan käyttää kyseisen jännitetason salamasyöksyjännitekokeen jännitearvoa, jonka arvo on taulukon 3 mukaan keskijänniteverkoissa 125 kV [17]. Tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukykyä voidaan puolestaan arvioida kaavalla (33)

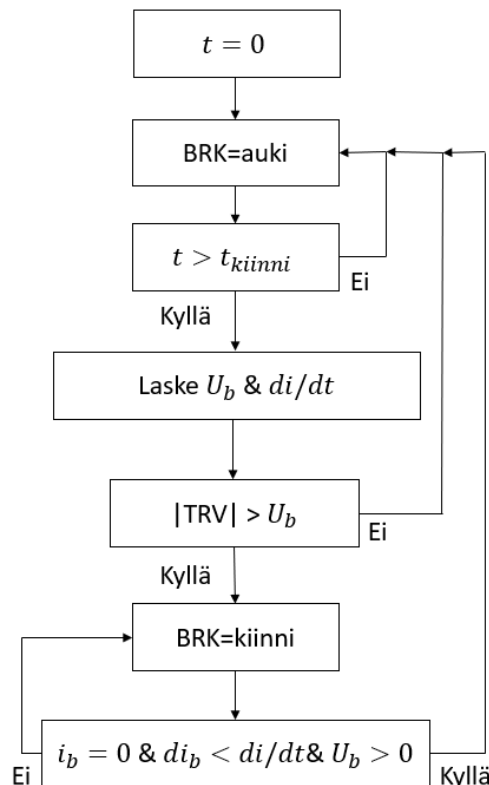
$$\frac{di}{dt} = C(t - t_{auki/kiinni}) + D \quad (33)$$

, jossa  $C$  ja  $D$  ovat tyhjiökatkaisijalle ominaisia vakioita, joille tyypillisiä arvoja on esitetty taulukossa 5. Tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen transienttivirran katkaisukykyä kuvataan siis virran muutosnopeuden eli derivaatan avulla. Jos esi- tai jälleensyöttymisestä syntyvän korkeataajuisen transienttivirran nollakohdan derivaatta ylittää  $di/dt$ :n arvon, ei katkaisija onnistu sammuttamaan koskettimien välillä palavaa valoakaarta, vaan valoakaari sammuu seuraavassa perustaajuisen virran nollakohdassa. [40] [42]

**Taulukko 5: Tyypillisiä arvoja tyhjiökatkaisijan toimintaa kuvaaville vakioille  $C$  ja  $D$ . [40]**

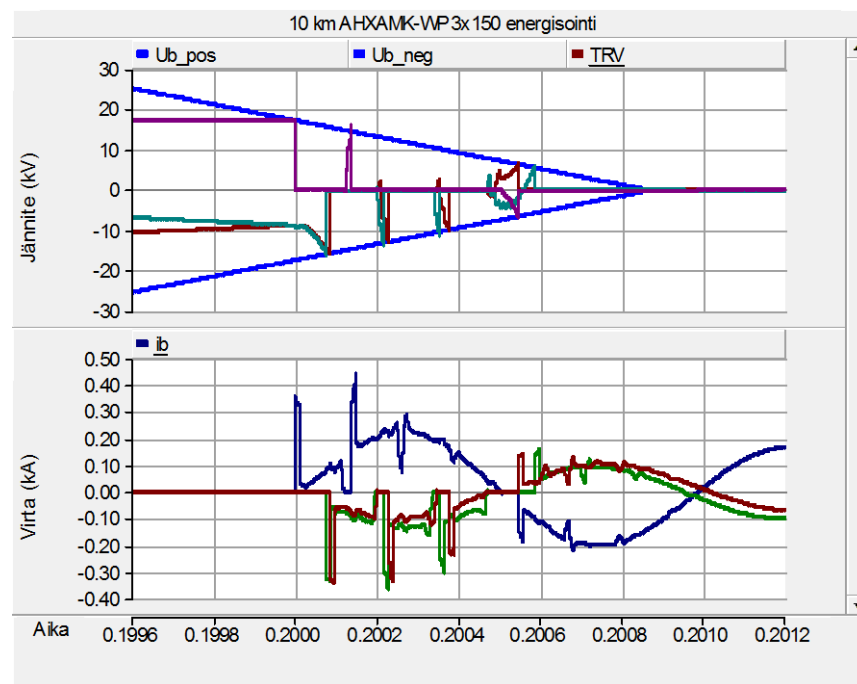
C (A/ $\mu$ s <sup>2</sup> )	D (A/ $\mu$ s)
$-0.34 * 10^3$	255
0	100
0	600
$0.31 * 10^6$	155

Tyhjiökatkaisijan kiinniohjauksen aikana tapahtuvia esisyttyä on mallinnettu kuvan 23 mukaisella logiikalla. Ajanhetkellä  $t = 0$  katkaisijan BRK-tila on auki ja se pysyy auki käyttäjän määrittämään ajanhetkeen  $t_{kiinni}$  asti, jolloin katkaisija saa kiinniohjaus käskyn. Katkaisija ei ohjaudu kiinni välittömästi, vaan logiikka alkaa laskemaan avausvälin jännitelujuutta  $U_b$  ja korkeataajuisen virran katkaisukykyä  $di/dt$ . Kun avausvälin yli olevan jännitteen eli TRV:n itseisarvo ylittää avausvälin jännitelujuuden  $U_b$ :n arvon, katkaisija ohjataan kiinni. Todellisuudessa katkaisijan koskettimien väliin syttyisi valokaari, mutta valokaaren resistanssi on lähellä nollaa ja sen mallintaminen on verrattain monimutkaista, jonka vuoksi logiikka ohjaa katkaisijan yksinkertaisesti kiinni valokaaren syttyessä. Voidaan kuitenkin päätellä, että valokaaren syttyessä jännitteet ja virrat olisivat todellisuudessa hieman pienempiä valokaariresistanssin vaikutuksesta. Kiinniohjauksen jälkeen logiikka alkaa laskemaan valokaaren aiheuttaman virran kulmakerrointa  $di_b$  ja katkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukykyä  $di/dt$ . Jos katkaisukyky  $di/dt$  ylittää  $di_b$ :n arvon virran nollakohdassa ja avausvälin jännitelujuus  $U_b$  on suurempi kuin nolla eli katkaisijan koskettimet eivät ole vielä kiinni, katkaisija ohjataan auki eli valokaari sammuu ja logiikka palaa alkuun. Muuten katkaisija pysyy kiinni ja vertaa  $di/dt$ : ja  $di_b$ :n arvoja seuraavassa virran nollakohdassa. [17]



**Kuva 23: Tyhjiökatkaisijan esisyttyä kuvaava logiikka. Logiikka perustuu viitteessä [17] tehtyyn logiikkaan.**

Tyhjiökatkaisijan esisyytymisiä kuvaava logiikka toteutettiin PSCAD:ssa oletuksena olevilla logiikka- ja funktiokomponenteilla. Esisyytymisiä kuvaavan mallin toimintaa on testattu simuloimalla 10 km pitkän AHXAMK-WP 3x150 kaapelin energisointia. Energisoinnin aikana syntyvät esisyytymiset ja korkeataajuisen virran katkeamiset on esitetty kuvassa 24. Kuvasta 24 nähdään, että malli toimii juuri niin kuin pitääkin. Logiikka ohjaa katkaisijan vaihekohtaisesti kiinni, kun tietyn vaiheen avausvälin yli oleva jännite ylittää avausvälin laskevan jännitelujuuden eli katkaisijan koskettimien välille syttyy valokaari. Kiinniohjauksen jälkeen katkaisija pystyy vielä katkaisemaan virran sen nollakohdassa, mutta valokaari syttyy nopeasti uudelleen alhaisesta avausvälin jännitelujuudesta johtuen. Kun katkaisijan avausvälin jännitelujuus saavuttaa arvon 0 eli katkaisijan koskettimet ovat kokonaan kiinni, ei katkaisija enää pysty katkaisemaan virtaa ja katkaisija pysyy lopullisesti kiinni.



**Kuva 24: 10 km AHXAMK-WP 3x150 kaapelin energisoinnin aikaiset esisyytymiset.**

Simuloinneissa huomattiin, että kaapelin energisoinnista aiheutuneet kytkentäylijännitteet ovat tyhjiökatkaisijan mallilla hieman pienempiä, kuin ideaalisella katkaisijan mallilla. Tämä johtuu siitä, että tyhjiökatkaisijan mallissa katkaisija ohjautuu kiinni eri vaiheissa eri aikaan. Ideaalisella katkaisijalla voidaan kytkeä kaikki vaiheet kiinni yhtä aikaa, jolloin simulointien mukaan syntyy myös suurempia ylijännitteitä. Tämän vuoksi työssä tehdyissä simuloinneissa on yksinkertaistuksen vuoksi käytetty yleisesti ideaalisia katkaisijoita, joka on turvallisempi tapa simulointien kannalta. Jos ideaalisen katkaisijan mallia käytettäessä kytkentäylijännitteet kasvavat yli kriittisten rajojen, on tarpeen käyttää tyhjiökatkaisijan mallia, joka kuvaa katkaisijan toimintaa tarkemmin.



### 5.1.6 Rinnakkaisreaktori

Loistehon kompensointiin tarkoitettuja rinnakkaisreaktoreita mallinnetaan tavallisesti verkon rinnalle kytketyllä induktanssin ja resistanssin sarjaankytkennällä, jolloin malli ei ota huomioon mm. saturaatiota tai vaiheiden välistä keskinäisinduktanssia [43]. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että reaktorin vaiheiden välisellä keskinäisinduktanssilla on vaikutusta reaktorin irtikytkennästä syntyvään värähtelyyn [3] [44]. Mallinnettaessa reaktorin irtikytkennästä aiheutuvaa värähtelyä voidaan sanoa, että ilman keskinäisinduktanssin mallintamista värähtely tapahtuu vain yhdellä taajuudella, kun taas keskinäisinduktanssi huomioon ottaen värähtely tapahtuu korkeintaan kolmella eri taajuudella [25]. Todellisuudessa reaktorin vaiheiden välillä on aina keskinäisinduktanssia, jonka vuoksi sitä on myös tarpeen mallintaa [3]. Työssä käytettäviä reaktoreita on mallinnettu PSCAD:n ”Mutually Coupled 3 Wires” -komponentilla, joka koostuu yksinkertaisesti induktanssin ja resistanssin sarjaankytkennästä ja sillä voidaan mallintaa myös vaiheiden välistä keskinäisinduktanssia [43]. Mallinnettavan reaktorin kuluttama näennäisteho saadaan laskettua kaavasta (34),

$$S = \sqrt{Q^2 + (r_r * Q)^2} \quad (34)$$

, jossa  $Q$  on reaktorin kuluttama loisteho eli reaktorin mitoitusteho ja  $r_r$  on reaktorin pätötehohäviöiden suhteellisarvo reaktorin mitoitustehoon nähden. Yleensä  $r_r$ :n arvo on pieni ja esimerkiksi viitteessä [45] esitetyt reaktorivalmistajan ilmoittamat arvot vaihtelevat välillä 0.2 – 1.4 %, kun taas viitteessä [46] on käytetty kaikilla reaktoreilla arvoa 0.6 %. Reaktorin malliin tarvittava induktanssi saadaan laskettua kaavalla (35)

$$L = \frac{3QU^2}{6\pi fS^2} \quad (35)$$

, jossa  $Q$  on reaktorin mitoitusteho,  $U$  verkon pääjännite,  $f$  verkon taajuus ja  $S$  reaktorin näennäisteho. Jos reaktorin pätötehohäviöitä ei oteta huomioon, reaktorin mitoitusteho ja näennäisteho ovat yhtä suuria, kuten kaavasta (34) nähdään. Reaktorin resistanssi saadaan puolestaan laskettua pätötehohäviöiden avulla kaavasta (36).

$$R = \frac{r_r QU^2}{S^2} \quad (36)$$

Reaktorin vaiheiden välistä keskinäisinduktanssia voidaan mitata syöttämällä reaktorin yhteen vaiheeseen jännite ja mittaamalla kahteen muuhun vaiheeseen indusoitunutta jännitettä [3]. Mittauksia on suoritettu lähinnä vain suurjänniteverkoissa käytetyille reaktoreille, jonka vuoksi työssä käytetyt keskinäisinduktanssin arvot on jouduttu redusoimaan suurjänniteverkoissa tehdyistä mittauksista. Viitteessä [47] on ilmoitettu vaiheiden välisen keskinäisinduktanssien arvot 4,5 MVar reaktorille 60 kV verkossa. Nämä arvot on työssä redusoitu 20 kV verkkoon ja saatu taulukon 6 mukaiset arvot.

**Taulukko 6: 4,5 MVar reaktorin 20 kV jännitetasoon redusoidut keskinäisinduktanssin arvot.**

Vaiheväli	Keskinäisinduktanssi [H]
A-B	-0.0010388889
B-C	-0.0010388889
C-A	-0.0003144444

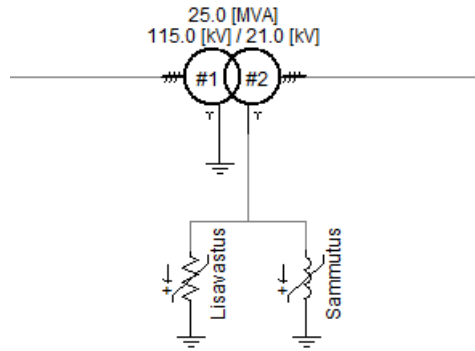
Taulukossa 6 esitetyt keskinäisinduktanssin arvot on käytetty kaikissa työssä mallinnetuissa reaktoreissa. Tämän on oletettu olevan riittävän tarkka menetelmä työssä tehtyjen simulointien kannalta, koska tarkastelun pääkohteena oli kaapeliverkkoon varastoitunut energia. Tarkkojen keskinäisinduktanssien käyttäminen simuloinneissa vaatisi mitauksia myös keskijänniteverkoissa käytetyille reaktoreille. Taulukosta 6 huomataan, että keskinäisinduktanssien arvot ovat polariteetiltaan negatiivisia. Tämä johtuu siitä, että reaktorissa jokaisen vaiheen käämitys on kiinnitettynä samansuuntaisesti yhteiseen rautasydämeen, jonka seurauksena yhden vaiheen käämin magneettikenttä indusoi viereisiin käämeihin vastakkaissuuntaisen virran [3].

Myös reaktorin tähtipisteen maadoituksella on vaikutusta irtikytkennästä syntyvän värähtelyn amplitudiin. Keskijänniteverkoissa käytetyt reaktorit ovat tyypillisesti tähtipistees-tään maadoittamattomia, jolloin irtikytkennästä aiheutuvan värähtelyn jännitteen amplitudit ovat suurempia kuin maadoitetuilla reaktoreilla [44]. Työssä ei mallinnettu lainkaan reaktoreiden saturoitumista, jolla on oletettavasti hieman vaikutusta irtikytkennästä syntyvään värähtelyyn.

### 5.1.7 Maasulkuvirran kompensointilaitteistot

Laajoille kaapeliverkoille on ominaista, että niissä on keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin lisäksi myös hajautettua maasulkuvirran kompensointia, jotta päästään riittäviin kosketusjännitevaatimukseen maasulun aikana [35]. Maasulkuvirran kompensointikela eli sammutuskuristin kytketään verkon tähtipisteen ja maan välille. Keskijänniteverkoissa tähtipistettä ei ole saatavilla, koska päämuuntajat ovat tyypillisesti Ynd11-kytkentäisiä. Tähtipiste voidaan kuitenkin luoda keinotekoisesti Znyn-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla. [45]

Keskitettyä maasulkuvirran kompensointikelaa on mallinnettu PSCAD:ssa muuttamalla päämuuntaja Yy-kytkentäiseksi, jolloin keskijännitepuolen tähtipiste on saatavilla suoraan päämuuntajalta. Päämuuntajan alajännitepuolen tähtipisteeseen on kytketty rinnan sammutuskuristin ja sammutuslaitteistojen lisävastus kuvan 25 mukaisesti.



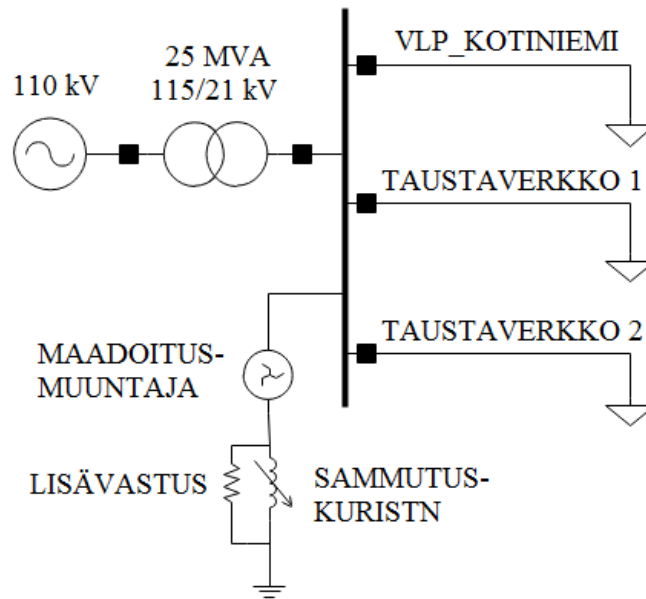
**Kuva 25: Keskitetyn maasulkuvirran kompensoinnin mallinnus PSCAD:ssa.**

Hajautettuja maasulkuvirran kompensointilaitteistoja mallinnettiin Znyn-kytkentäisten maadoitusmuuntajien avulla, joiden tähtipisteen ja maan välille oli kytkettyä kiinteä sammutuskuristin ilman lisävastusta. Hajautetut maasulkuvirran kompensointilaitteistot kytkettiin jakelumuuntajien yhteyteen keskijännitepuolelle. [45]

Keskitetty maasulkuvirran kompensointikela säädettiin jokaisessa simuloinnissa lähelle resonanssipistettä, mutta hieman alikompensoiduksi, joka vastaa verkon todellista tilannetta. Tämä tehtiin siten, että simuloitiin verkossa olevaa 1-vaiheista maasulkua ja verrattiin nollajännitteen  $U_0$  ja vikapaikan nollavirran  $I_0$  kulmaeroa. Simuloinneissa ei kuitenkaan käytetty tarkkaa viritysastetta, vaan kelan induktanssi säädettiin millin tarkkuudella siten, että verkko on vielä juuri ja juuri alikompensoitu. Kompensointikelan rinnalle kytketty  $2.5 \Omega$  lisävastus on todellisuudessa kytkettynä  $500 \text{ V}$  jännitetasoon erillisen muuntajan avulla, jonka vuoksi mallinnettu vastus on redusoitu  $20 \text{ kV}$  jännitetasoon, jolloin vastuksen arvoksi saatiin noin  $1400 \Omega$ . Yksittäinen hajautettu maasulkuvirran kompensointikela mitoitettiin kompensoimaan  $5\text{-}15 \text{ A}$  kapasitiivista maasulkuvirtaa [45].

## 5.2 Vilppulan sähköaseman verkkomalli

Työssä rakennettiin PSCAD -malli Elenian verkkoalueella sijaitsevasta Vilppulan sähköasemasta. Mallinnettavaksi sähköasemaksi valittiin Vilppula laajan kaapeloinnin sekä sähköasemalla hajonneen katkaisijan vuoksi. Kyseinen katkaisija hajosi Vilppulan sähköaseman Kotiniemen lähdöllä, joka on pitkä haja-asutusalueen lähtö sisältäen paljon maakaapelia. Tämän vuoksi mallissa on pyritty mallintamaan Kotiniemen lähtö mahdollisimman tarkasti ja muut lähdöt yksinkertaistettuna taustaverkkona. Kuvassa 26 on esitetty työssä rakennetun Vilppulan sähköaseman PSCAD -mallin verkkokaavio. Kuvasta 26 nähdään, että malli koostuu syöttävästä verkosta, päämuuntajasta, keskitetystä maasulun kompensointilaitteistosta sekä johtolähdöistä, joista Kotiniemen lähtö on kuvattu tarkasti ja muut lähdöt yksinkertaistettuna taustaverkkona. Kotiniemen lähtö puolestaan sisältää paljon maakaapelia, avojohtoa, jakelumuuntajia sekä hajautettuja maasulkuvirran kompensointilaitteistoja. Lähdön kaapeleiden ja avojohtojen sijainnit on esitetty tarkemmin liitteessä A.



**Kuva 26: Vilppulan sähköaseman PSCAD -mallin verkkokaavio.**

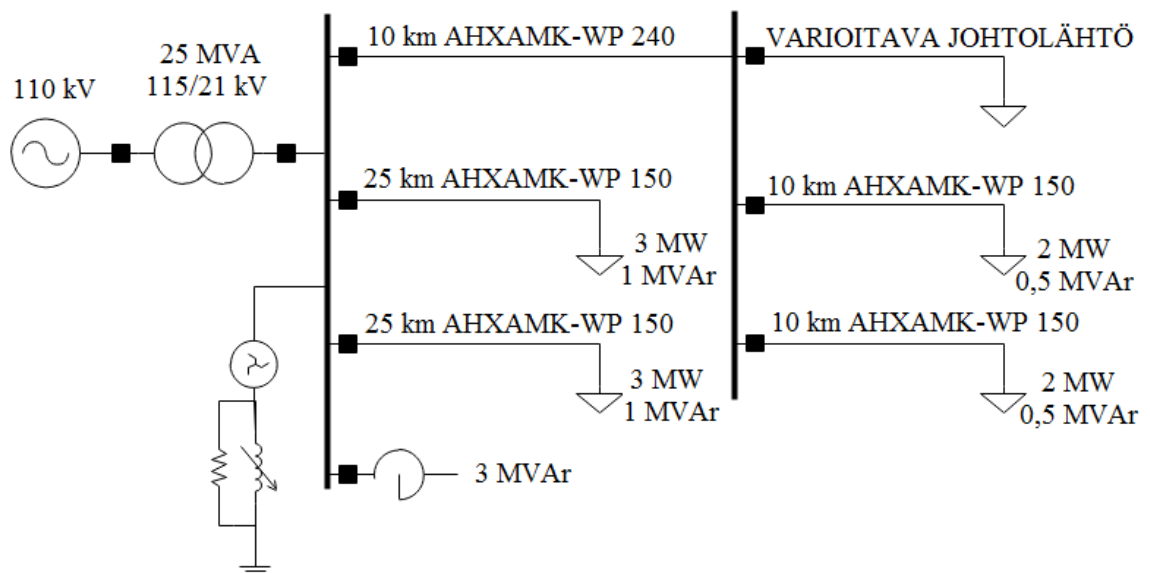
Kotiniemen lähdön runkojohto koostuu lähes täysin kaapelista, kun taas haarajohdot kaapeleista ja avojohdoista. Mallissa runkojohto on mallinnettu kokonaan taajuusriippuvilla kaapelin malleilla lukuun ottamatta runkojohdon loppupäätä. Haarajohdot ja runkojohdon loppupää on mallinnettu  $\pi$ -malleilla, jotta päästään pienempiin simulointiaikoihin. Voidaan olettaa, että  $\pi$ -mallien käytöllä on jonkun verran vaikutusta tarkasteltuihin kytkentäilmiöihin.  $\pi$ -malleilla vaimeneminen on kuitenkin heikompaa kuin taajuusriippuvilla malleilla, jonka vuoksi todellisuudessa kytkentäylijännitteiden voidaan olettaa olevan hieman alhaisempia [25]. Lähdöllä on yhteensä 102 km kaapelia ja 91 km avojohtoa. Suuren työmäärän vuoksi mallissa on kuitenkin jouduttu tekemään johtojen suhteen yksinkertaisuuksia. Mallissa kaikki kaapelit ovat AXAL-TT -kaapeleita, joiden poikkipinta-alat vastaavat kuitenkin todellisia. Kaikkia avojohdoja on puolestaan mallinnettu Raven 54/9 Al/Fe -avojohdoina, koska työssä tarkastelun pääkohteena olivat kaapelit. Kotiniemen lähdöllä on yhteensä 154 jakelumuuntajaa, joiden nimellisteho vaihtelee yleisesti välillä 50-300 kVA. Yksinkertaisuksen vuoksi kaikkia jakelumuuntajia on mallinnettu 100 kVA muuntajina. Kotiniemen lähdöllä on myös laajan kaapeloinnin vuoksi yhteensä 17 hajautettua maasulkuvirran kompensointikelaa, joiden nimellisvirta vaihtelee 5-15 A välillä.

Sähköaseman kuormitukset ja lähtöjen tuottamat maasulkuvirrat on säädetty kuntoon verkkotietojärjestelmästä saatujen arvojen perusteella. Kuormitusten arvot perustuvat viime vuoden mittauksiin ja arvoiksi pyrittiin valitsemaan keskiarvot koko vuoden ajalta. Kotiniemen lähdön kuormitukset on jaettu tasaisesti kaikille jakelumuuntajille. Taustaverkon kuormitukset on saatu vähentämällä Kotiniemen lähdön kuormat päämuuntajan läpi menevästä tehosta. Taustaverkon kuormitukset on puolestaan jaettu tasaisesti kahdelle taustaverkkoa kuvaavalle lähdölle. Mallissa taustaverkko koostuu pelkästään kaapelista, vaikka todellisuudessa muilla lähdöillä on myös laajalti avojohtoa. Taustaverkon

kaapeleiden pituudet ja hajautettu maasulun kompensointi on säädetty siten, että taustaverkkoa kuvaavat lähdöt tuottavat verkkotietojärjestelmää vastaavan maasulkuvirran. Taustaverkon kaapeleita on mallinnettu  $\pi$ -malleilla, jotta päästään entistä pienempiin simulointiaikoihin.

### 5.3 Yksinkertaistettu verkkomalli

Työssä rakennettiin myös yksinkertaistettu verkkomalli sähköasemasta ja täysin kaapeloidusta keskijänniteverkosta. Yksinkertaistetulla verkkomallilla pystyttiin tutkimaan eri parametrien kuten kaapelipituuden vaikutusta eri kytkentätilanteissa. Kuvassa 27 on esitetty yksinkertaistetun verkkomallin verkkokaavio. Kuvasta 27 nähdään, että yksinkertaistettu verkkomalli koostuu syöttävästä 110 kV verkosta, päämuuntajasta, keskitetystä maasulun kompensointilaitteistosta, keskitetystä 3 MVA<sub>r</sub> loistehon kompensointireaktori, johtolähdöistä sekä erillisestä kytkinasemasta. Yksinkertaistetun verkkomallin PSCAD-mallin rakenne on esitetty tarkemmin liitteessä B.



**Kuva 27: Yksinkertaistettu verkkomalli**

Kaikki sähköaseman johtolähdöt koostuvat AHXAMK-WP kaapeleista, joiden poikkipinta-alat ovat joko  $150 \text{ mm}^2$  tai  $240 \text{ mm}^2$ . Verkkomallissa varioitavalla johtolähdöllä tarkoitetaan lähtöä, jolla tutkittiin eri kytkentöjä ja testattiin eri parametrien vaikutusta kytkentäilmiöihin. Varioitavia parametrejä olivat mm. kaapelipituus, kaapelin poikkipinta-ala, hajautettu maasulun kompensointi ja hajautettu loistehon kompensointi. Varioitava johtolähtö sijoitettiin erilliselle kytkinasemalle, jotta verkko kuvaisi kulkuaaltojen heijastumisia mahdollisimman tarkasti ja todenmukaisesti [13].

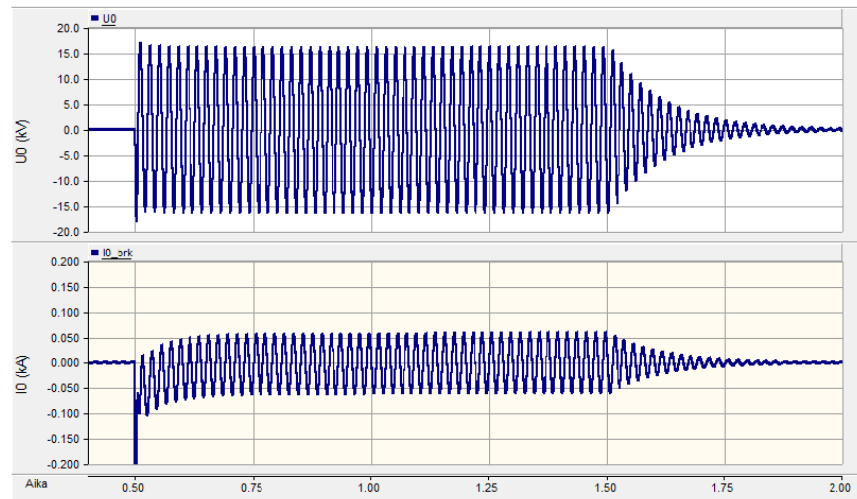
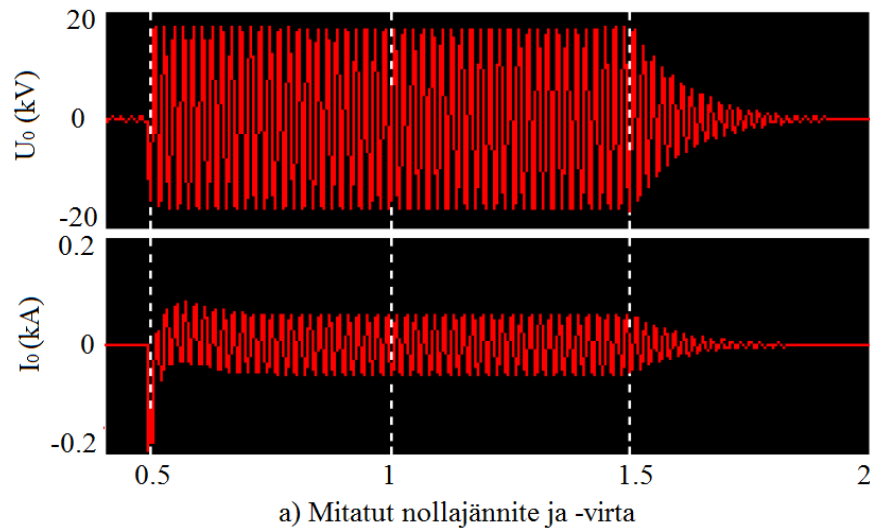
Keskitetty maasulun kompensointikela säädettiin jokaisessa simuloinnista erikseen, jos kaapelipituutta tai hajautettua maasulun kompensointia muutettiin. Kompensointikela

säädettiin hieman alikompensoiduksi, joka vastaa todellista verkon tilannetta. Johtolähtöjen kuormat on puolestaan valittu siten, että päämuuntaja on alikuormitettu ja tehokertoimet ovat suhteellisen lähellä yhtä.

## 5.4 Mallien verifiointi

Simulointimallit olisi aina hyvä verifioida, jotta saadaan varmennus siitä, että mallit toimivat ja kuvaavat verkkoa oikein. Kaikki verkot ovat yksilöllisiä, jonka vuoksi paras tapa verifiointiin on mallinnetussa verkossa tehdyt kenttämittaukset tutkituista kytkentätoimenpiteistä. Työssä mallien verifiointi muodostui kuitenkin ongelmaksi, koska työssä tutkituista kytkentätoimenpiteistä on saatavilla varsin vähän mittausdataa ja tietoa yleisesti. Kytkennöissä tutkittiin varsinkin irtikytkentöjen jälkeistä sähkökenttään varastoituneen energian purkautumista, jota on myös verrattain hankala mitata, koska yleensä osa energiasta purkautuu mittaukseen käytetyn laitteen kautta, jolloin todellista kuvaa energian purkautumisesta ei saada. Mittauksia on kuitenkin suoritettu jonkin verran suurjänniteverkoissa ja niitä on pyritty hyödyntämään myös työssä tehtyjen mallien verifiointissa.

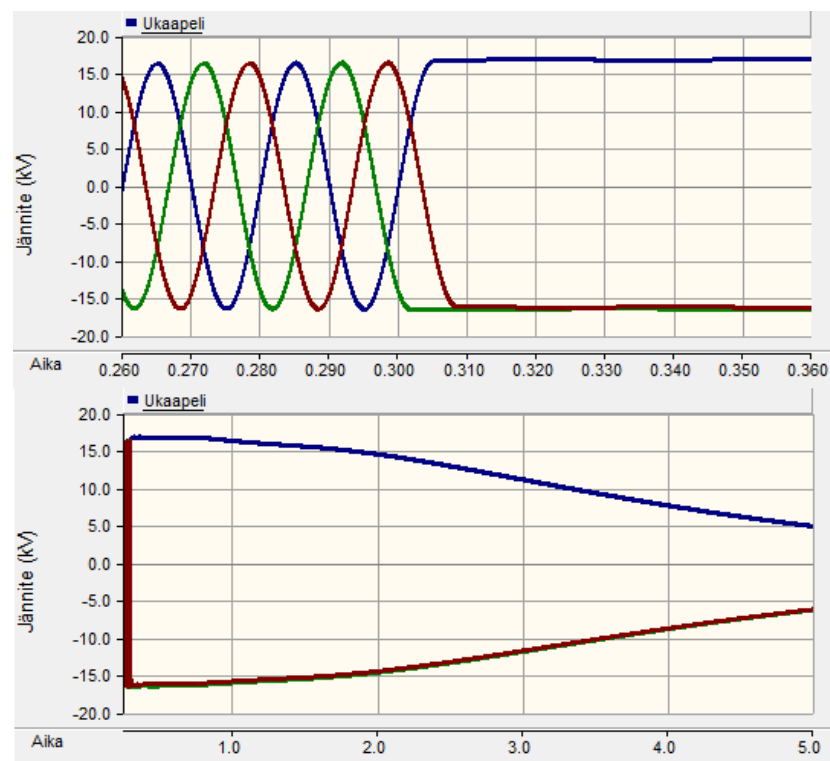
Vilppulan sähköasemaa kuvaava verkkomalli pyrittiin aluksi verifioimaan Kotiniemen lähdön releen häiriötallenteiden avulla. Kyseinen lähtö oli kuitenkin koestettu juuri ennen häiriötallenteiden hakua sekä lisäksi rele oli vanhempaa kennoterminaalityyppiä, jonka vuoksi releeltä saatiin ulos ainoastaan kaksi häiriötallennetta. Saadut kaksi häiriötallennetta olivat molemmat jälleenkytkentöjen aiheuttamia, joita on hankalaa simuloida, koska tarkkaa vikapaikkaa ja vikatyyppeä ei ollut tiedossa. Kotiniemen lähdöllä oli onneksi tehty vuonna 2013 kenttämittauksia, joita hyödynnettiin kyseisen mallin verifiointissa. Lähdöllä on tehty paljon kaapelointia vuoden 2013 kenttämittausten jälkeen, jonka vuoksi verkkomalli säädettiin aluksi vastaamaan vuoden 2013 kytkentää. Kenttämittauksissa Kotiniemen lähdön loppupäähän lisättiin vastukseton 1-vaiheinen maasulku, jota myös simuloitiin PSCAD:ssa rakennetulla verkkomallilla. Maasulun annettiin olla verkossa sekunnin ajan, jonka jälkeen se poistettiin. Mittauksissa mitattiin Kotiniemen lähdön katkaisijan läpi menevää nollavirtaa sekä nollajännitettä vian aikana ja sen jälkeen. Kuvassa 28 on esitetty vian aiheuttamat mitatut sekä PSCAD-mallilla simuloidut lähtökatkaisijan nollajännitteet ja -virrat.



**Kuva 28: Vilppulan Kotiniemen lähdön maasulun aikaiset a) mitatut ja b) simuloidut nollajännitteet ja -virrat.**

Kuvasta 28 nähdään, että Vilppulan 2013 vuoden kytkentätilanteella rakennettu verkkomalli kuvaa varsin hyvin verkon toimintaa 1-vaiheisen vastuksettoman maasulun aikana ja sen poistumisen jälkeen. Erityisesti verifiointissa kiinnitettiin huomiota maasulun jälkeisen värähtelyyn, joka vaimenee simulointien mukaan lähes yhtä tehokkaasti kuin mitauksissa. Verkon vaimenemista ei kuitenkaan saatu verifioitua kytkentätaajuisilla ilmiöillä puutteellisen mittausdatan vuoksi. Vilppulan nykyiseen kytkentätilanteeseen perustuva verkkomalli rakennettiin samoilla periaatteilla kuin 2013 vuoden verkkomalli, joten voidaan todeta, että myös nykyisellä kytkentätilanteella rakennettu verkkomalli toimii oikein. Tämä oli paras verifiointitapa Vilppulan verkkomallille, koska parempaa mittausdataa Vilppulan verkkomallilla tehdyistä kytkennöistä ei ollut saatavilla.

Yksinkertaistettu verkkomalli puolestaan pyrittiin verifioimaan suurjänniteverkoissa tehtyjen mittausten perusteella, koska keskijänniteverkoista ei löydy juurikaan mittausdataa kytkennän jälkeisistä ilmiöistä. Yksinkertaistetun verkkomallin verkkorakenne on itse kehitetty työssä, jonka vuoksi samanlaisessa verkossa tehtyjä mittauksia ei olisi muutenkaan mahdollista saada. Suurjänniteverkoissa mittauksia on suoritettu tyhjäkäyvän kaapelin ja rinnakkaisreaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennöille, joita myös tutkittiin työssä tehdyissä simuloinneissa [30] [3]. Useissa viitteissä [25], [29] ja [30] on todettu, että tyhjäkäyvän kosketussuojalla varustetun kaapelin irtikytkentä ilman uudelleen- ja jälleensytymisiä on vaimeneva DC-komponentti, joka ei aiheuta merkittäviä ylijännitteitä. Kuvassa 29 on esitetty yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitua 10 km pitkän tyhjäkäyvän AHXAMK-WP 3x150 -kaapelin irtikytkennän jälkeistä jäännösvarausta. Kuvassa jännitteet ovat vaihejännitteitä ja mittaus on suoritettu kaapelin loppupäästä.



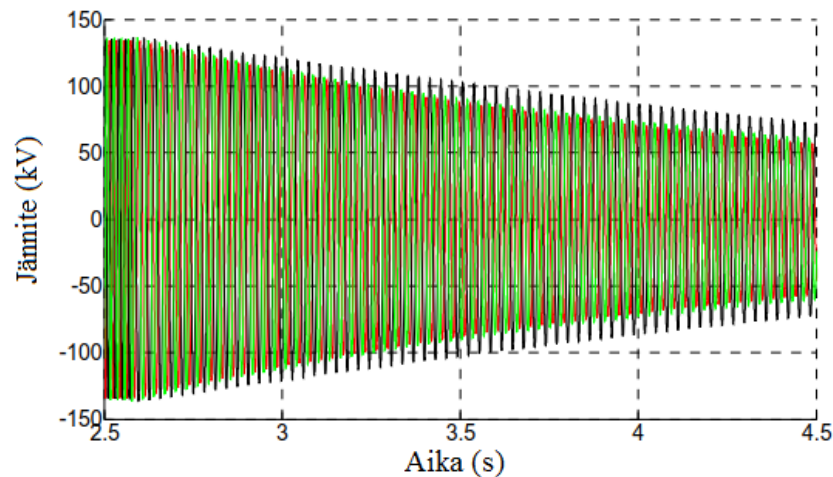
**Kuva 29: Yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitu 10 km pitkän tyhjäkäyvän AHXAMK-WP -kaapelin irtikytkentä.**

Kuvasta 29 nähdään, että yksinkertaistettu verkkomalli kuvaa kaapelin irtikytkentää oikein, koska jäännösvarauksen aiheuttama DC-jännite on irtikytkennän hetkellä lähes yhtä suuri kuin kaapelissa vaikuttava jännite eikä merkittäviä ylijännitteitä esiinny [3]. Jäännösvaraus myös vaimenee suhteellisen nopeasti kaapelin eristeiden läpi maahan. Jäännösvarauksen purkautumisnopeuden suhteen verifiointia ei kuitenkaan pystytty suorittamaan puutteellisen mittausdatan vuoksi. Lisäksi jäännösvarauksen purkautumisnopeuteen vaikuttavat mm. ilmankosteus ja kaapeliin liitettujen komponenttien purkautumisresistanssit, jotka vaikeuttavat mittausten verifiointia entisestään [48]. Voidaan kuitenkin

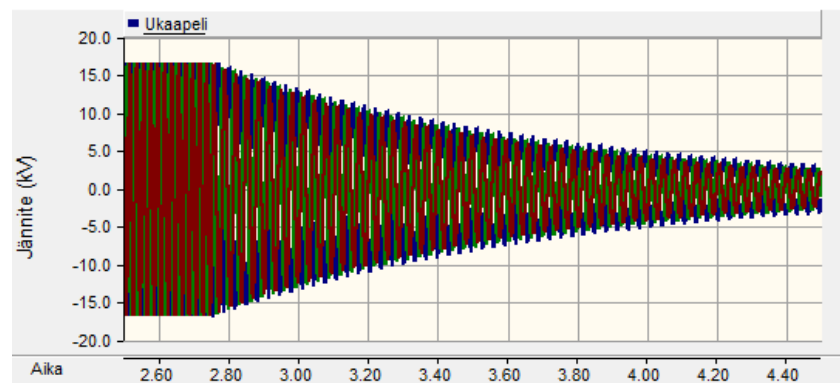


sanoa, että yleisesti simuloinneissa verkon riittävä vaimennus voi muodostua haasteelliseksi, jolloin simuloinneissa syntyvät kytkentäylijännitteet ovat suurempia kuin todellisuudessa [13]. Tämä taas tarkoittaa sitä, että simuloinnit kuvastavat hyvin verkossa esiintyviä pahimpia tilanteita.

Yksinkertaistettu verkkomalli pyrittiin verifioimaan myös rinnakkaisreaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennän osalta. Verifiointi on suoritettu viitteessä [3] tehtyjen 150 kV suurjänniteverkon mittauksien perusteella, jolloin ei kuitenkaan tiedetä varmaksi, että värähtelyn amplitudi vastaa todellista arvoa. Ilmiön luonteesta ja käyttäytymisestä puolestaan voidaan päätellä, että malli kuvaa irtikytkennän jälkeistä värähtelyä oikein. Kuvassa 30 on esitetty 150 kV suurjänniteverkossa mitatut ja yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitut rinnakkaisreaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennän jälkeiset vaihejännitteet, kun reaktorin kompensoima loisteho on 40 % kaapelin tuottamasta loistehosta. Molemmissa tapauksissa reaktori on kytketty johdon keskelle ja vaihejännitteitä on mitattu johdon alkupäästä. [3]



a) Suurjänniteverkossa tehty mittaus



b) Yksinkertaistetulla verkkomallilla tehty simulointi

**Kuva 30: Mitatut ja simuloitut reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennästä aiheutuvan värähtelyn vaihejännitteet, kun kompensointiaste on 40 % [3].**

Kuvasta 30 nähdään, että yksinkertaistettu verkkomalli kuvaa irtikytkennän aiheuttamaa värähtelyä riittävän tarkasti. Yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitu värähtely vaihtelee huomattavasti nopeammin kuin mittauksissa, joka johtuu todennäköisesti siitä, että suurjänniteverkossa kaapeliin on varastoituneena myös huomattavasti enemmän energiaa. Kaapelin kapasitanssiin varastoituneen energian kaavassa (4) jännite on nimitäin korotettuna toiseen potenssiin, jolloin suurjänniteverkoissa varastoituneet energiat ovat huomattavasti suurempia, vaikka käytetyt kaapelilaji ja kaapelipituus olisivat samat.

Kuten kappaleen alussa mainittiin, mallien verifiointi olisi ollut hyvä suorittaa jokaiselle kytkentätoimenpiteelle ja simuloitavalle verkolle erikseen, jota ei tässä työssä pystytty toteuttamaan puutteellisen mittausdatan vuoksi. Verifiointi on kuitenkin pyritty suorittamaan niiden kytkentöjen osalta, joista mittauksia ja tietoa löytyi riittävästi.

## 6. SIMULOINTIEN TULOKSET JA TARKASTELU

Tässä kappaleessa on esitetty keskeisimmät simulointitulokset ja pohdittu niiden merkityksiä. Simulointituloksissa syntyvien kytkentäylijännitteiden amplitudeja on verrattu komponenttien eristysrakenteiden jännitekestoisuuksiin. Jännitekestoisuuksina on käytetty tutkitun jännitetason standardin mukaisia kestokoejännitteitä, joita kyseisellä jännitetasolla käytettyjen laitteiden tulee vähintään kestää [2]. Taulukon 3 mukaan koejännitteiden arvot ovat keskijänniteverkoissa salamasyöksyjännitteelle 125 kV ja verkkotaajuiselle yhden minuutin kestäväälle vaihtojännitteelle 50 kV. Koejännitteistä tulee muistaa, että salamasyöksyjännitteen arvolla tarkoitetaan huippuarvoa, kun taas verkkotaajuisen vaihtojännitteen arvolla tehollisarvoa.

### 6.1 Simulointitulokset

Simuloitavia tilanteita on tutkittu työssä rakennetuilla Vilppulan sähköaseman mallilla sekä yksinkertaistetulla verkkomallilla, jolla on testattu eri parametrien vaikutusta syntyviin kytkentäilmiöihin. Tutkittavia kytkentätilanteita olivat 110 kV syöttökatkaisijan kytkennät, 20 kV johtolähtöjen rengaskytkennät, 20 kV johtolähtöjen kytkennät, tyhjäkäyviin kaapeleiden kytkennät, reaktorilla kompensoitujen kaapeleiden kytkennät sekä 1-vaiheisen maasulun aikaiset kytkennät. Näistä työhön esitettäväksi valittiin keskeisimmät ja simulointien mukaan suurimpia kytkentäylijännitteitä aiheuttavat kytkentätilanteet. Simuloinneissa irtikytkennät on suoritettu virran nollakohdassa tai 5 A current chopping level (CCL) arvolla. Irtikytkennöissä tyhjiökatkaisijan toimintaa kuvaavien vakioiden arvoina simuloinneissa on käytetty taulukossa 7 esitettyjä arvoja. Katkaisijan avausvälin jännitelujuutta kuvaavien vakioiden A ja B arvoiksi valittiin kyseiset arvot, koska niitä käytettäessä simuloinneissa tapahtui vielä jälleensyttymisiä. Jos vakion A arvoksi oltaisiin valittu taulukossa 4 esitetty seuraavaksi suurempi arvo eli 30 V/ $\mu$ s, ei simuloinneissa olisi tapahtunut enää lainkaan jälleensyttymisiä. Lisäksi voidaan sanoa, että jälleensyttyminen on sitä kriittisempi, mitä suuremmalla palaavan jännitteen arvolla se tapahtuu [25]. Vakioiden C ja D arvoina puolestaan käytettiin kyseisiä arvoja, koska niitä on käytetty myös viitteessä [17], jossa on tutkittu tyhjiökatkaisijan aiheuttamia kytkentäylijännitteitä. Jälleenkytkennöissä on käytetty yksinkertaistuksen ja suurempien kytkentäylijännitteiden vuoksi ideaalisen katkaisijan malleja kuten kohdassa 5.1.5 todettiin.

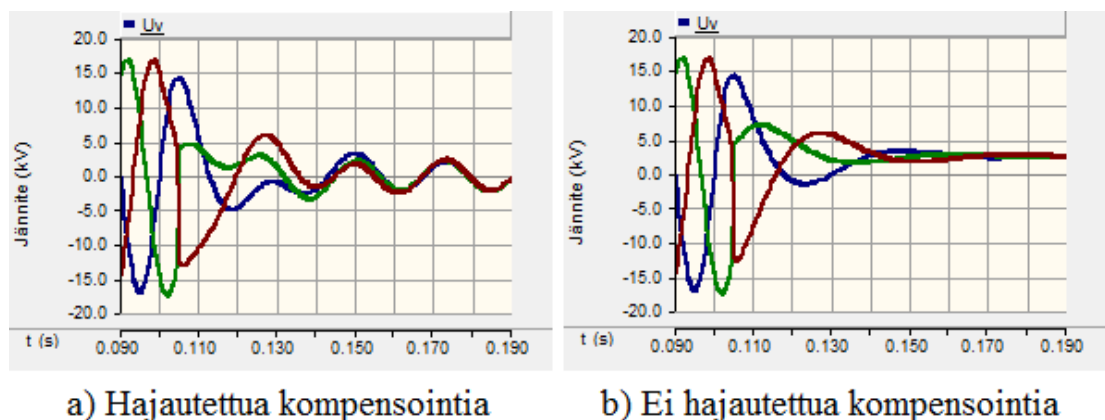
**Taulukko 7: Simuloinneissa käytettyjen tyhjiökatkaisijoiden toimintaa kuvaavien vakioiden A, B, C ja D arvot.**

A (V/ $\mu$ s)	B (kV)	C (A/s <sup>2</sup> )	D (A/ $\mu$ s)
20	0	0	100

Kaikissa simuloinneissa on yleisesti tutkittu, miten kaapeliverkon kapasitanssiin varastoitunut energia purkautuu eri kytkennöissä sekä jälleenkytkentöjen aiheuttamia kytkentäylijännitteitä. Kaikissa simuloinneissa on siis aina ensin simuloitu irtikytkentää, jonka jälkeen on tutkittu kaapeliverkkoon varastoituneen energian aiheuttamia ilmiöitä. Tämän jälkeen jälleenkytkentää on simuloitu irtikytkennän jälkeisen palaavan jännitteen huippu-arvolla, jolloin lähteiden mukaan syntyvät kytkentäylijännitteet ovat suurimmillaan [25].

### 6.1.1 Kuormitettu 20 kV johtolähtö

Ensimmäisenä simuloinneissa tutkittiin kuormitetun 20 kV johtolähdön kytkentöjä, jotka ovat keskijänniteverkoissa päivittäisiä kytkentätoimenpiteitä. Kuormitetun 20 kV johtolähdön kytkentöjä tutkittiin aluksi Vilppulan sähköaseman verkkomallilla kuormitetulla Kotiniemen lähdöllä. Lähdön kuormituksien arvoksi valittiin keskiarvo koko vuoden kuormituksista, jolloin kuormien yhteenlaskettu pätötehon kulutus oli 1 MW ja loistehon kulutus 0.52 MVA<sub>r</sub>. Simuloinneista havaittiin, että lähdön irtikytkennän jälkeen johtojen kapasitanssiin varastoitunut energia alkaa värähtelemään hajautettujen maasulkuvirran kompensointikelojen induktanssien kanssa. Kuvassa 31 on esitetty Kotiniemen lähdön irtikytkennän jälkeiset lähdön alkupäästä mitatut vaihejännitteet ilman hajautettua maasulkuvirran kompensointia ja kompensointikelojen kanssa.



**Kuva 31: Hajautetun maasulkuvirran kompensoinnin vaikutus irtikytkennän jälkeisiin vaihejännitteisiin.**

Kuvasta 31 nähdään, että ilman hajautettua maasulkuvirran kompensointia irtikytkentä aiheuttaa lyhyen värähtelyn, jonka jälkeen vaihejännitteet ovat vaimenevia DC-komponentteja. Hajautetun kompensoinnin kanssa lähdölle puolestaan syntyy irtikytkennän jälkeen matalataajuinen ja hitaasti vaimeneva värähtely. Värähtelytaajuus on matala, koska lähdön kapasitanssi on laajan kaapeloinnin vuoksi suuri [23]. Molemmissa tapauksissa vaihejännitteet tasaantuvat samaan potentiaaliin noin sekunnin kuluttua irtikytkennästä, joka johtuu siitä, että keskijänniteverkon jakelumuuntajien yläjännitepuolet ovat

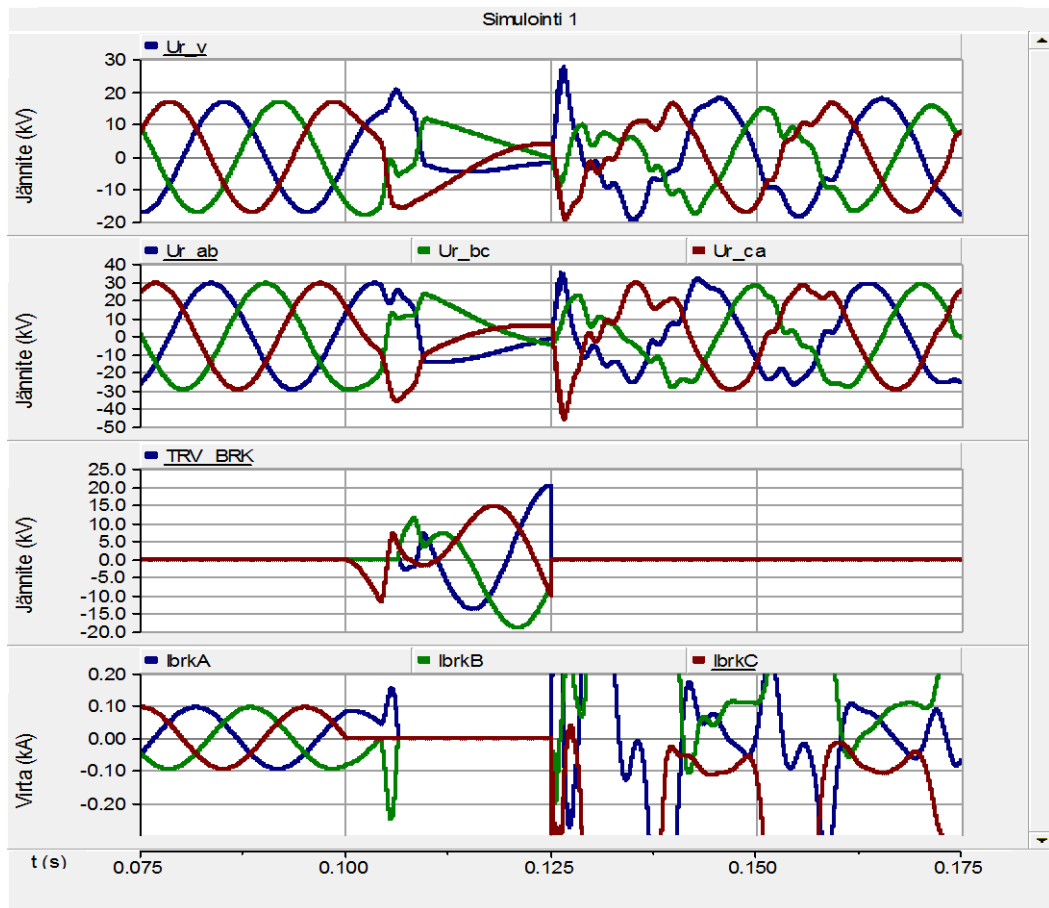
kolmiokytkentäisiä. Irtikytkennän jälkeen vaiheiden voidaan siis ajatella olevan oikosulussa muuntajien yläjännitepuolien kautta, jonka seurauksena vaiheiden jännitteet taantuvat samansuuruisiksi.

Laajoissa kaapeliverkoissa tarvitaan lähes aina hajautettua maasulkuvirran kompensointia, jonka vuoksi työssä tehdyissä simuloinneissa on tutkittu myös hajautetun kompensoinnin kompensointiasteen vaikutusta syntyvään värähtelyyn [35]. Vilppulan Kotiniemen lähdöllä on yhteensä 195 A hajautettua maasulkuvirran kompensointia, joka kompensoi 75 % lähdön tuottamasta maasulkuvirrasta. Vilppulan Kotiniemen lähdön irtikytkennän ja jälleenkytkennän aiheuttamien jännitteiden huippuarvot on esitetty taulukossa 8, kun mittaukset suoritettiin lähdön alku- ja loppupäistä. Taulukoissa jännitteen arvon tilalle on merkattu  $<U_{v,n}$  tai  $<U_n$ , jos kytkennästä aiheutuva jännite oli pienempi kuin ennen kytkentöjä vaikuttava vaihe- tai pääjännite. Kaikissa simuloinneissa sähköaseman kiskon jännite säädettiin arvoon 20,6 kV.

**Taulukko 8: Kuormitetulla Vilppulan Kotiniemen lähdöllä simuloitut irtikytkennän ja jälleenkytkennän aiheuttamat ylijännitteet.**

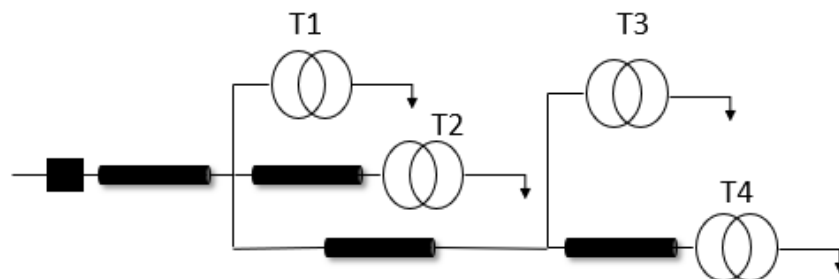
Simulointi nro.	VLP_KOTINIEMI lähtökatkaisijan avaus					Jälleenkytkentä	
	CCL (A)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	Taajuus (Hz)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
1	0	20,63	35,87	20,32	43,48	27,61	46,20
2	5	$< U_{v,n}$	$< U_n$	21,98	43,48	28,07	48,30

Taulukosta 8 nähdään, että lähdön irtikytkentä aiheuttaa pienen ylijännitteen simuloinnissa 1 eli tilanteessa, jossa virta katkeaa nollakohtassansa. Tällöin virta ei kuitenkaan saa nollakohtaansa verkkotaajuuden virran nollakohtassa kahdessa viimeisenä katkeavassa vaiheessa. Tämä johtuu siitä, että ensimmäisen vaiheen virran katkettua kahteen muuhun vaiheeseen syntyy värähtely, jonka seurauksena virta hetkellisesti kasvaa ja saa nollakohtansa vasta pienen viiveen kuluttua. Simuloinnissa 1 lähdön loppupäistä mitatut jännitteet, katkaisijan yli olevat jännite ja katkaisijan läpi menevä virta ovat esitetty kuvassa 32. Kuvasta 32 nähdään, että jälleenkytkennän aikaisten transienttivirtojen huiput ovat leikkaantuneet. Näin on tehty, jotta irtikytkentähetkellä vaihevirtojen katkeaminen sekä kahtena viimeisenä katkeavassa vaiheessa esiintyvä värähtely näkyisivät selvemmin. Lisäksi työssä tarkastelun kohteena olivat kytkentäylijännitteet eikä niinkään transienttivilivirrat.



**Kuva 32:** Simuloinnissa 1 mitatut jännitteet ja katkaisijan läpi menevä virta.

Kuormitetun 20 kV johtolähdön kytkentöjä tutkittiin seuraavaksi yksinkertaistetulla verkkomallilla, jolla testattiin hajautetun maasulkuvirran kompensointiasteen sekä kaapelipituuden vaikutusta irtikytkennästä syntyvään värähtelyyn ja jälleenkytkennöistä aiheutuviin kytkentäylijännitteisiin. Yksinkertaistetun verkkomallin varioitava 20 kV johtolähtö oli simuloinneissa kuvan 33 mukainen. Kuvasta nähdään, että lähtö koostui neljästä samanpituisesta AHXAMK-WP 3x150 kaapelista ja neljästä identtisestä muuntajasta. Muuntajien kooksi valittiin 300 kVA ja kuormitusten tehokertoimet säädettiin lähelle  $\cos \varphi = 0.97$ .



**Kuva 33:** Yksinkertaistetun verkkomallin varioitavan johtolähdön verkkokaavio.

Yksinkertaistetussa mallissa hajautettu maasulkuvirran kompensointikela liitettiin muuntajan T3 yhteyteen. Jännitemittaukset puolestaan suoritettiin lähdön alkupäästä sekä muuntajan T4 navoista. Taulukossa 9 on esitetty yksinkertaistetun verkkomallin varioitavan johtolähdön irtikytkennästä ja jälleenkytkennästä aiheutuvien jännitteiden huippuarvot, kun verkon kaapelipituutta ja hajautetun maasulkuvirran kompensointiastetta muutettiin. Kaikissa simuloinneissa oletettiin, että virta katkeaa nollakohdassansa.

**Taulukko 9: Yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitunut kuormitetun 20 kV johtolähdön kytkennät.**

Si- mu- lointi nro.	Varioitavan johtolähdön katkaisijan avaus						Jälleenkytkentä	
	Kaapeli- pituus (km)	Haj. $I_{Ef}$ komp. aste	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	Taa- juus (Hz)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
3	10	0,25	$< U_{v,n}$	$< U_n$	22,23	25	23,14	35,64
4	10	0,5	$< U_{v,n}$	$< U_n$	22,26	35,7	23,31	35,71
5	10	0,75	$< U_{v,n}$	$< U_n$	24,03	42,4	24,62	36,6
6	50	0,25	$< U_{v,n}$	$< U_n$	22,04	23,8	18,57	35,04
7	50	0,5	$< U_{v,n}$	$< U_n$	21,26	33,3	18,35	35,77
8	50	0,75	$< U_{v,n}$	$< U_n$	21,65	41,7	19,06	35,21
9	100	0,25	17,27	29,8	23,81	22,2	21,51	38,67
10	100	0,5	17,27	29,8	23,9	33	26,37	43,51
11	100	0,75	17,28	29,84	24,42	40	25,94	43,74
12	200	0,25	18,25	34,01	32,05	21,2	28,86	46,05
13	200	0,5	18,24	34	32,27	-	28,51	45,97
14	200	0,75	18,3	34,02	33,79	-	26,53	46,47

Yksinkertaistetulla verkkomallilla tehdyistä simuloinneista huomattiin, että kaapelipituudella ja kompensointiasteella on hieman vaikutusta syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuksiin. Simuloinneissa 10 km ja 50 km kaapeleiden irtikytkentä ei aiheuttanut lainkaan ylijännitteitä. Verkon kaapelipituuden kasvaessa kuitenkin yli 50 km irtikytkentä aiheuttaa johtolähdöllä pienen ylijännitteen ensimmäisen vaiheen virran katkeamisen jälkeen, joka johtuu verkon epätasapainosta ensimmäisen vaiheen irtoamisen jälkeen [49]. Epätasapainon vaikutus näkyy myös kiskon jännitteessä, joka alkaa hieman heilahdella irtikytkennän jälkeen. Kaapelipituuden kasvaessa myös irtikytkennästä syntyvä jännitteiden heilahtelu kasvaa, jonka vuoksi pidemmällä kaapeleilla katkaisijan yliolevan jännitteen huippuarvo kasvaa. Tämä puolestaan johtaa siihen, että myös jälleenkytkennästä aiheutuvat kytkentäylijännitteet ovat suurempia pidemmällä kaapeleilla. Simuloinneista huomattiin myös, että värähtely vaimenee nopeammin pidemmällä kaapelilla, vaikkakin kaapelin kapasitanssiin on varastoituneena enemmän energiaa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että pitkällä kaapelilla värähtelyn kulkuaallot joutuvat kulkemaan pidemmän matkan, jolloin myös vaimeneminen on voimakkaampaa. Kaapelipituuden kasvaessa

myös kaapelin vaipan pinta-ala kasvaa, jolloin värähtelypiirin energia purkautuu tehokkaammin. Hajautetun maasulkuvirran kompensointiaste puolestaan vaikutti enemmän irtikytkennästä syntyvän värähtelyn taajuuteen kuin jännitteiden amplitudiin. Kompensointiasteen kasvaessa värähtelyn taajuus kasvaa, joka voidaan päätellä myös LC-piirin värähtelytaajuuden kaavasta (24). Simuloinneissa 13 ja 14 ei saatu mitattua irtikytkennästä syntyvän värähtelyn taajuutta lainkaan, johtuen värähtelyn epämääräisestä aaltomuodosta.

Yleisesti simuloinneista voidaan sanoa, että kuormitetun 20 kV johtolähdön tapauksessa kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu kuormien ja kaapelin eristeiden kautta eikä aiheuta verkon komponentteihin merkittäviä ylijännitteitä. Syntyvät ylijännitteet jäävät kauas komponenttien jännitekestoisuuksista eikä katkaisijan avausvälissä tapahtunut lainkaan jälleensyttymisiä, koska ylijännitteiden amplitudit ja taajuudet olivat sen verran alhaisia.

### 6.1.2 Tyhjäkäyvä 20 kV johtolähtö

Seuraavaksi simuloinneissa tutkittiin tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön kytkentöjä. Simuloinneissa tyhjäkäyvän johtolähdön irtikytkentä aiheutti johtolähdölle ferresonanssin, jossa kaapeliverkkoon varastoitunut energia alkaa värähdellä muuntajien epälineaaristen induktanssien kanssa kuten kappaleessa 4.3 todettiin. Tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön irtikytkennästä aiheutuvaa ferresonanssia on tutkittu aluksi Vilppulan sähköaseman verkkomallilla Kotiniemen lähdöllä. Lähtö oli muuten täysin samanlainen kuin kuormitetun johtolähdön tapauksessa, mutta ilman kuormituksia. Taulukossa 10 on esitetty tyhjäkäyvän Kotiniemen lähdön irtikytkennän aiheuttamien jännitteiden huippuarvot sekä jälleensytkentöjen aiheuttamien kytkentäylijännitteiden huippuarvot, kun mittaukset on suoritettu lähdön alku- ja loppupäistä.

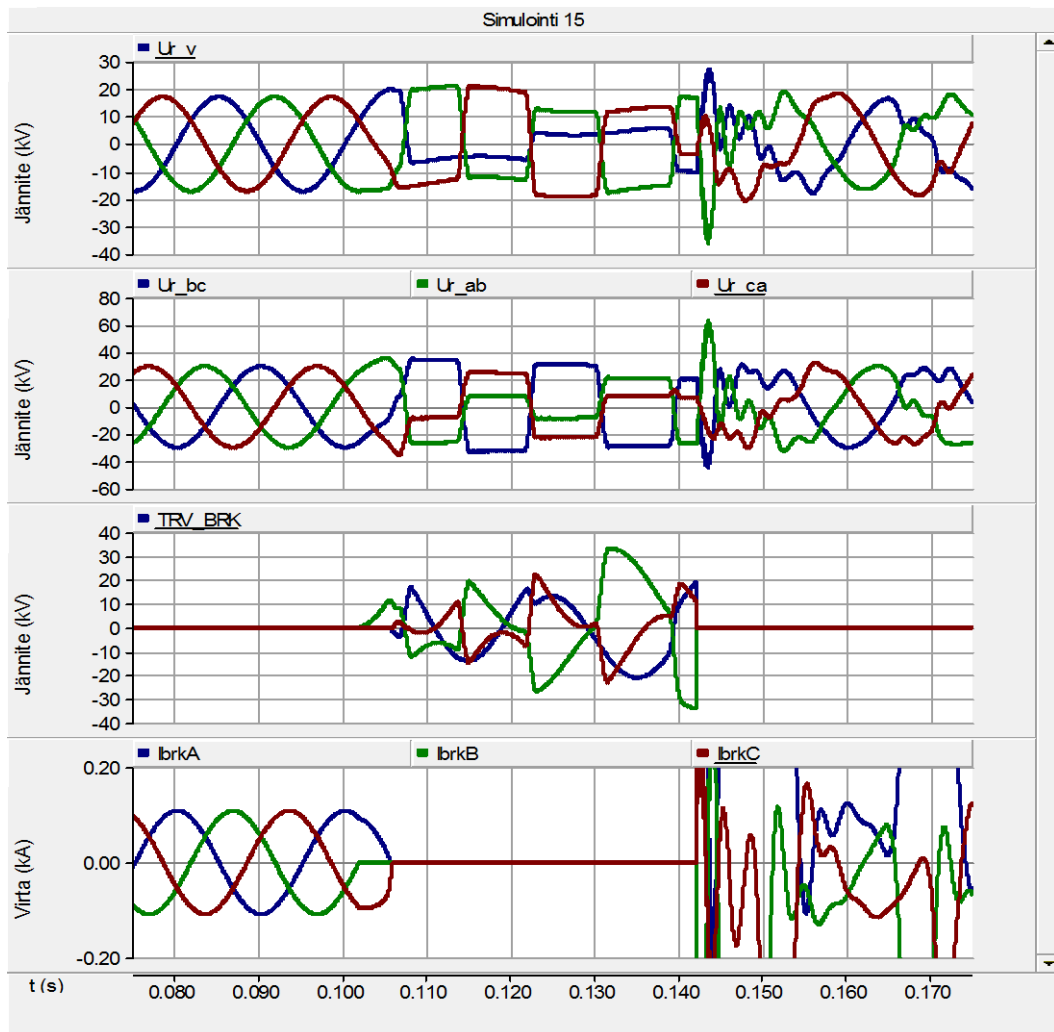
**Taulukko 10: Tyhjäkäyvällä Vilppulan Kotiniemen lähdöllä simuloitujen irtikytkennän ja jälleensytkennän aiheuttamat ylijännitteet.**

Simulointi nro.	VLP_KOTINIEMI lähtökatkaisijan avaus					Jälleensytkentä	
	CCL (A)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	Taajuus (Hz)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
15	0	21,15	35,79	33,70	45,5	35,78	63,14
16	5	21,15	35,77	33,32	45,5	35,17	57,64

Taulukosta 10 nähdään, että tyhjäkäyvän Kotiniemen lähdön irtikytkennästä syntyvä ferresonanssi aiheuttaa lähdölle pienen ylijännitteen. Kytkennöissä suurin ylijännite esiintyi jälleensytkennän yhteydessä simuloinnissa 15, jota on havainnollistettu kuvassa 34. Simuloinnissa 15 syntyvän ylijännitteen pääjännitteen huippuarvo oli taulukon 10 mu-



kaan 63,14 kV. Kotiniemen lähdöllä tehdyistä simuloinneista havaittiin, että syntyvät ylijännitteet ovat suurimmillaan CCL:n arvolla 0, jolloin myös kaapelin kapasitanssiin on varastoituneena enemmän energiaa virran katkaisuhetkellä.



**Kuva 34: Simuloinnissa 15 mitatut jännitteet ja virrat.**

Tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön irtikytkentää simuloitiin seuraavaksi yksinkertaistetulla verkkomallilla, jolloin tarkasteltava johtolähtö oli kuvan 33 mukainen, mutta ilman kuormituksia. Yksinkertaistetulla verkkomallilla suoritettujen simuloimien tehtiin CCL:n arvolla 0, koska tällöin syntyvät ylijännitteet ovat suurimmillaan Vilppulan verkkomallilla tehtyjen simuloimien mukaan. Yksinkertaistetulla verkkomallilla tehdyissä simuloinneissa varioitiin lähdön kaapelipituutta ja muuntajien kokoa sekä tutkittiin niiden vaikutusta syntyviin ylijännitteisiin. Simuloinneissa hajautetun maasulkuvirran kompensointiaste oli 0,75, joka aiheutti kuormitetun johtolähdön tapauksessa suurimmat ylijännitteet. Yksinkertaistetulla verkkomallilla tehtyjen simuloimien tulokset on esitetty taulukossa 11.

**Taulukko 11: Yksinkertaistetulla verkkomallin simuloitua tyhjäkävyn 20 kV johtolähdön kytkennät.**

Simulointi nro.	Varioitavan johtolähdön katkaisijan avaus					Jälleenkytkentä	
	Kaapelipituus (km)	Muuntajien koko (kVA)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
17	10	100	26,39	34,49	33,18	24,84	54,24
18	10	300	25,94	34,41	32,18	29,31	45,05
19	50	100	25,73	34,28	35,23	25,43	46,31
20	50	300	24,65	36,3	34,56	27,33	44,41
21	100	100	24,61	38,15	37,85	30,32	54,44
22	100	300	24,56	35,78	36,85	29,61	56,9
23	200	100	22,72	39,99	34,84	30,83	49,64
24	200	300	24,34	38,29	39,66	31,16	56,35

Taulukosta 11 nähdään, että kaapelipituudella on hieman vaikutusta irtikytkennästä syntyvän ferresonanssin jännitteen huippuarvoon, mutta vaikutus ei kuitenkaan ole merkittävä. Kaapelipituuden kasvaessa irtikytkennän aiheuttaman vaihejännitteen huippuarvo pienenee ja pääjännitteen huippuarvo kasvaa. Kaapelipituuden vaikutus jälleenkytkentöjen aiheuttamiin ylijännitteisiin ei ole kuitenkaan yhtä yksiselitteinen johtuen kulkuaaltojen heijastumisista ja vaimenemisesta. Myöskin kuormittamattoman muuntajan koon vaikutus syntyviin kytkentäylijännitteisiin oli todella vähäinen. Yksinkertaistetulla verkkomallilla tehdyissä simuloinneissa pahin tilanne syntyi simuloinnissa 22, jossa suurin verkossa vaikuttava jännite oli 56,9 kV.

Tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön simuloinneista voidaan sanoa, että kaapeliverkkoon varastoitunut energia ei aiheuta verkkoon merkittäviä kytkentäylijännitteitä, kun tyhjäkävällä lähdöllä suoritetaan kytkentätoimenpiteitä. Kaapeliverkon kapasitanssiin varastoitunut energia aiheuttaa muuntajien epälineaaristen induktanssien kanssa ferresonanssin, joka ei ole simulointien mukaan vaaraksi komponenttien eristysrakenteille. Tyhjäkävyn lähdön kytkennöissä syntyvien kytkentäylijännitteiden amplitudit jäivät kauas komponenttien jännitekestoisuuksista eikä katkaisijan avausvälissä tapahtunut katkaisijan avauksen jälkeen lainkaan jälleensyttymisiä. Jälleenkytkennöistä aiheutuvat kytkentäylijännitteet olivat suurempia Vilppulan verkkomallilla, koska lähdöllä tapahtuu eri kaapelilajien ja avojohtojen vuoksi huomattavasti enemmän kulkuaaltojen heijastumisia kuin yksinkertaistetulla verkkomallilla tehdyissä simuloinneissa.

### 6.1.3 Tyhjäkäyvä kaapeli

Seuraavaksi simuloinneissa tutkittiin tyhjäkäyvien kaapeleiden kytkentöjä. Tyhjäkäyvän kaapelin irtikytkennässä kaapelin kapasitanssiin varastoitunut energia aikaansaa hitaasti vaimenevan DC-jännitteen kaapeli napoihin. Tyhjäkäyvän kaapelin kytkentöjä on tutkittu ainoastaan yksinkertaistetulla verkkomallilla, koska simuloinneissa on testattu pelkästään kaapelipituuden ja kaapelin poikkipinta-alan vaikutusta syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuksiin. Simuloinneissa virran CCL:n arvona on käytetty 0 A, koska tällöin kaapelin kapasitanssiin varastoitunut energia on suurimmillaan, johtuen virran ja jännitteen 90° -vaihe-erosta. Tyhjäkäyvän kaapelin kytkentöjen simuloinneissa yksinkertaistetun verkkomallin varioitava johtolähtö koostui yksinkertaisesti ainoastaan katkaisijasta ja kaapelista. Simuloinneissa kaikki kaapelit olivat AHXAMK-WP kaapeleita. Taulukossa 12 on esitetty tyhjäkäyvien kaapeleiden kytkentöjen aikaiset kytkentäylijännitteiden huippuarvot, kun simuloinnit on tehty yksinkertaistetulla verkkomallilla ja mittaukset suoritettu kaapelin avoimesta päästä.

**Taulukko 12: Tyhjäkäyvien kaapeleiden kytkentöjen aikaiset kytkentäylijännitteiden huippuarvot.**

Simulointi nro.	Tyhjäkäyvän kaapelin erotus katkaisijalla					Jälleenkytkentä	
	Kaapeli-pituus (km)	Kaapelin poikkipinta-ala (mm <sup>2</sup> )	U <sub>v,max</sub> (kV)	U <sub>max</sub> (kV)	TRV <sub>max</sub> (kV)	U <sub>v,max</sub> (kV)	U <sub>max</sub> (kV)
25	1	150	< U <sub>v,n</sub>	32,49	30,76	31,24	49,50
26	1	240	< U <sub>v,n</sub>	33,28	32,61	30,07	47
27	10	150	16,94	33,57	34,05	28,99	44,12
28	10	240	17,04	33,66	34,21	26,08	38,4
29	50	150	18,04	34,51	36,07	29,66	44,70
30	50	240	18,72	35,49	37,13	32,97	49,90
31	100	150	19,69	35,91	37,66	39,27	57,18
32	100	240	20,67	37,36	38,89	41,39	59,09

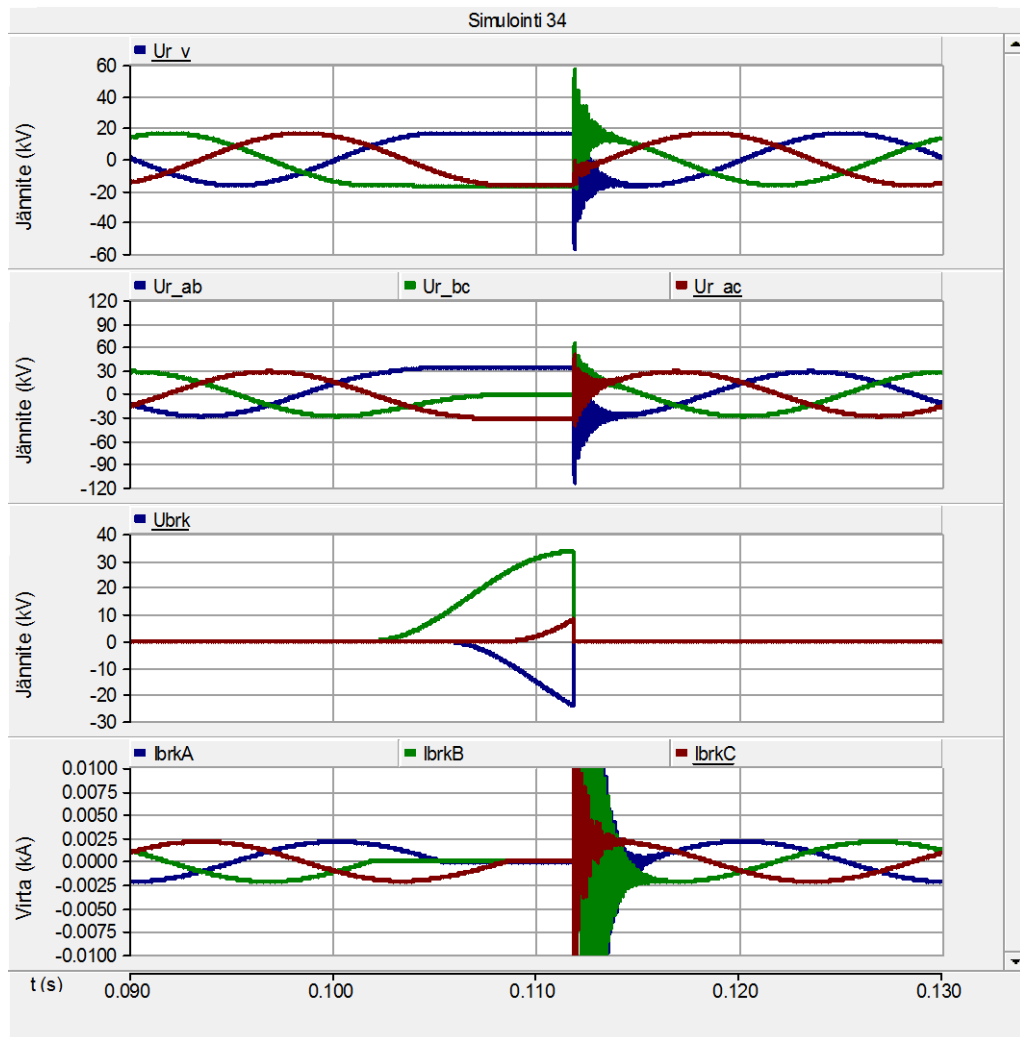
Taulukosta 12 nähdään, että tyhjäkäyvän kaapelin irtikytkennän aikaiset ylijännitteet kasvavat, kun kaapelin pituutta ja poikkipinta-alaa kasvatetaan. Tämä johtuu siitä, että kaapelin on varastoituneena enemmän energiaa, kun joudutaan erottamaan pidempiä ja paksumpia kaapeleita. Tyhjäkäyvien kaapeleiden jälleenkytkennöistä aiheutuvat kytkentäylijännitteet eivät ole kuitenkaan yhtä yksiselitteisiä. Simulointien mukaan alle 1 km ja 10 km pitkillä kaapeleilla jälleenkytkennän aiheuttamat kytkentäylijännitteet ovat suurempia ohuemman poikkipinta-alan omaavilla kaapeleilla, kun taas 50 km ja 100 km pitkillä kaapeleilla kytkentäylijännitteet ovat suurempia paksumman poikkipinta-alan omaavilla kaapeleilla. Erot johtuvat todennäköisesti kulkuaaltojen heijastumisista ja summautumisista.

Seuraavaksi simuloinneissa tutkittiin kytkentäyliännitteiden suuruuksia tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohton yhdistelmällä. Lähteiden mukaan suurimmat yliännitteet syntyvät, kun kaapeli on yhdistelmässä ensimmäisenä eli heti katkaisijan jälkeen ja ilmajohto kaapelin jälkeen eli johdon avoimessa päässä [25]. Simuloinneissa käytettiin yksinkertaistuksen vuoksi kaikkina kaapeleina AHXAMK-WP 3x240 kaapeleita ja ilmajohtoina Raven 54/9 Al/Fe -avojohtoja. Tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohton yhdistelmän simuloitien aikaiset kytkentäyliännitteiden huippuarvot on esitetty taulukossa 13.

**Taulukko 13: Tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohton yhdistelmän kytkennöistä aiheutuvien kytkentäyliännitteiden huippuarvot.**

Simulointi nro.	Tyhjäkäyvän kaapeli-ilmajohto -linjan erotus katkaisijalla					Jälleenkytkentä	
	Kaapelipituus (km)	Avojohton pituus (km)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
33	1	1	$< U_{v,n}$	33,33	32,61	65,65	107,08
34	1	10	17,31	33,68	33,4	62,65	114,96
35	1	50	18,83	34,51	35,07	52,96	99,4
36	1	100	19,67	35,02	35,85	46,23	85,55
37	10	1	17,04	33,66	34,21	38,39	59,15
38	10	10	17,05	33,71	34,18	58,56	92,6
39	10	50	17,1	33,94	34,1	60,68	94,6
40	10	100	17,49	34,28	34,04	62,52	89,84
41	50	1	18,72	35,49	37,13	32,92	50,02
42	50	10	18,73	35,51	37,14	33,49	50,64
43	50	50	18,79	35,63	37,18	47,31	68,53
44	50	100	18,87	35,77	37,22	60,58	88,18
45	100	1	20,67	37,36	38,89	41,39	59,1
46	100	10	20,68	37,38	38,9	41,43	59,38
47	100	50	20,75	37,49	38,95	48,2	69,1
48	100	100	20,87	37,64	39,01	51,86	75,73

Taulukosta 13 nähdään, että tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohton yhdistelmällä pahimmat kytkentäyliännitteet syntyvät, kun ilmajohton pituus on pidempi kaapelin pituuteen verrattuna. Pahin tilanne syntyy simuloinnissa 34, jossa kaapelin pituus on 1 km ja avojohton pituus 10 km. Simuloinnissa 34 syntyvän yliännitteen suuruus oli 114,96 kV, jonka syntyminen on esitetty kuvassa 35. Simuloinneissa syntyvät kytkentäyliännitteet pienenevät avojohton ja kaapelin pituuden kasvaessa, joka johtuu siitä, että pidemmällä johdolla kulkuaaltojen vaimeneminen on voimakkaampaa.



**Kuva 35: Simuloinnin 34 aikaiset jännitteet ja katkaisijan läpi menevä virta.**

Tyhjäkäyvien johtojen simuloinneista voidaan sanoa, että jälleenkytkentä palaavan jännitteen huippuarvolla voi aiheuttaa suuriakin ylijännitteitä, jos johto on kaapelin ja avojohdon yhdistelmä. Suurin simuloinneissa syntyvä ylijännite oli suuruudeltaan 114,96 kV, joka on jo suhteellisen lähellä salamasyöksyjännitteiden jännitekestoisuutta. Tyhjäkäyvien johtojen irtikytkennöissä ei simuloinneissa tapahtunut lainkaan katkaisijan avausvälin jälleensyttymisiä. Palaavan jännitteen huippuarvolla tapahtuva jälleenkytkentä on kuitenkin hyvin samankaltainen tapahtuma kuin palaava jännitteen huippuarvolla tapahtuva jälleensyntyminen [3].

#### 6.1.4 Reaktorilla kompensoitu kaapeli

Laajamittainen kaapelointi vaatii myös kapasitiivisen loistehon kompensointia, joka toteutetaan tyypillisesti rinnakkaisreaktoreilla. Simuloinneissa tutkittiin seuraavaksi, kuinka reaktorin ja kaapelin irtikytkennästä aiheutunut värähtely riippuu kaapeliverkkoon varastoituneesta energiasta ja voiko värähtely aiheuttaa kriittisiä ylijännitteitä. Simuloin-

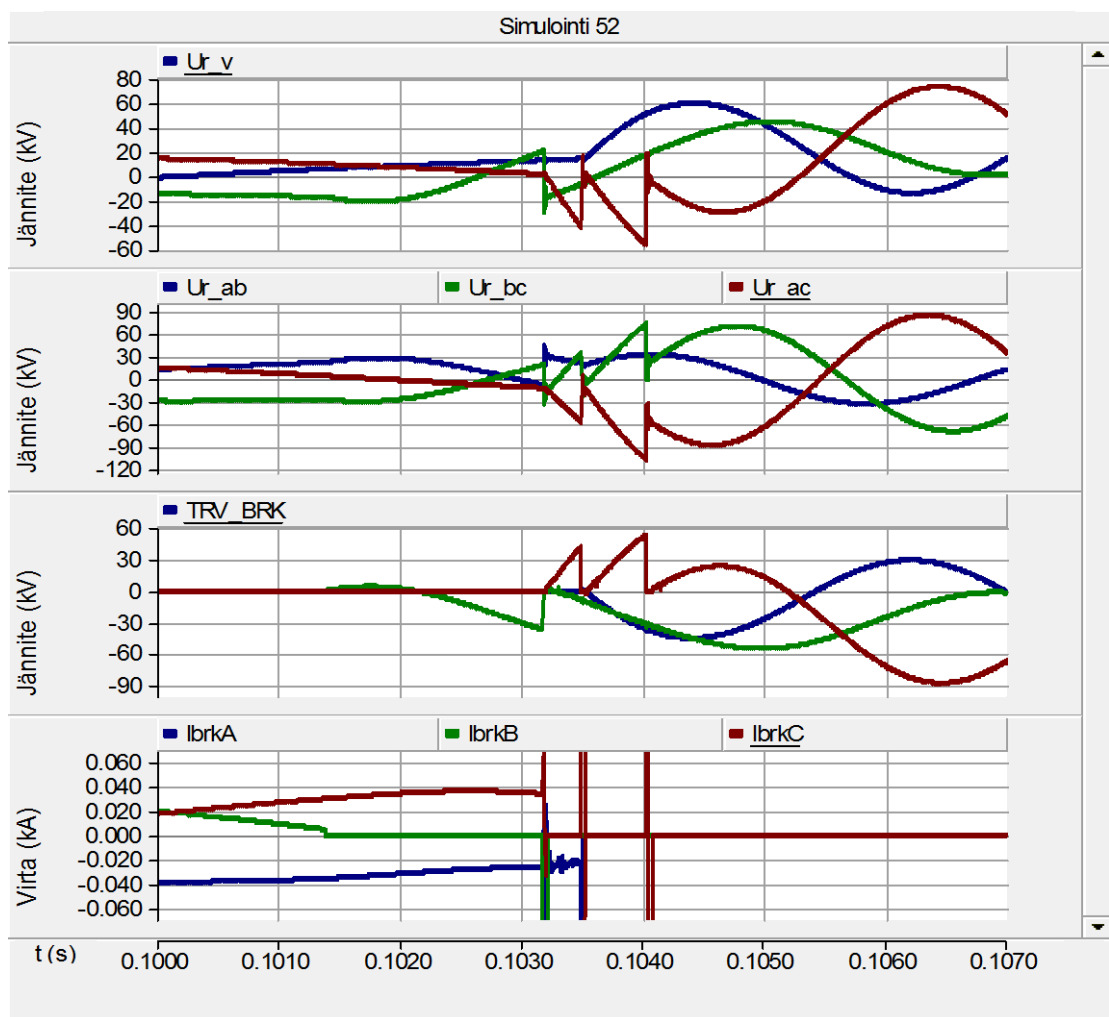
nit toteutettiin pelkästään yksinkertaistetulla verkkomallilla ja varioitavia parametrejä olivat kaapelipituus, reaktorin koko sekä virran katkaisuhetki. Yksinkertaistetulla verkkomallilla varioitu johtolähtö koostui pelkästään katkaisijasta, kaapelista ja rinnakkaisreaktorista. Rinnakkaisreaktori oli tähtipisteestä maadoittamaton ja se sijoitettiin simuloineissa kaapelin loppupäähän. Kaikki kaapelit olivat yksinkertaistuksen vuoksi AHXAMK-WP 3x150 -kaapeleita. Mittaukset suoritettiin reaktorin navoista sekä kaapelin alkupäästä. Taulukossa 14 on esitetty kaapelin ja reaktorin kytkennöistä aiheutuneet suurimmat kytkentäylijännitteet.

**Taulukko 14: Kaapelin ja reaktorin kytkennöistä aiheutuneet kytkentäylijännitteet.**

Si- mu- lointi nro.	Reaktorilla kompensoidun kaapelin erotus katkaisijalla						Jälleenkytkentä	
	Kaapeli- pituus (km)	Reakto- rin koko (MVA)	CCL (A)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	TRV <sub>max</sub> (kV)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
49	1	0.5	0	30,97	38,11	39,25	32,69	56,12
50	1	0.5	5	38,85	51,49	47,71	36,81	62,11
51	1	1	0	53,08	77,31	67,5	45	71,15
52	1	1	5	73,62	107,5	74	48,5	73,62
53	10	0.5	0	20,91	33,35	37,34	27,1	41,42
54	10	0.5	5	21,99	34,18	38,3	27,43	41,63
55	10	1	0	28,14	38,87	39,45	25,9	43,01
56	10	1	5	29,18	39,99	40,3	26,04	43,53
57	50	0.5	0	23,95	33,26	40,43	25,34	43,88
58	50	0.5	5	23,83	33,11	40,31	25,23	43,89
59	50	1	0	19,84	30,53	34,27	25,42	41,48
60	50	1	5	19,64	30,27	34,08	25,38	41,41
61	100	0.5	0	25,23	34,5	35,53	27,15	52,13
62	100	0.5	5	25,21	34,49	36,05	31,01	54,7
63	100	1	0	22,46	32,18	37,25	32,17	53,35
64	100	1	5	22,42	32,16	37,21	32,16	53,34

Taulukosta 14 nähdään, että kaapelin ja reaktorin kytkennöistä syntyvät ylijännitteet eivät riipu täysin lineaarisesti kaapelin pituudesta tai reaktorin koosta. Suurimmat ylijännitteet syntyvät 1 km kaapeleilla, mutta esimerkiksi 100 km kaapeleilla jälleenkytkennöistä syntyvät ylijännitteet ovat suurempia kuin 50 km kaapelilla. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että pidemmällä kaapelilla irtikytkennästä aiheutuva verkon epätasapaino on suurempi, joka johtaa myös suurempiin ylijänniteisiin irtikytkentähetkellä. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että irtikytkennästä aiheutuva värähtely on kriittisempää lyhyillä kaapeleilla, koska värähtelytaajuudet ovat suurempia, joka yleensä johtaa myös suurempiin ylijännitteisiin. Lisäksi kulkuaaltojen vaimeneminen on vähäisempää lyhyillä kaapeleilla.

Myöskään reaktorin koon vaikutus ei ollut yksiselitteinen, sillä 1 ja 10 km kaapeleilla suurempi reaktori aiheutti suuremmat ylijännitteet, kun taas pidemmillä kaapeleilla tilanne oli päinvastainen. Tämä puolestaan todennäköisesti johtuu siitä, että lyhyillä kaapeleilla reaktorin magneettikenttään varastoituneella energialla on suurempi vaikutus irtikytkennän jälkeiseen värähtelyyn, kun taas pitkillä kaapeleilla kaapelin sähkökenttään varastoituneen energian vaikutus korostuu enemmän magneettikenttään varastoituneeseen energiaan nähden. Tämä havaitaan myös virran CCL:n arvosta, jolla näyttää olevan samankaltainen vaikutus kuin reaktorin koolla. Simuloinneissa suurin kytkentäylijännite oli 107,2 kV, joka syntyi simuloinnissa 52 1 km kaapelin ja 1 MVA reaktorin irtikytkennän jälkeen. Simuloinnissa 52 tapahtui myös irtikytkennän jälkeen katkaisijan avausvälin jälleensyöttymisiä, joita on havainnollistettu kuvassa 36.



**Kuva 36: Irtikytkennän aikaiset jännitteet ja katkaisijan läpi menevä virta simuloinnissa 52.**

Kuvasta 36 nähdään, kuinka ensimmäisenä katkeavan vaiheen B jälkeen kaapelissa syntyy verkkotaajuista jännitettä huomattavasti korkeataajuisempi värähtely, jonka seurauksena katkaisijan avausvälissä tapahtuu jälleensyöttyminen noin ajanhetkellä  $t \approx 0.1032$ .

Jälleensyntyminen tapahtuu, koska katkaisijan yli oleva jännite ylittää katkaisijan avausvälin kasvavan jännitelujuuden. Vaiheessa B tapahtuva jälleensyntyminen aiheuttaa myös sen, että kahden muun vaiheen virta katkeaa huomattavasti suuremmalla arvolla kuin simuloinnissa määritelty CCL eli 5 A. Tästä ilmiöstä käytetään yleisemmin nimeä virtual current chopping, joka aiheutuu, kun B vaiheen jälleensyntymisestä aiheutuva korkeataajuinen transienttivirta katkeaa ja katkaisusta syntyvä transientti siirtyy kapasitiivisesti kahteen muuhun vaiheeseen. Virtual current chopping aiheuttaa sen, että virta katkeaa entistä suuremmalla arvolla, jonka seurauksena myös reaktorin induktanssiin jää varastoituneeksi isompi määrä energiaa, joka selittää myös suuremmat ylijännitteet. Jälleensyntymisiä tapahtuu B-vaiheen lisäksi myös C-vaiheessa. Simuloinneissa jälleensyntymisiä tapahtui ainoastaan 1 km pituisilla kaapeleilla, koska pidemmillä kaapeleilla värähtelyn taajuudet ovat matalampia suuremman kapasitanssin vuoksi sekä kulkuaaltojen vaimeneminen on voimakkaampaa, jonka seurauksena katkaisijan avausvälin jännitelujuus kasvaa suuremmalla kulmakertoimella kuin katkaisijan palaava jännite. [13]

Yleisesti kaapelin ja tähtipisteestään maadoittamattoman reaktorin simuloinneista voidaan sanoa, että kaapeliverkkoon varastoituneella energialla ei ole itsessään kovin suurta vaikutusta kytkennöistä aiheutuviin ylijännitteisiin. Suurempi vaikutus ylijännitteisiin on kuitenkin reaktorin magneettikenttään varastoituneella energialla, jonka vuoksi suurimmat ylijännitteet simuloinneissa syntyivätkin lyhyimmällä kaapelilla, suuremmalla reaktorilla ja CCL:n arvolla 5 A. Erittäin lyhyillä kaapeleilla reaktorin ja kaapelin irtikytkentä saattaa aiheuttaa erittäin suuriakin ylijännitteitä, joita on tutkittu tarkemmin esimerkiksi viitteessä [46]. Tämän vuoksi reaktorit tulee aina varustaa ylijännitesuojilla, varsinkin jos niiden erottamiseen käytetään lyhyitä kaapeleita. [13]

### 6.1.5 1-vaiheinen maasulku

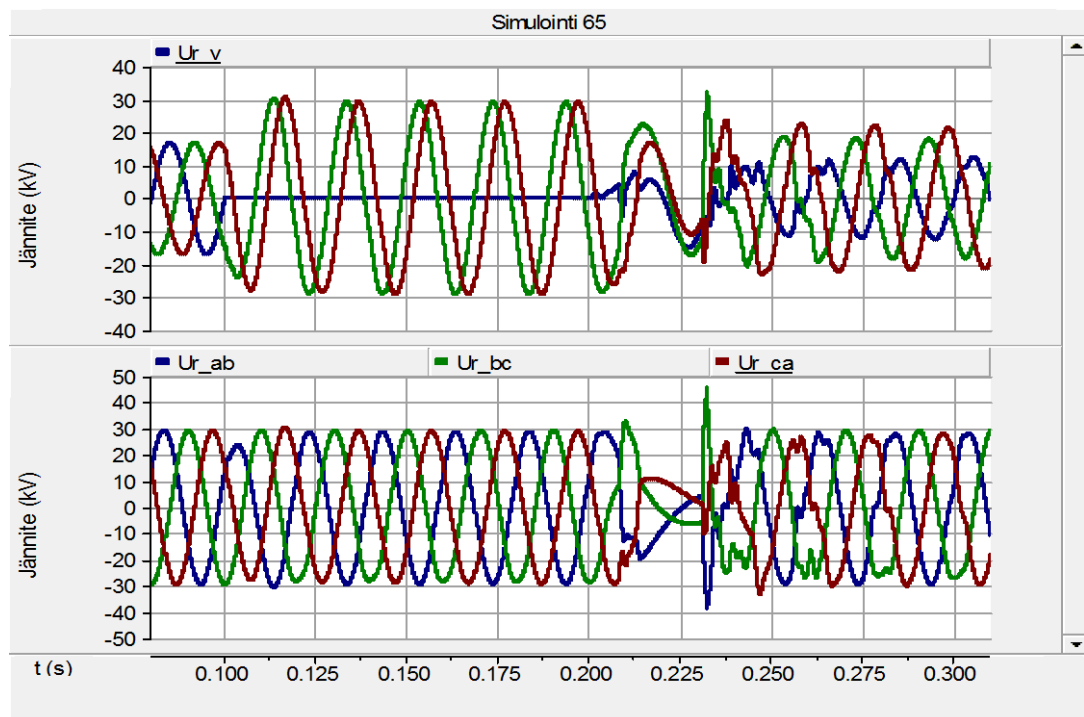
Seuraavaksi simuloinneissa tutkittiin 1-vaiheisen maasulun vaikutusta syntyviin kytkentäylijännitteisiin. Maasulkuja simuloitiin siten, että verkkoon lisättiin 1-vaiheinen maasulku, joka poistui samalla hetkellä, kun tutkinnan kohteena oleva verkon osa erotettiin verkosta. 1-vaiheisen maasulun aikana terveiden vaiheiden perustaajuinen jännite nousee, jonka seurauksena terveiden vaiheiden sähkökenttään varastoitunut energia kasvaa normaaliin tilaan verrattuna, koska sähkökenttään varastoituneen energian kaavassa (4) jännite on korotettuna toiseen potenssiin. Maasulku poistettiin irtikytkentähetkellä, koska muuten kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuisi maasulkupaikan kautta maahan. Vastuksettoman 1-vaiheisen maasulun vaikutusta syntyviin kytkentäylijännitteisiin tutkittiin aluksi Vilppulan sähköaseman verkkomallilla kuormitetulla Kotiniemen lähdöllä, jolla tehdyissä simuloinneissa syntyneet kytkentäylijännitteet on esitetty taulukossa 15. Vilppulan verkkomallissa maasulku sijoitettiin lähdön loppuun ja maasulkukerroin oli simulointien mukaan noin  $k \approx 1.7$ , jolloin maasulun aikana terveiden vaiheiden jännitteiden huippuarvo oli 28.8 kV. Mittaukset suoritettiin lähdön alku- ja loppupäistä. [13]



**Taulukko 15: Vilppulan verkkomallilla simuloidut maasulun jälkeiset kytkentäylijännitteet.**

Simulointi nro.	VLP_KOTINIEMI lähtökatkaisijan avaus				Jälleenkytkentä	
	CCL (A)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
65	0	22,55	33,05	40,16	30,93	44,17
66	5	22,55	33,04	40,16	30,92	44,22

Taulukosta 15 nähdään, että verkon maasulun aikaiset kytkennät aiheuttavat lähes samansuuruisia kytkentäylijännitteitä kuin taulukossa 8 esitetyt arvot, jossa on esitetty kuormitetun Kotiniemen lähdön kytkentäylijännitteet ilman maasulkuja. Katkaisijan palaavan jännitteen huippuarvo puolestaan on suurempi maasulun jälkeen johtuen terveiden vaiheiden jännitteenoususta maasulun aikana. Simuloinneista huomattiin lisäksi, että virran CCL:n arvolla ei ollut juuri lainkaan vaikutusta maasulun aikaisiin kytkentäylijännitteisiin. Kuvassa 37 on esitetty simuloinnin 65 aikaiset jännitteet ja katkaisijan läpi menevä virta. Kuvassa 37 maasulku lisätään verkkoon ajanhetkellä  $t = 0.1$  s ja poistetaan ajanhetkellä  $t = 0.2$  s, jolloin avataan myös johtolähdön katkaisija. Simuloinnista 65 nähdään, että maasulun aiheuttama jännitteenousu vaimenee suhteellisen nopeasti katkaisijan aukeamisen jälkeen, eikä irtikytkentä aiheuta verkkoon merkittäviä ylijännitteitä. Tämä näkyy myös taulukon 15 arvoissa, koska irtikytkennän aikaiset ylijännitteet ovat huomattavasti pienempiä kuin maasulun aikana vaikuttavat terveiden vaiheiden jännitteet.



**Kuva 37: Simuloinnin 65 aikaiset jännitteet ja katkaisijan läpi menevä virta.**

Kaapelipituuden vaikutusta 1-vaiheisen maasulun aikaisiin kytkentäylijännitteisiin tutkittiin seuraavaksi yksinkertaistetulla verkkomallilla, kun varioitava johtolähtö oli kuormitettu ja kuvan 33 mukainen. Simuloinneissa maasulku oli muuntajan T3 kiskossa. Simuloinnit suoritettiin ainoastaan CCL:n arvolla 0, koska Vilppulan verkkomallilla tehdyistä simuloinneista todettiin, että CCL:n arvolla ei ole juuri lainkaan vaikutusta syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuksiin. Yksinkertaistetussa verkkomallissa kaikki kaapelit olivat AHXAMK-WP 3x150 kaapeleita ja lähdön maasulkuvirran hajautettu kompensointia-aste oli 0,75. Taulukossa 16 on esitetty yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitua 1-vaiheisen maasulun aikaiset kytkentäylijännitteet. Yksinkertaistetun verkkomallin maasulkukerroin oli noin  $k \approx 1.7$ , jolloin maasulun aikainen terveiden vaiheiden jännitteiden huippuarvo oli 28,95 kV.

**Taulukko 16: Yksinkertaistetulla verkkomallilla simuloitua 1-vaiheisen maasulun jälkeiset kytkentäylijännitteet.**

Simulointinro.	Varioitavan johtolähdön katkaisijan avaus				Jälleenkytkentä	
	Kaapelipituus (km)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)	$TRV_{max}$ (kV)	$U_{v,max}$ (kV)	$U_{max}$ (kV)
67	10	20,81	$< U_{v,n}$	44,1	32,84	38,26
68	50	17,55	$< U_{v,n}$	40,18	31,85	33,75
69	100	18,42	$< U_{v,n}$	45,98	32,18	34,05
70	200	20,6	31,85	42,95	24,99	32,06

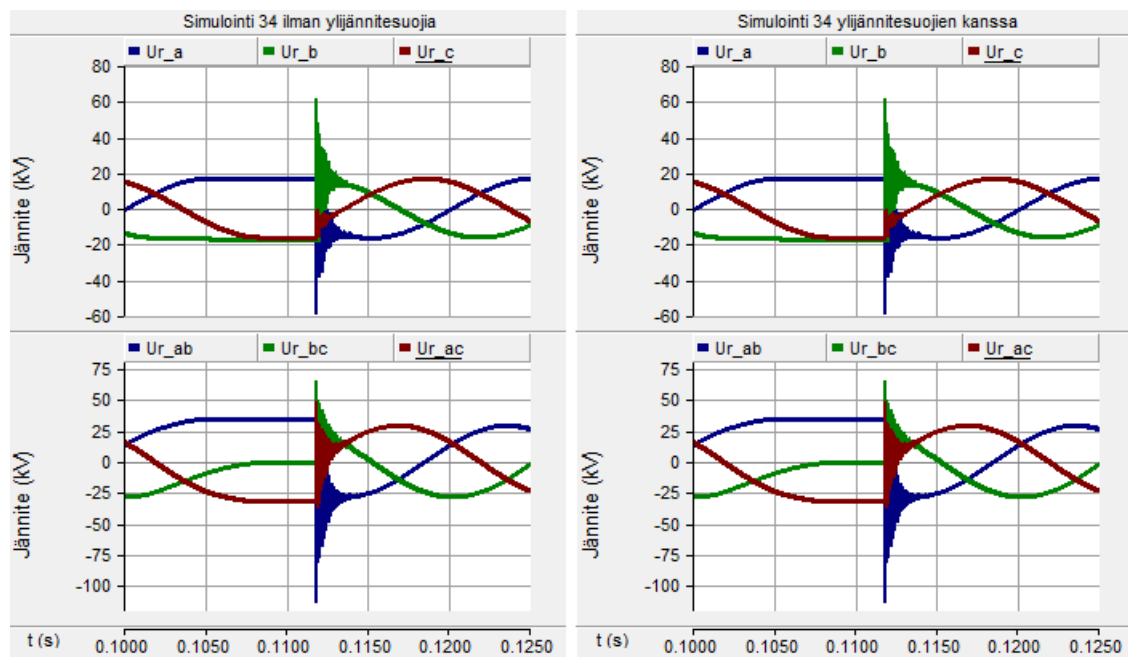
Taulukosta 16 nähdään, että kaapelipituuden vaikutus 1-vaiheisen maasulun aikaisiin kytkentäylijännitteisiin ei ole yksiselitteinen. Simulointien mukaan 1-vaiheisen maasulun jälkeinen kaapelilähdön irtikytkeä ei aiheuta verkkoon merkittäviä kytkentäylijännitteitä, koska syntyvät ylijännitteet olivat pienempiä kuin maasulun aikana vaikuttavat ylijännitteet. Kun verrataan taulukon 16 arvoja ilman maasulkua vaikuttaneisiin taulukon 11 arvoihin, nähdään, että jälleenkytkentöjen aiheuttamien kytkentäylijännitteiden vaihejännitteet ovat suurempia ja pääjännitteet pienempiä maasulun aikana.

Yleisesti voidaan sanoa, että 1-vaiheisella maasululla on vaikutusta syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuteen, joka johtuu maasulun aikaisesta terveiden vaiheiden jännitteiden noususta. Lisäksi jännitteiden nousu aiheuttaa sen, että verkon terveisiin vaiheisiin on varastoituneena enemmän energiaa, joka kuitenkin purkautuu verkkoon irtikytkeä jälkeä maltillisesti. Syntyvät kytkentäylijännitteet jäivät kauas komponenttien jännitekestoisuuksista, joten voidaan sanoa, että 1-vaiheisen vastuksettomaa maasulun jälkeisten kaapeliverkon kytkentöjen ei pitäisi olla sähköverkon komponenttien kannalta ongelmallisia. Simuloinneissa ei myöskään esiintynyt lainkaan katkaisijan avausvälin jälleensyöttymisiä.

### 6.1.6 Ylijännitesuojien vaikutus

Tähänastisissa simuloinneissa ei olla mallinnettu lainkaan verkossa olevia ylijännitesuojia, joiden voidaan olettaa rajaavan syntyviä kytkentäylijännitteitä entisestään. Ylijännitesuojia asennetaan tavallisesti kaapelin ja avojohdon kiinnityskohtiin, muuntajien ylijännitepuolille suojaamaan muuntajia sekä reaktoreiden napoihin. Seuraavaksi simuloinneissa tutkittiin ylijännitesuojien vaikutusta syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuteen. Ylijännitesuojia mallinnettiin PSCAD:n valmiilla metallioksidisuojan mallilla ja ne sijoitettiin vaiheen ja maan välille. Keskijänniteverkoissa käytetyn ylijännitesuojan nimellisjännite oli 30 kV ja ylijännitesuojan johtavuutta kuvaavan ominaiskäyrän arvot saatiin viitteessä [46] esitettyjen tietojen perusteella.

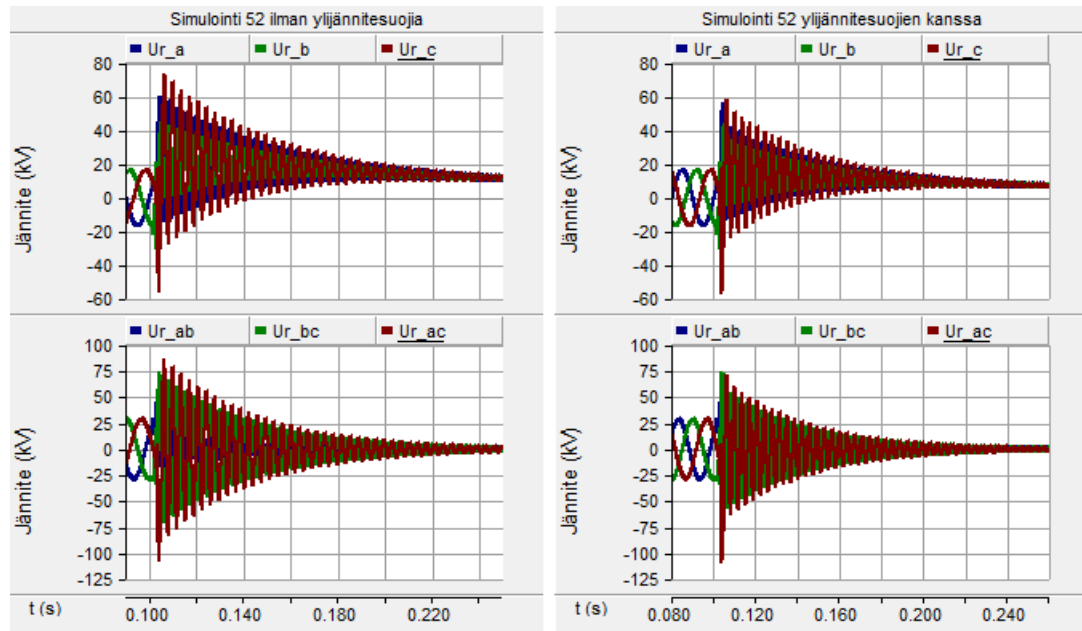
Ylijännitesuojien vaikutusta syntyviin kytkentäylijännitteisiin tutkittiin kaikista pahimpia ylijännitteitä aiheuttavilla simuloinneilla, joita olivat simuloinnit 34 ja 52. Ylijännitesuojien vaikutusta tutkittiin aluksi simuloinnissa 34, jossa kytkennät suoritettiin tyhjäkäyväälle kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmälle, kun kaapelin pituus oli 1 km ja avojohdon pituus 10 km. Simuloinnissa ylijännitesuojat sijoitettiin kaapelin ja avojohdon kiinnityskohtaan vaiheen ja maan välille, kuten todellisuudessaakin tehdään. Kuvassa 38 on havainnollistettu ylijännitesuojien vaikutusta jälleenkytkennän aiheuttamiin kytkentäylijännitteisiin simuloinnissa 34, kun mittaukset on suoritettu avojohdon avoimesta päästä.



**Kuva 38: Ylijännitesuojien vaikutus simuloinnissa 34 syntyviin kytkentäylijännitteisiin.**

Kuvasta 38 nähdään, että kaapelin ja ilmajohdon kiinnityskohtaan asennetut metallioksidisuojat eivät vaikuta lainkaan syntyvien kytkentäylijännitteiden suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että kytkentäylijännitteet ovat huomattavasti pienempiä kaapelin ja avojohdon kiinnityskohdassa kuin avojohdon avoimessa päässä. Tilanne olisi toinen, jos ylijännitesuojat

olisivat asennettuna avojohdon avoimeen päähän. Seuraavaksi ylijännitesuojien vaikutusta tutkittiin simuloinnissa 52, jossa kytkennät suoritettiin 1 km kaapelin ja 1 MVA reaktorin yhdistelmällä. Simuloinnissa ylijännitesuojat sijoitettiin reaktorin napoihin vaiheen ja maan välille. Kuvassa 39 on esitetty ylijännitesuojien vaikutus simuloinnissa 52 syntyviin kaapelin ja reaktorin irtikytkennän aikaisiin kytkentäylijännitteisiin, kun mitaukset on suoritettu reaktorin navoista.



**Kuva 39: Ylijännitesuojien vaikutus simuloinnissa 52 syntyviin kytkentäylijännitteisiin.**

Kuvasta 39 nähdään, että ylijännitesuojilla on vaikutusta reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennästä aiheutuviin ylijännitteisiin. Ylijännitesuojat rajaavat irtikytkennän jälkeisen värähtelyn siten, että vaihejännitteet jäävät alle 60 kV, kun ilman ylijännitesuojia värähtelyn huippuarvo oli taulukon 14 mukaan 73,62 kV. Ylijännitesuojilla on vaikutusta myös pääjännitteisiin, joka johtuu vaihejännitteiden pienenemisestä.

Simulointien mukaan syntyvät kytkentäylijännitteet saadaan rajattua tehokkaasti oikein sijoitettujen ylijännitesuojien avulla. Simuloinneissa käytetyt ylijännitesuojat rajasivat kytkentöjen aikaiset vaihejännitteet tehokkaasti alle 60 kV jännitetasolle. Alle 60 kV vaihejännitteiden seurauksena pääjännitteet eivät pääse nousemaan yli 120 kV, jolloin kytkentäylijännitteet jäävät alle komponenttien salamasyöksyjännitteiden jännitekestoisuuden. Kaapelin ja avojohdon yhdistelmän kytkennöissä avojohdon avoimessa päässä esiintyvät vaihejännitteet saattavat kuitenkin olla suurempia kuin 60 kV, koska avojohdon avointa päätä ei tyypillisesti varusteta ylijännitesuojilla. Kaapelin ja avojohdon kiinnityskohtaan sijoitettu ylijännitesuoja suojaa kuitenkin kaapelipäätettä sekä verkkoa tehokkaasti esimerkiksi salamaniskujen aiheuttamien ylijännitteiden osalta.

## 6.2 Tulosten arviointi ja kehitystarpeet

Simuloinneista tulee muistaa, että PSCAD:lla tehdyt verkkomallit ja komponentit ovat vain matemaattisia malleja sähköverkosta ja sen toiminnasta [17]. Täten simulointitulokset antavat vain hyvän kuvan siitä, miten kaapeliverkkoon varastoitunut energia eri kytkentätilanteissa todennäköisesti käyttäytyy eikä simulointituloksia pidä soveltaa sellaiseen todellisuuden sähköverkkoihin. Malleissa on tehty lisäksi paljon yksinkertaistuksia ja oletuksia, koska muuten työmäärä ja simulointiaika kasvaisivat liian suuriksi. Työssä ei ole esimerkiksi mallinnettu keskijänniteverkon jatkoksia, kaapelipäätteitä tai liittimiä, jotka todellisuudessa vaikuttaisivat kulkuaaltojen heijastumisiin johtuen aaltoimpedanssin muutoksesta [13]. Lisäksi simuloinneissa käytettiin jälleenkytkentöjen simuloinnissa ideaalisia katkaisijoita, jotka simulointien mukaan aiheuttavat pahempia ylijännitteitä kuin tyhjiökatkaisijan mallit. Ideaalisen katkaisijan mallilla myös jälleenkytkentä oli helpompaa ajoittaa tapahtuvaksi palaavan jännitteen huippuarvolla. Simuloinneista voidaan siis sanoa, että todellisuudessa syntyvät jälleenkytkentöjen aiheuttamat kytkentäylijännitteet olisivat pienempiä, jolloin ollaan simulointien kannalta turvallisella puolella.

Työssä simuloitiin ainoastaan pahimpia tilanteita, joiden syntyminen on verrattain epätodennäköistä, mutta mahdollista. On esimerkiksi paljon todennäköisempää, että jälleenkytkentä tapahtuu jollain muulla palaavan jännitteen arvolla kuin sen huippuarvolla, jolloin syntyvät kytkentäylijännitteet jäävät entistä pienemmiksi. Lisäksi irtikytkennöissä katkaisijan koskettimien avaus simuloitiin tapahtumaan aina juuri ennen virran CCL:n arvoa, jonka seurauksena jälleensyttymisten todennäköisyys on suurimmillaan. Simuloidut tilanteet syntyvät siis monen tekijän summana, jotka pienentävät niiden esiintymistodennäköisyyttä entisestään.

Suurena haasteena työssä oli simulointituloksien verifiointi, koska kaikista työssä tehdyistä simuloinneista ei ollut lainkaan mittausdataa saatavilla. Mittausdatan avulla oltaisiin voitu varmistua siitä, että simuloinneissa kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu samassa ajassa ja aiheuttaa samansuuruisia kytkentäylijännitteitä myös todellisuudessa. Mittauksia kuitenkin hankaloittaa se, että osa varastoituneesta energiasta purkautuu tyypillisesti myös mittalaitteiden kautta. Mittauksilla oltaisiin voitu lisäksi varmistua siitä, että verkon vaimeneminen on riittävä ja todenmukainen. Verkon riittävä vaimeneminen voi nimittäin muodostua ongelmaksi PSCAD:n kaltaisissa laskentaohjelmissa [13]. Työssä tehdyissä simuloinneissa verkkoon syntyvät värähtelyt vaimenivat kuitenkin suhteellisen nopeasti taajuusriippuvien kaapelimallien ansioista, jotka ottavat huomioon myös kaapelin virranahdon ja vaiheiden välisen keskinäisvaikutuksen [25]. Tämän vuoksi simuloinneissa ylijännitteiden suuruuksia verrattiin lähinnä vain salamasyöksyjännitteiden kestotasoon.

Simuloinneissa kehitystarpeena olisi ollut muun muassa tyhjiökatkaisijan malli, jolla olisi voinut mallintaa sulkemis- ja avaamistoimintoja, joka olisi antanut todenmukaisemman kuvan katkaisijan toiminnasta. Työssä tyhjiökatkaisijan sulkemis- ja avaamistoiminnoille

käytettiin molemmille omia malleja, joka monimutkaisti simulointimallien säätöä ja simulointeja yleisesti. Lisäksi tyhjiökatkaisijan toimintaa kuvaavien vakioiden arvona olisi voinut käyttää tarkkoja katkaisijakohtaisia arvoja, mutta niitä on verrattain hankalaa saada, koska ne yleensä ovat vain katkaisijoiden valmistajien tiedossa. Yksi tulevaisuuden kehitystarve olisi myös erottimien mallinnus. Erottimien mallintamisesta on yleisesti todella vähän tietoa saatavilla, jonka vuoksi niitä ei onnistuttu mallintamaan myöskään työssä tehdyissä simuloinneissa. Voidaan kuitenkin olettaa, että erotinta käytettäessä koskettimien avausvälissä tapahtuu huomattavasti enemmän jälleensyttymisiä, koska koskettimien avausnopeus on katkaisijoita hitaampi.

## 7. YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli selvittää, miten kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu verkossa eri kytkentöjen aikana ja miten se voi vaikuttaa verkon kytkentäylijännitteisiin. Kaapelin suuremman kapasitanssin vuoksi kaapeliverkkojen sähkökenttään on varastoituneena huomattavasti enemmän energiaa kuin avojohtoverkoissa. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että kaapeliverkoissa sähkökenttään varastoituneen energian aiheuttaman jäännösvarauksen purkautuminen kestää huomattavasti kauemmin kuin avojohtoverkoissa [31]. Kaapeliverkon sähkökenttään varastoitunut energia riippuu pitkälti irtikytkentähetkestä, koska vaihtosähköverkoissa kaapelin kapasitanssi vuorottain latautuu ja purkautuu ajan muuttuessa. Varastoitunut energia on siis suurimmillaan, kun virta katkeaa jännitteen ollessa huippuarvossansa. Voidaan siis sanoa, että pahimpia kytkentätilanteita sähkökenttään varastoituneen energian kannalta ovat täysin kapasitiiviset tai induktiiviset virtapiirit.

Kaapeliverkon kytkentöjä tutkittiin PSCAD:lla tehdyillä verkkomalleilla. Tutkittavia kytkentätoimenpiteitä olivat muun muassa työssä esitetyt kuormitetun ja tyhjäkäyvän 20 kV johtolähdön kytkennät, tyhjäkäyvän kaapelin kytkennät, tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmän kytkennät, reaktorilla kompensoidun kaapelin kytkennät sekä 1-vaiheisen maasulun aikaiset kytkennät. Simuloinneissa tutkittiin lähinnä irtikytkennän jälkeistä kaapeliverkkoon varastoituneen energian purkautumista ja jälleenkytkentöjen aiheuttamia kytkentäylijännitteitä. Jälleenkytkentöjä simuloitiin irtikytkennän jälkeisen palaavan jännitteen huippuarvolla. Simuloinneissa varioitavia parametrejä olivat mm. kaapelipituus, kaapelilaji, hajautetun maasulkuvirran kompensointiaste, hajautettu loistehon kompensointi ja virran current chopping arvo.

Simulointien mukaan kaapeliverkkoon varastoituneella energialla on vaikutusta syntyviin kytkentäylijännitteisiin, mutta vaikutus ei ole kaikissa kytkentätilanteissa yhtä merkittävä. Kaapeliverkoissa tavallisten kuormitusvirtojen kytkennät ovat keskijänniteverkoissa päivittäisiä kytkentätoimenpiteitä, eivätkä ne simulointien mukaan aiheuta verkkoon merkittäviä kytkentäylijännitteitä. Lisäksi kuormitusvirtoja kytkettäessä kaapeliverkkoon on varastoituneena vähemmän energiaa kuin tyhjäkäyvien johtojen kytkennöissä, koska jännitteen ja virran kulmaero poikkeaa 90°-asteesta johtuen kuormituksen aiheuttamasta virran resistiivisestä komponentista. Voidaan myös sanoa, että kokonaisia johtolähtöjä irtikytkettäessä kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu verkkoon huomattavasti tehokkaammin johtuen verkon laajuudesta. Verkon laajuuden vuoksi myös kulkuaaltojen vaimeneminen on voimakkaampaa, jonka seurauksena myöskään jälleenkytkentöjen aiheuttamat kytkentäylijännitteet eivät nouse merkittävän suuriksi.

Simulointien mukaan suurimmat ylijännitteet syntyivät tyhjäkäyvän kaapelin ja avojohdon yhdistelmän kytkennöissä sekä reaktorilla kompensoidun kaapelin kytkennöissä. Tyhjäkäyvillä johdoilla ja reaktorilla kompensoiduilla kaapeleilla virran ja jännitteen kulmaero on  $90^\circ$ , jonka seurauksena kaapeliverkkoon varastoitunut energia on suurimmillaan, kun virta katkeaa nollakohdassansa. Tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmän irtikytkennöissä sähkökenttään varastoitunut energia aiheuttaa johtoon vaimenevan DC-jännitteen ja jälleenkytkentä palaavan jännitteen huippuarvolla voi jäännösvarauksen ja kulkuaaltojen heijastumisien vuoksi aiheuttaa verkkoon suuriakin ylijännitteitä. Jälleenkytkentöjen aiheuttamat kytkentäylijännitteet olivat suurimmillaan, kun avojohto oli pidempi kuin kaapeli. Kun kaapeliin on kytkettynä reaktori, ei jäännösvaraus ole enää vaimeneva DC-jännite, vaan vaimeneva AC-jännite. Tämä johtuu siitä, että kaapeliverkkoon varastoitunut energia alkaa värähtelemään reaktorin induktanssin kanssa, jolloin värähtelyn taajuus riippuu kaapelin kapasitanssista ja reaktorin induktanssista. Reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennöissä suurimmat ylijännitteet esiintyivät, kun kaapeli oli lyhyt ja virran katkaisussa tapahtui current chopping. Tästä voidaan päätellä, että reaktorilla kompensoidun kaapelin irtikytkennästä aiheutuvat ylijännitteet riippuvat enemmänkin reaktorin magneettikenttään varastoituneesta energiasta kuin kaapeliverkkoon varastoituneesta energiasta.

Yleisesti simuloinneista voidaan sanoa, että kaapeliverkkoon varastoitunut energia purkautuu irtikytkennöissä verkkoon aiheuttamatta merkittävän suuria ylijännitteitä. Varastoituneen energian purkautumisen aiheuttama jännite riippuu pitkälti irtikytkettävän verkon rakenteesta ja komponenteista. Kriittisiä ylijännitteitä voi kuitenkin esiintyä, jos kaapeliin on kytkettynä induktiivinen kuorma tai verkkoon tulee irtikytkennän jälkeen jälleenkytkentä palaavan jännitteen huippuarvolla. Kaapelin ja reaktorin irtikytkennästä aiheutuvia ylijännitteitä vastaan voidaan kuitenkin suojautua tehokkaasti reaktorin napoihin asennettujen ylijännitesuojien avulla. Toinen merkittäviä kytkentäylijännitteitä aiheuttava kytkentätoimenpide oli varauksellisen tyhjäkäyvän kaapelin ja ilmajohdon yhdistelmän jälleenkytkentä. Kyseinen kytkentätoimenpide voi olla kriittinen, koska kaapelin ja avojohdon kiinnityskohtaan asennetut ylijännitesuojat eivät simulointien mukaan rajoittaneet lainkaan avojohdon avoimessa päässä esiintyviä kytkentäylijännitteitä. Tämän seurauksena kytkentäylijännite voi olla kriittinen avojohdolle tai sen läheisyydessä oleville komponenteille. Kaikissa simuloinneissa kytkentäylijännitteet jäivät kuitenkin alle komponenttien jännitekestoisuuksien, mutta edellä mainitut kytkentätoimenpiteet vaativat erityishuomiota ja tarkempaa tutkimusta. Simuloinneista tulee lisäksi muistaa, että simulointituloksia ei ole verifioitu kenttämittausten perusteella, jonka vuoksi tuloksia ei voi soveltaa suoranaisesti todellisuuden sähköverkkoihin.



## LÄHTEET

- [1] Sähkömarkkinalaki 588/2013.
- [2] E. Jarmo & H. Liisa, Sähköverkot II, Kirja, Otatiето, 2011.
- [3] F. Silva, Analysis and simulation of electromagnetic transients in HVAC cable transmission grids, Väitöskirja, Aalborg university, 2011.
- [4] JWG 21/22.01, Comparison Of High Voltage Overhead Lines And Underground Cables, Raportti, CIGRE, 1996.
- [5] SLO, Keskijännitekaapeli REKA - AHXAMK-WP 3x240 20 kV, Verkkosivusto, Saatavilla: <https://verkkokauppa.slo.fi/fi/0622409>.
- [6] REKA, Kaapelisanasto, Verkkosivusto, Reka Kaapeli Oy. Saatavilla: <https://www.reka.fi/kaapelitietoa/kaapelisanasto>.
- [7] P. Dev, C. Peniamin & H. Vahik, Cable-Capacitance Discharge Time With and Without the Application of Grounding Device, Konferenssijulkaisu, IEEE Transactions Of Industry Applications, osa. 47, nro 1, s. 286-291, 2011.
- [8] L. Haarla, Kurssi ELEC-E8419 Sähkönsiirtojärjestelmät, Luentokalvot, Aalto-yliopisto, 2015.
- [9] J. Elovaara & L. Haarla, Sähköverkot I, Kirja, Otatiето, 2011.
- [10] M. Farzaneh, S. Farokhi & W. Chrisholm, Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines, Kirja, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [11] J. Bastman, Kurssi DEE-24000 Sähköverkon mallintaminen ja analyysi, Opintomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018.
- [12] G. Unnur, Modelling of long High Voltage AC Cables in the Transmission System, Väitöskirja, Aalborg university, 2010.
- [13] M. Aro, E. Jarmo, K. Matti, N. Kirsi & P. Veikko, Suurjännitetekniikka, Kirja, Otatiето, 2015.

- [14] SESKO, Sähkötekniikan peruskäsitteet, Luentokalvot, 2013. Saatavilla: [https://www.sesko.fi/files/79/osa\\_1\\_jannite\\_-\\_kalvot.pdf](https://www.sesko.fi/files/79/osa_1_jannite_-_kalvot.pdf)
- [15] ABB, TTT-käsikirja, Käsikirja, ABB Oy, 2007.
- [16] D. Fulchiron, Overvoltages and insulation coordination in MV and HV, Cahier Technique, Raportti, 1995.
- [17] J. Prusti, Tyhjiökatkaisijan aiheuttamat kytkentäyliännitteet ja kuivamuuntajan yliännitesuojaus, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [18] Circuit Globe, Ferranti Effect, Verkkosivusto, 2016. Saatavilla: <https://circuitglobe.com/ferranti-effect.html>.
- [19] E. Turto, Keskijänniteverkon yliännitesuojaus, Opinnäytetyö, Satakunnan ammattikorkeakoulu, 2017.
- [20] L. Erkki & P. Jarmo, Sähkönjakelutekniikka, Kirja, Otatieto, 2008.
- [21] M. Doone & J. Colbert, Electrical surge arrester/diverter. Patentti EP0233022, European Patent Office, 1987.
- [22] T. Dokic, P. Dehganian, P.C. Chen, M. Kezunovic, Z. Medina-Cetina, J. Stojanovic & Z. Obradovic, Risk Assessment of a Transmission Line Insulation Breakdown due to Lightning and Severe Weather, Konferenssijulkaisu, 49th Hawaii International Conference on System Sciences, 2016.
- [23] C. L. Bak & F. F. da Silva, High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 1, Artikkel, Electric Power System Research 140, s. 984-994, 2016.
- [24] J. Li, Measurement and Analysis of Overvoltages in Power Systems, Kirja, John Wiley & Sons, 2018.
- [25] F. Silva & C. Bak, Electromagnetic Transients in Power Cables, Kirja, Springer, 2013.
- [26] H. Khalilnezhad, M. Popov, L. van der Sluis, J. P. W. de Jong, N. Nenadovic & J. A. Bos, Assessment of Line Energization Transients when increasing cable length in 380 KV power grids, Konferenssijulkaisu, IEEE International Conference on Power System Technology, 2016.

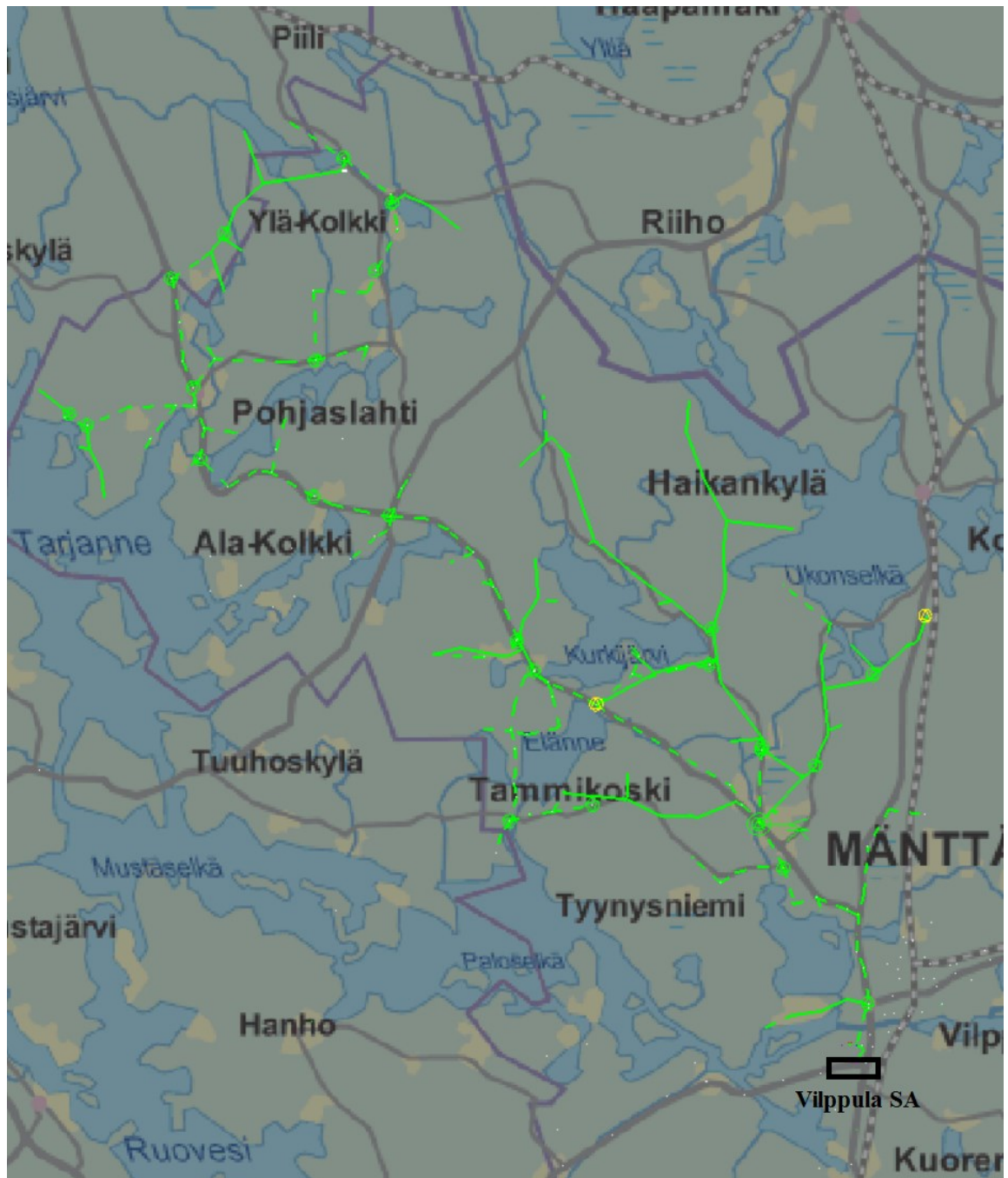
- [27] A. Hayati Soloot, A. Gholami, E. Agheb, A. Ghorbandaeipour & P. Mokhtari, Investigation of Transmission Line Overvoltages and their Deduction Approach, Artikkel, International Journal of Electrical and Computer Engineering, osa 3, nro 5, s. 1070-1078, 2009.
- [28] R. Smeets, L. van der Sluis & M. Kapetanovic, Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems, Kirja, John Wiley & Sons, 2014.
- [29] IEEE Power and Energy Society, IEEE Guide for the Application of Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Above 1000 V, IEEE Standardi, IEEE Standards Association, 2014.
- [30] F. Ghassemi, S. Dennis, A. Ainsley, A. Manu Haddad & S. Robson, 275 kV cable discharge field measurement and analysis of SVLs chain, Artikkel, Electric Power Systems Research 161, s. 95-102, 2018.
- [31] I. R. Pordanjani, Y. Wang, R. Cui & E. Amiri, Discharge characteristics of trapped charge in power lines with underground cable and overhead line segments, Konferenssijulkaisu, IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2016.
- [32] G. W. Chang, H. M. Huang & J.-H. Lai, Modeling SF6 Circuit Breaker for Characterizing Shunt Reactor Switching Transients, Artikkel, IEEE Transactions On Power Delivery, osa. 22, nro. 3, 2007.
- [33] D. Dufournet, Transient Recovery Voltages (TRVs) for High-Voltage Circuit Breakers Part 1, Luentokalvot, Alstom, 2013. Saatavilla: [http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp\\_files/2013-1\\_Thu\\_Dufournet.pdf](http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp_files/2013-1_Thu_Dufournet.pdf)
- [34] A. Mäkinen, Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä, Raportti, Tampereen teknillinen yliopisto, 2016.
- [35] A. Nikander & A. Mäkinen, Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset - suojausasteet, yliaallot, vaarajännitteet, Raportti, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [36] S. Herraiz, J. Meléndez, V. A. Barrera, J. Sánchez & M. Castro, Estimation of the Zero-Sequence Impedance of Undergrounds Cables for Single-Phase Fault Location in Distribution Systems, Konferenssijulkaisu, International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2009.

- [37] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, Kirja, John Wiley & Sons, 1991.
- [38] I. A. Aristi, A. H. Nielsen, J. Holboll, K. H. Jensen & T. Sorensen, *Switching overvoltages in offshore wind power grids*, Väitöskirja, Technical University of Denmark, 2011.
- [39] A. Mueller & D. Saemann, *Switching phenomena in medium voltage systems - good engineering practice on the applications of vacuum circuit-breakers and contactors*, Konferenssijulkaisu, Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Electrical and Instrumentation Applications, 2011.
- [40] S. M. Wong, L. A. Snider & E. W. C. Lo, *Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker*, Konferenssijulkaisu, International Conference on Power Systems Transients, 2003.
- [41] Manitoba Hydro International Ltd, *Breaker Models*, Verkkosivusto. Saatavilla: <https://hvdc.ca/knowledge-base/topic:55/v:>.
- [42] K. Rao & G. Gajjar, *Development and Application of Vacuum Circuit Breaker Model in Electromagnetic Transient Simulation*, Konferenssijulkaisu, IEEE Power India Conference, 2006.
- [43] K. E. Pollestad, *Protection of Permanently Shunt-compensated HVAC Cables*, Diplomityö, Aalborg university, 2014.
- [44] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for the Application of Shunt Reactor Switching*, IEEE Standardi, IEEE Standards Association, 2017.
- [45] S. Vehmasvaara, *Compensation Strategies In Cabled Rural Networks*, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.
- [46] K. Kauhaniemi, S. Korpiniemi & M. Västi, *Switching overvoltages of shunt reactors when opening the circuit breaker*, Raportti, Vaasan yliopisto, 2018.
- [47] C. L. Bak, H. Baldursson & A. M. Oumarou, *Switching Overvoltages in 60 kV reactor compensated cable grid due to resonance after disconnection*, Konferenssijulkaisu, WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '08), 2008.

- [48] I. Lafaia, F. Ghassemi, A. Ametani, J. Mahseredjian, S. Dennis, A. M. Haddad & S. Robson, Experimental and Theoretical Analysis of Cable Discharge, Artikkel, IEEE Transactions On Power Delivery, osa 32, nro. 4, 2017.
- [49] F. Faria Da Silva, 29.7 käytty keskustelu, Sähköpostikeskustelu, 2018.

## LIITE A: VILPPULAN SÄHKÖASEMAN KOTINIEMEN LÄHDÖN RAKENNE

Vilppulan sähköaseman Kotiniemen lähdön rakenne verkkotietojärjestelmän mukaan. Kuvassa katkoviiva tarkoittaa maakaapelia ja yhtenäinen viiva avojohtoa.



# LIITE B: YKSINKERTAISTETUN VERKKOMALLIN PSCAD-MALLI

