



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUKKA PRUSTI
TYHJIÖKATKAISIJAN AIHEUTTAMAT KYTKENTÄYLIJÄNNIT-
TEET JA KUIVAMUUNTAJAN YLIJÄNNITESUOJAUS

Diplomityö

Tarkastaja: TKT Kari Lahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 26.4.2017

TIIVISTELMÄ

JUKKA PRUSTI: Tyhjiökatkaisijan aiheuttamat kytkentäylijännitteet ja kuivamuuntajan ylijännitesuojaus
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 104 sivua, 1 liitesivu
Syyskuu 2017
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat
Tarkastaja: TkT Kari Lahti

Avainsanat: tyhjiökatkaisija, kytkentäylijännitteet, erittäin jyrkät transienttiylijännitteet, kaapeli, kulkuaaltoilmiö, kuivamuuntajat, ylijännitesuojaus, PSCAD/EMTP

Tyhjiökatkaisijalla tehdyt kytkentätoimenpiteet voivat aiheuttaa erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä sähköverkoissa. Ylijännitteiden syntyyn ja suuruuteen vaikuttavat ympäröivän verkon ominaisuudet, kuorman ominaisuudet, tyhjiökatkaisijan ominaisuudet, sekä kytkentätilanne. Yleisesti pienen induktiivisen virran katkaisua pidetään siinä syntyvien ylijännitteiden takia vaarallisena. Tilanteita, joissa katkaistaan pientä induktiivista virtaa, ovat esimerkiksi tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkentä, induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentä, sekä muuntajan irtikytkentä keskijännitepuolen suojauslaukaisuilla tilanteessa, jossa muuntajan toisionavoissa on oikosulkuvika.

Tyhjiökatkaisijan sulkeutumisen ja avautumisen yhteydessä tapahtuvat esi- ja uudelleen-syttymiset aiheuttavat erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä, jotka ovat haitallisia muuntajakäämityksille ja muuntajan eristysrakenteille. Erityisesti kuivamuuntajat ovat tyypillisesti herkkiä ylijännitteille. Tässä diplomityössä tarkastellaan teollisuuden keskijänniteverkon tilannetta, jossa tyhjiökatkaisijaa käytetään kuivan jakelumuntajan pääkytkinlaitteena. Työn tavoitteena on selvittää missä tilanteissa tyhjiökatkaisijan aiheuttamat kytkentäylijännitteet ovat niin suuria, että kuivamuuntaja tulisi varustaa ylijännitesuojilla.

Työssä rakennetaan simulointimalli PSCAD-ohjelmistolla, jolla tutkitaan erilaisia kytkentätilanteita erilaisissa verkkotopologioissa. Simuloinneilla pyritään määrittämään ja tunnistamaan tärkeimmät transienttiylijännitteiden syntyyn ja suuruuteen vaikuttavat tekijät. Tutkittavia tilanteita ovat muuntajan energisointi, tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkentä, induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentä, muuntajan irtikytkentä, kun kuorman tehokerroin on lähellä yhtä ja muuntajan irtikytkentä, kun toisionavoissa on kolmivaiheinen oikosulku.

Työssä tehdyistä simuloinneista selviää, että tärkein ylijännitteiden syntyyn vaikuttava tekijä on tyhjiökatkaisijan ja kuivamuuntajan välisen kaapelin pituus. Myös muuntajan nimellisteholla on vaikutusta tyhjäkäyvän muuntajan irti kytkennässä, sekä toision oikosulkuvian tapauksessa. Sen sijaan syöttävän verkon laajuuden vaikutus ei osoittautunut simuloinneissa merkittäväksi, vaikkakin sillä on myös vaikutusta. Simuloinneista selviää, että muuntajan energisointi ja tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkentä eivät aiheuta vaarallisen suuria ylijännitteitä. Myöskään kuormallisen muuntajan irtikytkentä ei aiheuta vaarallisen suuria ylijännitteitä, jos kuorman tehokerroin on lähellä yhtä. Sen sijaan induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentä, sekä muuntajan irtikytkentä toision oikosulkuvian tapauksessa voivat aiheuttaa erittäin jyrkkiä muuntajan eristystason ylittäviä transienttiylijännitteitä.

ABSTRACT

JUKKA PRUSTI: Switching overvoltages due to vacuum circuit breaker operations and overvoltage protection of dry-type transformers

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 104 pages, 1 Appendix pages

September 2017

Master's Degree Programme in Electrical engineering

Major: Power systems and market

Examiner: DSc. (Tech.) Kari Lahti

Keywords: vacuum circuit breaker, switching overvoltages, very-fast-front transient overvoltages, cables, travelling waves, dry-type transformers, overvoltage protection, PSCAD/EMTP

Vacuum circuit breakers can cause transient overvoltages in electric grids. The magnitude and severity of the generated overvoltages depends on properties of the network, load, circuit breaker and type of circuit breaker operation. Generally breaking small inductive currents is considered as dangerous because of overvoltages it generates. Situations in which small inductive currents are interrupted are disconnecting an unloaded transformer, disconnecting a transformer with inductive load and disconnecting a transformer with a medium voltage circuit breaker after a fault at the low voltage side of the transformer.

During opening and closing of vacuum circuit breaker happens re-ignitions and pre-strikes which cause very fast front overvoltages. These very steep surges are harmful to transformer windings and insulation of transformers. Especially dry-type transformers are typically vulnerable to overvoltages. This master's thesis focuses on a typical situation in industrial medium voltage system where a vacuum circuit breaker operates as a main switching device to a dry-type distribution transformer. The purpose of this thesis is to find out when transient overvoltages caused by vacuum circuit breaker operations are so high that a dry-type transformer should be equipped with surge arresters.

A simulation model is built with PSCAD which is used to study different switching operations in different network topologies. The purpose of the simulations is to recognize the most important factors leading to overvoltages. The studied switching operations are energizing a transformer, disconnecting an unloaded transformer, disconnecting a transformer with inductive load, disconnecting a transformer with normal load and disconnecting a transformer during a fault at the low voltage side of the transformer.

From simulations carried out in this thesis it is found that the most important factor affecting to overvoltages is the length of a cable between vacuum circuit breaker and transformer. Also the nominal power of a transformer has an influence in disconnecting a transformer during no-load and during a fault at the low voltage side. However cable length in the supplying network didn't seem to have big influence. According to simulations dangerous overvoltages are not generated when an unloaded transformer is energized or disconnected. Also disconnecting a transformer during normal load condition is quite safe from overvoltage point of view. However, disconnecting the transformer with inductive load and during a short circuit fault at the low voltage side of the transformer can cause very high transient overvoltages that exceed the basic insulation level of a transformer.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Process Industries, Electrification-yksikössä. Työn ohjaajana ABB:llä on toiminut DI Timo Haapalainen ja Tampereen teknillisessä yliopistossa tarkastajana on toiminut TkT Kari Lahti. Haluan kiittää heitä työn ohjaamisesta, tarkastamisesta, sekä saamastani avusta ja neuvoista työn aikana. Lisäksi haluan kiittää insinööri Anssi Mäkystä suuresta avusta erityisesti tyhjiökatkaisijoihin liittyvien asioiden selvittelyssä sekä esimiestäni Kimmo Kerästä mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö.

Kiitokset vielä perheelleni, joka on tukenut minua koko opiskelujeni ajan.

Tampereella, 22.8.2017

Jukka Prusti

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	YLIJÄNNITTEET JA ERISTYSRAKENTEET	3
	2.1 Ylijännitteiden luokittelu.....	3
	2.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet	4
	2.1.2 Loivat transienttiylijännitteet	5
	2.1.3 Jyrkät ja erittäin jyrkät transienttiylijännitteet	7
	2.2 Eristysrakenteiden jännitelujuus	8
	2.2.1 Eristyskoordinaatio	8
	2.2.2 Koejännitteet ja standardien mukainen jännitetestaus	9
3.	VIRRRAN KATKAISU JA KYTKEMINEN TYHJÖKATKAISIJALLA.....	11
	3.1 Tyhjiökatkaisijasta yleisesti	12
	3.2 Induktiivisen virran katkaisu tyhjiökatkaisijalla	15
	3.2.1 Virran katkeaminen ja current chopping.....	16
	3.2.2 Palaava transienttijännite ja avausvälin jännitelujuus.....	20
	3.2.3 Korkeataajuinen transienttivirta ja sen katkaisu	23
	3.2.4 Virtual current chopping	27
	3.3 Kuivamuuntajan energisointi tyhjiökatkaisijalla.....	28
	3.4 SF ₆ -katkaisijat	29
	3.4.1 Itsepuhallusperiaate.....	30
	3.4.2 SF ₆ -katkaisijan ja tyhjiökatkaisijan katkaisutekniikan erot	31
4.	KAAPELIN MALLINTAMINEN.....	32
	4.1 Kaapelin rakenne	32
	4.2 π -sijaiskytkentä	33
	4.3 Kulkuaaltoilmiö transienttianalyysissä	34
	4.3.1 Kulkuaallon eteneminen johdolla	35
	4.3.2 Aaltoimpedanssi ja kulkuaallon etenemisnopeus	38
	4.3.3 Kulkuaallon teho ja energia	39
	4.3.4 Kulkuaallon vaimeneminen	40
	4.3.5 Kulkuaaltojen heijastuminen.....	41
5.	KUIVAMUUNTAJAT JA YLIJÄNNITESUOJAUS	44
	5.1 Kuivamuuntajista yleisesti	44
	5.2 Ylijännitteiden vaikutukset kuivamuuntajiin	45
	5.3 Ylijännitesuojien toimintaperiaate ja ominaisuudet.....	47
	5.3.1 Metallioksidisuoja.....	48
	5.3.2 Metallioksidisuojien ominaisuudet.....	51
	5.3.3 Metallioksidisuojien valintakriteerit	52
	5.4 Ylijännitesuojien sijoittaminen	54
	5.5 Metallioksidiylijännitesuojien soveltuvuus erittäin jyrkille transienttiylijännitteille	59
	5.6 RC-suojat ylijännitesuojauksessa.....	60

6.	KOMPONENTTIEN MALLINNUS PSCAD:SSÄ.....	62
6.1	Tyhjiökatkaisijan mallinnus	62
6.1.1	Tyhjiökatkaisijamallin toiminta PSCAD:ssä	62
6.1.2	Tyhjiökatkaisijamallin verifiointi 1-vaiheisena	65
6.2	Kaapelin mallinnus.....	69
6.2.1	Johtimen käsittely	71
6.2.2	Pääeristyskerros ja puolijohtavat kerrokset.....	72
6.2.3	Kosketussuojan ja ulkovaipan käsittely	73
6.2.4	Kulkuaallon nopeuden määrittäminen	73
6.2.5	Kaapelin kapasitanssi ja varausvirta	77
6.3	Muuntajan mallinnus.....	79
7.	SIMULOINTIMALLI JA SIMULOINTITULOKSET	81
7.1	Mallin toimivuuden todentaminen	81
7.1.1	Induktiivisen kuormitusvirran katkaisu ilman suojalaitteita.....	81
7.1.2	Tyhjäkäyvän muuntajan energisointi	84
7.2	Simuloitavat tilanteet.....	86
7.2.1	Muuntajan energisointi	88
7.2.2	Tyhjäkäyvän muuntajan irrottaminen verkosta.....	90
7.2.3	Induktiivisesti kuormitetun muuntajan irrottaminen verkosta	93
7.2.4	Muuntajan nimelliskuormitusvirran ($\cos(\varphi)=0,7$) katkaisu	94
7.2.5	Vika muuntajan toisionavoissa	95
7.3	Mallin rajoitteet ja pohdintaa sen toimivuudesta	99
8.	YHTEENVETO	101
	LÄHTEET.....	105

LIITE A: SIMULOINTIMALLI

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Keskijännitekatkaisijamarkkinoiden kehitys Euroopassa. Muokattu lähteestä [2].</i>	12
Kuva 2.	<i>VD4 tyhjiökatkaisijan pilariin upotetun tyhjiökammion poikkileikkaus. Muokattu lähteestä [15].</i>	13
Kuva 3.	<i>Paschenin käyrän periaatteellinen muoto. Muokattu lähteestä [2].</i>	14
Kuva 4.	<i>Verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä pienen induktiivisen virran katkaisussa.</i>	15
Kuva 5.	<i>Vasemmalla kuvassa on diffuusi ja oikealla keskittynyt valokaari. Muokattu lähteestä [15].</i>	17
Kuva 6.	<i>Katkaisijan spiraalikoskettimen muotoilu RMF-tekniikassa. B on magneettivuon tiheys, I on virta ja F on azimutaalinen sähkömagneettinen voima [16].</i>	18
Kuva 7.	<i>Korkeataajuinen värähtelyilmiö aiheuttaa virtaan ennenaikaisen nollakohdan, jossa virta katkeaa. Muokattu lähteestä [17].</i>	19
Kuva 8.	<i>Uudelleensyttymistä seuraavan korkeataajuisen transienttiovirran syntymekanismit. Muokattu lähteestä [21].</i>	23
Kuva 9.	<i>Verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä uudelleensyttymisen aiheuttamassa korkeataajuisen transienttiovirran synnyssä.</i>	23
Kuva 10.	<i>Periaatekuva peräkkäisistä katkaisijan avausvälin uudelleensyttymisistä ja sitä seuraavasta korkeataajuudesta virrasta ja sen katkaisusta. Muokattu lähteestä [3].</i>	25
Kuva 11.	<i>Jännitteenvoimistuminen ja katkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvu. Muokattu lähteestä [4].</i>	26
Kuva 12.	<i>Virran kulkutie kolmivaihejärjestelmässä vaiheiden kapasitiivisen kytketymisen kautta. Muokattu lähteestä [21].</i>	27
Kuva 13.	<i>Virtojen käyrämuodot virtual current chopping-ilmiössä. Ensimmäisenä katkaisevan vaiheen (punainen) katkaisutransientti siirtyy kahteen muuhun vaiheeseen aiheuttaen ennenaikaisen nollakohdan myös niihin. Muokattu lähteestä [21].</i>	28
Kuva 14.	<i>Itsepuhallus-katkaisijan perustoimintaperiaate: (a) kiinni-asento; (b) valokaaren palaminen koskettimien välillä; (c) valokaaren puhallus ja sammutus [24].</i>	30
Kuva 15.	<i>AHXCMK-WTC kaapelin rakenne. 1 johdin, 2 johdinsuoja, 3 eriste, 4 hohtosuoja, 5 puolijohtava sidenauha, 6 kosketussuoja, 7 erotusnauha ja 8 vaippa. Muokattu lähteestä [26].</i>	32
Kuva 16.	<i>Johdon yksivaiheinen π-sijaiskytkentä [29].</i>	34
Kuva 17.	<i>Jakautunein vakioin kuvatun johdon johtoalkio. Perustuu lähteeseen [1].</i>	35

Kuva 18.	<i>Vasemmalla johdolla etenevä jänniteaalto ja oikealla tarkastelupisteessä A mitattavissa oleva jännite tai virta. Perustuu lähteeseen [1].</i>	37
Kuva 19.	<i>Jännite- ja virta-aaltojen positiiviset suunnat. Perustuu lähteeseen [1].</i>	37
Kuva 20.	<i>Vastakkaisiin suuntiin kulkevat jänniteaallot ja niihin liittyvät virta-aallot. Perustuu lähteeseen [1].</i>	38
Kuva 21.	<i>Kulkuaallon eteneminen johdolla. Perustuu lähteeseen [1].</i>	40
Kuva 22.	<i>Kulkuaallon heijastuminen aaltoimpedanssin muutoskohdassa. Perustuu lähteeseen [1].</i>	41
Kuva 23.	<i>Valuhartsieristeisen kuivamuuntajan rakenne. Muokattu lähteestä [34]</i>	45
Kuva 24.	<i>Jännitteen jakautuminen eri käämikiirroksille. Muokattu lähteestä [36].</i>	46
Kuva 25.	<i>Venttiilisuojiin periaatteellisia rakenteita. a) Levykipinävälisuoja. b) Magneettipuhallussuoja. c) Metallioksidisuoja. 1 epälineaarinen vastus. 2, 3 kipinävälit. 4 puhalluskäämit. 5 puhalluskäämien ohitusvastukset. [9]</i>	48
Kuva 26.	<i>ABB:n valmistamia MO-vastuselementtejä [37].</i>	49
Kuva 27.	<i>MO-vastuselementin epälineaarinen jännite-virta-ominaiskäyrä. a) kapasitiivinen lineaarinen alue, missä virta on alle milliampeerin. b) ominaiskäyrän taitepiste, jossa tapahtuu siirtyminen eristeestä johteeksi. c) vahvasti epälineaarinen alue. d) resistiivinen lineaarinen alue. A jatkuvan käyttöjännitteen alue. B jäännösjännite, suojaustaso. Muokattu lähteestä [37].</i>	49
Kuva 28.	<i>ABB:n POLIM-D-tyyppinen keskijänniteyläjännitesuoja. Vasemmalla aktiivinen osa ennen kuoren valamista. Keskellä havainnekuva, jossa näkyy aktiivinen osa silikonikuoren sisällä. Oikealla valmis ylijännitesuoja. [37]</i>	50
Kuva 29.	<i>Esimerkki käyrästä, josta σ_{TOV}-arvo luetaan. Muokattu lähteestä [39].</i>	53
Kuva 30.	<i>Jänniteaallon eteneminen johdolla, johon on kytketty ylijännitesuoja. Muokattu lähteestä [37].</i>	55
Kuva 31.	<i>Jatkavan jänniteaallon positiivinen heijastuminen muuntajan navoissa. Muokattu lähteestä [37].</i>	56
Kuva 32.	<i>Muuntajan navoista positiivisesti heijastuneen jänniteaallon U_{1r} negatiivinen heijastuminen ylijännitesuojan kytkentäpisteessä. Muokattu lähteestä [37].</i>	57
Kuva 33.	<i>Ylijännitesuojasta negatiivisesti heijastuneen jänniteaallon saapuminen muuntajan napoihin. Muokattu lähteestä [37].</i>	57
Kuva 34.	<i>Tilanne todellista suojaustasoa laskettaessa yhtälöllä 31. Muokattu lähteestä [37].</i>	58

Kuva 35.	<i>Kuvassa jäännösjännitteen ja purkausvirran aaltomuodot 12 kV ylijännitesuojalle. Ylhäällä kuvassa käytetty virtapulssi 5 kA, 2000 ns rinnannousuajalla ja alhaalla 5 kA 160 ns rinnannousuajalla. Muokattu lähteestä [12].</i>	59
Kuva 36.	<i>Esimerkki RC-suojan kytkennästä muuntajan ylijännitesuojauksessa. Muokattu lähteestä [42].</i>	61
Kuva 37.	<i>Tyhjiökatkaisijan ohjauslogiikkaa PSCAD:ssä kuvaava lohkoakaavio.</i>	63
Kuva 38.	<i>J. Helmerin [3] käyttämä testipiiri, jolla tutkitaan tyhjiökatkaisijamallin toimintaa.</i>	65
Kuva 39.	<i>Tyhjiökatkaisija avautuu ajanhetkellä 0,0743 sekuntia ja current chopping-ilmio tapahtuu ajanhetkellä 0,074816 sekuntia.</i>	66
Kuva 40.	<i>Tyhjiökatkaisija avautuu ajanhetkellä 0,0743 sekuntia, jonka jälkeen palaava transienttijännite saa aikaan uudelleensyttymisiä katkaisijan avausvälissä.</i>	67
Kuva 41.	<i>Lähikuva uudelleensyttymistä seuraavasta korkeataajuisesta transienttivirrasta.</i>	68
Kuva 42.	<i>Katkaisija saa sulkeutumiskäskyn ajanhetkellä 0,06 sekuntia, jolloin avausvälin jännitelujuus alkaa lineaarisesti laskea. Ajanhetkellä 0,0623 sekuntia katkaisijan avausväliä rasittava pitkittäinen jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden ja tapahtuu esisytyminen.</i>	69
Kuva 43.	<i>1-johtimisen 20 kV AHXCMK-WTC-kaapeli ja PSCAD:n kaapelin malli. Muokattu lähteestä [46].</i>	70
Kuva 44.	<i>Viitteessä [50] laboratoriossa toteutettu mittauskytkentä kulkuaallon nopeuden mittaamiseksi.</i>	74
Kuva 45.	<i>PSCAD-malli, jolla tutkitaan kulkuaallon matka-aikaa ja värähtelytaajuutta AXHCMK-WTC-kaapelissa.</i>	75
Kuva 46.	<i>Jännite kaapelin alkupäässä punaisella ja jännite kaapelin loppupäässä sinisellä. Kaapelipituus 242 m.</i>	76
Kuva 47.	<i>Jännite kaapelin alkupäässä punaisella ja jännite kaapelin loppupäässä sinisellä. Kaapelipituus 484 m.</i>	76
Kuva 48.	<i>PSCAD-malli, jolla tutkitaan tyhjäkäyvän kaapelin tuottamaa kapasitiivista varausvirtaa.</i>	78
Kuva 49.	<i>Tyhjäkäyvän 1 km pitkän 20 kV 185 mm² AHXCMK-WTC-kaapelin tuottama varausvirta.</i>	78
Kuva 50.	<i>Havainnekuva laboratorioverkosta Västeråsissa.</i>	82
Kuva 51.	<i>Pääjännitteet (ylhäällä) ja vaihejännitteet (alhaalla) muuntajan navoissa virran katkaisun hetkellä. Muokattu lähteestä [7].</i>	82
Kuva 52.	<i>Simuloidut pääjännitteet (ylhäällä) ja vaihejännitteet (alhaalla) muuntajan navoissa induktiivisen kuormitusvirran katkaisun yhteydessä.</i>	83
Kuva 53.	<i>Havainnekuva laboratorioverkosta Västeråsissa, jolla tutkitaan tyhjäkäyvän muuntajan energisointia.</i>	84

Kuva 54.	<i>Muuntajan napajännitteet energisoinnissa. Oikealla lähikuva ensimmäisistä uudelleensyöttymisistä. Muokattu lähteestä [8].</i>	84
Kuva 55.	<i>Simuloidut vaihejännitteet muuntajan navoissa energisoinnin yhteydessä.</i>	85
Kuva 56.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaihejännitteet simuloinnissa 2. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	89
Kuva 57.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaihejännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2000 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	90
Kuva 58.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 2. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	91
Kuva 59.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2 m, syöttävän verkon kaapelipituus 1200 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 4 MVA.</i>	92
Kuva 60.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaiheiden ja maan väliset jännitteet simuloinnissa 9. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 1200 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	94
Kuva 61.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	97
Kuva 62.	<i>Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 9. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 200 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.</i>	97

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABB	Asea Brown Boveri
BIL	Basic Insulation Level, peruseristystaso
DC	Direct Current, tasavirta
EMTP	Electromagnetic Transient Program, sähkömagneettisten transienttien simulointiin tarkoitettu ohjelmisto
GIS	Gas Insulated Switchgear, kaasueristeinen kojeisto
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähkötekniikan standardoimisjärjestö
LIWV	Lightning Impulse Withstand Voltage, salamasyöksyjännitteen kestotaso
MO	Metallioksidi
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni
PFVV	Power Frequency Withstand Voltage, käyttötaajuuden jännitteen kestotaso
PM	Päämuuntaja
PSCAD	Power System Computer Aided Design, sähkömagneettisten transienttien simulointiin tarkoitettu ohjelmisto
PVC	Polyvinyylikloridi
RMF	Radial Magnetic Field, säteittäinen magneettikenttä
RMS	Root Mean Square, tehollisarvo
RMU	Ring Main Unit, rengassyöttökojeisto
RRDS	Rate of Rise of Dielectric Strength, jännitelujuuden kasvunopeus
SF ₆	Sulphur Hexafluoride, rikkiheksafluoridi
SIWV	Switching Impulse Withstand Voltage, kytkentäsyöksyjännitteen kestotaso
TOV	Temporary Overvoltage, hetkellinen ylijännite
TRV	Transient Recovery Voltage, palaava transienttijännite
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VCB	Vacuum Circuit Breaker, tyhjiökatkaisija
XLPE	Ristisilloitettu polyeteeni
YJS	Ylijännitesuoja
ZnO	Zinc Oxide, Sinkkioksidi
A_c	johtimen poikkipinta-ala
A_S	kaapelin kosketussuojan poikkipinta-ala
A_{VCB}	tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvunopeus
B	magneettivuon tiheys
b	suskeptanssi pituusyksikköä kohti
B_{VCB}	tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuus heti koskettimien irrotessa
c	kapasitanssi pituusyksikköä kohti
c_0	valonnopeus tyhjiössä
C_L	katkaisijan kuorman puoleinen yhteiskapasitanssi
C_S	syöttävän verkon kapasitanssi
C_{SI}	katkaisijan avausvälin kapasitanssi

c_{TOV}	suhdeluku, joka kuvaa suurimman RMS-arvona annetun verkkotajuisen ylijännitteen ja ylijännitesuojan mitoitusjännitteen välistä suhdetta ajan suhteen logaritmisella asteikolla esitettynä
C_{VCB}	tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukykyyn kasvunopeus
D	ylijännitesuojan ja suojattavan kohteen etäisyys
d_1	ylijännitesuojan liitosjohtimien pituus
d_2	ylijännitesuojan maadoitusjohtimien pituus
di/dt_{crit}	tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukyky
D_{VCB}	tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukyky välittömästi koskettimien irrotessa
E_{CL}	katkaisijan kuorman puoleisen yhteiskapasitanssin energia
E_{LL}	kuorman induktanssin energia
F	voima
f	taajuus
f_1	korkeataajuisen transienttivirran suuritaajuisimman komponentin taajuus
f_2	korkeataajuisen transienttivirran määräävimman komponentin taajuus
g	konduktanssi pituusyksikköä kohti
i	virran hetkellisarvo
i_1	tarkastelupisteeseen saapuva virta-aalto
i_{1r}	tarkastelupisteestä heijastuva virta-aalto
i_2	tarkastelupisteestä jatkava virta-aalto
i_{chop}	virta katkeamishetkellä
i_d	ylijännitesuojan nimellipurkausvirta
i_i	virran hetkellisarvo, joka johtaa valokaaren epästabiiliuteen
i_{peak}	verkkotajuisen virran amplitudi
\underline{I}_R	johdon loppupään virtaosoitin
\underline{I}_S	johdon alkupään virtaosoitin
j	imaginääriyksikkö
k	maasulkukerroin
k_{TOV}	suhdeluku, joka kuvaa suurimman RMS-arvona annetun verkko-tajuisen ylijännitteen ja ylijännitesuojan mitoitusjännitteen välistä suhdetta ajan suhteen logaritmisella asteikolla esitettynä
l	induktanssi pituusyksikköä kohti
L_C	kaapelin induktanssi
$l_{kaapeli}$	kaapelin pituus
L_L	kuorman induktanssi
L_P	suojausetäisyys
L_S	syöttävän verkon induktanssi
L_{SI}	katkaisijan avausvälin induktanssi
p	kulkuaallon hetkellinen teho
Q_{th}	suurin varaus, joka voi siirtyä ylijännitesuojan läpi 3 minuutin aikana toimintakokeessa aiheuttamatta ylijännitesuojan termistä läpilyöntiä
r	resistanssi pituusyksikköä kohti
r_1	johtimen ulkosäde
r_2	kaapelin eristyskerroksen ulkosäde
r_3	kaapelin kosketussuojan ulkosäde PSCAD:ssä
r_4	kaapelin ulkosäde PSCAD:ssä
R_C	kaapelin resistanssi

R_{DC}	kaapelin tasavirtaresistanssi
R_{SI}	katkaisijan avausvälin resistanssi
S	ylijännitteen jyrkkyys
s	johdon pituus x-akselin suunnassa
t	aika
t_{chop}	ajanhetki, jolla virta katkeaa ennenaikaisesti
t_{close}	katkaisijan sulkeutumishetki
t_{open}	katkaisijan avautumishetki
t_{TOV}	suurimman käyttötaajuuden ylijännitteen kestoaika
u	jännitteen hetkellisarvo
u_1	tarkastelupisteeseen saapuva jänniteaalto
u_{1r}	tarkastelupisteestä heijastuva jänniteaalto
u_2	tarkastelupisteestä jatkava jänniteaalto
U_b	tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuus
U_c	ylijännitesuojan suurin jatkuva käyttöjännite
u_{chop}	jännite katkeamishetkellä
$u_{cl,max}$	katkaisijan kuorman puoleisen yhteiskapasitanssin suurin jännite
U_m	jänniteportaan suurin käyttöjännite
U_P	ylijännitesuojan suojaustaso
U_R	verkon mitoitusjännite (nimellisjännite)
\underline{U}_R	johdon loppupään jänniteosoitin
U_{RES}	jäännösjännite
\underline{U}_S	johdon alkupään jänniteosoitin
u_s	syöksyjänniteaallon amplitudi
U_{TOV}	suurin verkossa esiintyvä käyttötaajuinen ylijännite
U_{TRV}	palaava transienttijännite
v	kulkuaallon etenemisnopeus
W	kulkuaallon energia
W_{th}	suurin kJ/kV-yksikössä mitoitusjännitteellä ilmoitettu energia, joka voi kulkea ylijännitesuojan läpi toimintakokeessa 3 minuutin aikana aiheuttamatta termistä läpi-lyöntiä
x	reaktanssi pituusyksikköä kohti
\underline{Y}	johdon poikittaisadmittanssi
\underline{Z}	johdon pitkittäisimpedanssi
Z_L	johdon aaltoimpedanssi
Z_T	muuntajan aaltoimpedanssi
Z_w	aaltoimpedanssi
α	vaimennuskerroin
α_{VCB}	katkaisijan kosketinmateriaalille ominainen vakio
β_{VCB}	katkaisijan kosketinmateriaalille ominainen vakio
ε	permittiviteetti
ε_0	tyhjiön permittiviteetti
ε_r	suhteellinen permittiviteetti
ε_{r1}	kaapelin eristemateriaalin suhteellinen permittiviteetti PSCAD:ssä
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ρ	heijastuskerroin
ρ_c	johdinmateriaalin resistiivisyys PSCAD:ssä
ρ'_c	johdinmateriaalin resistiivisyys

τ	läpäisykerroin
φ	virran ja jännitteen vaihe-ero
ω	kulmataajuus

1. JOHDANTO

Muuntajien ja induktiivisten kuormien virran katkaisu ja energisointi tyhjiökatkaisijalla voivat aiheuttaa ylijännitteitä, jotka voivat johtaa muuntajan vaurioitumiseen. Erityisesti kuivamuuntajat ovat rakenteensa vuoksi alttiita ylijännitteille. Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia tyhjiökatkaisijan kytkentätoimenpiteiden aiheuttamia transienttiylijännitteitä teollisuuden keskijänniteverkossa ja selvittää missä tapauksissa kuivamuuntajat tulisi varustaa ylijännitesuojilla tyhjiökatkaisijan aiheuttamia transienttiylijännitteitä vastaan.

Induktiivista virtaa katkaistaessa tyhjiökatkaisijalla voi syntyä transienttiylijännitteitä. Tällaisia tilanteita esiintyy esimerkiksi muuntajan tyhjäkäyntivirtaa, moottorin käynnistysvirtaa tai reaktorin virtaa katkaistaessa. Samoin ylijännitteitä voi syntyä, kun muuntajaa energisoidaan. Syntyvien ylijännitteiden suuruuteen vaikuttavat virran ja jännitteen hetkellisarvot kytkentähetkellä, verkon vaimennusominaisuudet, katkaisijan ominaisuudet, kuorman ominaisuudet sekä verkon induktanssit ja kapasitanssit katkaisijan kummallakin puolella. [1]

Tyhjiökatkaisijan aiheuttamat kytkentäylijännitteet ovat hyvin tunnettu ilmiö ja aiheesta on tehty tutkimusta verrattain paljon. Esimerkiksi viitteissä [2-8] käsitellään ilmiötä. Syntyvän ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa kuitenkin moni asia, eikä aina ole selvää, milloin ylijännitteet ovat niin suuria, että muuntajia pitäisi suojata ylijännitesuojilla. Tässä työssä keskitytään tutkimaan varsin tyypillistä teollisuuden keskijänniteverkon tilannetta, jossa tyhjiökatkaisijalla varustettu keskijännitekojeiston muuntajalähtö syöttää kaapelilla suoraan kuivamuuntajaa. Työssä perehdytään ilmiön taustalla olevaan teoriaan, rakennetaan simulointimalli PSCAD-transienttilaskentaohjelmistolla ja pyritään erilaisia tilanteita simuloimalla selvittämään, milloin ylijännitteet ovat niin suuria, että kuivamuuntajat tulisi varustaa ylijännitesuojilla. Lisäksi työssä otetaan kantaa siihen, miten ylijännitesuojat tulisi sijoittaa, että ne antavat parhaimman suojan.

Luvussa 2 perehdytään yleisesti ylijännitteisiin ja niiden luokitteluun. Luku 3 käsittelee tyhjiökatkaisijaan liittyvää teoriaa ja ilmiötä, joita tyhjiökatkaisijassa ja verkossa tapahtuu induktiivisen virran katkaisun ja kytkennän yhteydessä. Lisäksi lyhyesti sivutaan tyhjiökatkaisijan ja SF₆-eristeisen katkaisijan eroja. Luvussa 4 käsitellään kaapelin mallintamisen teoriaa ja kulkuaaltoteoriaa, sillä mallinnettaessa nopeita transientti-ilmiöitä johdolla, johto pitää mallintaa jakautunein vakioin. Luvussa 5 kuvataan yleisesti kuivamuuntajia, sekä ylijännitteiden vaikutusta kuivamuuntajissa ja kuivamuuntajan vikaantumismekanismeja. Lisäksi luvussa 5 perehdytään ylijännitesuojiiin ja ylijännitesuojaukseen. Luvussa 6 kerrotaan, miten eri komponentit on mallinnettu simulointimallissa. Erityisesti

on syytä huomata, että PSCAD-transienttilaskentaohjelmistossa ei ole valmista tyhjiökatkaisijan mallia, vaan se on itse luotu tässä työssä. Luku 7 on työn ydin, jossa esitetään simuloinnit ja niiden tulokset. Työssä simuloidaan erilaisia tilanteita ja tulosten perusteella pyritään selvittämään missä tilanteissa ylijännitesuojat ovat välttämättömiä.

2. YLIJÄNNITTEET JA ERISTYSRAKENTEET

Ylijännitteellä tarkoitetaan sähköverkoissa jännitettä, joka ylittää verkolle tai sen komponentille ominaisen eristysrakenteen referenssiarvon [1]. Ylijännitteitä voidaan jakaa luokkiin sen mukaan mihin eristysväliin ne kohdistuvat. Vaihevälin referenssiarvona voidaan pitää pääjännitteen huippuarvoa $U_m\sqrt{2}$, jossa U_m on kyseisen jänniteportaan suurimman käyttöjännitteen tehollisarvo (highest voltage for equipment). Vaiheen ja maan eristysvälistä puhuttaessa eristysvälin referenssiarvona käytetään vastaavan vaihejännitteen huippuarvoa $U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$. IEC:n mukaisia verkon nimellisjännitteitä U_R vastaavia laitteiden suurimpia käyttöjännitteitä U_m on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Eräitä IEC:n standardoimia verkon nimellisjännitteitä ja niitä vastaavat suurimmat käyttöjännitteet [9].

U_m/kV	3,6	7,2	12	24	36	52	123	245	420
U_R/kV	3	6	10	20	30	45	110	220	400

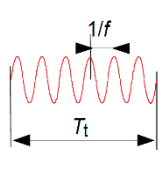
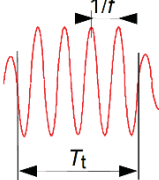
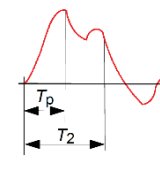
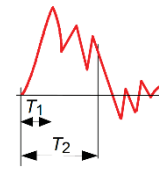
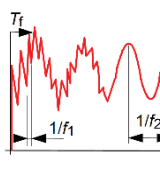
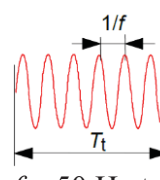
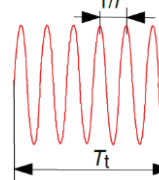
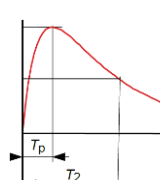
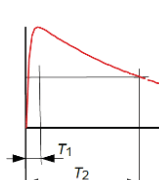
Verkon kytkinlaitteita, kuten katkaisijoita ja erottimia suunniteltaessa vaihevälin ja vaiheen ja maan välisten ylijännitteiden lisäksi tärkeää huomioida myös kytkinlaitteen avausvälejä rasittavat ylijännitteet. Näitä ylijännitteitä kutsutaan pitkittäisiksi ylijännitteiksi. [1]

2.1 Ylijännitteiden luokittelu

Ylijännitteitä voidaan luokitella eri tavoin. Ennen ylijännitteitä luokiteltiin ylijännitteen alkuperän mukaan, mutta nykyisin suositellaan käytettäväksi ylijännitteen muotoon perustuvaa luokittelutapaa. Karkeasti ylijännitteet voidaan jakaa kahteen luokkaan: heikosti vaimeneviin tai vaimenemattomiin ylijännitteisiin, joiden kestoaika on tyypillisesti melko pitkä, ja nopeasti vaimeneviin lyhytkestoisiin ylijännitteisiin. Edellisistä puhuttaessa käytetään nykyisin termiä pientaajuiset ylijännitteet. Jälkimmäisistä eli lyhytkestoisista nopeasti vaimenevista ylijännitteistä käytetään nimitystä transienttiylijännitteet ja ne voidaan edelleen jakaa kolmeen eri luokkaan: loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttiylijännitteisiin.

Jännitelujuus riippuu jänniterasituksen muodosta ja kestoajasta. Tästä syystä on ollut tarpeen määritellä koejännitemuodot, joilla pyritään jäljittelemään eri ylijännitelajeja. Sähköverkon laitteiden esimerkiksi muuntajien ja katkaisijoiden testausvaiheessa ne altistetaan koejännitetesteille, joilla varmistetaan laitteen eristysrakenteiden jännitelujuus. Eri ylijännitelajit ja niitä vastaavat standardoidut koejännitemuodot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ylijänniteluokat ja -muodot sekä niitä vastaavat standardoidut koejännitteet. Perustuu lähteeseen [10].

Luokka	Pientaajuiset ylijännitteet		Transienttiylijännitteet		
	Jatkuva	Hetkellinen	Loivat	Jyrkät	Erittäin jyrkät
Jännitteen tai ylijännitteen muoto					
Jännitteen tai ylijännitteen kestoajan vaihteluväli	$f = 50 \text{ Hz}$ tai 60 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 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 jännitekestoituskoete	a	Lyhytkestoinen käyttötaajuinen testi	Kytkeäsyökypulssi	Salama- syökypulssi	a

^a Kyseisestä laitetypistä vastaava toimikunta määrittelee erikseen.

Erittäin jyrkille transienttiylijännitteille ei ole standardisoitua koejännitettä. Eri ylijänniteluokista ja ylijännitteiden syntymekanismeista kerrotaan tarkemmin alempana alaluissa.

2.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuisista ylijännitteistä (englanniksi temporary overvoltages) käytettiin aiemmin nimitystä käyttötaajuiset ylijännitteet. Niille on tyypillistä verrattain pitkä kesto aika ja heikko vaimenevuus. Pientaajuisia ylijännitteitä aiheutuu tyypillisesti verkon tilanmuutoksista, joita ovat mm. vian syntyminen ja katkaisijatoiminta. Yleensä pientaajuisiin ylijännitteisiin liittyy myös loiva transienttiylijännite. [1]

Pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttajia ovat mm.

- verkon maasulku
- resonanssit ja ferresonanssit
- vajaanapainen toiminta tai katkos
- generaattoreiden itseherätys
- ferranti-ilmiö.

Verkon yksivaiheinen maasulku on yleisin pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttaja. Maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa terveiden vaiheiden vaihejännitteet voivat nousta suurimmillaan noin pääjännitteen suuruiseksi yksivaiheisessa jäykässä maasulussa. Maasulkuylijännitteen suuruuteen vaikuttavat verkon tähtipisteen maadoitustapa ja vikaimpedanssi. Maasulkukerroin k kuvaa terveen vaiheen vaihejännitteen huippuarvon suuruutta vian aikana suhteessa normaalitilan vaihejännitteen huippuarvoon. Maasta erotetun verkon tapauksessa maasulkukerroin on siis $\sqrt{3} \approx 1,8$. Suomessa 245 kV ja 420 kV suurvoimansiirtoverkot ovat tehollisesti maadoitettuja. Tämä tarkoittaa sitä, että niiden maasulkukerroin on $k \leq 1,4$. [1]

Ferranti-ilmiö tulee vastaan siirtojännitetasoilla, kun pitkiä kuormittamattomia siirtojohdot kytetään jännitteisiksi. Tällöin tyhjäkäyvän siirtojohdon kapasitiivinen loisvirta aiheuttaa johdon pitkittäisreaktanssissa negatiivisen jännitehäviön ja johdon loppupään jännite nousee. Tästä syystä esimerkiksi Suomessa 420 kV verkon sähköasemilla verkkomuuntajien tertiäärikäämeihin on kytketty reaktoreita 420 kV johtojen varausloistehon kompensoimiseksi. [1]

Erilaiset resonanssitilanteet ovat myös mahdollisia pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttajia. Ne syntyvät siten, että verkossa on jokin värähtelypiiri, joka alkaa resonoidaan saatuaan herätteen, jonka taajuus on lähellä värähtelypiirin ominaistaajuutta. Heräte voi esimerkiksi olla yliaaltolähde. Tyypillinen resonanssi on esimerkiksi syöttömuuntajan ja sen lähellä alajännitepuolella olevan kompensointikondensaattorin muodostama LC-piiri. Heräte piiriin voi tulla esimerkiksi muuntajan alajännitepuolelle kytketyn suuntaajakäytön verkkoon tuottamista yliaalloista. Ferresonanssi eli kippivärähtely puolestaan syntyy kun kapasitanssin ja epälineaarisen induktanssin muodostama sarjapiiri alkaa resonoidaan. Ehkä parhaiten tunnettu kippivärähtelyn muoto on yksinapaisen magneettisen jännitemuuntajan värähtely kiskoston hajakapasitanssien kanssa. Kippivärähtelyn vaimentamiseksi jännitemuuntajan avokolmioon kytetään yleensä vaimennusvastus.

2.1.2 Loivat transienttiylijännitteet

Loivia transienttiylijännitteitä (englanniksi slow-front overvoltages) kutsuttiin aiemmin kytkentäylijännitteiksi [1]. Kuten pientaajuiset ylijännitteet, myös loivat transienttiylijännitteet syntyvät useimmiten verkon erilaisten tilanmuutosten seurauksena. Ehkä tyypillisimmin loivia transienttiylijännitteitä syntyy juuri kytkentätoimenpiteiden seurauksena,

kuten vanha nimi kytkentäylijännitteet kuvaa. Myös vikatapauksien (oiko- ja maasulku) yhteydessä voi esiintyä loivia transienttiylijännitteitä.

Pientaajuisista yliäänitteistä poiketen loivat transienttiylijännitteet rasittavat vaihevälin ja vaiheen ja maan välisen eristyksen lisäksi kytkinlaitteiden kuten katkaisijoiden avausvälejä. Virran katkaisun jälkeen katkaisijan avausväliin vaikuttava jännite muodostuu verkon puoleiseen ja kuorman puoleiseen napaan vaikuttavien jännitteiden erotuksena. Yleisnimityksenä näille jännitteille käytetään nimitystä palaava jännite (recovery voltage). Kun puhutaan heti virran katkeamisen jälkeen avausväliin vaikuttavasta jännitteestä, käytetään termiä palaava transienttijännite (transient recovery voltage). [1]

Kytkeätoimenpiteen seurauksena syntyvän loivan transienttiylijännitteen muoto ja suuruus riippuvat voimakkaasti virran katkaisuun tai kytkentään käytetyn kytkinlaitteen kuten katkaisijan ja ympäröivän verkon ominaisuuksista. Verkon induktanssit ja kapasitanssit katkaisijan molemmin puolin yhdessä kuorman kanssa määräävät syntyvien tasoitusvärähtelyjen taajuuden. Lisäksi yliäänitteen suuruuteen vaikuttavat virran ja jännitteen hetkellisarvot kytkentähetkellä, verkon vaimennusominaisuudet ja katkaisijan ominaisuudet. [1]

Loivia transienttiylijännitteitä aiheuttavia tilanteita ovat esimerkiksi [1]:

- kuorman kytkentä verkkoon
- johdon jännitteenanto ja jälleenkytkentä
- erilaiset verkon vikatilanteet
- kuormitusvirran katkaisu.

Kuorman kytkentä verkkoon on luonnollinen kytkentätoimenpide, joka aiheuttaa loivia transienttiylijännitteitä. Sekä kapasitiivisen, että induktiivisen kuorman kytkentä aiheuttaa yliäänitteitä. Tällaisia kuorman kytkentätilanteita ovat esimerkiksi kondensaattoripariston ja moottorin tai muuntajan kytkentä verkkoon. Kondensaattorin kytkennän aiheuttamat yliäänitteet ovat suhteellisen pieniä. Tilannetta kuitenkin pahentaa, jos verkolla sattuu olemaan resonanssitaajuus kondensaattorin kytkennän aiheuttamalla värähtelytaajuudella. Kondensaattorikytkennän aiheuttamaa yliäänitetransienttia on vaikea eliminoida muuten kuin vaikuttamalla itse katkaisijan toimintaan. Yksi tapa rajoittaa yliäänitteitä on käyttää ns. tahdistettua kytkentää, missä katkaisijan kunkin vaiheen napa suljetaan yksitellen niin, että syntyvä yliäänite on mahdollisimman pieni. [1]

Suurilla käyttöjännitteillä yksi tärkeimmistä yliäänitteiden aiheuttajista on tyhjäkäyvän johdon kytkeminen jännitteiseksi. Ferranti-ilmiön lisäksi tämä toimenpide on yliäänitteiden kannalta ongelmallinen siksi, että johdon jännitteenanto synnyttää kulkuaaltoilmiön, jossa loppupäässä tapahtuva heijastus kaksinkertaistaa jännitteen johdolla. [1]

Erilaiset verkon vikatilanteet synnyttävät pientaajuisten ylijännitteiden lisäksi myös loivia transienttiylijännitteitä. Sekä vian syntyminen, että sen poistaminen katkaisijatoiminnon avulla verkosta aiheuttavat ylijännitetransientteja. Vaikka yleisin ylijännitteitä aiheuttava vika on maasulku, niin kuitenkin ylijännitteidenkin kannalta vaikein tilanne on oikosulkuvirran katkaisu. Oikosulku verkossa laskee sähköaseman kiskoston jännitettä. Jännite oikosulun aikana on sitä matalampi, mitä lähempänä kiskostoa vika on. Kun katkaisija avataan, vian aiheuttama jännitehäviö poistuu, jolloin kiskoston jännite palautuu värähtelyjen kautta syöttävän verkon ja muuntajan käämikytkimen asennon määräämään arvoon. Myös katkeileva maasulku vikana aiheuttaa ylijännitteitä, joiden huippuarvot voivat olla jopa 3,0 – 4,0 p.u. Vian syntyminen ja poistaminen eivät kuitenkaan yleensä aiheuta merkittäviä ylijännitteitä. [1]

Kuormitusvirran, induktiivisen ja kapasitiivisen, katkaisu aiheuttaa ylijännitteitä. Tämän työn kannalta virran katkaisu ja erityisesti induktiivisen virran katkaisu on kaikkein tärkein ylijännitteen syntymekanismi. Induktiivisen virran katkaisuun liittyvien ylijännitetransienttien syntymekanismeja käsitellään tarkemmin luvussa 3. Tässä työssä tarkasteltavat tyhjiökatkaisijan aiheuttamat kytkentäylijännitteet eivät kuitenkaan ole luonteeltaan loivia transienttiylijännitteitä, vaan erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä, sillä niiden rinnannousuajat ovat hyvin lyhyitä.

2.1.3 Jyrkät ja erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

Jyrkistä transienttiylijännitteistä (englanniksi fast-front overvoltages) käytettiin aiemmin nimitystä ilmastolliset ylijännitteet. Useimmiten ne aiheutuvatkin salamaniskujen seurauksena. Salamanisku aiheuttaa ylijännitteen sähköverkkoon pääasiassa kolmella eri mekanismilla: suora salamanisku jännitteeseen johtimeen, maadoitettuun osaan osuneen takaiskun kautta tai induktion kautta. [1]

Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet (englanniksi very fast-front overvoltages) ovat uusi ylijänniteluokka. Erittäin jyrkille transienttiylijännitteille ei ole määritelty koejännitettä. Joka tapauksessa niiden nousuajat ovat nanosekuntien luokkaa [9]. Erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä aiheuttavat tyypillisesti erotintoiminnot. Erottimen avautuminen ja sulkeutuminen on huomattavasti hitaampaa kuin katkaisijan. Tästä syystä avautumisen ja sulkeutumisen aikana erottimen avausvälissä tapahtuu useita esisyttymisiä, valokaaren sammumisia ja uudelleensyttymisiä, jotka synnyttävät erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä. Myös tyhjiökatkaisijan avautumisen ja sulkeutumisen yhteydessä tapahtuvat uudelleensyttymiset ja esisyttymisen aiheuttavat erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä. [1; 11; 12]

2.2 Eristysrakenteiden jännitelujuus

Eristysrakenteen jännitelujuudella tarkoitetaan sähkölaitteen eristyksen kykyä kestää jänniterasituksia ilman vahinkoa tuottavia sähköpurkauksia [9]. Jos eristysrakenteeseen kohdistuvaa jänniterasitusta kasvatetaan, alkaa eristeessä tapahtua osittaispurkauksia. Täydellinen purkaus eli läpi- tai ylilyönti tapahtuu, kun purkaus yhdistää elektrodit kokonaan, jolloin virta kasvaa voimakkaasti ja elektrodien välinen jännite romahtaa. Termiä läpilyönti käytetään, kun purkaus tapahtuu pääasiassa vain yhtä eristettä sisältävässä elektrodivälissä. Ylilyönti tarkoittaa purkausta kahden eristemateriaalin rajapinnassa, esimerkiksi posliinista valmistetun tukieristimen tapauksessa posliinin ja ilman rajapinnassa. [9]

Läpi- ja ylilyönnin vaikutusten perusteella eristeet voidaan jakaa kahteen ryhmään: palautuviin eristysiin ja palautumattomiin eristysiin. Palautuvia eristyksiä ovat esimerkiksi nesteet ja kaasut, joiden ominaisuudet eivät merkittävästi muutu läpilyönnin seurauksena. Esimerkiksi ilmaeristeisen kipinävälin jännitelujuusominaisuudet palautuvat ennalleen valokaaren sammuttua. Palautumattomia eristyksiä ovat esimerkiksi kiinteät eristeet, jotka menettävät lujuusominaisuutensa läpilyönnissä. [9]

2.2.1 Eristyskoordinaatio

Eristysrakenteiden täydellinen mitoittaminen ei ole koskaan taloudellisesti järkevää [1]. Ylijännitteiden suuruus sähköverkoissa on satunnaissuure. Tämän vuoksi ei ole käytännössä mahdollista tai taloudellisesti järkevää mitoittaa eristysrakenteita niin, ettei yli- tai läpilyöntejä ikinä tapahtuisi. Sähköverkkojen eristysrakenteet pyritäänkin mitoittamaan niin, että ne kestävät suurimman osan niiden suunnitellun käyttöiän aikana esiintyvistä jänniterasituksista ilman vakavia vaurioita tai pitkiä käyttökeskeytyksiä. Eristyskoordinaatiolla tarkoitetaan sähkölaitteiden jännitelujuuden mitoittamista suhteessa esiintyvien ylijännitteiden todennäköisyyteen ja suuruuteen sekä suojalaitteiden ominaisuuksiin niin, että ylijännitteistä johtuvien laitevaurioiden ja käyttökeskeytysten määrä laskee taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle [13]. Ylijännitesuojaus on oleellinen osa eristyskoordinaatiota. Ylijännitesuojilla ylijännitteet voidaan rajata niin alhaisiksi, etteivät ne enää ole vaaraksi eristysrakenteille [1]. Nyky-yhteiskunnan sähkönriippuvuus vaikuttaa myös eristyskoordinaatioon, sillä nykyään hyväksyttävä käyttökeskeytysten määrä on huomattavasti pienempi kuin menneinä vuosikymmeninä. Esimerkiksi sähkömarkkinalaki [14] Suomessa määrittelee selvästi hyväksyttävät keskeytysajat ja keskeytystiheydet.

Eristyskoordinaatio on kaksivaiheinen prosessi. Ensin määritetään mitoittavien jänniterasitusten suuruus ja esiintymistiheys. Näiden perusteella sitten määritellään tarvittavat eristystasot, että laitteet kestävät niihin kohdistuvat rasitukset. Laitteisiin kohdistuvat jänniterasitukset riippuvat vahvasti niiden sijoituspaikasta. Esimerkiksi teollisuusverkoissa tai laajoissa kaapeliverkoissa ukkosen aiheuttamien jänniterasitusten todennäköisyys on pieni avojohtoverkkoihin verrattuna, joka pienentää niiden eristystasovaatimuksia. Kun

laitteilta vaadittavat eristystasot on määritelty, varmistetaan että kaikkien laitteiden eristystasot täyttävät niiltä vaaditut jännitelujuusominaisuudet. IEC-standardi 60071-1 [10] määrittelee eristyskoordinaation toteutustavat ja koejännitteille aseteltavat vaatimukset. Eristyskoordinaation toteutustapoja on kaksi: konventionaalinen ja tilastollinen menetelmä. [1]

Tärkeä osa eristyskoordinaatiota on ylijännitesuojien valinta ja sijoittaminen. Ylijännitesuojilla voidaan rajata verkossa esiintyvät transienttiluonteiset ylijännitteet niin pieniksi, että niistä ei ole vaaraa laitteiden eristysrakenteille. Siten ylijännitesuojaus vaikuttaa verkossa esiintyvien mitoittavien jänniterasitusten suuruuteen ja esiintymistiheyteen. Yleensä suurin painoarvo annetaan tärkeimpien verkon laitteiden suojaukselle. Tyypillisesti nämä laitteet ovat myös kalleimpia ja omaavat pisimmät korjausajat. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi suurmuuntajat, generaattorit ja isot moottorit, GIS-laitokset, kaapelipäätteet ja kaapelijatkot. Nykyään uusissa asennuksissa ylijännitesuojaukseen käytetään käytännössä pelkästään metallioksidisuoja, mutta aiemmin esimerkiksi kipinävälisuojat ovat olleet yleisiä myös. Ylijännitesuojaukseen ja ylijännitesuojiiin palataan tarkemmin luvussa 5. [1]

2.2.2 Koejännitteet ja standardien mukainen jännitetestaus

Käytännössä eristysrakenteen jännitelujuuden riittävyys todetaan koejännitteillä. Standardi IEC 60071-1 [10] määrittelee koejännitteiden muodot ja huippuarvot. IEC:n mukaan eristysrakenteen jännitelujuuden osoittamiseen vaaditaan kaksi eri jännitemuotoa. Käyttöjännitteille $1 \text{ kV} < U_m < 245 \text{ kV}$ koejännitteinä käytetään käyttötaajuista vaihtojännitekoetta ja salamasyöksyjännitekoetta. Yli 245 kV käyttöjännitteillä vaihtojännitekoe on korvattu kytkentäsyöksyjännitekokeella. Tämä johtuu siitä, että ilmaeristeisten eristysrakenteiden jännitelujuuden minimi saavutetaan loivien transienttiylijännitteiden kuvaamiseen tarkoitetulla pulssimuodolla. [1]

Taulukko 3 esittää otteita IEC 60071-1 standardista. Taulukossa on esitetty Suomessa yleisesti käytössä olevia suurimpia käyttöjännitteitä ja niitä vastaavat kestotasovaatimukset. Kestotasot ovat samalla jännitekokeissa käytettäviä koejännitteitä.

Taulukko 3. Standardien IEC 60071-1, IEC 62271-102 ja IEC 60694 mukaisia eristystasoarvopareja. U on koejännite, v-m on vaihe-maa, v-v on vaihe-vaihe ja pitk. on pitkittäinen eristys. Alleviivatut eristystasot ovat Suomessa valintatapauksissa sovellettuja eristystasoja [1].

Laitteen suurin käyttöjännite U_m/kV	Koejännitteet						
	vaihtojännite U_{PFWV}^1/kV		salamasyöksyjännite U_{LIWV}^2/kV		kytkentäsyöksyjännite U_{SIWV}^3/kV		
	v-m v-v	pitk.	v-m v-v	pitk.	v-m	v-v	pitk.
12	28	32	60, <u>75</u>	70, <u>85</u>			
24	50	60	95, <u>125</u>	110, <u>145</u>			
52	95	110	250	290			
123	(185)	210	450	520			
245	<u>230</u>	265	<u>550</u>	<u>630</u>			
	360	415	850	950			
	<u>395</u>	460	<u>950</u>	<u>1050</u>			
	460	530	1050	1200			
420	520	610	<u>1300</u>	1300+(240)	950	1425	900+(345)
	520	610	<u>1425</u>	1425+(240)	<u>1050</u>	1575	900+(345)

IEC-standardi mahdollistaa eristystason valinnan vaihtoehtoisten arvojen joukoista. Eristystason valintaan vaikuttavat mm. verkon tähtipisteen käsittelytapa, ylijännitesuojaus ja ylijännitesuojien ominaisuudet, sekä se kuinka altis verkko on jyrkille transienttiylijännitteille. Esimerkiksi teollisuusverkkojen tai muiden laajojen kaapeliverkkojen tapauksessa salamaniskun aiheuttamat ylijänniterasitukset ovat epätodennäköisiä tai käytännössä mahdottomia, jolloin voidaan valita alempi kestotaso salamasyöksyjännitteillä. [1]

¹ Power Frequency Withstand Voltage, käyttötaajuisen jännitteen kestotaso

² Lightning Impulse Withstand Voltage, salamasyöksyjännitteen kestotaso

³ Switching Impulse Withstand Voltage, kytkentäsyöksyjännitteen kestotaso

3. VIRRAN KATKAISU JA KYTKEMINEN TYHJIÖKATKAISIJALLA

Kuten luvussa 2 mainittiin, induktiivisen virran katkaisu tyhjiökatkaisijalla on merkittävä transienttiylijännitteitä aiheuttava kytkentätoimenpide. Myös kuorman kytkennässä, esimerkiksi muuntajan energisoinnissa, syntyy transienttiylijännitteitä. Erityisesti tyhjiökatkaisijoiden virran katkaisumekanismi on sellainen, että se tuottaa verkkoon transienttiylijännitteitä. Tässä luvussa perehdytään tyhjiökatkaisijoihin, sekä virran katkaisuun ja kytkentään tyhjiökatkaisijalla. Tarkastelun pääpaino on induktiivisen virran katkaisussa ja kytkennässä.

Sähköverkoissa kytkinlaitteiden tehtävä on muuttaa verkon topologiaa ja sitä kautta ohjata sähköenergian kulkua, sekä tarvittaessa irrottaa nopeasti viallinen verkon osa muusta verkosta vaarojen ja häiriötilanteiden välttämiseksi [9]. Lisäksi kytkinlaitteiden, erityisesti erottimien tulee toimia tarvittaessa erotuskohtana verkossa ja näin mahdollistaa turvallinen työskentely jännitteettömässä verkon osassa.

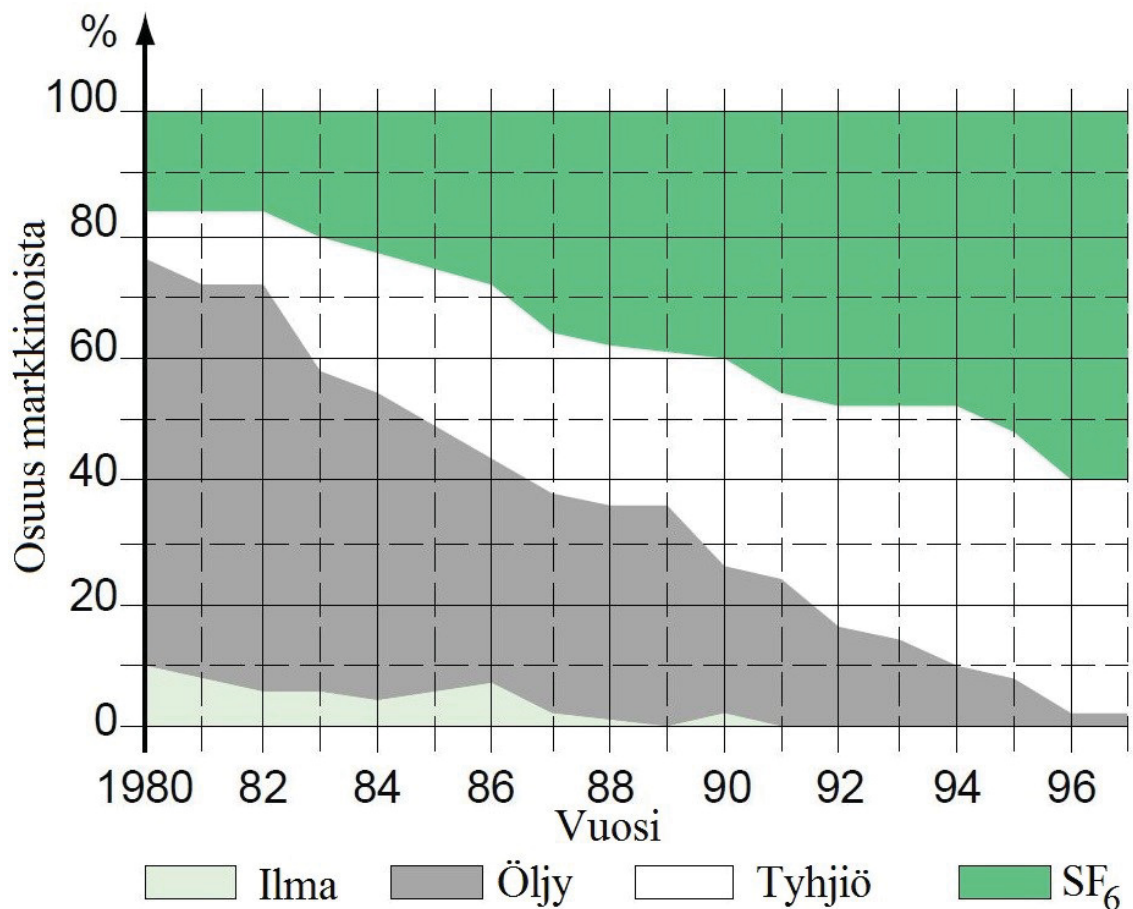
Tyypillisesti verkon kallein ja tärkein kytkinlaite on katkaisija [9]. Katkaisijat ovat kojeita, joiden tehtävä on sulkea tai avata virtapiiri, joko automaattisesti tai manuaalisesti ohjattuna. Tyypillinen automaattinen katkaisijan ohjaustilanne on esimerkiksi avautuminen ylivirran seurauksena. Tällöin mittamuuntajien kautta päävirtapiiriin kytketty rele antaa katkaisijalle avautumiskäskyn, kun mittamuuntajien läpi kulkeva virta ylittää releelle asetellun laukaisuportaan virta-arvon. Kytkinlaitteena katkaisijan tärkein ominaisuus on, että se kykenee sekä avaamaan, että sulkemaan oikosulkuvirtapiirin. Näin se pystyy katkaisemaan suurimmatkin verkossa esiintyvät virrat ja irrottamaan luotettavasti vikaantuneen verkon osan terveestä verkosta. [9]

Katkaisijatekniikka on kehittynyt paljon viimeisten vuosikymmenien aikana. Alle on listattu eri katkaisijalajeja, sekä niiden pääasialliset valmistuskaudet: [9]

- Ilmakatkaisijat
- Öljykatkaisijat (1905-1950)
- Vähäöljykatkaisijat (1930-1985)
- Paineilmakatkaisijat (1930-1970)
- SF₆-katkaisijat (1975-)
- Tyhjiökatkaisijat (1980-).

Nykyään suurilla jännitetasoilla (>72,5 kV) SF₆-katkaisijat ovat lähes täysin syrjäyttäneet muut katkaisijatyypit. Keskijännitealueella puolestaan katkaisijamarkkinat ovat jakautuneet varsin selvästi tyhjiökatkaisijoiden ja SF₆-katkaisijoiden kesken. Keskijännitteellä

nämä katkaisijatekniikat ovat korvanneet aiemmin käytössä olleet ilma- ja öljykatkaisijatekniikat. Kuvassa 1 on havainnollistettu katkaisijamarkkinoiden jakautumista eri katkaisijatekniikoiden kesken menneiden vuosikymmenten aikana.



Kuva 1. Keskijännitekatkaisijamarkkinoiden kehitys Euroopassa. Muokattu lähteestä [2].

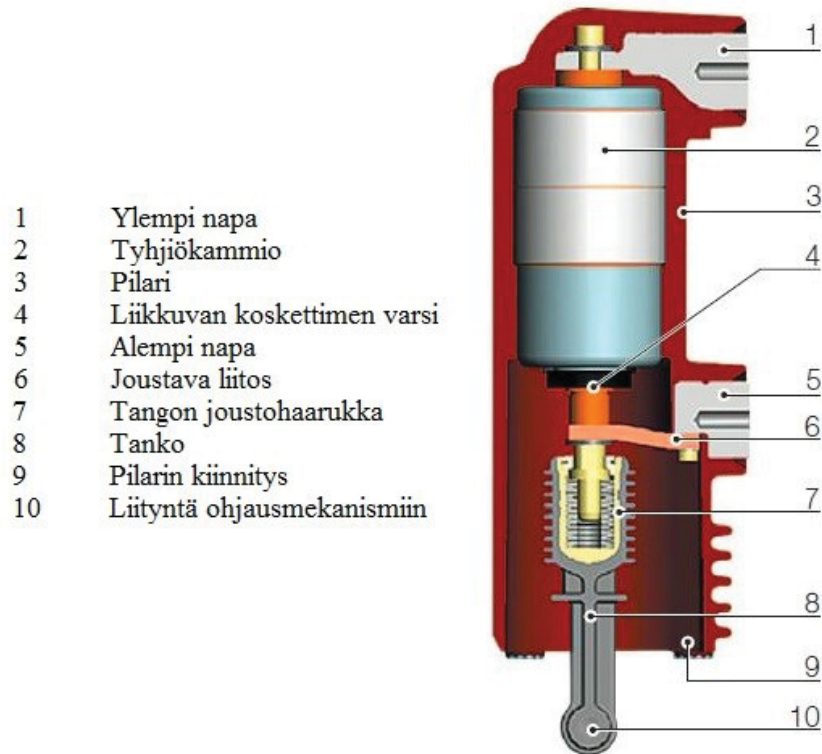
Nykyään suuret katkaisijavalmistajat valmistavat keskijännitteelle molempia katkaisijatyyppejä: tyhjiö- ja SF₆-katkaisijoita. Pienjännitealueella puolestaan ilmakatkaisija on yleinen katkaisijatyyppejä. [2]

3.1 Tyhjiökatkaisijasta yleisesti

Tyhjiökatkaisijan mekaaninen rakenne on yksinkertainen. Periaatteessa tyhjiökatkaisijassa on tyhjiökammio, jonka sisälle on sijoitettu kiinteä ja liikkuva kosketin, jotka irtotessaan toisistaan muodostavat avausvälin tyhjiöön. Tyhjiön jännitelujuus on erittäin hyvä, jonka takia jo hyvin lyhyt avausväli (5-15 mm) riittää suuren jännitelujuuden saavuttamiseen. Eräs oleellinen ero, joka tyhjiökatkaisijalla on verrattuna perinteisiin katkaisijatyyppeihin, on se että tyhjiökatkaisijan kontaktit tarvitsevat koko ajan ulkoisen puristusvoiman kyetäkseen johtamaan mitoitus- ja oikosulkuvirtoja ilman liiallista lämpenemistä. [9]

Tyhjiökatkaisijoiden hyvä puoli on niiden erittäin vähäinen huollontarve, josta myös seuraa niiden taloudellinen kilpailukyky. Itse katkaisuyksikköä ei yleensä tarvitse eikä edes voi huoltaa. Ainoastaan ohjain tarvitsee voitelua määrätyin väliajoin. [9]

ABB:n VD4-tyhjiökatkaisijan tyhjiökammion (englanniksi vacuum interrupter) poikkileikkaus on esitetty kuvassa 2.

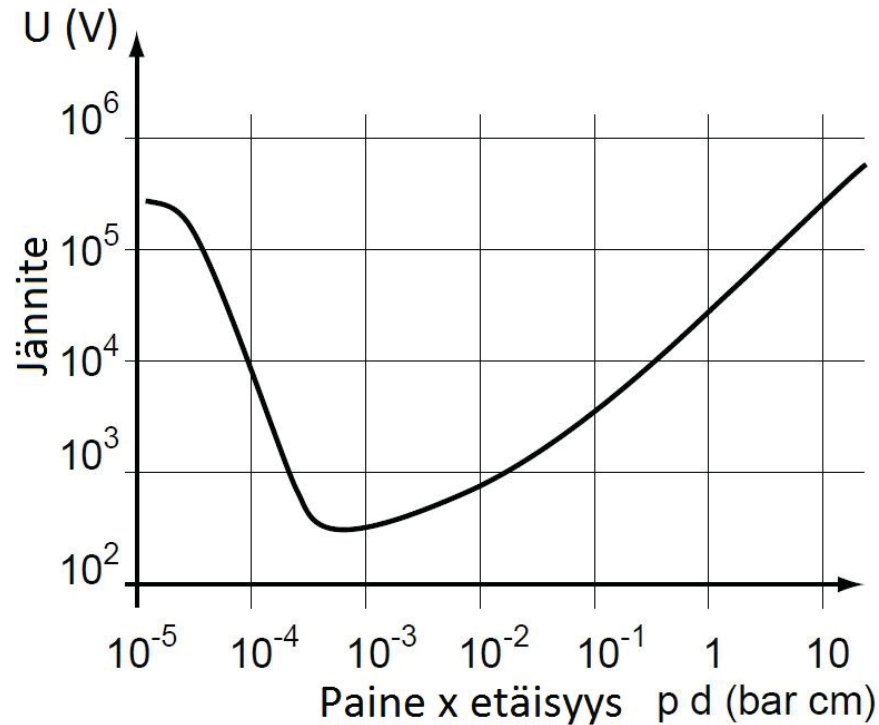


Kuva 2. VD4 tyhjiökatkaisijan pilariin upotetun tyhjiökammion poikkileikkaus. Muokattu lähteestä [15].

Varsinainen katkaisutapahtuma tapahtuu tyhjiökammion (2) sisällä. Kun rele antaa katkaisijalle avauskäskyn, katkaisijan laukaisukela vetää ja katkaisijan viritysjouseen varastoitunut mekaaninen energia vapautuu vetäen liikkuvan koskettimen (4) nopeasti alaspäin. Tällöin kontaktit tyhjiökammion sisällä erkanevat ja katkaisija avautuu.

Tarkalleen ottaen tyhjiökatkaisijan tyhjiökammiossa ei ole täydellistä tyhjiötä, vaan pikemminkin alipaineistettua kaasua. Uudessa tyhjiökatkaisijassa kammion kaasun paine on tyypillisesti luokkaa 10^{-6} mbar. Tässä kaasun paineessa ja 273,15 K lämpötilassa 1 mm^3 tilavuudessa on edelleen noin $27 \cdot 10^6$ kaasumolekyyliä. Kaasu on kuitenkin niin harvaa, että kaasumolekyylien välisillä vuorovaikutuksilla ei käytännössä enää ole merkitystä. Kaasumolekyylien keskimääräinen vapaa matka on noin sadan metrin suuruusluokkaa. [2]

Paschenin käyrä kuvaa kaasujen jännitelujuutta kaasun paineen ja elektrodien välisen etäisyyden tulo funktiona. Käyrän periaatteellinen muoto on esitetty kuvassa 3.



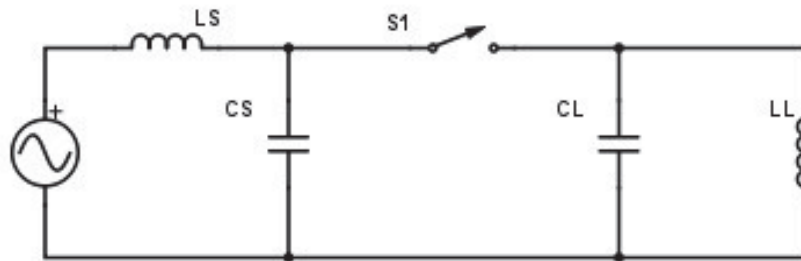
Kuva 3. Paschenin käyrän periaatteellinen muoto. Muokattu lähteestä [2].

Kuvan 3 Paschenin käyrän jännitelujuuden voimakas kasvu kuvaajan vasemmassa laidassa johtuu siitä, että vaikka elektronit ehtivät saada paljon energiaa keskimääräisen vapaan matkansa aikana, niiden keskimääräinen vapaa matka on niin pitkä, että törmäys kaasumolekyyliin on epätodennäköinen. Jos elektrodien välinen etäisyys pidetään vakiona ja kaasun painetta kasvatetaan, jännitelujuus heikkenee. Tämä johtuu siitä, että molekyylien määrä kaasussa kasvaa, jolloin elektronien törmäminen niihin on todennäköisempää. Jos molekyyliin törmäävän elektronin energia on riittävän suuri, se ionisoi molekyylin. Ionisaatiossa molekyylistä irronnut elektroni voi ionisoida uuden molekyylin, jolloin vapaiden elektronien määrä kasvaa vyörynomaisesti. Tilannetta kutsutaan elektronivyöryksi. Tyhjiön erinomaisuus eristeenä perustuu juuri siihen, että elektrodivälissä ei ole molekyyliä, jotka voisivat ionisoitua ja synnyttää läpilyöntiin johtavan elektronivyöryn. [1; 2]

Käytännössä tyhjiösäiliön seinämiin jää aina jonkin verran epäpuhtauksia ja hiukkasia. Nämä voivat irrota seinämistä elektrodien väliseen tilaan esimerkiksi iskun tai sähköstaattisten voimien vaikutuksesta, jolloin ne heikentävät avausvälin jännitelujuutta. Tästä syystä käytännössä tyhjiössä on vaikeaa saavuttaa suuria jännitelujuuksia. Tämän takia tyhjiökatkaisijoiden käyttö rajoittuukin nykyään pitkälti keskijännitetasolle. [2]

3.2 Induktiivisen virran katkaisu tyhjiökatkaisijalla

Merkittävä ylijännitteitä synnyttävä virran katkaisutilanne on pienen induktiivisen virran katkaisu. Käytännössä tämä on myös kaikkein suurimmat ylijännitteet aiheuttava virran katkaisutilanne. Tästä syystä tässä työssä induktiivisen virran katkaisua käsitellään tarkasti. Pienellä induktiivisella virralla tarkoitetaan virtaa, jonka tehokerroin $\cos\varphi < 0,5$, ja jonka suuruus on huomattavasti pienempi kuin katkaisevan kytkinlaitteen katkaisukyky. Tällainen tilanne esiintyy esimerkiksi muuntajan tyhjäkäyntivirtaa, suurjännitemoottorin käynnistysvirtaa tai reaktorin virtaa katkaistaessa. [1]



Kuva 4. Verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä pienen induktiivisen virran katkaisussa.

Ilmiön perusluonnetta voidaan havainnollistaa kuvan 4 mukaisella yksinkertaisella yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Induktanssi L_L kuvaa kuorman (esimerkiksi tyhjäkäyvän muuntajan) induktanssia ja kapasitanssi C_L kuormaa syöttävän johdon (esimerkiksi kaapelin tai kiskosillan) ja kuorman yhteistä kapasitanssia. Käytännössä ongelmat aiheutuvat siitä, että katkaistaessa virtaa, joka alittaa huomattavasti katkaisijan katkaisukykyyn, virta pyrkii katkeamaan hieman ennen nollakohtaansa. Virran hetkellisarvoa katkeamishetkellä kutsutaan englannin kielisessä kirjallisuudessa termillä chopping current. Virta katkeamishetkellä on i_{chop} ja jännite u_{chop} . Tällöin kuorman induktanssiin L_L jää varastoituneeksi energia, joka on verrannollinen kuorman induktanssiin ja katkeamishetken virran i_{chop} neliöön. Tämä induktanssiin varastoituneeksi jäänyt magneettinen energia voidaan laskea kaavalla 1 [1]:

$$E_{LL} = \frac{1}{2} L_L i_{chop}^2. \quad (1)$$

Tämä kuormitusinduktanssiin varastoitunut magneettinen energia aiheuttaa kuorman kapasitanssin ja induktanssin muodostaman LC-piirin värähtelyn, jolloin kapasitanssin C_L jännite nousee. Kapasitanssin C_L maksimijännite voidaan johtaa niin, että ajatellaan induktanssiin varastoituneen magneettisen energian siirtyvän kokonaisuudessaan kapasitanssiin sähköiseksi energiaksi:

$$E_{LL} = E_{CL}. \quad (2)$$

Nyt kapasitanssiin C_L siirtynyt varaus nostaa kapasitanssin jännitettä yhtälön 3 mukaisesti:

$$\frac{1}{2}C_L U_{CL,max}^2 = \frac{1}{2}L_L i_{chop}^2. \quad (3)$$

Kapasitanssin C_L maksimijännite voi siis tässä tapauksessa saada arvon:

$$u_{CL,max} = \sqrt{u_{chop}^2 + \frac{L_L}{C_L} i_{chop}^2}. \quad (4)$$

Katkaisijan avausväliin heti katkaisun jälkeen vaikuttavaa pitkittäistä jännitettä kutsutaan palaavaksi transienttijännitteeksi (transient recovery voltage) U_{TRV} ja se on suunnilleen yhtä suuri kuin kapasitanssin C_L yli oleva jännite. Transienttitilassa jännite katkaisijan avausvälissä nousee erittäin nopeasti ja voi johtaa uudelleensyttymisiin, varsinkin jos katkaisijan avausvälin jännitelujuus ei ole vielä ehtinyt saavuttaa riittävän suurta arvoa. [1]

Yhtälöstä 4 nähdään, että syntyvän ylijännitteen suuruuteen vaikuttavat kuorman induktanssi L_L , syöttökaapelin ja kuorman yhteinen kapasitanssi C_L , sekä virran suuruus katkeamishetkellä. Yhtälöstä voidaan siis melko suoraviivaisesti päätellä, että syntyvä ylijännite on suurimmillaan, jos katkaisijan ja kuorman välillä oleva kapasitanssi on pieni eli kun kuorman ja katkaisijan välinen kaapeli on lyhyt.

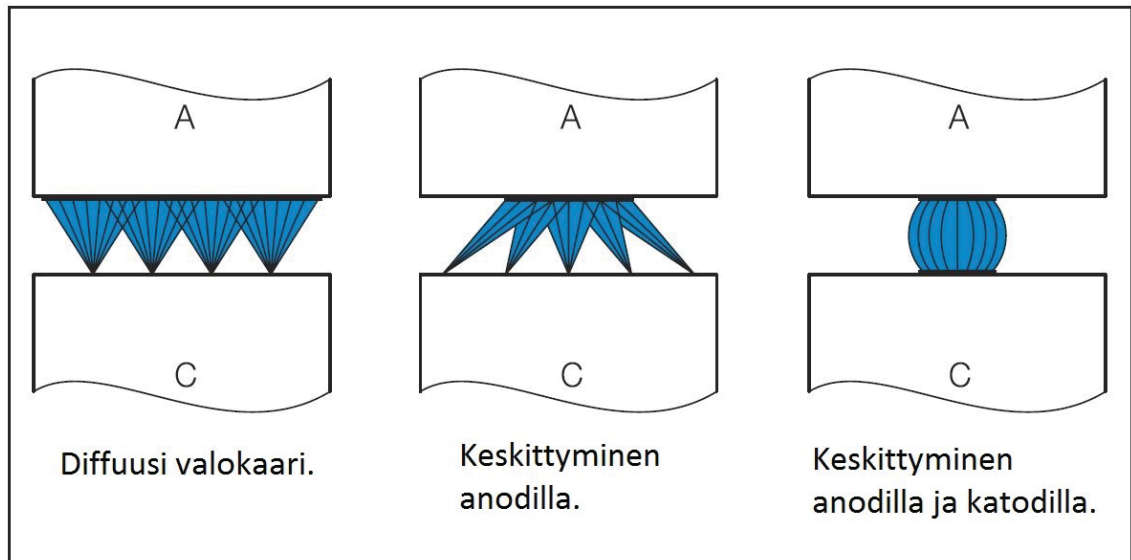
3.2.1 Virran katkeaminen ja current chopping

Virtapiirin katkaisulle on tyypillistä, että virta ei katkea heti katkaisijan kontaktien avaututtua, vaan katkaisijan koskettimien välille syttyy valokaari, joka pitää virtapiirin suljetuna. Valokaaren syntymekanismi tyhjiössä noudattaa seuraavaa mekanismia [2; 9]:

- Koskettimien viimeisillä kosketushetkillä kosketinpaine pienenee ja kosketusvasutus kasvaa kosketuspinta-alan pienentyessä. Tällöin virrantiheys kasvaa paikallisesti hyvin suureksi ja kosketinpinnat kuumenevat.
- Lopulta viimeiset kosketuspisteet sulavat ja koskettimien välille syntyy sula metallinen silta.
- Koskettimet jatkavat erkanemistaan ja sula metallisilta kuumenee virran vaikutuksesta.
- Lopulta sula metallisilta muuttuu epästabliiksi ja repeää, joka johtaa sulan metallisillan räjähtämiseen.
- Koskettimien välille syttyy valokaari, joka palaa metallisillan räjähdyksessä syntyneessä kuumassa metallihöyryssä.

Syntynyt valokaari esiintyy diffuusissa muodossa (diffuse mode) tai keskittyneessä muodossa (constricted mode) riippuen valokaarivirran suuruudesta [2]. Valokaari esiintyy diffuusissa muodossa, jos valokaaren virta on suhteellisen pieni, tyypillisesti muutamista ampeereista muutamaan kiloampeeriin. Diffuusi valokaari on erityisesti ominainen juuri tyhjiövalokaarille. Siinä katodi emittoi juuri avautuneeseen kosketinväliin sähköisesti

neutraalia plasmaa yhden tai useamman katodipisteen kautta. Katodipiste on erittäin pieni, säteeltään noin 5-10 μm kokoinen, alue, joka pystyy emittoimaan sähkövirtaa noin 100 ampeeriin asti. Katodipisteessä vallitsee erittäin korkea lämpötila ja sähkökentän voimakkuus. Nämä olosuhteet mahdollistavat elektronien emission mekanismeilla, jossa yhdistyy terminen emissio ja kenttäemissio [2]. Kuvassa 5 on graafisesti havainnollistettu diffuusia ja keskittynyttä valokaarta.



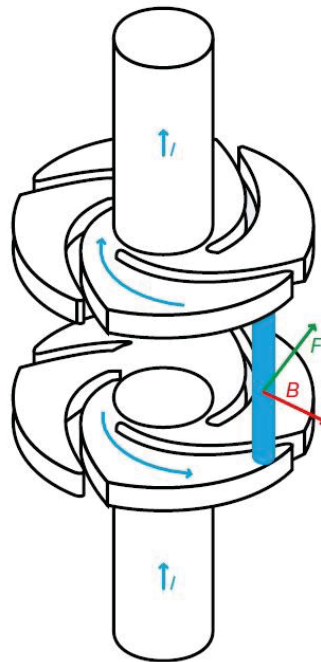
Kuva 5. Vasemmalla kuvassa on diffuusi ja oikealla keskittynyt valokaari. Muokattu lähteestä [15].

Yli sadalla ampeerilla katodipiste edelleen jakaantuu useampaan rinnakkaiseen katodipisteeseen, jota on havainnollistettu kuvassa 5 vasemmalla. Katodipisteet liikkuvat koskettimen pinnalla ja pyrkivät levittäytymään koko koskettimen pinnalle, mikä on hyvä, sillä se pienentää koskettimen pinnan eroosiota. Katkaisijan nimellisvirralla valokaari on aina diffuusi [15].

Virran kasvaessa diffuusi valokaari alkaa kehittyä kohti keskittynyttä valokaarta. Tyypillisesti kehittyminen kohti keskittynyttä valokaarta alkaa virran kasvaessa yli 10 kiloampeeriin [16]. Keskittyneessä valokaarissa on vain yksi valokaarikanava, jonka kautta kaikki virta kulkee. Siirtyminen rajoittuneeseen muotoon alkaa tyypillisesti anodilta. Siirtyminen johtuu siitä, että Ampère-Maxwellin lain mukaan johtimessa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Tässä tapauksessa ”johtimena” toimivat yksittäiset valokaarikanavat. Magneettikenttä puolestaan kohdistaa varattuun hiukkaseen voiman, jota kutsutaan Lorentzin voimaksi ja jonka suunta voidaan päätellä oikean käden säännöstä. Lorentzin voima ohjaa elektroneja kuvan 5 mukaisesti keskelle päin, jolloin yksittäiset valokaarikanavat yhdistyvät ja valokaari muuttuu diffuusista keskittyneeksi. Tätä ilmiötä kutsutaan myös Hall-ilmiöksi. [2]

Keskittynyt valokaari kuumentaa katkaisijan koskettimien pintoja enemmän ja voi aiheuttaa höyrystymistä, sillä kaikki virta kulkee nyt käytännössä yhden pisteen kautta. Jos tämä

valokaari pysyy liikkumattomana, kuumeneminen aiheuttaa voimakasta koskettimien eroosiota, eikä virran katkaisu edes sen luonnollisessa nolokohdassa ole enää varmaa [2; 16]. Tämä johtuu siitä, että keskittynyt valokaari siirtää koskettimiin enemmän energiaa ja kuumentaa niitä. Voimakkaan kuumenemisen takia kosketinpinnoilta irtoaa hiukkasia, jotka heikentävät tyhjiökammion jännitelujuutta [2; 16]. Yksi keino estää rajoittuneen valokaaren aiheuttamat ongelmat katkaisijoissa on pyrkiä saamaan valokaari liikkuvaksi. Tämä voidaan toteuttaa koskettimien geometriaan vaikuttamalla. Koskettimien geometria tuottaa avautuvaan avausväliin magneettikenttiä, jotka vaikuttavat valokaaren käyttäytymiseen. Keskittynyt valokaari saadaan liikkuvaksi esimerkiksi ns. säteittäisellä magneettikenttäteknikalla (radial magnetic field technique, RMF). RMF-tekniikassa katkaisijan koskettimet muotoillaan spiraalimaisiksi, jolloin valokaaren virta itse aiheuttaa säteittäisen magneettikentän, joka edelleen kohdistaa valokaareen itseensä azimutaalisen voiman, joka saa valokaaren liikkumaan. Kuvassa 6 on havainnollistettu virran kulkureittiä spiraalikoskettimessa.

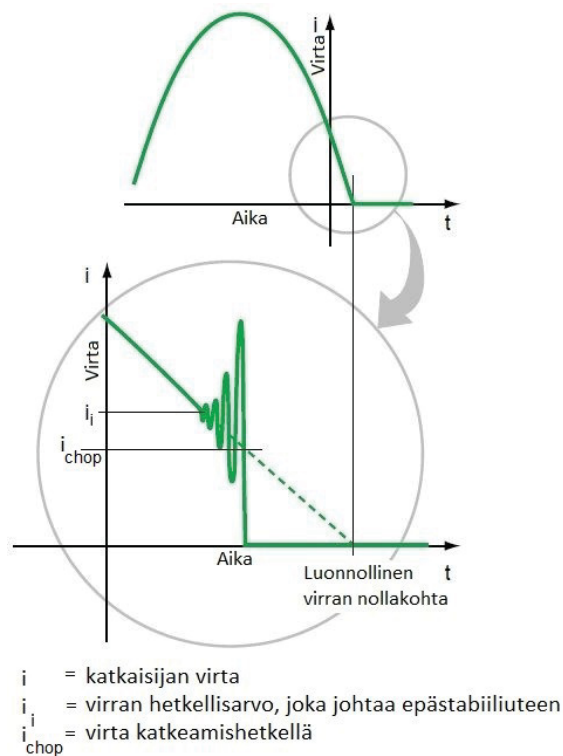


Kuva 6. Katkaisijan spiraalikoskettimen muotoilu RMF-tekniikassa. B on magneettivuon tiheys, I on virta ja F on azimutaalinen sähkömagneettinen voima [16].

Kuvassa 6 valokaari joutuu ”hyppimään” koskettimien spiraalien välisten rakojen yli. Valokaari alkaa siis kiertyä ympyrää koskettimen reunoja pitkin nopeudella 70-150 m/s [16]. Silloin se käyttää suuremman osan koskettimien pinta-alasta mikä vähentää ylikuumenemista ja eroosiota, vaikka valokaari edelleen on keskittynyt. Lisäksi valokaari pysyy paremmin hallittavissa, mikä helpottaa virran katkaisua.

Tyhjiössä palavan valokaaren jännite on pieni verrattuna verkon generaattoreiden sähkömotorisiin voimiin. Tästä syystä valokaaren jännite ei juurikaan vaikuta virran kulkuun piirissä. Tässä diplomityössä ei perehdytä sen tarkemmin valokaaren sähköisten ominaisuuksien matemaattiseen mallintamiseen.

Pienellä induktiivisella virralla (muutamista ampeereista useisiin satoihin ampeereihin) virta katkeaa hieman ennen luonnollista nollakohtaansa. Tämä johtuu siitä että katkaisija, joka on mitoitettu katkaisemaan suuria oikosulkuvirtoja, jäähdyyttää verraten pienienergistä valokaarta erittäin voimakkaasti. Tämä johtaa valokaaren muuttumiseen epästabiiliksi, joka saa aikaan verkon kapasitanssien ja induktanssien välisen korkeataajuuden värähtelyn. Tämä korkeataajuinen värähtely aiheuttaa virtaan nollakohdan ennen sen luonnollista nollakohta, jolloin valokaari sammuu ja virta katkeaa äkisti. Kuorman, esimerkiksi muuntajan, ottama virta on kuitenkin edelleen perustaajuista virtaa, jolloin kuorma ei ”näe” katkaisijassa tapahtuvaa korkeataajuista värähtelyä, vaan virran ennenaikaisen katkeamisen. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 7. [17]



Kuva 7. Korkeataajuinen värähtelyilmiö aiheuttaa virtaan ennenaikaisen nollakohdan, jossa virta katkeaa. Muokattu lähteestä [17].

Tätä ilmiötä kutsutaan virran ennenaikaiseksi katkeamiseksi eli englanniksi current choppingiksi. Kyseessä on verraten monitahoinen ongelma, jonka matemaattinen mallintaminen on vaikeaa, eikä ilmiötä vielä tunneta täysin. Keskimääräistä virran suuruutta katkeamishetkellä eli chopping currentia voidaan kuitenkin J. Helmerin [3] mukaan arvioida yhtälöllä 5:

$$i_{chop} = (\omega \cdot i_{peak} \cdot \alpha_{VCB} \cdot \beta_{VCB})^q, \quad (5)$$

missä

- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
- α_{VCB} , β_{VCB} ja q ovat katkaisijan kosketinmateriaalille ominaisia arvoja. CuCr-seoksesta valmistetuille koskettimille tyypillisiä arvoja ovat:
 - $\alpha_{VCB} = 6,2 \cdot 10^{-16}$
 - $\beta_{VCB} = 14,3$
 - $q = (1 - \beta)^{-1}$
- i_{peak} = verkkotaajuuden virran huippuarvo

Yhtälön mukaan katkeamishetken virta riippuu siis virran amplitudista ja kosketinmateriaalista. Nykyisille tyhjiökatkaisijoille, jotka käyttävät kuparin ja kromin seoksesta valmistettuja koskettimia, virta katkeamishetkellä on noin 3-8 ampeeria pienillä virroilla [2; 3]. Pelkästä kuparista valmistetuilla koskettimilla virta katkeamishetkellä on huomattavasti suurempi, jopa 21 ampeeria, eikä niitä siksi voi sellaisinaan käyttää [2].

3.2.2 Palaava transienttijännite ja avausvälin jännitelujuus

Välittömästi valokaaren sammumisen ja virran katkeamisen jälkeen katkaisijan avausvä-
lissä vaikuttaa palaava transienttijännite, joka syntyy, kuten kohdassa 3.2 on kuvattu. Kuorman induktanssiin varastoituneeksi jäänyt magneettinen energia siirtyy verkon kapasitanssiin ja aiheuttaa LC-piirin värähtelyn, joka nostaa verkon kuorman puoleisen maakapasitanssin jännitettä. Palaavan transienttijännitteen taajuus on tyypillisesti muutamia kymmeniä kilohertsejä. Samaan aikaan katkaisijan koskettimet ovat alkaneet vetäytyä eroon toisistaan ja katkaisijan avausvälin jännitelujuus on kasvanut. Jos palaava transienttijännite ylittää katkaisijan avausvälin jännitelujuuden, tapahtuu uudelleensyttyminen. Uudelleensyttymisen todennäköisyys riippuu palaavan transienttijännitteen suuruudesta, sekä katkaisijan avaushetkestä. Jos koskettimet ovat irronneet hyvin lähellä ensimmäisenä katkaisevan vaiheen nollakohtaa, ei katkaisijan avausväli ole ehtinyt kasvaa kovinkaan suureksi, kun virta katkeaa ja avausväliin kohdistuu palaava transienttijännite. Tällöin uudelleensyttyminen on erittäin todennäköistä.

Virran nollakohdassa viimeinen katodipiste häviää, kun valokaaren jännite häviää. Nollakohdan lähellä virrantiheys ei enää riitä ylläpitämään termistä emissiota eikä sähkökentän voimakkuus kenttäemissiota. Valokaaren sammumisen jälkeen katkaisijan avausväliin alkaa vaikuttaa palaava transienttijännite, jonka polariteetti on vastakkainen virran katkeamista edeltäneeseen valokaarijännitteeseen. Ex-anodi muuttuu nyt polariteetiltaan negatiiviseksi ja alkaa hylkiä elektroneja. Toisaalta ex-anodi alkaa nyt vetää puoleensa avausväliin jäljelle jääneestä plasmasta positiivisia ioneja, jolloin plasma alkaa muuttua harvemmaksi. Tämä positiivisista ioneista koostuva ionivirta, jonka suunta on ex-katodilta ex-anodille, on polariteetiltaan vastakkainen valokaaren sammumista edeltäneeseen virtaan ja sitä kutsutaan valokaaren jälkeiseksi virraksi (englanniksi post-arc current). [2]

Ex-anodin ympärille alkaa muodostua suojakuori, jonka sisällä sisäpuolelta elektronit ovat siirtyneet ex-katodin suuntaan. Vaikka avausvälissä on edelleen neutraalia plasmaa, se ei ole enää kosketuksissa ex-anodiin, sillä vain positiiviset ionit pääsevät suojakuoren sisäpuolelle, jonka jälkeen sähkökenttä edelleen kiihdyttää niitä kohti negatiivista ex-anodia. Ex-anodin ja ex-katodin välillä vaikuttava jännite kohdistuu nyt siis täysin ex-anodin ympärillä olevaan suojakuoren paksuuteen. Lisäksi suojakuoren sisäpuolella olevat positiiviset varaukset edelleen vahvistavat ex-anodin pinnalla vaikuttavaa sähkökenttää, jonka suuruus on nyt suurempi kuin minkä pelkkä palaava transienttijännite suojakuoreen kohdistaa. [2]

Ex-anodia ympäröivän suojakuoren paksuus on verrannollinen neutraalin plasman ja elektrodin väliseen jännitteeseen ja kääntäen verrannollinen positiivisten varausten määrään kuoren sisällä. Kuoren paksuus siis kasvaa palaavan transienttijännitteen kasvaessa ja plasman harvetessa valokaaren jälkeisen virran vaikutuksesta. Lopulta kun kuori saavuttaa ex-katodin, jäljelle jäänyt plasma on kokonaan hävinnyt ja valokaaren jälkeinen virta häviää olemattomiin. Kaikki nämä tapahtumat tapahtuvat hyvin lyhyessä ajassa. Tyypillisesti valokaaren jälkeinen virta kestää vain noin mikrosekunnista kymmeneen mikrosekuntiin. [2]

Virta ei kuitenkaan välttämättä katkea ensimmäisen valokaaren sammumisen jälkeen, vaan virran katkaisu voi myös epäonnistua. Ensimmäinen mahdollinen mekanismi, joka johtaa virran katkaisun epäonnistumiseen, on avausvälissä olevan neutraalin metallihöyryn ionisoituminen. Se on sitä todennäköisempää, mitä suurempi on neutraaleiden partikkeleiden tiheys avausvälissä. Jos metallihöyryn tiheys on riittävän suuri, virta ei katkea ollenkaan, eikä palaavaa transienttijännitettä synny avausväliin. Metallihöyryn tiheys avausvälissä voi kasvaa suureksi, jos valokaari pääsee synnyttämään koskettimien pinnalle todella kuumia pisteitä, jotka sylkevät metallihöyryä avausväliin. Juuri tästä syystä katkaisijan koskettimet muotoillaan niin, että keskittynyt valokaari liikkuisi, eikä pysyisi paikoillaan ja pääsisi muodostamaan näitä kuumia pisteitä (kuva 6). [2]

Toisaalta avausvälissä olevien neutraaleiden partikkeleiden määrä vaikuttaa myös toisella tavalla. Jos avausväliin on valokaaren vaikutuksesta sinkoutunut paljon neutraaleja partikkeleita, kasvaa kaasun paine, jolloin avausvälin jännitelujuus lähenee kohti Paschenin käyrän minimiä (kuva 3). Tällöin virta voi katketa nollakohdassaan, mutta avausväli ei kestä palaavan transienttijännitteen siihen kohdistamaa jänniterasitusta, vaan tapahtuu läpilyönti ja katkaisijan avausvälin uudelleensyntyminen. [2]

Toinen mekanismi, joka voi johtaa virran katkaisun epäonnistumiseen, on katodipisteiden syntyminen ex-anodille virran katkeamisen jälkeen. Tämä mekanismi tarvitsee toimiakseen tietynlaiset olosuhteet ex-anodin pinnalle. Termisen emission käynnistyminen edellyttää, että elektrodiin on jäänyt erittäin kuumia pisteitä. Tällainen tilanne on esimerkiksi

kun kosketinmateriaalina käytetään tulenkestävää terästä. Termisen emission ja kenttä-emission yhdistelmä voi myös synnyttää katodipisteitä ex-anodille, jos sähkökentän voimakkuus ex-anodin pinnalla kasvaa riittävän suureksi. [2]

Mikäli plasman tiheys avausvälissä on riittävän matala, olosuhteet virran onnistuneelle katkaisulle ovat olemassa. Virta katkeaa nollakohdan ympäristössä ja avausvälin jännitelujuus kestää palaavan transienttijännitteen aiheuttaman jänniterasituksen.

Kun katkaistavan virran suuruus on maksimissaan joitakin satoja ampeereja, voidaan avausvälin jännitelujuutena pitää ns. kylmän avausvälin jännitelujuutta (cold-gap breakdown voltage). Lisäksi yleensä katkaisuvälin jännitelujuuden voidaan olettaa kasvavan lineaarisesti ajan funktiona koskettimien irtoamisesta avausvälin täyteen pituuteen asti [3-5]. Tarkalleen ottaen tämä ei pidä täysin paikkaansa, sillä avausvälin jännitelujuuden kasvu on lineaarista vain lyhyillä väleillä (2-4 mm). Tällaisia avausvälejä käytetään esimerkiksi tyhjiökontakteissa. [18]

Avausvälin jännitelujuuden kasvua ajan funktiona ensimmäisten millimetrien aikana voidaan mallintaa yhtälöllä:

$$U_b = A_{VCB}(t - t_{open}) + B_{VCB} \quad (6)$$

missä t_{open} on katkaisijan koskettimien avautumishetki, A_{VCB} on jännitelujuuden kasvunopeus ja B_{VCB} on vakiotermi, joka kuvaa avausvälin jännitelujuutta välittömästi kontaktien mekaanisen aukeamisen jälkeen. Kirjallisuudesta löytyy paljon erilaisia arvoja vakioille A_{VCB} ja B_{VCB} . Viitteessä [19] S. M. Wong et al. esittävät taulukon 4 mukaisia arvoja vakioille A_{VCB} ja B_{VCB} .

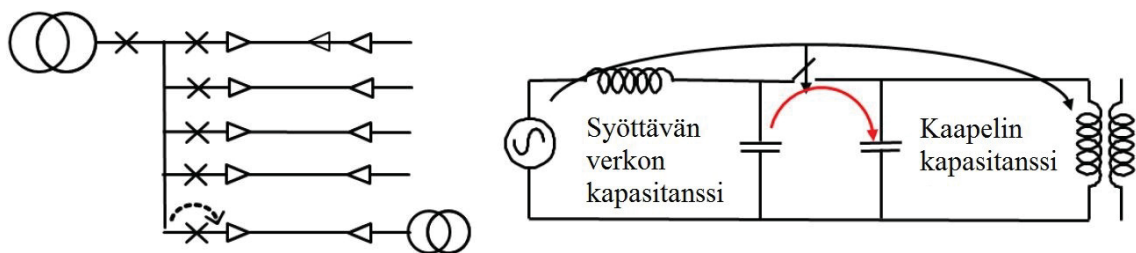
Taulukko 4. Tyypillisiä arvoja vakioille A ja B yhtälössä 6 [19].

A_{VCB} (V/ μ s)	B_{VCB} (V)
2	0
20	0
30	1000
50	0

Toinen keino, jolla jännitelujuuden kasvunopeutta eli vakiota A_{VCB} voi estimoida, on olettaa, että avausväli saavuttaa jännitelujuuden maksimiarvonsa lineaarisesti yhden perustaajuisen puolijakson aikana. Esimerkiksi ABB:n 24 kV VD4 katkaisijalle avausvälin suurin jänniteimpulssin kestoarvo on 125 kV. Viidenkymmenen hertsin järjestelmässä tämä tarkoittaa, että vakio A_{VCB} olisi 12,5 V/ μ s. Vakiona B_{VCB} voidaan varsin hyvällä tarkkuudella käyttää arvoa nolla. [20]

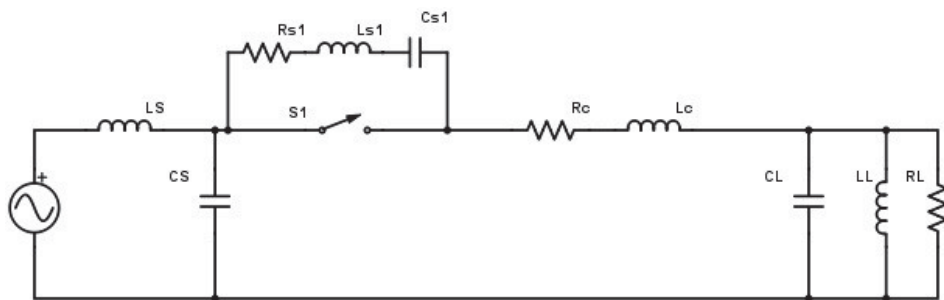
3.2.3 Korkeataajuinen transienttivirta ja sen katkaisu

Jos valokaaren sammumista seuraa uudelleensyttyminen, alkaa katkaisijan avausvälissä kulkea tasoitusilmiöiden seurauksena hyvin korkeataajuinen transienttivirta, joka kerrostuu superpositioperiaatteen mukaisesti perustaajuiseen kuormitusvirtaan. Korkeataajuisen transienttivirran kerrostuminen perustaajuiseen virtaan aiheuttaa kokonaisvirtaan nol-lakohtia, kun perustaajuisen virran hetkellisarvo ja transienttivirran hetkellisarvo ovat yhtä suuret ja vastakkaismerkkiset. Uudelleensyttymistä seuraava korkeataajuinen transienttivirta syntyy, kun katkaisijan kummankin puolen olevien kapasitanssien varaukset tasoittuvat korkeataajuisena tasoitusvirtana. Korkeataajuisen tasoitusvirran syntymekanismia on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8. Uudelleensyttymistä seuraavan korkeataajuisen transienttivirran syntymekanismi. Muokattu lähteestä [21].

Uudelleensyttymisen seurauksena syöttävän verkon puoleinen kapasitanssi purkautuu katkaisijan sisällä palavan valokaaren kautta kuorman puoleiseen kapasitanssiin hyvin korkeataajuisena tasoitusvirtana. Kuvasta 8 nähdään myös miten käytännön verkoissa rinnakkaiset johtolähdöt lisäävät syöttävän verkon kapasitanssia ja voimistavat korkeataajuisia transienttivirtoja. Kuvassa 9 on esitetty hieman tarkemmin korkeataajuisen transienttivirran ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 9. Verkon yksivaiheinen sijaiskytkentä uudelleensyttymisen aiheuttamassa korkeataajuisen transienttivirran synnyssä.

Tasoitusvirta koostuu kolmesta taajuuskomponentista [3]. Heti uudelleensyttymistä seuraa erittäin korkeataajuinen virtasysäys, kun syöttävän verkon puoleiseen kapasitanssiin varastoitunut sähkövaraus purkautuu äkisti. Tämän transienttivirtakomponentin taajuus voidaan laskea kaavalla 7.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{S1}C_{S1}}}, \quad (7)$$

Missä L_{S1} on katkaisijan avausväliä kuvaava induktanssi ja C_{S1} kapasitanssi. Tämän virtakomponentin taajuus on muutamien kymmenien megahertsien luokkaa ja se vaimenee nopeasti [3]. Korkeataajuisen transienttivirran määräävimmissä asemassa olevan taajuuskomponentin taajuus voidaan puolestaan lasketa kaavalla 8.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_L}}, \quad (8)$$

Missä induktanssi L_c kuvaa kuormaa ja katkaisijaa yhdistävän kaapelin induktanssia ja C_L kuorman kapasitanssia. Korkeataajuisella transienttivirralla on myös perustaajuinen komponentti, mutta sen taajuus on merkittävästi pienempi, kuin näiden kahden korkeataajuisen komponentin. [3]

Katkaisija pystyy katkaisemaan korkeataajuisen transienttivirran sen nollakohdissa jos virran aikaderivaatta nollakohdassa ei ole liian suuri. Tyhjiökatkaisijoille on tyypillistä, että ne pystyvät katkaisemaan virtoja, joiden nollakohdan aikaderivaatta on hyvin suuri, jopa 150-1000 A/ μ s [5]. Virran katkaisua korkeataajuisen transienttivirran nollakohdassa seuraa uudelleen palaava transienttijännite, joka voi aiheuttaa uuden uudelleensyttymisen ja uuden korkeataajuisen transienttivirran. Kuvassa 10 on havainnollistettu tilannetta.

Tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen transienttivirran katkaisukykyä voidaan estimoida yhtälöllä 9 [19]:

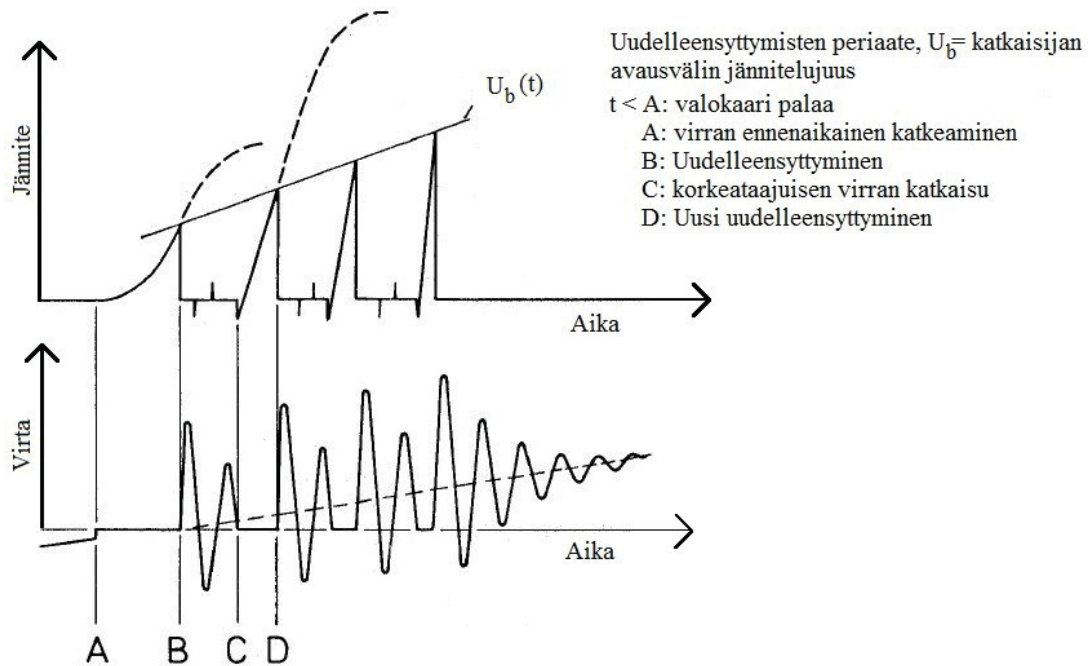
$$\frac{di}{dt_{crit}} = C_{VCB}(t - t_{open}) + D_{VCB}, \quad (9)$$

missä C_{VCB} on korkeataajuisen virran katkaisukyvyyn kasvunopeus, joka voi olla myös negatiivinen, t_{open} on koskettimien avaushetki ja D_{VCB} on vakiotermi, joka kuvaa korkeataajuisen virran katkaisukykyä heti koskettimien avautumisen jälkeen. Korkeataajuisen virran katkaisukykyä voidaan mallintaa myös vakiolla [19]. S.M. Wong et al. [19] esittävät vakioille C_{VCB} ja D_{VCB} käytettäväksi taulukon 5 mukaisia arvoja.

Taulukko 5. Vakiot C_{VCB} ja D_{VCB} [19].

C_{VCB} (A/ μ s ²)	D_{VCB} (A/ μ s)
-0,34·10 ⁵	255
0	100
0	600
0,31·10 ⁶	155

Uudelleensyttymistä seuraa korkeataajuinen transienttivirta, jonka tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan. Virran katkaisua seuraa uusi uudelleensyntyminen ja korkeataajuinen transienttivirta. Kuva 10 havainnollistaa peräkkäisiä uudelleensyttymisiä.

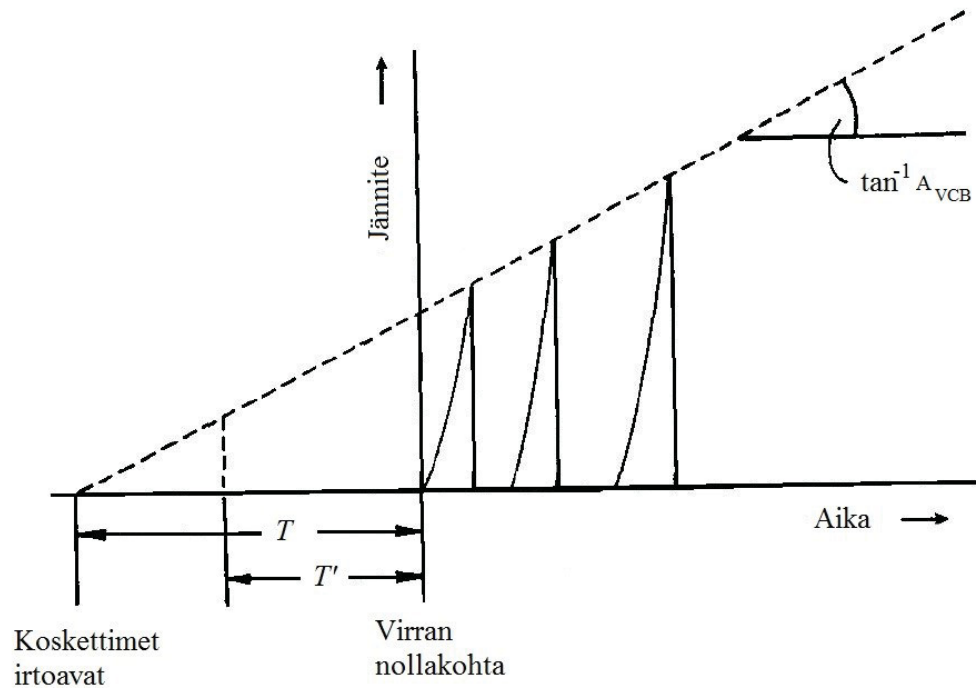


Kuva 10. Periaatekuva peräkkäisistä katkaisijan avausvälin uudelleensyttymisistä ja sitä seuraavasta korkeataajuisesta virrasta ja sen katkaisusta. Muokattu lähteestä [3].

Sykli jatkuu katkaisijan koskettimien irtaantuessa toisistaan ja voi päättyä periaatteessa kolmella eri tavalla [4]:

- Virran katkaisu onnistuu avausvälin jännitelujuuden kasvaessa niin suureksi, että se kestää palaavan transienttijännitteen rasituksen.
- Virran katkaisu epäonnistuu ensimmäisessä verkkotaajuisessa nollakohdassa virran perustaajuisen osan kasvaessa niin suureksi, että siihen kerrostunut korkeataajuinen virta ei enää pysty pakottamaan siihen nollakohdista. Seuraavassa verkkotaajuisessa virran nollakohdassa katkaisijan avausvälin jännitelujuus on kasvanut niin suureksi, että virran katkaisu onnistuu.
- Jännitteenvoimistuminen (voltage escalation) kunnes verkon jonkin komponentin jännitelujuus ylittyy ja tapahtuu läpilyönti tai ylilyönti

Voltage escalation eli jännitteenvoimistuminen voi tapahtua määrättyissä olosuhteissa, kun tyhjiökatkaisija avautuu. Siinä piirin katkaisijan avausväliin kohdistama palaava transienttijännite kasvaa samalla kulmakertoimella, kuin katkaisijan avausvälin jännitelujuus kasvaa. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 11.

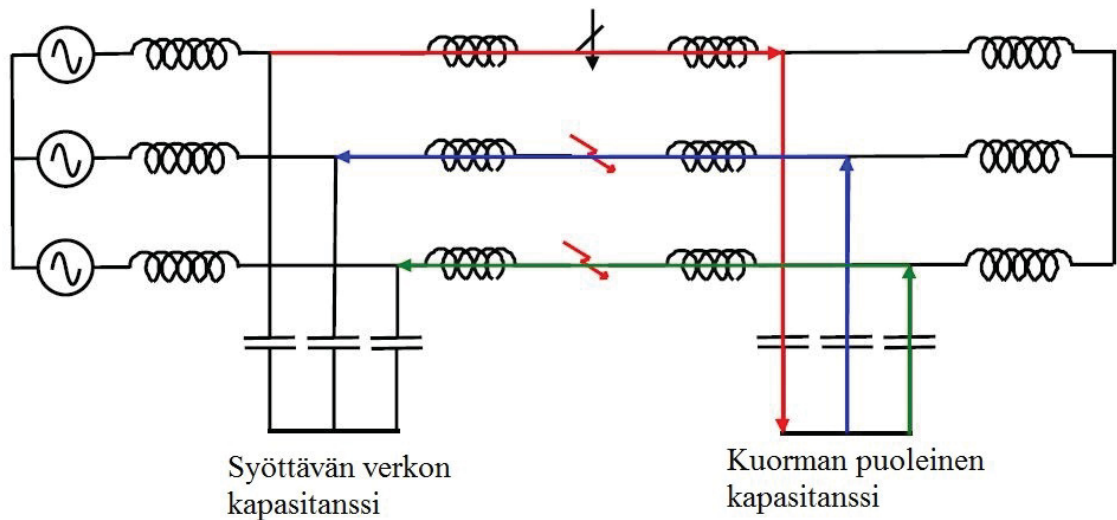


Kuva 11. Jännitteenvoimistuminen ja katkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvu. Muokattu lähteestä [4].

Kuvassa 11 katkoviiva kuvaa katkaisijan avausvälin jännitelujuutta, joka kasvaa kulmakertoimella A_{VCB} . Palaavan transienttijännitteen arvo kunkin uudelleensyttymisen hetkellä seuraa tätä katkoviivaa. Jos avausvälin jännitelujuus kasvaa liian hitaasti, palaava transienttijännite pystyy sytyttämään avausvälin useita kertoja. Samalla virran perustaajuinen osa on ohittanut nollakohtansa ja kasvaa, jolloin korkeataajuinen virta aiheuttaa katkaisijan läpi kulkevaan valokaaren kokonaisvirtaan nollakohtia yhä suuremmilla virran perustaajuisen osan hetkellisarvoilla kuvan 11 osoittamalla tavalla. Tällöin kuorman induktanssiin varastoitunut energia kasvaa aiheuttaen jokaisella korkeataajuisen virran katkaisuhetkellä yhä suuremman jännitteen. Mikäli palaava transienttijännite pystyy sytyttämään avausvälin yhä uudelleen ja uudelleen, virran katkaisu pitkittyy ja samalla on riskinä, että kuorman navoissa vaikuttava ylijännite kasvaa niin suureksi, että tapahtuu läpilyönti tai eristysvaurio. Jännitteenvoimistumista ei tapahdu, mikäli kerroin A_{VCB} on riittävän suuri, eli kun katkaisijan avausvälin jännitelujuus kasvaa riittävän nopeasti koskettimien irtoamisen jälkeen. Tällöin katkaisijan avausväli kestää palaavan transienttijännitteen rasituksen ja virran katkaisu onnistuu ennen kuin virran perustaajuinen osa on ehtinyt kasvaa niin suureksi, että korkeataajuisen virran katkaisusta aiheutuva ylijännite ylittää verkon komponenttien eristystason. [4]

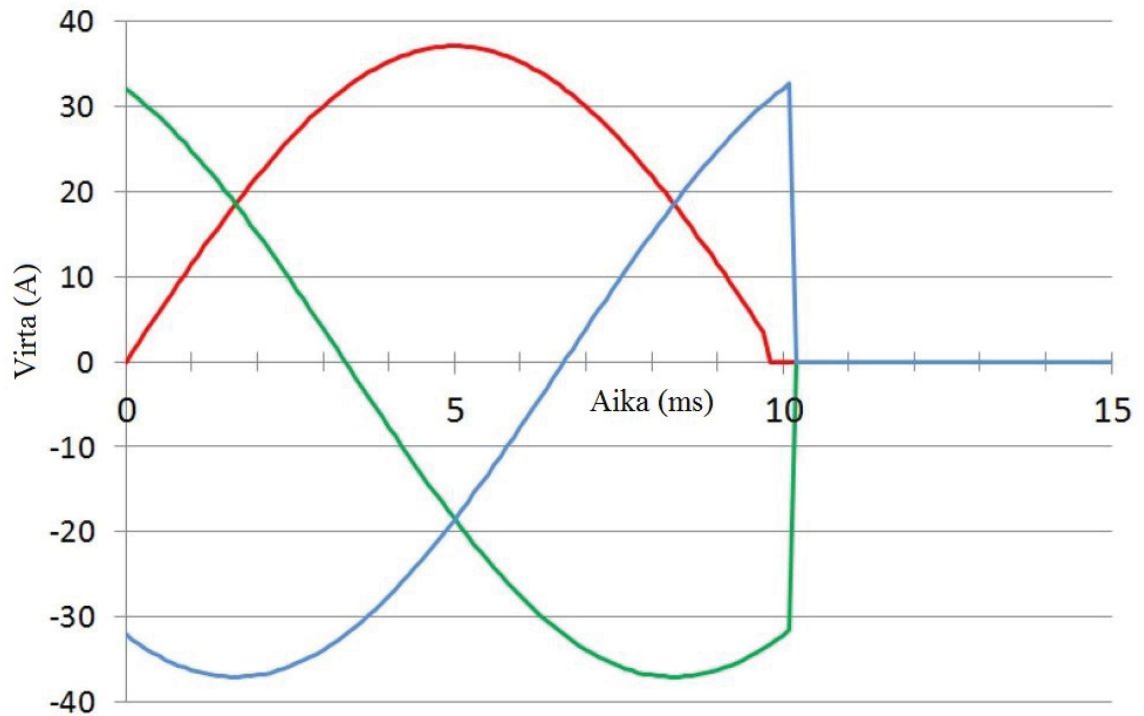
3.2.4 Virtual current chopping

Virtual current chopping tarkoittaa kolmivaihejärjestelmässä ensimmäisenä katkaisevan vaiheen uudelleensyöttymistransientin kapasitiivista siirtymistä kahteen muuhun vaiheeseen [1]. Virtual current chopping-ilmiö on vaarallinen, sillä se aiheuttaa kaikkein suurimmat ylijännitteet. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Virran kulkutie kolmivaihejärjestelmässä vaiheiden kapasitiivisen kytketymisen kautta. Muokattu lähteestä [21].

Ilmiö syntyy, kun ensimmäisenä katkaisevassa vaiheessa tapahtuu uudelleensyöttöminen. Uudelleensyöttöminen aiheuttaa korkeataajuisen transienttivirran kyseisen vaiheen napojen välille. Korkeataajuinen transienttivirta kulkeutuu kuorman puoleisen kaapelin keskinäiskapasitanssin kautta kahteen muuhun vaiheeseen. Virtapiiri sulkeutuu katkaisijan kahden muun vaiheen navoissa palavien valokaarien ja syöttävän verkon puoleisten keskinäiskapasitanssien kautta. Kerrostuessaan perustaajuiseen virtaan korkeataajuinen transienttivirta voi pakottaa ennenaikaisia nollakohtia myös kahteen muuhun vaiheeseen, mikäli korkeataajuisen virran amplitudi on korkeampi kuin perustaajuinen virta sillä hetkellä. Korkeataajuisen virran aiheuttamat nollakohdat aiheuttavat virran katkeamisen myös kahdessa muussa vaiheessa. Nyt virran hetkellisarvo katkeamishetkellä on merkittävästi suurempi kuin ensimmäisessä vaiheessa, jolloin syntyvät ylijännitteet ovat merkittävästi suurempia. [5; 7; 21]



Kuva 13. Virtojen käyrämuodot virtual current chopping-ilmiössä. Ensimmäisenä katkaisevan vaiheen (punainen) katkaisutransientti siirtyy kahteen muuhun vaiheeseen aiheuttaen ennenaikaisen nollakohdan myös niihin. Muokattu lähteestä [21].

Kuvasta 13 nähdään, miten virtual current chopping-ilmiön aikaansaama virran ennenaikainen katkeaminen tapahtuu selvästi korkeammalla virran hetkellisarvolla. Korkea virran hetkellisarvo katkeamishetkellä johtaa korkeampiin ylijännitteisiin yhtälön 4 osoittamalla tavalla, jonka vuoksi virtual current chopping on erityisen vaarallinen.

3.3 Kuivamuuntajan energisointi tyhjiökatkaisijalla

Tyhjäkäyvän muuntajan tai muun induktiivisen kuorman energisointi eli virran kytkeminen on vastakkainen toimenpide virran katkaisuun nähden. Myös energisointi voi johtaa ylijännitteisiin, joskin ne ovat yleensä huomattavasti pienempiä, kuin katkaisusta johtuvat ylijännitteet. Energisoinnissa katkaisijan koskettimet sulkeutuvat. Jossain kohtaa sulkeutumista jännite katkaisupäiden välillä ylittää avausvälin pienenevän jännitelujuuden ja tapahtuu esisyttymisen. Esisyttymiset aiheuttavat jyrkkiä askelmaisia ylijännitteitä kuorman napoihin. Esisyttymistä seuraa myös korkeataajuinen transienttivirta, jonka vielä avonainen avausväli voi katkaista. Korkeataajuinen virran katkeamista seuraa palaava transienttijännite, joka voi sytyttää avausvälin uudelleen. Avausvälin pienenevä jännitelujuus kuitenkin rajoittaa syntyviä ylijännitteitä tehokkaasti. [4; 5]

Energisoinnissa syntyvien transienttiylijännitteiden syntymekanismi poikkeaa virran katkaisun synnyttämistä ylijännitteistä. Katkaisijan avausvälin ennenaikainen syttyminen koskettimien sulkeutuessa aiheuttaa nopeita jännitepulsseja, jotka etenevät kulkuaaltoina

kaapelia pitkin kohti kuormaa. Kohdatessaan aaltoimpedanssin epäjatkuvuuskohdan, esimerkiksi kuorman navat, kulkuaalto joko heijastuu tai jatkaa matkaansa tai jakaantuu heijastuneeseen ja jatkavaan osaan riippuen siitä minkälaisen aaltoimpedanssin muutoksen kulkuaalto kohtaa. Heijastuva aalto superponoituu uusiin jänniteaaltoihin, joita katkaisijan uudelleensyttymiset aiheuttavat. Tällöin jännite kuorman navoissa voi värähdellä hyvin voimakkaasti ja kasvaa hetkittäin niin suureksi, että kuorman eristystaso ylittyy [22]. Energisoinnissa ylijännitteet tulevat lähinnä kysymykseen pitkillä kaapeleilla, jolloin kulkuaaltoilmiön vaikutus johdolla on suurempi. Kulkuaaltoilmiötä käsitellään tarkemmin luvussa 4.

L. Liljestrand et al. [8] ovat laboratoriossa testanneet tyhjäkäyvän kuivamuuntajan energisointia. Heidän mukaansa muuntajan energisointi aiheuttaa aina vähintään yhden esiyttymisen jokaisessa vaiheessa. He päätyivät kokeissaan siihen, että kuivamuuntajan energisointi tyhjiökatkaisijalla aiheuttaa muuntajan napoihin amplitudiltaan noin 1,5 kertaisen ylijännitteen nimelliseen vaihejännitteeseen verrattuna. [8]

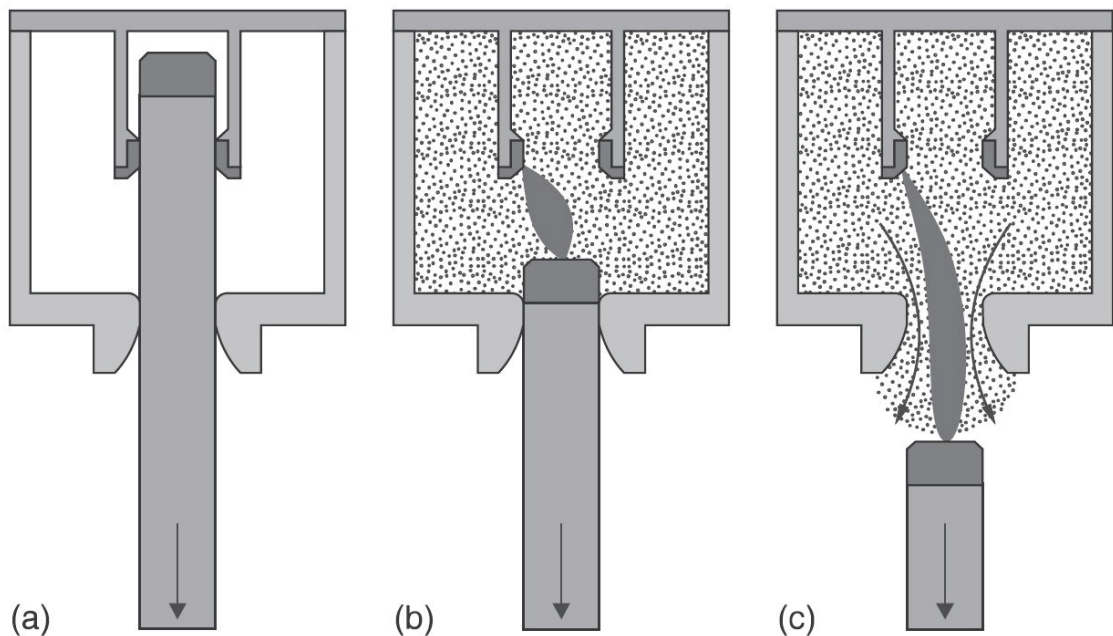
3.4 SF₆-katkaisijat

Toinen keskijännitealueella yleisesti käytössä oleva katkaisijatyyppejä on SF₆-katkaisija. Siinä katkaisutapahtuma tapahtuu nimensä mukaisesti SF₆-kaasussa. SF₆-katkaisijan etuja muihin katkaisijatyyppeihin ovat mm. suuri valokaaren jäähdytyskyky, väliaineen palamattomuus ja korkea palaavan jännitteen kestoisuus. Erityisesti suurjännitealueella SF₆-katkaisija on yleensä kokonaistaloudellisin vaihtoehto, sillä suuren katkaisutehon saavuttamiseksi tarvitsee kytkeä vähemmän katkaisupäitä sarjaan, kuin kilpailevilla katkaisijateknologioilla. Keskijännitealueella katkaisupäiden lukumäärä ei ole tärkeä, vaan siellä esiin nousevia katkaisijan ominaisuuksia ovat vähäinen huollon tarve, pienet kytkentäylijännitteet ja palamattomuus. [9]

SF₆-katkaisija voidaan toteuttaa monella eri tekniikalla. Ensimmäiset SF₆-katkaisijat olivat niin sanottuja kaksipainekatkaisijoita, joissa kaasu johdettiin katkaisutapahtuman aikana korkeapaineosasta matalapaineosassa olevaan valokaaren katkaisukohtaan. Seuraavat SF₆-katkaisijat olivat niin sanottuja yksipainekatkaisijoita, joissa hyödynnettiin autopneumaattista periaatetta eli niin sanottua pufferitekniikkaa. Näissä katkaisijoissa käytettiin katkaisijan koskettimen liikettä valokaareen kohdistuvan kaasupuhalluksen aikaansaamiseksi. Näiden katkaisijoiden tarvitsema ohjausenergia on kuitenkin suuri, mikä heikentää autopneumaattisella periaatteella toimivien katkaisijoiden taloudellista kilpailukykyä erityisesti keskijännitesovelluksissa. Keskijänniteverkkoihin onkin kehitetty hieman eri periaatteella toimivia katkaisijoita. Tällaisia ovat esimerkiksi katkaisijat, joissa valokaari saatetaan pyörimisliikkeeseen valokaarivirran itsensä aiheuttamalla magneettikentällä ja valokaaren sammuttamiseen tarvittava energia otetaan katkaistavasta virrasta. Valokaarta jäähdyttävän kaasun virtaus voidaan aikaansaada myös ns. itsepuhallusperiaatteella (self-blast), valokaaren aiheuttaman SF₆-paineennousun avulla. [9]

3.4.1 Itsepuhallusperiaate

Itsepuhallus- eli self-blast-periaatteella toimivissa SF₆-katkaisijoissa valokaaren sammutus perustuu valokaarta jäähdyttävän kaasun virtaukseen, kuten yksipainekatkaisijoissa-kin. Nämä katkaisijateknologiat eroavatkin toisistaan siinä, miten kaasun paine virtauksen aikaansaamiseksi synnytetään. Siinä missä yksipainekatkaisijoissa SF₆-kaasun paineen nostamiseksi tarvittava energia otetaan katkaisijan ohjausmekanismista, hyödyntävät itsepuhallusperiaatteella toimivat katkaisijat valokaaren tuottamaa lämpöenergiaa riittävän paineen aikaansaamiseksi. Eri katkaisijavalmistajat saattavat käyttää erilaisia nimityksiä itsepuhallusperiaatteella toimivista katkaisijoista. Käytössä olevia nimityksiä ovat esimerkiksi self-compression, auto-expansion, arc-assisted, thermal-assisted ja auto-puffer. Myös ABB:n HD4-SF₆-katkaisija käyttää itsepuhallusmenetelmään perustuvaa auto-puffer-tekniikkaa [23].



Kuva 14. Itsepuhallus-katkaisijan perustoimintaperiaate: (a) kiinni-asento; (b) valokaaren palaminen koskettimien välillä; (c) valokaaren puhallus ja sammutus [24].

Kaikissa kaasukatkaisijoissa valokaaren lämpöenergia nostaa kaasun painetta katkaisijan kaasukammiossa. Itsepuhallusperiaatteella toimivien katkaisijoiden sammutuskamion rakenne on periaatteeltaan varsin yksinkertainen, kuten kuvassa 14 on esitetty. Siinä katkaisukoskettimet ovat eristetyssä katkaisukammiossa. Koskettimien irrotessa niiden välille syttyy valokaari, joka palaa ionisoituneessa SF₆-kaasussa. Valokaari lämmittää ympäröivää SF₆-kaasua, joka aiheuttaa kaasun paineen nousun. Kun liikkuva kosketin tulee ulos valokaarikammion suukappaleesta, puhaltaa paine-erosta johtuva voimakas SF₆-kaasun virtaus valokaareen ja jäähdyttää sitä voimakkaasti, jolloin valokaari sammuu.

3.4.2 SF₆-katkaisijan ja tyhjiökatkaisijan katkaisutekniikan erot

Tyhjiökatkaisijoiden ja SF₆-katkaisijoiden katkaisutekniikat ovat hyvin erilaisia, mistä johtuu niiden erilainen käyttäytyminen myös kytkentäylijännitteiden suhteen. Tyhjiökatkaisijoissa chopping current-tason määrää pitkälti katkaisijassa käytettävä kosketinmateriaali. SF₆-katkaisijoissa SF₆-kaasu pysyy johtavana suhteellisen matalaan lämpötilaan asti, jolloin virran ennen aikainen katkeaminen tapahtuu mahdollisimman alhaisella virran hetkellisarvolla ja korkeilta kytkentäylijännitteiltä vältetään. [24]

Toinen tärkeä ero tyhjiökatkaisijan ja SF₆-katkaisijan katkaisutapahtumassa on uudelleensyttymisten määrä. Tyhjiökatkaisijan kyky katkaista uudelleensyttymistä seuraavia korkeataajuisia transienttivirtoja, johtaa suureen määrään peräkkäisiä uudelleensyttymisiä virran katkaisun aikana. SF₆-katkaisijan kyky katkaista korkeataajuisia virtoja on huomattavasti matalampi. Tästä syystä uudelleensyttymisen jälkeen katkaisijan avausväli pysyy johtavana pidemmän aikaa kuin tyhjiökatkaisijalla, jolloin uudelleensyttymisten lukumäärä vähenee huomattavasti. Huomionarvoista on myös se, että SF₆-katkaisija itsessään kestää uudelleensyttymisiä huonommin kuin tyhjiökatkaisija ja katkaisijan vaurioituminen monen peräkkäisen uudelleensyttymisen takia on mahdollista. [25]

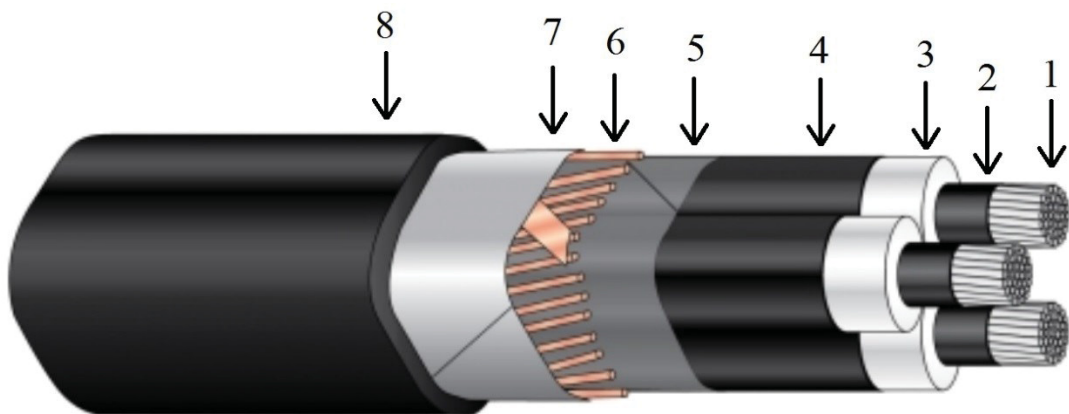
4. KAAPELIN MALLINTAMINEN

Teollisuussähköverkot ovat yleensä pääasiassa kaapeliverkkoja, joissa on useita jännite-
tasoja. Kaapelit ovat hyviä sähköjakelussa, sillä ne vievät vähän tilaa ja niiden vikataa-
juus on pieni. Vaihtosähköverkoissa siirtojännitetasolla kaapelit eivät sen sijaan ole
useinkaan teknisesti paras ratkaisu niiden tuottaman suuren varausloistehon vuoksi.

Tässä työssä tarkasteltavien ylijännitteiden kannalta kaapelin ominaisuudet ovat merkittävässä roolissa. Kuten jo kohdassa 3.2 todettiin, induktiivisen virran katkaisussa syntyvän ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa tyhjiökatkaisijan muuntajan välisen kaapelin pituus, mutta myös katkaisijan syöttävän verkon puolella olevan galvaanisesti yhteen kytetyn verkon laajuus. Lisäksi käyttötaajuista jännitettä tai virtaa oleellisesti nopeammilla transientti-ilmiöillä sähköverkkoa ei voida enää kuvata keskitettyjen komponenttien avulla, vaan on siirryttävä jakautuneiden vakioiden käyttöön [1]. Tässä luvussa perehdytään kaapeleihin, sekä niiden matemaattiseen mallintamiseen.

4.1 Kaapelin rakenne

Sähkökaapelit koostuvat monesta eri kerroksesta. Suurilla jännitteillä kaapelin rakenne on huomattavasti monimutkaisempi kuin esimerkiksi kiinteistöasennuksissa käytettävien pienjänniteasennuskaapelien rakenne. Kuvassa 15 on esitetty teollisuudessa yleisesti käytetyn AHXCMK-WTC-keskijännitekaapelin rakenne.



Kuva 15. AHXCMK-WTC kaapelin rakenne. 1 johdin, 2 johdinsuoja, 3 eriste, 4 hohtosuoja, 5 puolijohtava sidenauha, 6 kosketussuoja, 7 erotusnauha ja 8 vaippa. Muokattu lähteestä [26].

Kaapelin sisin osa on johdin, jossa virta kulkee. Johtimen päällä oleva puolijohtava kerros on johdinsuoja. Johdinsuojan jälkeen tulee varsinainen kaapelieristys, joka nykyisissä muovikaapeleissa on usein PEX-muovia eli ristosilloitettua polyeteeniä. Eristyksen jälkeen tulee toinen puolijohtava kerros, jota kutsutaan hohtosuojuksi. AHXCMK-WTC-

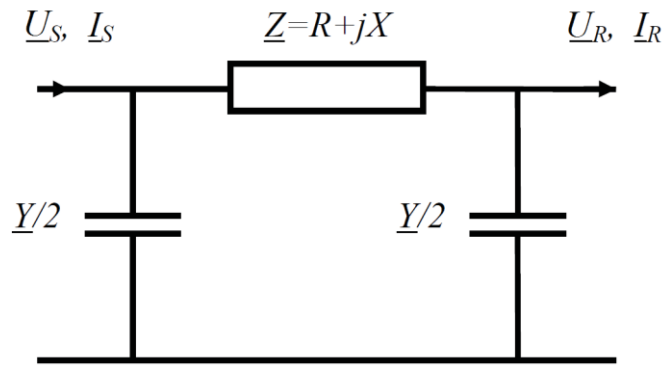
keskijännitekaapelissa eristetyt johtimet on kerrattu yhteen ja sidottu puolijohtavalla sidonauhalla (5). Sidonauhan jälkeen tulee kosketussuoja, joka koostuu kerroksesta kuparinauja ja kuparinauhasidoksesta. Kosketussuoja toimii samalla myös varaus- ja vikavirtojen kulkutienä ja estää esimerkiksi vikatapauksissa ulkopuolisten virtojen pääsyn varsinaisiin johtimiin. Kosketussuojaa ympäröi muovinen erotusnauha, jonka päällä edelleen on varsinainen vaippa. Vaippa voi olla esimerkiksi mustaa säänkestävää PVC-muovia. [27]

Nykyisin kaapeleissa paljon käytetyn polyeteenimuovieristyksen heikkous on sen herkkyys osittaispurkauksille. Tästä syystä kaapeleissa käytetään sileitä, hyvin eristeeseen tarttuvaa puolijohtavia kerroksia. Johdin- ja hohtosuojien käyttäminen kaapelissa pienentää onteloiden ja siten osittaispurkausten esiintymistodennäköisyyttä. Lisäksi kaapelin eristysrakenteen suunnittelussa on olennaista, että sähkökenttä säilyy lieriösymmetrisenä, minkä toteutumista johdin- ja hohtosuoja osaltaan edistävät. Tämän vuoksi puolijohtavan kerroksen on oltava sileä ja homogeeninen, jotta välttyttäisiin paikallisilta kentänvoimakkuushuipuilta. [1]

4.2 π -sijaiskytkentä

Mallinnettaessa perustajuisia ilmiöitä lyhyillä johdoilla johdot tyypillisesti mallinnetaan keskitetyllä sijaiskytkennällä. Järjestelmän perustajuuden ollessa 50 Hz sähkömagneettisen aallon aallonpituus on noin 6000 km. Tällöin aaltovaikutus alkaa näkyä johdoilla, joiden pituus on 250-300 km. Tätä pidemmät johdot joudutaan mallintamaan jakautunein vakioin myös perustajuisia ilmiöitä mallinnettaessa. [28; 29]

Keskitetyissä sijaiskytkennöissä johdon sähköiset suureet eli resistanssi r , reaktanssi x , konduktanssi g ja susceptanssi b on keskitetty yksittäisissä pisteissä vaikuttaviksi impedanssiksi ja admittanssiksi. Impedanssi ja admittanssi saadaan kertomalla kilometriä kohti ilmoitetut johdon sähköiset arvot kokonaisjohtopituudella. Keskitettyjä sijaiskytkentöjä on olemassa kaksi, π -sijaiskytkentä ja T-sijaiskytkentä. T-sijaiskytkennälle ei ole käyttöä tietokonelaskennassa, sillä se tuottaa yhden ylimääräisen solmupisteen johtovälille, joka turhaan monimutkaistaa laskentaa. Tästä syystä T-sijaiskytkentää ei tässä diplomityössä käsitellä tämän enempää. Laskennan tarkkuuden kannalta π -sijaiskytkentä ja T-sijaiskytkentä ovat yhtä tarkkoja, vaikkakaan ne eivät ole samoja sijaiskytkentöjä. Johdon yksivaiheinen π -sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 16. [29]



Kuva 16. Johdon yksivaiheinen π -sijaiskytkentä [29].

Kuvassa 16 \underline{U}_S ja \underline{I}_S kuvaavat johdon alkupään (sending) jännitettä ja virtaa. \underline{U}_R ja \underline{I}_R kuvaavat johdon loppupään (receiving) jännitettä ja virtaa. \underline{Z} on johdon pitkittäisimpedanssi ja \underline{Y} on johdon poikittaisadmittanssi.

Johdon pitkittäisimpedanssin resistanssi on suurin pätötehohäviöiden aiheuttaja johdolla [30]. Konduktanssi g puolestaan kuvaa johdon poikittaisadmittanssissa tapahtuvia vuotovirtahäviöitä, esimerkiksi kaapelin tapauksessa eristeen läpi maahan kulkevaa resistiivistä vuotovirtaa [31]. Konduktanssi on kuitenkin yleensä hyvin pieni, eikä sitä esimerkiksi tarvitse yleensä huomioida alle 220 kV jännitteillä [28]. Pitkittäisreaktanssi X puolestaan kuvaa johdon induktanssin vaikutusta, joka johtuu sähkövirran aiheuttamasta magneettikentästä johdolla [30]. Suskeptanssi b on johdon kapasitanssin c käänteisarvo ja kuvaa jännitteen aiheuttamaa sähkökenttää eri vaiheiden vaihejohtimien välillä ja vaihejohtimien ja maan välillä [31].

4.3 Kulkuaaltoilmiö transienttiansalyysissä

Kun mallinnetaan käyttötaajuisia virtaa ja jännitettä huomattavasti nopeampia ilmiöitä, verkkoa ei enää voida kuvata keskitettyjen verkkokomponenttien avulla, kuten esimerkiksi π -sijaiskytkennässä tehdään. Nopeiden transientti-ilmiöiden mallinnuksessa tilanne on hieman samankaltainen kuin pitkillä siirtojohdoilla, joita pitää mallintaa jakautunein vakioin. Taajuuseron ja reaktiivisten komponenttien taajuusriippuvuuden takia verkkoa ei voida kuitenkaan kuvata samoin kuin pitkillä siirtojohdoilla. Ainoa ero pitkän siirtojohdon ja transienttiaallon kulkuaaltoyhtälöiden johtamisessa on, että pitkällä siirtojohdolla perustaajuisia ilmiöitä tutkittaessa liikutaan kaiken aikaa ajan ja paikan määrittämissä avaruudessa, kun taas transientti-ilmiöiden tapauksessa hetkellisarvoja tarkastellaan Laplace-tasossa. [1; 28]

Tässä alaluvussa tarkastellaan kulkuaallon etenemistä johdolla, sekä sen ominaisuuksia. Kulkuaaltoilmiön matemaattinen mallintaminen on verrattain hankalaa ja sen yksityiskohtainen matemaattinen käsittely jätetään tässä pois. Kulkuaaltoilmiön yksityiskohtainen tarkastelu on esitetty esimerkiksi viitteen [1] luvussa 5 ja liitteessä 4.

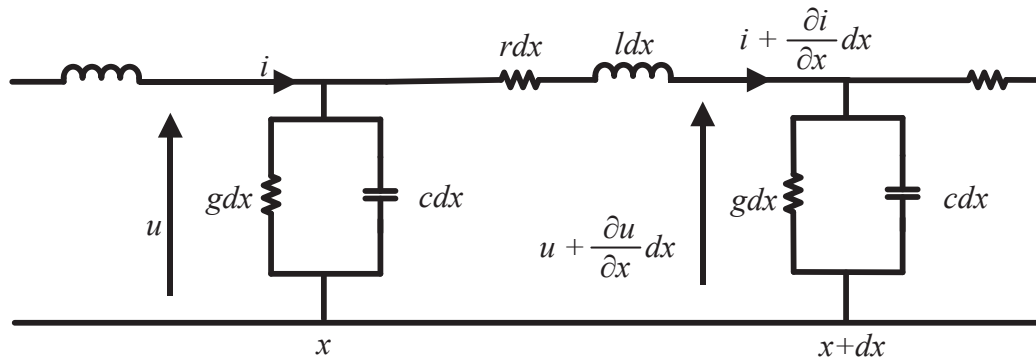
4.3.1 Kulkuaallon eteneminen johdolla

Kulkuaaltoilmiötä mallinnettaessa johdon resistanssit, induktanssit, konduktanssit ja kapasitanssit on ajateltava jakautuneiksi pitkin johtoa. Tällöin päästään kuvan 17 osoittamaan tilanteeseen, jossa johto koostuu äärettömästä määrästä differentiaalisia johtoalkioita. Jännite u ja virta i ovat nyt sekä paikan x , että ajan t funktioita, jolloin joudutaan siirtymään osittaisdifferentiaaliyhtälöiden käyttöön. Kuvan 17 sijaiskytkennän perusteella voidaan johtoalkioissa tapahtuvan virran ja jännitteen muutoksille kirjoittaa seuraavat yhtälöt 9 ja 10. Yhtälöistä tulee kuitenkin huomata, että etäisyyden nollapisteen valinta yhtälöitä johdettaessa on hieman epäintuitiivinen, sillä etäisyyskoordinaatti saa arvon $x = 0$ johdon loppupäässä ja arvon $x = s$ johdon alkupäässä. Suure s merkitsee johdon pituutta x -akselin suunnassa. [1; 28; 32]

$$u - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = r dx i + l dx \frac{\partial i}{\partial t} \quad (9)$$

$$i - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) = g dx u + c dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

Missä u on jännite, i virta, x paikka johdolla ja t aika. Yhtälöissä 9 ja 10 r , l , g ja c merkitsevät pituutta kohti laskettua resistanssia, induktanssia, konduktanssia ja kapasitanssia.



Kuva 17. Jakautunein vakioin kuvatun johdon johtoalkio. Perustuu lähteeseen [1].

Kulkuaaltoyhtälöiden johtaminen voidaan aloittaa kirjoittamalla jännitteen ja virran muutosta x -akselin positiiviseen suuntaan kuljettaessa kuvaava yhtälöpari. [1]

$$-du = \left(r + l \frac{\partial}{\partial t} \right) i dx \quad (11)$$

$$-di = \left(g + c \frac{\partial}{\partial t} \right) u dx \quad (12)$$

Ratkaisun muodollinen esittäminen helpottuu, kun laskenta suoritetaan Laplace-tasossa. Kulkuaaltoyhtälöiden ratkaiseminen ylläolevasta differentiaaliyhtälöparista on matemaattisesti vaikeaa, eikä sitä tässä käsitellä.

Kulkuaaltoyhtälöiden ratkaisussa oletetaan, ettei johdolla tapahdu kulkuaallon vääristymisiä. Tällöin viitteen [1] liitteen 4 mukaan yhtälöiden 11 ja 12 ratkaisu on yhtälöiden 13 ja 14 mukainen. [1]

$$u(t, x) = e^{-a\frac{x}{v}} f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + e^{a\frac{x}{v}} f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (13)$$

$$i(t, x) = \frac{1}{Z_w} \left[e^{-a\frac{x}{v}} f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - e^{a\frac{x}{v}} f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] \quad (14)$$

Suure Z_w on häviöttömän johdon aaltoimpedanssi ja se lasketaan yhtälöstä 15a. Lisäksi kerroin a yhtälöissä 13 ja 14 on yhtälön 15b kuvaamaa muotoa.

$$Z_w = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (15a)$$

$$a = \frac{r}{2l} + \frac{g}{2c} \quad (15b)$$

Ratkaisua johdettaessa oletettiin, että johdolla ei tapahdu vääristymisiä. Tämä ehto toteutuu, kun

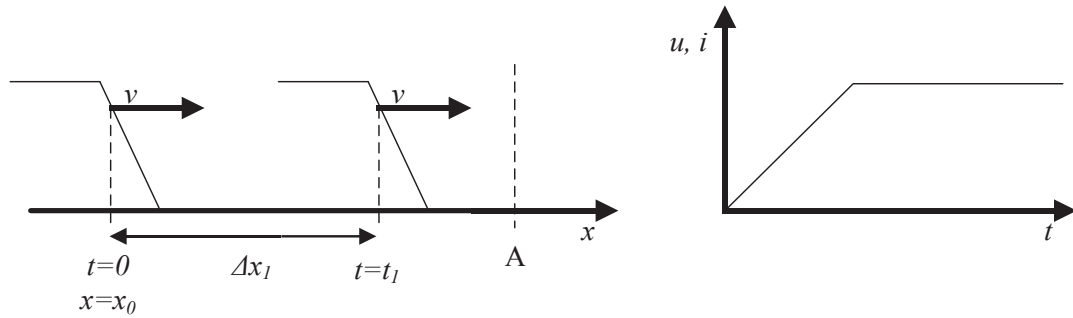
$$b = \frac{r}{2l} - \frac{g}{2c} = 0. \quad (16)$$

Kun vääristymättömyysehto toteutuu, vaimennuskertoimeksi α tulee

$$\alpha = \frac{a}{v} = \frac{r}{Z_w}, \quad (17)$$

missä suure v kuvaa kulkuaallon etenemisnopeutta johdolla. Aaltoimpedanssi Z_w voidaan siis laskea vääristymättömälle johdolle kaavasta, joka pätee häviöttömälle johdolle ($r = 0$, $g = 0$), vaikka itse johto ei olisikaan häviötön. Yhtälöissä 13 ja 14 esiintyvät funktiot f_1 ja f_2 määräytyvät differentiaaliyhtälöryhmän reunaehdoista. Niissä esiintyvä muuttuja $t \pm x/v$ voidaan esittää myös muodossa $x \pm vt$ ilman, että lausekkeiden sisältö muuttuu. Tällöin vaimennusta kuvaavan eksponenttilausekkeen muoto pitää muuttaa. [1]

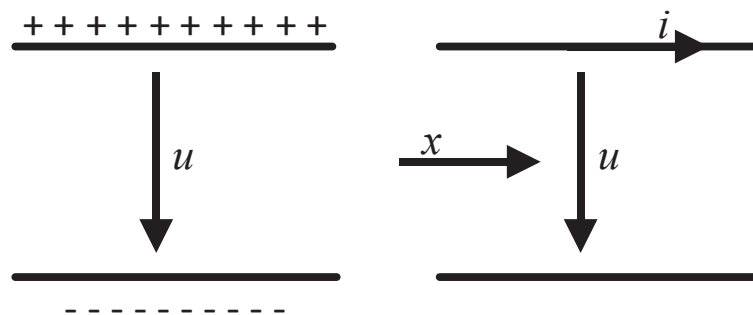
Ratkaisuyhtälöitä 13 ja 14 voidaan tulkita graafisesti kuvan 18 osoittamalla tavalla. Yhtälöiden mukaan jännite ja virta muodostuvat x-akselin positiiviseen suuntaan kulkevasta komponentista $f_1(x - vt)$ ja negatiiviseen suuntaan kulkevasta komponentista $f_2(x + vt)$. Kun tarkastellaan x-akselilla positiiviseen suuntaan etenevää jännitteen osakomponenttia $u_1 = f_1(x - vt)$, nähdään että paikan suhteen u_1 :n yhtälö esittää kuvan 18 vasemman puoleista tilannetta, jossa jänniteaalto etenee positiiviseen suuntaan nopeudella v .



Kuva 18. Vasemmalla johdolla etenevä jänniteaalto ja oikealla tarkastelupisteessä A mitattavissa oleva jännite tai virta. Perustuu lähteeseen [1].

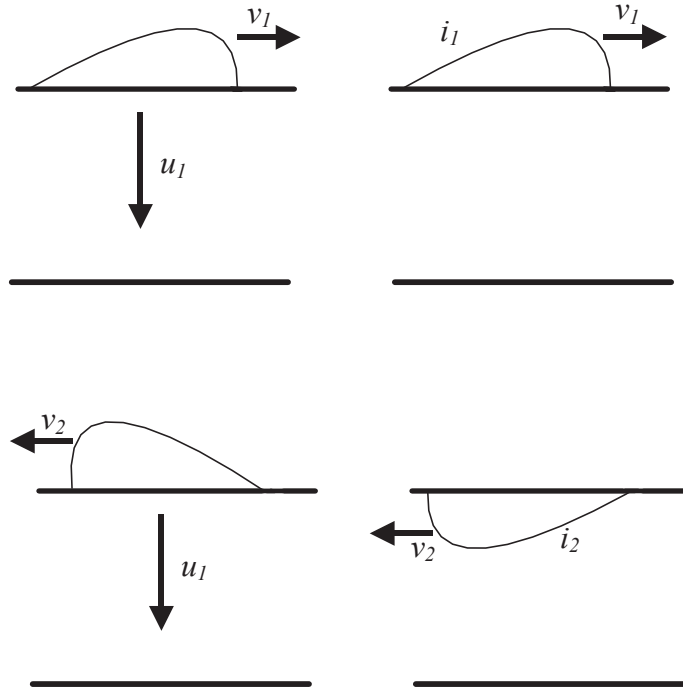
Aalto etenee ajassa $t = t_1$ matkan $\Delta x_1 = vt_1$, joten jännite hetkellä t_1 kohdassa $x = x_0 + \Delta x_1$ on sama kuin jännite paikassa $x = x_0$ hetkellä $t = t_0$. Kun aaltoa tarkastellaan ajan suhteen, päädytään kuvan 18 oikeanpuoleiseen tilanteeseen. Siinä on esitetty jännite (tai virta) tarkastelupisteessä A ajan funktiona. Kuvassa aikaa aletaan laskea hetkestä jolloin kulku-aalto saapuu pisteeseen A. [1]

Kulkuaalloille määritellään lisäksi kulkusuunnat. Paikallinen jänniteaalto tarkoittaa johdon kapasitanssien varautumista. Jänniteaallon edessä johtoa pitkin, etenee myös varaus. Sähkövarausten liikkuminen tarkoittaa, että johdolla kulkee myös virtaa, joka ilmaisee mihin suuntaan varaus johdolla liikkuu. Kuvassa 19 on määritelty jännitteiden ja virtojen suunnat.



Kuva 19. Jännite- ja virta-aaltojen positiiviset suunnat. Perustuu lähteeseen [1].

X-akselin positiiviseen suuntaan liikkuva positiivinen varaus aiheuttaa positiivisen virran ja vastaavasti negatiiviseen suuntaan liikkuva positiivinen varaus negatiivisen virran. Peruslaskusääntöjen mukaan tällöin negatiiviseen suuntaan liikkuva negatiivinen varaus synnyttää negatiiviseen suuntaan kulkevan positiivisen jännitekomponentin. Kuvassa 20 on esitetty vastakkaisiin suuntiin kulkevia jänniteaaltoja ja niihin liittyviä virta-aaltoja. [1]



Kuva 20. Vastakkaisiin suuntiin kulkevat jänniteaallot ja niihin liittyvät virta-aallot. Perustuu lähteeseen [1].

4.3.2 Aaltoimpedanssi ja kulkuaallon etenemisnopeus

Johdon aaltoimpedanssin fysikaalinen merkitys nähdään, kun jänniteaaltoa ja virta-aaltoa kuvaavat ratkaisuyhtälöt 13 ja 14 jaetaan keskenään. Positiiviseen suuntaan kulkevalle jännite- ja virta-aallolle pätee yhtälö 18. [33]

$$u_1 = i_1 Z_w \Leftrightarrow i_1 = \frac{u_1}{Z_w} \quad (18)$$

Vastaavasti negatiiviseen suuntaan eteneville jännite- ja virta-aalloille pätee yhtälö 19 [33].

$$u_2 = -i_2 Z_w \Leftrightarrow i_2 = -\frac{u_2}{Z_w} \quad (19)$$

Jännite- ja virta-aallon amplitudien kesken vallitsee siis muodollisesti Ohmin laki [33]. Yhtälöt 18 ja 19 ovat lineaarisia, mikä tarkoittaa sitä, että niitä voidaan tarkastella toisistaan riippumatta. Tämä tarkoittaa sitä, että kulkuaaltojen käsittelyssä voidaan soveltaa superpositioperiaatetta. [1]

Johdon aaltoimpedanssiin Z_w vaikuttaa johdon rakenne, mutta ei sen pituus. Myöskään jännite ja virta eivät vaikuta aaltoimpedanssiin. Yhtälön 15 mukaan aaltoimpedanssi on johdon pituusyksikköä kohti lasketun induktanssin ja kapasitanssin osamäärä. Johdon induktanssi ja kapasitanssi siis vaikuttavat aaltoimpedanssiin ja aallon etenemisnopeuteen.

Induktanssiin ja kapasitanssiin vaikuttavat johdon geometrisen rakenteen lisäksi eristeenä toimivan väliaineen permeabiliteetti μ ja permittiviteetti ε . Näistä erityisesti permittiviteetti poikkeaa tyhjiön permittiviteetistä esimerkiksi kaapeleilla [1]. Yksivaiheiselle kaapelille tai yksivaiheisesti koteloidulle GIS-putkelle aaltoimpedanssi saadaan seuraavasti

$$Z_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (20)$$

missä r_2 on vaipan tai kuoren sisäsäde ja r_1 on johtimen säde [1]. Aallon etenemisnopeudelle voidaan vastaavasti kirjoittaa

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}, \quad (21)$$

missä c_0 on valonnopeus tyhjiössä ($\sim 300\,000$ km/s), μ_r on suhteellinen permeabiliteetti ja ε_r on suhteellinen permittiviteetti.

Jos kulkuaalto etenee väliaineessa, jonka permittiviteetti ja permeabiliteetti poikkeavat tyhjiön arvoista, aaltoimpedanssi ja aallon etenemisnopeus muuttuvat. Esimerkiksi yhtälöstä 21 nähdään, että tyhjiössä olevalla häviöttömällä johdolla kulkuaalto etenee valonnopeudella. Öljypaperieristeen kaapelin suhteellinen permittiviteetti ε_r on noin 4, jolloin etenemisnopeus v laskee likimain puoleen valonnopeudesta. Todellisuudessa häviöt ja korona pienentävät kulkuaaltojen etenemisnopeutta myös ilmaeristeisillä johdoilla. Aaltoimpedanssi alenee myös suhteellisen permittiviteetin kasvaessa, mutta sen alenemiseen vaikuttavat enemmän johtorakenteen dimensioteckijät. [1]

4.3.3 Kulkuaallon teho ja energia

Kulkuaallon mukana siirtyvä hetkellinen teho voidaan määrittellä yksinkertaisesti yhtälöllä

$$p = ui, \quad (22)$$

missä u ja i ovat jännite ja virta kyseisellä ajanhetkellä. Kulkuaallon energia W puolestaan on hetkellisen tehon aikaintegraali.

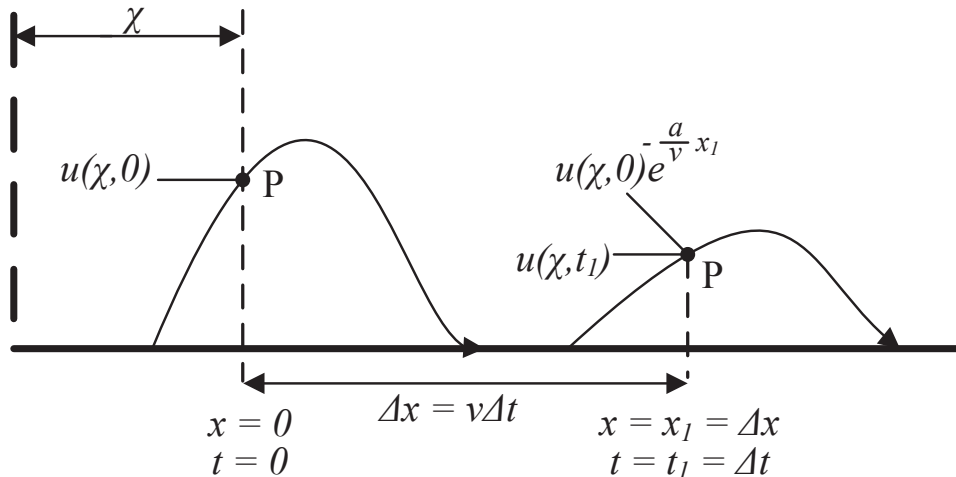
$$W = \int_0^T |p| dt = \int_0^T |ui| dt \quad (23)$$

Itseisarvomerkkejä käytetään, jotta yhtälö olisi pätevä kumpaankin suuntaan eteneville alloille.

Kulkuaallon energia varastoituu johdon sähkömagneettiseen kenttään. Aallon edetessä energia siis varastoituu vuoroin johdon sähkökenttään ja vuoroin magneettikenttään. [1]

4.3.4 Kulkuaallon vaimeneminen

Todellisuudessa johdot ja kaapelit eivät ole häviöttömiä, vaan häviöiden vuoksi johdolla kulkevan kulkuaallon energia pienenee. Tätä kutsutaan kulkuaallon vaimenemiseksi. Yhtälö 13 esittää kulkuaallon vaimenemisen vääristymättömällä johdolla. Tarkastellaan kuvan 21 mukaista tilannetta, jossa kulkuaalto etenee johdolla positiiviseen suuntaan (oikealle kuvassa).



Kuva 21. Kulkuaallon eteneminen johdolla. Perustuu lähteeseen [1].

Oletetaan, että aallon piste P on ajanhetkellä $t = 0$ paikassa $x = 0$. Tällöin jännitteen arvo pisteessä P on u_P . Ajan Δt aikana aalto etenee johdolla positiiviseen suuntaan matkan $\Delta x = vt$, jolloin ajanhetkellä $t = t_1 = \Delta t$ aallon piste P on paikassa $x = x_1 = v\Delta t$. Jos johto olisi häviötön, pisteessä x_1 vaikuttaisi ajanhetkellä t_1 sama jännite mikä vaikutti pisteessä $x = 0$ ajanhetkellä $t = 0$. Johdolla tapahtuvien häviöiden vuoksi vaikuttava jännite voidaan laskea nyt yhtälöllä 24. [1]

$$u(x_1, t_1) = u(\chi, t_1) = e^{-a\frac{v\Delta t}{v}} u(\chi, 0) = e^{-a\Delta t} u_P \quad (24)$$

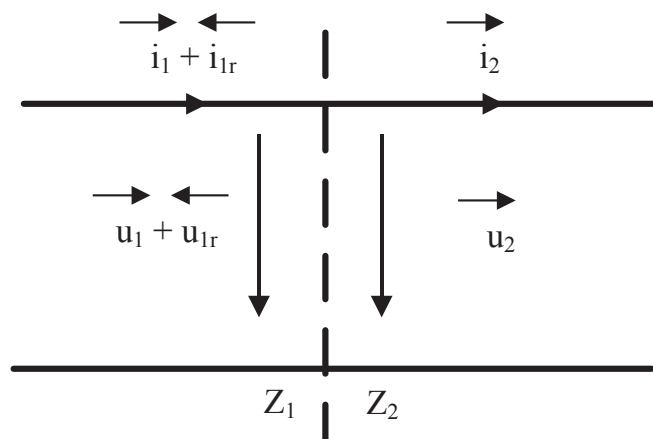
Negatiiviseen suuntaan kulkevalle aallolle voidaan suorittaa analoginen tarkastelu. Yhtälön mukaan sekä positiiviseen suuntaan, että negatiiviseen suuntaan etenevä kulkuaalto vaimenee edetessään, mutta säilyttää samalla muotonsa. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole, sillä johdot ja johtimet harvoin täyttävät vääristymättömyys ehdon. Tämä tarkoittaa sitä, että kulkuaallon edetessä sen amplitudi pienenee ja samalla sen rinta loivenee. Avojohdoilla erityisesti kulkuaaltoon vääristävästi vaikuttavat häviöiden lisäksi korona ja virranahto sekä johtimessa, että virran paluutiellä toimivassa maapiirissä. Virran etenemisnopeus ja tunkeutumissyvyys maapiirissä riippuvat kulkuaallon taajuusspektristä, mikä tekee ilmiön huomioonottamisesta ja matemaattisesta käsittelystä monimutkaisia. [1]

Kaapeleilla kulkuaallon amplitudin vaimenemiseen ja rinnan loivenemiseen vaikuttavat mm. taajuus ja eristeen ominaisuudet. Erityisesti eristeen tehohäviöt ovat merkittävä kulkuaallon vaimenemiseen vaikuttava tekijä. Mittaukset ovat osoittaneet, että käytännössä loiveneminen on huomattavasti voimakkaampaa kuin mitä teoreettiset laskut antavat odottaa. Ilmiötä on selitetty mm. eristeen dielektristen häviöiden kasvulla syöksyjännitteellä, sekä virran osittaisella paluulla maapiirin kautta. Mittausten mukaan karkeana suuruusluokka-arviona kulkuaallon vaimenemiselle yksivaihekaapelissa voidaan pitää 0,7-1 $\mu\text{s}/\text{km}$ ja kolmivaihekaapelille 1-3 $\mu\text{s}/\text{km}$. [1]

Käytännössä teoreettisiin laskuihin ei voi luottaa kulkuaallon vaimenemista kaapelilla tutkittaessa. Tarkimmat tiedot saadaan kaapelin valmistajalta tai kaapelille suoritettavista mittauksista. [1]

4.3.5 Kulkuaaltojen heijastuminen

Kulkuaallon saapuessa johdolla aaltoimpedanssin epäjatkuvuuskohtaan, tapahtuu heijastuminen. Heijastumisilmiötä voidaan havainnollistaa siten, että ajatellaan johdon aaltoimpedanssin kasvavan aaltoimpedanssin muutoskohdassa. Kulkuaallolle tämä merkitsee sitä, että kulkuaallon virta pienenee epäjatkuvuuskohdan jälkeen. Tällöin varausta alkaa kasaantua muutoskohtaan, jolloin jännite epäjatkuvuuskohdassa nousee. Tasapainon säilyttämiseksi syntyy uusi aalto, joka jakautuu heijastuvaan ja suoraan jatkavaan osaan. Kuva 22 havainnollistaa kulkuaallon käyttäytymistä aaltoimpedanssin muutoskohdassa. [1]



Kuva 22. Kulkuaallon heijastuminen aaltoimpedanssin muutoskohdassa. Perustuu lähteeseen [1].

Kuvan 22 mukaisesti tasapainoehdoksi saadaan:

$$u_1 + u_{1r} = u_2 \quad (25a)$$

$$i_1 + i_{1r} = i_2 \quad (25b)$$

Yhtälöstä 25 nähdään, että jatkavan aallon jännite ja virta ovat yhtä suuret kuin saapuvan aallon jännitteen ja virran, sekä heijastuvan aallon jännitteen ja virran summat. Lisäksi jännitteille ja virroille voidaan kirjoittaa seuraavat ohmin lain mukaiset yhtälöt.

$$i_1 = \frac{u_1}{Z_1} \quad (26a)$$

$$i_{1r} = -\frac{u_{1r}}{Z_1} \quad (26b)$$

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} \quad (26c)$$

Yhtälöiden 25 ja 26 perusteella voidaan edelleen ratkaista jännitteet u_2 ja u_{1r} ja virrat i_2 ja i_{1r} .

$$u_2 = \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}u_1 = \tau_u u_1 \quad (27a)$$

$$u_{1r} = u_2 - u_1 = \frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2}u_1 = \rho_u u_1 = (\tau_u - 1)u_1 \quad (27b)$$

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1+Z_2}i_1 = \tau_i i_1 \quad (28a)$$

$$i_{1r} = i_2 - i_1 = \frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2}i_1 = \rho_i i_1 = (\tau_i - 1)i_1 \quad (28b)$$

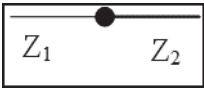

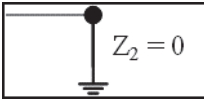
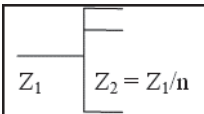
Yhtälöissä 27 ja 28 määritellyt kertoimet τ ja ρ ovat läpäisykerroin ja heijastuskerroin virralle ja jännitteelle. [1]

Kulkuaallon heijastumisen kannalta tärkeitä erityistapauksia ovat avoin johto ja oikosuljettu johto. Avoimen johdon tapauksessa kulkuaalto heijastuu takaisin niin, että jännite kaksinkertaistuu, kuten kohdassa 2.1.2 todettiin. Tällöin virta-aalto heijastuu negatiivisena niin, että johdon lopussa vaikuttava virta on kaikkina ajanhetkinä nolla. Oikosuljetulla johdolla puolestaan virta kaksinkertaistuu ja jännitteelle tapahtuu vastaavanlainen negatiivinen heijastuminen, jolloin jännite johdon lopussa on kaikkina ajanhetkinä nolla. [1]

Lisäksi aaltoimpedanssin muutoskohtien yhteydessä on syytä kiinnittää huomiota johdon haarautumispisteisiin ja kaapelin ja avojohdon yhtymäkohtiin. Johdon haarautumispisteessä kulkuaallon amplitudi pienenee ja kaapelin ja avojohdon yhtymäkohdissa tapahtuu heijastuksia. Kaapelin aaltoimpedanssi on tyypillisesti pienempi kuin avojohdon, esimerkiksi 10 % avojohdon aaltoimpedanssista. Tällöin kaapeliin jatkava aalto on yhtälön 27a mukaisesti noin 18 % tulevasta aallosta. Tämän perusteella kaapelin voidaan ajatella itse suojaavan itsensä ylijännitteiltä. Tämä väite kuitenkin pitää paikkaansa vain silloin, kun kaapelin lähellä ei tapahdu vikaa, joka voisi aiheuttaa negatiivisia heijastuksia. [1]

Taulukossa 6 on esitetty neljä perustapausta erilaisista aaltoimpedanssin epäjatkuvuuskohdista ja kulkuaallon käyttäytyminen niissä. Tarkemmin heijastuvan ja jatkavan aallon käyttäytymistä epäjatkuvuuskohdissa käsitellään esimerkiksi Suurjännitetekniikka-kirjan [1] luvussa 5.

Taulukko 6. Heijastuva ja jatkava aalto erilaisissa epäjatkuvuuskohdissa. Perustuu lähteeseen [1]

Epäjatkuvuustapaus	Sijaiskytkentä	Heijastuva aalto	Jatkava aalto
Aaltoimpedanssin muutos		$u_{1r} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1$ $i_{1r} = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} i_1$	$u_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_1$ $i_2 = \frac{2}{Z_2 + Z_1} u_1$
Avoin johto		$u_{1r} = u_1$ $i_{1r} = -i_1$	$u_2 = 2u_1$ $i_2 = 0$
Oikosuljettu johto		$u_{1r} = -u_1$ $i_{1r} = i_1$	$u_2 = 0$ $i_2 = \frac{2u_1}{Z_1} = 2i_1$
n rinnakkaista lähtöä		$u_{1r} = \frac{1 - n}{1 + n} u_1$ $i_{1r} = -\frac{1 - n}{1 + n} i_1$	$u_2 = \frac{2}{1 + n} u_1$ $\frac{i_2}{n} = \frac{2u_1}{(1 + n)Z_1} u_1$

5. KUIVAMUUNTAJAT JA YLIJÄNNITESUOJAUS

Muuntajien tehtävä vaihtosähköverkoissa on muuntaa jännitettä eri verkon osien välillä ja näin yhdistää toisiinsa eri jännitetason verkkoja. Tämän lisäksi muuntajia voidaan käyttää jännitteensäätöön. Esimerkiksi 110/20 kV sähköasemilla päämuuntajan käämikytkimellä voidaan säätää muuntajan muuntosuhdetta ja pitää aseman 20 kV kiskon jännite suurin piirtein vakioarvossa kuormitustilanteiden vaihdellessa.

Muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitusvirtaa katkaistaessa muuntajan napoihin voi syntyä suuriakin ylijännitteitä. Erityisesti kuivamuuntajat ovat ylijännitteille alttiita. Tästä syystä muuntajien kannelle yleensä asennetaan ylijännitesuojia suojaamaan muuntajaa transienttiylijännitteiltä, jotka voivat aiheutua ilmastollisista syistä tai sitten kytkentätoimenpiteiden seurauksena.

Tässä luvussa käsitellään kuivamuuntajia yleisesti, sekä ylijännitteiden vaikutusta kuivamuuntajiin. Lisäksi perehdytään ylijännitesuojiiin ja -suojuukseen. Muuntajan perustointaperiaate oletetaan yleisesti tunnetuksi tiedoksi, eikä sitä tässä käsitellä.

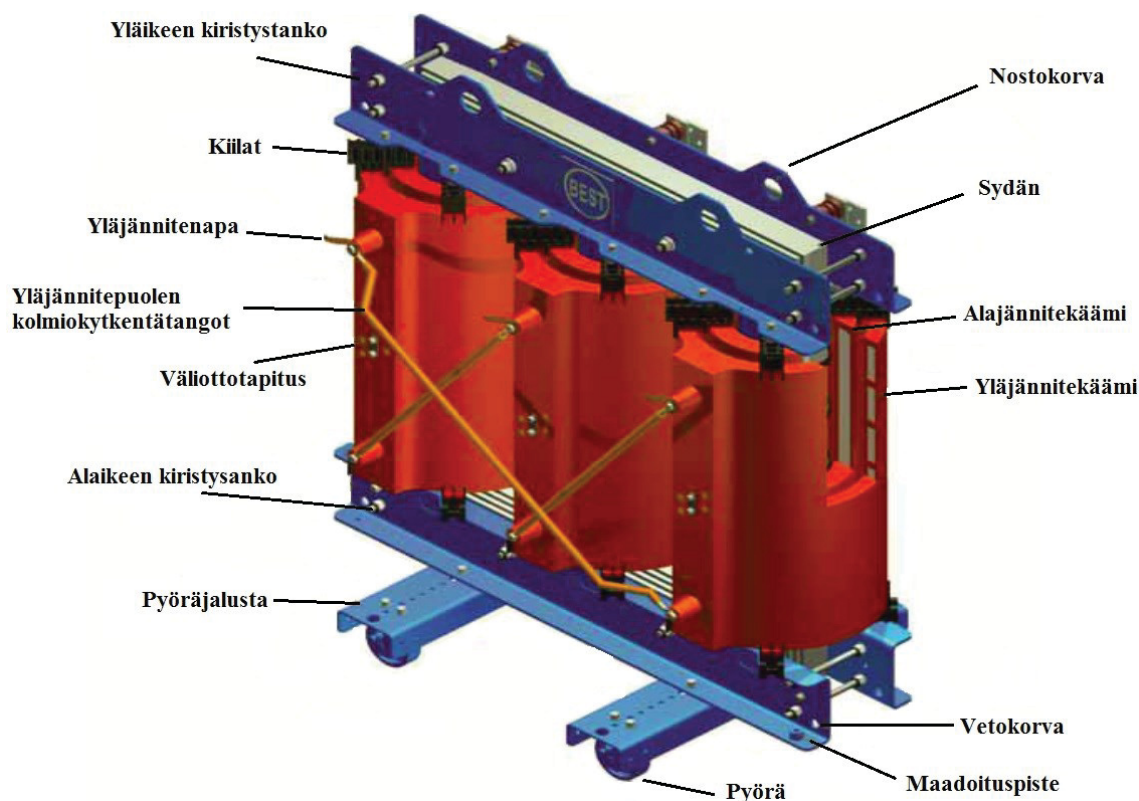
5.1 Kuivamuuntajista yleisesti

Tavallisesti suurmuuntajissa ja jakelumuuntajissa käytetään eristysaineena muuntajaöljyä ja paperia. Öljymuuntajilla on kuitenkin aina olemassa riski öljyvuotoon tai muuntajapalloon, sillä muuntajaöljy on palavaa ainetta. Tästä syystä paikoissa, joissa ympäristö on erityisen herkkä tai kun öljymuuntajaa ei haluta käyttää sen muodostaman suuren palokuorman vuoksi, käytetään usein kuivamuuntajia. Esimerkiksi teollisuuden jakeluverkoissa käytetään yleisesti kuivamuuntajia.

Erilaisissa kuivamuuntajatyypeissä käytetään erilaisia eristysmateriaaleja. Tyypillisesti kuivamuuntajan eristysrakenne on hartsia ja jäähdytysväliaineena toimii ilma. Alla on lueteltu muutamia kuivamuuntajatyyppejä [34].

- Valuhartsikuivamuuntajat
- Epoksi-lasikuitueristeinen Resibloc-muuntaja
- Tyhjiökyllästetyt kuivamuuntajat.

Kuvassa 23 on esitetty valuhartsieristeisen kuivamuuntajan rakenne. Kuvasta nähdään, että kuivamuuntajassa muuntajan sydän ja eri vaiheiden käämit ovat silmin nähtävissä toisin kuin öljymuuntajassa.



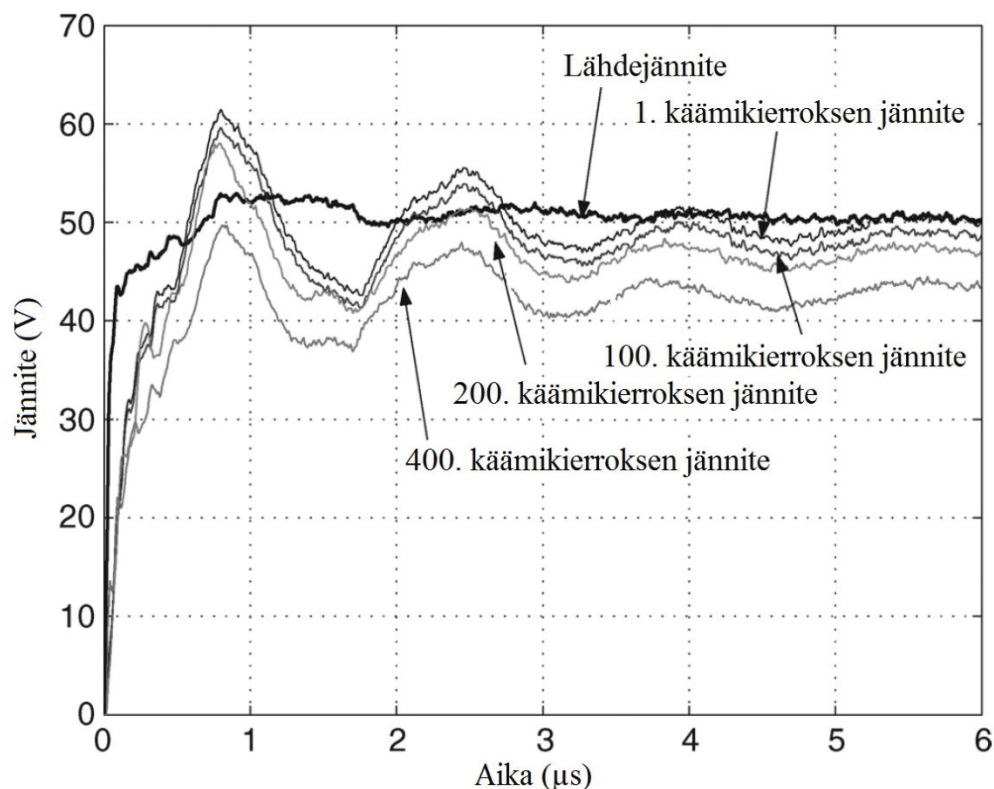
Kuva 23. Valuhartsieristeisen kuivamuuntajan rakenne. Muokattu lähteestä [34]

Kuivamuuntajan ja öljymuuntajan sähkötekninen toimintaperiaate on samanlainen: kummankin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Muuntajatyypin suurin ero onkin eristysrakenteessa. Öljymuuntajissa kuormitusvirran tuottama lämpö siirtyy käämityksistä muuntajaöljyyn, josta se edelleen johtuu muuntajatankkiin ja lopulta säteilee ilmaan. Kuivamuuntajissa taas muuntajakäämeissä syntyvä lämpö siirtyy suoraan ilmaan.

5.2 Ylijännitteiden vaikutukset kuivamuuntajiin

Muuntajakäämin jännitejakauma riippuu voimakkaasti siihen kohdistetun jännitteen aaltomuodosta. Matalilla taajuuksilla, kuten verkon perustaajuudella, jännitejakauma käämillä on lineaarinen. Suuritaajuisilla ja nopeilla transienttiylijännitteillä sen sijaan jännitejakauma käämillä muuttuu epälineaariseksi siten, että suurin osa jännitteestä kohdistuu muutamalle ensimmäiselle käämikierrokselle. Tällöin muuntajakäämin ensimmäisten käämikierrosten välinen jännite on huomattavasti suurempi kuin normaalitilanteessa. Normaalisti muuntajat kuitenkin suunnitellaan kestävänsä nämä epälineaarisen jännitejakauman tuottamat rasitukset. [35]

Viitteessä [36] on 6,6/0,69 kV 15 MVA muuntajan napoihin kohdistettu jänniteimpulssi ja mitattu jännitteen jakautumista eri käämikierroksille. Kuvassa 24 on esimerkin vuoksi esitetty viitteessä [36] mitattu jännitteen epälineaarinen jakautuminen käämille.



Kuva 24. Jännitteen jakautuminen eri käämikierröksille. Muokattu lähteestä [36].

Suurtaajuinen transienttiylijännite voi myös toimia herätteenä muuntajan sisäisille resonansseille, mikäli transienttiylijännitteen taajuus on sama kuin muuntajan oma resonansitaajuus. Muuntajan sisäinen resonanssi voi voimistaa entisestään ylijännitettä ja johtaa muuntajavaurioon. [35]

Syy sille, miksi kuivamuuntajat ovat öljymuuntajia herkempiä ylijännitteille, johtuu todennäköisesti siitä, että kuivamuuntajissa käytetty kiinteä eriste ei palaudu. Öljymuuntajissa käytetty muuntajaöljy on palautuva eriste, joka ei vaurioidu pysyvästi esimerkiksi osittaispurkausten yhteydessä. Kuivamuuntajien eristysrakenne sen sijaan vaurioituu pysyvästi jo pienen osittaispurkausaktiiviteetin seurauksena, jolloin vaurioitunut eristysrakenne voi myöhemmin johtaa laajempaan eristysvaurioon. Kuivamuuntajien suurempi ylijännitealttius öljymuuntajiin verrattuna ei kuitenkaan näyttäisi olevan täysin yksiselitteistä ainakaan ABB Corporate research centerissä tehtyjen laboratoriomittausten mukaan [20]. Lars Liljestränd et al. ovat suorittaneet lukuisia laboratoriomittauksia, joissa he ovat kytkeneet tyhjiökatkaisijalla kuivamuuntajia [6-8]. Mittauksissaan he eivät ole saaneet yhtään kuivamuuntajaa rikki, mutta eräs öljymuuntaja on kylläkin rikkoutunut [20].

Tässä diplomityössä ei perehdytä syvällisesti muuntajan sisäisiin ilmiöihin, kuten käänin jännitejakaumatarkasteluihin. Muuntajan sisäisten ilmiöiden tutkiminen ja mallintaminen korkeataajuisten transientti-ilmiöiden yhteydessä vaatisi hyvin tarkkaa ja yksityiskohtaista tietoa muuntajan käämitysrakenteen geometriasta [35]. Yleensä näin tarkkaa tietoa

muuntajan rakenteesta on vain muuntajavalmistajilla. Tässä työssä tyydytään siis tarkastelemaan vain muuntajan navoista mitattavissa olevia ilmiöitä.

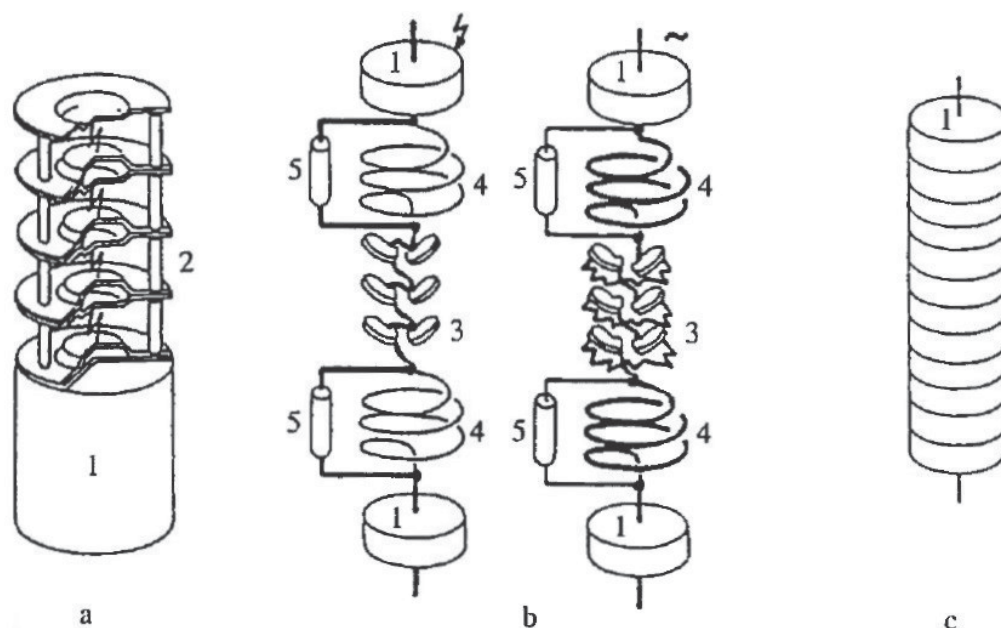
5.3 Ylijännitesuojien toimintaperiaate ja ominaisuudet

Verkossa esiintyviä ylijännitteitä vastaan voidaan suojautua ylijännitesuojilla. Ylijännitesuojien tehtävänä on rajata suojattavan kohteen läheisyyteen saapuvien ylijännitteiden amplitudi turvalliselle tasolle [13]. Parhaiten ylijännitesuojat toimivat verkon transienttiluonteisia ylijännitteitä vastaan. Pientaajuisilta ylijännitteiltä suojautumiseen ylijännitesuojia ei yleensä voida käyttää, sillä niiden pitkän kestoajan vuoksi ylijännitesuojilta vaadittaisiin huomattavan suuri energianpurkauskyky. Pientaajuiset ylijännitteet on kuitenkin huomioitava ylijännitesuojauksen suunnittelussa ja mitoituksessa, sillä ylijännitesuojien on selvittävä normaalin käyttötilanteen aikana ilmenevistä jännite- ja virtarasituksesta. Yleisin pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttava tilanne on verkon yksivaiheinen maasulku, jolloin tähtipisteestään maasta erotetussa verkossa kahden terveen vaiheen vaihejännitteet voivat nousta pääjännitteen suuruiseksi. Tällöin vaiheen ja maan väliin asennettujen ylijännitesuojien tulee kestää tämä maasulun aiheuttama jänniterasitus, sekä sen aikana suojan läpi kulkeva vuotovirta. [1; 9; 13; 37]

1980-luvun puoleen väliin asti keskijänniteverkoissa käytettiin lähes ainoastaan levykipinävälisuoja. Levykipinävälisuoja koostuu levymäisillä elektrodeilla osiin jaetusta kipinävälisestä ja sen kanssa sarjassa olevasta piikarbidivastuksesta, jonka virta-jännite-käyrä on epälineaarinen. Ylijännitteellä levykipinävälit syttyvät ja purkavat ylimääräisen varauksen maahan. Epälineaarisen vastuksen tehtävä on suojan toimiessa rajoittaa suojan läpi kulkevaa maasulkuvirtaa niin, että valokaari levykipinäväleissä sammuu itsestään jännitteen nollakohdassa. [1; 9]

Toinen käytössä oleva venttiilisuojatyyppi on aktiivisilla kipinäväleillä varustettu magneettipuhallussuoja. Sen suurin ero perinteiseen levykipinävälisuojaan on se, että kipinäväliden ja purkausvastusten kanssa on sarjassa ns. puhalluskäämejä, joiden rinnalle on kytketty ohitusvastukset. Magneettipuhallussuojassa transienttiyläjännitteen aiheuttama suurtaajuinen virta kulkee puhalluskäämien ja ohitusvastusten kautta maahan. Transienttiyläjännite sytyttää valokaaren magneettipuhallussuojan kipinäväleihin, jolloin korkeataajuinen virta kulkee puhalluskäämien ohitusvastusten kautta maahan, sillä käämien induktiivinen reaktanssi on korkeataajuisella virralla suuri. Virran suuritaajuisen komponentin purkauduttua taajuudeltaan matalampi jälkivirta ohjautuu puhalluskäämeille. Jälkivirta aiheuttaa puhalluskäämeissä magneettikentän, joka puolestaan kohdistaa valokaaren varautuneisiin hiukkasiin voiman, jota kutsutaan magneettipuhallukseksi. Tämä magneettikenttä puhaltaa valokaaren pidemmäksi, jolloin valokaarijännite kasvaa ja valokaaren virta puolestaan pienenee. Tällöin valokaari sammuu ja purkausvirta katkeaa jo huomattavasti ennen verkkojännitteen nollakohtaa. [1; 9]

Kuvassa 25 on esitetty eri venttiilisuojatyyppejen periaatteellisia rakennekuvia. Vasemmassa kuvassa on levykipinävälisuoja, keskellä magneettipuhallussuoja ja oikealla metallioksidisuoja.



Kuva 25. Venttiilisuojien periaatteellisia rakenteita. a) Levykipinävälisuoja. b) Magneettipuhallussuoja. c) Metallioksidisuoja. 1 epälineaarinen vastus. 2, 3 kipinävälit. 4 puhalluskäämit. 5 puhalluskäämien ohitusvastukset. [9]

Nykyään metallioksidisuojat (kuvassa oikealla) ovat käytännössä täysin syrjäyttäneet aiemmin käytössä olleet levykipinävälisuojat uusissa asennuksissa. Tämä johtuu niiden hyvistä ylijännitesuojausominaisuuksista ja perinteisiin venttiilisuojiin verrattuna kilpailukykyisistä hinnoista. Tässä työssä keskitytään käsittelemään metallioksidisuojia, sillä ne ovat nykyään hallitseva ylijännitesuojatyyppi.

5.3.1 Metallioksidisuojat

Metallioksidisuojat eli MO-suojat koostuvat yleisesti ottaen kahdesta osasta: aktiivisesta osasta ja eristävästä kuoriosasta. Aktiivisella osalla tarkoitetaan MO-suojan epälineaarista vastusta. Eristävä kuori taas on valmistettu synteettisestä polymeeristä tai posliinista. Nykyään polymeerit ovat kuitenkin korvanneet posliinin ylijännitesuojien kuorimateriaalina. [1; 37]

Sinkkioksidi (ZnO) on metallioksidisuojien epälineaarisen vastuksen pääasiallinen materiaali. Vastuselementit eivät kuitenkaan ole puhdasta sinkkioksidia, vaan vastukseen lisätään pieniä määriä muita metallioksideja. Muilla metallioksideilla on suuri vaikutus vastuksen sähköisiin ominaisuuksiin, sillä ne käytännössä määräävät MO-suojan epälineaarisen käytöksen. Jokaisella metallioksidisuojavalmistajalla onkin oma ”reseptinsä”, jonka

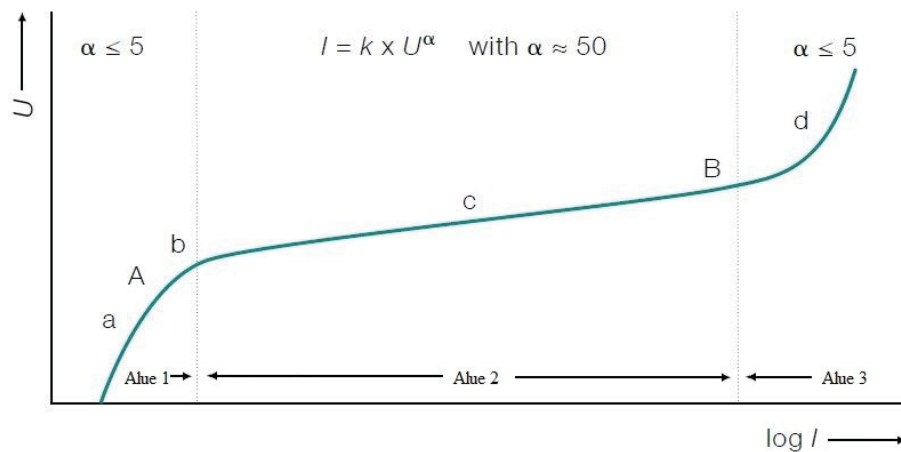
mukaan ne valmistavat ylijännitesuojansa. Metallioksidijyväsistä koostuva massa sintrataan lieriönmuotoisiksi vastuselementeiksi, joita edelleen kytetään rinnan ja sarjaan vaadittavan suojaustason ja energianpurkauskyvyn edellyttämä määrä. Yksittäisen jyväsien keskus on sinkkioksidia, jonka pinnalle on muodostunut muista metallioksideista koostuva pintakerros. Kuvassa 26 on esitetty ABB:n valmistamia valmiita MO-vastuselementtejä.



Kuva 26. ABB:n valmistamia MO-vastuselementtejä [37].

MO-vastuselementtien halkaisija määrää venttiilisuojan virtakestoisuuden ja korkeus suurimman käyttöjännitteen. Ylijännitesuojan energianpurkauskyky puolestaan määräytyy MO-vastuselementtien tilavuudesta. [37]

Kuvassa 27 on esitetty tyypillinen metallioksidivastusmateriaalin jännite-virta-ominaiskäyrä. Kuvasta nähdään vastuksen kolme eri toiminta-aluetta.



Kuva 27. MO-vastuselementin epälineaarinen jännite-virta-ominaiskäyrä. a kapasiivinen lineaarinen alue, missä virta on alle milliampeerin. b ominaiskäyrän taipetepiste, jossa tapahtuu siirtyminen eristeestä johteeksi. c vahvasti epälineaarinen alue. d resistiivinen lineaarinen alue. A jatkuvan käyttöjännitteen alue. B jännösjännite, suojaustaso. Muokattu lähteestä [37].

Kuvassa vasemmalla alueessa 1, missä suojan yli vaikuttava jännite on alle suurimman jatkuvan käyttöjännitteen, virran suuruuden määrää sinkkioksidijyvasten huonosti virtaa johtava pintakerros. Alueessa 1 metallioksidisuoja läpi kulkeva virta on resistiivis-kapasitiivista vuotovirtaa. Tällä alueella kapasitiivinen virtakomponentti on huomattavasti resistiivistä virtakomponenttia suurempi. Jatkuvan käyttöjännitteen ja vuotovirran välillä onkin lähes 90° vaihesiirto vuotovirran suuruuden ollessa noin 1 mA luokkaa [37]. Tärkeää on kuitenkin huomata, että pienillä virroilla eli alueella 1 sinkkioksidivastuselementillä on negatiivinen lämpötilakerroin. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpötilan kasvaessa vastuselementin resistanssi pienenee ja vuotovirta kasvaa. Kasvanut vuotovirta edelleen nostaa lämpötilaa, jolloin riskinä on, että lämpötila kasvaa jatkuvasti ja prosessi päättyy vastuselementin termiseen läpilyöntiin. Tästä syystä resistiivinen vuotovirtakomponentti on ehdottomasti tärkein alueessa 1 ja sen suuruus on mitattava tasajännitteellä. Lämpötilan nousun estämiseksi vastuselementin jäähdytys on mitoitettava niin, että vastuselementti ei joudu normaalin käyttöjännitteen vallitessa tai ylijännitteitä purettuaan tilaan, jossa termien läpilyönti on mahdollinen. [1; 9]

Taitepisteen jälkeen alueessa 2 alkaa vaikuttaa ns. tunneloitumisilmiö pintakerroksen läpi, jolloin sinkkioksidijyväsiin alkaa tunkeutua enemmän virtaa. Kipinäväliön metallioksidisuoja siirtyy pehmeästi johtavaan tilaan ilman viivettä tai syttymisjännitepiikkiä [37]. Tällä alueella vastuksen jännite-virta-ominaiskäyrä on hyvin epälineaarinen. Pienikin lisäys jännitteessä kasvattaa vastuksen läpi kulkevaa virtaa merkittävästi. Alueelle 3 siirryttäessä tunneloitumisilmiö alkaa vaikuttaa koko materiaalissa. Tällä alueella ZnO-jyvasten sisus määrää vastuksen läpi kulkevan virran, jolloin vastusmateriaalin resistiivisyys on hyvin pieni. [1]

ABB:n valmistamien metallioksidivastuselementtien kontaktipinnat metalloidaan pehmeällä alumiinilla ja reunat passivoidaan lasilla. Täten koko metallioksidivastus tulee ympäröidyksi. ABB käyttää kaikissa MO-suojissaan samaa valmistustekniikkaa. Siinä silikonista tehty suojakuori valetaan suoraan metallioksidivastuselementtien päälle. Kuvassa 28 on esitetty valmis ABB:n POLIM-D-tyyppinen metallioksidisuoja.



Kuva 28. ABB:n POLIM-D-tyyppinen keskijänniteylijännitesuoja. Vasemmalla aktiivinen osa ennen kuoren valamista. Keskellä havainnekuva, jossa näkyy aktiivinen osa silikonikuoren sisällä. Oikealla valmis ylijännitesuoja. [37]

Silikonia käytetään monesti eristemateriaalina metallioksidisuojoissa sen hyvien ominaisuuksien vuoksi. Sähköisten eristysominaisuuksiensa lisäksi silikoni on hyvin elastista ja kestää hyvin repimistä. Sillä on hyvät lämpötilastabiiliusominaisuudet ja se palaa huonosti. Erityisesti ulkoasennuksissa silikonin hydrofobisuus on merkittävä ominaisuus. [37]

Metallioksidisuojan toimintaan vaikuttaa suuresti myös jännitteenjakauma sen yli. Esimerkiksi suurjännitteiset metallioksidisuojat koostuvat yksittäisistä lyhyehköistä yksiköistä, joita on kytketty tarpeellinen määrä sarjaan. Sarjaankytketyt moduulit muodostavat pinon, jonka ylitse oleva jännite normaalissa käyttötilanteessa jakautuu kapasitiivisesti sarjaan kytkettyjen metallioksidivaristorien kapasitanssien ja niiden maata vastaan olevien hajakapasitanssien mukaisesti. Eri korkeudella olevien metallioksidivaristorien hajakapasitanssien suuruus vaihtelee merkittävästi, minkä vuoksi korkeassa ylijännitesuojoissa jännite jakautuu epälineaarisesti ylijännitesuojan yli. Jännitejakautuman epälineaarisuus siis kasvaa ylijännitesuojan pituuden kasvaessa. Tästä syystä suurjännitteiset metallioksidisuojat varustetaan jännitteenohjauselektrodilla, jonka tehtävä on ohjata jännitteenjakautumaa kapasitiivisesti niin, että kokonaisjännitteenjakauma suojan yli on mahdollisimman lineaarinen. Keskijännitteellä metallioksidisuojat ovat kuitenkin niin lyhyitä, että epälineaarista jännitteenjakautumaa suojan yli ei tarvitse huomioida. [9; 37]

5.3.2 Metallioksidisuojojen ominaisuudet

Metallioksidisuojojen käyttäytymistä kuvaavat ominaisuudet vaikuttavat metallioksidisuojan valintaan. IEC-standardi 60099-4 määrittelee metallioksidisuojojen ominaisuudet. Tärkeimpiä MO-suojojen ominaisuuksia ovat jatkuva käyttöjännite, käyttötaajuuden ylijännitteen sietokyky, mitoitusjännite, jäännösjännite, mitoituspurkausvirta ja suojaus-taso. [1; 9]

Suurin jatkuva käyttöjännite U_c (maximum continuous operating voltage) tarkoittaa suurinta perustajuuden verkkojännitteen tehollisarvoa, joka saa jatkuvasti vaikuttaa suojan yli [1; 9; 13; 37]. Lisäksi valmistajat ilmoittavat suurimman käyttötaajuuden ylijännitteen sietokyvyn (temporary overvoltage withstand capability). Tämä ilmoitetaan yleensä ominaiskäyränä, jossa suurin sallittu käyttötaajuuden ylijännite ilmaistaan ylijännitteen kestoajan funktiona. Suurin sallittu käyttötaajuuden ylijännite tarkoittaa siis jännitettä, jonka suoja kestää ominaiskäyrän määrittelemän ajan vaurioitumatta tai joutumatta termisen epästabiiliuden alueelle. [1; 9]

Mitoitusjännite U_r (rated voltage) puolestaan tarkoittaa suurinta suojan yli vaikuttavaa käyttötaajuuden jännitteen tehollisarvoa, jolla suoja toimii vielä IEC-standardin määrittelemässä toimintasyklikokeessa. Toimintasyklikokeessa simuloidaan erilaisia verkossa esiintyviä jänniterasituksia tietyin aikavälein. Useimmat valmistajat mitoittavat metallioksidisuojojensa siten, että mitoitusjännitteen U_r ja suurimman sallitun käyttöjännitteen U_c suhde on vakio. Tyypillinen arvo on $U_r / U_c = 1,25$, mutta myös muita suhdelukuja

voidaan käyttää. Mitoitusjännitettä käytetään metallioksidisuojiin valinnassa, vaikka sillä ei ole muuta merkitystä. [1; 9; 37]

Jäännösjännitteellä U_{res} tarkoitetaan suurinta jännitettä, joka vaikuttaa metallioksidisuojan yli sen ollessa johtavassa tilassa [1; 9; 13; 37]. Metallioksidisuojan jäännösjännite ilmoitetaan erilaisia jänniterasituksia aiheuttaville standardinmukaisille virtapulsseille. Standardinmukaisia virtapulsseja on kolme: jyrkkä virtapulssi (1/20 μ s), syöksyvirtapulssi (8/20 μ s) ja kytkentävirtapulssi (tyypillisesti 30/60 μ s). Metallioksidisuojan nimellipurkausvirta määrää kokeissa käytettävät virran huippuarvot. [1; 9; 37]

Nimellipurkausvirralla i_d tarkoitetaan suurinta syöksyvirtaa, jolla suoja on suunniteltu toimivaksi oikein [1]. Tätä suuremmilla virroilla valmistaja ei takaa suojan oikeaa toimintaa. Metallioksidisuojiin nimellipurkausvirran vaihtoehtoisia arvoja ovat 20, 10, 5, 2,5 ja 1,5 kA. Nykyään metallioksidisuojiin energiankäsittelykyky määritellään standardin IEC 60099-4 [38] mukaisesti suureilla Q_{th} ja W_{th} . Suure Q_{th} (thermal charge transfer rating) tarkoittaa suurinta varausta, joka voi siirtyä ylijännitesuojan läpi 3 minuutin aikana toimintakokeessa aiheuttamatta ylijännitesuojan termistä läpilyöntiä. Suure W_{th} (thermal energy rating) puolestaan tarkoittaa suurinta kJ/kV-yksikössä mitoitusjännitteellä ilmoitettua energiaa, joka voi kulkea ylijännitesuojan läpi toimintakokeessa 3 minuutin aikana aiheuttamatta termistä läpilyöntiä.

Metallioksidisuojan suojaustasosta U_p (protective level) puhuttaessa tarkoitetaan metallioksidisuojan yli ja sen välittömässä läheisyydessä vaikuttavaa jännitettä suojan toimiessa. Suojaustaso ei kuitenkaan välttämättä ole aina sama asia kuin jäännösjännite. Salamasyöksyjännitteellä metallioksidisuojan suojaustaso on joko jäännösjännite jyrkällä virtapulsilla tai jäännösjännite nimellipurkausvirralla riippuen siitä kumpi on suurempi. Loiville transienttiylijännitteille suojaustaso määritellään erikseen kytkentävirtakokeen perusteella. [1]

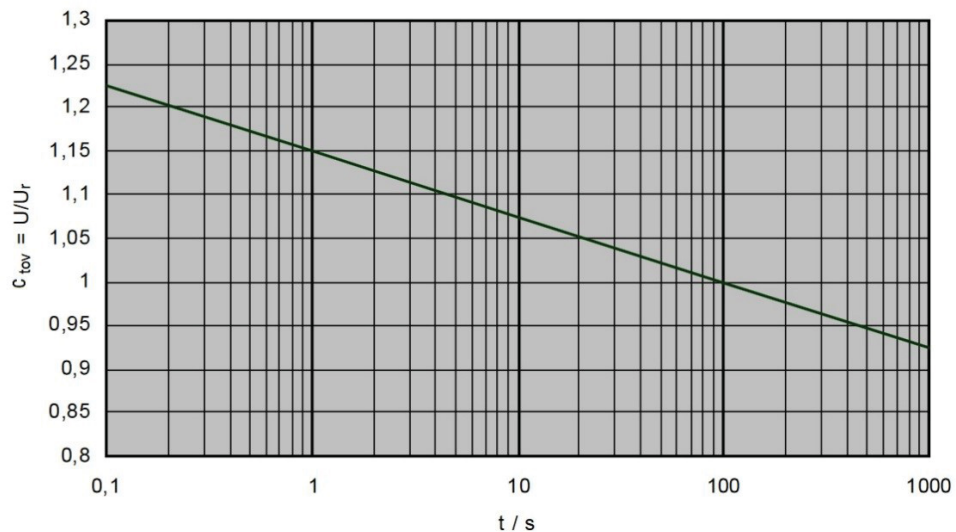
5.3.3 Metallioksidisuojiin valintakriteerit

Kun ylijännitesuojina käytetään metallioksidisuoja, on suoja mitoitettaessa tunnettava suojan asennuspaikalla esiintyvät erilaiset ylijännitteitä aiheuttavat tilanteet ja niiden aiheuttamat suurimmat käyttötaajuiset ylijännitteet. Suurimman käyttötaajuisen ylijännitteen suuruuden määrää tyypillisesti verkon maadoitustavasta johtuva maasulkukerroin. Käyttötaajuisen ylijännitteen keston määrää puolestaan verkon suojareleistyksen toiminta eli se kuinka nopeasti mahdolliset maasulut kytketään pois. [1; 9]

Metallioksidisuojan valinta alkaa suurimman jatkuvan käyttöjännitteen U_c määrittelyllä. Venttiilisuojan suurin jatkuva käyttöjännite valitaan verkon laitteiden suurimman jatkuvan käyttöjännitteen U_m perusteella soveltaen 5-10 % varmuusmarginaalia. Jos käytetään 10 % varmuusmarginaalia vaiheen ja maan väliin asennettaville suojoille käytetään arvoa $U_c = 1,1 \cdot U_m / \sqrt{3}$. Näin ollen vaihevälisuojoille pätee siis $U_c = 1,1 \cdot U_m$. Suurimman jatkuvan

käyttöjännitteen valinnassa on syytä käyttää standardien mukaista laitteiden suurinta käyttöjännitettä U_m , ellei olla täysin varmoja siitä, että verkon suurin todellinen käyttöjännite ei koskaan sivua U_m -tasoa missään verkon käyttötilanteessa. [1; 9]

Seuraavaksi siirrytään määrittelemään suojan mitoitusjännite U_r , joka valitaan käyttötaajuuden ylijännitteen sietokyvyn perusteella. Mitoitusjännitteen valinta aloitetaan arvioimalla suojan tarvitsema energianpurkauskyky, jolloin päädytään tarvittavaan suojatyyppiin. Alustavasti mitoitusjännite saadaan suhteen $U_r/ U_c = 1,25$ perusteella, mutta mitoitusjännitteen valintaa on syytä vielä pohtia verkossa esiintyvän suurimman käyttötaajuuden ylijännitteen U_{TOV} kannalta. Lisäksi siihen vaikuttaa suojareiden laukaisuajoista johtuva suurimman käyttötaajuuden ylijännitteen kestoaika t_{TOV} . Kestoajassa on syytä huomioida myös varasuojan aikaansaamaan laukaisuun kuluva aika. Kestoajan t_{TOV} perusteella määritellään valmistajan antamasta kullekin suojatyyppille ominaisesta käyrästä arvo c_{TOV} . Joissain lähteissä suhdeluvusta käytetään myös merkintää k_{TOV} . Arvo c_{TOV} on suhdeluku, joka kuvaa suurimman RMS-arvona annetun verkkotaajuuden ylijännitteen ja ylijännitesuojan mitoitusjännitteen välistä suhdetta ajan suhteen logaritmisella asteikolla esitettynä. Käyrästä voidaan siis lukea, kuinka nopeasti verkossa esiintyvä suurin käyttötaajuinen ylijännite on laukaistava, jotta ylijännitesuojaus toimii oikein. Esimerkki käyrästä on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Esimerkki käyrästä, josta c_{TOV} -arvo luetaan. Muokattu lähteestä [39].

Nyt mitoitusjännitteen tulee täyttää yhtälön 29 mukainen ehto:

$$U_r \geq \frac{U_{TOV}}{c_{TOV}} \quad (29)$$

Nyt mahdollisten suojien joukosta valitaan ylijännitesuoja, jonka suojaustasot ovat riittävän alhaiset verkon laitteiden koordinaatiokestotasoihin nähden. Valittavan ylijännitesuojan suojaustason ja suojattavan laitteen koordinaatiokestotason väliin on syytä jättää varmuusmarginaali, jolla varaudutaan mahdollisiin muutoksiin, joita voi ajan kuluessa

ilmetä esimerkiksi metallioksidisuojan suojaustasossa tai suojattavan kohteen eristyksen koordinaatiokestoputasossa. Koordinaatiokestoputason ja suojaustason välistä suhdetta kutsutaan suojaussuhteeksi ja sen tyypillinen arvo on esimerkiksi 1,2. Mikäli mikään valittavissa olevista ylijännitesuojista ei täytä ehtoja, on valittava ylijännitesuojatyypin, jonka energianpurkauskyky on suurempi kuin aiemmin valitulla suojatyypillä. [1; 9]

Lopuksi valitaan venttiilisuojan nimellipurkausvirta. Se valitaan niin, että suoja selviytyy käyttöpaikallaan todennäköisesti esiintyvistä syöksyvirroista. Suomessa keskijänniteverkoissa tyypillinen metallioksidisuojan nimellipurkausvirran arvo on 10 kA. Alle 10 kA suojaia käytetään lähinnä pienjänniteverkkojen ylijännitesuojauksessa ja vähemmän tärkeiden keskijänniteverkon laitteiden ylijännitesuojina. Tarvittavaa nimellipurkausvirtakestoisuutta voidaan karkeasti arvioida yhtälön 30 esittämällä tavalla.

$$i = \frac{2u_s - U_p}{Z_w} \quad (30)$$

Yhtälössä 30 oletetaan, että syöksyaalto, jonka amplitudi on u_s , kulkee johdolla. Johdon aaltoimpedanssi on Z_w ja sen päässä on venttiilisuoja, jonka suojaustaso on U_p . Lisäksi oletetaan, että johto on tyhjäkäyvä, mistä johtuu jänniteaallon kaksinkertaistuminen johdon loppupäässä ja kerroin 2 yhtälön 30 osoittajassa. [1; 9]

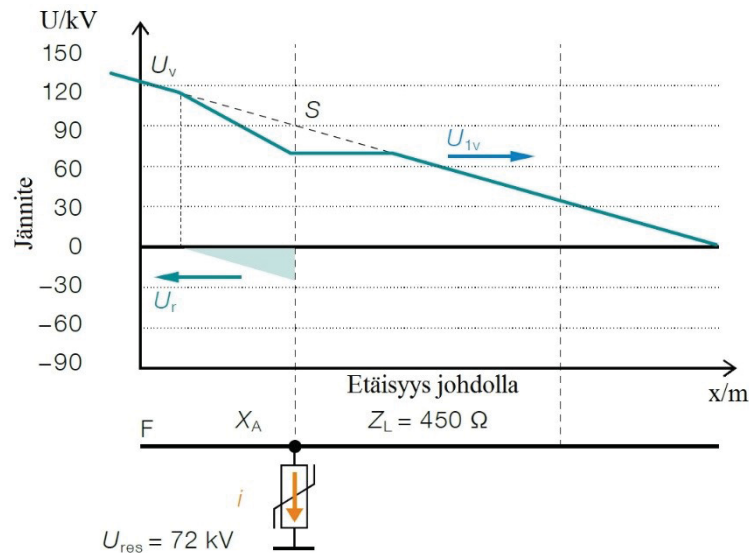
5.4 Ylijännitesuojien sijoittaminen

Kun ylijännitesuojaukseen käytetään venttiilisuoja, esimerkiksi nykyaikaisia metallioksidisuoja, ovat ylijännitesuojien sijoittamista koskevat säännöt riippumattomia venttiilisuojasuojatyypistä [1]. Peruseräite ylijännitesuojien sijoitusta suunniteltaessa on, että suojat tulisi asentaa aina mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta. Tämä johtuu siitä, että käytettävän ylijännitesuojan kilpiarvon mukainen suojaustaso saavutetaan vain ylijännitesuojan kytkentäpisteessä. Näin ollen myös suojattavan kohteen koordinaatiokestoputason ja ylijännitesuojan suojaustason välinen suojaussuhde on olemassa vain kun suoja on asennettu aivan suojattavan kohteen läheisyyteen äärettömän lyhyin johtimin. Kun ylijännitesuojan ja suojattavan kohteen etäisyys kasvaa, kasvaa myös todellinen suojaustaso suojattavassa kohteessa. Ylijännitesuojausmielessä tilanne siis heikkenee, sillä jännitetaso suojattavassa kohteessa ylijännitesuojan ollessa johtavassa tilassa kasvaa. Suojaustason nousuun vaikuttavat purkausvirran aiheuttama jännitehäviö ylijännitesuojan liitos- ja maadoitusjohtimissa, sekä transienttiylijännitteen kulkuaaltoluonteesta johtuva jännitteen nousu ylijännitesuojaa edeltävällä ja sen jälkeisellä johdon osalla. Ylijännitesuoja ei välttämättä enää suojaa kohdetta, jos se on sijoitettu liian kauas suojattavasta kohteesta. Suojaetäisyydellä L tarkoitetaan suurinta etäisyyttä ylijännitesuojan ja suojattavan kohteen välillä, jolla riittävä ylijännitesuojaus vielä toteutuu. [1; 13; 37]

Transienttiylijännitteiden etenemistä johdolla tulee tarkastella kulkuaaltolina. Ylijännitteiden analysoinnissa vain jänniteaalloilla on merkitystä [37]. Kun johdolla etenevä jänniteaalto kohtaa aaltoimpedanssin muutoskohdan, osa siitä heijastuu takaisin ja osa jatkaa

matkaansa, kuten luvussa 4.3 käsiteltiin. Tämä tarkoittaa sitä, että aaltoimpedanssien muutoskohdissa tapahtuu jännitteen nousuja ja laskuja riippuen siitä kasvaako vai pieneenekö aaltoimpedanssi muutoskohdassa. Tällaisia muutoskohtia ovat esimerkiksi kaapelin ja avojohdon yhdistyspisteet, sekä kuormien liityntäpisteet. Erityisesti heijastumisia tapahtuu, jos johdon loppupäässä on muuntaja tai avonainen piiri, esimerkiksi auki oleva erotin tai katkaisija. Tällöin johdon aaltoimpedanssi kasvaa muutoskohdassa erittäin suureksi tai jopa äärettömäksi, jolloin koko jänniteaalto heijastuu takaisin johdolle. Heijastuva jänniteaalto superponoituu saapuvaan aaltoon, jolloin jännite aaltoimpedanssin muutoskohdassa voi jopa kaksinkertaistua. [1; 37]

Tarkastellaan seuraavaksi hieman tarkemmin ylijänniteaallon käyttäytymistä muuntajan navoissa, sekä ylijännitesuojan sijoituspaikan vaikutusta muuntajan navoissa vaikuttavan ylijännitteen suuruuteen. Kuva 30 esittää johdolla etenevää jänniteaaltoa, joka saavuttaa vaiheen ja maan väliin kytketyn ylijännitesuojan.

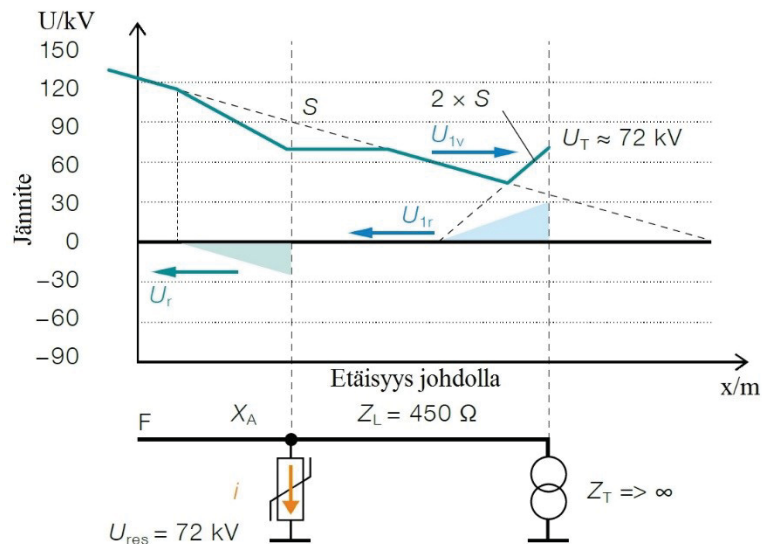


Kuva 30. Jänniteaallon eteneminen johdolla, johon on kytketty ylijännitesuoja. Muokattu lähteestä [37].

Kuvassa 30 ylijänniteaalto U_v , jonka rinnan jyrkkyys on S , etenee johdolla F, nopeudella $v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$. Johdon F aaltoimpedanssi on $Z_L = 450 \Omega$. Johdon F pisteeseen X_A on kytketty ylijännitesuoja, jonka jäännösjännite on $U_{res} = 72 \text{ kV}$. Jos jänniteaalto saavuttaa arvon $U_v = 72 \text{ kV}$, rajoittaa ylijännitesuoja jännitteen kasvua ja pitää sen tässä jäännösjännitteen määräämässä vakioarvossa. Ylijännitesuojan läpi kulkee nyt purkausvirta i , jolloin ylijännitesuoja käyttäytyy verkossa oikosulun tavoin. Oikosuljetun johdon tapauksessa jänniteaallolle tapahtuu negatiivinen heijastuminen [1]. Kuvan 30 tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että pisteeseen X_A saapuvasta jänniteaallosta se osa, joka ylittää arvon $U_{res} = 72 \text{ kV}$ näkee ylijännitesuojan oikosulkuna ja heijastuu takaisin negatiivisena aaltona U_r . Ylijännitesuojan jäännösjännitteen alittava osa saapuvasta jänniteaallosta ei puolestaan koe aaltoimpedanssin muutosta pisteessä X_A , jolloin se jatkaa etenemistään kohti johdon

loppupäätä jatkavana aaltona U_{Iv} . Jatkavan aallon amplitudi on 72 kV ja rinnan jyrkkyys S . [37]

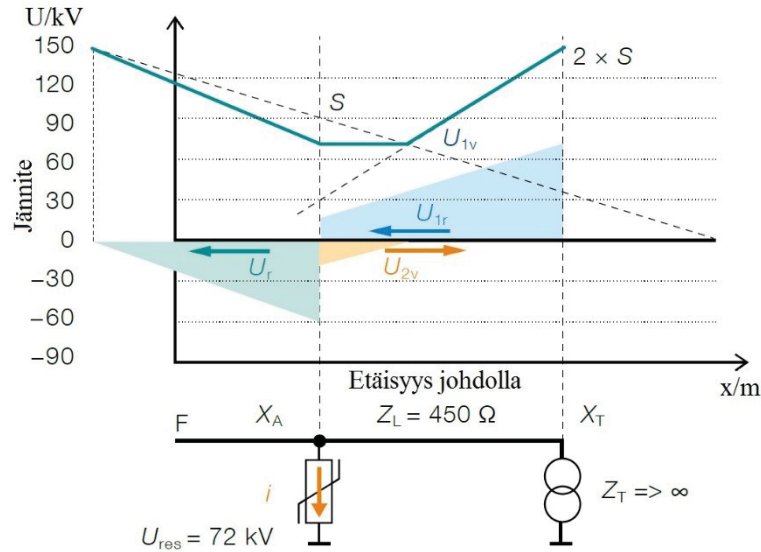
Tarkastellaan seuraavaksi jatkavan aallon käyttäytymistä ylijännitesuojan ja johdon loppupään välillä. Oletetaan, että johdon loppupäässä on muuntaja, jonka aaltoimpedanssi on $Z_T = \infty$. Kuva 31 esittää jänniteaallon käyttäytymistä ylijännitesuojan ja muuntajan välissä.



Kuva 31. Jatkavan jänniteaallon positiivinen heijastuminen muuntajan navoissa. Muokattu lähteestä [37].

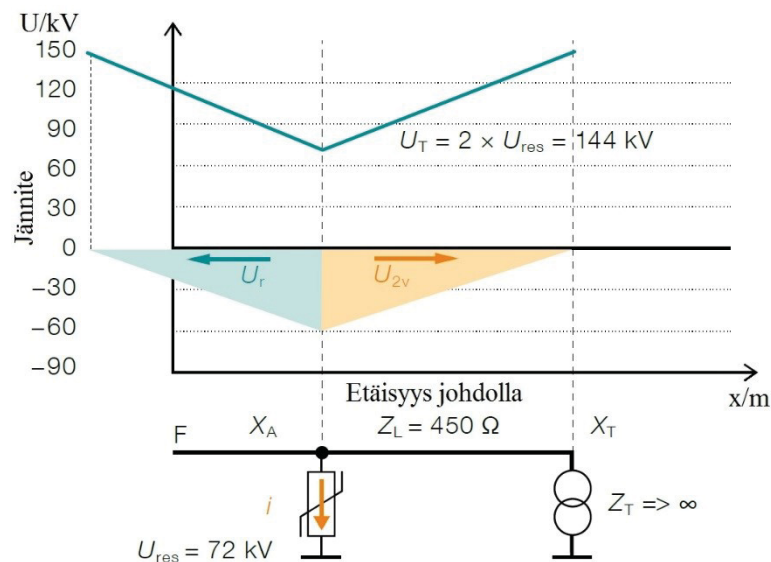
Kun jatkava transienttiaalto U_{Iv} saapuu muuntajan napoihin, se kokee aaltoimpedanssin muutoksen. Tässä tapauksessa muuntajan aaltoimpedanssi Z_T oletetaan äärettömän suureksi. Tällöin tilanne on samankaltainen kuin tyhjäkäyvän johdon tapauksessa, jolloin jänniteaalto heijastuu positiivisena ja johdon lopussa jännite kaksinkertaistuu [1]. Kuvasta nähdään myös, että jänniteaallon rinnan jyrkkyys S kaksinkertaistuu muuntajan navoissa. Kuvan 31 kuvaamalla hetkellä jatkavan aallon U_{Iv} amplitudi ei ole vielä saavuttanut muuntajan napoja, jolloin jännite muuntajan navoissa ei ole ehtinyt kasvaa huippuarvoonsa. Muuntajan navoista heijastunut positiivinen jänniteaalto U_{Ir} jatkaa nyt x-akselin negatiiviseen suuntaan kohti pisteessä X_A olevaa ylijännitesuojaa. Ylijännitesuoja on edelleen johtavassa tilassa, jolloin kaikki siihen tulevat jänniteaallot heijastuvat negatiivisina.

Siirrytään seuraavaksi tarkastelemaan miten muuntajan navoista positiivisesti heijastuneen jänniteaallon U_{Ir} toinen negatiivinen heijastuminen ylijännitesuojan kytkentäpisteessä vaikuttaa johdon jänniteprofiiliin. Kuvassa 32 on esitetty muuntajan navoista heijastuneen jänniteaallon saapuminen pisteeseen X_A kytkettyyn ylijännitesuojaan.



Kuva 32. Muuntajan navoista positiivisesti heijastuneen jänniteaallon U_{1r} negatiivisen heijastumisen ylijännitesuojan kytkentäpisteessä. Muokattu lähteestä [37].

Kuvasta 32 nähdään, miten ylijännitesuojasta negatiivisesti heijastuva jänniteaalto U_{2v} lähtee takaisin pisteestä X_A kohti muuntajaa amplitudiltaan negatiivisena. Nyt kohti muuntajaa kulkeva negatiivinen jänniteaalto U_{2v} superponoituu kohti ylijännitesuojaa kulkevan positiivisen jänniteaallon U_{1r} kanssa. Tällä välin kuitenkin jännite muuntajan navoissa on ehtinyt kasvaa suurimpaan mahdolliseen arvoonsa. Jännite muuntajan navoissa on siis nyt $U_T = 2 \cdot U_{res} = 144 \text{ kV}$. Jänniteaaltojen superponoituminen toisiinsa aikaansaa sekä ylijännitteen amplitudin, että rinnan jyrkkyyden laskun ylijännitesuojan ja muuntajan välisellä johto-osuudella.

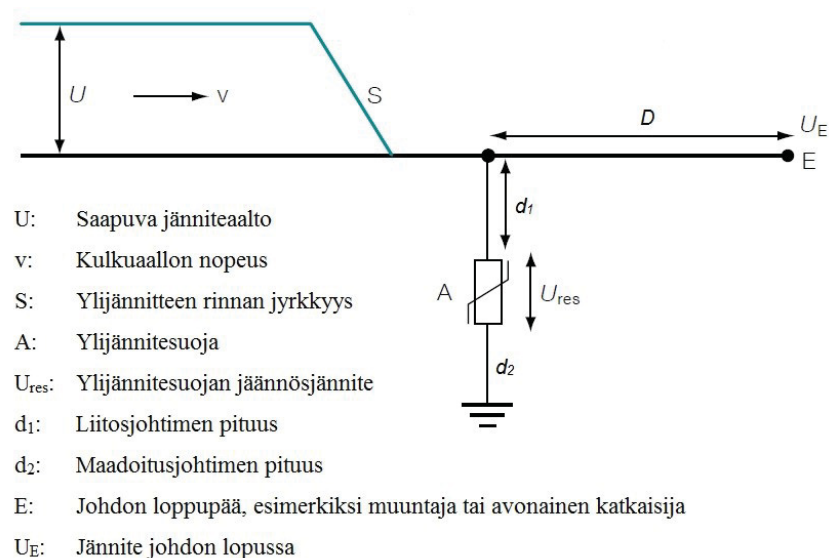


Kuva 33. Ylijännitesuojasta negatiivisesti heijastuneen jänniteaallon saapuminen muuntajan napoihin. Muokattu lähteestä [37].

Kuvassa 33 on vielä esitetty ylijännitesuojasta negatiivisesti heijastuvan jänniteaallon saapuminen muuntajan napoihin. Kun amplitudiltaan negatiivinen jänniteaalto U_{2v} saapuu muuntajan napoihin, kokee se jälleen äärettömän suuren aaltoimpedanssin ja tapahtuu jänniteaallon positiivinen heijastuminen. Kun amplitudiltaan negatiivinen jänniteaalto heijastuu positiivisena, pysyy sen amplitudi negatiivisena. Nyt takaisin kohti ylijännitesuojaa heijastunut negatiivinen jänniteaalto superponoituu muuntajan navoissa sillä hetkellä vaikuttavan jännitteen kanssa ja jännite muuntajan navoissa alkaa laskea. Muuntajan navoissa vaikuttavaa transienttiylijännitettä U_T voidaan siis ylijännitesuojia käyttämällä rajoittaa aikaisintaan kahden ylijännitesuojan ja muuntajan välillä matkaavan kulkuaallon matka-ajan jälkeen. Tästä syystä ylijännitesuojat tulisi asentaa mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta. [37]

Kuvista nähdään myös, että ylijännitesuoja rajoittaa jännitettä myös sitä edeltävällä johtosuudella. Siten ylijännitesuoja suojaa ylijännitteiltä kumpaankin suuntaan. Ylijännitesuoja tuottaakin suppilon muotoisen jänniteprofiilin johdolle [37].

Tarkastellaan vielä kuvien 30-33 mukaista tilannetta, jossa suojattava kohde on johdon päässä ja ylijännitesuoja on sijoitettu kohteen eteen. Oletetaan suojattavan kohteen aaltoimpedanssin olevan suuri (esimerkiksi muuntaja tai auki oleva katkaisija), jolloin jänniteaalto heijastuu positiivisena ja jännite johdon lopussa kaksinkertaistuu. Oletetaan lisäksi että maapiiri on tehokas verkko, jonka induktanssi on merkityksettömän pieni ja että saapuvan ylijänniteaallon rinnan jyrkkyys pysyy vakiona. Tilanne on siis kuvan 34 mukainen. [1; 37]



Kuva 34. Tilanne todellista suojaustasoa laskettaessa yhtälöllä 31. Muokattu lähteestä [37]

Ylijännitesuojan tarjoamaa todellista suojaustasoa voidaan tällöin approksimoida yhtälöllä 31. [1; 37]

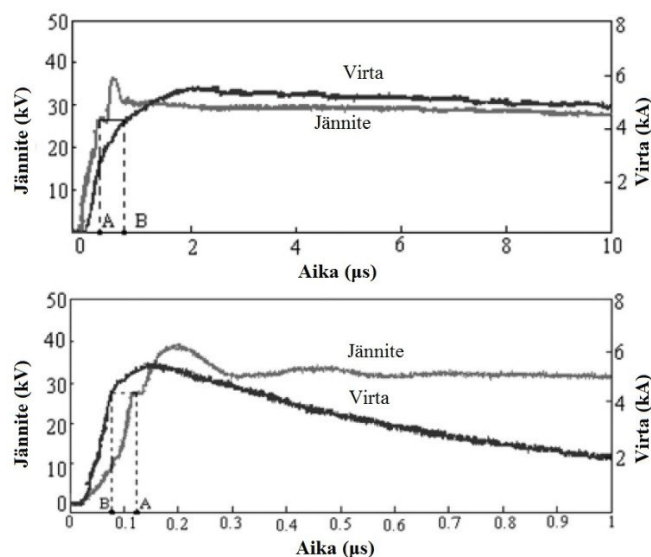
$$U_p = U_{res} + (d_1 + d_2)l \frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{2 \cdot S \cdot (d_1 + D)}{v} \quad (31)$$

Yhtälössä l on ylijännitesuojan liitos- ja maadoitusjohtimien induktanssi (noin $1 \mu\text{H/m}$) ja i on ylijännitesuojan toimiessa sen läpi kulkeva purkausvirta. Yhtälöstä 31 voidaan varsin suoraviivaisesti päätellä, että sitä alhaisempi suojaustaso saavutetaan suojattavassa kohteessa, mitä lähemmäksi suojattavaa kohdetta ylijännitesuojat asennetaan. Erityisesti ylijännitesuojan liitosjohdin d_1 tulisi mitoittaa mahdollisimman lyhyeksi. Avojohtojen tapauksessa olisikin parasta viedä muuntajalle tuleva johto ylijännitesuojan kautta muuntajan napoihin [37].

5.5 Metallioksidiylijännitesuojien soveltuvuus erittäin jyrkille transienttiylijännitteille

ZnO-ylijännitesuojien suojausominaisuudet ovat sellaisia, että niiden jäännösjännitteet ovat suurempia jyrkillä virtapulsseilla standardivirtapulssiin ($8/20 \mu\text{s}$ tai $4/10 \mu\text{s}$) verrattuna. Jäännösjännitteen nousu riippuu virtapulssin rinnannousuajasta, amplitudista, sekä ZnO-elementtien ominaisuuksista [12; 40].

Hyvin korkeataajuisilla virtapulsseilla MO-suojan purkausvirran huippuarvon ja jäännösjännitteen huippuarvon välillä on viive. Jyrkillä rinnannousuajoilla MO-suojan jäännösjännitteen huippuarvo saavutetaan purkausvirran huippuarvoa myöhemmin. Tämä johtuu ylijännitesuojan hajakapasitanssin vaikutuksesta. MO-suoja siis käyttäytyy kapasitanssin tavoin ennen siirtymistään johtavaan tilaan. Kuvassa 35 on esitetty MO-suojan purkausvirran ja jäännösjännitteen käyttäytyminen kahdella eri virtapulssin rinnannousuajalla.



Kuva 35. Kuvassa jäännösjännitteen ja purkausvirran aaltomuodot 12 kV ylijännitesuojalle. Ylhäällä kuvassa käytetty virtapulssi 5 kA , 2000 ns rinnannousuajalla ja alhaalla 5 kA 160 ns rinnannousuajalla. Muokattu lähteestä [12].

Kuvasta 35 nähdään miten jäännösjännitteet huippuarvo saavutetaan hieman aiemmin jyrkemmällä virtapulssilla. Lisäksi jäännösjännitteen huippuarvo on hieman suurempi kun ylijännitesuoja altistetaan erittäin jyrkälle virtapulssille. Viitteessä [12] P. Valsalal et al ovat mitanneet 12 kV ZnO-ylijännitesuojan jäännösjännitettä eri rinnannousuajan omaavilla virtapulsseilla. Heidän mittaustuloksiaan on koottu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Mitatut jäännösjännitteet eri jyrkkyyksille virtapulsseille. Perustuu lähteeseen [12].

Mittaus	Pulssin nousuaika (ns)	Jäännösjännite (kV)
1	2000	36,1
2	450	37,3
3	175	38,2
4	160	39,5

Taulukon 7 mittaustuloksista nähdään, että metallioksidilylijännitesuojan jäännösjännite kasvaa hieman virtapulssin rinnannousuajan lyhentyessä. Virtapulssin rinnannousuajan vaikutus on kuitenkin taulukon 7 mukaan varsin pieni. Jäännösjännitteen kasvua erittäin jyrkillä transienteilla voidaan kuitenkin rajoittaa erilaisilla keinoilla. Suurjännitteellä ylijännitesuojien varustaminen jännitteenohjauselektrodeilla parantaa ylijännitesuojan vastetta erittäin jyrkillä nousuajoilla. Myös muuttamalla ylijännitesuojan epälineaarisen vastuselementin ”valmistusreseptiä” niin, että vastuselementin epälineaarisuus kasvaa, voidaan jäännösjännitettä laskea. [12]

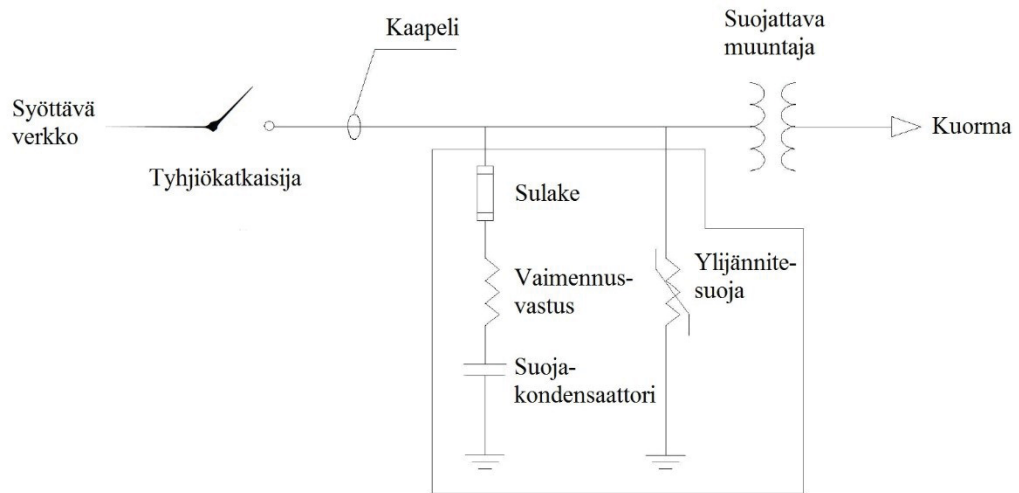
5.6 RC-suojat ylijännitesuojauksessa

Ylijännitesuojaukseen voidaan metallioksidilylijännitesuojien lisäksi käyttää myös RC-suojia. RC-suoja koostuu neljästä peruskomponentista [41]:

1. Suojakondensaattoreista
2. Vaimennusvastuksista
3. Sulakkeista (ei pakollinen)
4. Ylijännitesuojista.

Kuvassa 36 on esitetty periaate RC-suojan kytkennästä. Kapasitiivisen osan tehtävä on lisätä katkaisijan kuorman puoleista kapasitanssia ja siten rajoittaa katkaisijan avausväliä rasittavan palaavan transienttijännitteen nousunopeutta [6]. Tämä pienentää uudelleensyttymisten riskiä ja vähentää niiden määrää, mikäli uudelleensyttymisiä esiintyy. Suojakondensaattoreina tulisi käyttää vain sellaisia kondensaattoreita, jotka on erityisesti suunniteltu kestävämmän korkeataajuisia transientteja. Suojakondensaattoreita valmistetaan tyyppillisesti vain valituilla kapasitanssiarvoilla, eikä kondensaattoreita suositella kytkettä-

väksi rinnan tai sarjaan jonkin muun kapasitanssiarvon saavuttamiseksi. 20 kV järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi $0,13 \mu\text{F}$ suojakondenssaattoreita tai muita samaa suuruusluokkaa olevia standardikokoisia suojakondenssaattoreita. [41]



Kuva 36. Esimerkki RC-suojan kytkennästä muuntajan ylijännitesuojauksessa. Muokattu lähteestä [42]

Resistiivisen osan tehtävä on estää jännitteen kaksinkertaistuminen muuntajan navoissa estämällä heijastuksia ja tästä syystä RC-piirin resistanssi tulisi valita siten, että se on yhtä suuri katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin aaltoimpedanssin kanssa [6]. Kaapelin aaltoimpedanssi on tyypillisesti luokkaa $20\text{--}100 \Omega$ [41]. Yleisimmin käytössä olevat vaimennusvastukset ovat kooltaan 30Ω ja ne sopivat käytännössä kaikkiin asennuksiin [43].

Suojakondenssaattoreiden ja vaimennusvastusten lisäksi kaupallisissa RC-suojissa käytetään sulakkeita ja ylijännitesuojia. Sulakkeiden tehtävä on toimia oikosulkusuojana, mikäli RC-suojassa tapahtuu vika. Ylijännitesuojia puolestaan käytetään rajoittamaan ylijännitteen suuruutta sekä vaiheen ja maan, että vaiheiden välillä. [43]

6. KOMPONENTTIEN MALLINNUS PSCAD:SSÄ

Simulointitulosten luotettavuuden kannalta on erittäin tärkeää, että sähköverkon komponentit on mallinnettu oikein. Sähköverkon transientti-ilmiöiden simulointi etenkin vaatii verkon laitteiden ja johtojen tarkkaa mallintamista. Komponenttien tarkan mallintamisen lisäksi on tärkeää, että rakennetun simulointimallin toimivuus ja luotettavuus verifioidaan, jotta tiedetään kuinka suureen tarkkuuteen malli pääsee ja millä reunaehdoilla se toimii.

Tässä diplomityössä mielenkiinnon kohteena ovat kuivamuuntajaan kohdistuvat transienttiyliännitteet erilaisten kytkentätoimenpiteiden yhteydessä, kun pääkytkinlaitteena käytetään tyhjiökatkaisijaa. Nopeat ja suuritaajuiset transientti-ilmiöt vaimenevat verkossa nopeasti sekä ajan, että paikan suhteen. Tästä syystä ne ovat varsin paikallisia ilmiöitä. Transienttisimulointien kannalta tärkeimmät komponentit ovat tyhjiökatkaisija, muuntaja, sekä niiden välissä oleva kaapeli. Tässä luvussa esitellään pääpiirteissään PSCAD-simuloinneissa käytettävien komponenttien mallinnus, sekä pyritään verifioimaan kunkin verkkokomponentin mallinnuksen oikeellisuus.

6.1 Tyhjiökatkaisijan mallinnus

Tässä diplomityössä tehtävissä kytkentäyliännitesimuloinneissa tyhjiökatkaisija on yksi tärkeimmistä verkon komponenteista. Syy ylijännitteiden syntyyn on pohjimmiltaan juuri tyhjiökatkaisijan epäideaalinen toiminta katkaisu- ja kytkentätilanteissa. Tässä luvussa kerrotaan, miten luvussa 3 esitetty tyhjiökatkaisijan toiminta ja sen taustalla vaikuttavat teoreettiset ilmiöt on käytännössä mallinnettu PSCAD:ssä. Lisäksi luodun tyhjiökatkaisijamallin toimivuus pyritään todentamaan yksinkertaisilla esimerkkisimuloineilla.

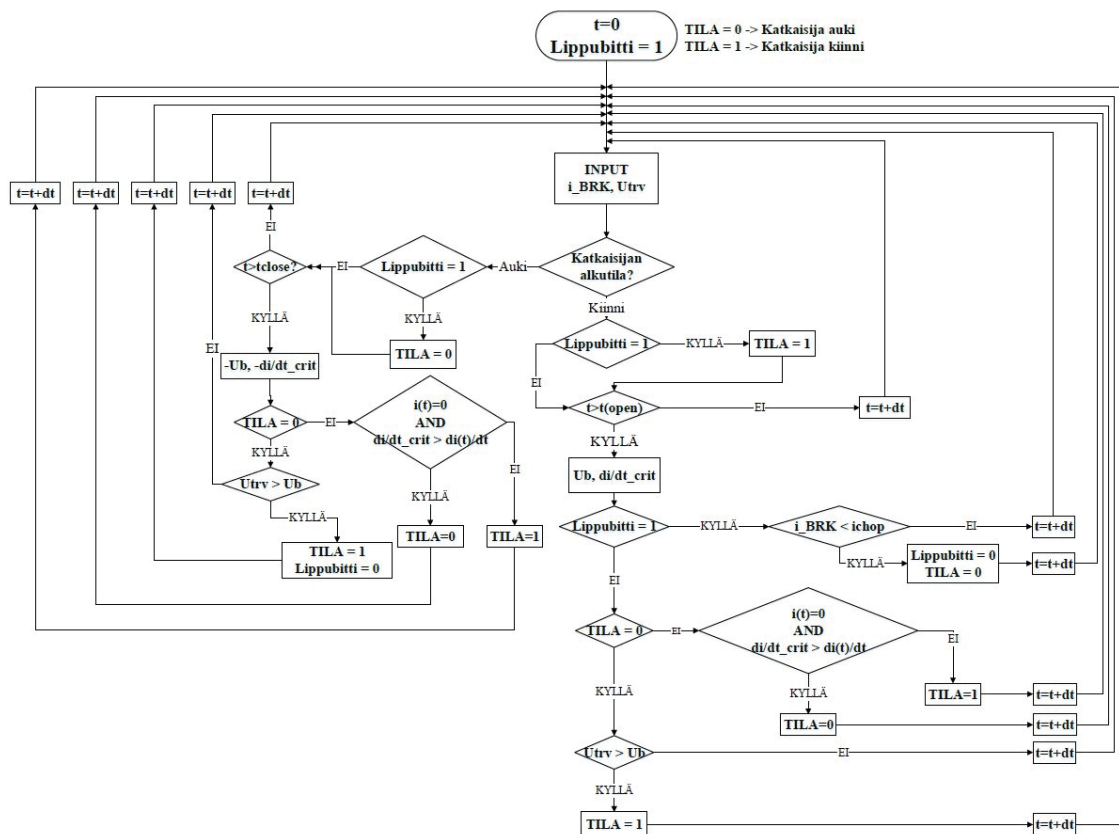
6.1.1 Tyhjiökatkaisijamallin toiminta PSCAD:ssä

PSCAD/EMTP-transienttilaskentaohjelmiston 4.2.1-versiossa ei ole valmiina tyhjiökatkaisijaa. PSCAD:n Master-kirjastossa on tarjolla vain ideaalinen katkaisija, joka ei sovellu kytkentäyliännitteiden tarkasteluun. Tästä syystä tässä työssä on rakennettu itse tyhjiökatkaisijan malli PSCAD:iin. Luvussa 3 käsiteltiin tyhjiökatkaisijan toimintaa virran katkaisussa. Tärkeimmät huomioonotettavat asiat tyhjiökatkaisijaa mallinnettaessa ovat:

1. Current chopping-ilmiö, eli virran ennaikainen katkeaminen
2. RRDS (Rate of Rise of Dielectric Strength) eli katkaisuvälin jännitelujuuden kasvu koskettimien aukeamisen jälkeen
3. Quenching capability eli tyhjiökatkaisijan kyky katkaista uudelleensyttymistä seuraava korkeataajuinen tasoitusvirta sen nollakohdassa.

Muuntajan energisointitilanne puolestaan on käänteinen virran katkaisulle. Siinä koskettimien välinen jännitelujuus lähtee laskemaan koskettimien sulkeutuessa. Kun katkaisijan koskettimien yli vaikuttuva jännite ylittää lineaarisesti laskevan koskettimien välisen jännitelujuuden, tapahtuu katkaisijan avausvälissä esisytyminen. Esisytyminen johtaa korkeataajuisen tasoitusvirtaan, jonka tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan jossain sen nollakohdassa. Virran katkeamista seuraa palaava transienttijännite katkaisijan koskettimien välille, joka aiheuttaa uuden esisytyksen edellistä esisyttymistä matalammalla jännitetasolla. Esisyttymisen ja korkeataajuisen virran katkaisut seuraavat toisiaan, kunnes koskettimet koskettavat toisiaan ja katkaisija on täysin sulkeutunut.

PSCAD-mallissa tyhjiökatkaisija on PSCAD:n valmis ideaalikatkaisija, jonka tilaa (kiinni/auki) ohjataan logiikalla sen mukaan palaako koskettimien välillä valokaari vai ei. Tyhjiövalokaaren valokaarijännite ja resistanssi ovat tyypillisesti pieniä, eikä niillä ole simuloitavan ilmiön kannalta juurikaan merkitystä [2]. Tästä syystä simulointimal- lissa on jätetty valokaaren sähköiset ominaisuudet huomioimatta ja valokaarta mallinnetaan yksinkertaisesti suljetulla ideaalikatkaisijalla. Tyhjiökatkaisijan toimintaa voidaan kuvata kuvan 37 mukaisella lohkokaaviolla.



Kuva 37. Tyhjiökatkaisijan ohjauslogiikkaa PSCAD:ssä kuvaava lohkokaavio.

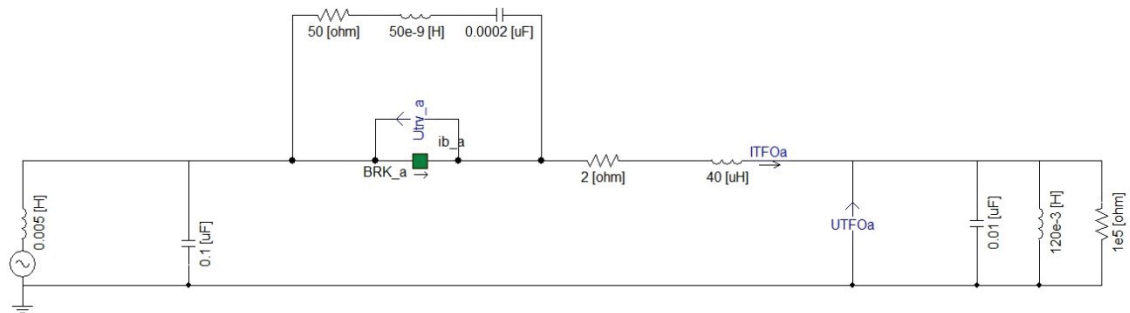
Katkaisijan ohjauksessa lähtötietoina käytetään katkaisijan läpi kulkevaa virtaa sekä katkaisijan yli olevaa jännitettä. Aluksi logiikka päätelee mallinnetaanko sulkeutumista vai avautumista sen perusteella mikä on katkaisijan tilatieto simuloinnin alkuhetkellä. Mikäli

katkaisija on kiinni, mallinnetaan avautumista tai mikäli katkaisija on auki, mallinnetaan sulkeutumista. Ajanhetkellä t_{open} katkaisija saa avautumiskäskyn, jonka jälkeen logiikka alkaa vertailla katkaisijan läpikulkevan virran suuruutta käyttäjän ennalta määrittelemään virran current chopping-arvoon. Samalla ajanhetkellä logiikka alkaa laskemaan katkaisijan avausvälin jännitelujuutta U_b ja korkeataajuisen virran katkaisukykyä di/dt_{crit} . Ajanhetkellä t_{open} katkaisijan avausvälin jännitelujuus ja korkeataajuisen virran katkaisukyky alkavat siis kasvaa lineaarisesti käyttäjän määrittelemillä kulmakertoimilla A_{VCB} ja C_{VCB} . Kun jonkin vaiheen virta laskee virran current chopping-tasolle, ohjaa logiikka siinä vaiheessa katkaisijan yksinapaisesti auki. Tämän jälkeen logiikka alkaa vertailla katkaisijan yliolevaa jännitettä U_{TRV} katkaisijan avausvälin jännitelujuuteen U_b . Kun U_{TRV} ylittää U_b :n tapahtuu katkaisijan avausvälissä uudelleensyttyminen, logiikka ohjaa katkaisijan sen vaiheen uudelleen kiinni. Uudelleensyttymisen jälkeen katkaisijan läpi kulkee suuri-
taajuinen transienttivirta, jonka taajuuden ja suuruuden määräävät katkaisijan kummallakin puolella olevat verkon induktanssit ja kapasitanssit. Kun korkeataajuisen transienttiovirran aikaderivaatta $di(t)/dt$ virran nollakohdassa on alle katkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukykyyn di/dt_{crit} , katkeaa virta, ja logiikka ohjaa katkaisijan sen vaiheen uudelleen auki. Tämän jälkeen logiikka siirtyy uudestaan vertailemaan palaavaa transienttijännitettä katkaisijan jännitelujuuteen ja mikäli tapahtuu toinen uudelleensyttyminen, logiikka alkaa uudestaan vertailla virran muutosnopeutta nollakohdassa katkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukykyyn. Prosessi jatkuu, kunnes katkaisijan avausvälin jännitelujuus U_b kestää lopullisesti palaavan transienttijännitteen aiheuttaman rasituksen ja virran katkaisu onnistuu.

Katkaisijan sulkeutumista mallinnettaessa prosessi on käänteinen. Tällöin katkaisijan saadessa sulkeutumiskäskyn ajanhetkellä t_{close} , alkavat avausvälin jännitelujuus U_b ja korkeataajuisen virran katkaisukyky di/dt_{crit} lineaarisesti laskea huippuarvoistaan kohti nol-
laa kulmakertoimilla $-A_{VCB}$ ja $-C_{VCB}$. Kun katkaisijan yli oleva jännite U_{TRV} ylittää avausvälin jännitelujuuden U_b tapahtuu katkaisijassa esisytyminen, ja logiikka ohjaa katkaisijan kyseisen vaiheen kiinni. Valokaaren syttyessä eli tässä tapauksessa katkaisijan ensimmäisenä syttyvän vaiheen mennessä kiinni, alkaa katkaisijan läpi kulkea korkeataajuinen transienttivirta, jonka taajuus ja suuruus määräytyvät ympäröivän verkon ominaisuuksista. Koska katkaisijan koskettimet eivät ole vielä fyysisesti kiinni, pystyy katkaisija vielä katkaisemaan korkeataajuisen virran sen nollakohdassa, mikäli virran aikaderivaatta nollakohdassa ei ylitä arvoa di/dt_{crit} . Jos korkeataajuinen virta katkeaa, logiikka ohjaa katkaisijan uudelleen auki ja katkaisupäiden välille syntyy palaava jännite. Avausvälin jännitelujuuden lineaarisesti pienentyessä tapahtuu kuitenkin uusi esisytyminen, mutta tällä kertaa edellistä pienemmällä jännitteen hetkellisärvolla. Prosessi jatkuu, kunnes katkaisijan koskettimet ovat kokonaan sulkeutuneet.

6.1.2 Tyhjiökatkaisijamallin verifiointi 1-vaiheisena

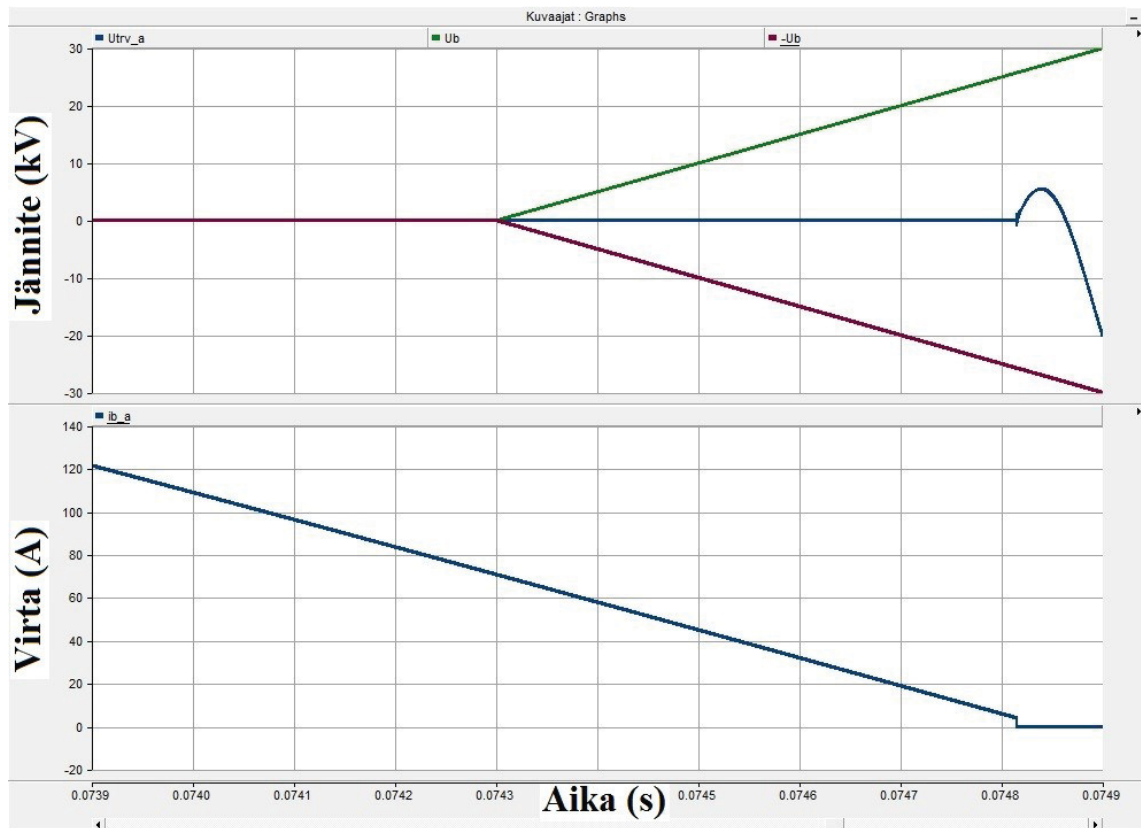
Tutkitaan seuraavaksi miten PSCAD:iin mallinnettu tyhjiökatkaisija toimii yksivaiheisena. Kolmivaiheisessa tyhjiökatkaisijamallissa kunkin vaiheen koskettimet toimivat itsenäisesti riippumatta muista vaiheista, joten yksivaiheinen tyhjiökatkaisijamalli on helpposti laajennettavissa kolmivaiheiseksi. Kolmivaiheisessa tyhjiökatkaisijamallissa on siis käytännössä rinnakkain kolme yksivaiheista tyhjiökatkaisijamallia, joista kukin kytketty yhteen järjestelmän vaiheeseen. Tästä syystä selvyyden vuoksi on mielekästä verifioida tyhjiökatkaisijamallin toimintaa ensin yksivaiheisena. Tutkitaan yksivaiheisen tyhjiökatkaisijamallin toimintaa J. Helmerin [3] käyttämällä yksinkertaisella testipiirillä, joka on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. J. Helmerin [3] käyttämä testipiiri, jolla tutkitaan tyhjiökatkaisijamallin toimintaa.

Pyritään ensin verifioidaan tyhjiökatkaisijamallin toimintaa simuloimalla induktiivisen virran katkaisua kuvan 38 mukaisella testikytkennällä. Käytetään chopping current-arvona 4 ampeeria, katkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvunopeutena 50 kV/ms ja korkeataajuisen virran katkaisukykyä 100 A/ μ s. Käytetään testipiirin jännitteenä 20 kV verkon vaihejännitettä eli 11,547 kilovolttia, jolloin tyhjiökatkaisijan avausvälin maksimijännitelujuus transienttiylijännitteille olisi ABB:n VD4 tyhjiökatkaisijalla 125 kV [15].

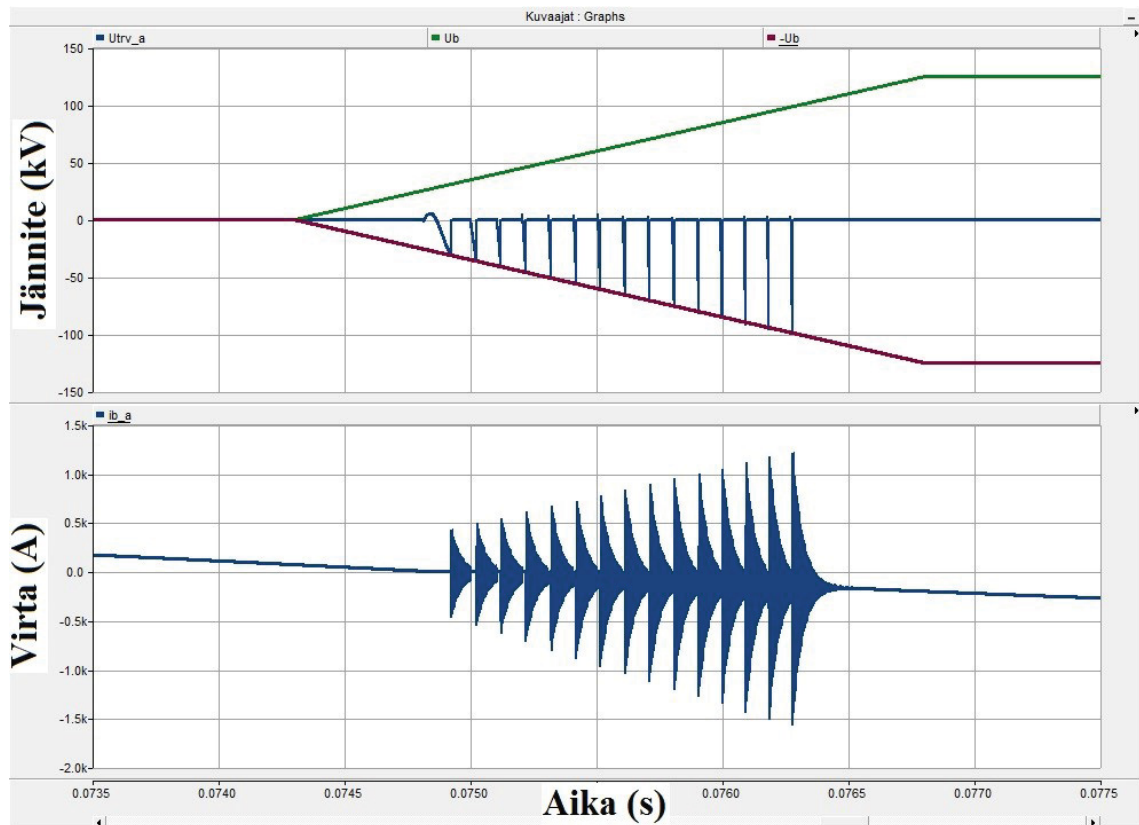
Kuvassa 39 on esitetty tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvu, avausväliä raskas palaava transienttijännite ja katkaisijan läpi kulkeva virta katkaisun alussa. Kuvasta 39 nähdään, että ajanhetkellä 0,0743 sekuntia katkaisija saa avauskäskyn ja koskettimet lähtevät avautumaan. Samalla ajanhetkellä katkaisijan avausvälin jännitelujuus lähtee kasvamaan kulmakertoimella 50 kV/ms. Virta ei kuitenkaan katkea heti, vaan katkaisijan sisälle koskettimien väliin jää palamaan valokaari. Virta katkeaa vasta hieman ennen verkkotaajuista nollakohtaansa virran hetkellisarvon laskiessa tyhjiökatkaisijalle tyypillisen chopping current-arvon tasolle. Tässä simuloinnissa chopping current-virtana käytettiin 4 ampeeria. Kuvasta 39 nähdään miten katkaisija katkaisee virran ennenaikaisesti noin ajanhetkellä 0,074816 sekuntia virran hetkellisarvon laskiessa 4 ampeeriin.



Kuva 39. Tyhjiökatkaisija avautuu ajanhetkellä 0,0743 sekuntia ja current chopping-ilmio tapahtuu ajanhetkellä 0,074816 sekuntia.

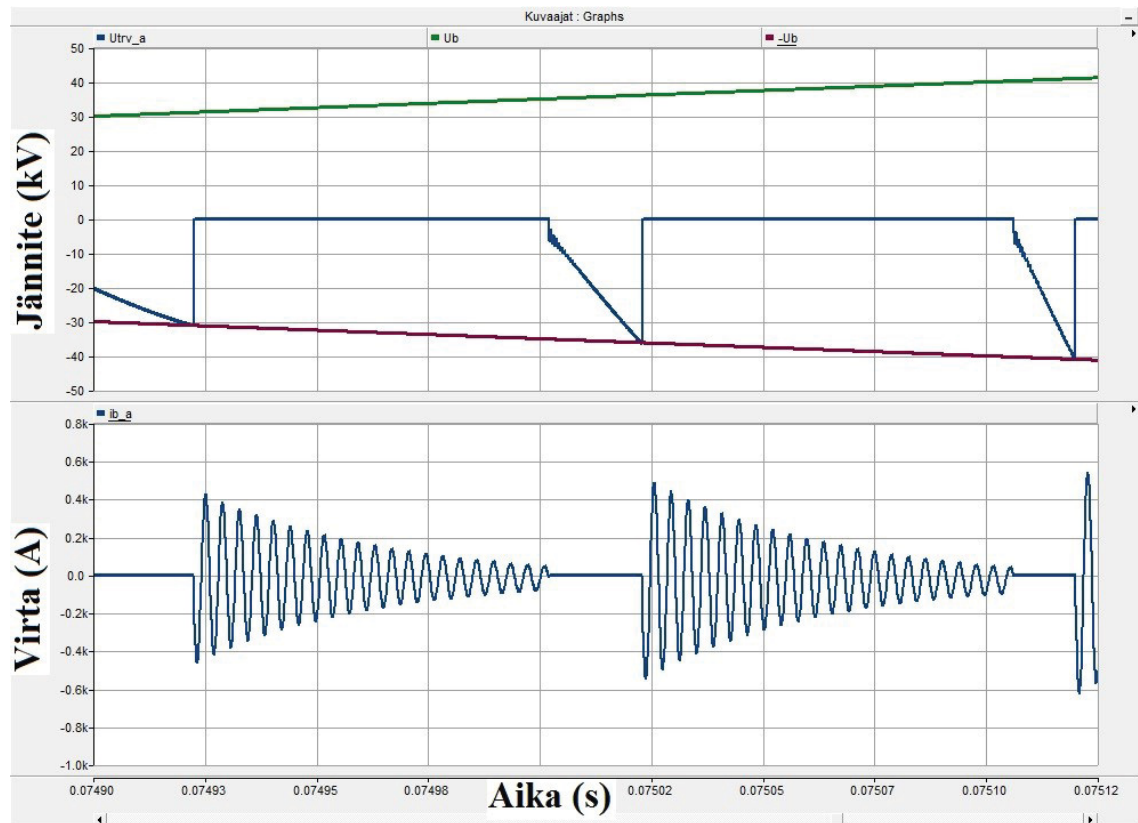
Virran ennen aikaisen katkeamisen jälkeen kuorman induktanssiin varastoon jäänyt magneettinen energia alkaa kuitenkin värähtelemään kuorman puoleisen kapasitanssin kanssa, jolloin kapasitanssin jännite nousee. Tämä jännitteenousu rasittaa myös juuri auenneen katkaisijan avausväliä ja voi johtaa uudelleensyttymiseen. Kuvassa 40 on esitetty uudelleensyttymisiä katkaisijan avausvälissä katkaisijan aukeamisen jälkeen. Kuvasta 40 nähdään, miten katkaisijan avausvälissä tapahtuu uudelleensyntyminen palaavan transienttijännitteen ylittäessä katkaisijan vielä kehittyvän avausvälin jännitelujuuden. Kuvasta nähdään myös, miten jokaista uudelleensyttymistä seuraa hyvin korkeataajuisen transienttivirta, joka kuitenkin vaimenee nopeasti, ja jonka tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan. Jokaista korkeataajuisen virran katkaisua seuraa kuitenkin uusi katkaisijan avausväliä rasittava palaava transienttijännite, joka johtaa uuteen uudelleensyttymiseen, mikäli katkaisijan avausvälin jännitelujuus ei ole ehtinyt kehittyä riittävästi.

Mikäli katkaisijan avausvälin jännitelujuus ei ehdi kehittyä riittävästi, voi virran verkko-
taajuisen komponentti kasvaa niin suureksi, että uudelleensyttymistä seuraava korkeataajuisen transienttivirta ei pysty enää ”pakottamaan” siihen nollakohtia. Tällöin virrankatkaisu sen ensimmäisessä katkaisijan avautumista seuraavassa nollakohdassa voi epäonnistua, kuten kuvassa 40 tapahtuu.



Kuva 40. Tyhjiökatkaisija avautuu ajanhetkellä 0,0743 sekuntia, jonka jälkeen palaava transienttijännite saa aikaan uudelleensyttymisiä katkaisijan avausvälissä.

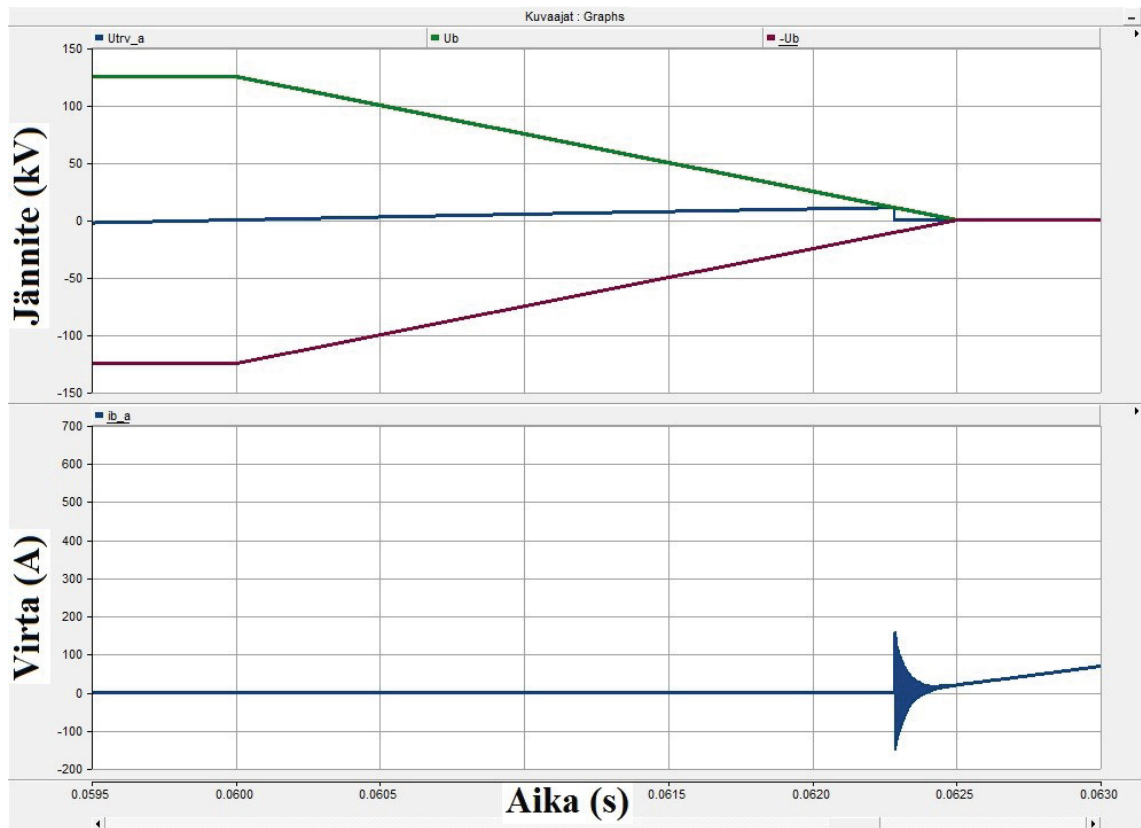
Tutkitaan seuraavaksi vielä hieman tarkemmin korkeataajuisen transienttivirran käyttäytymistä uudelleensyttymisten yhteydessä. Kuvassa 41 on esitetty lähikuva kolmesta uudelleensyttymisestä. Kuvasta nähdään, miten uudelleensyttymistä seuraa hyvin korkeataajuinen tasoitusvirta. Alussa korkeataajuisen virran aikaderivaatta virran nollakohdissa on niin suuri, että tyhjiökatkaisija ei pysty katkaisemaan virtaa niissä. Korkeataajuinen virta kuitenkin vaimenee nopeasti, ja jokaisessa seuraavassa nollakohdassa sen aikaderivaatta laskee edelliseen nollakohtaan verrattuna. Lopulta korkeataajuinen virta on vaimentunut niin paljon, että tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan virran. Korkeataajuisen virran katkaisu johtaa kuitenkin uuteen katkaisijan avausväliä rasittavaan palaavaan transienttijännitteeseen, joka puolestaan johtaa uuteen uudelleensyttymiseen.



Kuva 41. Lähikuva uudelleensyttymistä seuraavasta korkeataajuisesta transienttivirrasta.

Tutkitaan seuraavaksi vielä tyhjiökatkaisijamallin toimintaa katkaisijan sulkeutumisesta mallinnettaessa. Sulkeutuminenhan on periaatteessa käänteinen tapahtuma avautumiselle. Siinä katkaisijan avausvälin jännitelujuus lähtee laskemaan katkaisijan saatua kiinniohjauskomennon. Katkaisijan avausvälissä tapahtuu esisytyminen, kun avausvälin jännitelujuus on laskenut niin pieneksi, että katkaisijan avausvälissä vaikuttava pitkittäissuuntainen jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden.

Kuvassa 42 on simuloitu tyhjiökatkaisijan sulkeutumisesta. Kuvasta nähdään, miten katkaisijan saadessa kiinniohjauskomennon, alkaa katkaisijan avausvälin jännitelujuus laskea lineaarisesti. Kun katkaisijan avausväliä rasittava pitkittäissuuntainen jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden, tapahtuu esisytyminen. Esisytyminen katkaisijan sulkeutumisen yhteydessä johtaa samanlaiseen korkeataajuiseseen transienttivirtaan, kuin uudelleensytyminen virran katkaisun yhteydessä. Kuvan 42 simuloinnissa esisyttymistä seuraava korkeataajuinen transienttivirta ei katkea nollakohdassaan, vaan esisyttymisen jälkeen valokaari palaa avausvälissä, kunnes katkaisija on täysin sulkeutunut. Periaatteessa on kuitenkin mahdollista, että vielä avonainen katkaisijan avausväli sammuttaa valokaaren korkeataajuisen virran nollakohdassa, jolloin katkaisijan avausvälissä tapahtuu useita esisyttymisiä ennen katkaisijan täydellistä sulkeutumista.



Kuva 42. Katkaisija saa sulkeutumiskäskyn ajanhetkellä 0,06 sekuntia, jolloin avausvälin jännitelujuus alkaa lineaarisesti laskea. Ajanhetkellä 0,0623 sekuntia katkaisijan avausväliä rasittava pitkittäinen jännite ylittää avausvälin jännitelujuuden ja tapahtuu esisyttyminen.

Simulointien perusteella tyhjiökatkaisijamalli näyttää toimivan oikein. PSCAD:iin mallinnettu tyhjiökatkaisijamalli huomioi kaikki virran katkaisuun ja kytkentään liittyvät ilmiöt, joita käsiteltiin luvussa 3, ja joita ovat:

- Current chopping
- Katkaisijan avausvälin jännitelujuuden kasvu ja uudelleensyttymiset
- Korkeataajuisen virran katkaisukyky.

Tyhjiökatkaisijamalli on helposti laajennettavissa kolmivaiheiseksi, sillä PSCAD-mallissa katkaisijan kutakin vaihetta ohjaava logiikka toimii itsenäisesti toisista vaihteista riippumatta. Tästä syystä tässä ei erikseen testata mallin toimintaa kolmivaiheisena, vaan tyydytään toteamaan, että tyhjiökatkaisijamalli toimii oikein.

6.2 Kaapelin mallinnus

Virranahdon ja läheisyysvaikutuksen takia kaapeleiden sähköiset ominaisuudet muuttuvat taajuuden funktiona [44]. Erityisesti suurtaajuusilmiöitä mallinnettaessa näiden ilmiöiden vaikutus kasvaa. Tämän vuoksi on tärkeää, että simuloinneissa käytetään riittävän

tarkkoja kaapelimalleja. PSCAD:ssä on valmiina useita kaapelin malleja, kuten Bergeron-malli, frequency dependent (mode)-malli ja frequency dependent (phase)-malli. Näistä frequency dependent (phase)-malli on kaikkein tarkin ja PSCAD-manuaalin mukaan kyseessä onkin maailman tarkin kaapelin malli [45]. Tässä työssä tehtävissä simuloinneissa käytetään frequency dependent (phase)-mallia.

Pohjimmiltaan frequency dependent (phase)-malli on kulkuaaltomalli, jossa RLC-komponentit ovat jakautuneet pitkin kaapelia, ja joka huomioi kaikkien kaapelin sähköisten parametrien taajuusriippuvuuden [45]. Kaapeleiden ja johtojen mallinnuksessa tärkeimmät parametrit ovat:

$$Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega) \quad (32)$$

$$Y(\omega) = G(\omega) + j\omega C(\omega) \quad (33)$$

PSCAD:ssä kaapelin sähköiset ominaisuudet lasketaan kaapelin geometriatietojen perusteella. Käyttäjän tulee siis syöttää ohjelmaan mallinnettavan kaapelin geometriset, kuten johtimen ja pääeristyskerroksen säteet. Käytännön kaapeleiden rakenne kuitenkin poikkeaa yleensä suuresti siitä, missä muodossa PSCAD:n kaapelimalliin pitää kaapelin geometriatieto syöttää. Kuvassa 43 on esitetty oikean AHXCMK-WTC 20 kV kaapelin rakenne ja PSCAD:n kaapelirakenne.



Kuva 43. 1-johtimisen 20 kV AHXCMK-WTC-kaapeli ja PSCAD:n kaapelin malli. Muokattu lähteestä [46].

Kuvasta nähdään, että PSCAD:n kaapelimalli koostuu vain päällekkäisistä johtavista kerroksista ja eristekerroksista. Näin ollen PSCAD:n kaapelimalli ei siis esimerkiksi huomioi johdinsuojaa ja hohtosuojaa. Olemassa olevan todellisen kaapelin geometriatietoja pitää siis muokata sellaiseen muotoon, että ne voidaan syöttää PSCAD-ohjelmaan. Alla on kerrottu miten todellisen kaapelin geometriatiedot muutetaan PSCAD:iin sopivaan muotoon.

6.2.1 Johtimen käsittely

Kaapelin sisintä osaa eli johdinta mallinnettaessa PSCAD:iin ei voi syöttää suoraan kaapelin valmistajan ilmoittamaa johtimen halkaisijaa. Tämä johtuu siitä, että todellisuudessa kaapelin johtimen rakenne ei ole yhtenäinen, kuten PSCAD olettaa, vaan käytännössä johdin muodostuu useista säikeistä, joiden välissä on tyhjää tilaa. Tämä johtaa siihen, että kaapelivalmistajan ilmoittamalla johtimen säteellä laskettu johtimen poikkipinta-ala on suurempi kuin kaapelin johtimen todellinen tehollinen poikkipinta-ala. [47]

Jotta kaapelin johtimen resistanssi PSCAD:ssä saadaan todellisen suuruiseksi, on PSCAD:iin syötettävää johdinmateriaalin resistiivisyyttä kasvatettava. Tällöin PSCAD:iin syötetään kaapelivalmistajan ilmoittama johtimen säde ja johdinmateriaalin resistiivisyyttä kasvatetaan niin, että johdinsäikeiden välinen tyhjä tila tulee huomioiduksi ja kaapelin resistanssi pysyy muuttumattomana. PSCAD:iin syötettävä johdinmateriaalin resistiivisyys voidaan laskea yhtälöllä 34.

$$\rho_c = \rho_c' \frac{\pi r_l^2}{A_c} \quad (34)$$

Yhtälössä 34 ρ_c on PSCAD:iin syötettävä johtimen resistiivisyys, ρ_c' johdinmateriaalin todellinen resistiivisyys, r_l johtimen säde ja A_c johtimen poikkipinta-ala. Tyypillisiä johdinmateriaalien resistiivisyyksiä on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Yleisesti kaapelin johdinmateriaalina käytettyjen alumiinin ja kuparin resistiivisyydet [47; 48].

Johdinmateriaali	Resistiivisyys
Kupari	$1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$
Alumiini	$2,8264 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$

Jos kaapelivalmistaja ilmoittaa kaapelilleen vain DC-resistanssin, voidaan PSCAD:ssä käytettävä johtimen resistiivisyys laskea yhtälöllä 35

$$\rho_c = R_{DC} \frac{\pi r_l^2}{l_{kaapeli}}, \quad (35)$$

missä R_{DC} on kaapelin DC-resistanssi ja $l_{kaapeli}$ on kaapelin pituus.

6.2.2 Pääeristyskerros ja puolijohtavat kerrokset

Kaapelin puolijohtavilla kerroksilla, johdinsuojalla ja hohtosuojalla, voi olla merkittävä vaikutus kaapelin kulkuaallon etenemisominaisuuksiin, kuten aaltoimpedanssin, kulkuaallon nopeuteen, sekä mahdolliseen vaimenemiseen. PSCAD:n frequency dependent (phase)-malliin ei kuitenkaan voida suoraan syöttää kaapelin puolijohtavia kerroksia. Tästä syystä puolijohtavien kerrosten vaikutus on huomioitava kaapelin pääeristyskerroksen ominaisuuksissa. [47; 48]

PSCAD:iin syötettävän pääeristyskerroksen paksuuden r_2 määrittäminen aloitetaan laskemalla yhteen kaapelivalmistajan ilmoittama eristeen paksuus, sekä johdin- ja hohtosuojan paksuudet [47; 48]. Esimerkiksi 20 kV AHXCMK-WTC/PE-kaapelille eristeen nimellispaksuus on 5,5 mm. Vastaavasti johdin- ja hohtosuojien nimellispaksuudet ovat 0,5 mm [27]. On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että valmistajan ilmoittamat paksuudet ovat usein minimipaksuuksia ja todellisuudessa kaapelivalmistajat voivat käyttää halutessaan paksumpiakin kerroksia [47]. PSCAD:iin syötetään siis kaapelin pääeristeen ja puolijohtavien kerrosten kokonaispaksuus. Seuraavaksi lasketaan kaapelin eristyskerroksen permittiviteetti yhtälöllä 36.

$$\varepsilon_{r1} = \frac{C \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\varepsilon_0} \quad (36)$$

Yhtälössä 36 ε_{r1} on PSCAD:iin syötettävä eristeen permittiviteetti, C on kaapelin kapasitanssi, r_2 on kokonaiseristekerroksen ulkosäde, r_1 kokonaiseristekerroksen sisäsäde ja ε_0 on tyhjiön permittiviteetti $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. [47; 48]

Syy sille, miksi johdin- ja hohtosuoja voidaan ottaa näin huomioon, johtuu siitä, että näiden puolijohtavien kerrosten suhteellinen permittiviteetti on luokkaa 1000, mikä puolestaan johtuu niiden korkeasta hiilipitoisuudesta. Tämä johtaa siihen, että puolijohtavien kerrosten kapasitanssi on paljon suurempi kuin kaapelin eristyskerroksen, jolloin puolijohtavat kerrokset toimivat rinnakkaisadmittanssimatriisia laskettaessa lähes oikosulun tavoin. Ilmiö vain voimistuu, kun otetaan huomioon puolijohtavien kerrosten konduktanssi, joka myös on paljon suurempi kuin eristyskerroksen. Samalla kuitenkin puolijohtavien kerrosten konduktanssi on huomattavasti johtimen konduktanssia pienempi. Tämä johtaa siihen, että puolijohtavat kerrokset eivät juurikaan osallistu virran kuljettamiseen pitkittäissuunnassa. Tästä syystä kaapelin geometriatietoja syötettäessä PSCAD:iin voidaan puolijohtavat kerrokset ottaa mukaan eristeen paksuuteen ja vain nostaa eristeen permittiviteettiä, jotta kaapelin kapasitanssi pysyy muuttumattomana. Toisaalta on syytä pitää mielessä, että tämä mallinnus ei ota huomioon puolijohtavien kerrosten aiheuttamaa kulkuaallon vaimenemista, millä voi olla hyvin suuri vaikutus todella korkeataajuisen transientti-ilmiöiden yhteydessä. [47; 48]

6.2.3 Kosketussuojan ja ulkovaipan käsittely

Kun kaapelin kosketussuoja koostuu kerroksesta kuparilankoja ja kuparinauhasidoksesta, järkevin tapa mallintaa kosketussuoja on mallintaa se eristekerroksen päällä olevana onttona sylinterimäisenä johtimena, jonka poikkipinta-ala on vastaa kosketussuojan todellista poikkipinta-ala [47; 48]. Kaapelivalmistajat yleensä ilmoittavat kosketussuojan nimellispoikkipinta-alan ja esimerkiksi 20 kV 3x185/35 AHXCMK-WTC-kaapelille se on 35 mm². PSCAD:iin syötettävän kaapelin kolmannen kerroksen ulkoreunan säde r_3 voidaan siis laskea yhtälöllä 37.

$$r_3 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi} + r_2^2} \quad (37)$$

Missä A_s on kosketussuojan poikkipinta-ala ja r_2 eristekerroksen yli oleva säde. Kolmannen kerroksen resistiivisyytenä voidaan käyttää kosketussuojan materiaalin, esimerkiksi kuparin, resistiivisyyttä. [47; 48]

Jäljelle jää vielä uloimman eristekerroksen säteen r_4 määrittely. Koska emme mallinna armeerattua kaapelia, tällä kerroksella on vaikutusta vain kaapelin yhteisinduktanssiin. Varsin hyvä approksimaatio on jakaa yksivaiheisen kaapelin ulkohalkaisija kahdella ja käyttää sitä kaapelin ulkosäteenä r_4 PSCAD:ssä. Materiaali voi olla mitä vain eristettä, mutta yleisesti käytetään XLPE-muovia, jonka suhteellinen permittiviteetti ϵ_r on 2,3. Viimeisen kerroksen vaikutus on minimaalinen, jos kaapeli ei ole armeerattu. [49]

6.2.4 Kulkuaallon nopeuden määrittäminen

Kaapelin mallinnuksen oikeellisuutta pyritään verifioimaan kahdella eri tavalla: määrittämällä kulkuaallon nopeus kaapelissa, sekä kaapelin tuottama varausvirta. Tässä työssä tehtäviä simuloiteja varten on mallinnettu AHXCMK-WTC-kaapelia PSCAD:n frequency dependent (phase) mallilla. Mallinnuksen lähtötiedot on kerätty taulukkoon 9.

Taulukko 9. AHXCMK-WTC-kaapelin lähtötiedot PSCAD-mallia varten. Perustuu lähteeseen [27].

Johtimen säde	8,1 mm
Johtimen poikkipinta-ala	185 mm ²
Johdinmateriaali	Alumiini
Johdinsuojan nimellispaksuus	0,5 mm
Pääeristyksen nimellispaksuus	5,5 mm
Eristemateriaali	XLPE
Hohtosuojan paksuus	0,5 mm
Kosketussuojan poikkipinta-ala	35 mm ²
Ulkosäde	19 mm

Kulkuaallon nopeuden matemaattiseen määrittämiseen tarvitaan kaapelin induktanssia ja kapasitanssia, jotka voidaan laskea kaapelin geometriatietojen perusteella. Kaapelin induktanssi voidaan laskea kaavalla 38. [47]

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (38)$$

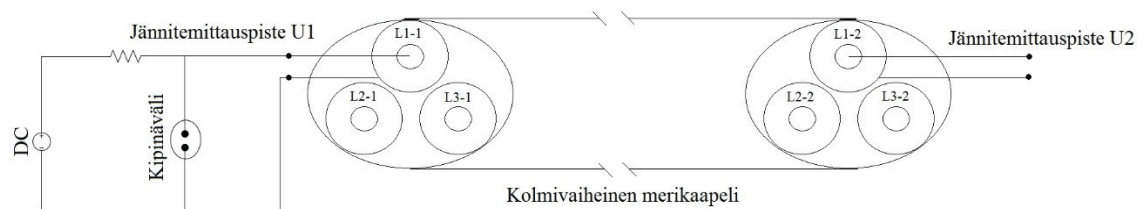
Lisäksi tarvitaan kaapelin kapasitanssia, joka voidaan laskea kaavalla 39.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (39)$$

Kaavoilla 38 ja 39 laskettujen induktanssin ja kapasitanssin perusteella voidaan seuraavaksi määrittää kaapelissa kulkevan kulkuaallon nopeus.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1,178314934 \cdot 10^{-7} \text{H/m} \cdot 2,59999840 \cdot 10^{-10} \text{F/m}}} \approx 180,7 \text{ m}/\mu\text{s} \quad (40)$$

Seuraavaksi kaapelissa etenevän kulkuaallon nopeutta simuloidaan PSCAD:ssä, sekä vertaillaan kulkuaallon nopeutta laskennalliseen kulkuaallon nopeuteen ja viitteessä [50] tehtyihin mittauksiin ja simulointeihin. Näin pyritään varmistamaan kaapelin mallinnuksen oikeellisuudesta. Viitteessä [50] on tutkittu laboratoriomittauksin kulkuaallon nopeutta 240 mm² merikaapelissa. Kuvassa 44 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva viitteessä [50] laboratorioon tehdystä mittaussytkennästä.



Kuva 44. Viitteessä [50] laboratorioissa toteutettu mittaussytkentä kulkuaallon nopeuden mittaamiseksi.

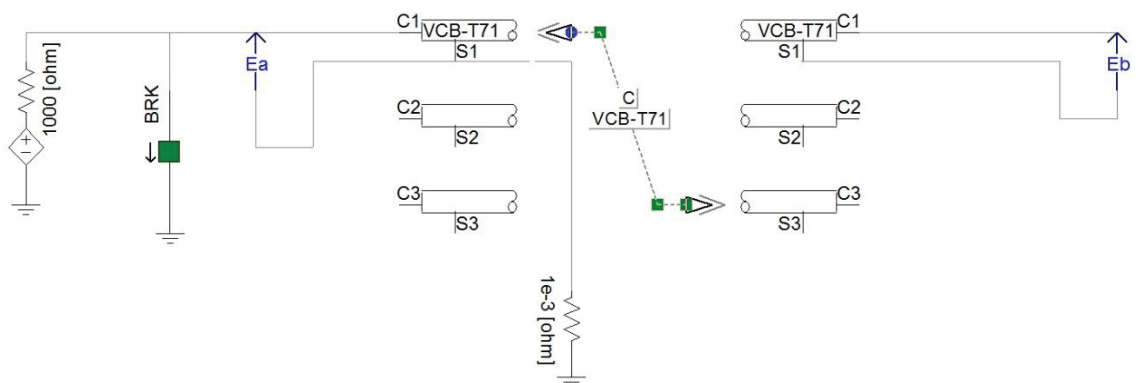
Mittaussytkennässä kaapelin johtimen ja vaipan välille varataan säädettävällä DC-jännitelähteellä ramppimaisesti varaus. Jännitettä nostetaan hiljaa aina 800 volttiin, jolloin COM-gap-kipinäväli syttyy ja purkaa äkisti varauksen. Tämä johtaa jyrkkään askelmaiseen jänniteromahdukseen kaapelin alkupäässä, joka synnyttää erittäin jyrkän jänniteaallon, joka etenee kaapelin alkupäästä kaapelin loppupäähän. Jännite mitataan kaapelin alku- ja loppupäässä, jotta voidaan määrittää kulkuaallon matka-aika kaapelin yli, sekä jännitteen värähtelytaajuus. A. Daniel ja S. Gebre ovat työssään [50] mitanneet ja simuloineet kulkuaallon etenemistä 484 metrin ja 242 metrin kaapeleille. Heidän työssään saavutetut tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. A. Danielin ja S. Gebren mittaus- ja simulointitulosten vertailu [50].

Kaapelipituus	Värähtelytaajuus (Simulointi)	Värähtelytaajuus (Mittaus)	Matka-aika (Simulointi)	Matka-aika (Mittaus)
242 m	0,181 MHz	0,154 MHz	1,4 μ s	1,634 μ s
484 m	0,08962 MHz	0,0767 MHz	2,789 μ s	3,26 μ s

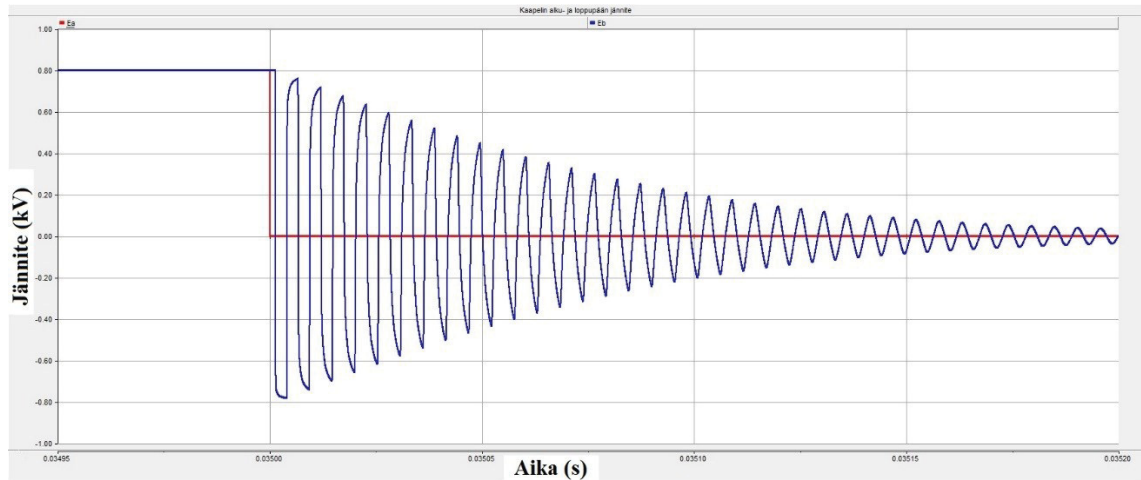
Taulukosta nähdään, että A. Daniel ja S. Gebre ovat simuloinneissaan päässeet varsin lähelle mittaustuloksia. Näyttäisi siis, että frequency dependent (phase)-malli ottaa kulkuaaltoilmiön varsin hyvin huomioon.

Simuloidaan seuraavaksi PSCAD:llä vastaavaa tilannetta, kuin mitä viitteessä [50] on mitattu ja simuloitu, tässä työssä mallinnetulle AHXCMK-WTC-kaapelille. Tulokset eivät siinä mielessä ole täysin vertailukelpoisia, että kyse on eri kaapeleista, mutta tavoitteena on päästä simuloinneissa samaan suuruusluokkaan ja lähelle yhtälössä 40 laskennallisesti määritettyä kulkuaallon nopeutta. PSCAD-malli, jolla kulkuaaltoa kaapelissa simuloidaan, on esitetty kuvassa 45.



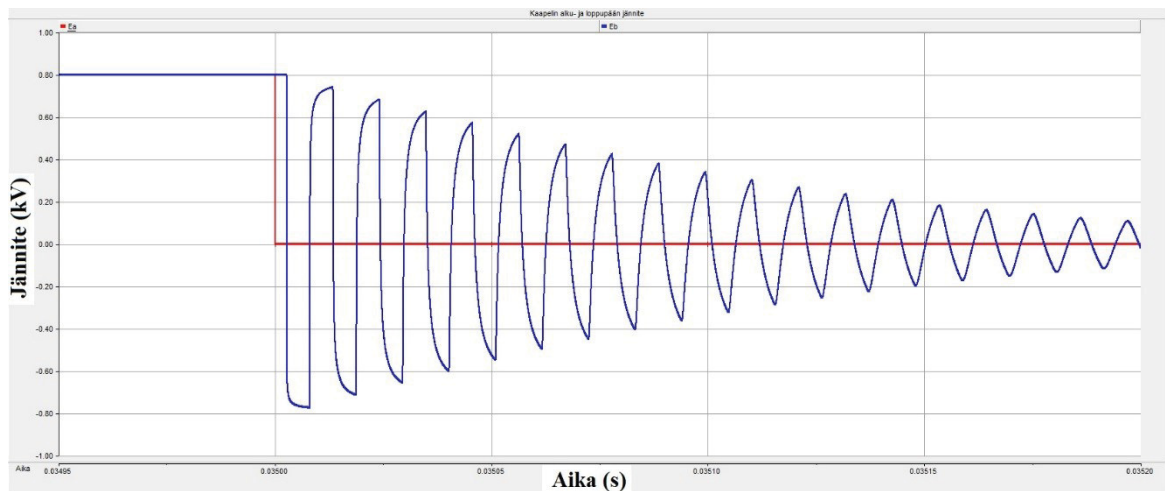
Kuva 45. PSCAD-malli, jolla tutkitaan kulkuaallon matka-aikaa ja värähtelytaajuutta AXHCKM-WTC-kaapelissa.

Kuvassa 45 esitetyllä PSCAD-mallilla on tässä työssä simuloitu kuvan 44 mukaista mitauskytkentää, jota viitteessä [50] on käytetty. Tuhannen kilo-ohmin vastuksen takana on DC-jännitelähde, joka nostaa jännitettä ramppimaisesti 800 volttiin. Jännitteen saavutettua 800 volttia, kipinäväli syttyy ja purkaa kaapelin kapasitanssiin jääneen varauksen askelmaisesti synnyttäen samalla jyrkän jänniteaallon kohti kaapelin loppupäätä. Kipinäväliä mallinnetaan PSCAD:ssä yksivaiheisella ideaalikatkaisijalla, joka sulkeutuu jännitteen noustessa 800 volttiin. Simulointiaskeleena on käytetty 0,01 μ s. Kuvassa 43 on samassa kuvaajassa esitetty simuloitu kaapelin alku- ja loppupään jännite kaapelipituuden ollessa 242 m.



Kuva 46. Jännite kaapelin alkupäässä punaisella ja jännite kaapelin loppupäässä sinisellä. Kaapelipituus 242 m.

Kuvasta 46 nähdään, että kipinävalin syttyessä kaapelin alkupään jännite tipahtaa askelmaisesti arvosta 800 V arvoon 0 V. Sinisellä kuvassa 46 esitetty kaapelin loppupään jännite, kuitenkin tippuu 800 voltista arvoon 0 voltia hieman viiveellä kaapelin alkupäähän nähden. Tämä viive on kulkuaallon matka-aika kaapelin päästä päähän. Lisäksi jänniteaallon heijastuminen kaapelin päissä aikaansaa jännitteen värähtelyn kaapelin loppupäässä. Kuvassa 47 on esitetty vastaava simulointi 484 metrin kaapelille. Kuvat 46 ja 47 on skaalattu samalle asteikolle x- ja y-akselien suhteen.



Kuva 47. Jännite kaapelin alkupäässä punaisella ja jännite kaapelin loppupäässä sinisellä. Kaapelipituus 484 m.

Kuvasta 47 nähdään, että kulkuaallon matka-aika kaapelin päästä päähän on selvästi pidempi 484 metrin kaapelilla, kuin 242 metrin kaapelilla. Tämä nähdään siitä, että jännitteen askelmaiseen laskemiseen kaapelin loppupäässä kuluu selvästi pidempi aika 484 metrin kaapelilla, kuin 242 metrin kaapelilla. Kuvia vertailemalla nähdään myös, että kaapelin loppupään jännitteen värähtelytaajuus on selvästi alhaisempi 484 metrin kaapelilla, kuin 242 metrin kaapelilla. Tämä johtuu siitä, että pidemmällä kaapelilla heijastuksia

tapahtuu harvemmin, sillä kulkuaallon matka-aika kaapelin päästä päähän on pidempi. Kuvista nähdään myös, että lyhyellä kaapelilla jännitevärähtely vaimenee voimakkaammin, kuin pidemmällä kaapelilla. Tämä johtuu siitä, että lyhyellä kaapelilla korkeampi värähtelytaajuus johtaa voimakkaampaan virranähtöön, joka puolestaan saa korkeataajuisen jännitesignaalin vaimenemaan voimakkaammin lisäämällä kaapelin vaimennusta.

Taulukossa 11 on esitetty simuloitua matka-aikaa, sekä värähtelytaajuuksia AHXCMK-WTC-kaapelille.

Taulukko 11. *Simuloitu värähtelytaajuus ja kulkuaallon matka-aika AHXCMK-WTC-kaapelille*

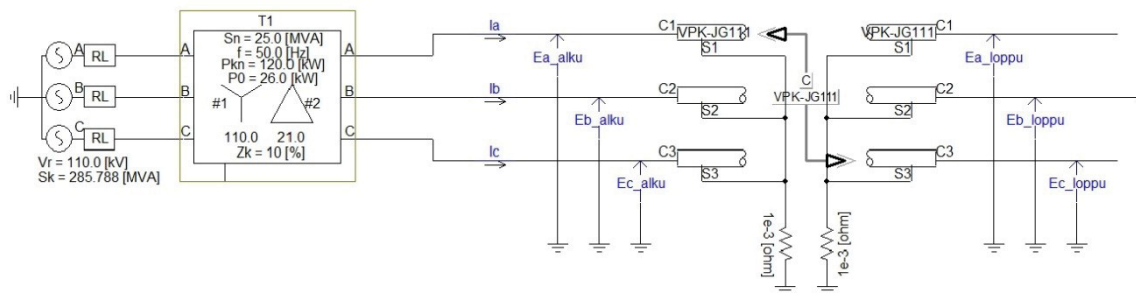
Kaapelipituus	Värähtelytaajuus	Matka-aika
242 m	0,18539 MHz	$1,335 \cdot 10^{-6}$ s
484 m	0,094375 MHz	$2,678 \cdot 10^{-6}$ s

Taulukon 11 tuloksia vertaamalla taulukossa 10 esitettyihin, viitteessä [50] saavutettuihin tuloksiin, nähdään, että sekä värähtelytaajuus, että matka-aika ovat varsin lähellä toisiaan. Kun taulukossa 11 esitettyjen kaapelipituuden ja matka-ajan perusteella lasketaan kulkuaallon nopeus, saadaan kulkuaallon nopeudeksi 242 metriä pitkälle kaapelilla 181,27 m/ μ s ja 484 metriä pitkälle kaapelilla 180,76 m/ μ s. PSCAD-simuloinneilla määritetyt kulkuaallon nopeudet ovat varsin hyvin linjassa yhtälön 40 avulla määritetyn kulkuaallon nopeuden kanssa. Viitteessä [50] 240 mm² merikaapelille laskennallisesti määritetty kulkuaallon nopeus on noin 175 m/ μ s, jota tukevat myös simulointi- ja mittaustulokset. 185 mm² AHXCMK-WTC-kaapelilla kulkuaallon nopeus on simulointien ja laskelmien perusteella hieman korkeampi, jolloin kulkuaallon matka-ajan tulee olla hieman lyhyempi ja värähtelytaajuuden hieman suurempi, kuin samanpituisella 240 mm² merikaapelilla. Taulukossa 10 ja 11 esitetyt simulointi- ja mittaustulokset näyttäisivät siis olevan varsin hyvin linjassa keskenään.

6.2.5 Kaapelin kapasitanssi ja varausvirta

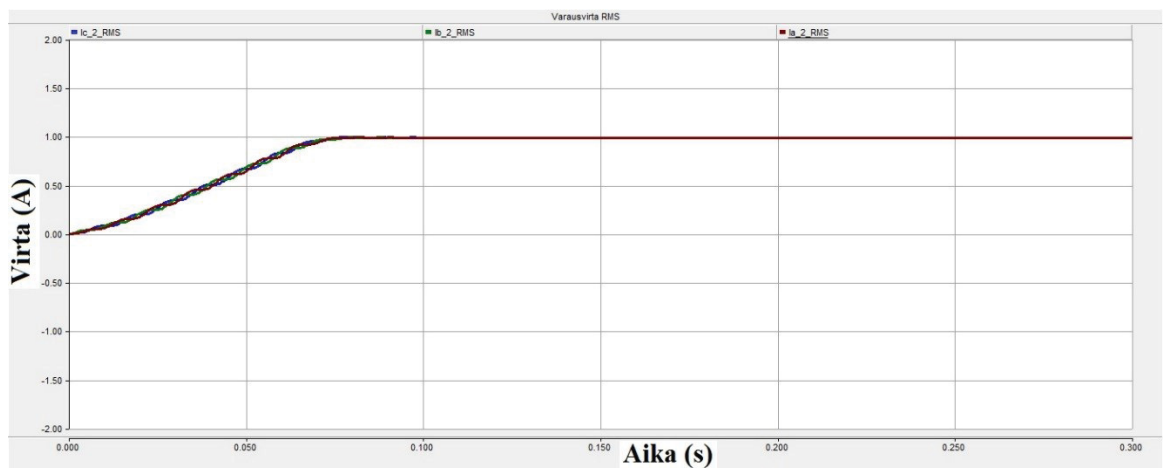
Kaapelin kapasitanssilla on varsin suuri merkitys muuntajan navoissa vaikuttavan transienttiylijännitteen suuruuteen tyhjiökatkaisijalla tehtävän kytkentätoimenpiteen yhteydessä. Kuten luvussa 3 esitettiin, on tyhjiökatkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin kapasitanssilla suuri merkitys tyhjiökatkaisijan uudelleensyttymistodennäköisyyteen ja toisaalta syöttävän verkon kapasitanssi vaikuttaa uudelleensyttymistä seuraavan transientti-luonteisen tasoitusvirran suuruuteen ja taajuuteen.

Määritetään seuraavaksi frequency dependent (phase)-mallilla mallinnetun AHXCMK-WTC-kaapelin kapasitanssi määrittämällä sen tuottama kapasitiivinen varausvirta. Kaapelia mallinnettaessahan ei PSCAD:iin missään vaiheessa syötetty suoraan kaapelin käyttökapasitanssia, vaan simulointiohjelma laskee sen käyttäjän syöttämien geometriatietojen ja eristekerroksen permittiviteetin perusteella. Tyhjäkäyvä kaapeli toimii verkossa kondensaattorin tavoin tuottamalla kapasitiivista loistehoa, jonka suuruuden määräävät verkon jännite ja kaapelin kapasitanssi. Tyhjäkäyvän kaapelin varausvirrasta voidaan siis määrittää kaapelin kapasitanssi jos verkon jännite tunnetaan. Kuvassa 48 on esitetty PSCAD-malli, jolla tyhjäkäyvän kaapelin tuottamaa varausvirtaa on simuloitu.



Kuva 48. PSCAD-malli, jolla tutkitaan tyhjäkäyvän kaapelin tuottamaa kapasitiivista varausvirtaa.

Kuvan 48 esittämässä PSCAD-mallissa kilometrin pituinen tyhjäkäyvä 20 kV 185 mm² AHXCMK-WTC-kaapeli on kytketty 25 MVA 110/20 kV päämuuntajan kautta 110 kV verkkoon. Simuloinnissa mitataan kaapelin alkupäässä kulkevaa virtaa. Kuvassa 49 on esitetty kaapelin alkupään virta RMS-arvona ajan suhteen.



Kuva 49. Tyhjäkäyvän 1 km pitkän 20 kV 185 mm² AHXCMK-WTC-kaapelin tuottama varausvirta.

Kuvasta 49 nähdään, että kilometrin pituinen tyhjäkäyvä 20 kV 185 mm² AHXCMK-WTC-kaapeli tuottaa varausvirtaa yhden ampeerin. Kuvassa näkyvä virran kasvaminen simuloinnin alussa johtuu siitä, että PSCAD:ssä syöttävää verkkoa kuvaava jännitelähde

ei voi välittömästi nousta nimellisarvoonsa, vaan simulointiteknisistä syistä sen on annettava lineaarisesti kasvaa kohti nimellisarvoaan [45]. Simulointitulokset on erittäin hyvin linjassa kaapelivalmistajan ilmoittaman varausvirran kanssa. Esimerkiksi Prysmian ilmoittaa 20 kV 185 mm² AHXAMK-W kaapelin varausvirraksi 1,0 A/km [51]. Molempien 20 kV 185 mm² AHXAMK-W ja AHXCMK-WTC-kaapeleiden kapasitanssit ovat 0,26 µF/km [46; 51]. Tällöin niiden tuottamien varausvirtojen täytyy olla myös samat. Frequency dependent (phase)-mallilla mallinnetun kaapelin kapasitanssi on siis 0,26 µF/km. Samaan lukuun päädytään myös kun käytetään kohdassa 6.2.4 esitettyä kaapelin kapasitanssin yhtälöä 39.

6.3 Muuntajan mallinnus

Muuntajan mallintaminen transienttiylijännitteitä simuloitaessa poikkeaa huomattavasti jatkuvan tilan ilmiöiden simulointiin soveltuvasta muuntajan mallista. Esimerkiksi muuntajakäämien jännitejakauma riippuu voimakkaasti käämiin kohdistuvan jännitteen aaltomuodosta. Matalilla taajuuksilla jännitejakauma on lähes lineaarinen, mutta korkeataajuisilla transienttijännitteillä suurin osa käämiin kohdistuvasta jännitteestä kohdistuu ensimmäisille käämikierroksille. [35]

Matalataajuisilla transienteilla muuntajan oikosulkuimpedanssi on dominoivin komponentti muuntajan impedansseista. Sähköverkon mallinnuksessa muuntaja yleensä esitetäänkin ideaalisena muuntajana, jonka impedanssi on oikosulkuimpedanssi. Kun jännitesignaalin taajuus kasvaa ja alkaa lähestyä ääretöntä, alkaa muuntaja käyttäytyä sähkötekniikassa mielessä eri tavalla. Muuntajien ja pyörivien koneiden yhteydessä on havaittu, että taajuuden kasvaessa alkaa impedanssi lähestyä nolaa yhtälön 41 mukaisesti. [52]

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \{|Z(j\omega)|\} = 0 \quad (41)$$

Vastaavasti muuntajan impedanssin vaihesiirtokulma on matalilla taajuuksilla noin 90°, joka radiaaneina on $\frac{\pi}{2}$ radiaania. Kuitenkin taajuuden kasvaessa ja lähestyessä ääretöntä, alkaa muuntajan impedanssin vaihesiirtokulma lähestyä -90° tai $-\frac{\pi}{2}$ radiaania. Korkeilla taajuuksilla muuntajan hajakapasitanssista tulee siis muuntajan vasteen määräävä tekijä, ja muuntaja käyttäytyy kapasitiivisesti. [52]

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \{Arg|Z(j\omega)|\} = -\frac{\pi}{2} \quad (42)$$

Tästä syystä muuntajan käyttäytymistä hyvin korkeataajuisilla transientti-ilmiöillä voidaan tutkia erittäin yksinkertaisella, mutta kuitenkin kohtuullisen tarkalla mallilla, missä standardimuuntajan mallin rinnalle kytketään yksinkertaisesti kondensaattori. Tätä lähestymistapaa on käytetty useissa tutkimuspapereissa ja se on osoittautunut tarkkuudeltaan varsin tyydyttäväksi [53-56].

Yleensä transienttitarkasteluissa hajakapasitanssia edustava kondensaattori lisätään vaiheen ja maan väliin vain sille puolella muuntajaa, joka altistuu verkosta tulevalle transienttiylijännitteelle. Tämä on varsin toimiva tapa, kun tarkastellaan kytkentäilmiöitä verkossa, joka koostuu esimerkiksi tyhjiökatkaisijasta, kaapelista ja kuormitetusta tai kuormittamattomasta muuntajasta, kuten tässä diplomityössä. Jos halutaan tutkia muuntajan läpi kulkeutuvia ylijännitteitä, täytyy simulointimallissa huomioida muuntajan ylä- ja alajännitekäämin välinen hajakapasitanssi sekä alajännitekäämin ja maan välinen kapasitanssi. [52-54]

Muuntajan hajakapasitanssien tarkat arvot ovat tyypillisesti vain muuntajavalmistajan tiedossa. Kuitenkin hajakapasitanssien arvoja voidaan tietyin rajoituksin arvioida, kun tiedetään muuntajan nimellisteho [52; 53]. Tyypillisiä hajakapasitanssien arvoja sydänmuuntajille on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Tyypillisiä muuntajan hajakapasitanssien arvoja [52; 53].

Muuntajan nimellisteho (MVA)	YJ-maa kapasitanssi (nF)	AJ-maa kapasitanssi (nF)	YJ-AJ kapasitanssi (nF)
1	1,2-14	3,1-16	1,2-17
2	1,2-16	3-16	1-18
5	1,2-14	5,5-17	1,1-20
10	4-7	8-18	4-11
25	2,8-4,2	5,2-20	2,5-18
50	4-6,8	3-24	3,4-11
75	3,5-7	2,8-13	5,5-13

Tätä mallinnustapaa käytettäessä on kuitenkin syytä pitää mielessä, että kyseessä on vain yksinkertaistus todellisen muuntajan käyttäytymisestä. Jos halutaan tutkia muuntajan sisäisiä ilmiöitä tai halutaan tarkempia simulointituloksia, on käytettävä monimutkaisempia ja tarkemmin muuntajan toimintaa kuvaavia malleja. Käytännön verkoissa muuntajan sisällä tapahtuvat suurtaajuusilmiöt ovat kuitenkin monimutkaisia ja tästä syystä niiden täsmällinen on mallintaminen vaikeaa.

7. SIMULOINTIMALLI JA SIMULOINTITULOKSET

Tässä luvussa esitellään työssä rakennettu simulointimalli, sekä simulointitulokset, joiden pohjalta on pyritty tunnistamaan tilanteet, joissa kuivamuuntaja tulisi varustaa ylijännitesuojilla tyhjiökatkaisijan aiheuttamia kytkentäylijännitteitä vastaan. Aiemmin luvussa 6 esiteltiin yksityiskohtaisesti simulointimallin tärkeimmät komponentit ja pyrittiin verifioimaan niiden toiminta yksittäisenä komponenttina. Tässä luvussa pyritään verifioimaan aluksi mallin toiminta kokonaisuudessaan vertaamalla sitä oikeisiin mittaustuloksiin. Tämän jälkeen käydään läpi simuloitavat kytkentätilanteet ja esitellään simulointitulokset pääpiirteissään.

Simuloitavia tilanteita on monta, joten tässä luvussa esitellään vain tärkeimmät simulointitulokset ja kuvaajat. Simulointimalli on liitteenä työn lopussa.

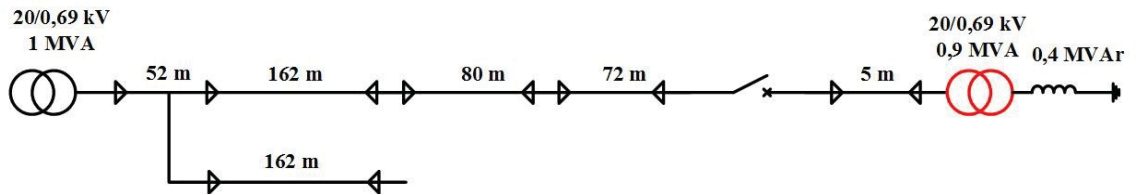
7.1 Mallin toimivuuden todentaminen

Ruotsissa Västeråsissa ABB:n Corporate research centerissä on laboratoriomittauksin tutkittu tyhjiökatkaisijan aiheuttamia kytkentäylijännitteitä. Lars Liljestränd et. al. [6-8] ovat rakentaneet laboratorioon pienoiskoossa 20 kV sähkövoimajärjestelmän, joka koostuu syöttävästä muuntajasta, eripituisista kaapeleista, testimuuntajasta sekä rengassyöttökojeistossa olevasta tyhjiökatkaisijasta. Rengassyöttökojeistoa (RMU, Ring Main Unit) voidaan siirtää, jolloin tyhjiökatkaisijan ja testimuuntajana olevan kuivamuuntajan välissä olevaa kaapelipituutta voidaan vaihdella.

Tässä työssä on PSCAD:iin mallinnettu mittauksissa käytetty laboratorioverkko ja simuloitu samoja kytkentätilanteita, joita on laboratoriossa mitattu. Vertailemalla Västeråsissa saatuja mittaustuloksia ja simulointituloksia pyritään vahvistamaan simulointimallin toimivuudesta, sekä saamaan käsitystä sen tarkkuudesta.

7.1.1 Induktiivisen kuormitusvirran katkaisu ilman suojalaitteita

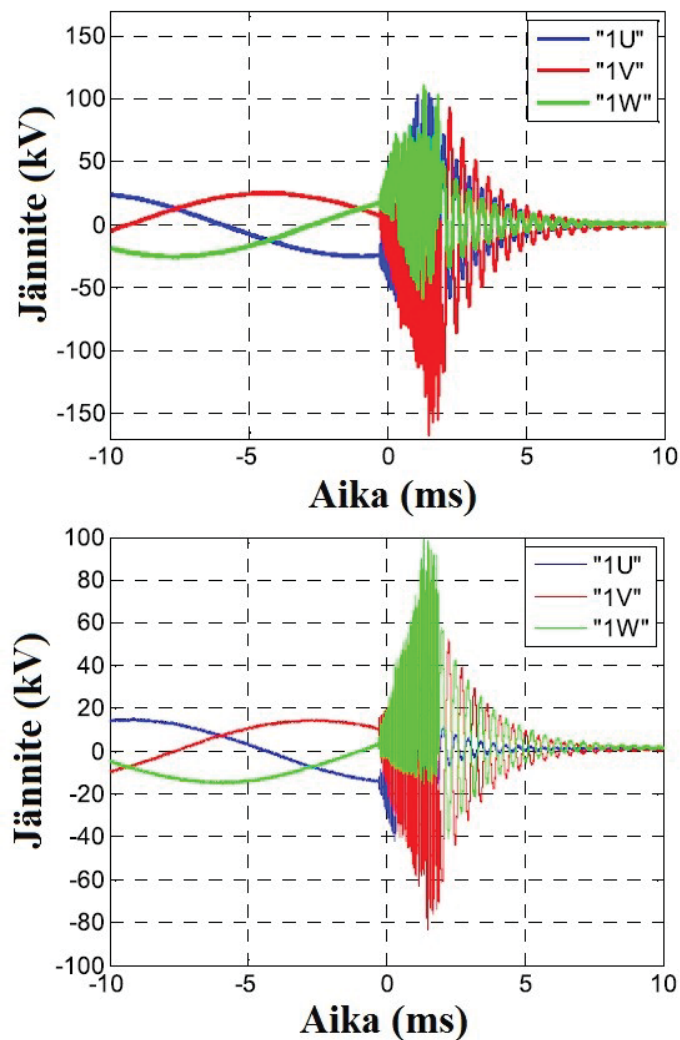
Simuloidaan ensin kuvan 50 mukaista tilannetta, jossa tyhjiökatkaisijalla katkaistaan induktiivisesti kuormitetun muuntajan kuormitusvirta. Katkaisijan avautuminen on synkronoitu virran vaihekulman kanssa siten, että katkaisija aukeaa mahdollisimman lähellä virran nollakohtaa, jolloin uudelleensyttymiset katkaisijan avausvälissä ovat mahdollisimman todennäköisiä. Lisäksi katkaisijan ja muuntajan välinen kaapeli on lyhyt, vain 5 metriä pitkä, ja katkaisijan yläpuolella on useita satoja metrejä kaapelia, jotta kytkentätilanne olisi mahdollisimman ”vaarallinen”.



Kuva 50. Havainnekuva laboratorioverkosta Västeråsissa.

Kuvasta 50 nähdään, miten laboratorioverkko koostuu eripituisista kaapeleista, jolloin rengassyöttökojeistossa olevaa tyhjiökatkaisijaa voidaan siirrellä ja näin muuttaa verkon konfiguraatiota.

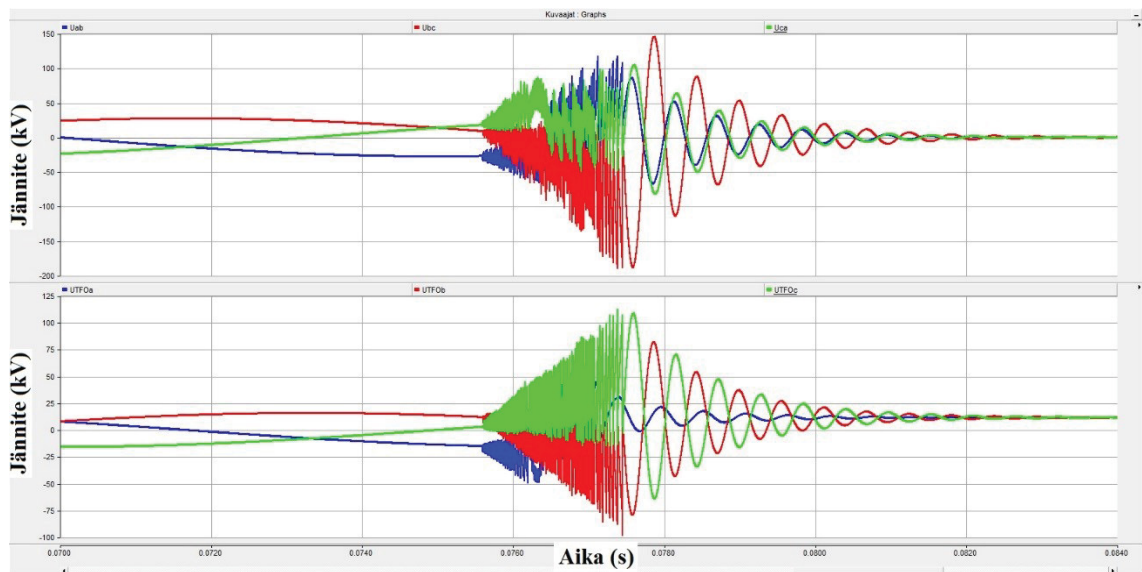
Kuvassa 51 on esitetty jännitemittauksia muuntajan navoista induktiivisen kuormitusvirran katkaisun yhteydessä. Laboratoriossa on mitattu sekä pääjännitettä, että vaiheen ja maan välistä jännitettä muuntajan navoissa virran katkaisun hetkellä.



Kuva 51. Pääjännitteet (ylhäällä) ja vaihejännitteet (alhaalla) muuntajan navoissa virran katkaisun hetkellä. Muokattu lähteestä [7].

Kuvasta nähdään, että virran katkaisun yhteydessä katkaisijan avausvälissä tapahtuu suuri määrä uudelleensyttymisiä, jotka näkyvät muuntajan navoissa erittäin jyrkkinä jännitetransientteina. Pääjännitteen huippuarvo virran katkaisun yhteydessä on keskimmissä vaiheissa 168 kV. Tämä ylittää selvästi muuntajan peruseristystason eli BIL-tason (Basic Insulation Level), joka 24 kV verkossa on standardin mukaan 125 kV. Vaiheen ja maan välinen jännitteen huippuarvo muuntajan navoissa on noin 99 kV. [7]

Seuraavaksi kuvassa 52 on esitetty simulointitulokset vastaavasta tilanteesta. Simuloinnissa katkaisijan ja muuntajan välistä 5 metriä pitkää kaapelia mallinnetaan frequency dependent (phase)-mallin sijasta kolmivaiheisella π -sijaiskytkennällä. Tämä sen takia, että näin lyhyen kaapelin mallintaminen taajuusriippuvalla mallilla vaatisi erittäin lyhyen simulointiaskeleen (luokkaa 20 ns), eikä tämä ole simulointiteknisistä syistä mahdollista. Lisäksi näin lyhyellä kaapelilla kulkuaallon matka-aika kaapelin päästä päähän erittäin lyhyt, noin 28 ns, joten kulkuaaltoilmiön vaikutus on minimaalinen. Kaikki muut kaapelit on mallinnettu taajuusriippuvalla mallilla. Valokaaren palamisaika (eng. arcing time), eli aika koskettimien irtoamisesta virran katkeamiseen eli current choppingiin on erittäin lyhyt, noin 0,1 ms. Simulointiaskeleena on käytetty 0,04 mikrosekuntia.



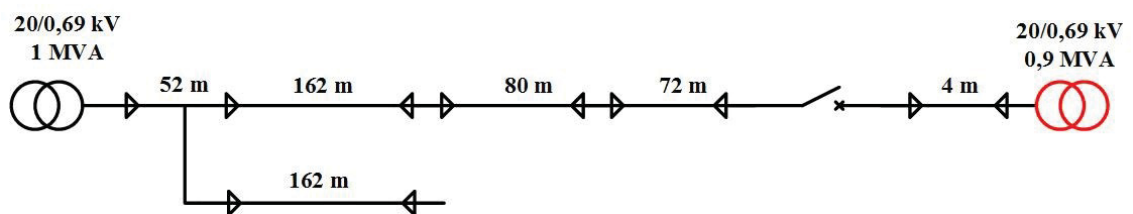
Kuva 52. Simuloidut pääjännitteet (ylhäällä) ja vaihejännitteet (alhaalla) muuntajan navoissa induktiivisen kuormitusvirran katkaisun yhteydessä.

Kuvasta 52 nähdään, että jännitteen käyrämuodot simuloinnissa ovat varsin samankaltaiset, kuin mitä viitteessä [7] on mitattu. Simuloinnissa tapahtuu runsaasti uudelleensyttymisiä katkaisijan avausvälissä, jotka johtavat erittäin jyrkkiin jänniteimpulsseihin muuntajan navoissa, kuten kuvasta 49 nähdään. Simuloinnissa tapahtuu uudelleensyttymisiä yhteensä kaikissa vaiheissa 350 kpl. Simuloinnin mukaan pääjännite muuntajan navoissa saavuttaa suurimmillaan hetkellisarvon -189 kV, mikä on noin 20 kV suurempi kuin mitä on mitattu viitteessä [7]. Vaihejännitteen suurin hetkellisarvo puolestaan on noin 112 kV,

mikä sekin on noin 13 kV suurempi kuin mitattu. Kuitenkin sekä mittauksissa, että simuloinneissa pääjännitteen huippuarvo saavutetaan B-vaiheessa ja vaihejännitteen huippuarvo C-vaiheessa. Sekä mittauksessa, että simuloinnissa peräkkäisten uudelleensyttymisten vaihe kestää noin 2 millisekuntia, jonka jälkeen jännite muuntajan navoissa laskee värähtelyjen kautta kohti nollaa. Simulointimalli näyttäisi siis toimivan varsin hyvin, mutta tuottavan jonkin verran mitattua suurempia ylijännitteitä.

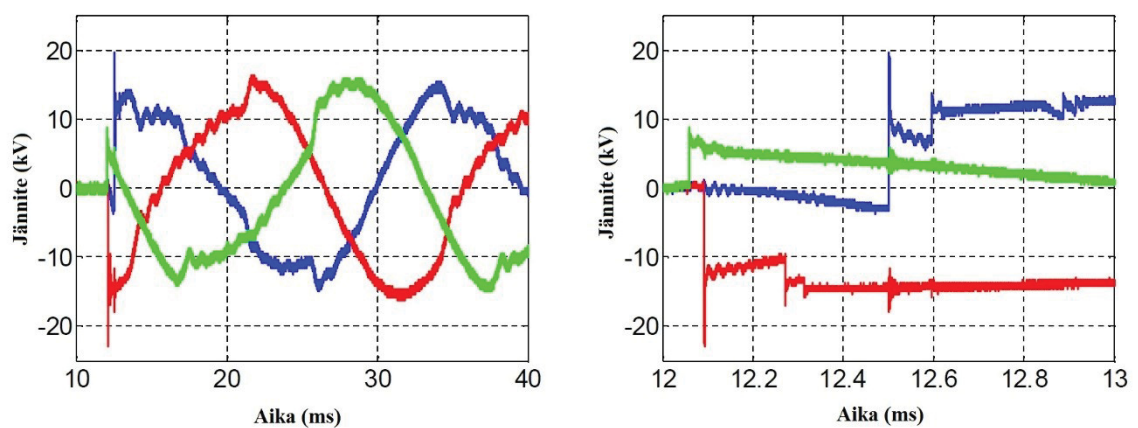
7.1.2 Tyhjäkäyvän muuntajan energisointi

Simuloidaan seuraavaksi tyhjäkäyvän muuntajan energisoinnissa syntyviä ylijännitteitä. Simuloitava verkko on nyt kuvan 53 mukainen.



Kuva 53. Havainnekuva laboratorioverkosta Västeråsissa, jolla tutkitaan tyhjäkäyvän muuntajan energisointia.

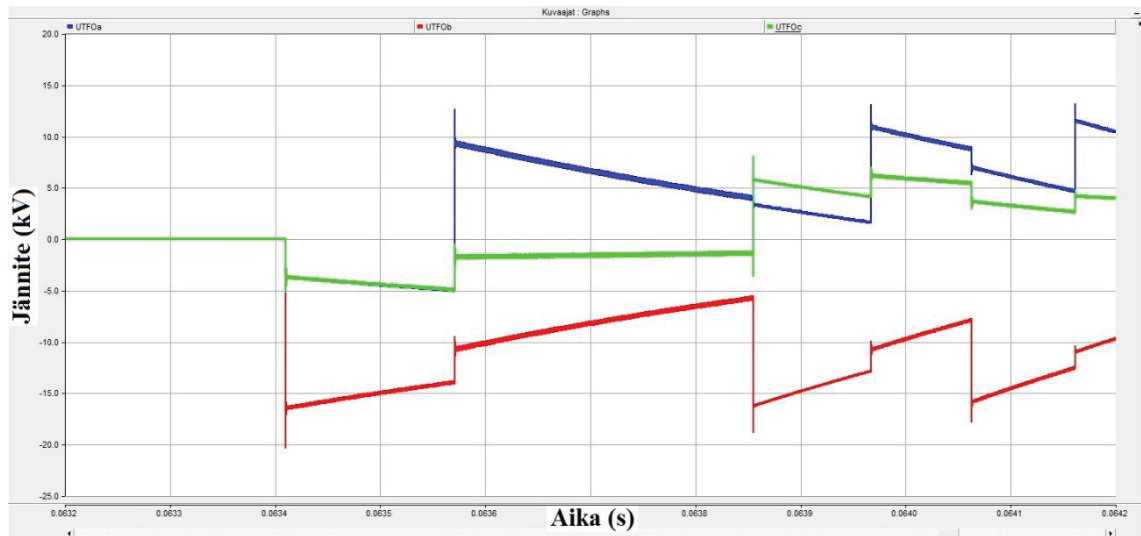
Vastaavassa tilanteessa syntyviä ylijännitteitä on mitattu ABB:n Corporate Research Centerissä Ruotsin Västeråsissa olevassa laboratorioverkossa [8]. Verkko on muuten samanlainen, kuin kohdan 7.1.1 simuloinnissa, mutta katkaisijan ja muuntajan välinen kaapeli on nyt vain 4 metriä pitkä ja kuivamuuntajan toisioon ei ole kytketty kuormaa. Västeråsissa tehtyjen mittausten mukaan kuormittamattoman muuntajan energisoinnissa muuntajan navoista mitatut napajännitteet ovat kuvan 54 mukaisia.



Kuva 54. Muuntajan napajännitteet energisoinnissa. Oikealla lähikuva ensimmäisistä uudelleensyttymisistä. Muokattu lähteestä [8].

Kuvasta 54 nähdään, että energisoinnin yhteydessä syntyvät ylijännitteet ovat varsin vaatimattomia. Muuntajan napajännitteissä näkyy muutamia askelmaisia jännitepiikkejä, joiden suuruus on noin 1,5 kertaa normaalin vaihejännitteen amplitudi. Kuvassa näkyvä 50 Hz taajuinen jännitteen säröytymä johtuu laboratorioverkkoa syöttävän 20/0,69 kV syöttömuuntajan pienestä nimellistehosta. Energisointitilanteessa testimuuntajan kytkentävirrasyösy ylittää syöttömuuntajan nimellisvirran, jolloin jännite säröytyy. [8]

Simuloidaan seuraavaksi samaa tilannetta PSCAD:llä. Simuloidut vaihejännitteet muuntajan navoissa energisoinnin aikana on esitetty kuvassa 55.



Kuva 55. Simuloidut vaihejännitteet muuntajan navoissa energisoinnin yhteydessä.

Kuvasta 55 nähdään, että myös PSCAD-simuloinnissa muuntajan energisoinnin yhteydessä muuntajan navoissa vaikuttava vaihejännite saavuttaa suurimmillaan noin 20 kV suuruisen hetkellisarvon. Erojaikin mittausten ja simulointien välillä on havaittavissa. Mittausten mukaan vaihejännitteen 20 kV hetkellisarvo saavutetaan kahdessa vaiheessa: ensin punaisella värillä piirrettyssä B-vaiheessa negatiivisena ja sitten positiivisena noin 0,4 millisekunnin päästä sinisellä piirrettyssä A-vaiheessa. Simulointien mukaan B-vaiheessa saavutetaan ensimmäisen esisytymisen yhteydessä noin -20 kV napajännitteen arvo, mutta noin 0,2 millisekunnin päästä sinisellä piirretyn A-vaiheen uudelleensytymisen yhteydessä jännite saavuttaa vain noin 13 kV hetkellisarvon. Simuloinneissa näyttäisi lisäksi tapahtuvan enemmän ja tiheämmin esisytymisiä, kuin mittauksissa. Ylijännitteiden suuruuteen vaikuttaa kuitenkin suuresti ajanhetki, jolla katkaisija sulkeutuu. Viitteessä [8] ei kerrota millä ajanhetkellä ensimmäinen uudelleensyntyminen tapahtuu. Mittaustuloksista voi kuitenkin päätellä, että ensimmäinen esisyttyminen tapahtuu B-vaiheen jännitteen ollessa verkkojakson negatiivisessa huippuarvossa, jolloin myös syntyvä ylijännite on suurin. Myös simuloinneissa katkaisijan sulkeutuminen on ajoitettu niin, että katkaisijassa tapahtuu ensimmäinen esisyttyminen B-vaiheen jännitteen negatiivisessa huippuarvossa.

Simuloinneissa päästiin tässäkin kytkentätilanteessa varsin hyvään tarkkuuteen, kun tuloksia verrattiin mittaustuloksiin. Eroja voivat selittää mittaasepätarkkuus, syöttömuuntajan kyllästyminen laboratoriomittauksissa, sekä puutteet simulointimallissa. Yksi mahdollinen syy simulointivirheeseen on kaapelin mallinnustapa. Simuloinnissa käytettiin π -sijaiskytkentää katkaisijan ja muuntajan välisen 4 metrin kaapelin mallinnuksessa, sillä taajuusriippuvan mallin käyttäminen näin lyhyelle kaapelille vaatisi äärimmäisen lyhyen simulointiaskeleen, joka ei simulointiteknisistä syistä ole mahdollista. Esisyyttymisten yhteydessä syntyvät transienttiaallot heijastuvat muuntajan navoista kohdatessaan aaltoimpedanssin muutoskohdan. Heijastuvan aallon kerrostuessa muuntajaa kohti tulevaan aaltoon voi jännite muuntajan navoissa jopa kaksinkertaistua. π -sijaiskytkentä ei kuitenkaan huomioi kulkuaaltoilmiötä, jolloin tämä tulevan ja heijastuneen aallon kerrostumisesta johtuva jännitteennousu ei näy simuloinneissa. Tämä on yksi mahdollinen virhelähde simuloinneissa. Toisaalta vain 4 metriä pitkän kaapelin tapauksessa kulkuaaltoilmiön vaikutus on varsin pieni, joka osaltaan laskee virheen suuruutta. Toinen erityisesti esisyyttymisten määrään vaikuttava tekijä, on tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukyky. Tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan esisyyttymistä seuraavan korkeataajuisen transienttivirran ennen katkaisijan täydellistä sulkeutumista, joka aiheuttaa vielä avonaiseen katkaisuväliin palaavan transienttijännitteen, joka johtaa uuteen esisyyttymiseen. Jos tyhjiökatkaisija pystyy katkaisemaan hyvin korkeataajuisia virtoja, tapahtuu esisyyttymisiäkin enemmän. Tyhjiökatkaisijan korkeataajuisen virran katkaisukyky riippuu kuitenkin monesta tekijästä ja on jossain määrin myös tilastollinen suure. Tästä syystä yhden oikean arvon määrittäminen simulointeihin on vaikeaa, mikä johtaa virheeseen.

7.2 Simuloitavat tilanteet

Tässä työssä tutkitaan viittä erilaista kytkentätilannetta erilaisilla verkkokonfiguraatioilla, joiden perusteella pyritään tunnistamaan muuntajan ylijännitesuojausta vaativat kytkentätilanteet ja verkkokonfiguraatiot. Normaaaleja kytkentätilanteita ovat tyhjäkäyvän muuntajan energisointi ja irtikytkentä. Normaalistihan muuntajaa irti kytkettäessä yläjännitepuolelta olisi muuntaja hyvä ensin saattaa kuormittamattomaksi alajännitepuolelta tehdyillä kytkennöillä. Tilanteita, joissa muuntaja voidaan joutua kytkemään irti kuormallisena, ovat esimerkiksi vika muuntajan toisiopuolen navoissa tai muuntajan tahaton laukeaminen kytkentävirtasysäyksen aiheuttaman suojauslaukaisun takia. Tutkittavat kytkentätilanteet ovat siis:

1. Muuntajan energisointi
2. Tyhjäkäyvän muuntajan irti kytkeminen
3. Induktiivisesti kuormitetun muuntajan irti kytkeminen ($I_L = 0,5 \cdot I_n$, $\cos(\phi) = 0_{ind}$)
4. Lievästi induktiivisen ($\cos(\phi) = 0,7_{ind}$) muuntajan nimellisvirran katkaisu
5. Muuntajan irti kytkeminen, kun muuntajan toisiossa on kolmivaiheinen oikosulku.

KytKentätilanne 3 on varsin teoreettinen tilanne, sillä reaktoreita tai kuristimia lukuun ottamatta tuskin koskaan kuormitus on puhtaasti induktiivista. Tätä simuloidaan siksi, että vahvasti induktiivisen virran katkaisu aiheuttaa suurimmat ylijännitteet yleensä ja on siksi ns. ”worst case scenario”. Todellisuudessa muuntajan laukeaminen toisionavoissa olevan kolmivaiheisen oikosulun seurauksena lienee pahin mahdollinen tilanne, sillä tällöin oikosulkuvirran suuruuden määrää käytännössä muuntajan oikosulkuimpedanssi, joka on lähes puhdasta induktiivista reaktanssia. Katkaisija joutuu siis katkaisemaan suurrehkon, mutta selvästi oikosulkuvirtaa pienemmän induktiivisen virran.

Ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi valokaaren paloaika katkaisijan sisällä (arcing time). Sillä on siis vaikutusta missä kohtaa sinijaksoa katkaisijan koskettimet avautuvat ja sulkeutuvat. Todellisuudessaan koskettimien avautumis- ja sulkeutumishetket ovat tilastollisia suureita, mikäli ei käytetä tahdistettua katkaisua. Tässä diplomityössä kuitenkin mielenkiinnon kohteena on pahin mahdollinen tilanne, eli suurin ylijännite. Virran katkaisussa suurin ylijännite syntyy, kun katkaisijan koskettimet irtoavat juuri ennen virran ennenaikaista katkeamista eli current choppiä, sillä silloin uudelleensyttymisiä tapahtuu lähes varmasti. Tyhjäkäyntivirran katkaisussa pahin tilanne on kuitenkin koskettimien avautuminen virran amplitudissa, sillä keskijännitepuolella muuntajan tyhjäkäyntivirta on alle katkaisijan chopping current-tason ja virta katkeaa välittömästi koskettimien avautuessa. Toisaalta katkaisijan sulkeutuessa pahin tilanne on, kun esisytyminen katkaisijan avausvälissä tapahtuu verkkojännitteen huippukohdassa, sillä tällöin katkaisijasta muuntajan napoihin kulkevan jännitetransientin amplitudi on suurin. Virran katkaisua simuloitaessa katkaisijan avaushetki on simuloinneissa ajoitettu tapahtuvaksi juuri ennen virran chopping current-tasoa ja vastaavasti katkaisijan sulkeutumista mallinnettaessa sulkeutumishetki on ajoitettu niin, että ensimmäinen esisytyminen tapahtuu verkkojännitteen huippuarvossa.

Tyhjiökatkaisijan aiheuttaman kytkentäylijännitteen suuruuteen vaikuttavat monet asiat kytkentähetken ja kytkentätilanteen lisäksi. Kaikkien ylijännitteen suuruuteen vaikuttavien muuttujien simuloiminen kaikissa tilanteissa vaatisi erittäin suuren määrän simuloitavia tilanteita. Yksinkertaisuuden vuoksi kaikki simuloinnit tehdään samoilla katkaisijakohtaisilla arvoilla 24 kV verkossa. Simuloinneissa tyhjiökatkaisijan avausvälin suurin impulssijännitekestoisuus on 125 kilovoltia, avausvälin jännitelujuuden kasvunopeus 50 kV/ms, korkeataajuisen virran katkaisukyky 100 A/μs ja chopping current 5 A. Tärkeimmät ylijännitteen suuruuteen vaikuttavat asiat ovat tyhjiökatkaisijan ja kuivamuuntajan välisen kaapelin pituus, syöttävän verkon kokonaiskaapelipituus ja tutkittavan kuivamuuntajan nimellisteho. Tästä syystä vain nämä muuttuvat eri simulointitilanteissa. Taulukossa 13 on esitetty simuloinneissa muuttuvat verkkoparametrit, sekä niiden vaihteluvälit. Taulukossa syöttävän verkon kaapelipituuden merkinnässä esimerkiksi 20 m + 1200 m tarkoittaa sitä, että päämuuntajan ja tyhjiökatkaisijan välissä on 20 metriä pitkä kaapeli ja rinnakkaisten johtolähtöjen yhteispituus on 1200 metriä.

Taulukko 13. Simuloinneissa muutettavat verkkoparametrit.

Muuttuja	Muuttujan vaihteluväli
1. VCB-TR kaapelipituus	2 10 20 50 100 200 500 1000 2000
2. VCB:n syöttävän verkon puoleinen kaapelipituus (PM-VCB-kaapeli + rinnakkaiset lähdöt)	20m + 0m 20m + 2000m 1200m + 2000 200m + 2000m
3. Muuntajan nimellisteho	1,25 4

Simulointimalli koostuu syöttävästä 110 kV verkosta, johon liitytään 25 MVA 110/20 kV päämuuntajalla. Muuntajalta lähtee syöttö useiden solmupisteiden ja niitä yhdistävien kaapeleiden kautta tyhjiökatkaisijalle ja sen perässä olevalle kuivamuuntajalle. Tyhjiökatkaisijan ”yläpuolella” olevassa verkossa on myös rinnakkaisia johtolähtöjä, kuten oikeassakin verkossa yleensä on. Kaikki verkon kaapelit ovat joko frequency dependent (phase)-mallilla tai π -sijaiskytkennällä mallinnettuja AHXCMK-WTC-kaapeleita. π -sijaiskytkentää käytetään vain erittäin lyhyiden kaapelien mallinnuksessa. Simulointimalli on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Simulointituloksista on dokumentoitu esi- tai uudelleensyttymisten lukumäärä, suurin muuntajan navoissa vaikuttava vaihe-maa-välinen jännite, sekä suurin vaiheiden välillä vaikuttava jännite. Esi- ja uudelleensyttymisen aiheuttavat erittäin jyrkkiä jännitetransientteja ja ovat siten vaarallisia muuntajakäämityksille. Tästä syystä myös niiden lukumäärään on kiinnitetty huomiota pelkkien vaihe- ja pääjännitteiden lisäksi.

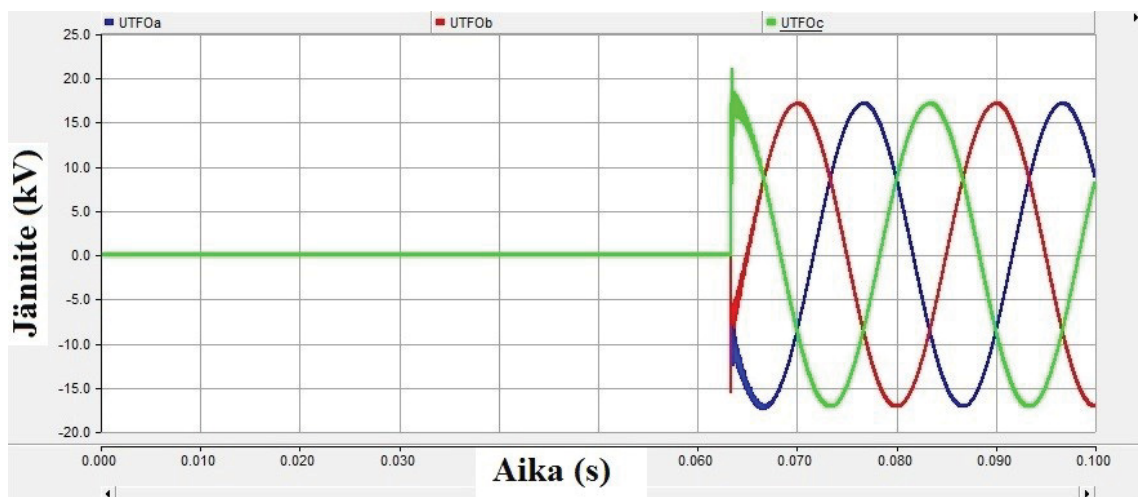
7.2.1 Muuntajan energisointi

Simuloidaan ensin muuntajan energisointia tyhjiökatkaisijalla erilaisilla verkkokonfiguraatioilla. Syntyvien ylijännitteiden suuruutta on tutkittu muuttamalla katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituutta, sekä syöttävän verkon kaapelipituutta. Kaikissa simuloinneissa katkaisijan sulkeutumishetki on ajoitettu tapahtuvaksi syöttävän verkon C-vaiheen jännitteen huippukohdassa. Simulointitilanteet ja -tulokset on koottu taulukkoon 14.

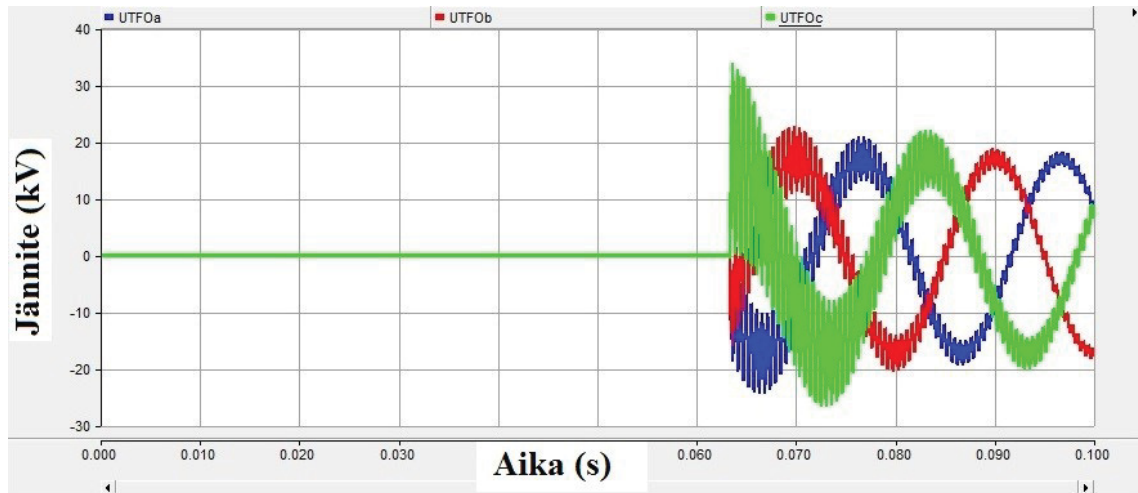
Taulukko 14. Simulointitilanteet ja -tulokset muuntajan energisoinnissa.

Simulointi	Katkaisijamuuntaja kaapelipituus (m)	Syöttävän verkon kaapelipituus (m)	Muuntajan nimellisteho (MVA)	Esisyt. lukumäärä	Suurin vaihejännite (kV)	Suurin pääjännite (kV)	YJS
1	2	20 + 0	1,25	17	19,33	-	-
2	20	20 + 0	1,25	13	21,06	30,8	-
3	100	20 + 0	1,25	28	35,33	47,16	-
4	200	20 + 0	1,25	45	29,01	47,7	-
5	1000	20 + 0	1,25	11	33,25	51,7	-
6	2000	20 + 0	1,25	6	33,8	53,1	-
7	20	20 + 2000	1,25	7	27,3	32	-
8	100	20 + 2000	1,25	6	26,84	31,75	-
9	500	20 + 2000	1,25	5	25,5	33,63	-
10	1000	20 + 2000	1,25	8	25,5	37,9	-
11	20	1200 + 2000	1,25	10	18	-	-
12	100	1200 + 2000	1,25	8	18,03	-	-
13	500	1200 + 2000	1,25	7	25,1	-	-
14	1000	1200 + 2000	1,25	7	25,8	35,4	-

Taulukosta 14 nähdään, että muuntajan energisoinnissa tärkein ylijännitteiden suuruuteen vaikuttava tekijä on muuntajan ja katkaisijan välinen kaapelipituus. Pitkä kaapeli aiheuttaa muuntajaa energisoitaessa suurempia ylijännitteitä, kuin lyhyt kaapeli. Verrataan esimerkiksi simuloinneista 2 ja 6 saatuja muuntajan navoissa vaikuttavia jännitekuvaajia toisiinsa. Simuloidut kuvaajat on esitetty kuvissa 56 ja 57.



Kuva 56. Muuntajan navoista mitatut vaihejännitteet simuloinnissa 2. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.



Kuva 57. Muuntajan navoista mitatut vaihejännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2000 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.

Kuvia 56 ja 57 vertaamalla nähdään, että pidemmällä kaapelilla muuntajaa energisoitaessa muuntajan napoihin syntyy korkeataajuisia jännitevärähtelyä, jonka amplitudi on selvästi suurempi, kuin lyhemmällä kaapelilla. Korkeataajuinen jännitevärähtely johtuu kulkuvaallon heijastumisista muuntajan navoista. Pitkillä kaapeleilla siis kulkuvaaltoilmiön vaikutus on suurempi, jolloin muuntajan navoissa tapahtuvat jänniteaaltojen heijastumiset aikaansaavat jännitteen nousun. Huomionarvoinen seikka simulointituloksissa on se, että pidemmällä kaapelilla katkaisijan sulkeutuessa tapahtuu vähemmän esisyyttymisiä.

Syöttävän verkon kaapelipituudella näyttäisi simulointien mukaan olevan päinvastainen vaikutus. Kun syöttävässä verkossa on paljon kaapelia, muuntajan energisoinnissa syntyvät transienttiylijännitteet ovat pienempiä, kuin jos syöttävässä verkossa on vähän vain kaapelia.

Suurin ylijännite energisoinnin yhteydessä tapahtui simuloinnissa 6. Tällöin muuntajan navoissa vaikutti vaiheiden välillä suurimmillaan 53,1 kV jännite. Tämä jää kuitenkin vielä kauaksi muuntajan BIL-tasosta, joka on 125 kV. Muuntajan energisointi ei siis missään tilanteessa simulointien mukaan aiheuta vaarallisen korkeita ylijännitteitä.

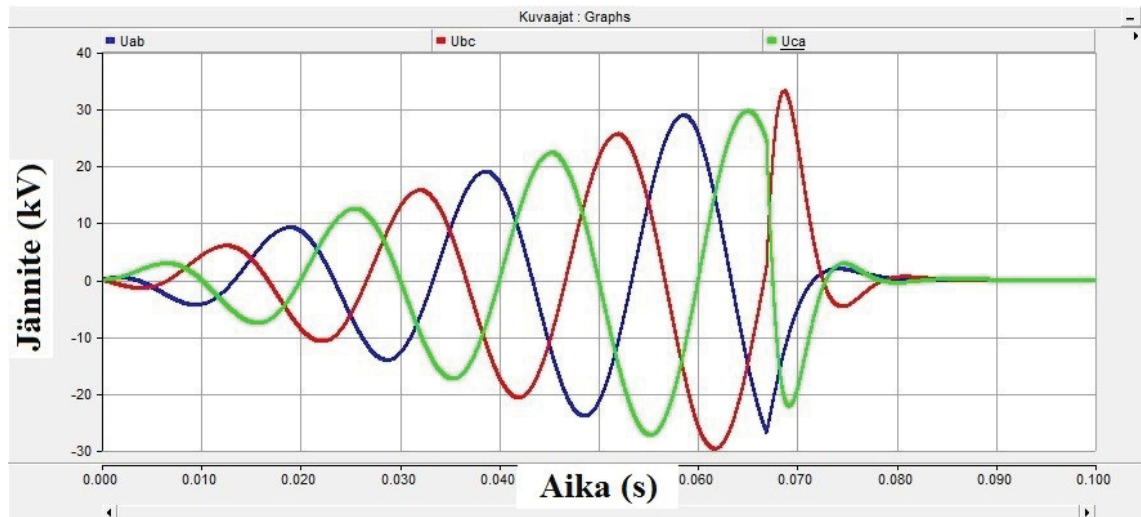
7.2.2 Tyhjäkäyvän muuntajan irrottaminen verkosta

Simuloidaan seuraavaksi tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkentää tyhjiökatkaisijalla erilaisilla verkkokonfiguraatioilla. Syntyvien ylijännitteiden suuruutta on tutkittu muuttamalla katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituutta, syöttävän verkon kaapelipituutta ja irti kytkettävän muuntajan nimellistehoa. Kaikissa simuloinneissa katkaisijan avautumishetki on ajoitettu tapahtuvaksi muuntajan tyhjäkäyntivirran huippukohdassa, jolloin current chop tapahtuu suurimmalla mahdollisella virran hetkellisarvolla. Simulointitilanteet ja -tulokset on koottu taulukkoon 15.

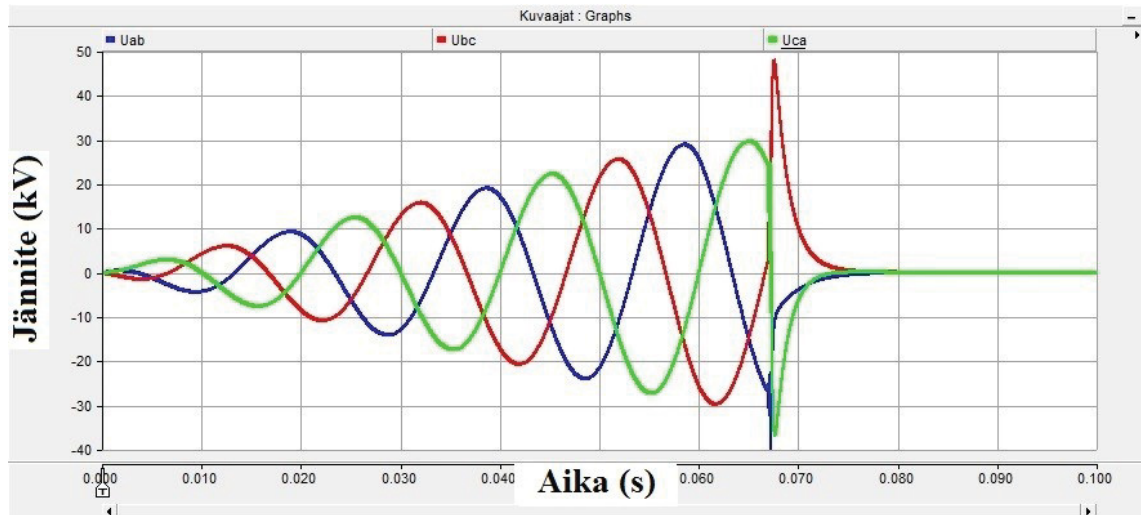
Taulukko 15. Simulointitilanteet ja –tulokset muuntajan tyhjäkäyntivirran katkaisussa.

Simulointi	Katkaisija-muuntaja kaapelipituus (m)	Syöttävän verkon kaapelipituus (m)	Muuntajan nimellisteho (MVA)	Uud-syt. lukumäärä	Suurin vaihejännite (kV)	Suurin pääjännite (kV)	YJS
1	2	20 + 0	1,25	3	-24,97	42,93	-
2	20	20 + 0	1,25	0	-18,2	33,2	-
3	2	20 + 2000	1,25	3	-24,99	42,96	-
4	2	1200 + 2000	1,25	3	-25	42,98	-
5	2	1200 + 2000	1,25	5	-22,49	42,31	-
6	2	1200 + 2000	4	17	27,29	48,05	-
7	20	1200 + 2000	4	3	-24,08	42,27	-

Simulointituloksista nähdään, että myös muuntajan tyhjäkäyntivirran katkaisussa tärkein ylijännitteen suuruuteen vaikuttava tekijä on katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus. Lyhyellä kaapelilla tapahtuu enemmän uudelleensyttymisiä ja syntyy suurempia ylijännitteitä, kuin pidemmällä kaapelilla. Myös muuntajan nimellisteholla on merkittävä vaikutus uudelleensyttymisten määrään ja syntyvien ylijännitteiden suuruuteen. Verrataan esimerkiksi simulointeja 2 ja 6 toisiinsa. Kuvissa 58 ja 59 on esitetty simuloinneista saadut muuntajan navoissa vaikuttavat jännitteet.



Kuva 58. Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 2. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 0 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.



Kuva 59. Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2 m, syöttävän verkon kaapelipituus 1200 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 4 MVA.

Kuvaajista nähdään, että simuloinnissa 2 syntyvät ylijännitteet ovat todella maltillisia, eikä esimerkiksi uudelleensyttymisiä tapahdu lainkaan. Tämä johtuu siitä, että pienitehoisen muuntajan tyhjäkäyntivirta on tyypillisesti myös pieni, jolloin virran katkaisun hetkellä muuntajan induktanssiin varastoinut magneettinen energia on myös pieni. Toisaalta myös katkaisijan ja muuntajan välisen 20 metriä pitkän kaapelin kapasitanssi on tässä tapauksessa riittävän suuri rajoittamaan katkaisijan avausvälissä vaikuttavaa palaavaa transienttijännitettä, jolloin uudelleensyttymisiä ei tapahdu. Simuloinnissa 6 sen sijaan uudelleensyttymisiä tapahtuu, mikä näkyy muuntajan navoissa nopeina jännitetransientteina. Tämä johtuu siitä, että irti kytkettävä muuntaja on nimellisteholtaan suurempi, jolloin myös muuntajan induktanssiin virran katkaisun hetkellä varastoitunut energia on suurempi. Tässä tapauksessa myös katkaisijan ja muuntajan välinen kaapeli on vain 2 metriä jolloin sen kapasitanssi on liian pieni estämään uudelleensyttymisiä katkaisijan avausvälissä.

Tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkennässä syöttävän verkon kaapelipituudella ei simulointien mukaan ole merkittävää vaikutusta. Suuri kaapelipituus syöttävässä verkossa näyttää hieman lisäävän ylijännitteiden suuruutta, mutta vaikutus ei ole merkittävä.

Suurin ylijännite tyhjäkäyntivirran katkaisun yhteydessä tapahtui simuloinnissa 6. Tällöin muuntajan navoissa vaikutti vaiheiden välillä suurimmillaan 48,05 kV jännite. Tämä jää kuitenkin vielä kauaksi muuntajan BIL-tasosta, joka on 125 kV. Tyhjäkäyvän muuntajan irti kytkeminen ei simulointien mukaan aiheuta vaarallisen suuria ylijännitteitä. Kuitenkin muuntajan nimellisteholla on merkittävä vaikutus ylijännitteiden suuruuteen, joten nimellisteholtaan suurten jakelumuntajien yhteydessä on suositeltavaa suorittaa kytkentäylijännitetarkastelu tapauskohtaisesti erityisesti jos tyhjiökatkaisijan ja muuntajan välillä käytetään lyhyttä kaapelia.

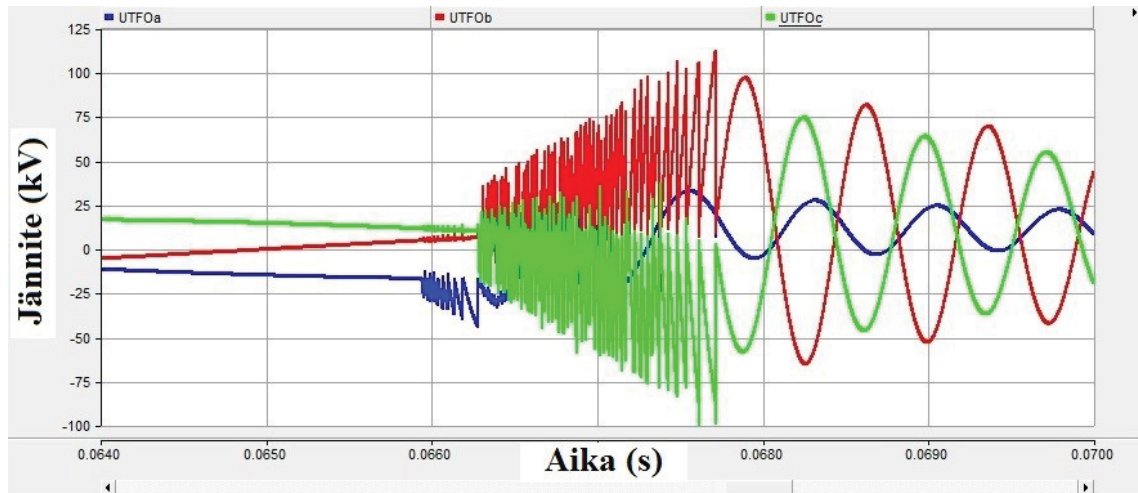
7.2.3 Induktiivisesti kuormitetun muuntajan irrottaminen verkosta

Simuloidaan seuraavaksi tilannetta, jossa muuntaja kytketään irti verkosta kun sen toisiossa on induktiivinen kuorma, jonka $\cos(\phi) = 0_{\text{ind}}$ ja jonka teho on 50 % muuntajan nimellistehosta. Induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentää pidetään yleensä pahimpana mahdollisena kytkentätoimenpiteenä, sillä se synnyttää suurimmat ylijännitteet [8]. Syntyvien ylijännitteiden suuruutta on tutkittu muuttamalla katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituutta sekä syöttävän verkon kaapelipituutta. Kaikissa simuloinneissa katkaisijan avautumishetki on ajoitettu tapahtuvaksi 0,2 ms ennen kuormitusvirran chopping current-tasoa. Tällöin virta katkeaa ennenaikaisesti lähes heti koskettimien avautumisen jälkeen, jolloin uudelleensyttymisiä tapahtuu erittäin todennäköisesti. Simulointitulokset ja -tulokset on koottu taulukkoon 16.

Taulukko 16. Simulointitulokset ja -tulokset induktiivisesti kuormitetun muuntajan irti kytkennässä.

Simulointi	Katkaisijamuuntaja kaapelipituus (m)	Syöttävän verkon kaapelipituus (m)	Muuntajan nimellisteho (MVA)	Uud-syt. lukumäärä	Suurin vaihejännite (kV)	Suurin pääjännite (kV)	YJS
1	2	20 + 0	1,25	82	-187,3	276,8	-
2	10	20 + 0	1,25	120	148	245,1	-
3	20	20 + 0	1,25	76	146,75	269,64	-
4	50	20 + 0	1,25	49	72,82	133,02	-
5	100	20 + 0	1,25	98	131,88	207,2	-
6	200	20 + 0	1,25	89	-100,33	-161,18	-
7	20	20 + 2000	1,25	126	141	227,35	-
8	200	20 + 2000	1,25	0	-55,15	-75	-
9	20	1200 + 2000	1,25	112	112,8	198,6	-
10	200	1200 + 2000	1,25	0	-54,7	-75,6	-

Simulointituloksista nähdään, että induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentä on ylijännitteiden kannalta erittäin vaarallinen kytkentätoimenpide. Uudelleensyttymisiä tapahtuu katkaisijan avausvälissä runsaasti ja muuntajan navoissa vaikuttavat ylijännitteet ylittävät joissain tapauksissa jopa kaksinkertaisesti muuntajan BIL-tason. Kuvassa 60 on esitetty muuntajan navoissa vaikuttavat vaiheiden ja maan väliset jännitteet simuloinnissa 9. Kuvasta nähdään lukuisten uudelleensyttymisten aiheuttamat erittäin jyrkät transienttiylijännitteet muuntajan navoissa.



Kuva 60. Muuntajan navoista mitatut vaiheiden ja maan väliset jännitteet simuloinnissa 9. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 20 m, syöttävän verkon kaapelipituus 1200 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.

Tärkein ylijännitteiden suuruuteen vaikuttava tekijä on tässäkin kytkentätilanteessa katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus. Lyhyillä kaapeleilla uudelleensyttymisiä voi tapahtua kaikissa vaiheissa yhteensä yli 100 kpl ja ylijännitteet kasvavat erittäin suuriksi. Pidempi kaapeli katkaisijan ja muuntajan välissä rajoittaa uudelleensyttymisiä ja ylijännitteitä. Simulointien mukaan näyttää siltä, että katkaisijan ja muuntajan väliin tarvitaan kuitenkin useita satoja metrejä pitkä kaapeli, että kytkentätoimenpide olisi turvallinen.

Suuri kaapelipituus syöttävässä verkossa simulointien mukaan vaikuttaa jonkin verran ylijännitteisiin, mutta vaikutus ei ole täysin yksikäsitteinen. Simulointien mukaan suuri määrä kaapelia syöttävässä verkossa näyttäisi lisäävän uudelleensyttymisten lukumäärää, mutta laskevan ylijännitteiden huippuarvoja.

Muuntajan irtikytkentä verkosta puhtaasti induktiivisella kuormalla on simulointien mukaan erittäin vaarallinen kytkentätoimenpide. Toisaalta tämä ei lukeudu normaaleihin muuntajan kytkentätoimenpiteisiin, eikä kuormitus muuntajan toisiossa yleensä ole näin voimakkaasti induktiivista, ellei muuntajan toisiota kuormiteta esim. reaktorilla. Tällaisia erikoistilanteita olisi kuitenkin hyvä tarkastella aina tapauskohtaisesti.

7.2.4 Muuntajan nimelliskuormitusvirran ($\cos(\varphi)=0,7$) katkaisu

Simuloidaan seuraavaksi tilannetta, jossa muuntaja kytketään irti, kun toisiossa on muuntajan nimellistehoa vastaava kuorma, jonka tehokerroin on $\cos(\varphi) = 0,7_{ind}$. Syntyvien ylijännitteiden suuruutta on tutkittu muuttamalla katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituutta sekä syöttävän verkon kaapelipituutta. Kaikissa simuloinneissa katkaisijan avautumishetki on ajoitettu tapahtuvaksi 0,2 ms ennen kuormitusvirran chopping current-tasoa. Tällöin virta katkeaa ennaikaisesti lähes heti koskettimien avautumisen jälkeen,

jolloin uudelleensyttymisiä tapahtuu erittäin todennäköisesti. Simulointitilanteet ja -tulokset on koottu taulukkoon 17.

Taulukko 17. Simulointitilanteet ja -tulokset muuntajan nimelliskuormitusvirran katkaisussa, kun $\cos(\varphi)=0,7$.

Simulointi	Katkaisija-muuntaja-kaapeli-pituus (m)	Syöttävän verkon kaapeli-pituus (m)	Muuntajan nimellisteho (MVA)	Uud.-syt. lukumäärä	Suurin vaihejännite (kV)	Suurin pääjännite (kV)	YJS
1	2	20 + 0	1,25	13	45	77	-
2	10	20 + 0	1,25	7	34,1	57	-
3	20	20 + 0	1,25	7	31,1	48,8	-
4	50	20 + 0	1,25	9	27,4	39,9	-
5	100	20 + 0	1,25	1	22,5	37,33	-
6	2	20 + 2000	1,25	11	44,74	77	-
7	20	20 + 2000	1,25	6	30,7	48,87	-
8	2	1200 + 2000	1,25	4	44,8	76,95	-
9	20	1200 + 2000	1,25	2	30,88	48,8	-
10	50	1200 + 2000	1,25	0	25,8	39,78	-

Taulukossa 17 esitettyjen simulointitulosten mukaan kuormallisen muuntajan irtikytkentä, kun $\cos(\varphi)$ on lähellä yhtä, aiheuttaa selvästi vähemmän uudelleensyttymisiä ja pienempiä ylijännitteitä, kuin puhtaasti induktiivisen kuorman irtikytkentä. Tässäkin tilanteessa suurimmat ylijännitteet syntyivät, kun katkaisijan ja muuntajan välinen kaapeli oli lyhyt. Tällöin myös syntyi eniten uudelleensyttymisiä. Kuitenkin jo esimerkiksi 50 metriä pitkä kaapeli katkaisijan ja muuntajan välissä simulointien mukaan vaimentaa ylijännitteet varsin turvalliselle tasolle. Syöttävän verkon kaapelipituudella sen sijaan ei näyttäisi olevan juurikaan vaikutusta ylijännitteiden suuruuteen.

Simulointien mukaan siis lievästi induktiivisen muuntajan kuormitusvirran katkaisu ei aiheuta vaarallisen suuria ylijännitteitä missään tilanteissa. Tässä tehdyissä simuloinneissa muuntajan toisiossa olevan kuorman tehokerroin oli 0,7, mikä käytännössä olisi todella huono tehokerroin kuormalle. Mikäli kuorman tehokerroin on lähellä yhtä, ei kuormitusvirran katkaisu ole vaarallista. Tätä väitettä tukee myös alan kirjallisuus [25].

7.2.5 Vika muuntajan toisionavoissa

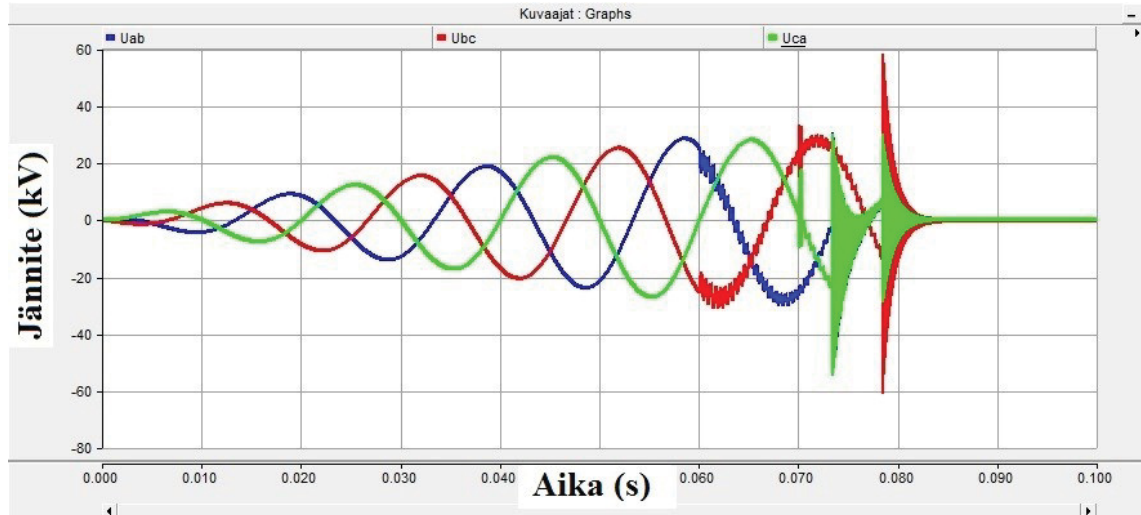
Simuloidaan seuraavaksi tilannetta, jossa muuntajan toisionavoissa on kolmivaiheinen oikosulku ja vika erotetaan laukaisemalla katkaisija keskijännitepuolelta. Syntyvien ylijännitteiden suuruutta on tutkittu muuttamalla katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin

pituuutta, syöttävän verkon kaapelipituutta ja muuntajan nimellistehoä. Lisäksi simuloinneissa 20-24 on tutkittu erilaisten ylijännitesuojauskeinojen vaikutusta. Simuloinneissa 1-21 katkaisijan avautumishetki on ajoitettu tapahtuvaksi 0,2 ms ennen kuormitusvirran chopping current-tasoa. Simuloinneissa 22-24 on käytetty valokaaren paloaikana (arcing time) on käytetty 0,1 millisekuntia. Näin on tehty sen takia, että RC-suojaa loiventaa palaavan transienttijännitteen nousuaikaa niin paljon, että 0,2 ms on liian pitkä aika uudelleensyttymisten tapahtumiselle.

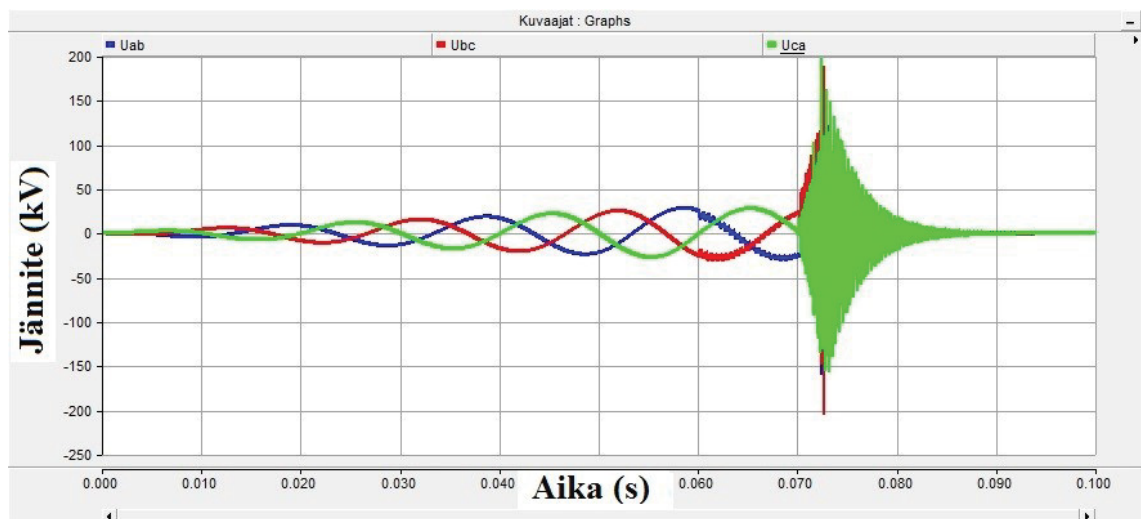
Taulukko 18. Simulointitilanteet ja –tulokset, kun muuntaja kytketään irti vian ollessa toisionavoissa.

Simulointi	Katkaisijamuuntaja kaapelipituus (m)	Syöttävän verkon kaapelipituus (m)	Muuntajan nimellisteho (MVA)	Uud-syt. lukumäärä	Suurin vaihejännite (kV)	Suurin pääjännite (kV)	YJS
1	2	20 + 0	1,25	26	-47,55	-60,7	-
2	10	20 + 0	1,25	7	-29,47	-43,3	-
3	20	20 + 0	1,25	23	-24,92	41,12	-
4	50	20 + 0	1,25	10	-27,71	46,08	-
5	100	20 + 0	1,25	20	-40,45	59,3	-
6	2	20 + 2000	1,25	26	-45,3	-60,6	-
7	20	20 + 2000	1,25	13	-26,44	44	-
8	100	20 + 2000	1,25	49	124,97	-193,5	-
9	200	20 + 2000	1,25	30	121,51	-203,1	-
10	500	20 + 2000	1,25	12	107,1	-147,7	-
11	2	1200 + 2000	1,25	10	-45,79	-60,65	-
12	50	1200 + 2000	1,25	57	73,9	74,66	-
13	100	1200 + 2000	1,25	34	84,2	81,96	-
14	200	1200 + 2000	1,25	14	56,8	58,8	-
15	20	1200 + 2000	4	7	-	-	-
16	100	1200 + 2000	4	18	27,4	37,72	-
17	200	1200 + 2000	4	29	120,5	119,7	-
18	500	1200 + 2000	4	31	104,5	-118,3	-
19	1000	1200 + 2000	4	10	-87,6	103	-
20	200	200 + 2000	1,25	8	-50,27	68,2	3 x MO v-m
21	200	200 + 2000	1,25	0	-	-	RC
22	200	200 + 2000	1,25	3	22,5	38,25	RC
23	200	200 + 2000	1,25	3	22	38,45	RC 3 x MO v-m
24	200	200 + 2000	1,25	18	-51,32	51,79	6 x MO v-v v-m

Taulukon 18 simulointituloksista nähdään, että katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelipituuden vaikutus ylijännitteisiin on nyt käänteinen kuin mitä se oli aiemmissa simuloinneissa. Pitkä kaapeli aiheuttaa nyt suuremmat ylijännitteet, kuin lyhyt kaapeli. Verrataan esimerkiksi simulointeja 6 ja 9 toisiinsa. Kuvissa 61 ja 62 on esitetty kussakin kytkentätilanteessa muuntajan navoissa vaikuttavat pääjännitteet.



Kuva 61. Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 6. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 2 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.



Kuva 62. Muuntajan navoista mitatut vaiheiden väliset jännitteet simuloinnissa 9. Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus on 200 m, syöttävän verkon kaapelipituus 20 m + 2000 m ja muuntajan nimellisteho 1,25 MVA.

Kuvaajista nähdään, että 200 metrin kaapelilla simuloinnissa 9 syntyy huomattavan suuria ylijännitteitä verrattuna 2 metrin kaapeliin simuloinnissa 6. Tämä johtuu siitä, että simuloinnissa 9 virran katkaisussa tapahtuu virtual current chopping. Simuloinnissa 6 sen sijaan virtual current choppingia ei tapahdu ja ylijännitteet jäävät huomattavasti pienimmiksi. Pitkällä kaapelilla kaapelin vaiheiden välinen kapasitiivinen kytketyminen on

voimakkaampaa kuin lyhyellä kaapelilla, jolloin ensimmäisenä katkaisevan vaiheen uudelleensyttymistransientti siirtyy helpommin kahteen muuhun vaiheeseen. Tästä syystä pitkällä kaapelilla ylijännitteet ovat simulointien mukaan suurempia.

Syöttävän verkon kaapelipituuden vaikutus ei tässäkään simulointitulanteessa ole täysin selvä. Kuitenkin jos verrataan esimerkiksi simulointeja 5 ja 8 toisiinsa, nähdään että rinnakkaisilla johtolähdöillä on vaikutusta virtual current choppingin todennäköisyyteen. Simuloinnissa 5, missä rinnakkaisia johtolähtöjä ei ole, ei tapahdu virtual current choppingia ja ylijännitteet jäävät kohtuullisiksi. Simuloinnissa 8 sen sijaan rinnakkaisten johtolähtöjen yhteispituus on 2000 metriä ja current chopping tapahtuu, mikä johtaa todella suuriin ylijännitteisiin. Rinnakkaiset johtolähdöt siis näyttäisivät lisäävän uudelleensyttymistä seuraavaa korkeataajuisia transienttivirtaa, mikä puolestaan lisää virtual current choppingin todennäköisyyttä.

Muuntajan nimellisteholla on myös vaikutusta ylijännitteisiin. Suuremmalla muuntajalla oikosulkuvirta on suurempi myös keskijännitepuolelta nähtynä. Tämä tarkoittaa sitä, että jos virtual current chopping tapahtuu, katkeaa kahden jälkimmäisenä katkaisevan vaiheen virta suuremmalla virran hetkellisarvolla kuin pienemmällä muuntajalla. Tämä puolestaan johtaa suurempiin ylijännitteisiin. Toisaalta kun virta on suuri, virtual current chopping ei tapahdu niin helposti, sillä kapasitiivisesti siirtyvän transienttivirran pitää olla riittävän suuri, että se pystyy pakottamaan nollakohtia tähän suureen verkkotaajuiseseen oikosulkuvirtaan. Simuloinneissa 15-19, joissa muuntajan nimellisteho on 4 MVA ei tapahtunut yhdessäkään virtual current choppingia, jolloin ylijännitteet jäivät pienemmiksi kuin vastaavissa simuloinneissa 1,25 MVA muuntajalla.

Simuloinneissa 20-24 on tutkittu MO-suojien ja RC-suojan vaikutusta ylijännitteisiin. Simuloinnissa käytettyjen MO-suojien suurin jatkuva käyttöjännite U_c on 22 kV. RC-suojan kapasitanssin ja resistanssin arvot puolestaan ovat 0,1 μF ja 35 Ω . Simulointituloksista nähdään, että molemmilla suojilla voidaan rajata ylijännitteet turvalliselle tasolle. Huomionarvoista simulointituloksissa on se, että MO-suojat eivät suoranaisesti vaikuta uudelleensyttymisten lukumäärään, vaan ne rajoittavat puhtaasti jännitettä kytkentäpisteessään. Toisaalta ylijännitesuojat rajoittavat myös katkaisijan avausvälissä vaikuttavaa palaavaa transienttijännitettä, jolloin uudelleensyttymisiä ei tapahdu yhtä pitkään kuin ilman MO-suojia tapahtuisi. RC-suojat puolestaan loiventavat palaavan transienttijännitteen nousuaikaa, jolloin uudelleensyttymiset saadaan rajattua lähes kokonaan pois. Siten ne samalla vaikuttavat myös ylijännitteen suuruuteen muuntajan navoissa.

Muuntajan irtikytkentä keskijännitepuolen tyhjiökatkaisijalla, jos toisionavoissa on oikosulku, on simulointien mukaan erittäin vaarallinen kytkentätoimenpide. Mielenkiintoinen huomio simuloinneista on se, että pitkä kaapeli katkaisijan ja muuntajan välissä ei tässä tapauksessa suojaa ylijänniteiltä samoin kuin aiemmissa kytkentätapauksissa. Ylijännitesuojilla ja RC-suojilla voidaan kuitenkin rajoittaa ylijännitteet turvalliselle tasolle.

7.3 Mallin rajoitteet ja pohdintaa sen toimivuudesta

Simulointimallissa päästiin kohtuulliseen tarkkuuteen ja mielekkäisiin tuloksiin. Tämän todistavat luvuissa 7.1.1 ja 7.1.2 tehdyt verifiointisimuloinnit. Simulointimalli ei kuitenkaan ole täydellinen. Tämä johtuu mallissa olevista yksinkertaistuksista sekä joistain vain karkeaan arvioon perustuvista parametreista. Esimerkiksi katkaisijakohtaisten arvojen, kuten chopping current-tason, avausvälin jännitelujuuden kasvunopeuden ja korkeataajuisten virran katkaisukyvyyn määrittäminen on vaikeaa, sillä nämä ovat jossain määrin tilastollisia suureita, joihin vaikuttavia muuttujia on paljon. Toisaalta myös tyhjiökatkaisijan mallinnuksessa on tehty yksinkertaistuksia. Yksi näistä on se, että katkaisijan avausvälin jännitelujuuden on oletettu kasvavan lineaarisesti, mikä ei todellisuudessa pidä täysin paikkaansa [18].

Myös PSCAD-ohjelmiston valmiit verkkokomponenttien mallit ovat pohjimmiltaan matemaattisia malleja ja siten vain yksinkertaistuksia todellisista sähköverkon laitteista. Ehkä suurin puute mallissa on korkeataajuisten kytkentätransienttien simulointiin soveltuvan muuntajan suurtaajuusmallin puuttuminen. Kuten luvussa 6.3 aiemmin käsiteltiin, muuntajan toimintaperiaate hyvin korkeilla taajuuksilla on täysin erilainen mitä se on jatkuvassa tilassa normaalilla verkkotaajuudella. Tässä työssä tehdyissä simuloinneissa on PSCAD-ohjelmiston valmiiseen umec-muuntajamalliin lisätty vain hajakapasitanssit. Tämä ei kuitenkaan vielä ole täydellinen esitys muuntajasta. Tästä syystä erityisesti simuloinnit, joissa syöttävän verkon kaapelipituus on 20 m + 0 m voivat olla epäluotettavia. Tämä johtuu siitä, että katkaisijan uudelleensyttymisen yhteydessä tapahtuvat korkeataajuiset transientti-ilmiöt ovat sähköisesti erittäin lähellä verkkoa syöttävää päämuuntajaa, jonka malli puolestaan ei toimi täysin oikein näin korkeilla taajuuksilla.

Simulointimallissa kaapelit on mallinnettu PSCAD-ohjelmiston taajuusriippuvalla frequency dependent (phase)-mallilla. Vain kaikkein lyhimät 2 metriä pitkät kaapelit on mallinnettu π -sijaiskytkennällä. Kulkuaaltoilmiön huomioiminen transienttisimuloinneissa on tärkeää, sillä korkeataajuisten ilmiöiden kulkuaaltoluonne vaikuttaa laskentatuloksiin jo lyhyillä kaapeleilla. Taajuusriippuvan mallin vaikutus ylijännitteiden suuruuteen on kaksijakoinen. Toisaalta taajuusriippuva malli antaa keskitettyjä malleja suurempia ylijännitteitä, sillä se huomioi kulkuaaltojen heijastumiset aaltoimpedanssin muutoskohdissa. Esimerkiksi muuntajan energisoinnissa jänniteaallon heijastuminen muuntajan navoissa aiheuttaa ylijännitteitä. Toisaalta erityisesti pitkillä kaapeleilla taajuusriippuva malli voi vaimentaa ylijännitteitä, sillä se huomioi esimerkiksi virranahdon. Tällöin kaikkein suuritaajuisimmat jännite- ja virtakomponentit vaimenevat. Taajuusriippuvaa mallia ei voi simulointimallissa kuitenkaan käyttää todella lyhyiden kaapeleiden mallinnuksessa. Tämä johtuu siitä, että simulointiaskeleen tulee olla alle kulkuaallon matka-ajan kaapelin päästä päähän. Erittäin lyhyillä kaapeleilla simulointiaskel pitäisi siis olla luokkaa 0,02 μ s tai alle, jolloin simulointiaika kasvaa suhteettoman pitkäksi. Toisaalta erittäin lyhyt simulointiaskel tuo ongelmia, jos samassa simulointimallissa on pitkiä kaapeleita. Pitkän taajuusriippuvan kaapelimallin simulointi erittäin lyhyellä simulointiaskeleella

johtaa PSCAD:n ”kulkuaaltopuskurin” (englanniksi traveling wave buffer) loppumiseen. Tällöin PSCAD antaa virheilmoituksen, että simulointia ei voida jatkaa. Lyhyet kaapelit on siis pakko mallintaa π -sijaiskytkennällä, mikäli samassa simulointimallissa on pitkiä kaapeleita. Erittäin lyhyillä kaapeleilla kulkuaaltoilmiön vaikutus on kuitenkin varsin pieni, joten π -sijaiskytkennän käyttämisestä aiheutuva kokonaisvirhe simulointituloksissa lienee myös pieni.

Luvussa 7.2.5 simuloitiin muuntajan irti kytkemistä, kun muuntajan toisionavoissa on kolmivaiheinen oikosulku. Tällöin suuri vaikutus ylijännitteiden suuruuteen oli sillä, tapahtuiko katkaisun yhteydessä virtual current chopping vai ei. Virtual current chopping tapahtuu, kun ensimmäisenä katkaisevan vaiheen uudelleensyttymistransientti siirtyy kapasitiivisesti muihin vaiheisiin. Tällöin simuloinneissa on tärkeää, että kaapelin mallissa vaiheiden välinen kapasitiivinen kytkeytyminen vastaa todellisuutta. Tästä syystä näiden simulointien perusteella on vaarallista lähteä tekemään liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä siitä, että lyhyillä kaapeleilla virtual current choppingia ei tapahtuisi, vaikkakin PSCAD-manuaalin mukaan frequency dependent (phase)-malli on tarkin simulointiohjelmistoissa saatavilla oleva kaapelin malli [45].

Simulointimallin verifiointissa merkittävin puute oli saatavilla olevan mittausdatan vähyys. Tästä syystä mallin kunnollinen verifiointi oli hankalaa, eikä täyttä varmuutta mallin tarkkuudesta saatu. Yleisesti malli näyttäisi antavan hieman todellista korkeampia ylijännitteitä. Tämä voi johtua siitä, että simuloinneissa käytetty taajuusriippuva kaapelin malli ei huomioi kaapelin puolijohtavissa kerroksissa tapahtuvaa kulkuaallon vaimenemista. Puolijohtavissa kerroksissa tapahtuvat dielektriset häviöt ovat merkittäviä ja siten todellisuudessa vaimentavat kulkuaaltoa. Tässä vaiheessa voidaan sanoa, että malli näyttäisi toimivan oikein, sekä antavan mielekkäitä ja oikean suuntaisia tuloksia.

8. YHTEENVETO

Muuntajan irtikytkentä ja energisointi tyhjiökatkaisijalla aiheuttavat kytkentäylijännitteitä. Nämä kytkentätoimenpiteiden seurauksena syntyvät ylijännitteet ovat luonteeltaan erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä ja johtuvat pitkälti uudelleensyttymisistä ja esisyttymisistä tyhjiökatkaisijan avausvälissä katkaisijan avautumisen ja sulkeutumisen aikana. Tyhjiökatkaisijan kytkentätoimenpiteen yhteydessä voi tilanteesta riippuen syntyä ylijännitteitä, joiden suuruus ylittää muuntajan eristysrakenteen jännitelujuuden. Erityisesti kuivamuuntajien on todettu vaurioituneen tyhjiökatkaisijan kytkentätoimenpiteen yhteydessä syntyvistä ylijännitteistä.

Kytkenän yhteydessä syntyvien ylijännitteiden suuruuteen ja todennäköisyyteen vaikuttavat suuresti tyhjiökatkaisijan ominaisuuksien lisäksi kytkentätilanne ja ympäröivän verkon ominaisuudet. Syy miksi juuri tyhjiökatkaisija aiheuttaa erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä johtuu tyhjiökatkaisijan kyvystä katkaista hyvin korkeataajuisia virtoja. Katkaisijoiden tärkein tehtävä sähköverkoissa on katkaista oikosulkuvirtoja. Tästä syystä niiden katkaisukyky on mitoitettu niin, että esimerkiksi keskijännitealueella katkaisija pysyy katkaisemaan useiden kymmenien kiloampeerien oikosulkuvirtoja. Suuri katkaisukyky johtaa siihen, että pienempiä kuormitus- ja tyhjäkäyntivirtoja katkaistaessa katkaisijan koskettimien välillä palava valokaari sammuu jo ennen virran luonnollista nollakohdasta. Virran ennenaikaisen katkeamisen takia katkaisijan perässä olevan muuntajan induktanssiin jää varastoituneeksi magneettista energiaa, joka alkaa värähdellä tyhjiökatkaisijan ja muuntajan välissä olevan kapasitanssin eli käytännössä kaapelin kapasitanssin kanssa. Tämä LC-piirin värähtely nostaa jännitettä muuntajan navoissa virran katkeamisen jälkeen, mutta se rasittaa myös juuri aukeavaa tyhjiökatkaisijan avausväliä palaavana transienttijännitteenä. Mikäli tyhjiökatkaisijan avausvälin jännitelujuus ei ole vielä ehtinyt kasvaa riittävän suureksi, on mahdollista, että palaava transienttijännite sytyttää valokaaren uudestaan katkaisijan avausväliin. Uudelleensyntyminen katkaisijan avausvälissä saa aikaan korkeataajuisen transienttiovirran, jonka suuruuden ja taajuuden määräävät katkaisijan molemmiin puoliin verkossa olevat induktanssit ja kapasitanssit. Lisäksi uudelleensyntymistransientti etenee jyrkkänä transienttiaaltona kaapelia pitkin muuntajan napoihin. Tyhjiökatkaisijan kyky katkaista korkeataajuisia virtoja johtaa siihen, että tämä uudelleensyntymistä seuraava korkeataajuinen transienttiovirta voi katketa nollakohdassaan. Korkeataajuisen virran katkeaminen johtaa uuteen palaavaan transienttijännitteeseen katkaisijan avausvälissä, joka voi aikaansaada uuden uudelleensyntymisen. Tyhjiökatkaisijoilla uudelleensyntymisiä voi verkosta ja kytkentätilanteesta riippuen tapahtua suurikin määrä ennen virran lopullista katkeamista.

Uudelleensyntymiset ovat siksi erityisen vaarallisia, että ne aiheuttavat erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä, jotka puolestaan ovat vaarallisia muuntajan käämityksille. Tämä

johtuu siitä, että hyvin korkeilla taajuuksilla jännitteenjakaantuminen muuntajan käämille ei ole lineaarista. Jyrkän jännitepulssin kohdatessa muuntajakäämin, kohdistuu suurin jänniterasitus ensimmäisille käämikierroksille, jolloin käämikierrosten välisen eristysrakenteen jännitelujuus voi ylittyä. Jännitteen epälineaarinen jakautuminen käämille voi tarkoittaa myös sitä, että muuntajan eristysrakente ei välttämättä kestä edes BIL-tason suuruisia jänniterasituksia. Uudelleensyttymiset ovat vaarallisia myös siksi, että hyvin korkeataajuinen uudelleensyttymistransientti voi siirtyä kapasitiivisesti muihin vaiheisiin. Korkeataajuisten kapasitiivisesti muihin vaiheisiin siirtyneen transienttivirran superponoituminen verkkotaajuiseen virtaan voi aiheuttaa ennenaikaisia nollakohtia myös muissa vaiheissa. Tyhjiökatkaisijalla tämä tarkoittaa sitä, että virta voi ensimmäisenä katkaisevan vaiheen uudelleensyttymistransientin takia katketa ennenaikaisesti myös muissa vaiheissa. Erityisen vaarallista tämä on siksi, että nyt virta katkeaa huomattavasti suuremmalla virran hetkellisarvolla, jolloin induktanssiin jäänyt magneettinen energia on huomattavasti suurempi, joka johtaa vielä suurempiin ylijännitteisiin. Tätä ilmiötä kutsutaan englannin kielisessä kirjallisuudessa nimellä virtual current chopping.

Verkon ominaisuuksilla on vaikutusta syntyvien ylijännitteiden suuruuteen. Tärkein ylijännitteiden suuruuteen vaikuttava tekijä verkossa on tyhjiökatkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus. Lyhyellä kaapelilla kaapelin kapasitanssi on pieni, jolloin virran katkeamista seuraavan LC-piirin värähtely aiheuttaa korkeita jännitteitä, jotka lisäävät uudelleensyttymisten todennäköisyyttä. Pidemmällä kaapelilla suuri kapasitanssi loiventaa tyhjiökatkaisijan avausvälissä vaikuttavaa palaavaa transienttijännittä ja laskee sen huippuarvoa, jolloin uudelleensyttymiset ovat epätodennäköisempiä. Kuitenkaan pitkään kaapeli ei täysin poista suurien ylijännitteiden riskiä. Tämä huomataan esimerkiksi luvussa 7.2.5 tehdyistä simuloinneista. Pitkällä kaapelilla vaiheiden välinen kapasitiivinen kytketyminen on voimakkaampaa, jolloin virtual current choppingin tapahtuminen on todennäköisempää kuin lyhyellä kaapelilla. Alan tutkimusartikkeleista löytyy myös tukea väitteelle, että pitkä kaapeli ei yksin estä ylijännitteiden syntyä [57].

Katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin lisäksi myös muilla verkon ominaisuuksilla on vaikutusta. Tärkeimmät muut tekijät ovat syöttävän verkon kaapelipituus ja tutkittavan muuntajan nimellisteho. Syöttävä verkko vaikuttaa lähinnä uudelleensyttymistä seuraavan korkeataajuisten transienttivirran suuruuteen ja taajuuteen. Tässä työssä tehtyjen simulointien mukaan syöttävän verkon vaikutus ei ole kuitenkaan yhtä suuri kuin katkaisijan ja muuntajan välisen kaapelin pituus. Muuntajan nimellisteho vaikuttaa lähinnä kun kyseessä on tyhjäkäyvän muuntajan irtikytkentä tai muuntajan irti kytkeminen, kun muuntajan toisiopuolen navoissa on oikosulkuvika. Nimellisteholtaan suuremman muuntajan tyhjäkäynti- ja oikosulkuvirrat ovat suurempia, joka johtaa suurempiin ylijännitteisiin.

Yleensä normaaleita muuntajan kytkentätoimenpiteitä ovat muuntajan energisointi ja irti kytkeminen tyhjäkäyvänä. Näissä kytkennöissä syntyvät ylijännitteet pysyvät tässä työssä tehtyjen simulointien mukaan pieninä ja uudelleensyttymiset vähäisinä. Tyhjäkäyvän

muuntajan energisointi ja irtikytkentä eivät siis ole vaarallisia ylijännitteitä aiheuttavia kytkentätoimenpiteitä. Myös tämän väitteen tueksi löytyy tutkimusaineistoa [8].

Tilanne kuitenkin muuttuu, kun otetaan tarkasteluun mukaan myös harvinaisemmat ja epätodennäköisemmät kytkentätilanteet. Ylijännitteiden kannalta vaarallisimpana kytkentätoimenpiteenä voidaan pitää induktiivisesti kuormitetun muuntajan irtikytkentää. Tällöin vaarallisen suuria ylijännitteitä näyttäisi simulointien mukaan syntyvän lähes aina. Normaalia teollisuuden jakelumuuntajaa ei kuitenkaan yleensä kuormiteta täysin induktiivisella kuormalla, vaan kuorman tehokerroin on lähempänä yhtä. Mikä kuormalisena irti kytkettävän muuntajan kuormitusvirran tehokerroin on lähellä yhtä, vaarallisen suuria ylijännitteitä ei simulointien mukaan synny.

Vaarallisen suuria ylijännitteitä synnyttävä kytkentätilanne on muuntajan irtikytkentä verkosta keskijännitepuolen katkaisijan suojauslaukaisulla, kun muuntajan toisiossa on oikosulkuvika. Tällöin oikosulkuvirran suuruuden määrää muuntajan oikosulkuimpedanssi, joka on käytännössä lähes puhdasta induktiivista reaktanssia. Keskijännitepuolelta tarkasteluna oikosulkuvirta on siis lähes täysin induktiivista virtaa. Simulointien mukaan vian ollessa toisiossa vaarallisen suuria ylijännitteitä ei synny, jos virtual current choppingia ei tapahdu. Mikäli virtual current chopping tapahtuu, syntyvät ylijännitteet ylittävät reilusti muuntajan salamasyöksyjännitelujuuden. Virtual current choppingin todennäköisyyttä kuitenkin näyttäisi laskevan se, että sillä ajanhetkellä jolloin ensimmäisenä katkaisevassa vaiheessa tapahtuu uudelleensyntyminen, ovat kahden muun vaiheen vaihevirratt niin suuria, että korkeataajuinen virta ei pysty pakottamaan niihin ennenaikaisia nollakohtia. Kuitenkin jos tyhjiökatkaisijan ja muuntajan välissä oleva kaapeli on pitkä, on kaapelin vaiheiden välinen kapasitiivinen kytketyminen voimakkaampaa, jolloin virtual current chopping tapahtuu. Pelkästään näiden simulointitulosten valossa on kuitenkin vaarallista tehdä niin pitkälle meneviä johtopäätöksiä, että virtual current chopping ei olisi mahdollinen myös lyhyillä kaapeleilla.

Syntyvien ylijännitteiden suuruus on kuitenkin käytännössä tilastollinen ilmiö. Tämä johtuu siitä, että ylijännitteen suuruuteen ja uudelleensyntymisten määrään vaikuttavat suuresti virran ja jännitteen hetkellisarvot katkaisijan avautumis- tai sulkeutumishetkillä. Jos katkaisijan avautuminen tapahtuu virran amplitudissa, palaa koskettimien välillä valo-kaari, kunnes virta katkeaa vasta hieman ennen nollakohtaansa. Tällöin katkaisijan avausvälin jännitelujuus on ehtinyt kasvaa niin suureksi, että uudelleensyntymisiä ei välttämättä enää tapahdu ja ylijännitteet pysyvät maltillisina. Pahin kytkentähetki onkin juuri hieman ennen virran current chopping-tasoa, jolloin virta katkeaa lähes heti koskettimien avauduttua ja uudelleensyntymisiä tapahtuu lähes varmasti. Muuntajan tyhjäkäyntivirta puolestaan on alle katkaisijan current chopping-tason, jolloin suurimmat ylijännitteet syntyvät, kun katkaisija avautuu tyhjäkäyntivirran amplitudissa. Energisoinnissa pahin tilanne puolestaan esiintyy, kun ensimmäinen esisyntyminen tapahtuu syöttävän verkon vaihejännitteen huippuarvossa.

Eräs asia, joka nousee esille aihepiiriin liittyvissä tutkimusartikkeleissa, on muuntajan sisäisten resonanssien aiheuttama jännitteenousu. Kun ylijännitetransientin luonnollinen taajuus osuu lähelle muuntaja-kaapeli-järjestelmän luonnollista värähtelytaajuutta, on muuntajan ulkoisesta resonanssi-ilmioistä aiheutuva jännitteenousu mahdollinen. Ongelma on suurimmillaan silloin, kun saapuva jännitetransientti saa aikaan muuntajan sisäisen resonanssi-ilmion. Muuntajan sisäisiä resonansseja ei tässä diplomityössä tutkittu, sillä se olisi vaatinut hyvin tarkan ja yksityiskohtaisen muuntajan mallin. [57]

Ylijännitteitä vastaan voi suojautua esimerkiksi metallioksidilylijännitesuojilla tai RC-suojilla. MO-suojat rajoittavat ylijännitteiden suuruuden suojalle ominaisen jäännösjännitteen tasolle, mutta eivät poista uudelleensyttymisiä. RC-suojat puolestaan loiventavat palaavaa transienttijännitettä, jolloin uudelleensyttymiset saadaan käytännössä lähes täysin rajattua pois, jolloin myös ylijännitteet jäävät pieniksi. Ylijännitesuojat tulisi kuitenkin aina sijoittaa niin lähelle suojattavaa kohdetta kuin mahdollista.

Kysymys siitä, että missä tilanteissa muuntaja tulisi varustaa ylijännitesuojilla ja missä tilanteissa ne voi jättää pois, näyttäisi olevan teknis-taloudellinen. Puhtaasti teknisessä mielessä ylijännitesuojia olisi perusteltua käyttää aina. Teoriassa vaarallisen suurien ylijännitteitä voi tyhjiökatkaisijan kytkennästä aiheutua kaikissa verkoissa. Kuitenkin taloudellisessa mielessä pitäisi pohtia erikseen esimerkiksi oikosulkuvian todennäköisyyttä muuntajan toisiossa ja sen poiskytkennästä aiheutuvan transienttiylijännitteen aiheuttaman muuntajavaurion taloudellisen haitan suuruutta.

LÄHTEET

- [1] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjänniteteekniikka, 3rd ed. Otatieto, Helsinki, 2003, 520 p.
- [2] P. Picot, Vacuum Switching, Cahier Technique, No. 198, 2000.
- [3] J. Helmer, M. Lindmayer, Mathematical modeling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems, Proceedings of 17th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp. 323-331 vol.1.
- [4] A. Greenwood, M. Glinkowski, Voltage escalation in vacuum switching operations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 1698-1706.
- [5] B. Kondala Rao, Gopal Gajjar, Development and application of vacuum circuit breaker model in electromagnetic transient simulation, 2006 IEEE Power India Conference, pp. 7 pp.
- [6] E. Lindell, L. Liljestrand, Effect of Different Types of Overvoltage Protective Devices Against Vacuum Circuit-Breaker-Induced Transients in Cable Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 4, 2016, pp. 1571-1579.
- [7] L. Liljestrand, E. Lindell, Efficiency of Surge Arresters as Protective Devices Against Circuit-Breaker-Induced Overvoltages, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 4, 2016, pp. 1562-1570.
- [8] L. Liljestrand, C. Roy, E. Lindell, E. Dullni, D. Bormann, Vacuum circuit breaker and transformer interaction in a cable system, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), pp. 1-4.
- [9] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II, 2nd ed. Otatieto, Helsinki, 2011, 551 p.
- [10] Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, 60071-1, 2006.
- [11] Y. Bo, M. Li, B. Bai, G. Qiu, Study on Very Fast Transient Overvoltage of closing No-Load China UHV Transmission Demonstration Project Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV Transmission Lines, International Journal of Grid Distribution Computing, Vol. 7, No. 3, 2014, pp. 273-286.
- [12] P. Valsalal, S. Usa, K. Udayakumar, Modelling of metal oxide arrester for very fast transients, IET Science, Measurement & Technology, Vol. 5, No. 4, 2011, pp. 140-146.

- [13] Ylijännite- ja häiriösuojaus, in: ABB: TTT-käsikirja 2000-07, 2007, pp. 1-9.
- [14] Sähkömarkkinalaki, 588, L 9.8.2013. Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#a588-2013>.
- [15] VD4 Medium voltage vacuum circuit breakers 12...36 kV-630...4000 A - 16-50 kA, in: Technical catalogue, ABB Medium voltage products, 2016, .
- [16] H. Fink, M. Heimbach, W. Shang, Vacuum interrupters with axial magnetic field contacts, ABB review, No. 1, 2000, pp. 59-64.
- [17] S. Theoleyre, MV breaking techniques, Cahier Technique, No. 193, 1999.
- [18] T. Wenzel, T. Leibfried, D. Retzmann, Dynamical simulation of a Vacuum Switch with PSCAD, 16th Power Systems Computation Conference, 14-18.7.2008.
- [19] S. M. Wong, L. A. Snider, E. W. C. Lo, Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker, Advances in Power System Control, Operation and Management, 2003. ASDCOM 2003. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 497), pp. 653-658.
- [20] Liljestrand, Lars; Lindell, Elisabeth; Backman, Marcus, puhelinkeskustelu ja sähköpostiviestit, haastattelu 18.11.2016.
- [21] L. Liljestrand, Phenomenon related to vacuum circuit breaker operations, ABB AB Corporate research, 2014.
- [22] M. Popov, R. P. P. Smeets, L. van der Sluis, H. de Herdt, J. Declercq, Experimental and Theoretical Analysis of Vacuum Circuit Breaker Prestrike Effect on a Transformer, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1266-1274.
- [23] HD4 Gas insulated MV circuit breakers, in: Technical catalogue, ABB Medium Voltage Products, 2016.
- [24] R. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanović, D.F. Peelo, A. Janssen, 6. Current Interruption in Gaseous Media, in: Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, Somerset, 2014, pp. 164-222.
- [25] R. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanović, D.F. Peelo, A. Janssen, 4. Load Switching, in: Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, Somerset, 2014, pp. 96-138.

- [26] Keskijännitekaapeli AHXCMK-WTC 10 kV 3-johdin, REKA kaapeli, web page. Saatavissa (viitattu 4.1.2017): <http://www.reka.fi/keskijannitekaapeli-ahxcmk-wtc-10-kv-3-johdin>.
- [27] S. V-M, Keskijännitekaapeleiden terminen kuormitettavuus, Diplomityö, 2009, Saatavissa: https://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Simonen_Vesa_Matti_julk.pdf.
- [28] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I, 2nd ed. Otatieto, Helsinki, 2011, 520 p.
- [29] J. Bastman, Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi, Opetusmoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2016, 189 p.
- [30] J. Grainger J., Stevenson, William, D., Jr., Series Impedance of Transmission Lines, in: Power System Analysis, Mcraw-Hill, New York, 1994, pp. 141-167.
- [31] J. Grainger J., Stevenson, William, D., Jr., Capacitance of Transmission Lines, in: Power system analysis, McGraw-Hill, New York, 1994, pp. 170-191.
- [32] J. Grainger J., Stevenson, William, D., Jr., Current and Voltage Relations on a Transmission Line, in: Power System Analysis, McGraw-Hill, New York, 1994, pp. 193-237.
- [33] Ylijännitteet, Satakunnan ammattikorkeakoulu, Luentomoniste, 2001.
- [34] A.A. Pyone, T.M. Tun, Design of Cast Resin Dry Type Transformer, International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, Vol. 03, No. 17, 2014, pp. 3500-3504.
- [35] F. de Leon, P. Gomez, J.A. Martinez-Velasco, M. Rioual, Transformers, in: Power System Transients: Parameter Determination, CRC Press, 2010, pp. 177-250.
- [36] M. Popov, L. van der Sluis, R. P. P. Smeets, J. Lopez Roldan, Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 238-247.
- [37] Application guidelines Overvoltage protection Metal oxide surge arresters in medium voltage systems, 5th ed., ABB Switzerland Ltd., 2011, .
- [38] Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, IEC 60099-4:2014, 2014.
- [39] V. Hinrichsen, Metal-Oxide Surge Ar-resters Part 1: Fundamentals, Siemens AG, Berlin, 2001.

- [40] I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, M. Kobayashi, Study of ZnO arrester model for steep front wave, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1996, pp. 834-841.
- [41] P. E. Sutherland, M. E. Valdes, Snubber design for transformer protection, 2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), pp. 343-351.
- [42] C. S. Mardegan, D. D. Shipp, L. A. R. Melo, M. R. Santana, The experience acquired sizing snubbers to mitigate switching transients in industrial power systems, 2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), pp. 1-10.
- [43] Transformer Surge Protection - RC Snubbers, NEPSI North East Power Systems, Inc, verkkosivu. Saatavissa: <https://nepsi.com/resource/820-00%20RC%20Snubber.pdf>.
- [44] Xin, Y., Liu, B., Tang, W., & Wu, Q. (2016). Modeling and mitigation for high frequency switching transients due to energization in offshore wind farms. *Energies*, 9(12), 1044. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/en9121044> .
- [45] PSCAD Manuaali, Manitoba HVDC Research Centre Inc, 2006.
- [46] Keski-jännitekaapeli AHXCMK-WTC 20 kV 1-johdin, Reka kaapeli, <http://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keski-jannitekaapeli/keski-jannitekaapeli-ahxcmk-wtc-20-kv-1-johdin>.
- [47] B. Gustavsen, Panel session on data for modeling system transients insulated cables, 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), pp. 718-723 vol.2.
- [48] B. Gustavsen, J. A. Martinez, D. Durbak, Parameter determination for modeling system transients-Part II: Insulated cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005, pp. 2045-2050.
- [49] D. Mireanu, Transient Overvoltages in Cable Systems, M.Sc thesis, 2007, Available: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/MireanuDanMSc.pdf>.
- [50] A. Daniel, S. Gebre, Analysis of Transients in Wind Parks: Modeling of System Components and Experimental Verification, Master of Science Thesis, 2008.
- [51] AHXAMK-W 3-johtiminen, Prysmian Group, Tuote-esite.
- [52] T. Abdulahovic, Analysis of High-Frequency Electrical Transients in Offshore Wind Parks, 2011.

- [53] J. C. Das, Surges transferred through transformers, Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.02CH37352), pp. 139-147.
- [54] L. Liljestrand, A. Sannino, H. Breder, S. Thorburn, Transients in collection grids of large offshore wind parks, *Wind Energy*, Vol. 11, No. 1, 2008, pp. 45-61.
- [55] R.B. Lastra, M. Barbieri, Fast Transients in the Operation of an Induction Motor with Vacuum Switches, *Int. Conf. on Power Systems Transients IPST*, 2001, pp. 24-28.
- [56] T. Abdulahovic, T. Thiringer, Comparison of switching surges and basic lightning impulse surges at transformer in MV cable grids, *Nordic Wind Power Conference*, Bornholm, Danmark.
- [57] A. Theocharis, M. Popov, R. Seibold, S. Voss, M. Eiselt, Analysis of Switching Effects of Vacuum Circuit Breaker on Dry-Type Foil-Winding Transformers Validated by Experiments, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 1, 2015, pp. 351-359.

LIITE A: SIMULOINTIMALLI

