LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

DIPLOMITYÖ

Jussi-Mikko Paju

TEOLLISUUDEN SÄHKÖNJAKELUVERKKOJEN YLIJÄNNITESUOJAUS

Työn tarkastajat Professori Jarmo Partanen
Tutkijaopettaja Jukka Lassila
Työn ohjaaja: Power Distribution Specialist, Sami Tuomela

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jussi-Mikko Paju

Teollisuuden sähkönjakeluverkkojen ylijännitesuojaus

Diplomityö
2017
90 sivua, 39 kuvaa, 4 taulukkoa, 8 liitettä

Työn tarkastajat	Professori Jarmo Partanen
	Tutkijaopettaja Jukka Lassila
Työn ohjaaja:	Power Distribution Specialist, Sami Tuomela

Hakusanat: ylijännite, ylijännitesuojaus, metallioksidisuojat, kipinävälit, eristyskoordinaatio

Sähköverkkojen ylijännitteet aiheuttavat laitevahinkoja ja keskeytyskustannuksia. Kustannuksien vähentämiseksi sähköverkon osia suojataan ylijännitesuojilla, joilla pyritään minimoimaan verkon komponentteihin kohdistuvat vahingot. Kyseisen tutkimuksen tarkoituksena on toimia ohjeena ylijännitesuojauksen toteuttamisen tukena.

Tutkimuksessa perehdytään ylijännitteisiin, niiden suojaukseen ja ylijännitesuojien valintaan. Tutkimuksessa käsitellään teollisuuden sähkönjakeluverkon rakennetta ja siinä ilmeneviä ylijännitteitä. Kyseiset ylijännitteet ovat jaettavissa pientaajuisiin, loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin ylijännitteisiin. Ylijännitteet luokitellaan niiden ominaispiirteiden mukaan. Ylijännitesuojaus toteutetaan erityskoordinaation lainalaisuuksia noudattaen. Eristyskoordinaatiossa määritetään ylijännitesuojalle tasot, joiden perusteella valitaan olosuhteisiin sopiva suoja. Ylijännitesuojat mitoitetaan kestämään ylijännitteistä aiheutuvat kuormat ja samalla niiden tulee suojata verkon komponentteja halutuissa tilanteissa.

Työssä on käsitelty ylijännitesuojauksen toteuttamista eri komponenteilla useissa toisistaan poikkeavista tilanteista. Ylijännitesuojien valintaa ja niiden sijoittamista on käsitelty käytännön esimerkkien kautta. Lisäksi tutkielmassa perehdytään, missä laajuudessa suojaus on perusteltua toteuttaa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Electrical Engineering

Jussi-Mikko Paju

Overvoltage protection in industrial power distribution

Master's Thesis
2017
90 pages, 39 figures, 4 tables, 8 appendices

Examiners:	Professor Jarmo Partanen
	Associate Professor Jukka Lassila
Supervisor:	Power Distribution Specialist, Sami Tuomela

Keywords: overvoltage, overvoltage protection, metal-oxide surge arresters, spark gap, insulation co-ordination

Overvoltage cause's malfunctions in power distribution networks. To be exact overvoltage causes power distribution's equipment malfunctions. Overvoltage protection's purpose is to prevent these malfunctions and costs. Overvoltage protection is a crucial part in a functional power distribution. This thesis is a guide for designing overvoltage protection. Thesis includes overvoltage arrester's insulation co-ordination where surge arrester's system and parameters are defined. Surge arresters are defined according to these parameters.

Thesis presents overvoltage protection examples for aerial lines, motors, generators, distribution transformers and gas-insulated substations. Main purpose of this thesis is to give broad aspect in overvoltage protection and surge arresters. Thesis presents aspects of how overvoltage protection should be made and how to make productive solutions on overvoltage protection.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto 10

1.1 Työn tavoitteet 10

1.2 Työn rakenne 10

2 Teollisuuden sähkönjakelu ja laitteet 12

2.1 Teollisuusverkon sähkönjakelu 12

2.2 Pienjänniteverkko 13

2.2.1 TN-C-järjestelmä 13

2.2.2 TN-S-järjestelmä 14

2.2.3 TN-C-S-järjestelmä 14

2.2.4 TT-järjestelmä 15

2.2.5 IT-järjestelmä 16

3 Ylijännitteet 18

3.1 Ylijännitteiden luokittelu 18

3.2 Pientaajuiset ylijännitteet 20

3.2.1 Maasulkuylijännitteet 21

3.2.2 Muut aiheuttajat 21

3.3 Loivat transienttiylijännitteet 23

3.4 Jyrkät transienttiylijännitteet 24

3.5 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet 26

4 Eristyskoordinaatio 27

4.1 Ylijännitesuojaus teollisuuden toimistotilojen pienjänniteverkossa 28

4.2 Pienjännite-eristyskoordinaatio 29

4.3 Suur- ja keskijänniteverkon eristyskoordinaatio 31

4.3.1 Konventionaalinen menetelmä 37

4.3.2 Tilastollinen menetelmä 38

4.3.3 Standardoidut koejännitteet 39

4.3.4 Eristyskoordinaation toteuttaminen käytännössä 42

5 Ylijännitesuojat 43

5.1 Ukkosjohtimet ja pylväsmaadoitukset 44

5.2 Kipinävälit 44
5.3 Venttiilisuojat 46
5.4 Ylijännitesuojien asennus 49
5.5 Ylijännitesuojien ominaissuureet 49
5.5.1 Metallioksidisuojan ominaissuureet 49
5.5.2 Kipinäväliventtiilisuojan ominaissuureet 50
5.6 Transienttien rajoittaminen 51
6 Ylijännitesuojauksen toteuttaminen 52
6.1 Valintaohjeet 53
6.1.1 Jatkuvan käyttöjännitteen määrittäminen 54
6.1.2 Mitoitusjännite ja käyttötaajuisen ylijännitteen sieto 56
6.1.3 Nimellispurkausvirta 59
6.1.4 Energian purkauskykyluokka 60
6.1.5 Suojaustaso 61
6.1.6 Maadoitustavan vaikutus maasulkukertoimeen 63
6.2 Ylijännitesuojan sijoittaminen 64
6.2.1 Muuntajan suojaus 65
6.2.2 Kaasueristettyjen kytkinlaitosten suojaus 68
6.2.3 Kaapelien suojaus 69
6.2.4 Ilmaeristeiset kytkinlaitokset 72
6.2.5 Generaattoreiden ja suurjännitemoottoreiden suojaus 73
6.3 Ylijännitesuojien maadoitus 77
6.4 Taloudellinen ylijännitesuojaus 79
6.4.1 Kustannusanalyysi 79
6.5 Laskentaesimerkkejä 81
6.5.1 Ylijännitesuojan suurin jatkuva käyttöjännite $\boldsymbol{Uc}$ eri tilanteissa 81
6.5.2 Siirtoverkko 84
6.5.3 Jakeluverkko 85
6.5.4 Tähtipistesuojaus 87
6.5.5 Kaapelivaipan suojaus 87
6.5.6 Vaihe-maa-suojaus 88
7 Yhteenveto 89

LÄHTEET 91

LIITTEET 94

Symbolit

C_{in}	Muuntajakäämityksen sisäänmenokapasitanssi
c_{TOV}	TOV-kerroin
D	Suojattavan kohteen ja venttiilisuojan välinen etäisyys
d_1	Venttiilisuojan liitäntäjohtimen pituus
d_2	Venttiilisuojan maadoitusjohtimen pituus
$f(U)$	Tilastollinen todennäköisyystiheys
H	Korkeus merenpinnan yläpuolella
I_n	Nimellispurkausvirta
I_K	Vaiheeseen kohdistuva oikosulkuvirta
k	Maasulkukerroin
K_c	Suoriutumiskriteerin perusteella määritettävä kerroin
K_e	Verkon maadoitustavasta riippuva kerroin
K_s	Varmuuskerroin
K_t	Sään huomioiva korjauskerroin
K_a	Korkeuskerroin
L_K	Maadoittamattoman kaapelin pituus
$P(U)$	Ylilyönnin todennäköisyys
$p.u$	Per uni, suhteellisuusarvo
S	Tulevan lineaarisesti nousevan syöksyjännitteen jyrkkyys
S_k	Kaapelipituus
v	Syöksyjännitteen etenemisnopeus
U	Jännitteen tehollisarvo
U_c	Suurin jatkuva käyttöjännite
U_{cw}	Jännitelujuutta kuvaavat koordinaatiokestotasot
U_i	Vaippaan indusoitunut jännite

U_{liwl}	Peruseristystaso
U_m	Maksimi käyttöjännite
U_p	Ylijännitteen suojaustaso
u_p	Venttiilisuojan kilpiarvojen mukainen suojaustaso
U_{ptod}	Todellinen suojaustaso
U_r	Mitoitusjännite
U_{res}	Jäännösjännite
U_{rp}	Edustavat jänniterasitukset
U_{rw}	Vaadittavat kestotasot
U_s	Syttymisjännite
U_{TOV}	Käyttötaajuisen ylijännitteen sieto
U_v	Vaihejännite ennen maasulkua
U_w	Ylijännitteen kestotaso
U_{wl}	Salamasyöksyjännitteen kestotaso
U_{ws}	Kytkentäylijännitteen kestotaso
Δu_1	Induktiivinen jännitehäviö suojan liitos- ja maadoitusjohtimissa
Δu_2	Venttiilisuojan ja suojattavan kohteen välisellä matkalla syntyvä jännitteen nousu
γ	Liitäntä- ja maadoitusjohtimen induktanssi

Lyhenteet

AIS	Air insulated substation, ilmaeristeinen kytkinlaitos
GIS	Gas insulated substation, kaasueristeinen kytkinlaitos
RMU	Ring main unit, muuntamokojeisto

IEC	Internation Electrotechnical Commisson, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
PFWV	Power Frequence Withstand Voltage
LIWV	Lightnin Impulse Withstand Voltage, salamasyöksyjännitteen kestotaso
SIWV	Switching Impulse Withstand Voltage, kytkentäsyöskyjännitteen kestotaso
CENELEC	European Committee For Electrotechnical Standardization
TOV	Temporary Overvoltage, hetkellinen ylijännite
SF_6	Sulphur Hexafluoride, rikkiheksafluoridi
SiC	Silicon Carbide, piikarbidi
ZnO	Zinc Oxide, sinkkioksidi

1 Johdanto

1.1 Työn tavoitteet

Diplomityön tarkoituksena on muodostaa yksiselitteinen ohje Pöyry Finlandin sähkösuunnittelijoiden käyttöön, jolla kyetään tekemään kansainvälisen IEC-standardin täyttävää sähkösuunnittelua kustannustehokkaasti ylijännitesuojaukseen liittyen. Työn lähteinä käytetään ylijännitesuojauksen IEC 60071-1/2 standardeja ja suurjännitetekniikan sekä sähköverkkotekniikan kirjallisuutta. Tutkimushankkeen voidaan katsoa helpottavan Pöyry Finlandin sähkösuunnittelutehtäviä ylijännitesuojaukseen liittyen ja samalla tehostaen toimeksiantajan sisäisiä prosesseja. Lisäksi tutkimushankkeen voidaan katsoa myös helpottavan ylijännitesuojauksen suunnittelun lähestymistä.

1.2 Työn rakenne

Tutkimuksen pohjamateriaalina on kansainvälinen ylijännitesuojauksen IEC-standardi 60071-1/2 ja suurjännitetekniikan sekä sähköverkkotekniikan kirjallisuus. Aineistoa käsitellään kvalitatiivisen tutkimusteorian näkökulmasta, sillä siinä olemassa olevasta aineistosta muokataan Pöyry Finlandin sähkösuunnittelun tarpeisiin sopiva ohje. Tällaista aineistokeruutapaa nimitetään sekundääridatan käytöksi. Sekundäärisuudella viitataan siihen, että aineisto on jo olemassa tietokannan muodossa (Eskelinen & Karsikas 2012, 79.). Kvalitatiiviseen tutkimustraditioon kuuluvat kuvailevuus, selittävyys ja kartoittavuus ja ne ovatkin avainsanoja, joilla tutkimuksen luonnetta voidaan kuvata. (Hirsjärvi ym. 2010, 138.)

Kvalitatiivisen tutkimuskentän suuntauksista työssä korostuvat fenomenologinen sekä hermeneuttinen analyysi. Fenomenologiseen analyysiin kuuluu tutkimuskohteesta saatujen havaintojen analysoiminen ja niiden reflektointi. (Eskelinen ja Karsikas 2012, 78.) Tämä analyysimalli korostuu tutkimuksessa, sillä tutkimuksen tekijä pohtii havaintojaan useammasta teorialähteestä ja muodostaa niistä yhtenevän ja loogisesti etenevän materiaalin. Tutkimuksen tekijän on myös prosessoitava lähdeaineistoa, jotta niistä voidaan muodostaa mielekäs kokonaisuus.

Hermeneuttisen analyysin tavoite on ymmärtää tekstin merkitystä käyttämällä avuksi systemaattista prosessia. Tätä nimitetään hermeneuttiseksi kehäksi, jossa yksityiskohtien kautta ymmärretään suurempaa kokonaisuutta. Näin ollen tuoreet havainnot voimistavat kokonaiskäsitystä. (Eskelinen ja Karsikas 2012, 78.) Tämä tulee esiin kyseisessä tutkimuksessa siten, että eri lähteistä koostuvista yksityiskohdista muodostetaan yhtenäinen ohje. Yksityiskohdat auttavat siis suuremman kokonaisuuden hahmottamista.

Tutkimusongelmana voidaan nähdä olevan se, että Pöyry Finlandilla ei ole tällä hetkellä yleisesti käytössä olevaa ohjeistusta ylijännitesuojauksen suunnittelusta ja tällaiselle on tarvetta. Tutkimukselta odotetaan vastauksia siihen, kuinka ylijännitesuojauksen suunnittelu tulisi toteuttaa, jotta se täyttää kansainvälisen IEC-standardin asettamat vaatimukset. Näin ollen tutkimuksella on konkreettinen merkitys, sillä sen myötä ylijännitesuojauksen suunnittelijalla on käytettävissä ajantasainen ohje. Näin ollen toteutuu myös vaatimus tutkimuksen hyödynnettävyydestä ja merkitystä aihepiirin lomassa työskentelevälle yhteisölle. Koska kerättävästä aineistosta on luotava yleispäteviä argumentteja, on tärkeää, että tutkimuskysymykset ovat helposti ymmärrettävässä muodossa. (Valli 2001, 100.)

2 Teollisuuden sähkönjakelu ja laitteet

2.1 Teollisuusverkon sähkönjakelu

Laajuudeltaan teollisuuden sähköverkot ovat pieniä, mutta niissä siirretään suuria tehoja. Toimialasta riippuen suurin osa energiasta käytetään sähkömoottoreiden pyörittämiseen, joten sähkökäyttöjen nimellistehot ja lukumäärät vaikuttavat merkittävästi teollisuuslaitoksen sähkönjakeluverkon rakenteeseen ja nimellisjännitteiden valintaan.

Teollisuuslaitoksen koosta riippuen se liittyy yleiseen sähköverkkoon joko 110 kV-, 20 kV- tai 10 kV -jännitetasolla. Suuret teollisuuslaitokset, joissa sähköteho ylittää 10 MW:n käytetään 110 kV jännitettä. Tämän kokoluokan laitoksissa on tyypillistä, että osa sähköenergiasta tuotetaan omilla voimalaitoksilla. Teollisuussähkönjakelujärjestelmään kuuluvat yleisen sähköverkon lisäksi keskijännitejakelu ja kulutuskohteiden käyttöjakelu. Käyttöjakelujärjestelmä on jaettavissa apusähköjärjestelmään, tuotannon sähkönjakeluun ja valaistus- sekä huoltosähköverkkoon. (Korpinen 1998, 1.)

Teollisuuslaitoksien pääjakelujännitteet vaihtelevat tuotantolaitoksesta riippuen 20 kV, 10 kV ja 6 kV välillä. Pääjakelujännitteeksi kutsutaan jännitettä, jolla suoritetaan pääsääntöinen sähkönjakelu ja johon liitetään jakelumuuntajat. Keskijännitejakelussa voidaan käyttää yhtä tai useampaa eri keskijännitetasoa, mutta usein valitaan yksi pääjakelujännite, jolla keskijännitejakelu suoritettaan. Yleisesti 20 kV jännite sopii laitoksen keskijännitejakeluun ja samalla se sopii tehtaan varayhteydeksi esimerkiksi paikalliseen sähkölaitokseen. (Korpinen 1998, 1.)

Tuotannonsähkönjakelun suurimpana kuluttajan ovat moottorit riippumatta toimialasta. Suomessa käytettyjä moottorijännitteitä ovat 10 kV, 6 kV, 3 kV, 690 V ja 400 V. Moottorijännitteen valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat huipputehon suuruus, suurimpien moottoreiden teho, alueen laajuus, laitoksessa käytössä olevat jännitteet ja jakelumuuntajien oikosulkuteho. Teollisuudessa 10 kV jännitettä käytetään yli 10MW:n tehoisilla moottoreilla. Apusähköjärjestelmään kuuluu ohjaus- ja automaatiojärjestelmä. Valaistus- ja huoltosähköverkon jännitteenä käytetään 400 V. (Korpinen 1998, 1.)

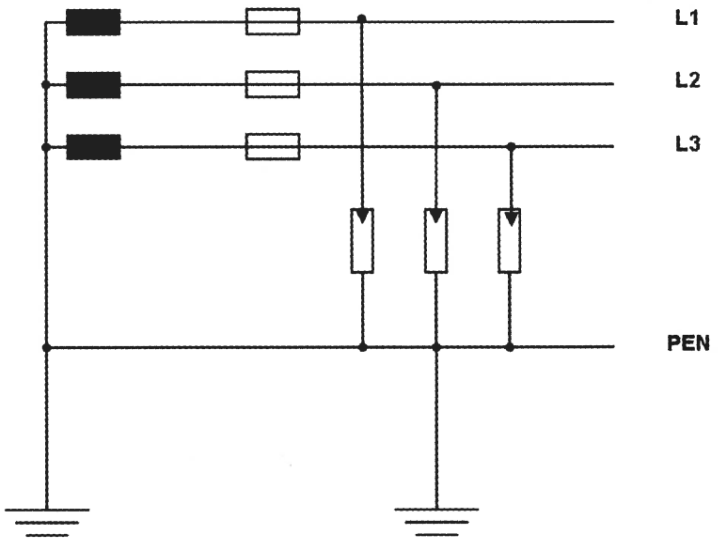
2.2 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkoksi lasketaan verkon osa, jonka nimellinen jännite on alle 1 kV. Pienjänniteverkko liitetään keskijänniteverkkoon muuntajan välityksellä, jolla verkon nimellinen pääjännite muunnetaan 400 V:n tai 690 V:n tasolle. Pienjänniteverkolla hoidetaan sähkönjakelu loppukäyttäjille ja kojeille.

Pienjänniteverkko jaetaan eri jakelujärjestelmään järjestelmän maadoitustavan mukaan. Erilaisia jakelujärjestelmiä ovat TN-, TT- ja IT-järjestelmät. TN-järjestelmät ovat jaoteltu vielä suojajohtimen käytön mukaan TN-S-, TN-C- ja TN-C-S-järjestelmiin. Sama jaottelu on käytössä myös tasajännitejärjestelmillä. Seuraavaksi käsitellään edellä mainitut jakelujärjestelmät. (Annanpalo et al. 2005, 136.)

2.2.1 TN-C-järjestelmä

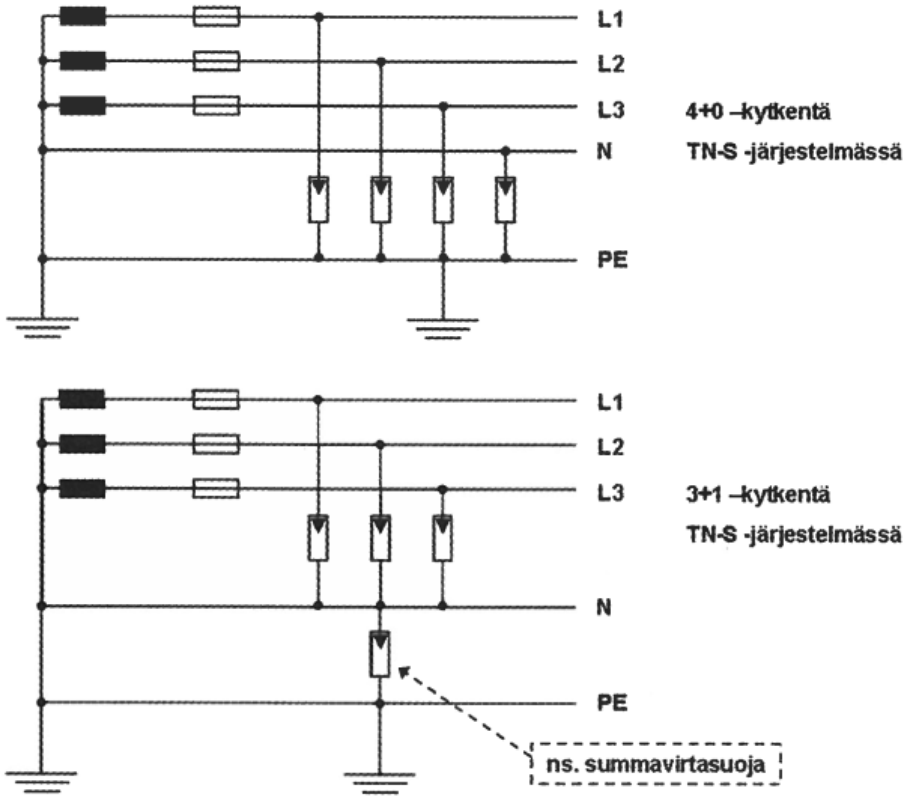
TN-C-järjestelmässä PEN-johdin toimii koko järjestelmässä suojamaadoitus- ja nollajohtimena; lisäksi se tunnetaan 4-johdinjärjestelmänä. TN-C-järjestelmää käytetään kolmivaihejärjestelmänä, jossa johtimia on kolme vaihdejohdinta ja yksi PEN-johdin. Ylijännitesuojaus toteutetaan yhdistämällä kaikki vaihejohtimet ylijännitesuojien kautta maadoitukseen. TN-C-järjestelmän ylijännitesuojaus on nähtävissä kuvasta 2.1. (Annanpalo et al. 2005, 137.)



Kuva 2.1. TN-C-järjestelmä (Annanpalo et al. 2005, 137.)

2.2.2 TN-S-järjestelmä

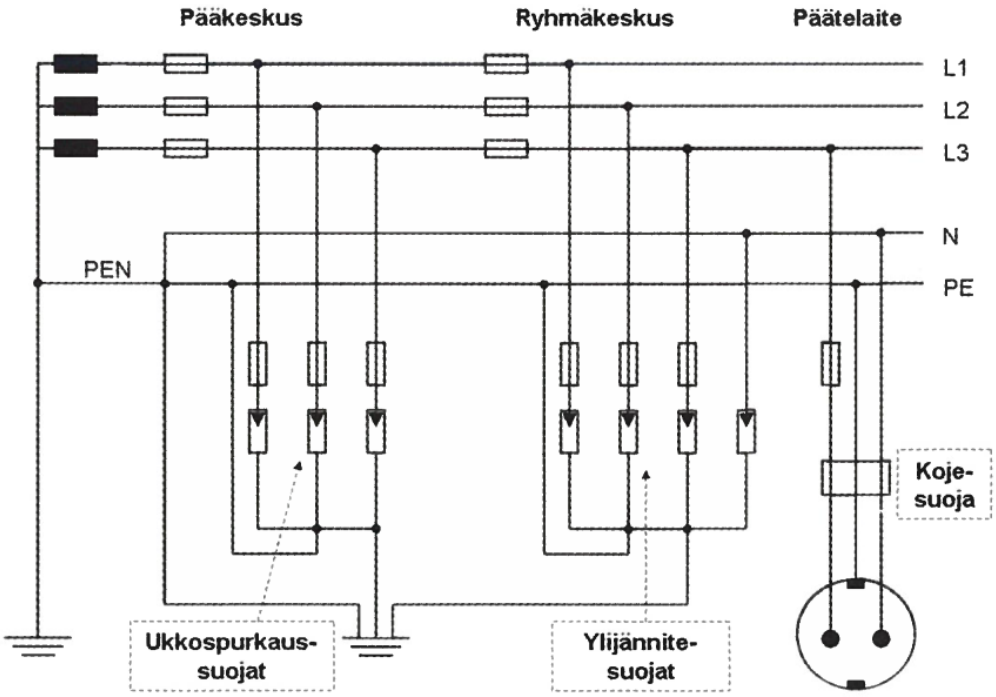
TN-S-järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin, jolloin se tunnetaan 5-johdinjärjestelmänä. N-johdin pitää myös suojata, mikäli PEN-johdin on haaroitettu ja matka ylijännitesuojille on yli kaksi metriä. TN-S-verkon suojauksessa on mahdollista käyttää 4+0 tai 3+1 kytkentää. TN-S-järjestelmän ylijännitesuojaus on nähtävissä kuvasta 2.2 (Annanpalo et al. 2005, 137.)



Kuva 2.2. TN-S-järjestelmän toteutusvaihtoehdot (Annanpalo et al. 2005, 138.)

2.2.3 TN-C-S-järjestelmä

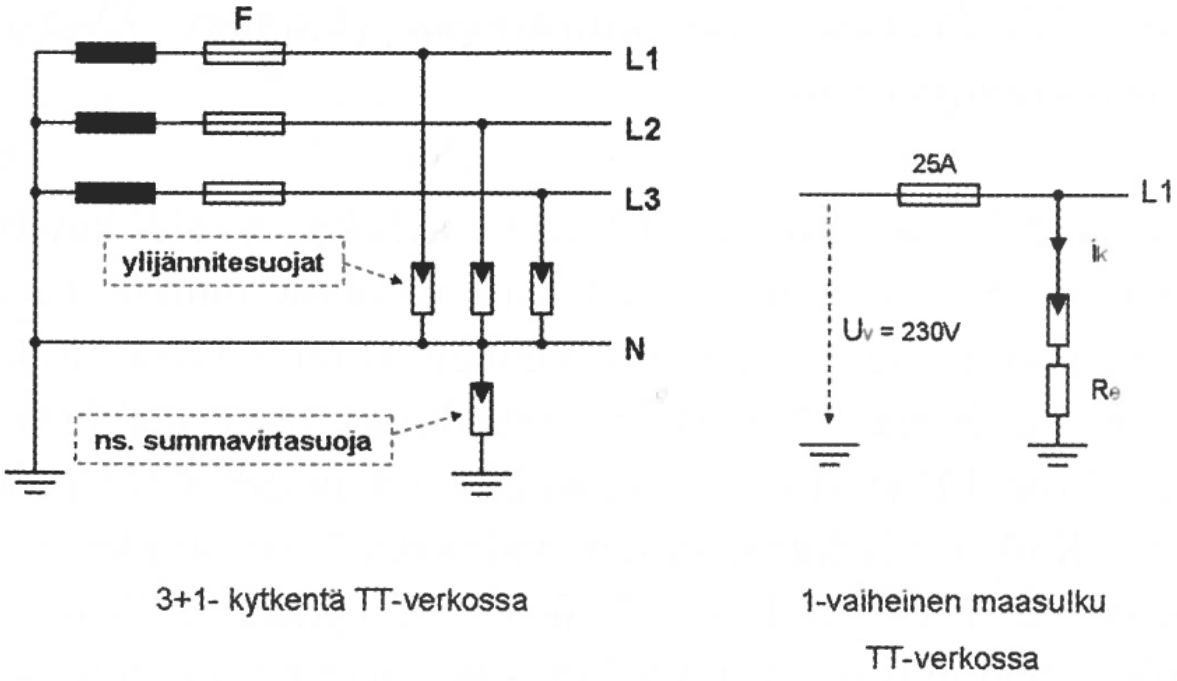
Suomen yleisin verkkomuoto on TN-C-S. Tässä tapauksessa pääkeskukseen tullaan 4-johdinsyötöllä, jossa otetaan käyttöön 5-johdin- eli TN-S-järjestelmä. Tällöin pääkeskuksessa riittää kolminapainen suoja, mutta nousu- ja ryhmäkeskuksissa suojataan nollajohdin. TN-C-S-järjestelmän ylijännitesuojaus on nähtävissä kuvasta 2.3. (Annanpalo et al. 2005, 137.)



Kuva 2.3. TN-C-S-järjestelmä (Annanpalo et al. 2005, 143.)

2.2.4 TT-järjestelmä

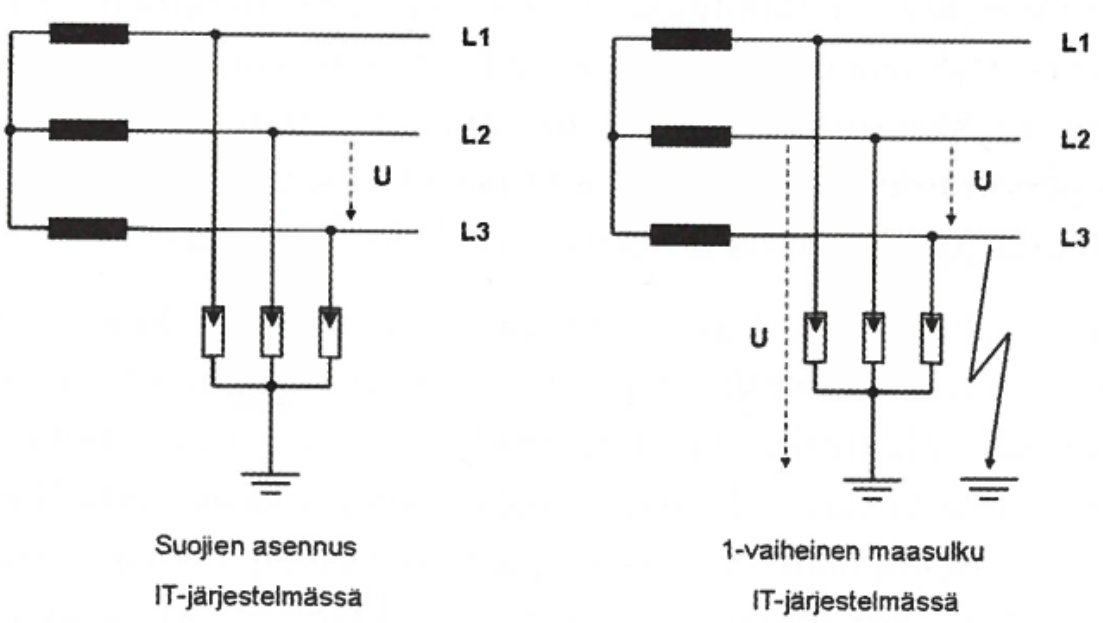
TT-järjestelmässä muuntajan tähtipiste maadoitetaan suoraan. Lisäksi sähkölaitteistot ja -laitteet maadoitetaan erillisen tai erillisten maadoituselektrodien avulla, joiden tulee olla sähköisesti erillisiä syöttöverkon maadoituselektrodiin nähden. TT-järjestelmä ei ole käytössä Suomessa, mutta sitä käytetään Keski- ja Etelä-Euroopassa. TT-järjestelmän ylijännitesuojaus on esitetty kuvassa 2.4. (Annanpalo et al. 2005, 140.)



Kuva 2.4. Ylijännitesuojaus TT-verkossa (Annanpalo et al. 2005, 140.)

2.2.5 IT-järjestelmä

IT-sähköverkko on maasta erotettu eli kelluva järjestelmä, jossa ei ole nollajohdinta. Sähkölaitteiden jännitteelle alttiina olevat osat kytketään suojamaadoitusjohtimen välityksellä maadoituselektrodeihin tai yhteiseen elektrodiin. IT-järjestelmä voidaan toteuttaa kytkemällä se maahan impedanssin välityksellä ja impedanssin suuruus valitaan käyttökohteen perusteella. IT-järjestelmää käytetään muun muassa teollisuudessa ja sairaaloiden leikkaussalien jakelujärjestelmissä. IT-järjestelmän ylijännitesuojaus on esitetty kuvassa 2.5. (Annanpalo et al. 2005, 140.)



Kuva 2.5. Ylijännitesuojaus IT-verkossa. (Annanpalo et al. 2005, 140.)

3 Ylijännitteet

Käyttö- ja ylijännitteet kuormittavat sähköverkkoon kuuluvien laitteiden ja osien eristysrakenteita. Ylijännite on jännite, joka ylittää kyseessä olevan verkon osan tai laitteen eristysrakenteelle spesifisen referenssiarvon. Verkkojen eristysmitoitukseen vaikuttavat jänniterasitukset jaetaan tyypillisesti jatkuvaan käyttöjännitteeseen ja lyhytaikaisiin ylijännitteisiin.

Lyhytaikaisten ylijännitteiden referenssiarvot ylittyvät, kun vaihevälieristyksen tapauksessa jännite ylittää arvon $U_m\sqrt{2}$ ja vaiheen ja maan välisen eristyksen vaikuttava jännite ylittää referenssiarvon $U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$. Molemmissa tapauksissa U_m ilmentää laitteen suurinta suunniteltua käyttöjännitteen tehollisarvoa. Ylijännitteen karakteroinnissa käytetään sen suurinta arvoa. Lisäksi ylijännitteen ajallinen vaihtelu on oleellinen suure, joka vaikuttaa jännitelujuuteen. Taulukosta 3.1 on nähtävissä IEC:n mukaisten laitteiden suurimpia käyttöjännitteitä ja mitoitusjännitteitä. (Elovaara & Haarla 2011, 11; Aro & al. 2015, 253.)

Taulukko 3.1. Otanta IEC:n mukaisten laitteiden käyttö- ja mitoitusjännitteistä. (Elovaara & Haarla 2011, 79.)

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

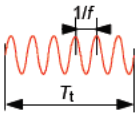
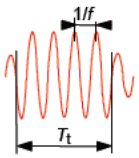
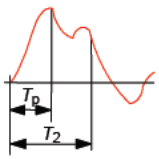
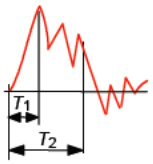
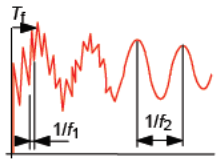
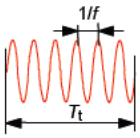
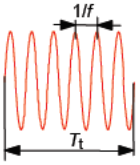
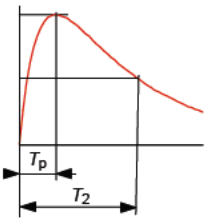
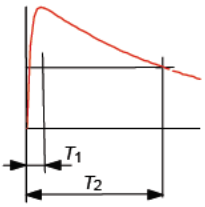
3.1 Ylijännitteiden luokittelu

Ylijännitteet voidaan jakaa kahteen luokkaan, jotka perustuvat ylijännitteen muotoon. (IEC 60071-1) Voimakkaasti vaimenevia ja lyhytaikaisia ylijännitteitä kutsutaan transienttiylijännitteiksi ja vaimenemattomat tai heikosti vaimenevia ylijännitteitä kutsutaan pientaajuisiksi ylijännitteiksi. Pientaajuisille ylijännitteille on tyypillistä pitkä kestoaika ja jaksollisuus. Transienttiylijännitteiden kestoaika on muutamia millisekunteja ja sen ylijännitemuoto eroaa merkittävästi pientaajuisesta ylijännitteestä. Transienttiylijännitteet ovat vielä jaettavissa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin transienttijännitteisiin. (Elovaara & Haarla 2011, 12.)

Jänniterasituksen kestoaika muodostaa suurimman eron transienttiylijänniteryhmien välille. Tällä on suuri vaikutus eristysrakenteiden jännitelujuustarkastelussa. Elovaaran ja

Haarlan (2011, 12) mukaan ”jyrkät transienttiylijännitteet saavuttavat huippuarvonsa mikrosekunneissa ja vaimenevat muutaman kymmenen mikrosekunnin kuluessa.” Sen sijaan loivien transienttijännitteiden huippuarvo saavutetaan satojen mikrosekuntien kuluessa ja vaimeneminen tapahtuu millisekuntiluokkaa olevassa ajassa. Erittäin jyrkille transienttiylijännitteille ei ole määritetty testipulssia eikä testaustapaa, sillä se on suhteellisen uusi luokka. Niiden nousuaika on nanosekuntien tasoa ja valtaosa jyrkistä transienttiylijännitteistä on ukkosen aiheuttamia. Aiemmin ylijänniteluokat oli jaoteltu niiden alkuperän mukaan. Pienitaajuisten ylijännitteiden, loivien transienttiylijännitteiden sekä jyrkkien transienttijännitteiden vastaavat luokat olivat käyttötaajuiset ylijännitteet, kytkentäylijännitteet ja ilmastolliset ylijännitteet. (Elovaara & Haarla 2011, 12; Aro & al. 2015, 253.)

Kuvassa 3.1 esitetään yläjännitteiden muodot ja koejännitemuodot, joita käytetään laitteiden jännitelujuustarkastelussa. Erittäin jyrkille transienttijännitteille ei ole määritetty standardipulssia ja se sovitaan tapauskohtaisesti. (Elovaara & Haarla 2011, 12.)

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	f = 50 Hz or 60 Hz $T_t \geq 3\,600$s	10 Hz < f < 500 Hz 0,02 s ≤ T_t ≤ 3 600 s	20 µs < T_p ≤ 5 000 µs $T_2 \leq 20$ ms	0,1 µs < T_1 ≤ 20 µs $T_2 \leq 300$ µs	$T_f \leq 100$ ns 0,3 MHz < f_1 < 100 MHz 30 kHz < f_2 < 300 kHz
Standard voltage shapes	 f = 50 Hz or 60 Hz T_t [a]	 48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz T_t = 60 s	 T_p = 250 µs T_2 = 2 500 µs	 T_1 = 1,2 µs T_2 = 50 µs	[a]
Standard withstand voltage test	[a]	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	[a]

[a] To be specified by the relevant apparatus committees.

Kuva 3.1 Ylijännitetyypit ja niiden koejännitemuodot (IEC 60071-1)

3.2 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttaa usein verkkojen vika- ja resonanssitilanteet. Ne vaihtelevat muodoltaan ja ovat tyypillisesti värähteleviä. Useimmiten värähtelytaajuus on sama kuin verkkotaajuus tai siihen nähden yli- tai aliharmoninen taajuus. Näitä jänniterasituksia kutsutaan yleisesti käyttötaajuisiksi ylijännitteiksi. Pientaajuiset ylijännitteet syntyvät transienttijännitteiden tapaan verkossa tapahtuvien kytkentäoperaatioiden ja verkon tilan muutoksien yhteydessä. (Elovaara & Haarla 2011, 13.)

Pientaajuisen ylijännitteen yhteydessä esiintyy usein myös loiva transienttiylijännite. Etenkin resonanssi ja epälineaariset verkon osat vaikuttavat pienitaajuisen ylijännitteen syntyyn ja suuruuteen. Tyypillisimmät pientaajuista ylijännitettä aiheuttava tekijä on

maasulku, kuorman äkillinen poiskytkeminen, resonanssit ja ferroresistanssit, generaattoreiden itseherätys tai vajaanapainen toiminta. (Aro & al. 2015, 255.)

3.2.1 Maasulkuylijännitteet

Yleisin käyttötaajuisia ylijännitteitä aiheuttava tilanne on yksivaiheinen maasulku, ja se aiheuttaa kahden terveen vaiheen jännitteen nousun. Tyypillisesti ylijännite on perustaajuinen ja se esiintyy vaihe-maa-eristysvälissä. Maasulun aiheuttaman ylijännitteen suuruuteen vaikuttavat tähtipisteen maadoitustapa ja vikapaikka. Verkot ovat jaettavissa maadoitustavan mukaan erotettuihin, sammutettuihin, impedanssin kautta tai suoraan maadoitettuihin verkkoihin. (Aro et al. 2015, 255.)

Maasulkukertoimella k kuvataan vian aikana terveessä vaiheessa vaikuttavan vaihejännitteen huippuarvon suhdetta samassa vaiheessa ja paikassa ennen vikaa vaikuttaneeseen huippuarvoon. Maasulkukerroin on suurimmillaan 1,8 $p.u$ maasta erotetuissa verkoissa ja lisäksi sammutetuissa verkoissa päädytään samaan arvoon. Pienehköllä impedanssilla maadoitetuilla tai suoraan maadoitetuilla verkoilla maasulkukerroin on pienempi. Mikäli maasulkukerroin on $k \leq 1{,}4$, verkkoa voi kutsua tehollisesti maadoitetuksi. Käytännössä pienjänniteverkot ovat suoraan maadoitettuja ja keskijänniteverkot ovat maasta erotettuja, sammutettuja tai tehollisesti maadoitettuja. Suurjänniteverkot ovat tehollisesti maadoitettuja, koska tällöin voidaan alentaa verkon eristysmitoitusta. (Aro et al. 2015, 255.)

Maasulkuylijännitteen kestoaika on määriteltävissä samaksi ajaksi kuin aika, joka kestää vian syttymisestä laukaisuun. Aika vaihtelee eri tavalla maadoitetuissa järjestelmissä. Tehollisesti maadoitetussa järjestelmässä aika on alle yhden sekunnin. Sammutetuissa verkoissa tämä aika on alle kymmenen sekuntia. Maasta erotettujen verkkojen vika-aikaan vaikuttavat maasulkusuojauskäytännöt ja turvallisuusmääräykset. Tyypillisesti maasulkulaukaisuaika on alle viisi sekuntia. Maasulkutilanteista muodostuneet ylijännitteet eivät tavallisesti aiheuta ongelmia eristysten kestoisuuden kannalta. (Aro et al. 2015, 259.)

3.2.2 Muut aiheuttajat

Tässä kappaleessa käsitellään aikaisemmin mainitut muut pientaajuista ylijännitettä aiheuttavat tekijät. Kuormituksen äkillinen irtikytkeytyminen aiheuttaa symmetristä ja

kolmivaiheista pientaajuista ylijännitettä. (Aro et al. 2015, 259.) Kytkentäylijännitteet syntyvät kytkinlaitteen toiminnan yhteydessä ja tällaisia kytkinlaitteita voi olla esimerkiksi katkaisija, erotin, kontaktori tai sulake. Kytkentäylijännitteitä aiheuttavat muun muassa kuormituksen äkillinen kytkeytyminen, tyhjäkäyvän johdon tai kondensaattoriparistoon katkaisu, tyhjäkäyvän kuristimen tai muuntajan irrottaminen verkosta sekä tyhjäkäyvän johdon kytkeminen jännitteeseen. Äkilliseen irtikytkeytymiseen liittyvässä ylijännitteessä käsitellään usein Ferranti-ilmiötä, jossa johdon kapasitiivinen varausvirta nostaa tyhjäkäyvän suurjännitejohdon jännitettä johdon avointa loppupäätä lähestyessä. (Elovaara & Haarla 2011, 17–18.)

Resonanssiylijännitteet ovat pitkäkestoisia ja matalataajuisia ylijännitteitä. Resonanssiylijännitteitä aiheuttavat yliaaltovirtoja verkkoon syöttävät kuormat, kuten kyllästetyt muuntajat, jotka syöttävät verkkoon harmonisia taajuuksia. Kyllästyvä magneettipiiri voi pienen kapasitanssin kanssa aiheuttaa sarjaresonanssin, jota kutsutaan ferroresonanssiksi. Resonanssien tavallisimmat haitat ovat jännitetason vaihtelut, jännitteen säröytyminen ja lämpeneminen. Resonanssi usein syntyy yliaaltojen vaikutuksesta. (Elovaara & Haarla 2011, 17–18.)

Teho- tai jännitemuuntajan vajaanapainen kytkentä esiintyy ajoittain johdinkatkeaman aikana, katkaisijan toiminnassa tapahtuneen virheen vuoksi tai vaiheen sulakkeen palamisen seurauksena. Ylijännite pääsee muodostumaan, kun tyhjäkäynti-impedanssi kytkeytyy sarjaan muuntajan omien kapasitanssien ja verkkoon kytkemättömien vaiheiden liitäntäjohtojen kapasitanssin kautta. Vajaanapaisesta kytkennästä johtuvia ylijännitteitä esiintyy, kun muuntaja on hieman ylikuormitettuna. Ylijännitteet voivat aiheuttaa liian suuren jännitteen takia pienjännitelaitteille termisiä vaurioita. Vastaavasti keskijänniteverkossa ylijännitteet eivät saavuta eritystasoa vastaavia koejännitteitä. (Aro et al. 2015, 272.)

3.3 Loivat transienttiylijännitteet

Loiviksi transienttiylijännitteiksi katsotaan verkon äkillisissä tilanmuutoksissa tasoitusilmiönä syntyviä ylijännitteitä. Tällaisia muutoksia voi syntyä vikatapauksien aiheuttamista tai muista syistä suoritetuista kytkentätoimenpiteistä. Tyypillisiä tapauksia ovat oiko- tai maasulku, kuorman irtikytkeytyminen, epätahtilanne, virtapiirin avaaminen tai sulkeminen. Usein samat tekijät aiheuttavat loivia transienttiylijännitteitä ja pientaajuisia ylijännitteitä. Onkin tyypillistä, että loivan transienttiylijännitteen vaimennuttua verkkoon saattaa jäädä pienitaajuinen ylijännite. (Elovaara & Haarla 2011, 19., Aro & al. 2015, 274.)

Loivan transienttiylijännitteen muotoon ja suuruuteen vaikuttavat verkon ja katkaisijan ominaisuudet. Katkaisijan molemmilla puolilla olevien verkkojen induktanssit ja kapasitanssit määräävät tasoitusvärähtelyjen taajuuden. Värähtelyn amplitudi riippuu jännitteen ja virran hetkellisarvosta kytkentähetkellä, verkon vaimennusomaisuuksista ja katkaisijan ominaisuuksista. (Elovaara & Haarla 2011, 19.)

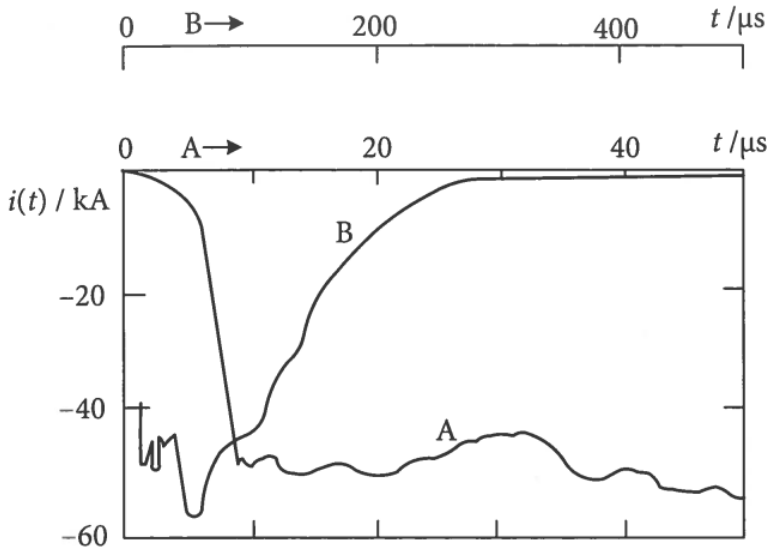
Loivien transienttiylijännitteiden oleellinen piirre on, että ylijännitteiden suuruus riippuu useimmissa tapauksissa verkkotilanteesta. Käytännössä tämä ilmenee siten, että kullekin kytkentätilanteen ominainen, suhteellisarvona ilmoitettu ylijännite on lähes samansuuruinen käyttöjännitteen verkoissa, mikäli kytkinlaitteiden ja verkon ominaisuudet ovat samat. Tästä johtuen loivien transienttiylijännitteiden merkitys kasvaa esimerkiksi ilmastollisista syistä aiheutuneisiin ylijännitteisiin nähden, kun verkon käyttöjännite kasvaa. (Aro & al. 2015, 275.)

Lisäksi loiville transienttiylijännitteille on ominaista, että kytkentäilmiöihin liittyvien ylijännitteiden suuruus riippuu jännitteen ja virran hetkellisarvoista hetkellä, jolla kytkinlaitteen yksittäiset navat sulkeutuvat tai avautuvat. (Aro & al. 2015, 275.)

3.4 Jyrkät transienttiylijännitteet

Jyrkät transienttiylijännitteet syntyvät yleensä salamaniskun seurauksena, jonka vuoksi niitä on aikaisemmin nimitetty ilmastollisiksi ylijännitteiksi. Salaman isku aiheuttaa ylijännitteen sähköverkkoon kolmella eri tavalla: induktion kautta, johdon maadoitettuun osaan osuneen iskun aiheuttaman takaiskun kautta tai osumalla suoraan jännitteiseen johtimeen. Indusoituneet ylijännitteet ovat enimmillään suuruusluokaltaan 100 kV – 300 kV, jolloin ne ovat vaarallisia eristyksille sellaisissa keskijänniteverkoissa, joissa on $U_m \leq$ 52 kV. Mikäli salamaniskut osuvat suoraan johtoon, se saattaa aiheuttaa megavolttien suuruisia ylijännitteitä ja aiheuttaa lähes aina ylilyönnin ja tämän seurauksena maasulun johdolla. (Elovaara & Haarla 2011, 23.)

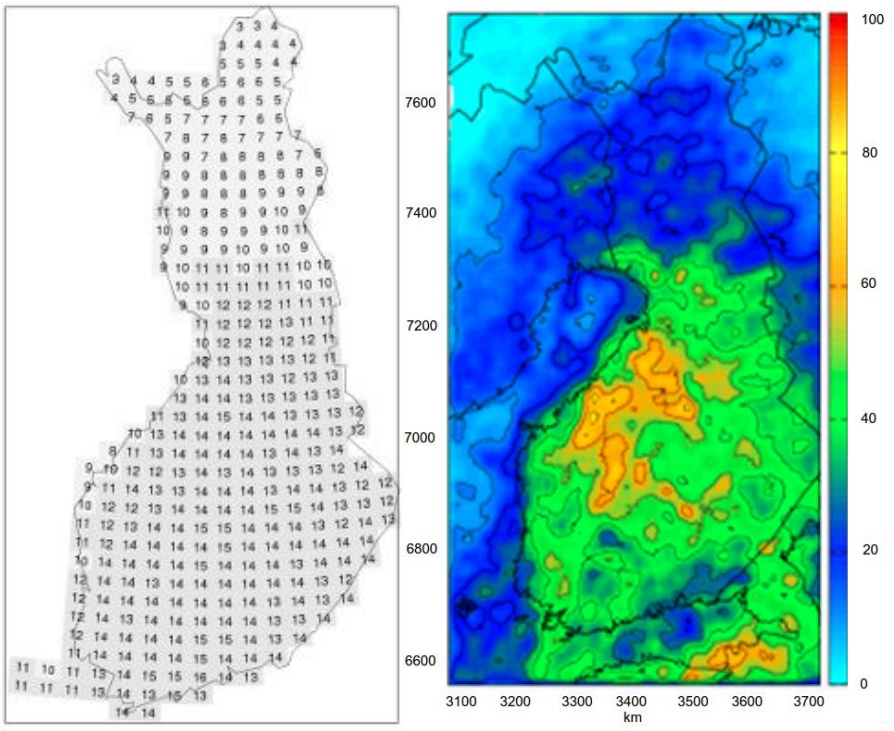
Salamavirran alkuosa on kovera muodoltaan ja sen suurin jyrkkyys saavutetaan virran huippuarvon lähistöllä. Virran alkuosalle käytetään myös rinta-nimitystä ja sen kestoaika on suuruudeltaan 2,5 μs. Virtapulssi kostuu tyypillisesti nopeasti nousevasta suuri amplitudisesta osasta, jonka kestoaika on muutamia kymmeniä mikrosekunteja ja tätä seuraavasta pitkän ajan vaikuttavasta, mutta pienivirtaisesta osasta. Suomen salamaniskutiheys on Ilmatieteen laitoksen salamanpaikanjataverkon mukaan 0,1 – 1,5 iskua 100 km^2. Kuvasta 3.2 on nähtävissä keskimääräiset ukkospäiväluvut Suomessa. (Elovaara & Haarla 2011, 24.)



Kuva 3.2 Tyypillinen salamavirtaoskillogrammi. A-käyrä on suurennos B-käyrän alkuosasta (Elovaara & Haarla 2011, 25.)

Jyrkät transienttiylijännitteet vaikuttavat eristysmitoitukseen kaikilla käyttöjännitteillä. Tämä johtuu siitä, että jänniterasituksen suuruus ja muoto riippuvat suuresti salamavirran ominaisuuksista, joihin verkon suunnittelu ja mitoitus eivät pysty vaikuttamaan. Tämän vuoksi jyrkät transienttiylijännitteet onkin huomioitava eri laitteiden eritysrakenteiden jännitelujuutta ja suojatalaitteiden ominaisuuksia valittaessa. (Elovaara & Haarla 2011, 27.)

Salamaniskun osuessa sähköverkon maadoitettuun tai jännitteiseen osaan salamavirta kulkee verkon erilaisten impedanssien kautta aiheuttaen jänniterasituksen. Mikäli salamanisku osuu johdon jännitteiseen osaan, iskua kutsutaan suoraksi iskuksi. Pääsääntöisesti johdot suojataan suorilta salamaniskuilta yhdellä tai kahdella ukkosjohdolla, joiden on tarkoitus vetää puoleensa johdon jänteeseen suuntautuvat salamaniskut. Muita ukkosjohtimien mahdollisia tehtäviä ovat relesuojauksessa sekä vaara- että häiriöjännitteiden pienentämisessä. (Elovaara 1988, 487.) Takaiskussa salamanisku kohdistuu avojohdon maadoitettuihin osiin, kuten pylvääseen tai johdon jänteessä oleviin ukkosjohtimiin. Kuvassa 3.3 on esitetty Suomen keskimääräiset ukkospäiväluvut ja vuotuiset maasalamatiheydet. (Aro & al. 2015, 295.)



Kuva 3.3 Keskimääräinen ukkospäiväluku ja keskimääräinen vuotuinen maasalamatiheys (100 km^2) vuosien 1998 – 2012 välillä (Ilmatieteenlaitos 2016.)

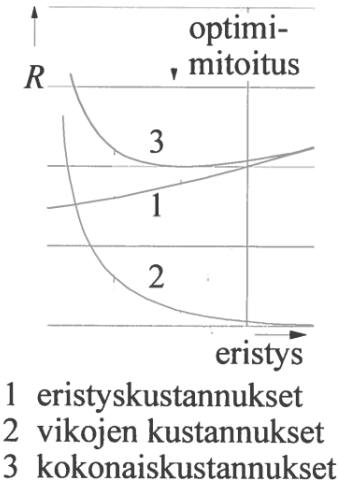
3.5 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet ovat yleisiä erotintoiminnoille ja ne ovat peräisin siitä, kun valokaari katkeaa ja jälleensyttyy erotinta avattaessa. Jälleensyttymisiä on erottimen avausliikkeen aikana useampi kymmen ja kaikki jälleensyttymiset generoivat suurtaajuisen värähtelyn RLC-piirinä kuvattavissa olevaan verkkoon, johon erotin on kytketty. (Aro & al. 2015, 311.)

4 Eristyskoordinaatio

Eristyskoordinaatiolla tarkoitetaan laitteiden jännitelujuuden valintaa ja soveltamista suhteessa verkossa esiintyviin ylijännitteisiin ja suojalaitteiden ominaisuuksiin siten, että eristysvaurioiden ja käyttökeskeytysten esiintymistodennäköisyys alenee taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. Yleisesti tunnettuja eristysvaurioita aiheuttavat niihin kohdistuvat rasitukset, kuten jatkuva käyttötaajuinen jännite, ylijännitteet, hetkelliset ylijännitteet, kytkentäylijännitteet ja ilmastolliset ylijännitteet. Eristysrakenteiden jännitelujuus riippuu eristysrakenteiden mittojen ja muotojen lisäksi jännitemuodosta, polariteetista, likaantumisesta sekä ilmastollisista olosuhteista kuten paineesta, lämpötilasta ja kosteudesta. (ABB 2000, 1.)

Sähköverkkojen eristysrakenteet pyritään mitoittamaan siten, että laitteet kestävät jänniterasitukset ilman vaurioita niiden suunnitellun käyttöiän. Käytännössä ei ole mahdollista eikä taloudellisesti järkevää mitoittaa eristyksiä niin, ettei yli- tai läpilyöntejä koskaan tapahtuisi. Eristyskoordinaation tarkoitus on huolehtia siitä, että eristysrakenteiden jännitelujuus mitoitetaan suhteessa esiintyvien ylijännitteiden suuruuteen ja lukumäärään niin, että käyttöhäiriöiden ja laitevaurioiden määrä alenee taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. Mitoitus on optimi, kun kokonaiskustannukset ovat minimissään. Tällöin laitteiden jännitelujuuden lisäämisestä ja ylijännitesuojauksen tehostamisesta aiheutuvat kulut ovat yhtä suuret kuin keskeytys- ja vauriokustannusten pienentämisestä muodostuva säästö. Optimimitoitusta on käsitelty kuvassa 4.1. (Aro & al. 2015, 333, Elovaara & Haarla 2011, 66.)



Kuva 4.1 Eristyskoordinaation kustannusten minimointi (Aro & al. 2015, 336.)

Tärkeä osa eristyskoordinaatiota on ylijännitesuojien sijoituspaikkojen ja ominaisuuksien valinta. Ylijännitesuojien avulla ylijännitteet rajataan riittävän alhaisiksi, etteivät ne vahingoita eristysrakenteita. Pääsääntöiset ylijännitesuojat ovat kipinävälit ja venttiilisuojat. Pääpainona on suojata kalleimpia ja pisimmän korjausajan omaavia laitteita. Tällaisia laitteita ovat tehomuuntajat, kaasueristetyt kytkinlaitokset, kaapelit päätteineen ja jatkoksineen sekä generaattorit ja suuret moottorit. (Aro & al. 2015, 333.)

4.1 Ylijännitesuojaus teollisuuden toimistotilojen pienjänniteverkossa

Suomessa rakennusten sähköjärjestelmien ylijännitesuojaus ei ole yleensä pakollista. Ylijännitesuojausta edellyttävät SFS- ja CENELEC-standardit tilanteissa, joissa keskimääräinen salamatiheys on yli kaksi maasalamaa / km^2 vuodessa ja rakennukseen liittyy ilmajohto. (SFS 6000-4-44 2007, 58.) (CLC/TS 61643-12 2009, 81.) Mikäli vain toinen ehdoista täyttyy, ylijännitesuojausta edellytetään tilanteissa, joissa voi aiheutua välitöntä tai välillisesti hengenvaaraa henkilöille. Lisäksi vastaavia tilanteita ovat sellaiset, joissa ylijännitesuojauksen puuttuminen vaikuttaa julkisen palveluun tarjoamiseen sekä kaupalliseen tai teolliseen aktiviteettiin. Ylijännitesuojauksen tarpeellisuutta tarkastellaan erikseen tilanteissa, mikäli salamoinnilla ei ole välitöntä vaikutusta ihmisten tai ihmisryhmien turvallisuuteen. Suomen keskimääräinen salamatiheys on 0,4 maasalamaa / km^2 vuodessa. (ST 53.16, 2011, 8.)

Pienjännitejärjestelmän koordinoitu ylijännitesuojaus koostuu peräkkäisistä selektiivisesti toimivista ylijännitesuojista, joilla ylijännitteet pienennetään vaaditulle tasolle.

Rakennuksien ylijännitesuojausta edellytetään sellaisissa tapauksissa, joissa rakennukseen on toteutettu ulkoinen salamansuojausjärjestelmä tai mikäli rakennuksen sähkönsyöttö on otettu ilmajohtolinjasta. Lisäksi ylijännitesuojausta edellytetään rakennuksissa, joissa on käytössä elektronisia laitteita. Transientit aiheutuvat sähköverkon kytkentätoimenpiteistä, salamaniskuista ja sähköstaattisista purkauksista. (ST 53.16 2011, 13.) (SFS 6000-4-44 2012, 10.)

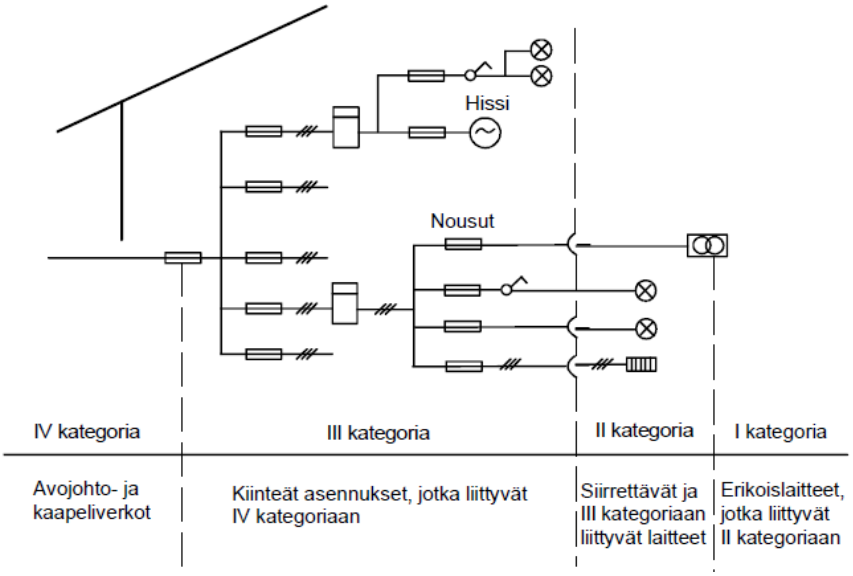
Sähköverkon suojauksen pääkomponentteja ovat jännitettä portaattomasti rajoittavat kipinävälit ja varistorit. Jännitettä kytkeviä pääkomponentteja ovat ilmaväli, kipinäväli, kaasupurkausputki ja tyristori. Virtaa rajoittavia pääkomponentteja ovat sulake, sulaketoiminnan vastus ja PTC-vastus. Kipinäväli, kaasupurkausputki ja varistori ovat karkeasuojia. Varistoria käytetään välisuojissa. Hienosuojissa käytetään myös kaasupurkausputkia, puolijohteita tai varistoria. (ST 53.16 2011, 11.)

Mikäli ylijännitesuojaus päätetään toteuttaa, tulee aluksi selvittää, vaaditaanko salamasuojaus ja sen osana tehokas ylijännitesuojaus vai tuleeko ylijännitesuojaus toteuttaa suojauksena pientaajuisilta ylijännitteiltä, kytkentäjännitteiltä tai epäsuorien salaman iskujen aiheuttamilta ylijännitteiltä. Liitteestä 1 on nähtävissä ylijännitesuojien luokittelutaulukko. (ST 53.16 2011, 11.)

4.2 Pienjännite-eristyskoordinaatio

Laitteiden ja järjestelmien ylijännitesuojaukselle asetetaan vaatimuksia laitteiden ylijännitekestävyyden mitoituksen kautta. Ylijänniteluokkia käytetään verkosta syötettyjen laitteiden luokitteluun. IEC 60664-1 standardissa pienjännitteen eristystasot on jaettttu neljään eristyskategoriaan, jotka ovat esitetty kuvassa 4.2. IV-luokan laitteet ovat kestävimpiä ja niiden syöksyjännitekestoisuus on suurin. (Annanpalo 2005, 122.)

- Kategoriaan I kuuluvat pistorasialiitännäiset laitteet
- Kategoriaan II kuuluvat kiinteästi asennetut sähkölaitteet kuten liedet
- Kategoriaan III kuuluvat pääkeskuksen jälkeen sijaitsevat ja kiinteät asennukset esim. kaapelit, kytkimet ja pistorasiat
- Kategoriaan IV kuuluvat rakennuksen sisääntulo ja pääkeskuksen laitteet, kuten sähkömittarit sekä johdonsuojakatkaisijat (Annanpalo 2005, 122.)



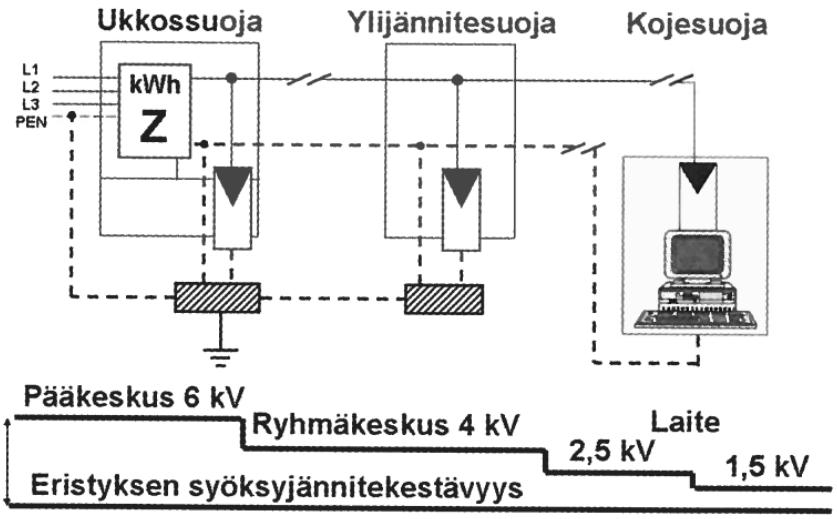
Kuva 4.2 Eristyskategoria pienjännitteellä (ABB 2000, 1.)

Eristyskategorioiden tarkemmat syöksyjännitearvot ovat nähtävissä 4.1 taulukosta. 230 V nimellisjännitteellä kiinteästi asennettujen laitteiden tulee kestää 2,5 kV:n transientti, ja pistorasiaan liitettävien laitteiden tulee kestää 1,5 kV:n transientti. Laitteiden asennuspaikat määräävät niiden eristyskategoriat. Laitteiden sopivaa ja tehokasta suojausta valittaessa käytetään taulukkoa 4.1, josta on nähtävissä, mihin jännitetasoon suojauksen on rajoitettava transientti.

Taulukko 4.1. Ylijänniteluokat ja syöksyjännitekestoisuudet. (ABB 2000, 1.)

Järjestelmän nimellisjännite V		Vaihejännite (AC tai DC)	Mitoituskestojännite (Syöksyjännite) 1)			
			Ylijännitekategoriat			
Kolmi-vaiheinen	Yksi-vaiheinen	V	I	II	III	IV
		50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
	120-240	150	800	1500	2500	4000
230/400		300	1500	2500	4000	6000
277/480						
400/690		600	2500	4000	6000	8000
1000		1000	4000	6000	8000	12000

Kuvassa 4.3 on esitetty vaadittavat syöksyjännitekestoisuudet 230 V:n laitteille eri järjestelmän pisteissä. Taulukosta 4.1. luettuna katsotaan vaihejännitesarakkeen 300 V riviä, josta eristyskategorialle määräytyvät edellytettävät arvot.



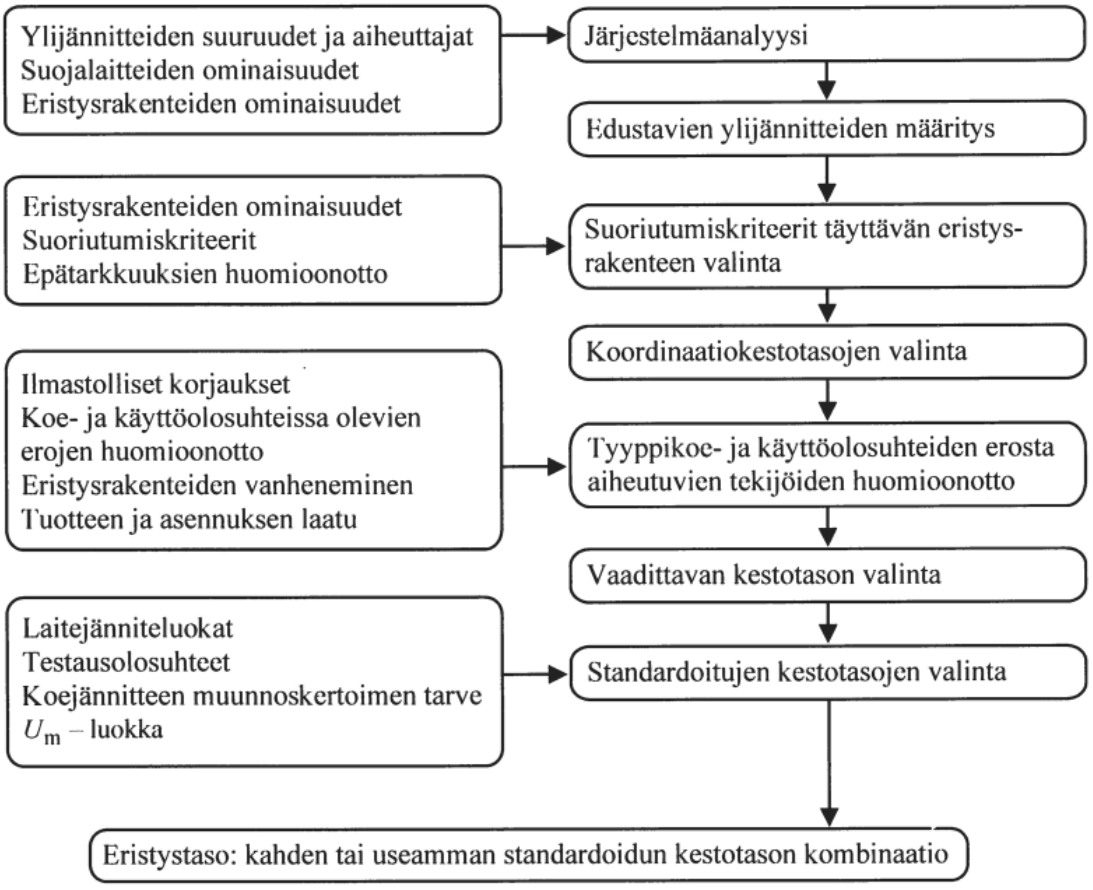
Kuva 4.3. Vaadittavat syöksyjännitekestoisuudet 230 V nimellisjännitteen laitteille. (Annanpalo et al, 122.)

4.3 Suur- ja keskijänniteverkon eristyskoordinaatio

Eristyskoordinaatiota voidaan kuvata kahdesta vaiheesta koostuvaksi prosessiksi, jossa ensin selvitetään tai arvioidaan erilaisten mitoittavien jänniterasitusten suuruus ja esiintymistiheys. Näiden perusteella määritetään vaaditut eristystasot. Tämä tapahtuu varmistamalla, että laitteet kestävät sijoituspaikallaan niihin kohdistuvat rasitukset. Seuraavaksi varmistetaan, että laitteilla on vaaditut jännitelujuusominaisuudet. Tämä varmennetaan jännitekokeilla, jotka suoritetaan tehdasvalmisteisilla laitteilla tyyppi- ja kappalekokeina. Lopullisella käyttöpaikalla koottavien rakenteiden tapauksissa varmistetaan, että esimerkiksi eristysrakenteisiin sisältyvät ilmavälit täyttävät määräyksissä tai standardeissa annetut minimimitat. Eristyskoordinaation toteutustavat ja laitteiden koejännitevaatimukset määrittelee IEC-standardi 60071-1. Käytettyjä toteutustapoja ovat konventionaalinen menetelmä ja tilastollinen menetelmä. (Aro & al. 2015, 333.)

IEC-standardin 60071-1 eristyskoordinaation vaiheet ovat nähtävissä kuvasta 4.4. Kaavion perusolettamuksena on, että suunnitellaan täysin uutta sähkövoimajärjestelmää. Aluksi perehdytään järjestelmäanalyysiin, jossa määritetään jänniterasitusten suuruus ja alkuperä, eristysrakenteiden jännitelujuusominaisuudet sekä suojalaitteiden suojausominaisuudet. Järjestelmäanalyysin aikana määritetään myös kriteeri, jolla arvioidaan eristysrakenteiden suoriutumista. Suoriutumiskriteerinä K_c käytetään usein vikatiheyttä, jonka arvo valitaan

aikaisemman käyttöhistorian, kokemuksen tai sähköverkon luotettavuus- ja käytettävyysanalyysien perusteella. (Aro & al. 2015, 333–334.)



Kuva. 4.4 Eristyskoordinaation vaiheet standardin IEC 60071-1 mukaan. (Aro & al. 2015, 334.) (IEC 2006)

Kun kokonaisuudessaan järjestelmäanalyysin ominaisuudet on hahmotettu, tulee seuraavaksi määrittää edustavat ylijänniterasitukset U_{rp}. Nämä määritetään IEC:n mukaisten jänniteluokkien perusteella. Ylijänniterasituksen amplitudi, jännitemuoto ja kesto määrittävät, mihin IEC:n ennalta määrättyyn jänniteluokkaan se kuuluu. Olemassa oleva luokittelu näkyy kuvasta 4.4. Jännitelujuutta kuvaa koordinaatiokestotaso. Suoriutumiskriteerin perusteella määritellään kerroin K_c, jonka avulla saadaan jännitelujuutta kuvaavat koordinaatiokestotasot U_{cw}. (Aro & al. 2015, 334.)

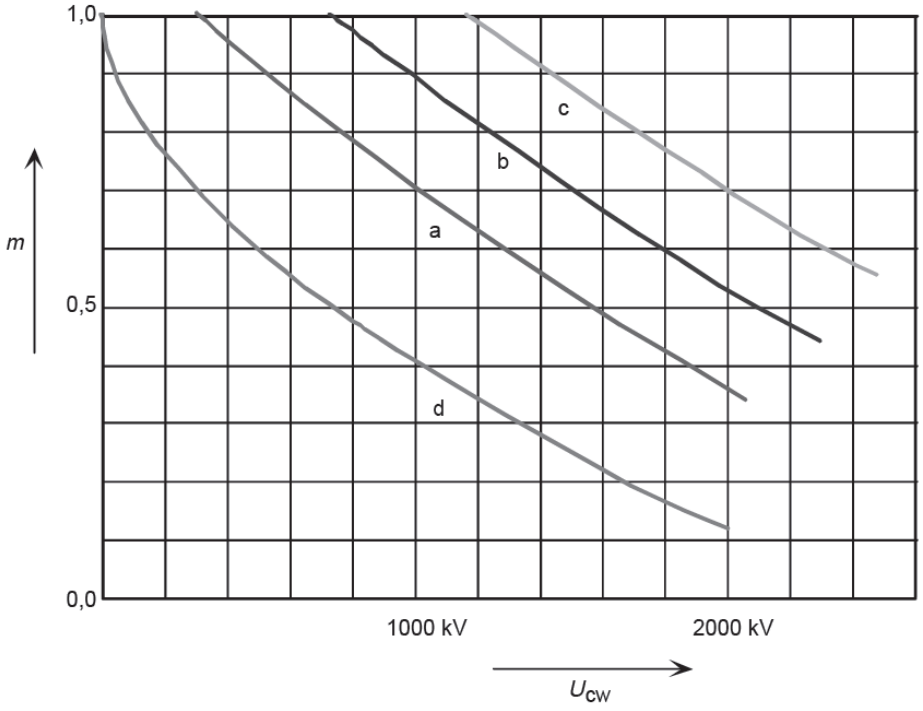
$$U_{cw} = k_c U_{rp} \tag{4.1}$$

Suoriutumiskerroin K_c huomioi eristysrakenteen suoriutumiskriteerin lisäksi tarkkuuden, jolla edustavat ylijännitteet kyetään määrittämään. Tilastollista menetelmää käyttäen kertoimen K_c määrittäminen on selkeätä verrattuna konvetionaaliseen menettelyyn. Jälkimmäiseksi mainitussa menettelyssä eristyskoordinaation toteuttajan tulee tuntea aikaisemmin sovellettujen kertoimien K_c ja käyttöhäiriöiden sekä eristysvaurioiden määrän välinen riippuvuus. Koordinaatiokestotasot määräävät eristykseltä vaadittavat jännitelujuusomaisuudet asennuspaikalla. Jotta koordinaatiokestotasot kyetään varmentamaan, tulisi kyetä huomioimaan laiteasennukset erot laboratoriossa ja käyttöpaikalla. Samalla tulisi kyetä huomioimaan tuotteen ja laadun hajonta sekä eristyksen vanheneminen. (Aro & al. 2015, 334–335.)

Ilmaeristysten jännitelujuus riippuu ilman lämpötilasta ja paineesta eli ilman tiheydestä sekä kosteudesta. Tämän vuoksi säätila huomioidaan korjauskertoimella K_t, joka saadaan käyttämällä tiheys- sekä kosteuden korjauskertoimia. (Aro & al. 2015, 378–379.) (IEC 60060-1.)

Merenpinnan suhteen lasketun korkeuden vaikutuksille voidaan määrittää korjauskerroin K_a. Kyseisen kertoimen laskentakaavassa käytetään järjestelmän korkeutta merenpinnan yläpuolella (H) ja parametria (m). Parametrin arvo riippuu jännitteen kestotasosta. Pientaajuisen jännitteen kestotasolla m-parametri saa arvon 0,5 ja salasyöksyjännitteen kestotasolla parametri saa arvon 1. Niinpä U_{cw} jännitelujuuden koordinaattitasojen vaihteluiden vaikutukset m-parametrin arvoon ovat nähtävissä kuvasta 4.5. (IEC 60071-2 1996, 99–100.)

$$K_a = e^{m(\frac{H}{8150})} \tag{4.2}$$



Kuva 4.5. Koordinaatiokestotasojen vaikutus ilmastokertoimen m-parametriin. a) vaihe-maa eristys b) pitkittäinen eritys c) vaihe-vaihe eristys d) tauko-taso-kipinäväli (IEC 60071-2 1996, 39.)

Muut tekijät, kuten laiteasennuksissa tulevat erot tai eristyksen vanheneminen voidaan yhdistää yhdeksi varmuuskertoimeksi K_s. Varmuuskertoimen arvoksi suositellaan IEC-60071-2 standardissa 1,15 sisäiselle eristykselle ja 1,05 arvoa ulkoiselle eristykselle.

Aikaisemmin käsiteltyjen korjauskertoimen K_t, varmuuskertoimen K_s ja jännitelujuutta kuvaavan koordinaatiokestotason U_{cw} avulla lasketaan vaadittavat kestotasot U_{rw}. Sisä- ja ulkotiloihin asennettavien eristeiden kanssa käytetään eri laskukaavoja. (Aro & al. 2015, 335.) (IEC 60071-2 1996)

Ulkotiloihin asennettavien eristeiden kanssa käytetään yhtälöä:

$$U_{rw} = K_s K_t U_{cw} \tag{4.3}$$

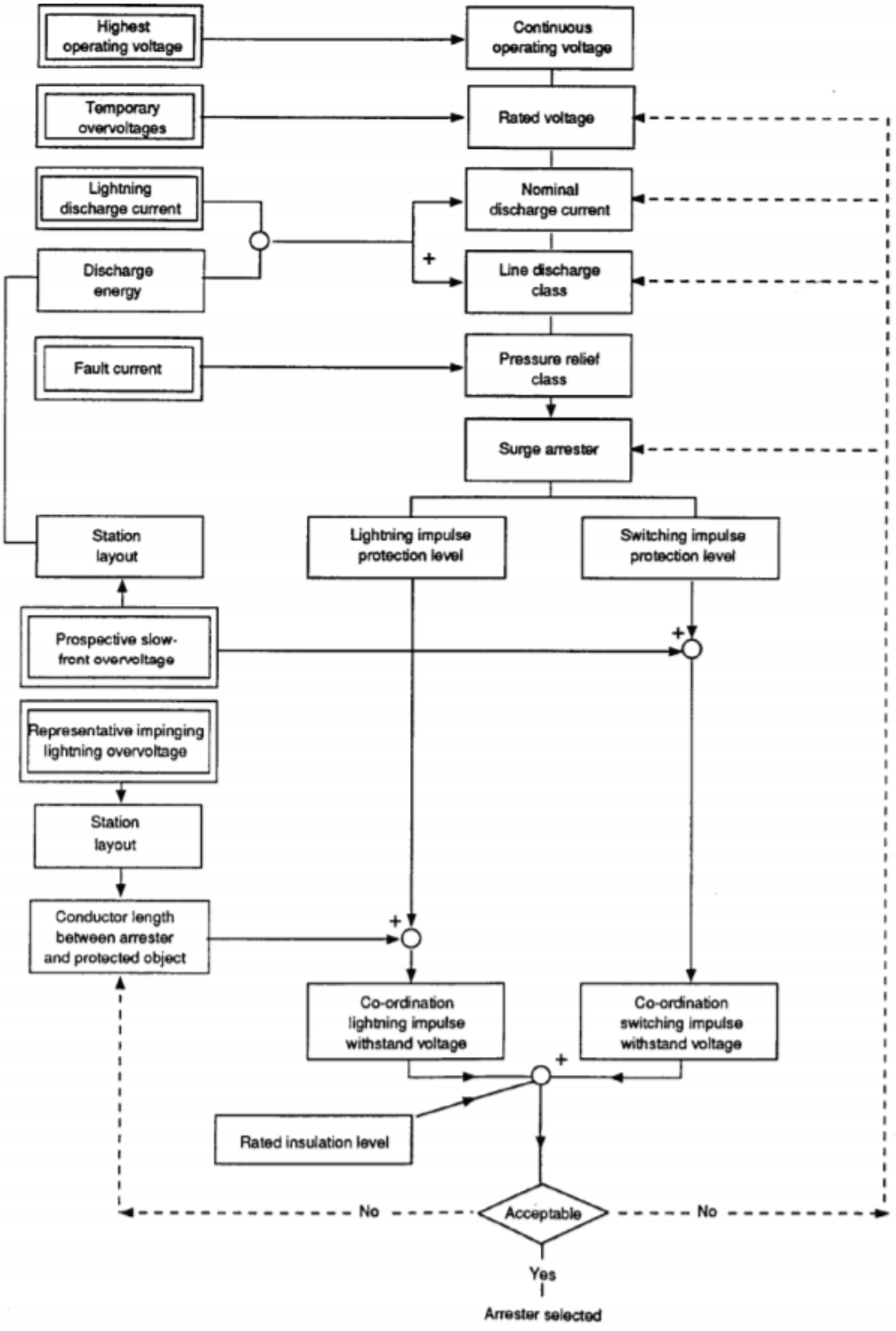
Sisätiloihin asennettavien eristeiden kanssa ei tarvitse ottaa huomioon kerrointa K_t, johon vaikuttavat säätilojen vaihtelut. Tällöin helposti jää huomioimatta asennuskorkeudesta johtuva paineen muutosta korjaava kerroin K_a, joka on sisällytetty korjauskertoimeen K_t. Sisätilojen asennettavien eristeiden kanssa yhtälössä korvataan korjauskerroin K_t korjaavalla kertoimella K_a.

$$U_{rw} = K_s K_a U_{cw} \tag{4.4}$$

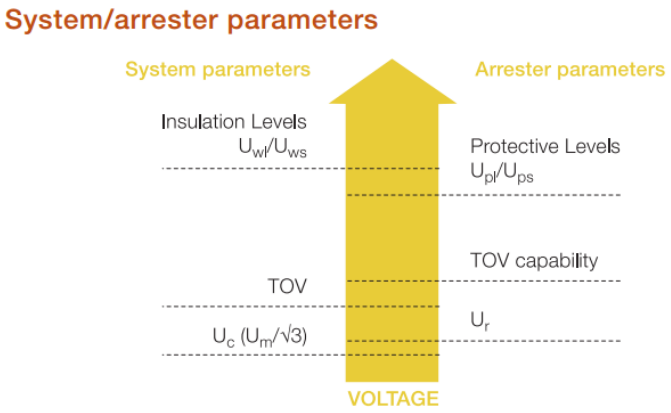
Eristyskoordinaation perimmäisenä tarkoituksena on alentaa ylilyöntien, eristysvaurioiden ja käyttöhäiriöiden määrää taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. Tämä päämäärä saavutetaan laitteiden oikeanlaisella sähkölujuuden valinnalla ja soveltamisella. Mitoitustaso ja suojaustavan valinta riippuvat käyttökohteen ominaisuuksista, jolloin loppuratkaisut tulee soveltaa vastaamaan käyttökohteen ominaisuuksien tarpeisiin soveltuvia suojausratkaisuja. (Elovaara & Haarla 2011, 66.)

Kuvasta 4.6 on nähtävissä IEC 60099-5 standardin ylijännitesuojan valintaprosessi kaaviomuodossa. Kaaviolla osoitetaan valintaprosessissa määritettävät tekijät. Alla on eritelty kaavion eri vaiheet. Kuvassa 4.7 on eritelty suojattavan järjestelmän ja suojan parametrit.

- Suojan jatkuva käyttöjännite U_c, määrittyy järjestelmän suurimman käyttöjännitteen perusteella
- Suojan nimellisjännite, määrittyy järjestelmän lyhytaikaisten ylijännitteiden perusteella
- Määritetään suojan nimellispurkausvirta I_n ja salamavirran huippuarvo. Samalla määritetään suojan luokka, johon vaikuttavat suojan läpi kulkeva salamapurkausvirta, sen todennäköisyys sekä verkon muodostamat tarpeet.
- Suojan paineenpurkausluokka, määrittyy vikavirran mukaan
- Valitaan suoja, joka täyttää edellä mainitut ehdot
- Asetetaan suojan kytkentä- ja salamasyöksyjännitteen suojausominaisuudet.
- Suoja tulee asentaa mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta
- Asetetaan suojattavan kohteen salamasyöksyjänniteen koordinaatiokestotaso
- Asetetaan laitteiden nimellinen eristystaso



Kuva 4.6 Standardinmukainen ylijännitesuojan valintaprosessi (IEC 60099-5: 13)

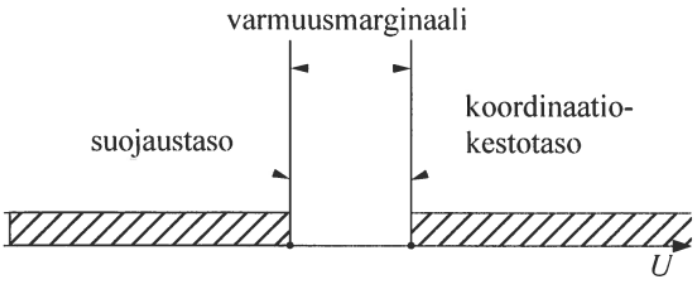


Kuva 4.7. Suojattavan järjestelmän ja venttiilisuojan jännitteet (ABB 2016, 7.)

4.3.1 Konventionaalinen menetelmä

Konventionaalista menettelyä käytetään silloin, kun ylijännitteiden tilastollisista ominaisuuksista ei ole tietoa tai ylijännitteiden ominaisuuksia ei voida kuvata tilastollisesti. Tällaisia tarkasteltavia tapauksia ovat esimerkiksi laitteiden sisäiset eristykset tai venttiilisuojien vaikutukset. (Aro & al. 2015, 335.)

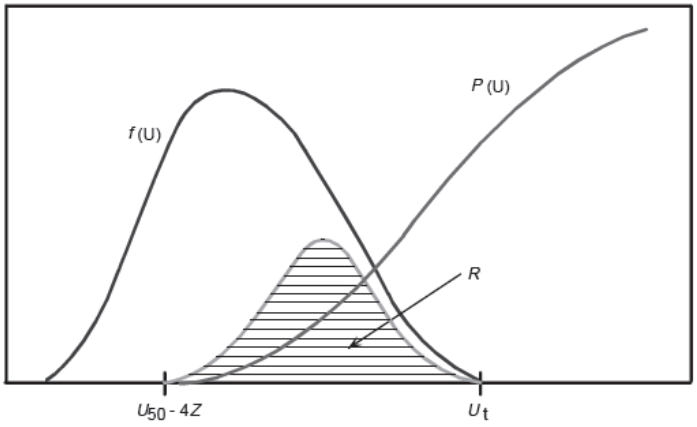
Eristyskoordinaation toteutumisessa tunnetaan käsitteet kestotaso U_w ja suojaustataso U_p. Suojaustasolla tarkoitetaan jännitettä, jonka ylittäviä arvoja esiintyy ylijännitesuojia käytettäessä harvoin ja kestotasolla tarkoitetaan jännitearvoa, jolla eristysrakenteen yli- tai läpilyönnin todennäköisyys on pieni. Eristyskoordinaatiossa jätetään kestotason ja suojaustason välille marginaali, jolla huomioidaan esimerkiksi eristyksen vanhenemisesta johtuva jännitelujuuksien väheneminen tai venttiilisuojan suojaustason nousu suurilla purkausvirroilla. Tämä on esitetty kuvassa 4.8. (Elovaara & Haarla 2011, 66.)



Kuva 4.8 Marginaalin käyttö eristyskoordinaatiotarkastelussa (Aro & al. 2015, 336.)

4.3.2 Tilastollinen menetelmä

Tilastollisessa menetelmässä on otettu huomioon ylijännitteisiin sekä jännitelujuuteen liittyvät satunnaisuudet ja sitä sovelletaan järjestelmissä joissa suurin sallittu jännite U_m on vähintään 300 kV. Tilastollista menettelyä käytetään usein loivilla transienttiylijännitteillä ja siinä tilastollisessa eristyskoordinaatiossa lasketaan vaurioitumisriski. Tämä riski on todennäköisyys, jolla esimerkiksi tietyn kytkentätapahtuman aiheuttama ylijänniterasitus ylittää eristysrakenteen jännitelujuuden. Jotta vaurioitumisriski kyetään laskemaan, tulee tietää ylijännitteiden tilastollinen todennäköisyystiheys *f(U)* ja ylilyönnin todennäköisyys *P(U)* (Elovaara & Haarla 2011, 68.)



Kuva 4.9 Yli- ja läpilyöntiriskien määritelmä (IEC 60071-2 1996, 34.)

Kuvassa 4.9 viivoitettu pinta-ala kuvaa vaurioitumisriskiä. Kuvasta on nähtävissä, että ylijännitteiden rajoittaminen ja jännitelujuuden suurentaminen pienentävät riskiä.

4.3.3 Standardoidut koejännitteet

Koejännitteiden huippuarvot ja koejännitemuodot määritellään IEC 60071-1 -standardissa, jonka perusteella todennetaan eristysmitoituksen riittävyys.

Eristysrakenteen jännitelujuusmitoituksen riittävyyden osoittamiseen tarvitaan kaksi eri jännitearvoa, jotka ovat IEC:n määrittämiä. Nämä on jaettu suurimman käyttöjännitteen U_m mukaan ryhmiin. Ryhmässä 1 mitoitettavina mitoitettavina koejännitemuotoina käytetään salamasyöksyjännitettä ja käyttötaajuista vaihtojännitettä, kun laitteen suurimman käyttöjännitteen arvo on $1\ kV < U_m \leq 245\ kV$. Käyttöjännitteen ollessa yli 245 kV ryhmässä 2 vaihtojännitekoe korvataan kytkentäsyöksyjännitteellä suoritettavalla testauksella. (Aro & al. 2015, 338.)

Molemmille ryhmille on määritetty eristystasoarvoparit IEC 60071-1 standardin mukaan. Ryhmään 1 kuuluvien laitteiden eristys määritetään etsimällä taulukosta 4.2 laitteen suurimmalle käyttöjännitteelle vastaava standardin mukainen pientaajuisen jännitteen kestotaso PFWV ja salamasyöksyjännitteen kestotaso LIWV. Taulukosta 4.2 on nähtävissä värjättynä ryhmä 1:n kuuluvat Suomessa tyypillisesti käytetyt käyttöjännitteet, jotka ovat 12, 24, 52, ja 245 kV. (Elovaara & Haarla 2011, 63.)

Ryhmään 2 kuuluvien laitteiden eristys määritetään etsimällä laitteen suurimmalle käyttöjännitteelle vastaava standardien mukainen kytkentäjännitteen kestotaso SIWV ja LIWV. Suomessa yleisimmin käytetty ryhmä 2:n suurin käyttöjännite on 420 kV. (Elovaara & Haarla 2011, 63.)

Koejännitteiden valintajärjestykseen standardi ei anna suositusta, jolloin käyttäjän on päätettävä verkko-ominaisuuksien pohjalta, kumpi käytettävissä olevista koejännitteistä valitaan. Ensimmäinen koejännitearvon valitseminen rajaa toisen arvon vaihtoehtoja. Esimerkiksi mikäli koejännite kytkentäsyöksyjännitteellä on 1050 kV, koejännite salamasyöksyjännitteellä voi olla 1300 kV tai 1425 kV. (Aro & al. 2015, 339.)

Taulukko 4.2 Ryhmä 1:n standardin IEC 60071-1 mukaisia eristystasoarvopareja $1\,kV < U_m \leq 245\,kV$. Suomessa valintapauksissa sovellettujen eristystasot on väritetty.

Highest voltage for equipment (U_m) kv (r.m.s. value)	Standard rated short-duration power-frequency withstand voltage kv (r.m.s. value)	Standard rated lightning impulse withstand voltage kv (peak value)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5	38	75
		95
21	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
100	150	380
	185	450
123	185	450
	230	550
145	185	450
	230	550
	275	650
170	230	550
	275	650
	325	750
245	275	650
	325	750
	360	850
	395	950
	460	1050

Taulukko 4.3 Ryhmä 2:n standardin IEC 60071-1 mukaisia eristystasoarvopareja $245\ kV > U_m$. Suomessa valintapauksissa sovellettujen eristystasot on väritetty.

Highest voltage for equipment (U_m) kv (r.m.s. value)	Standard rated switching impulse withstand voltage			Standard rated lightning impulse withstand voltage kv (peak value)
	Longitudinal insulation kv (peak value)	Phase-to-earth kv (peak value)	Phase-to-earth (ratio to the phase-to-earth peak value)	
300	750	750	1,5	850
				950
	750	850	1,5	950
				1050
362	850	850	1,5	950
				1050
	850	950	1,5	1050
				1175
420	850	850	1,6	1050
				1175
	950	950	1,5	1175
				1300
	950	1050	1,5	1300
				1425
550	950	950	1,7	1175
				1300
	950	1050	1,6	1300
				1425
	950	1175	1,5	1425
	1050			1550
800	1175	1300	1,7	1675
				1800
	1175	1425	1,7	1800
				1950
	1175	1550	1,6	1950
	1300			2100

4.3.4 Eristyskoordinaation toteuttaminen käytännössä

Eristyskoordinaatiotarkastelua tehdessä tulee huomioida verkko kokonaisuutena, jolloin huomioidaan johdot, kaikki laitteet sisäisine ja ulkoisine eristyksineen sekä jänniterasitusmuodot. Laaja-alainen selvitys on tarpeen, kun otetaan käyttöön uusi siirtojännite tai muutetaan olemassa olevan verkon mitoitussääntöjä eristysmitoituksen osalta. Muutoin eristyskoordinaatiotarkastelut rajoittuvat lähinnä ylijännitesuojien suojausarvojen riittävyyden osoittamiseen ja suojien sijoituspaikkojen määrittämiseen. (Aro & al. 2015, 339.)

5 Ylijännitesuojat

Ylijännitesuojien tarkoitus on pienentää verkon ylijännitteiden suuruuksia ja niitä käytetään yleisimmin transienttiluonteisten ylijännitteiden yhteydessä. Ylijännitesuojia ei käytetä pientaajuisen ylijännitteiden rajoittamiseen, koska tällöin suojilta edellytetään ylijännitteiden pitkän keston seurauksena hyvin suurta energianpurkauskykyä. Pientaajuinen ylijännite kuitenkin huomioidaan ylijännitesuojien mitoituksessa, koska suojien tulee kestää tavallisen käyttötilanteen jännite- ja virtarasituksia. (Aro & al. 2015, 343.)

Ylijännitesuojauksessa käytettyjä menetelmiä ovat avojohtojen ukkosjohtimet, pylväsmaadoitukset, suojakipinävälit, venttiilisuojat ja tehokas verkonjärjestelmäsuunnittelu. Edellä mainituilla laitteita ja menetelmiä hyödynnetään erilaisissa ympäristöissä erilaisiin ylijänniteluokkiin. Käytettävät menetelmät vaihtelevat käyttökohteen tarpeiden mukaan.

Tavallisimmin käytetyt ylijännitesuojat ovat venttiilisuojia, jotka ovat kipinävälittömiä metallioksidisuojia. Suojia käytetään kaikilla jännitetasoilla. Jakelujännitteillä on myös käytetty kipinävälejä ylijännitesuojauksessa. (Aro & al. 2015, 343.) Tehokkaimmin ylijännitettä rajoitetaan kytkemällä venttiilisuoja suojattavan laitteen rinnalle yleensä vaiheen tai maan väliin. Toisinaan venttiilisuojat joudutaan kytkemään vaihejohtimien väliin. (Elovaara & Haarla 2011, 36.)

Suomessa ylijännitesuojille suojataan vain tärkeimmät laitteet kuten tehomuuntajat ja GIS-laitokset. Toinen perusmenettelytapa on sijoittaa suojat kaikille asemille tuleville johdoille johdon puolelle johtokatkaisijaa. Edellä mainittu menetelmä on kuitenkin vähemmän käytössä Suomessa. Pääsääntöisesti jokainen tehomuuntajat varustetaan omilla suojilla ja GIS-laitoksissa kaikki avojohto- sekä muuntajalähdöt varustetaan ylijännitesuojilla. On todettu, että edellä mainittu menettely on riittävä, sillä Suomen salamaniskutiheys on alhainen ja samalla vikatilastot osoittavat, että ylijännitesuojauksen tehostamiseen ei ole tarvetta. (Aro & al. 2015, 343.)

Avojohdon ylijännitesuojien avulla kyetään pienentämään ukkosesta aiheutuvia häiriöitä ja jännitekuoppien määrää, niin ratkaisua ei voida pitää Suomessa kannattavana suojauskustannusten ja alhaisen salamaniskutiheyden vuoksi. Teollisuusprosessien puolella

jännitekuoppien ongelmiin voidaan saada parannuksia helpommin ja kustannustehokkaammin. (Aro & al. 2015, 343.)

Laaja-alainen transienttiylijännitetason alentaminen edellyttää ylijännitesuojien käyttämistä monissa verkon eri kohdissa, jolloin tehokas ylijännitteiden rajoituskeino on verkon järjestelmäsuunnittelu; ennen kaikkea tähtipisteen käsittely. Käyttötaajuisten ylijännitteiden rajoittamiseen venttiilisuojien energianpurkamiskyky ei riitä erikoistapauksia lukuun ottamatta. Tällainen erikoistapaus on esimerkiksi sarjakondensaattoreiden yli vaikuttavien ylijännitteiden rajoittaminen. (Elovaara & Haarla 2011, 237.)

5.1 Ukkosjohtimet ja pylväsmaadoitukset

Avojohtoverkkojen ukkosuojauksessa voidaan käyttää ukkosjohtimia ja näiden edellyttämiä pylväsmaadoituksia. Ukkosjohtimilla estetään suoraan vaihejohtimiin osuvat salamaniskut ja ne parantavat maasulkusuojauksen suojareleistyksen toimintaa. Ukkosjohtimille soveltuvia käyttökohteita ovat 400 kV:n ja 200 kV:n johtojen lisäksi 110 kV:n johdot. Ukkosjohtimia käytetään kytkinasemien läheisyydessä tai koko johdoilla. Kytkinasemien suojauksessa ukkosjohtimilla pyritään välttämään jyrkät syöksyaallot. Pylväsmaadoituksen avulla pyritään vähentämään salamaniskujen yhteydessä muodostuvia takaiskujen määrää. Samalla tehostetaan ukkosjohtimien tehokasta toimintaa. Mikäli pylväsmaadoitus jätetään pois, niin ukkojohtimilla varustettujen 110 kV:n johtojen ukkoshäiriömäärää kasvaa merkittävästi. (Elovaara & Haarla 2011, 32–35.)

5.2 Kipinävälit

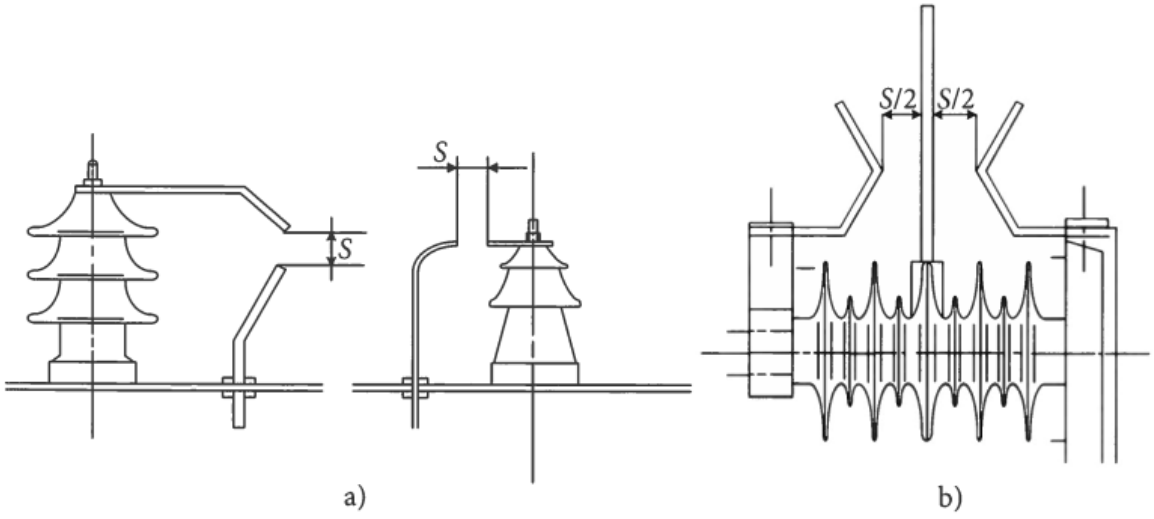
Kipinävälejä käytetään suojakipinäväleinä sekä laitteiden sisäisen jännitelujuuden koordinoitiin. Sisäisen jännitelujuuden koordinoinnissa on kyse kytkinlaitokselle tulevien ja siellä olevien laitteiden ylijännitteiden rajoittamisesta laitteiden kestotason alapuolelle. Kuitenkaan Suomessa kipinäväliä ei käytetä tässä tarkoituksessa. Maailmalla kipinävälejä on käytetty rajoittamassa kytkinasemille tulevia jyrkkiä tai loivia transienttiylijännitteitä. Käytettyjä kipinävälirakenteita ovat muuntajan läpivientieristimien rinnalle kytkettävät yksivälisuojat ja suurjännite-erottimien yhteyteen asennettava lintuesteellä varustettu kaksivälisuoja. Kipinävälirakenteita käytetään yleisesti avojohtojen eristinketjujen

yhteydessä sähkökenttä muotoa muuttavina ja valokaaren kulkua ohjaavina elektrodeina. (Elovaara & Haarla 2011, 35.)

Suomessa kipinävälejä on käytetty jakeluverkoissa ja vallitsevan käytännön mukaan alle 200 kVA:n pylväsmuuntamot varustetaan suojakipinävälillä. Niiden tarkoitus on alentaa ulkoisen eristyksen jännitelujuus muuntajan sisäisen eristyksen jännitelujuuden alapuolelle. Suomessa kipinävälin elektrodien välimatka valitaan niin suureksi, että pienitaajuiset ylijännitteet ja loivat transienttijännitteet eivät johda ylilyöntiin kipinävälissä. Toisaalta elektrodiväli on valittava mahdollisimman lyhyeksi, jotta jyrkät transienttiylijännitteet rajoittuisivat alemmaksi kuin suojattavan kohteen sisäisen eristyksen kestotaso. Kipinävälien rakennetta on esitelty kuvassa 5.1. (Elovaara & Haarla 2011, 35–36.)

Kipinävälin etuna on yksinkertaisuus ja halpuus, mutta sen haittoja ovat:

- Kipinävälin toiminta aiheuttaa maasulun, jonka poistaminen vaatii verkon kytkinlaitteiden toimintaa.
- Kipinävälin toiminta aiheuttaa jännitteen romahdusmaisen alenemisen, joka on vaarallinen käämityksiä sisältäville laitteille.
- Luotettavaa suojausta vaikeuttaa kipinävälin ylilyöntijännitteen suuri hajonta.
- Jyrkillä syöksyjännitteillä ilmenee kipinävälin ylilyöntijännitteen suuri hajonta. (Elovaara & Haarla 2011, 36.)



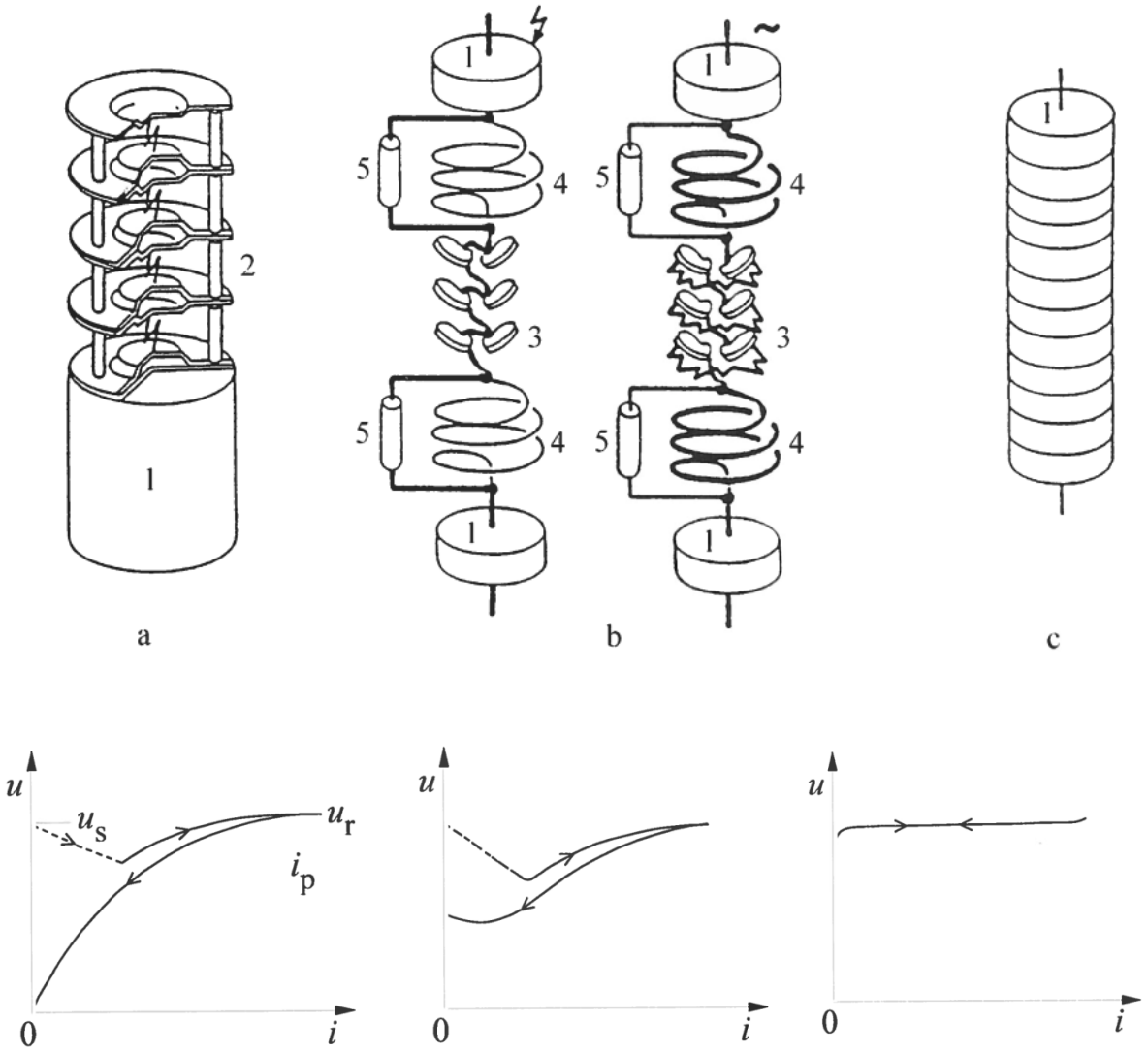
Kuva 5.1 Pylväsmuuntamoiden (a) ja pylväserottimien yhteydessä sovellettavia suojakilpivälirakenteita. (Elovaara & Haarla 2011, 35.)

Käytännössä kipinävälin elektrodien etäisyydellä, rakenteella ja muotoilulla vaikutetaan kipinävälin ylilyöntijännitteeseen salamasyöksyjännitteellä. Suomessa 24 kV:n verkossa sovelletaan yksivälisuojien arvona s = 80 mm ja 100 mm. Kaksivälisuojilla arvot ovat s = 60 mm ja s = 80 mm. (Elovaara & Haarla 2011, 36.)

5.3 Venttiilisuojat

Ensimmäiset ylijännitesuojat olivat kipinävälillisiä ja epälineaarisella piikarbidivastuksella varustettuja konventionaalisia kipinävälisuojia. Näistä siirryttiin suojan läpi kulkevan virran pienentämisen vuoksi ja energianpurkamiskyvyn suurentamisen johdosta aktiivikipinäsuojiin, jotka otettiin laajemmin käyttöön 1960-luvulla. Aktiivikipinäsuojat pidensivät kipinäväleissä palavan valokaaren pituutta ja sammuttivat valokaaren nopeammin kuin konventionaaliset suojat. Tämän jälkeen markkinoille tuli 1980-luvlla metallioksidisuojat, joilla on vielä suurempi energianpurkamiskyky. Lisäksi ne kykenevät toimimaan olosuhteissa, joissa virralla ei ole luonnollista nollakohtaa. Tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi tasasähköjärjestelmät. (Elovaara & Haarla 2011, 37.)

Venttiilisuojatekniikka on jaettavissa kipinävälittömiin tai kipinävälillisiin venttiilisuojiin. Yleisimmät venttiilisuojat ovat tyypiltään levykipinävälisuojia, magneettipuhallussuojia tai kipinävälittömiä metallioksidisuojia. Nykypäivänä käytettävät ylijännitesuojat ovat pääsääntöisesti kipinävälittömiä metallioksidisuojia. Ne perustuvat epälineaariseen vastusmateriaaliin, jolloin suojan toimiessa ei tapahdu äkillistä jännitteen muutosta. Tämän ansiosta kipinäväliä ei tarvita. Metallioksidisuojat ovat aikaisempiin venttiilisuojiin verrattuna rakenteeltaan yksinkertaisia. (Aro & al. 2015, 344.) Kuvasta 5.2 on nähtävissä venttiilisuojien rakenteellisia eroavaisuuksia.



Kuva 5.2 Ylijännitesuojat ja niiden ylijännitteen rajoittuminen venttiilisuojan toimiessa; a) levykipinävälisuoja, b) magneettipuhallussuoja, c) metallioksidisuoja. (Aro & al. 2015, 344-346.)

Kuvassa 5.2 on esitetty venttiilisuojien rakenteiden lisäksi ylijännitteen rajoittuminen ja suojan toimintapisteen siirtyminen toiminnan aikana. Venttiilisuojien toimintajännitteiden suuruudet sekä suhteet ovat riippuvia venttiilisuojan rakenteesta. Lisäksi kuvasta on nähtävissä venttiilisuojan rakenteen osat: numero yksi on epälineaarinen vastus, numero kaksi ja kolme ovat kipinävälit, numero neljä on puhalluskäämit ja numero viisi on puhalluskäämien ohitusvastukset. (Aro & al. 2015, 344.)

Levykipinäväliventtiilisuojan rakenne kostuu levymäisillä elektrodeilla osiin jaetuista kipinävälistä ja piikarbidivastuksesta (SiC). Kipinävälien muotoilulla on pyritty siihen, että syttymisjännitteen hajonta pysyisi posliinikuoressa. Kipinävälin jakaminen useampaan eri

osaan vähentää syttymisjännitteen hajontaa ja loiventaa syttymistä seuraavaa jyrkkää jännitemuutosta. (Aro & al. 2015, 344.)

Epälineaarisella vastuksella rajoitetaan kipinävälin toiminnasta syntyvä maasulkuvirta pieneksi, jotta valokaari sammuu itsestään jännitteen nollakohdassa. Vastuksen resistanssin kuuluisi olla pienillä virroilla pieni ja suurilla virroilla suuri. Venttiilisuojalta edellytetään kykyä purkamaan suuria energioita ilman, että sen sammumiskyky vaarantuu tai suojausominaisuudet muuttuvat. Venttiilisuojan energianpurkauskyky on alhainen, mikäli se on varustettu levykipinäväleillä. Tämän aiheuttavat suuret pitkäaikaiset purkausvirrat, joka kuluttavat kipinävälien elektrodeja ja muuttavat kipinävälien syttymisominaisuuksia. (Aro & al. 2015, 344.)

Metallioksidivastuksen materiaalina käytetään sinkkioksidia (ZnO). Tämän lisäksi vastus sisältää pieniä määriä muita metallioksideja, jotka vaikuttavat merkittävästi vastuksen sähköisiin ominaisuuksiin. (Aro & al. 2015, 344.) Metallioksidin vastusmateriaali ei pysy käytön aikana muuttumattomana ja suojan vastuselementtien kautta normaalitilankin vuotovirta muuttaa vähitellen vastusmateriaalia. Tämän lisäksi kosteuden vaikutuksesta sisäinen jännitteenjakauma häiriintyy. Edellä mainitut tekijät yhdessä muuttavat vastuksen resistiiviset ominaisuudet käytön aikana ja vuotovirta alkaa suurentua. Suoja saattaa tuhoutua termisen ylikuormituksen vuoksi. (Aro & al. 2015, 349–350.)

Venttiilisuojia voidaan käyttää myös pienjänniteverkoissa. Pienjänniteverkkojen ylijännitesuojaus voidaan jakaa kahtia jakelumuuntajan suojaamiseen ja kuluttajalaitteiden suojaamiseen. Yleisesti verkkoyhtiöiden näkökulmasta pienjänniteverkojen ylijännitteiden aiheuttamat muuntajavauriot tai kWh-mittarivauriot ovat vähäisiä, eivätkä yhtiöt ole katsoneet pienjänniteventtiilisuojien hankkimista tarpeelliseksi. Pienjänniteverkkojen ylijännitesuojausta tarkasteltaessa on huomioitava pienjännitejohdon rakenne. Suomessa käytetään ilmaeristeistä avojohtoa ja riippukierrejohtoa AMKA:a. Riippukierrejohdossa muovieristeiset alumiiniset virtajohtimet ovat kierretty paljaan seosalumiinisen kannatusköyden ympärille, joka toimii nollajohtimena. AMKA:n nollajohtimen maadoittamisella noin 300–500 metrin välein ylijännitteiden suuruutta kyetään rajoittamaan siten, että venttiilisuojan käyttö on tarpeetonta. (Elovaara & Haarla 2011, 39–40.)

5.4 Ylijännitesuojien asennus

Venttiilisuojien jännitteen jakauman lineaarisuus on tärkeää kaikille venttiilisuojille, mutta sen merkitys korostuu pitkillä, useista yksiköistä koostuvilla suojilla. Jännitteenjakauma linearisoidaan kipinäväliventtiilisuojilla sisäisin ohjausvastuksin tai –kondensaattorein ja käyttämällä ulkoista, suojan yläosassa sijaitsevaa kapasitiivisesti vaikuttavaa ohjauselektrodia. Metallioksidisuojilla ulkoista ohjausta käytetään samalla tavalla kuin kipinäväliventtiilisuojillakin, mutta sisäistä ohjausta ei tarvita. Suojavalmistajat ilmoittavat vähimmäisetäisyydet, mitkä jätetään suojan ja maadoitetun tai jännitteellisen kohteen väliin, jotta ulkoinen kapasitiivinen ohjaus ei häiriintyisi. Etäisyyssuositukset vaihtelevat valmistajan mukaan, mutta karkeasti ilmaistuna minimietäisyys on suojan pituuden luokkaa. (Aro & al. 2015, 362.)

5.5 Ylijännitesuojien ominaissuureet

Ylijännitesuojia käytettäessä on tunnettava suojatyypistä riippuvat ominaisuussuureet, jotka ovat määritelty IEC-standardeissa 60099-1 ja 60099-4. Seuraavaksi tarkastellaan kipinävälillisten ja metallioksidi venttiilisuojien ominaissuureiden poikkeavuudet. (Aro & al. 2015, 350.)

5.5.1 Metallioksidisuojan ominaissuureet

Tärkeimpiä metallioksidisuojan ominaisuuksia ja suojauskykyä kuvaavia suureita ovat sen jatkuva käyttöjännite, käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyky, mitoitusjännite, nimellispurkausvirta, jäännösjännite sekä suojaustaso. Ominaisuudet käsitellään alla tarkemmin. (IEC 60099-4 1998, 139.)

- Suurin jatkuva käyttöjännite U_c, joka saa jatkuvasti vaikuttaa suojan yli.
  Usein 0,8 * U_r.
- Mitoitusjännite U_r kuvaa suurinta suojan yli vaikuttaa käyttötaajuista jännitettä, jolla suoja toimii oikein IEC-standardin mukaisessa toimintasyklikokeessa
- Nimellispurkausvirta I_n on suurin syöksyvirta, jolla suoja suunnitellaan toimivaksi
- Jäännösjännite U_{res} on suojan ollessa johtavassa tilassa suurin jännite, joka vaikuttaa suojan yli.

- Suojaustasona salamasyöksyjännitteellä on jäännösjännite jyrkällä virtapulssilla tai jäännösjännite nimellispurkausvirralla riippuen kumpi on suurempi. (IEC 60099-4 1998, 139.)
- Käyttötaajuisen jännitteen sietokyky U_{TOV} ilmentää ylijännitteen kestoajan funktiona suurimman käyttötaajuisen ylijännitteen, jonka suoja sietää rikkoontumatta tai joutumatta termisen epästabiiliuden alueelle.

5.5.2 Kipinäväliventtiilisuojan ominaissuureet

Kipinäväliventtiilisuojille ilmoitetaan myös jäännösjännite, nimellispurkausvirta ja johtopurkauskyky kuten metallioksidisuojillekin. Tämän lisäksi on tiedettävä kipinävälisuojilla nimellisjännite ja syttymisjännite. Jäännösjännitteen määrittely poikkeaa metallioksidisuojilla käytettävistä. Seuraavaksi käsitellään edellä luetellut ominaisuudet. (IEC 60099-1 1991, 93.)

- Nimellisjännite U_R on käyttötaajuisen vaihejännitteen suurin tehollisarvo, jolla kipinävälisuoja toimii oikein; oleellisin ominaissuure kipinäväliventtiilien mitoituksen kannalta.
- Syttymisjännite U_S on jännite, jolla kipinävälillä varustettu venttiilisuoja siirtyy johtavaan tilaan, eli syttyy.
- Jäännösjännite U_{res} on suojan ollessa johtavassa tilassa suurin jännite, joka vaikuttaa suojan yli.
- Nimellispurkausvirta I_n on suurin syöksyvirta, jolla suoja suunnitellaan toimivaksi
- Suojaustaso määritetään salama- ja kytkentäsyöksyjännitteille. Kytkentäsyöksyjännitteellä suojaustasoa ilmentää syttymisjännite standardien kytkentäjännitepulssilla. Salamasyöksyjännitteellä valinnassa käytetään suurinta jännitteen arvoa seuraavista jännitteistä: syttymisjännite salamasyöksyjännitteellä, jäännösjännite nimellispurkausvirralla tai rintasyttymisjännite lineaarisesti nousevalla salamasyöksyjännitteellä jaettuna luvulla 1,15. Jakajaa käytetään, koska sisäisen eristyksen jännitelujuuden jyrkällä ja lineaarisella jännitteellä katsotaan olevan 15 % suurempi jännite kuin tavallisella jyrkällä transienttiylijännitteellä. (IEC 60099-1 1991, 93.)

5.6 Transienttien rajoittaminen

Pääsääntöisesti pientaajuisten ylijännitteiden suuruuteen vaikutetaan verkkosuunnittelulla. Tällöin tulee tiedostaa ja välttää toimenpiteet, jotka saattavat aiheuttaa verkossa ylijännitteitä. Ehkäiseviä toimenpiteitä ovat esimerkiksi verkon tehokas maadoittaminen ja riittävän reaktoriliitännän pito verkossa. Lisäksi pätötehohäviöiden tarkoituksenmukaisella lisäyksellä, kuten releistyksellä, jännitteensäätölaitteilla ja resonanssitilanteissa vaimennuksella vaikutetaan pientaajuisten ylijännitteiden suuruuteen. (Elovaara & Haarla 2011, 30.)

Loivien transienttiylijännitteiden rajoittamiskeinoja ovat sulkemisvastusten käyttö katkaisijassa, yksinapaisen pikajälleenkytkennän käyttö, rinnakkaiskuristimien käyttö ja johdon jäännösvarauksenpienentäminen käyttämällä esimerkiksi katkaisijaa avattaessa erityisiä avausvastuksia. Tämän kategorian ylijännitteitä vastaan on mahdollista myös käyttää sinkkioksidista valmistettuja venttiilisuojia esimerkiksi pienen induktiivisen virran katkaisuun. (Elovaara & Haarla 2011, 30.)

Jyrkkiä transienttiylijännitteitä pyritään rajoittamaan sekä avojohtoverkossa sekä kytkinasemilla. Kytkinasemilla tärkein ylijännitteiden rajoitin on venttiilisuoja, jota käytetään kalliiden ja pitkäaikaiskorjausta vaativien kytkinlaitoslaitteiden kanssa. Tällaisia laitteita ovat muuntajat, kaasueristetyt kytkinlaitokset sekä kaapeleiden ja niiden päätteiden suojina. Lisäksi ulkokytkinlaitoksissa käytetään ukkosjohtimia ja mastoja ukkoshoukuttimina. (Elovaara & Haarla 2011, 30.)

6 Ylijännitesuojauksen toteuttaminen

Ylijännitesuojien tarkoitus on suojata sähköverkossa olevia komponentteja pulssimuotoiselta lyhytaikaiselta ylijännitteeltä. Mikäli suoja toimii käyttötaajuisilla ylijännitteillä, se tuhoutuu termisen kuormituksen vuoksi. Venttiilisuojan toiminta käyttötaajuisen ylijännitteen vaikutuksesta on hyväksyttävää, mikäli suojan on tarkoitus estää arvokkaamman suojaavan kohteen vaurioituminen. (Aro & al. 2015, 351.)

Yleisesti ottaen suurjänniteverkon käyttötaajuisten ylijännitteiden torjunnassa on huomioitava, että verkkoon on kytketty riittävä määrä kuristimia pienen kuormituksen aikana, verkon oikealla mitoituksella vaimennetaan resonanssitilanteita, arvokkaimmat jännitemuuntajat varustetaan ferroresonanssin vaimennusvastuksilla, verkko maadoitetaan tehokkaasti ja katkaisijatyypit valitaan oikein. (Elovaara & Haarla 2011, 31.)

Avojohtoverkoissa käytetään ukkosjohtimia, mitkä tunnetaan myös ukkosköysinä sekä näiden edellyttämiä pylväsmaadoituksia. Mikäli johto kulkee salamaniskulle alttiilla paikalla, se voidaan suojata johtoylijännitesuojalla. Menetelmää voidaan käyttää kaksoisjohtojen suojauksessa, jotta pylvääseen osuva salaman vaikutuksesta ei menetetä molempia virtapiirejä samanaikaisesti. (Elovaara & Haarla 2011, 31.)

Pylväsmuuntajilla käytetään muuntajatehoon 200 kVA saakka muuntajan ylijännitesuojina suojakipinävälejä, mutta suuremmat muuntajat venttiilisuojilla. Venttiilisuojan käyttöä perustellaan suojattavan kohteen hinnalla sekä kohteen korjauksen pitkällä ajalla. Kipinvälin suojaus ei ole yhtä tarkka ja tehokas kuin venttiilisuojalla toteutettu suojaus. Samalla kipinävälin toiminta aiheuttaa katkaisijatoiminnan sekä samalla jännitekuopan, joka heikentää sähkön laatua. (Elovaara & Haarla 2011, 31.)

Metallioksideja käytettäessä on tiedettävä suojan käyttöpaikalla esiintyvät erilaiset ylijännitteitä aiheuttavat kytkentä- ja vikatilanteet sekä niistä aiheutuvat käyttötaajuiset ylijännitteet. Kuorman laukeaminen, tyhjäkäyvä johto, erilaiset resonanssitilat ja maasulut ovat tyypillisiä ylijännitteen aiheuttajia. Metallioksidisuojan valinnassa tulee tietää suojareleistyksen toiminta tyypillisimmissä vikatilanteissa.. (Aro & al. 2015, 351.)

Kuvassa 6.1 esitetään kipinävälittömän venttiilisuojan käyttötaajuisten ylijännitteiden sietokäyrä, jossa käyttötaajuisten ylijännitteiden sietokyky ilmaistaan suojan mitoitusjännitteen U_r verrannollisena ominaisarvona. Kyseinen esitystapa on yleisin, mutta

samalla markkinoilta löytyy suojia, joiden käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyky on ilmaistu suhteessa suojan suurimpaan sallittuun jatkuvaan käyttöjännitteeseen U_c. Tämä asia on hyvä tiedostaa suojia valittaessa ja ominaiskäyriä sovellettaessa. (Aro & al. 2015, 351–352.)

Tähtipisteen liittyviä suojia käsitellään erityistapauksina suojien valinnassa, sillä suojat ovat normaalitilassa jännitteettömiä. Tähtipisteen jänniterasitus nousee maasulun aikana maasta erotetuissa, sammutetuissa tai osittain maadoitetuissa verkoissa arvoon $U_m/\sqrt{3}$. Tehollisesti maadoitetuissa verkoissa tähtipisteen jänniterasitus nousee arvoon $U_m * 0{,}45$. Tyypillisesti kuvaa 6.1 vastaavissa kuvissa ei ole omaa käyrää tähtipistesuojille, jolloin tähtipistesuojaksi tyypillisesti valitaan samaa tyyppiä oleva suoja kuin vaihe-maa-väliin kytkettävä suoja. Kuvasta 6.1 katsotaan mitoitusjännite käyttämällä edellä mainittuja käyttötaajuisen ylijännitteen arvoja ja tähtipisterasituksen kannalta sopivaa ylijännitteen kestoaikaa. (Aro & al. 2015, 354.)

6.1 Valintaohjeet

Seuraavaksi tarkastellaan perusteellisemmin ylijännitesuojan valinnan eri vaiheita. Tulevissa vaiheissa ei oteta kantaa suojan tilantarpeeseen tai suojakuoren materiaaliin, joka on oleellista likaisuutta huomioidessa. (Elovaara 1992, 32.)

Valitaan ylijännitesuoja alla olevin kriteerein:

1.1 Valitaan suojan jatkuva ylijännite suuremmaksi kuin normaalissa käyttötilanteessa suojan yli vaikuttava jännite.

1.2 Valitaan suojan käyttötaajuisen ylijännitteen sieto-ominaisuudet sillä tavalla, että suoja selviää verkossa esiintyvistä käyttötaajuisen jännitteen nousuista

1.3 Tarkistetaan tarvittaessa kytkentäylijännitteen purkauskyky

1.4 Tarkistetaan, että suojan sijoituskohteen ympäristöolosuhteet vastaavat IEC standardin edellyttämiä olosuhteita; ulkolämpötila -40…+40°C, verkon taajuus 48…62 Hz, sijoituspaikan korkeus vaikuttaa ulkoiseen jännitelujuuteen ja standardissa on käytetty 1000 m korkeutta merenpinnasta. Lisäksi tulee tarkistaa, onko suojan räjähtämättömyysvirta suurempi kuin oikosulkuvirta sijoituspaikalla. Tätä ongelmaa ei Suomessa yleensä ole. (Elovaara 1992, 32.)

Suojan suojausominaisuudet suojattavan kohteen jännitelujuusominaisuuksia vastaan tulee tarkistaa.

2.1 Suojan suojaustaso syöksy- ja kytkentäjännitteillä
2.2 Varmistetaan että suojausmarginaali, suojattavan kohteen eristystason ja suojan suojaustason suhde, on riittävä. (Elovaara 1992, 31-32.)

6.1.1 Jatkuvan käyttöjännitteen määrittäminen

Jatkuvan käyttöjännitteen U_c valinnassa huomioidaan suojan sijoituspaikan vaikuttava jännite. Lisäksi on huomiotava asennustapa, koska suoja voidaan sijoittaa vaihe-maan, vaihe-tähtipisteen, vaihevälin tai tähtipiste-maan välille. Jatkuvan jännitteen kannalta U_c arvon tulee olla 5–10 % suurempi kuin verkon suurin käyttöjännite. Liian alhainen U_c arvo altistaa suojan suuremmalle jatkuvalle virtarasitukselle. (Aro & al. 2015, 352.)

Suurimman sallitun käyttöjännitteen mitoituksessa valitaan suurimman sallitun käyttöjännitteen arvo verkossa sovelletun laitteen suurimman käyttöjännitteen perusteella. Käytännössä vaiheen ja maan välisille suojille määritetään $U_c > U_m / \sqrt{3}$. Vaihevälisuojalla määritetään $U_c > U_m$. Kun kaavoissa otetaan huomioon 5–10 % muutos, saadaan lopullisiksi yhtälöiksi maan ja vaiheen välisille suojille $U_c = (1{,}05 \ldots 1{,}1)\, U_m / \sqrt{3}$ ja vaihevälinsuojile U_c = (1,0…1,1) U_m. Normaalitilanteessa tähtipistesuojien yli ei vaikuta jännitettä, jolloin pysyvän tilan jännite ei anna niille sopivaa mitoituskriteeriä.

Metallioksidisuojan näkökulmasta kaikki jatkuvan käyttöjännitteen U_c ylittävät jännitteet ovat käyttötaajuisia ylijännitteitä, joiden kesto voi vaihdella yksittäisisä jaksoista useihin tunteihin. Usean tunnin kestävä tilanne voi esimerkiksi olla maasulkutilanteessa maasta erotetun verkon käytön jatkaminen. (Elovaara 1992, 34.)

Tilanteissa joissa verkon normaali käyttöjännite on pienempi kuin standardien mukainen laitteen suurin jännite, U_c arvon valinta aiheuttaa tulkinnanvaraisuutta. Usein tällaisia tilanteita kohdataan 24 kV jakeluverkoissa, joissa normaalikäyttöjännite voi olla 21–22 kV. Haastavammaksi tilanteen tekee se, että kaikki valmistajat eivät valmista suojia jatkuvalle käyttöjännitteelle, joka pääjännitteen puolesta vastaisi 24–26 kV. Jatkuvan käyttöjännitteen $U_m/\sqrt{3}$ alittavaa arvoa voidaan harkita, mikäli voidaan olla varmoja, ettei normaali- tai

häiriötilanteiden yhteydessä käytetä U_m-tasoa sivuavia käyttöjännitteitä. (Aro & al. 2015, 353.)

Jatkuva käyttöjännite U_c saa poiketa suurimmasta laitejännitteestä U_m. Tällöin kuitenkin käyttäjän on arvioitava jännitearvon valinassa, kuinka usein verkkoa käytetään suurimman laitejännitteen mukaisilla arvoilla. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi, että 123 kV:n verkon syöttöasemien jännite on 117 kV. (Elovaara 1992, 33.)

Tilanteissa joissa verkon maadoitustapa voi muuttua automaattisten tai muiden vastaavien kytkentätoimenpiteiden seurauksena, tulee jatkuvan käyttöjännitteen U_c arvoa valitessa käyttää erityistä huolellisuutta. Enintään 123 kV verkoissa haittalliset seurausvaikutukset jäävät kuitenkin vähäisiksi, koska osittain maadoitetun ja maasta erotetun verkon maasulkukertoimien välillä ei ole suurta eroa. Maadoitustavan vaihtuminen verkossa vaikuttaa maasulkukertoimeen. (Elovaara 1992, 33.)

Tietyissä erikoistilanteissa on huomioitava, että valmisjien arvot pätevät sinimuotoisella jännitteellä. On mahdollista, että esimerkiksi yliaaltojen takia jännite poikkeaa merkittävästi sinimutoisesta jännitteestä. Näissä tapauksissa lähtökohtana on pidettävä suojan sijoituspaikalla vaikuttavan pääjännitteen huippuarvoa, joka palautetaan vaihteen tehollisarvoksi. Palauttaminen tehdään esimerkiksi jakamalla pääjännitteen huippuarvo $\sqrt{6}$:lla. Jos vääristyneen jännitteen verkossa ei tunneta pääjännitteen huippuarvoa, valitaan käytettäväksi suurin laitejännite U_m. (Elovaara 1992, 33.)

Muuntajan käämin liittimet tulee varustaa ylijännitesuojilla, mikäli muuntaja on tyhjäkäynnissä, mutta silti normaalin käytön aikana pidempiä aikoja jännitteisenä. Tyypillisiä tällaisia tapauksia ovat tilanteet, joissa muuntajalla on kaksi vaihtoehtoista toisiota. (Elovaara 1992, 34.)

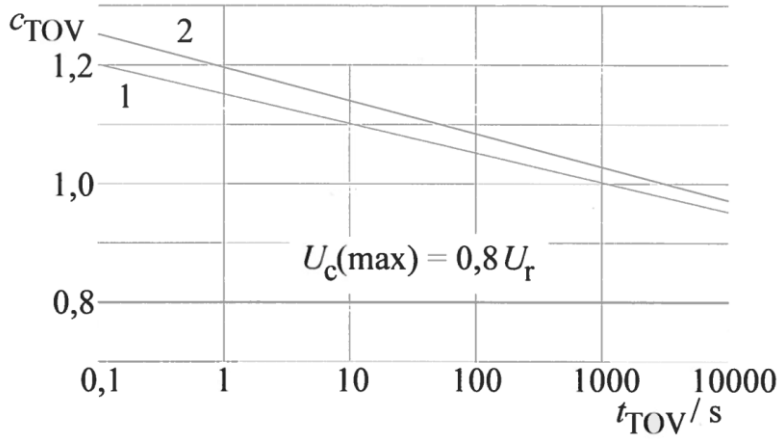
Metallioksidisuojaan, joka on sijoitettu tähtipisteeseen, ei kohdistu normaalitilanteessa merkittävää jänniterasitusta. Lisäksi ne omaavat samalla suuren energiapurkauskyvyn, joten ne soveltuvat hyvin tähtipistesuojiksi. Jatkuvan käyttöjännitteen määrittäminen on suhteellisen vapaata, jossa merkittävin kriteeri on käyttötaajuisten ylijännitteiden sieto. (Elovaara 1992, 34.)

6.1.2 Mitoitusjännite ja käyttötaajuisen ylijännitteen sieto

Käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyvyn perusteella valitaan suojan mitoitusjännite U_r. Käyttäjä voi valita kuvan 6.1 mukaisen käyrästön avulla metallioksidisuojan käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyvyn suhteen tai joko jättämällä valinnan suojanvalmistajan tehtäväksi. Suojan valmistajan tehdessä valinnan, tulee hänelle toimittaa lähtötietoina käyttötaajuisen ylijännitteen suuruus ja kestoaika, joka suojan on kestettävä. (Aro & al. 2015, 352.)

Itse valintoja tehdessä mitoitusjännitteen valinta aloitetaan arvioimalla suojan tarvitsema energian purkauskyky, joka määrittää tarvittavan suojan tyypin. Mitoitusjännitteen alkuarvon voidaan laskea suhteen $U_c \,/\, U_r = 0{,}8$ perusteella. Tämän jälkeen valitaan mitoittavan käyttötaajuisen ylijännitteen suuruus U_{TOV} ja sen kestoaika t_{TOV} ottaen huomioon suojareleiden toimintoajat, jossa huomioidaan varasuojauksen toiminta. Valitulle suojatyypille määritetään kestoajan t_{TOV} perusteella pätevästä käyrästöstä arvo c_{TOV}. Lisäksi mitoitusjännitteen tulee täyttää lisäehto (Aro & al. 2015, 352.)

$$U_r \geq U_{TOV} \,/\, c_{TOV} \tag{6.1}$$



Kuva 6.1. Tietyn metallioksidisuojan käyttötaajuisen jännitteen sietokäyrästö. 1) Vaihesuojat kun käyttötaajuista ylijännitettä (TOV) on edeltänyt suojan energianpurkauskykyä vastaava loiva transienttiylijännite. 2) Vaihesuojat ilman loivan transienttiylijännitteen aiheuttamaa kuormitusta. (Aro & al. 2015, 352.)

Valittavan suojan suojaustasojen tulee olla riittävän alhaiset suojattavan laitteen koordinaatiokestotasoon nähden. Jos ehtoja ei saada täytettyä, on valittava suojatyyppi jonka energianpurkauskyky on suurempi kuin alustavasti valitulla. (Aro & al. 2015, 352.)

Suojan tulee IEC:n asettamien vaatimusten mukaan kestää kymmenen sekuntin ajan vähintään mitoitusjännitteensä mukaisen käyttötaajuisen ylijänniteen, jonka aikana suoja on 60°C lämpötilassa purkanut standardien mukaiset esirasitukset. Laitevalmistajat ilmoittavat tyypillisesti taulukoissaan IEC:n minimiarvoa suuremman arvon. (Elovaara 1992, 34.)

Tilanteissa joissa U_m < 123 kV ja mitoitettavana olevasta verkosta tunnetaan käyttötaajuisen ylijännitteen suuruus U_{tov} ja kestoaika, voidaan mitoitusjännitteen valinnasssa käyttää ylijännitteen kestoaikaan t perustuvia yleistyksiä:

- $t \leq$ 10s, $U_r \geq U_{tov}$
- 10s < t ≤ 100s, $U_r \geq 1{,}05\ U_{tov}$
- 100s < t < 2h valinta TOV-käyrän avulla tai kysymys valmistajalle
- t ≥ 2h, $U_c \geq U_{tov}$

Usein on kuitenkin tilanteita, joissa käyttötaajuisen ylijännitteen ominaisuuksia ei tunneta. Tällöin maasta erotetuissa, osittain maadoitetuissa tai sammutetuissa verkoissa sen suurudeksi voidaan olettaa (Elovaara 1992, 35.)

$$U_{tov} = 1,8 * U_m \qquad (6.2))$$

Mitoitusjännitteen valinta tulisi suorittaa relesuojauksen toiminta-aikojen mukaan kuten yllä. Sammutetuissa verkoissa, joissa on pitkiä säteittäisiä johtohaaroja on suositeltavaa käydä erikoistarkestelu resonanssitilanteiden välttämiseksi. (Elovaara 1992, 35.)

110 kV verkon valintaprosessissa määritetään eri vikatilanteiden ylijännitteet U_{tov} ja kestoajat, joiden perusteella muodostetaan käyttötaajuisen ylijännitteen sietokäyrältä kertoimet c_{tov}. Käyrästön kertoimia määritettäessä on huomioitava suojaa rasittanut muu energiarasitus tai ennen vikaa muodostunut ylijännitepulssi. Tyypillisesti mitoitusjännitteeseen sovelletaan vielä noin 10 % marginaalia. (Elovaara 1992, 35.)

$$U_r > \max\left((1{,}0 \ldots 1{,}1) * \frac{U_{tov}}{c_{tov}}\right) \quad (6.3)$$

Esimerkiksi mitoittava tekijä 110 kV verkossa voi olla johdon johtovika tilanteessa, jossa johdon varrella tai päässä on asema, jossa maadoittamaton muuntaja saa syötön alajännitepuolelta. Kyseinen muuntaja laukeaa nollajännitereleellä viiden sekunnin kuluessa ja vika toistuu ainakin kerran jälleenkytkennän takia pysyvän vian tilanteissa. Tällöin rasitus kestää ainakin kymmenen sekuntia suojan lämpenemisen kannalta. Kuvaa 6.1 tarkastelemalla saa c_{tov} arvoksi 1,14 silloin, kun ei huomioida kytkentäjännitteistä aiheutuvia rasituksia. Mikäli oletetaan verkon jännitteen olevan suurimman laitejännitteen tasolla, saadaan lopulliseksi arvoksi (Elovaara 1992, 36.)

$$U_r > 1{,}1 * \left(\frac{1{,}8 * \frac{123\ \text{kV}}{\sqrt{3}}}{1{,}14}\right) = 124\ \text{kV} \quad (6.3)$$

Kyseisessä tilanteessa mitoitusjännitteeksi määrittyisi arvon 124 kV ylittävä valmistajan taulukkoarvo. Edellä mainitussa esimerkissä ei huomioitu esirasituksia. Tyypillisesti esirasituskäyrät ilmoitetaan eri kJ/kV-arvoilla, jonka vuoksi 0-esirasituksen käyttö on neutraalimpaa. Valitettavasti kaikki valmistajat eivät välttämättä ilmoita 0-esirasituskäyriä.

On myös mahdollista, että joidenkin jakeluverkkosuojien käyttötaajuisten ylijänniteiden sietokäyrät lähestyvät vakioarvoa 10 000s paikkeilla. Tällä vakioarvo on esimerkiksi 1,1 * U_c. Kyseisissä tapauksissa käyttötaajuisen ylijännitteen sietokäyrän määrittävä koe ja suojan toimintasyklikoe eivät vastaa toisiaan tarkasti. Suojilla tapahtuu vastaava TOV-käyrän vakioituminen, muttei vielä yleensä 100000s aikana. Suojan todellista U_c arvoa ei saa pitää TOV-käyrän vakioarvon mukaisena, koska U_c-arvo on sidoksissa toimintasyklikokeeseen ja sen arvo on toimintasyklikokeen kilpiarvon mukainen.

Lähtökohtana voidaan pitää menetelmää, että suoja kestää tavanomaiset viat riittävällä marginaalilla ja harvinaisemmat viat ilman marginaalia. Edellä mainittu harvinainen vika voi olla tilanne, jossa maasulun ilmenemistä maadoitetuksi tarkoitetun muuntajan tähtipisteen ollessa maadoittumaton tai tilannetta, jossa laite- tai järjestelmävika osuu

samanaikaisesti maasulun kanssa. Joissakin tilanteissa on taloudellisesti kannattavampaa antaa ylijännitesuojan rikkoutua, kuin mitoittaa suojat kaikkien mahdollisten vikojen kannalta. Tämän perimmäisenä tarkoituksena on, että tavalliset viat eivät rasita suojaa äärimmilleen, jolloin käyttäjälle varmuus suojan pitkästä eliniästä. (Elovaara 1992, 35.)

Suojan ominaisuudet ja suojauksen toiminta-aika vaikuttavat mitoitusjännitteen valintaan. Maasulun aikana pääjännitteessä ei tapahdu merkittäviä muutoksia, jonka vuoksi vaihevälisuojien mitoitusjännitteet valitaan tyypillisesti suoraan jatkuvan käyttöjännitteen perusteella. (Elovaara 1992, 36.)

6.1.3 Nimellispurkausvirta

Venttiilisuojan nimellispurkausvirran valinnan tarkoituksena on, että suoja selviää odotettavista syöksyvirroista. Metallioksidisuojilla ja kipinävälisuojilla ei ole virtarasituksen kannalta eroa ja molempia suojatyyppejä valmistetaan samoille nimellispurkausvirroille. Kokonaisenergiarasitus tulee huomioida kuitenkin vain metallioksidisuojia valittaessa. Teknistaloudellisesta näkökulmasta ei ole kannattavaa järkevää toteuttaa täydellistä suojausta. Tämän vuoksi suojan ei tarvitse kestää pienellä todennäköisyydellä toteutuvia suurivirtaisia syöksyvirtapulsseja. Yleisesti ottaen nimellisvirraltaan 10 kA suoja on riittävä ja alle 10 kA suojia käytetään vähemmän tärkeissä keskijännitekohteissa tai pienjänniteverkoissa. Tietyissä 24 kA verkoissa on hyväksyttyä suojata tärkeät kohteet 20 kA suojalla. (Aro & al. 2015, 353.)

Seuraavat tekijät vaikuttavat suojan nimellispurkausvirran valintaan:

- aseman ja sen lähiympäristön alttius salamansikuille ja ukonilmojen yleisyys
- pylväsmaadoituksen ja ukkosköysien käyttö aseman tulevilla johdoilla
- johtoon tai sen läheisyyteen osuvien salamaniskujen keskinäinen painoarvo
- Johdon eristystason salamavirran aiheuttamilla jänniterasituksilla

Suojalle tarvittavan nimellisvirran suuruuden arvioinnissa voidaan käyttää yhtälöä 6.4, jossa huippuarvon u_s omaava jänniteaalto etenee pitkin tietyn aaltoimpedanssin Z_w omaavaa johdinta päätyen venttiilisuojaan. Lisäksi johdon päässä tapahtuu jänniteaallon kaksin kertaistuminen. Venttiilisuojaa tarkastellessa suojaustason u_p suuruisena jännitteen syöttävänä jännitelähteenä saadaan virraksi. (Aro & al. 2015, 354.)

$$i = (2\ u_s - u_p) / Z_w \quad (6.4)$$

Mikäli tunnetaan johdon vaihe-maa eristyksen 50 % ylilyöntijännite U_{50} salamasyöksyjännitteillä ja asemalle tulee useita johtoja, voidaan purkausvirran maksimiarvo arvioida likimääräisesti yhtälöstä

$$i = \frac{n}{Z_w}(\frac{2}{n}U_{50} - u_p) \quad (6.5)$$

jossa purkausvirta halutaan arvioida. Asemalle tulevien johtojen määrää kuvaa n. (Aro & al. 2015, 352.)

6.1.4 Energian purkauskykyluokka

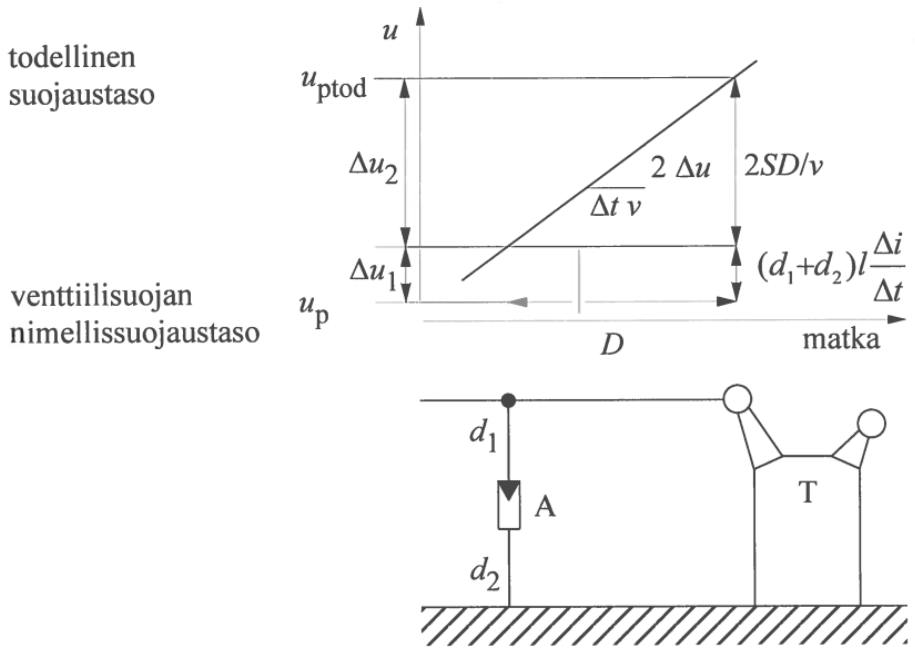
Suojalaitteiden virtakestoisuudella tarkoitetaan johtopurkauskykyä tai pitkän virtapulssin kestoisuutta. Virtakestoisuuteen vaikuttavat jännitetaso ja suojan läheisyydessä sijaitsevat laitteet. Johtopurkauskyky tyypillisesti esitetään purkauskykyluokan tunnusnumerolla, joka vaihtelee 1–5 välillä. Purkauskykyluokan tunnusnumero kuvaa suoraan suojan energianpurkauskykyä mitoitusjännitteen kilovolttia kohti (kJ/kV) tietyllä jäännösjännitteen arvolla. Luokat on jaettu siten, että kolme alinta luokkaa ovat 10 Ka- ja kaksi ylintä luokkaa 20 Ka-suojia varten. Tyypillisimpiä kohteita, joissa kiinnitetään erityishuomiota ylijännitesuojien johtopurkauskyvyn valintaan, ovat suuret käyttö-jännitetasot, pitkät siirtojohdot tai tähtipisteestään maadoitettujen kondensaattorien läheisyydessä. (Aro & al. 2015, 354.)

Alle 110 kV järjestelmien normaalitilanteissa purkauskykyluokan valintaan ei tarvitse kiinni suurta huomiota, koska suojien energian purkauskyvyt ovat luonnostaan riittävät. Suuria energioita sisältäviä ylijännitteitä syntyy kytkentäilmiöissä. Käyttöjännitteellä ylijännitteiden energiasisältö jää vaatimattomaksi, joka johtuu ylijännitteiden alhaisista amplitudeista. (Elovaara 1992, 38–39.)

6.1.5 Suojaustaso

Vertaamalla suojattavan kohteen eristystasoa suojan suojaustasoon, voidaan arvioida ylijännitesuojauksen onnistumista. Todellinen suojaustason määritetään kuvan 6.2 mukaan, kun venttiilisuoja sijoitetaan johdolle kohteen eteen. Kuvassa jännitepulssin rinta on nouseva ja suojattava kohde on johdon päässä. Tapauksessa oletetaan maapiiriksi tehokasta verkkoa, jolloin induktanssi on vähäpätöisen pieni. (Aro & al. 2015, 356.) Todellisen suojaustason u_{ptod} yhtälö on

$$u_{ptod} = u_p + \Delta u_1 + \Delta u_2 = u_p + (d_1 + d_2)\,\gamma\frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{2\,S\,D}{v} \tag{6.6}$$



Kuva 6.2 Yhdysjohtimien ja etäisyyden vaikutus suojaustasoon. (Aro & al. 2015, 356.)

Aro et al. esittävät teoksessaan Suurjännitetekniikka (2015, 356–357) todelliseen suojaustasoon liittyvän esimerkkilaskun seuraavalla tavalla: ”-- muuntajaa lähestyy 123 kV verkon avojohdolta kulkuaalto, jonka jyrkkyys on 1500 kV/µs. Muuntajan ylijännitekäämityksen koordinaatiokestotaso on 550 kV. Muuntajaa suojaavien venttiilisuojien suojaustaso on 380 kV ja suojat sijoitetaan 10m päähän muuntajasta. Venttiilisuojan maadoitus- ja liitosjohtimissa syntyvän jännitehäviön oletetaan olevan 20 kV.”

$$u_{ptod} = 380 \text{ kV} + 20 \text{ kV} + \frac{2*1500\frac{kV}{\mu s}*10m}{300\ m/\mu s} = 500 \text{ kV} \quad (6.6)$$

Laskusta saatu arvo on alhaisempi kuin muuntajan kestotaso. Mikäli tulevan aallon jyrkkyys olisi 2250 kV/µs, muuntajan kestotaso ylittyisi salamasyöksyjännitteillä. Tässä tapauksessa suojat tulisi asettaa lähemmäksi, jos se on mahdollista. Muussa tapauksessa tulee tilalle valita alemman suojaustason suoja. (Aro & al. 2015, 357.)

Marginaaliajattelun mukaan suoja tulee valita ja sijoittaa siten, että suojattavan kohteen koordinaatiokestotasoon U_{CW} ja todellisen suojaustason väliin jää riittävä marginaali. (Aro & al. 2015, 357.)

$$u_{ptod} = U_{rp} < \frac{U_{CW}}{k_c} \quad (6.7)$$

Ylijännitesuojien kanssa käytetty suhdeluku k_c ilmentää suojaussuhdetta, jolla huomioidaan suojalaitteen ja eristyksen vanheneminen. Lisäksi suojaussuhteella voidaan huomioida epävarmuus, kuten suojausetäisyyden laskennassa tehtävät olettamukset. Yllä esitetyssä esimerkissä liitosjohtimien vaikutus sekä venttiilisuojan ja muuntajan keskinäinen etäisyys muodosti suojaustason kasvua 32 %:lla. Tällöin alkuperäisestä suojaussuhteesta 550/380 = 1,45 on käytetty noin 70 %. Tässä tapauksessa vanhenemisen vaikutuksiin jäisi suhteellisen vähän alkuperäisestä suojaussuhteesta. Tämän perusteella voisi olettaa, ettei käytetyillä olettamuksilla tule asianmukaista suojauksen toteutusta. (Aro & al. 2015, 357.) Salamasyöksyjännitteillä riittäväksi suojasuhteen arvoksi on todettu 1,2 – 1,4 ja kytkentäsyöksyjännitteillä 1,15 – 1,2. (Aro & al. 2015, 357.)

Edellä on osoitettu, että valitulla suojalla ja sen sijoituksella ei saavuteta riittävää suojaussuhdetta. Tällöin täytyy käyttää seuraavia keinoja suojaussuhteen suurentamiseksi:

- suojat asennetaan lähemmäksi suojattavaa kohdetta
- valitaan paremmilla suojausominaisuuksilla oleva suoja
- käytetään muita venttiilisuojaryhmiä apuna
- eristyksen kestotasoa suurennetaan

Muiden ylimääräisten venttiilisuojaryhmien pääsääntöinen tarkoituksena on jakaa purkausvirtaa. Tällöin suojien yli vaikuttava resultoiva jäännösjännite ja ylijännitetasot pienenevät koko asemalla. (Aro & al. 2015, 357.)

6.1.6 Maadoitustavan vaikutus maasulkukertoimeen

Maasulkukertoimen *k* avulla osoitetaan maasulkutilanteessa syntyvien ylijännitteiden suuruus. Maasulun aikana muodostuneen ylijännitteen absoluuttinen arvo lasketaan kertomalla terveen verkon vaihejännite maasulkukertoimella. Sähköverkon maadoitustapa vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen sekä eristystason ja ylijännitesuojien valintaan. Tähtipisteen maadoitustapoja ovat impedanssin kautta maadoitettu järjestelmä, sammutettu järjestelmä ja maasta erotettu järjestelmä. (SFS 6001 2015, 32) Käytössä oleva maadoitustapa vaikuttaa eristyskoordinaatiossa käytettävään maasulkukertoimeen k. (ABB 2011, 34)

Maastoerotetussa keskijänniteverkossa, jossa kapasitiivisen maasulkuvirran arvo on 5-30 A, maasulkukerroin saa arvoksi (ABB 2011, 34)

$$k = \sqrt{3} \approx 1{,}73. \tag{6.8}$$

Joissakin epäsuotuisissa ja pitkäkestoisissa maasulkutilanteissa käytetään maasulkukertoimena k = 1,9. Sammutetussa keskijänniteverkossa, jossa kapasitiivinen maasulkuvirta vaihtelee 5 – 60 A välillä, maasulkukertoimen arvona käytetään (ABB 2011, 34)

$$k = (1{,}0 \ldots 1{,}1) * \sqrt{3} \approx 1{,}73 \ldots 1{,}9. \tag{6.9}$$

Pienen resistanssin kautta maadoitetussa keskijännitejärjestelmässä maasulkukertoimena käytetään (ABB 2011, 35)

$$k = (0{,}8 \ldots 1{,}0) * \sqrt{3} \approx 1{,}3 \ldots 1{,}73 \tag{6.10}$$

Lisäksi käytössä voi olla tehollisesti maadoitettu verkko, jota pääsääntöisesti käytetään yli 100 kV:n verkoissa. Suomen 400 kV ja 220 kV verkot ovat tehollisesti maadoitetut. Maasulkukertoimen arvona käytetään (ABB 2011, 36)

$k = (0{,}75 \ldots \leq 0{,}8) * \sqrt{3}$, maasulkukertoimen kuitenkin ollessa $k \leq 1{,}4$

Suomen keskijänniteverkot ovat tyypillisesti sammutettuja tai maasta erotettuja. 110 kV:n verkko on pääsääntöisesti osittain maadoitettu ja sen maadoituskerroin on enintään 1,8. Lapissa ja jossain isommissa kaupungeissa 110 kV:n verkko on sammutettu. (Elovaara & Haarla 2011, 16.)

6.2 Ylijännitesuojan sijoittaminen

Ylijännitesuojan rakenne ei vaikuta ylijännitesijoittamiseen liittyviin sääntöihin. Venttiilisuojan nimellissuojaustason ja suojattavan kohteen eristystason välinen marginaali on todellinen, mikäli venttiilisuoja sijaitsee suojattavan kohteen vieressä lyhyin yhdysjohtimin. Muutoin on huomioitava jänitteen nousu venttiilisuojan jälkeisellä johdon osalla ja purkausvirran venttiilisuojan liitos- ja maadoitujohtimissa aiheuttama jännitehäviö. (Aro & al. 2015, 356.)

SFS 6001 käsikirjan mukaan ylijännitesuojat tulee sijoittaa ja suunnittella siten, ettei henkilöstö altistu vaaralle paineenpurkausjärjestelmän toimiessa tai ulkovaipan rikkoutuessa. Ylijännitesuojien jännite-aika ominaiskäyrää suunniteltaessa on huomioitava samaan piiriin sijoitettujen virtaa rajoittavien sulakkeiden synnyttämät ylijännitteet. Suojan ja laitteen välinen johdin ja valvonlaite on suojattava koskettamiselta, mikäli epälineaarisen resistanssin omaavien ylijännitesuojien maadoitusjohtimeen sijoitetaan valvontalaitteita. Valvontalaitteen lukeman tarkastaminen tulee olla mahdollista laitteen ollessa jännitteisenä. (SFS 6001 2015, 46.)

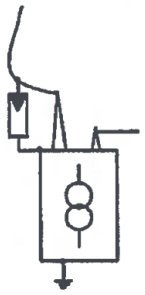
Seuraavissa kappaleissa tullaan käsittelemään suojien sijoittamista yleisohjeilla. Suurempia asemia käsitellessä ylijännitesuojaus voi edellyttää yleisohjeiden sijasta tarkempaa tietokonelaskentaa. Esimerkiksi sähköasemalle saapuvan ylijänniteaalto aiheuttaa aseman johtohaaroissa ja komponenteissa heijastuksia. Yksinkertaisellakin sähköasemalla heijastukset ovat monimutkaisia ja niiden vaikuttavia jännitteitä on hankala todentaa ilman

simulaatiomallia. Tyypillisiä erikoistapauksia, jotka saattavat vaatia laskentaa ovat: (Elovaara 1992, 44.)

- GIS-kojeistojen suojaus
- Muuntajiin suoraan liittyvät kaapelit
- Erityisen suuret vaatimukset suojaustasolle
- Tilanahtaudesta johtuvat sijoitusongelmat
  (Elovaara 1992, 44.)

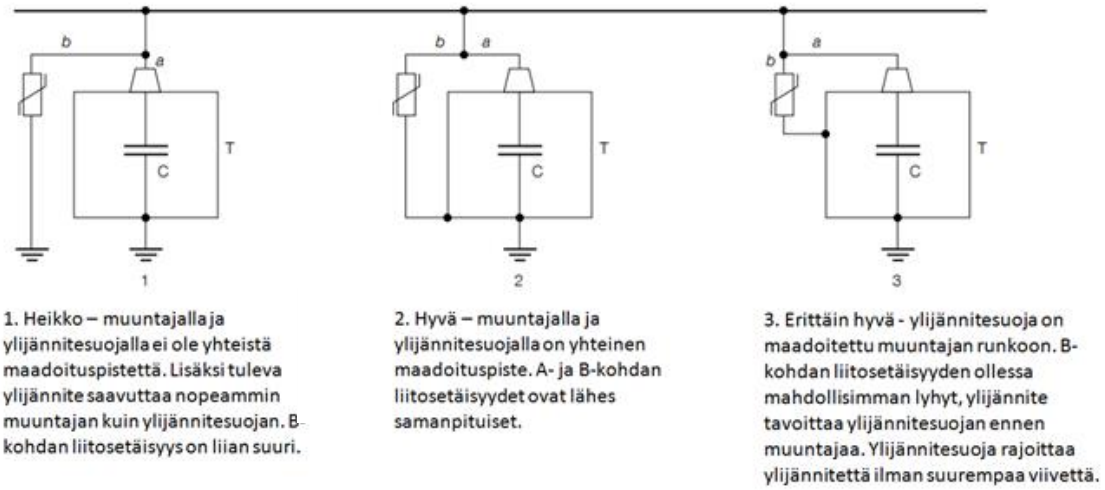
6.2.1 Muuntajan suojaus

Muuntajasuojauksessa yleensä yleisin suojattava kohde on tehomuuntaja. Optimaalisin ratkaisu suojauksen kannalta olisi asentaa venttiilisuoja aivan muuntajan viereen, katkaisijan ja muuntajan väliin. Mikäli venttiilisuojaa ei voida asentaa muuntajan viereen, tulee huomioida venttiilisuojan ja suojattavan kohteen välillä olevan johdon jännitteennousu otettava huomioon. Tällöin tarpeen sitä edellyttäessä valitaan suojaustasoltaan alempi suoja. Ilmajohdon liittäminen muuntajaan on esitetty kuvassa 6.3. (Aro & al. 2015, 359.)



Kuva 6.3 Ilmajohtoon ensiöstä liittyvä jakuemuuntaja (Elovaara 1992, 3.)

Mikäli muuntajassa on kaksi toisiota, josta toista ei käytetä, tulee ylijännitesuojia käyttää myös vapaassa käämissä. Ensiöstä avojohtoverkoon liittyvän muuntajan toisionavat on suojattava ylijännitesuojin, sillä muuntajan kytkentäryhmän vaikutus tulee huomioida. Kolmiokytkentäisessä käämissä tähtikytketyn käämin vaiheen ja maan väliset rasitukset muuttuvat vaiheiden välisiksi rasituksiksi. Kuvassa 6.4 käsitellään muuntajan ylijännitesuojauksen toteuttamista. (Elovaara 1992, 3.)

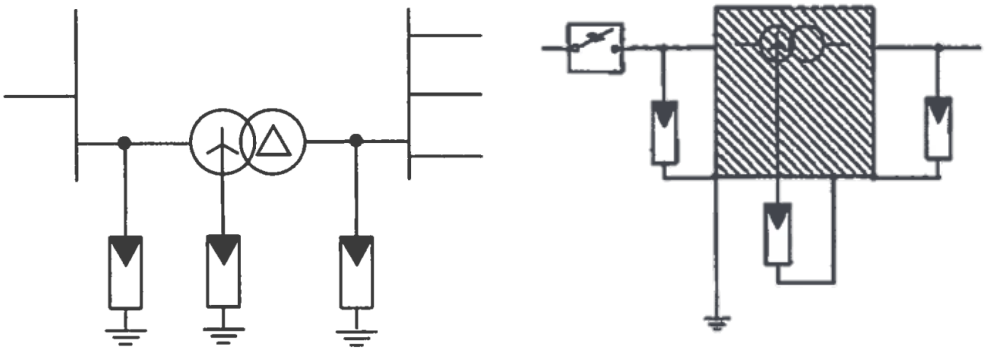


Kuva 6.4 Ylijännitesuojan sijoitus muuntajan yhteydessä

Lisäksi tarkasteluissa on huomioitava muuntajakäämityksen sisäänmenokapasitanssi C_{in}, sillä tämä ja venttiilisuojapiirin kokonaisinduktanssi muodostavat värähtelyn. Tämä värähtely suurentaa jyrkkyyden perusteella laskettua jännitteen nousua ja muuntajaan vaikuttavaaa jännitettä. (Aro & al. 2015, 359.)

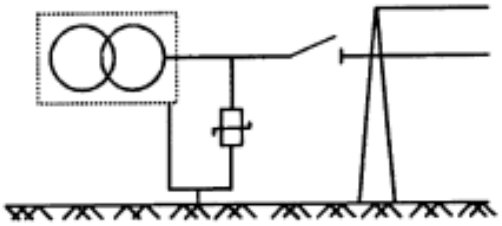
Muuntajan liittyessä avojohtoverkkoon ala- sekä yläjännitepuolelta tulee molemmat käämitykset suojata ylijännitesuojilla. Maadoittamattomat tähtipisteet, jotka ovat tuotu muuntajan kannelle, varustetaan ylijännitesuojilla. Muuntajan alijännitepuolen verkon ollessa maasta erotettu ja muuntosuhteen ollessa suuri, tulee alajännitepuolella mahdollisesti käyttää suojakondensaattoreita rajoittamaan ylijännitepuolen maasulussa alajännitekäämitykseen siirtyviä käyttötaajuisia jännitteitä. (Aro & al. 2015, 359.)

Ilmajohtoon ensiöstä liittyvät jakelumuuntajat, jotka ylittävät 200 kVA varustetaan aina venttiilisuojilla. Alle 200 kVA muuntajissa käytetään kipinävälisuojausta, mikäli muuntaja on koestettu SFS 6001:n mukaisesti. Pylväsmuuntajasta tulee poistaa kipinävälit, mikäli käytetään venttiilisuojaa. (Elovaara 1992, 3.)

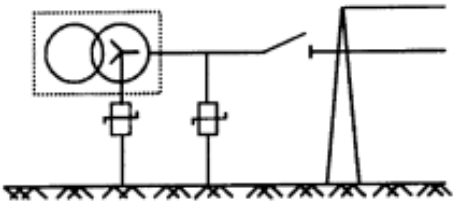


Kuva 6.5 Muuntajan suojaus (Aro & al. 2015, 358.)

Muuntajien suojauksessa ylijännitesuojaon sijoitettava niin lähelle muuntajaa kuin mahdollista. Suojaetäisyys tulee tarkistaa mikäli ylijännitesuoja sijoitetaan yli 10 m päähän muuntajasta. Ylijännitesuojan kytkentä asemamaadoitukseen tulee tehdä lyhyintä reittiä pitkin ja muuntajan suojamaadoitus tulee aina liittää ylijännitesuojan kanssa samaan maadoituspisteeseen. (ABB 2000, 7.) Lisäksi muuntajan ja suojan yhdysjohtimen tulee olla mahdollisimman lyhyt. Suojaustaso ei riipu yhdys- ja maadoitusjohtimien pituudesta, silloin kun suoja kytketään tähtipisteeseen. (Elovaara 1992, 4.)



Kuva 6.6 Muuntajan ylijännitesuojan sijoitus (ABB 2000, 7)



Kuva 6.7 Muuntajan tähtipiste tulee suojata ylijännitesuojalla, mikäli sitä ei ole maadoitettu ja se on esillä. (ABB 2000, 7)

6.2.2 Kaasueristettyjen kytkinlaitosten suojaus

SF_6-eristeisten, eli kaasueristeisen GIS-kytkinlaitoksien suojaus tulee toteuttaa siten, että laitosten sisäiset ylijännitteet eivät pääse nousemaan yli eristystason. Laitoksen vaurioituessa sillä on pitkä keskeytysaika. Tämän vuoksi GIS-laitoksilla venttiilisuojat sijoitetaan kaikkiin avojohtolähtöihin sekä GIS-laitoksen yhteydessä olevilta avojohdoilta edellytetään ukkosjohtimia. Mitoituksen kannalta kriittisin kohta on yleensä takaisku GIS-laitoksen läheisyyteen. (Aro & al. 2015, 359.) (IEC 60099-5 1996, 28)

Usein kustannussyistä laitoksen kiskojärjestelmä on yksinkertainen, joka aiheuttaa erityisongelmia GIS-laitoksissa. Avoinna olevat katkaisimet ja erottimet aiheuttavat ylimääräisiä heijastuskohtia mitkä suurentavat laitoksen ylilyöntiriskiä. Muuntajalla ei ole mahdollista käyttää ulkokytkinlaitoksen ylijännitesuojia, mikäli muuntajat kytketään suoraan SF_6- ja öljy-läpivientieristimin. Tämä yleensä aiheuttaa ylijännitesuojausongelmia. (Aro & al. 2015, 359.)

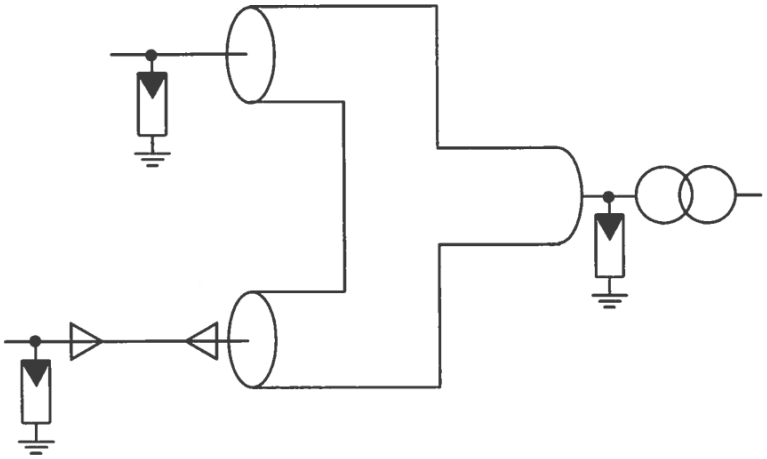
On myös mahdollista, että avojohtoverkon liityntä tehdään kaapelien välityksellä, jolloin etäisyydet ylijännitesuojiin kasvavat pitkiksi. Tällaisissa tapauksissa on syytä pohtia GIS-laitoksen sisäisten ylijännitesuojien käyttöä; erityisesti vähintään 420 kV laajoilla GIS-laitoksilla. GIS-suojien hinta on parhaimmillaan kymmenkertainen verrattuna avokytkinlaitoksen suojiin verrattuna ja tämän vuoksi on perusteltua tutkia ylijännitesuojauksen tarve ennen GIS-ylijännitesuojien hankintapäätöstä. (Aro & al. 2015, 359.) (IEC 60099-5 1996, 28)

Ylijännitesuojat kannattaa sijoittaa GIS-laitoksissa avojohdon puolelle. Suojia tulisi käyttää myös muuntajien yhteydessä, mikäli tämä on mahdollista. (Elovaara 1992, 6.)

Avojohtoverkkoon liityttäessä GIS-laitoksen suojat tulee sijoittaa jokaiseen kaapeli- ja avojohtoliityntään. Ylijännitesuojan suojaetäisyyttä arvioitaessa aallon nopeutena voidaan käyttää 300 km/ms ja kaapelin pituus voidaan arvioida kaksinkertaiseksi todellisuuteen nähden. (Elovaara 1992, 6.)

Yli 100 m pitkien GIS-laitoskiskojen tapauksissa GIS-laitoksen sisään voidaan katsoa tarpeelliseksi käyttää ylijännitesuojaa. Kyseinen ratkaisu on kallis ja tätä voidaan välttää verkon käyttötilanteiden suunnittelulla. Yksi vaihtoehtoinen menetelmä on käyttää kahta peräkkäistä ylijännitesuojaryhmää avojohto-osuuksilla. (Elovaara 1992, 6.)

RMU-kojeistojen ylijännitesuojauksessa suojat voidaan poikkeuksellisesti sijoittaa kaapelin ja RMU-kojeiston liittymispaikkaan. RMU-suojat ovat normaalia suojia kalliimpia niiden erikoisrakenteiden vuoksi. GIS- ja RMU-kojeiden suojausta on esitetty kuvassa 6.8. (Elovaara 1992, 6.)



Kuva 6.8 GIS-laitosten ja RMU-kojeiden suojaus. (Aro & al. 2015, 358.)

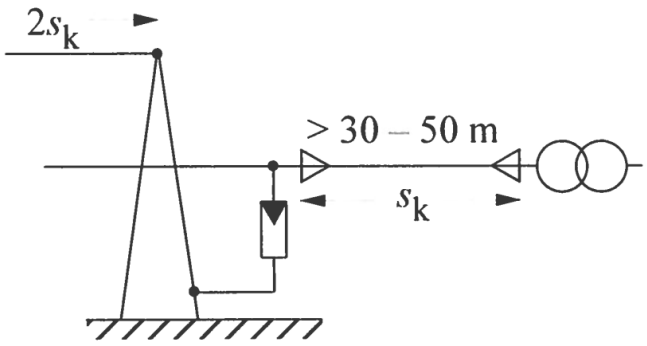
6.2.3 Kaapelien suojaus

Käytännössä ylijännitesuoja tarvitaan avojohtoon liittyvän kaapelin molempiin päihin. Riittävän pitkät kaapelit, joiden pituus on > 1–2 km, suojaavat loppupäänsä takaiskutilanteissa. Näissäkin tilanteissa on perusteltua käyttää ylijännitesuojia kaapelin ja avojohdon liityntäkohdissa. (Elovaara 1992, 4.)

Lyhyillä 30 – 50m pituisilla kaapeleilla riittää, että ylijännitesuoja sijoitetaan vain toiseen päähän, kuten esimerkiksi muuntajan syöttävän kaapelin päähän. Pidempien yli 30 – 50 m pituisten kaapeleiden suojauksessa riittää yksi suojaryhmä, joka on sijoitettu kaapelin alkupäähän, mikäli venttiilisuojan suojataso on vähemmän kuin puolet muuntajan kestotasosta. Muulloin molempiin päihin tulee sijoittaa ylijännitesuojat.

Pidempiä kaapeleita käytettäessä tulee suojausta tehostaa, koska kaapeleiden läheisyyteen osuvat takaiskut aiheuttavat ylijänniteriskin. Vaarallisimpia ovat tilanteet, joissa takaisku tai suora salamanisku syntyy lyhyemmän etäisyyden päähän kaapelista kuin mikä on itse kaapelin pituus. Kyseisissä tapauksissa ylijännitesuojat asennetaan molempiin kaapelin päihin. Muuntoasemaa joka liittyy avojohtoverkkoon kaapelien välityksellä, tulee tarkastella omana tapauksena. (Aro & al. 2015, 359–360.) (ABB 2000, 7)

Tapauksissa joissa kaapelin päähän ei voida sijoittaa ylijännitesuojaa, varustetaan tuleva avojohto ukkosjohtimilla vähintään etäisyydelle 2 x S_k kaapelipäätteestä. S_k tarkoittaa kaapelin pituutta. Samalla pylväsmaadoitus mitoitetaan taloudellisesta näkökulmasta mahdollisimman pieneksi. Yksi mahdollisuus on myös sijoittaa ylimääräinen ylijännitesuojaryhmä tietyn etäisyyden päähän kaapelipäätteestä, mikäli pylväsmaadoitusten maadoitusresistansseja ei saada riittävän alhaisiksi. Kuvassa 6.9 on esitetty ukkosjohtimen ja ylijännitesuojan käyttöä. (Aro & al. 2015, 360.)

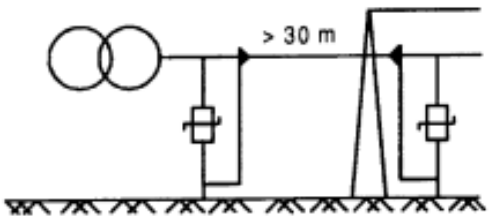


Kuva 6.9 Ukkosjohtimen ja ylijännitesuojan käyttö (Aro & al. 2015, 358.)

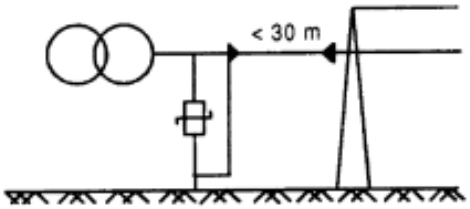
Kaapeliverkon liittyessä avojohtoverkkoon vain muuntajan välityksellä, suojausta ei yleensä tarvita. Edellyttäen, että muuntaja on asianmukaisesti suojattu. Suppean kaapeliverkon tapauksessa, jossa kokonaispituus on muutamia kilometreja, on ylijännitteen suojaustarve selvitettävä erikseen. (ABB 2000, 7.)

Venttiilisuojan maadoituksen ja kaapelivaipan tarvittavat yhdysjohtimet tulee pitää lyhyinä sekä tehokkaina. Lisäksi on oleellista maadoittaa venttiilisuoja sekä kaapelivaippa samaan pisteeseen. (Aro & al. 2015, 360.)

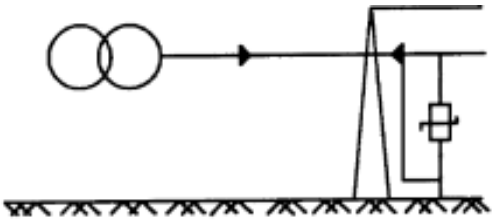
Alla on esitetty tyypillisimmät kaapelien suojaustapaukset kuvissa 6.10–6.12.



Kuva 6.10 Pitkien tehosiirtokaapelien ylijännitesuojaus. Avojohtoon liittyvän muuntajan kanssa kaapelin vaippa maadoitetaan ylijännitesuojan kanssa samaan pisteeseen mahdollisimman lyhyellä johdolla (ABB 2000, 7.)

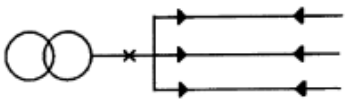


Kuva 6.11 Alle 30 – 50m pituisten kaapelien ylijännitesuojaus toteutetaan muuntajan päähän (ABB 2000, 7.)

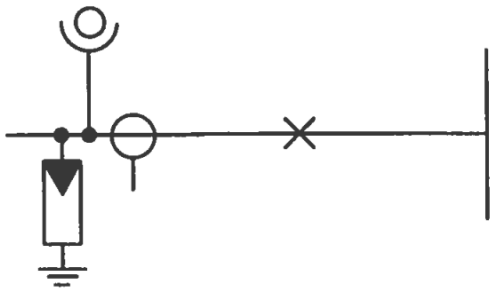


Kuva 6.12 Mikäli kaapelin loppupäätä ei voida suojata ylijäänitesuojin, suojat on sijoitettava kaapelin alkupäähän. (ABB 2000, 7.)

Mikäli kaapeliverkko liittyy avojohtoon muuntajan välityksellä, kaapelit eivät yleensä tarvitse erillistä ylijännitesuojausta edellyttäen, että muuntaja on asianmukaisesti suojattu. Tämä on esitetty kuvassa 6.13. Kaapeliverkon yhteispituuden ollessa käyttötilanteissa 2–3 km luokkaa, on syytä tarkistaa ylijännitesuojauksen tarve siirtyvien ylijännitteiden kannalta. (Elovaara 1992, 4–5.) Kuvassa 6.14 on esitetty johdonpuoleisten mittamuuntajien suojaus.



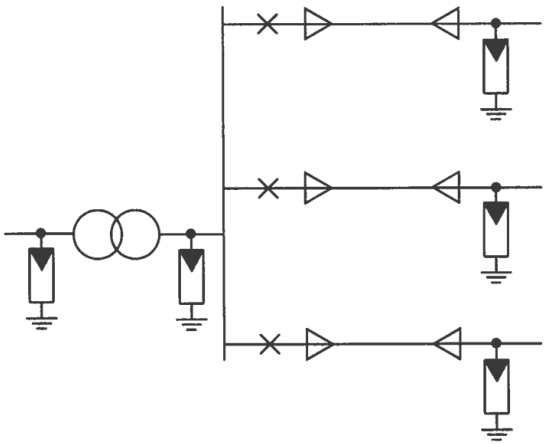
Kuva 6.13 Kaapeliverkon liittyminen avojohtoverkkoon muuntajan välityksellä. (ABB 2000, 7.)



Kuva 6.14 Tärkeiden johdonpuolisten mittamuuntajien suojaus (Aro & al. 2015, 358.)

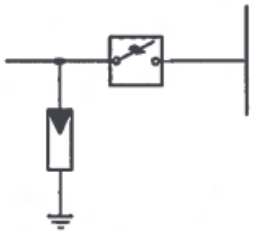
6.2.4 Ilmaeristeiset kytkinlaitokset

110/20 kV aseman kaapelisyöttöisen 20 kV kiskoston tapauksessa voidaan käyttää ylijännitesuojia vain avojohtoliitynnöissä, mikäli kiskon puoleisia päätteitä suojaavat suojat eivät mahdu katkaisijan ja kiskon väliin. 20 kV kiskostoon liitetyn suojaryhmän hankintaa voisi harkita, mikäli 20 kV kiskostoon liittyviä kaapeleita on alle kolme kappaletta. Tämä ilmenee kuvassa 6.15. (Elovaara 1992, 5.)



Kuva 6.15 Kaapelisyöttöinen kiskosto. (Aro & al. 2015, 358.)

Ylijännitesuojaa käytetään katkaisijan ja johdon välissä ja niihin vaikuttaa painoarvo, joka annetaan johdon puolella olevien laitteiden vaurioitumiselle ylijännitteestä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi mittamuuntajat. Lisäksi on huomioitava asemalle tulevien avojohtojen määrä ja verkoston erilaiset käyttötilanteet, kuten johtokatkaisijan avoinna oleminen. Ylijännitesuojien merkitys korostuu, mikäli johtoa ei ole suojattu ukkosjohtimilla. (Elovaara 1992, 5.) Kuvasta 6.16 tulee ilmi, kuinka ylijännitesuojaa käytetään johdon ja katkaisijan välissä.



Kuva 6.16 Ylijännitesuojaa käytetään johdon ja katkaisijan välissä (ABB 2000, 7.)

6.2.5 Generaattoreiden ja suurjännitemoottoreiden suojaus

Pyörivien sähkökoneiden ylijännitesuojaus toteutetaan seuraavissa tapauksissa:

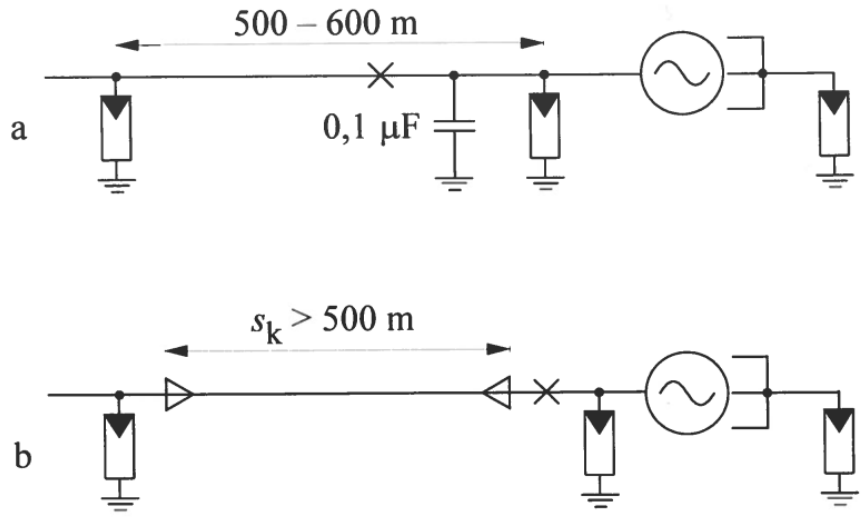
- kone liitetään suoraan avojohtoverkkoon
- kone liitetään avojohtoverkkoon muuntajan tai lyhyen kaapelin välityksellä
- suuret moottorit suojataan kytkentätoimenpiteiden muodostamilta ylijännitteiltä. (Aro & al. 2015, 360.)

Moottoreiden ja generaattoreiden jännitelujuus on alhaisempi kuin saman jännitteisten kaapeleiden tai muuntajien jännitelujuus. Tämän vuoksi pyörivien sähkökoneiden ylijännitesuojauksen vaatimukset poikkeavat aikaisemmin käsitellyistä tapauksista. On myös tärkeää tietää, että ylijännitteen jyrkkyys ja huippuarvo ovat vaarallisia kone-eristykselle. Mikäli generaattorin ja avojohdon välissä ei ole riittävästi kapasitanssia on jyrkkyyttä rajoitettava esimerkiksi suojakondensaattoreiden avulla. Jyrkkyys ilmentää erityisesti rasitusta, joka kohdistuu kierrosten tai vyyhtien väliseen eristykseen. (Aro & al. 2015, 360.)

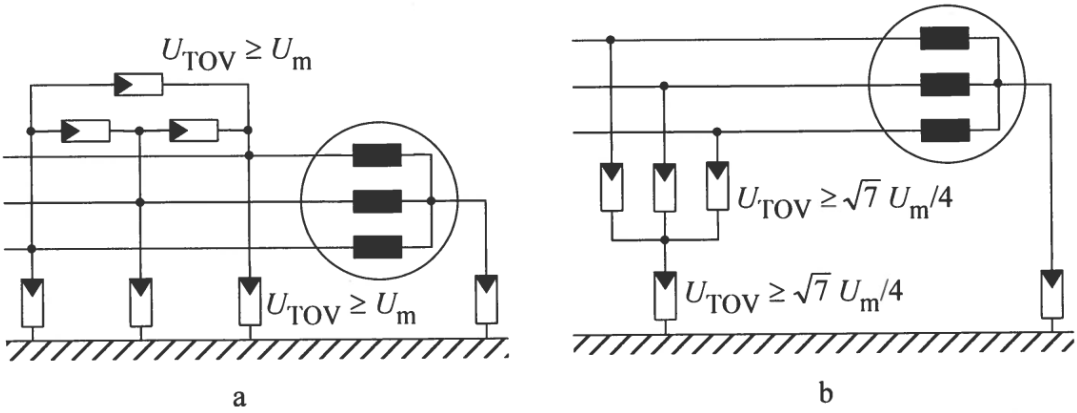
Moottorikytkennän ja katkaisutilanteissa syntyvien ylijännitteiden rajoittamiseen käytetään ylijännitesuojia. Tyypillisin ratkaisu on kytkeä venttiilisuoja moottorin liittimiin. Lisäksi keskijännitemoottoreiden suojauksessa on yleistä käyttää venttiilisuojien kanssa vastuksen ja kondensaattorin sarjakytkentää. Tätä kytkentää kutsutaan RC-suojaksi ja se kytketään tyypillisesti suojattavan moottorin liittimiin. Kaapelisyöttöisten mottoreiden suojaustilanteissa, joissa pelkän kondensaattorin käyttö lisää vaiheiden välistä kapasitiivista kytkentää, RC-suoja on osoittautunut tehokkaaksi ratkaisuksi. Pelkän kondensaattorin käytön seurauksena on usein indusoituneen siirtymävirran (virtual current chopping) tilanteen. Kyseinen siirtymävirta ilmenee pienillä virroilla, joiden vaihteluväli

on muutamista kymmenistä ampeerista muutamiin satoihin ampeereihin (Mueller, A & Saemann, D. 2011, 2.). Vastuksen resistanssi mitoitetaan kaapelin aaltoimpedanssin suuruiseksi, jonka seurauksena kaapelin syöttämät jyrkät jänniteaallot eivät tule heijastumaan kaapelin loppupäästä, eli moottorin liittimistä. (Aro & al. 2015, 360.)

Avojohtoverkkoon suoraan liitetyillä pienillä generaattoreilla tulee käyttää kahta ylijännitesuojaryhmää, mikäli generaattorisuojien energianpurkauskyky tai suojaustaso eivät ole riittäviä. On oleellista, että generaattorisuojien suojat toimivat ensin ja niillä on oltava parempi energianpurkauskyky kuin avojohtoverkon suojilla. Lisäksi avojohtoverkon suojat on sijoitettava etäälle generaattorista, jotta generaattorisuojien syttymisen johdosta muodostuva negatiivinen heijastus ei viivästyttäisi suojaryhmän toimintaa. Riittävä etäisyys suojien välillä on noin puoli kilometriä. Käytettäessä kaapeliliityntäisiä generaattoreja suojakondensaattoreista voi luopua yli 500 m pituisilla kaapeleilla, jolloin avojohtojen sijoituspaikka ei ole yhtä kriittinen. Muuntajien kaltaisesti myös generaattoreiden maadoittamaton tähtipiste varustetaan ylijännitesuojalla. Kuvat 6.17 ja 6.18 esittävät ylijännitesuojauksen toteutusta käytännössä. (Aro & al. 2015, 361.)



Kuva 6.17 Pyörivien sähkökoneiden ylijännitesuojaus. (Aro & al. 2015, 361.)



Kuva 6.18 Vaihevälin sekä vaiheen ja maan ylijännitesuojauksen yhtäaikainen toteuttamien. a) Kuuden erillisen suojan käyttö b) Neljän suojan ryhmän käyttö (Aro & al. 2015, 361.)

Yd-kytkentäisten muuntajien toisiossa vaihevälin ylijännitesuojaus voi olla tarpeellinen. Tällöin voi olla tarpeellista toteuttaa ylijännitesuojaus kuvan 6.18a mukaisesti erillisillä vaihe-maa- ja vaihevälin suojilla. On myös olemassa eristysrakenteisia ylijännitesuojapaketteja, joissa yksittäisten suojien kokonaismäärä on pienempi. Näissä tapauksissa ylijännitesuojauksessa käytetään kahta sarjassa olevaa venttiilisuojaa, joka on nähtävissä kuvasta 6.18b. (Aro & al. 2015, 361.)

Kuvan 6.18b kaltaista kytkentää käytetään maasta erotetuissa verkoissa ja tällöin on tiedostettava, että maasulkutilanteessa suojaryhmän tähtipiste kytkeytyy rinnakkain viallisen vaiheen vaihesuojan kanssa. Tästä johtuen jännite jakautuu epätasaisesti suojien yli. Terveiden vaiheiden suojien kohdistuva jänniterasitus U_{TOV} on laskettavissa alla olevalla kaavalla. (Aro & al. 2015, 362.)

$$U_{TOV} = |\,(a - \tfrac{1}{4})\,|\,U_V = \sqrt{21}\ \tfrac{U_V}{4} = \sqrt{7}\ \tfrac{U_m}{4} \approx 0{,}66\ U_m \qquad (6.11)$$

jossa vaihejännite ennen maasulkua on U_V ja

$$a = 1 \angle 120° = \tfrac{1}{2}(-1 + j\sqrt{3}) \qquad (6.12)$$

Samalla ylijännitesuojaryhmän tähtipisteen ja viallisen vaiheen ylijännitesuojan vaikuttava jännite on

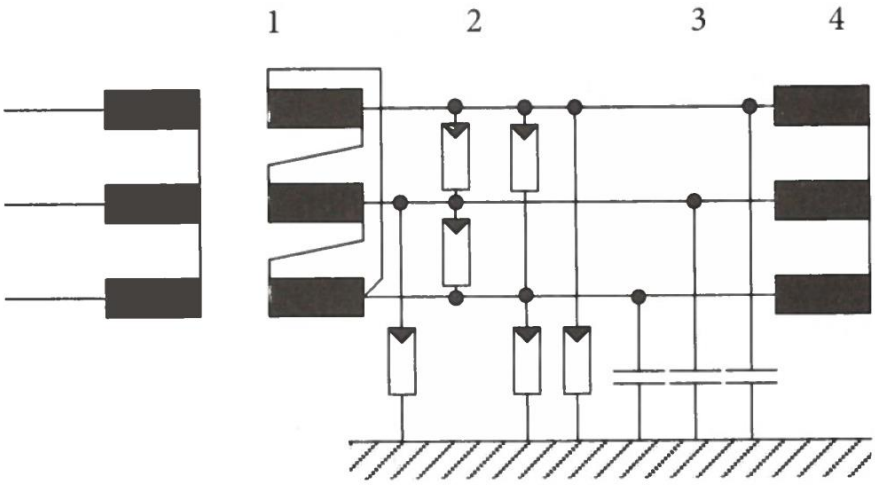
$$3 * \frac{U_V}{4} = \sqrt{3}\ \frac{U_m}{4} \quad (6.13)$$

Suojaryhmän tähtipistehaaran suoja ja vaihesuoja tulee mitoittaa samalla tavalla, koska muulloin toinen rinnakkain olevista suojista ylikuormittuu maasulun aikana. Maasulku voi syntyä mihinkä tahansa vaiheeseen, joten vaihesuojat mitoitetaan terveen vaiheen jännitenousun varalta. Tämän vuoksi kaikki suojat mitoitetaan kertomalla maksimi käyttöjännite U_m 0,66 :lla.

Ylijännitetilanteessa jossa ei ole maasulkua, on aina kaksi suojaa sarjassa. Tällöin suojaus mitoitetaan tätä erityiskytkentää käytettäessä 32 % suuremman jännitteen mukaan kuin käytettäessä kuutta erillistä suojaa. Suojaustaso siis nousee 32 % kuuden suojan tapaukseen verrattaessa. Tästä johtuen kuvan 6.17b kaltaista ratkaisua ei voida pitää tehokkaana. Muuntajan tähtipisteen venttiilisuoja ja generaattorin tähtipisteeseen liitetty venttiilisuoja mitoitetaan samalla tavalla. (Aro & al. 2015, 362.)

Ylijännitteitä voidaan myös rajoittaa kytkemällä kondensaattori vaihejohtimen ja maan väliin. Kondensaattorilla pienennetään asemalle saapuvan syöksyaallon jyrkkyyttä ja amplitudin arvoa verrattaessa tilanteeseen, jossa kondensaattoria ei käytettäisi. Lopullinen vaikutus heijastuu kondensaattorin kapasitanssiin; mitä suurempi kapasitanssi, sitä suurempi vaikutus. Kondensaattoria käytetään rajoittamaan muuntajan ensiöstä toisioon siirtyneitä syöksyjännitteitä. Tämän vuoksi kondensaattorit kytketään muuntajan toisioon vaiheiden ja maan väliin. Menetelmää käytetään, kun toisiopiiriin liittyy generaattori. (Elovaara & Haarla 2011, 41.)

Suojausta täydennetään usein venttiilisuojilla ja käytettävien kondensaattoreiden kapasitanssi on karkeasti 0,1 µF. Vaiheiden väliset venttiilisuojat ovat tarpeen, koska Yd-kytkettyjen muuntajien ensiössä yksinapaisena esiintyvä ylijännite muuntuu toisiossa kaksinapaiseksi. Lisäksi kondensaattoreilla vähennetään ensiöpuolen maasuluissa muodostuvia jännitteitä, jotka siirtyvät kapasitiivisesti muuntajan toisioon. Kondensaattoreilla on myös mahdollista rajoittaa pienen induktiivisen virran katkaisussa syntyviä ylijännitteitä. Kuvassa 6.19 on esitetty suojakondensaattoreiden käyttöä venttiilisuojaryhmien rinnalla. (Elovaara & Haarla 2011, 41.)



Kuva 6.19 Suojakondensaattorin käyttö venttiilisuojaryhmän rinnalla. 1) muuntaja, 2) venttiilisuojaryhmä, 3) suojakondensaattorit, 4) generaattori (Elovaara & Haarla 2011, 41.)

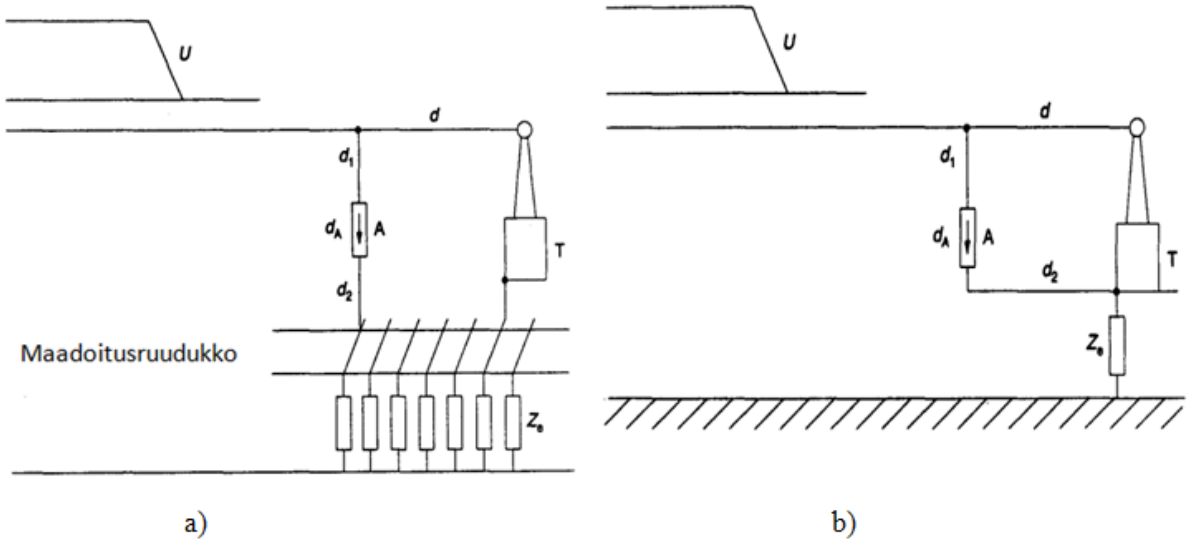
Voimalaitosgeneraattoreita tarkastellessa niiden ylijännitesuojaus ylijännitesuojia käyttäen poikkeaa asemasuojauksesta siten, että kuorman putoaminen aiheuttaa generaattorin pyörimisnopeuden hetkellisen lisääntymisen. Tämä nopeuden lisääntyminen saattaa nostaa koneen napajännitettä 1,4…1,5 -kertaiseen arvoon riippuen laitoksen suojaus- ja säätöjärjestelmistä. Kyseisissä tapauksissa vaiheväliin ja vaihe-maa-väliin kytkettyjen ylijännitesuojien yli vaikuttava jännite kasvaa. (Elovaara 1992, 41.)

6.3 Ylijännitesuojien maadoitus

Ylijännitesuojien maadoituksessa ylijännitesuojat kytketään aina kun mahdollista suojattavan kohteen rinnalle mahdollisimman lyhyin johtimin. Ylijännitesuojien maadoituksessa viedään maadoitusjohdin aina mahdollisimman suoraan maahan. Tällöin maadoituselektrodin tulisi olla useampihaarainen, jotta pienempi aaltovastus saavutetaan. Riittävänä määränä voidaan pitää 3–4 kappaletta 10 m pituisia haaroja, jotka on asennettu 0,5 – 0,7 m syvyyteen. (Tiainen 2014, 72.)

Yleisesti keskijännitekaapelin toinen pää on muuntamossa, jolloin ylijännitesuojauksen maadoituselektrodin maadoitusresistanssiin ei tarvitse kiinnittää huomiota. Muuntopiirin maadoitusimpedanssi huolehtii matalasta kosketusjännitteestä, joka määräytyy käyttötaajuuden mukaisesti. (Tiainen 2014, 72.)

Maadoitusverkkoa käyttävillä asemilla esimerkiksi muuntajabunkkerin päälle sijoitetut ylijännitesuojat ja suojattava kohde maadoitetaan lyhyillä johtimilla suoraan maadoitusverkkoon, kuten kuvassa 6.20 on esitetty. Ylijännitesuojauksen kannalta edullisin menetelmä olisi asentaa ylijännitesuoja lähelle läpivientieristimiä sekä samalla maadoittaa ne muuntajan runkoon. Tyypillisesti tilanpuute tai muuntajan vaihtotilanteessa tehtävät työaluerajaukset saattavat rajoittaa kyseistä menettelyä. (Elovaara 1992, 45.)



Kuva 6.20 a) Ylijännitesuojan asennus maadoitusruudukkoa käytettäessä b) ylijännitesuojauksen asennus ilman maadoitusruudukkoa (IEC 60099-5 1996, 25)

Maadoituksen kannalta on keskeistä yhdistää ylijännitesuojan alapää pieni-induktanssisesti esimerkiksi mittamuuntajan runkoon, kaapelivaippaan, GIS-putkeen tai muuntajasäiliöön. Mikäli edellä mainittujen kohteiden käyttäminen ole mahdollista, tulee suoja ainakin maadoittaa samaan pisteeseen suojattavan kohteen kanssa. Erillisissä maadoituspisteissä toteutettu suojattavan kohteen ja suojalaitteen maadoitus mitätöi mahdollisen hyödyn, mikä alhaisella suojaustasolla tai aseman tehokkaalla maadoitusverkolla on saavutettavissa. (Aro & al. 2015, 363.)

Päädyttäessä käytännön ongelmia vuoksi pitkiin maadoituskaapeleiden, voidaan niiden aiheutumaa haittaa kompensoida käyttämällä rinnakkaisia maadoitusjohtimia. Kyseisissä tilanteissa on kuitenkin hyvä tiedostaa esimerkiksi kunnonvalvontaan käytettävästä vuotovirtamittarista aiheutuvat lisävaatimukset. (Elovaara 1992, 45.)

Jos käytetään kahta peräkkäistä ylijännitesuojaryhmää, jotka sijaitsevat suhteellisen lähekkäin tosistaaan, niin voidaan ylijännitesuojien maadoitukset yhdistää toisiinsa. Suositeltava etäisyys on noin 50 m. Maadoituksen yhdistämisellä saavutetaan pienempi maadoitusresistanssi. (Elovaara 1992, 45.)

6.4 Taloudellinen ylijännitesuojaus

Jakeluverkon syöttöasemilla ja siirtoverkossa kytkinlaitoksen, muuntajan tai kaapelin vaurioista aiheutuvat taloudelliset menetykset ovat niin suuret, että ylijännitesuojia kannattaa käyttää usein. Kaapelin tai muuntajan vaurioituminen jakeluverkossa tarkoittaa käytännössä pitkää keskeytystä. (Elovaara 1992, 7.)

Vaurio- ja keskeytyskustannukset muodostavat kokonaisvahingon. Suojauskustannukset muodostuvat suojien hankinnasta, asentamisesta, kunnossapidosta ja suojien vaurioitumisista aiheutuvat kustannukset. Ylijännitesuojien hankintojen kannattavuutta arvioidaan vahinkokustannusten vähenemisen ja suojauskustannusten erotuksena. Toisin sanoen hankintojen kannattavuutta verrataan suojaamatta jättämiseen. Tilanteessa jossa vertaillaan kahta eri suojaustapaa, lasketaan vahinko- ja suojauskustannusten erojen erotus. (Elovaara 1992, 7–8.)

Todellisuudessa ylijännitesuojauksen kannattavuuden laskeminen on haastavaa ja työlästä, sillä esimerkiksi keskeytyksen laajuus ja keskeytysaika vaihtelevat laajalti. Pääsääntöisesti suurjänniteavojohtoverkossa jakelumuuntajia ei suojata suurjännitesulakkeilla, jonka seurauksena muuntajan vaurioituminen aiheuttaa keskeytyksen katkaisijan jälkeisessä verkonosassa. (Elovaara 1992, 8.)

6.4.1 Kustannusanalyysi

Seuraavassa osiossa pohditaan ylijännitesuojauksen toteuttamisen laajuutta teknistaloudellisesta näkökulmasta. Sähköverkon komponenttien hintatiedot ovat peräisin kansainväliseltä laitetoimittajalta. Tekstissä näitä tietoja reflektoidaan toimeksiantajan tarpeiden mukaan.

Ylijännitesuojan tyypillisimmät käyttökohteet ovat ilmajohdot, muuntajat, kaasueristetyt kytkinlaitokset, ilmaeristeiset kytkinlaitokset, generaattorit ja suurjännitemoottorit. Kyseisten käyttökohteiden suojausta on käsitelty tarkemmin tässä työssä.

Keskeytyskustannukset ovat merkittävä osa ylijännitesuojauksen kokonaissäästöjä ja –kustannuksia käsiteltäessä. Tyypillisesti keskeytyskustannuksissa huomioidaan palvelun tai tuotteen valmistuksen keskeytymisestä aiheutuvat kustannukset, kuten tuotantotappiot tai hyvitykset asiakaskunnalle. Keskeytyskustannukset muodostavat merkittävän osan kokonaiskustannuksista, sillä keskeytyksestä johtuen valmistamatta jääneet tuotteet tai palvelut aiheuttavat tuotannollisia tappioita. Kyseiset vahingot vaihtelevat toimialakohtaisesti ja ne ovat kokoluokaltaan moninkertaisia verrattuna ylijännitesuojien hankintahintoihin. Muita keskeytyksistä aiheutuvia kustannuksia ovat esimerkiksi korjaus- ja kunnostuskustannukset.

Ylijännitesuojien hinnat vaihtelevat muutamista satasista muutamaan tuhanteen euroon. Suojien hankintakustannuksia ei voida pitää merkittävinä, jos tarkastellaan suojattavien kohteiden hankinta-, kunnossapito- ja keskeytyskustannuksia. Ylijännitesuojausta vaativissa kohteissa ylijännitesuojien pois jättäminen aiheuttaa laitevahinkoja, korjaustöitä ja prosessin tai palvelun katkeamisesta johtuvia keskeytyskustannuksia. Kyseisten kustannuksien kokonaisvahingot ovat kymmenkertaisia verrattuna ylijännitesuojan hankintahintaan. Kyseisissä tapauksissa ylijännitesuoja maksaa itsensä takaisin nopeasti. Tarkemmin tyypillisesti suojattavien verkkokomponenttien hintatietoja löytyy liitteistä.

Suojausta toteuttaessa on oleellista hahmottaa, missä laajuudessa ylijännitesuojaus on kustannustehokasta. Tällöin verrataan suojan ja suojattavan kohteen hintoja sekä lisäksi suojattavan kohteen kriittisyyttä prosessissa. Avo- tai maajohtimien kilometrihinnat vaihtelevat tuhansista euroista kymmeniin tuhansiin euroihin, siinä missä ylijännitesuojan hankintakustannus on kokonaisuudessaan muutamia tuhansia. Ilmajohtojen kanssa ylijännitesuojia käytetään harvoin. Mikäli ylijännitesuojia käytetään, niillä estetään ilmastollisten ylijännitteiden tapauksissa pikajälleenkytkennät. Sähköverkkojen avojohdoilla ja maakaapeleilla käytetään ylijännitesuojia aina kun niille katsotaan tarvetta, sillä sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuvat kustannukset ylittävät nopeasti ylijännitesuojien hankintakustannukset. Tämä tarpeen määritys perustuu tyypillisesti

kustannuslaskelmiin, eli investointikustannuksien ja hyötyjen vertailuun. Avojohtojen osalta kustannusanalyysi on keskeinen työkalu.

Moottoreiden, tahtikoneiden ja generaattoreiden hinnat vaihtelevat kymmenistä tuhansista euroista satoihin tuhansiin euroihin. Kyseisissä tapauksissa ylijännitesuojilla pyritään estämään kalliin laitteiston hajoaminen, sillä kyseisten laitteiden huoltoajat voivat olla suhteellisen pitkät ja tätä kautta muodostuvat vahingot kasvavat suuriksi. Tyypillisimmin pienimpiä moottoreita on saatavana lyhyinäkin toimituksina tai korjattuna pikaisesti paikallisesti. Etenkin erikoistapauksissa varaosien toimitusajat ja huoltoajat ovat useita päiviä, jolloin kustannukset kasvavat sen myötä.

Teho- ja jakelumuuntajien hinnat vaihtelevat tuhansista euroista satoihin tuhansiin euroihin. Ylijännitesuojauksen näkökulmasta niihin suhtaudutaan samalla tavalla kuin edellä mainittuihin moottoreihin, tahtikoneisiin tai generaattoreihin. Suojattavien kohteiden hankintahinnat ovat merkittävät, jolloin ylijännitesuojausta ei ole järkevää jättää toteuttamatta. Kustannusanalyysin avulla ei automaattisesti määritetä ylijännitesuojien tyyppejä, sillä ne määrittyvät suojattavien kohteiden ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi pienemmät jakelumuuntajat turvataan aktiivisuojien sijaan kipinäväleillä. Ylijännitesuojauksen toteuttamisesta saatavat hyödyt ovat suuremmat kuin suojauksen toteuttamatta jättämisestä tulevat säästöt, sillä laitteistovahingot sekä keskeytyskustannukset aiheuttavat moninkertaiset vahingot suhteessa ylijännitesuojan hankintahintaan.

Kannattavuuden laskemisessa tulee huomioida tapauskohtaisesti toimialan ja verkon ominaispiirteet, jotka vaikuttavat kannattavuuteen.

6.5 Laskentaesimerkkejä

6.5.1 Ylijännitesuojan suurin jatkuva käyttöjännite U_c eri tilanteissa

Seuraavaksi käsitellään ylijännitesuojan suurimman jatkuvan käyttöjännitteen määrittämistä eri tilanteissa. Eri tilanteiksi ovat valittu tyypillisimmät kohteet, joissa suojan jatkuva käyttöjännite määritellään eri tavoilla.

Sammutetut tai suuren impedanssin kautta maadoitetut verkot

Sammutetuissa tai impedanssin kautta maadoitetuissa verkoissa ylijännitesuojan sijaitessa vaiheen ja maan välissä, ylijännitesuojan jatkuva käyttöjännitteen U_c tulee olla suurempi kuin verkon suurin jännite U_m. (Tyco 2008, 8.)

Mikäli suoja asennetaan muuntajan vaiheen ja tähtipisteen välissä, suojan $U_c$valitaan yhtälöllä 6.14 (Tyco 2008, 8.)

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \tag{6.14}$$

Suuren impedanssin kautta maadoitetut ja maasulkusuojatut verkot

Impedanssilla maadoitetuissa ja maasulkusuojatuilla verkoilla ylijännitesuojan sijaitessa vaiheen ja maan välissä, suojan suurin jatkuva käyttöjännite $U_c$valitaan yhtälöllä (Tyco 2008, 8.)

$$U_c \geq \frac{U_m}{c_{TOV}} \tag{6.15}$$

Mikäli suoja asennetaan muuntajan vaiheen ja tähtipisteen välissä, suojan suurin jatkuva käyttöjännite $U_c$valitaan yhtälöllä (Tyco 2008, 8.)

$$U_c \geq \frac{U_m}{c_{TOV}*\sqrt{3}} \tag{6.16}$$

Pienen impedanssin kautta maadoitetut verkot, maasulkukerroin < 1,4

Vaiheen ja maan väliin asennettavan suojan suurin jatkuva käyttöjännite $U_c$valitaan yhtälöllä (Tyco 2008, 8.)

$$U_c \geq \frac{1{,}4*U_m}{c_{TOV}*\sqrt{3}} \tag{6.17}$$

Muuntajan ja sen tähtipisteen väliin asennettavan suojan suurin jatkuva käyttöjännite U_c lasketaan yhtälöllä (Tyco 2008, 9.)

$$U_c \geq \frac{U_{TOV}}{c_{TOV}}, \text{ jossa } U_{TOV} = 0{,}4 * U_m \quad (6.18)$$

Pienen impedanssin kautta maadoitettu verkko, maasulkukerroin >1,4

Tilanteissa joissa verkko on maadoitettu pienen impedanssin kautta ja maasulkukerroin ylittää 1,4, huomioidaan 5 % nousu maksimi käyttöjännitteessä. Tällöin mitoituksessa käytetään (Tyco 2008, 9.)

$$U_c \geq \frac{1{,}05 * U_m}{c_{TOV}} \quad (6.19)$$

Ylijännitesuojat vaiheiden välissä

Ylijännitesuojat on mahdollista sijoittaa vaihevälin sekä vaiheen ja maan väliin. Suojaus on mahdollista toteuttaa kuudella erillisellä suojalla, jolloin kaikkien suojien suurin jatkuva käyttöjännite U_c tulee olla suurempi kuin verkon suurin käyttöjännite U_m. (Tyco 2008, 9.)

Suojaus on myös mahdollista toteuttaa neljän suojan ryhmänä, jolloin mitoituksessa käytetään yhtälöä 6.20. (Tyco 2008, 9.)

$$U_c \geq 0{,}667 * U_m \quad (6.20)$$

Neljän suojan ryhmää käytettäessä saavutetaan kolmanneksen korkeampi suojaus kuin suojauksen toteuttaminen kuudella eri suojalla.

Generaattori jakeluverkossa

Gereraattorin kuormituksen irti kytkeytyessä tulee huomioida kuorman irti kytkeytymiskerroin, joka korkeimmillaan saavuttaa arvon 1,5. Tämä kerroin tulee huomioida ylijännitesuojan U_c mitoituksessa. Suojan sijaitessa vaiheen ja maan välissä käytetään kaavaa 6.21.

$$U_c \geq \frac{\delta_L * U_m}{c_{TOV}} \quad (6.21)$$

6.5.2 Siirtoverkko

Ylijännitesuojan mitoitusjännite U_r lasketaan kaavalla 6.22.

$$U_r = \frac{k\ K_e U_m}{\sqrt{3}} \tag{6.22}$$

Siirtoverkon suojan mitoitusjännitteen määrittämistä käsitellään alla olevalla esimerkillä, jossa on käytetty seuraavia arvoja:

- Järjestelmän maksimijännite U_m on 123 kV
- Maasulun kestoaika on maksimissaan 1 s. Maasulkukertoimen k arvona, on käytetty arvoa 0,9.
- Siirtoverkon maadoitus on toteutettu osittain maadoitettuna. Verkon maadoitustavasta riippuvana kertoimena K_e on käytetty arvoa 1,7.

Ylijännitesuojan mitoitusjännite lasketaan sijoittamalla edellä mainitut lukuarvot yhtälöön 6.22. (ABB 2007, 2–3.)

$$U_r = \frac{0{,}9 * 1{,}7 * 123\ kV}{\sqrt{3}} = 108{,}8\ kV \tag{6.22}$$

Ylijännitesuojan lasketun mitoitusjännitteen perusteella valitaan ylijännitesuoja, jonka mitoitusjännitteen arvo on suurempi kuin edellä käsitellyssä esimerkissä saatu laskennallinen tulos. Kaavan 6.22 laskennallisen mitoitusjännitteen 108,8 kV perusteella valitaan ylijännitesuojaksi erään valmistajan ylijännitesuojatyyppi PEXLIM R120-YH123. Kyseisen suojan mitoitusjännitteen U_r arvo on $120\ kV$ ja jäännösjännite U_{res} 8/20µs 10kA:n virralla on 311 kV. Hetkellisten käyttötaajuisten ylijännitteiden sietokyky on 138 kV/1s ja 132kV/10s. Kyseiset arvot ovat saatu valmistajan ylijännitesuojan manuaalista, katso liite 3. (ABB 2007, 2–3.)

Järjestelmän maksimijännitteen perusteella määritetään peruseristystaso U_{liwl} taulukon 4.2 perusteella. Järjestelmän maksimijännitteen arvona on käytetty esimerkissä 123 kV, jolloin peruseristystaso U_{liwl} määritetään salamasyöksyjännitteen kestotason arvon 550 kV

mukaa. Peruseristystason arvoa käytetään ylijännitesuojan suojaustason määrittämisessä. Suojaustaso lasketaan kaavalla 6.23. (ABB 2007, 2–3.)

$$\left(\frac{U_{liwl}}{U_{res}} - 1\right) * 100 = (\frac{550\ kV}{311\ kV} - 1) * 100 = 76{,}8\ \% \tag{6.23}$$

Mikäli suojaustasolta edellytetään parempaa suojaa, ylijännitesuojatyyppi tulisi vaihtaa esimerkiksi saman valmistajan PEXLIM Q120-XH123 suojaan. Kyseisellä suojalla mitoitusjännitteen arvo on $U_r = 120\ kV$ ja jäännösjännite U_{res} 8/20µs 10kA:n virralla on 282 kV. Hetkellisten käyttötaajuisten ylijännitteiden sietokyky on 138 kV/1s ja 132 kV/10s. Kyseiset arvot ovat saatu valmistajan ylijännitesuojan manuaalista, katso liite 4. Käyttämällä jäännösjännitteen U_{res} arvoa kaavassa 6.23 huomataan, että suojaustaso paranee edellisestä. (ABB 2007, 2–3.)

$$(\frac{550\ kV}{282\ kV} - 1) * 100 = 95\ \% \tag{6.23}$$

Mikäli tarvitaan suojaustasoltaan parempi suoja, ylijännitesuojaksi valitaan pienemmän jäännösjännitteen omaava suoja. Tällöin suojalla on parempi suojausmarginaali, mutta vielä tulisi huomioida etäisyys suojattavasta kohteesta sekä eristyksen ikääntyminen. Nämä huomioituna todellinen suojaustaso on 10–15 % pienempi kuin laskennallinen suojaustaso eli -marginaali. (ABB 2007, 2–3.)

6.5.3 Jakeluverkko

Kompensoidussa verkossa ylijännitesuojan suurimman käyttöjännitteen U_c tulee olla suurempi kuin verkon maksimi käyttöjännitteen U_m. Laukaisevalla maasulkusuojauksella, eli relesuojauksella toteutetussa verkossa ylijännitesuojan jatkuvan käyttöjännite U_c lasketaan kaavalla 6.24. (ABB 2007, 2–3.)

$$U_c = \frac{K_e U_m}{c_{TOV}\sqrt{3}} \approx \frac{U_m}{c_{TOV}} \tag{6.24}$$

Seuraavaksi käsitellään laukaisevan maasulkusuojauksen esimerkkiä. Esimerkissä on käytetty hetkellisten ylijännitteiden TOV-kertoimen c_{TOV} arvoa, joka on poimittu

ylijännitesuojan POLIM DA 20 valmistajan julkaisemasta manuaalista. Esimerkissä käytetään seuraavia arvoja (ABB 2007, 2–3.)

- Järjestelmän maksimijännite U_m on 21 kV
- Maasulun kestoaika on 1s
- Hetkellisten ylijännitteiden TOV-kertoimen c_{TOV} arvo on 1,312. Arvo on poimittu liitteestä 5.

Sijoitetaan käytetyt arvot kaavaan 6.24.

$$U_c = \frac{U_m}{c_{TOV}} = \frac{21}{1{,}312} = 16\ kV \tag{6.24}$$

Kaavalla 6.24 ylijännitesuojan suurimmaksi jatkuvaksi käyttöjännitteeksi U_c saadaan 16 kV. Ylijännitesuojaa valittaessa käytetään kaavalla 6.24 laskennallisesti saatua suurempaa arvoa. Ylijännitesuojan valinnassa käytetään suurempaa jatkuvan käyttöjännitteen U_c arvoa, kuin laskennallisesti on saatu. Tämän vuoksi valitaan ylijännitesuojaksi POLIM DA 20, jonka suurin jatkuva käyttöjännite U_c on 20 kV sekä jäännösjännite U_{res} on 8/20µs 10 kA:n virralla 70 kV. Kyseiset arvot ovat saatu valmistajan ylijännitesuojan manuaalista, katso liite 6. (ABB 2007, 2–3.)

Järjestelmän maksimijännitteen perusteella määritetään peruseristystaso U_{liwl} taulukon 4.2 perusteella. Järjestelmän maksimijännitteen arvona on käytetty esimerkissä 21 kV, jolloin peruseristystaso U_{liwl} määritetään salamasyöksyjännitteen kestotason arvon 125 kV:n mukaa. Peruseristystason arvoa käytetään ylijännitesuojan suojaustason määrittämisessä. Suojaustaso lasketaan kaavalla 6.25. (ABB 2007, 2–3.)

$$\left(\frac{U_{liwl}}{U_{res}} - 1\right) * 100 = (\frac{125\ kV}{70\ kV} - 1) * 100 = 78{,}5\ \%. \tag{6.25}$$

Mikäli suojaustasolta edellytetään parempaa suojaa, niin ylijännitesuojatyyppi tulisi vaihtaa esimerkiksi saman valmistajan MWK 20 suojaan. Kyseisellä suojalla mitoitusjännitteen arvo on $U_r = 20\ kV$ ja jäännösjännite U_{res} 8/20µs 10 kA:n virralla on 61,4 kV. Kyseiset arvot ovat saatu valmistajan ylijännitesuojan manuaalista, katso liite 7.

Käyttämällä jäännösjännitteen U_{res} arvoa kaavassa 6.25 huomataan, että suojaustaso paranee edellisestä. (ABB 2007, 2–3.)

$$\left(\frac{U_{liwl}}{U_{res}} - 1\right) * 100 = (\frac{125\ kV}{61{,}4\ kV} - 1) * 100 = 103{,}5\ \%. \tag{6.25}$$

Mikäli tarvitaan suojaustasoltaan parempi suoja, niin ylijännitesuojaksi valitaan pienemmän jäännösjännitteen omaava suoja. Tällöin suojalla on parempi suojausmarginaali, mutta vielä tulisi huomioida etäisyys suojattavasta kohteesta sekä eristyksen ikääntyminen. Nämä huomioituna todellinen suojaustaso on 10–15 % pienempi, kuin laskennallinen suojaustaso, eli -marginaali. (ABB 2007, 2–3.)

6.5.4 Tähtipistesuojaus

Verkon maksimijännitteen U_m ollessa 123 kV, niin tähtipistesuojan nimellisjännitteen voidaan katsoa olevan

$$U_c = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{123\ kV}{\sqrt{3}} = 71\ kV \tag{6.26}$$

Kyseisessä tapauksessa valitaan ylijännitesuoja, jonka U_c on vähintään 71 kV. Valmistajasta riippuen tyypillisesti käytetään nimellisjännitteeltään 72 kV ylijännitesuojaa.

6.5.5 Kaapelivaipan suojaus

Korkea- ja keskijännitesiirtokaapeleissa käytetään ylijännitesuojaa kaapelivaipan suojauksessa. Kyseissä tapauksessa järjestelmä on maadoitettu vain toisesta päästä, jolloin maadoittaman puoli suojataan ylijännitesuojalla. Suojauksella pyritään estämään kaapelivaipan liiallinen lämpörasitus ylijännitetilanteissa. Kyseisissä tapauksissa ylijännitesuojan suurin jatkuva käyttöjännite valitaan seuraavalla yhtälöllä

$$U_C \geq \frac{U_i}{c_{TOV}}\ I_K\ L_K \tag{6.27}$$

jossa indusoitunut jännite jaetaan TOV-kertoimella ja kerrotaan vaiheeseen kohdistuvalla oikosulkuvirralla sekä maadoittamattoman kaapeliosuuden pituudella. (ABB 2011, 53.)

6.5.6 Vaihe-maa-suojaus

Seuraavaksi käsitellään vaihe-maa-väliin asennettavaa metallioksidisuojan valintaa. Suoja sijoitetaan tehollisesti maadoitettuun 420 kV verkon muuntajalle, jossa maasulkusuojaus on laukaiseva. Kyseisessä tapauksessa arvioidaan, että pisin maasulun kestoaika on 10 s, kun otetaan huomioon varasuojauksen toiminta-aika. Muuntajan yläjännitepuolen koejännite salamasyöksyjännitteellä on 1425 kV ja muuntaja on valmistettu IEC-standardien mukaan. Tehollisesti maadoitetussa verkossa maasulkukerroin k saa arvoksi 1,4. (Aro & al. 2015, 355.)

Suurimmaksi jatkuvaksi käyttöjännitteeksi U_c saadaan $420/\sqrt{3} = 242\ kV$, johon tulee huomioida 5−10 % varmuuskerroin. Jatkuvaksi käyttöjännitteeksi U_c saadaan 254−266 kV, kun huomioidaan kyseinen marginaali. Alustavaksi mitoitusjännitteeksi U_r saadaan $U_c/0{,}8 = 318 - 333\ kV$. Seuraavaksi huomioidaan suurin maasulun aikainen jännite, joka on $1{,}4 * 420\ kV/\sqrt{3} = 339\ kV$. (Aro & al. 2015, 355.)

Suojan valmistajilla on olemassa suojan käyttötaajuisen ylijännitteen sietokäyrästä. Työssä käytetty käyrästö on esitetty kuvassa 6.1. Kokonaisvika-ajan ollessa 10s, kertoimeksi saadaan kuvan 6.1 perusteella $c_{TOV} \approx 1{,}1$. Mitoitusjännitteen U_r arvoa ohjaavaksi ehdoksi saadaan $U_r \geq 339\ kV\ /\ 1{,}1 = 308\ kV$. Laskussa on käytetty mitoitusjännitteen 333 kV sijasta maasulun aikaista jännitettä 339 kV, joka on arvoltaan suurempi. (Aro & al. 2015, 355.)

Ylijännitesuojan valmistajan taulukosta valitaan mitoitusjännitteeltään U_r suurempi arvo kuin edellä saatu 308 kV. Tässä esimerkissä käytetään erään valmistajan tyyppiä PEXLIM Q-Y. Kyseisen suojan taulukosta valitaan suurempi mitoitusjännitteen U_r arvo, joka on 336 kV. Taulukko on nähtävissä liitteestä 8. (Aro & al. 2015, 355.)

Suojan suurimmaksi jatkuvaksi käyttöjännitteeksi määrittyy ylijännitesuojan valmistajan taulukon perusteella 267 kV, jota tulee verrata $(1{,}05 - 1{,}1) * 242\ kV = 254 - 266\ kV$ arvoon. Alustavasti tarkasteltuna valitun suoja suurin sallittu käyttöjännite on riittävä. Suojan 10 kA:n suojauspurkausvirralla suojaustaso on 790 kV. Tällöin suojaussuhteeksi

saadaan 1425 kV/ 790kV = 1,80. Suojaussuhde on suurempi kuin standardin mukainen vähimmäisvaatimus, joten suoja soveltuu käyttökohteeseen. (Aro & al. 2015, 355.)

7 Yhteenveto

Tutkielmassa käsitellään ylijänniteilmiötä, ylijännitesuojasta, eristyskoordinaatiota, ylijännitesuojan sijoitusta ja valintaa. Näiden menetelmien avulla on esitetty ylijännitettä ilmiönä ja käsitelty tyypillisimpiä suojausmenetelmiä ylijännitteitä kohtaan. Ylijännitteitä tyypillisesti ilmenee avojohtoverkoissa ukkosen aiheuttamina tai sähköverkkojen kytkentätilanteiden muodostamina. Ylijännitesuojauksen tarkoituksena on suojata verkon komponentit ylijännitteiden rasituksilta. Lisäksi suojien tarkoitus on yllä pitää sähköverkon toimintakyky ja estää keskeytyksistä aiheutavat taloudelliset vahingot. Tutkimuksen voidaan nähdä tavoittaneen sille asetetut päämäärät, sillä toimeksiantajalla on nyt käytössään ajankohtainen ja yleiset kriteerit täyttävä ohjeistus ylijännitesuojauksen toteuttamisesta.

Tutkielman alussa tutkimusongelmaksi määriteltiin se, että toimeksiantajalla ei ole tällä hetkellä yleisesti käytössä olevaa ohjeistusta ylijännitesuojauksen suunnittelusta, vaikka tälle nähdään olevan tarvetta. Tutkimuksen pääasiallinen ansio onkin se, että nyt toimeksiantajalla on käytössään tieto siitä, kuinka ylijännitesuojaus tulee toteuttaa IEC-standardeja noudattaen.

Ylijänniteilmiöön perehdyttäessä on oleellista perehtyä ylijänniteluokkiin. Ylijännitteet luokitellaan tyypillisesti pientaajuisiin, loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin ylijännitteisiin. Luokittelu perustuvat niiden muotoon. Tätä luokittelua käsitellään tarkemmin luvussa 3.

Seuraavaksi tutkielmassa edetään eristyskoordinaatioon, jossa otetaan kantaa laitteiden jännitelujuuden valintaan ja soveltuvuuteen suhteessa verkossa esiintyviin ylijännitteisiin. Kyseisessä kappaleessa on käsitelty suojalaitteiden ominaisuuksia, joilla vaikutetaan eristysvaurioiden ja käyttökeskeytysten esiintymistodennäköisyyden alentamiseen taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle.

Tutkielmassa lisäksi perehdyttiin ylijännitesuojatyyppeihin ja niiden soveltuvuuksiin eri käyttökohteissa. Nykypäivänä tyypillinen ylijännitesuojaus toteutetaan metallioksidisuojalla. Kyseisiä suojia käytetään muun muassa ilmajohdoilla, muuntajilla,

kaasueristetyt kytkinlaitoksilla, ilmaeristetyillä kytkinlaitoksilla, generaattoreilla ja suurjännitemoottoreilla. Tutkielmassa on käsitelty edellä mainittujen laitteiden ylijännitesuojausta.

Lisäksi työssä on käsitelty ylijännitesuojauksen toteuttamisen laajuutta, eli missä laajuudessa ylijännitesuojauksen toteuttaminen on teknistaloudellisessa näkökulmassa perusteltua. Kokonaiskustannuksia tarkasteltaessa on perusteltua käyttää ylijännitesuojia aina kun ylijännitteet ovat todennäköisiä. Jakeluverkon syöttöasemilla ja siirtoverkossa kytkinlaitoksen, muuntajan tai kaapelin vaurioista aiheutuvat taloudelliset menetykset ovat niin suuret, että ylijännitesuojia kannattaa käyttää usein. Kaapelin tai muuntajan vaurioituminen jakeluverkossa tarkoittaa käytännössä pitkää keskeytystä. Ylijännitesuojien hankintakustannukset ovat suurien sähköverkkojen vaurio- ja keskeytyskustannuksiin verrattuna marginaalisia.

LÄHTEET

ABB, 2016. High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide. [verkkodokumentti] [viitattu 25.3.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/be50e909d1fa4a4ba73ad54f0466f88f/Surge%20Arresters%20Buyer's%20Guide%20Edition12.pdf

ABB, 2014. High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide – Section PEXLIM Q. [verkkodokumentti] [viitattu 1.3.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/fc3493e4b45396a8c1257cd6002a9ba4/PEXLIM%20Q%20-%20Section%20of%20Surge%20Arrester%20Buyers%20Guide%20-%20Edition%2011%202014-05%20-%20English%20-%201HSM%209543%2012-00en.pdf

ABB, 2013A. Datasheet - Surge arrester POLIM-D. [verkkodokumentti] [viitattu 1.3.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/ef24f24a8657a4bdc1257c210032208d/ABB%20Surge%20arrester%20POLIM-D%20-%20Data%20sheet%201HC0075853%20E01%20AD.pdf

ABB, 2013B. Datasheet - Surge arrester MWK. [verkkodokumentti] [viitattu 1.3.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/1b7d202dce37a44ec1257c210031cbb2/ABB%20Surge%20arrester%20MWK%20-%20Data%20sheet%201HC0075865%20E01%20AB.pdf

ABB, 2011. Overvoltage protection – Metal oxide surge arresters in medium voltage systems. ABB. [verkkodokumentti] [viitattu 14.11.2016] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/70e9fd6933c8c644c12578d200333cb5/952_abb_awr_mittelspannung_E_low.pdf

ABB, 2009. High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide – Section PEXLIM R. [verkkodokumentti] [viitattu 1.3.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/641ca077c8de9688c1257b130057ba0e/1HSM%209543%2012-00%20Surge%20Arresters%20Buyers%20Guide%20Edition%207.3%202009-12%20-%20Section%20PEXLIM%20R%20page%2029-35%20English.pdf

ABB, 2007. Suurjännitetuotteet – Ylijännitesuojaus. Tuote-esite. Vaasa

ABB, 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita –käsikirja, luku 6 Helsinki.

Annanpalo, Jaakko et al., 2005. Rakennusten ylijännite- ja ukkossuojaus

Aro, Martti et al., 2015. Suurjännitetekniikka. Otatieto Oy

CLC/TS 61643-12, 2009. Low-voltage surge protective devices – Part 12. Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles. CENELEC

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II – Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto Oy

Elovaara, J. 1992. Metallioksidisuojat sekä niiden valinta ja sijoitus. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.

Elovaara, J & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Toinen painos. Helsinki: Otakustantamo.

Eskelinen H., ja Karsikas S. 2012, 78–79. Tutkimusmetodiikan perusteet. Koulutus- ja kehittämiskeskus. Julkaisu 12. 1§

Hirsjärvi S., Remes P., Sajavaara P. 2010, 138. Tutki ja kirjoita. Tammi

Hinrichsen, V. 2011. Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems. Siemens. [verkkodokumentti] [viitattu 15.11.2016] Saatavissa: http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/aboutus/Arrester_Book_Ed%20_3_en.pdf

IEC 60071-1, 2006. Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules. Internation Standard.

IEC 60071-2, 1996. Insulation co-ordination. Part 2: Application guide. Internation Standard.

IEC 60099-1, 1991. Surge arresters – Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems.

IEC 60099-4, 1998. Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.

Ilmatieteenlaitos, 2006. Keskimääräinen ukkospäiväluku ja salamaniskutiheys. [verkkodokumentti] [viitattu 3.11.2016] Saatavissa: http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ukkosilmasto

Korpinen, L. 1998. Sähkön siirto- ja jakeluverkot [verkkodokumentti] [viitattu 9.10.2016] Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf

Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, D1-2012. 20. painos. Espoo 2013. Sähkö ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.

Mueller, A & Saemann, D. 2011. Switching phenomena in medium voltage systems - good engineering practice on the application of vacuum circuit-breakers and contactors. IEEE [verkkodokumentti] [viitattu 23.11.2016] Saatavissa: http://ieeexplore.ieee.org/document/5936959/

SFS 6000-4-44, 2007. Pienjännitesähköasennukset. Suojausmenetelmät – Suojaus jännitehäiriöiltä ja magneettisilta häiriöiltä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 6001, 2015. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Tyco Electronics Raychem GmbH, 2008. Surge Arresters for Medium Voltage Power Systems. [verkkodokumentti][viitattu 5.2.2017] Saatavissa: http://raychem.kz/te/catalogs/eng/Surge_Arresters_for_Medium_Voltage_Power_System.PDF

ST 53.16, 2011. Rakennusten sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien ylijännitesuojaus., Espoo: Sähköinfo Oy.

Tiainen, E. 2014. Maadoituskirja. Espoo: Sähköinfo Oy.

Valli, R. 2001b. Kyselylomaketutkimus, toim. Aaltola, J., Valli, R. Toim. Ikkunoita tutkimusmetodeihin. Virikkeitä aloittelevalle tutkijalle. Osa: 1, Metodin valinta ja aineistonkeruu. Jyväskylä, PS-kustannus.

LIITTEET

LIITE 1 Pienjänniteverkon ylijännitesuojien luokittelu (ST 53.16 2011, 11)

Kriteeri	Ominaisuus
Portteja	yksi tai kaksi (suojan sisäinen kytkentä, kaksiporttinen suoja sisältää sarjaimpedanssin, kohta 1.1)
Rakenne	jännitettä kytkevä, jännitettä rajoittava tai näiden kombinaatio
Testausvaatimus[3)]	luokka I[1)], II[2)] ja/tai III[2)] (IV[5)])
Tyyppi (EN)	tyyppi 1 (karkea suoja), tyyppi 2 (välisuoja), tyyppi 1 + 2, tyyppi 3 (hienosuoja) tai tyyppi 4[5)]
Luokka (IEC)	class I, class II, class I + II tai class III (vastaavat tyyppejä 1, 2 ja 3)
Sijainti	sisällä tai ulkona
Pääsy	päästävissä tai ei pääsyä
Asennus	kiinteä tai siirrettävissä
Erotin	sijainti (ulkoinen, sisäinen, sekä ulkoinen että sisäinen tai ei mitään) ja suojausfunktiot (lämpö, vuotovirta tai ylivirta)
Ylivirtasuojaus	spesifioitu tai ei
Kotelointiluokka	IP-luokka
Lämpötila-alue	normaali tai laajennettu
Ilmanpaine	asennuskorkeus enintään 2000 m[4)], 80 kPa – 106 kPA[5)]
Kosteusalue	30 % – 90 %[4)], kontrolloitu tai ei kontrolloitu[5)]

1) Testausluokka I on tarkoitettu simuloimaan osaa salamavirrasta. Luokan I mukaisesti testattuja ylijännitesuojia suositellaan yleisesti suurille virroille alttiisiin paikkoihin salamasuojauksen yhteydessä. Näitä suojia käytetään potentiaalintasauksessa salamasuojauksen ja sähköjärjestelmän välillä. Testausvirtapulssin kestoaika luokan I testauksessa on paljon pitempi kuin luokan II ja III testauksissa (kuva 2).
2) Pitää huomata, että ylijännitesuojien testausluokilla I–III ei ole mitään tekemistä ylijännitekestävyysluokkien I–IV kanssa.
3) Luokan I ja II testauksissa suojan läpi johdetaan tietty virta (virtageneraattori). Luokan III testauksessa suojan läpi kulkeva virta riippuu jännite-virtageneraattorin CWG tyhjäkäyntijännitteestä U_{OC} ja suojan ominaisuuksista.
4) Sähkötekniston järjestelmien ylijännitesuojat
5) Tietotekniston järjestelmien ylijännitesuojat

LIITE 2 Verkkokomponenttien hintatietoja

Ylijännitesuojien hinnat	a/kpl
110 kV:n vaihekohtainen hinta	900 €
110 kV:n nollapistesuojan hinta	700 €
20 kV:n vaihekohtainen hinta	150 €

Moottorien hintaluokat	a/kpl
LV-moottorit	50 - 50 000
MV-moottorit	15 000 - 500 000€
Tahtikoneet	50 000 - 1 000 000€
LV-generaattorit	1 000 - 40 000€

Kaapelien hintaluokat	€/km
Ilmajohdot 0,4 - 20 kV	16 000 - 52 000
Maakaapelit 0,4 - 20 kV	8 500 - 86 000
Ilmajohdot 110 kV	130 000 - 600 000€
Maajohdot 110 kV	220 000 - 350 000

Muuntajien hintaluokat	a/kpl
Jakelumuuntajat	3 000 - 22 000
Päämuuntajat	240 000 - 860 000

LIITE 3 Ylijännitesuojatyypin PEXLIM R arvot (ABB 2009, 31.)

Max. system voltage	Rated voltage	Max. continuous operating voltage [1]		TOV capability [2]		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC	as per ANSI/IEEE			30/60 µs			8/20 µs			
U_m	U_r	U_c	MCOV	1 s	10 s	0.5 kA	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}
123	90	72	72.0	103	99.0	186	193	202	220	234	262	299
	96	77	77.0	110	105	198	206	215	235	249	279	319
	102	78	82.6	117	112	210	218	229	250	265	296	339
	108	78	84.0	124	118	223	231	242	264	280	314	359
	120	78	98.0	138	132	247	257	269	294	311	349	398
	132	78	106	151	145	272	283	296	323	342	383	438
	138	78	111	158	151	284	295	309	338	358	401	458
	144	78	115	165	158	297	308	323	352	373	418	478
145	108	86	86.0	124	118	223	231	242	264	280	314	359
	120	92	98.0	138	132	247	257	269	294	311	349	398
	132	92	106	151	145	272	283	296	323	342	383	438
	138	92	111	158	151	284	295	309	338	358	401	458
	144	92	115	165	158	297	308	323	352	373	418	478
170	132	106	106	151	145	272	283	296	323	342	383	438
	138	108	111	158	151	284	295	309	338	358	401	458
	144	108	115	165	158	297	308	323	352	373	418	478

LIITE 4 Ylijännitesuojatyypin PEXLIM Q arvot (ABB 2014, 42.)

Max. system voltage	Rated voltage	Max. continuous operating voltage [1]		TOV capability [2]		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC	as per ANSI/IEEE			30/60 µs			8/20 µs			
U_m	U_r	U_c	MCOV	1 s	10 s	0.5 kA	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}
24[3]	24	19.2	19.4	27.6	26.4	46.1	47.6	49.5	53.6	56.4	62.1	69.4
36[3]	30	24.0	24.4	34.5	33.0	57.6	59.5	61.8	67.0	70.5	77.6	86.8
	36	28.8	29.0	41.4	39.6	69.2	71.4	74.2	80.4	84.6	93.1	105
52	42	34	34.0	48.3	46.2	80.7	83.3	86.5	93.8	98.7	109	122
	48	38	39.0	55.2	52.8	92.2	95.1	98.9	108	113	125	139
	51	41	41.3	58.6	56.1	98.0	102	105	114	120	132	148
	54	43	43.0	62.1	59.4	104	107	112	121	127	140	157
	60	48	48.0	69.0	66.0	116	119	124	134	141	156	174
	72	58	58.0	82.8	79.2	139	143	149	161	170	187	209
72	54	43	43.0	62.1	59.4	104	107	112	121	127	140	157
	60	48	48.0	69.0	66.0	116	119	124	134	141	156	174
	66	53	53.4	75.9	72.6	127	131	136	148	156	171	191
	72	58	58.0	82.8	79.2	139	143	149	161	170	187	209
	75	60	60.7	86.2	82.5	144	149	155	168	177	194	217
	78	62	63.1	89.7	85.8	150	155	161	175	184	202	226
	81	65	65.6	93.1	89.1	156	161	167	181	191	210	235
	84	67	68.0	96.6	92.4	162	167	173	188	198	218	243
100	75	59	60.7	86.2	82.5	144	149	155	168	177	194	217
	78	61	63.1	89.7	85.8	150	155	161	175	184	202	226
	84	65	68.0	96.6	92.4	162	167	173	188	198	218	243
	90	69	72.0	103	99.0	173	179	186	201	212	233	261
	96	74	77.0	110	105	185	191	198	215	226	249	278
123	90	72	72.0	103	99.0	173	179	186	201	212	233	261
	96	77	77.0	110	105	185	191	198	215	226	249	278
	102	78	82.6	117	112	196	203	210	228	240	264	295
	108	78	84.0	124	118	208	214	223	242	254	280	313
	120	78	98.0	138	132	231	238	248	268	282	311	347
	129	78	104	148	141	248	256	266	288	304	334	373
	132	78	106	151	145	254	262	272	295	311	342	382
	138	78	111	158	151	265	274	285	309	325	357	399
	144	78	115	165	158	277	286	297	322	339	373	417
	150	78	121	172	165	288	298	309	335	353	388	434

LIITE 5 Ylijännitesuoja POLIM-D (ABB 2013A, 1.)

Technical data

Surge arrester with metal oxide resistors without spark gaps (MO surge arrester), direct molded in silicone housing, grey color, designed and tested according to IEC 60099-4.

Nominal discharge current I_n 8/20 µs	10 kA peak
Line discharge class (LD)	1
High current impulse I_{hc} 4/10 µs	100 kA peak
Long duration current impulse	250 A / 2000 µs
Short circuit rating I_s 50 Hz	20 kA rms for 0.2 s
Classification according to IEEE (ANSI) C62.11	distribution heavy duty

The thermal stability of the MO surge arrester is proved in the operating duty test with a high current impulse I_{hc} = 100 kA, which gives an energy input of 3.6 kJ/kV (U_c).

Power frequency voltage versus time characteristic (TOV) with prior energy input

t = 1 s	$U_{TOV} = 1.325 \times U_c$
t = 3 s	$U_{TOV} = 1.300 \times U_c$
t = 10 s	$U_{TOV} = 1.275 \times U_c$

Mechanical loads

Torque moment	50 Nm
Tensile strength axial	625 N
Short term load SSL horizontal to axis	207 Nm
Long term load SLL horizontal to axis	207 Nm

General data

Ambient air temperature	–60 to +40 °C (for higher values contact manufacturer)
Altitude	up to 1800 m (for higher values contact manufacturer)
Frequency of system voltage	16.7/50/60 Hz
Weather ageing test	tested according to test series A (1000 h salt fog)

LIITE 6. Ylijännitesuojatyypin POLIM-D arvot (ABB 2013A, 2.)

U_c Continuous operating voltage	U_r Rated voltage	Residual voltage U_{res} in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/…µs		wave 8/20 µs					wave 30/60 µs		
kV	kV	5 kA	10 kA	1 kA	2.5 kA	5 kA	**10 kA**	20 kA	125 A	250 A	500 A
rms	rms	peak	peak	peak	peak	peak	**peak**	peak	peak	peak	peak
4	5.0	14.5	16.0	11.7	12.4	13.1	**14.0**	15.9	10.4	10.8	11.1
6	7.5	21.7	24.0	17.5	18.5	19.6	**21.0**	23.9	15.6	16.1	16.6
8	10.0	28.9	32.0	23.3	24.7	26.1	**28.0**	31.8	20.8	21.5	22.2
10	12.5	36.1	39.9	29.1	30.8	32.6	**35.0**	39.8	25.9	26.8	27.7
12	15.0	43.3	47.9	34.9	37.0	39.1	**42.0**	47.7	31.1	32.2	33.2
14	17.5	50.5	55.9	40.7	43.2	45.6	**49.0**	55.7	36.3	37.5	38.8
16	20.0	57.7	63.9	46.5	49.3	52.1	**56.0**	63.6	41.5	42.9	44.3
18	22.5	64.9	71.9	52.3	55.5	58.6	**63.0**	71.6	46.7	48.2	49.8
20	25.0	72.1	79.8	58.1	61.6	65.1	**70.0**	79.5	51.8	53.6	55.3
22	27.5	79.4	87.8	64.0	67.8	71.7	**77.0**	87.4	57.0	59.0	60.9
24	30.0	86.6	95.8	69.8	74.0	78.2	**84.0**	95.4	62.2	64.3	66.4
26	32.5	93.8	103.8	75.6	80.1	84.7	**91.0**	103.3	67.4	69.7	71.9
28	35.0	101.0	111.8	81.4	86.3	91.2	**98.0**	111.3	72.6	75.0	77.5
30	37.5	108.2	119.7	87.2	92.4	97.7	**105.0**	119.2	77.7	80.4	83.0
32	40.0	115.4	127.7	93.0	98.6	104.2	**112.0**	127.2	82.9	85.7	88.5
34	42.5	122.6	135.7	98.8	104.8	110.7	**119.0**	135.1	88.1	91.1	94.1
36	45.0	129.8	143.7	104.6	110.9	117.2	**126.0**	143.1	93.3	96.4	99.6

LIITE 7. Ylijännitesuojatyypin MWK arvot (ABB 2013B, 2.)

U_c Continuous operating voltage	U_r Rated voltage	Residual voltage U_{res} in kV peak at specified impulse current									
		wave 1/…µs		wave 8/20 µs					wave 30/60 µs		
kV	kV	5 kA	10 kA	1 kA	2.5 kA	5 kA	**10 kA**	20 kA	125 A	250 A	500 A
rms	rms	peak	peak	peak	peak	peak	**peak**	peak	peak	peak	peak
4	5.0	12.7	13.5	10.5	11.1	11.7	**12.3**	14.1	9.2	9.5	9.9
5	6.3	15.9	16.8	13.1	13.9	14.6	**15.4**	17.6	11.4	11.9	12.4
6	7.5	19.1	20.2	15.8	16.7	17.5	**18.5**	21.1	13.7	14.3	14.8
7	8.8	22.2	23.5	18.3	19.4	20.3	**21.5**	24.6	16.0	16.6	17.2
8	10.0	25.4	26.9	21.0	22.2	23.3	**24.6**	28.1	18.3	19.0	19.7
9	11.3	28.6	30.2	23.6	25.0	26.2	**27.7**	31.6	20.5	21.4	22.2
10	12.5	31.7	33.5	26.1	27.7	29.0	**30.7**	35.0	22.8	23.7	24.6
11	13.8	34.9	36.9	28.8	30.5	32.0	**33.8**	38.6	25.1	26.1	27.1
12	15.0	38.1	40.3	31.4	33.3	34.9	**36.9**	42.1	27.4	28.5	29.6
13	16.3	41.2	43.6	34.0	36.0	37.8	**40.0**	45.6	29.6	30.8	32.0
14	17.5	44.3	46.9	36.6	38.7	40.6	**43.0**	49.1	31.9	33.2	34.4
15	18.8	47.5	50.3	39.2	41.5	43.6	**46.1**	52.6	34.2	35.5	36.9
16	20.0	50.7	53.7	41.9	44.3	46.5	**49.2**	56.1	36.5	37.9	39.4
17	21.3	53.8	56.9	44.4	47.0	49.3	**52.2**	59.6	38.7	40.2	41.8
18	22.5	57.0	60.3	47.1	49.8	52.3	**55.3**	63.1	41.0	42.6	44.3
19	23.8	60.2	63.7	49.7	52.6	55.2	**58.4**	66.6	43.3	45.0	46.8
20	25.0	63.3	67.0	52.2	55.3	58.0	**61.4**	70.0	45.5	47.3	49.2
21	26.3	66.5	70.4	54.9	58.1	60.9	**64.5**	73.6	47.8	49.7	51.6
22	27.5	69.7	73.7	57.5	60.9	63.9	**67.6**	77.1	50.1	52.1	54.1
23	28.8	72.9	77.1	60.1	63.7	66.8	**70.7**	80.6	52.4	54.5	56.6
24	30.0	76.0	80.4	62.7	66.4	69.6	**73.7**	84.1	54.6	56.8	59.0
25	31.3	79.2	83.8	65.3	69.2	72.5	**76.8**	87.6	56.9	59.2	61.5
26	32.5	82.3	87.1	68.0	72.0	75.5	**79.9**	91.1	59.2	61.6	64.0

LIITE 8. Ylijännitesuojatyypin PEXLIM Q-Y arvot. (ABB 2016, 43.)

Max. system voltage	Rated voltage	Max. continuous operating voltage [1]		TOV capability [2]		Max. residual voltage with current wave						
		as per IEC	as per ANSI/IEEE			30/60 µs			8/20 µs			
U_m	U_r	U_c	MCOV	1 s	10 s	0.5 kA	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{rms}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}	kV_{peak}
145	138	92	111	151	143	265	274	285	309	325	357	399
	144	92	115	158	149	277	286	297	322	339	373	417
	150	92	121	165	156	288	298	309	335	353	388	434
	162	92	131	178	168	312	321	334	362	381	419	469
	168	92	131	184	174	323	333	346	376	395	435	486
	180	92	144	198	187	346	357	371	402	423	466	521
170	132	106	106	145	137	254	262	272	295	311	342	382
	144	108	115	158	149	277	286	297	322	339	373	417
	150	108	121	165	156	288	298	309	335	353	388	434
	162	108	131	178	168	312	321	334	362	381	419	469
	168	108	131	184	174	323	333	346	376	395	435	486
	180	108	144	198	187	346	357	371	402	423	466	521
	192	108	152	211	199	369	381	396	429	452	497	555
245	180	144	144	198	187	346	357	371	402	423	466	521
	192	154	154	211	199	369	381	396	429	452	497	555
	198	156	160	217	206	381	393	408	443	466	512	573
	210	156	170	231	218	404	417	433	469	494	543	608
	216	156	175	237	224	415	428	445	483	508	559	625
	219	156	177	240	227	421	434	451	489	515	567	634
	222	156	179	244	231	427	440	458	496	522	574	642
	228	156	180	250	237	438	452	470	510	536	590	660
300	216	173	175	237	224	415	428	445	483	508	559	625
	240	191	191	264	249	461	476	495	536	564	621	694
	258	191	209	283	268	496	512	532	576	607	667	746
	264	191	212	290	274	507	523	544	590	621	683	764
	276	191	220	303	287	530	547	569	617	649	714	798
362	258	206	209	283	268	496	512	532	576	607	667	746
	264	211	212	290	274	507	523	544	590	621	683	764
	276	221	221	303	287	530	547	569	617	649	714	798
	288	230	230	316	299	553	571	593	643	677	745	833
420	330	264	267	363	343	634	654	680	737	776	854	954
	336	267	272	369	349	646	666	692	751	790	869	972
	342	267	277	376	356	657	678	705	764	804	885	989
	360	267	291	396	374	692	714	742	804	846	931	1046
	372	267	301	409	387	715	737	766	831	875	962	1080
	378	267	306	415	393	726	749	779	844	889	978	1098
	381	267	308	419	396	732	755	785	851	896	985	1106
	390	267	315	429	405	749	773	803	871	917	1013	1132
	396	267	318	435	412	761	785	816	885	931	1029	1150