

Henrik Envall

# YLIJÄNNITESUOJAUS SÄHKÖVERKOSSA

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Kirsi Nousiainen  
04/2020

# TIIVISTELMÄ

Henrik Envall: Ylijännitesuojaus sähköverkossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma  
04/2020

---

Eräs keino vähentää sähköverkossa esiintyviä häiriöitä ja keskeytyksiä on käyttää erilaisia ylijännitesuojia, jotka suojaavat verkon ja verkossa kiinni olevien laitteiden eristysrakenteita erityyppisiltä ylijännitteiltä. Ylijännitesuojat mitoitetaan niin, että ne alentavat verkkoon muodostuneen ylijännitteen riittävällä marginaalilla suojattavan kohteen kestotason alapuolelle. Ylijännitesuojia käyttämällä saadaankin parannettua verkon luotettavuutta ja toimitusvarmuutta. Tämä on hyödyllistä, sillä yhteiskunnan toimiminen vaatii luotettavaa ja häiriötöntä sähköenergian saantia, ja lisäksi sähkömarkkinalaki velvoittaa verkkoyhtiöitä kehittämään säävarmaa sähköverkkoa.

Työn tarkoituksena on käsitellä sähköverkon ylijännitesuojausta ja yleisimmin käytössä olevia suojalaitteita. Työn alussa käsitellään verkossa esiintyviä ylijännitteitä, joita ovat ilmastolliset ylijännitteet, kytkentäylijännitteet ja käyttötaajuiset ylijännitteet. Ylijännitesuojausta käsittelevä osa on rajattu koskemaan vain ilmastollisia ylijännitteitä vastaan käytettäviä ylijännitesuojia.

Hyvin lyhytkestoiset, mutta suuren energiasisällön omaavat ilmastolliset ylijännitteet voivat aiheuttaa suuria vaurioita verkkoon kytketyille laitteille. Tämän vuoksi erityisesti verkon toiminnan kannalta kriittisimmät ja arvokkaimmat laitteet suojataan ylijännitesuojilla. Ylijännitesuojista työssä käsitellään ukkosjohtimia, joiden tarkoituksena on estää suorat salamaniskut vaihejohtimiin, ja kipinävälejä, joita käytetään Suomessa alle 200 kVA:n pylväsmuuntamoiden suojaukseen. Syväällisimmin työssä käsitellään metallioksidisuoja, jotka ovat yleisimpiä markkinoilla olevia ylijännitesuojia. Työssä havaitaan, että metallioksidisuojiensa yksinkertainen rakenne ja vastusmateriaalin epälineaarinen käyttäytyminen sopivat hyvin ilmastollisten ylijännitteiden rajoittamiseen. Työn lopussa perehdytään myös johtosuojaan, jotka vähentävät verkossa esiintyviä häiriöitä ja parantavat sähkön laatua.

Kasvanut häiriöttömän sähkösaannin tarve vaatii sähköverkolta luotettavaa ja häiriötöntä toimintaa. Lyhyetkin keskeytykset voivat olla hyvin haitallisia esimerkiksi joillekin teollisuuden prosesseille. Keskeytykset aiheuttavat lisäksi taloudellisia tappioita. Näitä taloudellisia tappioita voidaan pienentää hyvin optimoidulla ylijännitesuojauksella.

Avainsanat: Ylijännitesuoja, ylijännite, ilmastollinen ylijännite, metallioksidisuoja, ukkosjohdin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. YLIJÄNNITTEET .....	2
2.1 Ilmastolliset ylijännitteet.....	2
2.1.1 Suora isku vaihejohtimeen.....	3
2.1.2 Takaisku .....	4
2.1.3 Indusoitunut ylijännite .....	4
2.2 Kytkenäylijännitteet .....	5
2.3 Käyttötaajuiset ylijännitteet.....	5
3. YLIJÄNNITESUOJAUS ILMASTOLLISILTA YLIJÄNNITTEILTÄ .....	7
3.1 Ukkosjohtimet .....	7
3.1.1 Suojauskulma.....	8
3.1.2 Ukkosjohtimen valinta ja häviöt .....	9
3.1.3 Ukkosjohtimien uudet sovellutukset .....	10
3.2 Kipinävälit .....	12
3.3 Metallioksidisuojat .....	13
3.3.1 Ominaisuudet .....	15
3.3.2 Sähköiset ja termiset ominaisuudet.....	16
3.3.3 Metallioksidisuojan valinta .....	18
3.3.4 Metallioksidisuojien ympäristörasitukset ja vanheneminen.....	20
3.4 Johtosuojat .....	21
4. POHDINTAA .....	25
5. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET .....	27

# 1. JOHDANTO

Sähköverkossa esiintyvät jänniterasitukset ovat eristysmitoitusten perustana. Jänniterasitukset jaetaan yleisesti kahteen osaan, jatkuvaan käyttöjännitteeseen ja ylijännitteisiin. Eri syistä aiheutuvat ylijännitteet ovat sähköverkon kannalta haitallisia. Ne rasittavat ja vaurioittavat sähköverkon sekä sähkökoneiden ja -laitteiden eristysrakenteita. Tämän vuoksi ylijännitteitä varten on kehitetty erilaisia ylijännitesuojia, joiden tarkoituksena on suojata verkkoa ja verkossa kiinni olevia laitteita haitallisilta ylijännitepulsseilta. Lisäksi ylijännitesuojat vähentävät verkossa esiintyvien katkoksien ja häiriöiden määrää. Tämä on tärkeää, sillä häiriötön sähkösaanti on yhteiskunnan ja teollisuuden pyörimisen kannalta välttämätöntä.

Tässä työssä tarkastellaan pääasiassa ilmastollisia ylijännitteitä vastaan kehitettyjä ylijännitesuojia. Ilmastollisilta ylijännitteiltä voidaan suojautua käytännössä kahdella tavalla: estämällä salamanisku verkkoon esimerkiksi ukkosjohtimilla tai rajoittamalla iskeyneen salaman aiheuttama ylijännite erilaisten ylijännitesuojien avulla riittävän alhaiseksi. Molempia tapoja käytetään yleisesti verkon suojauksessa. Kun käytetään molempia edellä mainittuja tapoja yhdessä ja optimoidaan suojien ominaisarvot sopiviksi, saadaan verkko hyvin suojattua ilmastollisilta ylijännitteiltä. Tämän vuoksi on tärkeää tietää riittävästi kyseisellä alueella esiintyvistä ylijännitteistä, niiden esiintymistiheydestä ja suuruudesta. Verkkoyhtiöt keräävätkin verkostaan erilaista informaatiota ja dataa, jotta ylijännitesuojaus saadaan mitoitettua ja optimoitua tietyille alueille sopivaksi.

Työn alussa perehdytään verkossa esiintyviin erilaisiin ylijännitteisiin, joita käsitellään niiden aiheuttajien perusteella. Tämän jälkeen käydään läpi ilmastollisia ylijännitteitä vastaan kehitettyjä ylijännitesuojia ja niihin liittyviä perussuureita. Lisäksi käsitellään kyseisten ylijännitesuojien toimintaa ja niiden valintaan vaikuttavia tekijöitä. Lopuksi käydään lyhyesti yleistä pohdintaa ylijännitesuojauksesta ja sen vaikutuksista häiriöttömään sähkösaantiin.

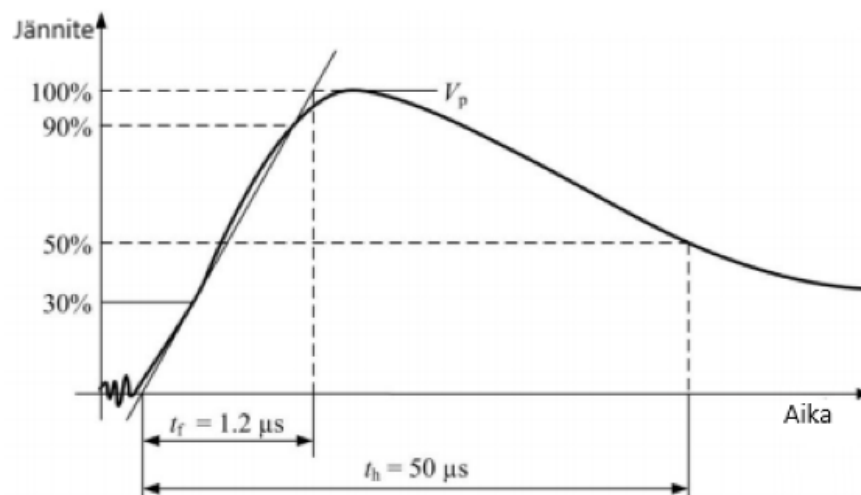
## 2. YLIJÄNNITTEET

Ylijännitteeksi nimitetään jännitettä, joka on suurempi kuin eristysrakenteen käyttöjännitteen mukaan määräytyvä referenssiarvo. Vaihe–maa-välillä ylijännitteeksi määritellään jännite, joka on suurempi kuin nimellisen vaihejännitteen huippuarvo  $(\sqrt{2}/\sqrt{3}) \cdot U_m$ , jossa  $U_m$  on laitteen suurin käyttöjännite. Vastaavasti vaiheiden välillä ylijännitteeksi määritellään jännite, joka ylittää nimellisen pääjännitteen huippuarvon  $\sqrt{2} \cdot U_m$ . [1]

Ylijännitteitä aiheutuu monista eri syistä. Yleisiä syitä ovat esimerkiksi salamanisku, verkkoon syntyvä vika, kuorman äkillinen irtoaminen verkosta ja kytkentätilanne. Tässä luvussa käsitellään ylijännitteitä niiden aiheuttajien mukaan.

### 2.1 Ilmastolliset ylijännitteet

Ilmastolliset ylijännitteet tarkoittavat salamaniskuista aiheutuvia ylijännitteitä. Ne ovat muodoltaan jyrkkiä transienttiylijännitteitä. Ylijännitepulssin nousuaika on tyypillisesti muutamia mikrosekunteja ja pulssin kokonaiskesto aika satoja mikrosekunteja [2]. Ne ovat siis lyhytkestoisia ja vaimenevat nopeasti, mutta niiden sisältämä energia on kuitenkin hyvin suuri. Kuvassa 1 on havainnollistettu ilmastollisille ylijännitteille määritetyn 1,2/50  $\mu\text{s}$ :n koejännitteen muoto. Tämä tarkoittaa sitä, että aallon rintaosa nousee huippuunsa 1,2  $\mu\text{s}$ :n aikana ja laskee puoleen huippuarvosta 50  $\mu\text{s}$ :n aikana. [2] Koejännitteitä käytetään testattaessa eristysrakenteiden jännitelujuuksia.



**Kuva 1.** Ilmastolliselle ylijännitteelle määritetty koejännitteen muoto. Muokattu lähteestä [3].

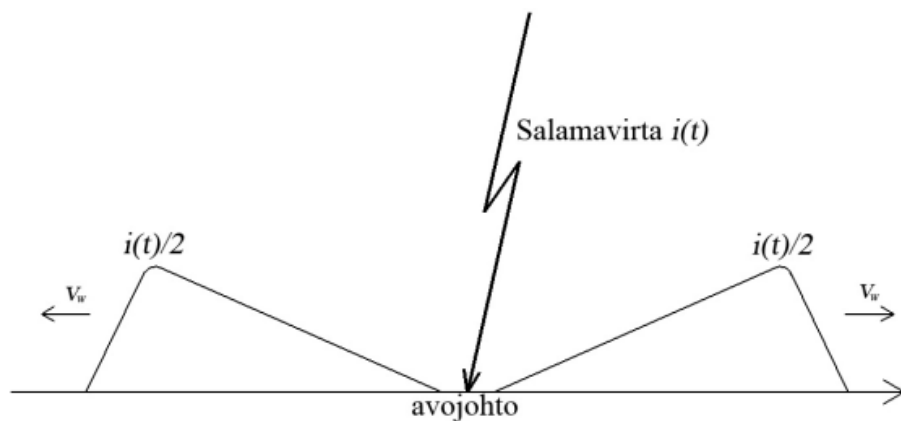
Salamaniskun seurauksena sähköverkkoon syntyvät ylijännitteet aiheutuvat pääasiassa kolmella tavalla. Nämä kolme tapaa ovat suora isku vaihejohtimeen, takaisku ja induktio. [1]

### 2.1.1 Suora isku vaihejohtimeen

Kun salama osuu suoraan vaihejohtimeen, muodostuu johdon molempiin suuntiin etenevä kulkuaalto. Salamavirta jakautuu yhtä suuriksi osiksi kulkuaaltoihin, joiden nopeus johdolla on lähes valon nopeus. Muodostuneen ylijänniteaallon suuruus  $u$  saadaan laskettua kaavalla

$$u = \frac{1}{2} Z_W i, \quad (1)$$

jossa  $Z_W$  on vaihejohtimen aaltoimpedanssi ja  $i$  salamavirran amplitudi. [1, 4] Kerroin 0,5 tulee siitä, että salamavirta jakaantuu kahteen osaan. Johdon jännitelujuus ja salamavirran jyrkkyys määräävät ylijänniteaallon nousuajan, ja johtimissa tapahtuvat häviöt sekä korona vaimentavat ja loiventavat kulkuaaltoa [1]. Kuvassa 2 on havainnollistettu suoran salamaniskun seurauksena syntyviä kulkuaaltoja.



**Kuva 2.** Salamavirran jakautuminen kulkuaalloiksi [5].

Suorien salamaniskujen muodostamat ylijännitteet ovat keskimäärin megavolttien suuruisia, sillä salamavirrat ovat tyypillisesti kymmenien kiloampeerien suuruusluokkaa ja aaltoimpedanssit satojen ohmien suuruusluokkaa. Tämän vuoksi suorat salamaniskut ovat merkittäviä kaikilla jännitetasoilla. Tyypillisesti suorien salamaniskujen muodostama ylijänniteaalto aiheuttaa kolmivaiheisen oikosulun ensimmäisellä vastaan tulevalla pylvällä. Ensin tapahtuu ylilyönti eristimen yli pylvääseen ja tämän jälkeen ylilyönti pylväästä muihin vaiheisiin. [2]

### 2.1.2 Takaisku

Takaisku on mahdollinen, kun salama iskee sähköverkon jännitteettömään osaan, kuten pylvääseen tai ukkosjohtimeen. Salamavirran purkautuessa maahan verkon maadoituskia pitkin muodostuu maadoituksiin ylijännite, joka on suuruudeltaan salamavirran ja maadoitusresistanssin tulo. Pylvään tyvestä tapahtuvat heijastukset kasvattavat syntyneen ylijännitteen suuruutta. Jos ylijännitteen suuruus on riittävä, tapahtuu takaisku eli ylilyönti maadoitetusta osasta vaihejohtimeen. [2]

Yleisesti verkon jännitteettömään osaan iskeneen salaman aiheuttama jänniterasitus on pienempi kuin suoraan vaihejohtimeen osuvan salaman tapauksessa. Mikäli salamavirta ja maadoitusimpedanssi ovat kuitenkin riittävän suuria, on takaisku mahdollinen. [4] Suomessa maadoitusolosuhteet ovat tunnetusti hankalat maaperän huonon johtavuuden takia. Tällöin maadoitusimpedanssi on suuri ja takaiskujen todennäköisyys suurempi. Takaiskujen todennäköisyys kasvaa myös pylvään korkeuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että pylvään korkeuden kasvaessa sen induktanssi kasvaa. Takaiskusta aiheutuva ylijännitepulssi on yleensä jyrkempi kuin suoran salamaniskun aiheuttama. Jyrkkä jänniteaalto on haitallinen käämityksiä sisältäville laitteille, sillä jännite ei jakaannu tasaisesti koko käämiin, vaan suurin rasitus vaikuttaa käämin alkupäässä. [1]

### 2.1.3 Indusoitunut ylijännite

Ylijännitteen indusoituminen on mahdollista, kun salama iskee johdon välittömään läheisyyteen. Voidaan ajatella, että salamavirta aiheuttaa johdon induktanssien ja maakapasitanssien muodostamiin silmukoihin nopeasti muuttuvan magneettikentän, joka muodostaa johdolle ylijännitteen. Keskimäärin indusoituneiden ylijännitteiden huippuarvo on suurimmillaan 200–300 kV. Tämän vuoksi ne ovat merkittäviä vain keskijänniteverkossa. Indusoituneet ylijännitteet ovatkin keskijänniteverkossa yleisin ukkosen aiheuttama ylijännitetyyppi. Indusoituvat ylijännitteet huomioidaan myös arvioitaessa pienjänniteverkkoon kytkettävien elektroniikkalaitteiden jänniterasituksia. [1]

On myös tutkittu [6], että vaihejohtimen riipunta ja salamakanavan taipuminen vaikuttavat indusoituvien ylijännitteiden suuruuteen. Tutkimuksissa todettiin, että johtimen riipunnan kasvaessa ylijännitteen arvo pienenee. Vastaavasti salamakanavan kallistuskulman kasvaessa kasvoi myös indusoituneen jännitteen huippuarvo. Salamakanavan kallistuskulmalla tarkoitetaan pystysuoran ja salamakanavan välistä kulmaa. Tutkimuksessa todettiin myös, että indusoituneen ylijännitteen laskennallinen arvo pienenee, kun huomioidaan maaperän johtavuus ja maadoitusjohtimet. [6]

## 2.2 KytKentäYlijännitteet

KytKentäYlijännitteitä syntyy verkon äkillisissä tilanmuutoksissa, vikatapausten yhteydessä sekä verkon kytKentöjen muuttuessa. Niiden muoto ja suuruus riippuvat verkon sen hetkisestä tilasta. KytKentäYlijännitteet tunnetaan myös nimellä loivat transienttiyli-jännitteet. Verrattuna ilmastollisiin ylijännitteisiin, on kytKentäYlijännitepulssin nousuaika tyypillisesti satoja mikrosekunteja ja kokonaiskesto aika millisekunteja. KytKentäYlijännitteiden koejännitteenä käytetään 250/2500  $\mu$ s:n pulssia. [1, 4]

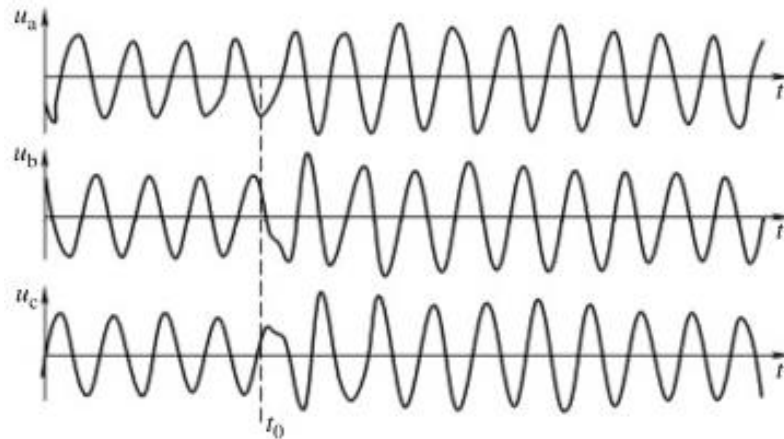
KytKentäYlijännitteen huippuarvo määräytyy kytKentähetkellä vaikuttaneesta virran ja jännitteen huippuarvosta, verkon vaimennusominaisuuksista ja kytkinlaitteen ominaisuuksista. Vastaavasti ylijännitteen värähtelytaajuuteen vaikuttavat verkon induktanssit, kapasitanssit ja kuormitus. Koska kytKentäYlijännitteiden suuruus riippuu verkkotilanteesta, merkitsee tämä sitä, että niiden merkitys kasvaa verkon käyttöjännitteen kasvaessa. [1] Onkin havaittu, että suuren ilmavälin omaavissa eristysrakenteissa jännitelujuuden minimi havaitaan tyypillisesti juuri kytKentäsyöksyjännitteillä [2].

Suurilla käyttöjännitteillä yleisimpiä kytKentäYlijännitteiden aiheuttajia ovat tyhjäkäyvän johdon kytkeminen jännitteiseksi sekä jälleenkytkennät. Muita esimerkkejä kytKentäYlijännitteiden aiheuttajista ovat moottorien ja kondensaattorien kytKentä verkkoon sekä kuormitusvirran katkaisu. Esimerkiksi moottorin tai kondensaattorin kytKentä verkkoon aiheuttaa ylijännitteen, jonka suuruus on noin 2 p.u. Yksikkö p.u (per unit) tarkoittaa ylijännitteen huippuarvon suhdetta jännitteen referenssiarvoon. Vastaavasti pikajälleenkytkennän aiheuttama ylijännite saattaa olla jopa 3 p.u ja kuormitusvirran katkaisusta seuraava ylijännite 2,3 p.u. [1, 2] Myös vikatapausten yhteydessä esiintyy kytKentäYlijännitteitä. Yleisin vikatapaus on maasulku, jonka yhteydessä esiintyy tavallisesti myös käyttötaajuinen ylijännite.

## 2.3 Käyttötaajuiset ylijännitteet

Käyttötaajuiset ylijännitteet syntyvät useimmiten verkon tilan muuttuessa. Tyypillisiä ylijännitteiden aiheuttajia ovat maasulut, kuorman äkillinen poiskytketyminen ja resonanssit. Muista ylijännitelajeista poiketen, käyttötaajuiset ylijännitteet ovat värähteleviä ja pidempikestoisia. Niiden värähtelytaajuus on usein sama kuin verkkotaajuus tai verkon ylitai aliharmoninentaajuus. Käyttötaajuisien ylijännitteiden yhteydessä esiintyy usein myös kytKentäYlijännitteitä. [1, 4] Kuvassa 3 on esitetty eräitä käyttötaajuisien ylijännitteiden käyrämuotoja.





**Kuva 3.** Eräitä käyttötaajuuksien ylijännitteiden käyrämuotoja [7].

Maasulku on yleisin verkossa esiintyvä vikatapaus ja samalla se on myös yleisin käyttötaajuuksien ylijännitteiden aiheuttaja verkossa. Verkon maadoitustapa vaikuttaa syntyneen ylijännitteen suuruuteen. Verkon eri maadoitustapoja ovat maasta erotettu, sammutettu ja suoraan tai impedanssin kautta maadoitettu verkko. [1] Maasulun aikana terveiden vaiheiden jännitteet nousevat ja syntyvien ylijännitteiden suuruus ilmoitetaan tavallisesti maasulkukertoimen  $k$  avulla. Maasulkukerroin kuvaa vian aikana muodostuneen ylijännitteen suhdetta terveeseen verkon vaihejännitteeseen. Maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa maasulkukerroin on suurimmillaan noin 1,8 p.u. Suoraan tai impedanssin kautta maadoitetulla verkolla maasulkukertoimen arvo on pienempi. [1] Suomessa siirtoverkko on tehollisesti maadoitettu. Tämä tarkoittaa sitä, että maasulkukerroin on pienempi kuin 1,4. Vastaavasti keskijänniteverkko on joko maasta erotettu tai sammutettu maaperän huonon johtavuuden takia. Pienjänniteverkko on Suomessa suoraan maadoitettu. [8]

## 3. YLIJÄNNITESUOJAUS ILMASTOLLISILTA YLIJÄNNITTEILTÄ

Ylijännitesuojien tarkoituksena on rajoittaa muodostuneet ylijännitteet sille tasolle, että ne eivät vaurioita verkon eristysrakenteita ja verkossa kiinni olevia laitteita. Erityisesti arvokkaimmat ja verkon toiminnan kannalta kriittisimmät laitteet suojataan. Tärkeitä suojausta vaativia laitteita ovat muun muassa tehomuuntajat, kaasueristetyt kytkinlaitokset sekä generaattorit. Tärkeiden laitteiden sijainti verkossa määrääkin pitkälti paikan, minne ylijännitesuoja sijoitetaan.

Tässä luvussa käsitellään ilmastollisia ylijännitteitä vastaan kehitettyjä yleisimpiä suoja-laitteita, kuten ukkosjohtimia, kipinävälejä, metallioksidisuoja ja johtosuoja. Lisäksi käsitellään niiden toimintaa ja rakennetta.

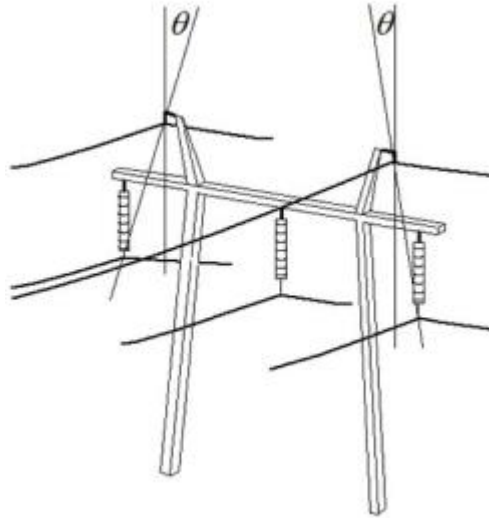
### 3.1 Ukkosjohtimet

Ukkosjohtimet ovat vaihejohtimien yläpuolelle sijoitettuja johtimia, joiden tarkoituksena suojata vaihejohtimia suorilta salamaniskuilta. Tavoitteena on siis se, että salama osuisi vaihejohtimen sijasta ukkosjohtimeen, joka johtaisi salamavirran maadoitusten kautta maahan aiheuttamatta häiriötä verkolle. Suomessa ukkosjohtimia käytetään siirtoverkoissa, sekä suurjännitteisissä jakeluverkoissa. Keskijänniteverkossa niitä ei juurikaan käytetä, koska niiden tuoman hyödyn ei ole koettu olevan lisääntyvien kustannuksien arvoinen [2].

Ukkosjohtimien lukumäärä ja sijoitus vaihejohtimiin nähden vaikuttaa niistä saatavaan suojaukseen. Mitä enemmän ukkosjohtimia on, sitä paremman ne suojaavat. Tyypillisesti käytetään kahta johdinta. Myös pylväiden maadoitusresistanssin suuruus vaikuttaa ukkosjohtimien tuottamaan suojaukseen. [4] Kun maadoitusresistanssi on pieni, pienenee todennäköisyys takaiskuun, jota käsiteltiin alaluvussa 2.1.2. Lisäksi ukkosjohtimeen muodostunut ylijännitepulssi jakautuu useaan eri suuntaan ja kulkeutuu maahan monesta eri paikasta, jolloin resuloiva maadoitusimpedanssi koostuu tavallisesti samaa suuruusluokkaa olevien aaltoimpedanssien rinnankytkentänä [4]. Tämä pienentää salamavirran kohtaamaa maadoitusresistanssia ja pulssin amplitudia, jolloin takaiskut ovat epätodennäköisempiä.

### 3.1.1 Suojauskulma

Ukkosjohtimien sijoittelua vaihejohtimiin nähden kuvataan suojauskulmalla  $\theta$ . Suojauskulman määritelmä on esitetty kuvassa 4.

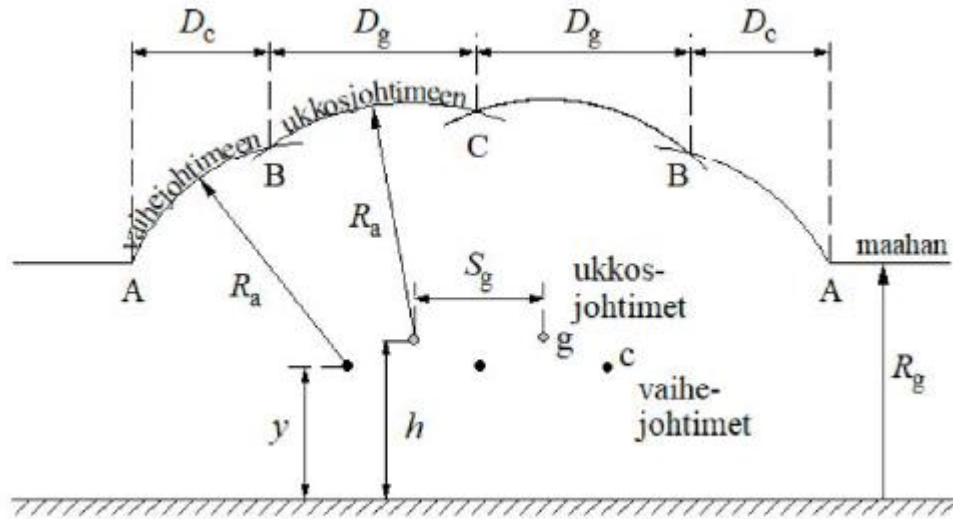


**Kuva 4.** Suojauskulman  $\theta$  määritelmä [1].

Suojauskulman optimointi oikeaan arvoon on tärkeää, jotta suojausten tehokkuus saadaan maksimoitua. Yksi suojauskulmaan vaikuttava tekijä on pylvään korkeus. Pylvään korkeuden kasvaessa käytetään pieniä suojauskulman arvoja. [4] Mikäli pylväs on 40–50 m korkea, kannattaa käyttää jopa negatiivista suojauskulmaa. Tämä tarkoittaa sitä, että ukkosjohtimet ovat vaihejohtimien ulkopuolella. Lisäksi suojauskulman arvoon vaikuttaa se, kuinka suurilta salamavirroilta vaihejohtimia halutaan suojata. Tätä asiaa voidaan havainnollistaa tarkastelemalla salaman viimeistä iskuporrasta  $R_a$ , jonka riippuvuutta salamavirrasta  $i$  voidaan esittää kaavalla [1]

$$R_a = Gi^b. \quad (2)$$

Kaavassa 2 esiintyvät  $G$  ja  $b$  ovat vakioita, joille on kehitetty erilaisia arvoja. Yleisesti tunnettuja ovat Brown-Whitehead- ja Young-mallit. [1] Kaavasta 2 huomataan, että salamavirran kasvaessa kasvaa myös salaman viimeinen iskuporras. Tämä tarkoittaa sitä, että suurivirtaisemman salaman iskukohta määräytyy kauempana verkon yläpuolella. Tällöin siis salama iskee todennäköisemmin ukkosjohtimeen. Vastaavasti pienivirtaisempi salama pääsee lähemmäs verkkoa ja vaihejohtimiin osumisen todennäköisyys kasvaa. [2] Kuva 2 havainnollistaa tilanteeseen liittyvää sähkögeometristä mallia.



**Kuva 5.** Salaman viimeistä iskuporrasta havainnollistava sähkögeometrinen malli [1].

Kuvassa 5 on esitetty salaman viimeinen iskuporras tietyllä virran arvolla. Lopullinen iskukohta määräytyy siitä, minkä ympyrän kaaren salaman purkauskanava lävistää. [9] Yksi mahdollisuus on myös se, että salama iskee maahan. Tätä kuvaa  $R_g$  eli iskuetäisyys maahan. Tyypillisesti  $R_g$  on pienempi kuin  $R_a$ . [10] Kun salamavirta  $i$  kasvaa tiettyyn arvoon, kasvavat  $R_a$  ja  $R_g$  niin, että jana  $D_c$  pienenee arvoon nolla. Tällöin kyseistä virtaa suurempien salamoiden osuminen vaihejohtimiin on erittäin epätodennäköistä. [1] Suojauskulman valinta sopivaksi on siis tärkeää, jotta haitallisen suuren salamavirran omaavat salamaiset eivät iske vaihejohtimiin.

### 3.1.2 Ukkosjohtimen valinta ja häviöt

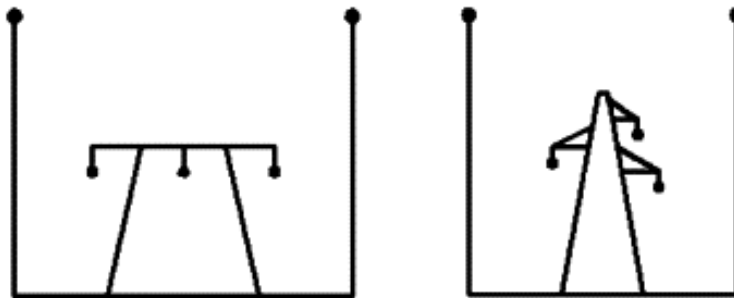
Ukkosjohtimet aiheuttavat myös häviöitä, sillä vaihejohtimet indusoivat niihin pieniä virtoja. Häviöiden suuruus määräytyy käytetyn johdinmateriaalin resistiivisyydestä ja johtimen poikkipinta-alasta. Koska ukkosjohtimien tarkoituksena ei ole verkon normaalitilassa kuljettaa virtaa, valmistetaan ne usein teräksestä [11]. Teräksen resistiivisyys on suurempi kuin vaihejohtimissa käytettävän alumiinin resistiivisyys, mutta syynä teräksen käyttöön on alhaisemmat kustannukset. Induktiosta aiheutuvia häviöitä voidaan vähentää nostamalla ukkosjohtimia kauemmaksi vaihejohtimista. Tästä kuitenkin seuraisi lisäkustannuksia pylvään rakentamiseen. [10]

Kun suunnitellaan ja valitaan ukkosjohtimia, on tärkeää, että ne kestävät syntyneet salamavirrat ilman vikaantumista. Muut tekijät, jotka vaikuttavat valitun johtimen kokoon, ovat systeemin vikavirrat ja johtimen käyttö mahdollisesti valokuitukaapelin tukena. [10] Johtimien on myös kestävä talvisista olosuhteista aiheutuvat lumi- ja jääkuormat.

Koska ukkosjohtimessa kulkeva virta on hyvin pieni, ei virrasta aiheutunut lämpö välttämättä riitä sulattamaan jäätä ja lunta johtimen pinnalta. Täten johtimen on oltava mekaanisesti riittävän kestävä.

### 3.1.3 Ukkosjohtimien uudet sovellutukset

Tutkimuksia [12, 13] on myös ollut niin sanotuista ulkonevista ukkosjohtimista (external ground wires). Kyseisessä rakenteessa ukkosjohtimille on rakennettu omat pylväät, ja johtimet sijaitsevat selkeästi vaihejohtimien ulkopuolella. Suojauskulma rakenteessa on reilusti negatiivinen ja induktiosta aiheutuvat häviöt pienet. Myös pylväiden korkeutta voidaan vähentää kyseistä rakennetta käyttämällä ja samalla tuulikuormat pienentyvät. [10] Rakennetta on havainnollistettu kuvassa 6. Kyseisen asettelun myötä ukkosjohtimien toiminnan epäonnistuminen on erittäin epätodennäköistä [12].



**Kuva 6.** Ulkonevat ukkosjohtimet [12].

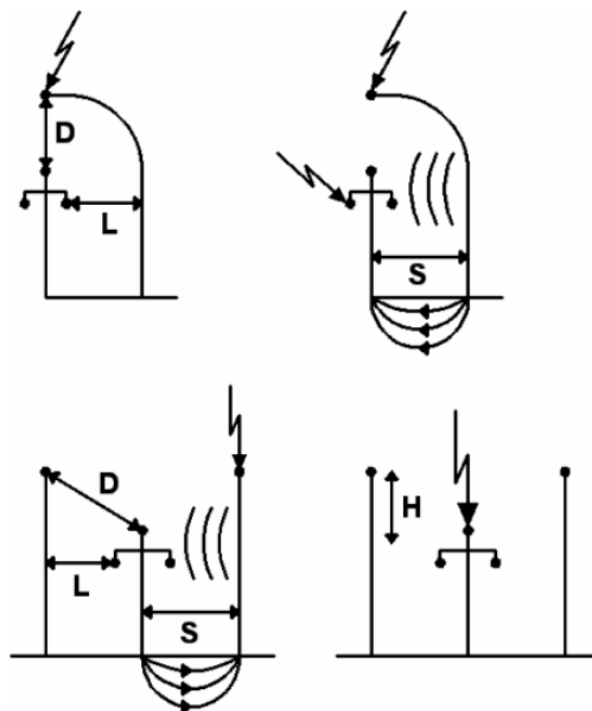
Eräässä tutkimuksessa [12] on tutkittu ulkonevien ukkosjohtimien käyttöä siirtoverkossa. Tutkimuksissa on tultu niihin tuloksiin, että kyseistä suojausta ei kustannussyistä ole kannattavaa käyttää kaikkialla verkossa. Sitä voitaisiin kuitenkin hyödyntää verkon haavoituvaisimmissa paikoissa, sekä siellä, missä perinteinen ukkossuojaus ei toimi riittävästi. Rakennetta voisi käyttää esimerkiksi sähköasemien läheisyydessä sekä lähekkäin sijaitsevien sähköasemien välillä. Mahdollinen käyttökohde olisi myös esimerkiksi leveiden jokien yli menevät ilmajohdot, koska tällöin tavalliset ukkosjohtimet jätetään usein laittamatta pylväiden mekaanisten rasitusten vähentämiseksi. Rakenteen etuja ovat lähes täydellinen suojaus suorilta salamaniskuilta sekä alhaiset ylläpitokustannukset. Haittana ovat kuitenkin suuret hankintakustannukset, joihin sisältyy muun muassa pylväät, niiden maadoitukset ja johtimet. [12]

Toisessa aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa [13] on tutkittu rakenteen toimivuutta jakeluverkossa. Tutkimuksessa on esitetty, että monissa tapauksissa vain yhden erillisen

pylvään rakentaminen olisi riittävä toimenpide. Tämä toimisi silloin, kun pylväs on matala, pylvään orsi on lyhyt ja ilmavälit ovat lyhyitä. Kyseisessä rakenteessa on neljä erilaista tilannetta, jossa ukkonen voi aiheuttaa katkoksen verkossa: [13]

- Ylilyönti ukkosjohtimesta vaihejohtimeen.
- Ylilyönti ukkosjohtimen pylväästä vaihejohtimien pylvääseen.
- Ukkosjohtimen toiminnan epäonnistuminen ja suora isku vaihejohtimeen.
- Ukkosjohtimeen iskeneen salaman aiheuttama indusoitunut ylijännite.

Jotta edellä mainituilta tilanteilta vältytään, täytyy kuvassa 7 näkyvät parametrit mitoittaa sopiviksi. Parametri  $D$  kuvaa ukkosjohtimen etäisyyttä lähimpään vaihejohtimeen ja  $L$  ukkosjohtimen pylvään ja lähimmän vaihejohtimen välistä etäisyyttä. Nämä parametrit on asetettava sellaisiksi, että ylilyöntien määrä ukkosjohtimesta ja sen pylväästä vaihejohtimiin minimoituu. Parametri  $S$  kuvaa pylväiden maadoitusten välistä etäisyyttä, joten se on asetettava siten, että ylilyönnit pylväiden välillä minimoituvat. Parametri  $H$  kuvaa ukkosjohtimien ja vaihejohtimien korkeuksien välistä eroa. Se asetetaan sellaiseksi, että suorien salamaniskujen määrä vaihejohtimiin minimoituu. Indusoituneiden ylijännitteiden vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä ylijännitesuojia, joista kerrotaan aluvuossa 3.3. [13]



**Kuva 7.** Ulkonevien ukkosjohtimien optimoitavat parametrit [13].

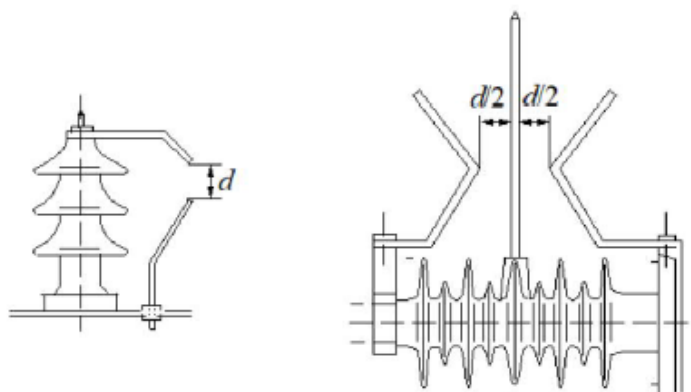
Tutkimuksen [13] tulokset olivat pitkälti samat kuin edellä esitetyn [12]. Rakennetta voidaan hyödyntää tietyissä osissa verkkoa, mutta kaikkialla verkossa se ei ole kannattavaa.

Eräs mahdollisuus ukkossuojauksen parantamiseen on myös yhden tai useamman johtimen lisääminen vaihejohtimien alle. Tämä perustuu siihen, että vaihejohdin ja sen alla oleva johdin kytkeytyvät sähkömagneettisesti. Johtojen lisääminen vaihejohtimien alle ei estä salamaniskuja vaihejohtimiin, mutta kytkeytyminen vähentää eristeisiin kohdistuvia rasiuksia ylijännitteiden aikana. [10] Lisäksi salamavirta, joka kulkee pylvästä pitkin maahan salaman iskiessä ukkosjohtimeen tai pylvääseen, pienenee. Tällöin siis takaiskujen mahdollisuus pienenee. Menetelmää suositellaan käytettävän erityisesti siellä, missä maaperän johtavuus on huonoa ja pylvään maadoitusresistanssin arvo jää suureksi. [14] Tutkimuksessa [14] havaitaan myös, että menetelmän suhteellinen hyöty kasvaa, kun maadoitusresistanssin arvo kasvaa.

Menetelmässä tärkein optimoitava parametri on asennettavan johtimen etäisyys vaihejohtimiin. Mitä lähempänä johdin on vaihejohtimia, sitä enemmän se laskee ylijännitteiden vaikutuksia. [14] Menetelmän haittapuolena on johtimiin kuluvat kustannukset ja pylväisiin kohdistuvien mekaanisten rasitusten kasvaminen.

### 3.2 Kipinäväli

Ilmastollisia ylijännitteitä vastaan käytettävä kipinäväli on rakenteeltaan ja toiminnaltaan varsin yksinkertainen. Sen toiminta perustuu siihen, että kahden elektrodin välisessä ilmapälissä tapahtuu ylilyönti, kun jännite elektrodien välillä kasvaa riittävän suureksi. Kipinäväli siis johtaa valkokaaren syttyä salamavirran maahan ja estää näin suojattavan kohteen jännitteen nousun liian korkeaksi. Kuvassa 8 on havainnollistettu tyypillisimpiä kipinäväli rakenteita.



**Kuva 8.** Yleisimmät kipinäväli rakenteet. Vasemmalla yksivälisuoja ja oikealla lintueteellään varustettu kaksivälisuoja. [1]

Tyypilliset kipinävälirakenteet ovat yksivälisuoja ja lintuesteellä varustettu kaksivälisuoja. Yksivälisuojiin haittana on se, että linnut pääsevät oikosulkemaan kipinävälin. Tämän vuoksi onkin siirrytty käyttämään kaksivälisuoja, jonka keskelle asetettu elektrodi estää lintujen aiheuttamat kipinävälitoiminnot. Kipinäväliä voidaan käyttää maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa, ja se asennetaan aina mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta. Niiden asennuksessa on myös huomioitava syttyvän valokaaren laajeneminen, joten niiden yläpuolelle on jätettävä vähintään 0,7 m tyhjää tilaa. Suomessa kipinävälisiä käytetään alle 200 kVA:n pylväsmuuntamoiden suojauksessa. [1, 4]

Kipinävälin elektrodien välimatka  $d$  on asetettava tarpeeksi suureksi, jotta käyttötaajuiset ylijännitteet ja kytkentäylijännitteet eivät johda kipinävälin ylilyöntiin. Toisaalta  $d$  on valittava mahdollisimman pieneksi, jotta ilmastolliset ylijännitteet rajoittuisivat riittävän alhaisiksi. Lisäksi elektrodien muoto ja vallitsevat sääolosuhteet vaikuttavat kipinävälin ylilyöntijännitteeseen. [4]

Kipinävälin etuja ovat sen halpuus ja yksinkertaisuus. Vastaavasti haittana on esimerkiksi se, että kipinävälin syttymisen jälkeen valokaari jää palamaan normaalilla käyttöjännitteellä. Tämän seurauksena tarvitaan pikajälleenkytkentä, jotta valokaari saadaan sammutettua. Muita haittoja ovat kipinävälin ylilyöntijännitteen suuri hajonta ja riippuvuus polariteetista. Tällöin suojattavan kohteen jännite saattaa ajoittain nousta kestotason yläpuolelle. Lisäksi suojattavan laitteen on kestettävä kipinävälin toiminnasta aiheutuvat jännitteen äkilliset muutokset, mitkä ovat haitallisia erityisesti käämityksiä sisältäville laitteille. [4] Verkon haltijan on myös varmistuttava siitä, onko pylväsmuuntaja mitoitettu ja testattu kestävänsä standardin muotoisen salamasyökyjännitteen lisäksi kipinävälin aiheuttamat jännitemuutokset [1].

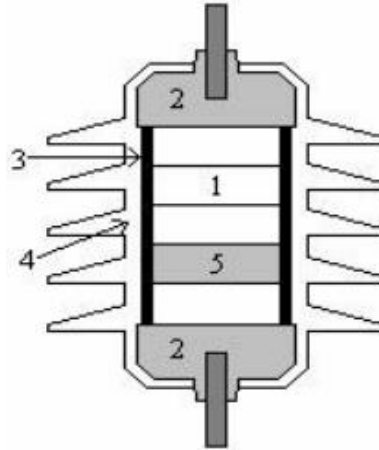
### 3.3 Metallioksidisuojat

Nykyään yleisimmät markkinoilla olevat ylijännitesuojat ovat metallioksidisuojia, jotka ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia. Ne ovat teknisten ominaisuuksien ja hinnan ansiosta pitkälti syrjäyttäneet aiemmin käytetyt venttiilisuojat. [15] Metallioksidisuoja sijoitetaan suojattavan kohteen rinnalle, ja niiden tehtävä on alentaa ylijännitteen suuruus sopivan alhaiseksi. Niitä käytetään kaikilla jännitetasoilla ilmastollisten ylijännitteiden, sekä mahdollisesti kytkentäylijännitteiden rajoittamiseen [1].

Metallioksidivastuksen päämateriaali on sinkkioksidi ( $ZnO$ ), ja siihen lisätään myös pieniä määriä muita metallioksideja. Lisäaineet vaikuttavat merkittävästi vastuksen sähköisiin ominaisuuksiin. Huolellisella valmistuksella vastusmateriaalista saadaan riittävän



epälineaarinen. Valmistuksessa metallioksidijyväsistä muodostetaan lieriömäinen vastuskiekkot, joita asetetaan suojaustasosta riippuen tietty määrä sarjaan ja rinnan. Lisäksi vastuskiekkot ympäröidään posliinista tai polymeeristä valmistetulla kuorella. Polymeerikuoren etuja posliinikuoreen verrattuna on muun muassa pienempi paino, pienempi koko, parempi tiiveys ja paremmat termiset ominaisuudet. [15]



**Kuva 9.** Polymeerikuorisen metallioksidisuojaan rakenne [16].

Kuvassa 9 on esitetty polymeerikuorisen metallioksidisuojaan rakenne. Vastuskiekkot (1), mahdolliset metallipalat (5) ja päätyelektrodit (2) tuetaan yhteen lasikuidusta valmistetulla tukirakenteella (3). Lopuksi rakenne päällystetään polymeerikuorella (4). [15, 16, 17] Polymeerikuorinen metallioksidisuoja tarvitsee lasikuitutukirakenteen, jotta suojasta tulee mekaanisesti riittävän tukeva. Vastaavasti posliinisuojuissa posliinikuori toimii suojan mekaanisena tukena. Metallioksidisuojasta on mekaanisen kestävyden lisäksi saatava mahdollisimman tiivis, jotta kosteus ei pääse tunkeutumaan suojan sisälle. [15]

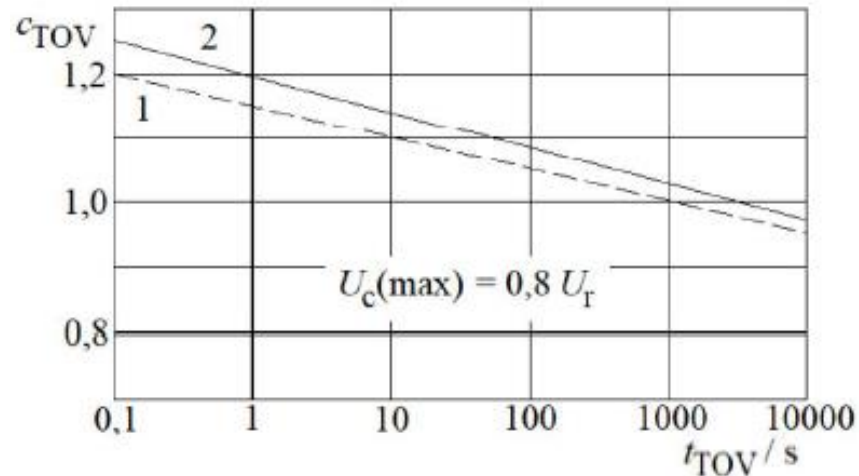
### 3.3.1 Ominaisuudet

Metallioksidisuojan ominaisuudet kuvaavat suojan ominaisuuksia ja suojauskykyä. IEC-standardi 60099-4 määrittelee metallioksidisuojiin ominaisuudet. Ominaisuudet ovat seuraavat: [2, 12]

- suurin jatkuva käyttöjännite  $U_c$
- mitoitusjännite  $U_r$
- käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyky
- nimellipurkausvirta  $I_n$
- jäännösjännite  $u_{res}$
- suojaustaso.

Suurin jatkuva käyttöjännite  $U_c$  kuvaa jännitettä, joka saa jatkuvasti vaikuttaa suojan yli. Mitoitusjännite  $U_r$  on vastaavasti IEC-standardin toimintasyklilökeessä suurin suojan yli vaikuttava käyttötaajuinen jännite, jolla suoja toimii suunnitellusti. Tyypillisesti suojat mitoitetaan siten, että  $U_c/U_r = 0,8$ . Käyttötaajuisen ylijännitteen sietokyky annetaan ominaiskäyränä. Kaikki edellä mainitut jännitteet ilmoitetaan tehollisarvona. Jäännösjännite  $u_{res}$  kuvaa suojan yli vaikuttavan jännitteen huippuarvoa, kun suoja on johtavassa tilassa. Tämä on samalla suojattavan kohteen yli oleva jännite, mikäli suoja on kohteen välittömässä läheisyydessä. Nimellipurkausvirta  $I_n$  on metallioksidisuojan läpi kulkevan purkausvirtapulssin suurin arvo, jolla suoja on suunniteltu toimivaksi. Usein käytetään 10 kA:n suojaa. Suojaustaso metallioksidisuojaalla määritetään sekä salamasyökyjännitteellä että kytkentäsyökyjännitteellä. Salamasyökyjännitteellä suojaustaso on joko jyrkän virtapulssin tai nimellipurkausvirran aiheuttama jäännösjännite riippuen siitä, kumman jäännösjännite on suurempi. Vastaavasti suojaustaso kytkentäsyökyjännitteellä määritetään kytkentävirtakokeella. [1, 12]

Käyttötaajuisen ylijännitteen sietokäyrä kuvaa sitä, kuinka kauan metallioksidisuoja kestää tietyn suuruista käyttötaajuista ylijännitettä rikkoutumatta ja termisesti vaurioitumatta. Usein sietokyky  $c_{TOV}$  annetaan käyttötaajuisen ylijännitteen  $U_{TOV}$  ja suojan mitoitusjännitteen  $U_r$  suhteena. [15] Kuvassa 10 on esitetty erään metallioksidisuojan käyttötaajuisen ylijännitteiden sietokäyrästä.

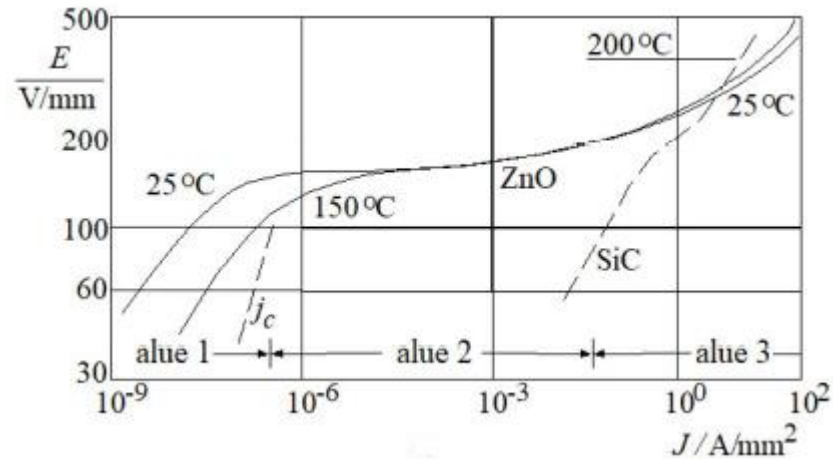


**Kuva 10.** Erään metallioksidisuojan käyttötaajuisten ylijännitteen sietokäyrästä [1].

Kuvan 10 käyrää 1 käytetään silloin, kun suoja on lämmennyt ennen käyttötaajuisia ylijännitettä esimerkiksi salamavirran vaikutuksesta. Toisin sanoen suoja on siis esirasittunut. Koska suojan lämpötilakerroin on negatiivinen, kulkee esirasitetussa suojaassa suurempi virta kuin rasittamattomassa. Esirasitettu suoja siis kestää tietyn suuruista käyttötaajuisia ylijännitettä lyhyemmän aikaa kuin rasittamaton. Käyrä 2 kuvaa suojan sietokäyrää, kun sitä ei ole esirasitettu. [15, 17] Suojaa valittaessa onkin tärkeä tietää alueella esiintyvien käyttötaajuisien ylijännitteiden suuruudet ja suojaroleistyksen toiminta-ajat. Erityisen tärkeää on, että metallioksidisuoja ei siirry johtavaan tilaan käyttötaajuisien ylijännitteiden aikana, sillä silloin suoja tuhoutuisi termisesti. [2]

### 3.3.2 Sähköiset ja termiset ominaisuudet

Metallioksidisuojan hyvät suojausominaisuudet perustuvat sen resistiivisyyden epälineaariseen käyttäytymiseen. Resisttiivisyys on suuri verkon ollessa normaalitilassa. Tällöin suoja toimii kuin eriste, ja sen läpi kulkee vain hyvin pieni vuotovirta. Ylijännitteen aikana metallioksidisuoja siirtyy johtavaan tilaan, eli sen resistiivisyys pienenee, ja se siirtää ylijännitepulssein turvallisesti maahan. Kuvassa 11 on esitetty metallioksidivastusmateriaalin ominaiskäyrä.

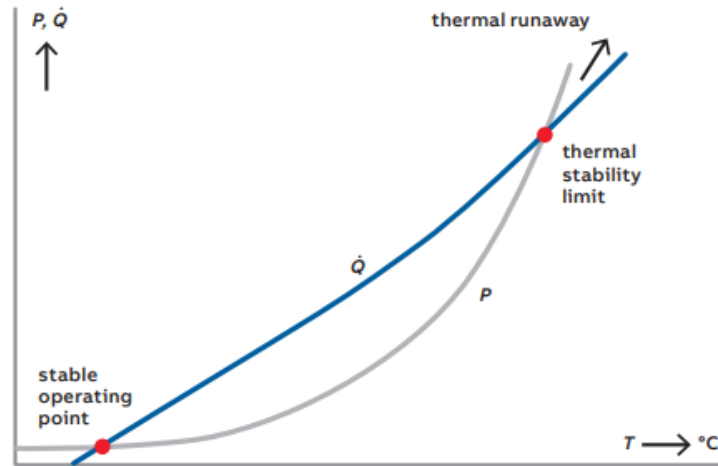


**Kuva 11.** Metallioksidivastuksen kentänvoimakkuus-virrantiheyskäyrä [1].

Ominaiskäyrä jaetaan tavallisesti kolmeen alueeseen. Alueessa 1 materiaalin resistiivisyys on suuri, sillä jyvästen pintakerros, joka johtaa huonosti virtaa, määrää virran suuruuden [2]. Vaihtojännitteellä vastuksen läpi kulkeva virta on pitkälti kapasitiivista tällä alueella [15]. Lisäksi lämpötilakerroin alueessa 1 on negatiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Tällöin myös tehohäviöt kasvavat, kun lämpötila nousee. Tämä asia voi vaikuttaa suojan termiseen stabiilisuuteen, ja onkin varotettava, että suoja ei lämpene liikaa. [17] Alueessa 2 tapahtuu niin sanottu tunneli-ilmiö, jolloin sinkkioksidijyväsiin alkaa tunkeutua enemmän virtaa. Ominaiskäyrästä on myös hyvin epälineaarinen kyseisellä alueella. Tällöin pienikin jännitteen nousu kasvattaa suojan läpi kulkevaa virtaa huomattavasti. Alueella 3 tunneli-ilmiö vaikuttaa koko materiaalissa ja pelkästään sinkkioksidin resistiivisyys määrää virran suuruuden. Resistiivisyys on tällöin hyvin pieni. [2, 12] Lämpötilakerroin on tällä alueella muuttunut positiiviseksi.

Metallioksidisuojan epälineaarisuus aiheuttaa myös sen, että jännitteen muutokset eivät ole niin äkillisiä kuin esimerkiksi kipinävälien tapauksessa. Tämä on hyvä asia käämityksiä sisältäville laitteille. [1] Toinen merkittävä etu metallioksidisuojien käytössä verrattuna kipinäväleihin on se, että pikajälleenkytkentää ei tarvita, vaan suoja siirtyy automaattisesti johtamattomaan tilaan ylijännitteen loputtua. Tämä vähentää lyhyiden keskeytysten määrää verkossa.

Jotta metallioksidisuoja ei termisesti vaurioituisi käytön aikana, on suojan jäähdytyksen oltava jatkuvasti riittävää. Toisin sanoen suojasta ympäristöön haihtuvan lämmön on oltava suurempaa kuin suojassa tapahtuva tehohäviö. Mikäli näin ei ole, kuumenee suoja jatkuvasti ja lopulta tuhoutuu termisesti. Kuvassa 12 on havainnollistettu lämpötilan  $T$  funktiona suojassa tapahtuvaa tehohäviötä  $P$ , ja lämpövirtaa  $Q$  suojasta ympäristöön, kun suojan yli vaikuttaa suurin sallittu jatkuva käyttöjännite  $U_c$ . [17]



**Kuva 12.** Metallioksidisuojan terminen käyttäytyminen lämpötilan funktiona suurimmalla sallitulla käyttöjännitteellä [17].

Kuvasta 12 havaitaan, että  $P$  kasvaa eksponentiaalisesti lämpötilan noustessa. Kriittistä pistettä suuremmilla lämpötiloilla  $P$  on suurempi kuin  $Q$ , ja tällöin suoja ajautuu termiseen epätasapainoon. [17] Tämän vuoksi suojan lämpötilan on pysyttävä kriittisen pisteen alapuolella, jotta terminen stabiilisuus säilyy.

### 3.3.3 Metallioksidisuojan valinta

Oikean metallioksidisuojan valinta on tärkeää, jotta kohteen suojaus saadaan riittävälle tasolle. Tämän vuoksi suoja on mitoittettava oikein ja sen ominaisarvot on valittava sopiviksi. Tämän takia verkon jatkuvasta käyttöjännitteestä, esiintyvistä käyttötaajuisista ylijännitteistä ja relesuojauksen toiminta-ajoista on tiedettävä riittävästi, jotta ominaisuudet saadaan valittua mahdollisimman tarkasti. Lisäksi verkon maadoitustapa vaikuttaa suojan mitoittamiseen. Kun verkosta on riittävästi tarkkaa tietoa, voidaan ominaisuudet valita sopivalla marginaalilla riittävän suuriksi. Tämä on sen vuoksi tärkeää, sillä suoja ei kustannussyistä ole kannattavaa ylivoimaisesti.

Metallioksidisuojalta edellytettävät vaatimukset voidaan karkeasti jakaa kahteen osaan. Ensinnäkin sen tarvitsee alentaa ylijännitteet riittävällä marginaalilla suojattavan kohteen kesto- ja alijännitearvoiksi. Toiseksi suojan on kestettävä hetkelliset ja pidempiaikaiset ylijänniterasitukset ilman, että se ajautuu sähköiseen tai termiseen epätasapainoon. [18]

Ensimmäiseksi valitaan suurin sallittu jatkuva käyttöjännite  $U_c$ . Tyypillisesti  $U_c$  mitoite-  
taan vähintään 5 % suuremmaksi kuin verkossa keskimäärin vaikuttava käyttöjännite. Siemensin ohjeen [18] mukaan suoraan maadoitetuissa verkoissa vaiheen ja maan vä-  
lille suojille valitaan  $U_c \geq 1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$ . Tässä  $U_m$  kuvaa verkon pääjännitettä. Vastaavasti

maasta erotetuissa verkoissa ja sammutetuissa verkoissa vaiheen ja maan väliin tulevan suojan  $U_c$  on mitoitettava niin, että  $U_c \geq U_m$ . Tässä 5 %:n marginaalia ei ole huomioitu. Tätä on perusteltu sillä, että esimerkiksi maasulun aikana terveiden vaiheiden jännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi ja kyseinen tila voi kestää yli 30 minuuttia. Tämän vuoksi  $U_c$  on mitoitettu maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa pääjännitteen eikä vaihejännitteen mukaan.

Seuraavaksi voidaan valita alkuarvo mitoitusjännitteelle käyttämällä hyödyksi suhdetta  $U_c/U_r = 0,8$ . Tällöin suoraan maadoitetulle verkolle saadaan mitoitusjännitteen alkuarvoksi  $U_{r1} \geq 1,25 \cdot 1,05 \cdot U_m / \sqrt{3}$  ja maasta erotetulle sekä sammutetulle verkolle  $U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_m$  [18]. Tämän jälkeen määritetään mitoitusjännitteelle toinen arvo käyttötaajuisten ylijännitteiden  $U_{TOV}$  ja relesuojauksen toiminta-ajan  $t_{TOV}$  perusteella. Tällöin tarvitaan kuvassa 10 olevaa käyttötaajuisten ylijännitteiden sietokäyrästä. Kun  $t_{TOV}$  tiedetään, voidaan suojalle määrittää käyrästä arvo  $c_{TOV}$ . Lisäksi, kun tiedetään aikaa  $t_{TOV}$  vastaava  $U_{TOV}$ , voidaan mitoitusjännitteen toinen arvo määrittää ehdolla  $U_{r2} = U_{TOV}/c_{TOV}$ . Mikäli tiedetään useampien käyttötaajuisten ylijännitteiden suuruudet ja niiden kestoajat, lasketaan kaikissa tapauksissa mitoitusjännitteelle arvo  $U_{r2}$ . Lopulliseksi  $U_{r2}$ -arvoksi valitaan suurin laskuissa saatu arvo. [18] Seuraavaksi valitaan lopullinen mitoitusjännitteen arvo  $U_r$ . Mitoitusjännitteeksi valitaan suurempi arvoista  $U_{r1}$  tai  $U_{r2}$ , ja arvo pyöristetään vielä seuraavaksi suurimpaan 3:lla jaolliseen lukuun [18]. Mikäli  $U_{r2}$  on suurempi, täytyy  $U_c$  määrittää vielä uudestaan suhteen  $U_c/U_r = 0,8$  avulla.

Tämän jälkeen valitaan suojalle sopiva nimellispurkausvirta  $I_n$ . Ensiksi voidaan arvioida suurinta salamavirtaa, jonka verkkoon oletetaan tyypillisesti osuvan. Virta saadaan laskettua kaavalla

$$I_{max} = (2 \cdot U_{fo} - U_{pl})/Z_W, \quad (3)$$

jossa  $U_{fo}$  kuvaa verkon eristysrakenteiden ylilyöntijännitettä,  $U_{pl}$  kuvaa suojan suojaustasoa ja  $Z_W$  on johdon aaltoimpedanssi. [18] Kerroin 2 tulee siitä, että johdon päässä jänniteaalto kaksinkertaistuu. Nimellispurkausvirran mahdolliset arvot ovat 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA ja 20 kA. [18] Arvioiden ja verkosta tiedettävän informaation perusteella valitaan sopiva nimellispurkausvirran arvo. Suurjännitteisiin verkkoihin sopivia ovat vain 10 ja 20 kA:n suojat. [18] Nämä kaksi jaetaan viiteen eri purkauskykyluokkaan, joka kuvaa tietyllä jäännösjännitteen arvolla suojan energianpurkauskykyä mitoitusjännitteen kilovoltilla kohti (kJ/kV). Luokat 1–3 ovat 10 kA:n suojuille ja 4–5 ovat 20 kA:n suojuille. [1] 20 kA:n suojat kestävät siis suurempia energiarasituksia. Taulukossa 1 on esitetty IEC-standardissa 60099-5 annetut suositukset valittaville purkauskykyluokille

**Taulukko 1.** IEC-standardin 60099-5 suositukset purkauskyykyluokille.

Purkauskyykyluokka	$U_m$ / kV
1	$\leq 245$
2	$\leq 300$
3	$\leq 420$
4	$\leq 550$
5	$\leq 800$

Purkauskyykyluokan valintaan vaikuttaa siis verkon jännite. Lisäksi valintaan vaikuttaa suojan käyttöpaikan läheisyydessä olevat laitteet [1].

### 3.3.4 Metallioksidisuojien ympäristörasitukset ja vanheneminen

Metallioksidisuojan sijainti verkossa määrää pitkälti suojaan kohdistuvat ympäristörasitukset. Likainen, kostea ja kuuma ympäristö on suojan rasitusten kannalta huonoin mahdollinen. Ympäristörasituksista haitallisim on kosteus. Suojan sisään pääsevä kosteus voi aiheuttaa osittaispurkauksia suojan sisällä, ja lopulta sisäinen ylilyönti on myös mahdollinen. Kosteutta voi päästä suojan sisälle esimerkiksi vaurioituneiden tiivisteiden kautta. Muita mahdollisuuksia ovat kosteuden absorboituminen, diffuusio ja kapillaari-ilmiö. [19] Kosteuden aiheuttamien haittojen takia vastuselementit päällystetään jollakin suojakerroksella, kuten lasilla tai epoksilla [15]. Kosteus voi myös aiheuttaa suojan sisällä kemiallisia reaktioita, jotka yhdessä osittaispurkausten kanssa vaikuttavat vastuselementtien resistiivisiin ominaisuuksiin. Tämän seurauksena vuotovirta kasvaa ja lopulta suoja voi termisen ylikuormituksen vuoksi tuhoutua. Polymeerikuoriset suojat ovat kosteutta vastaan tiiviimpiä, eivätkä ne sirpaloidu vauriotapauksissa tosin kuin posliinikuoriset. [1]

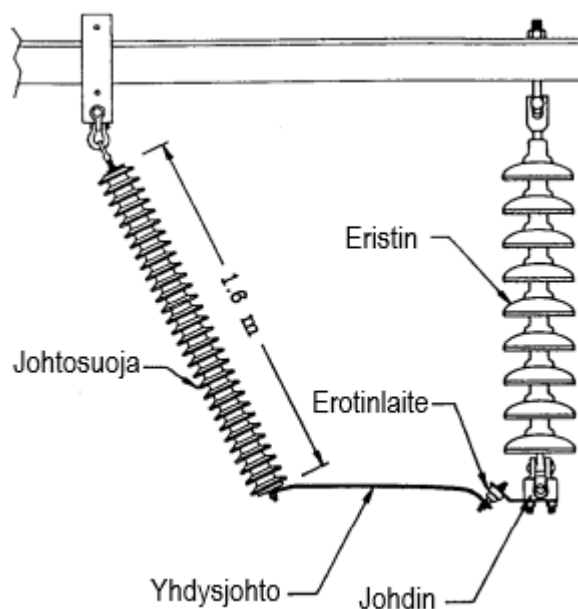
Toinen hyvin haitallinen ympäristörasitus on suojan pinnalle kertyvät lika, lumi tai jää. Nämä aiheuttavat eristypintaa pitkin kulkevan pintavuotovirran kasvua, mikä johtaa eristimen lämpenemiseen. Lopulta tilanne voi päättyä suojan termiseen läpilyöntiin. On myös mahdollista, että eristinpinnan johtavuuden kasvaessa tapahtuu ulkoinen läpilyönti, joka voi vaurioittaa eristinpinnta huomattavasti. Lisäksi ylilyönnistä aiheutuva maasulku ja siitä seuraava käyttötaajuinen ylijännite rasittaa verkon muita suoja. [19] Suojan pinnalle kertyvä lika muuttaa myös eristepinnan ulkoista jännitejakamaa. Tällöin

osa suojasta voi joutua suurempaan jänniterasitukseen. Tästä seuraa myös se, että vastuselementtien lämpötilajakauma ei ole enää tasainen ja suoja siirtyy helpommin termiseen epästabiilisuuteen. [15]

Ympäristön lämpötilalla on myös vaikutusta suojan vanhenemiseen. Alaluvussa 3.3.2 todettiin, että kuvan 11 alueessa 1, suojalla on negatiivinen lämpötilakerroin. Ympäristön lämpötilan ollessa korkea kasvaa suojassa kulkeva vuotovirta, jolloin suojan termiset rasitukset kasvavat ja vanheneminen nopeutuu. Termisen vanhenemisen kannalta viileät olosuhteet olisivat otollisimmat. Erityisen kylmät olosuhteet saattavat kuitenkin aiheuttaa tiivistysmateriaalien haurastumista ja näin edistää suojan vanhenemista. [19] Lisäksi jokaisesta suojan toiminnasta aiheutuu rasituksia, jotka nopeuttavat vanhenemista.

### 3.4 Johtosuojat

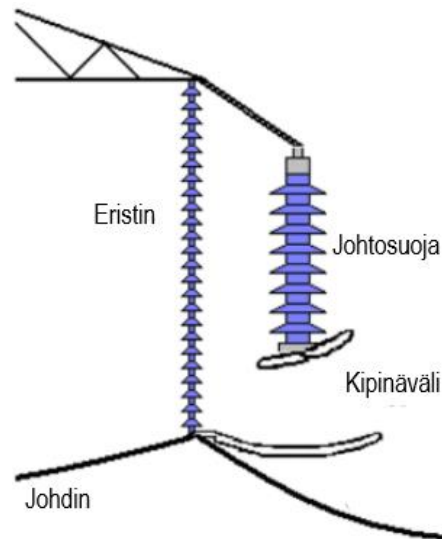
Edellä esitettyjen ylijännitesuojien pääasiallisena tarkoituksena on suojata jotakin verkon toiminnan kannalta tärkeää laitetta ylijännitteiltä. Johtosuojien tarkoituksena on suojata yksittäisen laitteen sijasta koko verkkoa. Ne vähentävät verkossa esiintyviä häiriöitä ja parantavat sähkön laatua. [20] Pääasiallisesti johtosuojat vähentävät ukkosen aiheuttamia lyhyitä jännitekatkoja. Ne asennetaan tyypillisesti verkon suojausta vaativan johtosuuden jokaisen pylvään tukieristimien rinnalle, jolloin ne vähentävät ylilyöntejä tukieristimien yli [20]. Johtosuoja on sekä kipinävälittömiä että kipinävälillisiä. Kipinävälitön johtosuoja koostuu pelkästään metallioksidisuojusta, kun taas kipinävälillinen koostuu metallioksidisuojan ja kipinävälin sarjaankytkennästä. Kuvassa 13 on esitetty kipinävälittömän johtosuojan sijoitus pylvälle.



**Kuva 13.** Kipinävälittömän johtosuojan sijoitus pylvälle. Muokattu lähteestä [21].



Kipinävälitön johtosuoja (Non-gapped line surge arrester, NGLA) on jatkuvassa jännite-  
rasituksessa, jolloin sen läpi kulkee jatkuvasti pieni vuotovirta. Tällaisten suojien rakenne  
ja siten myös toimintaperiaate on samanlainen kuin edellä esitetyillä metallioksidisuojiilla,  
sillä ne molemmat koostuvat samoista aineista. Lisäksi kipinävälittömien johtosuojien  
mitoitus ja valinta on vastaavanlainen prosessi kuin alaluvussa 3.3.3 on esitetty. [20]  
Kipinävälittömien johtosuojien kanssa sarjaan asetetaan eräänlainen erotinlaite, joka au-  
tomaattisesti erottaa vikaantuneen suojan verkosta. Tämän avulla verkko voi jatkaa toi-  
mintansa normaalisti, ja vikaantunut suoja jää odottamaan korvaamista. Johtosuojien  
yhteyteen on lisäksi kehitetty kunnonvalvontalaitteita, jotka toimivat langattomasti ja seu-  
raavat esimerkiksi suojan läpi kulkevaa vuotovirtaa. [22] Kunnonvalvontalaitteen avulla  
voidaan havaita, mikäli suoja on tulossa käyttöikänsä päähän, ja suoja voidaan korvata  
ennen kuin se menettää täysin toimintakykynsä.



**Kuva 14.** Kipinävälillisen johtosuojan sijoitus pylvälle. Muokattu lähteestä [23].

Kuvassa 14 on havainnollistettu kipinävälillistä johtosuojaa (externally gapped line arres-  
ter, EGLA) sähköverkossa. Kipinävälin ansiosta suojan läpi ei kulje vuotovirtaa, vaan se  
rasittuu ainoastaan toiminnan aikana [24]. Tämän vuoksi näiden käyttöikä on pidempi  
kuin kipinävälittömien suojien. Kipinävälillisiin suojiin kuuluu myös vähemmän materiaalia  
kuin kipinävälittömiin, joten ne ovat halvempia. Lisäksi ne ovat kevyempiä kuin kipinävä-  
littömät suojat ja niiden asentaminen on helpompaa. Myöskään metallioksidiosan hajoa-  
minen ei vaikuta verkon toimintaan, sillä kipinäväli eristää rakenteen jännitteellisistä  
osista. Suojan välittömälle korvaamiselle ei myöskään ole tarvetta, koska kipinäväli on  
mitoitettu kestämään käyttötaajuisia ylijännitteitä ja kytkenäylijännitteitä. [24] Kipinäväli  
tekee johtosuojan mitoitukselta erilaista ja tuo siihen omat haasteensa. Suojan rakenne  
voi olla myös sellainen, että kipinävälin molemmilla puolilla on metallioksidisuoja. [24]

Johtosuojien käyttö yhdessä ukkosjohtimien kanssa on tehokas tapa vähentää verkossa esiintyviä häiriöitä ja katkoksia. Suuren salamavirran omaavat salamit osuvat ukkosjohtimiin ja purkautuvat maadoituksia pitkin maahan. Vastaavasti pienen salamavirran omaavat salamit voivat osua vaihejohtimiin, mutta salamavirta purkautuu johtosuojaa pitkin maahan, eikä tukieristimen yli tapahdu ylilyöntiä. Kun suurivirtaiset salamit osuvat suurella todennäköisyydellä ukkosjohtimiin, ei suojan energianpurkauskykyä tarvitse mitoitaa niin suureksi. [25] Johtosuojat vähentävät myös takaiskuista aiheutuvia haittoja. Sijoittamalla johtosuojia lähelle sähköasemia pienenee asemalle pääsevien ylijännitteiden amplitudit. Tällöin myös sähköaseman ylijännitesuojien toimintavarmuus paranee. [25]

Johtosuojat ovat myös taloudellisesti kannattava ratkaisu. Sen lisäksi, että ne parantavat verkon suorituskykyä, ne myös alentavat verkon rakentamiseen ja ylläpitoon liittyviä kustannuksia [24]. Johtosuojia pidetäänkin taloudellisempänä ja tehokkaimpana tapana kehittää olemassa olevan ilmajohdon ukkossuojausta [22]. Johtosuojia ei taloudellisesti ole kannattavaa asentaa jokaiselle pylväälle, vaikka tällöin saataisiinkin täydellinen ukkosuojaus. Kannattavinta on sijoittaa johtosuojia alueille, joissa niistä saatava hyöty on merkittävä. Tyypillisesti niitä käytetäänkin alueilla, joissa ukkosia esiintyy runsaasti, sekä alueilla, joissa maadoitusolosuhteet ovat huonot. Suojauksen suunnittelussa käytetään erilaisia ohjelmistoja, jotta saadaan määritettyä optimaalinen ja kustannustehokas suojaus. Käytettäviä ohjelmistoja ovat esimerkiksi Sigma SLP ja IEEE Flash. [24]

Johtosuojia on myös mahdollista käyttää kytkentäylijännitteiden rajoittamiseen. Se vaatii suojan sijoittamista strategisesti oikeaan paikkaan verkossa. Toisin kuin ilmastollisilta ylijännitteiltä suojautuessa, johtosuojia ei tarvitse asettaa peräkkäisille pylväille, vaan vain tiettyihin paikkoihin verkon varrella. Tyypillisesti johtosuojia on käytetty tähän tarkoitukseen vain yli 245 kV:n johdoilla. Kytkenäylijännitteiltä suojautumiseen on käytettävä kipinävälittömiä johtosuojia, sillä kipinävälillisiä ei ole suunniteltu kyseiseen tarkoitukseen. [24]

Johtosuojien käytöstä on myös monia muita etuja. Esimerkiksi verkon jännitetasoa kasvatettaessa ilman, että verkon rakennetta tai eristeiden kokoa muutetaan, on johtosuojien käyttö hyödyllistä ja taloudellisesti kannattavaa. Johtosuojat myös alentavat kosketus- ja askelijännitteiden suuruuksia mahdollisen eristyksen ylilyönnin seurauksena. Ne siis parantavat turvallisuutta. Lisäksi esimerkiksi katkaisijoiden elinikä pitenee, sillä niiden toimintakerrat vähenevät johtosuojien ansiosta. Tämä on myös taloudellisesti hyvä asia. [24] Johtosuojia pidetään myös yksinä luotettavimmista komponenteista verkossa.

Niiden vikataajuuden arvioidaan olevan vain noin 0,1 % vuodessa. Johtosuojien kunnonvalvonnassa voidaan käyttää muun muassa lämpökameroita, joiden avulla havaitaan, mikäli suoja on ajautumassa termiseen epästabiilisuteen. Nykyisin verkkoa kuvataan paljon helikopterin avulla, mutta tulevaisuudessa helikopterit on tarkoitus korvata miehittämättömillä ilma-aluksilla eli droneilla. [24] Eräs tähän liittyvä kehitteillä oleva järjestelmä on Siemensin SIEAERO, jonka ohjelmisto hyödyntää tekoälyä ja koneoppimista datan tallentamiseen, hallintaan ja analysointiin. SIEAERO kerää lennon aikana hyvin paljon erilaista dataa, ja sen käyttö vähentää tarvittavien lentojen määrää. Se on hyvin tarkka ja täysin automatisoitu. Lisäksi datan analysointi nopeutuu huomattavasti. [26] Järjestelmää käytetään kokonaisvaltaiseen verkon kunnonvalvontaan, ei pelkästään johtosuojien kunnonvalvontaan.

## 4. POHDINTAA

Häiriöttömän sähkösaannin tarve on viime vuosina lisääntynyt merkittävästi. Asiakkaat ovat vaativampia sähkön suhteen, sillä heidän laitteistojensa ja prosessien toiminta vaatii luotettavaa sähköenergian saantia. Lyhyetkin katkokset ja häiriöt voivat olla joillekin teollisuuden prosesseille hyvin haitallisia. Katkoksesta seurannut prosessin pysähtyminen aiheuttaa erityisesti taloudellisia tappioita. Yritykset haluavat tietysti minimoida nämä taloudelliset tappiot ja vaativat tämän vuoksi luotettavaa ja häiriötöntä toimintaa sähköverkosta. Ylijännitesuojien käyttö parantaakin verkon luotettavuutta ja vähentää verkossa esiintyviä keskeytyksiä.

Suomessa sähköverkkoon aiheuttaa muutoksia nykyinen sähkömarkkinalaki, joka velvoittaa verkkoyhtiöitä kehittämään säävarmaa sähköverkkoa. Muutoksen sähkömarkkinalakiin aiheuttivat viime vuosikymmenen alussa olleet Hannu- ja Tapani-myrskyt ja niistä seuranneet suurhäiriöt. Tämän seurauksena monet jakeluverkkoyhtiöt kaapelivat verkkoaan, jotta vastaavanlaisilta suurhäiriöiltä vältyttäisiin. Kaapeloinnin myötä verkkoon kohdistuvat ilmastolliset rasitukset häviävät. Esimerkiksi tuuli- ja lumikuormat eivät aiheuta haittaa kaapelille. Lisäksi ilmastollisten ylijännitteiden vaikutus on pienempi kaapeliverkossa, jolloin käyttökeskeytysten määrä pienenee. Kaapelointi siis parantaa verkon toimitusvarmuutta. Kaapelointi tuo myös omat lisänsä ylijännitesuojaukseen. Erityisesti kaapelipäätteiden suojaus on tärkeää. Tyypillisesti avojohtoverkon keskellä oleva kaapeli suojataan metallioksidisuojuilla kaapelin molemmista päistä [27]. Lyhyillä kaapeleilla (30–50 m) ylijännitesuojat sijoitetaan kuitenkin pääasiassa vain kaapelin loppupäähän [1].

Ylijännitesuojien käyttö on myös verkkoyhtiön kannalta taloudellisesti kannattavaa. Laitteita, komponentteja ja eristyksiä vaurioituu vähemmän, jolloin niiden korjaamiseen kuuluu paljon vähemmän kustannuksia. Taloudellisesti suojat tuleekin mitoittaa niin, että rahallisesti niistä saatava hyöty on suurempi kuin suojien hankintaan kuluvat kustannukset. Suojia ei ole tarpeen suunnitella suojaamaan kaikilta mahdollisilta ylijännitteiltä, joiden esiintymistodennäköisyys on hyvin pieni. Suojien ylimitoittaminen ei siis ole kannattavaa. Voidaankin ajatella, että ylijännitesuojauksen suunnittelu on teknis-taloudellinen optimointitehtävä.

## 5. YHTEENVETO

Eri syistä aiheutuvat ylijännitteet rasittavat ja vaurioittavat sähköverkon ja verkkoon kytkettyjen laitteiden eristysrakenteita. Ylijännitteet voidaan aiheuttajittain jakaa ilmastollisiin ylijännitteisiin, kytkentäylijännitteisiin sekä käyttötaajuisiin ylijännitteisiin. Ilmastolliset ylijännitteet muodostuvat joko salaman iskiessä suoraan vaihejohtimeen, induktion kautta salaman iskiessä verkon välittömään läheisyyteen tai takaiskuna verkon maadoitetusta osasta vaihejohtimeen. Ilmastolliset ylijännitteet, jotka tunnetaan myös nimellä jyrkät transienttiylijännitteet, ovat hyvin lyhytaikaisia, mutta niiden sisältämä energia on erittäin suuri. Kytkentäylijännitteitä eli loivia transienttiylijännitteitä syntyy verkon äkillisissä tilanmuutoksissa, kuten jälleenkytkennöissä. Kytkentäylijännitteiden suuruus riippuu verkkotilanteesta, ja niiden merkitys kasvaa verkon käyttöjännitteen kasvaessa. Käyttötaajuiset ylijännitteet ovat edellisistä poiketen jaksollisia ja pidempiaikaisia. Käyttötaajuisia ylijännitteitä aiheutuu tyypillisesti verkon tilamuutoksissa. Yleisin käyttötaajuisen ylijännitteiden aiheuttaja on maasulku.

Ylijännitesuojien tarkoituksena on rajata ylijännitteet riittävällä marginaalilla eristysrakenteen kestotason alapuolelle. Ukkosjohtimien tarkoituksena on estää suorat salamaniskut vaihejohtimiin. Suomessa käytetään alle 200 kVA:n pylväsmuuntamoiden suojauksessa kipinävälejä, joiden rakenne on hyvin yksinkertainen. Kipinävälissä tapahtuu ylilyönti jännitteen noustessa riittävän suureksi ja salamavirta kulkeutuu kipinävälin ja maadoitusten kautta maahan. Pääasiassa verkkoon asennettavat ylijännitesuojat ovat metallioksidisuoja, joiden toiminta perustuu vastusmateriaalin epälineaariseen käyttäytymiseen. Normaaliolosuhteissa metallioksidisuojan läpi kulkee vain hyvin pieni vuotovirta, mutta ylijännitteen seurauksena suoja siirtyy johtavaan tilaan. Tällöin suoja siirtää haitallisen ylijännitepulsin maahan, ja ylijännitteen loputtua suoja palaa takaisin johtamattomaan tilaan, jolloin pikajälleenkytkentää ei tarvita, toisin kuin kipinävälin tapauksessa. Johtosuojat vastavasti suojaavat yksittäisen laitteen sijasta koko verkkoa. Niiden käyttö vähentää verkossa esiintyvien häiriöiden määrää ja parantaa sähkön laatua.

Kasvanut häiriöttömän sähkösaannin tarve ja lain velvoittama säävarman sähköverkon rakentaminen ajavat verkkoyhtiöitä kehittämään verkkojaan luotettavammiksi. Ylijännitesuojien käyttö onkin eräs toimenpide, jolla saadaan vähennettyä verkossa esiintyviä häiriöitä. Lisäksi laite- ja komponenttivaurioita syntyy vähemmän, jolloin eri pituisten keskeytysten määrä verkossa vähenee. Ylijännitesuojien käyttö parantaakin siis verkon toimitusvarmuutta.

# LÄHTEET

- [1] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V., Suurjännitetekniikka, Otatieto, 2015, 4. korjattu ja täydennetty painos.
- [2] Nousiainen, K., Suurjännitetekniikka, Tampereen yliopiston kurssin DEE-23060 opetusmateriaali, 2019.
- [3] Martinez-Velasco, J., Castro-Aranda, F., Lightning Overvoltages in Power Systems. Saatavissa: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-39-59-07.pdf>, viitattu 14.4.2020.
- [4] Laiho, Y., Elovaara, J., Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo, 1983, Espoo, 5. muuttumaton painos.
- [5] Mäkelä, H., Jakelumuuntajien läpi siirtyvien ukkosylijännitteiden tarkastelu, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2009.
- [6] Abouzeid, S., Shabib, G., Adel Zein El Dein, M., Induced Voltages on Overhead Transmission Lines Because of Nearby Included Lightning Channel, IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, Vol, 9, Iss. 13, pp. 1672–1680. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7274091>, viitattu 12.3.2020.
- [7] UHV Transmission Technology, The China Electric Power Research Institute, Academic Press, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/overvoltage>, viitattu 15.4.2020
- [8] Bastman, J., Sähköverkkotekniikka, Tampereen yliopiston kurssin DEE-23010 opetusmateriaali, 2019.
- [9] Ylijännitesuojaus ja eristyskoordinaatio, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, 1974, Helsinki.
- [10] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines (1243-1997), 1997, Piscataway, USA, pp. 1-44. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/640303>, viitattu 17.3.2020.
- [11] What is the Purpose of Ground Wire in Overhead Transmission Lines?, Electrical Technology, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.electricaltechnology.org/2012/04/what-is-purpose-of-ground-wires-in-over.html>, viitattu 19.3.2020.
- [12] Banjanin, M., Savić, M., Stojković, Z., Lightning Protection of Overhead Transmission Lines Using External Ground Wires, Electric Power Systems Research, 2015, Vol 127, pp. 206–212. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378779615001765?via%3Dihub>, viitattu 20.3.2020.
- [13] Banjanin, M., External Lightning Protection of Overhead Distribution Lines Against Direct Lightning Strikes, 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), IEEE, 2018, Vol. 2018-, pp. 1–6. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8345533>, viitattu 20.3.2020.

- [14] Visacro, S, Silveira, F., De Conti, A., The Use of Underbuilt Wires to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, Vol 27, Iss. 1, pp. 205–213. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6051511>, viitattu 22.3.2020.
- [15] Kannus, K., Nousiainen, K., Lahti, K., Pakonen, P., Nikander, A., Metallioksidisuojien käyttöön ja kestävyteen liittyviä näkökohtia, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1996, Tampere.
- [16] Lehtonen, M., Sähköjärjestelmän peruskomponentit, Sähköenergiatekniikka, Powerpoint-esitys. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/618623/mod\\_resource/content/1/Luento%20luku%20%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf](https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/618623/mod_resource/content/1/Luento%20luku%20%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf), viitattu 25.3.2020.
- [17] Application guidelines, Overvoltage protection, Metal-oxide surge arresters in medium-voltage systems, ABB Switzerland LTD, 2018, 6th revised edition. Saatavissa: [https://library.e.abb.com/public/dc42f0e0b30e48d08c54f683ef27b7b0/ABB%20Medium-voltage%20surge%20arresters%20-%20Application%20Guidelines%20HC0075561%20E2%20AC%20\(read%20view\).pdf](https://library.e.abb.com/public/dc42f0e0b30e48d08c54f683ef27b7b0/ABB%20Medium-voltage%20surge%20arresters%20-%20Application%20Guidelines%20HC0075561%20E2%20AC%20(read%20view).pdf), viitattu 27.3.2020.
- [18] Hinrichsen, V., Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems, Siemens AG, 2011, 3rd edition. Saatavissa: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public/0.64a37729c7408df1e15b39ca8c9cde8b957a5463.e50001-g630-h197-x4a00-ableiterhandbuch-teil-1-a4.pdf>, viitattu 3.4.2020.
- [19] Välkepinta, H., Näkökohtia metallioksidilyjännitesuojien valintaan ja suojauksen toteutukseen, diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1995.
- [20] Wirén, H., Johtosuojat ja niiden käyttö siirtojohtojen ylijännitteiden hallinnassa, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. Saatavissa: [http://www.tut.fi/eee/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Wiren\\_Henri\\_julk.pdf](http://www.tut.fi/eee/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Wiren_Henri_julk.pdf), viitattu 10.4.2020.
- [21] Melchior, R., Williams, J., Mcquin, N., Fault testing of gapless zinc oxide transmission line arresters under simulated field conditions. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, Vol 10, Iss. 2, pp. 786–96. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=400852>, viitattu 11.4.2020.
- [22] Line surge arresters, Siemens AG, <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/transmission-products/surge-arresters/line-surge-arresters.html>, viitattu 5.4.2020.
- [23] He, J., Hu, j., Chen, S., Zeng, R. Influence of Series Gap Structures on Lightning Impulse Characteristics of 110-kV Line Metal-Oxide Surge Arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, Vol 23, Iss. 2, pp. 703–709. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/4454200>, viitattu 11.4.2020.
- [24] Giraudet F., Various Benefits for Line Surge Arrester Application and Advantages of Externally Gapped Line Arresters, 2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET), IEEE, 2019, pp. 1–6. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8724171>, viitattu 12.4.2020.

- [25] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 2009, New York, USA. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6093926>, viitattu 9.4.2020.
- [26] Siemens presents SIEAERO – the next generation of overhead line inspection, Siemens AG, 2018. Saatavissa: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-presents-sieaero-next-generation-overhead-line-inspection>, viitattu 9.4.2020.
- [27] Ahonen, P., Keskijänniteverkkojen ylijännitesuojaus- ja jälleenkytkentätarkastelut ylijännitelaskentaohjelmiston avulla, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. Saatavissa: [http://www.tut.fi/eee/opetus/pdf%20julki-set%20dyot/Ahonen\\_Pasi\\_julk.pdf](http://www.tut.fi/eee/opetus/pdf%20julki-set%20dyot/Ahonen_Pasi_julk.pdf), viitattu 24.4.2020.