

Arttu Koskinen

SÄHKÖNJAKELUVERKON TURVALLISUUS

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kalle Ruuth
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Arttu Koskinen: Sähkönjakeluverkon turvallisuus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2023

Sähkön asema yhteiskunnan tukipilarina vankistuu koko ajan. Sähköenergian kriittisen roolin takia on varmistettava, että sähkön käyttäminen on myös turvallista. Työssä perehdytään olemassa olevaan aineistoon siitä, millainen on suomalaisen sähkönjakeluverkon rakenne, millaisia suojauksia eri jännitetasoilla käytetään ja mitkä ovat yleisimpiä tapaturma- ja vikatilanteita.

Jakeluverkko koostuu keskijänniteverkosta, jakelumuuntajista sekä pienjänniteverkosta. Keskijänniteverkon pääjännite on 20 000 volttia ja pienjänniteverkon 400 volttia. Molemmilla jännitetasoilla käytetään sekä avojohtoja että maakaapeleita. Teknologisen kehityksen sekä lakimuutosten myötä maakaapelointi on lisääntynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana ja siirtyä kohti kaapeloitua verkkoa etenee kovaa vauhtia.

Sähköverkon suojaus toteutetaan monessa tasossa. Keskijänniteverkon suojauskomponentit on sijoitettu pääasiassa 110/20 kilovoltin muuntaja-asemille. Nämä komponentit suojaavat johto-osuuksia jakelumuuntajille asti. Jakelumuuntajilla on suojaukset pienjänniteverkolle ja kiinteistöjen liitännällä eli sähköpääkeskuksella suojataan rakennusten asennukset sekä käytettävät sähkölaitteet. Verkon suojauksessa on kaksi keskeistä ulottuvuutta. Ensinnäkin verkonkäyttäjiä pitää suojata sähköiskuilta ja valokaarilta. Toiseksi verkon käyttö pitää olla myös välillisesti turvallista eli se ei saa aiheuttaa tulipaloja.

Sähköturvallisuuden keskeisenä tekijänä ovat lait ja standardit, jotka ohjaavat muun muassa sitä, ketkä saavat tehdä sähköasennuksia ja millaisia asennuksia saa tehdä. Keskeisimmät standardit ovat SFS 6000 ja SFS 6002, jotka ohjaavat pienjänniteasennuksia ja sähkötyöturvallisuutta. Vikavirtasuojakytkimen muuttuminen pakolliseksi uusissa asuinrakennuksissa on hyvä esimerkki standardien turvallisuusvaikutuksista.

Pahimpana sähköturvallisuuskana ovat kuolemat. Viimeisien vuosien aikana ei ole tapahtunut yhtään sähköammattihenkilön kuolemaa, mutta maallikoiden kuolemia tapahtuu edelleen vuosittain. Lisäksi eriasteisia sähkötapaturmia tapahtuu edelleen useita satoja vuodessa. Sähköturvallisuustyössä on siis vielä tekemistä. Tapaturmien lisäksi vuosittain tapahtuu noin 2000 kappaletta sähkön aiheuttamia tulipaloja. Aiheuttajina ovat muun muassa heikentyneet liitännät ja sähkönkäyttäjien huolimattomuus.

Avainsanat: jakeluverkko, jakelumuuntaja, keskijänniteverkko, pienjänniteverkko, sähköturvallisuus, sähkötapaturma

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. JAKELUVERKON RAKENNE	3
2.1 Sähkönjakelu	3
2.2 Keskijänniteverkko	4
2.2.1 Pylväät	4
2.2.2 Ilmajohdot	5
2.2.3 Kaapelit	6
2.3 Jakelumuuntamot	7
2.4 Pienjänniteverkko	9
3. JAKELUVERKON SUOJAUS	12
3.1 Keskijänniteverkon suojaus	12
3.1.1 Oikosulkusuojaus	13
3.1.2 Maasulkusuojaus	14
3.1.3 Ylijännitesuojaus	16
3.2 Pienjänniteverkon suojaus	17
4. JAKELUVERKON TURVALLISUUSTILANNE	20
4.1 Taustatietoa nykytilanteesta	20
4.2 Keskijänniteverkko	22
4.3 Jakelumuuntajat	23
4.4 Pienjänniteverkko	24
4.4.1 Sähköiskut ja valokaaret	25
4.4.2 Tulipalot	26
5. YHTEENVETO	28
LÄHTEET	29

1. JOHDANTO

Jakeluverkon avulla sähköenergiaa jaetaan jokaiselle kuluttajalle sopivalla jännitetasolla käytettäväksi. Oikein ja turvallisesti käytettynä sähköenergia luo huomasti mahdollisuuksia ja helpottaa ihmisten arkea ja työntekoa. Turvallinen käyttö ei kuitenkaan ole yksinkertainen asia. Käytössä on monia eri jännitetasoja sekä erilaisia ympäristöjä, joissa sähköä käytetään. Suomalainen jakeluverkko koostuu pääasiassa 20 kV:n ja 400 V:n sähköverkosta.

20 kV:n verkkoa kutsutaan keskijänniteverkoksi. Se koostuu avojohto- ja maakaapelirakenteesta. Keskijännitteellä kuljetetaan sähköä isoilta siirtoverkoilta lähemmäs kuluttajaa. Keskijänniteverkolla on keskeisin rooli verkon käyttövarmuudessa. Suurin osa ihmisten kokemista keskeytyksistä tapahtuu juuri keskijänniteverkossa. Keskijännitteen vikoja aiheuttavat eniten erilaiset sääilmiöt sekä maanrakennustyöt.

20 kV:n jännite on liian suuri käytettäväksi arkisissa sähkölaitteissa. Tämän takia on käytössä pienjännite, jossa verkon pääjännitteenä on 400 V. Sen avulla ihmiset pystyvät käyttämään valoja, kodinkoneita ja muita sähkölaitteita. Jännitetason pienentyessä sähköä on turvallista siirtää lähempänä ihmisiä. Samalla ihmisten on myös mahdollista päästä käsiksi pienjänniteverkon osiin. Näiltä vaaratilanteilta suojautuminen on keskeinen osa sähköturvallisuutta.

Vian esiintyessä verkko ei toimi oikein ja se voi aiheuttaa vaaraa ihmisille, eläimille tai omaisuudelle. Tämän takia jokainen verkonosa on suojattu jollakin laitteella. Keskijännitteellä suojaus tehdään yleensä 110/20 kV:n sähköasemilla, kun taas pienjännitteellä suojaus on jakelumuuntajilla sekä yksittäisen sähköliittymän sähköpääkeskuksella. Tunnetuin suojalaite on sulake, jonka tehtävänä on katkaista virran kulku liian suurella virralla.

Yleisesti sähköturvallisuus on hyvällä tasolla Suomessa. Tapaturmia kuitenkin tapahtuu ja viimeisten vuosien aikana sähkökuolemien vuosikeskiarvo on ollut kaksi kappaletta. Verkon suojaustaso on jo hyvällä tasolla, mutta tapaturmien ja kuolemien vähentämiseksi olisi tärkeä lisätä verkonkäyttäjien tietoisuutta sähkön vaaroista. Ihmisten huolimattomuus niin työssä kuin vapaalla aiheuttaa satoja turhia onnettomuuksia vuosittain.

Tämän työn tavoitteena on selvittää sähkönjakeluverkon turvallisuutta jokapäiväisessä elämässä. Työssä esitellään jakeluverkon rakennetta, eri jännitetasojen

suojausmekanismeja, sekä yleisimpiä vaara- ja vikatilanteita. Pääpainona on keskittyä tämänhetkiseen tilanteeseen verkon rakenteen ja turvallisuuden kannalta. Lähteinä käytettiin sekä kirjoja että avoimia internetlähteitä.

2. JAKELUVERKON RAKENNE

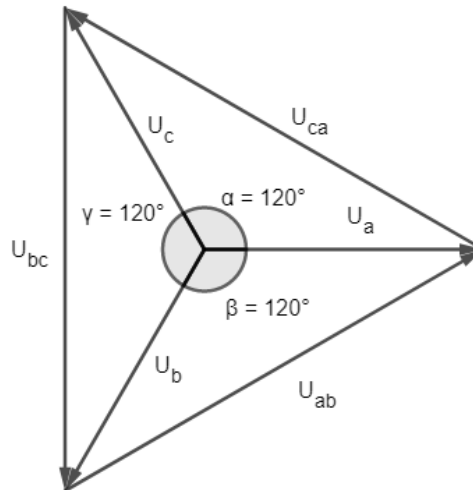
Jakeluverkosta puhuttaessa tarkoitetaan 20 kV:n keskijänniteverkon sekä 400 V:n pienjänniteverkon muodostamaa kokonaisuutta. Suomalaisessa jakeluverkossa on myös alueellisesti käytössä sekä 10 kV:n että 1 kV:n verkkoja. Joillain alueilla on myös käytössä vanhempaa 45 kV:n verkkoa, joka luetaan yleisesti mukaan suurjännitteiseen jakeluverkkoon 110 kV:n verkon kanssa. [1 s. 69]

2.1 Sähkönjakelu

Jakeluverkon tarkoituksena on mahdollistaa sähkönjakelu pienkäyttäjille, ja sen jakelupiiriin kuuluvatkin yksittäiset kuluttajat, koulut, kaupat ja muut julkiset laitokset sekä pienteollisuus. Suuremmat teollisuusasiakkaat voivat olla yhteydessä 20 kV:n tai 110 kV:n verkkoon sähkötehon tarpeen mukaan. [1 s. 11]

Sähkön siirrossa tapahtuu häviöitä. Häviöiden pienentämiseksi siirtoverkossa käytetään korkeampia jännitteitä, jotta pystytään siirtämään suurempia tehoja. Jakeluverkossa jännitetaso on alhaisempi, koska siirtomatkat ovat lyhyempiä. Tällä tavoin jakeluverkon rakennus- ja ylläpitokustannukset saadaan matalammaksi ja turvallisuusvaatimukset on helpompi saavuttaa. [1 s. 11-12]

Suomessa käytetään sähkönjakelussa kolmivaihejärjestelmää. Tämä tarkoittaa, että sähköä siirretään yhtä aikaa kolmessa vaiheessa. Vaiheiden huippuarvot eli jännitteiden maksimisuuruudet ovat yhtä suuret, mutta ne saavat huippuarvonsa 120° vaihesiirrossa toisiinsa nähden. [2 s. 45-49] Kuvassa 1 havainnollistava kuva vaihekulmista. Kuvassa näkyvät vektorit U_a, U_b ja U_c kuvaavat vaihejännitteitä ja vektorit U_{ab}, U_{bc} ja U_{ca} kuvaavat pääjännitteitä.



Kuva 1. Pää- ja vaihejännitteet vektoriesityksenä. [3, muokattu]

2.2 Keskijänniteverkko

Keskijänniteverkko koostuu tällä hetkellä kahdesta rakenteesta. Vanhempi verkonosa koostuu ilmajohdoista, joita on vuoden 2021 tilaston mukaan 89 000 kilometriä. Vuoden 2021 tilaston mukaan kaapeloitua keskijänniteverkkoa on noin 66 000 kilometriä. Kaapelointiaste on siis vuoden 2021 loppuun saakka ollut 42,5 %, kun se vielä 2016 oli 22,5 %. Tilastoissa keskijännitteeksi on määritelty 1–70 kV:a, joten ilmoitetut johtopituudet ja kaapelointiasteet sisältävät myös tämän työn tarkastelun ulkopuolelle jääviä jännitetasoja. [4]

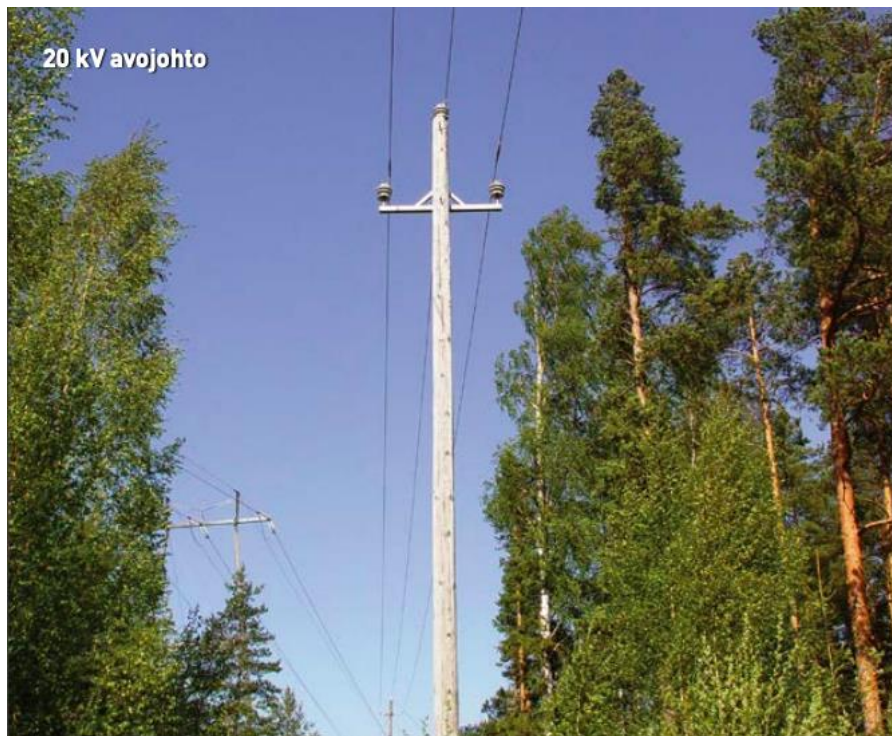
2.2.1 Pylväät

Ilmajohdot kulkevat kannatuspylväitä pitkin. Pylväiden tarkoituksena on mahdollistaa voimajohdon turvallinen kulku luonnossa ilman, että se aiheuttaa vaaraa ympäröivälle luonnolle, kuten eläimille tai ihmisille. 400 V:n ja 20 kV:n avojohdon varoetäisyys johdon alapuolella on 2 metriä ja vieressä 3 metriä. Johdot asennetaan yleensä vähintään 4 metrin korkeuteen, jotta varoetäisyys täyttyy automaattisesti. [5]

Suomessa yleisimmin käytettyjä pylväsmateriaaleja ovat puu ja teräs. Puun etuina ovat olleet helppo saatavuus ja matala hinta sekä parempi eristävyys verrattuna metallisiin pylväisiin. Jakeluverkossa puu on käytetyin pylväsmateriaali, mutta vaikeammissa olosuhteissa, kuten vesistöasennuksissa, käytetään teräspylväitä. Kiristyneet ympäristömääräykset ovat hankaloittaneet puupylväiden käyttöä, sillä vanhat kyllästeaineet, jotka suojaavat pylvästä, ovat haitallisia ympäristölle. Myös teräspylväät on suojattava joko sinkitsemällä tai maalaamalla. [6 s. 264-265]

2.2.2 Ilmajohdot

Ilmajohdot on kolmea tyyppiä [4]. Näistä selkeästi yleisin on avojohdot, jossa virtaa kuljettavat johtimet on kierretty säikeittäin ytimen ympärille. Ytimen tehtävänä on toimia kantavana rakenteena avojohdoissa. Yleisimmin käytetty ydinmateriaali on teräs, mutta viime vuosina on myös kehitetty komposiittimateriaalista olevia ytimiä. Ytimen ympärille kierretyt säikeet on tehty usein alumiinista tai alumiiniseoksesta, sillä alumiinilla on hyvä johtavuus hintaan nähden, ja se on kevyttä verrattuna moneen muuhun johdinmateriaaliin. [7 s. 100-101] Kuvassa 2 on esimerkki avojohdosta [5].



Kuva 2. 20 kV avojohdotyppi. [5]

Kuvasta nähdään, että yksi johdin on kiinnitetty suoraan pylvääseen eristimen avulla ja kaksi muuta johdinta ovat orrella. Orsirakenteen avulla asennuskorkeus saadaan matalammaksi, asennustyö on helpompi toteuttaa ja jänneväljen pituutta pystytään kasvattamaan. Uudet orret rakennetaan teräksestä, mutta vanhemmissa pylväissä saattaa vielä olla käytössä myös alumiiniorsia. [8 s. 192] Eristimen tehtävä on pitää orsi- ja pylväs rakenne jännitteettömänä ja samalla kiinnittää johdin kantavaan pylväs rakenteeseen.



Kuva 3. 20 kV PAS-johtopylväs. [9]

Toiseksi eniten verkosta löytyy päällystettyjä avojohtoja [4]. Johdot ovat sisärakenteeltaan samanlaisia kuin avojohdot, mutta säierakenteen päällä on muovipäällyste. Päällystetyistä avojohdoista käytetään nimitystä PAS-johto. PAS-johdon ideana on, että johtimien päällä oleva muovikerros toimii eristeenä ja estää näin vikatilanteen syntymisen, esimerkiksi oksan tippuessa johdon päälle. Eristekerros mahdollistaa myös vaihejohtimien sijoittamisen lähemmäs toisiaan avojohtoihin verrattuna. [1 s. 145] Tämän voi havaita vertaamalla kuvia 2 ja 3, joissa on esitetty avojohto- ja PAS-johtopylväät.

Lisäksi jakeluverkosta löytyy joitakin satoja kilometrejä ilmakaapelia. Ilmakaapelissa kaikki johtimet ovat saman kiinteän eristeen sisällä [6]. Kaapelirakenteesta kerrotaan lisää luvussa 2.2.3.

2.2.3 Kaapelit

Toinen keskijänniteverkossa käytetty rakenne on maa- ja merikaapelit. Maakaapeleita käytetään erityisesti kaupunki- ja taajama-alueilla. Viime vuosina kaapelointeja on alettu tekemään myös taajama-alueiden ulkopuolella käyttövarmuuden parantamiseksi. [1 s. 148-149] Kaapelointia on kiihdyttänyt 2013 voimaan astunut sähkömarkkinalaki, joka tiukensi laillisia keskeytysaikoja. [10]

Kuvassa 4 on esitetty havainnekuva kaapelirakenteesta. Kuvassa on AHXAMK-W maakaapeli, jossa kolme kaapelia on kiedottu saman keskusköyden ympärille, jolloin jokaiselle kolmelle vaiheelle on oma kaapeli. [11]



Kuva 4. Esimerkki kaapelin rakenteesta. [6 s. 313][11, muokattu] 1) johdin, 2) johdinsuoja, 3) eristys, 4) hohtosuoja, 5) paisuntakerros, 6) kosketussuoja, 7) vaippa.

Kaapeli koostuu yhdestä tai useammasta johtimesta, jotka on eristetty toisistaan [12]. Kaapeleiden yleisimmät johdinmateriaalit ovat kupari ja alumiini [8 s. 84]. Johdinsuojan tehtävänä on parantaa kaapelin jännitekestoisuutta. Suojan päälle tulee eristys, joka vähentää johtimen ulkopuolelle aiheutuvia sähköisiä vaikutuksia. Käytössä olevia eristysmateriaaleja ovat muun muassa muovi sekä öljypaperi. Hohtosuoja muokkaa johtimissa kulkevan virran muodostamaa sähkökenttää. Paisuntakerroksen tehtävänä on imeä kaapeliin mahdollisesti päätyvä kosteus. Kosketussuojan tarkoitus on toimia virran kulkutienä vikatilanteessa aiheuttaen verkon suojalaitteiden toiminnan. Kosketussuojan pitää johtaa sähköä hyvin, joten se on aina tehty metallista. Metallinen kuori vähentää myös sähkömagneettisen säteilyn vaikutuksia kaapelin ympärillä. Lopuksi kaapelirakenteen päälle tulee vaippa, joka suojaa kaapelia mekaanisesti. Vaativissa olosuhteissa vaipan päälle voidaan asentaa armeeraus parantamaan mekaanista kestävyttä. [6 s. 308-312][8 s. 87-88]

2.3 Jakelumuuntamot

Jakeluverkon keskeinen osa on jakelumuuntamot, joissa verkon jännitetaso lasketaan loppukäyttäjälle sopivaan 400 voltin tasoon. Yleisimpiä ovat 20/0,4 kV:n jakelumuuntajat. [1 s. 157] Jännitetason pienentyessä jännitehäviöt kasvavat, joten jakelumuuntajat rakennetaan yleensä käyttökohteen läheisyyteen. Jakelumuuntamomalleja ovat pylväs-, rakennus- ja puistomuuntamot. [8 s. 44-45] Kuvassa 5 on esimerkki pylväsmuuntamon rakenteesta ja kuvassa 6 puistomuuntamo.



Kuva 5. Pylväsmuuntamo. [13]

Pylväsmuuntamoita käytetään avojohtoverkossa. Muuntaja kiinnitetään pylväsrakenteeseen, jolloin pylväissä kulkeva keskijännitejohto saadaan tuotua muuntajalle ja muuntajalta saadaan samoja pylväitä pitkin kuljetettua myös pienjännitejohtoja. Pylväsmuuntamoiden hyötyjä ovat helppo asentaminen, keveys sekä pienet kustannukset. Pylväsmuuntamot ovat teholtaan pienempiä kuin rakennus- ja puistomuuntamot. [8 s. 44-45]

Rakennusmuuntamot ovat rakennuksen sisälle, erilliseen muuntamohuoneeseen rakennettavia muuntamoita. Muuntamohuoneeseen sijoitetaan muuntamokojeiston lisäksi keskijännitesisääntuloon tarvittavat liitälaitteet ja pienjännitelähtöön vaadittavat laitteet. [1 s. 157][8 s. 45]



Kuva 6. Puistomuuntamo. [13]

Puistomuuntamot ovat yleistyneet katukuvassa kaapeloinnin lisääntymisen myötä. Puistomuuntamoita käytetään pääasiassa kaapeliverkon muuntamona, mutta se voidaan liittää myös osaksi avojohtoverkkoa. Puistomuuntamot on rakennettu erilliseen muuntamokoppiin, joka sijoitetaan maahan. Muuntamokojeistoltaan puistomuuntamo sisältää samanlaiset komponentit kuin rakennusmuuntamo. [8 s. 45]

2.4 Pienjänniteverkko

Myös pienjänniteverkko koostuu ilmajohtoista ja maakaapeleista. Kaapeloinnin osalta on päästy suurempaan kaapelointiasteeseen kuin keskijännitteellä, sillä vuoden 2021 tilastojen mukaan kaapeloimisaste on 56,3 %. Ilmajohtoa on käytössä noin 112 000 kilometriä ja maakaapelia noin 144 000 kilometriä. [4]

Pienjänniteverkon kaapelointia on käyttövarmuuden parantamisen lisäksi kiihdyttänyt maisemansuojelu sekä aurausmenetelmä. Maisemansuojelulla tarkoitetaan ilmajohtojen rakentamista siten, että ne sulautuisivat mahdollisimman hyvin maastoon eivätkä pilaisi luontaista maisemaa. Esimerkiksi kaupungeissa maakaapelointi on lähes ainoa vaihtoehto, sillä avojohtoille ei ole tilaa tai ne aiheuttavat liikaa maisemahaittaa. [1 s. 94-96] Kuvassa 7 on esitettyä maakaapelin aurausta.



Kuva 7. Maakaapelin aurausta kaivinkoneella. [14]

Aurausmenetelmä on kaapelin asennustapa, jossa kaapeli asennetaan maahan erillisellä kaivuriin kytkettävällä aurauskoneella. Aurausmenetelmässä ei siis kaiveta leveää kaapeliojaa, johon kaapeli jälkikäteen asennetaan, vaan aurauskone tekee viillon maahan ja samanaikaisesti laskee kaapelia syntyneeseen viiltoon. Parhaimmillaan auraamalla voidaan asentaa useita kilometrejä kaapelia päivässä [1 s. 160]. Auraaminen onnistuu monenlaisen maaston, mutta kivikoinen tai kallioinen maa, asfaltti sekä jo maahan asennetut johdot tai kaapelit estävät auraustekniikan käytön. Maaperän helppouden ja huoltotöiden helpottamiseksi aurausta tehdäänkin usein hiekkateitä myötäillen. [8 s. 123-125]

Pienjänniteverkko on hyvin samankaltainen kuin keskijänniteverkko. Molemmat ovat säteittäisiä eli sähkönsyöttö tapahtuu vain yhdestä suunnasta. Molemmissa verkoissa on sekä avojohtoja että kaapeleita. Lisäksi suojalaitteet on sijoitettu muuntajiin. Eroavaisuuksiakin löytyy, joista merkittävin on maadoitus. Pienjänniteverkko on maadoitettu, kun taas keskijänniteverkko on maasta erotettu tai sammutettu verkko. Maadoitus vaikuttaa verkon suojaukseen, jota käsitellään kappaleessa 3. [1 s. 158-159]

Pienjänniteverkon avojohtorakenne muistuttaa keskijänniteverkon rakennetta. Johtimet kulkevat pylviä pitkin, mutta alhaisemman jännitetaso takia niiden kiinnitykseen ei tarvita eristintä, vaan ne voidaan ripustaa pylvääseen kiinnityskoukulla tai ripustimella. Yleisesti käytetty johdinratkaisu on niin sanottu AMKA-johdin, jossa on kolme

päällystettyä avojohdinta kiedottuna yhteisen päällystämättömän kannatusköyden ympärille. Kannatusköysi toimii myös PEN- eli maadoitus- ja nollajohtimena. [8 s. 172-176][15] Kuvassa 8 on havainnekuva pienjännitemaakaapelista.



Kuva 8. AXMK-PLUS-kaapeli. [15]

Jännitetason pienentyessä myös kaapelirakenne yksinkertaistuu. Kappaleessa 2.2.3 käsitellään keskijännitekaapeleita ja siinä kerrotut kaapelinosat ja niiden tehtävät pätevät myös pienjännitekaapeleissa. Maahan asennettavista pienjännitekaapeleista löytyy johdin, eriste sekä vaippa. Asennusolosuhteista ja ominaisuuksista riippuen kaapelirakenteessa voi olla myös kosketussuoja tai armeeraus. [8 s. 86-87, 91][16][17]

3. JAKELUVERKON SUOJAUS

Sähköverkon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on turvallisuus. Yksi osa sähköturvallisuuden rakentumisesta on verkon suojaus. Suojauksen tehtävä on katkaista tietyllä johto-osalla kulkeva sähkövirta vikatilanteen ilmetessä. Tällä tavoin varmistetaan, että verkon osat ja ihmiset sekä eläimet eivät vaarannu sähköverkon takia.

3.1 Keskijänniteverkon suojaus

Keskijänniteverkon suojauksen tehtävänä on estää vikatilanteen aiheuttamat vauriot johtimille ja verkossa oleville komponenteille, pitää verkko turvallisena ihmisille ja eläimille sekä parantaa sähkön laatua ja jakeluvarmuutta [1 s. 176-177]. Erilaisia vikatilanteita ovat oiko- ja maasulut, salaman iskut, johdinkatkokset sekä ylikuormitus [6 s. 339-342]. Oikosulussa kaksi tai kolme vaihejohdinta yhdistyy toisiinsa muodostaen epähalutun kytkennän. Maasulussa vaihejohdin yhdistyy maapotentiaalin kanssa. On myös mahdollista, että esiintyy tilanne, jossa on sekä oiko- että maasulku yhtä aikaa. Tällaista tilannetta kutsutaan maaosulukseksi. [1 s. 28][6 s. 339-342]

Vikasuojaus koostuu mittamuuntajista, suojarieleistä sekä katkaisijoista. Mittamuuntajien tehtävänä on muuttaa verkosta tuleva jännite tai virta releelle sopivaan tasoon, jotta rele ei vaurioidu mittaustilanteessa. Suojariele on komponentti, joka mittaa mittamuuntajalta tulevaa virtaa tai jännitettä. Virran tai jännitteen ylittäessä releen raja-arvot rele toimii ja antaa katkaisijalle käskyn avata virtapiiri. Kun mitattava suure palautuu raja-arvojen sisälle, rele palautuu. Katkaisijat ovat kojeita, joiden tehtävänä on katkaista virtapiiri vikatilanteessa. Katkaisijat sijoitetaan yleensä sähköasemille. [6 s. 162-163, 198-199, 335, 344][8 s. 38-42]

Relesuojauksen tavoitteena on olla selektiivinen, nopea, herkkä, käyttövarma ja toimintavarma. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että vain vikaantunut verkonosa kytketään irti ja muu verkko pysyy normaalissa käytössä. Selektiivisyyden saavuttamiseksi on tärkeää mitoittaa verkossa olevat releet siten, että lähimpänä vikaa oleva rele toimii nopeiten, jotta ehjässä verkossa ei tapahtuisi katkoksia. Suojauksen nopeudella on keskeinen rooli sähköverkon turvallisuuden kannalta. Mitä nopeammin vikaantunut verkonosa kytketään irti, sitä pienemmät ovat vikavirran aiheuttamat vauriot ihmisille ja verkon komponenteille. Suojauksen herkkyydellä tarkoitetaan sitä, että suojaus kykenee tarvittaessa toimimaan tilanteessa, jossa vikavirrat ovat pieniä. Suojauksen luotettavuus koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa on käyttövarmuus eli kuinka varmasti

suojaus toimii vikatilanteen sattuessa. Toinen osa on toimintavarmuus eli lähettääkö rele laukaisukäskyn tilanteessa, jossa verkko toimii oikein. [6 s. 342-344][8 s. 41-42]

3.1.1 Oikosulkusuojaus

Oikosulkusuojaus toteutetaan vakioaikaylivirtareleiden avulla. Releet toimivat oikosulkusuojauksen lisäksi ylivirtasuojina. [1 s. 176] Ylivirtareleen toiminta pohjautuu releelle annettuun raja-arvoon, jonka ylittyminen aiheuttaa suojauksen toteutumisen. Ylivirtareleen mitoittamisessa pitää huomioida, että suojattavalla johdolla esiintyvät vikavirrat ovat aina johdon kuormitusvirtaa suuremmat, jotta turvalaite toimii vikatilanteessa. [6 s. 346]

Oikosulkusuojausta suunniteltaessa halutaan tietää oikosulkuvirran suuruus, jotta johtimet sekä suojalaitteet osataan mitoittaa oikein. Oikosulkuvirran laskeminen onnistuu muodostamalla laskettavasta verkosta sijaiskytkentä Theveninin menetelmällä. Käytettävät suureet ilmaistaan osoitinsuureina. Laskenta tapahtuu kaavan 1 avulla. [1 s. 28-29]

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{Z}_f + \underline{Z}_i} \quad (1)$$

$$\underline{I} = \text{virta}$$

$$\underline{U}_v = \text{vaihejännite ennen vikaa}$$

$$\underline{Z}_f = \text{vikaimpedanssi}$$

$$\underline{Z}_i = \text{Ennen vikaa olevan verkon osan impedanssi}$$

Yleensä halutaan selvittää ainoastaan vikavirran suuruus, jolloin laskenta voidaan toteuttaa ilman osoitinsuureita. Keski-jänniteverkon oikosulkulaskut voidaan laskea kaavalla 2 ilman osoitinsuureita. [1 s. 28-30]

$$I_{k3} = \frac{U_v}{\sqrt{(R_{110} + R_m + R_j)^2 + (X_{110} + X_m + X_j)^2}} \quad (2)$$

$$R_{110}, X_{110} = 110 \text{ kV:n verkon oikosulkuresistanssi ja - reaktanssi}$$

muutettuna 20 kV:n tasolle

$$R_m, X_m = \frac{110}{20} \text{ kV muuntajan oikosulkuresistanssi ja - reaktanssi}$$

muutettuna 20 kV:n tasolle

$$R_j, X_j = 20 \text{ kV:n johtimien oikosulkuresistanssi ja - reaktanssi}$$

$$U_v = \text{vaihejännite}$$

$$I_{k3} = \text{vikavirta}$$

Oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttavat syöttävän verkon eli 110 kV:n verkon impedanssi, 110/20 kV:n muuntajan koko sekä vikapaikka, sillä johtimien impedanssi pienentää havaittavaa vikavirtaa lyhyelläkin matkalla. Sähköaseman lähellä tai syöttävässä kiskostossa esiintyvissä oikosuluissa havaittavan vikavirran suuruus on yleensä 5-12 kA. Pitkien johtopätkien päässä tapahtuvassa oikosulussa vikavirta vaimenee ja voi olla suojareleen havaitsemana enää muutaman sadan ampeerin luokkaa. [1 s. 30]

Vikavirtojen laskennan jälkeen pystytään mitoittamaan verkolle sopivat suojalaitteet ja johtimet, jotta vikatilanteessa suojalaitteet toimivat ennen kuin johtimien oikosulkukestoisuus ylittyy. Avojohtoverkossa vikatilanteiden hoidossa käytetään jälleenkytkentöjä. Tämä tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa suojalaite toimii normaalisti, mutta se on säädetty kytkemään johdin takaisin verkkoon tietyn ajan kuluttua. Ensimmäinen jälleenkytkentä on nimeltään pikajälleenkytkentä. Pikajälleenkytkentä tapahtuu muutamien kymmenien millisekuntien kuluttua suojalaitteen toiminnasta. Jos vika ilmenee uudelleen, toimii suojalaite taas ja kytkee johtimen pois verkosta. Tällöin tapahtuu aikajälleenkytkentä. Aikajälleenkytkennässä johdin pidetään jännitteettömänä 30-120 sekuntia, jonka jälkeen johdin kytketään takaisin. Jos vika havaitaan edelleen, kytkeytyy kyseinen johdin pysyvästi pois verkosta ja suojalaite lähettää vikailmoituksen sähköyhtiön valvomoon. Pika- ja aikajälleenkytkentöjen tarkoituksena on lyhentää poistuvien vikojen aiheuttamia häiriöitä kuluttajille. Esimerkiksi sähkölinjan päälle putoava oksa voi yhdistää kaksi johdinta toisiinsa ja aiheuttaa oikosulun. Jälleenkytkentä katkaisee johtimissa kulkevan virran, jolloin oksa saattaa tippua maahan, ja verkon kytkeytyessä takaisin vika on poistunut. [1 s. 176-178][18]

3.1.2 Maasulkusuojaus

Suomessa keskijänniteverkon maadoitus toteutetaan maasta erottamalla tai sammuttamalla. Maasta erotetussa verkossa muuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu, joten vikatilanteessa virralla ei ole suoraa kulkureittiä maan kautta takaisin virtapiiriin, vaan se palautuu takaisin piiriin johtojen maakapasitanssien kautta. Sammutetussa verkossa tähtipisteen ja maan välille kytketään kompensointi, jota kutsutaan myös sammutuskuristimeksi. Kompensoinnin tarkoituksena on saada maakapasitanssien kanssa yhtä suuri, mutta vastakkaissuuntainen virta kulkemaan kuristimen läpi tähtipisteelle, jolloin vastakkaissuuntaiset virrat kumoavat toisensa. [1 s. 182-184][19]

Maasta erotetussa verkossa vikavirrat ovat pieniä, sillä Suomen maaperä on yleisesti huonosti johtavaa ja virran paluureitiksi muodostuvat maakapasitanssit ovat melko pieniä. Tämä havaitaan myös vikavirran laskukaavasta. [1 s. 182-184]

$$I_f = \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} \quad (3)$$

I_f = vikavirta

\underline{E} = lähdejännite

R_f = vikaresistanssi

$3C$ = kolmen vaiheen maakapasitanssit

ω = kulmataajuus

Jos vikaresistanssi on nolla, saadaan kaava muutettua helpompaan muotoon [19].

$$I_f = 3\omega CE \quad (4)$$

Vikavirtojen saaminen pieniksi on tärkeää, jotta maasulussa syntyvä kosketusjännite ei kasva hengenvaaralliseksi. Kosketusjännite tarkoittaa jännitteellisen osan ja maan välistä potentiaaliero, jonka myötä virta voi kulkea ihmisen tai eläimen läpi. Kosketusjännitteen suuruutta on määritelty muun muassa standardissa SFS 6001. Jännitetason määrittelyssä pyritään siihen, että sähköiskun tapahtuessa virta ei pystyisi aiheuttamaan terveelle ihmiselle sydänkammiovärinä. [1 s. 182-183, 188]

Vikaresistanssin ollessa nolla viollisen vaiheen jännite menee nolleen, ja sen läpi ei kulje virtaa. Vastaavasti kahden muun vaiheen vaihejännite nousee pääjännitteen suuruiseksi. [1 s. 186] Tämän ominaisuuden takia maasulussa olevaa verkkoa voidaan käyttää tietyin ehdoin myös vikaantuneena [6 s. 338].

Maasulkusuojuksessa voidaan käyttää useita eri vikamittareita. Käytössä olevia mittareita ovat muun muassa summavirta, jännitteen muutos ja yliaallot. Maasulkusuojaus toteutetaan yleisesti suuntareleillä. Releiden toiminta mitoitetaan mittaamaan vaihevirtojen muutosta sekä vaihejännitteiden kasvua. Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä virrat ovat jännitteiden tapaan toisiinsa nähden vaihesiirrosta. Symmetrian myötä vaiheiden summavirta saa arvon nolla. Maasulun vikatilanteessa verkko ei pysy symmetrisenä, jolloin myöskään vaiheiden virrat eivät ole symmetriset ja summavirta saa nollasta poikkeavan arvon. [1 s. 190-193][19] Suunnattu maasulkurele vertaa nollavirran ja nollajännitteen välistä vaihekulmaa. Vaihekulmien vertailu perustuu terveen verkon symmetriaan. [6 s. 354]

3.1.3 Ylijännitesuojaus

Verkossa ei aina tapahdu vain vikatilanteita, joilta pitää suojautua. Esimerkiksi salaman osuminen sähköverkkoon aiheuttaa suuren ylijännitteen, joka pystyy vahingoittamaan verkkoa, ellei siltä ole suojauduttu. Ylijännitteet jaetaan transienttiylijännitteiksi ja pientaajuisiksi ylijännitteiksi. Transienttiylijännitteet ovat nopeita ylijännitteitä, jotka saavuttavat huippuarvonsa ja vaimenevat mikro- tai millisekunneissa. Niitä synnyttävät edellä mainitun ukkosen lisäksi esimerkiksi katkaisimet ja erottimet. Pientaajuisia ylijännitteitä synnyttävät muun muassa maasulut, kuormien kytkennät sekä verkon resonanssi. [6 s. 11-13]

Ylijännitesuojien tehtävänä on suojata verkossa olevia sähkölaitteita ylijännitteiltä. Ylijännitesuojat asennetaan herkkien verkkokomponenttien, kuten muuntajien, yhteyteen, sillä muuntajan hajoaminen saattaa aiheuttaa pitkänkin sähkökatkoksen. Verkon suojaus ylijännitteiltä ei perustu vain ylijännitesuojiin, vaan suojaus lähtee verkon suunnittelusta ja verkon itse aiheuttamien ylijännitteiden välttämistä. [6 s. 29-30]

Ylijännitesuojina käytetään kipinäväliä sekä venttiilisuoja. Kipinävälin tarkoituksena on ohjata ylijännite purkautumaan kipinävälin kautta, jolloin suojattava laite kestää jännitteen. Kipinävälin avulla toteutetaan siis hallittu läpilyönti kipinävälin johtimesta toiseen, jolloin vaarallinen ylijännite ei kulje suojattavan laitteen kautta. Kipinävälin vahvuuksia ovat yksinkertainen rakenne ja halpa hinta. Heikkouksia ovat vikatilanteen syntyminen verkkoon, joka yleensä johtaa muiden suojalaitteiden toimintaan. Valokaaren syttyminen kipinäväliin aiheuttaa jännitteenalenemää, joka vaikuttaa muihin verkon komponentteihin. Lisäksi kipinävälin toiminnan mitoittaminen on vaikeaa, sillä läpilyöntijännitteen suuruuteen vaikuttavat muun muassa transienttiylijännitteen tyyppi ja polariteetti. [6 s. 35-36]

Toinen käytössä oleva ylijännitesuojatyyppi on metallioksidisuoja. Se kytketään suojattavan laitteen rinnalle vaihejohtimen ja maan välille. Metallioksidisuojan toimintaperiaate perustuu epälineaariseen vastukseen. Tämä tarkoittaa sitä, että suojan halutaan käyttäjännitealueella toimivan kuin eriste, eli virta kulkee normaalisti verkon johtimia pitkin. Asetetun jänniterajan ylittyessä suojan sen sijaan halutaan omaavan mahdollisimman pieni vastus, jotta ylijännitteen energia purkautuu suojan eikä suojattavan komponentin kautta. Epälineaarisen ominaisuuden luomiseen käytetään pääasiassa sinkkioksidia. Metallioksidisuojien etuja kipinäväliin verrattuna ovat parempi energianpurkamiskyky ja komponenttien alempi suojaustaso. Suojaustaso tarkoittaa jännitetasoa, jolle metallioksidisuoja laskee saapuvan ylijännitteen. Toisin sanoen metallioksidisuoilla on pystytty vähentämään verkkokomponenttien suojausta, joka

vähentää komponenttien hintaa. [6 s. 36-38, 66, 237-241] Parempien ominaisuuksien takia metallioksidisuojaajat ovat yleistyneet ja niillä korvataan vanhoja kipinävälisuojaajia. [6 s. 237][8 s. 41]

3.2 Pienjänniteverkon suojaus

Pienjännitteellä verkon suojaaminen muuttuu, sillä verkko on maadoitettu. Verkonosien siirtyminen lähemmäs käyttäjiä tiukentaa suojausten vaatimuksia terveyden ja paloturvallisuuden osalta. Verkon vaurioitumisen estämisen lisäksi suojausten pitää myös pyrkiä estämään ihmisille koituvia terveyshaittoja sekä omaisuudelle aiheutuvia haittoja entistä paremmin. Verkon suojausta ohjaa muun muassa SFS 6000 standardi.

Pienjänniteverkon suojaus toteutetaan varokkeilla. Varokkeiden ohessa maadoitus suojaa verkonkäyttäjiä tasaamalla verkon osien potentiaalieroja. Jakelumuuntamolta lähtevä pienjänniteverkko suojataan sulakkeilla. Ne mitoitetaan siten, että ne kestävät verkon kuormitusvirran, mutta vikatilanteessa niiden pitää toimia riittävän nopeasti, jotta vika ei aiheuta henkilöille tai omaisuudelle vaaraa. Jokaisella vaiheella on oma sulake. Joissakin tilanteissa voidaan joutua käyttämään myös välisulakkeita jakelumuuntajan ja käyttäjän sähköpääkeskuksen välissä. Käyttökohteen sähköasennukset suojataan sähköpääkeskuksessa uusilla sulakkeilla tai johdonsuojakatkaisijoilla. Toisin sanoen jakelumuuntajan sulakkeet suojaavat verkonosaa muuntajalta esimerkiksi asuintalolle. Talon sisälle tehtyjä asennuksia ja pistorasiaan kytkettäviä laitteita suojaa rakennuksen omat pääsulakkeet. [1 s. 163, 199]

Rakennuksiin tulevissa sähköasennuksissa tavoitteena on se, että jännitteisiin osiin ei päästä käsiksi, jolloin ei voi saada sähköiskua. Tätä kutsutaan perussuojaukseksi. Perussuojauksen ideana on ensisijaisesti eristää tai koteloida jännitteelliset osat, jotta niihin ei pääse koskemaan ja ei voi joutua osaksi virtapiiriä. Joissakin erikoistilanteissa, kuten teollisuuden sovelluksissa, perussuojauksena voidaan käyttää myös esteitä, jotta jännitteisiin osiin ei pääse koskemaan vahingossa. Tämä on sallittua vain tietyissä erityistilanteissa. [20 s. 77-80]

Perussuojaus suojaa käyttäjiä sähköiskulta, kun laite tai asennus on ehjä ja toimii oikein. Siinä ei myöskään ole erillistä turvalaitetta, joka toimii vain vikatilanteessa. Vikatilanteen varalle pitääkin tehdä vikasuojaus. Sen tehtävänä on suojata esimerkiksi talon asukkaita saamasta vaarallista sähköiskua laitteesta tai verkonosasta, joka on vioittunut. Vikasuojaus toteutetaan yleensä syötön automaattisella poiskytkennällä. Poiskytkentä toteutetaan sulakkeiden tai johdonsuojakatkaisijoiden avulla. Suojausten toiminta perustuu vikatilanteessa muodostuvaan vikavirtapiiriin ja siihen muodostuvaan suureen

vikavirtaan. Normaalisissa käytössä virta kulkee verkossa vaihejohdinta pitkin sähkölaitteelle ja nollassa johdinta pitkin takaisin verkkoon. Vikatilanteessa virran paluureitti muuttuu ja se kulkeekin suojajohtimen kautta. Tällöin suojalaite havahtuu suureen vikavirtaan ja katkaisee virran kulun. Vaihejännitteen sallittu maksimi poiskytkentäaika on 0,4 sekuntia. Vikasuojaus voidaan toteuttaa myös sähköisellä erotuksella tai suojaeristyksellä. Suojaeristys tarkoittaa sitä, että laitetta ei ole maadoitettu, vaan siinä on ylimääräisiä eristyksiä estämässä kosketuksen jännitteellisiin osiin. Suojaeristystä käytetään esimerkiksi puhelinten latureissa. [20 s. 77-87]

Uusimpien sähköturvallisuusmääräyksien mukaisesti vikasuojaus tarvitsee edellä mainittujen suojausvaihtoehtojen lisäksi vikavirtasuojan alle 32 ampeerin pistorasioille ja valaisinryhmille [21]. Vikavirtasuojaja on laite, joka mittaa vaihe- ja nollassa johdinta kulkevaa virtaa. Kun sähkölaite toimii oikein, vaiheen ja nollassa kuljettava summavirta on nolla. Jos sähkölaite vikaantuu, virtaa kuluu jonnekin muualle ja nollassa johdinta pitkin palautuu pienempi virta kuin vaihejohdinta pitkin on laitteelle kulkenut. Vikavirtasuojaja havaitsee tämän muuttuneena summavirtana. Kun summavirta on 30 milliampeeria tai suurempi, kytkin laukeaa ja katkaisee virran kulun. Vikavirtasuojan käytölle on muutamia poikkeuksia, jolloin sitä ei tarvitse käyttää. Tällaisia tilanteita ovat muun muassa jääkaapit ja pakastimet sekä jotkin kaupalliset tai teolliset laitteet, joiden toiminta ei saa keskeytyä. [20 s. 88-89][22] Vikavirtasuojakytkin voidaan asentaa erikseen pää- tai ryhmäkeskukseen, pistorasiaan tai se voi olla osana johdonsuojakatkaisijaa [23].

Sähköiskulta suojautumisen lisäksi pitää varmistua, että johtimet kestävät käyttö- sekä vikatilanteet. Tätä varten käytetään ylivirtasuojaa. Ylivirtasuojan tehtävät jaetaan kahteen. Ensimmäinen tehtävä on ylikuormitussuojaus. Ylikuormitussuojauksella varmistetaan, että ylikuormitustilanteessa suojalaite katkaisee virran ennen kuin ylikuorma vaurioittaa johtimia tai eristeitä. Toinen tehtävä on oikosulkusuojaus. Oikosulkusuojan tehtävänä on katkaista vikatilanteessa esiintyvä suuri oikosulkuvirta ennen kuin johtimet tai eristeet vaurioituvat. Oikosulkusuojauksen tarvitsee olla nopea, jotta suojattavat komponentit kestävät räsituksen. Ylivirtasuojauksen voi toteuttaa yhdellä suojalaitteella tai sitten ylikuormitukselle ja oikosululle on omat suojansa. [20 s. 90-92]

Myös pienjännitteellä pitää huomioida ylijännitteet. Ylijännitteiden ongelmat pienjännitteellä painottuvat avojohtoverkkoihin. Maaseudulle rakennettaviin taloihin pitääkin tehdä riskikartoitus, onko ylijännitesuojalle tarvetta. Suojaustarpeeseen vaikuttaa sähkölaitteiden ylijänniteluokka sekä syöttävän verkon tyyppi ja pituus. Lisäksi

riskiarvioon vaikuttaa alueellinen salamatiheys sekä ympäristökerroin, joka kuvaa kuinka altis verkkoympäristö on ylijännitteille. [20 s. 93-95]

Kuvassa 9 on esitettyä pienjännitteellä käytetyt varokkeet eli sulake ja johdonsuojakatkaisija. Sulakkeen toimintaperiaate perustuu sulakkeen sisällä olevaan metallilankaan, joka liian suuren virran myötä katkeaa, jolloin virtapiiri aukeaa ja virta ei pääse enää kulkemaan. Sulakkeet voivat toimia ylikuormitussuojana ja oikosulkusuojana, mutta ylikuormitussuojana se pitää mitoittaa tarkasti, jotta se toimii riittävän nopeasti pienelläkin ylikuormalla. [2 s. 81-83]



Kuva 9. Sulake ja johdonsuojakatkaisija. [24][25]

Johdonsuojakatkaisijat ovat automaattisia suojakytkimiä. Niissä on kaksi toimintatapaa. Ylikuormitussuojauksessa käytetään termistä laukaisua eli virran kasvaessa katkaisijan sisällä oleva metalliliuska lämpenee ja tietyllä lämpötilalla laukaisee katkaisijan. Oikosulkusuojauksessa käytetään magneettista laukaisua. Oikosulkuvirta aiheuttaa suojan sisällä magneettikentän, joka johtaa suojalaitteen toimintaan. [2 s. 81-83][26]

4. JAKELUVERKON TURVALLISUUSTILANNE

Määräyksistä ja suojauksista huolimatta sähköverkossa tapahtuu erilaisia vaaratilanteita. Vaaratilanteita aiheutuu verkon asennus- ja korjaustöissä sekä normaalissa käytössä. Esimerkiksi jokin verkonkomponentti tai verkossa käytettävä laite voi vikaantua ja aiheuttaa vaarallisen kosketusjännitteen. Tai uutta maakaapelia asentavat urakoitsijat osuvatkin jo asennettuun kaapeliin ja katkaisevat sen. Joskus vaaratilanteet aiheutuvat myös omasta huolimattomuudesta tai tietämättömyydestä.

4.1 Taustatietoa nykytilanteesta

Suomessa tilastoidaan sähköpaloja, -tapaturmia ja -kuolemia. Tilastot ovat esitettynä kuvissa 10, 11 ja 12. Sähkötapaturmiksi luetaan tilanteet, joissa kohde saa sähköiskun tai sähköiskun seurauksena syntyy jokin muu vamma, esimerkiksi putoamisen takia [27]. Tilastointia tekevät muun muassa Tukes ja TVK eli tapaturmavakuutuskeskus.

Sähköpaloihin liittyvät tilastot saadaan Pelastuslaitosten onnettomuustietojärjestelmä Prontosta. Tilastojen pohjalta voi huomata, että trendi on viime vuosina pysynyt samanlaisena eli noin 20 prosenttia palokuolemista johtuu sähköpaloista. Rakennuspaloksi asti kasvaneiden sähköpalojen lisäksi sähkön aiheuttamia rakennuspalovaaratilanteita esiintyy pelastustoimen raporttien mukaan noin 2000 kappaletta vuodessa. [28] Kuvassa 10 on esitetty tilastoja sähkön aiheuttamista rakennuspaloista, sähköpalokuolemista ja palokuolemista vuosittain.

Tulipalot	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Sähköpalot (rakennuspalot)	524	502	490	549	507	523	477	455	503
Sähköpalokuolemat	11	24	16	21	8	11	11	10	11
Kaikki palokuolemat	52	86	70	82	61	53	48	44	51

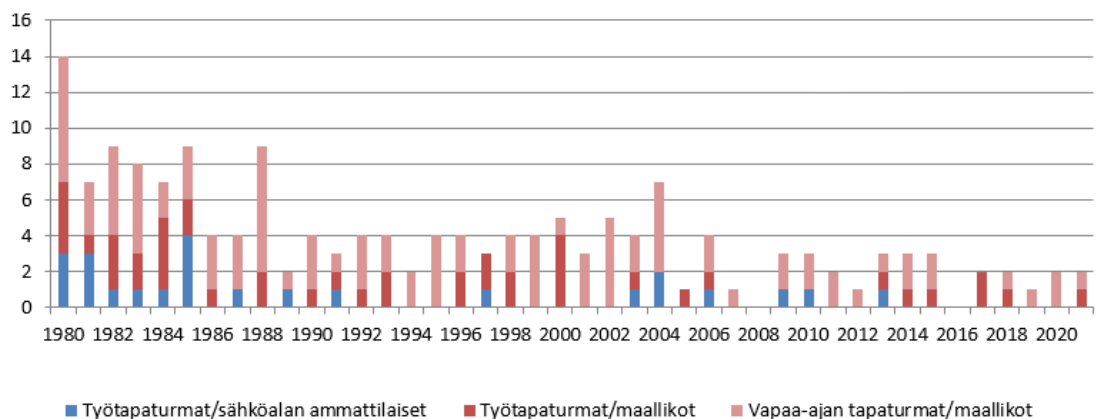
Kuva 10. Sähköpalotilastot vuosittain. [28]

Sähkötapaturmien tilastointi on vaikeampaa, sillä läheskään kaikkia tilanteita ei ilmoiteta eteenpäin. Sähköturvallisuuslaissa on määrätty, että vakavista sähkötapaturmista ja -kuolemista pitää ilmoittaa Tukesille. Kuvassa 11 on esitettynä Tukesin ja TVK:n tilastoja sähkötapaturmista. Esimerkiksi vuonna 2021 Tukes on tilastoinut 154 onnettomuutta. Näistä noin puolet tapahtui sähköalan ammattilaisille. TVK:n tilastoissa sähköisku on vuoden 2021 alustavan tilaston mukaan ilmoitettu 778. Todellinen tapaturmien määrä on tätä korkeampi, sillä kaikista tapaturmista ei raportoida eteenpäin. [28]

Tietolähde/rajaus	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
VARO-rekisteri (kaikki)	95	82	115	89	118	122	144	135	154
VARO-rekisteri (sähköalan ammattilaiset)	37	32	47	37	55	55	67	68	85
TVK:n rekisteri, sähköiskut (kaikki)	582	600	607	798	785	831	914	676	778*
TVK:n rekisteri, sähköiskut (sähköalan ammattilaiset**)	144	164	150	-	-	-	-	-	-
TVK:n rekisteri, sähköiskut (sähkölaitteiden asentajat ja korjaajat***)	-	-	-	163	171	188	224	168	185*

Kuva 11. Tilastoidut sähkötapaturmat. [28]

Sähkökuolemat tapahtuvat pääasiassa pien- ja keskijänniteverkossa. Viimeisen viiden vuoden aikana on tapahtunut yhteensä yhdeksän sähkökuolemaa. Näistä kuolemista jokainen tapahtui maallikolle ja kuolemista seitsemän tapahtui vapaa-ajalla. Kaksi kuolemista oli työtapaturmia maallikoille. Yleisin kuolinsyy oli junavaunun katolle kiipeäminen, joka on aiheuttanut sähköiskun tai valokaaren ajolangoista. [29] Junien ajolangoissa käytetään 25 kV:n jännitettä eli ne ovat keskijännitettä [30]. Vaikka sähkökuolemia tapahtuu tilastollisesti noin kaksi kappaletta vuodessa, on sähöturvallisuus parantunut ja sähkökuolemat ovat vähentyneet selkeästi. Tämä näkyy myös tilastoissa. Kuvassa 12 on esitetty Suomessa tapahtuneet sähkökuolemat vuosilta 1980–2021. Tilastoista voidaan huomata, että sähköalan ammattilaisten kuolemat ovat käytännössä loppuneet kokonaan. [29]



Kuva 12. Sähkökuolemat Suomessa vuodesta 1980 eteenpäin. [29]

Yleisesti Suomen sähöturvallisuutta pidetään korkeana. Eteenkin sähkötyöturvallisuuteen on keskitytty pitkäjänteisesti ja ammattihenkilöiden tapaturmien määrä on laskenut merkittävästi viimeisten vuosikymmenien aikana. [29] Sähöturvallisuuden parantumiseen ovat vaikuttaneet lait ja asetukset sekä standardit. Keskeisiä standardeja ovat SFS 6000-6002 standardit, jotka ohjaavat muun muassa sähkötöiden ja asennusten tekemistä sekä sähkötyöturvallisuutta. Standardeissa

määritellään tarkasti muun muassa eri töihin vaadittavat pätevyudet, työalueet sekä työtä edeltävät toimenpiteet ja varmistukset. [31] Kansallisten lakien lisäksi Euroopan Unionin jäsenyys on tuonut uudistuksia, kuten sähkötuotteiden CE-merkinnät. [8 s. 16-17] CE-merkintä tarkoittaa, että valmistaja takaa tuotteen täyttävän EU:n asettamat turvallisuusmääräykset [32].

4.2 Keskijänniteverkko

Keskijänniteverkossa suurin osa sähkötapaturmista tai läheltä piti -tilanteista liittyy avojohtoihin [33]. Avojohto on alttiina luonnonvoimille sekä ulkoisille tekijöille, esimerkiksi työkoneille. Usein vikatilanteet syntyvätkin puiden tai oksien kaatuessa johtojen päälle tai erilaisten koneellisten työtehtävien hoitamisesta avojohtojen lähellä. Avojohtoille on määritetty turvaetäisyydet, jotka pitäisi esimerkiksi työkoneen ja avojohtolinja väliin jäädä, mutta niiden havainnoiminen ilman apuvälineitä on vaikeaa. Onkin tärkeää tiedostaa työskentely vaara-alueen lähellä ja työtehtävät pitää suunnitella etukäteen, jotta toiminta on turvallista. [34]

Keskijänniteverkon vikatilanteen tunnistaminen voi olla vaikeaa. Etenkin avojohtoilla vikavirrat ovat pieniä ja vikapaikan löytäminen voi olla haastavaa, sillä avojohtoverkkoa kulkee paljon metsien seassa. [1 s. 95, 186] Myös maakaapeleilla tarkan vikapaikan löytäminen ja vian korjaaminen on haastavaa ja kallista, sillä kaapeli tarvitsee kaivaa esiin ja vikapaikka saattaa sijaita esimerkiksi vilkkaasti liikennöidyn tien kohdalla [35]. Vikatilanteiden tunnistamiseen ja hoitoon vaikuttaa myös verkon ikä, sillä uudemmissa verkoissa teknologia on kehittyneempää ja automatisoitua. [18]

Avojohtoverkko on alttiimpi vaurioille kuin kaapeliverkko. Keskijännitteellä avojohtot pyritään maisemoimaan hyvin ja ne ovat melko lähellä ihmisten arkea [1 s. 94-96]. Maisemoinnin myötä lisääntyy myös vaaratilanteiden todennäköisyys, kun pylväät ja johtimet eivät aina ole selkeästi nähtävissä. Avojohtoverkkojen lähellä työskennellään isoilla koneilla esimerkiksi maanmuokkaus-, maatalous- ja metsätöiden yhteydessä. Pelkästään työkoneet eivät ole uhka vaara- ja vikatilanteiden syntymiselle avojohtoverkossa. Metsissä tapahtuu luontaisesti oksien katkeamista ja puiden kaatumista muun muassa myrskyjen ja lumen painon aiheuttamana [36]. Keskijänniteverkolla johtokadun leveys on 6-10 metriä, joten puiden kaatuminen johtojen päälle on mahdollista [37]. Yleisimmät hetkellisten ja pysyvien vikojen aiheuttajat avojohtoverkossa ovat myrskyjen tai tykkylumen kaatamat puut [36].

Avojohtoverkko aiheuttaa joskus myös maastopaloja. Esimerkiksi johtimelle kaatunut puu, katkennut johdin tai vioittunut eriste saattaa aiheuttaa vian, joka ehtii sytyttämään

tulipalon ennen kuin suojalaitteet toimivat tai valvomosta kytketään jokin johto-osuus irti. [38][39] Kuvassa 13 on esimerkki tilanteesta, jossa keskijännitejohdon päälle on kaatunut puu, joka on sytyttänyt maastopalon. Vuosittain tapahtuu myös muutamia lintujen sytyttämiä tulipaloja. Linnun lentäessä linjojen lähellä voi se osua kahteen johtimeen, jolloin tapahtuu oikosulku ja lintu voi syttyä palamaan. Pudotessaan maahan palava lintu voi sytyttää myös kuivan maaston palamaan. [40]



Kuva 13. Sähkölinjaan nojaava puu, joka on aiheuttanut maastopalon. [41]

Toisin kuin avojohtoverkolla, kaapeliverkossa tapahtuvat vikaantumiset ovat yleensä aina ihmisten aiheuttamia. Vian aiheuttaja voi olla kaivinkoneenkuljettaja, joka katkaisee kauhalla maassa olevan kaapelin tai kaapelin pinta voi vaurioitua vääränlaisesta käsittelystä asennusvaiheessa ja se vikaantuu käytön aikana muutaman vuoden päästä asennuksesta. Oikein asennetulle kaapelille arvioitu käyttöikä on noin 50 vuotta. [35]

4.3 Jakelumuuntajat

Maakaapeloinnin myötä puistomuuntamot ovat yleistyneet suomalaisessa katukuvassa. Kuten jo luvussa 2.3 käsiteltiin, puistomuuntamot koostuvat muuntamokopista, joka asennetaan kokonaisuutena pakettina haluttuun kohtaan maastoa. Muuntamossa on huoltoluukut, joiden kautta päästään tarvittaessa säätämään tai korjaamaan muuntamon osia. Muuten ulkokuori on yhtenäistä metallia, joka toimii muuntamon suojana sääolosuhteita ja ihmisiä sekä eläimiä vastaan.

Puistomuuntamoiden yleistyminen on lisännyt vaaratilanteiden mahdollisuuksia. Aiemmin käytetyt pylvä- ja rakennusmuuntamot ovat olleet kauempana eläimistä sekä

ihmisistä, ja niihin liittyvät vaaratilanteet liittyvät usein vikaantumisen aiheuttamaan palovaaraan. Puistomuuntamoissa ihmiset pääsevät käsiksi muuntamon ulkokuoreen ja halutessaan myös murtautumaan sisälle [29].

Edellä mainituista ihmisten tai eläimien aiheuttamista vaara- ja vikatilanteista on useita esimerkkejä. Pahimmat esimerkit viime vuosilta ovat vuonna 2021 tapahtunut työtapaturma, jossa maanrakentaja sai kuolettavan sähköiskun puistomuuntamosta. Vuonna 2020 tapahtui kaksi muuntamon aiheuttamaa sähkökuolemaa. Toisessa henkilö murtautui rakennuksen sisällä olleeseen muuntamotilaan ja sai kuolettavan sähköiskun, ja toisessa ihminen murtautui puistomuuntamoon ja sai kuolettavan sähköiskun. [29] Lievempiä tilanteita ovat aiheuttaneet muun muassa linnut ja oravat [42]. Vuosittain raportoidaan vikatilanteista, joissa jokin eläin on muodostanut oikosulun muuntajaan tai johtimien välille ja aiheuttanut sähkökatkon. Sähkökatkon pituus ja vaurioiden suuruus riippuvat tilanteesta. Linnun lentäessä johtimiin vika yleensä poistuu pikajälleenkytkennällä, mutta pahimmillaan eläin saattaa sytyttää tulipalon, joka tuhoaa koko muuntajan. [43][44][45]

Kuten jo edellä mainittiin, sähköisku tai valokaari ei ole muuntamoiden ainoa riski. Yksi Suomessa käytetty muuntajan eristystekniikka on öljyeristys. Öljyeristys luo suuren palon ja ympäristöuhan, jos tällaisiin uhkiin ei ole valmistauduttu jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Öljyeristeisissä jakelumuuntamoissa on koosta riippuen muutamia satoja litroja öljyä. [1 s. 98] Muuntamopalot voivat levitä eteenkin kuivana aikana myös maastopaloksi, joka voi aiheuttaa vahinkoa myös sähköverkon ulkopuolelle. Rakennukseen tai rakennuksen lähelle sijoitettavassa muuntajassa pitää myös huomioida rakennukselle asetetut paloturvallisuusmääräykset [8 s. 46].

4.4 Pienjänniteverkko

Suurin osa sähkötapaturmista tapahtuu pienjänniteverkossa [46]. Tähän on syynä muun muassa verkon läheisyys ihmisten arjessa sekä se, että verkko saatetaan pitää jännitteisenä sähkötöiden aikana ja tehdään jokin virhe, joka aiheuttaa sähköiskun. Johtimet ovat myös pienempiä ja niiden rakenne on yksinkertaisempi, jolloin niiden suojaus on myös vähäisempää kuin suuremmilla jännitetasoilla. Sähkötapaturmiin johtaneet kuolemat ovat kuitenkin viimeisen kolmen vuoden aikaan liittyneet pääosin keskijänniteverkkoon [29].

4.4.1 Sähköiskut ja valokaaret

Sähköiskut ovat jokaiselle aikuiselle tuttu tilanne. Pienen sähköiskun voi saada esimerkiksi villavaatteista, jotka tuottavat hankaussähköä. Pienjänniteverkosta saatava sähköisku on kuitenkin huomattavasti tehokkaampi ja vaarallisempi. Sähköiskun voi saada esimerkiksi vioittuneesta laitteesta tai virheellisestä kytkennästä.

Sähkötapaturmia tapahtuu pienjännitteellä sekä sähköammattihenkilöille että maallikoille [28]. Tähän on syynä muun muassa se, että pienjänniteasennuksia tehdään eniten verrattuna korkeampiin jännitteisiin ja niitä on myös maallikon melko vaivatonta tehdä ilman virallisia pätevyyskysymyksiä. Osa tapaturmista aiheutuukin juuri maallikon tekemistä virheellisistä asennuksista tai kytkennöistä. On myös havaittu, että rakennus- ja korjaustöiden aikana sähköasennuksia tekevien henkilöiden pätevyyksissä on ollut puutteita, joka on johtanut viallisiin kytkentöihin ja potentiaalsiin vaaratilanteisiin. [47]

Sähköiskussa sähkövirta kulkee ihmiskehon jonkin osan läpi. Sähköiskun saaminen edellyttää potentiaalieron eli kahden pisteen välillä pitää olla eri jännitetaso. Sähköiskun saamiseen vaikuttaa yleensä monta tekijää. Keskeisimpiä tekijöitä eteenkin sähköammattilaisten tapaturmissa on kiire ja huolimattomuus. Yritetään kiertää aikataulua oikaisemalla jokin turvallisuustekijä, joka aiheuttaakin tapaturman. [46] Maallikoiden tapaturmissa syynä on usein tietämättömyys sähköverkon toiminnasta tai jokin vika, jonka johdosta henkilö saa sähköiskun laitteesta tai kytkennästä. On myös joitakin tilanteita, joissa yksityishenkilö on itse tehnyt virheellisiä asennuksia, jotka voivat johtaa tapaturmaan [48].

Valokaari tarkoittaa tilannetta, jossa kahden pisteen välillä oleva potentiaaliero kasvaa niin suureksi, että virta kulkee eristeen, yleensä ilman, läpi pisteiden välillä. Valokaari-ilmion vaarallisuus piileekin juuri siinä, että ei tarvitse olla kosketuksissa jännitteelliseen osaan ja voi silti joutua osaksi virtapiiriä. [49] Valokaaren vaarana on korkea, tuhansien asteiden suuruinen, lämpötila, joka voi aiheuttaa palovammoja, sokaistumista sekä höyrystää ilmaan myrkyllisiä kaasuja. Valokaari pystyy sytyttämään myös lähellä olevia syttyviä esineitä palamaan. Lisäksi nopea lämpötilan nousu aiheuttaa paineiskun. [50]

Luvussa 3.2 käsiteltiin pienjänniteverkon suojausmekanismeja. On todettu, että alle 30 mA:n virroilla terveelle ihmiselle ei aiheudu pysyviä haittoja sähköiskusta. Kun tämä arvo ylitetään, ilmenee hengitysvaikeuksia, tajunnan heikentymistä ja sydänkammiovärinän riski kasvaa. Tämän takia suojalaitteet pyritään mitoittamaan siten, että vika saadaan poistettua niin nopeasti, että liian suuri virta ei ehdi vaikuttaa ja aiheuttaa sydänkammiovärinää. [20 s. 71-76] Sydänkammiovärinän lisäksi toinen sähköiskun

haitallinen vaikutus on lämpö. Virran kulkiessa kehossa se lämmittää kudoksia, joissa se kulkee. Lämpenemisen takia pidempiaikainen altistuminen sähkölle voi aiheuttaa vakavia kehon sisäisiä kudonvaurioita. [51]

4.4.2 Tulipalot

Sähköverkossa kuljetetaan energiaa, jolla pystytään käyttämään erilaisia sähkölaitteita. Sähkön käyttö yleistyy edelleen kovaa vauhtia ja markkinoille päätyy koko ajan uudenlaisia sähkölaitteita. Samalla kasvaa riski sähköpaloille. Kuten kaikki muukin, myös sähkölaitteet kuluvat käytössä ja ne vikaantuvat jossain vaiheessa. Joskus tämä vikaantuminen voi johtaa esimerkiksi laitteen sisäiseen oikosulkuun, jolloin laite ylikuumenee ja saattaa syttyä palamaan, jos suojalaitteet eivät havaitse vikaa tai toimi oikein.

Sähköpalot voivat syttyä joko kytkennöistä tai sähkölaitteista. Yleisin laitteesta lähteneen sähköpalon sytymissyys on huolimattomuus tai varomattomuus. Eniten näitä paloja sytyttivät uunit ja liedet. Lieden päälle tai uunin sisälle unohtunut ruoka sekä lieden tahaton päälle laittaminen aiheutti vuonna 2022 yli 900 pelastuslaitoksen hälytystehtäväksi johtanutta tilannetta. Tämän lisäksi myös valaisimet ja kiukaat aiheuttivat kumpikin yli 100 hälytystä vuonna 2022. Valaisinpalot aiheutuivat useimmiten loisteputkista tai muista kuumenevista lamputa. Valaisinpalojen ennustetaan vähentyvän tulevaisuudessa, kun ei-lämpenevät valaisimet lisääntyvät lediteknologian johdolla. Kiuas paloissa yleisin sytymissyys on kiukaalle joutuneet tavarat, kun ihmiset kuivattavat pyykkejä tai varastoivat tavaraa saunassa. [52]

Sähköjärjestelmän ikääntyminen kasvattaa sähköpalon riskiä. Vanhemmissa taloissa olisikin hyvä tarkastuttaa sähköjärjestelmän nykykunto. [53] Pienjännitejärjestelmän käyttöikäksi arvioidaan 20-40 vuotta [54]. Esimerkkejä vaarallisesta järjestelmästä ovat mustuneet pistorasiat tai valaisimet sekä palaneen haju tai rätinä pistorasian lähellä. Sähkön kulkiessa johtimet ja liitännät lämpenevät. Lämmön ja muun ikääntymisen vaikutuksesta liitännät saattavat löystyä, jolloin sähkön kulku vaikeutuu ja liitännä lämpenee lisää. [55] Myös sähköjärjestelmän eri komponenttien tekniset viat aiheuttavat sähköpaloja vuosittain. Usein komponenttien vikaantuminen johtuu kunnossapidon laiminlyönnistä tai muusta virheellisestä toiminnasta. [56]

Sähköpalot ovat tulen ja savun lisäksi myös sähköisesti vaarallisia. Sähköpalon sammuttamisessa onkin tärkeä kytkeä sähköt pois päältä tai irrottaa sähkölaite seinästä, jos se on mahdollista. [57] Sähköverkon suojalaitteet eivät välttämättä heti huomaa vikaa, sillä vikaantunut laite saattaa näyttäytyä sähköverkon kannalta oikein toimivalta

laitteelta. Onkin tärkeä varmistua sähköturvallisuudesta ennen pelastustoiminnan aloittamista. Joskus se saattaa viivästyttää palon sammuttamisen aloittamista, mutta tällä tavalla vältetään lisävahingoilta [58].

Sähköturvallisuuden varmistamisesta on hyvä esimerkki vuodelta 2015, kun kaksi pelastajaa sai sähköiskun rakennuspalossa. Kiinteistöön oli tilattu huoltomies tarkistamaan ilmoitettua vikaa, mutta ennen huoltomiehen saapumista oli syttynyt tulipalo ja pelastajat ehtivät paikalle ensin. Pelastajat saivat sähköiskun sammutusraivauksessa ja sähkömiehen saapuessa paikalle huoneistossa havaittiin 400 voltin jännite ja nollavika. [59]

Eri jännitetasojen kuljettaminen samassa pylväsrakenteessa on taloudellinen ja maisemankäytöllisesti järkevä vaihtoehto. Turvallisuuden kannalta se kuitenkin lisää mahdollisia vaaraskenaarioita. Tästä on esimerkkinä Lieksassa tapahtunut epäonninen onnettomuus, joka johti lopulta kolmeen rakennuspaloon jakeluverkon alueella. Kyseinen onnettomuus sai alkunsa 110/20 kV:n muuntamoasemalta, jossa oli laiterikon takia jouduttu muuttamaan kytkentöjä, ja epähuomiossa muuntamoaseman suojausmekanismit jäivät puutteellisiksi. Myöhemmin kyseisen muuntamoaseman syöttämälle 20 kV:n avojohtolinjalle kaatui puu, joka katkaisi yhden vaihejohtimista. Kyseisellä alueella käytettiin yhteispylväitä eli samaan pylväaseen oli kiinnitettynä 20 kV:n ja 400 V:n johtimet. Katkennut vaihejohdin putosi alla olevan pienjännite AMKA-johtimen päälle, jolloin tapahtui maasulku, jossa 20 kV:n jännite levisi koko 400 V:n verkkoon PEN-johdinta pitkin. Tämä aiheutti rakennuspaloja pienjänniteverkon alueelle. Rakennuspalopaikalle hälytettiin myös sähköasentajat tarkastamaan tilanne ja he huomasivat poikkeuksellisen korkeat jännitteet, jolloin vikatilannetta alettiin korjaamaan. [60]

5. YHTEENVETO

Tämän työn aikana perehdyttiin olemassa olevaan materiaaliin jakeluverkon rakenteesta ja suojausmekanismeista sekä tietoon sähkön aiheuttamista onnettomuuksista ja vaaroista. Aiheen käsittely jakautui kolmeen osaan. Aluksi käytiin läpi verkon rakenne, jonka jälkeen käsiteltiin verkon suojausmenetelmät. Lopuksi esiteltiin verkossa esiintyneitä vikatilanteita.

Sähköverkon rakenne on muuttunut viimeisen kymmenen vuoden aikana hurjasti. Säävarman verkon kehittäminen ja rakentaminen on muuttanut jakeluverkon painopistettä kohti kaapeloitua verkkoa. Samalla häiriö- ja vikatilanteiden tyypit ovat muuttuneet erilaisiksi.

Sähköverkon suojaus on ollut jo pitkään keskeinen asia suomalaisessa sähköverkossa. Teknologinen kehitys on edesauttanut myös verkon suojausta. Sähköasemia on pystytty automatisoimaan ja automatiikka pystyy hoitamaan vikatilanteiden aikaisia kytkentöjä sekä suojausasioita. Myös itse suojalaitteet ovat parantuneet ja esimerkiksi vikavirtasuojia on tullut pakolliseksi uusiin asuinrakennuksiin.

Sähkötapaturmia tapahtuu edelleen, mutta niiden vakavuutta on pystytty pienentämään. Tästä parhaana mittarina on sähkökuolemien määrän vähentyminen ja sähköammattihenkilöiden kuolemien loppuminen lähes kokonaan. Työtä on kuitenkin vielä tehtävänä, sillä sähkö- ja sähköpalokuolemia tapahtuu edelleen vuosittain. Lisäksi tapaturmia sattuu edelleen niin maallikoille kuin ammattihenkilöille. Vakavien tapaturmien määrää on kuitenkin pystytty vähentämään johdonmukaisella lainsäädännöllä ja ohjeistuksilla.

Sähköturvallisuuden eteen on tehty jo paljon työtä ja sitä jatketaan edelleen. Parantamalla kansalaisten tietämystä sähkön vaaroista, voidaan päästä eroon tietämättömyyden aiheuttamista tapaturmista.

LÄHTEET

- [1] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, Gaudeamus Helsinki University Press, Helsinki, 2009.
- [2] E. Ruppä, Sähkötekniikkaa sivuaineopiskelijoille, Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka, Tampere, 2016.
- [3] Kurssi: EE.EES.200 Sähköverkkotekniikka 2022. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): <https://moodle.tuni.fi/course/view.php?id=28304>
- [4] Verkkotoiminnan julkaisut, Laajemmat tilastotiedot vuosittain, Energiavirasto. Saatavissa (viitattu 7.2.2023): https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12862527/Tilastotietoja_s%C3%A4hk%C3%B6verkoista_28_9_2022.xlsx/53291ff9-46c2-a5f2-bd96-291e14a1bc14?t=1666868432030
- [5] Turvallisuus sähköjohtojen läheisyydessä, Hengenvaaraesite, Tukes. Saatavissa (viitattu 23.2.2023): <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/sahkotyoturvallisuus/turvallisuus-sahkojohtojen-laheisyydessä>
- [6] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Otatieta Helsinki University Press, Helsinki, 2011.
- [7] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, Otatieta Helsinki University Press, Helsinki, 2011.
- [8] M. Monni, Sähköverkkoasennukset, Adato Energia, Helsinki, 2018.
- [9] Tiedä ennen kuin toimit, Caruna. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://caruna.fi/turvallintyomaa>
- [10] Sähkömarkkinalaki, 588/2013, 51§, 2013. Saatavissa (viitattu 16.2.2023): <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#a588-2013>
- [11] Energiaverkot - 10-20 kV keskijännitekaapelit. Saatavissa (viitattu 16.3.2023): fi.prysmiangroup.com/sahkonjakeluverkko/10-20-kV-keskijannitekaapelit
- [12] Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät, Suomen Standardisoimisliitto, SFS 6000-1:2022, Helsinki, 2022. Saatavissa (viitattu 17.5.2023): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141256.html.stx>
- [13] Sähkö-verkon turval-lisuus. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): <https://www.elenia.fi/vastuullisuus/turvallisuus/sahkoverkon-turvallisuus/>
- [14] Wizense. Saatavissa (viitattu 10.5.2023): <https://wizense.com/trenching/>
- [15] Energiaverkot - 1 kV verkonrakennuskaapelit. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): fi.prysmiangroup.com/sahkonjakeluverkko/1kv-verkonrakennuskaapelit
- [16] Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-814: Täydentävät vaatimukset, Kaapelien asentaminen maahan tai veteen, Suomen Standardisoimisliitto, SFS 6000-8-814:2022, Helsinki, 2022. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1142602.html.stx>
- [17] 0,6/1 kV voimakaapelit. PEX-eristeiset ja PVC-vaippaiset Al- ja Cujohitimiset kaapelit. Rakenne, testaus ja käyttöohje, Suomen Standardisoimisliitto, SFS 4879:2018, Helsinki, 2018. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/4/728581.html.stx>
- [18] Flyktman, T. (2022). Sähköverkon suojaukset auttavat rajaamaan vikojen vaikutuksia. Saatavissa (viitattu 13.3.2023): <https://blogit.jamk.fi/techtothefuture/2022/11/16/sahkoverkon-suojaukset-auttavat-rajaamaan-vikojen-vaikutuksia/>

- [19] S. Hänninen, Single phase earth faults in high impedance grounded networks : characteristics, indication and location. VTT Technical Research Centre of Finland, Publication 453, 2001. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/2212>
- [20] M. Orrberg, E. Tiainen, Sähköasennukset 1, Sähköinfo Oy, Espoo, 2022.
- [21] Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät, Suojaus sähköiskulta, Suomen Standardisoimisliitto, SFS 6000-4-41:2022, Helsinki, 2022. Saatavissa (viitattu 19.4.2023): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141200.html.stx>
- [22] Mikä on vikavirtasuojakytkin? Sähkötekniikka 2021, Youtube-video, 2021. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://www.youtube.com/watch?v=L33vRAkrxyA>
- [23] Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-53: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen, Erottaminen, kytkentä ja ohjaus, Suomen Standardisoimisliitto, SFS 6000-5-53:2022, Helsinki, 2022. Saatavissa (viitattu 19.4.2023): <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141211.html.stx>
- [24] Tulppasulake, K-Rauta. Saatavissa (viitattu 7.4.2023): <https://www.k-rauta.fi/tuote/tulppasulake-ifo-dii-16a-500v-5kpl/7312904782160>
- [25] Johdonsuojakatkaisija, K-Rauta. Saatavissa (viitattu 7.4.2023): <https://www.k-rauta.fi/tuote/johdonsuojakatkaisija-abb-sh201-c16/4016779630641>
- [26] Miten johdonsuojakatkaisija (automaattisulake) toimii? Sähkötekniikka 2021, Youtube-video, 2022. Saatavissa (viitattu 27.3.2023): <https://www.youtube.com/watch?v=y4FrXkh79J8>
- [27] Sähkötapaturmat, STEK. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://stek.fi/sahkoturvallisuus/sahkovaarat-ja-vahingot/sahkotapaturmat/>
- [28] Sähkötapaturmat ja sähköpalot, Tukes. Saatavissa (viitattu 28.3.2023): <https://tukes.fi/onnettomuudet/yhteenvedot-onnettomuuksista-toimialoittain/sahkotapaturmat-ja-sahkopalot>
- [29] Sähkökuolemat. Tukes. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://tukes.fi/onnettomuudet/sahkokuolemat>
- [30] Junan katolla on tappava sähkövirta – sähköiskun voi saada myös purjeveneen mastosta tai onkivavasta ilmajohdon läheisyydessä, Tukes, 2021. Saatavissa (viitattu 11.4.2023): <https://tukes.fi/-/junan-katolla-on-tappava-sahkovirta-sahkoiskun-voi-saada-myos-purjeveneen-mastosta-tai-onkivavasta-ilmajohdon-laheisyydessa-1>
- [31] V. Kauppi, P. Mäkinen, V. Reinikainen, T. Ylinen, Sähköasennukset 4, Sähköinfo Oy, Espoo, 2013.
- [32] CE-merkintä, Tukes. Saatavissa (viitattu 31.3.2023): <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/ce-merkinta>
- [33] Vältä sähkötapaturmat, Tukes. Saatavissa (viitattu 31.3.2023): <https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/sahkotyoturvallisuus/sahkotapaturmien-ensiapu/valta-sahkotapaturmat>
- [34] Työskentely jakeluverkkojen läheisyydessä, Skanskan sopimusasiakirjat ja ohjeistukset, Skanska. Saatavissa (viitattu 3.4.2023): <https://www.skanska.fi/tietoa-skanskasta/yhteistyokumppaneille/sopimusasiakirjat-ja-ohjeistukset/>
- [35] Kun maakaapeli katkeaa – mitä silloin tapahtuu ja mitä se vaikuttaa sähkökäyttäjälle? PKS, 2020. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://www.pks.fi/verkossa/kun-maakaapeli-katkeaa/>
- [36] Miksi säävarmassa sähköverkossa katkeaa sähkö? PKS Sähkönsiirto, 2022. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://pkssahkonsiirto.fi/ajankohtaista/miksi-saavarmassa-sahkoverkossa-katkeaa-sahko/>

- [37] Puuston-käsittely, Elenia. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://www.elenia.fi/palvelut/sahkoverkon-rakentaminen-ja-yllapito/tietoa-maanomistajille/puustonkasittely/>
- [38] V. Näveri, Oikosulku aiheutti hurjia valokaaria Orimattilassa - Katso video, Ilta-Sanomat, 2009. Saatavissa (viitattu 15.4.2023): <https://www.is.fi/kotimaa/art-2000000217774.html>
- [39] V-M. Ruuska, Myrskyssä katkennut sähkölinja sytytti tulipalon Liedossa, Yle, 2015. Saatavissa (viitattu 15.4.2023): <https://yle.fi/a/3-7915043>
- [40] N. Joki, Linnun törmäminen sähkölinjaan sytytti taas maastopalon – kyläläiset sammuttivat palon ämpäreiden avulla, Yle, 2020. Saatavissa (viitattu 15.4.2023): <https://yle.fi/a/3-11352766>
- [41] H. Manskinen, Puu kaatui sähkölinjalle — kipinät sytyttivät metsäpalon Savitaipaleella, Etelä-Saimaa, 2018. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://www.esaimaa.fi/paikalliset/3811771>
- [42] Lyhyitä sähkökatkoja Harjavallassa joen pohjoispuolella, Lammaisten Energia. Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://lammaistenenergia.fi/fi-fi/article/ajankohtaista/lyhyita-sahkokatkoja-harjavallassa-joen-pohjoispuolella/1068/>
- [43] Muuttolinnut aiheuttavat sähkökatkoja, PKS Sähkösiiro, 2022. Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://pkssahkonsiirto.fi/ajankohtaista/linjoihin-lentavat-muuttolinnut-aiheuttavat-sahkokatkoja/>
- [44] R. Degerman, Kuollut orava piinasi sähköverkkoa, Yle, 2014. Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://yle.fi/a/3-7425064>
- [45] T. Manninen, Kolme oravaa telmi muuntajassa – tuloksena kaksi vainajaa, valokaaria ja sähköt poikki koko alueelta, Ilta-Sanomat, 2018. Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://www.is.fi/kotimaa/art-2000005666416.html>
- [46] 10 keinoa parantaa sähkötöiden turvallisuutta, GetCompetence. Saatavissa (viitattu 15.4.2023): <https://www.getcompetence.com/fi/blogi/yksikin-sahkotaturma-on-liikaa>
- [47] Laittomat sähkötyöt vaarallisia, Tukes, 2015. Saatavissa (viitattu 14.4.2023): <https://tukes.fi/-/laittomat-sahkotyot-vaarallis-1>
- [48] Suomalaisten kodeissa piilee virheellisiä sähköasennuksia, Raksystems, 2016. Saatavissa (viitattu 20.5.2023): <https://raksystems.fi/ajankohtaista/suomalaisten-kodeissa-piilee-virheellisia-sahkoasennuksia/>
- [49] Miksi sähkö on vaarallista? STEK, 2018. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://stek.fi/perustietoa-sahkosta/miksi-sahko-on-vaarallista/>
- [50] Sähkötyöturvallisuus | Miksi Sähkötyöturvallisuuskoulutus on tärkeää, Koulutusmaailma, 2021. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://koulutusmaailma.fi/fi/news/miksi-sahkotyoturvallisuuskoulutus-on-tarkeaa>
- [51] O. Saarelma, Sähkön aiheuttamat vammat (sähköisku). Duodecim Terveyskirjasto, 2022. Saatavissa (viitattu 15.4.2023): <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00334>
- [52] Sähköliesistä, mikroaaltouuneista ja lämmityslaitteista alkaneet palot lisääntyivät viime vuonna, Tukes, 2023. Saatavissa (viitattu 14.4.2023): <https://tukes.fi/-/sahkoliesista-mikroaaltouuneista-ja-lammityslaitteista-alkaneet-palot-lisaantyyivat-viime-vuonna>
- [53] Huonokuntoisessa sähkölaitteessa ja -asennuksessa kytee turvallisuusriski, Tukes, 2019. Saatavissa (viitattu 16.4.2023): <https://tukes.fi/-/huonokuntoisessa-sahkolaitteessa-ja-asennuksessa-kytee-turvallisuusriski>
- [54] Taloyhtiön sähkösaneeraus, Sähkö-Satek. Saatavissa (viitattu 16.4.2023): <https://sahkosatek.fi/taloyhtion-sahkosaneeraus/>

- [55] M. Knuutila, Karmivat kuvat todistavat - kotoasi voi löytyä yleinen sähköriski: ”Pitäähän näistä ihmisille tiedottaa”, Iltalehti, 2019. Saatavissa (viitattu 16.4.2023): <https://www.iltalehti.fi/asumisartikkelit/a/66ce2436-362f-4d35-8ce2-7872c4c03030>
- [56] Perustietoja sähköpaloista ja niiden ennalta ehkäisystä, SÄTY ry, 2003. Saatavissa (viitattu 20.4.2023): https://saty.fi/wp-content/uploads/Perustietoja_sahkopaloista.pdf
- [57] Paloturvallisuusvinkit sähkölaitteille, Paloturvallisuusviikko. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://paloturvallisuusviikko.fi/paloturvallisuusvinkit/paloturvallisuusvinkit-sahkolaitteille/>
- [58] A. Vihanta, Kaustisella paloi suurjännitemuuntaja – palo ei päässyt leviämään maastoon, Yle, 2022. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://yle.fi/a/3-12519804>
- [59] Onnettomuustiedot, Tukes, 2015. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://varo.tukes.fi/ExtranetHome/Incident/7220>
- [60] Tukesin tutkimat onnettomuudet: sähkö ja hissit, Tukes. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://tukes.fi/onnettomuudet/tutkitut-onnettomuudet/sahko-ja-hissit>