

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KESKIJÄNNITEVERKON SELVITYS

TEKIJÄ Atte Paavola

| | |
|--|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma | |
| Työn tekijä Atte Paavola | |
| Työn nimi Keskijänniteverkon selvitys | |
| Päiväys 29.4.2022 | Sivumäärä/Liitteet 26/6 |
| Toimeksiantaja Yara Suomi Oy | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Työn toimeksiantaja oli Yara Suomi Oy ja kohteena kemiantehtaiden 10 kV keskijänniteverkko. Työn tarkoituksena oli perehtyä keskijänniteverkon kuormitettavuuteen vaikuttaviin tekijöihin ja selvittää kemiantehtaiden keskijänniteverkon kaapeleiden kuormitettavuutta. Edellinen verkon kuormitettavuutta käsittelevä selvitys oli tehty vuonna 1995. Edellisen selvityksen jälkeen verkko on muuttunut ja lasketut kuormitettavuusrajat olivat määriteltä ajalta ennen ristosilloitetun polyeteenin (PEX) yleistymistä kaapelieristeenä.</p> <p>Työssä esiteltiin tehdasalueella käytössä olevat keskijännitekaapelityypit ja käsiteltiin kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttavia seikkoja. Kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttavia ilmiöitä tarkasteltiin yleisellä tasolla. Verkon kaapeleista, asennustavoista ja olosuhteista kerättiin tietoja, joiden pohjalta jokaisen kaapelin kuormitettavuus laskettiin erikseen. Laskentatapana käytettiin kansallista standardia SFS 5636.</p> <p>Työn tuloksena jokaiselle kaapeliyhteydelle määritettiin kuormitettavuusraja sekä laskettiin, kuinka paljon kuormitusta on mahdollista nostaa. Selvitetävän verkon keskijännitekaapelit on mitoitetu oikein. Suurimman kuormitusvirran kaapeleissa ei ollut juurikaan varaa kuormituksen nostamiseen, vaan kaapelit on kuormitettu äärimmilleen. Työssä käsiteltiin kaapelin mitoittamista vain kuormitusvirran mukaan, vaikka kaapelin tulee kestää kaikki keskijännitejärjestelmän vikaolosuhteet. Kerättyä tietoa voidaan hyödyntää verkon suojausta suunniteltaessa, ja suojaustarkastelu voisi olla aiheellista.</p> | |
| Avainsanat keskijänniteverkko, keskijännitekaapeli, kuormitettavuus | |

| | |
|---|--------------------------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | |
| Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering | |
| Author Atte Paavola | |
| Title of Thesis Study of Medium Voltage Network | |
| Date 29 April 2022 | Pages/Appendices 26/6 |
| Client Organisation Yara Suomi Oy | |
| <p>Abstract</p> <p>This thesis was research made for Yara Suomi Oy. The aim was to conduct research on the medium voltage network of the plant. The thesis included getting acquainted with factors influencing the current carrying capacity of medium voltage cables and calculating load capacities of the cables. The previous study regarding network loads was carried out in 1995. After the previous study, the network has been changed and the determined load capacity limits were calculated before crosslinked polyethylene (XLPE) became more common cable insulation material.</p> <p>The medium voltage cable types used in the plant area and the phenomena affecting the cable load capacities were studied. Information about cables, installation methods and conditions were collected from the network. Based on the information gathered the load capacity of each cable was calculated separately. Load capacity modelling was done based on Finnish national standard SFS 5636.</p> <p>As a result, the load limit was determined for each cable connection. The network in question is dimensioned correctly. It was found out that the loads of cables with highest load currents could not be increased any further, these cables were loaded to the maximum. This thesis considered cable dimensioning only based on load current, although the cable should withstand all fault conditions of medium voltage systems. Information gathered from the network can be used to design network protection and it might be appropriate to review medium voltage protection systems.</p> | |
| <p>Keywords</p> <p>medium voltage network, medium voltage cable, current-carrying capacity</p> | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 5 |
| 2 | YARA..... | 6 |
| 2.1 | Yara International ASA | 6 |
| 2.2 | Yara Suomi..... | 6 |
| 2.3 | Siilinjärven toimipaikka | 6 |
| 3 | YARAN KESKIJÄNNITEVERKKO | 7 |
| 3.1 | Verkon kuvaus..... | 7 |
| 3.2 | Verkosta kerätyt tiedot | 7 |
| 4 | KÄYTÖSSÄ OLEVAT KAAPELIT | 8 |
| 4.1 | APYAKMM..... | 8 |
| 4.2 | APAKM | 9 |
| 4.3 | AHXAMK-W..... | 10 |
| 4.4 | AHXCMMK-WTC..... | 11 |
| 5 | KAPELIN KUORMITETTAVUUS | 12 |
| 5.1 | Yleistä | 12 |
| 5.2 | Häviöt kaapeleissa | 13 |
| 5.3 | Kaapelin hätäkuormitettavuus..... | 14 |
| 5.4 | Olosuhteet maahan asennettaessa | 15 |
| 5.5 | Olosuhteet ilmaan asennettaessa | 17 |
| 6 | KUORMITTAVUUDEN LASKEMINEN | 18 |
| 6.1 | Eri menetelmien esittely | 18 |
| 6.2 | Käytetty menetelmä | 18 |
| 6.2.1 | Kaapelit sähkötiloissa | 19 |
| 6.2.2 | Kaapelit muissa maan yläpuolisissa asennuksissa..... | 20 |
| 6.2.3 | Maahan asennetut kaapelit..... | 21 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 24 |
| | LAINATUT LÄHTEET | 25 |
| | LIITE 1: LASKENNASSA KÄYTETYT KUORMITETTAVUUSARVOT JA KORJAUSKERTOIMET | 27 |
| | LIITE 2: TULOSTEN KOONTITÄULUKKO | 31 |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on ”Keskijänniteverkon selvitystyö”. Aihe pohjautuu tilaajan tarpeelle saada tehtaiden keskijänniteverkosta ajantasainen kuva, sillä verkko on muuttunut vuodesta 1995, jolloin edellinen selvitystyö on tehty. Työn toimeksiantajana on Yara Suomi Oy ja ehdotus opinnäytetyöaiheesta on saatu Yaran Siilinjärven toimipaikan sähköpäälikkö Pasi Raatikaiselta.

Työssä perehdytään keskijännitejakeluun ja keskijännitekaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttaviin asioihin, jonka jälkeen tarkastellaan Yaran Siilinjärven tehtaiden keskijänniteverkon kuormitettavuutta. Vaikka opinnäytetyössä tutkitaan nimenomaisesti teollisuuden keskijänniteverkkoa, samat asiat pätevät myös muussa keskijännitejakelussa.

Työn tarkoituksena on tarkastella kaikkien tehtaan puolen keskijännitekojeistojen välisiä kaapelointeja, selvittää niiden nykytilaa ja koota tietoa yhteen paikkaan. Edellisen selvitystyön aikaan suurin osa tehtaiden kaapeleista oli tyypiltään APYAKMM- ja HMCMK-kaapeleita. Tehtaiden keskijännitejakeluverkkoa on vuosien saatossa uudistettu ja paperieristeisiä kaapeleita on korvattu PEX-eristeisillä kaapeleilla. Kuormitettavuusrajat on laskettu ajalta ennen AHXAMK-kaapeleiden käyttöönottoa.

Opinnäytetyön tuotos on mahdollisimman tarkka ja ajantasainen verkon kuvaus, eli tiedot jokaisesta lähdöstä sekä koontitaulukko, jossa on selvitetty kaikki keskijännitekojeistojen väliset kaapelit (24 kpl). Lähdöistä selvitetään kaapeleiden poikkipinnat, kuormat, kuormitettavuudet sekä kuormitusreservi.

2 YARA

2.1 Yara International ASA

Yara International ASA on norjalainen kemianalan yritys, jonka päätuotteita ovat kivennäislannoitteet, teollisuuskemikaalit ja ympäristönsuojelutuotteet. Yritys toimii globaalisti yli 60 maassa työllistäten yli 17000 työntekijää. Yhtiön toiminta alkoi vuonna 1905 Norsk Hydro -nimellä. (Yara julkaisupäivä ei tiedossa.)

2.2 Yara Suomi

Suomessa lannoiteteollisuuden historia alkoi yli sata vuotta sitten pian Suomen itsenäistymisen jälkeen, kun valtion Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat perustettiin 1920. Tehtaiden nimi muuttui vuonna 1961 Rikkihappo Oy:ksi, ja 11 vuotta myöhemmin Kemira Oy:ksi vuonna 1972. Lannoiteliiketoiminnan ensimmäiset askeleet otettiin 60-luvulla lannoiteviennin alkaessa. Kemira toimi globaalisti 1980-luvulla ja teki yritysostoja ostamalla lannoitetehtaita useista Euroopan maista. (Yara julkaisupäivä ei tiedossa.)

Kemira oli erottanut kemianteollisuuden ja lannoiteliiketoiminnat toisistaan 1970-luvulla, jonka jälkeen lannoiteliiketoiminta jatkoi Kemira Argo Oy:nä. Vuonna 2004 Kemira Argo Oy irtautui emoyhtiöstään, vaihtoi nimensä Kemira GrowHow:ksi ja listautui pörssiin. Vuonna 2007 Yara International ASA osti Suomen valtion osuuden yhtiöstä, ja se jatkaa tytäryhtiö Yara Suomi Oy:nä. (Yara julkaisupäivä ei tiedossa.)

2.3 Siilinjärven toimipaikka

Siilinjärvi on yksi Yaran kolmesta Suomessa toimivasta tehdaspaikkakunnasta Uudenkaupungin ja Kokkolan lisäksi. Siilinjärven toimipaikalla on sekä kaivostoimintaa että kemianteollisuuden tuotantolaitoksia. Toimipaikalla toimii neljä tehdasta: lannoite- fosforihappo- typpihappo- ja rikkihappotehdas. Tehtailla tuotetaan rikki- ja typpihappoa lannoitteiden raaka-aineeksi ja lopputuotteena ovat erilaiset lannoitteet sekä fosforihappo. Sivutuotteina syntyy myös sivukiveä, biotiittia, kipsiä, pasutetta sekä fluoripiihappoa. (Yara julkaisupäivä ei tiedossa.) Tehtaiden keskellä on oma voimalaitos, jonka kautta prosessihöyry kulkee tehtaalta toiselle. Tuotantoprosesseissa syntyvä prosessihöyry käytetään sähköenergian tuottamiseen kahden höyryturbiinin avulla, jonka lisäksi sitä hyödynnetään kaukolämpönä Siilinjärven taajamassa. Toimipaikka on merkittävä työllistäjä, tehtaat ja kaivos työllistävät välittömästi 400 henkilöä, urakoitsijat mukaan luettuna 700 henkilöä (Yara julkaisupäivä ei tiedossa).

3 YARAN KESKIJÄNNITEVERKKO

3.1 Verkon kuvaus

Opinnäytetyössä käsitellään Yara Siilinjärven kemian tehtaiden keskijänniteverkkoa. Työn kannalta tarkkoihin kojeistojen komponenttiselvityksiin ei ole tarvetta, sillä työ rajattiin koskemaan kojeistojen välisiä kaapelointeja, niiden asennustapaa ja kuormitettavuutta.

Keskijänniteverkko eroaa pienjänniteverkosta oleellisesti käyttövarmuusvaatimusten osalta. Pienjänniteverkko on tyypillisesti säteittäinen ja varasyöttöyhteyksiä on vähän. Keskijännitejakelussa verkon käyttövarmuusvaatimukset ovat tiukemmat, ja sähkönjakelua tulisi pystyä jatkamaan verkon terveissä osissa kaikissa yksittäisissä vikatilanteissa. (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 160.) Työssä tarkastellaan myös varasyöttöyhteyksien kuormitettavuutta.

Yara Siilinjärven keskijänniteverkko rakentuu kahdesta fyysisesti erillisestä verkosta. Kaivoksella ja kemiantehtailla on omat keskijänniteverkkonsa, joita syötetään omien päämuuntajien kautta. 110/10 kV päämuuntajia verkossa on yhteensä neljä, joista kaksi palvelee tehtaiden sähkönjakelua. Kahdesta muuntajasta vain toisella otetaan tehoa valtakunnanverkosta, toisen ollessa varalla. Muuntajista toinen sijaitsee tehdasalueen reunalla kytkinkentällä, jonka yhteydessä on kevytrakenteinen sähköasema. Toinen päämuuntaja sijaitsee voimalaitoksen yhteydessä.

Tehtaiden keskellä oleva voimalaitos tuottaa prosessihöyryllä sähköenergiaa kahden generaattorin avulla. Keskijänniteverkon kompensointi on toteutettu generaattoreiden magnetointia säätämällä, erillistä kompensointiparistoa ei tehtaiden keskijänniteverkossa ole. Tehtaiden energiaomavaraisuus on hieman yli puolet kokonaisenergiatarpeesta ja puuttuva sähkö otetaan valtakunnanverkosta.

Ensimmäiset tehtaiden keskijänniteverkon kaapelit on mitoitettu tehtaiden tarpeita vastaaviksi vuosina 1968 ja 1973. Yara Siilinjärven kemiantehtaiden keskijänniteverkkoa on selvitetty aiemmin. Selvitystyössä (Mustonen, 1995) on selvitetty tehtaiden energiatarpeita, kaapeleiden reittejä sekä kuormituskykyä.

3.2 Verkosta kerätyt tiedot

Keskijänniteverkko käsittää kaapelit, kojeistot ja katkaisijat, jotka ovat päämuuntajan ja jakelumuuntajan välillä. Selvityksen kohteeksi rajattiin keskijännitekojeistojen väliset kaapeliyhteydet. Tehdasalueella on 18 keskijännitekojeistoa, jotka on yhdistetty toisiinsa 24 kaapelilla. Selvittävää kaapeliyhteyksiä oli noin kymmenen kilometrin verran.

Työn suorittamiseksi valmista kaapeliluetteloa ei ollut käytettävissä, vaan tiedot kaapeleista kerättiin kentältä hyödyntäen sähkönjakelun yleiskaaviota. Kaapelihyllyille asennettujen kaapeleiden kohdalla reittejä ja asennustapoja oli mahdollista havainnoida silmämääräisesti, mutta maahan asennettujen kaapeleiden kohdalla reittejä selvitettiin kaapelikartan ja toimeksiantajan asiantuntijoiden avustuksella.

Toimipaikalla on pääosin käytössä ABB REF630 -sarjan suojareleet, jotka ovat yhteydessä automaatiojärjestelmään. Tietoja luettiin suojareleiltä sekä Valmet DNA historiakeruusta. Tietoja käsiteltiin taulukkolaskentaohjelmalla ja niistä laskettiin kaapeleiden huippukuormitusvirrat.

4 KÄYTÖSSÄ OLEVAT KAAPELIT

Keskijännitekaapeli koostuu yhdestä tai useammasta johtimesta, johdinsuojasta, johdineristyksestä, hohtosuojasta, kosketussuojasta sekä ulkoisista suojakerroksista, joihin kuuluu vaippa, mahdollinen armeeraus ja korroosiosuoja. Kaapeleiden johdinmateriaali on yleensä kuparia tai alumiinia, mutta myös muita metalleja tai niiden seoksia voidaan käyttää erikoistapauksissa. Alumiini on kustannussyistä keski- ja suurjännitekaapeleissa yleisimmin käytetty johdinmateriaali etenkin johdinpoikkipinnan kasvaessa. (Elovaara & Haarla, 2011b, 307.)

Selvitettävässä verkossa olevat kaapelit ovat suurimmalta osin muovieristeisiä, mutta myös paperieristeisiä kaapeleita on käytössä. Paperieristeisten kaapeleiden elinikä on jopa 70–100 vuotta, mikäli kaapelia ei ole ylikuormitettu eikä kaapelin sisään pääse vettä. Vanhat kaapelipäätteet ja jatkokset ovat usein kaapelilyhteydessä heikoin lenkki. (Kivisaari 2022).

4.1 APYAKMM



KUVA 1. APYAKMM-kaapelin rakennekuva (Nokia Kaapeli 1983, 21)

APYAKMM on paperieristeinen keskijännitekaapeli, joka on ollut suomalaisessa keskijännitejakelussa pääkaapelina ennen muovieristeisten kaapeleiden yleistymistä 1990-luvulla. APYAKMM-kaapeleiden valmistus lopetettiin vuonna 1987 ja viimeiset kaapelit toimitettiin asiakkaille vuosina 1988 ja 1989. (Kivisaari, 2022.) Kyseistä kaapelityyppiä on yhä käytössä teollisuudessa sekä muussa keskijännitejakelussa ja vanhimmat toimipaikan keskijännitekaapelit ovat APYAKMM-kaapeleita. Käytössä noin 1500 m, joista osa on varayhteyksiä.

Kyllästysaineena paperieristeisissä kaapeleissa käytetään normaalia kaapelimassaa, sitkomassaa tai öljykaapeliöljyä. Kaapelin tyyppimerkintä APYAKMM tulee kaapelin rakenneosista ja niitä kuvaavista kirjaintunnuksista: (Elovaara & Haarla, 2011b, 312–313.)

”Alumiininen virtajohdin (A)
 Nokipaperikerros
 Paperieristys (P)
 Hohtosuoja
 Alumiinivaippa (YA)
 Korroosiosuojakerrokset
 Polyetyleenivaippa (M)
 Polyetyleenivaippa (M)”

Tyyppimerkintä APYAKMM on kansallinen, eikä kaapelilla ole CENELEC-pohjaista merkintää. Kaapeli on sähköturvallisuusmääräysten 30§ mukainen vaipallinen voimakaapeli. (Sähkötarkastuskeskus 1989, 387.) Kaapelin rakennetiedot on määritelty standardissa SFS 4115 Paperieristeiset metallivaipaiset voimakaapelit ($U_0/U \leq 18/30$ kV):

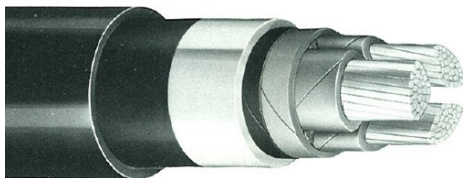
”Jokainen alumiinijohtiminen paperieristeinen johdin ja johtosuojin varustettu vaihe on päällystetty omalla alumiini- ja muovivaipalla. Kolme yhteen kerrattua vaihetta on varustettu yhteisellä muovivaipalla.”

Nokian valmistama APYAKMM-kaapeli on kyllästetty valumattomalla kyllästysmassalla. Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, kaapelin poikkileikkaus on muodoltaan kolmio. APYAKMM-kaapelin suurin sallittu käyttölämpötila on 65 °C, jota ei tule missään olosuhteessa ylittää paperieristeen ennenaikaisen vanhenemisen vuoksi. Kaapelin suurimmat sallitut kuormitusvirrat on esitetty taulukossa 1. (Nokia Kaapeli 1983, 21.)

TAULUKKO 1. APYAKMM-kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta (Nokia Kaapeli 1983, 21.)

| | 3x185 | 3x240 | 3x300 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| ilmassa +25 °C, johdin +65 °C | 270 A | 315 A | 360 A |
| maassa +15 °C, johdin +65 °C | 290 A | 335 A | 375 A |

4.2 APAKM



KUVA 2. APAKM-kaapelin rakennekuva (Nokia Kaapeli 1983, 20)

APAKM on APYAKMM tapaan paperieristeinen keskijännitekaapeli, jonka sektorinmuotoiset alumiinijohtimet on eristetty ja kierretty yhteen kuvan 2 osoittamalla tavalla. APYAKMM:stä poiketen vaihejohtimilla ei ole omaa alumiinivaippaa, vaan kaikkia kolmea johdinta ympäröi yhteinen alumiinivaippa. Kaapelin suurin sallittu käyttölämpötila 65 °C, ja suurimmat sallitut kuormitusvirrat on esitetty taulukossa 2. Kaapelia on käytössä noin 500 m matkalla kipsimäen kuljettimella.

TAULUKKO 2. APAKM kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta (Nokia Kaapeli 1983, 21.)

| | 3x35 | 3x70 | 3x120 | 3x185 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| ilmassa +25 °C, johdin +65 °C | 105 A | 155 A | 210 A | 270 A |
| maassa +15 °C, johdin +65 °C | 115 A | 170 A | 225 A | 290 A |

4.3 AHXAMK-W



KUVA 3. AHXAMK-W-kaapelin rakennekuva (Reka Kaapeli Oy 2022a)

SFS 5636 mukainen AHXAMK-W-tyyppinen kaapeli on ollut Yaran Siilinjärven keskijänniteverkon saneerauksessa useimmin käytetty kaapelityyppi. Selvitettävästä verkosta noin 6 kilometriä on AHXAMK-W kaapelia. Kaapeli koostuu kolmesta keskusköyden ympärille kerrotusta vaipatusta yksijohtinkaapelista kuvan 3 mukaisesti. Kaapelin rakenne on seuraava: (Reka Kaapeli Oy 2022a)

| | |
|--------------------------|---|
| ” Vaihejohtin | Pyöreä tiivistetty vesitiivis alumiiniköysi |
| Johdinsuoja | Puolijohtava ristosilloitettu polyeteeni PEX |
| Eriste | Ristosilloitettu polyeteeni PEX |
| Hohtosuoja | Puolijohtava ristosilloitettu polyeteeni PEX |
| Metallinen kosketussuoja | Vaipan alle tiukasti laminoitu alumiininauha |
| Ulkovaippa | Polyeteenimuovi |
| Kertaus | Kolme vaipattua vaihejohtinta kerrattu paljaan maadoitus- ” köyden ympärille |

AHXAMK-W on täysin vedenpitävä niin pitkittäis- ja poikittaissuunnassa puolijohtavan paisuvan nauhan ansiosta (Simonen 2010, 4). Eristeen suurin sallittu lämpötila on paperieristeisistä kaapeleista poiketen 90 °C, joskin maahan asennettuna asennetun kaapelin johtimen lämpötilan tulisi pysyä alle 65 °C maaperän kuivumisen vuoksi.

TAULUKKO 3. Suurin sallittu kuormitusvirta PEX-eristeiselle yksijohtimiselle alumiinikaapelille (SFS 5636 2017, 50)

| Johtimen poikkipinta-ala mm ² | Asennettuna maahan +15 °C | | | | Asennettuna ilmaan +25 °C | | | |
|--|---------------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Johtimen lämpötila +65 °C | | | | Johtimen lämpötila +90 °C | | | |
| | Taso | | Kolmio | | Taso | | Kolmio | |
| | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | |
| | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) |
| 150 | 330 | 315 | 305 | 300 | 425 | 395 | 380 | 370 |
| 185 | 375 | 350 | 345 | 330 | 485 | 440 | 430 | 425 |
| 240 | 435 | 395 | 395 | 385 | 570 | 515 | 505 | 490 |
| 300 | 485 | 440 | 445 | 435 | 650 | 580 | 580 | 565 |
| 800 | 805 | 650 | 725 | 695 | 1220 | 950 | 1045 | 1010 |

4.4 AHXCMK-WTC



Kuva 4 AHXCMK-WTC-kaapelin rakennekuva (Reka Kaapeli Oy 2022b)

AHXCMK-WTC-kaapelia on käytössä noin 3400 m. Se on APYAKMM-kaapelin korvaava alumiinijohtiminen PEX-eristeinen kaapeli. Kuten kuvasta 4 voidaan nähdä, profiililtaan AHXCMK-WTC on samanlainen kuin APYAKMM. PEX-eristeen suuremman sallitun käyttölämpötilan ansiosta kaapelia voidaan maan yläpuolisissa asennuksissa kuormittaa huomattavasti suuremmalla virralla kuin paperieristeistä kaapelia.

Kaapelin vaihejohtimet on kerrottu yhteen ja sidottu puolijohtavalla nauhalla. Kaikkia kolmea vaihejohtinta ympäröi yhteinen kosketussuoja ja vaippa. Kaapelia ei suositella asennettavaksi maasennuksissa kosteisiin tai märkiin olosuhteisiin, sillä kaapelin vesisulkusuojaus AHXAMK-W:stä poiketen ainoastaan pituussuuntainen. Kaapeli on siten alttiimpi kosteusvaurioille, mikäli uloin vaippa rikkoontuu. (Simonen 2010, 5–6).

TAULUKKO 4. Suurin sallittu kuormitusvirta PEX-eristeiselle kolmijohtimiselle alumiinikaapelille (SFS 5636 2017, 50)

| Johtimen poikkipinta-ala mm ² | Alumiinijohdin | |
|--|--------------------------|--------------------------|
| | Johtimen lämpötila 65 °C | Johtimen lämpötila 90 °C |
| | (A) | (A) |
| 150 | 260 | 305 |
| 185 | 290 | 340 |
| 240 | 340 | 400 |
| 300 | 380 | 460 |

5 KAAPELIN KUORMITETAVUUS

5.1 Yleistä

Energian muodosta toiseen muuntamisessa sekä sen siirtämisessä syntyy aina häviöitä, ja sähkö-energian kohdalla tämä tarkoittaa lähes yksinomaan muuttumista lämpöenergiaksi. Lämpöteho nostaa kaapelin ja sitä ympäröivän ympäristön lämpötilaa ja lämpötilanmuutos on riippuvainen sekä lämpötehosta että kohteen lämpöteknisistä ominaisuuksista. (Lakervi & Partanen, 2009.) Ihannetapauksessa kaikki johdon kautta siirretty teho siirtyy johtoa pitkin, mutta käytännössä osa tehosta häviää lämpönä vaikuttaen itse johtimeen sekä sen ympäristöön. Tässä osiossa käsitellään kaapelin häviöitä ja niiden vaikutusta kuormitettavuuteen.

Keskijännitekaapelin kuormitettavuus on riippuvainen varsin monesta asiasta; siihen vaikuttaa kaapelin rakenne, ympäristön lämpötila, muiden lähistöllä olevien (esimerkiksi samassa kaapeliojassa kulkevien) kaapeleiden lämmittävä vaikutus, maan lämpöresistiivisyys, kaapelin asennustapa ja asennussyvyys (Elovaara & Haarla 2011b, 316). Kuormitettavuutta arvioidessa tulee tarkastella sekä itse kaapelia että ympäristöä johon kaapeli on asennettu. Suurjännitesähköasennusstandardin (SFS 6001 2008, 43) mukaan kuormitettavuus on otettava huomioon kaapelityyppiä ja sen reittiä suunniteltaessa:

”Kaapelit on valittava ja sijoitettava siten, että johtimien, eristeiden, liitosten, päätteiden tai ympäristön suurinta sallittua lämpötilaa ei ylitetä seuraavissa olosuhteissa: a) normaalikäytössä, b) erityisissä, toimittajan ja käyttäjä ennalta sopimissa käyttöolosuhteissa, c) oikosulussa”

Kaapelin lämpöhäviöt siirtyvät kaapelin ulkopinnalle. Ilmaan asennetun kaapelin lämpöenergia siirtyy kaapelin pinnalta ympäristöön konvektion ja säteilyn avulla, kun taas maahan asennetun kaapelin lämpöenergia siirtyy ensin ympäröivään maaperään. Lämpötilaero kaapelin johtimen ja ympäristön välillä on suunnilleen suhteessa kaapelin kokonaishäviöihin. (Heinhold 1990, 181.) Tästä johtuen eri asennustavoilla asennettuja saman poikkipinnan kaapeleita ei voida kuormittaa samalla virralla.

Kaapelin terminen kuormitettavuus kertoo, kuinka suurella virralla johdinta voidaan kuormittaa aiheuttamatta sille vahinkoa. Jännitteen ollessa vakio, vain siirrettävään virtaan voidaan vaikuttaa. Tämän vuoksi kuormitettavuus ilmaistaan suurimpana sallittuna kuormitusvirtana. Kaapelin mitoittamista virran mukaan sanotaan virtamitoitukseksi. Yhtälön 1 mukaisesti kuormitusvirta I (A) voidaan laskea siirrettävän tehon avulla

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (1)$$

missä P = pätöteho (W)

Q = loisteho (VAr)

U = pääjännite (V)

$\cos \varphi$ = tehokerroin (pätötehon suhde näennäistehoon)

5.2 Häviöt kaapeleissa

Kaapelin maksimikuormitettavuus riippuu kaapelin lämpenemästä, joka taas johtuu kaapelissa tapahtuvista häviöistä. Häviöitä aiheutuu johtimissa, vaipassa ja armeerauksessa syntyvien virtalämpöhäviöiden vaikutuksesta, myös eristyksen dielektriset häviöt vaikuttavat kaapelin lämpenemään. Kaapelissa tapahtuvat häviötehot muuttuvat lämmöksi, joka johtuu ympäristöön. (Elovaara & Haarla, 2011b, 317.)

Kaapeleissa tapahtuvat häviöt ovat kahden tyyppisiä: toiset ovat riippuvaisia kaapelissa kulkevasta virrasta, toiset taas käytettävästä jännitteestä. Johtimessa ja vaipassa tapahtuvat häviöt ovat verrannollisia virtaan, kun taas jänniteriippuvaiset dielektriset häviöt tapahtuvat kaapelin eristeissä. Dielektriset häviöt ovat keskijännitekaapeleilla yleensä niin pieniä, että niitä ei tarvitse huomioida (Simonen 2010, 72).

Häviöt johtimissa

Valtaosa kaapelissa syntyvissä häviöistä syntyy kaapelin johtimissa, ja häviöt ovat riippuvaisia virrasta I ja resistanssista R (Simonen 2010, 54). Häviöteho P_h nousee virran neliössä yhtälön 2 mukaisesti

$$P_h = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (2)$$

Kaapelin ominaisresistanssit riippuvat kaapelin johdinmateriaalista sekä poikkipinta-alasta. Kaapeleiden DC-resistanssit on standardoitu, ja kaapelivalmistuksessa pinta-alaa suuremmassa roolissa ovat standardissa määritellyt resistanssirajat (Elovaara & Haarla, 2011b, 317). Keskijännitekaapelistandardissa SFS 5636 määrittää kaapeleiden suurimmat sallitut DC-resistanssit 20 °C lämpötilassa. Yleensä kaapelivalmistajat ilmoittavat myös kaapeleidensa vaihtovirtaresistanssien likiarvot.

Kaapelipoikkipinnan kasvaessa kasvaa myös kaapelin virranjohtokyky, mutta toisaalta kaapelin jäähdytysominaisuudet eivät kasva samassa suhteessa. Tämän vuoksi kaapelin kuormitettavuuden kaksinkertaistaminen vaatii poikkipinnaltaan nelinkertaistamisen. (Elovaara & Haarla, 2011b, 317.)

Kosketussuojan häviöt

Kolmesta yksivaiheisesta johdosta kootun kolmivaiheisen kaapelin, kuten AHXAMK-W kaapelin, metallivaipan kytkentätapa vaikuttaa kaapelin maksimikuormitettavuuteen. Johtimissa kulkeva vaihevirta indusoi kaapelin kosketussuojaan virran, joka synnyttää ylimääräisiä häviöitä, mikäli kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu molemmista päistä (Elovaara & Haarla, 2011a, 99).

Kahdesta päästä maadoitetussa, eli suljetussa kosketussuojapiirissä syntyy virtapiiri, jota pitkin indusoituneen jännitteen aiheuttama virta kulkee. Virta aiheuttaa lämpöhäviöitä ja ylimääräinen lämmöntuotto on pois johtimen virtalämpöhäviöistä. (Thue 1998, 195). Kaapelin kuormitettavuutta voidaan nostaa eliminoimalla kosketussuojan häviöt. Tämä tapahtuu eristämällä kaapeleiden metallivaipat toisistaan koko reitillä sekä loppupäässä, ja maadoittamalla vain toinen pää.

Dielektriset häviöt

Dielektriset häviöt ovat kaapelieristeessä tapahtuvia eristemateriaalin polarisaatioon liittyviä häviöitä, jotka ovat riippuvaisia käytetystä jännitetasosta. Dielektristen häviöiden osuus keskijännitteellä on alle 2 % kokonaishäviöistä, joten ne voidaan jättää kokonaan huomioimatta. (Simonen 2010, 13).

Kuormituskerroin

Kuormituskertoimen avulla ilmaistaan kaapelin huippukuormituksen suhde keskimääräiseen kuormitukseen. Kuormituskertoimen huomioiminen voi tulla kyseeseen, mikäli kaapelin kuormitus vaihtelee jaksollisesti. Maahan asennettujen kaapeleiden tapauksessa puhutaan niin sanotusta lämpökapasitanssista, jolla kuvataan aikaa, joka itse kaapelin ja sitä ympäröivän maa-aineksen lämpeneminen ja jäähtyminen kestää. Ohuet maan yläpuolelle asennetut kaapelit lämpenevät nopeasti, eikä niiden kohdalla kuormituskerrointa huomioida kuormitettavuutta määritettäessä. (Thue 1998, 180.)

Teollisuuden keskijänniteverkkojen kuormitus on tyypillisesti tasaista ja jatkuu korkeana hyvin pitkiä aikoja, kun taas kaupunkiverkon kuormitus vaihtelee eri vuorokauden aikoina, ja huippukuormitusilanne kestää harvoin pitkään.

5.3 Kaapelin hätäkuormitettavuus

Kaapelia voidaan kuormittaa hetkellisesti hätäkuormitettavuuden mukaisesti, mutta tilanteessa on käytettävä aina huolellista tapauskohtaista harkintaa, sillä jo lyhytkestoinen varayhteyden ylikuormitustilanne voi vaurioittaa kaapelia (Lakervi, 1996, 58). Hätäkuormitettavuustilanteessa palonkestävästi asennettua kaapelia voidaan kuormittaa yli sallitun lämpötilan. On kuitenkin pidettävä mielessä, että kaapelin eriste vanhenee ennenaikaisesti, mikäli kaapelin lämpötila ylittää suurimman sallitun rajalämpötilan. Verkostosuosituksen SA 5:92 (Sener 1994, 6.) mukaan:

”Eräinä raja-arvoina voidaan pitää korkeintaan 50 tuntia hätäkuormitusta kerrallaan, ja 500 tuntia hätäkuormitusta koko kaapelin elinkaaren aikana. ”

Kaapeleiden hätäkuormitettavuutta ei käsitellä standardeissa. On hyvä tiedostaa, että hätäkuormitettavuuden määrittelyssä suosituksilla ei ole Suomessa samanlaista viranomaisasemaa kuin SFS-standardeilla.

5.4 Olosuhteet maahan asennettaessa

Maan lämpöresistiivisyys

Maan lämpöresistiivisyys kuvaa maaperän kykyä siirtää lämpöä (Enescu ym. 2021, 4). Maan alapuolissa kaapeliasennuksissa maan lämpöresistiivisyys on tärkein kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttava tekijä. Korkeampi maan lämpöresistiivisyys madaltaa kaapelin kuormitettavuutta, sillä häviölämpö poistuu kaapelista huonommin. (Enescu ym. 2021, 3).

On yleinen käytäntö olettaa maaperän rakenne homogeeniseksi, eli tasakoosteiseksi aineeksi, jonka lämpöresistiivisyysarvo ei vaihtelee. Todellisuudessa maaperän koostumus on usein rakeinen, erilaisista orgaanisista tai kiviaineksesta koostuva seos. Maaperän ollessa rakeista, rakeiden välissä on vettä tai ilmaa. Tämän vuoksi maaperän rakenne riippuu sen lämpötilasta sekä kosteusprosentista, joka voi myös vaihdella kaapelin lämmön vaikutuksen, sään ja vuodenajan mukaan. (Enescu ym. 2021, 4).

Kaapelin lämpeneminen siirtää kaapelin viereistä kosteutta kuivattaen maata ja nostaen lämpöresistiivisyyttä. Kaapelin paikoittainen ylikuumeneminen aiheuttaa eristeen ennen aikaista vanhenemista ja lyhentää kaapelin teoreettista käyttöikää. (Enescu ym. 2021, 3).

Maan lämpöresistiivisyyden tulisikin olla mahdollisimman matala. Lämpöresistiivisyyden madaltamiseksi ja tasaisen ja tehokkaan lämmön poistumisen varmistamiseksi kaapelit ympäröidään yleensä tiiviisti hiekkaan. Yleensä käytetään kivetöntä hiekkaa, sillä se on edullista ja sitä on hyvin saatavilla. Eri materiaalien lämpöresistiivisyysarvoja on esitetty taulukossa 5. Lämpöresistiivisyysarvo 2,5 Km/W kuvaa lähes kokonaan kuivunutta hiekkaista maaperää tai ympäryshiekkaa, kun taas 1,0 Km/W tavonomaista Euroopan leveysasteilla esiintyvää maa-ainesta (Heinhold 1990, 156).

Mikäli maan lämpöresistiivisyyttä haluttaisiin selvittää tarkemmin, sitä voidaan mitata kenttä- tai laboratoriolaitteiston avulla, jota kuvataan IEC julkaisussa 442-2017 "*IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials*"

TAULUKKO 5. Esimerkkejä yleisien maalajien lämpöresistiivisyyksistä (SFS 5636 2017, 51 & Sähköturvallisuuskeskus 1989, 185)

| Materiaali | Lämpöresistiivisyys Km/W |
|---|-----------------------------|
| Kuiva hiekka (kosteus 0 %) | 3,0 |
| Kuiva sora ja savi | 1,5 |
| Puolikuiva sora, suomuta ja hiekka (kosteus 10 %) | 1,2 |
| Puolikuiva savi ja kostea sora | 1,0 |
| Kostea savi ja hiekka (Kosteusprosentti 25 %) | 0,7 |

Asennussyvyys

Keskijännitekaapeleiden asennussyvyys on yleensä vähintään 0,7 metriä maan routimisen vuoksi (Elovaara & Haarla, 2011b, 99). Asennussyvyys lasketaan maan pinnasta kaapelin keskikohtaan tai kolmijohdinkaapeleiden tapauksessa kaapeleiden keskikohtaan. Kaapelin asentaminen syvemmälle heikentää kaapelin kuormitettavuutta, olettaen että maan lämpötila ja lämpöresistiivisyys pysyvät samana. Syvemmällä maaperässä maa-aines on yleensä kosteampaa ja tasalaatuisempaa kuin maan pintakerroksissa. Onkin oletettavissa, että olosuhteet syvemmällä maassa ovat lämmön siirtymisen kannalta suotuisammat. (Heinhold 1990, 153.) Kuten osassa 6 esitellystä taulukosta 10 on nähtävissä, asennussyvyyden aiheuttama kuormitettavuuden madaltuminen on lähes mitätön asennussyvyyksille välillä 0,5 m – 1,1 m.


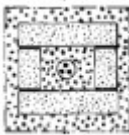

Maan lämpötila

Maan lämpötilalla on kuormitettavuutta madaltava vaikutus. Lämpötila mitataan maasta asennussyvyydestä ilman kaapelin lämmittävää vaikutusta. Erityisesti auringon säteilylle alttiin betoni- tai asfalttipäällysteisen alueen lämpötila metrin syvyydessä voi kesäkuukausien aikana nousta 5 °C korkeammaksi kuin mitattu arvo. (Heinhold 1990, 155)

Kaapelin suojaus

Kaapelin suojaaminen tiilillä, betonilaatoilla tai muovilla ei yleensä vaikuta kuormitettavuuteen. Mikäli suojan ja kaapelin väliin jää ilmaa esimerkiksi käytettäessä kaarevia laattoja, on suositeltavaa käyttää korjauskerrointa tämän huomioon ottamiseksi. (Heinhold 1990, 153). Taulukossa 6 on esitelty vuoden 1989 sähköturvallisuusmääräyksien korjauskertoimet suojakourujen ja laattojen aiheuttaman kuormitettavuuden pienenemisen huomioimiseksi.

TAULUKKO 6. Kaapelin suojakourujen ja laattojen käytöstä aiheutuva korjauskerroin (Sähkötarkastuskeskus 1989, 186)

| Suojaustapa | Piirros | Korjauskerroin |
|---|---|----------------|
| Betoni- tai tiililaatta yli 0,1 m kaapelin yläpuolella hyvin tiivistetyssä hiekkamaassa |  | 1,0 |
| Tiiliskivet joka puolella kaapelin suojana, välit täytetty tiiviisti hiekalla tai betonikouru kaapelin päällä, kourun ja kaapelin välissä tiivis hiekka |  | 0,9 |
| Betoni- tai muovikouru kaapelin päällä, kaapelin ja kourun välinen hiekkatäyte löysä |  | 0,8 |

5.5 Olosuhteet ilmaan asennettaessa

Maan yläpuolisissa asennuksissa olisi hyvä pyrkiä käyttämään tarkoituksenmukaisinta kaapelityyppiä AHXAMK-WTC, sillä sen vaiheet yhteen sitova vaippa kestää paremmin oikosulkujen aiheuttamia voimia (Simonen 2010, 6). Myös yksivaihekaapeleista koostuva AHXAMK-W on soveltuva maan yläpuolisiin asennuksiin, mutta tällöin kaapelit on kiinnitettävä huolellisesti esimerkiksi Tespa-kiristysvan-teilla.

Jos rinnakkain asennetaan monta yksivaihekaapelia, virranjako kaapeleiden välillä tulisi pitää niin tasaisena ja symmetrisenä kuin mahdollista. Tähän vaikuttaa kaapeleiden sijoittelu kaapelihyllyllä ja se, asennetaanko kaapelit rinnakkain vai kolmioon yhdelle vai päällekkäisille hyllyille. Kolmioon asennettaessa kaikkien vaiheiden induktanssit ovat yhtä suuret. Jos useita kolmioon asennettuja ryhmiä asennetaan rinnakkain, ne tulisi asentaa peilisymmetrisesti. Tasoasennuksissa huonoin mahdollinen asennustapa on asentaa kaikki saman vaiheen kaapelit vierekkäin ja jättää väliä seuraavaan vaiheeseen (RRR SSS TTT). (Elovaara & Haarla 2011b, 322–323)

Kaapeleiden kuormitettavuustaulukot olettavat, että ilmaan (kaapelihyllyille) asennetut kaapelit pysyvät jäähtymään täysin esteettä, eikä lähistöllä ole muita lämmönlähteitä, jotka nostaisivat kaapelia ympäröivän ilman lämpötilaa merkittävästi (Heinhold 1990, 157). Kaapeleita voi lämmittää myös auringon säteily, jonka suurin voimakkuus eli niin sanottu aurinkovakio on noin $1,35 \text{ kW/m}^2$. Todellinen arvo riippuu leveysasteesta, vuodenajasta, säästä ja vuorokauden ajasta. Mikäli paikallista arvoa auringon säteilystä ei ole saatavilla, arvoa 1 kW/m^2 voidaan käyttää. (Heinhold 1990, 194).

Ilmaan asennettujen, jatkuvassa kuormituksessa olevien kaapeleiden laskennallista maksimikuormitettavuutta ei tulisi ylittää missään tilanteessa, sillä kaapelin lämpöaikavakio on huomattavasti lyhyempi kuin maahan asennetulla kaapelilla (Heinhold 1990, 157). Kaapelin kuormittaminen 10 % laskettua maksimikuormitusvirtaa suuremmalla virralla aiheuttaa maahan asennetun kaapelin kohdalla kaapelin pintalämpötilan nousua ja maaperän kuivumista, mutta eristeen lämpötila pysyy alle suurimman sallitun lämpötilan. Ilmaan asennetun kaapelin kohdalla sama 10 % ylikuormitus nostaa johtimien lämpötilan yli $100 \text{ }^\circ\text{C}$, eli yli sallitun $90 \text{ }^\circ\text{C}$. (Simonen 2010, 68–71).

6 KUORMITTAVUUDEN LASKEMINEN

6.1 Eri menetelmien esittely

Kaapelin kuormitettavuutta voidaan arvioida pääasiassa kolmella eri menetelmällä, joita ovat: kansallinen standardi SFS 5636, kansainvälinen standardi IEC 60287 sekä numeerinen laskenta. Eri menetelmien laskentatavat eroavat toisistaan, ja lasketut kuormitettavuudet eroavat toisistaan (Simonen 2010, 54).

Kaikki käytössä olevat menetelmät kuormituksen mallintamiseen ovat pääasiassa teoreettisia ja perustuvat suurimmaksi osin laskemalla saatuihin tuloksiin. Numeerinen laskentatapa on kuormituksen mallintamisessa tarkin, sillä laskennassa käytetään kaapelin todellisia parametreja ja täten saadaan tulokseksi lähimpänä todellisuutta oleva arvio kuormitettavuudesta. (Simonen 2010, 74). Numeerinen laskenta perustuu kaapelissa tapahtuvien häviöiden yhteen laskentaan ja tämän jälkeen tarkastelemalla lämmön siirtymistä yleisten lämmönsiirtymisen yhtälöiden mukaisesti (Simonen 2010, 54). Mikäli kuormitettavuutta haluttaisiin tarkastella numeerisesti, kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta ja kaapelin eri osien kuten johtimen, eristeen, johdineristeen, kosketussuojan ja ulkoisten suojakerrosten lämpöresistanssi tulee olla tiedossa. Luotettavat tiedot kaapelin ominaisuuksista on saatavana vain kaapelivalmistajalta. (Schlabach & Rofalski 2014, 127)

Kansainvälisessä IEC 60287 standardissa laskentatapa perustuu häviöiden aiheuttaman lämpenemisen sekä ympäristön välisen lämpötasapainon laskentaan (Simonen 2010, 24). Laskentatavassa on numeeriseen laskentaan verrattaessa yksinkertaistuksia, jotka vaikuttavat tulosten tarkkuuteen. (Simonen 2010, 74).

Kansallisen standardin SFS 5636 mukainen laskentatapa on menetelmistä epätarkin, sillä standardin taulukot pohjautuvat eri kaapelivalmistajien arvioihin kaapeleiden kuormitettavuuksista. Erot tuloksissa eri laskentatapojen välillä eivät kuitenkaan ole merkittäviä, ja SFS 5636 mukaisesti lasketut kuormitettavuudet ovat pääsääntöisesti hieman pienempiä kuin muilla menetelmillä laskemalla (Simonen 2010, 73–74). Lisäksi kaapeleiden kuormitettavuuden arviointi tehdään Suomessa yleisimmin standardissa SFS 5636 esitetyllä tavalla (Simonen 2010, 20), joten kansallisen standardin soveltaminen laskennassa on perusteltua.

6.2 Käytetty menetelmä

Standardissa SFS 5636 on määritelty kuormitettavuustaulukoita, joita voidaan hyödyntää kaapelin kuormitettavuutta tarkastellessa. Taulukossa kaapelin peruskuormitettavuus perustuu seuraavanlaiseen oletustilanteeseen:

”Maan alapuolisissa asennettaessa maaperän korkeimman lämpötilan oletetaan olevan +15 °C, asennussyvyyden 0,7 m ja maan lämpöresistanssi enimmillään 1,0 Km/W. Maan yläpuolisissa asennuksissa auringon säteilyn oletetaan olevan 1000 W/m² ja tuulen nopeuden 0,6 m/s. Ilman lämpötilan oletetaan olevan +25 °C. ”

Kun asennusolosuhteet eroavat oletustilanteesta, perustilanteen kuormitettavuus kerrotaan eri olosuhteiden korjauskertoimien avulla. Myös kaapelivalmistajat tarjoavat näistä korjauskertoimista omia taulukoita, jotka miltei yhtäläiset standardissa esitettyjen kanssa. Standardissa SFS 5636 on esitetty

korjauskertoimia maahan asennettaessa kaapeleiden lähekkäiseen asentamiseen, eri asennussyvyyksille, maan lämpötiloille ja lämpöresistiivisyyksille. Ilmaan asennettaessa korjauskertoimia on kaapelia ympäröivän ilman eri lämpötiloille sekä tikas- ja levyhyllyille sekä lattialle asennettaville kaapeleille.

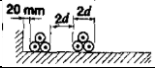
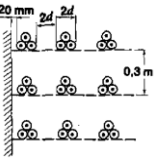
Kaikille tehdasalueen kaapeleille, myös APYAKMM-tyyppisille sovellettiin samoja taulukoita kuin uusille PEX-eristeisille kaapeleille, sillä ne eivät poikenneet sähköturvallisuusmääräyksissä StM A1-89. Kaikki kuormitettavuuden laskennassa käytetyt korjauskertoimet on esitetty liitteessä 1.

Kaapeleiden peruskuormitettavuus määräytyy kappaleessa 4 esiteltujen taulukoiden mukaan kaapelin pinta-alan sekä asennustavan perusteella. Kaikkien tehdasalueen AHXAMK-W-kaapeleiden kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu molemmista päistä, eli kosketussuojapiirit ovat suljettuja. Asennustapa maan yläpuolisissa asennuksissa on kolmio, maan alapuolisissa taso. Kaapelireitillä on useita erilaisia olosuhteita, ja mikäli niitä ei oteta huomioon, on mahdollista, että kaapelireitin varrella on paikkoja, joissa kuormitus on liian suuri kuormitettavuuteen nähden.

6.2.1 Kaapelit sähkötiloissa

Keskijännitekojeistojen välisten kaapeleiden lähtö- ja päätepiiste on sähkötilassa. Osassa kojeistotiloista on korotettu lattia ja kaapelit kulkevat kaapelikellarissa alumiinisille kaapelitikkaille asennettuina. Muussa tapauksessa kaapelit tuodaan kojeistojen takapuolelle hyllyllä. Kaapelitikkaille asennettut yksijohtimiset alumiinikaapelit ovat aina niputettuna kolmioksi. Kuormitettavuuteen vaikuttaa samalle tai päällekkäisille hyllyille asennettujen kaapeleiden lukumäärä. Kuormitettavuuden aleneminen otetaan huomioon taulukossa 7 esitetyillä korjauskertoimilla.

TAULUKKO 7. Kaapeleiden ryhmyksestä aiheutuva korjauskerroin ilma-asennuksessa monijohtimisten kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 53 & Kuvat Sähkötarkastuskeskus 1989)

| Kaapeleiden järjestys | | Kolmioasennus; Vapaa välimatka = $2d$, etäisyys seinästä ≥ 20 mm | | |  |
|---------------------------------------|--------------------|--|------|------|---|
| Vierekkäisten järjestelmien lukumäärä | | 1 | 2 | 3 | |
| Lattian tai katon pinnalla | | Korjauskerroin | | |  |
| | | 0,95 | 0,90 | 0,88 | |
| Kaapelihyllyllä | Hyllyjen lukumäärä | | | | |
| | 1 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | |
| | 2 | 1,00 | 0,95 | 0,93 | |
| | 3 | 1,00 | 0,94 | 0,92 | |
| | 6 | 0,86 | 0,81 | 0,79 | |

Taulukon 7 korjauskertoimet pätevät vain, mikäli kaapeleita ympäröivän ilman lämpötila ei nouse häviölämmön vaikutuksesta. Sähkö- ja automaatiotilat ovat jäähdytettyjä sähkötilassa syntyvän lämpökuorman poistamiseksi. Sähkötilojen lämpötila pysyy pääsääntöisesti ympäri vuoden noin 25 °C, joten sähkötilojen ilma-asennuksissa ei ole tarpeen käyttää taulukon 8 korjauskertoimia.

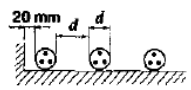
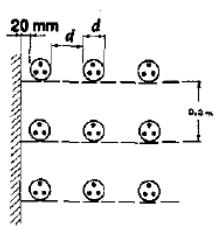
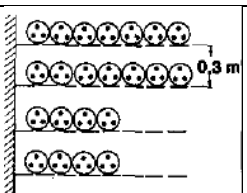
TAULUKKO 8. Kaapelia ympäröivän ilman lämpötilan vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| Johtimen lämpötila °C | Kaapelia ympäröivän ilman lämpötila | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| 90 | 1,12 | 1,08 | 1,04 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,74 | 0,68 |
| 65 | 1,20 | 1,14 | 1,07 | 1,00 | 0,93 | 0,85 | 0,77 | 0,68 | 0,57 | 0,45 |

6.2.2 Kaapelit muissa maan yläpuolisissa asennuksissa

Osa kaapeloinnista kulkee tehtaiden välisillä putkisilloilla kaapelitikkaille asennettuina. Kaapelitikkailta voi kulkea useita keskijännitekaapeleita, joiden aiheuttama kuormitettavuuden aleneminen on otettava huomioon. Kaapeleiden asentaminen kiinni toisiinsa heikentää kaapeleiden kuormitettavuutta merkittävästi, sillä ilmankierto heikentyy ja kaapelit lämmittävät toisiaan. Sähkötilojen ulkopuoliset maan pinnan yläpuoliset asennukset on toteutettu kolmivaiheisella AHXCMK-WTC- tai APYAKMM-tyyppisellä kaapelilla. Kyseisten kaapelityyppien laskennassa sovelletaan taulukossa 9 esiteltyjä standardin SFS 5636 monijohdinkaapeleiden korjauskertoimia.

TAULUKKO 9. Kaapeleiden ryhmityksestä aiheutuva korjauskerroin ilma-asennuksessa monijohtimisten kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 55 & Kuvat Sähkötarkastuskeskus 1989)

| Kaapeleiden järjestys | | Vapaa välimatka = 2d, etäisyys seinästä ≥ 20 mm | | | | | Piirros |
|---------------------------------------|--------------------|---|------|------|------|------|---|
| Vierekkäisten järjestelmien lukumäärä | | 1 | 2 | 3 | 6 | 9 | |
| Lattian tai katon pinnalla | | Korjauskerroin | | | | |  |
| | | 0,95 | 0,90 | 0,88 | 0,85 | 0,84 | |
| Kaapelihyllyllä | Hyllyjen lukumäärä | | | | | |  |
| | 1 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,92 | |
| | 2 | 1,00 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,89 | |
| | 3 | 1,00 | 0,94 | 0,92 | 0,89 | 0,88 | |
| | 6 | 1,00 | 0,93 | 0,90 | 0,87 | 0,86 | |
| | | Kaapelit koskettavat toisiaan ja seinää | | | | |  |
| Kaapelihyllyllä | 1 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 0,75 | 0,73 | |
| | 2 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 0,71 | 0,69 | |
| | 3 | 0,95 | 0,87 | 0,74 | 0,70 | 0,68 | |
| | 6 | 0,95 | 0,76 | 0,72 | 0,68 | 0,66 | |

Auringonsäteilyä ei tarvitse ottaa huomioon, sillä se on huomioitu peruskuormitettavuudessa. Mikäli hyllyllä olevat kaapelit kulkevat kuumissa olosuhteissa, sovelletaan kuitenkin ilman lämpötilan korjauskerrointa taulukosta 8. Huonoimmissa mahdollisissa olosuhteissa tehdastilojen lämpötila voi kohoata tehtaan lämpökuorman sekä ilman vaihtumattomuuden vuoksi jopa lähelle 40 °C. Taulukon 8 korjauskerrointa 0,77 sovellettiin mm. pasuton läpi kulkevien kaapeleiden tapauksessa.

Esimerkkitapaus 1: Kuormitettavuus laskettu kolmelle rinnakkaiselle APYAKMM 3x185 kaapelille hyllyllä, jossa kaapeleiden lisäksi muuntajan syöttö (kaapeleita yhteensä 4 kpl). Kaapelit ovat kaapelihyllyllä paikoittain kiinni toisissaan ja ilman lämpötila tehdashallissa 40°C

APYAKMM 3x185 kuormitettavuus ilmassa on 270 A

Kolmen kaapelin yhteenlaskettu kuormitettavuus on 810 A

Taulukon 8 mukaisesti hallin 35 °C lämpötilan korjauskerroin on 0,77

Taulukon 9 mukaisesti vierekkäisten kaapeleiden korjauskerroin on 0,77

Kaapelin peruskuormitettavuus kerrotaan kaikilla käytettävillä korjauskertoimilla

$$kk = 0,77 \cdot 0,77 = 0,5929$$

$$810 \text{ A} \cdot 0,5929 = 480 \text{ A}$$

6.2.3 Maahan asennetut kaapelit

Suurimmaksi osaksi tehdasalueen keskijännitekaapelit on kaivettu maahan. Kaapelin asennustavalla on merkitystä kaapelin kuormitettavuuteen. Taulukon 3 mukaisesti kolmioon asennetuilla maakaapeleilla on hieman matalampi kuormitettavuus kuin tasoon asennetuilla. Kaapelit on asennettu tasossa ja kosketussuojapiirit ovat suljettuja. Maan asennussyvyyden arvioitiin olevan metrin luokkaa, ja kaikkiin maahan asennettuihin kaapeleihin sovellettiin taulukon 12 kerrointa 0,98 ellei tarkempaa tietoa olosuhteista ollut tiedossa.

TAULUKKO 10. Asennussyvyyden vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Asennussyvyys m | 0,50–0,70 | 0,71–0,90 | 0,91–1,10 | 1,11–1,30 | 1,31–1,50 |
| Korjauskerroin | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,95 |

Kuten kohdassa 5.4 on todettu, maan lämpöresistiivisyys määrittelee suurimmalta osin kaapelin kuormitettavuuden, ja ympärysmään kuivuminen voi vaikuttaa siihen merkittävästi. Kaapeleiden vierusmateriaalina käytetään kivetöntä hiekkaa, jonka lämpöresistiivisyyden arvioidaan olevan luokkaa 1,2 Km/W. Poikkeuksena typpihappotehtaan ja voimalaitoksen välinen asfalttikenttä, jonka lämpöresistiivisyyden arvioin nousevan maaperän kuivumisen vuoksi. Taulukon 11 korjauskertoimia käytettiin kaikkien maahan asennettujen kaapeleiden kuormituksen laskennassa.

TAULUKKO 11. Maan lämpöresistiivisyyden vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Maan lämpöresistiivisyys Km/W | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| Korjauskerroin | 1,10 | 1,00 | 0,92 | 0,85 | 0,75 | 0,69 | 0,63 |

Maan lämpötilan korjauskerroin valitaan kaapelin syvyydessä olevan lämpötilan mukaan. Useimmissa tapauksissa maan oletuslämpötilaa 15 °C ei korjata taulukon 12 korjauskertoimilla, mutta asfalttikenttien alla kulkevien kaapeleiden lämpötila voi nousta kesäisin 20 °C, joten taulukon 12 korjauskerrointa 0,95 näissä tapauksissa.

TAULUKKO 12. Korjauskertoimet eri maaperän lämpötiloille (SFS 5636 2017, 51)

| Johtimen lämpötila °C | Kaapelia ympäröivän ilman lämpötila (°C) | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 90 | 1,13 | 1,10 | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,86 | 0,82 |
| 65 | 1,18 | 1,14 | 1,10 | 1,05 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,84 | 0,77 | 0,71 |

Vanhoja kaapeleiden kohdalla tuli huomioida niiden suojaustapa, sillä käytettävissä olevien tietojen mukaan kaapelit on suojattu betonilaatoin kappaleessa 5.4 kuvatulla tavalla. Korjauskerrointa 0,8 käytettiin kaikkien maahan asennettujen APYAKMM-kaapeleiden laskennassa. Lisäksi kaapelireiteillä, jossa on käytössä paperieristeisiä kaapeleita ja useita kaapelilähtöjä rinnan, jätettiin vielä ylimääräinen 10 % varmuusmarginaali laskemalla saatuihin kuormitettavuusarvoihin.

Tehdasalueella samaan kaapeliojaan asennettuja kaapeleita on vain muutamia. Näiden kohdalla saatettiin käyttää taulukon 13 korjauskertoimia vierekkäisten kaapeleiden kuormitusta alentava vaikutus.

TAULUKKO 13. Samaa kaapeliojaan asennettujen kaapeleiden korjauskertoimet etäisyyden mukaan (SFS 5636 2017, 51)

| Kaapeleiden tai kaapeliryhmien etäisyys toisistaan (mm) | Vierekkäin olevien kolmijohtimisien kaapeleiden tai yksijohdinkaapeliryhmien määrä | | | | |
|---|---|------|------|------|------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 (koskettavat) | 0,79 | 0,69 | 0,58 | 0,55 | 0,50 |
| 70 | 0,85 | 0,75 | 0,68 | 0,64 | 0,60 |
| 250 | 0,87 | 0,79 | 0,75 | 0,72 | 0,69 |

Esimerkkitapaus 2: Edellisen esimerkkitapauksen kaapelit kulkevat ennen putkisillalle nousua maassa. Vierekkäisten kaapeleiden välimatka on 250 mm.

APYAKMM 3x185 peruskuormitettavuus maassa on taulukon 1 mukaisesti 290 A
Kolmen kaapelin yhteenlaskettu kuormitettavuus on 870 A

Taulukon 10 mukaisesti kaapelin asennussyvyyden (1,3 m) korjauskerroin on 0,95

Taulukon 11 mukaisesti kaapelin vierusmateriaalin (1,2 Km/W) korjauskerroin on 0,92

Taulukon 13 mukaisesti vierekkäisten kaapeleiden korjauskerroin on 0,79

Taulukon 8 mukaisesti kaapelin suojaustavan korjauskerroin on 0,85

Kaapelin peruskuormitettavuus kerrotaan kaikilla käytettävillä korjauskertoimilla

$$kk = 0,95 \cdot 0,92 \cdot 0,79 \cdot 0,85 = 0,586891$$

$$870 \text{ A} \cdot 0,586891 = 510 \text{ A}$$

Esimerkissä kolmen rinnan kytketyn APYAKMM-kaapelin kuormitettavuus maassa on 510 A, mutta tehdashallin olosuhteissa vain 400 A. Tyypillisesti kaapelin suurimman sallitun kuormituksen määräävä tekijä on maanalaisen kaapelin osuus, mutta ei tässä tapauksessa. Kaapeliyhteyden heikoin kohta olisi ollut maanalainen kaapelointi, mikäli käytössä olisi ollut PEX-eristeinen AHXCMK-WTC-kaapeli, jonka eristeen suurin sallittu lämpötila on 90 °C. Jokaisen kaapeliyhteyden suurimmat sallitut kuormitusvirrat selvitettiin esimerkinomaisesti ja tulokset dokumentoitiin.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää keskijännitekaapelin mitoitus- ja mitoittamiseen vaikuttavat asiat ja ilmiöt niiden takana. Työn tavoite oli selvittää tehtaiden keskijänniteverkon kaapeleiden kuormitettavuutta ja kuormitettavuusreserviä. Työn perusteella laadittiin toimeksiantajan käyttöön kuormitettavuuslaskelmat lähdöittäin sekä liitteessä 2 esitetty koontitaulukko.

Kojeistojen välisten kaapeleiden pituudet ovat verrattain lyhyitä verrattuna tyypilliseen kaupungin keskijänniteverkkoon. Tästä syystä kaapeleiden kuormitettavuuden tarkastelu oli mahdollista tehdä jokaiselle kaapelille erikseen. Kaapelireittien olosuhteita arvioitaessa ymmärrys asennusolosuhteiden ja asennustapojen merkityksestä kaapelin kuormitettavuuteen syveni. Kuormitettavuuden arviointi valittua menetelmää käyttäen onnistui suhteellisen helposti.

Selvitystyön kohteena olleesta verkosta ei löytynyt puutteita ja verkon virtamitoitus on tehty oikein. Vain keskijännitejakelun yleiskaaviosta löytyi väärin merkattu kaapelipoikkipinta voimalaitoksen ja fosforihappotehtaan väliseltä kaapeliyhteydeltä. Tavoite tuottaa yhteenveto kaikista tehtaanalueen keskijänniteyhteyksistä toteutui. Työn tuloksena jokaiselle kaapeliyhteydelle määritettiin kuormitettavuusraja sekä laskettiin, kuinka paljon kuormitusta on mahdollista nostaa. Kaikkia kriittisiä tehtaita voidaan syöttää kahdella erillisellä syöttökaapelilla tehtaiden ollessa huippukuormituksella. Suurimman kuormitusvirran kaapeleissa ei ollut juurikaan varaa kuormituksen nostamiseen, vaan kaapelit on kuormitettu äärimmilleen.

Kaikki tieto kaapeleiden reittien olosuhteista kerättiin suhteellisen nopealla aikataululla ja parhaan saatavissa olleen tiedon pohjalta. Mikäli kaapeliyhteyden kuormitettavuutta on tarpeen tulevaisuudessa kasvattaa merkittävästi, olisi hyvä tehdä katselmus kaapelin asennusolosuhteista ja verrata, että työssä on huomioitu kaikki tarpeellinen.

Maan lämpöresistiivisyys on kuormitettavuutta laskiessa merkittävin tekijä. Maalajin lämmönjohtavuutta ei selvitetty mittaamalla, vaan arvioimalla. Työn kannalta tästä ei ollut haittaa, sillä selvitystyö kohdistui jo rakennettuun verkon osaan. Oli siis järkevää käyttää korjauskertoimena mieluummin liian suurta maan lämpöresistiivisyyden arvoa kuin pienempää.

Selvitettävässä verkossa oli paperieristeisiä kaapeleita seitsemässä lähdössä yhteensä noin kahden kilometrin verran. Paperieristeisten kaapeleiden elinkaari on hyvin pitkä, eikä käytössä olevia kaapeleita ole järkevää lähteä korvaamaan muovieristeisillä, sillä käyttöikä on vielä jäljellä, mikäli huolehditaan ettei kaapeleita ylikuormiteta. Kyseessä olevia kaapeleita on kojeistousintojen yhteydessä jatkettu useimmissa tapauksissa kummastakin päästä, joten jatkokset ovat uusia ja sijaitsevat kuivissa olosuhteissa. Jatkokset ja päätteet ovat paperieristeisten kaapeleiden eliniän kannalta kaapelia heikompi lenkki.

Opinnäytetyöni käsitteli kaapelin mitoitus- ja kuormitusvirran mukaan. Kaapelin tulee kestää kaikki keskijännitejärjestelmän vikaolosuhteet eli työn aihetta olisi voinut laajentaa. Työn tuotoksena syntynyt tietoa kaapeliyhteyksistä voidaan hyödyntää esimerkiksi suojausta suunniteltaessa.

LAINATUT LÄHTEET

Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011a. Sähköverkot 1, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011b. Sähköverkot 2, verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Enescu, Diana, Pietro Colella, Angela Russo, Radu F. Porumb, and George C. Seritan. 2021. "Concepts and Methods to Assess the Dynamic Thermal Rating of Underground Power Cables" *Energies* 14, no. 9: 2591. <https://doi.org/10.3390/en14092591> Viitattu 20.3.2022

Heinhold, Lothar. Power Cables and Their Application. 3. Painos. Berliini: Siemens, 1990.

Kivisaari, Risto. 2022. Prysmian Finland Oy, Sähköpostikeskustelu 4.2022 aikana.

Lakervi, Erkki, ja Jarmo Partanen. Sähkönjakelutekniikka. 2. uud. p. Gaudeamus Helsinki University Press, 2009.

Mustonen, Heikki 1995. Siilinjärven Kemiran tehtaiden 10,5 kV verkon syötöt.

Nokia Kaapeli. Voimakaapelit. Luettelo 02.01.01.13, kansio 2 ryhmä 1. 32 sivua. Ervaco / Kodaprint 4.83.

Reka Kaapeli Oy 2022a, datasheet C0115 <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0115> Viitattu 15.4.2022

Reka Kaapeli Oy 2022b, datasheet C0309 <https://www.reka.fi/datasheet/category/C0309> Viitattu 15.4.2022

Schlabbach, Juergen, Karl-Heinz Rofalski. Power System Engineering : Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. *ProQuest Ebook Central*, <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/detail.action?docID=1666551>. Viitattu 15.3.2022

SFS 4115. (1978). Paperieristeiset metallivaippaiset voimakaapelit (U0/U ≤ 18/30 kV).

SFS 5636. (2017). PEX-ERISTEISET 10, 20 JA 30 KV AL- JA CU-VOIMAKAAPELIT. RAKENNE JA TESTAUS.

SFS 6001. (2008). Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Simonen, Vesa-Matti 2010 Keskijännitekaapeleiden Terminen Kuormitettavuus: Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

Sähköturvallisuuskeskus 1989 Sähköturvallisuusmääräykset. Julkaisu A1-89. Helsinki. <https://tu-kes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/sahkoasennusten-tekniset-vaatimukset/vanhat-maaraykset> Viitattu 29.3.2022

Thue, William A. 1998. Electrical Power Cable Engineering. 2. painos. ProQuest Ebook Central. New York: CRC Press LLC. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/detail.action?docID=216100>. Viitattu 15.3.2022

Verkostosuositus SA 5:94. Keskijänniteverkon sähkötekniinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergia-liitto ry SENER.

Yara julkaisuaika tuntematon. Tietoa Yarasta. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/> Viitattu 15.3.2022

Yara julkaisuaika tuntematon. Toimipaikat. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/> Viitattu 15.3.2022

Yara julkaisuaika tuntematon. Yara Siilinjärvi. Verkkojulkaisu. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/siilinjarvi/> Viitattu 15.3.2022

LIITE 1: LASKENNASSA KÄYTETYT KUORMITETTAVUUSARVOT JA KORJAUSKERTOIMET

Liitteessä on koottu yhteen laskennassa käytetyt kertoimet, jotka pohjautuvat standardiin SFS-5636 sekä sähköturvallisuusmääräyksiin StM A1-89

TAULUKKO 1. APYAKMM-kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta (Nokia Kaapeli 1983, 21.)

| | 3x185 | 3x240 | 3x300 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| ilmassa +25 °C, johdin +65 °C | 270 A | 315 A | 360 A |
| maassa +15 °C, johdin +65 °C | 290 A | 335 A | 375 A |

TAULUKKO 2. APAKM-kaapelin suurin sallittu kuormitusvirta (Nokia Kaapeli 1983, 20.)

| | 3x35 | 3x70 | 3x120 | 3x185 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| ilmassa +25 °C, johdin +65 °C | 105 A | 155 A | 210 A | 270 A |
| maassa +15 °C, johdin +65 °C | 115 A | 170 A | 225 A | 290 A |

TAULUKKO 14. Suurin sallittu kuormitusvirta PEX-eristeiselle yksijohtimiselle alumiinikaapelille (SFS 5636 2017, 50)

| Johtimen poikki-pinta-ala mm ² | Asennettuna maahan +15 °C | | | | Asennettuna ilmaan +25 °C | | | |
|---|---------------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | Johtimen lämpötila +65 °C | | | | Johtimen lämpötila +90 °C | | | |
| | Taso | | Kolmio | | Taso | | Kolmio | |
| | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | | Kosketussuojapiiri | |
| | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) | Avoin (A) | Suljettu (A) |
| 150 | 330 | 315 | 305 | 300 | 425 | 395 | 380 | 370 |
| 185 | 375 | 350 | 345 | 330 | 485 | 440 | 430 | 425 |
| 240 | 435 | 395 | 395 | 385 | 570 | 515 | 505 | 490 |
| 300 | 485 | 440 | 445 | 435 | 650 | 580 | 580 | 565 |
| 800 | 805 | 650 | 725 | 695 | 1220 | 950 | 1045 | 1010 |




TAULUKKO 4. Suurin sallittu kuormitusvirta PEX-eristeiselle kolmijohtimiselle alumiinikaapelille (SFS 5636 2017, 50)

| Johtimen poikki-pinta-ala mm ² | Alumiinijohdin | |
|---|--------------------------|--------------------------|
| | Johtimen lämpötila 65 °C | Johtimen lämpötila 90 °C |
| | (A) | (A) |
| 150 | 260 | 305 |
| 185 | 290 | 340 |
| 240 | 340 | 400 |
| 300 | 380 | 460 |

TAULUKKO 15. Esimerkkejä yleisien maalajien lämpöresistiivisyyksistä (SFS 5636 2017, 51 & Sähköturvallisuuskeskus 1989, 185)

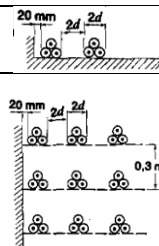
| Materiaali | Lämpöresistiivisyys K m/W |
|---|------------------------------|
| Kuiva hiekka (kosteus 0 %) | 3,0 |
| Kuiva sora ja savi | 1,5 |
| Puolikuiva sora, suomuta ja hiekka (kosteus 10 %) | 1,2 |
| Puolikuiva savi ja kostea sora | 1,0 |
| Kostea savi ja hiekka (Kosteusprosentti 25 %) | 0,7 |

TAULUKKO 16. Kaapelin suojakourujen ja laattojen käytöstä aiheutuva korjauskerroin (Sähkötarkastuskeskus 1989, 186)

| Suojaustapa | Piirros | Korjauskerroin |
|---|---|----------------|
| Betoni- tai tiililaatta yli 0,1 m kaapelin yläpuolella hyvin tiivistetyssä hiekkamaassa |  | 1,0 |
| Tiiliskivet joka puolella kaapelin suojana, välit täytetty tiiviisti hiekalla tai betonikouru kaapelin päällä, kourun ja kaapelin välissä tiivis hiekka |  | 0,9 |
| Betoni- tai muovikouru kaapelin päällä, kaapelin ja kourun välinen hiekkatäyte löysä |  | 0,8 |

TAULUKKO 17. Kaapeleiden ryhmytyksestä aiheutuva korjauskerroin ilma-asennuksessa monijohtimisten kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 53 & Kuvat Sähkötarkastuskeskus 1989)

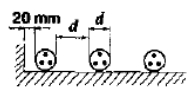
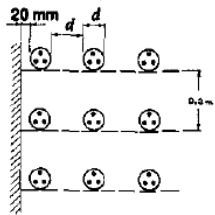
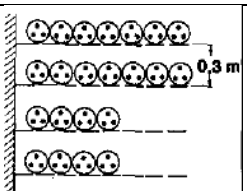
| Kaapeleiden järjestys | | Kolmioasennus; Vapaa välimatka = 2d, etäisyys seinästä ≥ 20 mm | | |
|---------------------------------------|--------------------|--|------|------|
| Vierekkäisten järjestelmien lukumäärä | | 1 | 2 | 3 |
| Lattian tai katon pinnalla | | Korjauskerroin | | |
| | | 0,95 | 0,90 | 0,88 |
| Kaapelihyllyllä | Hyllyjen lukumäärä | | | |
| | 1 | 1,00 | 0,98 | 0,96 |
| | 2 | 1,00 | 0,95 | 0,93 |
| | 3 | 1,00 | 0,94 | 0,92 |
| | 6 | 0,86 | 0,81 | 0,79 |



TAULUKKO 18. Kaapelia ympäröivän ilman lämpötilan vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| Johtimen lämpötila °C | Kaapelia ympäröivän ilman lämpötila | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| 90 | 1,12 | 1,08 | 1,04 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,74 | 0,68 |
| 65 | 1,20 | 1,14 | 1,07 | 1,00 | 0,93 | 0,85 | 0,77 | 0,68 | 0,57 | 0,45 |

TAULUKKO 9. Kaapeleiden ryhmytyksestä aiheutuva korjauskerroin ilma-asennuksessa monijohtimisten kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 55 & Kuvat Sähkötarkastuskeskus 1989)

| Kaapeleiden järjestys | | Vapaa välimatka = 2d, etäisyys seinästä ≥ 20 mm | | | | | Piirros |
|---------------------------------------|---|---|------|------|------|------|---|
| Vierekkäisten järjestelmien lukumäärä | | 1 | 2 | 3 | 6 | 9 | |
| Lattian tai katon pinnalla | | Korjauskerroin | | | | |  |
| | | 0,95 | 0,90 | 0,88 | 0,85 | 0,84 | |
| Kaapelihyllyllä | Hyllyjen lukumäärä | | | | | |  |
| | 1 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,92 | |
| | 2 | 1,00 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,89 | |
| | 3 | 1,00 | 0,94 | 0,92 | 0,89 | 0,88 | |
| | 6 | 1,00 | 0,93 | 0,90 | 0,87 | 0,86 | |
| Kaapelihyllyllä | Kaapelit koskettavat toisiaan ja seinää | | | | | |  |
| | 1 | 0,95 | 0,84 | 0,80 | 0,75 | 0,73 | |
| | 2 | 0,95 | 0,80 | 0,76 | 0,71 | 0,69 | |
| | 3 | 0,95 | 0,87 | 0,74 | 0,70 | 0,68 | |

TAULUKKO 10. Asennussyvyyden vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| Asennussyvyys m | 0,50–0,70 | 0,71–0,90 | 0,91–1,10 | 1,11–1,30 | 1,31–1,50 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Korjauskerroin | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,96 | 0,95 |

TAULUKKO 19. Maan lämpöresistiivisyyden vaikutus kaapeleiden kuormitettavuuteen (SFS 5636 2017, 51)

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Maan lämpöresistiivisyys K.m/W | 0,7 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| Korjauskertoin | 1,10 | 1,00 | 0,92 | 0,85 | 0,75 | 0,69 | 0,63 |

TAULUKKO 12. Korjauskertoimet eri maaperän lämpötiloille (SFS 5636 2017, 51)

| Johtimen lämpötila °C | Kaapelia ympäröivän ilman lämpötila (°C) | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 90 | 1,13 | 1,10 | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,86 | 0,82 |
| 65 | 1,18 | 1,14 | 1,10 | 1,05 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,84 | 0,77 | 0,71 |

LIITE 2: TULOSTEN KOONTITÄULUKKO

| Mistä | Mihin | Kaapeli | Kaapeli | Kuormitus | Kuormitettavuus | Reservi |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|----------|
| | | Tyyppi | Poikkpinta | A | A | A |
| VLB1.09 Voimalaitos | PUB1.01 Pumppaamo | AHXAMK-W | 3x300+35 | 140 | 345 | 205 |
| VLB1.12 Voimalaitos | RBB1.01 Rikkihappotehdas 2 | AHXAMK-W APYAKMM | 3x(3x185) | 260 | 399 | 139 |
| VLB1.13 Voimalaitos | AMB1.04 Ammoniakki | APYAKMM | 3x240 | 38 | 293 | 255 |
| VLB1.14 Voimalaitos | TRB1.01 Trukkitalli | AHXAMK-W | 3x300+35 | 21 | 397 | 376 |
| VLB1.15 Voimalaitos | KAIVOS VARA | APYAKMM | 3x240 | 113 | 397 | 284 |
| VLB1.18 Voimalaitos | FHB1.02 Fosforihappotehdas | AHXAMK-WTC | 2x(3x300) | 343 | 578 | 235 |
| VLB1.21 Voimalaitos | RAB1.01 Rikkihappotehdas 1 | AHXAMK-WTC | 3x(3x240) | 222 | 804 | 582 |
| VLB1.23 Voimalaitos | THB1.01 Typpihappotehdas | AHXAMK-W | 2x(3x300+35) | 548 | 606 | 58 |
| VLB1.24 Voimalaitos | PUB1.03 Pumppaamo | AHXAMK-WTC AHXAMK | 3x240 3x300+35 | 192 337 | 400 345 | 208 9 |
| VLB1.27 Voimalaitos | CCB0.05 Sähkösäama | AHXAMK-WTC | 2X(3X1X800+35) | 914 | 1020 | 106 |
| VLB1.28 Voimalaitos | THB1.08 Typpihappotehdas | AHXAMK-W | 2x(3x300+35) | 548 | 606 | 58 |
| TRB1.01 Trukkitalli | TRB2.05 Parkkipaikka | AHXAMK-W | 3x185+35 | 7 | 315 | 308 |
| TRB1.04 Trukkitalli | LAB1.07 Lannoitetehtas | AHXAMK-W APYAKMM AHXCMK-WTC | 3x240+35 | 23 | 272 | 249 |
| LAB1.06 Lannoitetehtas | SEB1.03 Seulonta-asema | AHXAMK-WTC | 3x300+35 | 25 | 343 | 318 |
| SEB1.01 Seulonta-asema | SÄB1.03 Säkitämo | AHXCMK-WTC APYAKMM | 3x240 | Ei käytössä vara | 315 | 315 |
| SÄB1.02 Säkitämo | FHB1.07 Fosforihappotehtas | AHXCMK-WTC APYAKMM | 3x240 | 30 | 302 | 272 |

| Mistä | Mihin | Kaapeli | Kaapeli | Kuormitus | Kuormitettavuus | Reservi |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------|---------|
| | | Tyyppi | Poikkpinta | A | A | A |
| FHB1.03 Fosforihappotehdas | AMB1.01 Ammoniakkipumppaamo | AHXAMK-W | 3x300 | 36 | 343 | 307 |
| FHB1.08 Fosforihappotehdas | FKB1.01 Kiertovesipumppaamo | AHXCMK-WTC AHXAMK-W | 3x240 | 36 | 356 | 333 |
| FKB1.03 Kiertovesipumppaamo | FKB4.01 Sulkavanojan muuntamo | AHXAMK-W | 3x185+35 | 6 | 315 | 309 |
| FKB4.01 Sulkavanojan muuntamo | FKB3 01 Kiertovesiallas KVA10 | AHXAMK-W | 3x185+35 | 6 | 315 | 309 |
| FKB1.04 Kiertovesipumppaamo | FKB2.01 Kipsimäki | AHXCMK-WTC APAKM AHXCMK-WTC | 3x150+35 3x70 3x185+35 | 17 | 125 | 108 |
| CCB0.03 Sähköasema | CCB1.03 Alavarasto | AHXAMK-W | 3x300+35 | 5 | 690 | 685 |
| CCB0 06 Sähköasema | PUB2 Pumppaamo | AHXAMK-W | 3x240+35 | 80 | 356 | 276 |
| THB1.01 Typpihappotehdas | LAB1.06 Lannoitetehtas | AHXCMK-WTC APYAKMM | 2x(3x240) | 251 | 433 | 182 |