



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jussi Lehtimäki

LÄMPÖHÄVIÖIDEN LASKENTA VEON TUOT- TEIDEN VIRTAKISKOISSA

Tekniikka
2023

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jussi Lehtimäki
Opinnäytetyön nimi	Lämpöhäviöiden laskenta VEO:n tuotteiden virtakiskoissa
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Juha Ramsila

Tässä työssä käsitellään virtakiskojen lämpöhäviöihin vaikuttavia tekijöitä pienjännitekojeistoissa. Sovelletun tiedon pohjalta on koottu VEO:n käyttöön Excel-pohjainen laskentatyökalu, jolla pystytään laskemaan haluttujen virtakiskojen lämpöhäviöt erilaisissa käyttötilanteissa.

Työssä perehdytään siihen, millä tavoin lämpöenergia siirtyy kiskotilassa, mitkä tekijät määrittävät kiskojen lämpöhäviöiden määrää ja millaisissa suhteissa tekijät vaikuttavat keskinäisesti toisiinsa. Työ käsittelee sekä fyysisten tekijöiden, kuten valmistusmateriaalin, mittojen ja pinnoitteiden että sähkötekniisten tekijöiden kuten virtalajin ja resistiivisyyden kasvun vaikutusta lämpöhäviöihin.

Kolmannessa luvussa dokumentoidaan laskentatyökalun prosessi. Siinä kerrotaan, millä tavoin työkalun helppokäyttöisyyttä, virheiden minimointia ja jatkokehitysmahdollisuuksia on edistetty.

Työn lopussa arvioidaan työkalun toimintaa ja siinä käytettyjen laskentamenetelmien tarkkuutta. Toimintaa testataan käyttämällä työkalua käytännön malliprojektin lämpöhäviöiden laskennassa. Lopuksi luodaan katsaus mahdolliselle jatkokehittämiselle.

Avainsanat	lämpöhäviö, virtakisko, pienjännitekojeisto, laskentamenetelmät, VEO
------------	--

ABSTRACT

Author	Jussi Lehtimäki
Title	The calculation of heat losses in the busbars of VEO's products.
Year	2023
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Juha Ramsila

This work addresses the factors influencing the heat losses in busbars in low-voltage switchgear. Based on applied knowledge, an Excel-based calculation tool has been developed for VEO, enabling the calculation of heat losses for specific busbars in various operating conditions.

The study explores how thermal energy transfers within the busbar enclosure, the factors determining the amount of heat losses in busbars, and the interrelationships of influencing factors. The work covers both physical factors, such as manufacturing materials, dimensions, and coatings, as well as electrical factors, such as the type of current and the impact of resistivity growth on heat losses.

The third chapter documents the process of the calculation tool, explaining how user-friendliness, error minimization, and possibilities for further development have been enhanced.

The conclusion evaluates the performance of the tool and the accuracy of the calculation methods used. The tool's functionality is tested by applying it to calculate heat losses in a practical model project. Lastly, an review is provided regarding potential further improvement.

Keywords	heat loss, busbar, low voltage switchgear, calculating methods, VEO
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Virtakiskoista.....	7
1.2	Tarveanalyysi ja nykytila	9
1.3	Työhön liittyvien VEOn tuotteiden esittely	9
1.3.1	VEDA MCC	9
1.3.2	VEDA Drives.....	10
1.3.3	VEDA Marine ja Hybrid.....	10
1.3.4	VEDA Light.....	10
2	TEORIATAUSTA	11
2.1	Lämpöhäviöt	11
2.2	Resistanssin muutos lämpötilan funktiona.....	12
2.3	Lämmön siirtymistavat virtakiskoissa	13
2.3.1	Johtuminen	13
2.3.2	Kulkeutuminen eli konvektio	13
2.3.3	Säteileminen.....	14
2.4	Kiskomateriaali.....	16
2.5	Materiaalin laatujen luokittelu	17
2.6	Hapeton kupari (Cu-OF)	18
2.7	Metallisten pinnoitteiden vaikutus.....	18
2.8	Käyttökohteen vaikutus.....	19
2.9	Käyttötavan vaikutus	19
2.10	Useiden kiskojen vaikutus.....	20
2.11	Virtalajin vaikutus	22
2.12	Vaihtovirtailmiöt	23

2.12.1	Keskinäisvaikutus	25
2.12.2	Vaihtovirtaresistanssin selvittäminen.....	27
3	KEHITTÄMISPROSESSIN JA -TOIMINNAN KUVAUS.....	29
3.1	Lähtökohdat laskentaprosessiin	29
3.2	Laskentatyökalussa tavoitellut ominaisuudet	30
3.2.1	Helppokäyttöisyys	30
3.2.2	Käyttäjän virheiden minimointi	30
3.2.3	Mahdollisuus kehittämiseen	32
3.3	Resistanssin arvot	33
3.4	Laskutoimitukset työkalussa	36
3.5	Koko kiskoston häviölaskenta	37
3.6	Lämpöhäviöiden raportointi	37
4	TULOKSEN ARVIONTI	39
4.1	Käytännön laskutuloksia	39
4.2	Huomioita työkalusta käytössä.....	41
4.3	Laskennan virheen arviointi.....	43
4.4	Työkalun ja prosessin kehitys tulevaisuudessa.....	45
5	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kuparisia virtakiskoja kojeiston sisällä.....	8
Kuva 2. DC-resistanssi kiskojen lukumäärän funktiona.....	21
Kuva 3. Visualisointi virran tiheydestä AC-johtimella.....	24
Kuva 4. 2x3 AC-kiskojärjestelmä FEM-mallinnettuna.....	26
Kuva 5. Kiskojärjestelmän visualisointi.....	32
Kuva 6. Kojeston kiskosto.....	39

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Kuparin ja alumiinin ominaisvastukset.....	12
Taulukko 2. Suhteellinen emissiivisyys.....	15
Taulukko 3. Kiskojärjestelmän vaikutus DC-resistanssiin 60x10 kuparikiskolla... ..	21
Taulukko 4. Vaihtovirtakerroimen S suuruus eri kiskoilla.....	23
Taulukko 5. Keskinäisvaikutuksen etäisyys 2000 - 3000 A virta-alueella.....	27
Taulukko 6. Arvioitu vaihtovirtakerroin 120x10mm kiskolle.....	35
Taulukko 7. Vaihtovirtakiskoston spesifikaatiot.....	41
Taulukko 8. Tasavirtakiskoston spesifikaatiot.....	41
Taulukko 9. Raportoitavia arvoja poikkeavalla kuormituksella ajettaessa.....	42
Taulukko 10. Oletettu virhe vaihtovirtailmiöiden kertoimessa.....	44
Taulukko 11. Resisttiivisyyden virherajat 120x10mm kokoisella kiskolla.....	44
Taulukko 12. Virhelaskenta sovellettuna käytännön projektiin.....	45

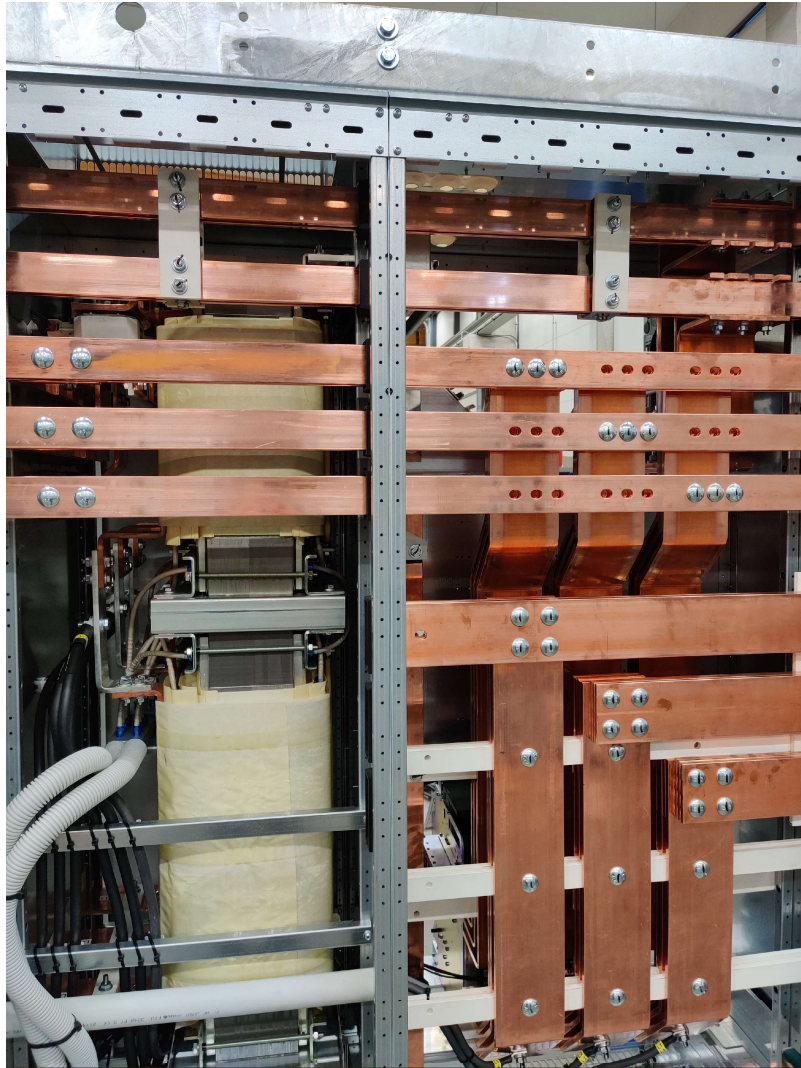
1 JOHDANTO

1.1 Virtakiskoista

Virtakiskot ovat kuparista tai alumiinista valmistettuja komponentteja, joiden tarkoitus on johtaa virtaa järjestelmässä jakelupisteestä lähtöihin. Sähkönjakeluosastoissa itse kojeistolle täytyy tuoda syöttö jakelumuuntajalta suojattua virtakiskorakennelmaa pitkin, jota kutsutaan kiskosillaksi. Suomessa kojeiston syöttö toteutetaan lähes poikkeuksetta kiskosillalla, mutta eri puolilla maailmaa on vaihtoehtoisesti kiskosillan sijasta käytetty kaapelijärjestelmää syöttönä [1].

Kojeiston sisällä kulkevia päävirtakiskoja, jotka johtavat virran kojeiston eri moduuleihin, kutsutaan kokoojakiskoiksi. Kokoojakiskot sijaitsevat kokoojatilassa yleensä keskuksen yläosassa. Kokoojakiskoilta virta haarautuu sitä tarvitseviin moduuleihin pystysuuntaisilla virtakiskoilla, haarakiskoilla. Kuvassa 1 on esimerkki kojeiston kiskojen ulkonäöstä.

Virtakiskot vaihtelevat laajasti käyttötarkoituksesta riippuen. VEDA 5000-keskusjärjestelmässä kiskot ovat paljaita suorakaiteen muotoisia kupari tai alumiinikiskoja. Kojeistotuotteissa kiskoja voidaan käsitellä myös maalaamalla tai tinaamalla ne. Haluttu nimellisvirta, käyttötarkoitus ja oikosulkukestoisuus määrää virtakiskojen lukumäärän, koon ja materiaalin. [2.] Tämän lisäksi se vaikuttaa myös kiskotilojen IP-luokitukseen. Koska sähkönjohtavuus on tehokkainta johdemateriaalien pinnassa, virtakiskoja läpyleikkäysmuoto on litteä. Tällöin materiaalin pinta saadaan eniten kokonaispinta-alaan nähden. VEO:n käyttämät kokoojakiskot ovat vakiona 10 millimetrin paksuisia ja niiden korkeus vaihtuu 30 – 150 millimetrin välillä halutun virran suuruudesta riippuen.



Kuva 1. Kuparisia virtakiskoja kojeiston sisällä.

Virtaa kuljetetaan aina rinnakkain useammassa kuin yhdessä kiskossa. Kolmivaihejärjestelmässä jokaiselle vaiheelle on varattu oma kiskonsa, mutta sama vaihe voidaan jakaa myös useamman kiskon kuljetettavaksi. Rinnakkaisten kiskojen lukumäärän lisääminen tuo useita teknisiä hyötyjä, vaikka se lisää monia suunnitteluvaiheessa huomioon otettavia yksityiskohtia. Tämä pätee erityisesti vaihtovirtakiskoihin, joiden useiden kiskojen vaikutuksia käydään tarkemmin läpi luvuissa 2.11 ja 2.12.

1.2 Tarveanalyysi ja nykytila

Koska VEO:n valmistamien tuotteiden virtakiskoissa kulkee tuhansien ampeerien virtoja, niiden suunnittelussa vaaditaan huolellisuutta, tietämystä ominaisuuksista ja optimiratkaisujen etsimistä. Parempi kiskostoympäristön teknillisten yksityiskohtien tunteminen tuottaa parempia kiskoratkaisuja, tarkempia kiskojen jäähdytyslaitteiden mitoituksia ja lisää virtakiskojen luotettavuutta. Yhtenä työn tavoitteista onkin kartuttaa kiskotietämystä yrityksen sisällä ja tuoda se helposti saataville.

Asiakkaiden kiinnostus lämpenemien optimointiin kojeistoratkaisuissa on lisääntynyt. Tarpeita vastatakseen VEO on lisännyt lämpenemämittauksia virtakiskoille ja tätä toimintaa on jatkossa tarkoitus kehittää entisestään lisäämällä mittauksiin tarvittavia laitteistoja. Mittauslaitteisto vaihtovirtakiskoille on jo olemassa, mutta tasavirtakiskojen lämpenemämittaukset joudutaan toistaiseksi suorittamaan yrityksen ulkopuolella. Työn avulla pystytään kehittämään entisestään lämpenemämittausprosesseja ja luomaan tarkempia laskelmia lämpöhäviöiden arviointiin osa-alueilla, joissa mittaukset eivät ole vielä niin suosittuja.

1.3 Työhön liittyvien VEO:n tuotteiden esittely

1.3.1 VEDA MCC

VEO:n tuotteista VEDA MCC -pienjännitekojeisto on yleisin ja vakioiduin. Se on teollisuuden ja voimalaitosten tarpeeseen suunniteltu kennokeskusjärjestelmä. Keskus on rakenteellisesti vapaasti seisova ja sen runko on valmistettu kuumasinkityistä teräslevyistä. Keskuksen eri osat ovat syöttökenttä, apulaite- ja mittauskenttä, lähtömoduuleista koostuvat lähtöyksiköt sekä kaapelointikuilut. Lähtömoduuleita on saatavilla eri kokoisina tehotarpeen mukaan joko kiinteänä, ulosvedettävänä tai ulosotettavana. [2.]

VEDA MCC on saatavilla suurimmillaan 5000 ampeerin nimellisvirroille asti. Kotelointiluokka on vakiostaan IP 31, mutta keskus on mahdollista toteuttaa jopa IP 54

luokan koteloinnilla. Keskusjärjestelmä täyttää IEC 61439, SGS Fimko ja DNV standardit. [3.]

1.3.2 VEDA Drives

Drives-kojeistot omaavat saman rakenteen, tekniset tiedot ja standardien mukaisen toteutuksen kuin VEDA MCC -kojeistot. Kojeistotuotteet eroavat toisistaan sillä, että Drives-kojeistoissa on perinteisten lähtöjen lisäksi myös taajuusmuuttajalähtöjä. Tästä syystä ne ovat saatavilla joko ilma- tai vesijäähdytteisinä. Drives-keskusten vakio kotelointiluokka on IP21, mutta se voidaan myös valmistaa IP54-luokkaan asti.

1.3.3 VEDA Marine ja Hybrid

VEDA Marine on laivoihin ja muihin veden päällä sijaitseviin käyttökohteisiin tarkoitettu versio VEDAsta. Laivaluokitusten saamiseksi Marine-pienjännitekojeistoilla on suuremmat testattavat vaatimukset. Vaatimusten laajuus riippuu siitä, minkä maantieteellisen alueen luokituslaitoksen mukaan kriteerit laaditaan.

VEDA Hybrid on versio, jossa on normaalin syötön lisäksi akustoja. Hybridiratkaisuilla pyritään vähentämään kulutuksen aikana ilmenevää sähkön käytön vaihtelua ja näin ollen alentamaan kunnossapitokustannuksia ja energiankustannuksia. [4.]

1.3.4 VEDA Light

VEDA Light on nimensä mukaisesti kevytversio VEDA MCC -kojeistosta. VEDA Lightin nimellisvirrat ovat korkeintaan yhden kiloampeerin suuruisia. Kojeisto mahtuu huomattavasti kompaktimpaan tilaan, sillä sen syvyys on vain 400 millimetriä. Sen suunnittelussa ja toteutuksessa pystytään kuitenkin käyttämään samoja sovitteita ja rakenteita kuin tavallisessa VEDA MCC:ssä, poissulkien jotkin rakenteet kuten kasettilähdöt. [5.]

2 TEORIATAUSTA

2.1 Lämpöhäviöt

Lämpöhäviöiden syntyminen virtakiskoissa toimii samojen lainalaisuuksien mukaan kuin lämpöhäviöt missä tahansa sähkötekniikassa. Virtapiiriä osana olevan materiaalin lämpöhäviöt riippuvat kyseisen aineen resistiivisyydestä sekä virtapiirin läpi kulkevasta virrasta.

$$P = R(\rho) \times I^2 \quad [1]$$

jossa, P = Lämpöhäviöt

$R(\rho)$ = Resistanssi

I = Virta

Resistanssin arvo koostuu virtaa johtavan kappaleen ominaisvastuksesta, kappaleen poikkipinta-alasta sekä pituudesta. Virtakiskoissa poikkipinta-alan ja pituuden lämpölaajenemiset ovat niin pientä, että näiden arvojen voidaan olettaa pysyvän vakioina. Sen sijaan kappaleen ominaisvastus muuttuu lämpötilan funktiona. Aineiden ominaisvastukset ilmoitetaan tyypillisesti 20 °C arvoissa, mutta virtakiskojen laskennoissa käytetään niiden keskimääräistä lämpötilaa 65 °C:ta [6]. Lämpötilassa on huomioitu kiskotilassa oleva ympäristön lämpötila ja kuormituksen aiheuttama lämpenemä.

$$R(\rho) = \frac{\rho(\alpha) \times l}{A} \quad [2]$$

jossa, $\rho(\alpha)$ = ominaisvastus

l = pituus

A = Poikkipinta-ala

2.2 Resistanssin muutos lämpötilan funktiona

Ominaisvastuksen muutoksesta johtuen resistanssin arvo muuttuu myös lämpötilan muuttuessa. Johdinmateriaaleilla resistanssi kasvaa lineaarisesti lämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että lämpötilan kasvaessa varausta kuljettavien elektronien lämpöliike lisääntyy, eivätkä ne pysty kuljettamaan varausta yhtä tehokkaasti.

Kasvun määrä riippuu siitä, kuinka monta astetta lämpötila muuttuu 65 °C:sta, sekä siitä, mikä aineen lämpötilakerroin α on. Olennaisten kiskomateriaalien kuparin ja alumiinin lämpötilakertoimet on esitetty taulukossa 1. Todellisuudessa lämpötilakerroin ei ole täysin lineaarinen, mutta työn laskenta-alueella (20-120°C) kertoimen muutos voidaan olettaa lopputuloksen kannalta merkityksettömäksi [7].

Taulukko 1. Kuparin ja alumiinin ominaisvastukset.

Materiaali	Lämpötilakerroin (1/K)
Kupari	0,00393
Alumiini	0,00431

Kaavalla 3 saadaan laskettua kiskon uuden resistanssin kohonneessa lämpötilassa. Mikäli materiaalin resistanssi 65 °C:ssa ei ole tiedossa, voidaan se selvittää muuttamalla kaavan lähtölämpötilaa, kuten luvussa 3.3. tehdään alumiinin resistanssin selvittämiseksi keskimääräisessä käyttölämpötilassa.

$$R(t) = R(65^{\circ}\text{C}) \times (1 + \alpha \times \Delta t) \quad [3]$$

jossa, α = Lämpötilakerroin

Δt = Lämpötilan muutos

2.3 Lämmön siirtymistavat virtakiskoissa

Syntynyt lämpöenergia siirtyy kiskoista kolmella tavalla: säteilemällä, kulkeutamalla ja johtumalla. Suunnittelumielessä lämpöenergian siirtymistavat on olennaista ymmärtää. Niiden optimaalinen hyödyntäminen takaa sen, että lämpö siirtyy kiskoista tehokkaasti. Kaikki lämpöenergia, joka ei siirry pois kiskoista, jää lämmittämään itse kiskoa. Tämän seurauksena itse kiskon lämpötila kasvaa, mikä kasvattaa ominaisvastusta lisäten resistiivisyyttä. Suurempi resistiivisyys taas kasvattaa noidankehämäisesti lämmöksi muuttuvan energian osuutta.

2.3.1 Johtuminen

Kolmesta lämmön siirtymistavasta vähiten merkittävä on johtuminen. Syynä tähän on kiskon lämpeneminen yhtäläisesti joka puolelta, jolloin lämpöä ei johdu kappaleen sisäisesti. Tämän vuoksi käytännön tasolla vain kulkeutumisen ja säteilemisen määrä on merkittävä. [8.]

Johtuminen on merkittävä tekijä vain, mikäli tarkastellaan kiskojen liitoskohtien lämpenemistä. Liitoksia voidaan toteuttaa monella eri tapaa, mutta periaatteena on liittää kaksi kiskoa yhdeksi johtimeksi esimerkiksi eri materiaalista valmistetuilla pulteilla. Tällöin lämpö johtuu kiskoista liitosmateriaaliin. Kiskoliitoksissa on huomioitava monta teknistä yksityiskohtaa liiallisen lämpenemisen välttämiseksi. Liian pienen aluslaatan käyttäminen liitospultissa tai liitoksen jättäminen liian löysäksi tarkoittaa, että kosketuspinta-ala kiskon ja liitospultin välillä pienenee. Tämä tarkoittaa suurempaa resistanssia ja liitoskohdat voivat ylikuumentua. [9.] Kokonaisuutta tarkasteltaessa liitoskohtiin johtuva lämpö voidaan jättää kuitenkin huomiotta.

2.3.2 Kulkeutuminen eli konvektio

Kulkeutumisessa eli konvektiossa lämpö siirtyy kiskon pinnasta ympärillä olevaan kylmempään ilmaan. Konvektion lämpöhäviöt riippuvat kiskojen muodosta. Kisko-

jen pystysuuntaiset pinnat luovuttavat enemmän lämpöä kulkeutumalla kuin kisko-
kojen vaakatasoiset pinnat. Vedan kokoojakiskot asennetaankin aina pystyasen-
toon, jolloin suuremman pinta-alan pinnat ovat pystyssä ja lämpö kulkeutuu par-
haiten kiskoista. Tästä syystä tehokkaammin lämpöä haihduttavan pystysivun
pinta-ala halutaan maksimoida, kun taas vaakasivun pinta-ala minimoida. Pysty-
ja vaakasuuntaisten kiskon sivujen kulkeutumalla siirtyvä lämpö noudattaa kaa-
voja. [8.]

$$W_h = \frac{5,92^{1,25}}{l_h^{0,25}} \quad [4]$$

jossa, W_h = Vaakasuuntaisen sivun luovuttama lämpöenergia

l_h = Vaakasuuntaisen sivun pituus

$$W_v = \frac{7,66^{1,25}}{l_v^{0,25}} \quad [5]$$

jossa, W_v = Pystysuuntaisen sivun luovuttama lämpöenergia

l_v = Pystysuuntaisen sivun pituus

2.3.3 Säteileminen

Säteilyssä lämpö siirtyy kiskoista ympäristöön riippuen kisko-
jen suhteellisesta emissiivisyydestä sekä kisko-
jen ja ympäristön välisestä lämpötilaerosta. Läm-
pösäteilyn määrä vaihtelee tapauskohtaisesti paljon. Toisin kuin lämmön kulkeu-
tumisessa, pinnalta emittoituvan lämpösäteilyn määrän määrää pintaa ympäröi-
vän materiaalin lämpötila. Jos kiskotila on tasaisesti saman lämpöinen, säteilee jo-
kainen kiskon pinnoista yhtä paljon. Useampi vierekkäinen kisko heikentää läm-
pösäteilyn määrän vastakkain olevilta sivuilta. [8.]

Mitä korkeampi kiskojen pinnan emissiivisyys on, sitä enemmän ne luovuttavat lämpöä säteilemällä. Alla olevassa taulukossa 2 ollaan kuvattu eri kiskojen emissiivisyyksiä verrattuna täydelliseen mustaan kappaleeseen, jonka emissiivisyys on suurin mahdollinen. [10.]

Taulukko 2. Suhteellinen emissiivisyys.

Materiaali	Emissiivisyys (ε)
Uusi kirkas kuparikisko	>0,1
Uusi kirkas alumiinikisko	>0,1
Hapettunut alumiini	0,1 – 0,4
Hapettunut kupari	0,3 – 0,7
Mustaksi maalattu	0,9
Täysin musta kappale	1

Emissiivisyyden nostamiseksi lähemmäs täydellisen mustan kappaleen arvoa, maalataan kiskoja usein mustalla maalilla. Tällöin kiskot luovuttavat lämpöä paremmin säteilemällä. Maalaaminen heikentää kuitenkin lämmön kulkeutumista kiskoista, sillä maalikerros toimii eristävänä pintana. Maalaamista varten on tärkeä arvioida, onko paremman säteilevyyden saavuttaminen heikomman kulkeutuvuuden arvoista. [8.]

Tärkeänä huomiona paljaiden kupari- ja alumiinikiskojen emissiivisyys kasvaa käytössä. Tämä johtuu kiskojen pinnan hapettumisesta, mikä tummentaa kiskon pintaa. Vaikka ilmiö on hyödyllinen lämpösäteilyn lisäämisessä, on se etenkin alumiinilla haitallinen, koska hapettunut kerros johtaa huonosti sähköä [11].

2.4 Kiskomateriaali

Virtakiskojen valmistusmateriaali keskittyy kahden vaihtoehdon, kuparin ja alumiinin välillä. Materiaaleja vertaillaessa kupari osoittautuu useimmissa kohdissa paremmaksi. Koska kumpikin materiaali jakautuu satoihin eri laatuihin, verrataan sähköisiä ominaisuuksia usein International Annealed Copper Standardin (IACS) kuparilaatuun [8]. Standardi on laadittu jo vuonna 1914 ja sen tarkoituksena on vakioida tarkat arvot kaupallisesti teknisiin sovelluksiin käytetylle kuparille [12]. Standardi on edelleen relevantti, sillä se tarjoaa järkevän vertailukohtan muiden materiaalien sähköisten ominaisuuksien vertailemiseen [13]. Materiaaleja verrataan prosentuaalisesti IACS-kuparin vastaavaan arvoon. Esimerkiksi 1350-alumiiniluokan sähkönjohtavuus on 61 % IACS ja kaupallisen hopean sähkönjohtavuus on 108 % IACS. Verratulla alumiinilla on siis standardikuparia heikompi johtavuus ja verratulla hopealla standardikuparia parempi johtavuus.

Fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kupari on lujempaa ja elastisempaa kuin alumiini. Kuparin korkeampi sulamispiste ja pienempi lämpölaajenemiskerroin ovat myös etuna virtakiskokäytössä. Alumiinin etuna on sen pienempi tiheys kupariin verrattuna; vaikka saman sähkönjohtavuuden aikaansaamiseksi tarvitaan suurempi määrä alumiinia, tulee alumiinikiskoista silti puolet kevyempiä kuin kuparikiskoista. [8.]

Sähköisten ominaisuuksia kannalta kupari on alumiinia parempi vaihtoehto. Kuparin sähköisten ominaisuuksia standardina käytettyyn IACS-arvoihin verrattuna alumiinin sähkönjohtavuus on 1,6 kertaisesti heikompi. Sähkönjohtavuus ja resistanssi ovat kääntäen verrannollisia toisiinsa, eli kuparin parempi sähkönjohtavuus merkitsee pienempää resistanssia. Samankokoisten kuparikiskojen resistanssi on siis 1,6 kertaisesti pienempi kuin alumiinikiskojen. [8.]

Lämpöhäviöiden näkökulmasta merkittävimmät arvot materiaalivertailussa ovat resistanssi, sähkönjohtavuus ja lämpötilakerroin. Edellisen luvun mukaisesti kupari

on kahdessa ensimmäisessä arvossa alumiinia parempi. Lämpötilakerroin α käytiin läpi luvussa 2.2, jossa sen todettiin olevan lähes saman suuruinen kummallekin aineelle. Suurimmassa osassa käyttötilanteista kupari on siis paljon parempi vaihtoehto vaikka myös kalliimpi.

2.5 Materiaalin laatujen luokittelu

Kun alumiinin ja kuparin väliltä on valittu käyttötilanteeseen paremmin sopiva materiaali, tulee huomio kääntää materiaalin laatuun. Aihe on todella laaja, sillä materiaalilaatujen kirjo on lähes rajaton.

Ensimmäinen jaottelu on jakaa materiaalilaadut puhtaisiin laatuihin tai seoksiin. Seoksissa useita eri aineita sekoitetaan toisiinsa. Käytössä olevia kupariseoksia on yli 400, esimerkkinä pronssi, nikkelikupari ja messinki [14]. Jokaisella seoksella on uniikki yhdistelmä ominaisuuksia, mutta koska seoksiin lisättävät muut aineet ovat lähes poikkeuksetta kuparia huonompia johtamaan sähköä, laskisi tämä kiskojen sähköjohtokykyä. Koska sähköjohtavuus on äärimmäisen tärkeä ominaisuus virtakiskoissa, halutaan niiden valmistusmateriaalina käyttää mahdollisimman puhdasta kuparilaatua.

Puhtaat kuparilaadut voidaan jakaa edelleen kolmeen luokkaan: hapettomaan kupariin, happipitoiseen kupariin ja deoksidoituun kupariin. Näistä luokista deoksidoitua kuparia käytetään vähiten sähköjohtamistarkoituksiin, sillä se on tarkoitettu käytettäväksi yleiskupariksi. Happipitoinen kupari taas toimii pääasiallisena materiaalina tavallisissa kuparikaapeleissa ja siitäkin valmistetaan toisinaan virtakiskoja. Hapeton kupari omaa parhaimman sähköjohtavuuden ja siksi se soveltuu parhaiten virtakiskojen valmistamiseen [14].

2.6 Hapeton kupari (Cu-OF)

Jotta kuparikisko voidaan ryhmitellä hapettomaksi kupariksi, tulee sen puhtauden olla yli 99,95 % pelkkää kuparia [14]. Tähän puhtauteen pääseminen edellyttää kiskojen valamista erikoisolosuhteissa, joissa sulan kuparivaluun ei pääse happea. Prosessi tehdään useimmiten suojakaasussa tai tyhjiöinduktiouunissa [15]. Käytännössä täysin puhtaaseen kupariin ei voida päästä, sillä epäpuhtauksia jää aina pieni määrä.

Hapettoman kuparilaadun sisällä on edelleen useampia luokkia kuten 99,97 % puhtausluokka, ja 99,99 % Cu-OFE elektroniikkaluokka. IACS-standardin mukaiseen kupariin verrattuna parhaat hapettomat kuparit saavuttavat jopa 102 % sähköjohtavuuden [14].

2.7 Metallisten pinnoitteiden vaikutus

Toisinaan virtakiskot halutaan pinnoittaa ohuella kerroksella muuta metallia. Yleisimmät syyt pinnoittamiselle ovat paremman suojauksen aikaansaaminen sähköiskuilta, liitoskohtien pitävyyden varmentaminen, korroosion esto ja kosmeettiset syyt. Yleisimmät metallipinnoitteena käytetyt aineet ovat tina, tina-lyijy seos, nikkeli ja hopea. [8.]

Suurimmassa osassa tapauksista pinnoite heikentää kiskojen suorituskykyä. Pinnoite toimii lämpöä eristävänä kerroksena, mikä lisää kiskojen lämpenemistä. Koska kojeistolle on määritelty käyttöpaikasta riippuva maksimi toimintalämpötila, ei kiskoja voida kuormittaa yhtä suurella virralla kuin vähemmän lämpeneviä paljaita kiskoja. Kuormitettavuutta ja lämmönsiirtymistä heikentävien vaikutusten lisäksi pinnoitteet lisäävät työn määrää ja valmistusmateriaalien kustannuksia. [8.]

Eristävä kerros ja kustannuskysymys voidaan nähdä myös positiivisessa valossa. Tinakerroksen hapettuessa sähköjohtavuutta menetetään vähemmän kuin kuparin hapettuessa. Mikäli tinaus pidentää kiskojen käyttöikä, ovat korkeammat val-

mistuskustannukset perusteltuja. [16.] Kysymys metallisten pinnoitteiden käyttämisestä onkin sovelluskohtainen kompromissi hyvien ja huonojen puolien punnitsemisesta.

Teknisesti paras käytetyistä pinnoitemateriaaleista on hopea. Sillä on jopa kuparia parempi sähkön- ja lämmönjohtavuus. Kuparia jalompana metallina se antaa paremman suojan korroosiolta, poissulkien rikkiä sisältävät ympäristöt, jotka aiheuttavat hopean tummumista. Ongelmaksi nousee kuitenkin kallis hinta.

2.8 Käyttökohteen vaikutus

Ympäristöllä ja kuormitustavalla on suora vaikutus virtakiskojen luovuttamiin lämpöhäviöihin. Kojeistolle asetettavat maksimitoimintalämpötilat määräävät suurimman mahdollisen kuormitettavuuden. Näin ollen suurimmat mahdolliset lämpöhäviöt saadaan laskemalla ne suurimman kuormituksen tilanteessa. Koska resistanssi on lämpötilariippuvainen, myös se on korkeimmillaan lämpötilan ollessa korkeimmillaan, vaikka kuormitusvirta vaikuttaa resistanssia enemmän lämpöhäviöihin.

Maksimitoimintalämpötila riippuu siitä, onko kojeisto tulossa käyttöön maalle vai merelle. Merellä pätevät tiukemmat säännöt joiden johdosta suurin sallittu lämpenemä on pienempi. Yleisesti maapuolella se on 120 °C ja meripuolella 105 °C. Arvo on määritelty alaa koskevissa standardeissa, mutta se on silti projekti- ja laivaluokituskohdainen. [17.]

Keskuksen kotelointiluokalla on myös vaikutusta. Tiiviimmin suojatuissa keskuksissa (IP 54) ilma ei pääse kiertämään ja vaihtumaan. Tämän johdosta niiden kuormitettavuus on pienempi kuin hyvin tuuletettujen keskusten.

2.9 Käyttötavan vaikutus

Laskentaa tehdessä tulee olla aina tietoinen kojeiston käytännön toiminnasta. Kiskot eivät kuormitu aina jatkuvasti samalla virralla. Mikäli kiskojen lämpöhäviöitä

laskettaessa katsotaan ainoastaan kiskojen syöttämien laitteiden nimellisvirtoja, saadaan lämpöhäviöt laskettua vain nimelliskäyttötilanteessa. Jos laitteita ei kuormiteta jatkuvasti nimellisvirralla, eivät tulokset olekaan totuudenmukaisia. Esimerkkejä muuttuvasta kuormituksesta mainittakoon ohituskäyttötilanne Drives-kojeistoissa sekä erilaiset hybridikojeistojen käyttötavat. [17.]

Drives-kojeistoissa mahdolliset ohituskäytöt kuormittavat taajuusmuuttajia nimellisvirralla ainoastaan kuorman alkuvaiheessa. Ohituskäytön tarkoituksena on ajaa kuorma, esimerkiksi moottori, käyntiin taajuusmuuttajan avulla, minkä jälkeen kytketään taajuusmuuttaja pois ja otetaan syöttö moottorille muualta. Etuna ohituskäytössä on taajuusmuuttajan tuomat hyödyt: käynnistysvirrat ja -momentti pienenevät jolloin moottori pystytään mitoittamaan normaalin käyttötilanteen mukaan. Taajuusmuuttajakäynnistyksen avulla energiankäyttö pienenee huomattavasti normaalin suoraan käyttöön verrattuna. Ohituskäyttöjen lämpöhäviöissä tulee laskea käynnistysvaiheen lämpöhäviöt ja ohituksen jälkeiset lämpöhäviöt erikseen ja luoda prosessin perusteella järkevä arvio keskimääräisistä häviöistä

Hybridikojeistoissa kuormitus riippuu akkuvarastojen käytöstä. Pienten kuormien aikana akkuja halutaan ladata, jotta niitä voitaisiin hyödyntää suurempien energiantarpeiden aikoina. Hybridisovelluksissa tulee olla tietoinen akkuvarastojen purku- ja latausajankohdista ja niiden vaikutuksesta eri kiskojen kuormituksiin.

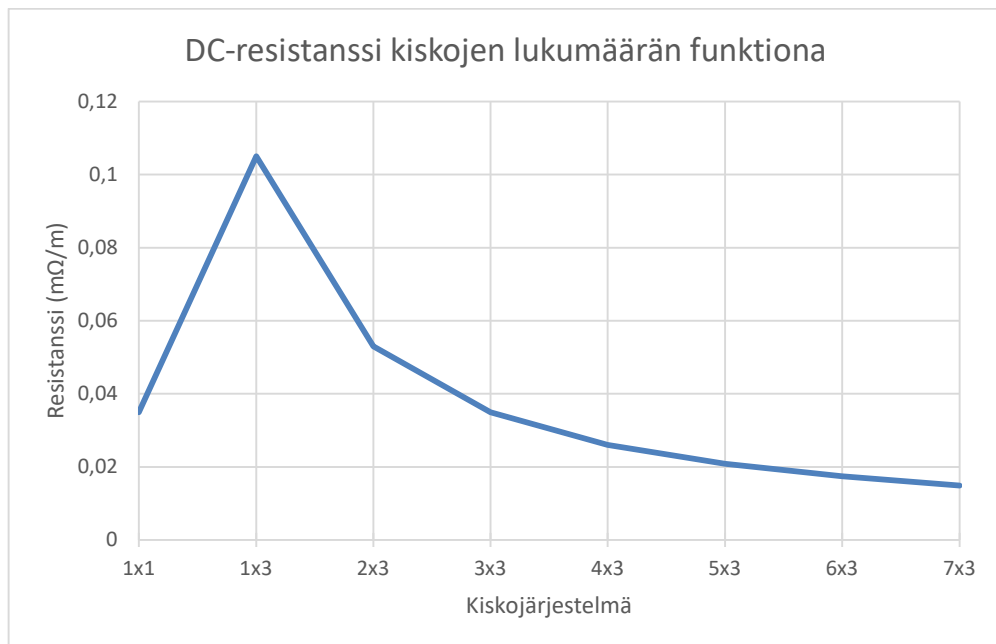
2.10 Useiden kiskojen vaikutus

Kojeistoihin on usein teknillisesti kannattavaa lisätä useampi kisko samalle vaiheelle. Taulukon 3 mukaisesti kiskopinta-alan moninkertaistaminen pienentää resistanssia jolloin lämpöhäviötkin pienenevät [6]. Ominaisvastuksen arvona on käytetty saksalaisen DIN 43 671 -standardin mukaista arvoa kuparikiskolle 65°C lämpötilassa $\rho(65^\circ\text{C}) = 20,9 \frac{\text{m}\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$.

Taulukko 3. Kiskojärjestelmän vaikutus DC-resistanssiin 60x10 kuparikiskolla.

Kiskosto	1x1	1x3	2x3	3x3	4x3
Lasku- kaava	$\frac{20,9 \times 1}{60 \times 10}$	$\frac{20,9 \times 3}{60 \times 10}$	$\frac{20,9 \times 3}{60 \times 10 \times 2}$	$\frac{20,9 \times 3}{60 \times 10 \times 3}$	$\frac{20,9 \times 3}{60 \times 10 \times 4}$
Tulos (mΩ/m)	0,0348	0,1045	0,052	0,0348	0,0261

Kuvassa 2 on visualisoitu samalle kiskotyypille resistanssin muutos kiskomäärän funktiona. Resistanssi pienenee proportionaalisesti jokaisen kiskon kohdalla, mutta lisätyistä kiskoista saatavan hyödyn huomataan myös pienentyvän jatkuvasti.

**Kuva 2.** DC-resistanssi kiskojen lukumäärän funktiona.

Kuormituskokeissa on myös todettu, että useiden kiskojen välillä virrat eivät jakaudu tasan kaikkien kiskojen välille. Keskeimmällä kiskostoa sijaitsevat kiskot kuormittuvat paljon reunimmaisista kiskoista suuremmilla virroilla. Epätasainen virran jakautuminen voi aiheuttaa eniten kuormittuvien kiskojen ylikuumentumista.

2.11 Virtalajin vaikutus

Vaihto- ja tasavirtakiskojen lämpenemisiä tarkastellessa on todettu tasavirtakiskojen lämpöhäviöt yksinkertaisemmiksi laskea. DC-kiskoissa virta kulkee yhtenäisesti kaikkialla kiskoissa. AC-kiskoissa taajuuden kasvaessa virta alkaa pakkautumaan johtavan kiskon reunoille, jolloin sitä kulkee vähemmän kiskon keskiosissa. Tätä ilmiötä nimitetään virranahdoksi (engl. skin effect). Virranahdo kasvatteaa kiskon resistanssia ja täten AC-kiskojen lämpöhäviöt ovat hieman vastaavia DC-kiskojen korkeampia. Virranahdon merkitys korostuu suurilla taajuuksilla ja suurten poikkipinta-alojen kiskoilla.

AC-kiskojen resistanssi saadaan selville huomioimalla resistanssiin virranahdon ja lähekkäisten kiskojen aiheuttamat keskinäisvaikutukset. Vaihtovirtailmiöiden aiheuttamista vaikutuksista käytetään aiheen kirjallisuudessa usein merkintää S . Näin ollen luvussa 2.1. esitelty kaava lämpöhäviöille saadaan pätemään vaihtovirta kiskoille kaavan 7 mukaisesti.

$$S = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad [6]$$

jossa, S = Vaihtovirtaresistanssin kerroin

R_{ac} = Vaihtovirtaresistanssi

R_{dc} = Tasavirtaresistanssi

$$P_{ac} = R_{dc} \times I^2 \times S \quad [7]$$

jossa, P_{ac} = Lämpöhäviöt vaihtovirralla

Taulukkoon 4 on koottu joidenkin erikokoisten kiskojärjestelmien vaihtovirtaker-
toimen S suuruutta. Taulukon resistanssiarvot R_{ac} ja R_{dc} on kerätty DIN 43 671
-standardin aineistosta. Kertoimen S todetaan kasvavan eksponentiaalisesti kisko-
kokoon ja lukumäärän kasvaessa. Useilla suunnitteluratkaisuilla pyritään pitämään
kerroin niin pienenä kuin mahdollista.

Taulukko 4. Vaihtovirtakertoimen S suuruus eri kiskoilla.

Kiskokoko	1x1	3x1	3x2	3x3
40 x 10 mm	$\frac{0,054}{0,052} = 1,04$	$\frac{0,162}{0,156} = 1,04$	$\frac{0,084}{0,078} = 1,08$	$\frac{0,061}{0,052} = 1,17$
80 x 10 mm	$\frac{0,029}{0,026} = 1,12$	$\frac{0,087}{0,078} = 1,12$	$\frac{0,049}{0,039} = 1,26$	$\frac{0,039}{0,026} = 1,50$
120 x 10 mm	$\frac{0,020}{0,017} = 1,18$	$\frac{0,060}{0,051} = 1,18$	$\frac{0,036}{0,026} = 1,39$	$\frac{0,028}{0,017} = 1,65$

2.12 Vaihtovirtailmiöt

Syvyys, jolla virranahto vaikuttaa (engl. skin depth), määräytyy pääasiassa materi-
aalin resistiivisyyden ja taajuuden perusteella alla olevan kaavan mukaisesti. Mi-
käli kisko on paksumpi kuin laskusta saatu tulos syvyydelle, vaikuttaa virranahto
AC-kiskon johtavuuteen. Pieni osa virrasta kulkee myös vaikutussyvyyttä sisem-

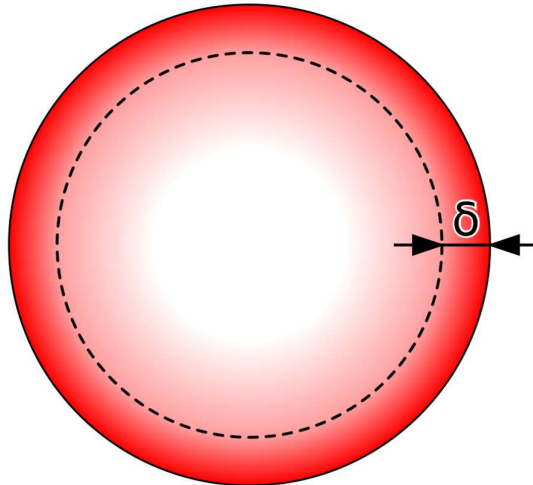
mässä osassa, mutta noin 85 % virrasta rajoittuu virranahdon syvyysrajaan [8.] Kuvaan 3 on visualisoitu virrantiheyden jakautuminen ilmiössä. Kaavasta 8 nähdään, että taajuuden kasvaessa luku pienenee. Näin ollen suuremmalla taajuudella virranahdo muuttuu merkityksellisemmäksi.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times \mu_0 \times f}} \quad [8]$$

jossa, δ = Virranahdon vaikutussyvyys

μ_0 = Tyhjiön permeabiliteetti

f = Taajuus



Kuva 3. Visualisointi virran tiheydestä AC-johtimella.

Kun kaavaan 8 sijoitetaan käytetty taajuus 50Hz ja kiskojen CUOF kuparimateriaalin resistiivisyys normaalissa käyttölämpötilassa $\rho(65^\circ\text{C}) = 20,9 \frac{\text{m}\Omega \times \text{mm}}{\text{m}}$ saadaan virranahdon vaikutussyvyys laskettua kaavassa 9.

$$\delta = \sqrt{\frac{20,9 \times 10^{-3}}{4 \times \pi^2 \times 10^{-7} \times 50}} = 10,29 \text{ mm} \quad [9]$$

Virranahdolla ei siis ole juurikaan merkitystä alle 10 mm paksun säteen omaavilla kiskoilla. Tätä paksummilla kiskoilla virranahto alkaa vaikuttamaan kuitenkin enenevässä määrin.

Alumiinikiskoilla virranahdon vaikutus on hieman pienempi. Johtamalla laskelmat virranahdolle alumiinin resistiivisyysarvoilla, saadaan vaikutussyvyyksille suhdeluku. [18.] Tästä ei ole kuitenkaan 50 Hz taajuudella hyötyä sillä alumiinikiskojen tulee olla huonomman sähkönjohtavuuden vuoksi pinta-alaltaan 1,6 kertaa suurempia kuin kuparikiskojen.

$$\frac{\delta_{Al}}{\delta_{Cu}} = \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} \approx 1,28 \quad [10]$$

jossa, δ_{Al} = Alumiinin virranahdon vaikutussyvyys

δ_{Cu} = Kuparin virranahdon vaikutussyvyys

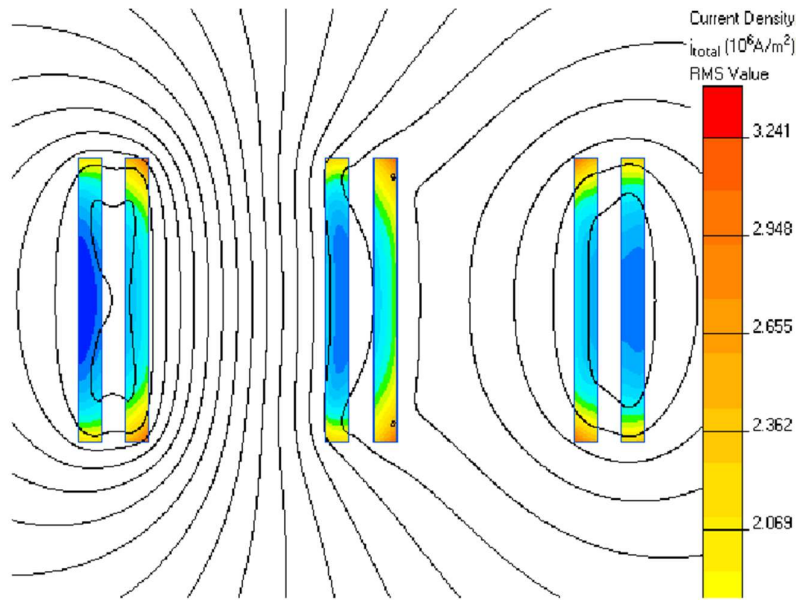
ρ_{Al} = Alumiinin resistiivisyys

ρ_{Cu} = Kuparin resistiivisyys

2.12.1 Keskinäisvaikutus

Keskinäisvaikutus (engl. Proximity effect) on toinen vaihtovirtailmiö, jonka takia vaihtovirtaresistanssi on tasavirtaresistanssia suurempi. Ilmiö syntyy, mikäli järjestelmässä on useita virrallisia kiskoja lähellä toisiaan. Keskinäisvaikutuksessa läheisten kiskojen magneettikentät vaikuttavat toisiin kiskoihin muuttaen niiden virran tiheyttä entisestään. Keskinäisvaikutuksen suuruus riippuu virrasta ja kiskojen välisestä etäisyydestä. Kahden virtaa kuljettavan johtimen välillä on aina voima,

mutta keskinäisvaikutus esiintyy ainoastaan vaihtovirtakiskoilla, sillä vain vaihtovirralla on induktiota. [19.] Kuvassa 4 on kuva FEM-mallinnuksesta 2500A:n virralla kuormitetusta 2x3 kiskojärjestelmästä.



Kuva 4. 2x3 AC-kiskojärjestelmä FEM-mallinnettuna.

Keskinäisvaikutuksia voidaan pienentää kasvattamalla kiskojen välistä etäisyyttä. Etäisyydet ilmoitetaan suhteessa kiskojen korkeuteen. Taulukossa 5 on esitetty etäisyyden kasvattamisen vaikutus. Kun kiskojen välinen etäisyys on 2 kertaa niiden pituuden suuruinen, vie keskinäisvaikutus noin 15 %:a virranjohtamiskyvystä. Taulukon 5 esimerkissä etäisyyden tuplaaminen vähentää keskinäisvaikutuksen merkityksen 5 %:iin. [19.]

Taulukko 5. Keskinäisvaikutuksen etäisyys 2000 - 3000 A virta-alueella.

Kiskojen välinen pituus	Keskinäisvaikutuksen merkitys
$D \geq 2 \times h$	n. 15 %
$D \geq 4 \times h$	n. 5 %

Etäisyyden kasvattaminen ei rajatussa kiskotilassa ole usein mahdollista. Mikäli kiskoston kolme vaihetta on jaettu usealle johtimelle, on samaa vaihetta olevien johtimien sijoittaminen mahdollisimman kauas toisistaan käytännöllinen tapa vähentää keskinäisvaikutusta [19]. Näin sekä kiskojen tasavirtaresistanssi että jokaisen vaiheen luoma magneettikenttä puolittuvat. Pienimpi magneettikenttä vähentää keskinäisvaikutusta.

2.12.2 Vaihtovirtaresistanssin selvittäminen

Vaihtovirtailmiöistä johtuvan kuormituskerroimen S arvioimiseen on määritetty useita laskukaavoja, muun muassa kansainvälisessä standardissa IEC 60287-1-1. Kuormituskerroin riippuu kuitenkin lukuisista tekijöistä ja perustuu atomitaso ilmiöihin, joten laskentakaavat menevät todella monimutkaiseen matematiikkaan tai pätevät vain rajattuihin tilanteisiin. Tiivistetysti voidaan sanoa, ettei analyyttisiä ratkaisuja ole vaihtovirtakerroimen S selvittämiseksi [8]. Kyse on tarkemmasta ja vähemmän tarkemmasta laskennallisesta arviosta.

Laskukaavojen sijasta kuormituskerroin on luotettavampi ja vaivattomampi selvittää FEM-mallituksen avulla. Mallinnohjelmissä pystytään simuloimaan halutun kiskotilanteen sähköinen käyttäytyminen yleisiä kaavoja huomattavasti pienemmällä virheprosentilla.

Yksinkertaisin metodi kerätä valmiit arvot vaihtovirtaresistanssille standardien avulla. Yleisimpien suorakulmaisten kiskojärjestelmien vaihtovirtaresistanssit on

esitetty saksalaisessa DIN 43 671 -standardissa. Mikäli haluttua järjestelmää ei ole standardissa, voidaan sen vaihtovirtaresistanssi arvioida analysoimalla jo olemassa olevaa dataa. Arvioinnissa tulee punnita vaihtovirtailmiöiden painoarvoa. Arviot vaihtovirtaresistanssista on esitetty luvussa 3.3.

3 KEHITTÄMISPROSESSIN JA -TOIMINNAN KUVAUS

3.1 Lähtökohdat laskentaprosessiin

Käytännön lämpöhäviölaskennassa ollaan lähtökohtaisesti jo tietoisia siitä, millaiset virtakiskot järjestelmään tulee. Kojeiston oleellisena komponenttina virtakiskot halutaan mitoittaa ja suunnitella heti projektin alussa lähtötietojen selvittyä. Projekteissa halu lämpöhäviöiden selvittämiseen tulee yleensä asiakkaalta myöhemmässä osassa projektia. Laskentaprosessin ensimmäisenä työvaiheena onkin tutustuminen toteutettavaan projektiin ja siinä olevien kiskojen spesifikaatioiden ylös kirjaaminen.

Virtakiskot halutaan jaotella ensimmäisenä tasa- tai vaihtovirtakiskoihin. Sovelluksia, jotka sisältävät kumpaakin virtalajia, ovat esimerkiksi hybridikojeistot, laivaliikenteessä käytetyt grid converterit ja muut taajuusmuuttajalähtöjä sisältävät kojeistot. Jako tasa- ja vaihtovirtakiskoihin on olennainen, sillä niiden laskukaavat poikkeavat toisistaan teoriaosuudessa käsitellyistä vaihtovirtailmiöistä johtuen.

Kiskot on käytännönläheisintä listata aloittaen kojeistoa syöttävästä kiskosillasta ja siirtyen järjestyksessä eteenpäin aina asiakkaan lähtöjä syöttäviä kiskoja. Jokaisesta erillisestä kiskosta otetaan ylös leveys, korkeus, pituus, kuormittava virta, materiaali ja johtimien lukumäärä. Kiskosillan kuormitusvirta on kojeistossa käytetty nimellisvirta. Sama virta kulkee pääkatkaisijan läpi kokoojakiskoille. Tämän jälkeen virta jakaantuu kokoojakiskoilla kojeiston eri osiin, joten kuormitusvirta tulee laskea sen mukaan, kuinka montaa laitetta se syöttää.

Mikäli kojeiston käyttölämpötila poikkeaa 65°C :sta (vakio­lämpötila + käytöstä johtuva lämpenemä), täytyy tämä huomioida laskennassa. Teoriataustan mukaisesti resistanssi kasvaa verrannollisesti lämpötilan kasvaessa.

3.2 Laskentatyökalussa tavoitellut ominaisuudet

3.2.1 Helppokäyttöisyys

Työkalu toteutetaan Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Se tulee VEOn yleiseen käyttöön, joten tavoitteena on luoda työkalusta mahdollisimman helppokäyttöinen. Tämä saavutetaan laatimalla tarkka ohjesivu, jossa on selostettu vaihe vaiheelta työkalun käyttö. Helppokäyttöisyyttä pyritään edistämään myös minimoimalla käyttämiseen tarvittavat välilehdet, valikot ja manuaalinen kirjoittaminen. Tavoitteena on, että työkalulla pystyttäisiin suorittaa laskenta vain kahta välilehteä hyödyntäen: ohjesivua ja laskentasivua. Valikoiden minimoimisessa laskenta halutaan saada aikaiseksi mahdollisimman vähillä parametreilla. Valmiilla vaihtoehdoilla täytettyjen alasvetovalikoiden suosiminen manuaalisesti kirjoitettavien parametrien avulla hyödynnetään kaikkialla missä se on mahdollista.

3.2.2 Käyttäjän virheiden minimointi

Toinen helppokäyttöisyyttäkin sivuava haluttu ominaisuus on käyttäjän mahdollisten virheiden minimoiminen. Ominaisuutta pyritään edistämään informoimalla käyttäjää, missä yksikössä mikin suure ilmoitetaan. Työkaluun merkitään selkeästi, että esimerkiksi kiskon pinta-ala halutaan nimenomaan neliömillimetreinä ja virta ampeereina. Teoriataustaa selvittäessä etenkin kaksi arvoa nousivat varteen otettavasti esille potentiaalisen yksikkövirheen aiheuttajana; materiaalikohtainen ominaisresistiivisyys ρ ja siitä johdettu kiskon resistanssi R . Aihetta käsittelevissä teksteissä ja kuparia jalostavien yritysten datalehdillä ominaisresistiivisyys löytyi ilmaistuna ainakin seuraavia yksiköitä käyttäen:

$$\rho = \frac{m\Omega \times \text{mm}^2}{m} = \frac{n\Omega}{m} = \frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \quad [11]$$

Ensimmäinen ilmaisutapa ominaisresistiivisyydelle ottaa kantaa johtimen pinta-alaan ja sopii siksi suoraan määrätyn kokoisen virtakiskon resistanssin laskemiseen. Kun ominaisresistiivisyyden avulla selvitetään määrätyn kokoisen virtakiskon resistanssi kaavan 12 mukaisesti, saadaankin epäintuitiivisesti vastauksen yksiköksi milliohmeja eikä ohmeja.

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\left(\frac{m\Omega \times mm^2}{m}\right) \times m}{mm^2} = m\Omega \quad [12]$$

Esimerkki osoittaa, että laskemalla pelkkiä lukuarvoja ilman tietoa niiden yksiköistä mahdollisuus virheisiin on suuri. Tämän vuoksi etenkin resistanssin arvot halutaan laskea taustalla ja muuttaa selkeiksi yksiköiksi käyttäjän nähtäville minimoiden sekaannukset yksiköissä.

Virheitä pyritään minimoimaan myös helpottamalla käyttäjää tarkistamaan, että hän on kirjoittanut oikein haluamansa kiskot ja niiden spesifikaatiot. Työkalu tarjoaa mahdollisuuden kirjoittaa jokaiselle kiskolle informatiivisen nimen ja merkata missä kojeiston kentistä kisko sijaitsee. Tämä ei vaikuta laskentaprosessiin millään tavalla, mutta helpottaa käyttäjää tarkistamaan, että hän on ottanut laskentaan huomioon kaikki kiskot ja että niiden sijainti vastaa todellista sijaintia.

Tämän lisäksi työkalu visualisoi käyttäjälle kiskojärjestelmän yleiskuvan kuvan 5 mukaisesti. Kun käyttäjä valitsee alasetoalikkolla haluamansa kiskojärjestelmän, ilmestyy sen visualisointi välittömästi näkyviin. Tämä helpottaa sen varmistamista, että haluttu järjestelmä vastaa välityksiltään kojeistoon aseteltuja todellisia kiskoja.

Select busbar system	Busbar system overview
1 x 3	
2 x 3	
3 x 3	
4 x 3	
6 x 3	
8 x 3	

Kuva 5. Kiskojärjestelmän visualisointi.

3.2.3 Mahdollisuus kehittämiseen

Kolmas haluttu ominaisuus laskentatyökaluun on mahdollisuus sen parantamiseen. Data ja kaavat pyritään tuomaan siinä muodossa, että uuden tiedon lisääminen tai vanhan tiedon päivittäminen ei riko aiempia tuloksia eikä kaavoja. Uusien kiskotyyppien tuominen halutaan mahdollistaa ilman, että laskentakaavoja pitää päivittää. Tavoitteena on hyödyntää toistuvia rakenteita taulukosta arvoja hakevissa kaavoissa. Näin ollen vaikka tulevaisuudessa taulukoita joutuisi lisäämään, on kaavojen rakennetta helpompi jatkaa koskemaan myös uutta taulukkoa kuin että koko kaavan joutuisi rakentamaan uudelleen.

Työkalun ulkoasu ja taulukoidut arvot pyritään rakentamaan siten, että tulevaisuudessa joku toinen aiheeseen tutustunut henkilö kykenisi myöskin päivittämään työkalua. Tätä edesautetaan merkitsemällä ylös kaavoja ja pieniä muistiinpanoja taulukointisivuille, joista saa käsityksen siitä, miten arvot ovat alun perin saatu aikaiseksi työkaluun. Tämän lisäksi työkaluun tehdään päivityshistoria-sivu, johon merkitään tehdyn kehitystoiminnan kuvaus ja tekopäivämäärä.

3.3 Resistanssin arvot

Laskennan tavoitteena on taulukoida mahdollisimman tarkka arvo jokaiselle mahdolliselle kiskostovariaatiolle, joita VEOn projekteissa esiintyy. Arvot kerätään DIN 43 671 -standardista, mikäli kiskojärjestelmälle on olemassa valmis arvo. Standardi sisältää sekä DC- että AC-resistanssin, mutta rajoittuu kiskon pinta-alaan arvoon 120 x 10 mm ja johdinmäärässä 3 x 3 järjestelmään. Tämän lisäksi standardi rajoittuu vain kuparikiskoihin. Sen periaatteita voidaan kuitenkin soveltaa myös muusta materiaalista tehtyihin kiskoihin. Järjestys, jossa resistanssin arvot on järkevintä taulukoida, on seuraava:

- 1) DC-resistanssi puuttuville kuparikiskokoille
- 2) DC-resistanssi puuttuville kuparikiskojärjestelmille
- 3) DC-resistanssi alumiinikiskokoille
- 4) DC-resistanssi alumiinikiskojärjestelmille
- 5) AC-resistanssi kuparikiskoille
- 6) AC-resistanssi alumiinikiskoille

DIN 43 671 -standardin ulkopuolelle jäävien kiskokokojen resistanssi lasketaan ensin luvussa 2.1 esitetyllä kaavalla käyttämällä poikkipinta-alan arvona halutun kiskon poikkipinta-alaa. Kun jokaiselle VEolla käytetylle yksittäiselle kiskokoolle on olemassa resistanssin arvo, aletaan seuraavaksi taulukoimaan arvoja standardin ulkopuolelle jääville kiskojärjestelmille. DC-resistanssi osittuu luvun 2.10 mukaisesti proportionaalisesti järjestelmän kiskomäärän mukaan. Näin ollen puuttuvien järjestelmien resistanssi voidaan yleistää yhteen laskukaavaan:

$$R_{Nx3} = \frac{R_{1x3}}{N} \quad [13]$$

jossa, R_{Nx3} = Resistanssi halutulla kolmivaiheiselle kiskojärjestelmälle

R_{1x3} = Resistanssi 1x3 kiskojärjestelmälle

N = Kolmivaiheisten kiskojen lukumäärä

Alumiinista valmistettujen kiskojen resistanssien selvittämiseksi täytyy tietää ensin alumiinin ominaisresistiivisyys. Kiskoihin käytetty alumiinilaatu on EN WA-6101B T6, jonka ominaisresistiivisyydeksi on ilmoitettu $30 \text{ n}\Omega/\text{m}$ [20] [21]. Resisttiivisyys on ilmoitettu $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, joten se on laskettava luvussa 2.1 esitetyllä kaavalla kiskotilojen vakioämpötilaan $65 \text{ }^\circ\text{C}$:een. Lämpötilakorjatuksi ominaisresistiivisyydeksi saadaan $35,1 \text{ n}\Omega/\text{m}$. Luku on 1,68-kertainen samassa lämpötilassa olevan kuparin ominaisresistiivisyyteen verrattuna. Koska tiedetään, että alumiinin sähkönjohtavuus on 60 % heikempi kuin kuparin, voidaan tuloksen oikeellisuus vielä tarkistaa kaavan 14 mukaisesti.

$$\frac{1}{\left(\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{35,1 \text{ n}\Omega/\text{m}}{20,9 \text{ n}\Omega/\text{m}}\right)} = \frac{1}{1,68} = 0,595 \approx 60 \% \quad [14]$$

Ominaisresistiivisyyden selvittämisen jälkeen toistetaan sama laskentaprosessi alumiinikiskojen taulukoille kuin mitä kuparisille kiskoille tehtiin. Tämän työvaiheen jälkeen kaikki DC-resistanssit kummallekin materiaalille on taltioitu. Seuraava työvaihe on lisätä molempiin taulukoihin arvioidut AC-resistanssit. Prosessi aloitetaan poikkipinta-alaltaan pienimpien kiskojen pienimmistä kiskojärjestelmistä, sillä niissä vaihtovirtailmiöiden kerroin S on pienin ja usein jopa ≈ 1 . Poikkipinta-alan tai johdinten lukumäärän kasvaessa vaihtovirtaresistanssi kasvaa kiihtyvästi kummankin kasvaessa samanaikaisesti kasvun määrä korostuu entisestään.

Jotta työkalun data pohjautuisi standardiin, on AC-resistanssin arvot puuttuville kiskovariaatiolle pyritty jatkamaan lähdestandardin DIN 43 671 pohjalta. Luvun 2.11. taulukossa 4 on esitetty lähdestandardissa olevien kiskovariaatioiden vaihtovirtakertoimia. Taulukon kertoimien suhteita vertaamalla huomataan, että kertoimen kasvu on lähes saman suuruinen seuraavaan kiskojärjestelmään siirryttäessä. Kaavassa 15 on verrattuna 10mm x 120mm kiskojen kertoimen kasvun määrää, josta nähdään vaihtovirtakertoimen suurentuvan noin 1,2 kertaa edellisen järjestelmän kertoimeen verrattuna.

$$\frac{S_{2x3}}{S_{1x3}} = \frac{1,39}{1,18} = 1,177 \approx \frac{S_{3x3}}{S_{2x3}} = \frac{1,65}{1,39} = 1,187 \quad [15]$$

Tämän perusteella voidaan tehdä aiempaan tietoon perustuvan oletuksen, että seuraavan kiskojärjestelmän kerroin S_{4x3} olisi 1,2-kertainen aiemman järjestelmän kertoimeen S_{3x3} verrattuna. Oletuksien pohjalta vaihtovirtakertoimen arvo olisi standardista puuttuvilla kiskojärjestelmillä taulukon 6 mukainen. Kertoimen huomataan vastaavan käyttäytymiseltään aihetta käsittelevien tutkimuksien tuloksia [22], vaikka todellinen resistanssi saattaa poiketa oletetusta arvosta.

Taulukko 6. Arvioitu vaihtovirtakerroin 120x10mm kiskolle.

	S_{4x3}	S_{6x3}	S_{8x3}
$S = \frac{R_{ac}}{R_{dc}}$	1,98	2,38	2,85

Samaa periaatetta voidaan soveltaa kaikkiin kiskokokoihin sekä kuparilla että alumiinilla. Kun kaikki resistanssin arvot ollaan taulukoitu, täytyy työkalussa huomioida vielä onko kisko mahdollisesti maalattu tai tinattu. Eri pinnoitteen käyttö huomioidaan kertoimella, joka joko suurentaa tai pienentää vastaavan paljaan kiskon

arvoa riippuen siitä luovuttaako pinnoitettu kisko enemmän vai vähemmän lämpöä. Pinnoitteiden vaikutus on vähäinen; esimerkiksi maalaamisen kannalta suosituimmassakin käyttöolosuhteessa kisko jäähtyy vain 12 % tehokkaammin, samalla kun virrankantakyky heikkenee 6 % [8]. Tämän vuoksi pinnoitteen vaikutuskertoimelle annetaan arvoja 0,9-1,1 väliltä.

3.4 Laskutoimitukset työkalussa

Jokaisen erilaisten kiskovariaation taulukoinnin jälkeen toteutetaan erillinen laskentasisiv, jossa määritellään mikä variaatio projektissa on käytössä. Variaation määrittelyn lisäksi spesifioidaan, kuinka pitkä kyseinen kisko on ja kuinka monta ampeeria siinä kulkee virtaa. Laskentasisivun hakukaava noutaa halutun kiskovariaation resistiivisyyden taulukosta. Hakukaava toteutetaan joukolla IF-komentoja, joiden avulla paikannetaan oikean kiskomateriaalin taulukko, sekä INDEX- ja MATCH-komentoja, joiden avulla paikannetaan taulukosta oikean koon ja oikean kiskojärjestelmän omaava solu.

Oikean kiskovariaation resistiivisyysarvon hakemisen jälkeen se lämpötilakorjataan kaavan 3 mukaisesti. Ohjelmaan on merkitty solu, johon pyydetään ilmoittamaan lämpötilan muutos. Mikäli soluun ei anna erityistä arvoa, laskee työkalu kiskot vakioidussa 65 °C lämpötilassa, jolloin resistiivisyys ja lämpötilakorjattu resistiivisyys ovat sama luku. Lämpötilakorjauksen toteutustyyli nitoutuu yhteen helpokäyttöisyys-tavoitteen kanssa, koska nyt todennäköisin kiskolämpötila on myöskin vakioitu vaihtoehto laskennassa.

Lämpötilakorjatun resistiivisyyden perusteella työkalu laskee suoraan ilmoitetun pituuden ja kuormitusvirran mukaisesti syntyvät lämpöhäviöt ja ilmoittaa tuloksen watteina. Lämpöhäviöt saadaan kaavojen 1 ja 2 perusteella. Tässä yhteydessä yksiköiden kerrannaiset korjataan, jotta vastauksen yksikkö ei olisi milliwattia vaan wattia. Etuliitteen korjaaminen liittyy luvussa 3.2.2. käsiteltyyn ongelmaan, ja siksi

työkalu suorittaa yksikkömuunnokset taustalla laskennassa eikä itse käyttäjän tarvitse keskittyä yksikkömuunnoksiin.

3.5 Koko kiskoston häviölaskenta

Laskennan kannalta kiinnostava tulos on koko kojeiston kiskoston lämpöhäviöt. Tulos saadaan yksinkertaisesti laskemalla työkalussa erikseen jokaisen kiskovälin lämpöhäviöt ja summaamalla nämä yhteen. Tämä toteutetaan SUM-komennolla, joka ilmoittaa tuloksen Total heat loss -soluun. Sekä AC- että DC-kiskoilla on oma vastaussolunsa. Kyseisen solun tulos on se, joka raportoidaan eteenpäin asiakkaalle.

Työkalussa on myös rivien lisäys- ja poistamispainikkeet kaikkien kiskovälien kirjaamista varten. Painikkeet on toteutettu VBA-makrokoodeilla. Rivinlisäystä käytettäessä makro luo uuden rivin kiskolistan viimeisimmän rivin perään. Kaikki laskentaan tarvittavat kaavat ja valikot kopioituvat automaattisesti riville. Lisäksi soluihin, joihin on tarkoitus kirjoittaa informaatio kyseisestä kiskovälistä, tulee automaattisesti oletusteksti. Tämä helpottaa käyttäjää hahmottamaan tekstikentät, ja täyttämään niihin kyseisen kiskovälin tiedot. Rivinpoistomakro toimii päinvastaisesti, eli poistaa kiskolistan viimeisimmän rivin.

3.6 Lämpöhäviöiden raportointi

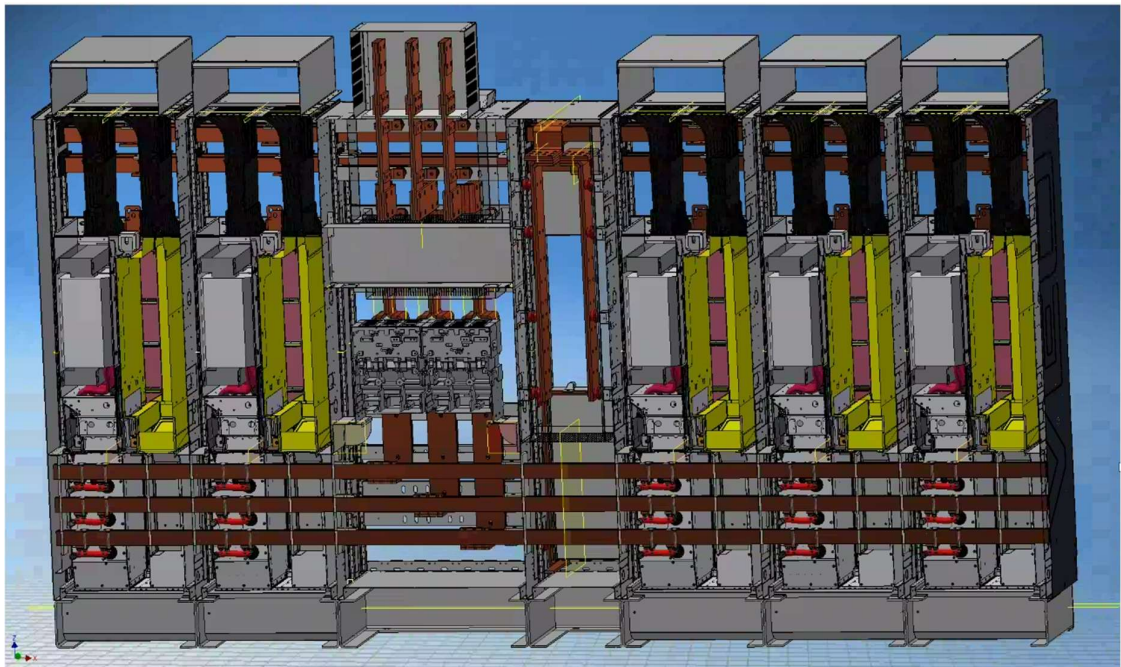
Sekä tämän kehittämisprosessin että oikealle projektille tehtävän lämpöhäviölaskennan viimeisimpänä huomionaiheena on tulosten raportointi asiakkaalle. Raportointi tehdään VEOn omalle lämpöhäviöraporttipohjalle. Siihen kirjataan kiskoston lämpöhäviöiden lisäksi kojeiston komponenttien lämpöhäviöt, jotka saadaan eri työkalujen kautta. Raportin tarkoituksena on siis yhdistää kiskoston sekä komponenttien häviöt projektin kokonaislämpöhäviöiksi, ja välittää tämä tieto asiakkaalle. Raportointivaihe voidaan aloittaa, kun käyttäjä on suorittanut laskelmat kiskoille, tarkistanut saadun tuloksen ja hankkinut komponenttien lämpöhäviötiedot toisen prosessin kautta.

Kehittämisen prosessin laajuuteen kuuluu raportin ulkoasun päivittäminen ja siistiminen. Tämä koostuu pääosin esimerkiksi logojen, otsikoiden ja tietosarakkeiden muuttamisesta esteettisemmiksi. Värimaailma halutaan muuttaa VEO:n visuaalisten ohjesääntöjen mukaiseksi. Raportin tietosarakkeissa on jo tarpeellinen informaatio, mutta niiden järjestystä muuttamalla saadaan informaatio esitettyä selkeämmin ja loogisemmin.

4 TULOKSEN ARVIONTI

4.1 Käytännön laskutuloksia

Työkalua on testattu laskemalla käytännön lämpöhäviöt olemassa olevan kojeiston kiskoille. Kojeisto oli omalla kiskosillalla varustettu taajuusmuuttajakaapitus eli se sisälsi sekä AC- että DC-kiskoston. Kojeiston laskennassa käytetyt nimellisvirrat olivat 3500 AAC ja 3112 ADC. Kojeistoa syötettiin kiskosillalla kolmannen kerran yläosasta, josta se johdettiin katkaisijalta AC-kokoojakiskostolle. Tämän jälkeen virta johdettiin DC-puolelle yksittäisten taajuusmuuttajalaitteiden kautta. DC-kokoojakiskostolta teho syötetään eteenpäin asiakkaan käyttöön.



Kuva 6. Kojeiston kiskosto.

Huomioitavana yksityiskohtana on virran jakautuminen. AC-kokoojakiskolle saatuttaessa nimellisvirta tulee jakaa osiin. Vaikka käytännössä kokoojakiskosto on samaa rakennetta, kuormittavat sen vasen ja oikea puoli eri virroilla, sillä syöttökentän vasemmalla puolella on vain kaksi laitetta kun taas oikealla puolella on kolme laitetta. Tällöin myös neljän metrin kokonaispituus kiskolle jakaantuu samoihin osiin kuin virta.

$$I_N = I_{K1} + I_{K2} = \frac{2}{5} \times I_N + \frac{3}{5} \times I_N \quad [16]$$

jossa, I_N = Kojeiston nimellisvirta

I_{K1} = Vasemmanpuoleisen kiskohaaran virta

I_{K2} = Oikeanpuoleisen kiskohaaran virta

Koska kojeistossa on viisi kappaletta taajuusmuuttajalaitteita, tulee virta jakaa edelleen laitekohtaisten kiskojen lämpöväiöiden laskemiseksi. Jokaista taajuusmuuttajaa kuormittava virta on tällöin viidenneksen kokonaisvirrasta eli 700A.

Sama jako tapahtuu päinvastaisesti DC-puolen kokoojakiskoissa, jossa jaettava kokonaisvirta I_N on 3500 A:n sijasta 3112 A. Siellä virta yhdistyy ensin laitekohtaisesta kokoojakohtaiseksi ja asiakkaan kentässä kokonaisvirraksi. DC-puolella on virran jakautumisen lisäksi toinen huomioitava yksityiskohta; laitteiden ja kokoojan väli on toteutettu kuparisia liuskoja hyödyntämällä. Tämä ei vaikuta käytännössä laskentaan muuta kuin normaalista poikkeavalla kiskokoolla. Yksityiskohta kuitenkin osoittaa, että samoin kuin syöttävä kiskosilta voidaan etenkin pienemmissä kojeistoissa korvata kaapeloinnilla, voidaan myös kojeiston sisällä olevat virtakiskot toteuttaa vaihtoehtoisesti liuskoilla tai kaapeleilla.

Projektin kiskot listattiin ylös taulukoiden 7 ja 8 mukaisesti. Taulukoista käy ilmi kaikki laskentaan tarvittavat spesifikaatiot sekä tarkka tieto siitä, mikä kisko on kyseessä ja missä se sijaitsee.

Taulukko 7. Vaihtovirtakiskoston spesifikaatiot.

AC Kiskosto	Kenttä	Kiskokoko	Järjestelmä	Virta (A)	Pituus (m)
Kiskosilta	03	60 x 10	4 x 3	3500	3
Silta-katkaisija	03	120 x 10	2 x 3	3500	1,9
Katkaisija-kokooja	03	120 x 10	2 x 3	3500	1
AC kokooja 1	01-02	60 x 10	3 x 3	1400	1,68
AC kokooja 2	04-06	60 x 10	3 x 3	2100	2,52
Kokooja - Laite	01-06	50 x 10	2 x 3	700	5 x 0,6

Taulukko 8. Tasavirtakiskoston spesifikaatiot.

DC Kiskosto	Kenttä	Kiskokoko	Järjestelmä	Virta (A)	Pituus (m)
DC Kokoojat	01-02	60 x 10	4 x 2	1244,8	1,68
DC Kokoojat	04-06	60 x 10	4 x 2	1867,2	2,52
Laite – Kokooja	01-06	25 x 12	1 x 1	700	5 x 0,3
DC asiakkaalle	04	120 x 10	3 x 2	3112	1,5

Näiden lähtötietojen perusteella työkalu pystyi laskemaan tulokset lämpöhäviöille. Vaihtovirtapuolen häviöiksi laskettiin 3461W (joista kiskosillan osuus oli noin 1500W) ja tasavirtapuolen häviöiksi laskettiin 675W. Laskennan suorittaminen todelliselle projektille oli hyvä tapa varmistua siitä, että työkalu on käyttökelpoinen ja toimii oletetusti.

4.2 Huomioita työkalusta käytössä

Työkalu vastaa ominaisuuksiltaan tavoiteltua ja toimii tarkoitetun mukaisesti. Sen käyttäminen tekee lämpöhäviöiden laskemisesta nopeaa, mikäli käyttäjä saa kiskojen tarvittavat spesifikaatiot selville. Lukujen 3.2.1. ja 3.2.2. mukaisesti työkalun käyttäminen on tehty mahdollisimman helpoksi ja huolimattomuusvirheiden mahdollisuus laskentatyökalua käytettäessä on saatu pieneksi. Jokainen projekti sisältää kuitenkin omat sovelluksensa, eikä kaikkiin tuleviin sovelluksiin voida varautua työkalun suunnitteluvaiheessa, joten kehittäminen on jatkuvien parannuksien prosessi. Jo ensimmäisessä käytännön laskennassa törmättiin tilanteeseen, jossa virtakisko oli korvattu liuskalla, minkä resistiivisyyttä ei oltu taulukoitu työkaluun.

Vaikka huolimattomuusvirheiden mahdollisuus työkalua käytettäessä olisikin saatu minimoitua, voi virheitä tapahtua myös ennen laskentaa. Jos työkaluun syötettävät arvot eivät ole todenmukaisia, ei laskennan tuloskaan ole. Tämä koskee erityisesti kuormittavaa virtaa. Kojeistoa ei useinkaan kuormiteta 100 % nimellisvirralla eikä luvun 2.9. mukaisesti kuormitusvirran arvo ole aina vakio esimerkiksi ohitus- tai hybridikäytöissä. Laskentaa tehdessä tulee olla tietoinen siitä, millä virralla kojeistoa todella kuormitetaan.

Esimerkiksi edellisen luvun 4.1. projektin tulokset laskettiin olettaen, että kojeistoa kuormitetaan jatkuvasti sillä virralla, jolle kojeisto on mitoitettu. Mikäli parempaa tietoa todellisesta kuormituksesta on saatavilla, voidaan laskenta suorittaa käyttäen sekä kojeistolle mitoitettua suurinta virtaa että keskiarvoista kuormitusvirtaa. Raportoinnissa keskiarvoisesta kuormituksesta käytetään nimitystä tasoituserroin (engl. simultaneity factor). Luku kertoo, kuinka monta prosenttia keskiarvoinen kuormitus on kojeistolle mitoitetusta kuormituksesta.

Raportoinnissa asiakkaalle ilmoitetaan lämpöhäviöt laitteille mitoitettulla nimellisvirralla, lämpöhäviöt keskiarvoisella todellisella kuormitusvirralla ja näiden arvojen välinen tasoituserroin. Esimerkiksi 3500 A virralla mitoitettun kojeiston, jota keskimäärin ajetaan vain 80 % täydestä tehosta, raportoidut arvot olisivat taulukon 9 mukaiset.

Taulukko 9. Raportoitavia arvoja poikkeavalla kuormituksella ajettaessa.

Raportoitava arvo	Selite
$P_{h,3500}$	Lämpöhäviöt 3500A virralla ajettuna
$S_f = 80 \%$	Simultaneity factor
$P_{h,2800}$	Lämpöhäviöt 2800A virralla ajettuna

4.3 Laskennan virheen arviointi

Koska vaihtovirtailmiöiden (Skin- ja proximity effect) kerrointa S on vaikea arvioida, on tärkeä analysoida siinä esiintyvän virheen suuruutta ja merkitystä kokonaistulokseen. Toistaiseksi ei ole saatavilla käytännön tuloksia, joten virhearvioinnissa joudumme tyytymään teoriapohjaiseen päättelyyn siitä, paljonko vaihtovirtakertoimen virhe voisi olla.

Vaihtovirtakertoimen virheen suuruuden arvioinniksi voidaan katsoa aihetta käsittelevien tutkimuksien tuloksia. Electrical Engineering Portalissa julkaistussa teknisessä artikkelissa arvioitiin kolmivaiheisen kiskojärjestelmän S kertoimen arvon alarajaksi 1,6 ja ylärajaksi 1,85 [22]. Näiden perusteella voimme laskea kaavan 17 mukaan keskimääräisen virheen kertoimelle. Tätä tulosta voidaan käyttää referenssinä omassa virhearvioinnissa.

$$S_{ER} = \frac{\Delta S}{S_{ka}} \times 100 \% = \frac{\frac{(1.85-1.6)}{2}}{(1.6+\frac{(1.85-1.6)}{2})} \times 100 \% = \pm 7,25 \% \quad [17]$$

jossa, S_{ER} = Vaihtovirtakertoimen suhteellinen virhe

ΔS = Vaihtovirtakertoimen muutos

S_{ka} = Vaihtovirtakertoimen keskiarvoinen tulos

Varteenotettavasta lähteestä laskettu keskimääräinen virhe auttaa saamaan luotettavuutta virheen analysointiin. Saatua tulosta voidaan käyttää virhearvioinnin lähtökohdana. On perusteltua olettaa, että 1x3 ja 2x3 järjestelmissä virhe on tätä pienempi, sillä vaihtovirtakerroin S on kyseisillä järjestelmillä artikkelin kerroinaluetta pienempi. Artikkelissa olevan kertoimen alue vastaa eniten 3x3 ja 4x3 kertoimien aluetta, joten näiden järjestelmien virheen voidaan olettaa vastaavan eniten

laskettua virhettä. Suuremmilla kiskojärjestelmillä 6x3 ja 8x3 virhe voi olla todennäköisesti suurempikin kuin laskettu virhe. Täten jokaiselle järjestelmälle saadaan oletettu virhe taulukon 10 mukaisesti.

Taulukko 10. Oletettu virhe vaihtovirtailmiöiden kertoimessa.

Kiskojärjestelmä	1x3, 2x3	3x3, 4x3	6x3, 8x3
Virhe	$S_{ER} = \pm 5 \%$	$S_{ER} = \pm 7,25 \%$	$S_{ER} = \pm 10 \%$

Esimerkiksi 120x10mm kokoisella kuparikiskolla resistiivisyys olisi muutamilla eri kiskojärjestelmillä virheen huomioimisen jälkeen taulukon 11 mukaisissa rajoissa.

Taulukko 11. Resisttiivisyyden virherajat 120x10mm kokoisella kiskolla.

Kiskojärjestelmä	2x3	3x3	6x3
Virhe S_{ER}	$\pm 5 \%$	$\pm 7,25 \%$	$\pm 10 \%$
Vaihtovirtakerroin S	1,38	1,64	2,38
Resistiivisyys $R_{AC} \left(\frac{\mu\Omega}{m^2} \right)$	34,2-37,8	26,0-30,0	18,6-22,7

Virhelaskennassa muut lämpöhäviöihin vaikuttavat tekijät on oletettu virheettömiksi. Kuormittavan virran oletetaan olevan täysin sama kuin laskettu virta ja johdinten DC-resistanssin oletetaan myös olevan 100 % tarkka. Toisin sanoen ainut laskennassa virhettä tuottava tekijä on vaihtovirtailmiöiden suuruus.

Kun sovelletaan virhemarginaalit luvun 4.1 projektin AC-kiskoihin, saadaan arvio vaihtovirtaresistanssin kokonaisvirheestä. Taulukossa 12 on osoitettu projektin pienin ja suurin lämpöhäviö virhemarginaaleilla sekä kokonaisvirheprosentti projektille. Koska olettamuksena on, että virhe syntyy vain AC-puolella vaihtovirtaker-toimen epätarkkuudesta, laskee virheetön DC-osuus kokonaisvirhettä.

Taulukko 12. Virhelaskenta sovellettuna käytännön projektiin.

Tilanne	Lämpöhäviöt	Virhe (vain AC puoli)	Virhe (koko kojeisto)
Ei virhettä	3461 W	0 %	0 %
Alaraja	3179 W	8,15 %	6,8 %
Yläraja	3743 W	8,15 %	6,8 %

4.4 Työkalun ja prosessin kehitys tulevaisuudessa

Työkalu tarjoaa hyvän lähtökohdan lämpöhäviöiden laskentaan. Laskentaprosessia voidaan kuitenkin useilla tavoilla kehittää varmemmaksi ja tarkemmaksi. Yhtenä teemana työssä onkin ollut kartoittaa kehittämistä vaativia paikkoja tulevaisuuden parannuksille.

Tärkeänä kehityskohteena olisi saada käytännön tuloksia, joita voitaisiin verrata teorian keinoin laskettuihin tuloksiin. Pelkkä kiskoston resistanssin mittaaminen auttaisi tuomaan vankemman pohjan laskentatuloksille, vaikka on huomioitavaa, että kuormittamattoman kojeiston resistiivisyyden mittaaminen ei anna kuvaa kuormitetun kojeiston vaihtovirtaresistanssille. Teorian ja käytännön yhteensopi-vuutta saataisiin vahvistettua myös kuormituskokeilla ja lämpötilamittauksilla.

Teoriakeinoin saavutettavia parannuksia työkaluun saataisiin luvun 2.12.2 mukaisesti ottamalla AC-resistanssin selvittämiseen tarkempia laskenta- ja simulointimenetelmiä. Etuina monimutkaisempien teoriakeinojen kautta lähestyttäessä käytännön toteutuksiin nähden on, että laskeminen ja simulointi ovat usein edullisempia kuin erinäisten kokeiden järjestäminen. Lisäksi erilaisia kiskovariaatioita on helpompi mallintaa teoriassa muuttamalla näiden parametreja kuin järjestämällä lukuisia mittauskokeita jokaiselle eri variaatiolle eri kuormitusilanteissa. Haasteena monimutkaisempien teoriakeinojen hyödyntämisessä on vaade uudentyyppiselle kokemukselle yrityksen sisällä sekä simuloinnin tapauksessa myös vaade uusille ohjelmistoille, esim. FEM-mallinnusohjelmille.

Työkalussa kehitettäviä yksityiskohtia olisi mahdollisesti tarkemmat ilmaiset kenttäkohtaisille lämpenemille ja monipuolisempi laskenta kuormitusvirralle. Tällä hetkellä käyttäjä pystyy merkitsemään jokaiselle kiskolle kenttäkohtaisen sijainnin, mutta tätä hyödynnetään vain tulosten oikeellisuuden tarkistamisessa. Mikäli lämpöhäviöiden jakautuminen kenttäkohtaisesti tiedettäisiin tarkemmin, voitaisiin jäähtytystä kohdentaa paremmin sitä eniten tarvitseviin kenttiin. Kuormitusvirran monipuolisempi laskenta auttaisi tarkemmissa tuloksissa tapauksissa, joissa kuormitus muuttuu ajan funktiona. Lämpöhäviöt muodostuvat luvun 2.1 kaavan 1 mukaisesti virran toisesta potenssista, eli virralla on resistanssia suurempi vaikutus häviöihin. Tämän vuoksi virran käyttäytyminen olisi tärkeä tietää mahdollisimman tarkasti. Haasteena tarkemmassa virran laskennassa on saada laskenta toimimaan sovelluksille, joissa halutaan lämpöhäviöt muillekin tilanteille kuin keskimääräiselle kuormitusvirralle.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli hyvä johdatus teoriapohjaisten teemojen toisiinsa sovittamisesta ja tutkitun tiedon soveltamisesta. Tutkinnon aikana opetetuista taidoista ja tietämyksestä oli paljon apua työssä. Työ näytti kuitenkin hyvin käytännön maailmassa tyyppisemmän puolen laskentatyöstä, jossa analyttisiä vastauksia ei ole ja jossa joudutaan tyytymään valistuneisiin arvioihin luetettavaan tietoon nojaten. Lisäksi työ johdatti hyvin kehitysprosesseihin yrityksissä; sekä kyseinen lämpöhäviöiden selvittämisprosessi että tuotekehitys laajemminkin ovat jatkuvaa pientä parantelua ja pyrkimystä vastaamaan muuttumassa maailmassa muuttuvia tarpeita.

Monet työn aiheet ovat hyvin tutkittuja ja haasteena olikin löytää työn kannalta relevantti tieto aiheesta uppoutumatta kuitenkaan liian syvälle. Toisena haasteena oli tiedonrippeiden yhdistäminen ja laskentatyökalun tekeminen mahdollisimman monipuoliseksi. Monen läpikäydyn ilmiön vaikutus vaihtelee useiden eri tekijöiden mukaan ja onkin vaikeaa tehdä laskentatyökalu sopimaan jokaiseen mahdolliseen tilanteeseen.

Lopputuloksena syntynyt lämpöhäviöiden laskentatyökalu ja uusittu raporttipohja tulevat VEO Oy:n käyttöön. Tuotosten toivotaan helpottavan ja nopeuttavan työtehtävän suorittamista ja antamaan tulokset vakuuttavassa muodossa asiakkaalle. Lisäksi työkalun tekemisen aikana noteerattujen havaintojen pyritään olemaan avuksi lämpöhäviöiden ja lämpenemien selvittämisprosessin kehittämisessä.

LÄHTEET

- 1 Ramsila J. Opinnäytetyön ohjaaja, VAMK. Palaveri 14.11.2023
- 2 Saranpää A. VEDA 5000 Suunnitteluopas. [Intranet]
- 3 VEO Oy. VEDA-pienjännitekojeistot -esite. <https://veo.fi/fi/kojeistot-ohjausjarjestelmat/veda-pienjannitekojeisto/>
- 4 VEO Oy. Hybridikojeistot <https://veo.fi/fi/kojeistot-ohjausjarjestelmat/hybridikojeistot/>
- 5 Kataja, J. Suunnittelija, VEO Oy. Haastattelu 05.08.2023
- 6 DIN 43 671. (2012). Rated currents of busbars E-Cu. Deutsches Institut für Normung
- 7 Dillinger J.H. (2003). The temperature coefficient of resistance of copper. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(10\)90872-7](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(10)90872-7)
- 8 Chapman D, Norris T. (2014). Copper for Busbars : Guidance for Design and Installation. Copper development association. <https://p537794.webspaceconfig.de/wp-content/uploads/2019/11/Copper-for-Busbars.pdf>
- 9 Millard, J. A comprehensive guide to jointing busbars. Storm power components. <https://stormpowercomponents.com/a-comprehensive-guide-to-jointing-busbars-which-method-is-best/>
- 10 The Engineering ToolBox. (2003). *Surface Emissivity Coefficients*. https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

- 11 Pryor, L, Schlobohm, R., & Brownell, B. (2008). A Comparison of Aluminum vs. Copper as used in Electrical Equipment. <https://library.industrial-solutions.abb.com/publibrary/checkout/Alum-Copper?TNR=White%20Papers%7CALum-Copper%7Cgeneric>
- 12 International Annealed Copper Standard (IACS) <https://archive.org/details/copperwiretables31unituoft/page/n3/mode/2up?view=theater>
- 13 Jaiswal, S. (2022). International Annealed Copper Standard <https://alchetron.com/International-Annealed-Copper-Standard>
- 14 Scandinavian Copper Development Association. Kupari & Kupariseokset <https://www.kupari.com/kupari-ja-kupariseokset/>
- 15 Wiho Industrial. (2021). Hapeton kupari <https://wihometals.com/fi/whats-the-oxygen-free-copper/>
- 16 Ningbo Jintian Copper (Group) Co., Ltd. The Benefits of Tin Plated Copper Bars for Electrical Applications. <https://jtcopper.com/the-benefits-of-tin-plated-copper-bars-for-electrical-applications.html>
- 17 Kallio M. Tiiminvetäjä, VEO Oy. Haastattelu 09.10.2023
- 18 Ducluzaux A. (1983). Extra losses caused in high current conductors by skin and proximity effects. Cahier Technique Schneider Electric no. 83. https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/Extra_losses_caused_in_high_current_conductors.pdf
- 19 K.C. Agrawal. (1987). IEEE Guide for Metal-Enclosed Bus and Calculating Losses in Isolated-Phase Bus. in ANSI/IEEE Std C37.23-1987 , vol., no., pp.1-58, 6 July 1987, DOI: 10.1109/IEEESTD.1987.79653.
- 20 Matmatch. EN 573-3 Grade AW-6101B T6 <https://matmatch.com/materials/minfc35871-en-573-3-grade-aw-6101b-t6>

- 21 Hydro Extruded Solutions AB. (2019). <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20EN%20AW%206101B.PDF?docId=7825>
- 22 Csanyi E. (2012). Effective resistance busbars. Electrical engineering portal. <https://electrical-engineering-portal.com/effective-resistance-of-busbars>