



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Arsi Mäenpää

Puistomuuntamoiden tyypitestiä mallinnus ja analysointi eräällä simulointiohjelmistolla

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka, DI

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

| | | | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----|
| Tekijä: | Arsi Mäenpää | | |
| Tutkielman nimi: | Puistomuuntamoiden tyyppitestien mallinnus ja analysointi eräällä simulointiohjelmistolla | | |
| Tutkinto: | Diplomi-insinööri | | |
| Oppiaine: | Sähkötekniikka | | |
| Työn valvoja: | Kimmo Kauhaniemi | | |
| Työn ohjaaja: | Nora Möttönen | | |
| Työn tarkastaja: | Hannu Laaksonen | | |
| Valmistumisvuosi: | 2026 | Sivumäärä: | 85 |

TIIVISTELMÄ:

Puistomuuntamon pääasiallinen tehtävä on koteloida jakelumuuntaja, joka muuntaa 20 kilovoltin jakeluverkon jännitteen 400 voltin jakeluverkolle sopivaksi. Puistomuuntamoon on lisäksi sijoitettuna keskijännite- ja pienjännitejakeluverkon käyttöön ja suojaukseen tarvittavia komponentteja. Puistomuuntamo koostuu pääpiirteittäin keskijännitekojeistosta, muuntajatilasta ja pienjännitekeskuksesta, joita koskevat omat laitestandardinsa kansallisten standardien lisäksi. Laitestandardit määrittelevät laitteille tehtävät tyyppitestit, joilla todistetaan tietyn laitemallin turvallisuus ja suorituskyky. Osa tyyppitesteistä ovat hankalia toteuttaa, aikaa sekä resursseja vieviä, jonka vuoksi laitteen suorituskykyä tulisi voida arvioida jo ennen tyyppitestejä esimerkiksi simulointiohjelmiston avulla.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää mitä tyyppitesteiksi puistomuuntamolle tehdään, mitä simulointiohjelmistoja on markkinoilla ja voiko COMSOL Multiphysics ohjelmistoa käyttää osana kohdeyrityksen tuotekehitystä ja tyyppitesteiksi valmistautumista. Työn teoriaosudessa esiteltiin pintapuolisesti COMSOL Multiphysics simulointiohjelmiston lisäksi muita simulointiohjelmitoja, syvennyttiin puistomuuntamon lämpenemätestiin ja puistomuuntamon oikosulkuvirtakestoisuustestiin sekä niihin liittyviin teoria-alueisiin. Simulointiosuudessa tarkasteltiin puistomuuntamon muuntajatilaa ilmanvaihdon skenaarioita sekä puistomuuntamon pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuutta.

Simulointien tuloksien perusteella voitiin todeta COMSOL Multiphysics simulointiohjelmiston sopivan kohdeyrityksen käyttöön, mutta kehoitettiin kuitenkin tulevaisuudessa tutustumaan myös muihin simulointiohjelmitoihin, sillä kohdeyrityksellä on etsinnässä ensimmäinen simulointiohjelmito tuotekehityksen käyttöön.

AVAINSANAT: CFD, lämmönsiirto, oikosulkuvirta, simulointi

Tekoälyn käyttö diplomityössä

Tässä diplomityössä on käytetty tekoälytyökalua simulointimallien vianhakuun.

Käytetyt tekoälytyökalut:

Microsoft 365 Copilot GPT 5.5

Diplomityöntekijä ottaa täyden vastuun opinnäytetyön sisällöstä. Mukaan lukien osiot, joissa tekoälytyökaluja on hyödynnetty.

Sisällys

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Johdanto | 15 |
| 1.1 | Työn tausta | 15 |
| 1.2 | Työn tavoite ja tutkimuskysymykset | 16 |
| 1.3 | Kohdeyritys | 16 |
| 2 | Puistomuuntamo ja siihen liittyvät vaatimukset | 17 |
| 2.1 | Tarkasteltava puistomuuntamo | 18 |
| 2.2 | SFS ja SFS-EN IEC standardit | 19 |
| 2.3 | Puistomuuntamon standardit | 20 |
| 3 | Simulointiohjelmistot | 23 |
| 4 | Lämpenemätesti ja oikosulkuvirtakestoisuustesti | 25 |
| 4.1 | Puistomuuntamon lämpenemätesti | 25 |
| 4.1.1 | Muuntajan jäähdytystavat | 29 |
| 4.1.2 | Muuntajatilän painovoimaisen ilmanvaihdon laskenta | 32 |
| 4.2 | Muuntamon pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustesti | 35 |
| 4.2.1 | Oikosulkuvirran laskenta sähköverkossa | 36 |
| 4.2.2 | Oikosulkuvirtojen vaikutusten laskenta jäykissä kiskostoissa | 44 |
| 5 | Mallintaminen ja simulointi | 56 |
| 5.1 | Muuntajatilän ilmanvaihdon simulointi | 56 |
| 5.1.1 | Simulointimallin rakenne | 56 |
| 5.1.2 | Ilman virtaus öljynkeräysaltaan kanssa | 58 |
| 5.1.3 | Ilman virtaus ilman öljynkeräysallasta | 60 |
| 5.1.4 | Pohdinta | 62 |
| 5.2 | Oikosulkuvirtojen vaikutusten simulointi | 62 |
| 5.2.1 | Simulointimallien rakenne | 63 |
| 5.2.2 | Dynaamisten vaikutusten simulointi | 68 |
| 5.2.3 | Termisten vaikutusten simulointi | 75 |
| 5.2.4 | Pohdinta | 78 |
| 6 | Yhteenveto | 80 |

Kuvat

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kuva 1. Puistomuuntamo ELMO 1000 4xD2 (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026). | 17 |
| Kuva 2. ELMO 1000 4xD2 periaatepiirros (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026). | 19 |
| Kuva 3. Puistomuuntamon standardit. | 22 |
| Kuva 4. Muuntajan lämpenemän mittaus ilman ympärillä olevaa muuntajatilaa (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46). | 26 |
| Kuva 5. Muuntajan lämpenemän mittaus muuntajan ollessa muuntajatilassa (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46). | 27 |
| Kuva 6. Keskijännitekojeiston, muuntajan ja pienjännitekeskuksen syöttöjärjestelyt lämpenemätestissä (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 48) | 28 |
| Kuva 7. Öljymuuntajan kuormituskäyrä (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 97) | 29 |
| Kuva 8. ONAN muuntajan jäähtytyksen rakenne, lämmönlähteet ja lämmönvaihto (Zhang ym., 2024). | 31 |
| Kuva 9. Eri oikosulkuvirrat ja niiden vaikutukset komponenttien mitoitukseen (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 37) | 37 |
| Kuva 10. Oikosulkuvirta ajan funktiona (International Electrotechnical Commission, 2016). | 38 |
| Kuva 11. Säteisverkon sijaiskytkentä oikosulkuvirtaa laskettaessa (International Electrotechnical Commission, 2016) | 39 |
| Kuva 12. Kuvaaja kertoimen k_{12} määrittämiseen (International Electrotechnical Commission, 2012a). | 45 |
| Kuva 13. Kertoimien määrittäminen oikosulun tyypin ja jälleenkytkennän mukaan (International Electrotechnical Commission, 2012a). | 47 |
| Kuva 14. Kertoimen β määrittäminen tukirakenteen mukaan (International Electrotechnical Commission, 2012a). | 48 |
| Kuva 15. Suorakulmaisen kappaleen taivutusvastuksen laskeminen (Tammertekniikka, 2023). | 49 |
| Kuva 16. Kertoimen q määrittäminen (International Electrotechnical Commission, 2012a). | 50 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kuva 17. Nimellisen oikosulkuvirtatiheyden määrittäminen kuparivirtakiskolle (ehyet viivat) oikosulun kestoajalla yksi sekunti (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 44). | 52 |
| Kuva 18. Nimellisen oikosulkuvirtatiheyden määrittäminen alumiinivirtakiskolle (ehyet viivat) oikosulun kestoajalla yksi sekunti (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 44). | 53 |
| Kuva 19. Muuntajatilän simulointimalli. | 57 |
| Kuva 20. Öljynkeräysallas osittain ilmanvaihtoaukon edessä. | 58 |
| Kuva 21. Muuntajatilän ilmanvirtaus öljynkeräysaltaan kanssa. | 59 |
| Kuva 22. Muuntajatilän ilmanpaine öljynkeräysaltaan kanssa. | 59 |
| Kuva 23. Muuntajatilän simulointimalli ilman öljynkeräysallasta. | 60 |
| Kuva 24. Muuntajatilän ilmavirtaus ilman öljynkeräysallasta. | 61 |
| Kuva 25. Muuntajatilän ilmanpaine ilman öljynkeräysallasta. | 61 |
| Kuva 26. COMSOL Multiphysics ohjelmistolla mallinnettu pienjännitekiskosto. | 63 |
| Kuva 27. Oikosulkuvirran dynaamisten vaikutusten simuloinnin simulointipuu. | 65 |
| Kuva 28. Lorentzin voima virtakiskojen kuormituksena. | 66 |
| Kuva 29. Virtakiskoihin vaikuttava painovoima. | 66 |
| Kuva 30. Tukieristimiin vaikuttava painovoima. | 66 |
| Kuva 31. Oikosulkuvirtojen termisten vaikutusten simuloinnin simulointipuu. | 67 |
| Kuva 32. Oikosulkuvirrat vaihevirtakiskoston dynaamisen kestoisuuden simuloinnissa. | 68 |
| Kuva 33. Alumiiniseoksen väsymislujuuspiirros (de Souza Rabelo ym., 2017, s. 3154). | 70 |
| Kuva 34. Tukieristinmateriaalin väsymislujuuspiirros (Sonsino & Moosbrugger, 2008, s. 1283) | 72 |
| Kuva 35. Oikosulkuvirta PEN-kiskoston dynaamisen kestoisuuden simuloinnissa. | 73 |
| Kuva 36. Oikosulkuvirrat vaihevirtakiskojen termisen kestoisuuden simuloinnissa. | 76 |
| Kuva 37. Vaihevirtakiskojen loppulämpötilat. | 76 |
| Kuva 38. Oikosulkuvirta PEN-kiskoston termisen kestoisuuden simuloinnissa. | 77 |
| Kuva 39. PEN-kiskoston loppulämpötilat. | 78 |

Taulukot

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Taulukko 1. COMSOL Multiphysics ohjelmiston hyödyllisiä moduuleita (COMSOL ab, 2026a). | 23 |
| Taulukko 2. Öljyeristeisen muuntajan jäähdytystavat (International Electrotechnical Commission, 2012b, s. 8–9). | 30 |
| Taulukko 3. Ekosuunnittelun vaiheen Tier 2 mukaiset enimmäishäviötehot (Konsolidoitu teksti: Komission asetus (EU) N:o 548/2014, 2019). | 32 |
| Taulukko 4. Virtausnopeuden käsin laskennassa käytetyt arvot. | 35 |
| Taulukko 5. Jännitekerroin oikosulkuvirtojen laskentaan (International Electrotechnical Commission, 2016). | 39 |
| Taulukko 6. 1000 KVA jakelumuuntajan likimääräisen oikosulkuvirran laskennassa käytetyt arvot. | 44 |
| Taulukko 7. Kupari- ja alumiinivirtakiskojen venymärajoja (Alumeco, 2025; Metal Center Group, 2025). | 51 |
| Taulukko 8. Kuvaajien nimellisen oikosulkukestoisuuden määrittämiseen käytetyt ominaisuudet. | 53 |
| Taulukko 9. Käsin lasketut voimavaikutukset ja taivutusjännitykset vaiheen L2 kiskoston osissa. | 54 |
| Taulukko 10. Simuloinnissa käytetyn tietokoneen tekniset tiedot. | 56 |
| Taulukko 11. Ilman ominaisuudet Muuntajatilän ilmavirtauksen simuloinnissa. | 57 |
| Taulukko 12. Muuntajatilän ilmavirtauksen simuloinnissa käytetyt parametrit. | 58 |
| Taulukko 13. Oikosulkuvirtojen dynaamisten vaikutusten simuloinnissa käytetyn alumiinin ominaisuudet. | 64 |
| Taulukko 14. Oikosulkuvirtojen dynaamisten vaikutusten simuloinnissa käytetyn polyamidin ominaisuudet (ALBIS, 2026). | 64 |
| Taulukko 15. Oikosulkuvirran dynaamisten vaikutusten simuloinnin parametrit. | 68 |
| Taulukko 16. Vaihevirtakiskoihin vaikuttaneet jännitykset. | 69 |
| Taulukko 17. Vaihevirtakiskojen suurimmat siirtymät. | 71 |
| Taulukko 18. Vaihevirtakiskojen tukieristimiin vaikuttaneet jännitykset. | 71 |
| Taulukko 19. PEN-kiskostoon vaikuttaneet jännitykset. | 73 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Taulukko 20. PEN-kiskoston tukieristimiin vaikuttaneet jännitykset. | 73 |
| Taulukko 21. PEN-kiskoston suurimmat siirtymät. | 74 |
| Taulukko 22. Pulttien lisäyksen jälkeiset jännitykset. | 75 |
| Taulukko 23. Oikosulkuvirran termisten vaikutusten simuloinnin parametrit. | 75 |

Kreikkalaiset symbolit

| | |
|----------------|--------------------------------------------------------|
| μ_0 | Tyhjiön permeabiliteetti [H/m] |
| μ_r | Suhteellinen permeabiliteetti [1] |
| α | Kiskoston tukirakenteista riippuva kerroin [1] |
| α_{20} | Resistanssin lämpötilakerroin 20 celsiusasteessa [1/K] |
| α_k | Kytkeähetki [rad] |
| β | Vaihekiskojen tuennasta johtuva kerroin [1] |
| Δp | Paine-ero [Pa] |
| ΔT | Sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero [K] |
| Δt_1 | Muuntajan ylänesteen lämpenemä ilman muuntajatilaa [K] |
| Δt_2 | Muuntajan ylänesteen lämpenemä muuntajatilassa [K] |
| ϑ_b | Virtakiskon alkulämpötila [°C] |
| ϑ_e | Virtakiskon loppulämpötila [°C] |
| κ | Sysäyskerroin [1] |
| ρ | Tiheys [kg/m ³] |
| ρ_o | Resistiivisyys [Ω m] |
| ρ_{ulk} | Ulkoilman tiheys [kg/m ³] |
| σ_{20} | Sähkönjohtavuus 20 celsiusasteessa [S/m] |
| σ_a | Jännitysamplitudi [Pa] |
| $\sigma_{m,d}$ | Virtakiskoon kohdistuva taivutusjännitys [Pa] |
| σ_{max} | Enimmäisjännitys [Pa] |
| σ_{min} | Vähimmäisjännitys [Pa] |
| φ | Vikapiirin impedanssin vaihekulma [rad] |
| ω | Kulmataajuus [rad/s] |

Muut symbolit

| | |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| A | Ilmanvaihtoaukon pinta-ala [m ²] |
| a | Vaihekiskojen keskilinjoiden välinen etäisyys [m] |
| A_{Joh} | Lämmön johtumiseen käytettävä pinta-ala [m ²] |
| a_m | Vaihekiskojen tehollinen etäisyys [m] |
| A_S | Virtakiskon poikkipinta-ala [m ²] |
| b | Kappaleen z-akselin suuntainen mitta [m] |
| C_d | Purkauserroin [1] |
| C_{max} | Suurimman oikosulkuvirran laskennassa käytettävä jännitekerroin [1] |
| C_{min} | Pienimmän oikosulkuvirran laskennassa käytettävä jännitekerroin [1] |
| C_p | Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK] |
| E | Kimmokerroin [Pa] |
| f | Taajuus [Hz] |
| F_{m3} | Keskimmäiseen kiskoon vaikuttava huippuvoima [N] |
| $F_{r,d}$ | Tukieristimiin välittyvä voimavaikutus [N] |
| f_y | Myötölujuus [Pa] |
| H | Lämmönsiirtokerroin [W/m ² K] |
| h | Kappaleen y-akselin suuntainen mitta [m] |
| I | Jatkuvan tilan oikosulkuvirta [A] |
| I''_k | Alkuoikosulkuvirta [A] |
| I''_{k3} | Kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta [A] |
| I''_{kQ} | Taustaverkon oikosulkuvirta [A] |
| I_1 | Lämpenemäkokeen muuntajan kuormitusvirta [A] |

| | |
|------------|-----------------------------------------------------------------|
| I_2 | Lämpenemäkokeen pienjännitekeskuksen kuormitusvirta [A] |
| I_b | Symmetrinen oikosulkuvirran katkaisukyky [A] |
| I_{cw} | Pienjännitekeskuksen termisen oikosulkuvirran kesto [A] |
| i_p | Oikosulkuvirran huippuarvo [A] |
| I_{rT} | Muuntajan ala- tai yläjännitepuolen nimellisvirta [A] |
| I_{th} | Terminen oikosulkuvirta [A] |
| K | Muuntajan kuormituskerroin [1] |
| k_{12} | Tehollisen etäisyyden määrittämiseen käytettävä kerroin [1] |
| l | Tukipisteiden keskilinjojen välinen etäisyys [m] |
| m | DC-komponentin aiheuttama lämmitysvaikutus [1] |
| n | AC-komponentin aiheuttama lämmitysvaikutus [1] |
| P_{krT} | Muuntajan nimelliskuormitushäviöt [W] |
| P_o | Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt [W] |
| q | Materiaalin plastisen käyttäytymisen huomioiva kerroin [1] |
| Q_{joh} | Johtumalla siirtynyt lämpöteho [W] |
| Q_{pois} | Ilmanvaihtoaukkojen kautta poistettava lämpöteho [W] |
| Q_{tr} | Muuntajan lämpöteho [W] |
| R_{20} | Kaapelin resistanssi 20 celsiusasteen lämpötilassa [Ω] |
| R_k | Verkon myötäresistanssi [Ω] |
| R_L | Kaapelin lämpötilakorjattu resistanssi [Ω] |
| $R_{p0,2}$ | Venymäraja [Pa] |
| R_Q | Taustaverkon myötäresistanssi [Ω] |
| R_s | Jännityssuhde [1] |
| R_T | Muuntajan myötäresistanssi [Ω] |
| S''_{kQ} | Taustaverkon alkuoikosulkuteho [VA] |

| | |
|----------------|--------------------------------------------------------------------|
| S_{rT} | Muuntajan nimellisteho [VA] |
| S_{th} | Virtakiskon oikosulkuvirtatiheys [A/m^2] |
| S_{thr} | Virtakiskon nimellinen oikosulkuvirtatiheys [A/m^2] |
| t_{a1} | Muuntajan ympäröivän ilman lämpötila [$^{\circ}C$] |
| t_{a2} | Muuntamon ympäröivän ilman lämpötila [$^{\circ}C$] |
| T_k | Oikosulun kesto aika [s] |
| T_{kr} | Nimellisen oikosulkuvirtatiheyden kesto aika [s] |
| t_{t1} | Muuntajan ylänesteen lämpötila ilman muuntajatilaa [$^{\circ}C$] |
| t_{t2} | Muuntajan ylänesteen lämpötila muuntajatilassa [$^{\circ}C$] |
| T_{ulk} | Ulkoilman lämpötila [K] |
| u_{kr} | Muuntajan oikosulkujännite [%] |
| U_{nQ} | Taustaverkon nimellijännite [V] |
| U_{rT} | Muuntajan ala- tai yläjännitepuolen nimellijännite [V] |
| ν | Poissonin suhde [1] |
| v_a | Ilman virtausnopeus aukon läpi [m/s] |
| v_{avg} | Ilman keskimääräinen virtausnopeus [m/s] |
| \dot{V} | Ilmavirta [m^3/s] |
| v_{avg} | Keskimääräinen virtausnopeus [m/s] |
| V_F | Oikosulkuvirran voimavaikutuksien laskennan kerroin [1] |
| V_{rm} | Oikosulkuvirran voimavaikutuksien laskennan kerroin [1] |
| $V_{\sigma m}$ | Oikosulkuvirran voimavaikutuksien laskennan kerroin [1] |
| W_m | Kappaleen taivutusvastus [m^3] |
| X_k | Verkon myötäreaktanssi [Ω] |
| X_Q | Taustaverkon myötäreaktanssi [Ω] |
| X_T | Muuntajan myötäreaktanssi [Ω] |

z Ilmanvaihtoaukkojen välinen korkeusero [m]

Z_T Muuntajan myötäimpedanssi [Ω]

Lyhenteet

CFD Numeerinen virtausdynamiikka

AC Vaihtovirta

DC Tasavirta

1 Johdanto

Sähköjaketun toimintavarmuus, turvallisuus ja energiatehokkuus ovat keskeisiä tavoitteita nykyaikaisessa sähköverkossa. Puistomuuntamot muodostavat tärkeän osan jakeluverkon sekä hajautetun energiantuotannon infrastruktuuria, sillä ne mahdollistavat sähköenergian jakelun loppukäyttäjille luotettavasti ja kustannustehokkaasti. Laitteiden toimivuuteen ja käyttöikään vaikuttavat monet tekijät, kuten sähköiset kuormitukset, lämpötilavaihtelut, ympäristöolosuhteet sekä rakenteelliset ratkaisut. Näiden ilmiöiden ymmärtäminen ja ennakointi on tärkeä osa puistomuuntamoiden suunnittelua, jotta voidaan tarjota markkinoille toimiva ja kestävä kokonaisuus.

Nykyaikaisilla laskenta- ja simulointiohjelmistoilla on mahdollista tarkastella monimutkaisempiakin järjestelmiä testaamatta kaikkea fyysisesti. Esimerkiksi COMSOL Multiphysics ohjelmisto tarjoaa kattavat mahdollisuudet eri simulointeihin.

1.1 Työn tausta

Kohdeyritys suunnittelee ja valmistaa pienjännitekeskuksia sekä puistomuuntamoita. Tehdasvalmisteisia puistomuuntamoita ja pienjännitekeskuksia koskevat omat standardinsa, jotka määrittelevät tuotteilta edellytettävät sähköiset ominaisuudet sekä niiden vaatimustenmukaisuuden todentamisen tyyppitestauksella. Simuloimalla tuotteita ennen tyyppitestauksia voidaan vertailla eri ratkaisuja sekä saada varmuutta siitä, että tuote läpäisee standardien asettamat vaatimukset. Näin saadaan markkinoille kilpailukykyinen ja toimiva ratkaisu. Kohdeyrityksellä ei ole aiemmin ollut käytössä simulointiohjelmistoa osana tuotekehitystä. Tässä diplomityössä tarkastelussa on kohdeyrityksen puistomuuntamot. Puistomuuntamoissa käytetään omien laitestandardien mukaan tyyppitestattuja komponentteja osana kokonaisuutta, joka valmistetaan kohdeyrityksen tiloissa. Kokonaisuudelle tulee suorittaa tyyppitestit sovellettavien laitestandardien mukaisesti.

1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää voiko COMSOL Multiphysics ohjelmistolla mallintaa puistomuuntamoita tai sen osia niin, että tuloksia voidaan hyödyntää kohdeyrityksen tuotekehityksessä sekä tyyppitestauksiin valmistautumisessa. Työn toisena tavoitteena on selvittää, onko markkinoilla myös muita simulointiohjelmistoja, joita kohdeyritys voisi harkita käyttävänsä.

Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitä tyyppitestauksia puistomuuntamoille tehdään?
2. Mitä simulointiohjelmistoja on markkinoilla?
3. Kuinka simuloitujen tulokset vertautuvat käsin laskettuihin tuloksiin ja mitä lisäarvoa simuloitujen tulokset tuovat käsin laskettuihin tuloksiin verrattuna?
4. Voidaanko simulointiohjelmistoa hyödyntää tuotteiden suunnittelussa ja tyyppitestauksiin valmistautumisessa?

1.3 Kohdeyritys

Oy Alfen Elkamo ab on suomalainen yritys, joka on perustettu Elkamo -nimellä vuonna 1981. Hollantilainen yritys Alfen liitti Elkamon osaksi konserniaan vuonna 2018, mistä lähtien Elkamo on toiminut nimellä Alfen Elkamo. Alfen Elkamon päätoimipiste sijaitsee Pietarsaareissa, missä valmistetaan puistomuuntamoita ja pienjännitekeskuksia. Alfen Elkamon tuotteita käytetään muun muassa jakeluverkossa, uusiutuvan energian tuotannossa, energian varastoinnissa sekä kiinteistöissä.

Alfen Elkamon visiona on olla Pohjoismaiden arvostetuin kumppani, joka tarjoaa kehittyneitä ratkaisuja energia-alalle turvaten kestävän maailman myös tuleville sukupolville. Kehittääkseen edistyneitä ratkaisuja, täytyy tuotekehityksessä tehdä toimivia ja taloudellisia ratkaisuja, joiden tekoa simulointiohjelmiston käyttö voi helpottaa.

2 Puistomuuntamo ja siihen liittyvät vaatimukset

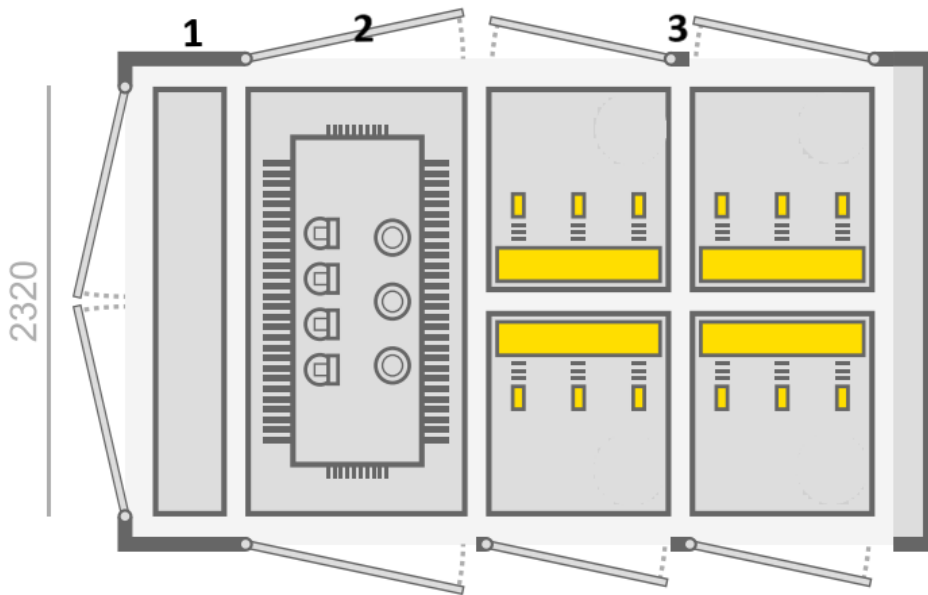
Puistomuuntamo on tiili-, betoni- tai metallirakenteinen rakennus, jota käytetään sähkönjakeluverkossa. Puistomuuntamon pääasiallinen tehtävä on koteloida jakelumuuntaja, joka muuntaa 20 kilovoltin jakeluverkon jännitteen 400 voltin pienjänniteverkkoon sopivaksi. Lisäksi puistomuuntamoon on sijoitettu keskijännitejakeluverkon sekä pienjännitejakeluverkon suojaamiseen ja käyttöön tarvittavia komponentteja. Puistomuuntamoita käytetään myös uusiutuvan energian kohteissa esimerkiksi verkkoliityntämuuntamoina. Puistomuuntamo koostuu keskijännitetilasta, muuntajatilasta sekä pienjännitetilasta. Kuvassa 1 on esitetty havainnekuva kohdeyrityksen puistomuuntamomallista ELMO 1000 4xD2.



Kuva 1. Puistomuuntamo ELMO 1000 4xD2 (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026).

Keskijännitetilassa on keskijännitekojeisto, jota käytetään keskijännitejakeluverkossa. Keskijännitekojeisto sisältää verkon käyttöön sekä suojaukseen tarvittavat komponentit

pienjännitekeskuksen mukaisesti omien laitestandardien mukaan suunniteltuja, rakennettuja ja testattuja komponentteja. Pienjännitekeskuksen tapaan myös keskijännitekojeiston kiskosto rakennetaan kohdeyrityksen tiloissa. Kuvassa 2 on esitetty periaatepiirros ELMO 1000 4xD2 puistomuuntamosta. Numerolla yksi on merkitty pienjännitekeskus, numerolla kaksi muuntajatila ja numerolla kolme keskijännitekojeisto, jossa on neljä keskijännitekenttää.



Kuva 2. ELMO 1000 4xD2 periaatepiirros (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026).

2.2 SFS ja SFS-EN IEC standardit

Tehdasvalmisteisten puistomuuntamoiden suunnittelun, testaamisen ja rakentamisen perustana käytetään SFS-EN IEC laitestandardeja. Lisäksi käytetään sovellettavissa osin kansallisia sähkötyöturvallisuus-, pienjännite-, ja suurjännitestandardeja. Standardeja seuraamalla tuotteista saadaan toimivia, luotettavia ja eritoten turvallisia.

Suurin osa Suomessa julkaistavista sähköalan standardeista pohjautuvat kansainvälisen sähkötekniikan komission IEC:n julkaisemiin kansainvälisiin IEC standardeihin (SESKO ry, 2026). Osa IEC standardeista vahvistetaan eurooppalaisena EN IEC standardina, jonka jälkeen ne on saatettava kansallisen standardin asemaan kaikissa EU- ja EFTA-maissa

sisältöä muuttamatta (SESKO ry, 2026). Tällöin Suomessa julkaistu standardi saa etuliitteeksi SFS-EN IEC. Ennen vuotta 2018 vahvistettujen standardien etuliitteenä on SFS-EN, mutta IEC standardeihin pohjautuvan standardin tunnistaa standardin ensimmäisestä numerosta kuusi (SFS Suomen Standardit ry, 2026).

Pelkällä SFS-etuliitteellä olevat standardit ovat puhtaasti kansallisia Suomessa laadittuja standardeja, joita ei käytetä muissa Euroopan talousalueen maissa. SFS standardit pohjautuvat kuitenkin usein IEC standardeihin tai eurooppalaisen standardoimisjärjestön CENELEC:n julkaisemiin HD-harmonisointiasiakirjoihin.

2.3 Puistomuuntamon standardit

Puistomuuntamon vaatimukset pohjautuvat standardisarjan SFS-EN IEC 62271 *High-voltage switchgear and controlgear* alaosaan SFS-EN IEC 62271-202 *High-voltage switchgear and controlgear - Part 202: AC prefabricated substations for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*, jota sovelletaan yli yhden kilovoltin nimellisjännitteellä oleviin tehdasvalmisteisiin puistomuuntamoihin. Standardin alaosaa käytetään yhdessä standardisarjan yleisosan SFS-EN IEC 62271-1 *High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear* kanssa, jota käytetään kaikkiin yli 1000 voltin nimellisjännitteellä oleviin vaihtojännitteisiin suurjännitekojeistoihin ja -kytkinlaitteisiin.

Standardisarjasta SFS-EN IEC 62271 käytetään myös alaosaa SFS-EN IEC 62271-200 *High-voltage switchgear and controlgear –Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV* keskijännitekojeiston suunnittelussa, rakentamisessa ja testaamisessa. Myös keskijännitekojeistoon asennettavat komponentit ovat oman SFS-EN IEC 67721 standardisarjan alaosan mukaisia.

Tehdasvalmisteisen puistomuuntamoon muuntajatilaa vaatimuksia käsitellään standardissa SFS-EN IEC 62271-202. Muuntajatilaa asennettavalle öljymuuntajalle sovelletaan SFS-EN IEC 60076 *power transformers* standardisarjaa.

Puistomuuntamon pienjännitekeskuksen suunnittelussa, rakentamisessa ja testaamisessa käytetään SFS-EN IEC 61439 *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies* standardisarjaa, joka on tarkoitettu enintään 1000 voltin nimellisjännitteellä oleviin vaihtojännitteisiin pienjännitekeskuksiin. Puistomuuntamon pienjännitekeskuksen perustavan laatuinen tehtävä on sähkönjakelu julkisessa jakeluverkossa, jolloin sovelletaan standardisarjan alaosaa SFS-EN IEC 61439-5 *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 5: Assemblies for power distribution in public networks* yhdessä sarjan yleisosan SFS-EN IEC 61439-1 *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: General rules* kanssa.

SFS-EN IEC 62271 ja SFS-EN 61439 standardisarjojen lisäksi käytetään kansallisia SFS-standardeja SFS 6000 pienjännitesähköasennukset, SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset ja SFS 6002 *sähkötyöturvallisuus* (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2022; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2025b; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2025a). Kansalliset standardit antavat joitain tarkennuksia muuntamon rakenteeseen sekä vaatimuksia muuntamon sisäisiin sähköasennuksiin. Edellä mainittujen SFS-EN IEC ja SFS standardien lisäksi voidaan käyttää puistomuuntamon suunnittelussa, rakentamisessa ja testaamisessa lisänä muita standardeja tai teknisiä määrittelyjä, kuten esimerkiksi teknistä määrittelyä IEC/TS 62271-304 *High-voltage switchgear and controlgear - Part 304: Classification of indoor enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV related to the use in special service conditions with respect to condensation and pollution*, joka käsittelee sisäasenteisten keskijännitekytkinlaitteiden testaamista vaikeissa olosuhteissa.

Kuvassa 3 on esitetty puistomuuntamossa normaalisti käytettävät standardit jaoteltuna puistomuuntamon eri osien mukaan. Joissain kohteissa voi olla tarpeen soveltaa myös muita standardeja kuvan standardien lisäksi.

| Keskijännitekojeisto keskijännitetila | Muuntaja muuntajatila | Pienjännitekeskus pienjännitetila |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • SFS-EN IEC 62271-1 • SFS-EN IEC 62271-200 • SFS-EN IEC 62271-202 • SFS 6000 • SFS 6001 • SFS 6002 | <ul style="list-style-type: none"> • SFS-EN IEC 60076 • SFS-EN IEC 62271-1 • SFS-EN IEC 62271-202 • SFS 6000 • SFS 6001 • SFS 6002 | <ul style="list-style-type: none"> • SFS-EN IEC 61439-1 • SFS-EN IEC 61439-5 • SFS-EN IEC 62271-1 • SFS-EN IEC 62271-202 • SFS 6000 • SFS 6002 |

Kuva 3. Puistomuuntamon standardit.

SFS-EN IEC laitestandardit määrittävät puistomuuntamolle tehtävät tyyppitestit, joilla todistetaan puistomuuntamomallin sekä siihen asennettujen jo tyyppitestattujen komponenttien standardienmukainen suorituskyky asennettuna puistomuuntamoon. Tyyppitestit tehdään kaikille puistomuuntamomalleille, joiden rakenne ja suorituskyky eroavat aiemmin testatuista malleista. Tekninen raportti IEC/TR 62271-312 *High-voltage switchgear and controlgear - Part 312: Guidance for the transferability of type tests of high-voltage/low-voltage prefabricated substations* käsittelee puistomuuntamoiden tyyppitestien siirtämistä eri mallien välillä. Standardit SFS-EN IEC 62271-200, SFS-EN IEC 62271-202, SFS-EN IEC 61439-5 määrittävät useita puistomuuntamomallille tehtäviä tyyppitestejä, joista tässä diplomityössä esitellään puistomuuntamon lämpenemätesti ja puistomuuntamon pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustesti. Lisäksi kohdeyritykselle luotiin kattava esitys kaikista puistomuuntamoja koskevista tyyppitesteistä, mitä ei kuitenkaan tässä diplomityössä esitellä.

3 Simulointiohjelmistot

Tässä diplomityössä käytettävä COMSOL Multiphysics simulointiohjelmisto on numeeriseen mallinnukseen ja simulointiin tarkoitettu kaupallinen vuosilisenssillä käytettävä ohjelmisto, jota hyödynnetään laajasti tekniikan ja luonnontieteiden eri aloilla (COMSOL ab, 2026b).

Simulointiohjelmiston toiminta perustuu pääasiassa elementtimenetelmään ja sitä käytetään erilaisten fysikaalisten ilmiöiden analysointiin, visualisointiin ja ennustamiseen. Ohjelmistolla voidaan mallintaa samassa laskentaympäristössä useita keskenään vuorovaikuttavia monifysikaalisia ilmiöitä.

Ohjelmisto koostuu pääohjelmasta sekä lisämoduuleista, joita voidaan linkittää pääohjelmaan tarpeen mukaan. Moduulien sisällä on useita eri vaihtoehtoja mallinnettaville fysiikoille. Alla olevassa taulukossa on lueteltu COMSOL Multiphysics ohjelmistoon saatavia puistomuuntamon mallinnuksen kannalta hyödyllisiä moduuleita. Ohjelmistoon on myös mahdollista linkittää kohdeyrityksen käyttämä SolidWorks mekaniikkasuunniteluohjelmisto.

Taulukko 1. COMSOL Multiphysics ohjelmiston hyödyllisiä moduuleita (COMSOL ab, 2026a).

| Moduuli | Käyttö |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AC/DC | Virtakiskostojen oikosulku- ja jännitekestoisuudet. Yhdessä CFD -ja Heat Transfer -moduulien kanssa virtakiskostojen lämpenemätarkastelut. |
| CFD | Yhdessä Heat Transfer -moduulin kanssa pienjännitekeskusten ja puistomuuntamoiden ilmanvaihdon suunnittelu. |
| Heat Transfer | Yhdessä AC/DC - ja Heat Transfer -moduulien kanssa virtakiskostojen lämpenemätarkastelut sekä pienjännitekeskusten ja puistomuuntamoiden ilmanvaihdon suunnittelu. |

| | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Structural Mechanics | Puistomuuntamoiden ja pienjännitekeskusten rakenteiden mekaaniset kestoisuudet. |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|

Tässä diplomityössä COMSOL Multiphysics ohjelmistolla simuloidaan puistomuuntamon muuntajatilän ilmanvaihtoa sekä pienjännitekeskuksen oikosulkukestoisuutta, joissa käytetään kaikkia edellä mainittujen moduulien fysiikoita. Puistomuuntamon ilmanvaihdon simuloimiseen käytetään CFD-moduulista Laminar Flow virtausfysiikkaa. Oikosulkukestoisuuden tarkastelussa käytetään Heat Transfer moduulista Heat Transfer in Solids fysiikkaa, AC/DC moduulista Electric Currents ja Magnetic Fields fysiikoita sekä Structural Mechanics moduulista Solid Mechanics fysiikkaa.

COMSOL Multiphysics ohjelmiston lisäksi on saatavilla useita muita simulointiohjelmistoja, joista osa on COMSOL Multiphysics ohjelmiston tapaan multifysikaalisia ja osa keskittyy tietyille osa-alueelle, kuten lämmönsiirtoon ja ilmanvaihtoon. Muita multifysikaalisia simulointiohjelmistoja COMSOL Multiphysics ohjelmiston lisäksi ovat esimerkiksi Ansys Multiphysics, SimScale, Simcenter ja Altair. Lämmönsiirtoon ja ilmanvaihtoon keskittyneitä simulointiohjelmistoja ovat esimerkiksi OpenFoam, SimFlow ja SimWork. Edellä mainituista simulointiohjelmistoista suurin osa ovat COMSOL Multiphysicsin tapaan lisenssillä toimivia, mutta esimerkiksi OpenFoam simulointiohjelmisto on ilmainen sekä muun muassa SimScale simulointiohjelmistosta on saatavilla rajoitettu ilmainen koikeilu (OpenCFD Ltd, 2026; SimScale GmbH, 2026). Myös kohdeyrityksen käyttämään SolidWorks mekaniikkasuunnitteluohjelmistoon on saatavana lisenssipohjainen simulointilisäosa, jolla on mahdollista tehdä lujuuslaskentaa sekä lämmönsiirto- ja ilmanvaihtosimulointeja (Dassault Systèmes, 2026).

4 Lämpenemätesti ja oikosulkuvirtakestoisuustesti

Tämän diplomityön aiemmissa luvuissa on esitelty käytettävää simulointiohjelmistoa sekä puistomuuntamoita koskevia laitestandardeja. Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi standardin SFS-EN IEC 62271-202 määrittämää puistomuuntamon lämpenemätestiä sekä standardin SFS-EN IEC 61439-5 määrittämää pienjännitekeskuksen oikosulkutestiä sekä näiden laskentateoriaa, joiden avulla saadaan käsin laskennalla laskennalliset tulokset simulointitulosten vertailun tueksi. Seuraavassa luvussa tarkastellaan tässä luvussa esiteltyjen tyyppitestien simulointia ja niiden tuloksia.

Simuloinnin kohteeksi valikoidut puistomuuntamon lämpenemätesti sekä pienjännitekeskuksen oikosulkukestoisuus ovat puistomuuntamon tyyppitesteistä eniten aikaa vieviä sekä kalliita toteutettavia. Näiden lisäksi testausmahdollisuudet Suomessa ovat rajalliset ilman omaa laitteistoa. Todentamalla tuotteen suorituskyky simuloimalla säästää siten resursseja sekä aikaa. Käsin laskennan tulosten ja simuloinnin tulosten vertailulla todetaan simulointimallien toimivuus.

4.1 Puistomuuntamon lämpenemätesti

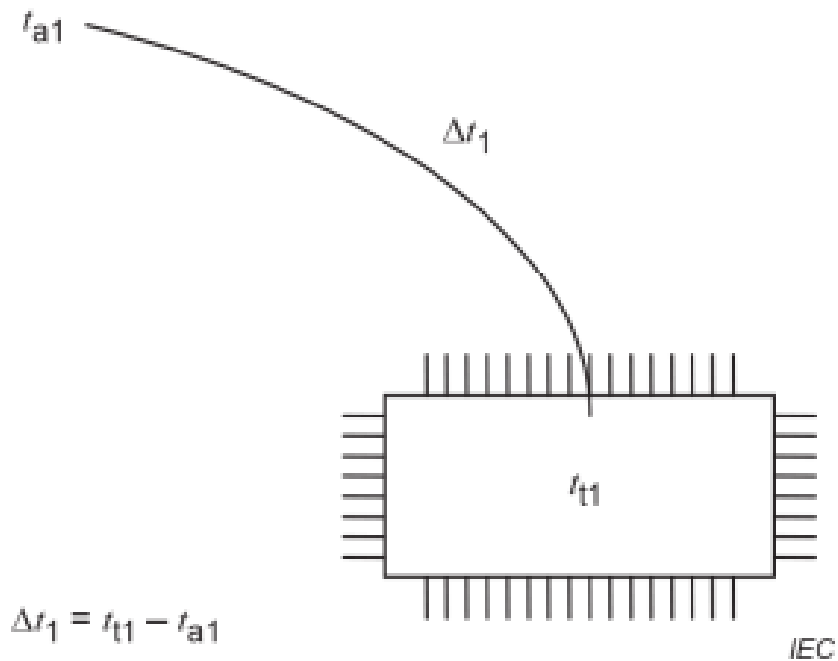
Standardin SFS-EN IEC 62271-202 mukaisesti tehdasvalmisteiselle puistomuuntamolle tulee suorittaa lämpenemätesti, jonka tarkoituksena on todistaa, ettei puistomuuntamoon asennettujen komponenttien sallittua lämpenemää ylitetä niiden ollessa asennettuna puistomuuntamon sisään sekä määrittää puistomuuntamon muuntajatilalle lämpenemäluokka (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 45).

Lämpenemätesti koostuu kahdesta vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa muuntajaa kuormitetaan vapaassa ilmatilassa ilman muuntajatilaa kokonaishäviötehoa vastaavalla virralla muuntajan toisiopuolen ollessa oikosuljettuna. Kuvassa 4 on havainnollistettu muuntajan lämpenemän Δt_1 mittaamista ilman muuntajatilaa, joka lasketaan kaavalla

$$\Delta t_1 = t_{t1} - t_{a1}, \quad (1)$$

missä t_{a1} on öljymuuntajan ympäröivän ilman lämpötila ja t_{t1} on öljymuuntajan ylänesteen lämpötila (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46).

Ylänesteen lämpötila lämpötilasensorilla eristeaineen yläpinnalta tai muuntajan kannen lämpömittaritaskuista (International Electrotechnical Commission, 2012b, s. 16). Muuntajan kuormitusta jatketaan kunnes ylänesteen lämpötilan muutos on alle yksi kelvinaste tunnissa (International Electrotechnical Commission, 2012b, s. 15).

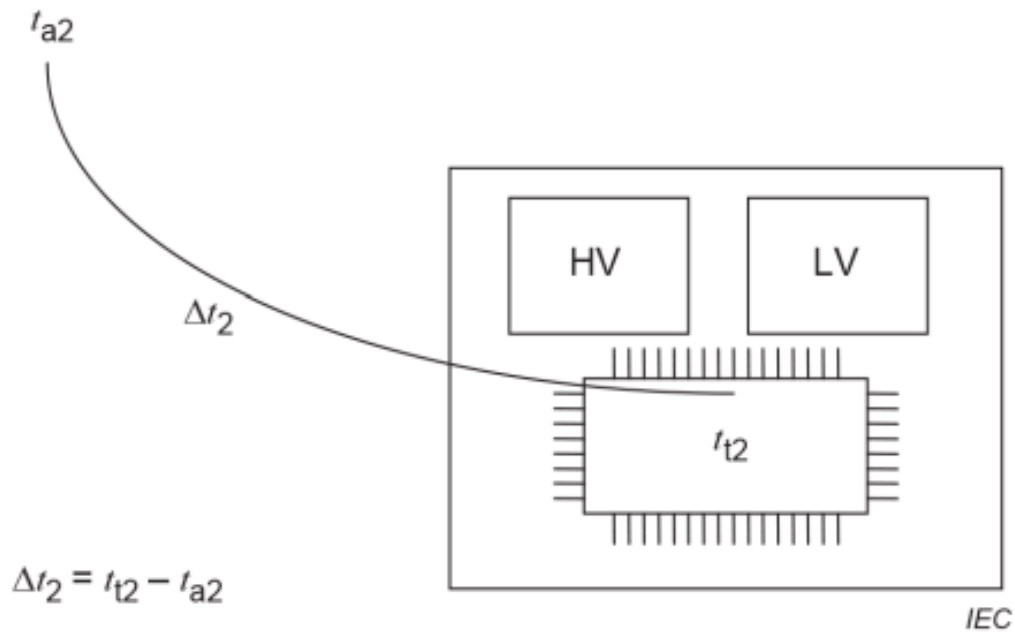


Kuva 4. Muuntajan lämpenemän mittaus ilman ympärillä olevaa muuntajatilaa (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46).

Kun tiedetään muuntajan ylänesteen lämpenemä Δt_1 , siirrytään lämpenemätestin toiseen vaiheeseen, jossa muuntajaa kuormitetaan muuntamon muuntajatilan sisällä. Kuvasssa 5 on havainnollistettu muuntajan ylänesteen lämpenemän Δt_2 mittaamista, joka lasketaan kaavalla

$$\Delta t_2 = t_{t2} - t_{a2}, \quad (2)$$

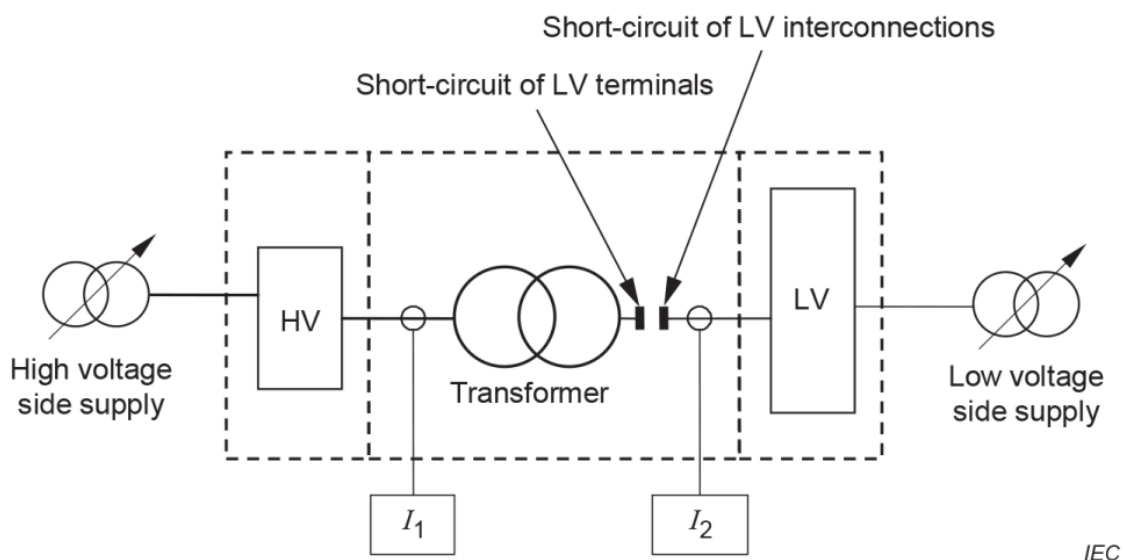
missä t_{a2} on ympäristön lämpötila ja t_{t2} on muuntajan ylänesteen lämpötila (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46).



Kuva 5. Muuntajan lämpenemän mittaus muuntajan ollessa muuntajatilassa (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 46).

Samanaikaisesti kuormitetaan muuntamon pienjännitekeskusta muuntajan toisiopuolen nimellisvirralla pienjännitestandardin IEC 61439-1 lämpenemätestin sekä IEC 62271-202 antamien lisäysten mukaisesti. Pienjännitekeskus tulee olla varusteltu niin, että saavutetaan suurin häviöteho, joka on normaalikäytössä mahdollista (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 48). Muuntajaa syötetään muuntamon keskijännitekojeiston kautta samalla testivirralla kuin testin edellisessä vaiheessa. Keskijännitekojeistossa tulee olla testin aikana asennettuna muuntajalle suunnatut suojalaitteet, kuten keskijännitesulakkeet tai katkaisija (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 47) Kuvassa 6 on esitetty syöttöjärjestelyt muuntamon lämpenemäkokeessa. Kuvassa I_1 on keskijännitekojeiston kautta syötetty muuntajan kuormitusvirta, jolla saadaan muuntajan kokonaishäviöteho ja I_2 muuntajan toisiopuolen nimellisvirta, jolla

pienjännitekeskusta kuormitetaan. Muuntaja tulee olla oikosuljettu toisioliittimistä ja pienjännitekeskus muuntajaliitynnästä mahdollisimman lähellä muuntajaa, mutta kuitenkin erotettuna toisistaan (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 48).

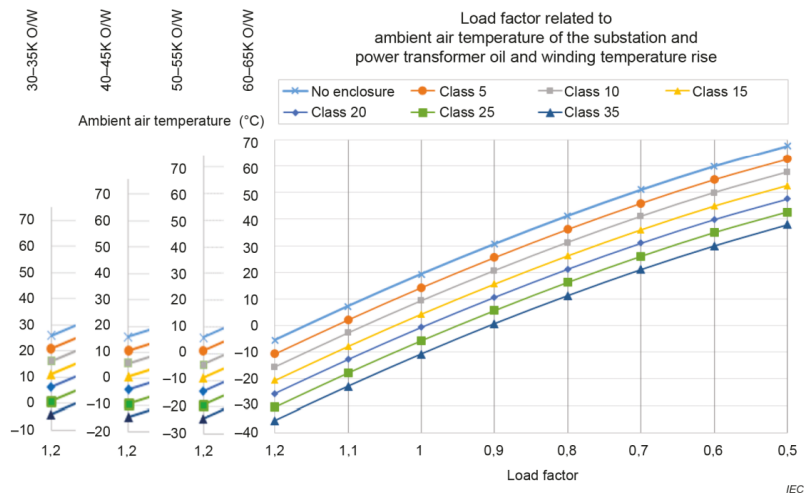


Kuva 6. Keskijännitekojeiston, muuntajan ja pienjännitekeskuksen syöttöjärjestelyt lämpenemätestissä (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 48)

Lämpenemätestiä jatketaan niin kauan, kunnes lämpötilan muutos keskijännitekojeiston osissa, muuntajan ylänestessä ja pienjännitekeskuksen osissa on alle yksi kelvinaste tunnissa.

Muuntamon lämpenemätesti on hyväksytty, jos pienjännitekeskuksen osien, komponenttien ja alajännitepuolen muuntajaliitynnän lämpenemä ei ylitä standardissa IEC 61439-1 esitettyjä raja-arvoja ja keskijännitekojeiston kosketeltavien osien ja yläjännitepuolen muuntajaliitynnän lämpenemä ei ylitä standardin IEC 62271-1 antamia raja-arvoja (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 99, 2022b, s. 52). Lisäksi muuntajan ylänesteen lämpenemien Δt_1 ja Δt_2 erotuksen avulla muuntamolle annetaan lämpenemäluokka 5 K, 10 K, 15 K, 20 K, 25 K tai 30 K (International Electrotechnical Commission, 2022b).

Lämpenemäluokan avulla saadaan selville muuntajan sallittu kuormitusaste, jolla muuntajan öljyn tai käämitysten sallittua lämpenemää ei ylitetä, vaikka muuntaja on asennettu muuntamon muuntajatilaan. Kuvassa 7 on standardissa SFS-EN IEC 62271-202 esitetty kuormituskäyrä öljyeristeiselle muuntajalle. Kuvan pystyakselilla on muuntamon ympäristön lämpötila celsiusasteina, vaaka-akselilla sallittu kuormitusaste sekä vasemmalla öljymuuntajan eri lämpenemäraajat SFS-EN IEC 60076-2 *Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers* mukaisesti (International Electrotechnical Commission, 2022b). Jakeluverkkokäytössä puistomuuntamon muuntajatilalta vaaditaan yleensä lämpenemäluokkaa 20 K, jolloin yleisesti käytetyillä lämpenemärajoilla 60 kelvinastetta öljylle ja 65 kelvinastetta käämityksille sekä ympäristön lämpötilalla 20 celsiusastetta muuntajan sallittu kuormitusaste olisi 0,8.



Kuva 7. Öljymuuntajan kuormituskäyrä (International Electrotechnical Commission, 2022b, s. 97)

4.1.1 Muuntajan jäähdystavat

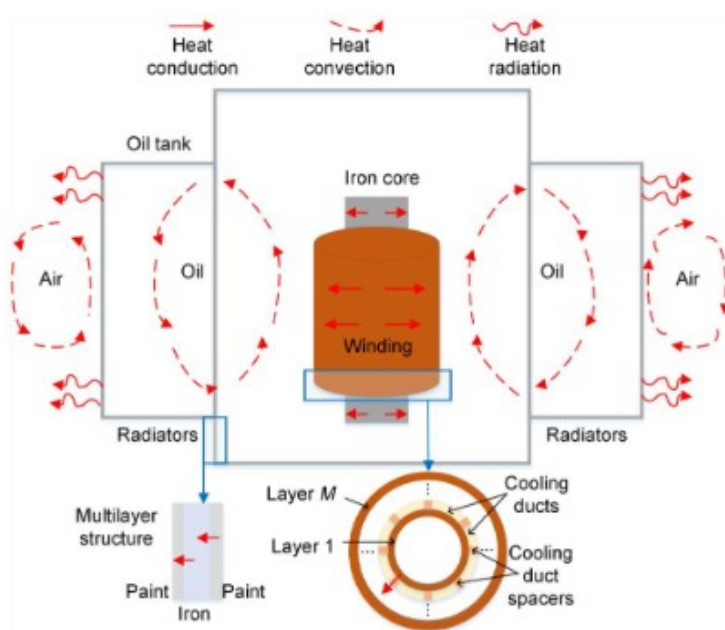
Puistomuuntamon lämpenemätestiin liittyy oleellisesti siihen asennettavan jakelumuuntajan jäähdytys. Öljyeristeiselle jakelumuuntajalle on useita eri jäähdystapoja, jotka ilmaistaan neljän kirjaimen yhdistelmällä. Alla olevassa taulukossa on esitetty eri kirjaimet ja niiden selitteet. Öljyeristeiset jakelumuuntajat ovat yleensä tyyppiä ONAN, joka tarkoittaa, että jakelumuuntajan sisällä oleva öljy kiertää muuntajan käämeissä sekä

jäähdytyslementeissä painovoimaisella kierrolla. Ulkoisena jäähdytysnesteenä toimii ilma, joka kiertää eristeineen tavoin painovoimaisella kierrolla sitoen lämpöenergiaa muuntajan jäähdytyslementeistä. Muuntajan eristeaine sitoo siis lämpöenergiaa käämityksistä sekä rautasydämeistä ja luovuttaa sitä jäähdytyslementtien kautta ympäröivään ilmaan.

Taulukko 2. Öljyeristeisen muuntajan jäähdytystavat (International Electrotechnical Commission, 2012b, s. 8–9).

| | | |
|-------------------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. kirjain Muuntajan jäähdytysaine | O | Eristeineena mineraaliöljy tai synteettinen neste, jonka syttymispiste on ≤ 300 °C |
| | K | Eristeneste, jonka syttymispiste on > 300 °C |
| | L | Eristeneste, jonka syttymispiste ei ole mitattavissa |
| 2. kirjain Jäähdytysaineen kierrätystapa | N | Painovoimainen kierto jäähdytyslementeissä ja käämeissä |
| | F | Koneellinen kierto jäähdytyslementeissä, mutta painovoimainen kierto käämeissä |
| | D | Koneellinen kierto jäähdytyslaitteissa, josta kierto ohjattu vähintään pääkäämeihin |
| 3. kirjain Ulkoisen jäähdytysaine | A | Ilma |
| | W | Vesi |
| 4. kirjain Ulkoisen jäähdytysaineen kierrätystapa | N | Painovoimainen kierto |
| | F | Koneellinen kierto |

ONAN tyyppisten jakelumuuntajien öljyn ja ilman painovoimainen kierto perustuu aineen lämpötilaeroista johtuvaan tiheyseroon. Häviötehon lämmittämän öljyn ja ilman tiheys pienenee ja nousee nostevoiman vaikutuksesta ylöspäin aiheuttaen painovoimaisen kierron. Kuvassa 8 on havainnollistettu muuntajan häviötehon synnyttämän lämmön siirtymistä muuntajan sydäimestä ja käämeistä ympäröivään ilmaan. Eri lämmön siirtymisen tavat on merkitty punaisilla nuolilla: suora yhtenäinen punainen viiva kuvaa lämmön johtumista, katkonainen punainen viiva lämmön kulkeutumista ja käyrä yhtenäinen viiva lämmön säteilyä (Zhang ym., 2024, s. 220). Kuvassa 8 nähdään sekä öljyn että ilman painovoimainen kierto esitettyinä kiertävällä punaisella katkonuolella.



Kuva 8. ONAN muuntajan jäähtymisen rakenne, lämmönlähteet ja lämmönvaihto (Zhang ym., 2024).

ONAN jäähdytteisen jakelumuuntajan jäähtymiseen vaikuttaa ulkoisen jäähdytysaineen eli ilman tehokas kierto, minkä vuoksi puistomuuntamon muuntajatilan ilmanvaihdon tulee olla suunniteltu niin, että jäähdytysaineena toimiva ilma kiertää muuntajatilassa mahdollisimman tehokkaasti. Muuntajatilan oikein mitoitettu jäähditys on myös muuntajan eliniän kannalta oleellista. Muuntajan ylikuumentuminen kiihdyttää johdinten eristeen heikkenemistä, aiheuttaa tiivisteiden haurastumista, kaasukuplien muodostumista

heikentäen jännitelujuutta, vähentää muuntajan oikosulkukestoisuutta ja aiheuttaa ylipainetta muuntajan tankissa (International Electrotechnical Commission, 2018).

Jakelumuuntajien sallittua häviötehoa säätelee Euroopan Unionin asetus 548/2014 tavoitteena vähentää sähköverkon energiahäviöitä. Asetuksessa 548/2014 esitetään ekosuunnittelun vaiheet Tier 1 ja 2, jotka määrittävät muuntajan sallitut kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt (Konsolidoitu teksti: Komission asetus (EU) N:o 548/2014, 2019). Vaihe Tier 2 tuli voimaan heinäkuussa 2021. Alla olevassa taulukossa on esitetty joidenkin öljyeristeisen jakelumuuntajan vaiheen Tier 2 mukaiset kuormitushäviöt nimellistehon mukaan, kun muuntajan yläjännitepuolen nimellisjännite on korkeintaan 24 kilovolttia ja alajännitepuolen nimellisjännite on korkeintaan 3,6 kilovolttia.

Taulukko 3. Ekosuunnittelun vaiheen Tier 2 mukaiset enimmäishäviötehot (Konsolidoitu teksti: Komission asetus (EU) N:o 548/2014, 2019).

| Nimellisteho | Enimmäiskuormitushäviöt P_k | Enimmäistyhjäkäyntihäviöt P_o |
|--------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1000 kVA | 7600 W | 693 W |
| 1600 kVA | 12000 W | 1080 W |
| 2500 kVA | 18500 W | 1575 W |

4.1.2 Muuntajatilän painovoimaisen ilmanvaihdon laskenta

Normaalissa jakeluverkkokäytössä jakelumuuntajan ulkoisen jäähdytysaineen eli ilman kierto puistomuuntamon muuntajatilassa pyritään toteuttamaan painovoimaisella ilmanvaihdolla sen luotettavuuden ja pitkän huoltovälin vuoksi. Vaativissa kohteissa muuntajatilän ilmanvaihtoa tehostetaan koneellisella ilmanvaihdolla (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026). Painovoimaisessa ilmanvaihdossa muuntajatilän ilmanvaihtoaukkojen korkeusero sekä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötila- ja tiheusero saavat aikaan painovoimalla toimivan ilmankierron, joka virtaa alhaalta ylöspäin.

Muuntajatilän painovoimaisen ilmanvaihdon käsin laskennassa muuntajaa voidaan käsitellä muuntajatilän sisäilmaa lämmittävänä lämmönlähteenä. Muuntajan lämpöteho

koostuu muuntajan tyhjäkäyntihäviöistä ja kuormitushäviöistä. Muuntajan lämpöteho Q_{tr} lasketaan kaavalla

$$Q_{tr} = P_0 + K^2 P_{krT}, \quad (3)$$

missä P_0 on muuntajan nimellistyhjäkäyntihäviöt, K on kuormituskerroin ja P_{krT} on muuntajan nimelliskuormitushäviöt (Liu ym., 2017).

Osa lämpötehosta poistuu johtumalla puistomuuntamon ohutlevyrakenteista. Rakenteiden kautta johtumalla poistuva lämpö Q_{joh} lasketaan kaavalla

$$Q_{joh} = HA_{joh}\Delta T, \quad (4)$$

missä H on lämmönsiirtokerroin, A_{joh} on lämmön johtumiseen käytettävä pinta-ala ja ΔT on sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero (Tammertekniikka, 2023, s. 111).

Ilmanvaihtauukkojen kautta poistettava lämpöteho Q_{pois} lasketaan täten kaavalla

$$Q_{pois} = Q_{tr} - Q_{joh}, \quad (5)$$

Lämpötehon sekä lämpötilaeron avulla voidaan laskea tarvittava ilmavirta \dot{V} kaavalla

$$\dot{V} = \frac{Q_{pois}}{\rho_{ulk}c_p\Delta T'}, \quad (6)$$

missä ρ_{ulk} ulkoilman tiheys ja c_p ilman ominaislämpökapasiteetti (Chenvidyakarn, 2013, s. 20).

Muuntajan häviötehon lämmittämän muuntajatilan ilman ja ulkoilman välinen paine-ero aiheuttaa ilmavirran tietyn pinta-alan läpi. Ilmavirran avulla voidaan laskea Ilmanvaihtauukkojen A pinta-ala kaavalla

$$A = \frac{\dot{V}}{C_d \sqrt{\rho_{\text{ulk}} \frac{2\Delta p}{\rho_{\text{ulk}}}}}, \quad (7)$$

missä C_d on purkauskerroin, joka riippuu ilmanvaihtoaukon rakenteesta ja Δp on paine-ero (Etheridge, 2011, s. 48).

Paine-ero Δp syntyy eri lämpötilassa olevan ilman tiheyseron aiheuttamasta paine-erosta korkeudella z . Kun oletetaan tiheyden muuttuvan lineaarisesti lämpötilan muuttuessa, voidaan tiheusero esittää lämpötilaeron avulla. Δp lasketaan kaavalla

$$\Delta p = gz \left(\rho_{\text{ulk}} \frac{\Delta T}{T_{\text{ulk}}} \right), \quad (8)$$

missä g on putoamiskiihtyvyys, z on ilmanvaihtoaukkojen välinen korkeusero ja T_{ulk} on ulkoilman lämpötila kelvineinä.

Kun paine-ero Δp sijoitetaan kaavaan 7, supistuu se alla esitettyyn muotoon, jolla voidaan laskea ilmanottoaukkojen tarvittava pinta-ala A :

$$A = \frac{\dot{V}}{C_d \sqrt{2gz \frac{\Delta T}{T_{\text{ulk}}}}}, \quad (9)$$

Kaavalla 9 saatu pinta-ala on sisääntulo- tai ulostuloaukkojen bruttopinta-ala. Todellisuudessa ilmanvaihtoritilän vapaa ilmanvaihtoon käytettävä pinta-ala on pienempi ilmanvaihtoritilässä olevan säleikön takia, jolloin ilmanvaihtoritilän kokonaispinta-alaa on kasvatettava, kunnes vapaa pinta-ala on vähintään yhtä suuri kuin kaavalla 9 saatu pinta-ala.

Käsin laskennalla saatujen tulosten ja seuraavan luvun simuloinneilla saatujen tulosten vertailua varten laskettiin lämpötilaerosta ΔT ja korkeuserosta z aiheutuva paine-ero Δp . Paine-eron Δp avulla voidaan laskea aukon läpi aiheutuva virtausnopeus v_a kaavalla

$$v_a = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (10)$$

Laskennassa käytetyt arvot on esitetty alla olevassa taulukossa. Taulukon arvoilla Paineeron Δp arvo on 0,95 pascalia ja virtausnopeuden v_a arvo on 1,26 metriä sekunnissa. Virtausnopeuden v arvo pätee vain aukon läpi ja pienenee huomattavasti ilman siirtyessä suurempaan ilmatilaan.

Taulukko 4. Virtausnopeuden käsin laskennassa käytetyt arvot.

| Suure | suuruus |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Korkeusero z | 1,2 m |
| Lämpötilaero ΔT | 20 K |
| Purkauserroin C_d | 1 |
| Ilman tiheys ρ | $1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |

4.2 Muuntamon pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustesti

Standardin SFS-EN 61439-5 mukaisesti pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuus tulee todentaa testaamalla, paitsi tietyissä poikkeustilanteissa (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 87, 2023, s. 27). Tehdasvalmisteisen puistomuuntamon pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustestillä todennetaan keskuksen vaihekiskoston, PEN-kiskoston, päävirtapiirin kytkinlaitteiden sekä muuntajaliitynnän oikosulkuvirtakestoisuus.

Oikosulkuvirtakestoisuustestissä keskuksen kuuluvat oleelliset komponentit oikosulkuvirtakestoisuustestin kannalta tulee olla asennettuna niin kuin normaalissa käyttötilanteessa. Oikosulkuvirtakestoisuustesti voidaan suorittaa ilman oikosulkusuojausta täydellä termisellä ja dynaamisella oikosulkuvirralla tai suojalaitteen rajoittamalla ehdollisella oikosulkuvirralla (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 88). PE,- N-, tai PEN-kiskoston oikosulkuvirtakestoisuustesti suoritetaan tavallisesti oikosulkuvirralla,

joka on 60 prosenttia vaihekiskoston oikosulkuvirrasta (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 107). Tehdasvalmisteisessa puistomuuntamossa pienjännitekeskuksen testaus suoritetaan ilman oikosulkusuojausta täydellä oikosulkuvirralla (Alfen Elkamo, 2026).

Oikosulkutesti on hyväksytty, jos standardin SFS-EN IEC 61439-1 mukaiset ilma- ja pintavälit täyttyvät virtakiskoissa ja johtimissa, eristeiden ominaisuudet ovat säilyneet sellaisina, että ne täyttävät niille asetetut vaatimukset, tukieristimet tai kaapelikiinnikkeet eivät ole hajonneet eikä tukieristimissä näy vastakkaisilla puolilla halkeamia tai pintahalkeamia koko pituudelta, Johtimien liitokset eivät ole löystyneet tai johtimet irronneet liittimistään, oikosulkuvirran aiheuttamat muodonmuutokset kiskoissa ja tukirakenteissa eivät heikennä normaalia käyttöä tai ulosvedettävien komponenttien käyttöä eikä keskuksen kotelointiluokka ole heikentynyt (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 92).

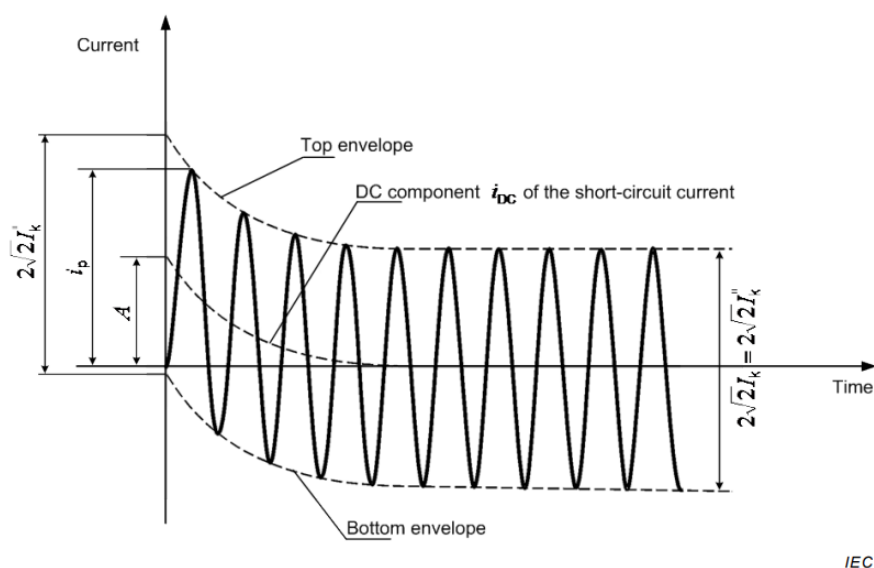
4.2.1 Oikosulkuvirran laskenta sähköverkossa

Puistomuuntamon rakenteiden ja komponenttien tulee kestää sähköverkon vikatilanteissa esiintyvien oikosulkuvirtojen aiheuttamat rasitukset. Standardissa IEC 60909-0 *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents* esitetään tapa laskea verkon oikosulkuvirrat Thevenin menetelmällä sekä kuinka eri oikosulkuvirrat vaikuttavat sähköverkon komponenttien mitoitukseen (International Electrotechnical Commission, 2016). Kuvassa 9 on esitetty standardin IEC 60909 esittämät eri oikosulkuvirrat ja niiden vaikutukset komponenttien mitoitukseen. Oikosulkuvirran huippuarvo i_p aiheuttaa vikavirtaa kuljettavissa virtakiskoissa ja komponenteissa dynaamisia eli mekaanisia rasituksia ja terminen oikosulkuvirta I_{th} termisiä eli lämmittäviä vaikutuksia. Rakenteen suunnittelussa ja komponenttien mitoituksessa on tarpeen tarkastella oikosulkuvirran huippuarvoa i_p , symmetrisen oikosulkuvirran katkaisukykyä I_b ja termistä oikosulkuvirtaa I_{th} .

| Short-circuit currents | Equipment | Relevant currents | | |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | k3 | k2 | k1 |
| maximum currents | | | | |
| stress: | | | | |
| – dynamic | components of installations | i_p | i_p | – |
| – switching on | switching devices | i_p | – | i_p |
| – switching off | switching devices | I_b | – | I_b |
| – thermal | components of installations, lines | I_{th} | – | I_{th} |
| minimum currents | | | | |
| tripping of relays | protection | – | I_k'' , I_k | I_k'' , I_k |

Kuva 9. Eri oikosulkuvirrat ja niiden vaikutukset komponenttien mitoitukseen (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 37)

Oikosulkuvirrat erotellaan generaattorista kaukana tapahtuviin ja generaattorin lähellä tapahtuviin oikosulkuihin (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 37). Kaukana tuotannosta tapahtuvissa oikosuluissa symmetrisen oikosulkuvirran katkaisukyky I_b on yhtä suuri kuin alkuoikosulkuvirta I_k'' sekä alkuoikosulkuvirta yhtä suuri kuin jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_k (International Electrotechnical Commission, 2016). Koska oikosulkuvirran huippuarvo i_p sekä terminen oikosulkuvirta I_{th} riippuvat osakseen alkuoikosulkuvirran suuruudesta, on muuntamon rakenteen suunnittelussa ja komponenttien mitoituksessa tarpeen tietää suurimman alkuoikosulkuvirran suuruus. (International Electrotechnical Commission, 2016). Kuvassa 10 havainnollistettu oikosulkuvirta ajan funktiona, kun oikosulkuvirta tapahtuu kaukana generaattorista (International Electrotechnical Commission, 2016).

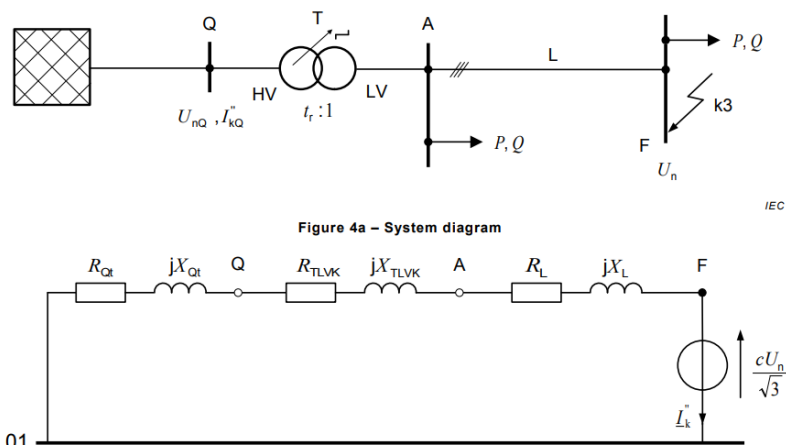


Kuva 10. Oikosulkuvirta ajan funktiona (International Electrotechnical Commission, 2016).

Vastukseton kolmivaiheinen oikosulku tuottaa suurimman vikavirran kolmivaihejärjestelmässä, joten puistomuuntamon suunnittelua ja mitoitusta varten tarpeen selvittää kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta I_{k3}'' (Elovaara & Haarla, 2011, s. 171).

Oikosulkuvirran laskennassa käytetään hyväksi symmetrisiä komponentteja, joilla laskettava verkko jaetaan myötä-, vasta- ja nollaimpedansseihin. Kolmivaiheisia vikoja eli symmetrisiä vikoja lasketaan myötäimpedansseja käyttäen.

Laskettaessa standardissa IEC 60909 esitetyllä menetelmällä, verkon eri osat korvataan niiden oikosulkuimpedansseilla redusoituna laskettavalle jännitetasolle. Menetelmällä laskettaessa jätetään huomioimatta ei-pyörivien kuormien rinnakkaisadmittanssit, myötä- ja vastakomponentteilla laskettaessa johtojen kapasitanssit ja muuntajien magnetointiadmittanssit, jolloin laskentatavasta saadaan yksinkertaisempi malli (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 19). Kuvassa 11 on esitetty säteisverkko sekä sen sijaiskytkentä, jossa verkon eri osat ovat korvattu resistansseilla ja reaktansseilla. Kuvassa oleva verkko on jaettu kolmeen pisteeseen Q, A ja F, joista pisteessä F tapahtuu kolmivaiheinen oikosulku.



Kuva 11. Säteisverkon sijaiskytkentä oikosulkuvirtaa laskettaessa (International Electrotechnical Commission, 2016)

Pisteessä Q tiedetään taustaverkon nimellijännite sekä pisteen oikosulkuvirta, joiden avulla voidaan laskea taustaverkon myötäimpedanssin suuruus kaavalla

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}}, \quad (11)$$

missä c on standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin, U_{nQ} on taustaverkon nimellijännite ja I_{kQ} on taustaverkon oikosulkuvirta pisteessä Q (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 23).

Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c määräytyy laskettavan verkon jännitetason sekä laskettavan oikosulkuvirran mukaan. Taulukossa 5 on esitetty jännitekerroimet eri jännitetasoilla. Taulukossa esitetyistä kertoimista c_{\max} -kerrointa käytetään laskettaessa maksimioikosulkuvirtaa ja c_{\min} laskettaessa minimioikosulkuvirtaa.

Taulukko 5. Jännitekerroin oikosulkuvirtojen laskentaan (International Electrotechnical Commission, 2016).

| Verkon nimellijännite | c_{\max} | c_{\min} |
|-----------------------|------------|------------|
|-----------------------|------------|------------|

| | | |
|---------------------|------|------|
| 100 – 1000 V | | |
| Vaihteluväli ± 6 % | 1,05 | 0,95 |
| Vaihteluväli ± 10 % | 1,10 | 0,90 |
| >1 – 230 kV | 1,10 | 1,00 |
| > 230 kV | 1,10 | 1,00 |

Jos taustaverkon resistanssi-reaktanssisuhde $\frac{R_Q}{X_Q}$ on tiedossa, voidaan kaavalla 11 laskettu verkon impedanssi jakaa reaktanssiin sekä resistanssiin suhteen avulla. Jos suhde ei ole tiedossa, yli 35 kV ilmajohtoilla voidaan impedanssin koostuvan pelkästään induktiivisesta reaktanssista (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 24). Muissa tapauksissa voidaan taustaverkon resistanssi R_Q ja reaktanssi X_Q laskea kaavoilla (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 24)

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad (12)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q. \quad (13)$$

Kuvan 11 pisteiden Q ja A välisen kaksikäämisen jakelumuuntajan myötäimpedanssi Z_T lasketaan kaavalla

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} * \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}, \quad (14)$$

missä U_{rT} on muuntajan ylä- tai alajännitepuolen nimellisjännite, u_{rT} on muuntajan oikosulkujännite prosentteina ja S_{rT} on muuntajan nimellisteho (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 25).

Muuntajan myötäimpedanssin resistanssiosa R_T lasketaan kaavalla

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2}, \quad (15)$$

missä P_{krT} on muuntajan tehöahiöt nimellisvirralla ja I_{rT} on muuntajan ylä- tai alajän- nitepuolen nimellisvirta (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 25).

Muuntajan myötäimpedanssin ja -resistanssin avulla voidaan laskea muuntajan myötä- reaktanssi kaavalla

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (16)$$

Kuvan 11 pisteen A ja oikosulkukohdan F välisen kaapelin myötäimpedanssi voidaan las- kea kaapelivalmistajan tiedoista, ohjeesta IEC TR 60909-2 tai muusta kirjallisuudesta (In- ternational Electrotechnical Commission, 2016, s. 28). Yleensä kaapelin resistanssi on esitetty 20 celsiusasteessa. Jos laskennassa on tarve käyttää korkeampia johdinlämpöti- loja, voidaan kaapelin resistanssi R_L muuttaa tarvittavaan lämpötilaan kaavalla

$$R_L = [1 + \alpha_{20}(\vartheta_e - 20^\circ\text{C})]R_{L20}, \quad (17)$$

missä α_{20} resistanssinlämpötilakerroin 20 celsiusasteessa, R_{L20} on kaapelin resistanssi 20 celsiusasteen lämpötilassa ja ϑ_e on laskennassa käytettävä lämpötila (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 42).

Laskennassa käytettävät suureet tulee redusoida laskettavalle jännitetasolle, minkä jäl- keen voidaan laskea kolmivaiheinen alkuoikosulkuvirta I_{k3}'' pisteessä F kaavalla

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}, \quad (18)$$

missä U_n on verkon nimellisjännite laskentapisteessä, R_k on verkon myötäresistanssit yhteenlaskettuna ja X_k verkon myötäreaktanssit yhteenlaskettuna (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 43).

Alkuoikosulkuvirran I_{k3}'' avulla voidaan laskea oikosulkuvirran huippuarvo i_p kaavalla

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_{k3}'', \quad (19)$$

missä κ on sysäyskerroin (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 49).

Sysäyskerroimen suuruuden määrittelee koko laskettavan verkon resistanssi-reaktanssi-suhde $\frac{R_k}{X_k}$. Sysäyskerroin κ lasketaan kaavalla (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 49)

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R_k}{X_k}}. \quad (20)$$

Terminen oikosulkuvirta I_{th} lasketaan alkuoikosulkuvirran I_{k3}'' avulla kaavalla

$$I_{th} = I_{k3}'' \sqrt{m + n}, \quad (21)$$

missä m on oikosulkuvirran DC-komponentin aiheuttama lämmitysvaikutus ja n oikosulkuvirran AC-komponentin aiheuttama lämmitysvaikutus (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 65).

Kaukana generaattorista tapahtuvissa oikosuluissa, jotka kestävät yli 0,5 sekuntia, voidaan termien m ja n summan olettaa olevan yksi (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 67).

Termistä oikosulkuvirtaa käytetään yhdessä kaavan 22 Joulen integraalin kanssa, joka kuvaa oikosulkuvirran aiheuttamaa lämpövaikutusta

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_{th}^2 T_k, \quad (22)$$

missä T_k on oikosulun kesto aika (International Electrotechnical Commission, 2016, s. 67).

Teoriassa puistomuuntamon oikosulkukestoisuus voidaan mitoittaa joka verkon pisteen oikosulkuvirralla erikseen oikosulkuvirran huippuarvon i_p , termisen oikosulkuvirran I_{th} ja oikosulun kestoajan T_k mukaan. Käytännössä muuntamoiden keskijännitekojeistot kuitenkin mitoitetaan yhden tietyn termisen oikosulkuvirran ja oikosulkuvirran huippuarvon mukaan. Pienjännitekeskus mitoitetaan usein syöttävän muuntajan likimääräisen kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla (Oy Alfen Elkamo Ab, 2026). Yleisesti, kun oikosulku tapahtuu lähellä muuntajaa, voidaan pienjänniteverkon laskennassa jättää taustaverkko huomioimatta, jos taustaverkon alkuoikosulkuteho S_{kQ}'' täyttää alla olevan epäyhtälön (Huotari & Partanen, 1998, s. 16)

$$S_{kQ}'' > 400 \cdot S_{rT}. \quad (23)$$

Muuntajan likimääräinen kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3T} voidaan laskea kaavalla 18 käyttäen laskennassa vain muuntajan myötäimpedanssia. Oikosulkuvirran huippuarvoa laskettaessa sysäyskertoimen κ arvo voidaan arvioida muuntajan myötäresistanssilla R_T ja myötäreaktanssilla X_T .

Kaavalla 18 laskettuna 1000 kilovolttiampeerin jakelumuuntajan likimääräiseksi kolmivaiheiseksi oikosulkuvirraksi I_{k3T} saadaan noin 38,7 kiloampeeria ja oikosulkuvirran huippuarvoksi i_p noin 86 kiloampeeria, kun laskennassa on käytetty taulukossa 6 esitettyjä arvoja. Sähkölaitteen nimellisvirtojen arvot voidaan määrittää standardissa IEC 60059 *IEC standard current ratings* esitetyllä R10-sarjalla, jolloin puistomuuntamon pienjännitekeskuksen termiseksi oikosulkuvirtakestoisuudeksi I_{cw} saadaan 40 kiloampeeria per yksi sekunti, kun valitaan nimelliseksi oikosulun kestoajaksi T_k yksi sekunti (International Electrotechnical Commission, 2017, s. 36, 2022a, s. 36).

Taulukko 6. 1000 KVA jakelumuuntajan likimääräisen oikosulkuvirran laskennassa käytetyt arvot.

| Suure | Suuruus |
|----------------------------------|----------|
| Toision nimellisjännite U_{rT} | 410 V |
| Nimellisteho S_{rT} | 1000 kVA |
| Oikosulkujännite u_{kr} | 4 % |
| Nimellisvirta I_{rT} | 1408 A |
| Kuormitushäviöt P_{krT} | 7600 W |
| Oikosulun kesto aika T_k | 1 s |
| Jännitekerroin c | 1,10 |

4.2.2 Oikosulkuvirtojen vaikutusten laskenta jäykissä kiskostoissa

Tiedettäessä oikosulkuvirtojen suuruudet, voidaan arvioida niiden vaikutuksia puistomuuntamon rakenteissa ja komponenteissa. Tässä luvussa tarkastellaan jäykkien virtakiskostojen oikosulkukestoisuutta, koska ne suunnitellaan ja rakennetaan kohdeyrityksen tiloissa. Oikosulkuvirran aiheuttamia lämmitys- ja voimavaikutuksia virtakiskostoihin voidaan tarkastella standardissa IEC 60865-1 *Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods* esitetyillä tavoilla (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 12).

Kolmivaiheisessa oikosulussa suurin voimavaikutus kohdistuu keskimmäiseen virtakiskoon, kun vaihekiskot ovat asennettu samaan tasoon ja niiden etäisyys toisistaan on sama (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 13). Oikosulkuvirran huippuarvon i_p aiheuttama huippuvoima F_{m3} keskimmäiseen virtakiskoon lasketaan kaavalla

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m}, \quad (24)$$

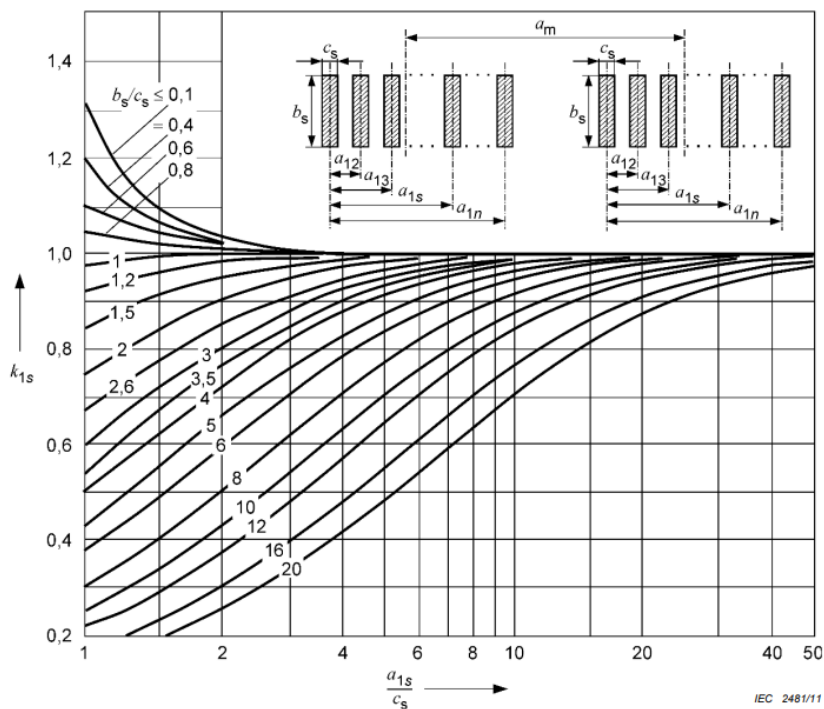
missä a_m on vaihekiskojen tehollinen etäisyys ja l on tukipisteiden keskilinjojen välinen etäisyys (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 13).

Suorakulmaisilla virtakiskoilla tehollinen etäisyys a_m lasketaan kaavalla

$$a_m = \frac{a}{k_{12}}, \quad (25)$$

missä a on vaihekiskojen keskilinjojen välinen etäisyys ja k_{12} on kerroin tehollisen etäisyyden määrittämiseen (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 14).

Kerroin k_{12} määritetään kuvan 12 kuvaajan avulla. Kuvaajaa käytettäessä kertoimen k_{12} määrittämiseen termit a_{1s} , b_s ja c_s ovat vaihekiskojen keskilinjojen etäisyys, vaihekiskon poikittaismitta voiman suuntaan nähden ja vaihekiskon pystymitta voiman suuntaan nähden (International Electrotechnical Commission, 2012a).



Kuva 12. Kuvaaja kertoimen k_{12} määrittämiseen (International Electrotechnical Commission, 2012a).

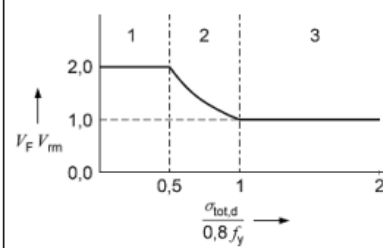
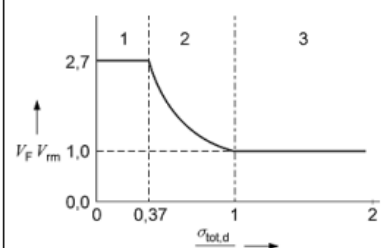
Kun lasketaan virtakiskoihin kohdistuneita jännityksiä, oletetaan niiden olevan tuettu niin, että niihin kohdistuu vain taivutusjännitys (International Electrotechnical

Commission, 2012a, s. 16). Huippuvoiman F_{m3} avulla voidaan täten laskea keskimmäiseen virtakiskoon kohdistuva taivutusjännitys $\sigma_{m,d}$ kaavalla

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{r m} \beta \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot W_m}, \quad (26)$$




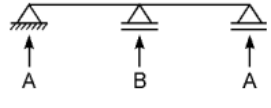
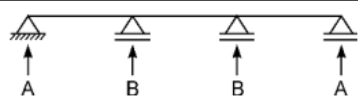
missä $V_{\sigma m}$ ja $V_{r m}$ ovat kertoimet dynaamisille vaikutuksille, β on kiskoston tuennasta riippuva kerroin ja W_m on vaihekiskojen välisten voimien suunnan suhteen laskettu taivutusvastus (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 16).

Kertoimet $V_{\sigma m}$ ja $V_{r m}$ riippuvat oikosulun tyypistä sekä automaattisesta jälleenkytkennästä. Kertoimien määrittäminen on esitetty kuvassa 13.

| Type of short-circuit | System | | | |
|-----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Without three-phase automatic reclosing | With three-phase automatic reclosing | | With and without three-phase automatic reclosing |
| | $V_{cm} V_{rm}, V_{os} V_{rs}$ | $V_{cm} V_{rm}, V_{os} V_{rs}$ | | $V_F V_{rm}$ |
| | | First current flow | Second current flow | |
| Line-to-line | 1,0 | 1,0 | 1,8 | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>2,0 for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$</p> <p>$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$</p> <p>1,0 for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$</p> </div> <div style="border-left: 1px solid black; padding-left: 5px;"> <p>range</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </div> </div>  |
| Three-phase | 1,0 | 1,0 | 1,8 | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>2,7 for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$</p> <p>$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$</p> <p>1,0 for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$</p> </div> <div style="border-left: 1px solid black; padding-left: 5px;"> <p>range</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </div> </div>  |

Kuva 13. Kertoimien määrittäminen oikosulun tyypin ja jälleenkytkennän mukaan (International Electrotechnical Commission, 2012a).

Kerros β määritellään kiskoston tukirakenteen mukaan. Kertoimen määrittäminen on esitetty kuvassa 14. Jos ei ole tiedossa tukirakenteiden tyyppiä, käytetään laskennassa kerrointa, jolla saadaan epäedullisin tilanne (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 17).

| Type of beam and support | | | α | $\beta^*)$ | γ |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| Single span beam | A and B: simple supports |  | A: 0,5 B: 0,5 | 1,0 | 1,57 |
| | A: fixed support B: simple support |  | A: 0,625 B: 0,375 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | A and B: fixed supports |  | A: 0,5 B: 0,5 | $\frac{8}{16} = 0,5$ | 3,56 |
| Continuous beam with equidistant simple supports | Two spans |  | A: 0,375 B: 1,25 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | Three or more spans |  | A: 0,4 B: 1,1 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 3,56 |
| * Plasticity effects included. | | | | | |

Kuva 14. Kertoimen β määrittäminen tukirakenteen mukaan (International Electrotechnical Commission, 2012a).

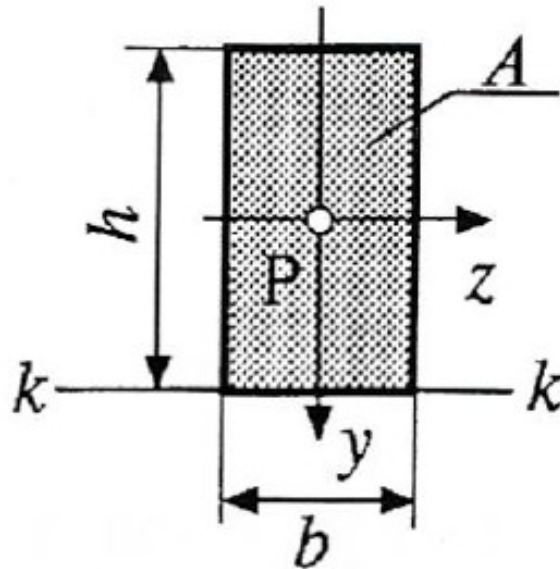
Taivutusvastuksen W_m laskentaan vaikuttaa virtakiskoon vaikuttavan voiman suunta suhteessa virtakiskoon. Kuvassa 15 on esitetty suorakulmainen virtakisko, johon vaikuttavia voimia on kuvattu y- ja z-akselin suuntaisilla komponenteilla. Kuvassa 15 esitetyn y-akselin suuntainen taivutusvastus W_y lasketaan kaavalla

$$W_y = \frac{hb^2}{6}, \quad (27)$$

missä h on y-akselin suuntainen mitta ja b on z-akselin suuntainen mitta (Tammertekniikka, 2023, s. 144).

Kuvassa 15 esitetyn z-akselin suuntainen taivutusvastus W_z lasketaan kaavalla (Tammertekniikka, 2023, s. 144)

$$W_z = \frac{bh^2}{6}. \quad (28)$$




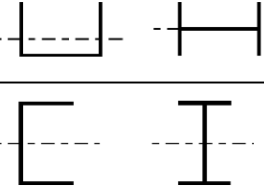
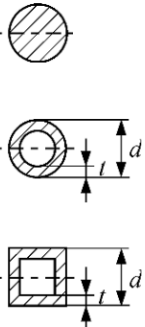
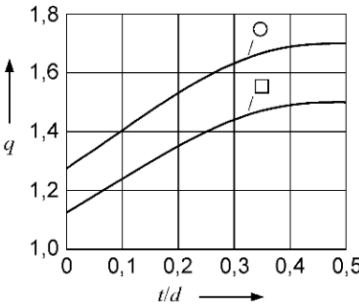
Kuva 15. Suorakulmaisen kappaleen taivutusvastuksen laskeminen (Tammertekniikka, 2023).

Virtakisko kestää oikosulun aiheuttamat voimavaikutukset, jos taivutusjännitys $\sigma_{m,d}$ täyttää epäyhtälön.

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y, \quad (29)$$

missä q on kerroin, joka kuvaa kappaleen plastisesta käyttäytymisestä johtuvaa sallitun jännityksen kasvua ja f_y on aineen myötölujuutta (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 20).

Kertoimeen q vaikuttaa virtakiskon muoto ja kohdistuvan voiman suunta. Kuvassa 16 on esitetty kertoimen määrittäminen.

| Cross section | Cross section |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  $q = 1,5$ |  $q = 1,83$ $q = 1,19$ |
|  $q = 1,7$ $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$ $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$ |  |
| q is valid for the dotted bending axis. The forces are perpendicular to it. | |

Kuva 16. Kertoimen q määrittäminen (International Electrotechnical Commission, 2012a).

Myötölujuus f_y tarkoittaa pistettä, jossa materiaali alkaa myötää staattisessa jännityksessä eli kappaleen venymä kasvaa, vaikka jännitys ei kasva (Salmi & Pajunen, 2010, s. 36). Myötölujuus jaetaan alempaan ja ylempään myötörajaan, joista alemman myötörajan ylittyessä myötääminen alkaa ja ylempään myötörajan ylittyessä kappaleen myötääminen loppuu ja pystyy ottamaan vastaan jännityksen kasvua, jolloin kappale myötölujittuu. Usein laskelmissa käytetään ylempää myötörajaa (Salmi & Pajunen, 2010, s. 36). Myötöraja riippuu kappaleen materiaalista. Joillekin materiaaleille, kuten alumiinille, ei voida määrittellä tarkkaa myötörajaa, jolloin myötörajan tilalla käytetään venymärajaa $R_{p0,2}$, joka vastaa 0,2 prosentin pysyvää venymää staattisessa jännityksessä (Salmi & Pajunen, 2010, s. 36). Alla olevassa taulukossa on esitetty joidenkin kupari- ja alumiinivirtakiskojen venymärajoja.

Taulukko 7. Kupari- ja alumiinivirtakiskojen venymärajoja (Alumeco, 2025; Metal Center Group, 2025).

| Materiaali | Venymäraja $R_{p0,2}$ |
|----------------|-----------------------|
| EN AW 6101A T6 | 170,00 MPa |
| EN Cu-OF R220 | 140,00 MPa |

Keskimmäisen virtakiskon lisäksi oikosulkutilanteessa virtakiskon tukieristimiin välittyy voimavaikutus $F_{r,d}$, joka lasketaan kaavalla

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_{m3}, \quad (30)$$

missä α on tukirakenteesta riippuva kerroin (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 21).

Kertoimet $V_F V_{rm}$ ja α määritetään kuvien 13 ja 14 avulla. Jos tukieristimiin kohdistunut voimavaikutus on pienempi kuin tukieristimien sallittu veto-, puristus- tai taivutuslujuus riippuen tukieristimen asennuksesta, voidaan todeta tukieristimien kestävä oikosulun aiheuttamat voimavaikutukset.

Oikosulkuvirran huippuarvon i_p aiheuttamien dynaamisten vaikutusten lisäksi tulee tarkastella termisen oikosulkuvirran I_{th} vaikutuksia virtakiskon lämpenemiseen oikosulkutilanteessa. Termisen oikosulkuvirran I_{th} avulla voidaan laskea virtakiskon oikosulkutiheys S_{th} kaavalla

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{A_S}, \quad (31)$$

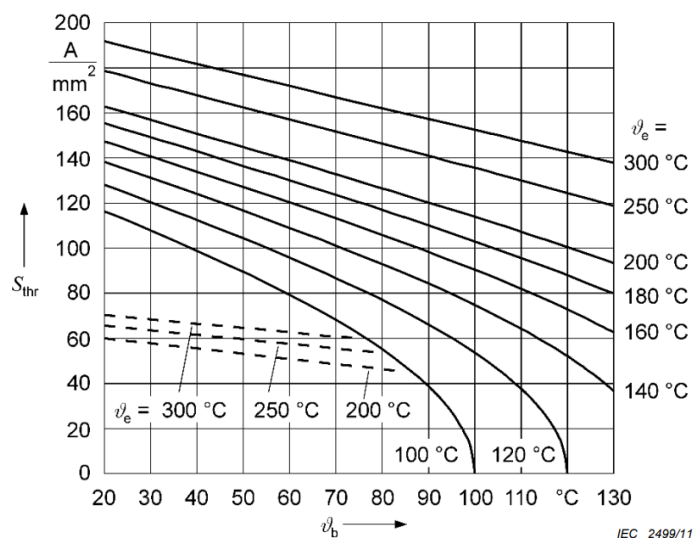
missä A_S on virtakiskon poikkipinta-ala.

Virtakiskon oikosulkuvirtatiheyden S_{th} tulee täyttää alla oleva epäyhtälö, jotta virtakiskon kestä oikosulun termiset vaikutukset

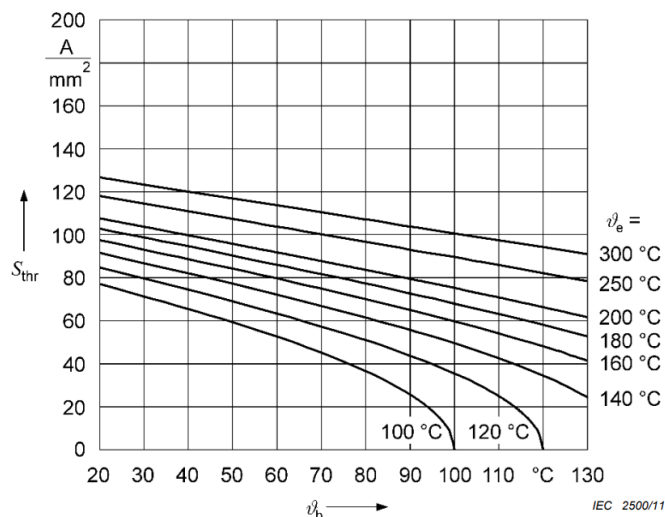
$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}, \quad (32)$$

missä S_{thr} on nimellinen oikosulkuvirtatiheys ja T_{kr} on oikosulkuvirran kestoaika, jolle nimellinen oikosulkuvirtatiheys on ilmoitettu (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 45).

Kupari- ja alumiinivirtakiskoille nimellinen oikosulkuvirtatiheys S_{thr} yhden sekunnin kestoajalla saadaan kuvien 17 ja 18 kuvaajien avulla. Kuvissa ϑ_b kuvaa virtakiskon alkulämpötilaa ennen oikosulun alkua ja ϑ_e virtakiskon loppulämpötilaa oikosulun päätyttyä. Kupari- ja alumiinivirtakiskoille suositeltu enimmäisloppulämpötila ϑ_e on 200 celsiusastetta (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 43).



Kuva 17. Nimellisen oikosulkuvirtatiheyden määrittäminen kuparivirtakiskolle (ehyet viivat) oikosulun kestoajalla yksi sekunti (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 44).



Kuva 18. Nimellisen oikosulkuvirtatiheyden määrittäminen alumiinivirtakiskolle (ehyet viivat) oikosulun kestoajalla yksi sekunti (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 44).

Yllä esitettyssä tavassa on tehty oletuksia laskennan mahdollistamiseksi. Tapa ei ota huomioon virranahtoa, johtimen resistanssin muutos lämpötilan suhteen oletetaan lineaarisiksi, johtimen ominaislämpökapasiteetti oletetaan muuttumattomaksi ja lämpenemistä adiabaattiseksi. Virranahto tulee ottaa laskennassa huomioon, kun virtakiskon poikkipinta-ala on yli 600 neliömillimetriä (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 42). Kuvaajissa esitetyt nimelliset oikosulkutiheydet S_{thr} on määritetty kuvassa 6 alla olevan taulukon arvoilla.

Taulukko 8. Kuvaajien nimellisen oikosulkukestoisuuden määrittämiseen käytetyt ominaisuudet.

| Suure | Kupari | Alumiiniseos |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tiheys ρ | $8900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | $390 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ | $910 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ |
| Sähkönjohtavuus 20 celsiusasteessa σ_{20} | $56,00 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ | $34,80 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ |
| Resistiivisyyden lämpötilakerroin 20 celsiusasteessa α_{20} | $0,0039 \frac{1}{\text{K}}$ | $0,004 \frac{1}{\text{K}}$ |

Jos käytetyn kiskostomateriaalin ominaisuudet poikkeavat yllä olevassa taulukossa esitetyistä arvoista, voidaan nimellinen oikosulkuvirtatiheys S_{thr} laskea alla olevalla kaavalla käyttäen kyseisen materiaalin arvoja (International Electrotechnical Commission, 2012a, s. 50)

$$S_{\text{thr}} = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{kr}}}} \sqrt{\frac{\sigma_{20} C_p \rho}{\alpha_{20}} \ln \left(\frac{1 + \alpha_{20} (\vartheta_e - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{20} (\vartheta_b - 20^\circ\text{C})} \right)} \quad (33)$$

Edellä lasketun oikosulkuvirran huippuarvon i_p arvolla voidaan laskea tarkastelussa olevan puistomuuntamon pienjännitekeskuksen keskimmäisen vaiheen alumiinikiskoston osiin sekä tukieristimiin vaikuttavat voimat ja jännitykset, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa. Puistomuuntamon pienjännitekeskuksen kiskosto on esitetty luvussa 5. Taulukon 6 venymärajan $R_{p0,2}$ ja kuvan 16 avulla määritetyllä kertoimella q voidaan todeta kiskoston täyttävän kaavassa 29 esitetyn ehdon dynaamiselle oikosulkuvirtakestoisuudelle. Tarkempia yksityiskohtaisia tietoja laskennassa käytetyistä arvoista ei tässä diplomityössä esitetä.

Taulukko 9. Käsin lasketut voimavaikutukset ja taivutusjännitykset vaiheen L2 kiskoston osissa.

| Kiskoston osa | Voimavaikutus F_{m3} tai $F_{r,d}$ | Taivutusjännitys $\sigma_{m,d}$ |
|----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| L2 vaakakisko | 4034 N | 53,9 MPa |
| L2 ylempi pystykisko | 3761 N | 28,2 MPa |
| L2 alempi pystykisko | 3761 N | 28,2 MPa |
| L2 vaakakiskoston tukieristin | 5043 N | |
| L2 ylempään pystykiskoston tukieristin | 5077 N | |
| L2 alemman pystykiskoston tukieristin | 5077 N | |

Kuvassa 18 esitetyn kuvaajan avulla voidaan todeta alumiinikiskoston kestävän myös edellä lasketun pienjännitekeskuksen termisen oikosulkuvirran I_{cw} vaikutukset, kun alkulämpötila ϑ_b on 65 celsiusastetta ja loppulämpötila ϑ_e on 200 celsiusastetta.

5 Mallintaminen ja simulointi

Tarkastelussa olevan puistomuuntamon ELMO 1000 4xD2 muuntajatilalla ja pienjännitekeskuksen kiskosto mallinnettiin COMSOL Multiphysics ohjelmistolla. Simulointimalleilla toteutettiin puistomuuntamon muuntajatilalla ilmanvaihdon sekä pienjännitekeskuksen oikosulkukestoisuuden simuloinnit. Luvun 4 käsin laskennan arvoja verrattiin simulointimalleilla saatuihin arvoihin todentaen samalla simulointimallien toiminta. Simuloinnit toteutettiin tietokoneella, jossa oli taulukon 10 mukaiset tekniset ominaisuudet.

Taulukko 10. Simuloinnissa käytetyn tietokoneen tekniset tiedot.

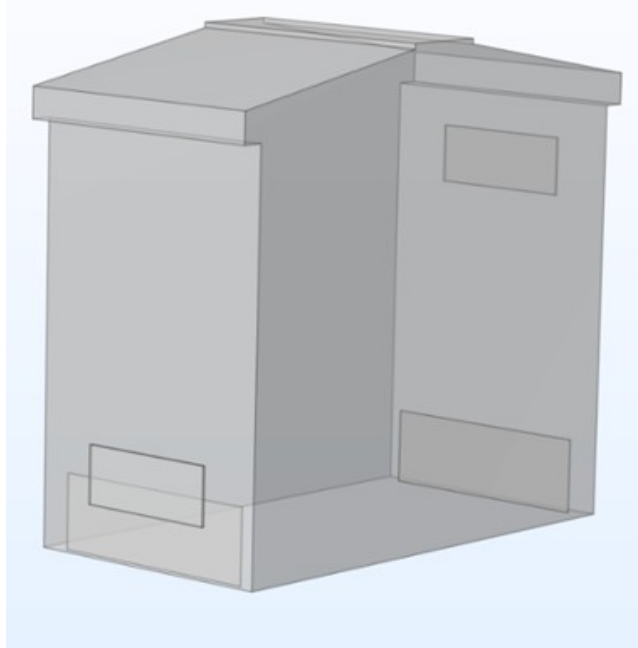
| | |
|---------------|----------------------------------------|
| Proessori | 3G Gen Intel® Core™ i7-13700T 1.40 GHz |
| Näytönohjain | Intel® UHD Graphics 770 |
| Keskusmuisti | DDR4 16 Gt 3200 MT/s |
| Tallennustila | SSD 477 Gt |

5.1 Muuntajatilalla ilmanvaihdon simulointi

Luvun 4 mukaisesti ONAN jäähdytteen jakelumuuntajan tehokas jäähtyminen vaatii tehokasta ilmankiertoa muuntajan ympärillä. Simuloinnissa tutkittiin yksinkertaisen mallin avulla kahta eri tilannetta, joissa samankokoiset ilmanvaihtoaukot olivat sijoitettu niin, että toisessa simuloinnissa muuntajatilalla öljynkeräysallas rajoitti alemmasta ilmanvaihtoaukoista virtaavaa ilmavirtaa ja toisessa öljynkeräysallas poistettiin. Simuloinneissa tarkasteltiin öljykaukalon kuristavaa vaikutusta muuntajatilalla ilman virtausnopeuden avulla.

5.1.1 Simulointimallin rakenne

Ilmavirtauksen tarkastelua varten rakennettiin muuntajatilalla simulointimalli, joka on esitetty kuvassa 19. Muuntajatilalla sivuille ristikulmiin mallinnettiin ilmanvaihtoaukot, joista alempi oletettiin sisääntuloaukoksi ja ylempi ulostuloaukoksi. Molemmilla ilmanvaihtoaukoilla oli sama pinta-ala A .



Kuva 19. Muuntajatilän simulointimalli.

Muuntajatilän ilman ominaisuuksina käytettiin taulukossa 11 esitettyjä arvoja. Öljynkeräysaltaan materiaalina käytettiin COMSOL Multiphysics materiaalikirjastosta valmista AISI 4340 terästä.

Taulukko 11. Ilman ominaisuudet muuntajatilän ilmavirtauksen simuloinnissa.

| Suure | Suuruus |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Ilman tiheys ρ | $1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Ilman viskositeetti η | $18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ |

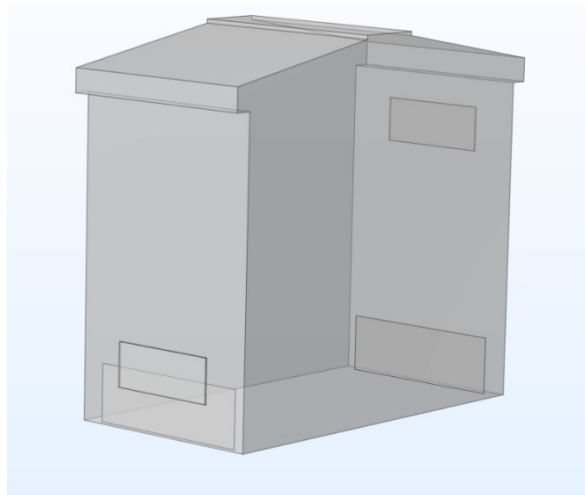
Simulointi toteutettiin Laminar Flow virtausfysiikalla. Laskennan yksinkertaistamiseksi sisään- ja ulostuloaukkojen välille määritettiin kaavalla 8 saatu virtauksen aiheuttama paine-ero Δp sekä laskennassa jätettiin inertia-termi huomioimatta.

5.1.2 Ilman virtaus öljynkeräysaltaan kanssa

Ilman virtauksen simuloinnissa öljynkeräysaltaan kanssa käytetyt parametrit on esitetty alla olevassa taulukossa. Kuvassa 20 on esitetty sisääntuloaukon ja öljynkeräysaltaan seinämä. Öljynkeräysaltaan ja sisääntuloaukon välinen etäisyys oli noin neljä senttimetriä.

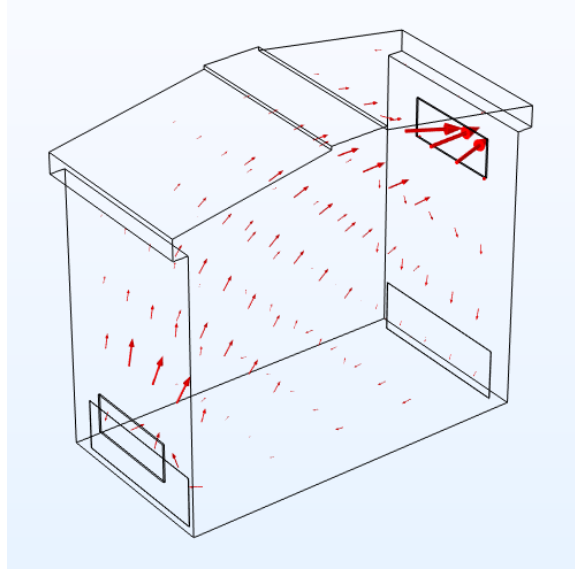
Taulukko 12. Muuntajatilän ilmapirtauksen simuloinnissa käytetyt parametrit.

| Suure | Suuruus |
|-------------------------|---------------------|
| Aukkojen pinta-ala A | 0,35 m ² |
| Korkeusero z | 1,2 m |
| Lämpötilaero ΔT | 20 K |
| Paine-ero Δp | 0,950 Pa |



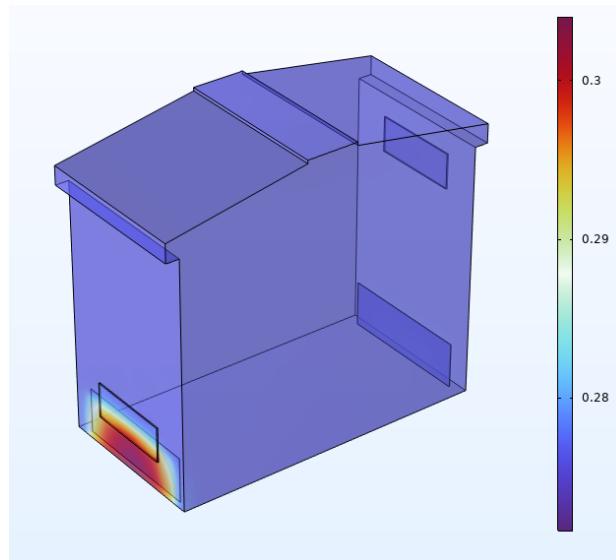
Kuva 20. Öljynkeräysallas osittain ilmanvaihtoaukon edessä.

Kuvassa 21 on esitetty simuloitu ilmapirtaus muuntajatilän sisällä öljynkeräysaltaan kanssa. Virtauksesta on nähtävissä luvussa 4 esitetty korkeuserosta johtuva painovoimainen ilmapirtaus. Simuloinnilla ilman keskimääräiseksi virtausnopeudeksi v_{avg} saatiin 0,072 metriä sekunnissa.



Kuva 21. Muuntajatilän ilmanvirtaus öljynkeräysaltaan kanssa.

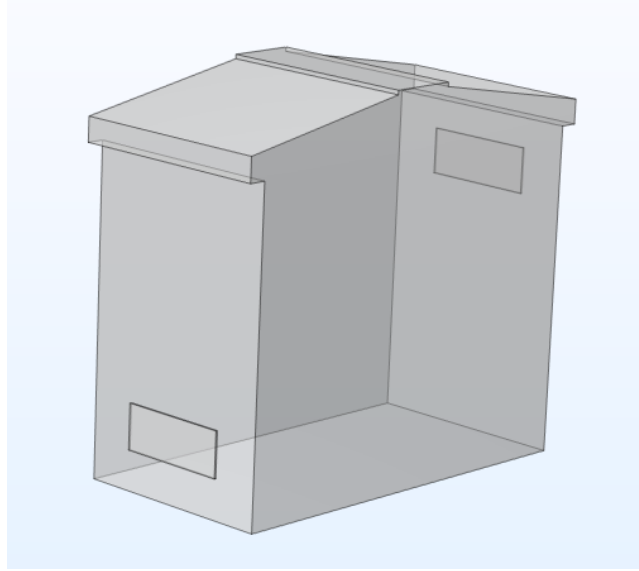
Öljynkeräysaltaan seinämän vaikutus näkyi myös muuntajatilän ilmanpaineessa, joka on esitetty kuvassa 22. Suurin ilmanpaine oli lähellä öljynkeräysaltaan seinämää, mikä kuvastaa ilman pakkautumista ulkoseinän ja öljynkeräysaltaan seinämän väliin. Simuloinnissa alkutilanteessa ilmanpaine asetettiin nollaan pascaliin.



Kuva 22. Muuntajatilän ilmanpaine öljynkeräysaltaan kanssa.

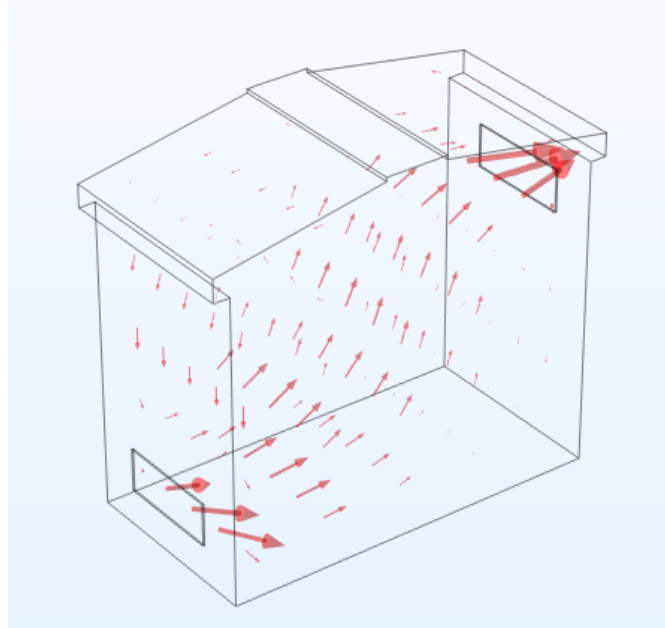
5.1.3 Ilman virtaus ilman öljynkeräysallasta

Simulointi ilman öljynkeräysallasta toteutettiin samoilla simulointiparametreilla kuin edellisessä vaiheessa. Simulointimallista poistettiin öljynkeräysaltaan seinämät. Simulointimalli on esitetty kuvassa 23.



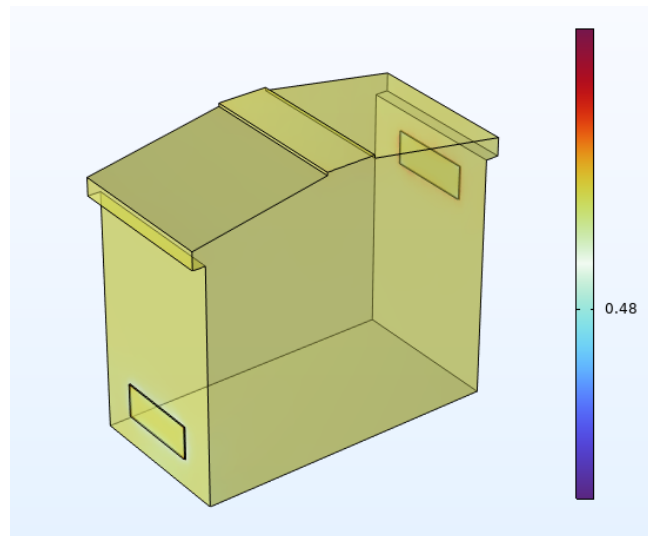
Kuva 23. Muuntajatilän simulointimalli ilman öljynkeräysallasta.

Kuvassa 24 on esitetty muuntajatilän ilmavirtaus ilman öljynkeräysallasta. Ilman keskimääräiseksi virtausnopeudeksi v_{avg} saatiin 0,104 metriä sekunnissa ja aukon virtausnopeudeksi v_a 1,274 metriä sekunnissa.



Kuva 24. Muuntajatilän ilmvirtaus ilman öljynkeräysallasta.

Muuntajatilän ilmanpaine ilman öljynkeräysallasta on esitetty kuvassa 25. Verrattuna ilmanpaineeseen öljynkeräysaltaan kanssa, ei ole nähtävissä vastaavanlaista ilman pakkaantumista.



Kuva 25. Muuntajatilän ilmanpaine ilman öljynkeräysallasta.

Keskimääräinen ilman virtausnopeus v_{avg} oli öljynkeräysaltaan kanssa 0,072 metriä sekunnissa ja ilman öljynkeräysallasta 0,104 metriä sekunnissa. Paineokuvaajista nähtiin ilman pakkautumista öljynkeräysaltaan kanssa. Öljynkeräysallas kuristi siis ilmavirtausta ja näin heikensi muuntajatilän ilmanvaihtoa.

5.1.4 Pohdinta

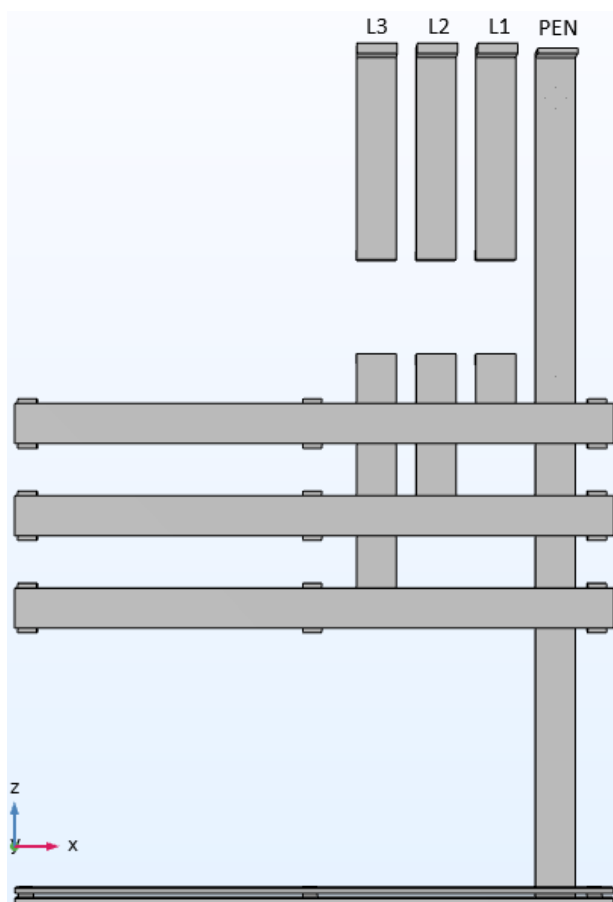
Suoritetuilla simuloinneilla pystyttiin havainnollistamaan muuntajatilän ilman liikettä, jota ei luvun 4 käsin laskennalla voitu huomioda, sillä käsin laskenta ei ota kantaa siihen, kuinka ilma muuntajatilassa käyttäytyy. Käsin laskettu ja simuloinnilla saatu aukon virtausnopeus v_a olivat lähellä toisiaan. Simulointimallia pyrittiin monimutkaistamaan lisäämällä muuntajatilään muuntaja lämmittämään muuntajatilän ilmaa aiheuttaen aidon painovoimaisen ilmanvaihdon, mutta simulointiin käytettävällä koneella simulointi ajat kasvoivat jopa kolmeen vuorokauteen, jonka vuoksi simulointimallia yksinkertaistettiin. Simulointiohjelmistolla on kuitenkin mahdollista simuloida myös todenmukaisempia malleja suuremmalla laskentateholla.

5.2 Oikosulkuvirtojen vaikutusten simulointi

Oikosulkukestoisuuden tarkastelussa keskityttiin kiskoston sekä tukieristimien kestoisuuden oikosulkutilanteessa luvussa 5 esitettyjen ehtojen mukaisesti. Tarkastelua varten rakennettiin kaksi erillistä mallia dynaamisten ja termisten vaikutusten simuloimiseen. Dynaamisten vaikutusten tarkastelussa mallista jätettiin pois tukieristimien kiinnikkeinä toimivat ohutlevyosat, pulttikiinnitykset sekä pienjännitekeskuksen pääkytkimenä toimiva kuormankytkin, joka mallinnettiin vaihekohtaisina tukieristiminä. Virtakiskoston dynaamista kestoisuutta tarkasteltiin yksinkertaisesti Trescan jännityksen, väsymislujuspiirrosten ja siirtymien avulla. Myös termisten vaikutusten tarkastelussa pienjännitekeskuksen kuormankytkin jätettiin mallintamatta ja kiskoston lämmönvaihto ympäristön kanssa oletettiin adiabaattiseksi. Luvun 4 mukaisesti oikosulkuvirtojen dynaamisten ja termisten vaikutusten simulointi toteutettiin sekä vaihekiskostolle että PEN-kiskostolle.

5.2.1 Simulointimallien rakenne

Puistomuuntamon pienjännitekiskosto koostuu pysty- ja vaakakiskostosta. Pystykiskoston vaihekiskojen väliin asennetaan keskuksen pääkytkin, jolla voidaan erottaa vaakakiskostoon asennetut pienjännitelähdöt syöttävästä muuntajasta. Kuvassa 26 on esitetty COMSOL Multiphysics ohjelmistossa mallinnettu pienjännitekiskosto, jossa pääkytkin on korvattu vaihekohtaisilla tukieristimillä mallintamaan pääkytkimen vaihenapoja.



Kuva 26. COMSOL Multiphysics ohjelmistolla mallinnettu pienjännitekiskosto.

Virtakiskoston materiaalina käytettiin taulukossa 10 esitetyn alumiiniseoksen ominaisuuksia. Loput ominaisuudet täydennettiin COMSOL Multiphysics ohjelmiston oman materiaalikirjaston alumiinin ominaisuuksilla. Tukieristimien materiaalina käytettiin polyamidi 66 kuitua, joka on vahvistettu lasikuidulla. Polyamidin ominaisuudet on esitetty taulukossa 11.

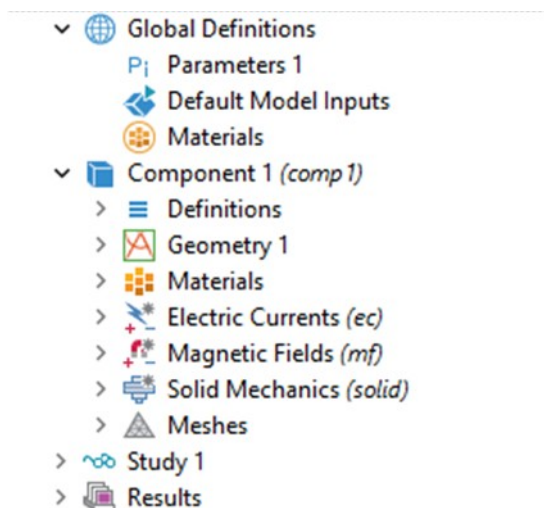
Taulukko 13. Oikosulkuvirtojen dynaamisten vaikutusten simuloinnissa käytetyn alumiinin ominaisuudet.

| Suure | Suuruus |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Sähkönjohtavuus σ_{20} | $34,80 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ |
| Resistiivisyys ρ_o | $0,02874 \mu\Omega\text{m}$ |
| Resistiivisyyden lämpötilakerroin α_{20} | $0,004 \frac{1}{\text{K}}$ |
| Tiheys ρ | $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Kimmokerroin E | 70 GPa |
| Poissonin suhde ν | 0,33 |
| Suhteellinen permeabiliteetti μ_r | 1 |
| Ominaislämpökapasiteetti C_p | $910 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ |

Taulukko 14. Oikosulkuvirtojen dynaamisten vaikutusten simuloinnissa käytetyn polyamidin ominaisuudet (ALBIS, 2026).

| Suure | Suuruus |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Tiheys ρ | $1410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Kimmokerroin E | 11,5 GPa |
| Poissonin suhde ν | 0,4 |

Oikosulkuvirtojen dynaamisten vaikutusten simulointia varten simulointipuu rakennettiin Electric Currents -, Magnetic Fields - ja Solid Mechanics -lohkoja käyttämällä. Simulointipuu on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Oikosulkuvirran dynaamisten vaikutusten simuloinnin simulointipuu.

Electric Currents -lohkossa virtakiskoihin syötettiin ajan suhteen muuttuvat kolmivaiheoikosulkuvirrat $i_1(t)$, $i_2(t)$ ja $i_3(t)$ (Elovaara & Haarla, 2011, s. 173)

$$i_1(t) = \sqrt{2}I_k(\sin(\omega t + \alpha_k - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi)) \quad (34)$$

$$i_2(t) = \sqrt{2}I_k(\sin(\omega t + \alpha_k - \frac{2\pi}{3} - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3} - \varphi)) \quad (35)$$

$$i_3(t) = \sqrt{2}I_k(\sin(\omega t + \alpha_k + \frac{2\pi}{3} - \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3} - \varphi)). \quad (36)$$

Yllä esitetyillä oikosulkuvirroilla saatiin Electric Currents -lohkon avulla virtakiskojen virrantiheys \mathbf{J} , jota käytettiin yhdessä Magnetic Fields -lohkosta saadun magneettivuon tiheyden \mathbf{B} kanssa laskettaessa virtakiskoihin vaikuttava Lorentzin voima \mathbf{F} . Lorentzin voima määritellään virrantiheyden \mathbf{J} ja magneettivuon tiheyden \mathbf{B} ristitulona (COMSOL ab, 2026a)

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (37)$$

Ristitulon avulla laskettiin Lorentzin voiman x-, y- ja z-akselien suuntaiset komponentit, jotka vietiin Solid Mechanics -lohkoon virtakiskojen kuormitukseksi kuvan 28 mukaisesti. Virtakiskojen ja tukieristimen kuormituksena oli lisäksi painovoiman aiheuttama kuormitus, jotka on esitetty kuvissa 29 ja 30.

Force

Load type:
Force per reference volume

f_V User defined

| | | |
|-----------------------------|---|------------------|
| $mf.Jy*mf.Bz - mf.Jz*mf.By$ | x | N/m ³ |
| $mf.Jz*mf.Bx - mf.Jx*mf.Bz$ | y | |
| $mf.Jx*mf.By - mf.Jy*mf.Bx$ | z | |

Kuva 28. Lorentzin voima virtakiskojen kuormituksena.

Force

Load type:
Force per reference volume

f_V User defined

| | | |
|-----------------------------|---|------------------|
| 0 | x | N/m ³ |
| 0 | y | |
| $-9.81[m/s^2]*2700[kg/m^3]$ | z | |

Kuva 29. Virtakiskoihin vaikuttava painovoima.

Force

Load type:
Force per reference volume

f_V User defined

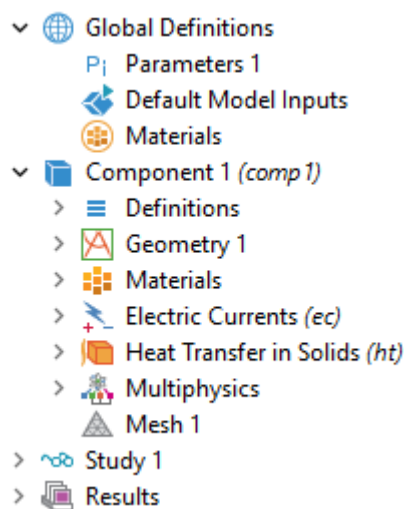
| | | |
|-----------------------------|---|------------------|
| 0 | x | N/m ³ |
| 0 | y | |
| $-9.81[m/s^2]*1150[kg/m^3]$ | z | |

Kuva 30. Tukieristimiin vaikuttava painovoima.

Simulointimallin toimivuus todennettiin vertaamalla simuloinnilla saatua ja luvussa 4 laskettua keskimmäiseen vaakakiskoon kohdistuvaa voimavaikutusta. Simuloinnilla saatiin suurin z-suuntainen voima 5432 newtonia ajassa 9 millisekuntia. Luvussa 4 laskettu voima oli 4034 newtonia, joten voitiin todeta tuloksien olevan samassa suuruusluokassa.

Simuloinnissa oikosulkuvirta saavutti suurimman huippuarvonsa ajassa 10 millisekuntia, joka vastaa kirjallisuudessa esitettyä aikaa suurimmalle oikosulkuvirran huippuarvolle (Huotari & Partanen, 1998, s. 3). Simulointimalli toimi siis oletetulla tavalla.

Oikosulkuvirtojen termisten vaikutusten simulointia varten simulointipuusta poistettiin Magnetic fields - sekä Solid Mechanics -lohkot ja lisättiin Heat Transfer in Solids sekä Electromagnetic Heating -lohkot. Kuvassa 31 on esitetty oikosulkuvirtojen termisten vaikutusten simulointiin käytetty simulointipuu.



Kuva 31. Oikosulkuvirtojen termisten vaikutusten simuloinnin simulointipuu.

Electric Currents -lohkossa kiskostoon syötettiin samat kolmivaihevirratt kuin dynaamisten vaikutusten tarkastelussa. Heat Transfer -lohkossa määriteltiin kiskoston alkulämpötila ϑ_b . Tapahtuma oletettiin adiabaattiseksi eli virtakiskoston ja ympäristön välillä ei tapahtunut lämmönvaihtoa epäedullisimman tilanteen aikaansaamiseksi.

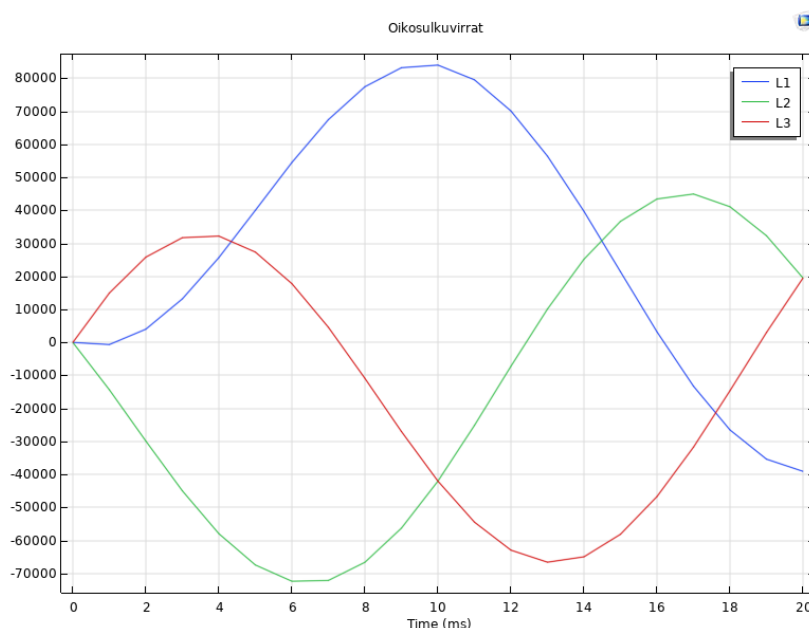
Simulointimallin toimivuus todennettiin syöttämällä virtakiskostoon kaavalla 32 laskettu nimellinen oikosulkuvirtatiheys S_{thr} , kun sallittu loppulämpötila on 200 celsiusastetta. Kiskoston loppulämpötilan keskiarvo oli noin 201 celsiusastetta, joten simulointimalli toimi oletetulla tavalla.

5.2.2 Dynaamisten vaikutusten simulointi

Simuloinnissa käytetyt oikosulkuvirran parametrit on esitetty alla olevassa taulukossa. Parametreilla saadut oikosulkuvirtojen käyrämuodot on esitetty kuvassa 32. Simulointi toteutettiin kahdessa osassa: ensin vaihekiskostolle ja sitten PEN-kiskostolle.

Taulukko 15. Oikosulkuvirran dynaamisten vaikutusten simuloinnin parametrit.

| Suure | Suuruus |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Oikosulkuvirran tehollisarvo I_k (PEN $0,6I_k$) | 38,70 kA |
| Taajuus f | 50 Hz |
| Piirin aikavakio τ | 0,016 s |
| Vikapiirin impedanssin vaihekulma φ | 1,38 rad |
| Kytkenähetki α_k | -0,19 rad |
| Oikosulkuvirran kestoaika T_k | 0,020 s |



Kuva 32. Oikosulkuvirrat vaihevirtakiskoston dynaamisen kestoisuuden simuloinnissa.

Oikosulkuvirran aiheuttama jännitys virtakiskoon ei ole staattista, vaan dynaamista vikavirran mukaan muuttuvaa. Dynaaminen rasitus aiheuttaa materiaaliin mikroskooppisia

vaurioita. Vauriot kumuloituvat aiempaan vaurioon aiheuttaen materiaalin väsymistä ja lopulta murtumista (Salmi & Pajunen, 2010, s. 353). Virtakiskojen keston arvioinnissa dynaamisessa kuormituksessa käytettiin väsymislujuuspiirrosta, joka kuvaa materiaalin kestoja dynaamisessa rasituksessa tietyllä jännitysamplitudin σ_a ja jännityssuhteen R_s arvolla (Salmi & Pajunen, 2010, s. 356–358). Jännitysamplitudi σ_a kuvastaa jännityksen suuruutta keskijännityksestä eli jännityksen staattisesta osasta σ_m laskettuna (Salmi & Pajunen, 2010, s. 356). Jännityssuhde R_s kuvastaa dynaamisen jännityksen vähimmäisjännityksen σ_{\min} ja enimmäisjännityksen σ_{\max} suhdetta (Salmi & Pajunen, 2010, s. 356). Jännityssuhde lasketaan alla olevalla kaavalla

$$R_s = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (38)$$

Jännitysamplitudi σ_a lasketaan kaavalla (Salmi & Pajunen, 2010, s. 356)

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}). \quad (39)$$

Keskijännitys σ_m lasketaan kaavalla (Salmi & Pajunen, 2010, s. 356)

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (40)$$

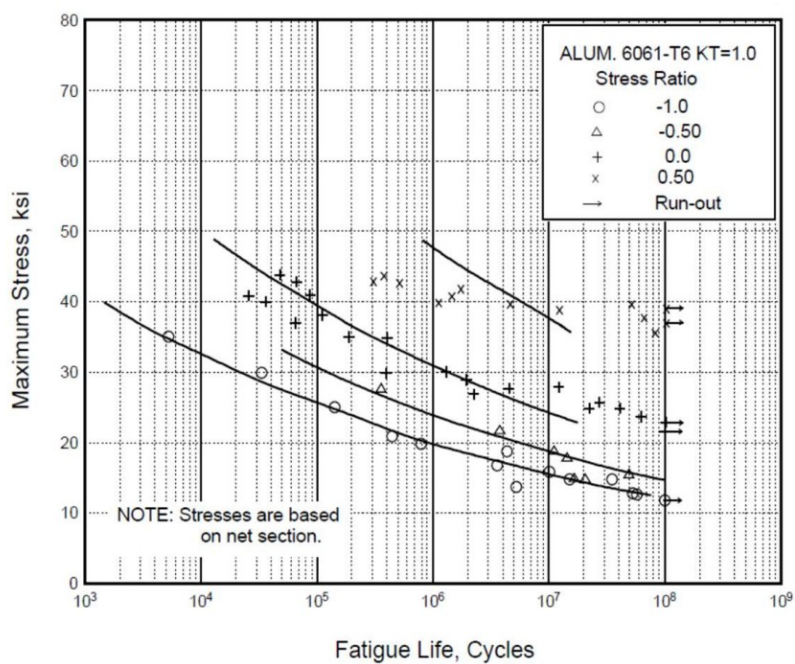
Tarkastelun yksinkertaistamiseksi oletettiin, että taulukossa 13 esitettyjen jännitysten suuruudet pysyivät vakioina koko simuloinnin keston ajan. Taulukon arvoista saadaan jännityssuhteen R_s arvoksi ≈ 0 ja suurimmaksi jännitysamplitudin σ_a arvoksi 6,79 megapascalialia.

Taulukko 16. Vaihevirtakiskoihin vaikuttaneet jännitykset.

| Kiskoston osa | Jännitys σ_{\min} | Jännitys σ_{\max} | Jännitysamplitudi σ_a |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| L1 vaakakisko | 83,11 kPa | 8,87 MPa | 4,39 MPa |
| L1 alempi pystykisko | 28,12 kPa | 4,80 MPa | 2,39 MPa |

| | | | |
|----------------------|------------|-----------|----------|
| L1 ylempi pystykisko | 150,04 kPa | 17,74 MPa | 8,79 MPa |
| L2 vaakakisko | 326,06 kPa | 10,25 MPa | 4,96 MPa |
| L2 alempi pystykisko | 262,61 kPa | 4,25 MPa | 1,99 MPa |
| L2 ylempi pystykisko | 296,90 kPa | 17,17 MPa | 8,44 MPa |
| L3 vaakakisko | 244,91 kPa | 10,04 MPa | 4,90 MPa |
| L3 alempi pystykisko | 289,89 kPa | 7,31 MPa | 3,51 MPa |
| L3 ylempi pystykisko | 285,88 kPa | 11,66 MPa | 5,69 MPa |

Kuvassa 33 on esitetty alumiiniseoksen väsymislukuuspiirros jännityssuhteen R_s ja syklien määrän mukaan. Pystyakselilla on esitetty suurin sallittu jännitysamplitudi σ_a . Jännityssuhteen R_s arvolla 0 ja syklimäärällä 10^4 suurimmaksi sallituksi jännitysamplitudin arvoksi saadaan noin 50 paunaa per neliötuuma eli 345 megapascalialia.



Kuva 33. Alumiiniseoksen väsymislukuuspiirros (de Souza Rabelo ym., 2017, s. 3154).

Murtumisen lisäksi tarkasteltiin suurimpia siirtymiä, jotta nähtiin etteivät virtakiskot kosketa toisiaan oikosulkutestin aikana aiheuttaen valokaarta. Taulukossa 14 on esitetty virtakiskojen suurimmat siirtymät simuloinnin aikana. Suurimmat siirtymät tapahtuivat

oletettavasti ylemmissä pystykiskoissa niiden muodon vuoksi. Suurin siirtymä 610,54 mikrometriä oli vaiheen L2 ylemmässä pystykiskossa.

Taulukko 17. Vaihevirtakiskojen suurimmat siirtymät.

| Kiskoston osa | Siirtymä |
|----------------------|----------------------|
| L1 vaakakisko | 72,27 μm |
| L1 alempi pystykisko | 32,39 μm |
| L1 ylempi pystykisko | 599,12 μm |
| L2 vaakakisko | 76,32 μm |
| L2 alempi pystykisko | 38,51 μm |
| L2 ylempi pystykisko | 610,54 μm |
| L3 vaakakisko | 57,40 μm |
| L3 alempi pystykisko | 60,51 μm |
| L3 ylempi pystykisko | 314,04 μm |

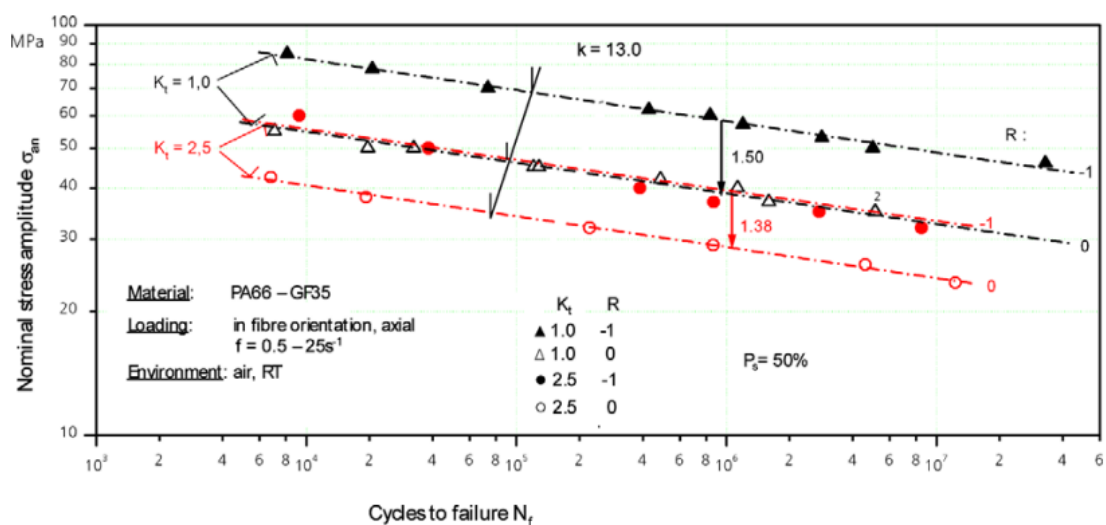
Virtakiskojen lisäksi todennettiin tukieristimien oikosulkukestoisuus. Taulukossa 15 on esitetty vastaavat jännitysten arvot tukieristimille kuin virtakiskojen tarkastelussa. Virtakiskojen tavoin jännityssuhteen R_s arvoksi saadaan ≈ 0 . Suurin jännitysamplitudin σ_a arvo on 14,64 megapascalia.

Taulukko 18. Vaihevirtakiskojen tukieristimiin vaikuttaneet jännitykset.

| Tukieristin | Jännitys σ_{\min} | Jännitys σ_{\max} | Jännitysamplitudi σ_a |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| L1 vaakakisko | 37,87 kPa | 6,00 MPa | 2,98 MPa |
| L1 alempi pääkytkimen napa | 31,80 kPa | 3,07 MPa | 1,52 MPa |
| L1 ylempi pääkytkimen napa | 56,23 kPa | 9,41 MPa | 4,68 MPa |
| L1 ylempi pystykisko | 70,50 kPa | 27,27 MPa | 13,60 MPa |
| L2 vaakakisko | 213,46 kPa | 6,78 MPa | 3,28 MPa |
| L2 alempi pääkytkimen napa | 256,89 kPa | 3,26 MPa | 1,50 MPa |
| L2 ylempi pääkytkimen napa | 214,78 kPa | 8,85 MPa | 4,32 MPa |
| L2 ylempi pystykisko | 593,03 kPa | 29,87 MPa | 14,64 MPa |

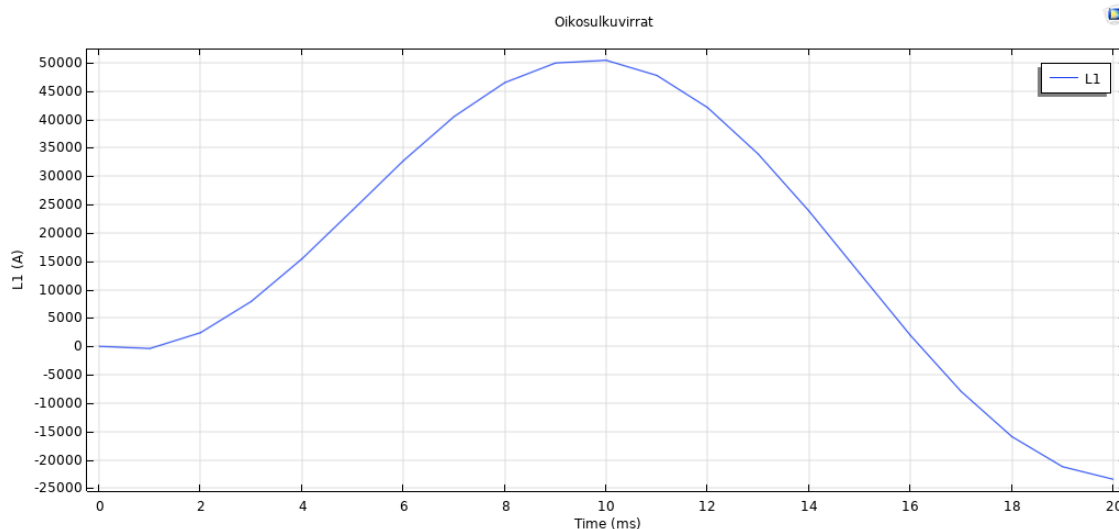
| | | | |
|----------------------------|------------|-----------|----------|
| L3 vaakakisko | 87,58 kPa | 3,65 MPa | 1,78 MPa |
| L3 alempi pääkytkimen napa | 202,29 kPa | 3,00 MPa | 1,40 MPa |
| L3 ylempi pääkytkimen napa | 203,26 kPa | 5,21 MPa | 2,50 MPa |
| L3 ylempi pystykisko | 494,45 kPa | 13,19 MPa | 6,35 MPa |

Tukieristinmateriaalin väsymislujuuteen vaikuttaa huomattavasti lämpötila sekä lisätyn lasikuidun kuitujen suuntaus, mutta tarkastelun yksinkertaistamiseksi niitä ei huomioitu, vaan tarkasteluun käytettiin kuvan 34 mukaista väsymislujuuspiirrosta, jossa kappale on huoneenlämmössä ja kuidut suunnattuna kuormituksen suuntaisesti (Sonsino & Moosbrugger, 2008). Tarkastelussa pääkytkimen napojen väsymislujuudeksi oletettiin sama kuin tukieristimien. Syklimäärällä 10^4 suurimmaksi sallituksi jännitysamplitudin σ_a arvoksi saadaan noin 55 megapascalia.



Kuva 34. Tukieristinmateriaalin väsymislujuuspiirros (Sonsino & Moosbrugger, 2008, s. 1283)

PEN-kiskoston dynaamisten vaikutusten kestoisuus simuloitiin oikosulkuvirran tehollisarvolla, joka oli 60 % vaiheiden oikosulkuvirran tehollisarvosta. Oikosulkuvirta syötettiin PEN-kiskostoa lähimpänä olevan vaiheen kautta standardin SFS-EN IEC 61439-1 mukaisesti (International Electrotechnical Commission, 2022a, s. 89–90). Oikosulkuvirran käyrämuoto on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Oikosulkuvirta PEN-kiskoston dynaamisen kestoisuuden simuloinnissa.

PEN-kiskoston suurimmat jännitykset on esitetty taulukossa 16. Taulukon arvoilla jännityssuhteen R_s arvoksi saadaan ≈ 0 ja suurimman jännitysamplitudin σ_a arvoksi 194,53 megapascalialia.

Taulukko 19. PEN-kiskostoon vaikuttaneet jännitykset.

| Kiskoston osa | Jännitys σ_{\min} | Jännitys σ_{\max} | Jännitysamplitudi σ_a |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| PEN pystykisko | 594,12 kPa | 191,67 MPa | 95,55 MPa |
| PEN alempi vaakakisko | 576,81 kPa | 389,63 MPa | 194,53 MPa |
| PEN ylempi vaakakisko | 575,65 kPa | 323,86 MPa | 161,64 MPa |

PEN-kiskoston tukieristimiin vaikuttaneet jännitykset on esitetty taulukossa 17. Jännityssuhteen R_s arvoksi saadaan ≈ 0 ja suurimman jännitysamplitudin σ_a arvoksi 243,15 megapascalialia.

Taulukko 20. PEN-kiskoston tukieristimiin vaikuttaneet jännitykset.

| Tukieristin | Jännitys σ_{\min} | Jännitys σ_{\max} | Jännitysamplitudi σ_a |
|----------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| PEN pystykisko | 164,01 kPa | 14,98 MPa | 7,41 MPa |
| PEN vaakakisko | 673,11 kPa | 486,50 MPa | 243,15 MPa |

PEN-kiskoston suurimmat siirtymät on esitetty taulukossa 18. Suurin siirtymä 6,91 millimetriä oli PEN-kiskoston alemmassa vaakakiskossa. Vaakakiskostossa on pitkä osuus ilman tuentaa, jolloin ylempi ja alempi osakisko taipuivat tukipisteiden välin keskikohdassa korkeussuunnassa.

Taulukko 21. PEN-kiskoston suurimmat siirtymät.

| Kiskoston osa | Siirtymä |
|-----------------------|----------|
| PEN pystykisko | 0,85 mm |
| PEN alempi vaakakisko | 6,91 mm |
| PEN ylempi vaakakisko | 6,09 mm |

Vaihevirtakiskojen jännitysamplitudi ei ylittänyt väsymislujuuspiirroksesta saatua suurinta sallittua jännitysamplitudia, eikä myöskään luvussa 4 esitetty venymäraja $R_{p0,2}$ ylittänyt dynaamisen jännityksen staattista jännitystä kuvaavalla osalla eli keskijännityksellä, joten voitiin todeta vaihevirtakiskojen kestäväen oikosulkuvirran dynaamiset vaikutukset ilman murtumista tai muodonmuutoksia. Myöskään tukieristimien suurin sallittu jännitysamplitudi ei ylittänyt, joten voitiin todeta tukieristimien kestäväen murtumatta. Suurin siirtymä vaihekiskoissa oli alle yksi millimetri, joten valokaarta ei päässyt syttymään vaihekiskojen kosketuksesta toisiinsa.

PEN-kiskoston pystykiskon suurin sallittu jännitysamplitudi ei ylittänyt, mutta venymäraja $R_{p0,2}$ ylittyi keskijännityksellä, joten on mahdollista, että PEN-kiskoston pystykiskossa on pieni muodonmuutos testin jälkeen. Pystykiskon tukieristimien suurin sallittu jännitysamplitudi ei ylittänyt ja suurin siirtymä oli alle yhden millimetrin, joten voitiin todeta pystykiskoston kestäväen oikosulun dynaamiset vaikutukset. PEN-kiskoston vaakakiskojen osalta ylittyi sekä vaakakiskojen että alumiinisten tukieristimien suurin sallittu jännitysamplitudi ja venymäraja $R_{p0,2}$. Myös vaakakiskojen suurin siirtymä oli yli kuusi millimetriä. Todellisuudessa kuitenkin PEN-kiskoston vaakakiskojen välissä on kaapeleiden kiinnitykseen käytettävät pultit, jotka tukevat rakennetta. Simulointiin lisättiin kaksi

pulttia vaakakiskoston osakiskojen väliin, jolloin saatiin taulukon 19 mukaiset jännitykset. Suurin jännitysamplitudi σ_a oli 82,19 megapascalia, joten voitiin todeta myös vaakakiskoston kestäväen oikosulun dynaamiset vaikutukset.

Taulukko 22. Pulttien lisäyksen jälkeiset jännitykset.

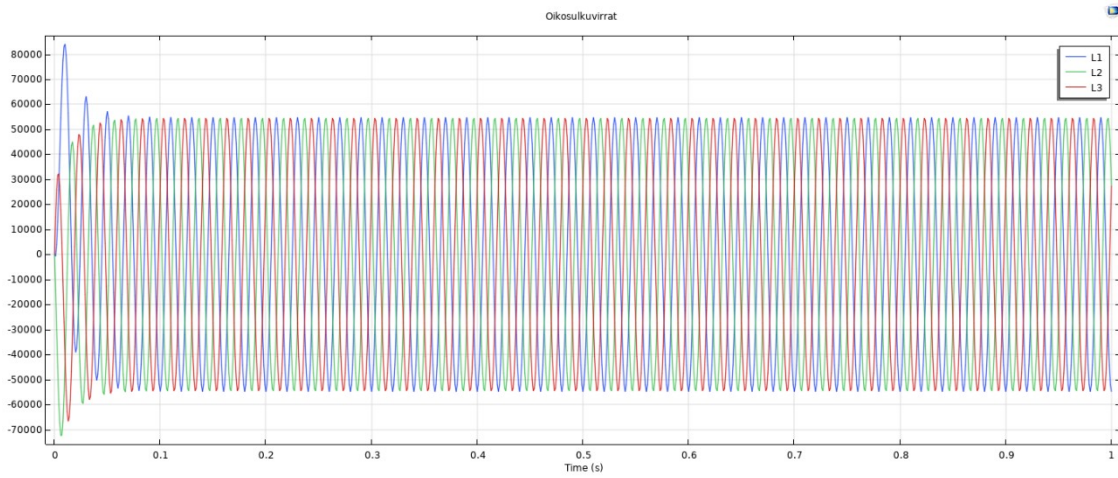
| Kiskoston osa | Jännitys σ_{\min} | Jännitys σ_{\max} | Jännitysamplitudi σ_a |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| PEN alempi vaakakisko | 570,55 kPa | 116,18 MPa | 57,80 MPa |
| PEN ylempi vaakakisko | 666,82 kPa | 167,04 MPa | 82,19 MPa |

5.2.3 Termisten vaikutusten simulointi

Termisten vaikutusten tarkastelussa käytetyt simulointiparametrit on esitetty alla olevassa taulukossa. Oikosulkuvirtojen käyrämuodot on esitetty kuvassa 36. Simulointi toteutettiin dynaamisten vaikutusten simuloinnin tapaan kahdessa osassa: ensin vaihevir- takiskostolle ja sitten PEN-kiskostolle.

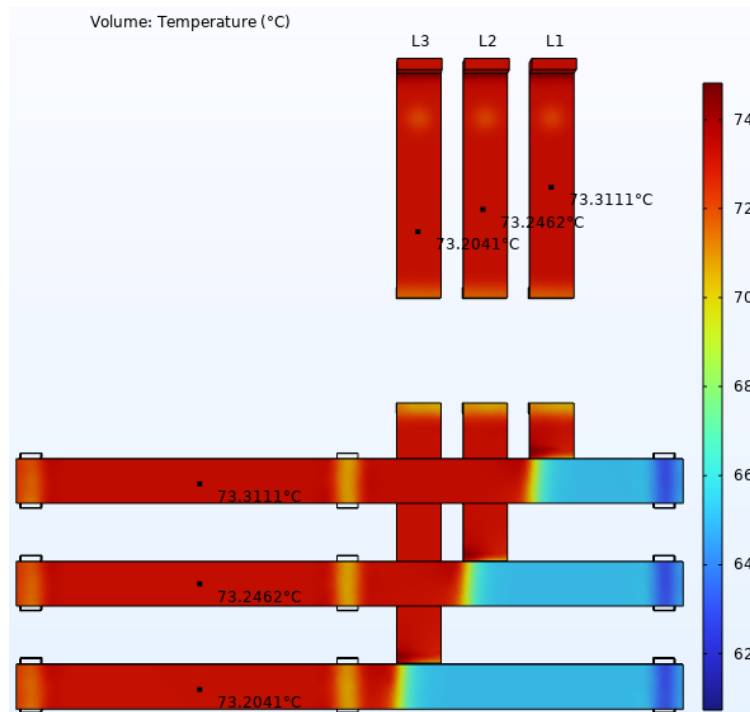
Taulukko 23. Oikosulkuvirran termisten vaikutusten simuloinnin parametrit.

| Suure | Suuruus |
|-----------------------------------------------------|---------------------|
| Oikosulkuvirran tehollisarvo I_k (PEN 0,6 I_k) | $38,7 \cdot 10^3$ A |
| Taajuus f | 50 Hz |
| Piirin aikavakio τ | 0,016 s |
| Vikapiiirin impedanssin vaihekulma φ | 1,38 rad |
| Kyt kentähetki α_k | -0,19 rad |
| Oikosulkuvirran kesto aika T_k | 1 s |
| Kiskoston alkulämpötila ϑ_b | 65 °C |



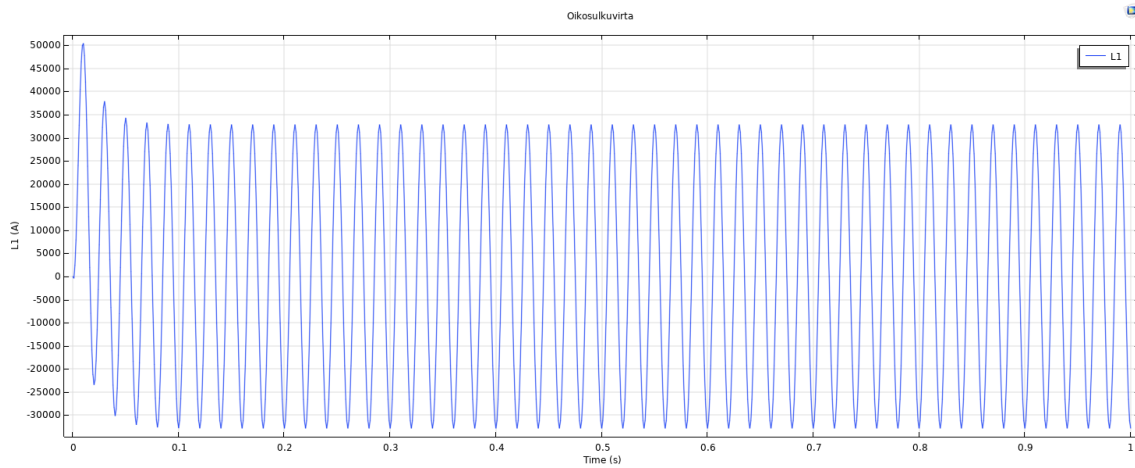
Kuva 36. Oikosulkuvirrat vaihevirtakiskojen termisen kestoisuuden simuloinnissa.

Kuvassa 37 on esitetty simuloinnin tulokset. Kuvasta on myös nähtävissä punaisella oikosulun kulkureitti yläkiskoista vaakakiskoihin. Vaihekiskoston loppulämpötila ϑ_e oli noin 73,3 celsiusastetta.



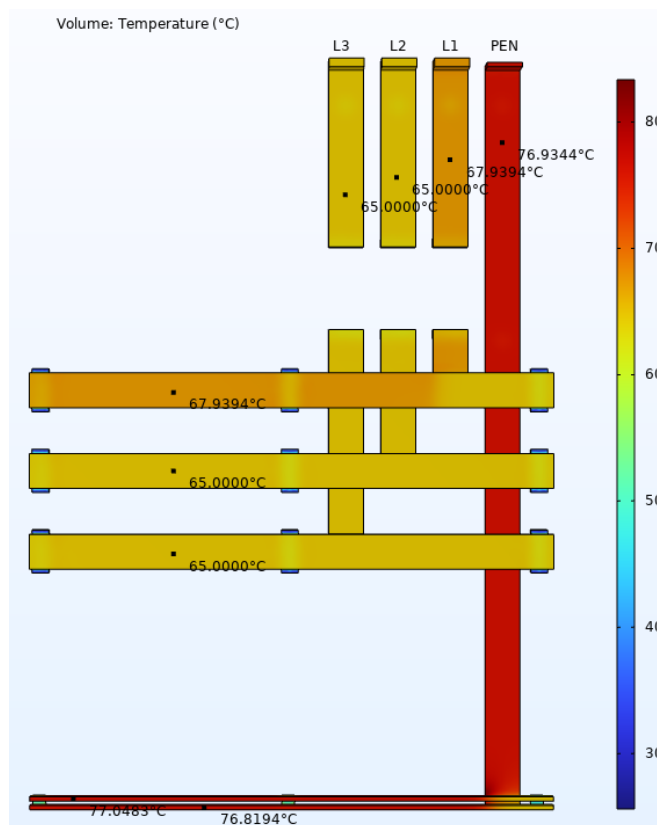
Kuva 37. Vaihevirtakiskojen loppulämpötilat.

Oikosulkuvirran termiset vaikutukset pienjännitekeskuksen PEN-kiskostoon simuloitiin oikosulkuvirran tehollisarvolla, joka oli 60 % vaiheiden oikosulkuvirran tehollisarvosta dynaamisten vaikutusten simuloinnin tapaan. Oikosulkuvirran käyrämuoto on esitetty kuvassa 38, josta on nähtävissä kuvan 10 tapainen oikosulkuvirran vaimeneminen.



Kuva 38. Oikosulkuvirta PEN-kiskoston termisen kestoisuuden simuloinnissa.

Kuvassa 39 on esitetty PEN-kiskoston simuloinnin tulokset. PEN-kiskoston loppulämpötila ϑ_e oli noin 77,0 celsiusastetta.



Kuva 39. PEN-kiskoston loppulämpötilat.

Standardin IEC 60865-1 mukaisesti alumiinikiskostolle sallitaan 200 celsiusasteen loppulämpötila, joten voidaan todeta vaihekiskoston sekä PEN-kiskoston kestäväen oikosulkuvirran termiset vaikutukset. Kiskoston sallitun loppulämpötilan lisäksi tulee huomioida kiskoihin kiinnitettyjen komponenttien, kuten tukieristimien sallitut lämpötilat. Tässä tapauksessa loppulämpötilojen jäädessä alhaiseksi, ei ole vaarana esimerkiksi tukieristimien sulaminen, niiden sulamispisteen ollessa 260 celsiusastetta (ALBIS, 2026).

5.2.4 Pohdinta

Simuloimalla oli mahdollista tarkastella kattavasti oikosulkuvirran vaikutuksia. Käsin laskentaan verrattuna simuloimalla nähtiin tarkemmin voimien vaikutukset ja kiskojen siirtymät sekä nähtiin kiskojen loppulämpötilat oikosulun päätyttyä. Käsin laskennalla jää huomioimatta esimerkiksi ylempien pystykiskojen L-muodon aiheuttama rasituksen lisäys pystykiskoston tukieristimiin, joka voi joissain tapauksissa olla ratkaiseva tekijä.

Käsin laskennalla saadut jännitykset olivat simulointiin verrattuna suurempia, joka johtuu todennäköisesti käsin laskennassa käytetyn menetelmän ja kertoimien yksinkertaisuudesta. Simulointimallia on mahdollista rakentaa kattavammaksi yhdistämällä dynaamisen ja termisen oikosulun mallit yhteen ja lisäämällä mukaan ohutlevyosat, pulttikiinnitykset sekä lämmönvaihto kiskojen ja ympäristön välillä. Kuitenkin jo tällaisenaan simulointimallit sopivat peruslaatuiseen rakenteen tarkasteluun. Simulointimallin rakentaminen kattavammaksi vaatii lisää laskentaresursseja. Myös syvempi ymmärrys lujuuslaskennasta on tarpeen varsinkin rajatapauksia analysoidessa. Tämän simuloinnin laskentaajat vaihtelivat kolmestakymmenestä minuutista yhteen tuntiin, jota on kuitenkin mahdollista parantaa paremmin laskentaan soveltuvalla tietokoneella.

6 Yhteenveto

Diplomityön päällimmäisenä tavoitteena oli selvittää voiko COMSOL Multiphysics ohjelmistoa käyttää osana yrityksen tuotekehitystä ja tyyppitestauksiin valmistautumisessa. Muita tavoitteita oli selvittää mitä muita vaihtoehtoisia simulointiohjelmistoja on markkinoilla ja mitä tyyppitestauksia puistomuuntamolle tulee tehdä. Diplomityön teoriaosuudessa keskityttiin puistomuuntamon lämpenemätestiin sekä sen pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustestiin. Lisäksi käsiteltiin näihin tyyppitesteihin liittyviä teoria-alueita kuten muuntajan jäähdytystä sekä oikosulkuvirran ja sen vaikutuksien laskentaa. Simulointiosuudessa demonstroitiin COMSOL Multiphysics ohjelmistolla muuntajatilän ilmanvaihdon skenaarioita sekä oikosulkuvirran vaikutuksia pienjännitekeskuksen kiskostossa.

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli, mitä tyyppitestauksia puistomuuntamolle tehdään. Kaikista puistomuuntamolta vaadittavista tyyppitesteistä koostettiin kohdeyritykselle kattava esitys. Tyyppitesteistä tarkemmin esiteltiin luvussa 4 muuntamon lämpenemätesti ja pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtakestoisuustesti. Yhteenvetona voidaan todeta, että muuntamolle tehdään tyyppitestejä päävirtapiireille, apusähköpiireille sekä puistomuuntamon rakenteelle.

Toinen tutkimuskysymys oli, mitä muita simulointiohjelmistoja on markkinoilla. Luvussa 3 esiteltiin pintapuolisesti COMSOL Multiphysics ohjelmiston lisäksi multifysikaaliset simulointiohjelmit Ansys Multiphysics, SimScale, Simcenter ja Altair sekä Lämmönsiirtoon ja ilmanvaihdon simulointiohjelmit OpenFoam, SimFlow ja SimWork. Lisäksi todettiin, että myös kohdeyrityksen SolidWorks mekaniikkasuunnitteluohjelmistoon on saatavilla simulointilisäosa. Osaan simulointiohjelmistoja on saatavilla ilmainen kokeilu ja jotkut ovat täysin ilmaisia käyttää, mutta suurin osa on kuitenkin lisenssipohjaisia.

Kolmas tutkimuskysymys oli, kuinka simuloitujen tulokset vertautuvat käsin laskettuihin tuloksiin ja mitä lisäarvoa simuloitujen tulokset tuovat käsin laskettuihin tuloksiin verrattuna. Muuntajatilän ilmanvaihdon laskennassa verrattiin käsin laskennalla ja

simuloinnilla saatua aukon läpi olevaa ilman virtausnopeutta, joka todettiin olevan lähes sama. Simuloinnilla pystytään kuitenkin käsin laskennasta poiketen tarkastelemaan kuinka ilma virtaa muuntajatilän sisällä ja kuinka muuntajatilän öljynkeräysallas vaikuttaa ilmavirtaukseen, jos sisääntuloaukko on sijoitettu niin alas, että öljynkeräysaltaan seinämä kuristaa ilmavirtausta. Oikosulkuvirran vaikutusten laskennassa käsin laskennalla saatiin simulointiin verrattuna suurempia tuloksia ja molemmilla menetelmillä voitiin todeta kiskoston kestävän oikosulun vaikutukset. Simuloinnilla pystytään kuitenkin tarkastelemaan tarkemmin virtakiskojen liikettä oikosulussa sekä kiskoston osien jännityksiä.

Viimeisenä tutkimuskysymyksenä oli, voidaanko simulointiohjelmistoa hyödyntää tuotteiden suunnittelussa ja tyyppitestauksiin valmistautumisessa. Luvussa 3 esiteltiin yleisesti COMSOL Multiphysics ohjelmiston eri fysiikoita ja luvussa 5 osaa niistä kokeiltiin simuloimalla. Voidaan todeta, että COMSOL Multiphysics ohjelmistossa on useita kohdeyritykselle tarpeellisia fysiikoita ja niillä pystytään simuloimaan puistomuuntamon eri tyyppitestejä. Kohdeyritykselle on kuitenkin etsinnässä käyttöönsä ensimmäinen simulointiohjelmisto, minkä vuoksi tulevaisuudessa olisi hyvä tutustua myös muihin tässä työssä mainittuihin simulointiohjelmistoihin. Kohdeyrityksen simulointiohjelmiston tarve on lisäksi epäsäännöllistä, jonka vuoksi olisi syytä vertailla eri simulointiohjelmistojen lisenssien kustannuksia sekä kartoittaa, olisivatko ilmaiset simulointiohjelmistot riittäviä kattamaan suurimman osan kohdeyrityksen simulointitarpeista.

Lähteet

- ALBIS. (2026). *Material data sheet PA66-GF35* [Dataset]. <https://www.albis.com/en/products/download/doc/en/SI/basf/UltramidA3EG7.pdf>
- Alumeco. (2025). *Alumiinit—6101A square bars* [Dataset]. <https://www.alumeco.fi/alumiini/alumiinin-tiedot/datasheets-aluminium/?s=0>
- Chenvidyakarn, T. (2013). *Buoyancy Effects on Natural Ventilation*. Cambridge University Press. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=1543610>
- COMSOL ab. (2026a). *COMSOL documentation* [Dataset]. <https://doc.comsol.com/6.4/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>
- COMSOL ab. (2026b). *COMSOL License Options*. <https://www.comsol.com/products/licensing>
- Dassault Systèmes. (2026). *SOLIDWORKS Simulation*. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation>
- de Souza Rabelo, D., Hobeck, J. D., Inman, D. J., Finzi Neto, R. M., & Steffen, V. (2017). Real-time structural health monitoring of fatigue crack on aluminum beam using an impedance-based portable device. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(20), 3152–3162. <https://doi.org/10.1177/1045389X17705213>
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot. I, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta*. Otatieto Helsinki University Press.
- Etheridge, D. (2011). *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. John Wiley & Sons, Incorporated. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=819166>
- Huotari, K., & Partanen, J. (1998). *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskenta*. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- International Electrotechnical Commission. (2012a). *IEC 60865-1 Short-circuit currents—Calculation of effects—Part 1: Definitions and calculation methods*. International Electrotechnical Commission.

- International Electrotechnical Commission. (2012b). *SFS-EN 60076-2 Power transformers—Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2016). *IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. Systems – Part 0: Calculation of currents*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2017). *SFS-EN 62271-1 High-voltage switchgear and controlgear—Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 60076-7 Power transformers—Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2022a). *SFS-EN IEC 61439-1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies—Part 1: General rules*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2022b). *SFS-EN IEC 62271-202 High-voltage switchgear and controlgear—Part 202: AC prefabricated substations for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2023). *SFS-EN IEC 61439-5 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies—Part 5: Assemblies for power distribution in public networks*. International Electrotechnical Commission.
- Konsolidoitu teksti: Komission asetus (EU) N:o 548/2014, Legislation No. 548/2014, 02014R0548 (2019). <https://doi.org/http://data.europa.eu/eli/reg/2014/548/2019-11-14>
- Liu, H., Hao, Y. P., Fu, M. L., Wang, D. B., & Yang, L. (2017, heinäkuuta 17). *Study on Ventilation of Indoor Substation Main Transformer Room Based on COMSOL Software*. 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). <https://doi.org/10.1109/ICEMPE.2017.7982088>

- Metal Center Group. (2025). *Kuparilevyt—CW008A - Cold rolled* [Dataset]. <https://www.metalcentergroup.fi/kupari-messinki-ja-pronssi/datasheetit/kuparilevyt/?s=0>
- OpenCFD Ltd. (2026). *About OpenFOAM*. <https://www.openfoam.com/>
- Oy Alfen Elkamo Ab. (2026). *Kohdeyhteyksen materiaalikirjasto* [Dataset].
- Salmi, T., & Pajunen, S. (2010). *Lujuusoppi*. Pressus. <https://triton.fi/Record/tria.286589>
- SESKO ry. (2026). *SFS-/IEC-/EN-standardit*. <https://sesko.fi/standardit/sfs-iec-en-standardit/>
- SFS Suomen Standardit ry. (2026). *Sähköalan standardeista*. <https://sfs.fi/osallistu-ja-vai-kuta/aihealueet/sahko-ja-elektronikka/sahkoalan-standardeista/#:~:text=Eu-rooppalaiset%20s%C3%A4hk%C3%B6alan%20standardit&text=Huomaathan%2C%20ett%C3%A4%20standardin%20tunnuksen%20numero,EN%2D%20tai%20IEC%2Dstandardi.&text=IEC%2Dstandardin%20tekstin%2C%20jossa%20kuvataan%20standardin%20varsinainen%20tekni- nen%20sis%C3%A4lt%C3%B6>.
- SimScale GmbH. (2026). *SimScale Pricing & Plans*. <https://www.simscale.com/product/pricing/>
- Sonsino, C. M., & Moosbrugger, E. (2008). Fatigue design of highly loaded short-glass-fibre reinforced polyamide parts in engine compartments. *International Journal of Fatigue*, 30(7), 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.08.017>
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2022). *SFS-käsikirja 600-1 Pienjännitesähköasennukset*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2025a). *SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2025b). *SFS 6002 sähkötyöturvallisuus*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Tammertekniikka. (2023). *Tekniikan kaavasto* (24. p.).
- Zhang, L., Luo, Y., Sheng, G., Ni, Z., & Jiang, X. (2024). Improving IEC thermal model for oil natural air natural transformers using optimised parameters based on

dynamic simulation. *High Voltage*, 9(1), 217–229.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1049/hve2.12374>