

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Ville Kaunismäki

**TEHOMUUNTAJAN APUSÄHKÖTOTEUTUS KUIVAMUUNTAJALLA**

**Tekninen toimivuus ja taloudellinen kannattavuus**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 28.1.2015

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Otso Takala

Työn tarkastaja

Kimmo Kauhaniemi

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Transformers -yksikköön Vaasassa. Haluan kiittää kaikkia työn valmistumisessa edesauttaneita.

Erityiskiitokset haluan osoittaa ohjaajalleni DI Otso Takalalle, jonka kanssa löysimme mielenkiintoisen aiheen diplomityölleni. Suuri kiitos myös Elina Salmeskarille opastuksesta simulointiohjelman käyttöön. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita työn teossa auttaneita muuntajien henkilökuntalaisia. Yliopistolta haluan kiittää työn valvojaa professori Timo Vekaraa asiantuntevista kommentteista sekä professori Kimmo Kauhaniemeä työn tarkastamisesta.

Osoitan kiitokset myös läheisille, ystäville, opiskelukavereille ja erityisesti Marialle tuesta ja kannustuksesta.

Vaasassa 9.2.2015

Ville Kaunismäki

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	6
ABSTRACT	7
1 JOHDANTO	8
2 TEHOMUUNTAJA	10
2.1 Muuntajan rakenne	11
2.2 Muuntajan häviöt	12
2.3 Muuntajan lämpenemä	14
3 APUSÄHKÖTOTEUTUS KUIVAMUUNTAJALLA	15
3.1 Asiakkaan vaatimuksia apusähköistykselle	15
3.2 Apumuuntajan kotelointi	16
3.3 Tarvittavien komponenttien vakiointi	22
4 KUIVAMUUNTAJAN JÄÄHTYMINEN	25
4.1 Lämmönsiirtoteorian perusteita	25
4.2 Apumuuntajakotelon simulointimallin rakentaminen	27
4.3 Apumuuntajakotelon lämpenemän simulointi	31
4.3.1 63 kVA:n apumuuntaja	31
4.3.2 100 kVA:n apumuuntaja	38
4.4 Apumuuntajakotelon lämpenemän mittaukset	43
4.4.1 Mittausjärjestelyt	43
4.4.2 Mittaustulokset	44
4.4.3 Mittaustulosten perusteella tehdyt muutokset	46
4.5 Simulointi- ja mittaustulosten vertailu	48
4.6 Tuulettimen huomioiminen simulointimallissa	50
5 ELINKAARIKUSTANNUSTEN VERTAILU	52
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	57
7 YHTEENVETO	60
LÄHDELUETTELO	66

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\kappa$	Kapitalisointikerroin
$\rho$	Resistiivisyys
$\Phi$	Magneettivuo
$\psi$	Kuormituksen ja laskentakoron vaikutus laskennassa
$\Delta T$	Lämpötilan muutos
$A$	Pinta-ala
$B$	Magneettivuon tiheys
$B_{max}$	Magneettivuon tiheyden maksimiarvo
$f$	Taajuus
$h$	Lämmönsiirtokerroin
$I$	Virran suuruus
$K$	Kappaleen geometriasta riippuva vakio
$k_1, k_2$	Sydänmateriaalista riippuva vakio
$L$	Kappaleen pituus lämmönsiirtoreitillä
$m$	Käämin kierrosten lukumäärä
$n$	Steinmetzin eksponentti
$P$	Teho
$P_0$	Tyhjäkäyntihäviöt
$P_e$	Pyörrevirtahäviöt
$P_h$	Hystereesihäviöt
$P_k$	Kuormitushäviöt
$P_T$	Kokonaishäviöt
$p$	Laskentakorko
$\dot{q}$	Lämpövirta
$R_k$	Oikosulkuresistanssi
$r$	Kuormituksen kasvu
$t$	Materiaalin paksuus

IEC

International Electrotechnical Commission, kansainvälinen  
sähköalan standardointiorganisaatio

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Ville Kaunismäki
<b>Diplomityön nimi:</b>	Tehomuuntajan apusähkötoteutus kuivamuuntajalla: tekninen toimivuus ja taloudellinen kannattavuus
<b>Valvoja:</b>	Professori Timo Vekara
<b>Ohjaaja:</b>	Diplomi-insinööri Otso Takala
<b>Tarkastaja:</b>	Professori Kimmo Kauhaniemi
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2007
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2015

**Sivumäärä: 69**

---

**TIIVISTELMÄ**

Sähköaseman sähköistys toteutetaan Ruotsissa usein muuntajan kylkeen asennetulla apumuuntajalla. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää öljyeristeistä muuntajaa tai kuivamuuntajaa. Tähän asti ABB:n Vaasan muuntajatehtaalla apumuuntajaratkaisu on toteutettu öljyeristeisellä muuntajalla. Nyt ollaan siirtymässä käyttämään kuivaa apumuuntajaa. Kuivamuuntaja ja sen vaatimat komponentit sijoitetaan niille suunniteltuihin koteloihin.

Diplomityön tavoitteena oli vakioida koteloinnin lisäksi sulakkeet, kompaktikatkaisija ym. tarvittavat komponentit eri mitoitusvirroille ottaen huomioon yleisimmät asiakasvaatimukset ja yleisimmät kuivan apumuuntajan nimellistehot. Öljyeristeisen apumuuntajan jäähdytyksen mitoitus ja riittävän jäähdytyksen toteutus on helppoa. Kuivamuuntaja asennettiin muuntajan kylkeen kaappiin, joka suojaa sitä pölyltä, vedeltä ja lumelta, mutta samalla kuivamuuntajan tulee jäähtyä riittävästi. Diplomityössä tutkittiin kuivamuuntajan jäähtymistä käytännön mittauksilla muuntajaprojektin rutiinikokeiden yhteydessä. Lisäksi mallinnettiin Comsol-simulointiohjelmalla kuivamuuntajan jäähtymistä kaapissa ja verrattiin simulointituloksia mittaustuloksiin.

Diplomityössä esitetään kustannusvertailu kuiva- ja öljymuuntajan elinkaarikustannuksista muuntajan eliniän aikana. Näin saatiin tutkittua onko kuivamuuntajateutus edullinen muuntajan omistajalle.

Työn tuloksena saatiin vakioitu rakenne apumuuntajakoteloinnille ja varmistus sille, että apumuuntajakotelo vaatii tuulettimen, jotta se jäähtyy riittävästi.

---

**AVAINSANAT:** Tehomuuntaja, kuivamuuntaja, elinkaarikustannus, apusähkö

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology****Author:**

Ville Kaunismäki

**Topic of the Thesis:**

Power transformer's auxiliary power supply executed with dry-type transformer: technical functionality and cost-effectiveness

**Supervisor:**

Professor Timo Vekara

**Instructor:**

Master of Science in Technology Otso Takala

**Evaluator:**

Professor Kimmo Kauhaniemi

**Degree:**

Master of Science in Technology

**Major of Subject:**

Electrical Engineering

**Year of Entering the University:** 2007**Year of Completing the Thesis:** 2015**Pages:** 69

---

**ABSTRACT**

Power supplies for substations in Sweden are executed with auxiliary transformer that is fitted to the main transformer. The auxiliary transformer could be oil immersed transformer or dry-type transformer. ABB Transformers has so far executed auxiliary power supply with oil immersed transformer. Now ABB Transformers is switching to use dry-type transformer as auxiliary transformer. Dry-type transformer and components for it are located in casing.

Target for this thesis was to standardize casing for dry-type transformer, as well as fuses and load switch etc. components for different rated currents. Other things that need to take into account are most common rated powers for auxiliary transformer and customers demands. It is easy to calculate enough cooling capacity for oil immersed transformer. Dry-type transformer was enclosed because it needs to be protected against dust, water and snow. Therefore it is important to know that the transformer is cooling enough inside the casing. In this thesis dry-type transformers temperature rise was simulated with Comsol multiphysics and measured during temperature-rise test. Simulation results was compared to measured temperatures.

Life cycle cost analyses for dry-type transformer and for oil immersed transformer are presented in thesis in order to research which of two auxiliary transformers will be the most economical solution for the electric company.

As a result we got standardized casing for dry-type transformer and confirmation that the casing requires cooling fan in order to cool enough.

---

**KEYWORDS:** Power transformer, dry-type transformer, life cycle costs, auxiliary power supply

## 1 JOHDANTO

Sähköaseman sähköistys toteutetaan Ruotsissa usein muuntajan yhteyteen asennetulla apumuuntajalla. Diplomityössä tutkitaan sähköasemamuuntajan apusähköistyksen toteuttamista kuivamuuntajalla öljyeristeisen muuntajan sijaan. Kuivamuuntajalla saavutettavia etuja öljyeristeiseen apumuuntajaan verrattuna ovat pienempi koko, pienemmät häviöt sekä pohjatöissä saavutettavat säästöt pienemmän öljyalan ansiosta.

Kuivamuuntaja tulee koteloida, jotta se on suojassa pölyltä, lumelta ja vedeltä, mutta kotelon tulee myös jäähtyä riittävästi. Öljyeristeisen apumuuntajan jäähtytyksen mitoitus ja riittävän luonnollisen jäähtytyksen toteutus on helppoa. Apumuuntajan jäähtymistä tutkitaan käytännön mittauksilla muuntajan rutiinikokeiden yhteydessä sekä simuloimalla Comsol multiphysics -ohjelmalla. Mittaustuloksia verrataan simulointituloksiin, jotta varmistutaan siitä, että simulointimalli antaa riittävän todenmukaisia tuloksia. Simulointi- ja mittaustulosten pohjalta tarkastellaan riittääkö ilman vapaa kierto jäähtyttämään apumuuntajakoteloa riittävästi vai tarvitaanko tuuletusritilöihin lisäksi puhaltimet tehostamaan jäähtymistä.

Apumuuntajaratkaisuun tarvittavat komponentit ja kotelot on tarkoitus vakioida siten, että samaa vakioratkaisua voidaan käyttää myöhemmin vastaavissa projekteissa, joissa asiakas haluaa toteuttaa apusähköistyksen kuivamuuntajalla. Koteloinnissa ja komponenttien valinnassa otetaan huomioon yleiset sähköisten komponenttien mitoitustavat sekä asiakkaan vaatimukset.

Simuloinnissa apumuuntaja mallinnetaan yksinkertaisesti vain laatikkona kotelon sisälle. Materiaalit ja muut parametrit määritetään niin, että ne vastaisivat parhaiten todellisuutta. Apumuuntajaa mallintavan laatikon seinät määritetään tuottamaan lämpöä kuivamuuntajan häviöiden verran. Apumuuntajan ympärillä olevaan koteloon mallinnetaan tuuletusaukot siten, että ne kuvaavat ritilää, joka peittäisi puolet aukon pinta-alasta. Simulointeja suoritetaan kahdella eri lämmönsiirtokertoimen arvolla, koska tarkka lämmönsiirtokertoimen arvon määrittäminen on hankalaa ja se pitäisi tehdä kokeellisesti. Lisäksi simuloinnit suoritetaan useilla eri ulkolämpötilan arvoilla. Näin saadaan katettua eri vuodenaikojen tyypilliset ulkolämpötilat. Simulointituloksina saadaan kotelon sisä-

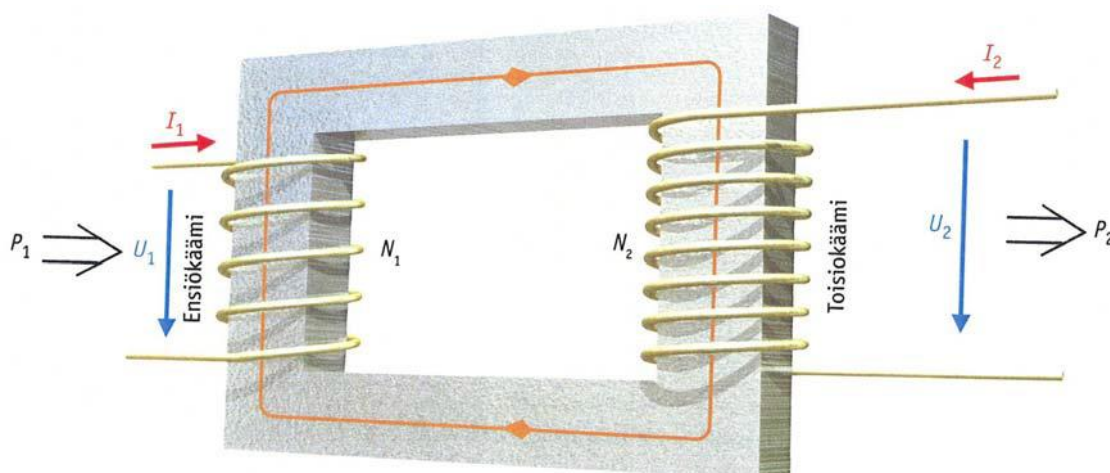
puolisen ilman keskilämpötila ja kotelon maksimilämpötila, joka vastaa kuivamuuntajan sydämen lämpötilaa, sekä ilman virtausnopeus kotelon eri osissa.

Lämpenemäkokeessa apumuuntajakoteloon asennetaan kolme optista kuitua, joilla mitataan lämpötilaa kuivamuuntajan sydämessä, käämissä ja ilmassa noin kymmen senttimetrin korkeudella kuivamuuntajasta. Optiset kuidut kytketään mittalaitteeseen, joka kytketään tietokoneeseen. Näin apumuuntajakotelon lämpenemistä voidaan seurata reaaliaikaisesti. Lämpenemäkokeen ajan kotelossa olevaa apumuuntajaa kuormitetaan nimellisvirralla niin kauan kunnes lämpötilat tasaantuvat.

Työssä tehdään myös elinkaarikustannusten vertailu eri apumuuntajaratkaisujen välillä. Verrataan öljyeristeisellä ja kuivalla apumuuntajalla toteutettujen apusähköistysratkaisujen hankintahintaa ja käyttökustannuksia. Käyttökustannukset muodostuvat apumuuntajan häviökustannuksista ja huoltokustannuksista. Elinkaarikustannuksia vertaamalla saadaan selville, kumpi vaihtoehdoista on muuntajan omistavan sähköverkkoyhtiön kannalta edullisempi. Hankintahinnaltaan halvin vaihtoehto ei välttämättä ole kokonaiskustannuksiltaan edullisin vaihtoehto.

## 2 TEHOMUUNTAJA

Muuntaja on staattinen sähkölaite, joka vaihtosähköjärjestelmässä muuntaa jännitteitä kahden tai useamman käämityksen välillä käyttäen sähkömagneettista induktiota. Muuntajan tärkeimpiä tehtäviä ovat jännitteen asettelu voimansiirron ja jakelun kannalta edulliseen arvoon sähköverkon eri osassa, jänniteportaiden galvaaninen erottaminen ja jakeluverkon oikosulkuvirran rajoittaminen katkaisijoille sallittavaan tasoon. Muuntajan ensiö- eli primäärikäämiin syötetään sähköenergiaa ja muuntajan toisio- eli sekundäärikäämi antaa energian kuormalle. Kuvassa 1 on yksivaihemuuntajan ensiö ja toisio. Jännitteen suuruuden mukaan käämejä nimitetään yläjännite- ja alajännitekäämeiksi. (Luomi 1992: 18; Elovaara & Haarla 2011.)



**Kuva 1.** Yksivaihemuuntajan ensiö ja toisio (ABB 2007).

Ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka indusoi toisioon vaihtojännitteen. Ensiön ja toisiojännitteelle pätee

$$U_i = 2\pi f N_i \Phi_i, \quad (1)$$

missä  $f$  on taajuus,  $N$  on käämissä olevien kierrosten lukumäärä ja  $\Phi$  on magneettivuo ja alaindeksillä  $i$  kuvataan ensiö- tai toisiosuuretta. Alaindeksin arvo 1 viittaa ensiöön ja

alaindeksin arvo 2 viittaa toisioon. Ideaalitulanteessa magneettivuo ensiössä ja toisiossa on yhtä suuri. Tällöin muuntajan muuntosuhde  $m$  saadaan jännitesuhteesta

$$m = U_1 / U_2, \quad (2)$$

missä  $U_1$  on ensiön jännite ja  $U_2$  on toisiosion jännite.

## 2.1 Muuntajan rakenne

Muuntajat voidaan jakaa rakenteensa puolesta kahteen ryhmään, öljyeristeisiin muuntajiin ja kuivamuuntajiin. Kuivamuuntajassa käämit ja rautasydän ovat suoraan kosketuksissa ympäröivään ilmaan, joten muuntajissa syntynyt häviölämpö säteilee suoraan ilmaan. Tästä syystä kuivamuuntajia käytetään paikoissa, joissa halutaan minimoida tulipalon riski tai ympäristön saastuminen. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi suuret toimistorakennukset, sairaalat, ostoskeskukset ja varastot, joissa tulipalolla on suuri potentiaali aiheuttaa katastrofaaliset seuraukset. Öljyeristeisissä muuntajissa käämit ja rautasydän on upotettu öljysäiliöön, joka on täytetty muuntajaöljyllä tai muulla eristysnestellä. Käämeissä ja rautasydämissä syntynyt lämpö siirtyy öljyn, joka kuljettaa sen säiliön tai jäähdytyspattereiden seinämiin, mistä lämpö edelleen siirtyy ympäröivään ilmaan. (ABB 2013b:39.)

Muuntaja voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin osiin. Aktiiviset osat, joita ovat käämit ja rautasydän, jotka suorittavat muuntajan varsinaisen tehtävän. Passiivisia osia ovat mm. tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet.

Muuntajasydämen tehtävänä on ohjata magneettivuo  $\Phi$  kulkemaan haluttujen käämitysten kautta. Magneettivuon suuruus on suoraan verrannollinen magneettivuon tiheyden ja sen kulkureitin poikkipinta-alan tuloon. Sydän rakennetaan raudasta magneettisen vastuksen eli reluktanssin pienentämiseksi. Sydänlevynä käytetään ns. kidesuunnattua muuntajalevyä, jossa magneettivuo pääsee kulkemaan helposti levyn pituussuuntaan, mutta kohtaa suuren vastuksen poikittaissuunnassa. Sydän koostuu pystysuunnassa olevista pylväistä, joita kolmivaihemuuntajassa on normaalisti kolme ja yksivaihemuunta-

jassa kaksi kappaletta. Pylväät yhdistetään toisiinsa ala- ja yläikeillä. Sydämen poikki-pinta-alan suuruus on riippuvainen muuntajan tehosta. (ABB 2007.)

Muuntajan säiliö toimii muuntajan kantavana runkona, öljysäiliönä ja jäähdyttimenä. Sen on myös kestävä ulkoilman ympäristörasitukset ja oltava öljytiivis. Säiliöltä vaaditaan myös riittävä jäähdytyspinta-ala. Säiliöitä on kahta tyyppiä, aaltolevysäiliö ja radiaattorisäiliö. Aaltolevysäiliö voi olla rakenteeltaan hermeettinen tai paisuntasäiliöllä varustettu. Hermeettisessä säiliössä ei ole erillistä paisuntatilaa öljyn tilavuuden muutoksia varten vaan säiliön seinien aaltoelementit on mitoitettu joustamaan öljyn tilavuuden muutoksissa. Aaltolevysäiliöitä käytetään pienissä muuntajissa. Isommissa muuntajissa, joissa vaaditaan suurempaa jäähdytyskykyä, käytetään radiaattorisäiliötä. Radiaattorisäiliön jäähdyttiminä käytetään radiaattoreita. Niitä tarvitaan muuntajan sisällä häviöistä aiheutuvan lämmön siirtämiseen ympäröivään ilmaan. Jäähdytystä voidaan vielä tehostaa radiaattoreiden pohjaan tai kylkeen kiinnitettävillä puhaltimilla, jotka lisäävät radiaattorin läpi virtaavan ilman määrää. (ABB 2007.)

Lisäksi muuntajaan kuuluu erilaisia suoja- ja valvontalaitteita, jotka suojaavat muuntajaa vikatilanteissa ja estävät lisävauriot. Kaasurele kiinnitetään muuntajan säiliön ja paisuntasäiliön väliseen öljyputkeen. Sen tehtävä on havaita säiliössä esimerkiksi osittaispurkauksissa hiljalleen syntyvä kaasu ja antaa siitä hälytyssignaali. Ylipaineventtiili on olennainen suojalaite muuntajassa. Mikäli muuntajan säiliön sisällä syntyy vika, joka kasvattaa säiliön painetta, pääsee paine ulos ylipaineventtiilin kautta. Muuten suuressa vikatilanteessa koko muuntajan säiliö saattaa haljeta paineen voimasta, jolloin kuuma öljy karkaa ympäristöön (Bayliss & Hardy, 2007:553). Öljyn- ja käämilämpömittareita käytetään kaikissa jakelumuntajissa aivan pienimpiä lukuun ottamatta. Näillä muunmuassa ohjataan tuulettimia ja pumppuja, jotka tehostavat muuntajan jäähtymistä.

## 2.2 Muuntajan häviöt

Muuntajasta ulos tuleva teho on sinne syötetty teho vähennettynä muuntajan sisäisillä häviöillä. Muuntajan hyötysuhde on tyypillisesti noin 99 %. Muuntajan kokonaishäviöt  $P_T$  voidaan jakaa kahteen osaan, tyhjäkäyntihäviöihin  $P_0$  ja kuormitushäviöihin  $P_k$ . Tyh-

jäkäyntihäviöt ovat pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä, jotka syntyvät magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Kuormitus- eli virtalämpöhäviöt syntyvät käämien vastuksissa virran vaikutuksesta. Kolmivaiheisen muuntajan kuormitushäviöt voidaan laskea

$$P_k = 3I^2R_k, \quad (3)$$

missä  $R_k$  on oikosulkuresistanssi ja  $I$  on vaihevirran suuruus. Kuormitushäviöt voidaan jakaa kolmeen osaan, resistanssin aiheuttamat häviöt käämijohtimissa, pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt käämijohtimissa sekä pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt säiliössä ja muissa teräsrakenteissa. (Heathcote, 2013).

Tyhjäkäyntihäviöt syntyvät pääosin muuntajan rautasydämessä ja ovat riippuvaisia jännitteen taajuudesta, vuontiheydestä, ja sydämen ominaisuuksista kuten materiaalista, koosta ja valmistuksesta. Tyhjäkäyntihäviöt voidaan jakaa kahteen osaan, hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin. Hystereesihäviöt saadaan laskettua

$$P_h = k_1 f B_{\max}^n, \quad (4)$$

missä  $k_1$  on materiaalista riippuva vakio,  $f$  on taajuus,  $B_{\max}$  on maksimi vuontiheys sydämessä ja  $n$  on Steinmetzin eksponentti, joka on materiaalista riippuva, yleensä välillä 1,6–2,5 tai korkeampi. Pyörrevirtahäviöt lasketaan

$$P_e = k_2 f^2 t^2 B^2 / \rho, \quad (5)$$

missä  $k_2$  on materiaalista riippuva vakio,  $f$  on taajuus,  $t$  on materiaalin paksuus,  $B$  on vuontiheys ja  $\rho$  on materiaalin resistiivisyys. (Heathcote, 2013.)

Resistanssin aiheuttamia häviöitä käämijohtimissa voidaan pienentää vähentämällä käämin kierroksia, kasvattamalla johdinten poikkipinta-alaa tai näiden kahden yhdistelmällä. Käämin kierrosten vähentäminen vaatii sydämeen suuremman magneettivuon ja sydämen poikkipinta-alan, mikä johtaa tyhjäkäyntihäviöiden kasvamiseen. Eli kuormitushäviöiden vähentäminen lisää tyhjäkäyntihäviöitä ja vastaavasti myös toisinpäin. (Heathcote 2013.)

### 2.3 Muuntajan lämpenemä

Muuntajassa syntyvät häviöt lämmittävät muuntajaa. Käämijohtimissa syntyvä lämpö johtuu ensin johtimen paperieristeen läpi muuntajaöljyyn, josta se johdetaan pois käämin lähettyviltä. Lopulta lämpö siirtyy muuntajan tai radiaattorin seinien kautta muuntajaa ympäröivään ilmaan. Muuntajan suurin sallittu käyttölämpötila tulee olla rajoitettu, jotta vältetään paperieristeen vioittumiselta. Öljyeristeisen muuntajan paperieristeen keskimääräinen lämpötila ei saa ylittää 98 °C, jotta saavutetaan eristeen normaali elinikä. Arrheniuksen lain mukaan paperieristeen elinikä puolittuu aina kun sille määritetty normaali käyttölämpötila ylittyy 6 °C:lla. Vastaavasti sama toimii toiseen suuntaan, lämpötilan alentaminen kasvattaa käyttöikää. Tosin se toimii vain rajoitetusti, yli 40 vuoden käyttöään jälkeen vaikuttaa jo moni muukin tekijä. (Bayliss & Hardy, 2007:532–534.)

Käytännössä lämpötilat käämien eri osissa vaihtelevat, koska joku osa jäähtyy tehokkaammin kuin joku toinen. Sitä osaa käämistä, joka saavuttaa korkeimman lämpötilan kutsutaan hotspotiksi. Tutkimukset ja testaukset ovat osoittaneet, että hotspot-lämpötila on noin 13 °C kuumempi kuin käämin keskimääräinen lämpötila luonnollisesti jäähdetyllä muuntajalla. (Bayliss & Hardy, 2007:532–533.)

### 3 APUSÄHKÖTOTEUTUS KUIVAMUUNTAJALLA

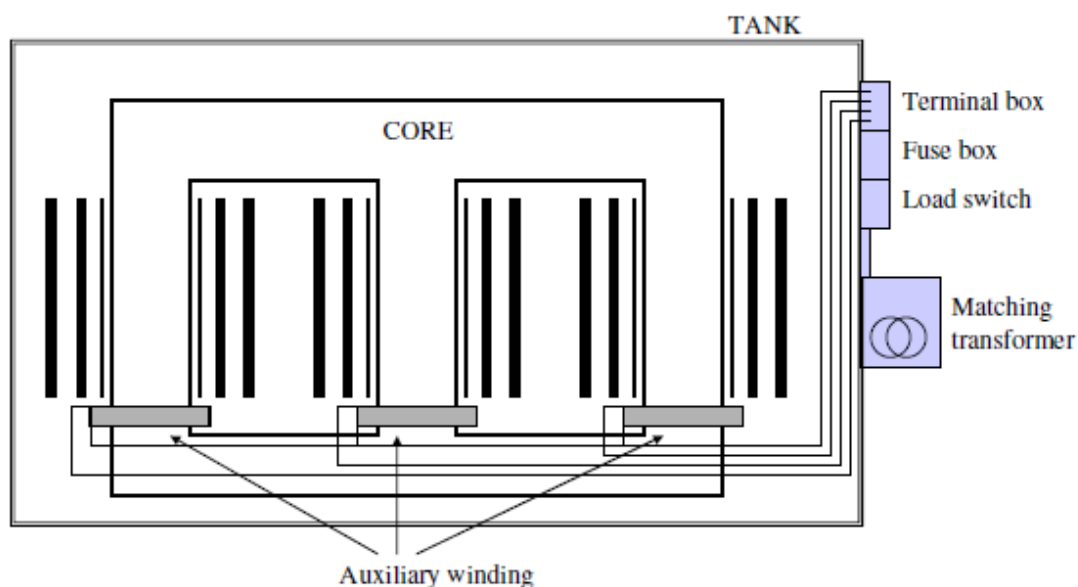
Kaikilla sähköasemilla aivan pienimpiä lukuun ottamatta on jonkinlainen apusähköistys. Sähköaseman rakennuksissa tarvitaan käyttö sähkö valaistukselle, lämmitykselle ja ilmanvaihdolle. Lisäksi sähköasemalla on viestiyhteyksiä, katkaisijoita, lämmittimiä ja moottoreita, jotka tarvitsevat jännitteen toimiakseen. (Bayliss & Hardy, 2007:115.)

Ruotsissa sähköaseman sähköistys toteutetaan usein muuntajan yhteyteen asennettavalla apumuuntajalla. Nyt on tarkoitus kehittää vakioratkaisu kuivamuuntajan koteloinnille siten, että samaa kotelointiratkaisua voidaan käyttää eri tehoisille apumuuntajille. Tässä työssä tutkitaan 63 kVA:n ja 100 kVA:n tehoisia kuivamuuntajia. Toisin sanoen apumuuntajakotelo mitoitetaan 100 kVA apumuuntajan mukaan. Koteloinnin lisäksi vakioidaan myös eri tehoisten apumuuntajien vaatimat sulakkeet, kompaktikatkaisijat ym. tarvittavat komponentit eri mitoitusvirroille ottaen huomioon yleisimmät asiakasvaatimukset ja apumuuntajien nimellistehot.

#### 3.1 Asiakkaan vaatimuksia apusähköistykselle

Asiakkaalla on omia vaatimuksia apumuuntajaratkaisun suhteen, jotka tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Tarkastellaan seuraavaksi erästä asiakasprojektia. Asiakas vaatii, että apumuuntajana on käytettävä kuivamuuntajaa öljyeristeisen muuntajan sijaan. Kuivamuuntaja on asennettava koteloon, jotta se on suojassa lumelta, vedeltä ja pölyltä. Apumuuntajakotelon oven pitää olla lukittavissa kiinni. Kotelointiin liittyvien muiden koteloiden ovet tulee olla pulttavissa kiinni. Lisäksi jos apumuuntaja on säästökytketty, niin sen ensiöjännite ei saa ylittää 420 V. Apumuuntajan yhteydessä tulee olla kuormakytin asennettuna omaan koteloonsa. Kotelo tulee sijoittaa sellaiselle korkeudelle, että kuormakytintä on mahdollista käyttää maasta käsin ilman tikkaita. Kuormakytimen virrankatkaisukyky tulee olla 1,25-kertainen apumuuntajan nimellisvirtaan nähden. Oikosulkusuojausta varten vaaditaan sulakkeet omaan koteloonsa. Jokaisen kotelon ovesa tulee olla teksti joka kieltää oven avaamisen jännitteisenä. (ABB 2013a.)

Kaikkien koteloiden materiaalina tulee olla ruostumaton teräs. Koteloihin, joissa on komponentteja, jotka vaativat lämmittimen toimiakseen  $-40\text{ °C}$  lämpötilassa, tulee asentaa termostaateilla ohjatut lämmittimet ja lämmittimille pitää asentaa kosketussuojat, että niitä ei voi vahingossa koskettaa. Näiden lisäksi vaaditaan vielä erillinen termostaatti, joka antaa hälytyssignaalin jo ennen kuin lämpötila on  $-40\text{ °C}$ . Kotelon alareunan tulee olla vähintään 600 mm korkeudella muuntajan asennustasosta, jotta asiakas pystyy vetämään kaapelit koteloon kotelon pohjan kautta. Kuvassa 2 on esitetty asiakkaan teknisessä erittelyssä esittämä periaatekuva apusähkötoteutuksesta. (ABB 2013a.)

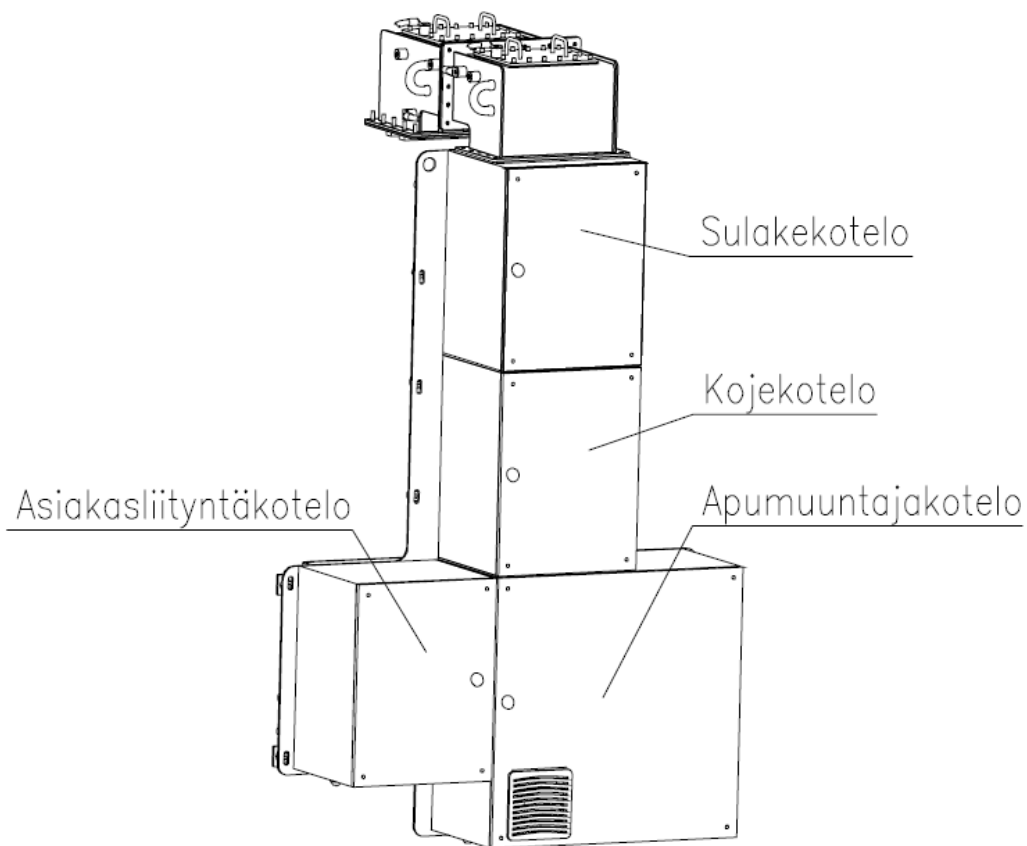


**Kuva 2.** Asiakkaan esittämä periaatekuva apusähkötoteutuksesta (ABB 2013a).

### 3.2 Apumuuntajan kotelointi

Edellä esitettyjen esimerkkiasiakkaan vaatimusten perusteella päädyttään ratkaisuun, jossa apumuuntajan kotelointi muodostuu neljästä eri kotelosta: sulakekotelo, kojekotelo, apumuuntajakotelo ja sulakekotelo asiakaslähdölle. Kotelointiratkaisu on esitetty

kuvassa 3. Siitä tehdään kahta eri versiota, jotka ovat peilikuvat toisistaan, eli vain asiakasliityntäkotelo ja tuuletusritilät asennetaan apumuuntajakotelon toiselle puolelle. Valinta tehdään sen mukaan kuinka päämuuntajan säiliön seinällä on tilaa. Kotelot kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksilla ja liitokset tiivistetään ulkoreunoilta korkkitiivisteellä. Jokaiseen koteloon asennetaan ilmanvaihtotulpat, jotta ilman kosteus ei tiivisty koteloiden sisälle. Koteloiden väliin asennetaan kaapeliläpiviennit. Jokaisen kotelon oveen laitetaan kilpi, jossa kielletään avaamasta ovea kun apumuuntaja on jännitteinen. Apumuuntajakokonaisuudelle tulee painoa noin 210 kg kun käytetään 63 kVA:n tehoista kuivamuuntajaa ja noin 265 kg kun käytetään 100 kVA:n tehoista kuivamuuntajaa.



**Kuva 3.** Apumuuntajakokonaisuuden kotelointiratkaisu.

Ylimmäiseksi kotelokokonaisuuteen tulee 450x600x400 mm sulakekotelo, johon asennetaan sulakkeet, varokekytkin ja tarvittavat liittimet, kuva 4. Kotelon kattoon ja pohjaan asennetaan läpivientilaipat kytkentöjä varten. Kaapelit tuodaan muuntajan kannelta kotelon katon läpi sisään koteloon, jossa kaapelit kytketään sulakkeille. Sulakkeilta vedetään kaapelit kotelon pohjan läpiviennin kautta alapuolella olevaan kojekoteloon ja kuormankytkimelle.



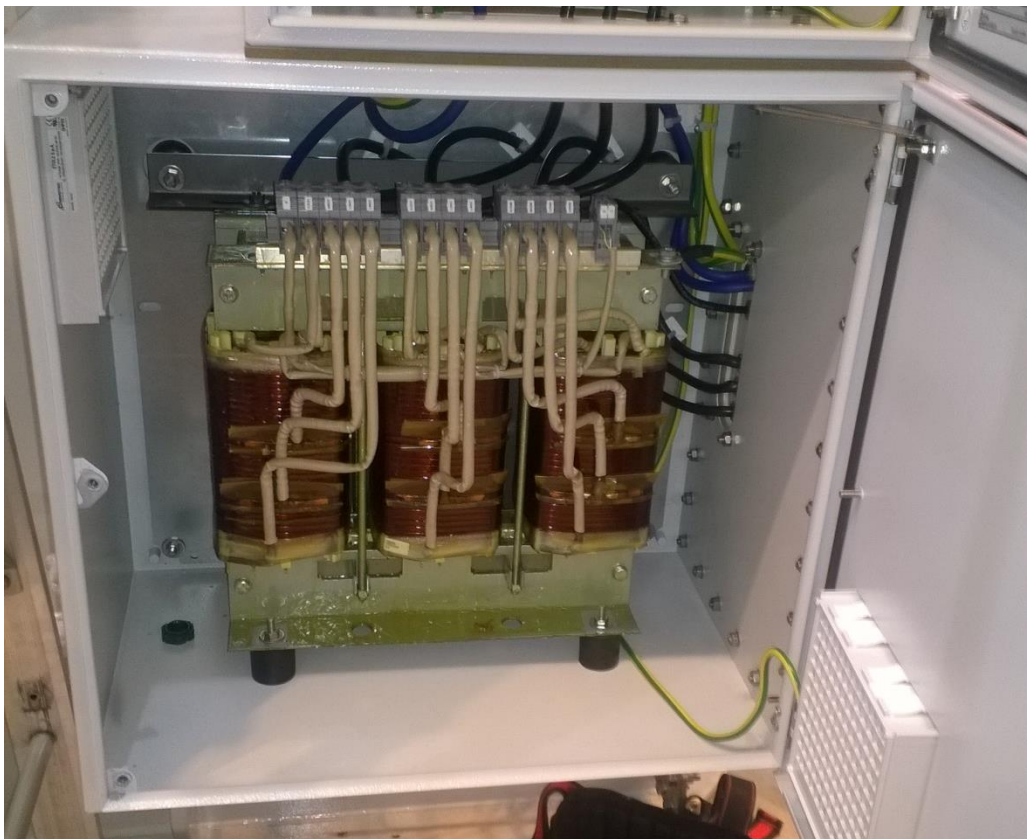
**Kuva 4.** Sulakekotelo

Sulakekotelon alapuolelle sijoitetaan 450x600x400 mm kokoinen kojekotelo, johon asennetaan kuormankytkin, ks. kuva 5. Kuormankytkimen kahva tulee kotelon oveen ja oven asennus toteutetaan siten, että se aukeaa vasta kun kuormankytkin on auki eli 0-asennossa. Kuormankytkimen lisäksi koteloon tulee tarvittava määrä liittimiä ja liittinsuojia. Kotelon pohjaan ja kattoon asennetaan läpivientilaipat kaapeliläpivientejä varten. Kuormankytkimeltä vedetään kaapelit apumuuntajakoteloon kuivamuuntajan ensiöliittimiin.



**Kuva 5.** Kuormankytkimen kotelo

Apumuuntajakoteloksi valitaan ruostumattomasta teräksestä valmistettu kotelo, jonka mitat ovat 800x800x400mm ja tiiveysluokka on IP54. Tämän kokoiseen koteloon mahtuu kaikki eritehoiset apumuuntajavaihtoehdot. Tärinänvaimentimia asennetaan kuivamuuntajan alle neljä sekä kotelon ja kannattimen väliin kaksi. Kuivamuuntaja tuetaan puristuspaikista apumuuntajakoteloinnin kannatusrunkoon kannattimella. Kotelon kattoon ja edestä katsottuna vasemman puoleiseen seinään asennetaan läpivientilaipat kaapeliläpivientejä varten. Kotelon jäähdytystä varten asennetaan tuuletusritilät kotelon oven alareunaan ja oikean puoleiseen seinään. Jäähdytys toteutetaan vapaalla kierrolla. Mikäli kotelo ei jäähdy tarpeeksi tuuletusritilöihin on mahdollista asentaa saman valmistajan tuulettimet tehostamaan kiertoa. Kotelon jäähtymistä tutkitaan tarkemmin seuraavassa luvussa. Apumuuntajakotelo on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Apumuuntajakotelo.

Apumuuntajakotelon vasemmalle puolelle sijoitetaan 450x600x400mm asiakasliityntäkotelo, johon asennetaan sulakkeet ja tarvittavat liittimet asiakkaan liityntää varten, ks. kuva 7. Kotelon pohjaan tehdään kolme aukkoa, joihin laitetaan C-umpilaipat. Oikeanpuoleiseen seinään asennetaan läpivientilaippa kaapeliläpivientiä varten.

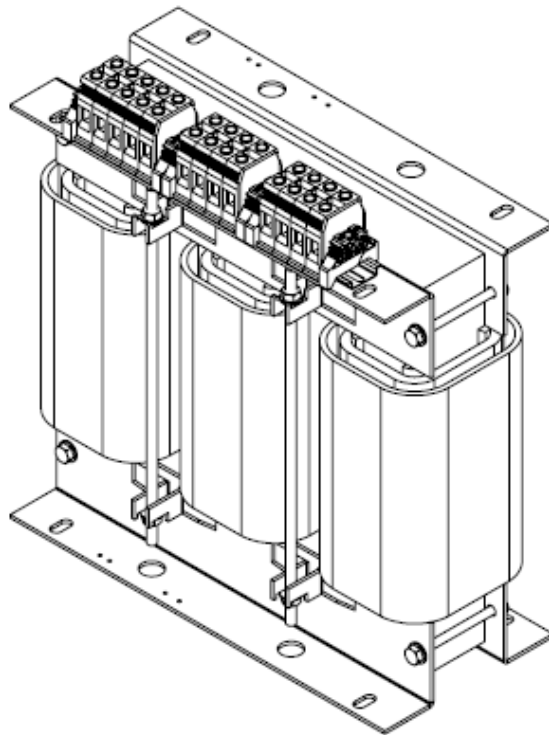


**Kuva 7.** Asiakasliityntäkotelo

### 3.3 Tarvittavien komponenttien vakiointi

Kotelointien lisäksi tarkoituksena on vakioida myös muut tarvittavat komponentit, kuten sulakkeet ja kuormankytkimet eri tehoisille apumuuntajille. ABB:n valmistamien OT- sarjan kuormankytkimien ja Wöhnerin valmistamien varokekytkinten alin käyttölämpötila on  $-40\text{ °C}$  (ABB 2012, van Ark 2013). Näin ollen koteloihin ei tarvitse asentaa ylimääräisiä lämmittämiä ja niitä ohjaavia termostaatteja, jolloin koteloinnin suunnittelu yksinkertaistuu.

Tässä työssä tutkitaan kolme eri versiota 63 kVA tehoisesta kuivamuuntajasta. Käytävissä olevat muuntosuhteet ovat 340/441 V, 345/441 V ja 370/441 V. Ensiöjännitteen eri arvoista johtuen eri apumuuntajilla on erilaiset ensiön nimellisvirrat, jotka vaihtelevat välillä 98,3–107,0 A. Toision nimellisvirta kaikilla kuivamuuntajaversioilla on 82,5 A. Kuivamuuntajille ilmoitetut häviöt ympäristöön vaihtelevat välillä 730–920 W. Kuvassa 8 on esitetty tällainen kuivamuuntaja. (ABB 2013a)



**Kuva 8.** 63 kVA kuivamuuntaja. (ABB 2013a)

Apumuuntajaa suojaaville sulakkeille, varokeytkimelle ja kuormankytkimelle mitoiteetaan kojeet, joiden nimellisvirta on 160 A. Tämä täyttää asiakkaan vaatimuksen, jossa kuormankytkimeltä vaadittiin 1,25-kertainen virrankatkaisukyky muuntajan nimellisvirtaan verrattuna. Asiakaslähtö suojataan sulakkeilla, joiden nimellisvirta on 80 A. Tämä valinta estää apumuuntajan liian suuren kuormittamisen. Apumuuntajan kytkentöihin käytetään poikkipinnaltaan 35 mm<sup>2</sup> johdinta. Tämän suuruista johdinpoikkipinta-alaa voidaan kuormittaa 135 A:lla (ABB Strömberg 1990:465). Valitut komponentit, niiden valmistajat ja lajimerkit on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** 63 kVA apumuuntajalle valitut komponentit.

<b>Komponentti</b>	<b>Valmistaja</b>	<b>Lajimerkki</b>
Sulakkeet apumuuntajan suojaukseen	ABB	OFAF00H160
Kuormankytkin	ABB	OT160EV03WP
Varokeytkin	Wöhner	Quadron crosslinkbreaker no.33200
Sulakkeet asiakaslähdön suojaukseen	ABB	OFAA00GG80 tai OFAF00H80
Varokeytkin asiakaslähdön suojaukseen	Wöhner	Quadron crosslinkbreaker no.33200
Kaapeli	Draka	MKEM 90 35

100 kVA kuivamuuntajista on myös kolme erilaista vaihtoehtoa. Käytettävissä olevat muuntosuhteet ovat 270/441 V, 280/441 V ja 333/441 V. Ensiojännitteen nimellisarvoista johtuen eri apumuuntajilla on erilaiset ensiön nimellisvirrat, jotka vaihtelevat välillä 173,4–209,6 A. Toision nimellisvirta kaikilla kuivamuuntajaversioilla on 130,9 A. Kuivamuuntajille ilmoitetut häviöt ympäristöön vaihtelevat välillä 950–1570 W. 100kVA kuivamuuntaja on ulkoisilta mitoiltaan hieman suurempi kuin 63 kVA kuivamuuntaja, mutta muuten samanlainen kuin kuvan 5 kuivamuuntaja.

Apumuuntajaa suojaaville sulakkeille, varokeytkimelle ja kuormankytkimelle mitoiteetaan kojeet, joiden nimellisvirta on 315 A. Asiakaslähtö puolestaan suojataan sulakkeil-

la, joiden nimellisvirta on 125 A. Nämä valinnat toteuttavat vaatimukset, jotka esitettiin jo aiemmin 63 kVA:n kuivamuuntajan yhteydessä. Apumuuntajan kytkentöihin käytetään poikkipinnaltaan 70 mm<sup>2</sup> johdinta, jota voidaan kuormittaa 200 A:lla (ABB Strömberg 1990:465). Valitut komponentit, niiden valmistajat ja lajimerkit on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** 100 kVA apumuuntajalle valitut komponentit.

<b>Komponentti</b>	<b>Valmistaja</b>	<b>Lajimerkki</b>
Sulakkeet apumuuntajan suojaukseen	ABB	OFAF2H315
Kuormankytkin	ABB	OT315E03WP
Varokekytkin	Wöhner	Quadron crosslinkbreaker no.33202
Sulakkeet asiakaslähdön suojaukseen	ABB	OFAF00H125
Varokekytkin asiakaslähdön suojaukseen	Wöhner	Quadron crosslinkbreaker no.33200
Kaapeli	Draka	MKEM 90 70

Lisäksi koteloidissa on paljon erilaisia liittimiä ja muita kiinnityskomponentteja, jotka ovat niin yleisiä, että niitä ei tässä erikseen tarvitse vakioida.

## 4 KUIVAMUUNTAJAN JÄÄHTYMINEN

Tässä luvussa tutkitaan tarkemmin apumuuntajan ja sitä suojaavan kotelon jäähtymistä. Jäähtymistä tutkitaan simuloimalla Comsol multiphysics -ohjelmalla sekä mittauksilla muuntajan muiden rutiinikokeiden yhteydessä. Aluksi käydään läpi yleistä lämmönsiirtoteoriaa, jonka jälkeen aletaan rakentaa simulointimallia.

### 4.1 Lämmönsiirtoteorian perusteita

Lämmönsiirtoa tapahtuu aina lämpötilaerojen esiintyessä. Lämpötilaerot tasoittuvat luonnostaan, kun lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta kohti matalampaa lämpötilaa termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan (Lampinen 2010:88). Lämmön siirtymiseen on olemassa kolme perusmekanismia: johtuminen, säteily ja konvektio, joka tarkoittaa lämmön siirtymistä virtaavan aineen mukana (Fagerholm 1986:255).

Johtumisessa lämpö siirtyy vierekkäisten molekyylien vuorovaikutuksen ansiosta ilman aineensiirtoa. Lämpö siirtyy siihen suuntaan, jossa molekyylien liike on hitaampaa eli lämpötila on matalampi. Lämmön johtuminen on seurausta siitä, että molekyylien törmäyksissä niiden liike-energiat pyrkivät tasoittumaan. Tällöin nopeammin liikkuvista eli kuumemmista molekyyleistä siirtyy energiaa kylmempiin, hitaammin liikkuviin molekyyliin. Johtuminen on ainoa mekanismi, jolla lämpö siirtyy läpinäkymättömässä kiinteässä aineessa. Aineen lämmönjohtavuus on fysikaalinen ominaisuus, joka kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuus on yleisesti ottaen lämpötilan ja paikan funktio, eli se vaihtelee systeemin eri osissa. Usein systeemi ajatellaan homogeeniseksi niin, ettei lämmönjohtavuus riipu paikasta ja varsinkin pienillä lämpötilaeroilla lämmönjohtavuutta pidetään vakiona. (Fagerholm 1986:255; Aalto yliopisto 2013:3.)

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota jokainen kappale lähettää pelkästään lämpötilansa perusteella. Lämpösäteilyksi kutsutaan sitä osaa sähkömagneettisesta säteilystä, jonka aallonpituus on alueella 0,3–50  $\mu\text{m}$  (Fagerholm 1986:258). Säteilylle on luonteenomaista, että sen eteneminen ei edellytä väliainetta, ja se on ainoa mekanismi, jolla lämpö siirtyy tyhjiössä. Esimerkiksi auringon lämpö siirtyy maahan vain säteile-

mällä, koska väliaineen puuttuessa ei ole muita vaihtoehtoja. Maan pinnalla ja ilmakehässä säteilylämpö sitoutuu johonkin aineeseen, jolloin myös muut lämmönsiirtomekanismit ovat mahdollisia (Aalto yliopisto 2013:3).

Lämmön siirtyminen konvektiivisesti eli kuljettumalla on tärkein mekanismi virtaavissa fluideissa. Konvektiivisella lämmönsiirrolla tarkoitetaan usein yleisemmin lämmönsiirtymistä kiinteän aineen ja fluidin välillä. Fluidi on yleisnimitys väliaineelle, jossa rakenneosat voivat liikkua vapaasti toistensa suhteen (Lampinen & Kotiaho 2012). Fluideja ovat pääasiassa nesteet, kaasut ja plasmata. Konvektiivinen lämmönsiirto voi tällöin olla joko pakotettua tai vapaata. Pakotetussa konvektiossa fluidi pakotetaan virtaamaan pumpulla tai puhaltimella. Vapaassa konvektiossa fluidin virtaus syntyy tiheyserosta, joka johtuu lämpötilaerosta (Aalto yliopisto 2013:20).

Apumuuntajan kotelon jäähdyttämiseen käytetään hyväksi vapaata konvektiota, eli apumuuntajan kiinteä pinta on kontaktissa eri lämpötilassa olevan paikallaan olevan ilman kanssa. Lähellä pintaa olevan ilman lämpötilan muuttuminen aiheuttaa tiheyden muuttumisen, ja painovoiman vaikutuksesta ilma alkaa liikkua. Lämmennyt ilma nousee ylöspäin ja poistuu kotelon yläreunaan asennetusta tuuletusritilästä. Samalla lailla koteloon tulee korvaavaa ilmaa oveen asennetun tuuletusritilän kautta. Näin ilma virtaa kuumamuuntajan ympärillä ja jäähdyttää sitä.

Lämmönsiirtoon vaikuttavat monet tekijät, kuten virtaavan aineen, eli tässä tapauksessa ilman, nopeus ja aineominaisuudet. Kiinteän aineen muoto ja pinta vaikuttavat lähinnä virtausolosuhteisiin. Lämpövirta kiinteästä pinnasta ohivirtaavaan fluidiin voidaan laskea yhtälöstä

$$\dot{q} = hA\Delta T, \quad (6)$$

missä  $h$  on lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ],  $A$  on jäähdytettävä pinta-ala ja  $\Delta T$  jäähdytettävän pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero.

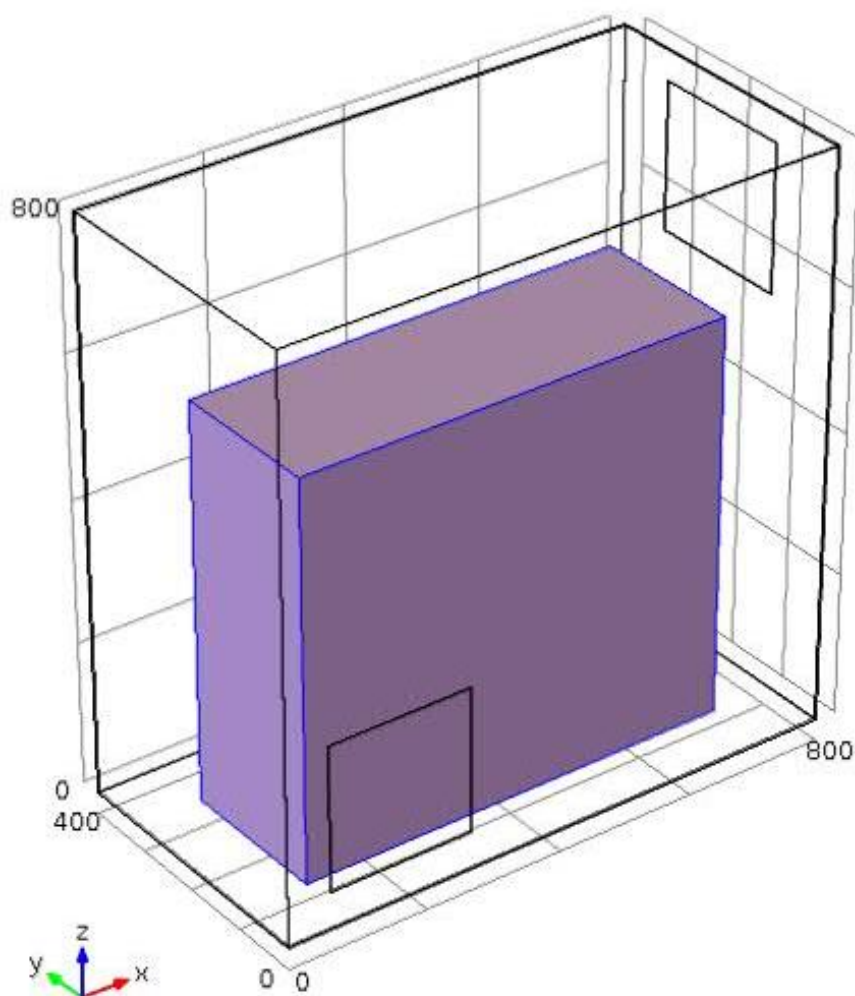
Lämmönsiirto kiinteästä kappaleesta fluidiin on monimutkainen ilmiö ja edellä esitetty lämmönsiirtokerroin riippuu monista tekijöistä, joista yleisimpiä ovat kappaleen muoto

ja koko, virtauksen ominaisuudet, lämpötila, nopeus ja fluidin fysikaaliset ominaisuudet (Aalto yliopisto, 2013). Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen lukuarvo on aina karkea aproksimaatio, koska laskutapaan, jolla se on saatu, sisältyy paljon karkeita idealisointeja. Käytännön insinööriyössä lämmönsiirtokertoimen ratkaisemiseksi haetaan kirjallisuudesta korrelaatiokaava kyseiselle tapaukselle (Lampinen & Kotiaho 2012). Näille kaavoille on useita eri vaihtoehtoja eri tutkijoiden ja tutkimusten perusteella. On otettava huomioon, että epätarkkuus aineominaisuuksien määrittämisessä, koevirheet, pinnan karheus ja geometriset poikkeamat saattavat aiheuttaa huomattavia poikkeamia korrelaatiokaavojen ja käytännön välillä. Virhe voi syntyä pätevyysalueiden rajalla tai muuten epäedullisissa tapauksissa (Fagerholm 1986:270).

#### 4.2 Apumuuntajakotelon simulointimallin rakentaminen

Comsol multiphysics -simulointiohjelmalla rakennetaan kuvan 9 mukainen simulointimalli, jolla tutkitaan apumuuntajakotelon jäähtymistä käytön aikana. Ensimmäisenä ennen varsinaisen mallin rakentamista valitaan 3D-mallinnus ja staattinen tilanne, eli simuloidaan tilannetta, jossa apumuuntaja on ollut jo kauan käynnissä ja saavuttanut maksimilämpötilan. Comsolissa on myös mahdollista valita simulointiin ajasta riippuva tilanne, jolloin laskenta alkaa tilanteesta, jossa apumuuntaja laitetaan päälle ja siitä eteenpäin lasketaan lämpenemistä määritetyin aikavälein.

Mallin rakentaminen aloitetaan tekemällä 800x800x400 mm laatikko, joka kuvaa apumuuntajakoteloa. Kotelon vasen etukulma sijoitetaan xyz-koordinaatiston origoon. Tämän jälkeen mallinnetaan kuivamuuntaja kotelon sisälle. Tässä tehdään yksinkertaistus kuivamuuntajan geometriaan ja mallinnetaan se laatikolla, jonka korkeus vastaa kuivamuuntajan aktiiviosan korkeutta. Kuivamuuntajan päällä olevat liittimet jätetään pois laskuista. Myöhemmin tälle pinnalle määritetään lämmittäväksi tehoksi kuivamuuntajalle ilmoitetut häviöt. 100 kVA tehoinen kuivamuuntaja mallinnetaan 620x560x220 mm kokoisella laatikolla, jonka vasen etukulma sijoitetaan pisteeseen (90;90;0), jolloin kuivamuuntaja asettuu kotelon keskelle.

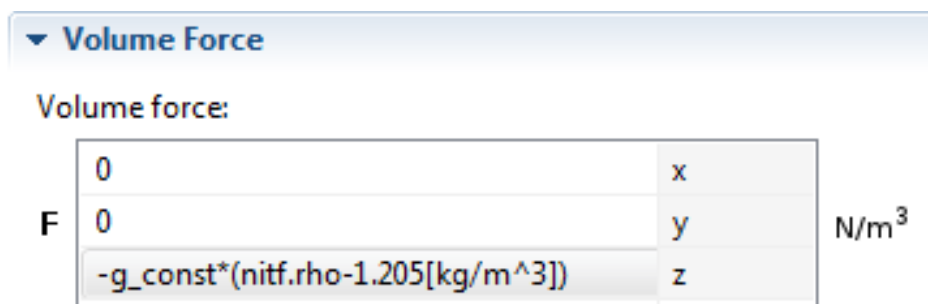


**Kuva 9.** Comsol- simulointiohjelmalla mallinnettu apumuuntajakotelo, jossa on 100 kVA apumuuntaja.

Vastaavasti 63 kVA:n tehoinen kuivamuuntaja mallinnetaan 430x373x175 mm kokoisella laatikolla, jonka vasen etukulma sijoitetaan pisteeseen (185;112,5;0). Kotelon oveen ja oikeaan päätyseinään mallinnetaan 204x204 mm kokoiset tuuletusaukot. Au-  
kot saadaan muodostettua *work plane* tasoilla. *Work Plane1* on xz-suuntainen taso, joka on sijoitettu kotelon etureunan tasalle ja *Work Plane2* on xy-suuntainen taso, joka on sijoitettu kotelon oikean päädyn tasalle. Tasojen geometrioihin määritetään 204x204 mm kokoiset ruudut, jotka kuvaavat tuuletusaukkoja. Näin saadaan mallinnettua kaikki tarvittavat geometriat malliin, joka on esitetty kuvassa 9.

Geometrioiden jälkeen määritetään materiaalit. Materiaalit valitaan Comsolin omasta materiaalikirjastosta. Apumuuntajakotelolle valitaan materiaaliksi Steel AISI 4340, joka on vaihtoehdoista lähimpänä todellisen kotelon ruostumatonta terästä. Sisempi laatikko ja tuuletusaukot määritetään ilmaksi, joka jäädyttää kuivamuuntajaa. Kuivamuuntajaa mallintavan laatikon materiaaliksi valitaan kupari.

Seuraavaksi määritellään *Non-Isothermal Flow*-osuus. Nämä määrittelyt ovat keskeisessä osassa, kun mallinnetaan lämmönsiirtoa. *Fluidiksi* eli jäädyttäväksi aineeksi valitaan ne osat mallista, jotka ovat ilmaa, eli kotelon sisäpuolinen tilavuus ja tuuletusaukot. *Thermal Insulation* kohtaan valitaan apumuuntajakotelon pohja ja itse apumuuntajan pohja. Näiden pintojen yli ei ole lämpövuota, eli käytännössä ne jätetään pois laskuista. Näin tehdään, jotta saadaan simuloitua lämmön siirtyminen kuivamuuntajan muiden pintojen kautta kotelossa olevaan ilmaan. Todellisuudessa kuivamuuntajan ja kotelon pohjan väliin asennetaan kumiset värinänvaimentimet. *Wall* määrittelyssä valitaan kaikki pinnat, jotka ovat kosketuksissa kotelon sisäpuolisen ilman kanssa. Niihin kuuluu kotelon pinta ja kuivamuuntajan pinnat. *Initial Values* kohtaan määritellään alkuarvoiksi esimerkiksi alkulämpötila, joka asetetaan arvoon 20 °C. *Heat Transfer in Solids* kohtaan määritetään apumuuntajan termodynaamisia ominaisuuksia. *Volume Force* kohtaan määritetään gravitaatiosta johtuva voima ja sen suunta koordinaatistossa malliin. Nämä määrittelyt on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** *Volume force* määrittelyt.

*Convective Cooling* kohtaan määritetään systeemin ulkopuolinen lämpötila ja lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerrointa tarvitaan konvektiivisen jäähtymisen laskemiseen. Tässä tilanteessa voidaan käyttää pystysuoralla levyllä tai sylinterillä määritettyä lämmönsiirtokertoimen laskentakaavaa

$$h = K \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

missä  $L$  on kappaleen pituus lämmönsiirtoreitillä,  $\Delta T$  on jäähdytettävän pinnan ja jäähdyttävän fluidin välinen lämpötilaero ja  $K$  on geometriasta riippuva kerroin, joka on tässä tapauksessa 1,42 (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014). *Boundary Heat Source* kohtaan määritetään lämmittävä pinta ja teho, jolla pinta lämpenee. Lämmittäväksi pinnaksi valitaan kuivamuuntajan pinnat pois lukien pohja ja lämmittäväksi tehoksi asetetaan kuivamuuntajan häviöt. Pohjaa ei määritellä lämmittäväksi pinnaksi, koska halutaan että lämpö siirtyy kotelossa olevaan ilmaan. Tuuletusaukot määritetään ritilöiksi eli *Grille1* ja *Grille2*. *Grille1* määritetään ilman sisäänmenoaukoksi ja *Grille2* määritetään ilman poistumisaukoksi. Näille aukoilta määritetään *linear loss coefficient* (ks. kuva 11), joka määrittää kuinka suuren osan tuuletusritilä peittää aukosta. Jakajassa oleva numero kaksi kertoo, että ritilä peittää puolet aukosta.

Linear loss coefficient:

$llc$    $\text{kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})$

**Kuva 11.** Linear loss coefficient määrittely.

*Temperature* -osassa sisään menevän ilman lämpötilaksi määritetään 20 °C ja *Outflow* kohtaan valitaan ilman poistumisaukko. *Highly Conductive Layer* osassa saadaan määritettyä kotelo ohueksi lämpöä johtavaksi kerrokseksi, jolloin lämpöä johtuu kotelon pintojen kautta ympäröivään ilmaan. Määritetään kerroksen paksuudeksi 1,5 mm, joka vastaa todellisen kotelon seinän paksuutta.

Comsolin valikossa seuraava kohta on *Mesh*. Tässä määritetään kuinka tiheän verkon ohjelma rakentaa laskemista varten. Mitä tiheämpi verkko valitaan, sitä tarkempi simulointi tuloksesta tulee, mutta toisaalta laskenta kestää kauemmin. Laskennan nopeuttamiseksi valitaan verkon tiheydeksi ohjelman oletusarvoa asteen karkeampi verkko.

Simulointimallia rakennettaessa tehdään kuivamuuntajan geometrioiden lisäksi seuraavat oletukset. Lämpöä ei siirry apumuuntajan pohjan kautta kotelon pohjaan, sillä todellisuudessa kuivamuuntajan jalkojen ja kotelon pohjan välissä on kumiset tärinänvaimentimet. Näin kaikki lämpö siirtyy kuivamuuntajasta ilmaan.

### 4.3 Apumuuntajakotelon lämpenemän simulointi

Kun simulointimallit on saatu valmiiksi ja toimiviksi voidaan aloittaa simulointi. Simuloidaan sekä 63 kVA että 100 kVA tehoisten apumuuntajien jäähtymistä koteloissa. Simuloidaan staattista tilannetta, joka kuvaa tapausta, jossa apumuuntaja on ollut käynnissä niin pitkään, että se on lämmennyt maksimiarvoonsa. Simulointi on myös mahdollista suorittaa ajasta riippuvana laskentana, jolloin laskennan alkutilanteessa apumuuntaja laitetaan päälle ja simulointiohjelma laskee kotelon lämpötiloja siitä eteenpäin määritellyin väliajoin. Tässä on se huono puoli, että ennalta ei ole tiedossa, kuinka kauan lämpötilan tasaantuminen kestää. Simulointiajo myös kestää huomattavasti pidempään. Näistä syistä simuloinnit suoritetaan staattisella mallilla.

Simulointien aikana muutetaan koteloa lämmittävää tehoa, ulkoilman lämpötilaa ja lämmönsiirtokerrointa. Kuivamuuntajan teknisissä tiedoissa ilmoitetaan, että suurin sallittu ympäristön lämpötila on 40 °C, joten yksi simulointi tehdään tässä lämpötilassa.

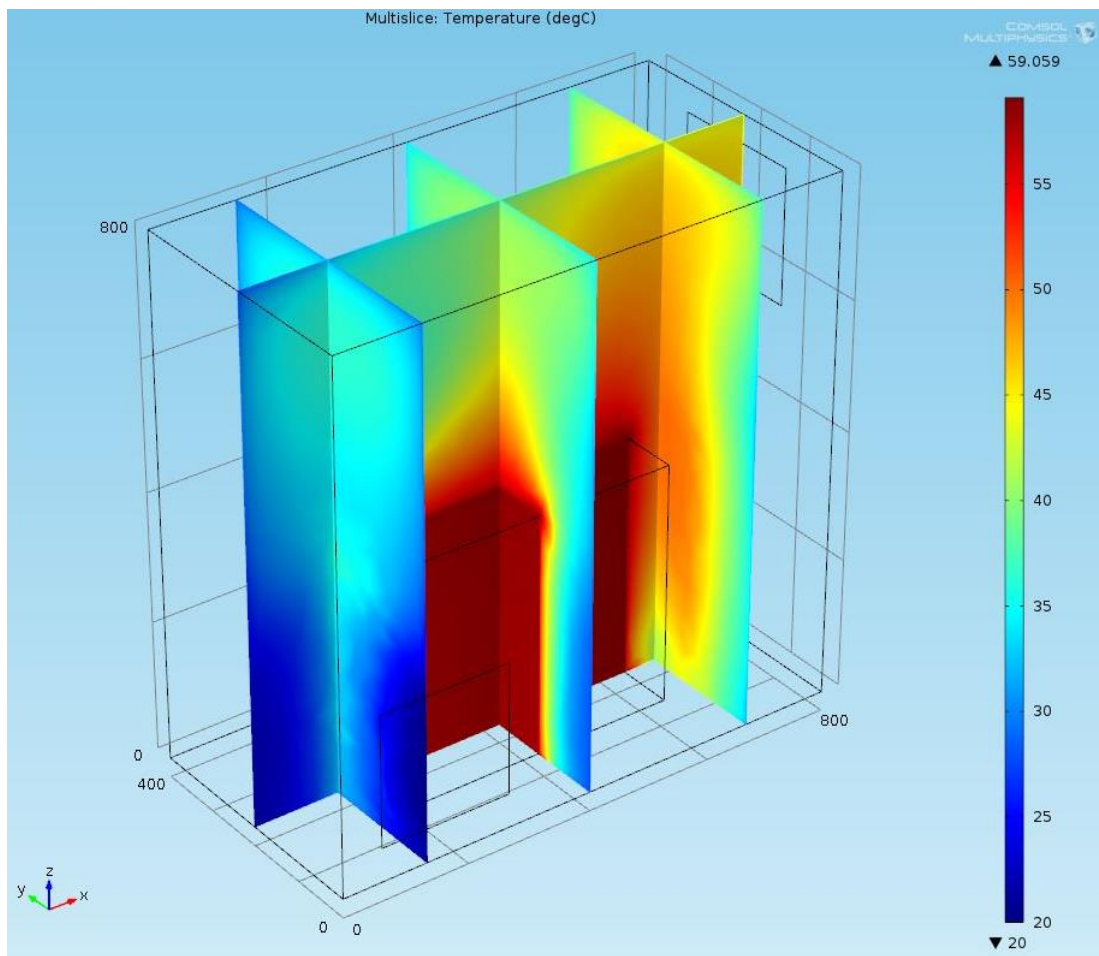
#### 4.3.1 63 kVA:n apumuuntaja

63 kVA:n tehoisten kuivamuuntajien häviötehot vaihtelevat välillä 730–920 W. Kuten jo aiemmin on käynyt ilmi, koska lämmönsiirtokerroimen tarkka määrittäminen ei ole helppoa, niin käytetään kahta eri arvoa. Lähteistä riippuen lämmönsiirtokerroimen arvo

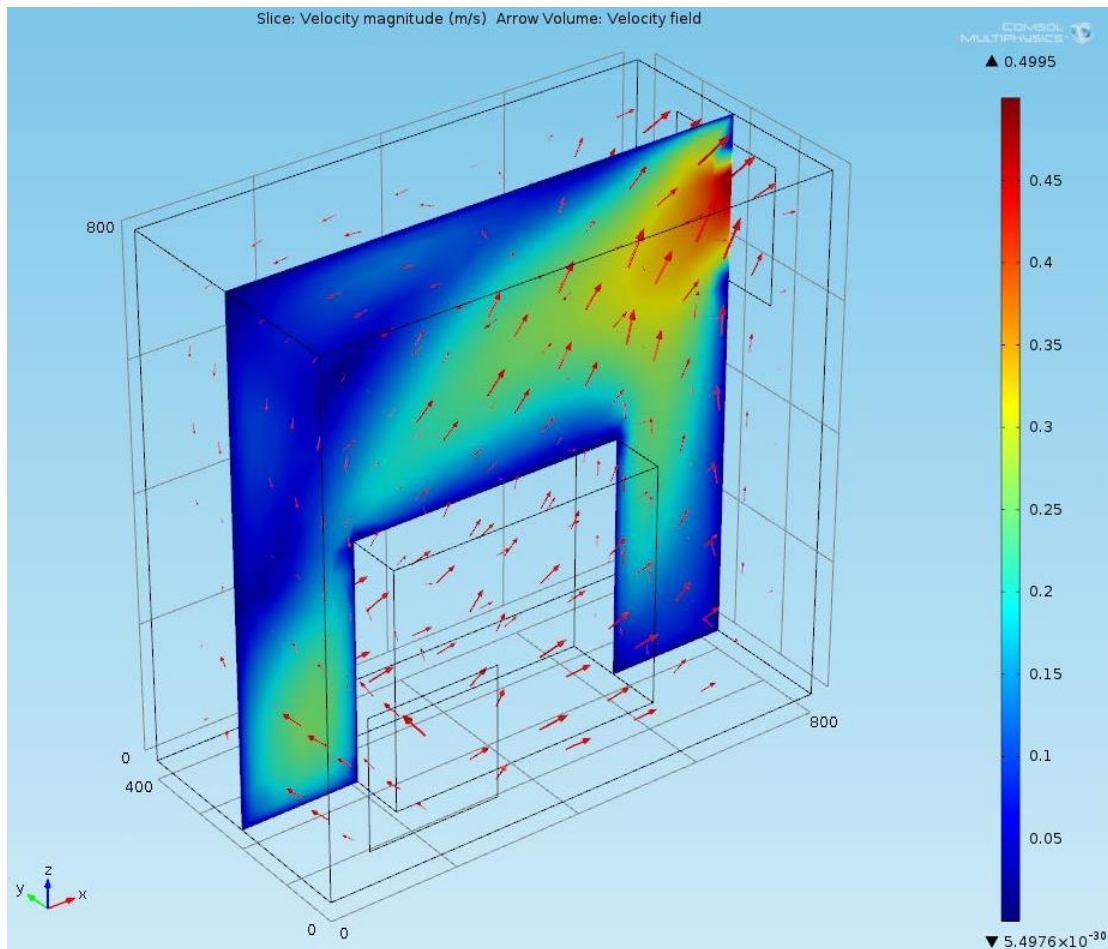
tämänkaltaisissa tilanteissa vaihtelee välillä 5–10 W/(m<sup>2</sup>K), joten simuloiteja tehdään arvoilla 5 ja 10 W/(m<sup>2</sup>K). Ulkoilman lämpötilaan valitaan useita eri arvoja -10, 0, 10, 20 ja 40 °C. Muuntajan rutiinikokeiden yhteydessä suoritettavat mittaukset tehdään koe-kentällä, joten 20 °C:n lämpötilassa simuloiteja ja mittauksia voidaan verrata toisiinsa. Muuntaja asennetaan kuitenkin ulkoilmaan, joten sen takia tarkastellaan myös alempia lämpötiloja, jotka kuvaavat paremmin ulkolämpötiloja eri vuodenaikoina. 40 °C on ilmoitettu kuivamuuntajalle korkeimmaksi ympäristön lämpötilaksi, joten simuloidaan myös näin korkealla lämpötilalla, vaikka muuntaja ei tule olemaan näin korkeassa ulko-lämpötilassa.

Simuloinnista saadaan kuvat, joissa on esitettyä väreillä kotelon sisäpuolisen ilman lämpötila ja ilman virtausnopeus kotelon eri osissa, lisäksi nuolet kertovat virtauksen suunnan. Kuvista selviää myös lämpötila- ja virtausnopeusasteikkojen minimi- ja maksimiarvot. Simuloinnista on myös mahdollista määrittää jonkun yksittäisen pisteen läm-pötila. Näiden pisteiden lämpötiloja voidaan verrata mittauksista saatuihin tuloksiin sa-moissa kohdissa. Kuvassa 12 on esitetty apumuuntajakotelon sisäpuolisen ilman läm-pötila. Ilma on kuuminta juuri kuivamuuntajan ympärillä ja sen yläpuolella. Kuvasta voi-daan todeta, kuinka lämmennyt ilma liikkuu kohti ilman poistumisaukkoa. Kuvasta 13 nähdään tarkemmin, kuinka kuivamuuntaja lämmittää ympärillä olevaa ilmaa, lämnen-nyt ilma nousee ylöspäin ja virtaa kohti tuuletusaukkoa, josta se virtaa ulkoilmaan. Vas-taavasti tilalle tulee kylmää ilmaa ovesa olevan tuuletusaukon kautta. Ilman virtaus-suunta on esitetty nuolilla ja virtausnopeus on esitetty väreillä. Nämä kuvat ovat tilan-teesta, jossa ympäröivä lämpötila on 20 °C, lämmönsiirtokerroin on 10 W/(m<sup>2</sup>K) ja ko-teloa lämmittävä teho 730 W. Näillä arvoilla simuloituna kotelon sisällä olevan ilman keskimääräinen lämpötila on 38,5 °C.

Ympäröivän ilman tiheys pidetään vakiona, vaikka ympäröivän ilman lämpötilaa muu-tetaan simuloinneissa. Ilman tiheydeksi määritettiin 1,205 kg/m<sup>3</sup>, joka vastaa 20 °C:sen ilman tiheyttä.



**Kuva 12.** Kotelon sisäpuolisen ilman lämpötila. Oikealla on lämpötila-asteikko.



**Kuva 13.** Kotelon sisäpuolisen ilman virtausnopeus ja -suunta. Oikealla on virtausnopeusasteikko

Simulointituloksista kiinnostavimpia ovat kotelon keskimääräinen lämpötila ja kotelon maksimilämpötila juuri kuivamuuntajan pinnalla. Niistä saadaan selville, minkälaisissa olosuhteissa kuivamuuntaja on käytön aikana. Simulointitulokset on kerätty taulukoihin 3–5 kuivamuuntajan häviötehon mukaan. Niistä voidaan todeta, että kotelo jäähtyy riittävästi pelkän vapaan ilmakierron avulla, eli ei ole tarvetta asentaa tuulettimia tuuletusritilöihin.

Simulointituloksista nähdään, miten lämmönsiirtokertoimen arvon vaihto vaikuttaa tuloksiin. Kuten jo aiemmin on käynyt ilmi, sen tarkka laskeminen on hyvin vaikeaa ja siksi usein käytetään approksimaatioita, kuten tässäkin on tehty. Kuivalle ilmalle tämän tyyppisessä tilanteessa, jossa lämmin pinta on käytännössä pystysuorassa oleva seinä tai sylinteri, lämmönsiirtokertoimen arvo on välillä 5–10 W/(m<sup>2</sup>K).

**Taulukko 3.** 63 kVA:n apumuuntajan simulointitulokset 920 W häviöillä.

<b>Häviöteho (W)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Kotelon keski- määräinen lämpötila (°C)</b>	<b>Maksimi lämpötila kotelossa (°C)</b>
920,0	40,0	10,0	56,5	81,2
920,0	40,0	5,0	57,8	81,4
920,0	20,0	10,0	42,0	66,5
920,0	20,0	5,0	44,0	67,3
920,0	10,0	10,0	36,5	61,1
920,0	10,0	5,0	38,9	62,2
920,0	0,0	10,0	32,0	57,3
920,0	0,0	5,0	34,8	58,0
920,0	-10,0	10,0	28,1	54,4
920,0	-10,0	5,0	31,5	54,9
920,0	-20,0	10,0	24,4	51,4
920,0	-20,0	5,0	28,6	52,5

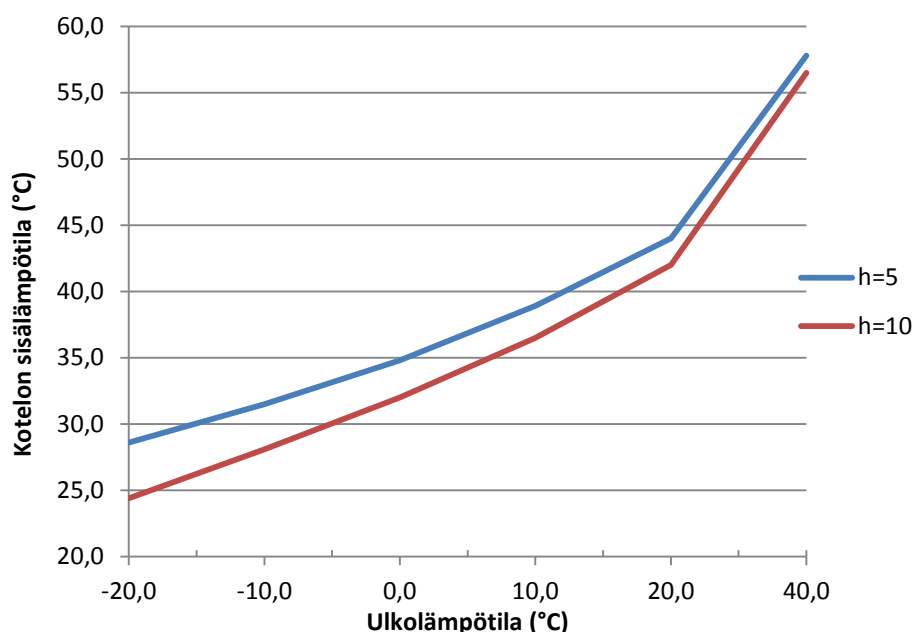
**Taulukko 4.** 63 kVA:n apumuuntajan simulointitulokset 890 W häviöillä.

<b>Häviöteho (W)</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>Lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Kotelon keski- määräinen lämpötila (°C)</b>	<b>Maksimi lämpötila kotelossa (°C)</b>
890,0	40,0	10,0	56,0	79,7
890,0	40,0	5,0	57,3	80,3
890,0	20,0	10,0	41,5	65,1
890,0	20,0	5,0	43,5	65,9
890,0	10,0	10,0	36,0	59,7
890,0	10,0	5,0	38,4	60,5
890,0	0,0	10,0	31,5	56,0
890,0	0,0	5,0	34,3	56,6
890,0	-10,0	10,0	27,6	53,1
890,0	-10,0	5,0	31,1	54,0
890,0	-20,0	10,0	23,9	50,5
890,0	-20,0	5,0	28,1	51,6

**Taulukko 5.** 63 kVA:n apumuuntajan simulointitulokset 730 W häviöillä.

Häviöteho (W)	Lämpötila (°C)	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)	Kotelon keskimääräinen lämpötila (°C)	Maksimi lämpötila kotelossa (°C)
730,0	40,0	10,0	53,5	73,8
730,0	40,0	5,0	54,5	74,3
730,0	20,0	10,0	38,5	59,0
730,0	20,0	5,0	40,4	59,8
730,0	10,0	10,0	33,0	53,7
730,0	10,0	5,0	35,3	54,6
730,0	0,0	10,0	28,8	50,6
730,0	0,0	5,0	31,4	51,1
730,0	-10,0	10,0	24,9	47,7
730,0	-10,0	5,0	28,3	48,6
730,0	-20,0	10,0	21,1	45,3
730,0	-20,0	5,0	25,4	46,5

Lämmönsiirtokertoimen arvon kasvattaminen 5:stä 10:een vaikuttaa kotelon sisäpuolisen ilman keskimääräiseen lämpötilaan noin 2 °C, ulkolämpötilan ollessa 0–20 °C. Vaikutus on suurempi, kun ulkolämpötila on tämän alapuolella. Näissä tilanteissa vaikutus kotelon sisälämpötilaan on noin 4 °C. Tilanteissa, joissa ulkolämpötila on korkeampi, lämmönsiirtokertoimen muutoksen vaikutus pienenee. Ulkolämpötilan ollessa 40 °C muutoksen vaikutus kotelon sisälämpötilaan on enää vain noin 1 °C. Tämä näkyy paremmin kuvassa 14, jossa esitetään graafisesti lämmönsiirtokertoimen arvon muutoksen vaikutus kotelon sisäpuolisen ilman lämpötilaan. Kuvan arvot ovat tapauksesta, jossa apumuuntajan häviöt ovat 920 W. Kuten kuvasta nähdään, lämpötilaero on suurimmillaan ympäristön lämpötilan ollessa alhainen, ero pienenee kun ulkolämpötila kasvaa.



**Kuva 14.** Lämmönsiirtokertoimen muutoksen vaikutus kotelon sisälämpötilaan. Sininen käyrä kuvaa lämpötiloja lämmönsiirtokertoimen  $h$  arvolla  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja punainen käyrä lämmönsiirtokertoimen arvolla  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Kotelon maksimilämpötila pahimmassa tapauksessa, jossa ulkolämpötila on  $40 \text{ °C}$ , kuivamuuntajan häviöt suurimmillaan ja pienempi lämmönsiirtokerroin, on  $81,4 \text{ °C}$ . Käytännössä se on lämpötila kuivamuuntajan pinnalla. Se ei ole vaarallisen korkea kuivamuuntajan toiminnan kannalta. Korkeasta lämpötilasta ei aiheudu vaaraa ihmisillekään, koska apumuuntajakotelon ovi on pultattu kiinni, joten apumuuntajaa ei ole mahdollista koskettaa vahingossa. Lämpötilat ovat kuitenkin sellaisella tasolla, että apumuuntajakoteloon ei ole simulointitulosten perusteella tarpeellista asentaa tuulettimia, vaan kotelo jäähtyy riittävästi ilman vapaalla kierrolla.

#### 4.3.2 100 kVA:n apumuuntaja

100 kVA:n kuivamuuntajan eri mallien häviötehot ovat 950 ja 1570 W. Näillä häviötehoilla suoritetaan samat simuloinnit kuin edellä on esitetty 63 kVA:n apumuuntajalle. Simuloinnissa muuttuu vain apumuuntajan häviöt ja koko. Apumuuntajakotelo on samankokoinen molemmissa tapauksissa. Jo ennen simulointia voidaan todeta, että

100 kVA:n apumuuntaja lämmitteää koteloa enemmän kuin 63 kVA:n apumuuntaja. Tämä todentuu simulointien edetessä. Simulointitulokset on esitetty taulukoissa 6 ja 7.

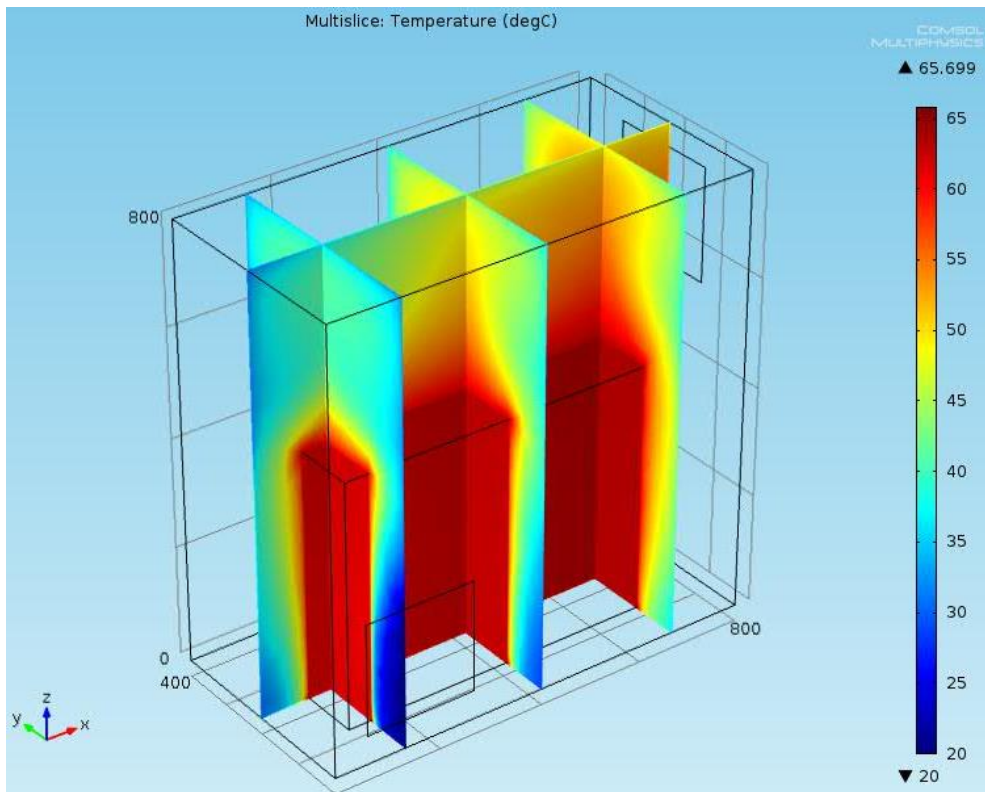
**Taulukko 6.** 100 kVA:n apumuuntajan simulointitulokset 1570 W häviöillä.

Häviöteho (W)	Lämpötila (°C)	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)	Kotelon keskimääräinen lämpötila (°C)	Maksimi lämpötila kotelossa (°C)
1570,0	40,0	10,0	77,2	100,3
1570,0	40,0	5,0	81,9	103,0
1570,0	20,0	10,0	61,6	86,2
1570,0	20,0	5,0	66,9	89,1
1570,0	10,0	10,0	52,3	80,3
1570,0	10,0	5,0	60,7	83,4
1570,0	0,0	10,0	49,7	76,5
1570,0	0,0	5,0	52,1	77,7
1570,0	-10,0	10,0	42,0	71,9
1570,0	-10,0	5,0	47,7	73,8
1570,0	-20,0	10,0	37,5	68,4
1570,0	-20,0	5,0	43,6	70,5

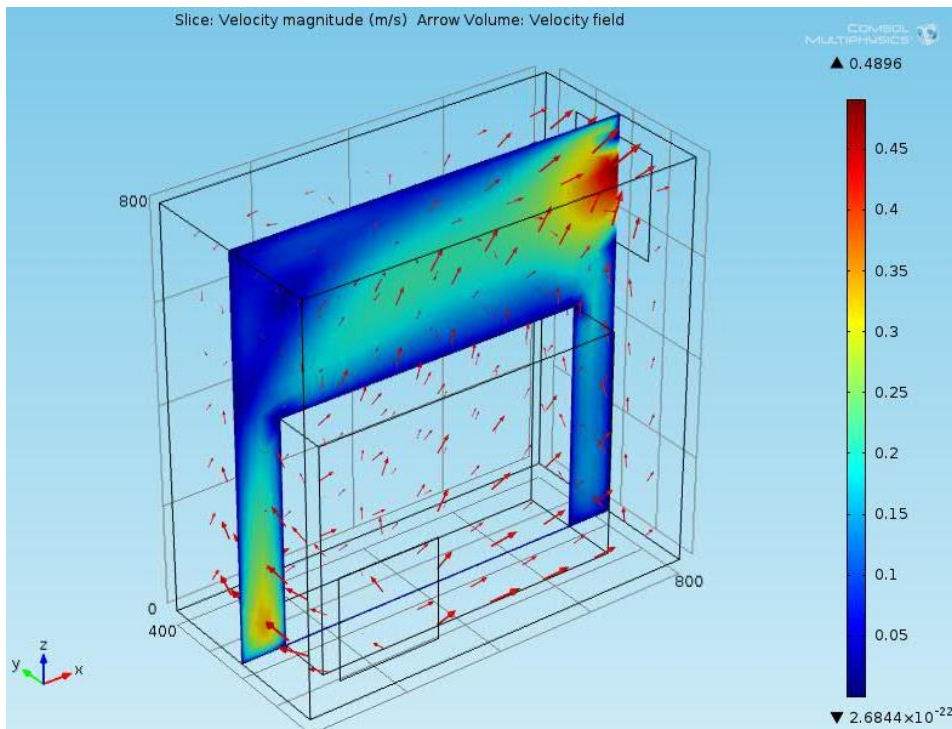
**Taulukko 7.** 100 kVA:n apumuuntajan simulointitulokset 950 W häviöillä.

Häviöteho (W)	Lämpötila (°C)	Lämmönsiirtokerroin (W/m <sup>2</sup> K)	Kotelon keskimääräinen lämpötila (°C)	Maksimi lämpötila kotelossa (°C)
950,0	40,0	10,0	62,1	79,6
950,0	40,0	5,0	64,8	80,6
950,0	20,0	10,0	48,4	65,7
950,0	20,0	5,0	52,4	67,0
950,0	10,0	10,0	40,2	60,6
950,0	10,0	5,0	43,9	61,8
950,0	0,0	10,0	35,0	56,5
950,0	0,0	5,0	39,2	57,9
950,0	-10,0	10,0	30,3	53,1
950,0	-10,0	5,0	35,2	54,8
950,0	-20,0	10,0	25,4	50,2
950,0	-20,0	5,0	31,5	52,2

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty simulointitulokset 100 kVA:n apumuuntajalle samoilla alkuarvoilla kuin kuvissa 9 ja 10 oli 63 kVA:n apumuuntajalle. Apumuuntajan koteloä lämmittävä häviöteho on 950 W. Kuvia ja taulukoiden simulointituloksia vertaamalla nähdään, että suurempi kuivamuuntaja lämmittää kotelon sisäilman keskimäärin kuusi astetta korkeammaksi. Tämä on kuitenkin niin pieni ero, että se ei merkitsevästi vaikuta lämmentyneen ilman virtausnopeuteen.



**Kuva 15.** Kotelon sisäpuolisen ilman lämpötila. Oikealla on lämpötila-asteikko.

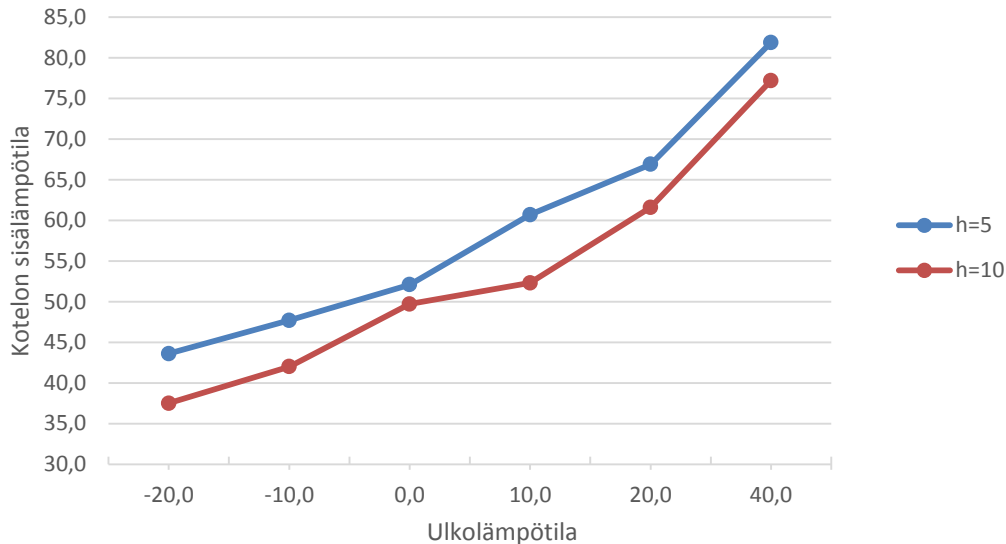


**Kuva 16.** Kotelon sisäpuolisen ilman virtausnopeus ja -suunta. Oikealla on virtausnopeusasteikko.

Lämmönsiirtokertoimen muutoksen vaikutus kotelon sisäpuolisen ilman lämpötilaan vaihtelee enemmän kuin 63 kVA:n kuivamuuntajalla. Simulointitulosten mukaan lämmönsiirtokertoimen muutoksen vaikutus kotelon sisälämpötilaan on noin 4,7–6,1 °C. Tuloksissa on kaksi mittauspistettä jotka poikkeavat huomattavasti tästä; ulkolämpötilan ollessa 0 °C lämpötilaero on pienempi ja ulkolämpötilan ollessa 10 °C lämpötilaero on suurempi. Tämä saattaa johtua mallin epätarkkuudesta. Kuvassa 17 esitetyt tulokset ovat kuitenkin siinä mielessä teorian mukaisia, että jokaisella ulkolämpötilan arvolla kotelon sisälämpötila on suurempi, kun simulointi on suoritettu pienemmällä lämmönsiirtokertoimen arvolla.

Kotelon maksimilämpötila pahimmassa tapauksessa, jossa ulkolämpötila on 40 °C, kuivamuuntajan häviöt suurimmillaan ja pienempi lämmönsiirtokerroin, on 103,0 °C. Tämä lämpötila on kuivamuuntajan pinnalla eikä se ole vaarallisen korkea kuivamuuntajan toiminnan kannalta. Kaikki kaapelit eivät kestä näin korkeita lämpötiloja, joten niiden valinnassa korkea lämpötila tulee ottaa huomioon. Kotelo on samalla tavalla pultattu kiinni kuten 63 kVA kuivamuuntajan kotelo, joten tässäkin korkeasta lämpötilasta ei

ole vaaraa ihmiselle. Simulointitulosten perusteella myös tämä nimellisteholtaan suurempi apumuuntaja jäähtyy riittävästi ilman tuuletin asentamista.



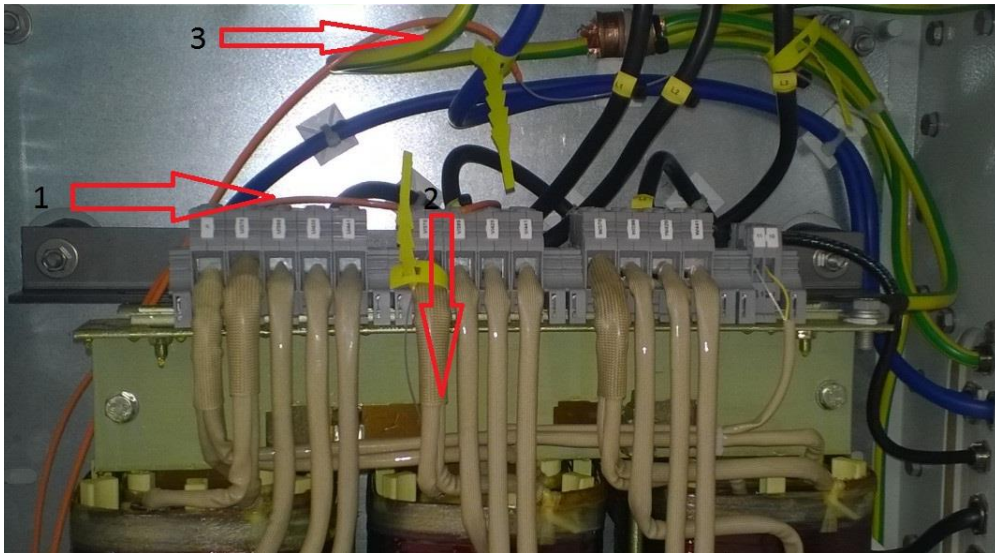
**Kuva 17.** Lämmönsiirtokertoimen muutoksen vaikutus kotelo sisälämpötilaan. Siniinen käyrä kuvaa lämpötiloja lämmönsiirtokertoimen  $h$  arvolla  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja punainen käyrä lämmönsiirtokertoimen arvolla  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

#### 4.4 Apumuuntajakotelon lämpenemän mittaukset

##### 4.4.1 Mittausjärjestelyt

Apumuuntajan lämpenemää tutkitaan, jotta saadaan varmuus siitä, että apumuuntajakotelo jäähtyy tarpeeksi pelkän vapaan ilmakierron avulla. Lämpenemäkoetta tehdään ennen apumuuntajakokonaisuuden kiinnittämistä päämuuntajaan. Mittauksissa 63 kVA:n kuivamuuntajaa ajetaan nimelliskuormalla niin kauan, että sen lämpötila tasaantuu. Lämpötilamittauksiin käytetään optisia kuituja. Apumuuntajakoteloon sijoitetaan kolme optista kuitua kuvan 18 mukaisesti. Optiset kuidut viedään apumuuntajakoteloon pohjassa olevan kondenssiveden poistoaukon kautta. Kuitujen toiset päät kytketään Qualitrolin mit-

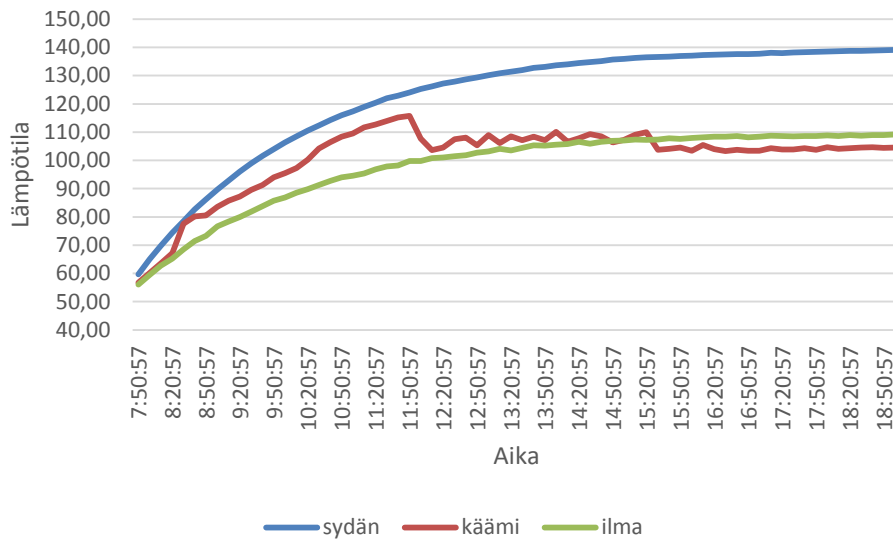
talaitteeseen, joka on kytketty tietokoneeseen. Mittausohjelma mittaa lämpötilat minuutin välein ja piirtää niistä käyrät. Mittaustulokset tallentuvat myös tekstitiedostoon, josta ne on helppo viedä taulukkolaskentaohjelmaan kuvaajien tekoa varten.



**Kuva 18.** Optisten kuitujen sijainti apumuuntajakotelossa. Yksi kiinnitetään kuivamuuntajan sydämeen (1), toinen kiinnitetään apumuuntajan käämiin (2) ja kolmas sijoitetaan ilmaan apumuuntajan yläpuolelle noin 10 cm korkeudelle mittaamaan apumuuntajakotelon sisäpuolisen ilman lämpötilaa (3).

#### 4.4.2 Mittaustulokset

Apumuuntajaa kuormitettaessa todetaan, että sen lämpötila alkaa nopeasti nousta. Vain neljän tunnin käytön jälkeen kuivamuuntajan sydämen lämpötila on jo yli 110 °C ja käämin lämpötila yli 105 °C. Tässä vaiheessa kuivamuuntajan lämpötila nousee vielä noin 10 °C tunnissa, joten on ilmeistä, että apumuuntajakotelo tarvitsee tuulettimen jäähtyäkseen riittävästi. Lämpötila alkaa tasaantua vasta noin 10 tunnin käytön jälkeen, silloin kuivamuuntajan sydämen lämpötila on noin 139 °C ja apumuuntajakotelon ilman lämpötila on noin 109 °C. Lämpenemäkokeen tulokset on esitetty kuvassa 19.



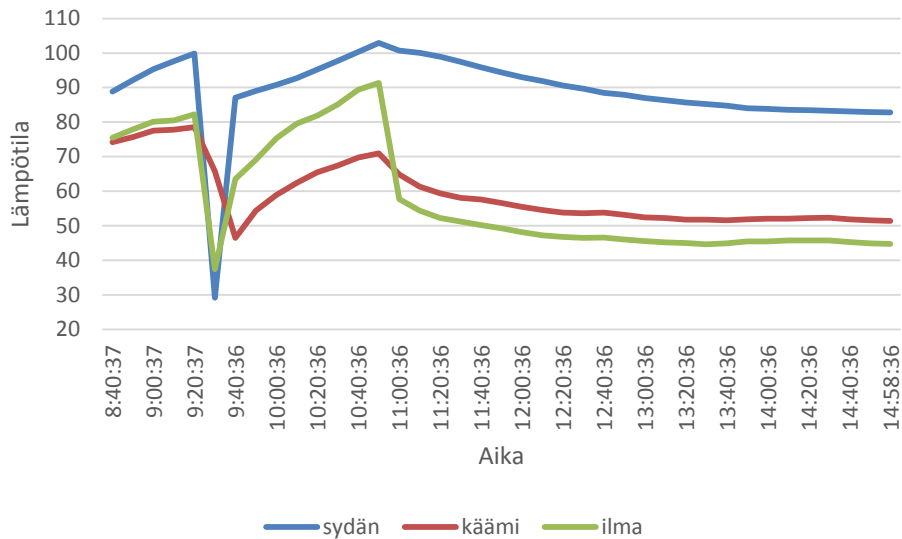
**Kuva 19.** Lämpenemäkokeen tulokset luonnollisella jäähdytyksellä ilman tuuletinta.

Kuitu numero 2 oli huonosti kiinnitetty käämiin ja se aiheuttaa tuloksissa näkyvän heilahtelun käämin lämpötilan kuvaajassa. Käämin lämpötilan pitäisi olla koko ajan korkeampi kuin ilman lämpötila kuivamuuntajan yläpuolella. Käytännössä käämin lämpötilaa mittaavan kuidun arvot ovat ilman lämpötiloja käämin vieressä. Tällä selittyy myös se, että kuvaajassa käämin lämpötila on matalampi kuin ilman lämpötila kuivamuuntajan yläpuolella.

Lämpenemäkoee osoitti, että apumuuntajakotelo lämpenee huomattavasti odotettua enemmän. Simulointien perusteella voitiin odottaa, että ilma kotelossa lämpenisi vain noin 60 °C:een. Raju lämpenemä selittyy sillä, että apumuuntajakotelon tuuletusritilöissä on suodatinkankaat, jotka suurelta osin estävät ilman vapaan kierron. Koska apumuuntajakotelon sisällä olevia komponentteja ei ole suunniteltu kestämään näin korkeita lämpötiloja, päätetään apumuuntajakotelon ovesa olevaan tuuletusritilään asentaa tuuletin ja suorittaa lämpenemäkoee uudelleen.

Uudessa lämpenemäkoekessa tuuletin kiinnitetään tuuletusritilään ja jännitteensyöttö otetaan koekentältä. Tuulettimen nimellispuhallusnopeus on 108 m<sup>3</sup>/h ja käyttöjännite 115 V. Jatkossa tuulettimesta on tarkoitus käyttää versiota, jonka käyttöjännite on 230 V. Lämpenemäkoekessa käytetään 115 V mallia, koska sellainen on nopeammin saatavissa paikalle. Tuuletinta ei ohjata termostaatilla. Uudessa lämpenemäkoekessa

apumuuntajaa käytetään ensin ilman tuuletinta, jotta se lämpenee. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 20.



**Kuva 20.** Lämpenemäkokeen tulokset tuulettimen lisäyksen jälkeen.

Kuvassa näkyvä ensimmäinen lämpötilan notkahdus johtuu tuulettimen asennuksesta, jolloin kotelon ovi oli auki ja apumuuntaja jännitteettömänä. Tuulettimen asennuksen jälkeen apumuuntajaa käytetään ilman tuuletinta, jotta se saadaan taas lämpimäksi. Tuulettimen käynnistyshetkellä apumuuntajakotelon sisäpuolisen ilman lämpötila on yli 90 °C. Tuulettimen vaikutus kotelon sisäpuolisen ilman lämpötilaan alkaa näkyä välittömästi. Vain kahdenkymmenen minuutin toiminnan jälkeen tuuletin on jäädyttänyt kotelo noin 35 °C. Tuntien kuluessa apumuuntajakotelon sisälämpötila tasaantuu noin 45 °C:een. Näiden tulosten perusteella apumuuntajakotelon oven tuuletusritilään päätetään asentaa tuuletin, jotta kotelo saadaan jäähtymään tarpeeksi.

#### 4.4.3 Mittaustulosten perusteella tehdyt muutokset

Apumuuntajakotelon ovesta olevaan tuuletusritilään asennetaan tuuletin, koska kotelon sisällä olevia komponentteja ei ole suunniteltu kestäväksi näin korkeita lämpötiloja.

Tuuletin itsessään on helppo asentaa paikalleen, koska se on samaa sarjaa tuuletusritilän kanssa, joten sen voi vain napsauttaa paikalleen, kuten kuvassa 21 näkyy. Tuuletin asennetaan oveen, koska siinä sille on paremmin tilaa. Tuuletin olisi myös mahdollista asentaa kotelon sivuseinässä olevaan tuuletusritilään, mutta apumuuntajakotelossa ei ole riittävästi tilaa sillä kohdalla. Oveen asennettuna tuuletin imee jäähdyttävää ilmaa koteloon ja siten jäähdyttää tehokkaammin kuin sivuseinään kiinnitetty, kuumaa ilmaa ulospäin puhaltava tuuletin. Oveissa ilmaa sisään imevä tuuletin myös jäähtyy paremmin ja siten kestää käyttöä pidempään.



**Kuva 21.** Kotelon oveen asennettu tuuletin.

Suuremman työn aiheuttaa jännitteen syötön, tuuletinta ohjaavan termostaatin kiinnityksen suunnittelu ja toteutus sekä kotelon sisäpuolisen kaapeloinnin vaihto kuuman kestävään kaapeliin. Termostaatin kiinnitystä varten suunniteltiin siihen sopiva kulmatuki, joka kiinnitetään apumuuntajan jalan kiinnityspulttiin. Kulmatukeen ruuvataan kiinnipala asennuskiskoa, johon termostaatti asennetaan. Apumuuntajakotelon pohjaan asennetaan kaapeliläpivienni tuulettimen syöttöjännitteen kaapelia varten. Jännitteensyöttö tuodaan muuntajan apujohtokotelosta, jossa syötölle on oma johdonsuojakatkaisija. Kotelon pohjan läpiviennistä kaapeli kytketään apumuuntajan jalkaan kiinnitettyyn termostaattiin, josta syöttö johdetaan oveen asennettuun tuulettimeen.

Apumuuntajakotelon sisäinen kaapelointi kuormankytkimeltä apumuuntajalle ja apumuuntajalta asiakasliityntäkoteloon vaihdetaan kuumankestäväksi kaapeliksi. Alkuperäinen muovieristeinen kaapeli kestää valmistajan ilmoittamien teknisten tietojen mukaan vain 90 °C lämpötilan (Prysmiangroup, 2014). Uudeksi kaapeliksi valikoitui halogeenivapaa Betatherm®145 UL kaapeli, joka kestää 125 °C lämpötilan (Synflex, 2014). Näillä muutoksilla apumuuntajakotelo saadaan jäähtymään riittävästi ja johtimet kestävät kuumuuden.

#### 4.5 Simulointi- ja mittaustulosten vertailu

Simulointituloksia verrataan mittaustuloksiin, jotta saadaan selville kuinka hyvin simulointimalli vastaa todellisuutta. Kuten edellä esitetyistä simulointi- ja mittaustuloksista voidaan todeta, niin simulointimalli ei juurikaan vastaa mittaustuloksia. Ongelma voi olla siinä, että apumuuntajakotelon tuuletusritilöissä käytetään suodatuskangasta, joka estää pölyn pääsyn koteloon jäähdyttävän ilman mukana. Tämä kangas käytännössä estää ilman vapaan kierron. Lisäksi apumuuntaja on mallinnettu hyvin yksinkertaisesti pelkkänä laatikkona, jonka pinnat tuottavat apumuuntajan häviöiden verran lämpöä. Simulointitulokset ovat huomattavasti lähempänä mittaustuloksia, kun tuuletin on lisätty apumuuntajakoteloon. Tosin simuloinneissa on tarkasteltu koko kotelon sisäpuolisen ilman keskilämpötilaa ja mittauksissa lämpötila on mitattu suoraan kuivamuuntajan yläpuolelta, jossa ilma on kuuminta. Simuloinneista saatava kotelon maksimilämpötilaa voidaan verrata mittauksissa saatuihin tuloksiin apumuuntajan sydämen lämpötilasta, koska simuloinneissa kaikkein kuumin kohta on juuri samassa paikassa apumuuntajan pinnalla, mihin oli mittauksissa kiinnitetty sydämen lämpötilaa mittaava valokuitu.

Simulointi- ja mittaustulokset eroavat niin paljon toisistaan, että ei voida päätellä kumpi lämmönsiirtokerroimen arvo, 5 vai 10 W/(m<sup>2</sup>K), antaa todenmukaisemman simulointituloksen. Simuloinneissa lämmönsiirtokerroimen arvon muutos vaikuttaa keskimäärin noin 2 °C lämpötiloihin, kun simuloidaan koekentän lämpötilaa vastaavalla ulkolämpötilalla. Se on pieni ero verrattuna siihen, että mittaustulokset eroavat simulointituloksista noin 60 °C.

Tuuletusritilän koon ja simuloimalla saadun tuuletusritilän kohdalla olevan ilman virtausnopeuden avulla saadaan laskettua kuinka paljon kotelossa vaihtuu ilmaa tunnissa. Simulointimallissa tuuletusritilä on 204 mm x 204 mm ja kuvasta 13 nähdään ilman virtausnopeuden maksimiarvon olevan 0,4995 m/s. Näistä laskemalla saadaan selville, että tunnissa koteloon tulee noin 75 m<sup>3</sup> jäädyttävää ilmaa. Vastaavasti tuuletin, joka asennettiin apumuuntajakotelon oveen puhaltaa 108 m<sup>3</sup>/h jäädyttävää ilmaa kotelon sisälle. Näin ollen simulointitulokset ovat paremmin vertailukelpoiset mittaustuloksiin, joissa tuuletin on ollut käytössä.

Tuulettimen asennuksen jälkeen simuloitujen sisäilman lämpötilat ovat jo melko lähellä mitattuja arvoja. Simuloimalla saatiin kotelon koko sisäpuolisen ilman keskilämpötilaksi 38,5–40,4 °C, lämmönsiirtokertoimesta riippuen, ulkolämpötilan ollessa 20 °C. Vastaavasti koekentällä suoritetuissa mittauksissa tuulettimella jäädytetyssä kotelossa ilman lämpötila nousi apumuuntajan yläpuolella 45 °C:een. Kuten jo aiemmin todettiin, niin simuloimalla ja mittaamalla saatujen arvojen eroon vaikuttaa se, että simuloinneissa on tarkasteltu koko kotelon sisäpuolisen ilman keskiarvoa ja mittauksissa on otettu huomioon vain yksi piste apumuuntajan yläpuolella.

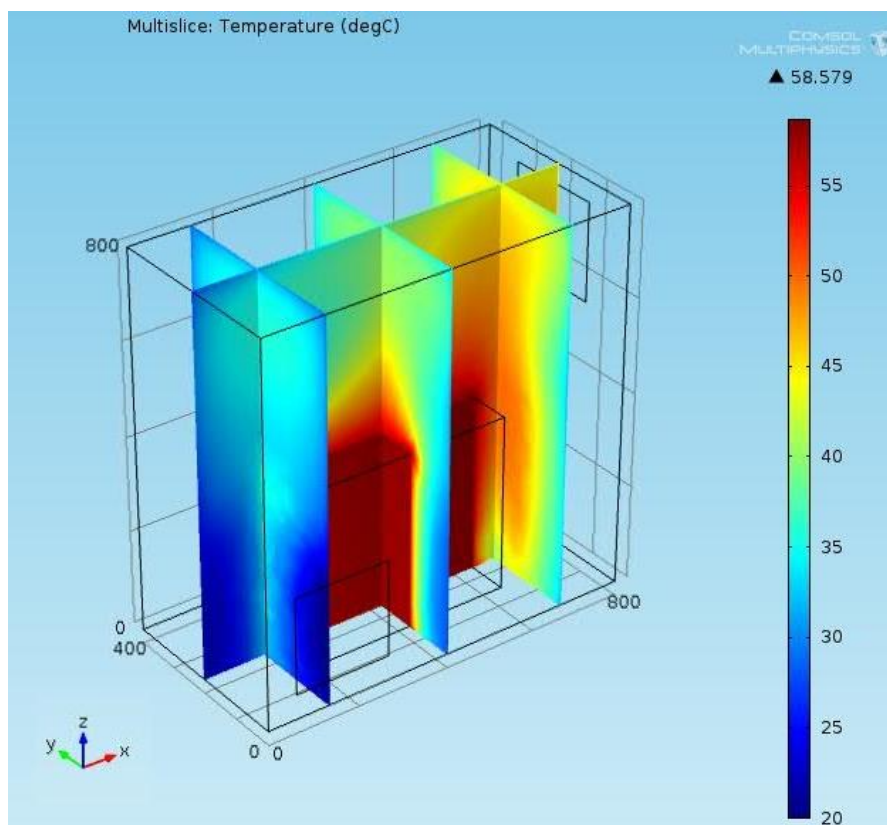
Simuloinnissa apumuuntajakotelon kuumin kohta on juuri apumuuntajan yläpinnalla, joka vastaa apumuuntajan sydämen lämpötilaa. Simuloimalla saatu lämpötila on 59,0–59,8 °C, lämmönsiirtokertoimen arvosta riippuen. Vastaava mittaustulos on 82,85 °C. Simuloidun ja mitatun tuloksen yli 20 °C:een ero selittyy ainakin osittain simulointimallin epätarkkuudella. Mallissa apumuuntaja on kuvattu laatikolla, jonka mitat ovat todellisen apumuuntajan leveys, korkeus ja syvyys. Tämän laatikon pinnoille on määritetty lämmittäväksi tehoksi apumuuntajan häviöt. Todellisuudessa apumuuntajaa lämmittävät häviöt syntyvät käämeissä ja rautasydämessä, jotka ovat tiiviimmällä alueella kuin simulointimallin laatikon seinät. Muutenkin apumuuntajan geometriat vaikuttavat lämmönsiirtymiseen apumuuntajan pinnalta sitä ympäröivään ilmaan. Simulointimallista tehtiin tarkoituksella riittävän yksinkertainen simulointien, jotta simulointi sujui suhteellisen lyhyessä ajassa. Mallista olisi ollut mahdollista tehdä tarkempi kuvaamalla käämit sylintereinä ja rautasydän palkeilla. Tällöin jokaiselle osalle olisi pitänyt määrittellä erikseen kaikki ominaisuudet. Tämä olisi kuitenkin hidastanut mallin rakentamista

ja ennen kaikkea simulointiajojen kesto olisi kasvanut huomattavasti. Simuloinneissa käytössä olleiden muuttujien määrän vuoksi simulointiajoja eri alkuarvoilla kertyi huomattava määrä, yhteensä 60 kappaletta.

#### 4.6 Tuulettimen huomioiminen simulointimallissa

Simulointi- ja mittaustuloksissa esiintyvän suuren eron takia simulointimallia pyritään parantamaan, jotta se vastaisi paremmin tilannetta, jossa apumuuntajakotelon oveen on asennettu tuuletin. Tuuletin voidaan mallintaa siten, että määritetään tuuletusaukolle ilman virtausnopeus. Aiemmissa simuloinneissa ilman virtaus oletettiin vapaaksi virtaukseksi, joka syntyy lämpötilaerojen seurauksena. *Grille 1:lle*, joka on määritetty ilman sisäänmeno aukoksi, määritetään parametrin siten, että *Linear loss coefficientin* sijaan käytetään *Static pressure curve dataa*, johon määritetään ilman sisään virtausnopeudeksi  $108 \text{ m}^3/\text{h}$ . *Grille 2*, eli ilman ulostuloaukko, määrittely pidetään samana kuin aiemmin, joten sieltä ilma pääsee virtaamaan vapaasti ilman pakotettua kiertoa.

Edellä mainituilla muutoksilla simuloituna  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ulkolämpötilassa päästään kohtalaisen lähelle mittaustuloksia. Simulointitulokset on esitetty kuvassa 22, jossa näkyy lämpötilat kotelon eri osissa.



**Kuva 22.** Simulointitulokset tuulettimen huomioimisen jälkeen. Oikealla on lämpötila-asteikko.

Simulointituloksissa kaikkein kuumin kohta aivan apumuuntajan yläpuolella on  $58,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja kotelon sisäpuolisen ilman keskilämpötila on  $38,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Näin ollen simulointi- ja mitaustulokset vastaavat paremmin toisiaan, kun tuuletin otetaan huomioon simuloinneissa.

## 5 ELINKAARIKUSTANNUSTEN VERTAILU

Tässä luvussa tarkastellaan apumuuntajaratkaisun elinkaarikustannuksia. Elinkaarikustannuksilla (Life Cycle Costs, LCC) tarkoitetaan kaikkia niitä kustannuksia, jotka syntyvät tai voidaan olettaa syntyvän tuotteelle määritetyn elinkaaren aikana. IEC 60300-3-3 -standardissa tuotteen elinkaarelle määritetään seuraavat vaiheet: konseptointi ja määrittely, suunnittelu ja kehitys, valmistus, asennus, käyttö ja ylläpito ja viimeisenä tuotteen hävittäminen. Näistä kuudesta vaiheesta aiheutuvat kustannukset voidaan jakaa kolmeen osaan: hankintakustannukset, käyttö- ja huoltokustannukset sekä käytöstä poistamisesta aiheutuvat kustannukset. Erilaisia suunnitteluratkaisuja vertailtaessa analyysin tarkoituksena on ohjata kokonaisuuden hankintaan, jolla saavutetaan matalimmat kokonaiskustannukset tarkasteltavan elinkaaren aikana. Hankintahinnaltaan edullisin vaihtoehto ei yleensä ole kokonaistaloudellisesti paras. (IEC 60300-3-3: 8–9, 2004; Motiva, 2013; Ramentor, 2014.)

Verrataan kuivamuuntajalla ja öljyeristeisellä apumuuntajalla toteutettujen ratkaisujen elinkaarikustannuksia muuntajan koko käyttöajalta. Muuntajan pitkän käyttöiän vuoksi pelkkien hankintahintojen vertailu ei ole riittävää, vaan täytyy ottaa huomioon myös huoltokustannukset ja muuntajan häviöistä aiheutuvat kustannukset. Vuosien aikana kertyvät käyttökustannukset saattavat olla moninkertaiset verrattuna muuntajan hankintahintaan. Sopiva tapa vertailla kilpailevia ratkaisuja on ottaa huomioon käytöstä aiheutuvat kustannukset. Tätä menetelmää kutsutaan *Total Owning Cost (TOC)* -menetelmäksi. TOC-menetelmä on käytetyin tekniikka, kun vertaillaan muuntajien kokonaiskustannuksia. TOC-menetelmässä muuntajan kokonaiskustannukset TOC laske-

$$TOC = BP + A \cdot NLL + B \cdot LL, \quad (8)$$

missä BP on muuntajan hankintahinta (€), A on ekvivalentti tyhjäkäyntihäviöiden arvo (€/W), NLL on tyhjäkäyntihäviöt (W), B on ekvivalentti kuormitushäviöiden arvo (€/W) ja LL on kuormitushäviöt (W). Mikäli A ja B eivät ole tiedossa, voidaan käyttää pelkästään tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöitä ja kertoa ne käyttötunneilla ja sopivalla

sähköhinnalla. (Copper Development Association Inc. 2014; Amoiralis, Tsili, Georkilakis & Kladas 2007.)

Muuntajan hankkimisesta ja käyttämisestä aiheutuvat kokonaiskustannukset saadaan yksinkertaisimmillaan laskemalla yhteen muuntajan hankintahinta, tyhjäkäyntihäviöistä aiheutuvat kustannukset, kuormitushäviöistä aiheutuvat kustannukset sekä huoltokustannukset. Näistä kustannuksista vain hankintakustannukset ovat kertaluontoisia ja muut kustannukset kertyvät muuntajan käyttöajalta. Eri kustannustekijät on tehtävä keskenään vertailukelpoisiksi, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. Tähän on kaksi tapaa: annuiteettimenetelmä ja nykyarvomenetelmä. Annuiteettimenetelmässä investointikustannukset muutetaan koko käyttöajalle jaksotetuiksi vuotuisiksi kustannuksiksi. Nykyarvomenetelmässä, jota tässä työssä käytetään elinkaarikustannusten vertailuun, jaksollisten kustannusten nykyarvo lasketaan koko käyttöajalta. Kertomalla ensimmäisen vuoden häviökustannukset kapitalisointikertoimella  $\kappa$  saadaan koko tarkastelujakson vuotuisen häviökustannusten nykyarvo. Kapitalisointikerroin saadaan laskemalla

$$\kappa = \psi \cdot \frac{\psi^{t_1} - 1}{\psi - 1}, \quad (9)$$

missä  $\kappa$  on kapitalisointikerroin,  $t_1$  on investoinnin pitoaika ja  $\psi$  on kuormituksen ja laskentakoron vaikutus laskennassa, joka voidaan laskea

$$\psi = \frac{1 + \left(\frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}}, \quad (10)$$

missä  $r$  on keskimääräinen kuormituksen kasvuprosentti ja  $p$  on korkoprosentti. (Heikkilä 2010: 21–22; Lakervi & Partanen 2008: 42.)

Muuntajan tyypin valinnalla on merkitystä jo ennen muuntajan asennusta. Öljyeristeistä apumuuntajaa käytettäessä pitää pohjatöitä tehtäessä ottaa huomioon laajempi öljyala, joten tarvitaan suurempi öljyallas muuntajan alle. Kuivan apumuuntajan tapauksessa tätä ei tarvitse ottaa huomioon. Öljymäärästä johtuen kuivamuuntajaa käyttämällä saa-

daan pienennettyä koko muuntajan palokuormaa. Muutenkin apumuuntajakokonaisuus vie vähemmän tilaa kun se toteutetaan säästökytketyllä kuivamuuntajalla kun verrataan ei-säästökytkettyyn öljymuuntajaan. Näin ollen muuntaja on mahdollista asentaa pienempään tilaan. Goudien ja Chattertonin (2002) mukaan normaalisti muuntajien huoltokustannukset ovat edulliset. Monet kuivamuuntajat kuitenkin vaativat säännöllistä puhdistamista, koska käämit ovat avoimena pölylle ja lialle. Käyttöympäristö määrää kuinka tiheästi kuivamuuntajaa täytyy puhdistaa. Tässä tapauksessa kuivamuuntaja on pölyltä suojattuna kotelon sisällä, mutta kotelon tuuletusaukoissa olevat suodattimet täytyy vaihtaa tai puhdistaa säännöllisesti, jotta ne eivät tukkeudu pölystä. Kuivamuuntajille ei kuitenkaan tarvitse tehdä ennaltaehkäisevää tai diagnostista ylläpitoa, toisin kuin öljyeristeisille muuntajille, joista otetaan öljynäytteitä.

Toisaalta mikäli apumuuntaja vaurioituu niin pahasti, että se pitää vaihtaa, niin kuiva apumuuntaja on huomattavasti helpompi vaihtaa. Siinä tapauksessa tarvitsee vain irrottaa pulteilla kiinnitetty kuivamuuntaja kotelostaan ja vaihtaa se uuteen. Vastaavasti öljyeristeisen apumuuntajan vaihto on paljon työläämpi operaatio. Koko apumuuntaja kokonaisuus pitää irrottaa päämuuntajasta, jonka jälkeen apumuuntajan ympärille rakennetut kotelot pitää irrottaa apumuuntajasta ja vasta sitten sen voi vaihtaa. Vaihdon jälkeen kaikki pitää kiinnittää uudelleen.

Häviökustannuksia laskettaessa täytyy häviösähkölle huomioida hinta. Sähköyhtiöt joutuvat ostamaan häviösähkösä sähköpörssistä, joten on järkevää käyttää laskelmissa sähkön pörssihintaa. Sähköpörssi Nordpoolin tilastojen mukaan vuosina 2007–2013 sähkön keskihinta vaihteli runsaasti. Tästä syystä käytetään laskelmissa näiden vuosien hinnan keskiarvoa, joka on 39,58 €/MWh. (Nordpool 2014, Väisänen 2012: 59.)

Häviökustannuksia laskettaessa tulee ottaa huomioon muuntajan käyttötunnit tyhjäkäynnillä ja kuormitettuna. Tyhjäkäyntihäviöt kuluvat koko ajan ja kuormitushäviöt vain kun muuntajaa kuormitetaan. Laskelmissa tarkastellaan apumuuntajien häviöitä siten, että apumuuntajia käytetään jatkuvasti 50 % kuormalla. Taulukossa 8 on esitetty valmistajien ilmoittamat nimelliset häviöt kuivalle ja aiemmin käytetylle öljyeristeiselle apumuuntajalle.

**Taulukko 8.** Valmistajien ilmoittamat 100 kVA:n tehoisten kuivan ja öljyeristeisen apumuuntajan häviöt (ABB 2013a).

Apumuuntaja- vaihtoehto	Tyhjäkäyntihäviöt (W)	Kuormitushäviöt (W)	Kokonaishäviöt (W)
kuivamuuntaja	250	700	950
öljyeristeinen muuntaja	320	1630	1950

Yhden vuoden aikana syntyvät häviökustannukset saadaan kertomalla häviöt käyttötunneilla, josta saadaan häviöenergian määrä, joka kerrotaan sähkön pörssihinnalla. Tyhjäkäyntihäviöiden kustannuksia laskettaessa voidaan ilmoitetut häviöt kertoa käyttötunneilla, joita tulee vuodessa 8760. Kuormitushäviöiden kustannuksia laskiessa tulee ottaa huomioon apumuuntajan kuormitusaste. 50 % kuormitus tarkoittaa sitä, että kuormitushäviöt ovat vain neljäsosan nimelliskuormalla syntyvistä kuormitushäviöistä. Taulukossa 9 on esitetty muuntajan käyttöiän aikana kertyvät häviöt ja niistä aiheutuvat kustannukset. 30 vuoden käyttöajalla ja 50 % kuormituksella kuivan apumuuntajan häviökustannukset ovat noin 42 % matalammat kuin öljyeristeisellä apumuuntajalla. Kuormituksen kasvaessa myös häviökustannusten ero kasvaa. Laskelmissa on oletettu, että kuormitus pysyy vakiona ja laskentakorkona on käytetty 0 %.

**Taulukko 9.** Apumuuntajien häviökustannukset muuntajan käyttöiän aikana 50 % kuormituksella.

Apumuunta- ja vaihtoehto	Tyhjä- käynti- häviöt (W)	Kuormitus- häviöt (W)	Häviökustannuk- set vuodessa (€)	Häviökustan- nukset 30 vuodessa (€)
Kuivamuun- taja	250	175	147,36	4420,69
Öljyeristeinen muuntaja	320	407,5	252,24	7567,18

Apumuuntajakokonaisuuden valmistuskustannukset ovat kuivamuuntajavaihtoehdolla 3980 € suuremmat kuin öljyeristeisen apumuuntajan tapauksessa. Hintaero kertyy kuivamuuntajan korkeammasta hinnasta ja kuivamuuntajan vaatimasta koteloinnista. Öljyeristeistä apumuuntajaa ei tarvitse erikseen koteloida, vaan siinä tapauksessa riittää omat kotelot sulakkeille ja kuormankytkimelle.

Vaikka kuivamuuntajalla toteutetun apumuuntajaratkaisun hankintahinta on korkeampi kuin vastaavan öljyeristeisellä apumuuntajalla toteutetun ratkaisun, niin ajan kuluessa häviökustannukset tasoittavat kokonaiskustannukset. Kun otetaan huomioon muita etuja, joita on vaikea rahallisesti arvioida, kääntyy kuivamuuntajaratkaisu paremmaksi vaihtoehdoksi. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi pienemmän öljyaltaan terve pohjätöissä, pienempi tilantarve sekä kuivamuuntajan vaihtamisen helppous mahdollisen rikkoutumisen jälkeen. Eli suuremmista valmistuskustannuksista huolimatta kuivamuuntajaratkaisu on kokonaisuudessaan edullisempi ratkaisu.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Esimerkkiasiakkaan vaatimukset täyttävä apumuuntajakokonaisuus saadaan toteutettua kuivamuuntajalla. Kotelointiratkaisu koostuu neljästä erillisestä kotelosta, joihin sijoitetaan sulakkeet, kuormankytkin, kuivamuuntaja ja viimeiseen sulakkeet asiakaslähdölle. Kaikki kotelot valmistetaan 1,5 mm paksusta ruostumattomasta teräksestä ja kiinnitetään taustalevyyn, jolloin kokonaisuudesta tulee tukeva ja sitä on mahdollista liikutella ennen paikalleen asentamista. Lisäksi kotelot kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksilla ja liitokset tiivistetään ulkoreunoilta korkkitiivisteellä. Apumuuntajakoteloon asennetaan kumiset tärinävaimentimet apumuuntajan kiinnityskohtiin. Jokaiseen koteloon asennetaan ilmanvaihtotulpat, jotta ilman kosteus ei tiivisty kotelon sisäpinnoille. Kaikki koteloiden sisäiset johdotukset voidaan tehdä valmiiksi jo kokoonpanovaiheessa. Muuntaajaan kiinnitettäessä kytketään vain päämuuntajalta tulevat kaapelit. Kaikki apumuuntajakokonaisuuteen liittyvät sähköiset komponentit vakioitiin kahdelle eri tehoiselle apumuuntajalle, joten niitä on jatkossa helppo käyttää suunnittelussa.

Apumuuntajakotelon lämpenemää tutkittiin simuloimalla ja tekemällä mittaukset koekentällä. Simulointimalliin rakennettiin yksinkertaistettu malli apumuuntajasta ja sitä suojaavasta kotelosta. Malliin määritettiin materiaalit, jäähdyttävän ilman lämpötila ja lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerroimen arvoa muutettiin arvosta  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  arvoon  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , koska se voidaan määrittää tarkasti vain kokeellisesti. Simulointituloksissa lämmönsiirtokerroimen arvon muutoksella on noin 1–2 celsius asteen vaikutus kotelon sisäpuolisen ilman keskilämpötilaan. Näin ollen ei ole suurta merkitystä kumpaa arvoa simuloinnissa käyttää. Simulointitulosten perusteella apumuuntajakotelo jäähtyy riittävästi pelkän vapaan ilmakierron avulla. Mittaustulokset kuitenkin osoittivat, että todellisuudessa kuivamuuntaja lämpenee huomattavasti enemmän. Odotettua suurempi lämpenemä aiheutuu pääasiassa tuuletusritilöissä olevista suodatinkankaista, jotka estävät tehokkaan ilman kierron. Tästä syystä kotelon ovesa olevaan tuuletusaukkoon asennetaan puhallin, joka imee jäähdyttävää ilmaa sisään koteloon. Kotelon sivuseinässä olevaan tuuletusritilään tuulettimen asentaminen on tilanpuutteen vuoksi erittäin hankalaa. Puhallinta ohjataan termostaatilla, joka asennetaan kuivamuuntajan jalkaan sille erikseen suunniteltuun kiinnitysosaan. Jännitteensyöttö tuulettimelle otetaan

päämuuntajan apujohtokotelosta, johon myös lisätään syötölle suojaus. Apumuuntajakotelon sisällä olevat kaapelit täytyy vaihtaa lämpöä kestäviin kaapeleihin.

Tuulettimen asentaminen apumuuntajakotelon oveen on ainoa keino, jolla kotelo saadaan jäähtymään riittävästi. Talviolosuhteissa tuuletinta tuskin tarvitaan, mutta koska tuuletinta ohjataan termostaatilla niin se lopettaa pyörimisen kun kotelon lämpötila ei ylitä termostaatille asetettua rajaa. Toisaalta kesällä tuuletin pyörii jatkuvasti. Tuulettimen käyttöikä on lyhyempi kuin muuntajan, joten tuuletin joudutaan jossain vaiheessa vaihtamaan. Tuulettimen rikkoutumisestakaan ei aiheudu ongelmaa, sillä apumuuntajassa on lämpötila-anturi, joka antaa hälytyssignaalin lämpötilan ollessa 135 °C ja laukaisusignaalin kun lämpötila saavuttaa 150 °C.

Simulointi- ja mittaustuloksissa näkyvän lämpenemäeron suurin aiheuttaja on tuuletusaukoissa olevat suodatinkankaat, jotka estävät suurimman osan vapaasta ilman kierrosta. Toinen syy on simulointimallissa, joka on monilta osin yksinkertaistettu, jotta laskenta sujuu nopeammin. Mallissa kuivamuuntaja on mallinnettu vain laatikolla, jonka pinnoille on määritetty lämmittäväksi tehoksi kuivamuuntajan häviöt. Yksinkertaistusta geometriasta johtuen simuloinnissa ilma pääsee virtaamaan paremmin kuivamuuntajan pinnoilla jäädyttäen sitä, jolloin simulointituloksissa esiintyy matalampia lämpötiloja. Simulointituloksista saadut lämpötilat ovat maksimilämpötila kotelossa ja kotelon sisäpuolisen ilman keskiarvo. Maksimilämpötila vastaa mittaustulosten lämpötilaa kuivamuuntajan sydämessä tai käämissä, joten ne ovat vertailtavissa keskenään. Sen sijaan kotelon sisäpuolisen ilman lämpötila mitattiin vain yhdestä pisteestä, joka oli noin kymmenen senttimetrin korkeudella kuivamuuntajan yläpuolella, joten ne eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Kun simulointimalliin lisätään sisään virtaavan ilman määräksi tuulettimen nimellispuhallusnopeus, saadaan simulointi- ja mittaustulokset vastaamaan paremmin toisiaan. Silti tuloksissa on vielä simulointimallin epätarkkuudesta johtuvaa heittoa, mutta tulokset ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa.

Simulointimallia olisi mahdollista parantaa siten, että ottaa paremmin huomioon kuivamuuntajan todellisen geometrian. Tällöin kuivamuuntajan käämit tulisi mallintaa pystysuuntaisina sylintereinä ja ikeet sekä puristusalkut tulisi mallintaa palkkeina. Näille osille täytyy vielä määrittää materiaalit, jotta niiden ominaisuudet olisivat mahdolli-

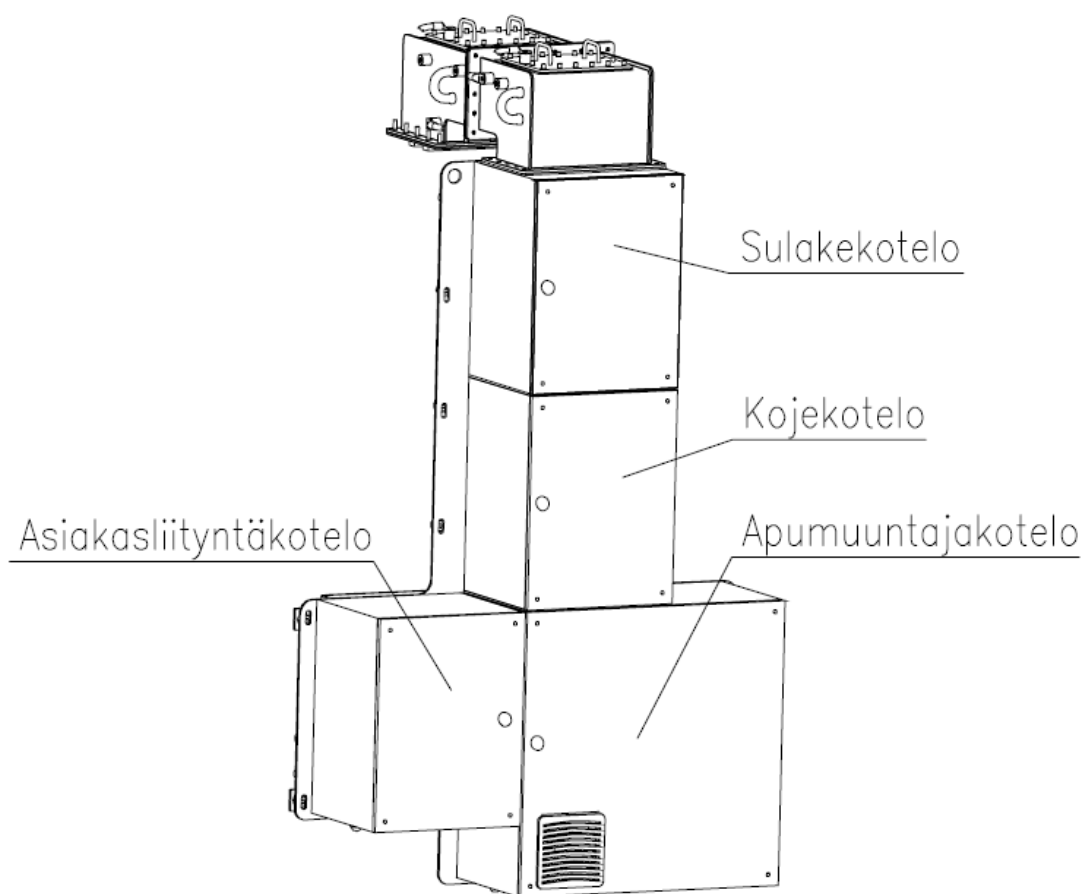
simman todenmukaiset. Tämä toisaalta pidentää simulointiaikaa huomattavasti, mutta jos halutaan simuloida tarkasti, niin riittävä tarkkuus on välttämätöntä.

Elinkaarikustannuksia vertailtaessa selvisi, että apumuuntajaratkaisun toteuttaminen säästökytketyllä kuivamuuntajalla tulee kalliimmaksi kuin öljyeristeisellä muuntajalla. Nämä valmistusvaiheessa syntyvät kustannuserot tasoittuvat kuitenkin käytön aikana. Kuivamuuntajaratkaisulla saavutetaan huomattavasti pienemmät häviöt. Häviösähkölle käytettiin laskelmissa sähköpörssi Nordpoolin tilastoista saatavaa sähkön keskihintaa, koska sähkön hinta on heilahdellut viime vuosina runsaasti. Tilastojen mukaan vuosina 2007–2013 sähkön keskihinta oli 39,58 €/MWh. Muuntajan käyttöäksi arvioitiin 30 vuotta ja kuormitusasteeksi 50 %. Näillä arvoilla laskettuna apumuuntajakokonaisuuden elinkaarikustannukset tasaantuivat, joten kuivamuuntajaratkaisu ei todellisuudessa ole muuntajan omistajalle sen kalliimpi kuin öljyeristeisellä muuntajalla toteutettu ratkaisu. Muuntajan kuormitusasteen kasvaessa häviökustannuksista aiheutuvat erot vielä kasvavat kuivamuuntajaratkaisun hyväksi. Kuivamuuntajalla saavutetaan myös muita etuja, joiden mittaaminen rahassa on hankalaa, kuten öljyttömyydestä aiheutuva pienempi palokuorma. Toinen öljyttömyyden etu on pienempi öljyala, jolloin muuntajan alla ei tarvitse olla niin laajaa öljyallasta. Näiden laskelmien perusteella kuivamuuntajavaihtoehto on muuntajan omistajalle aivan yhtä hyvä vaihtoehto kuin öljyeristeinen apumuuntaja. Toisaalta öljymuuntajatoteutus on osoittautunut pitkän kokemuksen perusteella luotettavaksi ratkaisuksi.

## 7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia sähköasemamuuntajan apusähköistyksen toteuttamista kuivamuuntajalla öljyeristeisen apumuuntajan sijaan. Kuivamuuntaja koteloidaan, jotta se on suojassa pölyltä, vedeltä ja lumelta. Tässä työssä tarkasteltiin kahden eri tehoisen kuivamuuntajan, 63 kVA ja 100 kVA, kotelointia. Kyseiset kuivamuuntajat ovat ulkoisilta mitoiltaan niin lähellä toisiaan, että ne on mahdollista sijoittaa samankokoisiin koteloihin. Apumuuntajaratkaisuun tarvittavat komponentit ja kotelot oli tarkoitus vakioida siten, että samaa vakioratkaisua voidaan käyttää myöhemmin vastaavanlaisissa projekteissa, joissa asiakas haluaa toteuttaa apusähköistyksen kuivamuuntajalla. Vakioratkaisulla saadaan nopeutettua suunnittelua seuraavissa samankaltaisissa projekteissa. Koteloinnissa ja komponenttien valinnassa otettiin huomioon yleiset sähköisten komponenttien mitoitustavat sekä asiakkaan esittämät vaatimukset kyseisiin asioihin.

Työn tuloksena syntyi seuraavanlainen kokonaisuus. Kotelointiratkaisu koostuu neljästä erillisestä kotelosta, joihin sijoitetaan sulakkeet, kuormankytkin, kuivamuuntaja ja viimeiseen sulakkeet asiakaslähdölle. Kaikki kotelot valmistetaan 1,5 mm paksusta ruostumattomasta teräksestä ja kiinnitetään taustalevyyn, jolloin kokonaisuudesta tulee tukeva ja sitä on mahdollista liikutella ennen paikalleen asentamista. Lisäksi kotelot kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksilla ja liitokset tiivistetään ulkoreunoilta korkkitiivisteellä. Koteloinnista on kahta eri versiota, toisessa asiakasliityntäkotelo on sijoitettu apumuuntajakotelon vasemmalle puolelle, kuten kuvassa 23, ja toisessa oikealle puolelle. Apumuuntajakoteloinnille tulee käytettävän kuivamuuntajan tehosta riippuen painoa noin 210 kg tai 265 kg. Apumuuntajakoteloon asennetaan kumiset tärinänvaimentimet apumuuntajan kiinnityskohtiin. Jokaiseen koteloon asennetaan ilmanvaihtotulpat, jotta ilman kosteus ei tiivisty kotelon sisäpinnoille. Kaikki koteloiden sisäiset johdotukset voidaan tehdä valmiiksi jo kokoonpanovaiheessa. Muuntajaan kiinnitettäessä kytketään vain päämuuntajalta tulevat kaapelit. Kaikki apumuuntajakokonaisuuteen liittyvät sähköiset komponentit vakioitiin kahdelle eri tehoiselle apumuuntajalle, joten niitä on jatkossa nopea käyttää suunnittelussa. Taulukkoon 10 on kerätty tiedot vakioiduista komponenteista eri tehoisille apumuuntajavaihtoehdoille. Kotelokokonaisuuteen liittyvät kiinnityskomponentit ovat niin yleisiä, että niitä ei tarvitse erikseen vakioida.



**Kuva 23.** Apumuuntajan kotelointiratkaisu.

**Taulukko 10.** Eri tehoisille apumuuntajavaihtoehdoille vakioidut komponentit.

Komponentti	Valmistaja	Lajimerkki / 63 kVA:n muuntajalle	Lajimerkki / 100 kVA:n muuntajalle
Sulakkeet apumuuntajan suojaukseen	ABB	OFAF00H160	OFAF2H315
Kuormankytkin	ABB	OT160EV03WP	OT315E03WP
Varokeytkin	Wöhner	Quadron crosslink-breaker no.33200	Quadron crosslinkbreaker no.33202
Sulakkeet asiakaslähdön suojaukseen	ABB	OFAA00GG80 tai OFAF00H80	OFAF00H125
Varokeytkin asiakaslähdön suojaukseen	Wöhner	Quadron crosslink-breaker no.33200	Quadron crosslinkbreaker no.33200
Kaapeli	Draka	MKEM 90 35	MKEM 90 70

Apumuuntajan jäähtymistä tutkittiin käytännön mittauksilla muuntajan rutiinikokeiden yhteydessä sekä simuloimalla Comsol multiphysics -ohjelmalla. Mittaustuloksia verrattiin simulointituloksiin, jotta varmistutaan siitä, että simulointimalli antaa riittävän todennukaisia tuloksia. Simulointi- ja mittaustulosten pohjalta tarkasteltiin riittääkö ilman vapaa kierto jäädyttämään apumuuntajakoteloa tarvittavan määrän vai tarvitaanko tuuletusrilöihin lisäksi puhaltimet.

Simuloinnissa apumuuntaja mallinnettiin yksinkertaisesti vain laatikkona kotelon sisälle. Materiaalit ja muut parametrit määritettiin niin, että ne vastaisivat parhaiten todellisuutta. Apumuuntajaa mallintavan laatikon seinät määritettiin tuottamaan lämpöä kuivamuuntajan häviöiden verran. Apumuuntajan ympärillä olevaan koteloon mallinnettiin tuuletusaukot siten, että ne kuvaavat ritilää, joka peittäisi puolet aukon pinta-alasta. Simulointeja suoritetaan kahdella eri lämmönsiirtokertoimen arvolla koska tarkka lämmönsiirtokertoimen arvon määrittäminen on hankalaa ja se pitäisi tehdä kokeellisesti.. Arvoina käytettiin  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , koska eri lähteistä saatujen tietojen perusteella tämän kaltaisissa tilanteissa se on tässä suuruusluokassa. Lisäksi simuloinnit suoritettiin eri ulkolämpötilan arvoilla, käytettävät lämpötilat olivat  $-20$ ,  $-10$ ,  $0$ ,  $10$ ,  $20$  ja  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Näin saadaan katettua pohjoismaiset eri vuodenaikojen tyypilliset ulkolämpötilat.  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  otettiin mukana sen takia, että saatiin tutkittua kuivamuuntajalle valmistajan ilmoittaman ylimmän käyttölämpötilan tilanne. Simulointituloksina saatiin kotelon sisäpuolisen ilman keskilämpötila ja kotelon maksimilämpötila, joka vastaa kuivamuuntajan sydämen lämpötilaa, sekä ilman virtausnopeus kotelon eri osissa. Simulointitulosten perusteella voitiin todeta, että apumuuntajakotelo jäähtyy riittävästi pelkän vapaan ilmakehän avulla, joten tuulettimen asentamiselle ei ole tarvetta. Simulointituloksista todettiin myös, että lämmönsiirtokertoimen arvon muutoksella on hyvin pieni vaikutus kotelon sisäpuolisen ilman lämpötilaan.

Lämpenemäkokeessa apumuuntajakoteloon asennettiin kolme optista kuitua, joilla mitattiin lämpötilaa kuivamuuntajan sydämessä, käämissä ja ilmassa noin kymmen senttimetrin korkeudella kuivamuuntajasta. Optiset kuidut kytkettiin mittalaitteeseen, joka kytkettiin tietokoneeseen. Näin apumuuntajakotelon lämpenemistä voitiin seurata reaaliaikaisesti. Lämpenemäkokeen ajan kotelossa olevaa apumuuntajaa kuormitettiin ni-

mellisvirralla niin kauan kunnes lämpötilat tasaantuvat. Lämpenemäkokeen perusteella voitiin todeta, että apumuuntajakotelon jäähtymiseen ei riitä pelkkä ilman vapaa kierto, vaan kotelo lämpenee liikaa. Apumuuntajakotelossa ilman lämpötila tasaantuu noin 108 °C:een ja kuivamuuntajan sydämen lämpötila päätyy 139 °C:een. Jäähdytyksen parantamiseksi apumuuntajakotelon ovesa olevaan tuuletusritilään lisättiin saman valmistajan tuuletin. Tuulettimen lisäyksen jälkeen lämpenemäkoetta suoritettiin uudelleen. Tuulettimen lisäyksen jälkeen apumuuntajakotelon lämpenemä saadaan pidettyä sopivalla tasolla.

Liian suuren lämpenemän vuoksi apumuuntajakotelon ovesa olevaan tuuletusritilään päätettiin asentaa tuuletin, koska kotelon sisällä olevia komponentteja ei ole suunniteltu kestävänsä näin korkeita lämpötiloja. Tuuletin itsessään oli helppo asentaa paikalleen, koska se on samaa sarjaa tuuletusritilän kanssa, joten sen voitiin vain napsauttaa paikalleen. Tuuletin asennettiin oveen, koska siinä sille on paremmin tilaa. Tuuletin olisi ollut mahdollista asentaa myös kotelon sivuseinässä olevaan tuuletusritilään, mutta apumuuntajakotelossa ei ole riittävästi tilaa sillä kohdalla. Oveen asennettuna tuuletin imee jäähdyttävää ilmaa koteloon ja siten jäähdyttää tehokkaammin kuin sivuseinään kiinnitetty, kuumaa ilmaa ulospäin puhaltava tuuletin. Ovesa ilmaa sisään imevä tuuletin myös jäähtyy paremmin ja siten kestää käyttöä pidempään. Suuremman työn aiheutti jännitteen syötön, tuuletinta ohjaavan termostaatin kiinnityksen suunnittelu ja toteutus sekä kotelon sisäpuolisen kaapeloinnin vaihto kuumaan kestävänsä kaapeliin. Termostaatin kiinnitystä varten suunniteltiin siihen sopiva kulmatuki, joka kiinnitettiin apumuuntajan jalan kiinnityspulttiin. Kulmatukeen kiinnitettiin ruuveilla pala asennuskiskoa, johon termostaatti asennettiin. Apumuuntajakotelon pohjaan asennettiin kaapeliläpivienti tuulettimen syöttöjännitteen kaapelia varten. Jännitteen syöttö otettiin muuntajan apujohtokotelosta, jossa syötölle on oma johdonsuojakatkaisija. Kotelon pohjan läpiviennistä kaapeli kytketään apumuuntajan jalkaan kiinnitettyyn termostaattiin, josta syöttö johdetaan oveen asennettuun tuulettimeen.

Vertaamalla simulointituloksia mittaustuloksiin huomattiin, että ne eivät vastaa toisiaan. Simulointitulosten perusteella kotelo ei tarvitsisi ylimääräistä jäähdytystä. Mittaustulokset kuitenkin osoittavat tuulettimen olevan ehdoton edellytys kotelon riittävänsä jäähty-

miselle. Tuulettimen avulla kotelon sisälämpötila tasaantui mittauksen aikana noin 45 °C:een ja kuivamuuntajan sydämen lämpötila noin 85 °C:een. Tuulettimen lisäksi otetaan huomioon myös simuloinnissa määrittämällä apumuuntajakotelon oven tuuletusaukolle tuulettimen aiheuttama ilmavirta kotelon sisään. Näin saadaan simuloitua tuulettimen vaikutusta jäähdytysilman kiertoon apumuuntajakotelossa. Simulointimaliin lisättiin alkutiedoksi tuulettimen aiheuttama ilmavirta kotelon sisään. Tällä muutoksella simulointituloksissa kaikkein kuumin kohta aivan apumuuntajan yläpuolella on 58,6 °C ja kotelon sisäpuolisen ilman keskilämpötila on 38,1 °C. Nyt simulointi- ja mitaustulokset ovat jo jotenkin vertailukelpoiset.

Työssä tehtiin myös elinkaarikustannusten vertailu eri apumuuntajaratkaisujen välillä. IEC 60300-3-3 standardissa tuotteen elinkaarelle määritetään seuraavat vaiheet: konseptointi ja määrittely, suunnittelu ja kehitys, valmistus, asennus, käyttö ja ylläpito ja viimeisenä tuotteen hävittäminen. Näistä kuudesta vaiheesta aiheutuvat kustannukset, eli elinkaarikustannukset voidaan jakaa kolmeen osaan: hankintakustannukset, käyttö- ja huoltokustannukset sekä käytöstä poistamisesta aiheutuvat kustannukset.

Työssä verrattiin öljyeristeisellä ja kuivalla apumuuntajalla toteutettujen apusähköistysratkaisujen elinkaarikustannuksia. Apumuuntajakokonaisuuden valmistuskustannukset olivat kuivamuuntajavaihtoehdolla 3980 € suuremmat kuin öljyeristeisen apumuuntajan tapauksessa. Hintaero selittyi kuivamuuntajan korkeammasta hinnasta ja kuivamuuntajan koteloinnista. Öljyeristeistä apumuuntajaa ei tarvitse erikseen koteloida, vaan siinä tapauksessa riittää omat kotelot sulakkeille ja kuormankytkimelle. Häviökustannusten laskemiseksi häviösähkölle tarvitaan hinta. Tässä työssä tehdyissä laskelmissa on käytetty sähköpörssi Nordpoolin tilastoista saatua vuosien 2007–2013 sähkön keskihintaa, joka oli 39,58 €/MWh. Keskihintaa käytettiin, koska tilastoissa oli suuria hintaeroja eri vuosien välillä. Häviösähkön hinnan lisäksi häviökustannuksia laskettaessa tulee ottaa huomioon muuntajan käyttötunnit tyhjäkäynnillä ja kuormitettuna. Tyhjäkäyntihäviöt ilmenevät koko ajan ja kuormitushäviöt vain muuntajan ollessa kuormitettuna. Laskelmissa tarkasteltiin apumuuntajien häviöitä siten, että muuntajan käyttöikä oletettiin 30 vuodeksi ja muuntajia kuormitetaan jatkuvasti 50 % kuormalla. Laskelmista saadut tulokset on esitetty taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Tarkasteltujen 100 kVA:n tehoisten apumuuntajien häviökustannukset muuntajan käyttöiän aikana 50 % kuormituksella.

<b>Apumuunta- ja vaihtoehto</b>	<b>Tyhjä- käynti- häviöt (W)</b>	<b>Kuormitus- häviöt (W)</b>	<b>Häviökustannuk- set vuodessa (€)</b>	<b>Häviökustan- nukset 30 vuo- dessa (€)</b>
Kuivamuun- taja	250	175	147,36	4420,69
Öljyeristeinen muuntaja	320	407,5	252,24	7567,18

Vaikka kuivamuuntajalla toteutetun apumuuntajaratkaisun hankintahinta oli korkeampi kuin vastaavan öljyeristeisellä apumuuntajalla toteutetun ratkaisun, niin ajan kuluessa häviökustannukset tasoittivat kokonaiskustannukset. Kun otetaan huomioon muita etuja, joita on vaikea rahallisesti arvioida, kääntyy kuivamuuntajaratkaisu paremmaksi vaihtoehdoksi. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi pienemmän öljyaltaan terve pohjatöissä, pienempi tilantarve sekä kuivamuuntajan vaihtamisen helppous mahdollisen rikkoutumisen jälkeen. Eli suuremmista valmistuskustannuksista huolimatta kuivamuuntajaratkaisu on varteenotettava vaihtoehto öljyeristeiselle apumuuntajalle muuntajan omistajan näkökulmasta.

## LÄHDELUETTELO

- Aalto yliopisto (2013) *Kemian laitetekniikka 1 osa 3 Lämmönsiirto*. Luentomateriaali  
Saatavissa: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ke-42.1700/materiaali>.
- ABB (2007) *Muuntajatekniikan perusteet 1LFI000001 – rev A*. Vaasa: ABB Oy,  
Transformers. Sisäinen opetusmateriaali. 36 s.
- ABB (2012) *Kytkimet & kuormakytkimet*, Esite OT\_OETL1FI12-10 Saatavissa:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/85750550ba727f4cc1257a94003810df/\\$file/1SCC301017C1801.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/85750550ba727f4cc1257a94003810df/$file/1SCC301017C1801.pdf)
- ABB (2013a) Otso Takala 15.12.2013. Sisäinen tiedoksianto. Julkaisematon.
- ABB (2013b). *Transformer Handbook* 3. Painos. 231 s.
- ABB Strömberg (1990) *Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja* 8. painos. Vaasa 586 s.
- Amoiralis, Eleftherios I., Marina A. Tsili, Pavlos S. Georgilakis & Antonios G. Kladas  
(2007). Energy efficient transformer selection implementing life cycle costs and  
environmental externalities. *Electrical Power Quality and Utilisation. International  
Conference. 2007 Barcelona, October 7–10*.
- Aro, Martti, Jarmo Elovaara, Matti Karttunen, Kirsi Nousiainen & Veikko Palva  
(2011) *Suurjännitetekniikka* 3. painos Jyväskylä: Otatieto 520 s.
- Bayliss, Colin & Brian Hardy (2007) *Transmission and distribution electrical engi-  
neering* 3. painos Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann 1010 s.
- Copper Development Assosiation Inc. (2014) *Transformer life cycle cost (Total own-  
ing cost)* Saatavissa: [http://www.copper.org/environment/sustainable-  
energy/transformers/education/trans\\_life\\_cycle.html](http://www.copper.org/environment/sustainable-energy/transformers/education/trans_life_cycle.html)

- Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla (2011) *Sähköverkot 2*. 1. painos Helsinki: Otatiето 551 s.
- Fagerholm, Nils-Erik (1986). *Termodynamiikka* 1. painos Tampere: Tammer-Paino 382 s.
- Goudie, James L. & Wayne J. Chatterton (2002). Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002 Boston, MA USA, April 7–10*.
- Heathcote, Martin J. (2013) *J&P Transformer book*. 13. painos Unkari: Elsevier Ltd 974 s.
- Heikkilä, Paula (2010). *Sähköverkon kunnossapitojärjestelmän kehitys*. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötökniiikan koulutusohjelma. Diplomityö. 61 s.
- IEC 60300-3-3 (2004) Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing. International standard. 2<sup>nd</sup> Edition.
- Lakervi, Erkki & Jarmo Partanen (2008) *Sähkönjakelutekniiikka*. 1. painos Helsinki: Hakapaino 285 s.
- Lampinen, Markku J. & Voitto W. Kotiaho (2012) *Johdatusta lämmönsiirto-oppiin* Luentomateriaali. Saatavissa: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ene-39.2001/materiaali>
- Lampinen, Markku J. (2010) *Termodynamiikan perusteet* 5. painos Helsinki: Otatiето 182 s.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2014). *Terminen laitesuunnittelu - Ilmajäähditys vapaalla konvektiolla ja säteilemällä*. Luento 5 Luentomateriaali Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0100/luennot>

Luomi, Jorma (1992). Sähkövoimatekniikka. Teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Opintojakson Svt-17.141 luennot. 169 s.

Motiva (2013) *Huomioi elinkaarikustannukset*. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/materiaalitehokkuus/materiaalitehokkuuden\\_edistaminen\\_kunnissa/hankinnat\\_ja\\_osto-osaamisen\\_kehittaminen/huomioi\\_elinkaarikustannukset](http://www.motiva.fi/toimialueet/materiaalitehokkuus/materiaalitehokkuuden_edistaminen_kunnissa/hankinnat_ja_osto-osaamisen_kehittaminen/huomioi_elinkaarikustannukset)

Nordpool (2014) *Elspot monthly prices from 2000*. Saatavissa: <http://www.nordpool-spot.com/Market-data1/Downloads/Historical-Elspot-prices/Monthly-Elspot-prices/>

Pöyhönen, Otso W. (1975) *Sähkötekniikan käsikirja* 6. painos Helsinki: Tammi 673 s.

Prysmiangroup (2014). *MKEM 90 450/750 V. Datasheet*. Saatavissa: [http://fi.prysmiangroup.com/en/business\\_markets/markets/ti/downloads/datasheets/MKEM90\\_450\\_750V.pdf](http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/ti/downloads/datasheets/MKEM90_450_750V.pdf)

Ramentor (2014) *Elinkaarikustannukset (Life Cycle Costs, LCC)*. Saatavissa: <http://www.ramentor.com/etusivu/teoria/elinkaarikustannukset/>

Synflex (2014). *Single core conductor BETAtherm 145 UL*. Datasheet. Saatavissa: <http://www.synflex.com/en/produkte/?id=11&areaid=litzen>

Väisänen, Pasi (2012). *Loistehon kompensointi jakeluverkkoyhtiössä*. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 106 s.

van Ark, Jan (2013) Wöhner. Sähköpostikeskustelu, marraskuu 2013.

Wagner, Walter. (1994) *Lämmönsiirto* 2. Uudistetusta saksankielisestä painoksesta suomentanut Osmo Ranta. Helsinki: Painatuskeskus Oy 210 s.

Winders, John J. Jr. (2002) *Power transformers - Principles and applications* 2. painos. New York: Marcel Dekker. 283 s.