



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Tuukka Toivonen

Muuntajatyypin paloluokat ja palokuormat

Öljy-, esteri- ja kuivamuuntajan eroavaisuuksia

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Kandidaatintutkinto
Sähkötekniikka

Vaasa 2024

VAASAN YLIOPISTO**Akateeminen yksikkö**

| | | |
|--------------------------|---|----------------------|
| Tekijä: | Tuukka Toivonen | |
| Tutkielman nimi: | Muuntajatyypien paloluokat ja palokuormat: Öljy-, esteri- ja kuivamuuntajan eroavaisuuksia | |
| Tutkinto: | Tekniikan kandidaatti | |
| Oppiaine: | Sähkö- ja energiatekniikka | |
| Työn ohjaajat: | Kimmo Kauhaniemi Patrik Ågren Timo Tuomisto Esa Virtanen | |
| Valmistumisvuosi: | 2024 | Sivumäärä: 55 |

TIIVISTELMÄ:

Tutkielman tarkoituksena on vertailla eri muuntajatyypien (öljy-, esteri- ja kuivamuuntaja) paloluokkia ja palokuormia. Vertailussa otetaan huomioon palo-ominaisuuksien lisäksi rahalliset- ja ympäristövaikutukset. Työn tarkoituksena on selkeyttää muuntajatyypien eroavaisuuksia paloturvallisuuden näkökulmasta Suomessa.

Muuntajatyypien vertailulla luodaan kuva Hitachi Energy Finland Oy:n Transformers yksikön eri osastoille muuntajatyypien paloturvallisuudesta. Tämä helpottaa kauppatilanteessa esittämään eri muuntajatyypien hyötyjä toisiinsa nähden. Tämän kandidaatintyön on tarkoitus toimia esiohjeistavana materiaalina kauppa- ja vakuutusilanteissa.

Tutkielman teoriaosassa tuodaan esille muuntajien perusteknillisiä ratkaisuja, sekä niiden paloteknillisiä eroavaisuuksia. Perusteknillisesti muuntajatyypit eroavat toisistaan mm. jäähdytysratkaisujen ja säiliön osalta. Palokuormien ja paloluokkien selvityksessä käytetään kirjallisuusmateriaalia, joka perustuu aikaisempiin standardeihin ja tutkimuksiin. Lisäksi tutkimusaineisto sisältää erään muuntaja-aseman lämpökuormalaskennan.

Tutkimusaineiston vertailun pohjalta saatiin selkeä kuva muuntajatyypien hinta- ja kustannuslaskennan eroista. Tutkimusaineistoa jouduttiin rajaamaan, jotta muuntajatyypeille sopiva yhteinen tehotaso löytyi. Midel 7131 osottautui tutkimuksessa parhaimmaksi vaihtoehdoksi neljästä eri muuntajatyypistä, kun vertailtiin muuntajan ja muuntaja-aseman todellisia kokonaiskustannuksia. Tutkimustulos pysyi samana häviöarvostusluokasta riippumatta. Tutkimuksen alustava hypoteesi Midel 7131:en paloturvallisuusluokan hyödyistä kustannuslaskennassa osoittautui oikeaksi.

AVAINSANAT: Muuntajat, paloluokka, palokuorma, vertailu

Sisällys

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 7 |
| 2 | Muuntajatyypit | 8 |
| 2.1 | Öljymuuntaja ja MIDEL 7131-muuntaja | 8 |
| 2.1.1 | Säiliön rakenne | 8 |
| 2.1.2 | Eristysnesteet | 9 |
| 2.1.3 | Jäähdytys | 12 |
| 2.1.4 | Paisuntasäiliö | 15 |
| 2.1.5 | Hermeettinensäiliö | 15 |
| 2.2 | Tyhjiövalettu- ja RESIBLOC® hartsityyppinen kuivamuuntaja | 16 |
| 2.2.1 | Ulkosuojan rakenne | 16 |
| 2.2.2 | Jäähdytys | 16 |
| 3 | Standardien mukaiset paloluokat, palokuormat ja suojaukset | 18 |
| 3.1 | Paloluokat | 18 |
| 3.2 | Palokuormat | 21 |
| 3.3 | Paloluokitukset Suomessa | 22 |
| 3.4 | Suojaukset | 24 |
| 3.4.1 | Muuntajan perussuojaukset | 24 |
| 3.4.2 | Paloseinät | 25 |
| 4 | Aseman perustamis- ja käyttökustannusten vertailu | 28 |
| 4.1 | Laskentakaavat | 29 |
| 4.1.1 | Hinta- ja kustannuslaskenta | 29 |
| 4.1.2 | Lämpökuormalaskenta | 29 |
| 4.2 | Tulokset | 30 |
| 4.2.1 | Muuntaja-aseman käyttökustannusvertailu | 30 |
| 4.2.2 | Muuntaja-aseman lämpökuormalaskenta | 34 |
| 5 | Yhteenveto | 35 |
| 6 | Lähteet | 36 |
| | Liitteet | 38 |

| | |
|---|----|
| Liite 1. P_0 - häviöarvostus 7500 €/kW ja P_k -häviöarvostus 2500 €/kW | 38 |
| Liite 2. P_0 - häviöarvostus 5000 €/kW ja P_k -häviöarvostus 5000 €/kW | 44 |
| Liite 3. P_0 - häviöarvostus 10000 €/kW ja P_k -häviöarvostus 1500 €/kW | 50 |

Kuvat

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Biologisen hajoamisnopeuksien vertailu (Martin, R., 2010, s. 18) | 11 |
| Kuva 2. Öljyn liikkuminen muuntajien ja radiaattorien välillä (ABB, 2007, s. 9) | 14 |
| Kuva 3. Aaltolevysäiliö muuntaja | 14 |
| Kuva 4. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (kk) | 32 |
| Kuva 5. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (ps) | 32 |
| Kuva 6. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (sp) | 32 |
| Kuva 7. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (kk) | 33 |
| Kuva 8. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (ps) | 33 |
| Kuva 9. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (sp) | 33 |
| Kuva 10. Lämpökuorma tehotasoittain | 34 |

Taulukot

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Öljyjen fysikaalisia arvoja ammattillisten julkaisujen perusteella | 11 |
| Taulukko 2. Öljyjen fysikaalisia arvoja ammattillisten julkaisujen perusteella | 12 |
| Taulukko 3. Kirjainmerkintä öljytuotteille tai vastaavien luokan tuotteille. | 18 |
| Taulukko 4. Kirjainmerkintä tuotteen pääasiallinen käyttötarkoitukskohteelle. | 19 |
| Taulukko 5. Kirjainmerkintä antioksidanttilisäaineiden mahdollisen läsnäolosta | 19 |
| Taulukko 6. Kirjainmerkintä syttymispisteen mukaan. | 20 |
| Taulukko 7. Kirjainmerkintä leimahduspiste mukaan. | 20 |
| Taulukko 8. Lämpöarvot | 21 |
| Taulukko 9. Ympäristöministeriön E1 mukaisia rakennusteknisiä vaatimuksia paloluokittain (Ympäristöministeriö, 2011, s. 10) | 23 |
| Taulukko 10. Muuntajien sisäasennukset suljetuilla sähkökäyttöalueilla (IEC Standard No. 61936-1, 2021, s. 78) | 27 |
| Taulukko 11. Käytetyt lyhenteet kuvissa 9 ja 10, sekä taulukoissa 12-29 | 30 |
| Taulukko 12. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (kk) | 38 |
| Taulukko 13. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (kk) | 39 |
| Taulukko 14. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (kk) | 40 |

| | |
|---|----|
| Taulukko 15. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (kk) | 41 |
| Taulukko 16. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (kk) | 42 |
| Taulukko 17. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (kk) | 43 |
| Taulukko 18. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (ps) | 44 |
| Taulukko 19. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (ps) | 45 |
| Taulukko 20. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (ps) | 46 |
| Taulukko 21. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (ps) | 47 |
| Taulukko 22. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (ps) | 48 |
| Taulukko 23. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (ps) | 49 |
| Taulukko 24. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (sp) | 50 |
| Taulukko 25. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (sp) | 51 |
| Taulukko 26. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (sp) | 52 |
| Taulukko 27. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (sp) | 53 |
| Taulukko 28. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (sp) | 54 |
| Taulukko 29. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (sp) | 55 |

1 Johdanto

Tämä kandidaatintyö sai alkunsa Hitachi Energy Finland Oy:n tarpeesta saada lisää tietoa erilaisten muuntajatyypin paloturvallisuuden liittyvistä vaatimuksista Suomessa. Tutkimusta tehdessäni olen ollut yhtiön palveluksessa viisi vuotta. Tulevaisuudessa ekologisuus astuu yhä enemmän määräävään asemaan muuntajatyypin valittaessa. Ekologisuuden lisäksi erilaisten muuntajatyypin paloturvallisuus voi myös parantua.

Tässä työssä vertaillaan neljän eri muuntajatyypin ominaisuuksia. Muuntajista tuodaan esille tekniset ratkaisut, paloturvallisuuden vaikuttavat tekijät ja kustannusten jakautuminen muuntajatyypittain.

Teknisten ominaisuuksien vertailussa kiinnitetään huomiota muuntajien ulkoisiin ja sisäisiin eroavaisuuksiin esittelemällä muuntajien erilaisia rakenteita ja käyttötarkoituksia. Muuntajien paloturvallisuutta ja palosuojausta käydään työssä läpi standardien ja esimerkkien avulla. Tästä aiheesta esitetään myös laskennallista vertailua työn loppupuolella. Työn loppupuolella käydään läpi laskennallisia tuloksia liittyen muuntajien kustannushankintaan. Tässä otetaan myös huomioon muuntajien paloturvallisuuden liittyvät määräykset.

Eri tehotasoilta tutkittavana on yhteensä 24 muuntajan tiedot. Tehotaso on määritelty niin, että tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailtavissa muuntajatyypistä riippumatta. Tehotasoa tutkitaan välillä 630-2000 kVA.

Tehotasolla pyritään rajamaan tarkasteltavien muuntajien määrää järkevälle tehotasoalueelle. Kyseinen alue vastaa Suomen jakeluverkossa toimivien muuntajien tehotasoa.

Työssä tavoitteena on vertailun kautta löytää kustannustehokas muuntajatyypin paloturvallisuus huomioiden.

2 Muuntajatyypit

Tässä työssä käydään läpi neljä erilaista jakelumuuntajatyyppeä, joita ovat öljymuuntaja, MIDEL 7131-muuntaja, tyhjiövalettu hartsityyppinen kuivamuuntaja ja RESIBLOC®-hartsityyppinen kuivamuuntaja. Työssä tutkittavat muuntajat ovat kolmivaiheisia sydäntyyppimuuntajia. Muuntajat sisältävät aktiiviosan, joka koostuu rautasydäimestä ja kolmivaihekäämityksestä. Käämimateriaalina toimii kupari tai alumiini. Muuntajan aktiiviosaa suojaa säiliö tai kaappi, joka ympäröi muuntajan aktiiviosaa. Eroavaisuudet muuntajatyypeissä liittyvät säiliön rakenteeseen, eristysaineisiin ja jäähdytyksen toteutukseen.

2.1 Öljymuuntaja ja MIDEL 7131-muuntaja

2.1.1 Säiliön rakenne

Säiliön tehtävänä on toimia muuntajan kantavana runkona, öljysäiliönä ja jäähdyttimenä. Sen on kestävä ulkoilman ympäristörasitukset ja oltava öljytiivis. Siinä on myös oltava riittävästi jäähdytuspinta-alaa. Muuntajasäiliöitä on kahdenlaisia; aaltolevysäiliö ja radiaattorisäiliö.

Aaltolevysäiliön seinämät tehdään tyyppillisesti 1,25 mm teräslevystä (ABB, 2007, s. 25). Teräslevyt aallotetaan siihen tarkoitetulla erikoiskoneella. Aaltolevysäiliö voi olla hermeettinen tai paisuntasäiliöllinen. Hermeettisessä aaltolevysäiliössä öljylle ei ole erityistä tilaa lämpölaajenemiselle toisin kuin paisuntasäiliöllisessä ratkaisussa. Hermeettisessä säiliössä aaltoelementit on suunniteltu niin että öljyn lämpölaajenemisen yhteydessä ne joustavat tarvittaessa. Aaltolevysäiliölliset muuntajat ovat usein teholtaan pienempiä kuin radiaattorilliset säiliöt. Hermeettiset aaltolevysäiliölliset muuntajat ovat teholtaan maksimissaan noin 5 MVA:a ja paisuntasäiliölliset aaltolevymuuntajat maksimissaan noin 6 MVA:a.

Radiaattorisäiliölliset muuntajat ovat suurempi tehoisia, koska niiden jäähdytyskyky on suurempi. Radiaattorisäiliöllisten muuntajien seinämät tehdään 8-10 mm teräslevystä. Säiliöön ulkopuolelle kiinnitetään jäähdyttimet, jotka ovat usein radiaattorit. Muita tapoja säiliön jäähdytykselle ovat vesi- ja ilmajäähdytteiset vaihtoehdot.

2.1.2 Eristysnesteet

2.1.2.1 Mineraaliöljy

Mineraaliöljy on yleisin neste, jota käytetään muuntajissa. Tässä työssä käytetään mineraaliöljystä yleisnimitystä ”öljy”. Sen tehtävänä on varmistaa muuntajan aktiiviosan eristysten vahvuus ja käämien jäähdytys. Öljy on referenssi, johon muita nesteitä verrataan muuntajissa (ABB, 2007, s. 166). Öljymuuntaja on useissa tapauksissa paras vaihtoehto, kun verrataan muuntajan hintaa ja teknillisten arvojen suhdetta. Öljyn positiivisena puolena nähdään myös sen yhteensopivuus muuntajan muiden osien aineiden kanssa esim. käämien paperieriste.

Öljyjä on eri laatuja. Muuntajaöljyjen laatuksiteerit on listattu tarkasti standardiin IEC 60296. Tärkeimpiä laatuksiteereitä öljylle ovat viskositeetti, tiheys, jähmettymispiste (Pour point), vesipitoisuus, läpilyöntijännite ja dielektrinen häviökerroin (International Electrotechnical Commission IEC 60296, 2020, s. 12). Hitachi Energy Finland Oy:n Transformers yksikössä on öljynä vakituksessa käytössä Nynas Nytro 10XN. Muitakin öljyjä käytetään asiakkaan niin halutessa. Esimerkkejä muista käytettävistä öljyistä:

- Nynas Nytro Gemini X
- Nynas Nytro Libra
- Nynas Nytro Lyra X
- Shell Diala S4 ZX-I
- HyVolt III

2.1.2.2 Midel 7131

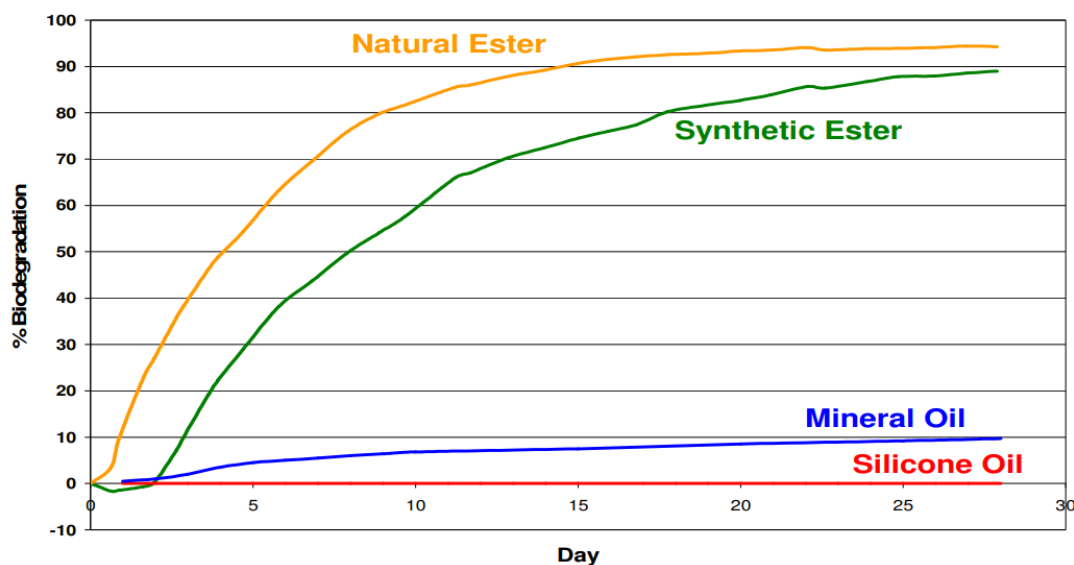
Midel 7131 on biohajoava synteettinen esteri, jota käytetään muuntajassa eristysnesteenä. Synteettiset orgaaniset esterit ovat nesteitä, jotka sisältävät vain hiiltä, vetyä ja happea (International Electrotechnical Commission IEC 61099, 2010, s. 7). Kemiallisesti valmistus tapahtuu mono- tai moniarvoisista alkoholeista ja yksi- tai moniemäksisestä alifaatteista tai aromaattisista hapoista. Tämän lisäksi nesteet voivat sisältää hapettumisen estäjiä ja muita lisäaineita.

Midelillä on korkea syttymispiste 316 °C verrattuna öljyjen yleiseen keskiarvoon 170 °C (Midel, 2020). Tämän katsotaan lisäävän merkittävästi muuntajan paloturvallisuutta. Biohajoavana nesteenä se ei muuntajavuodon sattuessa aiheuta suuria ympäristövahinkoja.

Muuntajissa käytettäväksi valituilla synteettisillä orgaanisilla estereillä on korkea leimahdus- ja syttymispistettä, ja siksi niitä on suhteellisen vaikea sytyttää (International Electrotechnical Commission IEC 61099, 2010, s. 7). Niillä voi kuitenkin olla hiukan korkeampi viskositeetti kuin mineraaliöljyllä.

Synteettiset orgaaniset esterit ovat hygroskooppisempia kuin mineraaliöljyt, ja tämä on otettava huomioon niiden käytössä ja ylläpidossa.

Midel 7131 on synteettinen esteri. Sen biohajoavaisuus on kuvan 1 mukaan selvästi suurempi kuin mineraaliöljyn. Työssä ei tutkita luonnollisia estereitä tai silikoni öljyjä.



Kuva 1. Biologisen hajoamisnopeuksien vertailu (Martin, R., 2010, s. 18)

Taulukosta 1 nesteiden viskositeetista on havaittavissa, että öljyjen viskositeetti on pienempi kuin Midelin tai Nycodielin. Muuntajan jäähdytyksessä öljy siis kiertää paremmin muuntajan sisällä kuin Midel tai Nycodiel. Asia pitää ottaa huomioon, kun mietitään jäähdytyksen riittävyttä muuntajassa.

Taulukko 1. Öljyjen fysikaalisia arvoja ammattillisten julkaisujen perusteella

| Neste | Tiheys @20 °C (kg/m ³) | Kinemaattinen viskositeetti @ 40°C (mm ² /s) | Kinemaattinen viskositeetti @ -20 °C (mm ² /s) | Kinemaattinen viskositeetti @ -30 °C (mm ² /s) |
|---------------------|------------------------------------|---|---|---|
| IEC 60296 | Max. 895 | Max. 12 | - | Max. 1800 |
| Shell Diala S4 ZX-I | 805 | 9,9 | - | 523 |
| Nytro Gemini | 869 | 9,0 | - | 888 |
| Nytro 10 XN | 874 | 7,6 | - | 705 |
| Nytro Lyra | 861 | 9,5 | - | 895 |
| Hyvolt III | 877 | 9,5 | - | 1021 |
| IEC 61099 | Max. 1000 | Max. 35 | Max. 3000 | - |
| Midel 7131 | 970 | 29 | 1440 | - |
| Nycodiel | 970 | 27,2 | 1150 | 3350 |

Taulukosta 2 voidaan nähdä, että standardin IEC 61099 alle kuuluvat Midel 7131:lla ja Nycodielilla leimahduspiste on merkittävästi suurempi. Vaasan muuntajatehtaan

kannalta toinen merkitsevä arvo on jäähdytyspiste. Muuntajatehdasta toimittaa muuntajia pohjoismaisille markkinoille, jolloin on syytä huomioida muuntajan pakkaskestävyys.

Taulukko 2. Öljyjen fysikaalisia arvoja ammattillisten julkaisujen perusteella

| Neste | Leimahduspiste (°C) | Jäähdytyspiste (°C) | Vesipitoisuus (mg/kg) | Neutralointiluku (mg KOH/g) | Häviökerroin $\tan \delta$ @90 °C | Läpilyöntijännite (kV) |
|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| IEC 60296 | Min. 135 | Max. -40 | Max. 30 | Max 0.01 | Max. 0.005 | Min. 30 |
| Shell Diala S4 ZX-I | 191 | -42 | 8 | 0,002 | 0,001 | 40-60 |
| Nytro Gemini | 147 | -54 | <20 | <0,01 | <0,001 | 40-60 |
| Nytro 10 XN | 142 | -63 | <20 | <0,01 | <0,001 | 40-60 |
| Nytro Lyra | 148 | -48 | <20 | <0,01 | <0,001 | 40-60 |
| Hyvolt III | 142 | -65 | 5 | <0,01 | 0,001 | 47 |
| IEC 61099 | Min. 250 | Max. -45 | Max. 200 | Max. 0.05 | Max. 0.03 | Min. 45 |
| Midel 7131 | 260 | -56 | 50 | <0,03 | <0,008 | >75 |
| Nycodiel | 255 | -60 | 30 | 0,01 | 0,016 | 64 |

2.1.3 Jäähdytys

Muuntajat jäähdytysmuoto merkitään standardin IEC 60076-2 mukaisesti (International Electrotechnical Commission IEC 60076-2, 2011, s. 8-9). Nelikirjaimisella tunnussymbolilla ilmoitetaan 1. sisäinen jäähdytysväliaine, 2. sisäisen jäähdytysväliaineen kiertomekanismi, 3. ulkoinen jäähdytysväliaine ja 4. ulkoisen jäähdytysväliaineen kiertomekanismi.

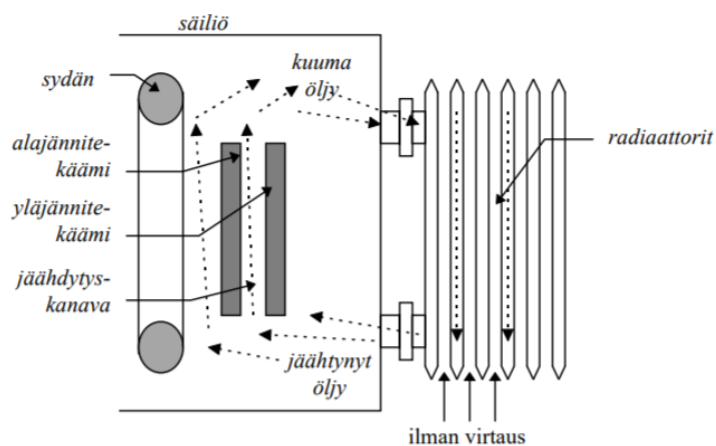
Muuntajat on tunnistettava käytetyn jäähdytysmenetelmän mukaisesti. Nestemäisiin upotettuihin muuntajiin tämä tunniste ilmaistaan nelikirjaimisella koodilla, kuten alla kuvataan:

- Ensimmäinen kirjain: Sisäinen jäähdytysväliaine
 - o O: Mineraaliöljy tai synteettinen neste, jossa on syttymispiste ≤ 300 °C

- K: eristysneste, jonka syttymispiste > 300 °C
- L: eristysneste ilman mitattavaa syttymispistettä
- A: ilma
- Toinen kirjain: Sisäisen jäähdytysväliaineen kiertomekanismi:
 - N: Luonnollinen termosifoni kulkee jäähdytyslaitteiden läpi ja käämeissä:
 - F: pakotettu kierto jäähdytyslaitteiden läpi, termosifonivirtaus käämissä
 - D: pakotettu kierto jäähdytyslaitteiden kautta, jäähdytyslaitteista ainakin pääkäämiin.
- Kolmas kirjain: Ulkoinen jäähdytysväliaine:
 - A: ilma:
 - W: vesi
- Neljäs kirjain: Ulkoisen jäähdytysväliaineen kiertomekanismi:
 - N: Luonnollinen konvektio;
 - F: pakotettu kierto (puhaltimet, pumput)

Muuntajien yleisimpiä jäähdytystapoja ovat luonnollinen öljyn- ja ilmankierto (ONAN) sekä luonnollinen öljynkierto ja tuulettimilla tehostettu ilmankierto (ONAF). Molemmissa jäähdytystavoissa aktiiviosa on upotettu säiliöön, jossa nesteenä toimii muuntajaöljy tai Midel 7131:en (KNAN/KNAF).

Radiaattorimuuntajassa ONAN-jäähdytystavalla muuntajanestettä jäähdytetään luonnollisesti niin, että kuuma neste kiertää säiliön yläosasta radiaattoreille. Kuvassa 2 radiaattoreissa kuuma öljy jäähtyy radiaattoreiden rakenteiden läpikulkevien ilmavirtausten avulla. Radiaattoreiden läpi kulkenut jäähtynyt neste siirtyy takaisin säiliöön tämän alaosasta, jolloin se pääsee jäähdyttämään aktiiviosaa. ONAF-jäähdytystapa eroaa edellisestä jäähdytyksestä niin, että radiaattoreiden ilmavirtauksia voimistetaan tuulettimilla.



Kuva 2. Öljyn liikkuminen muuntajien ja radiaattorien välillä (ABB, 2007, s. 9)

Kuvassa 3 aaltolevysäiliöllisessä muuntajassa kuuma neste kiertää säiliön yläosasta tankin seinään eli aaltolevyille. Aaltolevyjen ulkonevat pinnat päästävät väleistään ilman virtaamaan ja näin neste jäähtyy kulkiessaan aaltolevyjä pitkin. Jäähtyessään neste siirtyy tankin alaosaan, josta se luonnollisen kierron kautta siirtyy keskelle aktiiviosaa jäähdyttämään.

Edellä mainituissa jäähdytystavoissa säiliön malli voi olla hermeettinen tai se voi sisältää paisuntasäiliön.



Kuva 3. Aaltolevysäiliö muuntaja

2.1.4 Paisuntasäiliö

Paisuntasäiliöllä varustettu muuntaja on yleisin öljymuuntajatyyppe (Aura ja Tonteri, 1996, s.285). Paisuntasäiliö on säiliön ulkopuolella sijaitseva lisäsäiliö, jonka tehtävänä on varmistaa, että öljyn lämpölaajenemisen ja -supistumisen takia muuntajan aktiiviosan sisältävässä tankissa on tarvittava määrä öljyä. Paisuntasäiliö ei yleensä ole täysin tiivis, vaan se on kosketuksissa ilman kanssa. Tämä voi aiheuttaa ilmankosteuden siirtymistä öljyyn. Kosteuden imeytyminen paisuntasäiliössä vähenee, kun öljyn ja ilman välinen kosketuspinta on suhteellisen pieni ja öljyn lämpötila alhaisempi kuin öljysäiliössä. Tätä tilannetta varten paisuntasäiliöllisissä öljymuuntajissa on usein ilmankuivain, jonka tehtävä on sitoa kosteutta ilmasta. Öljystä erkaantunut vesi laskeutuu paisuntasäiliön pohjalle, josta se voidaan tarpeen vaatiessa poistaa. Paisuntasäiliöllisen muuntajan lämpötilat pysyvät matalampina kuin hermeettisen muuntajan.

2.1.5 Hermeettisensäiliö

Hermeettisessä säiliössä ei ole ulkopuolista tilaa öljyn laajentumiselle, vaan säiliön jäähdytysaallot joustavat lämpölaajenemisen yhteydessä (ABB, 2007, s. 25-26). Hermeettinen säiliö on täysin suljettu säiliö. Tällä tavalla varmistetaan, etteivät happi ja kosteus pääse säiliön sisälle muuntajan öljyyn ja eristeisiin. Suljettu säiliö pidentää hermeettisten säiliömuuntajien käyttöikä. Säiliö on täynnä öljyä ja hermeettisesti eli kaasutiivisti suljettu. Sen jäähdytysaallot ovat elastisia ja mukautuvat käytön aikaisiin tilavuuden muutoksiin. Säiliö on mitoitettu kestämään ylikuormituksenkin aiheuttama ylipaine. Hermeettiset muuntajat ovat jonkin verran matalampia kuin paisuntasäiliöiset muuntajat, mikä voi olla etu asennettaessa muuntajaa ahtaisiin tiloihin. Hermeettisissä muuntajissa öljy vanhenee hitaammin kuin paisuntasäiliöisissä muuntajissa.

2.2 Tyhjiövalettu- ja RESIBLOC®-hartsityyppinen kuivamuuntaja

2.2.1 Ulkosuojan rakenne

Kuivamuuntajassa aktiiviosaa suojaa epoksihartsivalu, joka on muotoiltu käämien ympärille. Tyhjiövalulla tarkoitetaan, että korkeajännitekäämit on valettu epoksihartsiin ja kovetettu tyhjiössä. Kuivamuuntajissa suurjännitekäämit ovat tyyppillisesti laippakäämejä.

RESIBLOC®-muuntaja toimii teknisesti samalla tavalla kuin tyhjiövalettu-kuivamuuntaja. RESIBLOC® on Hitachi Energyn patentoima menetelmä korkeajännitekäämitykseen (ABB, 2007, s. 40). Korkeajännitekäämi on monikerroksinen. Se on käämitty ristikkäin lasikuitueristeellä, joka on liotettu epoksilla ja kovetettu avoimessa ilmakehässä.

RESIBLOC®-hartsimuuntaja on Hitachi Energyn kehittämä tuote, joka on suunniteltu paloturvallisuus tarkasti huomioon ottaen (ABB, 2000, s. 326). Paloturvallisuus korostuu RESIBLOC®:issa pienen palokuorman ja itsestäänsammutustekniikan ansiosta.

RESIBLOC®:in itsestäänsammutus on standardin IEC 60092-101 mukainen.

RESIBLOC®-muuntajassa epoksihartsivaluun on lisätty lasikuitua, joka antaa paremman suojan mekaanisia voimia vastaan kuin tyhjiövalettu epoksihartsin. RESIBLOC®:in etuina nähdään myös kestävyys kylmässä ja äärimmäisissä kuormitusvaihteluissa.

2.2.2 Jäähdytys

Kuivamuuntajissa jäähdytystapoja ovat luonnollinen ilmankierto (ANAN) ja tuulettimilla tehostettu ilmankierto (ANAF). Molemmissa jäähdytystavoissa ilma kiertää käämityksissä sekä rautasydämessä. Molemmat ovat tällöin jatkuvasti suoraan kosketuksissa ilman kanssa muuntajan tuottaessa lämpöhäviöitä, jolloin lämmin ilma nousee ylöspäin. Tämä aiheuttaa muuntajan läheisyyteen luonnollisen ilmankierron. Tällöin muuntajaan virtaa lämpimän ilmakerroksen nousemisen vaikutuksesta viileämpää ilmaa alakautta. Tuulettimilla pystytään voimistamaan ilmankiertoa

muuntajan läheisyydessä, jolloin jäähdytyksen vaikutus muuntajassa kasvaa. Edellä mainitut jäähdytystavat toimivat molemmissa tutkittavissa kuivamuuntajamalleissa.

3 Standardien mukaiset paloluokat, palokuormat ja suojaukset

3.1 Paloluokat

Paloluokat nestemäisissä muuntajissa määritellään standardin IEC 61039 mukaisesti. Muuntajan öljytuotteisiin, voiteluaineisiin ja muihin samankaltaisiin tuotteisiin sovellettavan luokitusjärjestelmää, joka on määritelty standardissa IEC 61039. Luokitusjärjestelmä on luotu ISO 8681 standardin pohjasääntöjä noudattaen.

ISO 8681:n luokittelu pitää sisällään typologiset näkökulmat, sekä aineen loppukäytön kohteen. Käytännössä tarkoitus on rajata öljytuotteet, voiteluaineet ja muut samankaltaiset tuotteet tyypeittäin selkeään järjestykseen. ISO-luokitusperiaate perustuu kirjaimista ja numeroista koostettuihin pää- ja alaluokkiin. Jako toimii periaatteella luokka, kategoria ja numero. Tämän luokittelun katsotaan tämänhetkisillä tiedoilla parhaiten rajaavan erilaiset tuotteet keskenään.

Luokkaluokituksessa öljytuotteiden tai vastaavien tuotteiden luokka on merkitty kirjaimella, jolle on taulukossa 3 ilmoitettu merkitys. Nestemäiset muuntajat (öljy ja Midel 7131) kuuluvat luokkaan L.

Taulukko 3. Kirjainmerkintä öljytuotteille tai vastaavien luokan tuotteille.

| Luokka | Peruste |
|--------|---|
| F | Polttoaineet |
| S | Liuottimet ja raaka-aineet kemianteollisuudelle |
| L | Voiteluaineet, teollisuusöljyt ja niihin liittyvät tuotteet |
| W | Vahat |
| B | Bitumi |

Kategorialuokitus ilmoitetaan neljällä kirjaimella, jotka yksilöivät luokat erilaisilla merkityksillä. Ensimmäinen kirjain, joka rajaa tuotteen eristystavan on N, eli sähköeristysluokka. Muuntajien tapauksessa voidaan tutkia vain sähköeristyskategoriaa.

Toinen kirjain kategoriassa määrittelee tuotteen pääasiallisen käyttötarkoituksen mukaan. Taulukossa 4 muuntajien kohdalla kategorian toinen kirjain on T.

Taulukko 4. Kirjainmerkintä tuotteen pääasiallisen käyttötarkoitukselle.

| Kategoria | Peruste |
|-----------|--|
| C | Kondensaattorit |
| T | Muuntajat ja kytkentälaitteet |
| S | Kytkentälaitteet, jotka toimivat alle -10°C lämpötilassa |
| Y | Kaapelit |

Kolmas kirjain yksilöi antioksidanttilisäaineiden mahdollisen määrän muuntajien kyseisissä nesteissä. Taulukosta 5 löytyvät öljyt kuuluvat kaikki antioksidanttikategoriaan I, eli ne sisältävät IEC 60296 mukaan lisäaineita $> 0,08\text{m}\%$.

Taulukko 5. Kirjainmerkintä antioksidanttilisäaineiden mahdollisen läsnäolosta

| Antioksidantti | Peruste |
|----------------|---|
| U | Lisäaineita ei ole |
| T | Lisäaineita on läsnä (% painosta $< 0,08$) |
| I | Lisäaineita on läsnä (% painosta $> 0,08$) |

Neljäs kirjain tunnistaa syttymispisteen (syttymispiste: ISO 2592: 2000). Taulukossa 6 syttymispisteellä tarkoitetaan alinta lämpötilaa, jossa nesteen höyryt muodostavat riittävän määrän syttyvää höyry-ilma-seosta, joka pystyy syttymään hetkellisesti liekkeihin. Mitä korkeampi syttymispiste on, sitä vähemmän syttyvää neste on, koska se vaatii korkean lämpötilan syttyäkseen. Matalalla syttymispisteellä tarkoitetaan, että neste syttyy helpommin. Syttymispiste kertoo vain sen lämpötilan, missä neste alkaa haihtua ja muodostaa syttyviä höyryjä.

Taulukko 6. Kirjainmerkintä syttymispisteen mukaan.

| Syttymispiste | Peruste |
|---------------|---|
| O | Syttymispiste on ≤ 300 ° C |
| K | Syttymispiste on > 300 ° C |
| L | Nesteen syttymispiste ei ole havaittavissa. |

Syttymispisteen lisäksi myös aineen leimahduspiste on määritetty. Tämä otetaan huomioon IEC TC10 dokumentissa, joka pohjautuu standardiin ISO 2719: 2002. Leimahduspistettä mitataan Pensky-Martens-menetelmällä ”suljettu kuppi”. Leimahduspisteen ja syttymispisteen erona on, että syttymispisteessä palo jatkuu, kun leimahduspisteessä palo ei jatku. Tässä tarkastelussa öljy- ja Midel 7131-muuntajien välille saadaan ero. Öljyjen ja Midel 7131 valmistajat eivät ilmoita syttymispistettä katalogeissaan, koska sitä ei vaadita IEC60296 (2020) mukaan ilmoitettavaksi, mutta leimahduspisteet tiedetään taulukon 7 mukaisesti. Öljymuuntajat siis luokitellaan tässä siis leimahduspiste O:n mukaisesti ja Midel 7131-muuntajat luokitellaan leimahduspiste K:n mukaisesti.

Taulukko 7. Kirjainmerkintä leimahduspiste mukaan.

| Leimahduspiste | Peruste |
|----------------|--|
| O | Leimahduspiste on ≤ 250 ° C |
| K | Leimahduspiste on > 250 ° C |
| L | Nesteen leimahduspiste ei ole havaittavissa. |

Kategorioinnin lopputuloksena öljymuuntajan luokittelu on LNTIO ja Midel 7131-muuntajan LNTIK.

Seuraavaksi tarkastellaan tunnistuskoodeja. Nimityksen loppuun saattamiseksi lisätään seitsemän numeroinen numerosarja. Koodin kolme ensimmäistä numeroa vastaavat mahdollista IEC-vertailustandardia, joka identifioidaan kolmella viimeisellä numerolla. Jos IEC-referenssistandardia ei ole, käytetään numeroa 000. Neljäs numero koodissa identifioi mahdollisen IEC-alaluokituksen, ja jos sellaista ei ole, käytetään numeroa 0.

Tutkittavien öljymuuntajien lämpöarvo on yli arvon 42 MJ/kg. Työssä mukana olevat öljymuuntajat ovat taulukon 8 mukaan lämpöarvoltaan 1 luokassa.

Midel 7131-muuntajien lämpöarvo on alle arvon 32 Mj/kg. Työssä mukana olevat Midel-muuntajat ovat taulukon 8 mukaan lämpöarvoltaan 3 luokassa.

Taulukko 8. Lämpöarvot

| Lämpöarvo | Peruste |
|------------------|--|
| 1 | Alempi lämpöarvo on ≥ 42 MJ / kg; |
| 2 | Alempi lämpöarvo on < 42 MJ / kg; |
| 3 | Alempi lämpöarvo on < 32 MJ / kg. |

Standardin IEC 61039 muihin lukuihin ei oteta tässä työssä kantaa.

3.2 Palokuormat

Palokuorma määritellään kokonaislämpömääränä, kun tilassa oleva aine palaa täydellisesti. Vapautuvaan kokonaislämpömäärään lasketaan muuntajan palavan materiaalin lisäksi muuntajan ympäristössä/tilassa olevat pinnat. Yksikkönä palokuorman tiheyttä ilmoitettaessa käytetään kilo- tai megajoulea tilan neliometriä kohden (kJ/m^2 tai MJ/m^2). Palokuorma laskettaessa otetaan huomioon kaikkien palavien materiaalien paino niiden lämpöarvoilla ja jakamalla luku tarkasteltavalla lattia-alueella (Ympäristöministeriö, 2011, s. 9).

Materiaalit, joilla on sama paino ja sama lämpöarvo, voivat kuitenkin käyttäytyä eri tavalla palaessaan. Eroavaisuuksia materiaalien palamisessa ovat syttymisen helppous, palamisnopeus sekä lämmön ja höyryjen vapautuminen. Edellä mainittujen syiden takia palaminen voi olla nopeaa, voimakasta, vapauttaa vaarallisia höyryjä tai aiheuttaa muiden materiaalien nopeamman palamisen. Palokuormalla on voimakas vaikutus palon kehittymiseen palon aikana.

Paloturvallisuuden näkökulmasta rakennuksen sisällön jakautuminen koko lattia-alueelle on tärkeää. Näin pystytään välttämään palavien materiaalien keskittyminen murto-osaan lattiapinta-alasta. Materiaalien keskittyminen aiheuttaisi myös odotetun palokuorman laskennalliseen arvoon eroavaisuutta.

Paloriski muodostetaan mitattavan alueen palokuormien perusteella. Jakeluasemien sisällä palokuormitus voi vaihdella merkittävästi riippuen muuntajatyypistä. Tässä työssä otetaan kantaa vain muuntajan aiheuttamaan palokuormaan. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että itse palokuormaan normaalisti lasketaan kaikki rakennuksen kantavat ja jäykistävät rakenteet, palo-osastot, muut rakennuksen osat ja irtaimisto. Kiinteän palokuorman ja irtaimiston palokuorman yhteispalokuormaa kutsutaan suunnitteluarvoksi. Tilan palokuorman tiheyttä on määritelty laskemalla palavan pintamateriaalin määrä, jonka jälkeen on arvioitu sen lämpöarvo täydellisen palamisen oletuksen pohjalta. Tämän jälkeen saatu lämpöenergiamäärä on jaettu lattianeliöiden lukumäärällä. Lämpöarvo puolestaan kuvaa aineen täydellisessä palamisessa vapautuvaa lämpöenergian määrää yhtä massayksikköä kohden. Yleensä kiinteän ja nestemäisen aineen lämpöarvo ilmoitetaan megajouleina (MJ/kg), mikä tarkoittaa lämpöenergian määrää yhtä palavan materiaalin painokiloa kohti.

3.3 Paloluokitukset Suomessa

Suomessa rakennustekniset paloluokitukset jaetaan Ympäristöministeriön mukaan kolmeen paloluokkaan P1, P2 ja P3. Ne määritellään seuraavasti (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta 3/2011):

Paloluokkaan P1 kuuluvan rakennuksen kantavien rakenteiden oletetaan pääsääntöisesti kestävän palossa sortumatta. Rakennuksen kokoa ja henkilömäärää ei ole rajoitettu.

Paloluokkaan P2 kuuluvan rakennuksen kantavien rakenteiden vaatimukset voivat olla paloteknisesti edellisen luokan tasoa matalampia. Riittävä turvallisuustaso saavutetaan asettamalla vaatimuksia erityisesti seinien, sisäkattojen ja lattioiden pintaosien

ominaisuuksille. Lisäksi kerroslukua ja henkilömääriä on rajoitettu käyttötavasta riippuen.

Paloluokkaan P3 kuuluvan rakennuksen kantaville rakenteille ei aseteta erityisvaatimuksia palonkeston suhteen. Riittävä turvallisuustaso saavutetaan rakennuksen kokoa ja henkilömääriä rajoittamalla käyttötavasta riippuen. (Ympäristöministeriö, 2011, s. 10)

Ympäristöministeriön E1 määrittelee periaatteet taulukon 9 mukaan eri käytäntötapojen sijoittamisesta palokuormaryhmiin kolmella eri kokoluokalla: yli 1200 MJ/m², vähintään 600 MJ/m² ja enintään 1200 MJ/m² sekä alle 600 MJ/m² (Ympäristöministeriö, 2011, s. 10).

Taulukko 9. Ympäristöministeriön E1 mukaisia rakennusteknisiä vaatimuksia paloluokit-
tain (Ympäristöministeriö, 2011, s. 10)

| TAULUKKO 3.2.1 Rakennuksen ominaisuus | RAKENNUKSEN KOKOA KOSKEVAT RAJOITUKSET | | |
|--|---|--------------------------------|------------------------------|
| | Rakennuksen paloluokka | | |
| | P1 | P2 | P3 |
| KERROSLUKU | | | |
| - yleensä | ei rajoitusta | enintään 2 | enintään 2 |
| - asuinrakennus, työpaikkarakennus | ei rajoitusta | enintään 8 | enintään 2 |
| - tuotanto- tai varastorakennus, autosuoja | ei rajoitusta | enintään 2 | enintään 1 |
| KORKEUS | | | |
| - yleensä | ei rajoitusta | enintään 9 m | enintään 9 m |
| - asuinrakennus, työpaikkarakennus 3–4 krs. | ei rajoitusta | enintään 14 m | <i>ei sallittu</i> |
| - asuinrakennus, työpaikkarakennus 5–8 krs. | ei rajoitusta | enintään 26 m | <i>ei sallittu</i> |
| - yksikerroksinen tuotanto- tai varastorakennus | ei rajoitusta | ei rajoitusta | enintään 14 m |
| KERROSALA | | | |
| Kerrosala yleensä | | | |
| - yksikerroksinen | ei rajoitusta | ei rajoitusta | enintään 2400 m ² |
| - kaksikerroksinen | ei rajoitusta | ei rajoitusta | enintään 1600 m ² |
| - yli kaksikerroksinen | ei rajoitusta | enintään 12 000 m ² | <i>ei sallittu</i> |
| Kerrosala tuotanto- ja varastorakennuksissa sekä autosuojissa | | | |
| - yksikerroksinen | ei rajoitusta | ei rajoitusta | ei rajoitusta |
| - kaksikerroksinen | ei rajoitusta | ei rajoitusta | <i>ei sallittu</i> |
| Selostus | <i>Rakennuksen korkeus on julkisivupinnan ja vesikaton leikkausviivan korkeus maan pinnasta (MRA 58 §). Tarvittaessa lasketaan rakennuksen nurkkapisteiden korkeuksien keskiarvo.</i> | | |

Tässä työssä tutkittavat muuntajat kuuluvat yli 1200 MJ/m² kategoriaan, jolloin muuntajien kuuluu olla Ympäristöministeriön mukaan erillisessä varastotilassa.

3.4 Suojaukset

3.4.1 Muuntajan perussuojaukset

Muuntaja-aseilla käytettävät suojaus- ja valvontalaitteet ovat keskeisiä tekijöitä muuntajien turvallisen ja tehokkaan toiminnan varmistamisessa. Näiden laitteiden tarkoituksena on havaita mahdolliset viat ja suojata muuntajaa erilaisilta vaurioilta. Laitteita ovat differentiaali-, ylivirta- ja maasulkusuojat, mutta lisäksi itse muuntajassa on useita muita suojaus- ja valvontalaitteita.

Öljymuuntajaan kuuluva paisuntasäiliön tilavuus on mitoitettu vastaamaan öljyn minimi- ja maksimilämpötiloista johtuvaa tilavuuseroa. Paisuntasäiliön tärkein tehtävä on varmistaa, että varsinaisessa muuntajasäiliössä on aina riittävästi öljyä.

Kaasurele toimii suojana öljyeristeisissä tehomuuntajissa, havaiten sisäisiä vikoja kuten ylikuumentumista, purkaus- tai valokaari-ilmiöitä tai sisäisiä oikosulkuja.

Öljynlämpötilamittari mittaa muuntajasäiliössä olevaa öljyn huippulämpötilaa. Mittarissa on tavallisesti aseteltavat hälytys- ja laukaisukoskettimet.

Öljynkorkeusosoitin on normaalisti sijoitettu paisuntasäiliön päättyyn. Sen tehtävä on näyttää paisuntasäiliössä olevan öljynpinnan korkeus. Osoitin on suurissa muuntajissa varustettu ylä- ja alarajan hälytyskoskettimella.

Ilmankuivain puolestaan huolehtii muuntajan hengittämän ilman kuivattamisesta öljyn tilavuuden vaihdellessa.

Käämikytkinsuojarele suojaa käämikytkintä vaurioitumiselta ja kytkeytyy muuntajan pääkatkaisijoiden laukaisupiiriin.

Edellämainitut suojaus- ja valvontalaitteet ovat tyypillisiä vakiovarusteita 110 kV, 10-63 MVA tehomuuntajille. Jakelumuuntajissa öljynkorkeuden osoitin on vakiovarusteena, kun taas suurempia jakelumuuntajia suositellaan varustettavaksi myös kaasureleellä, ilmankuivaimella ja öljyn lämpömittarilla. Sisämuuntamossa ja muuntamokopissa jakelumuuntaja on yleensä suojattu keskijännitesulakkeilla ja kuormanerottimella.

Lisävarusteina muuntajille voidaan toimittaa erilaisia laitteita, kuten käämin lämpötilakuvaaja, öljyn ja käämin lämpötilan kaukomittausanturi valvomossa olevaan osoitinkojeeseen kytkettäväksi, lämpömittarit valvontatarkoituksiin sekä optisen lämpötilamittauksen anturit. Lisäksi ylipaineventtiili voi olla osa suojausmekanismeja, estäen paineen nousun muuntajasäiliössä vakavan vaurion tapahtuessa.

Näiden laitteiden avulla muuntajien toimintaa valvotaan ja suojataan tehokkaasti erilaisilta vaurioilta ja häiriöiltä, mikä on keskeistä sähköverkon turvallisuuden ja luotettavuuden kannalta (ABB, 2000, s. 325).

3.4.2 Paloseinät

Palomuurit ovat rakenteita, jotka estävät tulen leviämisen tietyltä alueelta toiselle ja kestävät samalla rakennuksen sortumisen. Palosulut ovat jaettuina tiloiksi, joissa on kaksi erillistä ovea, avautuen eri palo-osastoihin estäen molempien ovien samanaikaisen aukaisun.

Rakennusteknillisesti rakennusosien luokitus tapahtuu EN-standardien mukaisesti, ottaen huomioon rakennusosien kestävyden paloa vastaan (Ympäristöministeriö, 2011, s. 5). Luokittelu tapahtuu merkintöjen R (kantavuus), E (tiiviyys) ja EI (tiiviyys ja eristävyys) mukaisesti ja palonkestävyysaika ilmoitetaan minuuteissa kirjaimen jälkeen.

Seinän paloluokka voi olla esimerkiksi REI 60, ja sen oven luokka voi olla esimerkiksi EI 60 tai E 60. Tiiviysvaatimuksen merkitys rakennusosille vaikuttaa, niin että pelkän tiiviyn täyttäminen voi aiheuttaa lämpösäteilyyn liittyviä riskejä. Tällöin on tärkeää huomioida suojaetäisyydet poistumisteihin ja syttyviin materiaaleihin turvallisuuden varmistamiseksi.

Tässä työssä tutkittavien muuntajien turvaetäisyydet ja rakennusteknillisten paloseinien ja -ovien turvamuurit valitaan taulukon 10 mukaisesti.

Jokaisen tutkittavan muuntajan paloseinät ja -ovet ovat luokaltaan EI 60 / REI 60. Tässä työssä ei oteta kantaa kyseisten palosuojamateriaalien hintaan, ja koska jokaiselle muuntajalle kyseiset palosuojamateriaalit ovat samat, niiden hinta-arvolla ei ole merkitystä todellisessa kokonaiskustannus laskelmassa.

Öljymuuntaja kuuluu taulukon 10 muuntajatyyppeihin O ja kaikki tutkittavat muuntajat sisältävät öljyä alle 1000 litraa. Tällöin suojaetäisyys muuntajan ja suojamateriaalien välillä on 3 metriä.

Midel 7131-muuntaja kuuluu taulukon 10 muuntajatyyppeihin K. Kyseinen luokka vaatii muuntajan ja suojamateriaalien suojaetäisyydeksi 1,5 metriä.

Tyhjiövalettu- ja RESIBLOC®-muuntaja kuuluvat taulukon 10 muuntajatyyppeihin F0. Kyseinen luokka vaatii muuntajan ja suojamateriaalien suojaetäisyydeksi 1,5 metriä.

Taulukko 10. Muuntajien sisäasennukset suljetuilla sähkökäyttöalueilla (IEC Standard No. 61936-1, 2021, s. 78)

Table 5 – Minimum requirements for the installation of indoor transformers

| Transformer type | Class | Safeguards |
|---|----------------------------------|---|
| Oil insulated transformers (O) | Liquid volume | |
| | < 1 000 l | EI 60 / REI 60 |
| | 1 000 l ≤ ... < 5 000 l | EI 90 / REI 90 or EI 60 / REI 60 and fire extinguishing unit |
| | ≥ 5 000 l | EI 120 / REI 120 or EI 90 / REI 90 and fire extinguishing unit |
| Less flammable liquid insulated transformers (K) | Nominal power/max. voltage | |
| Without enhanced protection | (no restriction) | EI 60 / REI 60 or automatic sprinkler protection |
| With enhanced protection | ≤ 10 MVA and $U_m \leq 38$ kV | EI 60 / REI 60 or separation distances 1,5 m horizontally and 3,0 m vertically |
| Dry-type transformer (A) | Fire behaviour class | |
| | F0 | EI 60 / REI 60 or separation distances 0,9 m horizontally and 1,5 m vertically |
| | F1 | Non-combustible walls |
| <p>a) REI represents the bearing system (wall) whereas EI represents the non-load bearing system (wall) where R is the load bearing capacity, E is the fire integrity, I is the thermal insulation and 60/90 refers to fire resistance duration in minutes.</p> <p>b) Definitions of fire resistance are given in EN 13501-2.</p> <p>c) Enhanced protection means</p> <ul style="list-style-type: none"> – tank rupture strength, – tank pressure relief, – low-current fault protection, – high-current fault protection. <p>For an example of enhanced protection, see Factory Mutual Global standard 3990 and IEC 60076-13.</p> <p>d) Sufficient space should be allowed for periodic cleaning of resin-encapsulated transformer windings, in order to prevent possible electrical faults and fire hazard caused by deposited atmospheric pollution.</p> | | |

4 Aseman perustamis- ja käyttökustannusten vertailu

Tässä kappaleessa tutkitaan neljän eri muuntaja-aseman perustamis- ja käyttökustannuksia. Eri tehotasoilta tutkittavana on yhteensä 24 muuntajan tiedot. Tehotaso on määritelty niin, että tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailtavissa muuntajatyypistä riippumatta.

Tehotaso S tutkitaan välillä 630-2000 kVA. Vertailun jokainen muuntaja sisältää perusvarustetason, mitä tutkittavien muuntajien tehotasot pitävät normaalisti sisällään. Tutkittavat muuntajat ovat jakelumuuntajia ja niiden suurin käyttöjännite U_m on arvoltaan 24 kV. Muuntajien syöksyjännite kestokokeessa LI on arvoltaan 125 kV ja käyttötaajuinen kestokoejännite AC on arvoltaan 50 kV. Muuntajien nimelliset ensiöjännitteet U_n vaihtelevat välillä 20-20,5 kV ja toisiojännitteet 0,40-0,42 kV. Muuntajat ovat kaikki kytkentäryhmältään Dyn11, joka on yleinen kytkentäryhmä tutkittavalla jännite- ja tehotasolla. Muuntajat noudattavat IEC-standardia sekä EU:n vuonna 2021 määrittämää Eco Tier 2 asetusta 548/EU.

Vertailu on tehty Microsoft Excel-laskentaohjelmaan. Vertailussa otetaan huomioon normaalisti muuntaja-asiakkaan ilmoittamat P_0 - ja P_k -häviöarvostukset, muuntajien hinnat, muuntajien suunnitteluhinnat, kokonaishinta ja näistä saatu kokonaiskustannus. Kokonaiskustannuksen jälkeen huomioidaan paloluokan vaatima kustannusalue, jota kutsutaan lisäkustannukseksi. Tämä vertailu pitää sisällään nesteen määrän, muuntajan pituuden ja leveyden, turva-alueen, turvaneliöt, tilavuokran ja muuntajan pitoajan. Näillä tiedoilla saadaan todellinen kokonaiskustannus.

Muuntajille on myös laskettu lämpökuorma, joka määrittää muuntajien rakennusteknillisen paloluokan Suomessa.

4.1 Laskentakaavat

4.1.1 Hinta- ja kustannuslaskenta

Kokonaishinnassa otetaan huomioon tuotteen ja suunnittelun hinta

$$K_h = 1,2 (T_h + S_h), \quad (1)$$

missä K_h on kokonaishinta, T_h on tuotteen hinta, S_h on suunnittelun hinta. Kerrointa 1,2 käytetään kuvaamaan yleisesti muita kustannuksia.

Kokonaiskustannuksessa otetaan huomioon laskettu kokonaishinta sekä häviöarvostukset

$$K_k = K_h + P_0 + P_k, \quad (2)$$

missä K_k on kokonaiskustannus, K_h on kokonaishinta, P_0 on P_0 -häviöarvostus, P_k on P_k -häviöarvostus.

Häviöarvostuksia tullaan muuttamaan tutkimusvaiheessa, jotta saadaan mallinnettua erilaisia asiakkaan vaatimuksia.

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

4.1.2 Lämpökuormalaskenta

Työssä lämpökuormaa laskettaessa on täytynyt tehdä muutamia oletuksia. Materiaalien lämpöarvoa tarkastellessa käytetään kalorimetristä lämpöarvoa, eli oletetaan jokaisen materiaalin palavan täydellisesti (McAllister, Chen, Fernandez-Pello, 2011, s.23-25). Oletuksia käsitellään tarkemmin tuloksien tarkastelun yhteydessä. Tässä kohdassa esitetään vain laskentakaavat, mitä vertailussa on käytetty.

Lämpökuormaa laskettaessa on otettu huomioon eri materiaalien lämpöarvo.

Öljy- ja Midel 7131-muuntajien palavina lämpömateriaaleina toimivat öljy/Midel-7131, paperi ja puu

$$Q = m_n HHV_n + m_{pa} HHV_{pa} + m_{pu} HHV_{pu}, \quad (3)$$

missä Q on lämpökuorma, m on materiaalien (neste, paperi, puu) massa ja HHV on materiaalien kalorimetrinen lämpöarvo (neste, paperi, puu).

Tyhjiövalettu- ja RESIBLOC®-hartsityyppisten kuivamuuntajien palavina lämpömateriaaleina toimivat kiilat, sylinterit ja hartsi

$$Q = m_k HHV_k + m_s HHV_s + m_h HHV_h, \quad (4)$$

missä Q on lämpökuorma, m on materiaalien (kiilat, sylinterit, hartsi) massa ja HHV on materiaalien kalorimetrinen lämpöarvo (kiilat, sylinterit, hartsi).

4.2 Tulokset

4.2.1 Muuntaja-aseman käyttökustannusvertailu

Muuntajia verrattiin kolmella eri P_0 - ja P_k -häviöarvostustasolla (liitteet 1-3) ja kuudella eri tehotasolla (liitteiden taulukot 12-29). Jokaisen tarkastelun hintavertailu noudattaa samaa lopputulosta. Huomion arvoista on, että tehotason kasvaessa muuntajien kokonaiskustannukset ja todelliset kokonaiskustannukset lähestyivät toisiaan. Muuntajien hinnat ovat lähimpänä toisiaan, kun P_0 -häviöarvostus on tarkastelujoukon suurin ja P_k -häviöarvostustaso tarkastelujoukon pienin. Öljymuuntaja oli kokonaiskustannusta tarkastellessa muuntajista halvin vaihtoehto. Kun mukaan otettiin muuntaja-aseman paloturvaetäisyydet, Midel 7131-muuntaja osoittautui halvimmaksi vaihtoehdoksi. Taulukko 11 on lisätty selventämään käytettäviä lyhenteitä.

Taulukko 11. Käytetyt lyhenteet kuvissa 9 ja 10, sekä taulukoissa 12-29

| Lyhenne | P_0 - häviöarvostus | | | P_k -häviöarvostustaso | | |
|---------|-----------------------|----|-------------|--------------------------|----|------------|
| kk | keskitaso | // | 7500 €/kWh | keskitaso | // | 2500 €/kWh |
| ps | pieni | // | 5000 €/kWh | suuri | // | 5000 €/kWh |
| sp | suuri | // | 10000 €/kWh | pieni | // | 1500 €/kWh |

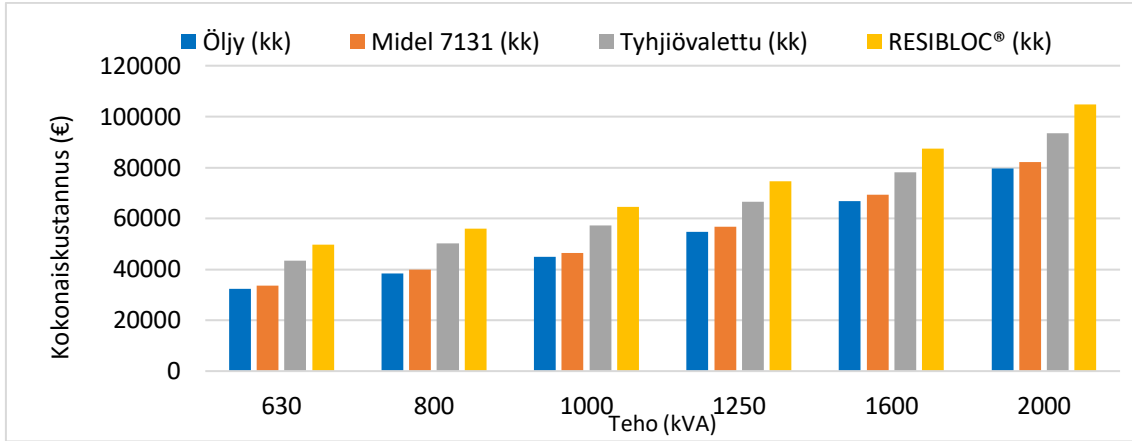
Suunnittelun hintaa ei ollut kaikille muuntajamalleille saatavilla, joten se päätettiin pitää arvossa nolla. Voidaan olettaa, että suunnitteluhinnat tutkittaville perusmuuntajille ovat

pitkälti samansuuruisia, jolloin sillä ei ole kaavan (1) mukaisesti ratkaisevaa merkitystä lopputulokseen.

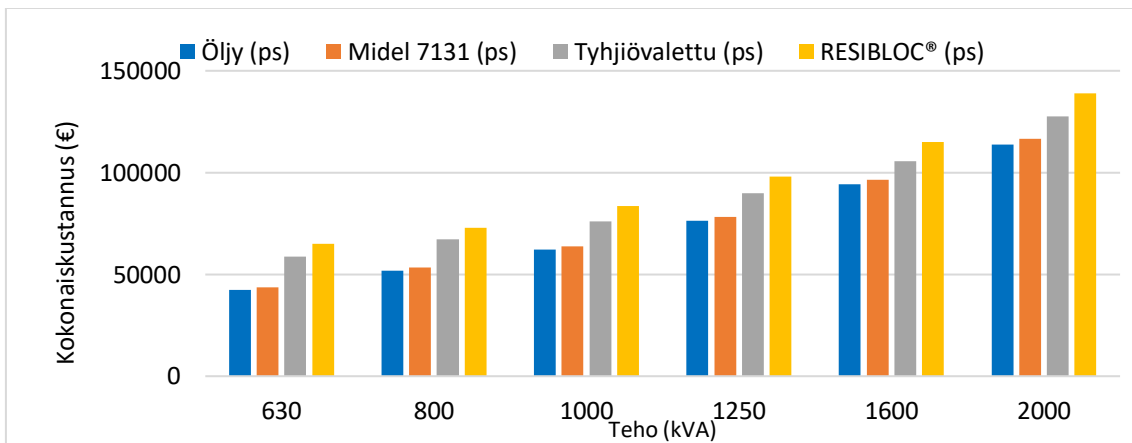
Tutkimuksessa muuntajien oletettuna pitoaikana käytettiin 25 vuotta. Riippuen muuntajan käyttötarkoituksesta ja huolloista käyttöikä voi vaihdella suuresti. Tutkimuksessa käytettyä pitoaikaa pidettiin tutkimukselle sopivana muuntajien yleisenä käyttöikä. Tutkimuksen oletuksena oli, että jokaista muuntajaa käytetään yhtä paljon yhtä pitkänä aikana, joten pitoajan muuttaminen Excel-laskentaan ei vaikuta lopputulokseen.

Tutkimuksessa vuokran hintana käytettiin liitteissä 1-3 näkyvää arvoa. Vuokran hinta valikoitui Hitachi Energy Finland Oy:n Transformers yksikön arvioiden pohjalta. Vuokran on arvioitu vastaavan Vaasan alueella toimivaa tuotantolaitosta tai varastorakennusta, johon voidaan muuntaja asentaa. Vuokran hinnannosto vaikuttaa vain todellisiin kokonaiskustannuksiin ja niissä eniten turvanieliöitä tarvitsevaan muuntajamalliin. Tarkasteltaessa muuntajien välistä lähimpänä olevaa hintaa, kun P_0 - häviöarvostus on tarkastelujoukon suurin ja P_k -häviöarvostustaso tarkastelujoukon pienin, vuokraa pitäisi nostaa tarkastellusta arvosta n. 1000 %, jotta Midel 7131-muuntaja ei olisi muuntajajoukon halvin vaihtoehto.

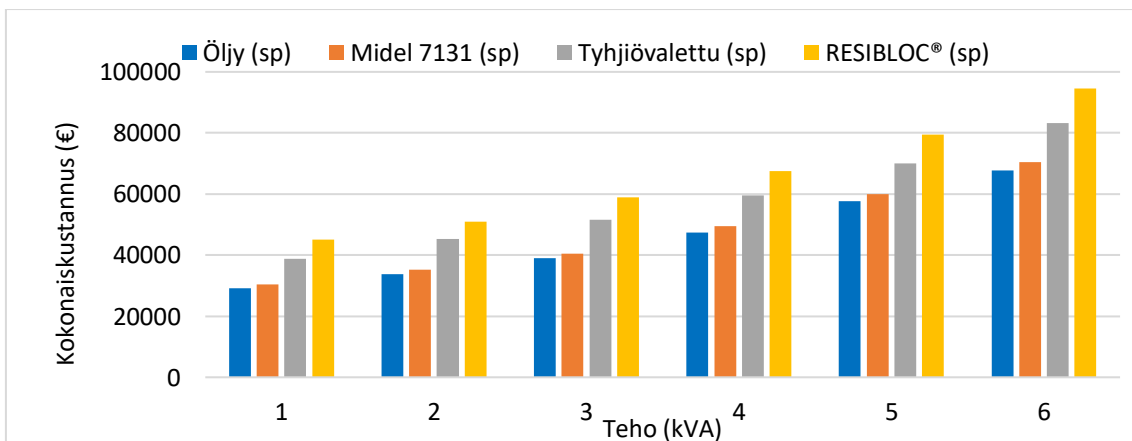
Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua. Kuviin 4-9 on kerätty tulokset taulukoista 12-29 tarkastelemisen helpottamiseksi. Kuvissa käytettävät lyhenteet kuvastavat eri P_0 - ja P_k -häviöarvostustasoja taulukon 11 mukaisesti.



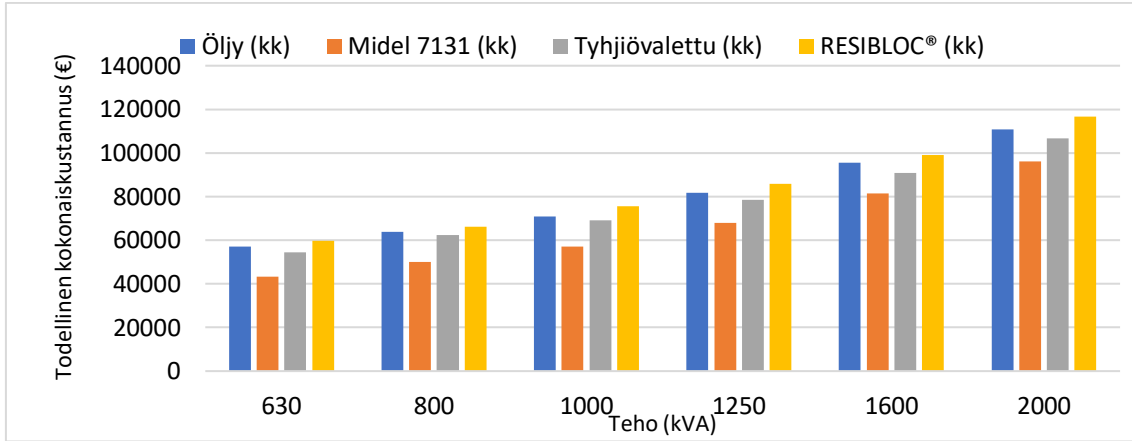
Kuva 4. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (kk)



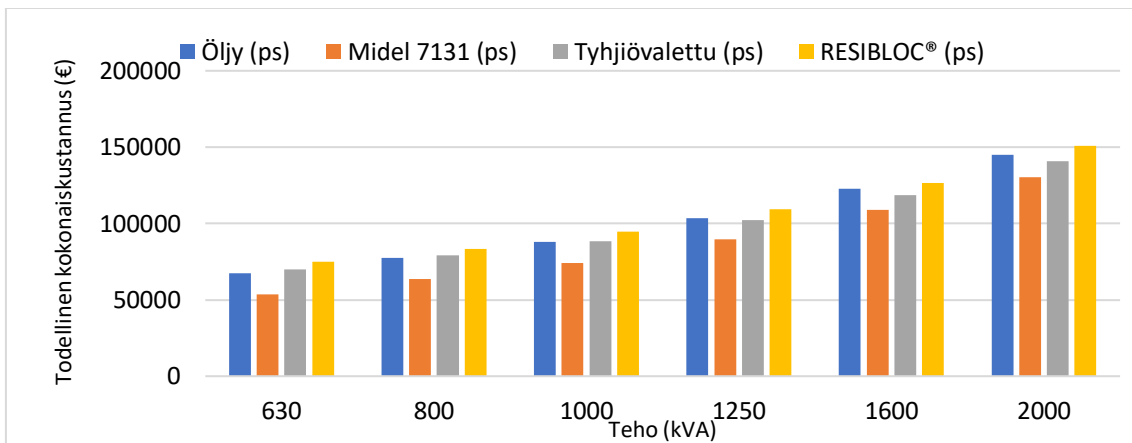
Kuva 5. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (ps)



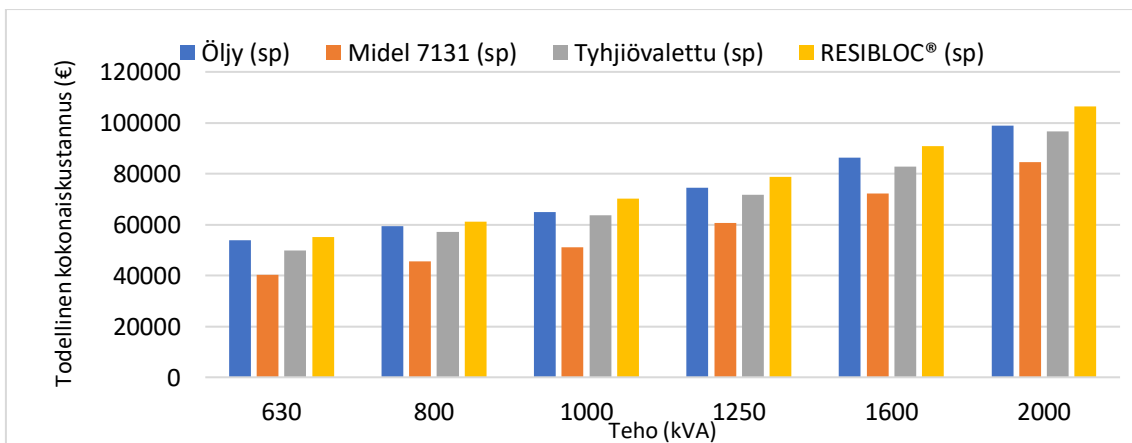
Kuva 6. Kokonaiskustannus häviöarvostustasoittain (sp)



Kuva 7. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoin (kk)



Kuva 8. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoin (ps)

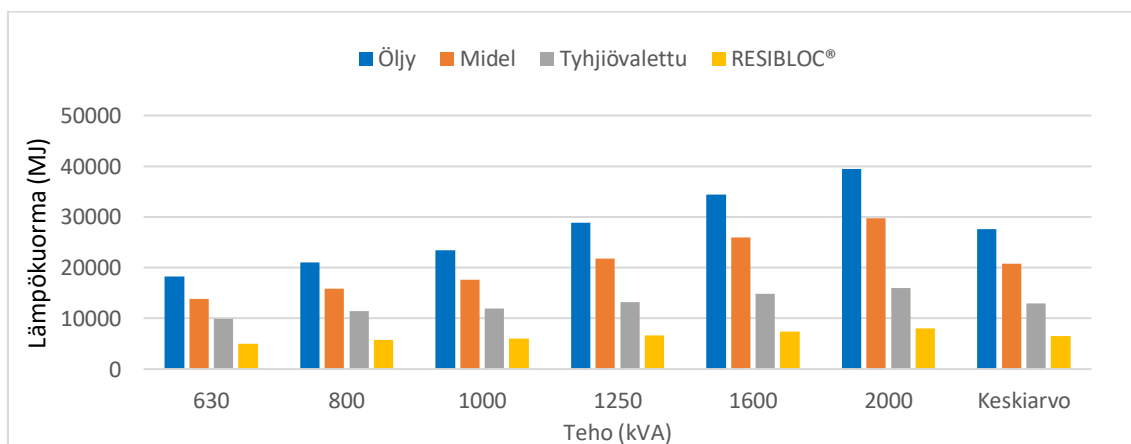


Kuva 9. Todellinen kokonaiskustannus häviöarvostustasoin (sp)

4.2.2 Muuntaja-aseman lämpökuormalaskenta

Työssä tutkittiin myös lämpökuorman määrää muuntajatyypin kesken. Myös tässä tarkastelussa voidaan nähdä kuvan 10 mukaisesti, että riippumatta tehoasosta, lopputulos pysyy samana. Mitä suurempi tehoisempi muuntaja on kyseessä, sitä suuremmiksi erot lämpökuormien välillä muodostuvat. Kaavan (3) ja (4) mukaisesti voidaan siis todeta, että massat kasvavat kalorimetrisesti suurimmissa lämpöarvon tuottajissa. RESIBLOC®-muuntaja on tässä tarkastelussa lämpökuormaltaan pienin.

Kuivamuuntajan lämpökuorman laskennassa käytettiin oletusta, että kuivamuuntajassa on kaksinkertainen määrä palavaa materiaali verrattuna RESIBLOC®-muuntajaan. Palava materiaali on 30-40 % kvartsilasia ja 60-70 % epoksihartsia. Laskennassa oletettiin, että kiilat sisälsivät epoksihartsia 60% ja sylinterit sisälsivät epoksihartsia 70%. Laskennassa kvartsilasille ei ole laskettu lämpöarvoa johtuen materiaalin palamattomuudesta.



Kuva 10. Lämpökuorma tehotasoittain

5 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli vertailla neljän eri muuntajatyypin välisiä eroja. Eroja vertailtiin huomioiden erilaiset tekniset ratkaisut muuntajissa. Muuntajien paloturvallisuutta tutkittiin vertaamalla palokuormaa ja mahdollisia standardien mukaisia suojauksia käyttäen. Lopuksi vertailtiin edellä mainituista asioista koostuvaa kokonaisuutta, missä otettiin myös kustannukset huomioon. Vertailua vaikeutti toisiinsa verrattavissa olevan tehoalueen löytäminen. Lopullisena tarkoituksena oli saada aikaan tutkimus Hitachi Energy Finland Oy:lle, jotta yhtiö pystyy tarjoamaan asiakkaalle parhaan mahdollisen muuntajaratkaisun asiakkaan tarpeisiin. Alustavan hypoteesin mukainen Midel 7131-muuntajan paloturvallisuus ja siitä saatava kustannushyöty osoittautuivat oikeaksi. Työssä käytetty Excel-laskentatyökalua tullaan käyttämään jatkossa myynnin puolella.

6 Lähteet

- ABB. (2007). Muuntajatekniikan perusteet. Sisäinen opetusmateriaali. ABB
- ABB. (2000). Teknisiä tietoja ja taulukoita (10.). ABB
- ABB. (2007). Transformer Handbook. 3. painos. Zürich: ABB Management Services Ltd., Transformers.
- Aura, L. & Tonteri, A. J. (1996). Teoreettinen sähkötekniikka (2. uud.). WSOY
- Itieffe. (2023, 21. helmikuuta). Eri materiaalien lämpöarvoja. Noudettu 10.11.2023 osoitteesta <https://www.itieffe.com/fi/erilaisten-materiaalien-l%C3%A4mp%C3%B6arvo/>
- International Electrotechnical Commission. (2008). Classification of insulating liquids (IEC Standard No. 61039).
- International Electrotechnical Commission. (2013). Fire hazard testing – Part 1-40: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products –Insulating liquids (IEC Standard No. 60695-1-40).
- International Electrotechnical Commission. (2020). Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment (IEC Standard No. 60296).
- International Electrotechnical Commission. (2010). Insulating liquids – Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes (IEC Standard No. 61099).
- International Electrotechnical Commission. (2021). Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC (IEC Standard No. 61936-1).
- International Electrotechnical Commission. (2011). Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers (IEC Standard No. 60076-2).
- Martin, R., Athanassatou, H., Duarte, J.C., Perrier, C., Sitar, I., Walker, J., Claiborne, C., Boche, T., Cherry, D., Darwin, A., Gockenbach, E., Janssen, H., Shirasaka, Y. & Wang, Z. (2010). Experience in Service with New Insulating Liquids. Cigré Technical brochure, 436.
- McAllister, S., Chen, J. & Fernandez-Pello, A. C. (2011). Fundamentals of combustion processes. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8>

Midel. (2020, 3. maaliskuuta). MIDEL 7131 – Synthetic Ester Transformer Fluid Brochure. Noudettu 14.09.2023 osoitteesta <https://www.midel.com/midel-range/midel-7131/>

Thauvoye, C., Zhao, B., Klein, J. & Fontana, M. (2008). Fire Load Survey and Statistical Analysis. Fire Safety Science 9: 991-1002. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-991>

Ympäristöministeriö. (2011, 6. huhtikuuta). E1 SUOMEN RAKENTAMISMÄÄRÄYSKOKOELMA – Rakennusten paloturvallisuus. https://www.finlex.fi/data/normit/37126-E1_2011-fi.pdf

Liitteet

Liite 1. P_0 - häviöarvostus 7500 €/kW ja P_k -häviöarvostus 2500 €/kW

Taulukko 12. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (kk)

| | | | |
|----------------------------|------|-------------------|-----|
| P_0 häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 630 |
| P_k häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|------------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P_0 (kW) | 0.540 | 0.540 | 0.990 | 0.990 |
| P_k (kW) | 4.600 | 4.600 | 7.100 | 7.100 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|--------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 13989.0 | 15017.0 | 15175.0 | 20500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 16786.8 | 18020.4 | 18210.0 | 24600.0 |
| P_0 -häviöarvostus (€) | 4050.0 | 4050.0 | 7425.0 | 7425.0 |
| P_k -häviöarvostus (€) | 11500.0 | 11500.0 | 17750.0 | 17750.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 32336.8 | 33570.4 | 43385.0 | 49775.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 34% | 54% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| Neste (l) | 435 | 435 | - | - |
| Pituus (mm) | 1300 | 1300 | 1630 | 1410 |
| Leveys (mm) | 840 | 840 | 880 | 806 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4300 | 2800 | 3130 | 2910 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3840 | 2340 | 2380 | 2306 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.512 | 6.552 | 7.4494 | 6.71046 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 24768 | 9828 | 11174.1 | 10065.69 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 57104.8 | 43398.4 | 54559.1 | 59840.7 |
| Hintaero | 32% | 0% | 26% | 38% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 13. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (kk)

| | | | |
|-------------------------------------|------|-------------------|-----|
| P ₀ häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 800 |
| P _k häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------------------|-------|------------|---------------|-----------|
| P ₀ (kW) | 0.585 | 0.585 | 1.170 | 1.170 |
| P _k (kW) | 6.000 | 6.000 | 8.000 | 8.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 15812.0 | 17003.0 | 17925.0 | 22625.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 18974.4 | 20403.6 | 21510.0 | 27150.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 4387.5 | 4387.5 | 8775.0 | 8775.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 15000.0 | 15000.0 | 20000.0 | 20000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 38361.9 | 39791.1 | 50285.0 | 55925.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 31% | 46% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|----------|
| Neste (l) | 503 | 503 | - | - |
| Pituus (mm) | 1390 | 1390 | 1700 | 1440 |
| Leveys (mm) | 870 | 870 | 1000 | 822 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4390 | 2890 | 3200 | 2940 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3870 | 2370 | 2500 | 2322 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.9893 | 6.8493 | 8 | 6.82668 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25483.95 | 10273.95 | 12000 | 10240.02 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 63845.9 | 50065.1 | 62285.0 | 66165.0 |
| Hintaero | 28% | 0% | 24% | 32% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 14. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (kk)

| | | | |
|-------------------------------------|------|-------------------|------|
| P ₀ häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 1000 |
| P _k häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------------------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P ₀ (kW) | 0.693 | 0.693 | 1.395 | 1.395 |
| P _k (kW) | 7.600 | 7.600 | 9.000 | 9.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 17195.0 | 18521.0 | 20125.0 | 26300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 20634.0 | 22225.2 | 24150.0 | 31560.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 5197.5 | 5197.5 | 10462.5 | 10462.5 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 19000.0 | 19000.0 | 22500.0 | 22500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 44831.5 | 46422.7 | 57112.5 | 64522.5 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 4% | 27% | 44% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|-----------|
| Neste (l) | 561 | 561 | - | - |
| Pituus (mm) | 1410 | 1410 | 1720 | 1530 |
| Leveys (mm) | 920 | 920 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4410 | 2910 | 3220 | 3030 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3920 | 2420 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 17.2872 | 7.0422 | 8.05 | 7.40835 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25930.8 | 10563.3 | 12075 | 11112.525 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 70762.3 | 56986.0 | 69187.5 | 75635.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 24% | 0% | 21% | 33% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 15. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (kk)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 1250 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.855 | 0.855 | 1.620 | 1.620 |
| Pk (kW) | 9.500 | 9.500 | 11.000 | 11.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 20534.0 | 22158.0 | 22350.0 | 29075.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 24640.8 | 26589.6 | 26820.0 | 34890.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 6412.5 | 6412.5 | 12150.0 | 12150.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 23750.0 | 23750.0 | 27500.0 | 27500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 54803.3 | 56752.1 | 66470.0 | 74540.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 4% | 21% | 36% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| Neste (l) | 686 | 686 | - | - |
| Pituus (mm) | 1510 | 1510 | 1760 | 1560 |
| Leveys (mm) | 1000 | 1000 | 980 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4510 | 3010 | 3260 | 3060 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4000 | 2500 | 2480 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 18.04 | 7.525 | 8.0848 | 7.4817 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 27060 | 11287.5 | 12127.2 | 11222.55 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 81863.3 | 68039.6 | 78597.2 | 85762.6 |
| | | | | |
| Hintaero | 20% | 0% | 16% | 26% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 16. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (kk)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 1600 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|--------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 1.080 | 1.080 | 1.980 | 1.980 |
| Pk (kW) | 12.000 | 12.000 | 13.000 | 13.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 23979.0 | 25928.0 | 25575.0 | 33500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 28774.8 | 31113.6 | 30690.0 | 40200.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 8100.0 | 8100.0 | 14850.0 | 14850.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 30000.0 | 30000.0 | 32500.0 | 32500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 66874.8 | 69213.6 | 78040.0 | 87550.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 3% | 17% | 31% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|---------|
| Neste (l) | 824 | 824 | - | - |
| Pituus (mm) | 1750 | 1750 | 1910 | 1620 |
| Leveys (mm) | 1030 | 1030 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4750 | 3250 | 3410 | 3120 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4030 | 2530 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 19.1425 | 8.2225 | 8.525 | 7.6284 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 28713.75 | 12333.75 | 12787.5 | 11442.6 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 95588.6 | 81547.4 | 90827.5 | 98992.6 |
| | | | | |
| Hintaero | 17% | 0% | 11% | 21% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 17. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (kk)

| | | | |
|-------------------------------------|------|-------------------|------|
| P ₀ häviöarvostus (€/kW) | 7500 | Power (kVA) | 2000 |
| P _k häviöarvostus (€/kW) | 2500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------------------|--------|---------------|---------------|-----------|
| P ₀ (kW) | 1.305 | 1.305 | 2.340 | 2.340 |
| P _k (kW) | 15.000 | 15.000 | 16.000 | 16.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 26881.0 | 29114.0 | 29825.0 | 39300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 32257.2 | 34936.8 | 35790.0 | 47160.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 9787.5 | 9787.5 | 17550.0 | 17550.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 37500.0 | 37500.0 | 40000.0 | 40000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 79544.7 | 82224.3 | 93340.0 | 104710.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 3% | 17% | 32% |

| | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Neste (l) | 944 | 944 | - | - |
| Pituus (mm) | 1870 | 1870 | 1980 | 1740 |
| Leveys (mm) | 1270 | 1270 | 1050 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4870 | 3370 | 3480 | 3240 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4270 | 2770 | 2550 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 20.7949 | 9.3349 | 8.874 | 7.9218 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitöaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 31192.35 | 14002.35 | 13311 | 11882.7 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 110737.1 | 96226.7 | 106651.0 | 116592.7 |
| | | | | |
| Hintaero | 15% | 0% | 11% | 21% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Liite 2. P_0 - häviöarvostus 5000 €/kW ja P_k -häviöarvostus 5000 €/kW

Taulukko 18. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (ps)

| | | | |
|----------------------------|------|-------------------|-----|
| P_0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 630 |
| P_k häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|------------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P_0 (kW) | 0.540 | 0.540 | 0.990 | 0.990 |
| P_k (kW) | 4.600 | 4.600 | 7.100 | 7.100 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|--------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 13989.0 | 15017.0 | 15175.0 | 20500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 16786.8 | 18020.4 | 18210.0 | 24600.0 |
| P_0 -häviöarvostus (€) | 2700.0 | 2700.0 | 4950.0 | 4950.0 |
| P_k -häviöarvostus (€) | 23000.0 | 23000.0 | 35500.0 | 35500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 42486.8 | 43720.4 | 58660.0 | 65050.0 |
| Hintaero | 0% | 3% | 38% | 53% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| Neste (l) | 435 | 435 | - | - |
| Pituus (mm) | 1300 | 1300 | 1630 | 1410 |
| Leveys (mm) | 840 | 840 | 880 | 806 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4300 | 2800 | 3130 | 2910 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3840 | 2340 | 2380 | 2306 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.512 | 6.552 | 7.4494 | 6.71046 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 24768 | 9828 | 11174.1 | 10065.69 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 67254.8 | 53548.4 | 69834.1 | 75115.7 |
| Hintaero | 26% | 0% | 30% | 40% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 19. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (ps)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|-----|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 800 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.585 | 0.585 | 1.170 | 1.170 |
| Pk (kW) | 6.000 | 6.000 | 8.000 | 8.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 15812.0 | 17003.0 | 17925.0 | 22625.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 18974.4 | 20403.6 | 21510.0 | 27150.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 2925.0 | 2925.0 | 5850.0 | 5850.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 30000.0 | 30000.0 | 40000.0 | 40000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 51899.4 | 53328.6 | 67360.0 | 73000.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 3% | 30% | 41% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|----------|
| Neste (l) | 503 | 503 | - | - |
| Pituus (mm) | 1390 | 1390 | 1700 | 1440 |
| Leveys (mm) | 870 | 870 | 1000 | 822 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4390 | 2890 | 3200 | 2940 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3870 | 2370 | 2500 | 2322 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.9893 | 6.8493 | 8 | 6.82668 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25483.95 | 10273.95 | 12000 | 10240.02 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 77383.4 | 63602.6 | 79360.0 | 83240.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 22% | 0% | 25% | 31% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 20. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (ps)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 1000 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.693 | 0.693 | 1.395 | 1.395 |
| Pk (kW) | 7.600 | 7.600 | 9.000 | 9.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 17195.0 | 18521.0 | 20125.0 | 26300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 20634.0 | 22225.2 | 24150.0 | 31560.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 3465.0 | 3465.0 | 6975.0 | 6975.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 38000.0 | 38000.0 | 45000.0 | 45000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 62099.0 | 63690.2 | 76125.0 | 83535.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 3% | 23% | 35% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|-----------|
| Neste (l) | 561 | 561 | - | - |
| Pituus (mm) | 1410 | 1410 | 1720 | 1530 |
| Leveys (mm) | 920 | 920 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4410 | 2910 | 3220 | 3030 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3920 | 2420 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 17.2872 | 7.0422 | 8.05 | 7.40835 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25930.8 | 10563.3 | 12075 | 11112.525 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 88029.8 | 74253.5 | 88200.0 | 94647.5 |
| | | | | |
| Hintaero | 19% | 0% | 19% | 27% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 21. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (ps)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 1250 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.855 | 0.855 | 1.620 | 1.620 |
| Pk (kW) | 9.500 | 9.500 | 11.000 | 11.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 20534.0 | 22158.0 | 22350.0 | 29075.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 24640.8 | 26589.6 | 26820.0 | 34890.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 4275.0 | 4275.0 | 8100.0 | 8100.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 47500.0 | 47500.0 | 55000.0 | 55000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 76415.8 | 78364.6 | 89920.0 | 97990.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 3% | 18% | 28% |

| | | | | |
|--|----------|---------|----------|----------|
| Neste (l) | 686 | 686 | - | - |
| Pituus (mm) | 1510 | 1510 | 1760 | 1560 |
| Leveys (mm) | 1000 | 1000 | 980 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4510 | 3010 | 3260 | 3060 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4000 | 2500 | 2480 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 18.04 | 7.525 | 8.0848 | 7.4817 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 27060 | 11287.5 | 12127.2 | 11222.55 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 103475.8 | 89652.1 | 102047.2 | 109212.6 |
| | | | | |
| Hintaero | 15% | 0% | 14% | 22% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 22. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (ps)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 1600 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|--------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 1.080 | 1.080 | 1.980 | 1.980 |
| Pk (kW) | 12.000 | 12.000 | 13.000 | 13.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 23979.0 | 25928.0 | 25575.0 | 33500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 28774.8 | 31113.6 | 30690.0 | 40200.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 5400.0 | 5400.0 | 9900.0 | 9900.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 60000.0 | 60000.0 | 65000.0 | 65000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 94174.8 | 96513.6 | 105590.0 | 115100.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 2% | 12% | 22% |

| | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Neste (l) | 824 | 824 | - | - |
| Pituus (mm) | 1750 | 1750 | 1910 | 1620 |
| Leveys (mm) | 1030 | 1030 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4750 | 3250 | 3410 | 3120 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4030 | 2530 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 19.1425 | 8.2225 | 8.525 | 7.6284 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 28713.75 | 12333.75 | 12787.5 | 11442.6 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 122888.6 | 108847.4 | 118377.5 | 126542.6 |
| | | | | |
| Hintaero | 13% | 0% | 9% | 16% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 23. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (ps)

| | | | |
|-------------------------|------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Power (kVA) | 2000 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 5000 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|--------|------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 1.305 | 1.305 | 2.340 | 2.340 |
| Pk (kW) | 15.000 | 15.000 | 16.000 | 16.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|----------|------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 26881.0 | 29114.0 | 29825.0 | 39300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 32257.2 | 34936.8 | 35790.0 | 47160.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 6525.0 | 6525.0 | 11700.0 | 11700.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 75000.0 | 75000.0 | 80000.0 | 80000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 113782.2 | 116461.8 | 127490.0 | 138860.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 2% | 12% | 22% |

| | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Neste (l) | 944 | 944 | - | - |
| Pituus (mm) | 1870 | 1870 | 1980 | 1740 |
| Leveys (mm) | 1270 | 1270 | 1050 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4870 | 3370 | 3480 | 3240 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4270 | 2770 | 2550 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 20.7949 | 9.3349 | 8.874 | 7.9218 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 31192.35 | 14002.35 | 13311 | 11882.7 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 144974.6 | 130464.2 | 140801.0 | 150742.7 |
| | | | | |
| Hintaero | 11% | 0% | 8% | 16% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Liite 3. P_0 - häviöarvostus 10000 €/kW ja P_k -häviöarvostus 1500 €/kW

Taulukko 24. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 630 kVA (sp)

| | | | |
|----------------------------|-------|-------------------|-----|
| P_0 häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 630 |
| P_k häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|------------|-------|------------|---------------|-----------|
| P_0 (kW) | 0.540 | 0.540 | 0.990 | 0.990 |
| P_k (kW) | 4.600 | 4.600 | 7.100 | 7.100 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|--------------------------|---------|------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 13989.0 | 15017.0 | 15175.0 | 20500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 16786.8 | 18020.4 | 18210.0 | 24600.0 |
| P_0 -häviöarvostus (€) | 5400.0 | 5400.0 | 9900.0 | 9900.0 |
| P_k -häviöarvostus (€) | 6900.0 | 6900.0 | 10650.0 | 10650.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 29086.8 | 30320.4 | 38760.0 | 45150.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 33% | 55% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| Neste (l) | 435 | 435 | - | - |
| Pituus (mm) | 1300 | 1300 | 1630 | 1410 |
| Leveys (mm) | 840 | 840 | 880 | 806 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4300 | 2800 | 3130 | 2910 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3840 | 2340 | 2380 | 2306 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.512 | 6.552 | 7.4494 | 6.71046 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 24768 | 9828 | 11174.1 | 10065.69 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 53854.8 | 40148.4 | 49934.1 | 55215.7 |
| Hintaero | 34% | 0% | 24% | 38% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 25. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 800 kVA (sp)

| | | | |
|-------------------------|-------|-------------------|-----|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 800 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.585 | 0.585 | 1.170 | 1.170 |
| Pk (kW) | 6.000 | 6.000 | 8.000 | 8.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 15812.0 | 17003.0 | 17925.0 | 22625.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 18974.4 | 20403.6 | 21510.0 | 27150.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 5850.0 | 5850.0 | 11700.0 | 11700.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 9000.0 | 9000.0 | 12000.0 | 12000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 33824.4 | 35253.6 | 45210.0 | 50850.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 34% | 50% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|----------|
| Neste (l) | 503 | 503 | - | - |
| Pituus (mm) | 1390 | 1390 | 1700 | 1440 |
| Leveys (mm) | 870 | 870 | 1000 | 822 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4390 | 2890 | 3200 | 2940 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3870 | 2370 | 2500 | 2322 |
| Turvaneliöt (m ²) | 16.9893 | 6.8493 | 8 | 6.82668 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25483.95 | 10273.95 | 12000 | 10240.02 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 59308.4 | 45527.6 | 57210.0 | 61090.0 |
| Hintaero | 30% | 0% | 26% | 34% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 26. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1000 kVA (sp)

| | | | |
|-------------------------|-------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 1000 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|-------|------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 0.693 | 0.693 | 1.395 | 1.395 |
| Pk (kW) | 7.600 | 7.600 | 9.000 | 9.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 17195.0 | 18521.0 | 20125.0 | 26300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 20634.0 | 22225.2 | 24150.0 | 31560.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 6930.0 | 6930.0 | 13950.0 | 13950.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 11400.0 | 11400.0 | 13500.0 | 13500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 38964.0 | 40555.2 | 51600.0 | 59010.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 32% | 51% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|-----------|
| Neste (l) | 561 | 561 | - | - |
| Pituus (mm) | 1410 | 1410 | 1720 | 1530 |
| Leveys (mm) | 920 | 920 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4410 | 2910 | 3220 | 3030 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 3920 | 2420 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 17.2872 | 7.0422 | 8.05 | 7.40835 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 25930.8 | 10563.3 | 12075 | 11112.525 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 64894.8 | 51118.5 | 63675.0 | 70122.5 |
| Hintaero | 27% | 0% | 25% | 37% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 27. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1250 kVA (sp)

| | | | |
|-------------------------------------|-------|-------------------|------|
| P ₀ häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 1250 |
| P _k häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------------------|-------|---------------|---------------|-----------|
| P ₀ (kW) | 0.855 | 0.855 | 1.620 | 1.620 |
| P _k (kW) | 9.500 | 9.500 | 11.000 | 11.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 20534.0 | 22158.0 | 22350.0 | 29075.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 24640.8 | 26589.6 | 26820.0 | 34890.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 8550.0 | 8550.0 | 16200.0 | 16200.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 14250.0 | 14250.0 | 16500.0 | 16500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 47440.8 | 49389.6 | 59520.0 | 67590.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 4% | 25% | 42% |

| | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| Neste (l) | 686 | 686 | - | - |
| Pituus (mm) | 1510 | 1510 | 1760 | 1560 |
| Leveys (mm) | 1000 | 1000 | 980 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4510 | 3010 | 3260 | 3060 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4000 | 2500 | 2480 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 18.04 | 7.525 | 8.0848 | 7.4817 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 27060 | 11287.5 | 12127.2 | 11222.55 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 74500.8 | 60677.1 | 71647.2 | 78812.6 |
| | | | | |
| Hintaero | 23% | 0% | 18% | 30% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 28. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 1600 kVA (sp)

| | | | |
|-------------------------|-------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 1600 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|--------|------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 1.080 | 1.080 | 1.980 | 1.980 |
| Pk (kW) | 12.000 | 12.000 | 13.000 | 13.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 23979.0 | 25928.0 | 25575.0 | 33500.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 28774.8 | 31113.6 | 30690.0 | 40200.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 10800.0 | 10800.0 | 19800.0 | 19800.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 18000.0 | 18000.0 | 19500.0 | 19500.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 57574.8 | 59913.6 | 69990.0 | 79500.0 |
| Hintaero | 0% | 4% | 22% | 38% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|---------|
| Neste (l) | 824 | 824 | - | - |
| Pituus (mm) | 1750 | 1750 | 1910 | 1620 |
| Leveys (mm) | 1030 | 1030 | 1000 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4750 | 3250 | 3410 | 3120 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4030 | 2530 | 2500 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 19.1425 | 8.2225 | 8.525 | 7.6284 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 28713.75 | 12333.75 | 12787.5 | 11442.6 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 86288.6 | 72247.4 | 82777.5 | 90942.6 |
| Hintaero | 19% | 0% | 15% | 26% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.

Taulukko 29. Muuntaja-aseman käyttökustannukset 2000 kVA (sp)

| | | | |
|-------------------------|-------|-------------------|------|
| P0 häviöarvostus (€/kW) | 10000 | Power (kVA) | 2000 |
| Pk häviöarvostus (€/kW) | 1500 | Vuokran hinta (€) | 5 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|---------|--------|---------------|---------------|-----------|
| P0 (kW) | 1.305 | 1.305 | 2.340 | 2.340 |
| Pk (kW) | 15.000 | 15.000 | 16.000 | 16.000 |

| | Öljy | Midel 7131 | Tyhjiövalettu | RESIBLOC® |
|-----------------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| Tuotteen hinta (€) | 26881.0 | 29114.0 | 29825.0 | 39300.0 |
| Suunnitteluhinta (€) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kokonaishinta (€) | 32257.2 | 34936.8 | 35790.0 | 47160.0 |
| P ₀ -häviöarvostus (€) | 13050.0 | 13050.0 | 23400.0 | 23400.0 |
| P _k -häviöarvostus (€) | 22500.0 | 22500.0 | 24000.0 | 24000.0 |
| Kokonaiskustannus (€) | 67807.2 | 70486.8 | 83190.0 | 94560.0 |
| | | | | |
| Hintaero | 0% | 4% | 23% | 39% |

| | | | | |
|--|----------|----------|---------|----------|
| Neste (l) | 944 | 944 | - | - |
| Pituus (mm) | 1870 | 1870 | 1980 | 1740 |
| Leveys (mm) | 1270 | 1270 | 1050 | 945 |
| Pituus + turva-alue (mm) | 4870 | 3370 | 3480 | 3240 |
| Leveys + turva-alue (mm) | 4270 | 2770 | 2550 | 2445 |
| Turvaneliöt (m ²) | 20.7949 | 9.3349 | 8.874 | 7.9218 |
| Vuokran hinta vuodessa per neliö (€/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Pitoaika / vuosia (a) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Lisäkustannus (€) | 31192.35 | 14002.35 | 13311 | 11882.7 |
| Todellinen kokonaiskustannus (€) | 98999.6 | 84489.2 | 96501.0 | 106442.7 |
| | | | | |
| Hintaero | 17% | 0% | 14% | 26% |

Muuntajan valmistuksessa käytettyjen materiaalien hinnat muuttuvat jatkuvasti. Tämä tutkimus ei ota huomioon materiaalien hintojen vaihtelua.