

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Jyri Leppilahti

**EKOSUUNNITTELUDIREKTIIVIN ALAISEN MUUNTAJA-ASETUKSEN  
VAIKUTUKSET SUOMESSA**

**Sähköverkon öljyeristeiset jakelu- ja päämuuntajat**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 14.1.2015

Työn valvoja

Professori Timo Vekara

Työn ohjaajat

DI Otso Takala

DI Raija Koivisto

## ALKULAUSE

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

Erityinen kiitos ohjaajana toimineelle Otso Takalalle diplomityöni ohjaamisesta ja avustamisesta sekä Esa Virtaselle mielenkiintoisesta aiheesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita työn teossa auttaneita Transformersin henkilökuntalaisia, erityisesti Fredrik Nybergiä asiantuntevista kommentteista. Yliopistosta haluan kiittää professori Timo Vekaraa työn valvonnasta, tarkastamisesta ja koko opintojen aikaisista arvokkaista kommentteista sekä Raija Koivistoa työn tarkastamisesta.

Lisäksi kiitän lämpimästi läheisiäni ja ystäviäni, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua koko opiskelujeni ajan.

Vaasassa 14.1.2015

Jyri Leppilahti

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	10
2 TEHOMUUNTAJA	12
2.1 Rakenne ja valmistus	14
2.2 Muuntajan häviöt	17
2.2.1 Sähköisen piirin häviöt	19
2.2.2 Muuntajasydämen häviöt	20
2.2.3 Eristykset ja säiliö	22
2.2.4 Häviöiden optimointi ja suunnittelu	22
3 MUUNTAJIA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ	24
3.1 Ekosuunnitteludirektiivi	25
3.1.1 Tavoitteet, soveltamisala ja sisältö	26
3.1.2 Vaatimukset	27
3.2 Komission asetus n:o 548/2014 muuntajille	29
3.2.1 Asetuksen soveltamisala ja sisältö	30
3.2.2 Vaatimukset	31
4 VALMISTUS JA TEKNISET RATKAISUT	34
4.1 Paras saatavilla oleva tekniikka, BAT	35
4.2 Paras ei vielä saatavilla oleva tekniikka, BNAT	39
4.3 ABB:n Suomessa valmistamat öljyeristeiset muuntajat	40
5 ASETUKSEN VAIKUTUKSET HÄVIÖISTÄ AIHEUTUVIIN PÄÄSTÖIHIN	43
5.1 Sähkönkulutus Suomessa	43
5.2 Verkostohäviöt ja muuntajien osuus	45
5.3 Muuntajien häviöistä aiheutuvat päästöt	50
5.4 Verkon muuntajien PEI ja häviötehot	51
5.4.1 Tehomuuntajat	51
5.4.2 Jakelumuuntajat	54
5.5 Asetuksen n:o 548/2014 vaikutus päästöihin	58
5.5.1 Tehomuuntajat	58
5.5.2 Jakelumuuntajat	59
6 ASETUKSEN VAIKUTUKSET KUSTANNUKSIIN	62
6.1 Kustannukset muuntajien valmistajille	62
6.2 Kustannukset muuntaja-asiakkaille ja muuntajien omistajille	63

7	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	67
7.1	Tulosten analysointi	67
7.2	Pohdintaa asetuksesta sekä jatkotutkimusmahdollisuuksista	69
8	YHTEENVETO	71
	LÄHDELUETTELO	75
	LIITTEET	81
	LIITE 1. Vaatimukset keskikokoisille muuntajille	81
	LIITE 2. Vaatimukset suurille muuntajille	85
	LIITE 3. Aiempien sukupolvien standardimuuntajien suorituservoja	86

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\alpha$	Lämpötilakerroin, materiaalille ominainen
$\mu$	Permeabiliteetti
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti
$\mu_r$	Suhteellinen permeabiliteetti, materiaaliriippuva
$\rho$	Resistiivisyys
$\rho_0$	Resistiivisyys vertailulämpötilassa
$\sigma$	Ominaissähkönjohtavuus, materiaaliriippuva
$\varphi$	Virran ja jännitteen välinen vaihesiirto
$\Phi$	Magneettivuo
$\omega$	Kulmataajuus
$A$	Poikkipinta-ala
$A_m$	Magneettivuon kulkutien poikkipinta-ala
$B_p$	Vuontiheyden huippuarvo
$d$	Sydänlevyn paksuus
$E_i$	Muuntajan ensiö- tai toisiokäämin sähkömotorinen voima
$f$	Taajuus
$H$	Magneettikentän voimakkuus
$I$	Sähkövirran voimakkuus
$I_0$	Tyhjäkäyntivirta
$I_{Fe}$	Rautahäviövirta
$I_i$	Ensiö- tai toisiovirta
$I_m$	Magnetointivirta
$I_v$	Vaihevirta
$l$	Virran kulkutien pituus
$l_m$	Magneettivuon kulkutien pituus
$m$	Muuntajan muuntosuhde
$N_i$	Muuntajan ensiö- tai toisiokäämin kierrosluku
$P$	Pätöteho
$P_0$	Tyhjäkäyntihäviöteho
$P_{0n}$	Nimellistyhjäkäyntihäviöteho

$P_{c0}$	Jäähdytysjärjestelmän sähköteho
$P_{Cu}$	Kuparihäviöteho
$P_{Cu_{15}}$	Kuparihäviöteho lämpötilassa 15 °C
$P_e$	Pyörrevirtahäviöteho
$P_{e_{15}}$	Pyörrevirtahäviöteho lämpötilassa 15 °C
$P_h$	Häviöteho
$P_{hmax}$	Huippuhäviöteho
$P_k$	Kuormitushäviöteho
$P_{kn}$	Nimelliskuormitushäviöteho
$R$	Kokonaisresistanssi
$R_{DC}$	Tasavirtaresistanssi
$R_{Fe}$	Rautahäviöitä kuvaava resistanssi
$R_i$	Ensiö- tai toisioresistanssi
$R_m$	Reluktanssi
$S$	Näennäisteho
$S_r$	Nimellinäennäisteho
$T$	Lämpötila
$t_h$	Häviöiden huipunkäyttöaika
$U$	Jännite
$U_i$	Ensiö- tai toisiojännite
$U_m$	Vuojännite
$U_{ni}$	Ensiö- tai toisiokäämin nimellisjännite
$V$	Sydämen tilavuus
$W_h$	Energiahäviö
$X_m$	Magnetointireaktanssi
$X_{\sigma i}$	Ensiö- tai toisiohajavuota kuvaava reaktanssi
$Z_{2L}$	Ensiöön redusoitu kuormaimpedanssi
$z_L$	Suhteellinen kuorma
$\Delta T$	Lämpötilaero

### *Lyhenteet*

A Ilma (Air)

ABB	Asea Brown Boveri
BAT	Best Available Technology, paras saatavilla oleva tekniikka
BC	Base-case, perustapaus
BNAT	Best Not yet Available Technology, paras ei vielä saatavilla oleva tekniikka
CE	Conformité Européene, vaatimustenmukaisuusmerkintä
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
DER	Distributed Energy Resources, hajautetut energialähteet
EU	Euroopan unioni
EY	Euroopan yhteisö
F	Pakotettu kierto (Forced flow)
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen standardoimisjärjestö
N	Luonnollinen kierto (Natural flow)
O	Öljy (Oil)
PEI	Peak Efficiency Index, huippuhyötysuhdeindeksi
PJ	Pienjännite
UM	Ulkoministeriö

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta****Tekijä:**

Jyri Leppilahti

**Diplomityön nimi:**

Ekosuunnitteludirektiivin alaisen muuntaja-asetuksen vaikutukset Suomessa: Sähköverkon öljyeristeiset jakelu- ja päämuuntajat

**Valvoja:**

Professori Timo Vekara

**Ohjaajat:**

Diplomi-insinööri Otso Takala

Diplomi-insinööri Raija Koivisto

**Tutkinto:**

Diplomi-insinööri

**Oppiaine:**

Sähkötekniikka

**Opintojen aloitusvuosi:**

2009

**Diplomityön valmistumisvuosi:**

2015

**Sivumäärä: 87**

---

**TIIVISTELMÄ**

Euroopan Unionin ekosuunnitteludirektiivin tavoitteena on vähentää energiaan liittyvien tuotteiden kasvihuonekaasupäästöjä ja pienentää hiilijalanjälkeä. Direktiivin nojalla säädetään tuoteryhmäkohtaisia täytäntöönpanotoimenpiteitä, asetuksia. Toukokuussa 2014 julkaistu asetus muuntajat-tuoteryhmälle koskee kaikkia 50 hertsin jakelu- ja suurmuuntajia pois lukien erikseen listatut erikoismuuntajat.

Tässä diplomityössä selvitetään ekosuunnitteludirektiivin sekä sen alaisen muuntaja-asetuksen keskeinen sisältö, tavoitteet sekä vaatimukset. Lisäksi tarkastellaan näiden vaatimusten mahdollisia vaikutuksia muuntajien valmistukseen sekä muuntajien häviö-energian kulutuksesta aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin Suomessa. Lopuksi käsitellään mahdollisia vaikutuksia kustannuksiin niin valmistajan kuin asiakkaiden osalta. Työssä hyödynnetään raportteja, tutkimuksia sekä kirjallisuutta. Työssä keskitytään sähköverkon öljyeristeisiin jakelu- ja tehomuuntajiin.

Työn tuloksena saadaan muodostettua käsitys edellä kuvatuista asioista. Koska muuntajissa on jo ennestään erittäin korkeasta hyötysuhteesta huolimatta suuri energiankulutuksen säästöpotentiaali, säädetään asetuksella suurimmat sallitut häviöt taikka vähimmäishyötysuhdevaatimus. Sähköverkon päämuuntajia ABB:n osalta asetus ei kuitenkaan suoraan kosketa, sillä uusimmat tehomuuntajat täyttävät jo asetuksen myöhemmänkin vaiheen (*Tier 2*) vaatimukset. Jakelumuuntajien häviöistä aiheutuviin päästöihin asetuksella on puolestaan pienentävä vaikutus, sillä vaikka se sallii aluksi nykyaikaisia jakelumuuntajia korkeammat kuormitushäviöt, tulee tyhjäkäyntihäviöitä vähentää reilusti.

Sähköverkon päämuuntajien kustannuksiin asetuksella ei ole suoraa vaikutusta. Välillisiä vaikutuksia saattaa syntyä eräiden materiaalien mahdollisesta kysynnän ja sitä kautta hinnan kasvusta. Jakelumuuntajien osalta asetuksella on vaikutusta sekä hankintahintoihin että elinkaarikustannuksiin. Vaikka hankintahinnat nousevat, häviöiden pienentämisen myötä elinkaarikustannukset pienenevät suurimmalla osalla jakelumuuntajista.

---

**AVAINSANAT:** Tehomuuntaja, ekosuunnitteludirektiivi, asetus, päästöt, kustannukset

---

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

Jyri Leppilahti

**Topic of the Thesis:**

Effects of the transformer Regulation under the ecodesign directive in Finland: Oil immersed distribution and power transformers in the electricity grid

**Supervisor:**

Professor Timo Vekara

**Instructors:**

M.Sc. (Tech.) Otso Takala

M.Sc. (Tech.) Raija Koivisto

**Degree:**

Master of Science in Technology

**Major of Subject:**

Electrical Engineering

**Year of Entering the University:** 2009**Year of Completing the Thesis:** 2015**Pages:** 87

---

**ABSTRACT**

The European Community's Ecodesign Directive aims to decrease greenhouse gas emissions of energy related products and to reduce the carbon footprint. Implementing measures, Regulations, are adopted under Directives. Regulation published in May 2014 with regard to small, medium and large power transformer applies to all 50 Hz distribution and power transformers, excluding special transformers listed separately.

This thesis clarifies the main content, the targets and the requirements of the Ecodesign Directive and the transformer Regulation adopted under the Directive. In addition, potential impacts of these requirements in the transformer manufacturing and to the carbon dioxide emissions in Finland caused by transformer losses are examined. Finally, potential impacts to manufacturer's and client's costs are considered. The work utilizes reports, studies and literature. The work will focus on the oil insulated distribution and power transformers of the electricity grid.

As a result, a conception of the issues described above is formed. Since transformers have large energy savings potential in spite of already very high efficiency, the Regulation determines maximum allowable losses or minimum peak efficiency index. The Regulation has no immediate impact for the main transformers of the grid because newest power transformers already meet the Tier 2 requirements. Emissions caused by distribution transformer losses are reduced because of very strict no-load loss levels, even though load losses can at first be higher than in a modern distribution transformer.

The Regulation doesn't have a direct impact on power transformer's costs. Indirect impacts may arise from the increase of demand and prices of certain materials. For distribution transformers, the Regulation has an impact on purchase prices as well as on life-cycle costs. Although the purchase prices are higher, the life cycle costs are reduced for most of the distribution transformers because of the reduction of losses.

---

**KEYWORDS:** Power transformer, ecodesign directive, regulation, emissions, costs

## 1 JOHDANTO

Kasvihuonekaasujen vähentämiseksi ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi Euroopan unioni on sitoutunut erilaisiin toimenpiteisiin ja tavoitteisiin. Näiden tavoitteiden saavuttamisessa energiaan liittyvillä tuotteilla, esimerkiksi tehomuuntajilla, on tärkeä rooli. Vaikka muuntajan hyötysuhde onkin jo nykyään hyvin korkea, on niissä silti merkittävä energiankulutuksen säästöpotentiaali. Suunnitteluvaiheessa vaikutetaan suurimpaan osaan tuotteen elinkaaren aikaisista kustannuksista ja ympäristövaikutuksista, joten muuntajien kaltaisissa pitkäikäisissä tuotteissa nämä tulisi ottaa mahdollisimman tarkasti huomioon edullisen hankintahinnan sijasta. Markkinavoimat eivät kuitenkaan ole tähän ohjanneet, joten energiatehokkaampien tuotteiden markkinoille pääsyn vauhdittamiseksi Euroopan unionissa on nähty tarpeelliseksi säätää direktiivejä ja asetuksia, jotka ohjaavat ympäristöystävällisempien tuotteiden suunnitteluun. Lisäksi direktiiveillä ja asetuksilla edistetään unionin sisämarkkinoiden toimintaa, koska niiden avulla yhdenmukaistetaan kansallisia lainsäädäntöjä.

Suuria, keskikokoisia ja pieniä muuntajia koskeva Euroopan komission asetus määrittää muuntajan koosta riippuen sen korkeimmat sallitut häviöt tai huippuhyötysuhdeindeksin vähimmäistason. Euroopan unionin alueella ei asetuksen voimaantulon jälkeen saa enää myydä muuntajia, jotka eivät täytä asetuksen vaatimuksia. Muuntajien häviöiden optimointi riippuu tuotteen käyttötarkoituksesta ja vaatii aina kompromisseja. Asetuksen pääpaino on kuitenkin muuntajien tyhjäkäyntihäviöiden pienentämisessä, sillä niitä muodostuu aina muuntajan ollessa kytkettynä verkkoon. Lisäksi jakelumuuntajien häviöraajat ovat tiukat häviöiden kertaantumisen vuoksi. Verkon hännillä kuluva häviöteho joudutaan syöttämään verkkoon, mikä puolestaan kasvattaa muun verkon osien häviöitä, joten on ensisijaisen tärkeää pienentää häviöitä nimenomaan verkon loppupäästä.

Äskettäin säädetyllä asetuksella on todennäköisesti vaikutuksia muuntajien valmistukseen ja teknisiin ratkaisuihin ja sitä kautta hinnoitteluun sekä muuntajien häviöistä aiheutuviin päästöihin. Tämän työn tarkoituksena onkin selvittää raporttien, tutkimusten sekä kirjallisuuden avulla mitä vaikutuksia asetuksella on edellä mainittuihin asioihin

Suomessa. Työssä keskitytään sähkönjakeluverkon öljyeristeisiin jakelu- ja päämuuntajiin.

Tämä työ koostuu kahdeksasta osasta. Johdannon jälkeen luvussa 2 käsitellään yleisesti tehomuuntajaa sekä kerrotaan sen häviöiden muodostumisesta ja niiden vaikutuksista tuotesuunnitteluun. Seuraavassa luvussa avataan muuntajia koskevaa Euroopan unionin lainsäädäntöä; miksi se on säädetty, mitä se pitää sisällään ja mitkä ovat sen vaatimukset. Neljännessä luvussa käsitellään säädetyn asetuksen vaikutuksia muuntajien teknisiin ratkaisuihin niin saatavilla olevien kuin tulooan tekevienkin tekniikoiden osalta. Lisäksi käydään läpi, mitä vaikutuksia asetuksella on ABB:n Suomessa valmistettaviin muuntajiin. Viidennessä luvussa selvitetään verkostohäviöiden suuruus sekä muuntajien osuus kyseisistä häviöistä ja muuntajien häviöistä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Lisäksi tarkastellaan verkkoon asennettujen muuntajien huippuhyötysuhdeindeksejä ja häviötehoja sekä selvitetään asetuksen vaikutuksia muuntajien päästöihin. Kuudennessa luvussa pohditaan asetuksesta aiheutuvia kustannuksia niin muuntajien valmistajille kuin asiakkaillekin. Seitsemännessä luvussa on esitetty pohdintaa työstä ja sen tuloksista sekä mahdollisista muista keinoista vähentää muuntajien häviöistä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Kahdeksas ja samalla viimeinen luku on yhteenveto työstä.

## 2 TEHOMUUNTAJA

Kolmivaihejärjestelmässä häviöteho  $P_h$  riippuu vaihevirrasta  $I_v$  neliöllisesti yhtälön 1 mukaisesti

$$P_h = 3RI_v^2, \quad (1)$$

missä  $R$  on vaihevirran kulkutien kokonaisresistanssi. Kokonaisresistanssi sisältää tasavirran ja vaihtovirran aiheuttamat komponentit. Vaihtovirtaresistanssi riippuu pyörrevirroista ja se määritetään kokeellisesti. Tasavirtaresistanssi  $R_{DC}$  puolestaan riippuu virran kulkutien pituudesta  $l$  ja poikkipinta-alasta  $A$  sekä materiaalin resistiivisyydestä  $\rho$

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A}. \quad (2)$$

Resistiivisyys riippuu lämpötilasta yhtälön 3 mukaisesti

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (3)$$

missä  $\rho_0$  on aineen resistiivisyys vertailulämpötilassa,  $T$  lämpötila,  $\alpha$  resistiivisyyden lämpötilakerroin ja  $\Delta T$  lämpötilaero. Sähköverkossa siirrettävä näennäisteho  $S$  on suoraan verrannollinen päävirtaan  $I$  ja pääjännitteeseen  $U$

$$S = \sqrt{3}UI \quad (4)$$

ja edelliseen perustuen kolmivaiheverkon siirtopäätöteho  $P$  voidaan laskea yhtälöllä

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (5)$$

missä  $\varphi$  on virran ja jännitteen välinen vaiheensiirtokulma. Siirrettävän tehon pysyessä vakiona jännitettä kasvatettaessa virta pienenee ja samoin tehohäviö  $P_h$  pienenee. Siirrettäessä sähköä korkeilla jännitetasoilla säästetään häviökustannuksissa ja virtajohdinten materiaalikustannuksissa, mutta vastaavasti korkeat jännitteet aiheuttavat suurempia jännitekestoisuusvaatimuksia verkon muille osille, mikä puolestaan nostaa kustannuk-

sia. Teho siirretäänkin kokonaistaloudellisesti parhailla, mahdollisimman suurilla standardijännitetasoilla. (Ristamäki 2012: 4.)

Muuntaja on staattinen sähkölaite, joka muuntaa vaihtosähköjärjestelmän jännitteitä ja virtoja kahden tai useamman käämityksen välillä sähkömagneettisen induktion avulla (Elovaara & Haarla 2011: 141). Tehomuuntajilla vaihtosähköä muunnetaan siirto- ja käyttöjännitetasoille; niitä on kaikkien sähköverkon jänniteportaiden välillä sekä esimerkiksi teollisuuden ja rautateiden sähköjärjestelmissä. Muuntajia voidaan jännitteiden ja virtojen muuntamisen lisäksi käyttää myös jännitteen säätöön, jännitteen vaihekulman muuttamiseen ja säätämiseen, galvaanisen erotuksen aikaansaamiseen sekä tietyissä tapauksissa vaiheluvun muuttamiseen.

Muuntajan ensiökäämissä kulkeva vaihtovirta  $I_1$  indusoi rautasydämeen muuttuvan magneettivuon  $\Phi$

$$\Phi = \frac{N_1 I_1}{R_m}, \quad (6)$$

missä  $N_1$  on ensiökäämin johdinkierrosten lukumäärä ja  $R_m$  on magneettipiirin reluktanssi. Magneettivuo indusoi ensiökäämiin sähkömotorisen voiman, smv:n,  $E_1$

$$E_1 = 2\pi f N_1 \Phi, \quad (7)$$

missä  $f$  on taajuus. Tämä smv on ideaalitalanteessa yhtä suuri, mutta vastakkaisuuntainen kuin jännite  $U_1$ . Samalla magneettivuo indusoi toisiokäämiin smv:n  $E_2$

$$E_2 = U_2 = 2\pi f N_2 \Phi, \quad (8)$$

missä  $U_2$  on toision jännite ja  $N_2$  toision johdinkierrosluku. Ensiökäämi on se, johon teho johdetaan sähkölähteestä ja toisiokäämi se, josta tehoa otetaan kuormitukseen. Ideaalitalanteessa ensiössä ja toisiossa kulkee sama magneettivuo, jolloin näiden jännitteiden tai johdinkierroslukujen suhteesta saadaan muuntajan muuntosuhde  $m$

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (9)$$

## 2.1 Rakenne ja valmistus

Muuntaja koostuu muuntajan varsinaisen tehtävän suorittavasta aktiiviosasta, johon kuuluu rautasydän ja käämitykset, sekä passiiviosasta, johon kuuluu muun muassa muuntajaöljy, eristykset, tukirakenteet, jäähdytyslaitteet sekä säiliö.

Muuntajasydän koostuu pylväistä sekä ylä- ja alaikeestä ja se valmistetaan tavallisesti ohuista, noin 0,2–0,3 mm vahvuisista kidesuunnatuista rautalevyistä. Jakelumuuntajissa on yleistymässä amorfinen sydänmateriaali. Amorfisella aineella ei ole säännöllistä atomijärjestystä, koska valmistusprosessin vuoksi kiinteälle aineelle tyypillinen kiderakenne puuttuu kokonaan. Tästä syystä sillä on erittäin pienet häviöt ja erinomaiset magneettiset ominaisuudet (Elovaara ym. 2011: 142). Normaalin sydänlevyn magneettiset ominaisuudet ovat erittäin hyvät silloin, kun magneettivuo kulkee levyn valssaussuuntaan. Häviöiden minimoimiseksi rautalevyt on päällystetty hyvin ohuella eristekerroksella (ABB 2004: 159). Levyt leikataan rainarullista oikean muotoisiksi, tyypillisesti levyjen päät ovat 45 asteen kulmassa, jotta magneettivuon kulku levyjen liitoskohdissa saadaan mahdollisimman optimaaliseksi, ja täten magnetoimisvirta ja tehohäviöt ovat mahdollisimman pienet (Aura & Tonteri 1996: 280). Leikkaamisen jälkeen levyt ladotaan sydämeksi erilaisia limitystapoja käyttäen. Nykyään yleisimmin on käytössä niin sanottu step-lap -ladonta. Sydämen poikkileikkaus voi olla soikea, pyöreä tai kulmikas. Isommissa muuntajissa se on yleensä pyöreä, jotta tilan ja materiaalien käyttö olisi mahdollisimman tehokasta (Winders 2002: 18). Valmiiksi ladotut sydänpylväät lakaataan tai liimataan leikkauspinnoilta sydämen lujuuden parantamiseksi. Muuntajasydämen valmistuksessa pyritään pitämään levyjen mekaaniset jännitykset mahdollisimman pieninä sekä vuontiheys tasaisena kaikkialla sydämessä (Tekniikan käsikirja 1973: 618).

Muuntajan sydänmalli riippuu vaiheluvusta ja se voi olla pylväs- tai vaippatyypinen. Pylväsmalli on yksinkertaisempi ja jäähdytyksen kannalta edullisempi kuin vaippamalli, mutta vaiheiden vuosymmetria saavutetaan vaippamallilla paremmin, koska yhden vai-

heen magneettivuolla on toisista vaiheista riippumaton paluutie (Ristamäki 2012: 5; Elovaara ym. 2011: 142).

Käyttötilanteissa, joissa syöttöjännite sisältää tasakomponenttia, kuten esimerkiksi taajuusmuuttajakäytöissä, muuntajan rautasydämen kyllästymistä voidaan ehkäistä muodostamalla siihen ilmväli. Magneettinen vastus, reluktanssi, on ilmassa huomattavasti suurempi kuin raudassa, jolloin ilmvälillisessä muuntajassa vuontiheyden kasvuun vaaditaan huomattavasti suurempi virta kuin ilmvälittömässä muuntajassa. Näin ollen sydän ei kyllästy yhtä helposti. (Ristamäki 2012: 5.) Reluktanssi  $R_m$  riippuu magneettivuon kulkutien pituudesta  $l_m$ , poikkipinta-alasta  $A_m$  ja permeabiliteetista  $\mu$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu A_m}. \quad (10)$$

Permeabiliteetti on aineen magneettisia ominaisuuksia kuvaava suure, joka riippuu magneettikentän voimakkuudesta  $H$ . Se voidaan ilmoittaa tyhjiön permeabiliteetin  $\mu_0$  ja kullekin aineelle yksilöllisen, suhteellisen permeabiliteetin  $\mu_r$  tulona

$$\mu(H) = \mu_0 \mu_r(H). \quad (11)$$

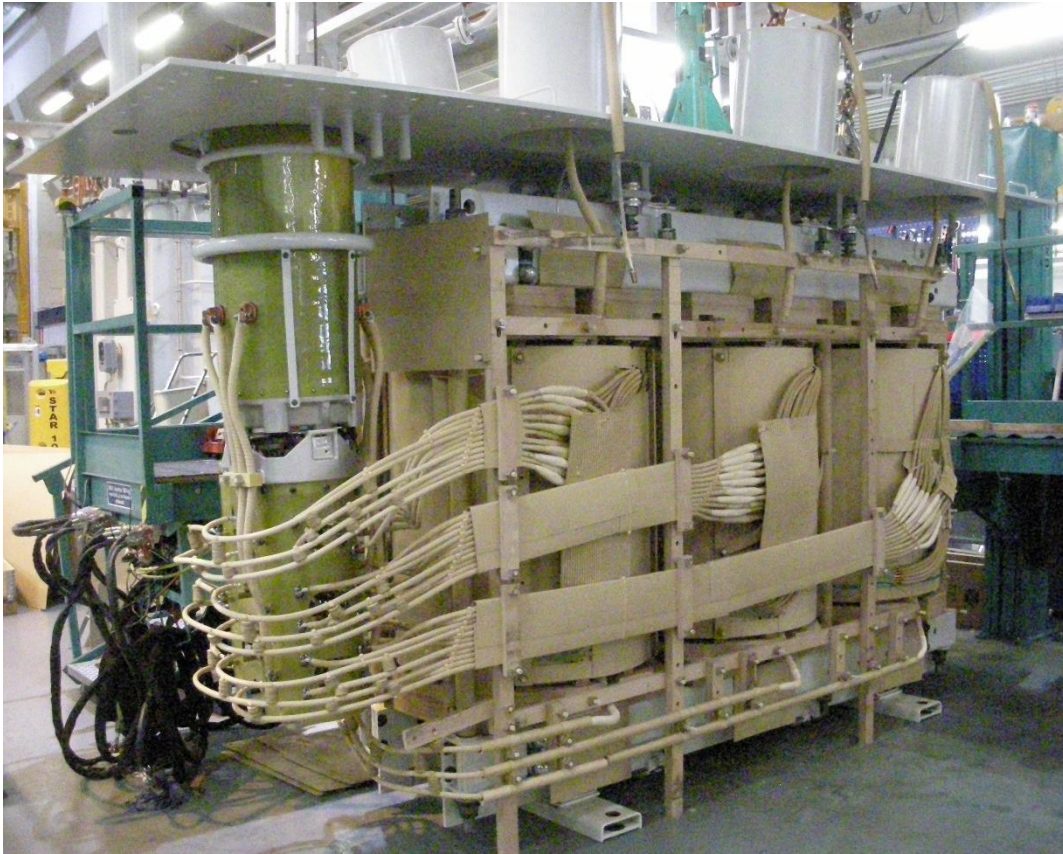
Muuntajan käämit voidaan käämiä erikseen ja laskea sitten pylvälle sydäneristyksen päälle, tai vaihtoehtoisesti käämit voidaan käämiä suoraan pylvälle ja asetella pylvääit sitten alaikeelle. Jälkimmäinen vaihtoehto koskee lähinnä pienempiä muuntajia. Ennen käämejä asennetaan alapään käämipöydät ja päätyeristysvälikkeet paikalleen. Yleensä kunkin vaiheen käämit laitetaan sisäkkäin kyseisen vaiheen pylvään ympärille, koska näin saadaan minimoitua epäedulliset voimavaikutukset sekä hajavuot. Käämitysten väliin asennetaan prespaanilieriöitä ja -kiiloja eristykseksi sekä muodostamaan öljykanavia erityistä ja jäähdytystä varten. Eristykset käämien sisällä, eri käämien välillä sekä maata vasten mitoitetaan suurimpien jänniterasitusten mukaan. Alajännitekäämi sijoitetaan yleensä sisemmäksi lähemmäksi sydäntä, koska se on helpompi eristää maadoitetusta sydäimestä kuin yläjännitekäämi. Sydän maadoitetaan sähkömagneettisten häiriöiden minimoimiseksi. Yhtä vaihetta kohden on vähintään kaksi peruskäämitystä, ylä- ja alajännitekäämitys, mutta erikoismuuntajissa voi olla useampia alajännitekäämi-

tyksiä. Käämitykset voivat koostua yhdestä tai useammasta osakäämistä. (ABB 2007: 17; Ristamäki 2012: 6.)

Käämit valmistetaan puhtaasta kuparista tai sähköalumiinista. Johtimet ovat yleensä suorakaiteen muotoisia, jotta käytettävissä oleva tila saadaan hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti. Suurilla virroilla, ja siten siis suurilla poikkipinnoilla, johtimet jaetaan kahteen tai useampaan osajohtimeen pyörrevirtahäviöiden pienentämiseksi ja käämintäytön helpottamiseksi. Osajohtimista muodostettuja johdinnippuja on saatavilla valmiina tehdasvalmisteisina nippujohtimina. (ABB 2004: 80.) Käämityyppejä on useita, yleisimmät ovat lieriö-, ruuvi-, laippa- ja nauhakäämit. Johdinkierrosten lukumäärä ja käämissä kulkeva virta määräävät yleensä käytettävän käämityyppin.

Verkossa tapahtuvien jännitevaihteluiden pienentämiseksi muuntajan jännitettä on voitava säätää. Jännitettä säädetään muuntajan muuntosuhdetta  $m$  muuttamalla. Yleensä muutetaan yläjännitekäämityksen johdinkierrosta  $N_1$ , koska yläjännitepuolen virta on pienempi kuin alajännitepuolen. Jännitteen säätöön käytetään joko käämikytöntä tai väliottokytöntä. Käämikytkimellä voidaan muuttaa muuntajan muuntosuhdetta muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu, joten se soveltuu jatkuvaan jännitteen säätöön. Väliottokytkimellä muuntosuhdetta voidaan muuttaa vain muuntajan ollessa jännitteetön, ja sitä käytetäänkin lähinnä muuntajissa, joiden jännite pysyy suhteellisen tasaisena. Käämikytinkin toimii tavallisesti moottoriohjaimella, väliottokytöntä ohjataan puolestaan käsin. (Aura ym. 1996: 282–283.)

Käämien asennuksen jälkeen asennetaan yläpään käämipöydät ja päätyeristysvälkkeet, ladotaan sydämen yläies, kiinnitetään yläpuristuspaalkit, tehdään muuntajan sisäinen johdotus sekä lasketaan muuntajan kansi aktiiviosan päälle. Tämä on esitetty kuvassa 1. Tämän jälkeen aktiiviosa viedään uuniin, jotta eristysosien jännitekestoisuutta heikentävä kosteus saadaan minimiin. Kuivauksella parannetaan myös muuntajan mekaanista oikosulkulujuutta. Kuivaamisen jälkeen aktiiviosa lasketaan säiliöön ja säiliö täytetään tyhjiössä öljyllä. Tyhjiöllä pyritään estämään ilman jääminen öljyn sekaan, ja lisäksi eristemateriaalien impregnoituminen öljyllä on huomattavasti tehokkaampaa tyhjiössä kuin normaalissa ilmanpaineessa. (ABB 2007: 21–22, 24.)



**Kuva 1.** Kolmivaihemuuntajan aktiiviosa.

Edellä käsiteltujen lisäksi muuntajaan kuuluu sen mallista ja käyttötarkoituksesta riippuen lukuisia muita komponentteja ja varusteita. Yleisimpiä näistä ovat paisuntasäiliö, virtamuuntajat, kaasurele, ylipaineventtiili, lämpömittari, ilmankuivain, käämin lämpötilan kuvaaja sekä öljynkorkeuden osoitin.

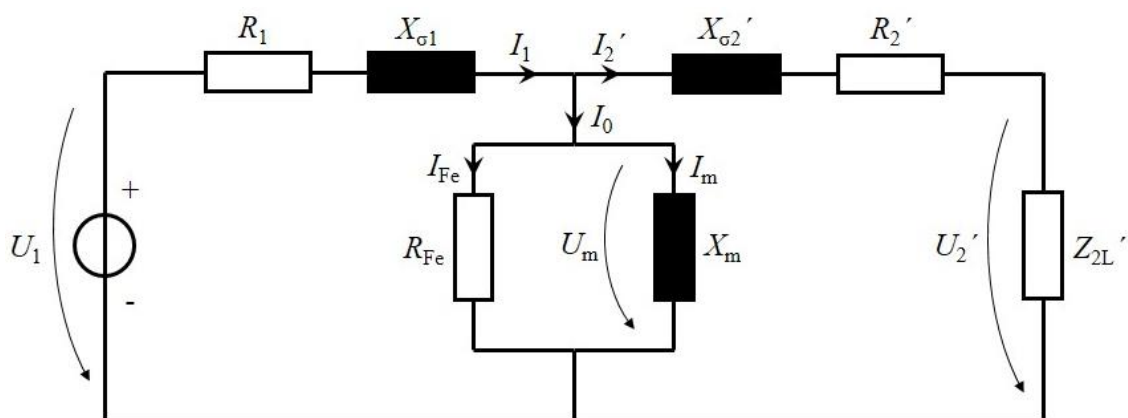
## 2.2 Muuntajan häviöt

Tehomuuntajan hyötysuhde on nykyään tyypillisesti välillä 99,0–99,5 % (ABB 2007: 8). Häviöt syntyvät pääosin muuntajan rautasydämessä ja käämityksissä, mutta jonkin verran häviöitä muodostuu myös muuntajan eristyspiirissä sekä jäähdytysjärjestelmässä. Häviöt jaetaan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Tyhjäkäyntihäviöistä käytetään myös nimitystä rautahäviöt ja kuormitushäviöistä nimitystä kuparihäviöt. Tyhjäkäyntihäviöt ovat vakiosuuruiset, mutta kuormitushäviöt riippuvat kuormituksesta neliöllisesti yhtä-

lön 1 mukaisesti. Muuntajan häviöt aiheuttavat rakenteiden lämpenemistä, rajoittavat kuormitusta ja lisäävät jäähdytyskustannuksia (Ristamäki 2012: 7).

Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt syntyvät pääosin muuntajan rautasydämessä. Niiden suuruuteen vaikuttavat vuontiheys ja sydämen ominaisuudet eli sydänlevyjen materiaali sekä niiden valmistus-, leikkaus- ja latomistapa. Pieni vuontiheys tarkoittaa pieniä tyhjäkäyntihäviöitä, mutta valmistuskustannukset kasvavat verrattuna suurempaan vuontiheyteen (ABB 2007: 8). Tyhjäkäyntihäviöiksi luetaan häviöt magneetti- ja eristyspiireissä sekä tyhjäkäyntivirran aiheuttamat virtalämpöhäviöt. Muut virtalämpöhäviöt sekä johtimien pyörrevirtahäviöt lasketaan kuormitushäviöiksi (Franklin & Franklin 1983: 91).

Muuntajaa voidaan kuvata kuvan 2 mukaisella sijaiskytkennällä, jossa on huomioitu myös muuntajan tyhjäkäyntivirta  $I_0$ , joka jakautuu edelleen sydämen pätötehohäviöitä kuvaavan resistanssin  $R_{Fe}$  läpi kulkevaksi rautahäviövirraksi  $I_{Fe}$  sekä päävuon synnyttävän magnetointireaktanssin  $X_m$  läpi kulkevaksi magnetointivirraksi  $I_m$ . Ension resistanssia ja hajareaktanssia kuvaavat komponentit  $R_1$  ja  $X_{\sigma 1}$ , toision vastaavia suureita komponentit  $R_2'$  ja  $X_{\sigma 2}'$  ja kuormaimpedanssia komponentti  $Z_{2L}'$ . Muita kuvassa näkyviä suureita ovat ensiojännite  $U_1$ , toisiojännite  $U_2'$ , ensio- ja toisiovirrat  $I_1$  ja  $I_2'$  sekä vuojännite  $U_m$ . Kuvan toisiosuureet on redusoitu ensiön jännitetasoon. Usein käytetään yksinkertaistettua sijaiskytkentää, jolloin tyhjäkäyntivirtaa kuvaava haara jätetään pois ja ensiön ja toision resistanssit yhdistetään sekä samoin reaktanssit. (Ristamäki 2012: 7.)



**Kuva 2.** Muuntajan sijaiskytkentä.

### 2.2.1 Sähköisen piirin häviöt

Sähköisen piirin häviöt aiheutuvat virran kulkutien resistansseista. Nämä häviöt ovat pääosin kuormitushäviöitä, mutta myös tyhjäkäyntivirta aiheuttaa osan kyseisistä häviöistä. Heathcoten (2007: 120–121) mukaan kuormitushäviöt voidaan jakaa tarkemmin resistiivisiin häviöihin, johtimien pyörrevirtahäviöihin sekä lisähäviöihin, joita muodostuu muun muassa sydämen tukirakenteissa ja säiliössä kuormituksesta riippuvan hajavuon aiheuttamana. Franklinin ym. (1983: 91) mukaan sydäntukirakenteen häviöt puolestaan luetaan tyhjäkäyntihäviöksi.

Johtimien resistiivisiä häviöitä voidaan vähentää kasvattamalla johtimien poikkipinta-aloja. Tämä kuitenkin johtaa muuntajan koon kasvuun, joka puolestaan kasvattaa magneettipiirin häviöitä ja nostaa kustannuksia. Lisäksi poikkipinnan kasvattaminen johtaa pyörrevirtahäviöiden kasvuun. (Heathcote 2007: 122.) Ideaalitapauksessa ensiön magneettivuo kulkisi kokonaan toision kautta, mutta todellisuudessa osa vuosta läpäisee vain osan toision käämikierroksista ja osa sulkeutuu kokonaan toision ohi (Ristamäki 2012: 8). Tätä hajavuota kuvataan hajareaktansseina ja se aiheuttaa pyörrevirtahäviöitä yksittäisissä johtimissa läpäistessään ne (Heathcote 2007: 122; Ristamäki 2012: 8). Pyörrevirrat ovat verrannollisia hajavuohon, joka puolestaan on verrannollinen kuormitusvirtaan, ja siten pyörrevirtojen neliö ja pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia kuormitusvirran neliöön (Winders 2002: 74). Lisäksi pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia muuntajassa olevan kuparin kokonaispainoon sekä hajavuon reittiä vastaan kohtisuoraan olevien yksittäisten johtimien leveyden neliöön (Franklin ym. 1983: 95; ABB 2010: 4). Pyörrevirtahäviöiden pienentämiseksi käämin kierrosjohdin jaetaan yleensä pienempiin, toisistaan eristettyihin osajohtimiin, jotka risteilevät sopivalla tavalla keskenään siten, että kukin johdin on keskimäärin yhtä voimakkaassa magneetikentässä yhtä pitkän matkan. Tällöin virta jakaantuu rinnankytkettyjen osajohtimien kesken taiseasti ja kaikki johtimet kuormittuvat samalla tavalla. (ABB 2007: 17; Heathcote 2007: 122.) Pyörrevirtahäviöt lasketaan usein kokemuseräisellä kertoimella teoreettisten kaavojen sijaan (Franklin ym. 1983: 95).

Edellisten lisäksi sähköisiin häviöihin voidaan sisällyttää myös sellaiset häviöt, jotka aiheutuvat magneetikentän voimakkuuden vaihtelusta käämin radiaalisuunnassa. Eri

osajohtimet voivat olla erisuuruudessa magneettikentässä tai ne voivat olla eripituisia tietynsuuruudessa magneettikentässä, joten virta jakautuu epätasaisesti osajohtinten kesken, mikä puolestaan aiheuttaa lisähäviöitä. Näitä häviöitä vähennetään osajohtimien risteilyllä. (Franklin ym. 1983: 95.) Väliotto- ja käämikytkimien asennot vaikuttavat kuparihäviöihin, sillä ne muuttavat virtoja sekä muuntajapiirissä olevan kuparin määrää (Franklin ym. 1983: 245).

Koska aineen resistiivisyys on lämpötilariippuva yhtälön 3 mukaisesti, myös häviöt riippuvat lämpötilasta. Lämpötilan noustessa yhdellä celsiusasteella kasvavat kuparin kuormitushäviöt  $P_{Cu}$  0,4 %

$$P_{Cu} = P_{Cu_{15}} \left[ 1 + 0,004 \frac{1}{^{\circ}C} \cdot (T - 15^{\circ}C) \right], \quad (12)$$

missä  $P_{Cu_{15}}$  on kuparihäviöt lämpötilassa 15 °C. Vastaavasti pyörrevirtahäviöt  $P_e$  pienenevät

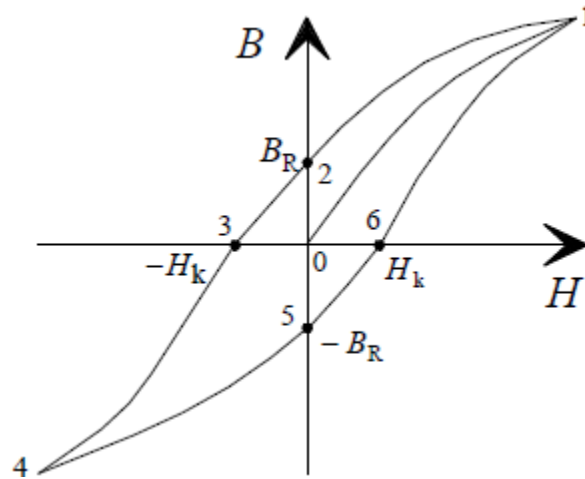
$$P_e = \frac{P_{e_{15}}}{1 + 0,004 \frac{1}{^{\circ}C} \cdot (T - 15^{\circ}C)}, \quad (13)$$

missä  $P_{e_{15}}$  on pyörrevirtahäviöt lämpötilassa 15 °C (Franklin ym. 1983: 128).

### 2.2.2 Muuntajasydämen häviöt

Magneettiin häviöt, eli muuntajasydämen hystereesi- ja pyörrevirtahäviöt, ovat tyhjäkäyntihäviöitä (Franklin ym. 1983: 91). Rautahäviöt oletetaan IEC -standardissa lämpötilan suhteen vakioiksi (Ristamäki 2012: 9).

Hystereesihäviöt ovat verrannollisia hystereesisilmukan pinta-alaan ja ne riippuvat taajuudesta, magneettivuon tiheyden huippuarvosta sekä käytettävästä sydänlevymateriaalista (Winders 2002: 76). Sydämen materiaalina käytetäänkin kidesuunnattua rautaa, jonka hystereesisilmukka on mahdollisimman kapea. Kuvassa 3 on esitetty periaatteellinen hystereesikäyrä.



**Kuva 3.** Periaatteellinen hystereesikäyrä (Vesti 2013: 15).

Yliaalloista ja magneettikentän vaihteluista hystereesisilmukkaan aiheutuu kuitenkin lisäilmukoita, jotka kasvattavat hystereesihäviöitä (Ristamäki 2012: 9). Muuttuva magneettivuo indusoi häviöitä aiheuttavia pyörrevirtoja käämien lisäksi myös sydämessä. Nämä pyörrevirtahäviöt lasketaan yhtälön 14 mukaan

$$P_e = \frac{1}{24} \sigma \omega^2 d^2 B_p^2 V, \quad (14)$$

missä  $\sigma$  on sydänmateriaalin ominaissähkönjohtavuus,  $\omega$  kulmataajuus,  $d$  sydänlevyn paksuus,  $B_p$  vuontiheyden huippuarvo sekä  $V$  sydämen tilavuus (ABB 2004: 143–144). Sydämen laminointi toisistaan eristetyillä levyillä perustuu pyörrevirtahäviöiden minimoimiseen. Pyörrevirtahäviöitä voidaan pienentää ohentamalla sydänlevyjä, mutta haittapuolena on sydämen täyttekertoimen huononeminen, koska levyjen välisen eristeen osuus sydämessä kasvaa. Samalla myös ikeiden ja pylväiden magneettiset liitokset sekä sydämen mekaaninen kestävyys heikkenevät ja asennus vaikeutuu (Franklin ym. 1983: 96). Ominaisvastuksen kasvattamiseksi ja sitä kautta pyörrevirtahäviöiden pienentämiseksi sydänrautaan lisätään jonkin verran piitä, mutta liian suuri määrä sitä tekee levyistä haurasta (ABB 2004: 144, 159). Sydänlevyn pinta voidaan myös laserkäsitellä kyseisten häviöiden pienentämiseksi (ABB 2004: 159).

### 2.2.3 Eristykset ja säiliö

Ristamäen (2012: 9) mukaan alle 50 kV:n jännitteillä syntyvät eristyksen dielektriset häviöt ovat pieniä ja ne sisällytetään yleensä tyhjäkäyntihäviöihin. Kuten kappaleen 2.2.1 alussa mainittiin, hajavuon leikatessa säiliörakenteita niihin indusoituu häviöitä, jotka etenkin suurilla toisiovirroilla voivat olla huomattavia. Näitä häviöitä pienennetään muun muassa toisiojohdinten huolellisella asettelulla sekä erityisillä säiliöseinämä-rakenteilla (Ristamäki 2012: 9).

### 2.2.4 Häviöiden optimointi ja suunnittelu

Muuntajan elinkaarikustannukset koostuvat hankintakustannuksista sekä käyttökustannuksista, joihin kuuluvat muun muassa häviöt ja huollot. Muuntaja voidaan suunnitella siten, että sen hankintakustannukset ovat mahdollisimman pienet, mutta tällaisen muuntajan häviöt ovat suuret ja siten myös käyttökustannukset ovat suuret. Jotta voitaisiin suunnitella häviöiden suhteen optimaalinen muuntaja, tulee asiakkaan määrittellä niin sanotut häviöarvostukset, eli kuinka paljon ollaan valmiita maksamaan säästetyistä tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä kilowattia kohden. Tyhjäkäyntihäviöiden häviöarvostusten laskemiseen tarvittavia parametreja ovat kilowattitunnin keskimääräinen hinta ensimmäisenä vuotena, energian hinnan keskimääräinen nousu vuodessa, hyväksytyt takaisinmaksuaika, keskimääräinen vuosittainen inflaatioprosentti sekä vaadittu vuotuinen korko sijoitetulle pääomalle. Kuormitushäviöiden häviöarvostuksen laskemiseen tarvitaan yhtälön 1 mukaisesta neliöllisestä riippuvuudesta johtuen edellisten lisäksi kuormitusvirran keskimääräinen vuotuinen kasvu sekä kuormitusvirran ekvivalentti. Kuormitusvirran ekvivalentti on vakio, jolla energiankulutus vuodessa on yhtä suurta kuin jatkuvasti vaihtelevalla kuormitusvirralla. (ABB 2004: 62–71.) Haluttaessa voidaan esimerkiksi energian hinta ottaa tarkemminkin huomioon, koska yleensä peruskuorman energian hinta on edullisempaa kuin huippukuorman aikana tuotettu energia. Tämä kuitenkin lisää laskelmien monimutkaisuutta.

Pitkästä pitoajasta johtuen häviöarvostusten laskeminen ei ole aivan helppoa, sillä se pitää sisällään paljon olettamuksia tulevista vuosista. Kuitenkin edes jonkinlaisten kohtuullisen relevanttien häviöarvostusten laskeminen johtaa todennäköisesti taloudelli-

sempaan muuntajavalintaan kuin häviöiden huomiotta jättäminen ja ainoastaan edullisen hankintahinnan painottaminen. Suomessa tarjouspyynnöissä tyhjäkäyntihäviöiden arvostushintana käytetään melko yleisesti noin 7 500 €/kW ja kuormitushäviöiden arvostushintana noin 2 500 €/kW. Mikäli aivan erityisesti halutaan painottaa pieniä tyhjäkäyntihäviöitä, voidaan niiden arvostushintana käyttää jopa 10 000 €/kW ja vastaavasti kuormitushäviöiden arvostushintana vain noin kymmenesosaa tästä. Häviöarvostushinnat kerrotaan muuntajan häviöillä ja lisätään hankintahintaan eri vaihtoehtoja vertailtaessa.

Muuntajan häviöiden minimointi vaatii aina kompromisseja suunnittelussa, sillä keinoilla, joilla tyhjäkäyntihäviöitä pienennetään, on taipumus kasvattaa kuormitushäviöitä ja päinvastoin. Niinpä parhaimman lopputuloksen aikaansaamiseksi on ennen suunnittelun aloittamista tärkeää tietää muuntajan käyttötarkoitus ja asiakkaan määrittelemät häviöarvostukset. Muuntajan, jonka rautahäviöt ovat huomattavan pienet verrattuna kuparihäviöihin, maksimihyötysuhde saavutetaan paljon pienemmällä kuormalla kuin muuntajan, jossa rautahäviöt ovat suuret suhteessa kuparihäviöihin. Tämä sopii muuntajiin, joiden kuormitusaste on kohtuullisen pieni (Franklin ym. 1983: 98). Esimerkiksi Suomessa sähköverkon muuntajien keskimääräinen kuormitusaste on tyypillisesti noin 50 % ja lisäksi käyttövarmuustekijöiden vuoksi muuntajan jatkuva kuormitus ei yleensä saa olla yli 70 % nimellistehosta. Siksi pienten häviöiden varmistamiseksi on tärkeää painottaa nimenomaan tyhjäkäyntihäviöitä. Yhtälön 15 avulla voidaan laskea, millä suhteellisella kuormalla  $z_L$  saavutetaan muuntajan paras hyötysuhde, kun tiedetään muuntajan tyhjäkäyntihäviöt  $P_0$  ja kuormitushäviöt  $P_k$  (Franklin ym. 1983: 101):

$$z_L (\%) = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \cdot 100. \quad (15)$$

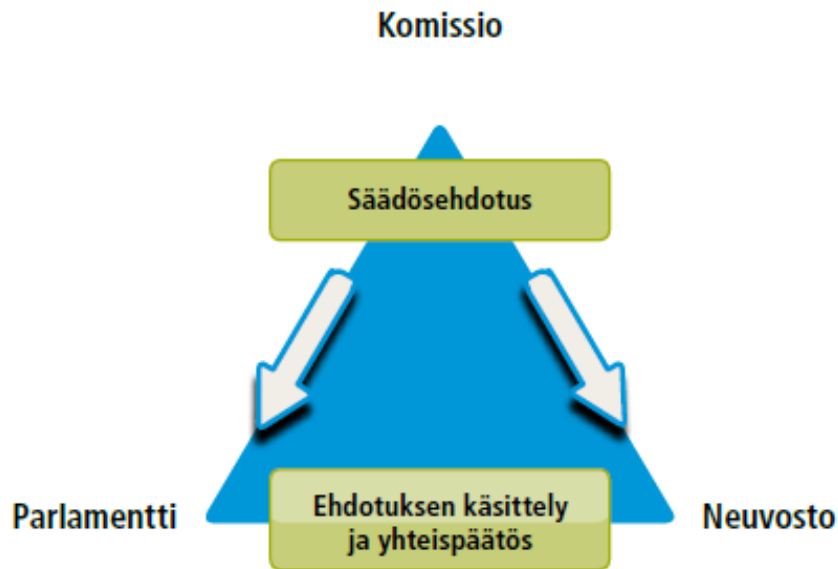
Muuntaja on tehokkaimmillaan siinä pisteessä, jossa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt ovat yhtä suuret.

### 3 MUUNTAJIA KOSKEVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Euroopan unionin lainsäädäntövälineiden avulla voidaan vaikuttaa kansallisiin oikeusjärjestyksiin vaihtelevissa määrin. Euroopan unionin neuvoston, Euroopan parlamentin ja Euroopan komission käytössä olevat lainsäädäntövälineet eli säädökset ovat EU:n toiminnasta tehdyn sopimuksen mukaisesti asetus, direktiivi, päätös, suositus ja lausunto. Näistä asetus, direktiivi ja päätös ovat velvoittavia säädöksiä, sen sijaan suositukset ja lausunnot eivät sido vastaajiaan oikeudellisesti. (Teknologiateollisuus 2010: 15.)

EU:n direktiivissä säädetään jäsenvaltioille tavoitteet ja peruseriaatteet tietyssä asiassa. Kansallista lainsäädäntöä joudutaan mukauttamaan direktiivissä säädettyjä tavoitteita vastaavaksi, mutta jäsenvaltiot saavat itse päättää kuinka ne sen tekevät. Direktiivi voi olla osoitettu yhdelle tai usealle jäsenvaltiolle, tai kaikille jäsenvaltioille. Direktiivissä säädetään määräpäivä, johon mennessä se on saatettava osaksi kansallista lainsäädäntöä, mutta muuten jäsenvaltioille jää liikkumavaraa kansallisten erityispiirteiden huomioimiseksi. Direktiivejä käytetään jäsenvaltioiden lainsäädäntöjen yhdenmukaistamiseen, etenkin sisämarkkinoiden toteuttamiseksi (Euroopan komissio 2012a). Direktiivit hyväksyy yleensä Euroopan unionin neuvosto yhdessä Euroopan parlamentin kanssa Euroopan komission tekemien ehdotusten pohjalta. Kuvassa 4 on esitetty säädösvalmistelun ja päätöksenteon osapuolet yhteispäätösmenettelyssä.

Asetus on direktiiviin ohella unionin tärkein lainsäädännön väline. Asetukset sitovat sellaisenaan kaikkia jäsenvaltioita. Ne astuvat voimaan kaikissa jäsenvaltioissa samanaikaisesti ja niitä sovelletaan yhdenmukaisesti. Asetuksilla luodaan yhtenäistä lainsäädäntöä Euroopan unionin alueella, joten jäsenvaltio ei voi päättää soveltaa vain osaa asetusten säännöksistä eikä se voi kansalliseen oikeuteen tai käytäntöihin vedoten kieltäytyä asetusten säännösten soveltamisesta. Asetuksia antavat neuvosto ja parlamentti yhdessä tai komissio yksin. (Teknologiateollisuus 2010: 15; Euroopan komissio 2012b.)



**Kuva 4.** EU:n säädösvalmistelun ja päätöksenteon osapuolet yhteispäätösmenettelyssä (Teknologiateollisuus 2010: 16).

### 3.1 Ekosuunnitteludirektiivi

Euroopan unioni asetti vuonna 2008 sovitussa ilmasto- ja energiapaketissa tavoitteeseen niin kutsutut 20–20–20 osuudet. Tämä tarkoittaa, että EU on sitoutunut vuoteen 2020 mennessä vähentämään kasvihuonekaasuja 20 % vuoden 1990 tasosta, kasvattamaan uusiutuvan energian osuus 20 prosenttiin sekä parantamaan energiatehokkuutta 20 % (UM 2012). Energiaan liittyvillä tuotteilla on merkittävä rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa, joten vuonna 2009 säädettiin kaikille jäsenvaltioille osoitettu *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/125/EY energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettävien vaatimusten puiteista*. Kyseisestä direktiivistä käytetään nimityksiä ekosuunnitteludirektiivi tai ecodesign-direktiivi, ja se korvasi aiemmin voimassa olleen ekosuunnitteludirektiivin 2005/32/EY. Parlamentti ja neuvosto katsovat, että jäsenvaltioiden lakien ja hallinnollisten määräysten eroavuudet energiaan liittyvien tuotteiden ekologista suunnittelua koskien voivat aiheuttaa kaupan esteitä ja vääristää kilpailua yhteisössä, ja siten niillä voi olla suora vaikutus sisämarkkinoiden luomiseen ja toimintaan. Ainoa keino torjua tällaiset kaupan esteet ja epäterve kilpailu on yhdenmukaistaa kansallista lainsäädäntöä. Lisäksi, koska energiaan liittyvillä tuotteilla on

suuri osuus luonnonvarojen ja energian kulutuksessa yhteisössä, olisi kestävä kehityksen vuoksi edistettävä näiden tuotteiden yleisten ympäristövaikutusten jatkuvaa parantamista. (EU 2009: 10, 15.)

Ekosuunnitteludirektiivi on puitedirektiivi, jonka nojalla Euroopan komissio antaa tuoteryhmäkohtaisia säädöksiä. Direktiivi koskee siis ensisijaisesti tuoteryhmäkohtaisten täytäntöönpanosäädösten laatijoita sekä viranomaisia. Tuotteiden valmistajia ja maahantuojia direktiivi velvoittaa vasta, kun kyseiselle tuotteelle on laadittu tuoteryhmäkohtaiset vaatimukset. Jäsenvaltioiden tuli saattaa direktiivi kansallisesti voimaan 20. marraskuuta 2010 mennessä (Teknologiateollisuus 2010: 26).

### 3.1.1 Tavoitteet, soveltamisala ja sisältö

Direktiivin 2009/125/EY tavoitteena on edistää kestävä kehitystä parantamalla energiatehokkuutta, ympäristönsuojelun tasoa ja energiahuoltovarmuutta sekä vähentämällä luonnonvarojen käyttöä. Energiatehokkuuden parantamista pidetään merkittävänä tekijänä myös yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteiden saavuttamisessa. Energiaan liittyvien tuotteiden ympäristövaikutuksia on mahdollista vähentää ja energiatehokkuutta parantaa paremmalla tuotesuunnittelulla, mikä lisäksi alentaisi myös yritysten ja loppukäyttäjien kustannuksia. (EU 2009: 10–11.) Ympäristönäkökohdat ja elinkaariajattelu halutaan siis ekosuunnitteludirektiivin avulla integroida tuotteiden suunnitteluvaiheeseen, sillä eräiden arvioiden mukaan jopa 80–90 % tuotteen elinkaaren aikaisista kustannuksista määräytyy tuotesuunnittelussa tehtyjen ratkaisujen perusteella (Kärnä 2001: 16).

Direktiivissä 2009/125/EY säädetään puitteet energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asettavista vaatimuksista tavoitteena varmistaa tällaisten tuotteiden vapaa liikkuvuus sisämarkkinoilla. Ekosuunnitteludirektiivin soveltamisalaan kuuluvat energiaan liittyvät tuotteet, joilla on käyttönsä aikana vaikutusta energiankulutukseen, kuten myös näihin tuotteisiin erikseen liitettävät osat, joiden ympäristötehokkuus voidaan arvioida itsenäisesti. Soveltamisalan ulkopuolelle rajataan henkilöiden tai tavaroiden kuljetukseen tarkoitettut liikennevälineet. Direktiivissä säädetään muun muassa soveltamisalaan kuuluvien tuotteiden markkinoille saattamisesta, maahantuojan velvolli-

suuksista, vaatimustenmukaisuusmerkinnästä (CE-merkintä) ja EY-vaatimustenmukaisuusvakuutuksesta sekä jäsenvaltioiden tehtävistä. (EU 2009: 14–17.) Direktiivi sisältää runsaasti ohjeistusta komissiolle tuoteryhmäkohtaisten täytäntöönpanotoimenpideehtotusten valmistelua varten.

### 3.1.2 Vaatimukset

Suurin osa ekosuunnitteludirektiivin vaatimuksista koskee täytäntöönpanotoimenpiteiden sisältöä sekä jäsenvaltioiden tehtäviä direktiiviin liittyen, mutta jonkin verran vaatimuksia esitetään myös suoraan tuotteisiin liittyville tahoille. Tällaisia ovat vaatimukset CE-merkinnän kiinnittämisestä tuotteeseen ennen sen saattamista markkinoille sekä EY-vaatimustenmukaisuusvakuutuksesta, jossa valmistaja vakuuttaa tuotteen olevan sovellettavan täytäntöönpanotoimenpiteen kaikkien asiaankuuluvien säädösten mukainen. EY-vaatimustenmukaisuusvakuutuksessa on oltava valmistajan tai sen valtuutetun nimi ja osoite; mallin kuvaus, joka riittää sen yksiselitteiseen tunnistamiseen; tapauksen mukaan sovelletut yhdenmukaistetut standardit, käytetyt tekniset standardit ja eritelvät; tapauksen mukaan viittaus muuhun sovellettuun yhteisön lainsäädäntöön, jossa säädetään CE-merkinnän kiinnittämisestä; ja valmistajaa tai sen valtuutettua edustajaa sitovan henkilön allekirjoitus ja tunnistetiedot. (EU 2009: 17, 31.)

Komission jatkotoimenpiteiden kannalta ekosuunnitteludirektiivin olennaisimpia vaatimuksia ovat 15 artiklan täytäntöönpanotoimenpiteitä koskevat kohdat. Niiden mukaan tuotteelle on toteutettava täytäntöönpanotoimenpide, mikäli tuotteella on yli 200 000 yksikön myynti- ja kauppavolyymi vuodessa, sillä on yhteisön alueella merkittävä ympäristövaikutus sekä siihen liittyy merkittäviä mahdollisuuksia ympäristövaikutusten parantamiseen ilman, että siitä aiheutuu kohtuuttomia kustannuksia. Täytäntöönpanotoimenpiteiden tulee lisäksi täyttää kaikki seuraavat arviointiperusteet (EU 2009: 20):

- tuotteen toiminnallisuuteen käyttäjän näkökulmasta ei saa kohdistua merkittävää kielteistä vaikutusta;
- terveydelle, turvallisuudelle ja ympäristölle ei saa aiheutua haitallisia vaikutuksia;

- kuluttajiin ei saa kohdistua merkittävää kielteistä vaikutusta erityisesti tuotteen kohtuuhintaisuuden ja elinkaarikustannusten osalta;
- toimialan kilpailukykyyn ei saa kohdistua merkittävää kielteistä vaikutusta;
- ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamisesta ei lähtökohtaisesti saa seurata, että valmistajalta vaaditaan patenttia edellyttävää tekniikkaa ja
- valmistajalle ei saa aiheutua kohtuutonta hallinnollista rasitusta.

Täytäntöönpanotoimenpiteissä on direktiivin mukaan säädettävä ekologisen suunnittelun vaatimuksista direktiivin liitteen I tai liitteen II mukaisesti; nämä antavat menetelmät yleisten ja erityisten ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamiseksi. Ekologisen suunnittelun yleisten vaatimusten pyrkimyksenä on pienentää tuotteiden ympäristövaikutuksia keskittymällä merkittäviin ympäristönäkökohtiin, kuitenkin raja-arvoja asettamatta. Erityisillä ekologisen suunnittelun vaatimuksilla puolestaan pyritään parantamaan tiettyä tuotteen ympäristönäkökohtaa. Ne voivat olla rajoituksia tietyn resurssin käytölle tuotteen elinkaaren eri vaiheissa, esimerkiksi kierrätetyn materiaalin määrälle asetettava vähimmäisvaatimus tai käytön aikaisen energiankulutuksen rajoitukset. Yleisiä ekologisen suunnittelun vaatimuksia sisältäviä täytäntöönpanotoimenpiteitä valmistellessaan komission on soveltuvin osin yksilöitävä valmistajalle asetettavat vaatimukset; valmistajan on esimerkiksi suoritettava arviointi tuotteesta sen elinkaaren aikana ja tämän perusteella laadittava tuotteen ekologinen profiili, jossa arvioidaan tuotteen ympäristönäkökohtia. Tätä arviointia on käytettävä myös vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen ja tuotteen ympäristötehokkuuden vertaamiseksi viitearvoihin. Lisäksi voidaan vaatia valmistajaa antamaan sellaisia tietoja, jotka vaikuttavat muiden osapuolien tapaan käsitellä, käyttää ja kierrättää tuotetta. (EU 2009:23–26.)

Ekosuunnitteludirektiivin 15 artiklassa viitataan myös direktiivin liitteeseen VII, jonka mukaan täytäntöönpanotoimenpiteissä on täsmennettävä erityisesti muun muassa tarkka määritelmä kohteena olevien tuotteiden tyypeistä ja niiden ekologista suunnittelua koskevat vaatimukset sekä täytäntöönpanopäivät. Täytäntöönpanotoimenpiteissä on täsmennettävä myös tuotteen asennusta koskevat vaatimukset, mikäli sillä on suora yhteys tuotteen ympäristötehokkuuteen sekä vaatimukset tiedoista, jotka valmistajan on toimitettava. Lisäksi on täsmennettävä täytäntöönpanotoimenpiteen arvioinnin ja mahdollisen

tarkistuksen päivämäärä ottaen huomioon teknologisen kehityksen vauhti. (EU 2009: 32).

### 3.2 Komission asetus n:o 548/2014 muuntajille

21.5.2014 annettiin *Komission asetus n:o 548/2014 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta pienten, keskikokoisten ja suurten muuntajien osalta*. Asetus astui voimaan kahdentenakymmenentenä päivänä sen jälkeen kun se 22.5.2014 julkaistiin *Euroopan unionin virallisessa lehdessä*. Asetuksessa Euroopan komissio katsoo, että keskikokoisten ja suurten muuntajien energiatehokkuutta koskevat ekosuunnitteluvaatimukset tulee määritellä näiden laitteiden ekosuunnitteluvaatimusten yhdenmukaistamiseksi koko yhteisön alueella. Yhdenmukaiset vaatimukset edistävät sisämarkkinoiden toimintaa ja jäsenvaltioiden ympäristötehokkuutta, lisäksi ne helpottavat energiatehokkuutta tai hyötysuhdetta parantavien tekniikoiden ja suunnitteluratkaisujen pääsyä markkinoille. Ekosuunnitteludirektiivissä mainitaan, että ensisijainen asema olisi annettava vaihtoehtoisille toimintatavoille kuten toimialan itsesääntelylle, mikäli asetetut tavoitteet voidaan tällä tavoin saavuttaa nopeammin ja vähemmän kustannuksin kuin pakollisilla vaatimuksilla. Asetus on siis annettu, koska markkinamekanismit eivät ohjaa ympäristön kannalta tehokkaimpiin mahdollisiin muuntajiin. Markkinamekanismeilla tarkoitetaan muun muassa muuntaja-asiakkaiden häviöarvostuksia, jotka asiakas voi halutessaan laskea hyvinkin alhaisiksi eivätkä ne näin ollen ohjaa valmistajaa tekemään pienihäviöistä muuntajaa.

Komission asetusta varten tekemä taustaselvitys osoittaa, että käyttövaiheessa kuluva energia on muuntajien osalta suurin ympäristönäkökohta, johon tuotesuunnittelulla on mahdollista vaikuttaa. EU:n 27 jäsenvaltiossa vuonna 2008 käytössä olleiden muuntajien kokonaishäviöt olivat 93,4 TWh, josta hyötysuhdetta parantamalla voitaisiin kustannustehokkaasti saavuttaa noin 16,2 TWh:n vuotuinen säästö vuonna 2025. Tämä vastaa noin 3,7 Mt:n hiilidioksidipäästöjä. Vaikka muuntajien valmistuksessa käytetäänkin huomattavia määriä eri raaka-aineita, komissio katsoo, ettei niiden osalta ole tarpeen laatia ekosuunnitteluvaatimuksia, sillä markkinamekanismit näyttävät takaavan niiden

asianmukaisen loppukäsittelyn. Muuntajan materiaaleista noin 99 % onkin kierrätettävissä. (VITO 2011: 5, EU 2014: 1–2).

Ekologisen suunnittelun vaatimusten voimaantulo toteutetaan asteittain, jotta valmistajat saavat riittävästi aikaa suunnitella tuotteensa uudelleen. Vaatimusten täytäntöönpanon aikarajaa määriteltäessä on pyritty huomioimaan valmistajille, erityisesti pienille ja keskisuurille yrityksille, aiheutuvien kustannusten vaikutukset tinkimättä kuitenkaan tavoitteiden oikea-aikaisesta toteutumisesta. Vaiheen 1 (*Tier 1*) vaatimukset astuvat voimaan 1.7.2015 ja vaiheen 2 (*Tier 2*) vaatimuksia tulee noudattaa 1.7.2021 alkaen.

### 3.2.1 Asetuksen soveltamisala ja sisältö

Asetuksella vahvistetaan ekosuunnitteluvaatimukset vähimmäisteholtaan 1 kVA:n ja 50 Hz:n sähkönsiirrossa ja jakeluverkoissa tai teollisissa sovelluksissa käytettävien muuntajien markkinoille saattamiselle ja käyttöönotolle. Asetusta sovelletaan vain muuntajiin, jotka on hankittu asetuksen voimaantulon jälkeen. Tässä hankkimisella tarkoitetaan sopimuksen tekemistä valmistajan kanssa tietyn muuntajamäärän toimittamisesta. Asetuksessa ei ole suoraan sanottu, tarkoitetaanko tällä voimaantulolla tuota aiemmin mainittua kahdettakymmenettä päivää julkaisun jälkeen, vai ensimmäisen vaiheen voimaanastumispäivämäärää. Asia on siis hieman tulkinnanvarainen. Todennäköinen tulkinta on, että asetuksen vaatimuksia täyttämättömiä muuntajia ei saa myydä asetuksen voimaantulon jälkeen ja vaiheiden 1 ja 2 voimaantulopäivämäärät koskevat käyttöönottoa. Asetuksen ekosuunnitteluvaatimukset eivät ole riippuvaisia sovelluskohteesta, jossa muuntajaa käytetään, mutta tietyt muuntajatyypit on jätetty asetuksen soveltamisalan ulkopuolelle niiden käyttötarkoituksen vuoksi. Tällaisten muuntajien energiankulutus ja säästöpotentiaali ovat vähäiset muihin muuntajiin verrattuna. Asetusta ei sovelleta, muutoin kuin tuotetietoja ja teknistä dokumentaatiota koskevien vaatimusten osalta, seuraaviin muuntajiin:

- mittamuuntajat, jotka on suunniteltu syöttämään virtaa mittauslaitteille;
- muuntajat, joiden pienjännitekäämiä käytetään tasasuuntaajan kanssa tasavirran tuottamiseksi;
- muuntajat, jotka kytketään suoraan uuniin;

- merialuesovelluksien ja kelluvien merialuesovelluksien muuntajat;
- varajärjestelmien muuntajat;
- rataverkon syöttöjärjestelmien muuntajat ja säästömuuntajat;
- maadoitusmuuntajat, eli järjestelmän maadoittamista varten neutraalipisteen tarjoavat kolmivaihemuuntajat;
- rautatiekalustoon asennetut syöttömuuntajat;
- kolmivaiheisten epätahtimoottoreiden käynnistämiseen tarkoitetut käynnistysmuuntajat;
- sähkölaitteiden testaamiseen käytettävät testimuuntajat;
- hitsausmuuntajat, joita käytetään kaarihitsaus- tai vastushitsauslaitteissa;
- räjähdysten kestäviin tai maanalaisiin kaivostoiminnan sovelluksiin tarkoitetut muuntajat;
- vedenalaisten sovelluksien muuntajat;
- keskijännitteen välimuuntajat 5 MVA:han asti;
- suuret muuntajat, mikäli on osoitettu, että asetuksessa vaaditun vähimmäishyötysuhteen saavuttamiseksi ei tiettyyn sovellukseen ole saatavilla teknisesti toteutuskelpoisia vaihtoehtoja ja
- suuret muuntajat, jotka ovat vaihto-osia samassa paikassa tai asennuskohteessa sijaitseville samanlaisille tehomuuntajille, jos vaihtoa ei voida toteuttaa ilman kohtuuttomia kuljetus- tai asennuskustannuksia.

Lisäksi sääntelyä koskevia helpotuksia myönnetään ilmajohtojen pylväisiin asennettaville muuntajille niiden painorajoitusten vuoksi sekä muuntajille, joissa on jännitettä stabilisoiva laitteisto, jonka avulla uusituvista energialähteistä saatava hajautettu tuotanto voidaan liittää jakeluverkkoon.

### 3.2.2 Vaatimukset

Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, tuotetietoja ja teknistä dokumentaatiota koskevia vaatimuksia sovelletaan kaikkiin muuntajiin. Tuotetietovaatimuksista säädetään, että vaiheen 1 voimaantulopäivästä lähtien muuntajien tuoteasiakirjoissa sekä vapaasti käytettävissä olevilla valmistajan internetsivustoilla on annettava erilaisia tuotetta kos-

kevia tietoja. Näihin lukeutuvat nimellisteho, kuormitushäviöitä ja tyhjäkäyntihäviöitä sekä tyhjäkäynnillä tarvittavan jäähdytysjärjestelmän sähkötehoa koskevat tiedot, kaksijännitteisten muuntajien osalta suurin nimellisteho pienemmällä jännitteellä sekä tiedot muuntajan kaikkien tärkeimpien osien painosta. Edellä mainitut tiedot on merkittävä myös muuntajan arvokilpeen. Lisäksi tuoteasiakirjoissa on oltava keskikokoisten ja suurten muuntajien osalta huippuhyötysuhdeindeksi (*Peak Efficiency Index, PEI*) ja teho, jolla se saavutetaan sekä keskikokoisten pylväsmuuntajien osalta näkyvä merkintä ”Vain pylväsasennukseen”. Huippuhyötysuhdeindeksi lasketaan asetuksessa annetulla yhtälöllä

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0})}{S_r \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}}, \quad (16)$$

missä  $P_0$  on mitatut tyhjäkäyntihäviöt nimellisjännitteellä ja -taajuudella nimellisväliotosta,  $P_{c0}$  on jäähdytysjärjestelmän vaatima sähköteho tyhjäkäynnillä,  $P_k$  on nimellisväliotosta mitatut, vertailulämpötilan mukaan korjatut kuormitushäviöt nimellisvirralla ja -taajuudella ja  $S_r$  on muuntajan tai säästömuuntajan nimellisteho, johon  $P_k$  perustuu. Muuntajien teknisessä dokumentaatioissa on kerrottava valmistajan nimi ja osoite, mallitunniste, jolla erotetaan malli valmistajan muista malleista sekä edellä mainitut tuotetiedot.

Asetuksessa säädetyt vaatimukset keskikokoisille ja suurille muuntajille on esitetty tämän työn liitteissä 1 ja 2. Koska työssä käsitellään ainoastaan öljymuuntajia, on liitteissä esitetty vaatimukset vain neste-eristeisille muuntajille. Keskikokoisten, nimellisteholtaan korkeintaan 3150 kVA:n, muuntajien on oltava liitteen 1 taulukossa 1 esitettyjen suurimpia sallittuja kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöitä koskevien vaatimusten mukaisia. Sellaisten muuntajien osalta, joissa on väliottoliitännät, joita voidaan käyttää niiden ollessa päällä tai kuormitettuna jännitteen muuttamista varten, liitteen 1 taulukossa 1 esitettyjä sallittuja enimmäistasoja korotetaan tyhjäkäyntihäviöiden osalta 20 % ja kuormitushäviöiden osalta 5 % vaiheessa 1 ja 10 % tyhjäkäyntihäviöiden osalta vaiheessa 2. Esimerkiksi jännitettä säätelevät jakelumuuntajat kuuluvat tähän luokkaan. Liitteen 1

taulukossa 2 esitetään tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden rajojen oikaisut muissa erikoistapauksissa. Nimellistehoita yli 3150 kVA:n keskikokoisten muuntajien huippuhyötysuhdeindeksin vähimmäisarvot on puolestaan esitetty liitteen 1 taulukossa 3. Keskikokoisten, 25–315 kVA:n pylväsmuuntajien on oltava liitteen 1 taulukossa 4 vahvistettujen suurimpia sallittuja häviöitä koskevien vaatimusten mukaisia. Liitteen 2 taulukossa 1 esitetään huippuhyötysuhdeindeksin vähimmäisvaatimukset suurille nesteeristeisille muuntajille. Enimmäishäviöt ja PEI-vähimmäisarvot nimellistehoille, jotka sijoittuvat taulukoissa mainittujen nimellistehojen välille, saadaan lineaarisesti interpoloimalla. (EU 2014: 6–11).

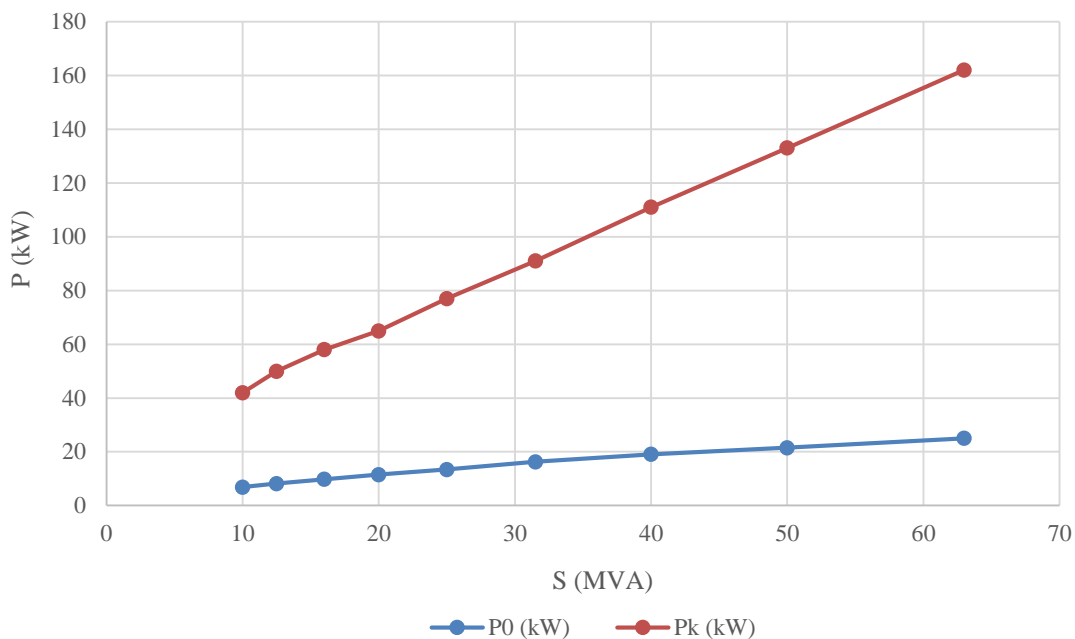
#### 4 VALMISTUS JA TEKNISET RATKAISUT

VITO (2011) esittelee raportissaan seitsemän markkina-analyysin perusteella laadittua perustapausta (*base-case, BC*). Näitä ovat jakelumuuntajat (BC 1), teollisuuden öljy-  
muuntajat (BC 2), teollisuuden kuivamuuntajat (BC 3), kanta- ja siirtoverkkojen teho-  
muuntajat (BC 4), hajautettujen energialähteiden (*Distributed Energy Resources, DER*)  
öljymuuntajat (BC 5), hajautettujen energialähteiden kuivamuuntajat (BC 6) sekä pie-  
nemmmät teollisuuden erotusmuuntajat (BC 7). Näiden perustapausten keskitehot sekä  
niiden tyypilliset tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** VITO:n (2011: 164) tutkimuksessaan käsittelemien perustapausten kes-  
kitehot sekä niiden tyypilliset tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt.

Perustapaus	Teho $S$ (kVA)	Tyhjäkäyntihäviöt $P_0$ (W)	Kuormitushäviöt $P_k$ (W) 75 °C:ssa
BC 1	400	750	4 600
BC 2	1 000	1 700	10 500
BC 3	1 250	2 800	13 100
BC 4	100 000	40 500	326 000
BC 5	2 000	3 100	21 000
BC 6	2 000	4 000	18 000
BC 7	16	110	750

Tyypillinen taajama-alueen jakelumuuntaja Suomessa on teholtaan 300–1250 kVA ja  
haja-asutusalueella 16–50 kVA (Partanen, Jarmo 2013: 9). Siirtoverkon tehomuuntajan  
nimellisteho tyypillisesti välillä 10–40 MVA ja valtaosa kantaverkon suurmuuntajista  
on teholtaan 400 MVA (Elovaara ym. 2011: 147; Partanen 2013: 10). Vertaamalla  
Suomen sähköverkon muuntajien tyypillisiä tehoja VITO:n raportissaan (2011) esitte-  
lemiin perustapauksiin, voidaan todeta perustapausten 1 ja 4 edustavan asennettua  
muuntajakantaa, joskin kohtuullisen voimakkaasti keskiarvoistettuna. Kuten kuvasta 5  
nähdään, samantyyppisten muuntajien häviöt riippuvat melko lineaarisesti muuntajan  
tehosta, joten keskiarvojen käyttö ei käytännössä aiheuta virhettä.



**Kuva 5.** ABB Oy, Transformersin 110/21 kV neste-eristeisien tehomuuntajien häviöt suhteessa muuntajan tehoon (ABB 2014).

Raportissa esitetään teknisiin ratkaisuihin useita ehdotuksia, joilla muuntajien energia-tehokkuutta voidaan parantaa verrattuna edellä esitettyihin perustapauksiin. Nämä parannusvaihtoehdot on jaettu parhaaseen käytettävissä olevaan tekniikkaan (*Best Available Technology, BAT*) sekä parhaaseen ei vielä saatavilla olevaan tekniikkaan (*Best Not yet Available Technology, BNAT*). BAT-vaihtoehdot on edelleen jaettu jo käytössä oleviin tekniikkoihin, joissa ei siis ole enää esteitä käyttöönotolle, sekä tekniikkoihin, joissa on tunnistettuja esteitä siihen, etteivät kyseiset tekniikat ole vielä kunnolla yleistyneet. Kaikki esitellyt parannusvaihtoehdot kasvattavat tuotteen hintaa, ja useat vaihtoehdot kasvattavat tuotteen kokoa ja painoa, koska tyypillisesti häviöiden pienentämiseksi tarvitaan enemmän materiaaleja. (VITO 2011: 212–213.)

#### 4.1 Paras saatavilla oleva tekniikka, BAT

Kuten edellä mainittiin, parhaat saatavilla olevat tekniikat voidaan jakaa jo yleistyneisiin käytäntöihin sekä vielä tuloaan tekeviin tekniikkoihin. VITO:n raportin (2011) pe-

rustapausten oletetaan sisältävän nämä yleiset tekniikat, jotka on hyötyineen esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Yleisesti käytössä olevat tekniikat hyötyineen (VITO 2011: 213–216).

Tekniikka	Hyöty
Suorakulmaisen johtimen tai folion käyttö käämeissä	Käämin parempi täytekerroin sekä mekaaninen kestävyys verrattuna pyöreään johtimeen
Sydämen laminointi ohuista, eristekerroksella pinnoitetuista sydänlevyistä	Sydämen hystereesi- ja pyörrevirtahäviöiden vähentäminen
Vuon kulkeutumisen välttäminen muussa kuin sydänmateriaalin kidesuunnassa	Sydämen häviöiden kasvun välttäminen
Poikkipinta-alan kasvattaminen ikeissä verrattuna pylväisiin	Sydämen häviöt pienenevät suhteellisesti enemmän kuin poikkipinnan kasvattamiseen vaaditaan materiaalia
Mekaanisen rasituksen välttäminen piiterässydämissä	Sydämen häviöiden kasvun välttäminen

Seuraavassa on esitetty parhaita käytössä olevia tekniikoita, jotka eivät VITO:n raportin (2011) mukaan ole täysin omaksuttuja esitellyissä perustapauksissa. Vaikka osa esitellyistä tekniikoista onkin pienihäviöisten muuntajien valmistajilla jo laajalti käytössä, voidaan näitä myös yleisesti pitää sellaisina ratkaisuin, joilla muuntajien hyötysuhdetta saadaan edelleen parannettua.

#### *Kuparin käyttö alumiinijohtimiin verrattuna*

Kuparikäämityt muuntajat ovat tehokkaimpia muuntajia tilavuutta kohden. Alumiinijohtimen käyttö kasvattavaa sydämen kokoa, koska samaan sähkönjohtavuuteen päästäkseen on käytettävä suurempaa johtimen poikkipinta-alaa. Sydämen koon kasvu puolestaan kasvattaa sen häviöitä. Esteitä tämän tekniikan hyödyntämiseen voivat olla kuparin korkeampi hinta, vaikka sitä siis kuluisi vähemmän kuin alumiinia vastaavan suorituskyvyn saavuttamiseksi. (VITO 2011: 217–218.) Käämimateriaalin valintoihin vaikuttavat myös usein asiakkaan vaatimukset. Yleisempää onkin vaatia käämeissä käytettävän nimenomaan kuparia.

*Mahdollisimman pyöreän poikkipinnan käyttö sydämen pylväissä*

Sydämessä pyritään käyttämään poikkipinnaltaan mahdollisimman pyöreänmuotoisia pylväitä, jotta tilankäyttö käämien sisällä olisi optimaalista ja kuormitushäviöt pienet. Yleensä käytetään 7- tai 11-portaista poikkileikkauksen muotoa, sillä näillä saavutettava täytekerroin on jo melko hyvä. Pienimmissä, eristyskäyttöön tarkoitetuissa muuntajissa käytetään tyypillisesti suorakulmaista pylvään mallia kustannussyistä. Samoin amorfi-sella sydänmateriaalilla vain suorakulmainen muoto on mahdollinen. (VITO 2011: 218–219.) Taulukossa 3 on esitetty esimerkkejä sydämen poikkileikkauksen muodon vaikutuksesta täytekerroimeen.

**Taulukko 3.** Sydämen poikkileikkauksen muodon vaikutus täytekerroimeen (VITO 2011: 219).

Poikkileikkauksen muoto	Täytekerroin
Ympyrä	1
7-portainen	0,93
9-portainen	0,95
1-portainen eli suorakulmio	0,64

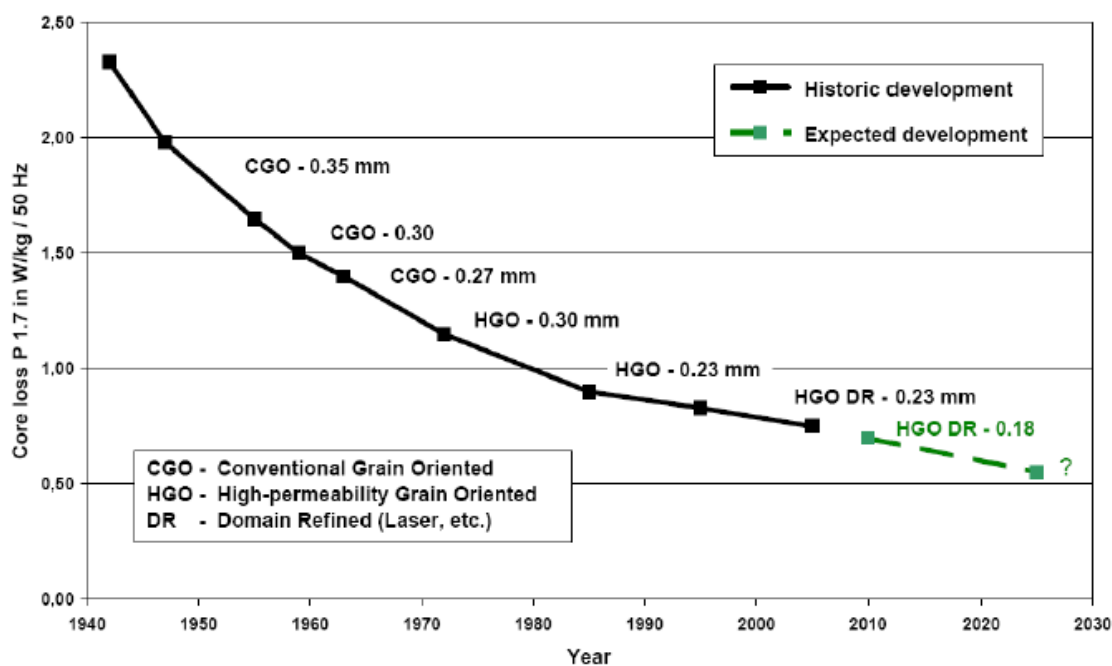
Perustelut tämän tekniikan käyttöönoton esteille ovat VITO:n raportissa (2011: 220) ristiriitaiset. Toisaalta siinä katsotaan, että kustannukset usean sydänlevyveyden leikkaamisesta ja käsittelystä voivat olla este, mutta samalla todetaan tämän työvaiheen olevan eurooppalaisilla valmistajilla hyvin pitkälti automatisoitu, joka siis puolestaan laskee kustannuksia. Toinen mahdollinen este on, että vaikka suorakulmaisen sydämen poikkileikkauksen kyky alentaa kuormitushäviöitä on rajallinen, niin rajojen pysyessä realistisina häviöitä voidaan pienentää esimerkiksi johtimen virrantiheyttä pienentämällä, eli toisin sanoen johtimen poikkipinta-alaa kasvattamalla. (VITO 2011: 220.) Käytännössä kuitenkin mahdollisimman pyöreää poikkileikkausta käytetään aivan pienimpiä muuntajia lukuun ottamatta, sillä kuten raportissakin todettiin, on kyseinen työvaihe pitkälti automatisoitu. Portaiden lukumäärän määräävät sydämen halkaisija sekä valmistajan itsensä määrittelemien käytössä olevien sydänlevyjen leveydet.

*Amorfisen sydänmateriaalin käyttö*

Viimeisen 30 vuoden ajan amorfista metallia on käytetty muuntajien sydämissä ja sen käytön on arvioitu edelleen yleistyvän. Tällaisella materiaalilla sydämen häviöt ovat merkittävästi pienemmät kuin normaalissa piiterässydämessä ja sydän on myös helpompi magnetoida. Toisaalta pienemmästä raudan määrästä johtuen amorfisen metallin kylästymisvuon tiheys on pienempi kuin piiteräksellä, mikä siis johtaa suuremman sydämen poikkipinta-alan tarpeeseen, mikäli kokonaisvuo halutaan pitää samana. Tästä seuraa edelleen johtimen pituuden kasvu, eli suuremmat kuormitushäviöt. Amorfista materiaalia käyttävät muuntajat ovat yleensä suurikokoisempia ja sitä kautta väistämättä kalliimpia kuin perinteiset muuntajat. Edellä mainittujen lisäksi potentiaalisena esteenä amorfisen sydänmateriaalin yleistymiselle voidaan pitää valmistusteknisiä rajoitteita, sillä kyseistä materiaalia on saatavissa vain muutamissa ennalta määritellyissä leveyksissä ja se on haurasta leikattavaksi. Amorfista sydäntä ei siten laminoida levyistä, vaan se valmistetaan ohuesta nauhasta kelaamalla, mikä siis johtaa suorakulmaiseen sydämen poikkipintaan. (VITO 2011: 222–227.)

*Pienempihäviöisen ja ohuemman sydänlevymateriaalin käyttö*

Parempilaatuisen kidesuunnatun sydänlevyn käyttö sekä levyjen ohentaminen on yksi potentiaalinen tapa vähentää sydämen häviöitä (VITO 2011: 220). Kuvassa 6 on esitetty sydänlevyn häviöiden kehittyminen eri valmistustekniikoiden ja levyjen ohentamisen myötä. Vaikka tämä tapa vähentää häviöitä on näistä esitellyistä keinoista muuntajan valmistajan kannalta todennäköisesti yksinkertaisin, ongelmaksi saattaa koitua ohuen laserkäsitellyn sydänlevyn saatavuus. Tällä hetkellä markkinoiden parasta laatua edustavaa, vuontiheydellä 1,7 T ja 50 Hz taajuudella hieman alle 0,7 W/kg häviöihin yltävää 0,20 mm paksua levyä on saatavilla rajoitetusti.



**Kuva 6.** Sydänlevyn häviöiden historiallinen kehitys ja ennustettu kehittyminen (VITO 2011: 241).

#### 4.2 Paras ei vielä saatavilla oleva tekniikka, BNAT

Parhaana ei vielä saatavilla olevana tekniikkana voidaan pitää sellaista teknistä ratkaisua, joka ei vielä ole yleistynyt tai se ei sellaisenaan ole vielä valmis käytettäväksi, vaan vaatii tuotekehitystä. Tällaisena voidaan pitää myös nykyisten tekniikoiden jatkokehitystä.

#### *Amorfisten metallien tuotekehitys*

Amorfisten metallien tuotekehityksellä pyritään löytämään uusia materiaaleja, joiden kyllästymisvuon tiheys olisi lähellä magneettisten teräksien arvoja. Tämä mahdollistaisi nykyisiä amorfisia sydämiä pienemmät sydämet ja täten pienemmät ja kevyemmät muuntajat. (VITO 2011: 239.)

### *Piiteräksen tuotekehitys*

Teollisuuden tuotekehitys tähtää pienempihäviöisen ja korkeamman permeabiliteetin omaavan kidesuunnatun levyn kehittelyyn, jotta se pystyisi vastaamaan vaatimuksiin energiatehokkaammista ja hiljaisemmista muuntajista. Toisaalta myös sydänlevyn valmistuskustannuksia pyritään laskemaan valmistusmenetelmiä kehittämällä. (VITO 2011: 240.)

### *Suprajohtavien tekniikoiden käyttö*

Suprajohdeteknologiaa sovelletaan niin sanottujen korkean lämpötilan suprajohtavien muuntajien kehityksessä. Tällaisessa muuntajassa käämien kupari tai alumiini korvattaisiin suprajohteilla. Hyötyinä olisivat muun muassa johtimien resistiivisten häviöiden puuttuminen, muuntajan pienempi koko sekä parempi ylikuormitettavuus. Vaikka ABB:n valmistama, ensimmäinen suprajohdeteknologiaa käyttävä muuntaja asennettiin sähköverkkoon Sveitsissä jo vuonna 1997, ei suprajohdeteknologian käyttö näytä olevan tällä hetkellä vielä taloudellisesti kannattavaa ja tämän tekniikan käyttöönotto Euroopassa näyttää olevan vielä melko kaukana. (VITO 2011: 242.)

### 4.3 ABB:n Suomessa valmistamat öljyeristeiset muuntajat

Erikoismuuntajiin erikoistunut ABB Oy:n Transformers-yksikkö valmistaa jonkin verran myös niin sanottuja tavallisia tehomuuntajia Pohjoismaiden ja Venäjän markkinoille. Yksiköllä on tuotevalikoimassaan eri tehoisia Suomen sähköasemien tarpeisiin vaki-oituja 115/21 kV:n neste-eristeisiä tehomuuntajia. Taulukossa 4 on esitetty näiden muuntajien laskennalliset nimellistehot  $S_r$  ja huippuhyötysuhdeindeksit ( $PEI$ ). Kaikki muuntajat ovat ONAN-jäähdytteisiä, paitsi 50 ja 63 MVA:n muuntajat ovat yli 65 % teholla toimiessaan ONAF-jäähdytteisiä. Tämä tarkoittaa, että yhtälössä 16 mainittu jäähdytysjärjestelmän vaatima sähköteho  $P_{c0}$  tyhjäkäynnillä on kaikkien muuntajien osalta nolla. (ABB 2014).

**Taulukko 4.** Eräiden ABB Oy, Transformersin valmistamien 110/21 kV neste-eristeisten tehomuuntajien laskennalliset tehot ja huippuhyötysuhdeindeksit sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimukseen (ABB 2014).

$S_r$ (MVA)	PEI (%)	Vaatimusten täytyminen
10	99,659	Vaihe 1 & 2
12,5	99,676	Vaihe 1 & 2
16	99,701	Vaihe 1 & 2
20	99,726	Vaihe 1 & 2
25	99,743	Vaihe 1 & 2
31,5	99,755	Vaihe 1 & 2
40	99,769	Vaihe 1 & 2
50	99,786	Vaihe 1 & 2
63	99,797	Vaihe 1 & 2

Vertaamalla yllä olevan taulukon PEI-arvoja liitteessä 2 esitettyihin, asetuksessa vaadittaviin PEI-arvoihin, nähdään, että kyseiset ABB Oy:n muuntajat täyttävät jo vaiheen 2 vaatimukset. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että kyseiset arvot ovat valmistajan taakaamat arvot häviöille, eivät todelliset mitatut häviöt. Standardin IEC 60076–1 mukaan suurin sallittu toleranssi kokonaishäviöiden osalta on +10 %. Erikseen mitattuina sekä kuormitus- että tyhjäkäyntihäviöiden toleranssi on +15 %, kuitenkin niin ettei kokonaishäviöille sallittu toleranssi ylity. Standardi ei kuitenkaan ota kantaa häviöiden suuruuteen, vaan ainoastaan vertaa mitattuja häviöitä ilmoitettuihin tai taattuuihin arvoihin. Asetus puolestaan vaatii, että muuntajan ilmoitetut häviöt tai niiden perusteella laskettu PEI-arvo ovat asetuksen sallimia enimmäisarvoja pienemmät. Häviöiden mitattu arvo ei asetuksen mukaan saa olla yli 5 % suurempi kuin ilmoitettu arvo. Näin ollen asetuksen voimaantullessa häviöilytykset eivät enää ole sovittavissa valmistajan ja asiakkaan kesken esimerkiksi sakkomaksujen muodossa, vaan muuntajaa ei saa toimittaa mikäli asetuksessa säädetty arvot mittaustoleranssi mukaan lukien ylittyy.

Taulukon 4 muuntajat täyttäisivät kuitenkin asetuksen molempien vaiheiden vaatimukset, vaikka sekä tyhjäkäynti- että kuormitushäviöt olisivat 10 % ilmoitettua suuremmat, eli kokonaishäviöiden ylitys olisi juuri standardin sallimissa rajoissa. Täten asetuksella

ei ole suoria vaikutuksia valmistukseen näiden muuntajien osalta. Todennäköistä kuitenkin on, että tekniikan kehittyessä tullaan säätämään myös nyt määriteltyjä rajoja tiukempia vaatimuksia, mikä edellyttää muuntajien valmistajilta jatkuvaa kehitystä kohti energiatehokkaampia tuotteita.

Taulukossa 5 on esitetty ABB:n valmistamien jakelumuuntajien nimellistehot, -jännitteet ja -häviöt. Verrattaessa arvoja asetuksen vaatimuksiin, nähdään, että uusimmatkaan standardijakelumuuntajat eivät tyhjäkäyntihäviöiden osalta täytä vielä vaatimuksia. Kuormitushäviöiden osalta vaatimukset täyttyvät vaiheen 1 osalta sekä suurimmilla jakelumuuntajilla myös vaiheen 2 osalta. Näitä muuntajia tulee tyhjäkäyntihäviöiden osalta kehittää energiatehokkaammiksi, jotta niitä saadaan EU:n alueella myydä. Etenkin asetuksen toisen vaiheen vaatimukset tyhjäkäyntihäviöille ovat erittäin tiukat, mikä asettaa tuotekehitykselle suuret vaatimukset.

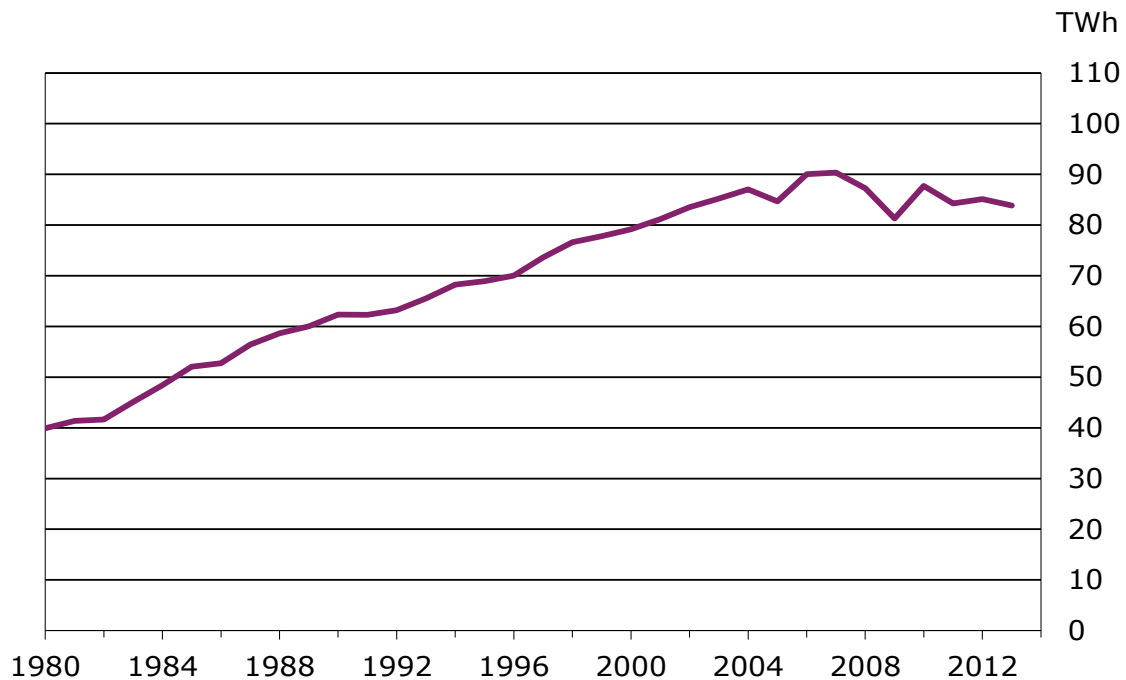
**Taulukko 5.** Eräiden ABB:n valmistamien neste-eristeisten jakelumuuntajien laskennalliset tehot ja häviöt sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin (ABB 2014).

$S_r$ (kVA)	$U_{n1}/U_{n2}$ (V/V)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täytyminen
30	20 500 / 410	100	585	Ei
50	20 500 / 410	105	850	Ei
100	20 500 / 410	175	1 550	Ei
200	20 500 / 410	405	2 345	Ei
315	20 500 / 410	520	3 150	Ei
500	20 500 / 410	705	4 900	Ei
630	20 500 / 410	850	5 600	Ei
800	20 500 / 410	1 020	6 800	Ei
1 000	20 500 / 410	1 240	8 000	Ei
1 250	20 500 / 410	1 570	9 100	Ei
1 600	20 500 / 410	1 880	11 200	Ei
2 000	20 500 / 410	2 130	13 600	Ei

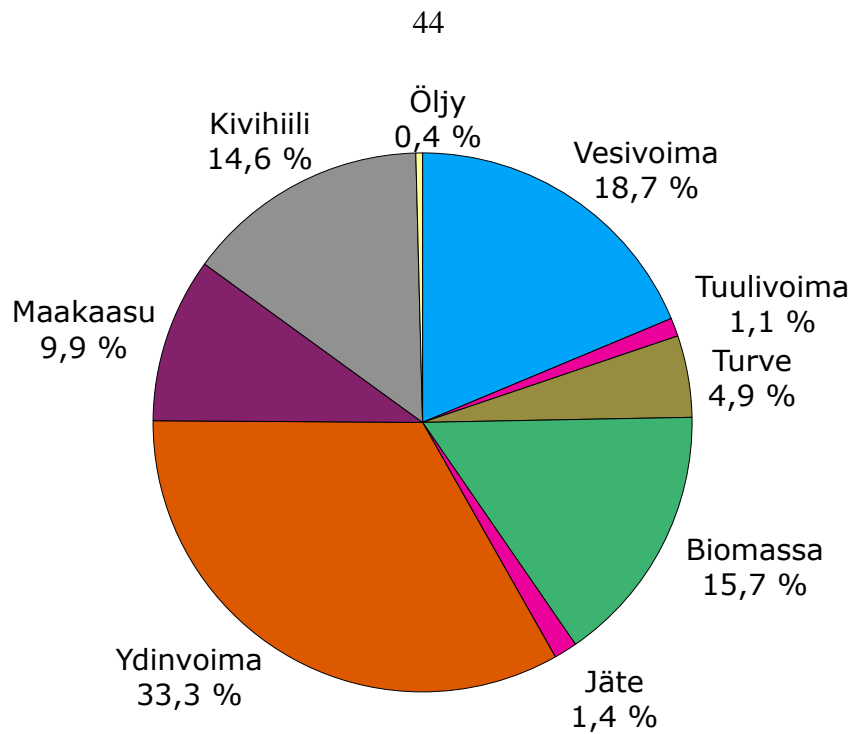
## 5 ASETUKSEN VAIKUTUKSET HÄVIÖISTÄ AIHEUTUVIIN PÄÄSTÖIHIN

### 5.1 Sähkönkulutus Suomessa

Vuonna 2013 sähkön kokonaiskulutus Suomessa oli 83,9 TWh (Energiateollisuus 2014a: 2). Kuvasta 7 nähdään, että sähkönkulutuksen kasvu on jatkunut tasaisena vuodesta 1980 aina vuoteen 2007, jolloin alkoi maailmanlaajuinen finanssikriisi. Kriisin seurauksena investoinnit, ja sen myötä myös teollisuuden tuotanto hiipuivat, mikä näkyy myös sähkönkulutuksen tasaantumisena. Sähkön kokonaiskulutuksesta nettotuonnin osuus oli vuonna 2013 18,7 %, loput 68,2 TWh tuotettiin kotimaassa eri energialähteillä kuvassa 8 näkyvän jakauman mukaisesti. Hiilidioksidivapaiden energialähteiden osuus kotimaisesta sähköntuotannosta oli noin 69 %. Tuontisähköstä noin kolme neljäsosaa tuli vuonna 2013 muista Pohjoismaista, noin neljäsosa Venäjältä sekä pieni osuus Viirosta (Energiateollisuus 2014a: 16).

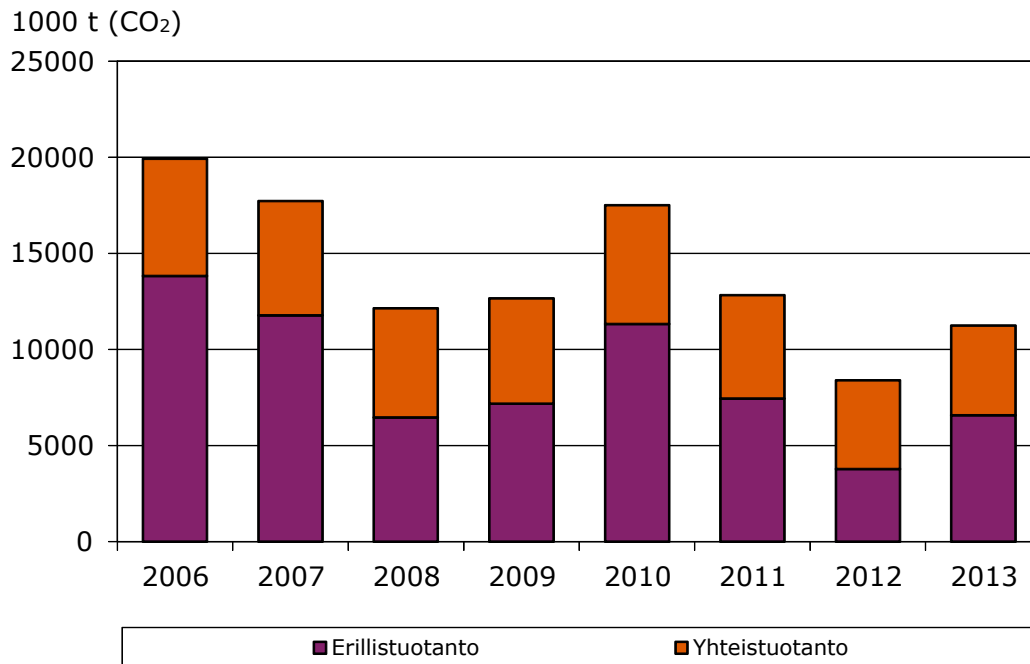


**Kuva 7.** Sähkön kokonaiskulutus Suomessa vuosina 1980–2013 (Energiateollisuus 2014a: 2).



**Kuva 8.** Sähkön tuotanto energialähteittäin Suomessa vuonna 2013 (Energiateollisuus 2014a: 12).

Kuvassa 9 on esitetty sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt vuosina 2006–2013. Päästöt luonnollisesti vaihtelevat jonkin verran sähkön kokonaistuotannon mukaan, mutta suurempi merkitys päästöihin on sillä, miten paljon vesivoimaa on tarjolla pohjoismaisilla markkinoilla. Suuri vesivoiman osuus vähentää erityisesti hiilen käyttöä, mikä näkyy sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen selvänä pienenemisenä. Esimerkkinä voidaan vertailla vuosia 2010 ja 2012; vuonna 2010 sähkön kokonaiskulutus oli 87,7 TWh ja vuonna 2012 85,1 TWh, mutta kuitenkin vuoden 2012 sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt olivat noin puolet vuoden 2010 luvuista. Tämä selittyy sillä, että vuonna 2010 Ruotsista tuotiin vain 2 TWh sähköä ja erillistuotannon osuus oli noin 14,2 TWh, kun puolestaan vuonna 2012 Ruotsista tuotiin sähköä 14,2 TWh ja erillistuotannolla tuotettiin vain 5,2 TWh. (Energiateollisuus 2014b.) Vastaavasti sähköntuotannon ominaispäästöt, eli hiilidioksidipäästöt tuotettua kilowattituntia kohden olivat vuonna 2010 noin 240 grammaa ja vuonna 2012 noin 130 grammaa (Energiateollisuus 2013). Tässä tulee huomioida, että luvut koskevat vain Suomessa tuotettua sähköä eikä tuontisähkön päästöjä ole huomioitu. Motivan (2014) mukaan Suomen keskimääräinen sähkönhankinnan CO<sub>2</sub>-päästökerroin viiden vuoden liukuvana keskiarvona laskettuna on 223 g/kWh.



**Kuva 9.** Sähköntuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt vuosittain (Energiateollisuus 2014a: 21).

## 5.2 Verkostohäviöt ja muuntajien osuus

Siirrettäessä sähköenergiaa paikasta toiseen syntyy aina häviöitä, joiden suuruus riippuu muun muassa sähköverkkoon asennettujen komponenttien ominaisuuksista sekä siirtoetäisyyksistä. Häviöillä on suuri merkitys sähkönsiirron ja -jakelun taloudellisuuteen sekä niiden vaikutuksiin ympäristölle. Tähän saakka energiansiirtoketjun kokonaistehokkuuden kannalta on ollut kannattavaa tuottaa sähköä suurissa voimalaitoksissa kohtuullisen kaukana kulutuskohteista, sillä tuotantokustannukset ovat niissä olleet yleensä alhaisemmat kuin pienissä voimalaitoksissa ja siirtohäviöt ovat verraten pieniä. Nykyään kuitenkin tekniikan kehityksen myötä on alettu suosia hajautettua energiantuotantoa. Sen etuja ovat parempi kokonaishyötysuhde, pienemmät päästöt, helpompi sijoituspaikan valinta sekä sähköntuotantomuotojen monipuolisempi jakauma. Esimerkiksi johdohaaran loppupäässä sijaitseva voimalaitos pienentää johdon energiahäviöitä. (Lakervi & Partanen 2008: 209, 211.)

Taulukossa 6 on esitetty sähkön kokonaiskulutus sekä siirto- ja jakeluhäviöt Suomessa menneinä vuosina. Tällä hetkellä sähkön siirto- ja jakeluhäviöiden osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on noin 3,5 %. Tähän lukuun sisältyy kantaverkon häviöt, joiden suuruus on noin 1,2 TWh, mikä siis vastaa noin 1,5 prosenttia koko Suomen sähkönkulutuksesta (Energiavirasto 2013). Käytännössä kaikki sähkön siirtohäviöt, eli noin 40 % koko sähköverkon häviöistä selittyvät siten kantaverkon häviöillä. Jakeluhäviöiden osuus verkostohäviöistä on noin 60 %. Sekä siirto- että jakeluhäviöiden prosentuaalinen osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on pienentynyt noin puoleen vuoden 1970 tasosta, mutta voimakkaasti kasvaneen kokonaiskulutuksen myötä häviöihin kuluva energiamäärä on lähes kaksinkertaistunut. Tästä syystä pienilläkin yksittäisillä parannuksilla häviöiden pienentämiseksi on merkittäviä taloudellisia ja ympäristön kannalta positiivisia vaikutuksia. Lisäksi, koska häviöt kertaantuvat verkossa, eli verkon loppupään häviöteho joudutaan syöttämään verkkoon, mikä puolestaan kasvattaa muun verkon osien häviöitä, on ensisijaisen tärkeää pienentää häviöitä nimenomaan verkon loppupäästä. Tähän on myös asetuksen vaatimuksissa kiinnitetty huomiota, sillä erityisesti jakelumuuntajien tyhjäkäyntihäviöiden rajat ovat todella tiukat.

**Taulukko 6.** Sähkön kokonaiskulutus sekä siirto- ja jakeluhäviöt Suomessa (Energiateollisuus 2014c).

<b>Vuosi</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2012</b>
Kokonaiskulutus (GWh)	21 817	39 921	62 334	79 158	87 704	85 131
Siirtohäviöt (GWh)	600	1 054	1 203	906	1 184	1 174
Siirtohäviöt (%)	2,75	2,64	1,93	1,14	1,35	1,38
Jakeluhäviöt (GWh)	911	1 251	1 622	1 726	1 582	1 741
Jakeluhäviöt (%)	4,18	3,13	2,60	2,18	1,80	2,04
Häviöt yhteensä (GWh)	1 511	2 305	2 825	2 632	2 766	2 915
Häviöt yhteensä (%)	6,93	5,77	4,53	3,32	3,15	3,42

Johdolla tai muuntajassa syntyvien energiahäviöiden laskenta on keskeinen osa häviöiden aiheuttamien kustannusten sekä muiden vaikutusten määrittämistä. Johtimien häviöt ovat kuormitushäviöitä, jotka riippuvat neliöllisesti johtimessa kulkevasta vaihevirrasta aivan luvun 2 alussa esitetyn yhtälön 1 mukaan. Muuntajien häviöt koostuvat puolestaan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä, kuten kappaleessa 2.2 esitettiin. Muuntajan kuormitushäviöteho  $P_k$  tietyllä ajanhetkellä voidaan laskea yhtälöstä

$$P_k = (S / S_r)^2 \cdot P_{kn}, \quad (17)$$

missä  $S$  on muuntajan kuorma kyseisellä hetkellä,  $S_r$  on muuntajan nimellisteho ja  $P_{kn}$  on muuntajan nimelliskuormitushäviöteho. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt  $P_0$  puolestaan riippuvat jännitteestä ja ne voidaan laskea yhtälöstä

$$P_0 = (U_2 / U_{n2})^2 \cdot P_{0n}, \quad (18)$$

missä  $U_2$  on muuntajan toision jännite,  $U_{n2}$  toision nimellisjännite ja  $P_{0n}$  muuntajan kilpiarvoissa ilmoitettu nimellistyhjäkäyntihäviöteho. Käytännön laskuissa muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä voidaan kuitenkin käsitellä vakiona.

Häviötehon ajallinen vaihtelu huomioon ottaen voidaan laskea vuodessa syntyvät energiahäviöt. Käytännössä niiden tarkka laskeminen on erittäin työläs toimenpide, mutta likiarvoihin päästään käyttämällä apuna huipunkäyttöaika, eli tuntimäärää, jonka aikana olisi nimellisteholla toimittaessa tuotettu tai kulutettu koko vuoden teho. Tällöin vuodessa syntyvät energiahäviöt  $W_h$  voidaan laskea yhtälöstä

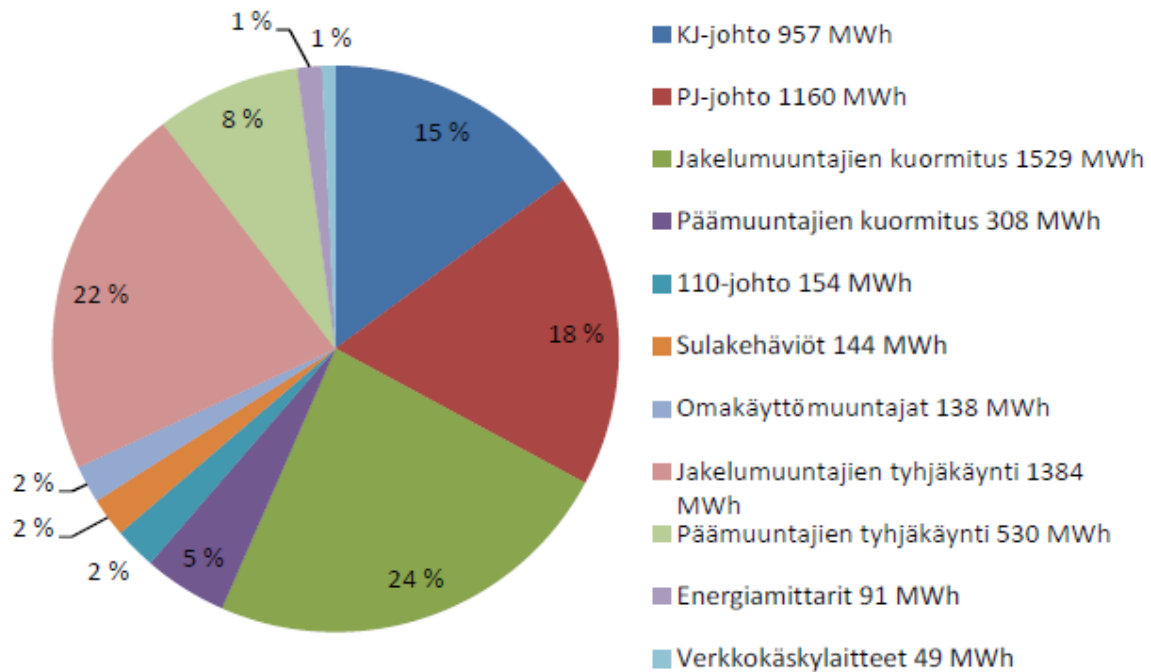
$$W_h \approx P_{hmax} t_h, \quad (19)$$

missä  $P_{hmax}$  on huippuhäviöteho ja  $t_h$  on häviöiden huipunkäyttöaika. Ellei tarkempaa tietoa ole saatavilla, voidaan käyttää tyypillisiä häviöiden huipunkäyttöaikoja, jotka ovat pienjänniteverkolle 700–1000 h/a, keskijänniteverkolle 2000–2500 h/a ja sähköasemalle 3000–3500 h/a. Muuntajien tyhjäkäyntihäviöiden huipunkäyttöaikana käytetään 8760 h/a. (Lakervi ym. 2008: 34–35.)

Fingridin vastuulla oleva kantaverkko jakautuu 110 kV, 220 kV ja 400 kV jännitetasoihin. Muuntohäviöiden osuus kokonaishäviöistä 400 ja 110 kV jännitetasoilla on keskimäärin noin 13 %, mutta 220 kV jännitetasolla jopa yli 30 % (Griinari 2014). Muuntajahäviöt korostuvat 220 kV jännitetasolla, sillä sen verkkopituus on huomattavasti lyhempi kuin 400 ja 110 kV jännitetasojen verkkopituudet. Keskimäärin muuntohäviöiden osuudeksi kantaverkossa voidaan verkkopituuksien mukaan painotettuna arvioida 16 %. 110 kV:n verkossa tyhjäkäyntihäviöiden osuus on vuositasolla keskimäärin noin 60 % muuntajien kokonaishäviöistä (Griinari 2014).

Sähkönjakeluverkon häviöt muodostuvat päämuuntajien ja keskijänniteverkon lisäksi jakelumuuntajissa ja pienjänniteverkossa sekä erilaisissa verkonkäyttölaitteissa. Jakelumuuntajien ja PJ-verkon häviöt muodostavat tavallisesti noin 40–60 % kokonaishäviöistä verkon rakenteesta riippuen. Erityisesti pitkillä pienjännitteen siirtoetäisyyksillä niiden häviöt voivat kuitenkin olla jopa 80 % jakeluverkon kokonaishäviöistä. (Kuisma 2008: 42; Haaranen 2011: 55). Häviöiden jakautuminen johtojen ja muuntajien kesken riippuu luonnollisesti pitkälti verkon rakenteesta, sillä muuntajien lukumäärä vaikuttaa suoraan tyhjäkäyntihäviöiden määrään. Kaupunkiverkossa, jossa siirtomatkat ovat yleensä lyhyet, muuntajien osuus häviöistä on suurempi kuin maaseudun verkossa, jossa suurin osa häviöistä kuluu pitkien siirtomatkojen vuoksi johtimissa.

Finning (2010: 3, 52) on diplomityössään määrittänyt Forssan Verkkopalvelut Oy:n sähköverkon häviöiden jakautumisen eri lähteiden kesken. Tämä on esitetty kuvassa 10. Kyseessä on kohtuullisen pieni verkko niin sähkönkulutukseltaan kuin alueelliselta kattavuudeltaankin. Päämuuntajia kyseisessä verkossa on neljä ja ne sijaitsevat kahdella eri sähköasemalla. Jakelumuuntamoita sähköverkossa on 210 ja verkossa siirretty energia 250 GWh vuodessa. Kuvan diagrammin perusteella voidaan laskea, että pienjänniteverkon ja jakelumuuntajien osuus häviöistä on hieman yli 60 % ja keskijänniteverkon ja päämuuntajien osuus vajaa 30 %. Muuntajien osuus häviöstä on hieman alle 60 %, josta jakelumuuntajien osuus noin kolme neljäsosaa. Täten jakelumuuntajien osuudeksi kokonaishäviöistä tulee noin 45 %. Päämuuntajien häviöt jakaantuvat siten, että kuormitushäviöiden osuus on noin yksi kolmasosa ja tyhjäkäyntihäviöiden osuus noin kaksi



**Kuva 10.** Häviöiden lähteet Forssan Verkkopalvelut Oy:n sähköverkossa (Finning 2010: 52).

kolmasosaa. Jakelumuuntajien osalta tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt puolestaan jakautuvat lähes tasan.

Kuisma (2008: 43) on omassa työssään määrittänyt häviöiden jakautumisen Porin Energia Sähköverkot Oy:n verkossa samoin kuin edellä esitettiin. Muuntajien osuus kyseisen verkon häviöistä on noin 40 %, josta jakelumuuntajien osuus noin 60 % eli kokonaisuudessaan häviöistä noin neljäsosa. Muuntajahäviöt ovat siis jakautuneet tasaisemmin pää- ja jakelumuuntajien kesken kuin Finningin (2010) tarkastelemassa verkossa. Lisäksi sekä pää- että jakelumuuntajien häviöt jakaantuvat siten, että kuormitushäviöiden osuus on noin yksi kolmasosa ja tyhjäkäyntihäviöiden osuus noin kaksi kolmasosaa. Eroja eri sähköverkkojen häviöiden jakautumisessa siis on, mikä on ymmärrettävää, sillä verkot ovat yksilöllisiä niin laajuudeltaan, sähkönkulutukseltaan kuin kuormitustyyppiltään. Esimerkiksi edellä esitetyn Kuisman (2008: 3) tarkasteleman verkon sähkönsiirron määrä oli nelinkertainen verrattuna Finningin (2010) tarkastelemaan verkkoon. Syy siihen, miksi toisessa verkossa muuntajien – erityisesti jakelumuuntajien – häviöt ovat pienemmät, löytyy todennäköisesti niiden suhteellisesta kuormituksesta. Porin Energia Sähköverkko

Oy:n jakelumuuntajien kuormitusaste on siis kohtuullisen alhainen. Tämän puolesta puhuu myös kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöiden jakautuminen jakelumuuntajissa verrattuna Forssan Verkkopalvelut Oy:n jakelumuuntajiin.

Tietoa sähkönjakeluverkkojen häviöiden jakautumisesta, ja erityisesti mikä on muuntajien osuus häviöistä, on hyvin vähän saatavilla. Edellä käsiteltyjen kahden toisistaan poikkeavan sähkönjakeluverkon perustella on vaikeaa tehdä kattavaa yleistystä, mutta karkeasti voidaan arvioida muuntajien osuudeksi sähkönjakeluverkkojen häviöistä keskimäärin 50 %. Jakelumuuntajien osuus tästä on jakeluverkon ominaisuuksista ja jakelumuuntajien kuormituksesta riippuen noin kaksi kolmasosaa. Verkon käyttövarmuustekijöiden vuoksi päämuuntajat ovat yleensä melko kevyessä kuormassa nimellistehoonsa nähden, eli tyhjäkäyntihäviöiden osuus on noin kaksi kolmasosaa ja loput muuntajan häviöistä ovat kuormitushäviöitä. Jakelumuuntajat puolestaan ovat tyypillisesti hieman korkeammassa kuormassa, joten tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden voidaan arvioida niissä jakautuvan lähes tasan.

### 5.3 Muuntajien häviöistä aiheutuvat päästöt

Edellisessä kappaleessa käsiteltiin muuntajien osuutta häviöistä ja niiden perusteella voidaan nyt päätellä muuntajien häviöiden vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin. Kantaverkon häviötehoksi mainittiin noin 1,2 TWh, josta muuntajien osuus on noin 16 % eli 192 GWh. Laskettuna Suomen keskimääräisellä sähkönhankinnan CO<sub>2</sub>-päästökerrotoimella, joka siis oli 223 g/kWh, saadaan kantaverkon muuntajien häviöistä aiheutuneiksi päästöiksi noin 43 000 tonnia hiilidioksidia. Mikäli käytetään tyhjäkäyntihäviöiden osalta 110 kV:n verkon keskimääräistä osuutta, voidaan kantaverkon muuntajien häviöt jakaa edelleen siten, että tyhjäkäyntihäviöiden päästöt ovat noin 26 000 tonnia ja kuormitushäviöiden päästöt noin 17 000 tonnia hiilidioksidia.

Jakeluhäviöiden osuus Suomen sähkönkulutuksesta vuonna 2012 oli 1,741 TWh, josta edellisen kappaleen lopussa esitetyn arvion mukaisesti muuntajahäviöiden osuus noin puolet eli 0,87 TWh. Tämä jakautui edelleen jakelu- ja päämuuntajien kesken siten, että jakelumuuntajien osuudeksi arvioidaan noin kaksi kolmasosaa. Täten jakelumuuntajien

häviöenergiaksi saadaan 580 GWh ja noin 130 000 tonnia hiilidioksidia. Jakelumuuntajien häviöt jakautuvat lähes tasan tyhjäkäyntihäviöiden ja kuormitushäviöiden kesken, joten molempien päästöt olivat siis 65 000 tonnia. Päämuuntajien osalta kokonaishäviöenergiaksi saadaan 290 GWh ja päästöiksi 65 000 tonnia. Nämä puolestaan jakautuvat siten, että tyhjäkäyntihäviöiden osuus on kaksi kolmasosaa, eli päästöinä noin 43 000 tonnia. Kuormitushäviöiden päästöt ovat siten noin 22 000 tonnia.

Yhteensä kantaverkon ja sähkönjakeluverkkojen muuntajien hiilidioksidipäästöt vuoden 2012 arvoilla laskettuna olivat noin 240 000 tonnia. Tämä vastaa noin 55 000 sähkölämmitteisen omakotitalon vuotuisia päästöjä kulutetun energian osalta.

#### 5.4 Verkon muuntajien PEI ja häviötehot

Muuntaja-asetuksen (N:o 548/2014) vaikutuksia CO<sub>2</sub>-päästöihin arvioitaessa täytyisi tietää tällä hetkellä verkossa olevien muuntajien suoritusarvoja. Koska Suomessa on yli 800 sähköasemaa muuntajineen sekä yli 130 000 jakelumuuntamoaa, olisi tällaisen tietomäärän kerääminen ja analysoiminen erittäin työlästä, eikä käytännössä edes mahdollista. Likiarvoihin päästään suppeammallakin otannalla sekä keskiarvoja käyttämällä, sillä suurin osa Suomen sähköverkosta on rakennettu 1960- ja 1970-luvulla ja on siten hyvin samoilla periaatteilla rakennettua ympäri maan.

##### 5.4.1 Tehomuuntajat

Väisänen (2012: 51) on työssään laskenut Tampereen Sähköverkko Oy:n 21 päämuuntajalle keskimääräiset sähköiset arvot, ja ne on esitetty taulukossa 7. Ilmoitettu kuormitushäviöteho on mitä ilmeisimmin keskimääräisen kuormituksen mukainen häviöteho, joten häviöitä vastaavaa PEI-arvoa ei tämän perusteella voida laskea.

**Taulukko 7.** Väisäsen (2012: 51) määrittämät päämuuntajien keskimääräiset sähköiset arvot sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin.

$S_n$ (MVA)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täyttyminen
33,4	19 900	(63 000)	Ei voida laskea

Finning (2009) on puolestaan eritellyt työssään ja edellä esitellyn Forssan Verkkopalvelut Oy:n verkon neljän päämuuntajan sähköiset arvot. Finningin esittämien arvojen perusteella lasketut päämuuntajien keskimääräiset sähköiset arvot on esitetty taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Forssan Verkkopalvelut Oy:n päämuuntajien keskimääräiset suoritusarvot sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin (Finning 2009).

$S_n$ (MVA)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täyttyminen
19	15 200	91 000	Ei

Edellisten lisäksi tietoja verkkoon asennettujen muuntajien suoritusarvoista löytyy myös Palolan (2014: 186) väitöskirjasta. Siinä hän on listannut Helen Sähköverkko Oy:n päämuuntajat suoritusarvoineen. Taulukkoon 9 on laskettu Palolan esittämistä muuntajista vain luonnollisella öljynkierrolla varustettujen keskimääräiset sähköiset arvot, sillä pakotetun öljynkierron muuntajien huippuhyötysuhdeindeksin laskemiseen tarvittavaa pumpun tehoa ei ole tiedossa. Maininnan arvoista kuitenkin on, että jäähdytystapa jakautui muuntajien lukumäärissä lähes tasan luonnollisen ja pakotetun öljynkierron kesken. Tämä johtuu siitä, että pakotettu öljynkierto on tiiviisti rakennetuille alueille soveliaampi.

**Taulukko 9.** Palolan (2014: 186) esittämät Helen Sähköverkko Oy:n luonnollisella öljynkierrolla varustettujen päämuuntajien keskimääräiset sähköiset arvot sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin.

$S_n$ (MVA)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täyttyminen
38	22 900	172 000	Ei

Vaasan Sähköverkko Oy:llä on puolestaan ollut vuonna 2009 yhteensä 16 päämuuntajaa, joiden keskiteho on ollut noin 22 MVA (Nykänen 2009). Havaitaan, että suurissa kaupungeissa päämuuntajien tehot ovat melko suuret, 30–40 MVA, koska kulutuskin on suurta. Pienempien kaupunkien sähköverkkojen päämuuntajat jäävät puolestaan noin 20 MVA:n paikkeille. Muuntajien kokoon vaikuttaa myös kaupunkirakenne, sillä tiiviisti rakennetuilla alueilla, joissa siirto- ja jakeluetäisyydet ovat lyhyet, voidaan käyttää suuriakin muuntajayksiköitä, kun taas haja-asutusalueilla on edullisempaa käyttää useampaa pienempitehoista muuntajaa. Energiaviraston (2013) mukaan jakeluverkkojen 110 kV tai suurempijännitteisten muuntajien keskimääräinen teho on 21,7 MVA ja niitä on koko maassa noin tuhat kappaletta.

Kuten edellä jo mainittiin, suurin osa Suomen sähköverkosta on rakennettu 1960- ja 1970-luvulla. Kun päämuuntajien pitoajat ovat 30–45 vuotta, on sähköverkossa edelleen runsaasti tuona ajanjaksona asennettuja muuntajia, mutta ensimmäisiä on jo korvattu uusilla. Vuosien saatossa on lisäksi asennettu runsaasti muuntajia jo siitäkin syystä, että sähkönkulutus on lähestulkoon nelinkertaistunut vuoden 1970 tasosta. Helen Sähköverkko Oy:n päämuuntajien keski-ikä on hieman alle 22 vuotta. Helsingin väkiluku ja infrastruktuuri on kuitenkin kasvanut viime vuosikymmeninä merkittävästi, joten muuntajiakin on täytynyt asentaa verkkoon kattamaan muuta maata nopeammin kasvanut kuormitus, mikä siis laskee Helen Sähköverkon muuntajien keskimääräistä ikää. Lisäksi käytössä on lukuisia OFAF-tyypin muuntajia, jotka korkeamman lämpötilan vuoksi vanhenevat nopeammin ja siksi myös niiden pitoajat ovat esimerkiksi yleisten ONAF-tyypin muuntajia lyhempiä.

Energiavirasto käyttää verkon nykykäyttöarvon laskemiseen valvontamenetelmien mukaan määritettyä keski-ikää. Tämän mukaan yksittäisen komponentin ikä ei voi olla pitoaikaa suurempi, mikä todennäköisesti laskee keski-ikää. Mikäli komponentin ikätietoa ei ole, tulee sen ikänä käyttää 70 % komponentin pitoajasta. Lisäksi päämuuntajan perusteellisen huollon sallitaan laskevan päämuuntajan ikää 20 vuotta kerran valitun pitoajan aikana. Nämä molemmat todennäköisesti vaikuttavat myös keski-ikää laskevasti. Energiaviraston käyttämän jaottelun mukaisesti 110 kV:n päämuuntajat-komponenttiryhmän suuntaa-antava keski-ikä on noin 20 vuotta. (Kilponen 2014.) Huomioiden kui-

tenkin edellä esitetyt keski-ikään laskevasti vaikuttavat tekijät, voidaan päämuuntajien todellisen keski-ian arvioida olevan ainakin noin 25 vuotta.

Seuraavasta taulukosta nähdään ABB Strömbergin noin 25 vuotta sitten valmistamien 110 kV:n muuntajien kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt sekä PEI-arvot. Edellä esitetyn sähköverkon päämuuntajien keskimääräisen iän määrittämisen perusteella näitä arvoja voidaan pitää myös sähköverkon päämuuntajien keskimääräisinä suoritusarvoina. Valtaosa Suomen sähköverkkoon aikanaan asennetuista muuntajista on toimitettu Vaasan muuntajatehtaalta. Muuntajien PEI-arvot vaihtelevat asetuksen vaiheen 1 rajan molemmin puolin tehosta riippuen. Edellä esitetyt eri sähköverkkoyhtiöiden päämuuntajien suoritusarvot vastaavat taulukon 10 arvoja kohtalaisesti.

**Taulukko 10.** Eräiden ABB:n valmistamien 110 kV öljyeristeisien standarditehomuuntajien laskennalliset tehot, häviöt sekä huippuhyötysuhdeindeksit (ABB Strömberg 1990: 269).

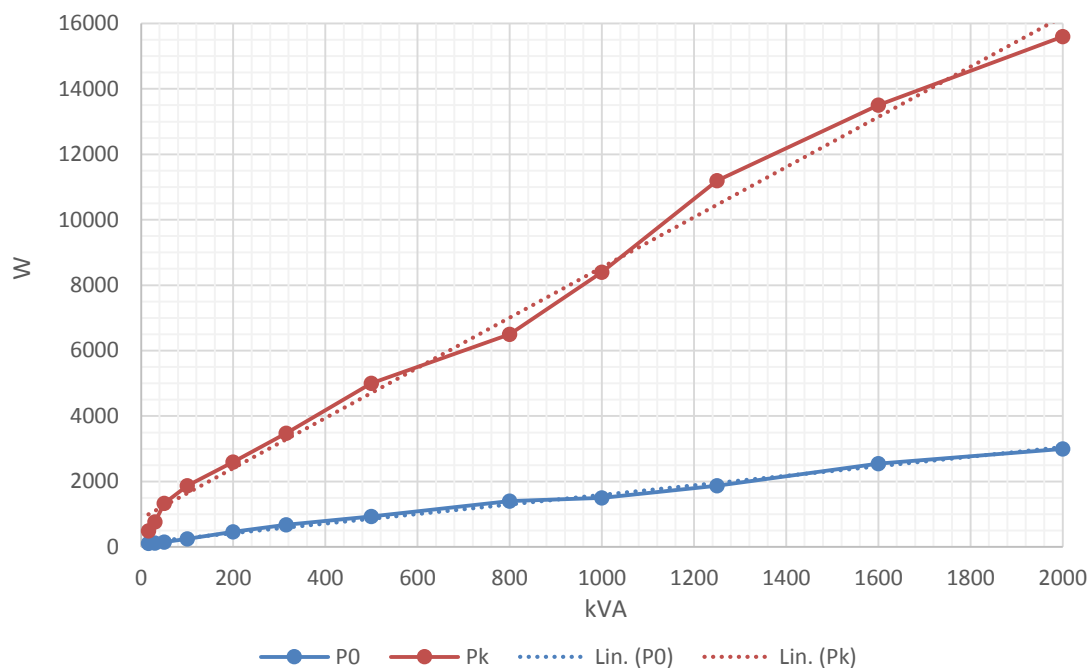
$S_r$ (MVA)	$P_0$ (kW)	$P_k$ (kW)	PEI (%)	Vaatimusten täyttyminen
10	9,0	60	99,535	Ei
16	11,0	85	99,618	Vaihe 1
20	13,5	100	99,633	Ei
25	15,5	115	99,662	Vaihe 1
31,5	18,0	140	99,681	Vaihe 1
40	23,5	170	99,684	Ei
50	27,0	200	99,706	Vaihe 1
63	32,0	245	99,719	Vaihe 1

#### 5.4.2 Jakelumuuntajat

Väisänen (2012: 52) diplomityöstä löytyy myös kohdeverkon 1837 jakelumuuntajalle lasketut keskimääräiset sähköiset arvot ja ne on esitetty taulukossa 11. Lukumäärällisesti eniten on 500 kVA:n muuntajia, noin kolmasosa jakelumuuntajien kokonaismäärästä. Kuvassa 11 on esitetty liitteessä 3 taulukoitujen Strömbergin vuonna 1982 valmistamien

**Taulukko 11.** Väisäsen (2012) määrittelemät jakelumuuntajien keskimääräiset sähköiset arvot sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin.

$S_r$ (kVA)	$P_k$ (W)	$P_0$ (W)	Vaatimusten täyttyminen
535	5 200	850	Ei



**Kuva 11.** Strömbergin (1982: 235) valmistamien jakelumuuntajien häviöt suhteessa muuntajan tehoon.

jakelumuuntajien häviöiden käyttäytyminen tehon suhteen. Nähdään, että sekä tyhjäkäynti- että kuormitushäviöt kasvavat melko lineaarisesti muuntajan tehon kasvaessa. Väisäsen esittämät arvot osuvat kuormitushäviöiden osalta hyvin käyrälle. Tyhjäkäyntihäviöt ovat hieman alhaisemmat kuin kuvaajan muuntajissa, mutta kuitenkin realistiset, sillä Strömbergin on valmistanut jakelumuuntajia erilaisilla häviösarjoilla, esimerkiksi alennetuilla tyhjäkäyntihäviöillä.

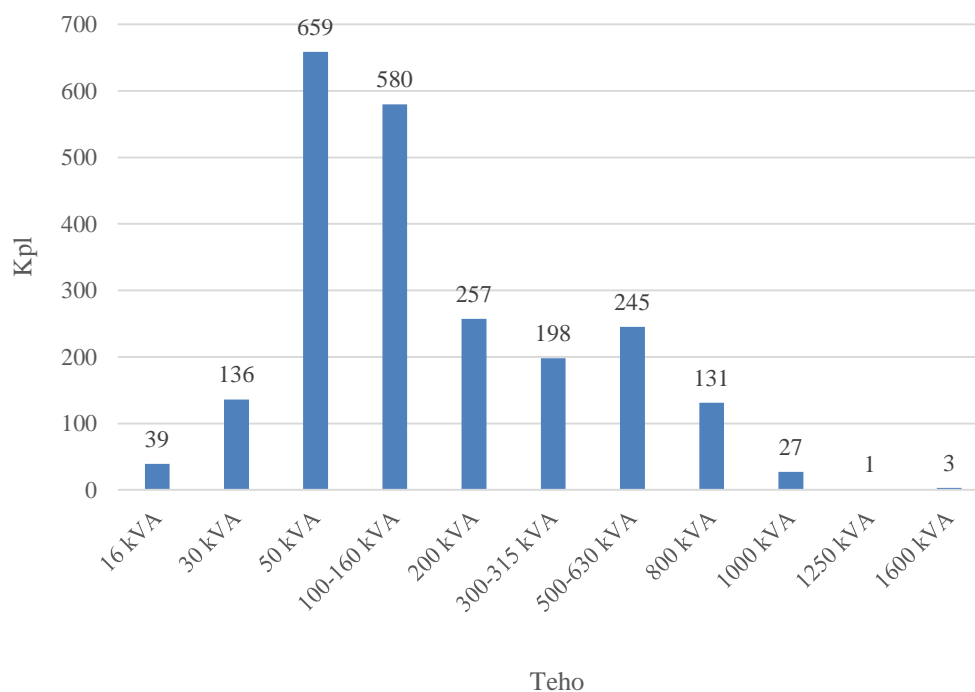
Finning (2009) on esittänyt työssään jakelumuuntajien sähköisistä arvoista ainoastaan nimellistehon keskiarvon. Tyhjäkäyntihäviöteho voidaan helposti laskea kun tiedetään jakelumuuntajien lukumäärä sekä kuvan 10 perusteella koko vuoden tyhjäkäyntihäviöt. Nämä on esitetty taulukossa 12. Vertaamalla muuntajan nimellistehoa ja tyhjäkäyntihä-

viöitä Väisäsen esittämiin, voidaan todeta, että häviöt korreloivat hyvin tehon kanssa. Kuormitushäviöiden laskeminen puolestaan on käytännössä mahdotonta, koska sitä varten pitäisi tietää melko tarkasti kuormitushäviöiden huipunkäyttöaika.

**Taulukko 12.** Forssan Verkkopalvelut Oy:n jakelumuuntajien keskimääräiset suoritusarvot sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin (Finning 2009).

$S_r$ (kVA)	$P_k$ (W)	$P_0$ (W)	Vaatimusten täyttyminen
412	–	750	Ei

Vaasan Sähköverkko Oy:llä on verkossaan noin 2300 jakelumuuntajaa, joiden keskimääräinen teho on noin 200 kVA (Vessari 2014). Kuvasta 12 nähdään jakelumuuntajien lukumääräinen jakautuminen eri tehoisiin muuntajiin. Lukumäärällisesti eniten on 50 kVA:n muuntajia, mikä on tyyppillisen haja-asutusalueen muuntajan tehoalueen ylärajoilla.



**Kuva 12.** Jakelumuuntajien lukumäärät tehoittain Vaasan Sähköverkko Oy:ssä (Vessari 2014).

Edellä esitetyt jakeluverkot ovat pääosin kaupunki- ja taajama-alueiden jakeluverkkoja. Tampereen Sähköverkko Oy:n alueella sijaitsee Suomen toiseksi suurin kaupunkialue, ja Forssan Verkkopalvelut Oy:n verkko on tiivis taajamaverkko, joten jakelumuuntajien tehot näissä ovat keskitehon yläpuolella. Vaasan Sähköverkko Oy:n alueellinen kattavuus puolestaan on hajautuneempi siten, että verkkoalueella on tiheän taajaman lisäksi myös harvaan asuttua maaseutua. Täten kyseisen verkon jakelumuuntajien keskitehon voidaan arvioida edustavan koko maan jakelumuuntajien keskitehoa kohtuullisen hyvin. Jakelumuuntajien tarkkaa keskitehoa ja lukumäärää ei ole saatavilla kuten päämuuntajien osalta on.

Jakelumuuntajien keski-ikä laskemiseen pätevät samat määritelmät kuin päämuuntajiinkin lukuun ottamatta perusteellisen huollon vaikutusta. Lisäksi jakelumuuntajien pitoaika on hieman lyhempi, 30–40 vuotta. Energiaviraston käyttämän jaottelun mukaisesti kaikkien jakeluverkonhaltijoiden osalta muuntajat -komponenttiryhmän suuntaa antava keski-ikä on noin 24 vuotta. (Kilponen 2014.) Koska ainakin osaa jakelumuuntajista käytetään vielä laskennallisen pitoajan jälkeenkin ja lisäksi niiden suuresta lukumäärästä johtuen on todennäköistä, että vanhimpien muuntajien ikätieto puuttuu, on Energiaviraston esittämä keski-ikä hieman alakanttiin. Koko Suomen jakelumuuntajien keski-ikäksi voidaan siten arvioida 28–30 vuotta.

Liitteen 3 taulukosta 2 nähdään Strömbergin noin 30 vuotta sitten valmistamien jakelumuuntajien kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt. Edellä esitetyn jakelumuuntajien keskimääräisen iän määrittämisen perusteella voidaan olettaa näiden arvojen edustavan olemassa olevaa jakelumuuntajakantaa. Kun verrataan näiden muuntajien suoritusarvoja asetuksen vaatimiin arvoihin, nähdään, että kuormitushäviöiden osalta vaiheen 1 vaatimukset täyttyvät tietyn tehoisilla muuntajilla. Tyhjäkäyntihäviöiden osalta jäädytään kuitenkin kauas taakse, eivätkä muuntajat näin ollen täytä asetuksen vaatimuksia.

## 5.5 Asetuksen n:o 548/2014 vaikutus päästöihin

Tarkkaa tietoa muuntajien iästä ja niiden häviöistä on hyvin heikosti saatavilla, mutta muuntajien häviöiden pienentymisestä aiheutuvaa päästöjen vähenemistä voidaan arvioida esitetyillä tiedoilla suuntaa antavasti. Asetuksen vaikutukset eroavat huomattavasti teho- ja jakelumuuntajien välillä.

### 5.5.1 Tehomuuntajat

Edellä todettiin Suomen sähköverkon päämuuntajien olevan keski-ikänsä noin 25 vuotta. Lisäksi havaittiin, että kyseisen ikäluokan muuntajat hieman tehosta riippuen juuri yltyvät asetuksessa säädettyihin vaiheen 1 vaatimuksiin. Sähköverkon vanhimpien päämuuntajien korvaaminen tällaisilla juuri asetuksen vaiheen 1 vaatimukset täyttävillä muuntajilla nostaisi keskimääräisiä PEI-arvoja jonkin verran, mutta olisi luonnollisesti huonompi ratkaisu kuin nykyaikaisen vähäpäästöisen muuntajan valinta.

Asiakkaiden toiveet ja vaatimukset ohjaavat suunnittelua ja yleensä tuotekehitystäkin lähes toimialasta riippumatta. Koska ABB Oy:n nykyään valmistamat tehomuuntajat täyttävät jo muuntaja-asetuksen vaiheen 2 vaatimukset, on perusteltua todeta, että Suomessa tämän tehoisten muuntajien ostajat ovat jo pidemmän aikaa osanneet häviöarvotuksissaan ottaa hyvin huomioon muuntajan koko elinkaaren aikaiset kustannukset. Myös materiaalien ja valmistustekniikoiden kehittyminen on laskenut häviötä. Kyseisiä muuntajia, tai häviöiden osalta vastaavanlaisia, voidaan lähtökohtaisesti pitää nykyään verkkoon asennettavien uusien päämuuntajien mallina. Täten ekosuunnitteludirektiivin alaisella muuntaja-asetuksella ei suurten muuntajien osalta ole vaikutusta päästöihin Suomessa.

Päämuuntajien häviöistä aiheutuvat päästöt luonnollisesti kuitenkin pienenevät sitä mukaa, kun vanhoja muuntajia korvataan uusilla. Vaikka asetus ei tähän suoraan vaikutaakaan, voidaan vanhojen ja uusien muuntajien häviötehoja vertailemalla arvioida muuntajien uusimisen vaikutuksia päästöihin. Päämuuntajien pitoajat huomioden voidaan Strömbergin vuonna 1982 valmistamien tehomuuntajien häviötehoja pitää seuraavan kymmenen vuoden aikana uudistettavien muuntajien keskimääräisinä häviötehoina.

Näihin verrattuna uusien muuntajien tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt ovat, muuntajan tehosta riippuen, keskimäärin noin 35 % pienemmät. Vanhimpien verkossa olevien tehomuuntajien häviöt voivat olla jopa kaksinkertaiset nykyaikaiseen tehomuuntajaan verrattuna.

Päämuuntajien pitoaikojen ollessa 30–45 vuotta, voidaan karkeasti arvioida, että seuraavan kymmenen vuoden aikana noin neljäsosa olemassa olevista päämuuntajista korvataan uusilla. Luonnollisesti tuolla aikavälillä asennetaan myös kokonaan uusia muuntajia, eikä vanhaa muuntajaa välttämättä korvata uudella saman tehoisella muuntajalla, joten arvio päästöjen pienentymisestä on todellakin karkea. Olettaen kuitenkin, että sähkökulutus sekä päämuuntajien kokonaismäärä ja keskiteho pysyvät lähes muuttumattomana, edellä esitetyillä luvuilla laskettuna päämuuntajien tyhjäkäynti- sekä kuormitushäviöt pienenevät seuraavan kymmenen vuoden aikana keskimäärin noin 9 %, eli vajaan prosenttiyksikön vuodessa. Tällainen muuntajien luonnollinen uusiminen pienentää siis kanta- ja jakeluverkon päämuuntajien häviöenergian kulutusta kyseisellä ajanjaksolla yhteensä noin 230 GWh. Aiemmin esitetyllä sähkönhankinnan CO<sub>2</sub>-päästökertoimella laskettuna tämä tarkoittaa reilun 50 000 hiilidioksiditonnin säästöä.

### 5.5.2 Jakelumuuntajat

Jakelumuuntajien osalta tilanne on toisenlainen kuin päämuuntajien osalta. Edellä todettiin, että Suomen sähköverkon jakelumuuntajien keski-ikä on noin 28–30 vuotta. Lisäksi havaittiin, että tämän ikäiset jakelumuuntajat eivät täytä asetuksen vaatimuksia, sillä tyhjäkäyntihäviöiden rajat jo asetuksen vaiheessa 1 ovat paljon alhaisemmat kuin vanhojen muuntajien tyhjäkäyntihäviöt. Toisin kuin päämuuntajissa, jakelumuuntajissa asiakkaiden häviöarvostukset eivät ole ohjanneet yhtä voimakkaasti pienihäviöisten muuntajien valmistamiseen. Näin ollen uusimmatkaan vakiohäviöiset jakelumuuntajat eivät ole täyttäneet asetuksen vaatimuksia. Näihin muuntajiin asetus kohdistuu tiukimmin, ja sillä on siten myös merkitystä jakelumuuntajien häviöiden aiheuttamien päästöjen vähentämisessä.

Jakelumuuntajien häviöiden pienentyminen ei ole ollut aivan yhtä selkeää ja lineaarista kuin tehomuuntajien. Tarkemman tiedon puutteessa ja laskennalliset pitoajat huomioi-

den voidaan Strömbergin vuonna 1982 valmistamien jakelumuuntajien häviötehojen arvioida vastaavan seuraavan kymmenen vuoden aikana uudistettavien muuntajien keskimääräisiä häviötehoja. Kyseisenä aikana uusitaan siis noin neljäsosa olemassa olevista jakelumuuntajista. Uusiminen jakaantuu siten, että muuntajakannasta uusitaan asetuksen ensimmäisen vaiheen eli kuuden vuoden aikana noin 15 % ja toisen vaiheen aikana noin 10 %. Jakelumuuntaja on tyypillisesti käytössä runsaasti vielä laskennallisen pitoajan jälkeenkin, joten käytännössä on todennäköistä, että arvio on hieman yläkanttiin.

Kuten kappaleen 4.3 taulukosta 5 nähtiin, eivät ennen asetuksen voimaantuloa myynnissä olleet jakelumuuntajat täyttäneet sen vaatimuksia. Kyseisten muuntajien kuormitushäviöt alittivat asetuksen rajat, mutta tyhjäkäyntihäviöt eivät. Koska muuntajien häviöiden optimointi vaatii kompromisseja ja tyhjäkäyntihäviöiden pienentäminen yleensä kasvattaa kuormitushäviöitä, voidaan asetuksen vaiheen 1 häviörajoja pitää asetuksen voimaantulon jälkeen uusien verkkoon asennettavien jakelumuuntajien suoritusarvoina. Tyhjäkäyntihäviöiden osalta nämä ovat keskimäärin noin 48 % pienemmät kuin vuoden 1982 muuntajien tyhjäkäyntihäviöt. Huomionarvoista kuitenkin on, että asetuksen vaiheen 1 rajat kuormitushäviöille ovat aivan pienimpiä jakelumuuntajia lukuun ottamatta suuremmat kuin noin 30 vuoden takaisten muuntajien kuormitushäviöt. Keskimäärin asetuksen ensimmäinen vaihe sallii noin 8 % suuremmat kuormitushäviöt näihin vanhoihin muuntajiin verrattuna. Asetuksen toinen vaihe kiristää vaatimuksia entisestään; tyhjäkäyntihäviötä tulee pienentää vielä 10 % ensimmäisen vaiheen vaatimuksista ja kuormitushäviöitä keskimäärin 24 %. Vaiheessa 2 siis päästään kuormitushäviöissä 1000 kVA:n ja sitä pienemmissä muuntajissa vuoden 2013 tasolle tai alle, mutta tyhjäkäyntihäviöiden tulee olla keskimäärin jo 37 % pienemmät kuin ennen asetuksen voimaantuloa markkinoilla olleissa muuntajissa.

Asetuksen voimaantulo ei kuitenkaan suoraan vaikuta jakelumuuntajien häviöihin edellä kuvatuilla luvuilla, vaan vaikutusta tarkasteltaessa tulee vertailla asetuksen asettamia häviörajoja uusimpien markkinoilla olleiden muuntajien häviöihin. Myös näihin verrattuna tyhjäkäyntihäviöitä on tarkoitus pienentää huomattavasti, keskimäärin noin 30 %. Kuitenkin tyhjäkäyntihäviörajojen saavuttamiseksi kuormitushäviöitä joudutaan kasvattamaan vuoden 2013 tasosta keskimäärin noin 23 %. ABB:n vuoden 2013 jakelumuun-

tajien tyhjäkäyntihäviöt ovat keskimäärin 25 % pienemmät kuin uusittavien muuntajien tyhjäkäyntihäviöt, eli asetuksen ensimmäisen vaiheen osuudeksi tyhjäkäyntihäviöiden vähentämisestä vuoden 1982 tasosta jää noin 23 prosenttiyksikköä. Kuten päämuuntajienkin osalta, arvioidaan sekä sähkönkulutuksen että jakelumuuntajien keskitehon ja kokonaismäärän pysyvän lähes muuttumattomana. Täten asetuksen voimaantulminen pienentää asennettujen jakelumuuntajien tyhjäkäyntihäviöitä kymmenen vuoden ajanjaksolla tarkasteltuna 6,25 prosenttiyksikköä enemmän kuin muuntajien uusiminen ilman asetusta pienentäisi. Toisaalta kuormitushäviöissä kuljetaan – ainakin aluksi – hie- man toiseen suuntaan; asetuksen vaikutuksesta kuormitushäviöt ovat tarkasteluaikana 2,4 prosenttiyksikköä suuremmat kuin ne ilman asetusta olisivat. Päästöjen vähentämi- sen kannalta kuitenkin asetuksen vaikutus jää positiiviseksi, sillä jakelumuuntajissa päästöt jakautuivat lähes tasan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden kesken. Jakelumuun- tajien uusiminen asetuksen vaatimukset täyttävillä muuntajilla edellä kuvatulla tavalla pienentää jakeluverkon jakelumuuntajien häviöenergian kulutusta noin 60 GWh. CO<sub>2</sub>- päästöissä tämä tarkoittaa reilun 13 000 tonnin säästöä.

## 6 ASETUKSEN VAIKUTUKSET KUSTANNUKSIIN

Ekosuunnitteludirektiivistä ja sen nojalla säädetyistä asetuksesta aiheutuu todennäköisesti kustannuksia niin muuntajien valmistajille kuin myös asiakkaille. Se, kuinka suuria nämä kustannukset ovat, riippuu pitkälti yritysten aiemmista toimintatavoista ja periaatteista. Kustannusten jaottelu tarkasti valmistajan ja asiakkaiden kustannuksiksi on hankalaa, sillä kuten yleensäkin liiketoiminnassa, kustannukset koituvat lopulta asiakkaan maksettavaksi. Kilpailutilanne yritysten välillä kuitenkin sanelee, kuinka paljon kustannusten kasvusta voidaan suoraan siirtää hintoihin. Materiaalikustannukset ovat kuitenkin saman alan yrityksille suurelta osin samat, joten niiden hinnanmuutokset näkyvät todennäköisesti myös tuotteiden hinnoissa.

### 6.1 Kustannukset muuntajien valmistajille

Asetuksesta aiheutuvat kustannukset muuntajien valmistajille koskevat suurimmalta osin muuntajien valmistusmahdollisuuksia ja -tekniikoita, mutta jonkin verran kustannuksia aiheutuu myös asetuksen vaatimuksista muuntajien teknisten tietojen dokumentaatioon liittyen. Asetuksen asettamat vaatimukset häviöiden pienentämiselle tarkoittavat suurella todennäköisyydellä sitä, että muuntajiin käytetään aiempaa enemmän materiaaleja ja sitä kautta muuntajien koko ja paino kasvavat. Tästä johtuen on mahdollista, että valmistajat joutuvat tekemään muokkauksia tuotantolinjoihinsa suurempien muuntajien valmistuksen mahdollistamiseksi, esimerkiksi hankkimaan uusia koneita, jotka mahdollistavat suurempien ja painavampien osien ja tuotteiden liikuttelun tehtaassa. Mikäli asetuksen vaatimuksiin vastaaminen tarkoittaa kokonaan uuden valmistustekniikan käyttöönottoa, aiheutuu tästä väistämättä kustannuksia. Esimerkkinä tällaisesta voisi olla amorfisten sydämien valmistaminen, sillä niitä ei voida tehdä perinteisin menetelmin.

Edellä kuvatuista tapauksista aiheutuneet välilliset kustannukset on mahdollista siirtää tuotteiden hintoihin, mutta ne eivät todennäköisesti kosketa kaikkia valmistajia samalla tavalla. Tällöin ne valmistajat, joita asia koskettaa, joutuvat ainakin aluksi tinkimään

omista voittotavoitteistaan, jotta eivät menettäisi asiakkaita epäedullisen hinnoittelun vuoksi.

## 6.2 Kustannukset muuntaja-asiakkaille ja muuntajien omistajille

Ekosuunnitteludirektiivin tavoitteena on vähentää tuotteiden ympäristövaikutuksia ja parantaa niiden energiatehokkuutta integroimalla elinkaariajattelu tuotteiden suunnitteluvaiheeseen. Tämän pitäisi lopulta myös alentaa yritysten ja loppukäyttäjien kustannuksia. Tuotteet suunnitellaan kuitenkin asiakkaiden toiveiden mukaisesti, joten tärkeää onkin saada myös asiakkaat elinkaariajatteluun mukaan. Liian usein edelleen asiakkaiden päätöksenteko perustuu hankintahintaan, eikä pitkäikäisen tuotteen koko elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia huomioida. Muuntajien tapauksessa nämä kustannukset ovat yleensä sitä korkeammat mitä pienempi hankintahinta on. Häviöiden pienentäminen maksaa, mutta sillä voidaan saada aikaan merkittäviäkin säästöjä vuosien kuluessa.

Kuten kappaleessa 4.3 todettiin, täyttävät ainakin ABB Oy:n Transformers-yksikön valmistamat vakiosarjan tehomuuntajat asetuksen vaatimukset. Näin ollen valmistuskustannusten ei pitäisi suoraan asetukselta johtuen nousta. Merkittävä osa muuntajan valmistuskustannuksista on kuitenkin materiaalikustannuksia, joten mikäli asetuksen voimaantulo nostaa näiden raaka-aineiden kysyntää ja sitä kautta hintaa, saattavat myös valmistuskustannukset nousta. Tällä hetkellä laserkäsitellyn 0,23 mm paksun sydänlevyn sekä tavanomaisen 0,30 mm paksun sydänlevyn hintaero on markkinoilla tällä hetkellä hyvin pieni. Täten on perusteltua käyttää hieman kalliimpaa, mutta pienihäviöisempää laserlevyä, sillä sen ansiosta muuntajan sydän saadaan pienemmäksi ja siten myös muita materiaaleja kuluu vähemmän, joten kustannukset saadaan myös optimoitua. Odotettavissa kuitenkin on, että asetuksen voimaantulon jälkeen pienihäviöisen levyn kysyntä markkinoilla kasvaa, joten myös sen hinta nousee. Tällöin voi olla jälleen kokonaisuuden kannalta edullisempää käyttää suurempihäviöistä sydänlevyä.

ABB:n valmistamat vakiosarjan tehomuuntajat täyttävät asetuksen ensimmäisen vaiheen vaatimukset myös suurempihäviöisellä sydänlevyllä. Toisen vaiheen vaatimukset täyttyvät kyseistä sydänlevyä käytettäessä kokoluokasta 20 MVA ylöspäin. Tätä pie-

nemmissä muuntajissa sydänlevyvä ei suoraan voi vaihtaa suurempihäviöiseen, vaan muitakin muutoksia joudutaan tekemään. Tämä tarkoittaa käytännössä muuntajan sydämen – ja siten koko muuntajan – koon kasvattamista vuontiheyden pienentämiseksi hyväksyttävälle tasolle. Suurempi sydän kasvattaa materiaalintarvetta niin käämeissä, säiliössä kuin eristysnesteessäkin. Tällainen muutos kasvattaa muuntajan myyntihintaa noin 3–5 % alkuperäisestä. (ABB 2014.) 25 MVA:n muuntajassa tämä on euromääräisesti noin 10000–20000 euroa verottomasta hinnasta laskettuna. Kuitenkin esimerkiksi pieni muutos lähtöarvoihin häviöarvostuksen laskemisessa saattaa helposti aiheuttaa niin sanotusti suuremman laskun koko elinkaaren aikana. Esimerkiksi ABB Oy:n valmistaman 25 MVA:n muuntajan häviöiden kustannuksiksi elinkaaren aikana tulee kappaleessa 2.2.4 esitettyjen tavanomaisten häviöarvostusten mukaan laskettuna 293 000 €. Ensisijaisen tärkeää asiakkaiden kokonaiskustannusten minimoinnissa onkin, että häviöarvostukset on laskettu mahdollisimman tarkasti.

ABB:n jakelumuuntajien osalta ekosuunnitteludirektiivin alaisesta muuntaja-asetuksesta aiheutuneet kustannukset liittyvät muuntajan häviöiden uudelleen optimointiin. Tästä aiheutuu niin suunnittelu- kuin materiaalikustannuksia, mikä puolestaan nostaa jakelumuuntajan myyntihintoja 5–10 % (ABB 2014). Taulukossa 13 on esitetty Energiaviraston (2014) määrittämät jakelumuuntajien yksikköhinnat vuodelle 2014. Näitä hintoja voidaan pitää ennen asetuksen julkaisua myytyjen jakelumuuntajien keskimääräisinä hankintahintoina, joihin siis asetuksen voimaantulo vaikuttaa. Jakelumuuntajien kuormitushäviöiden häviöarvostukset poikkeavat tehomuuntajien häviöarvostuksista reilusti. Tyhjäkäyntihäviöiden arvostukset ovat jakelumuuntajissa tyypillisesti 5000–8000 €/kW, mutta kuormitushäviöiden arvostukset vain 200–800 €/kW (ABB 2014). Taulukkoon 14 on laskettu vuoden 2013 sekä asetuksen mukaisten jakelumuuntajien häviöiden hinta, kun tyhjäkäyntihäviöiden arvostuksena käytetään 7 500 €/kW ja kuormitushäviöille 700 €/kW. Taulukosta nähdään, että näillä häviöarvostuksilla laskettuna häviöistä aiheutuneet kustannukset laskevat asetuksen vuoksi lähes jokaisessa tapauksessa. Ainoastaan pienimmissä, alle 100 kVA:n muuntajissa häviöiden kustannukset nousevat asetuksen ensimmäisen vaiheen aikana.

**Taulukko 13.** Jakelumuuntajien yksikköhinnat vuodelle 2014 (Energiavirasto 2014).

<b>Nimellisteho (kVA)</b>	<b>Hinta (€)</b>
16	3 360
30	3 360
50	3 430
100–160	4 920
200	6 450
300–315	7 930
500–630	10 160
800	14 430
1 000	16 390
1 250	19 510
1 600	19 510

**Taulukko 14.** Jakelumuuntajien häviöiden hinta.

<b>Teho (kVA)</b>	<b>Hinta (€)</b>		
	<b>2013</b>	<b>Vaihe 1 (Tier 1)</b>	<b>Vaihe 2 (Tier 2)</b>
30	1 160	1 210	940
50	1 380	1 450	1 130
100	2 400	2 310	1 850
200	4 680	3 800	3 100
315	6 110	5 430	4 390
500	8 720	7 680	6 170
800	12 410	10 760	6 590
1 000	14 900	13 130	10 520
1 250	18 150	14 830	13 060
1 600	21 940	18 800	16 500

Taulukkoon 15 on vielä laskettu asetuksen vaikutukset jakelumuuntajien elinkaarikustannuksiin, kun häviöiden kustannukset ovat taulukon 14 mukaiset ja taulukossa 13 esitettyjen myyntihintojen oletetaan nousevan viisi prosenttia asetuksen voimaantulon myötä. Nähdään, että asetuksen ensimmäisen vaiheen aikana elinkaarikustannukset kasvavat 100 kVA:n ja sitä pienemmillä jakelumuuntajilla, mutta lopuilla ne pienenevät. Asetuksen vaiheen 2 astuessa voimaan elinkaarikustannukset pienenevät kaikissa teholuokissa.

**Taulukko 15.** Jakelumuuntajien elinkaarikustannukset ennen ja jälkeen asetuksen voimaantulon.

Teho (kVA)	Elinkaarikustannukset (€)		
	2013	Vaihe 1 (Tier 1)	Vaihe 2 (Tier 2)
30	4 520	4 740	4 470
50	4 810	5 050	4 730
100	7 320	7 480	7 020
200	11 130	10 570	9 880
315	14 040	13 760	12 720
500	18 880	18 340	16 840
800	26 840	25 900	23 740
1 000	31 290	30 330	27 730
1 250	37 660	35 300	33 550
1 600	41 450	39 290	36 990

## 7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Komission asetuksella ekosuunnitteludirektiivin täytäntöönpanosta muuntajien osalta on vaikutuksia niin muuntajien valmistukseen, niiden häviöistä aiheutuviin päästöihin kuin myös kustannuksiin. Vaikutukset eivät kuitenkaan kosketa kaikkia muuntajia samalla tavalla, vaan kuten edellä nähtiin, osaan muuntajista asetus ei vaikuta mitenkään kun taas osaan se vaikuttaa hyvinkin paljon. Valmistuksen, päästöjen ja kustannusten välillä on yhteys, eli muutos yhdessä asiassa vaikuttaa myös kahteen muuhun.

### 7.1 Tulosten analysointi

Asetuksen vaikutuksia muuntajien valmistukseen arvioitiin VITO:n (2011) raportin perusteella. Siinä esitetyt valmistustekniset keinot asetuksen rajojen saavuttamiseksi soveltuvat kaikenkokoisille muuntajille, kuten raportissa laadittujen perustapausten kautta nähtiin. Esitetyt, parhaat saatavilla olevat keinot, ovat kuitenkin amorfisen sydämen käyttöä lukuun ottamatta jo melko laajalti käytössä, joten merkittävää parannusta muuntajien häviöihin ei näillä keinoilla ole saavutettavissa. Suurin yksittäinen vaikutus olisi-kin amorfisen sydänmateriaalin käytön yleistymisellä ja siihen liittyvien ongelmien ratkaisulla. Suunnitteluvaiheessa voidaan toki painottaa kuormitus- tai tyhjäkäyntihäviöitä käyttötarkoituksen mukaan, mutta tällä ei varsinaisesti ole vaikutusta valmistukseen. Asetuksen vaikutukset valmistukseen jäävätkin ainakin alkuvaiheessa lähinnä suuremman materiaalinkulutuksen tasolle niiden muuntajien osalta, joita se koskettaa. Tällä kasvaneella materiaalarpeella saattaa olla ympäristön kannalta negatiivinen vaikutus. Toisaalta, koska muuntajan materiaalit ovat lähes täysin kierrätettävissä, vaikutus on todennäköisesti erittäin pieni.

Muuntajien häviöistä aiheutuneita päästöjä tarkasteltiin käytännön syistä lukuisten olet-  
tamuksien kautta, sillä tarkkaa tietoa sähköverkon muuntajien häviöistä ei juurikaan ol-  
lut saatavilla. Oletuksista johtuen saadut tulokset ovatkin lähinnä suuntaa antavia. Esi-  
merkiksi sähkönhankinnan CO<sub>2</sub>-päästökerroin vaihtelee rajustikin eri vuosina riippuen  
sähköntuotantomuodoista ja tuontisähkön määrästä sekä alkuperästä. Viiden vuoden

liukuvan keskiarvon käyttäminen parantaa tilannetta jonkin verran, mutta ei anna tarpeeksi tarkkaa kuvaa päästöistä koko muuntajan elinkaaren aikana. Lisäksi oletus muuntajien määrän pysymisestä ennallaan tulevina vuosina aiheuttaa jonkin verran virhettä tuloksiin, sillä tyhjäkäyntihäviöiden määrä on suoraan verrannollinen muuntajien lukumäärään.

Tarkasteltaessa asetuksen vaikutuksia muuntajien häviöistä aiheutuneisiin päästöihin, lopputulos oli, että tehomuuntajien osalta asetuksella ei ole vaikutusta. Todennäköistä kuitenkin on, että asetuksessa nyt säädettyjen ensimmäisen ja toisen vaiheen jatkeeksi asetetaan jossain vaiheessa entistä tiukemmat rajat, jolloin sillä on suora vaikutus myös näihin suurempiin muuntajiin. Jakelumuuntajien osalta havaittiin, että asetuksella on suora vaikutus häviöihin. Tämä on päästöjen vähentämisen kannalta tärkeää, sillä häviöt kertaantuvat sähköverkossa, koska verkon loppupään häviöt tulee syöttää verkkoon. Täten häviöitä on ensisijaisesti vähennettävä sieltä. Kuten luvussa 5 nähtiin, jakelumuuntajat käsittävät muuntajahäviöistä kaksi kolmasosaa, joten niiden rooli päästöjen vähentämisessä on tehomuuntajia suurempi. Verrattaessa asetuksen ensimmäisen vaiheen vaatimukset täyttäviä muuntajia ennen asetusta markkinoilla olleisiin muuntajiin havaittiin, että häviöt olivat niissä painottuneet hieman eri tavalla tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden kesken. Asetuksessa painotetaan tyhjäkäyntihäviöitä, joten vastaavasti kuormitushäviöille on aluksi sallittava hieman suuremmat arvot. Täten asetuksen ensimmäisen vaiheen vaikutukset päästöjen vähentämiseen jäävät vain hieman positiiviselle puolelle. Vasta toisen vaiheen vaatimukset vähentävät häviöitä ja päästöjä selkeämmin. Tällainen asteittainen siirtyminen on kuitenkin välttämätöntä, jotta valmistajat pystyvät mukauttamaan tuotteensa vaatimusten mukaisiksi ilman suuria kustannuksia. Myös asiakkaat ehtivät mukauttaa omaa toimintaansa ja tulevaisuudessa suosimaan pieniä tyhjäkäyntihäviöitä.

Tehomuuntajien kustannuksiin asetuksella ei ole suoraa vaikutusta. Epäsuora vaikutus sillä saattaa olla, mikäli tiettyjen materiaalien kysyntä markkinoilla kasvaa niin, että se vaikuttaa niiden hankintahintoihin. Laserkäsitellyn sydänlevyn mahdollinen hinnannousu kasvattaa muuntajan hintaa aiemmin esitetyn 3–5 % verran, mikäli muuntajan mitoitukseen joudutaan tekemään muutoksia. Myös muiden materiaalien, esimerkiksi kää-

meissä käytettävän kuparin osalta asetuksella saattaa olla epäsuora, kysynnän kautta hintaa nostava vaikutus. Kuparin hintaan vaikuttaa kuitenkin moni muukin asia maailmanmarkkinoilla, joten asetuksen vaikutus sen hintaan on todennäköisesti erittäin pieni.

Jakelumuuntajien osalta asetuksella on vaikutusta sekä muuntajien hankintahintoihin, että häviöiden kautta myös muuntajien elinkaarikustannuksiin. Hankintahinnat nousevat 5–10 %. Toisaalta ainakin alkuvaiheessa kilpailu eri valmistajien välillä asetuksen muokautuneiden muuntajien myynnistä on kiivasta, joten asiakkaan kannalta parhaimmalla tapauksessa hankintahinnat eivät välttämättä nousekaan. Kuten luvussa 6 nähtiin, yleisimmillä häviöarvostusluvuilla laskettuna jakelumuuntajien häviöistä aiheutuneet kustannukset laskevat jo asetuksen ensimmäisestä vaiheesta lähtien, pienimpiä jakelumuuntajia lukuun ottamatta. Myös elinkaarikustannukset laskivat jo ensimmäisen vaiheen aikana yli 100 kVA:n muuntajien osalta mahdollisesta hinnannoususta huolimatta. Asetuksen toinen vaihe pienentää kaikkien teholuokkien elinkaarikustannuksia.

## 7.2 Pohdintaa asetuksesta sekä jatkotutkimusmahdollisuuksista

Asetuksella on hyvät tarkoitusperät kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Siinä on keskitytty ensisijaisesti jakelumuuntajien häviöiden vähentämiseen, mikä onkin ensisijaisen tärkeää häviöiden verkossa kertaantumisen vuoksi. Jakelumuuntajille on asetettu tiukat häviörajat, joita ei tule ylittää. Tehomuuntajien valvontaparametriksi on kuitenkin valittu huippuhyötysuhdeindeksi, joka lasketaan tässä työssä aiemmin esitetyllä yhtälöllä. Häviöiden vähentämisen kannalta ongelmalliseksi indeksin tekee se, että samaan arvoon on mahdollista päästä hyvin erilaisilla kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöiden yhdistelmillä. Täten, mikäli asiakkaan häviöarvostukset eivät syystä tai toisesta ole asianmukaisesti tiettyyn käyttötarkoitukseen määritelty, voi lopputuloksena olla häviöiden – ja päästöjen – kasvu. Tällöin myös kustannukset todennäköisesti koko elinkaaren aikana ovat suuremmat.

Suuri merkitys sähköverkon päämuuntajien aiheuttamissa päästöissä on sillä, minkälaisessa kuormassa muuntaja on. Uusi muuntaja tulee mitoittaa niin nykyiseen kuin tulevaankin kuormitukseen. Päästöjä voitaisiinkin kenties pienentää pelkästään optimoimal-

la olemassa olevien muuntajien kuormitus. Muuntajia voitaisiin vaihtaa sähköasemalta toiselle, mikäli jokin muuntaja on liian isossa ja jokin toinen liian pienessä kuormassa nimellistehoonsa nähden. Tähän liittyen asetuksen tulkinnassa on jonkin verran avoimia kysymyksiä. Siirtymävuosina tulkinnanvaraista on käytettyjen muuntajien myyminen ja käyttöönotto, eli sovelletaanko asetusta, mikäli esimerkiksi sähköverkkoyhtiöt kävisivät muuntajilla kauppaa optimoidakseen muuntajiensa mitoituksen. Lisäksi huollettujen, esimerkiksi uudelleenikäämittyjen muuntajien osalta asetuksen tulkinta on vielä avoin.

Ekosuunnitteludirektiivin alainen asetus muuntajille on uusi asia, ja nyt ollaan vielä siirtymävaiheessa. Jatkotutkimusmahdollisuudet aiheesta liittyvät lähinnä tarkempien tietojen käyttöön, mikä luonnollisesti edellyttää niiden saatavuutta. Tämä koskee niin olemassa olevien muuntajien häviöiden määrää ja niiden jakautumista kuin myös uusien muuntajien todellisia häviöitä ja hankintahintoja. Jälkimmäiset selviävät tarkemmin todennäköisesti vasta ensimmäisen vaiheen astuessa voimaan. Lisäksi olisi syytä selvittää, ovatko muuntaja-asiakkaiden käyttämät häviöarvostusluvut jo parhaat mahdolliset vai olisiko niissä tarkentamisen varaa. Mikäli uudelleenikäämityt muuntajat jäävät asetuksen ulkopuolelle, eräs tutkimuksen kohde voisi olla tällaisen vanhojen muuntajien huoltamisen vaikutukset kustannuksiin ja päästöjen vähentämiseen.

Koska yksittäisille verkon komponenteille asetettavat vaatimukset ovat lopulta vain osaoptimointia, olisi kokonaisuuden kannalta tärkeää selvittää myös se, mihin kohtaan sähköverkkoa sijoitettu pääoma tuottaa häviöiden ja päästöjen vähentämisen kannalta parhaan lopputuloksen.

## 8 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin Euroopan Unionin ekosuunnitteludirektiivin alaisen, muuntajia koskevan Euroopan komission asetuksen n:o 548/2014 vaikutuksia muuntajien valmistukseen sekä niiden häviöenergian kulutuksesta aiheutuviin päästöihin. Työssä käsiteltiin myös asetuksen vaikutuksia kustannuksiin valmistajan ja asiakkaiden osalta. Ekosuunnitteludirektiivin tavoitteena on vähentää energiaan liittyvien tuotteiden kasvihuonekaasupäästöjä sekä pienentää hiilijalanjälkeä. Direktiivin nojalla säädetään tuoterhyhmäkohtaisia täytäntöönpanotoimenpiteitä, asetuksia. Toukokuussa 2014 julkaistiin asetus muuntajille ja se koskee kaikkia 50 hertsin jakelu- ja suurmuuntajia pois lukien erikseen listatut erikoismuuntajat.

Työn alussa luodaan katsaus muuntajaan sähkölaitteena, sen häviöihin sekä niiden optimointiin. Muuntajan elinkaarikustannukset koostuvat hankintakustannuksista sekä käyttökustannuksista, joihin kuuluvat muun muassa häviöt ja huollot. Muuntaja voidaan suunnitella siten, että sen hankintakustannukset ovat mahdollisimman pienet, mutta tällaisen muuntajan häviöt ovat suuret ja siten myös käyttökustannukset ovat suuret. Muuntajan häviöiden minimointi vaatii aina kompromisseja suunnittelussa, sillä keinoilla, joilla tyhjäkäyntihäviöitä pienennetään, on taipumus kasvattaa kuormitushäviöitä ja päinvastoin. Parhaimman, kokonaistaloudellisesti edullisimman lopputuloksen aikaansaamiseksi on ennen suunnittelun aloittamista tärkeää tietää muuntajan käyttötarkoitus ja asiakkaan määrittelemät häviöarvostukset.

Diplomityössä selvitettiin myös ekosuunnitteludirektiivin ja sen alaisen muuntajasetuksen keskeinen sisältö, tavoitteet ja vaatimukset. Direktiivin 2009/125/EY tavoitteena on edistää kestävästä kehityksestä parantamalla energiatehokkuutta, ympäristönsuojelun tasoa ja energiahuoltovarmuutta sekä vähentämällä luonnonvarojen käyttöä. Energiaan liittyvien tuotteiden ympäristövaikutuksia on mahdollista vähentää ja energiatehokkuutta parantaa paremmalla tuotesuunnittelulla. Ympäristönäkökohdat ja elinkaariajattelu halutaan siis ekosuunnitteludirektiivin avulla integroida tuotteiden suunnitteluvaiheeseen. Asetuksessa Euroopan komissio katsoo, että keskikokoisten ja suurten muuntajien energiatehokkuutta koskevat ekosuunnitteluvaatimukset tulee määrittellä näiden laittei-

den ekosuunnitteluvaatimusten yhdenmukaistamiseksi koko yhteisön alueella, jotta ne edistäisivät sisämarkkinoiden toimintaa ja jäsenvaltioiden ympäristötehokkuutta. Ekosuunnitteluvaatimukset helpottavat lisäksi energiatehokkuutta tai hyötysuhdetta parantavien tekniikoiden ja suunnitteluratkaisujen pääsyä markkinoille. Asetus on annettu, koska markkinamekanismit eivät ole ohjanneet ympäristön kannalta tehokkaimpiin mahdollisiin muuntajiin.

Asetuksen vaikutuksia valmistukseen tarkasteltiin häviöitä pienentävien valmistustekniikoiden kautta. Käytännössä kuitenkin lähes kaikki valmistustekniset seikat, joilla häviöitä voidaan pienentää, ovat melko laajalti jo käytössä, joten merkittävää parannusta muuntajien häviöihin ei näillä keinoilla ole saavutettavissa. Suurin vaikutus olisi amorfisen sydämen käytön yleistymisen ja siihen liittyvien ongelmien ratkaiseminen. Muita vaihtoehtoja häviöiden pienentämiseksi on olemassa olevien materiaalien, lähinnä sydämessä käytettävän piiteräksen tuotekehitys. Niiden muuntajien osalta, joita asetuksen vaatimukset koskettavat, vaikutukset valmistukseen jäävät lähinnä suuremman materiaalinkäytön tasolle. ABB:n Suomessa valmistamiin tehomuuntajiin asetuksella ei ole vaikutusta, sillä kyseiset muuntajat täyttävät asetuksen vaatimukset huippuhyötysuhdeindeksistä.

Muuntajien häviöistä aiheutuneet päästöt riippuvat luonnollisesti itse sähköntuotannon päästöistä. Sähköntuotannon päästöt vaihtelevat vuosittain paljonkin riippuen siitä, millä sähköä on tuotettu ja kuinka paljon sitä on tuotu ulkomailta. Suomessa siirto- ja jakeluhäviöiden osuus sähkön kokonaiskulutuksesta on noin 3,5 %. Koska häviöt kertaantuvat sähköverkossa, on niiden vähentäminen verkon loppupäästä ensisijaisen tärkeää. Tähän on myös muuntaja-asetuksen vaatimuksissa kiinnitetty huomiota, sillä jakelumuuntajien tyhjäkäyntihäviöiden rajat ovat todella tiukat. Muuntajien osuus sähköverkon häviöistä on kantaverkon osalta noin 16 % ja jakeluverkon osalta noin 50 %. Tyhjäkäyntihäviöiden osuus muuntajien kokonaishäviöistä on verkon jännitetasosta riippuen 50–70 %.

Suoraa vaikutusta muuntajien päästöihin asetuksella n:o 548/2014 sähköverkon tehomuuntajien osalta ei ole, sillä Suomessa nykyaikaiset verkkoon asennettavat muuntajat täyttävät jo asetuksen vaatimukset. Muuntajien luonnollisen uusimisen myötä tyhjä-

käynti- ja kuormitushäviöt pienenevät noin prosenttiyksikön vuodessa seuraavan kymmenen vuoden aikana, mikä täten myös pienentää niiden häviöenergian kulutusta ja päästöjä. Jakelumuuntajia asetus koskettaa, sillä uusimmatkaan ennen asetusta valmistetut jakelumuuntajat eivät täytä sen vaatimuksia. Asetuksen vaikutuksesta seuraavan kymmenen vuoden aikana tarkasteltuna jakelumuuntajien tyhjäkäyntihäviöt Suomessa pienenevät, mutta kuormitushäviöt kasvavat jonkin verran. Päästöjen vähentämisen kannalta kuitenkin asetuksen vaikutus jää positiiviseksi, sillä jakelumuuntajissa päästöt jakautuvat nykyisellä kuormituksella lähes tasan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden kesken.

Kustannusten jaottelu tarkasti valmistajan ja asiakkaiden kustannuksiksi on hankalaa, sillä kuten yleensäkin liiketoiminnassa, kustannukset koituvat lopulta asiakkaan maksettavaksi. Asetuksesta aiheutuvat kustannukset muuntajien valmistajille koskevat suurimmalta osin muuntajien valmistusmahdollisuuksia ja -tekniikoita. Mikäli asetuksen vaatimukseen vastaaminen tarkoittaa kokonaan uuden valmistustekniikan käyttöönottoa, tästä aiheutuu väistämättä kustannuksia.

Ekosuunnitteludirektiivin tavoitteena on vähentää tuotteiden ympäristövaikutuksia ja parantaa niiden energiatehokkuutta, jonka pitäisi lopulta myös alentaa yritysten ja loppukäyttäjien kustannuksia. ABB Oy:n Transformers-yksikön valmistamat vakiosarjan tehomuuntajat täyttävät asetuksen vaatimukset, joten valmistuskustannusten ei pitäisi suoraan asetuksesta johtuen nousta. Merkittävä osa muuntajan valmistuskustannuksista on kuitenkin materiaalikustannuksia, joten mikäli asetuksen voimaantulo nostaa näiden raaka-aineiden kysyntää ja sitä kautta hintaa, saattavat myös valmistuskustannukset nousta. Ensisijaisen tärkeää asiakkaiden kokonaiskustannusten minimoinnissa on kuitenkin se, että häviöarvostukset on laskettu mahdollisimman tarkasti.

ABB:n jakelumuuntajien osalta ekosuunnitteludirektiivin alaisesta muuntaja-asetuksesta aiheutuneet kustannukset liittyvät muuntajan häviöiden uudelleen optimointiin. Tästä aiheutuu niin suunnittelu- kuin materiaalikustannuksia, mikä puolestaan saattaa nostaa jakelumuuntajan myyntihintoja 5–10 %. Jakelumuuntajilla tyypillisesti käytettyjen häviöarvostusten perusteella lasketut elinkaarikustannukset kasvavat asetuksen ensimmäisen vaiheen aikana 100 kVA:n ja sitä pienemmillä jakelumuuntajilla, mutta loppuilla ne

pienenevät. Asetuksen vaiheen 2 astuessa voimaan elinkaarikustannukset pienenevät kaikissa teholuokissa.

Toukokuussa 2014 julkaistu komission asetus N:o 548/2014 koskien muuntajia on vielä kohtuullisen tuore asia ja sen kokonaisvaikutukset niin muuntajien häviöistä aiheutuviin päästöihin kuin muuntajien kustannuksiinkin eri osapuolille nähdään kunnolla vasta tulevaisuudessa. Diplomityön perusteella voidaan kuitenkin todeta, että asetus onnistuu tavoitteessaan, eli pienentää muuntajien häviöenergian kulutusta ja sitä kautta niistä aiheutuvia päästöjä. Pienempien häviöiden myötä myös muuntajien elinkaarikustannukset pienenevät.

## LÄHDELUETTELO

- ABB (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 9. painos. Vaasa: Suomalaiset ABB-yhtiöt. 626 s.
- ABB (2004). *Transformer Handbook*. 2. painos. Zürich: ABB Power Technologies Management Ltd., Transformers. 212 s.
- ABB (2007). *Muuntajatekniikan perusteet*. Sisäinen opetusmateriaali. Julkaisematon. ABB Oy. 36 s.
- ABB (2010). *Load loss calculation*. Technical Standard. Julkaisematon. ABB Oy. 33 s.
- ABB (2014). Sisäinen tiedoksianto. Julkaisematon. ABB Oy.
- ABB Strömberg (1990). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 8. painos. Vaasa: ABB Strömberg. 586 s.
- Aura, Lauri & Antti J. Tonteri (1996). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*. 2. painos. Porvoo: WSOY. 448 s.
- Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla (2011). *Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki: Otatieto. 551 s.
- Energiateollisuus (2013). *Tilastot ja julkaisut – Kalvosarjat – Sähköntuotanto – Energiavuosi 2012: Sähkö* [online]. Helsinki: Energiateollisuus ry, 28.11.2013. [Viitattu 11.4.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2012-sahko>
- Energiateollisuus (2014a). *Tilastot ja julkaisut – Kalvosarjat – Sähköntuotanto – Energiavuosi 2013: Sähkö* [online]. Helsinki: Energiateollisuus ry, 23.1.2014. [Viitattu 20.3.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2013-s-hk>

Energiateollisuus (2014b). *Tilastot ja julkaisut – Sähkötalastot – Sähköntuotanto – Sähköntuotanto, tuonti ja vienti* [online]. Helsinki: Energiateollisuus ry, 2014. [Viitattu 21.3.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkontuotanto/sahkon-tuotanto-tuonti-ja-vienti>

Energiateollisuus (2014c). *Tilastot ja julkaisut – Sähkötalastot – Sähkönkulutus – Sähkön käyttö ja verkostohäviöt* [online]. Helsinki: Energiateollisuus ry, 2014. [Viitattu 11.4.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkonkulutus/sahkon-kaytto-ja-verkostohaviot>

Energiavirasto (2013). *Sähköverkon tt-luvut* [online]. Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut 2012. Helsinki: Energiavirasto, 2013. [Viitattu 29.4.2014]. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/sahkoverkkotoiminnan-tunnusluvut-2012>

Energiavirasto (2014). *Sähkönjakeluverkon komponenttien yksikköhinnat 2014* [online]. Valvontaparametrit. Helsinki: Energiavirasto, 2014. [Viitattu 26.10.2014]. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/sahkonjakeluverkon-komponenttien-yksikkohinnat-2014>

Euroopan komissio (2012a). *Pääsihteeristö – Euroopan unionin oikeuden soveltaminen – Mikä on direktiivi?* [online]. Euroopan komissio, 25.6.2012 [viitattu 23.1.2014]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/eu\\_law/introduction/what\\_directive\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/eu_law/introduction/what_directive_fi.htm)

Euroopan komissio (2012b). *Pääsihteeristö – Euroopan unionin oikeuden soveltaminen – Mikä on asetus?* [online]. Euroopan komissio, 25.6.2012 [viitattu 23.1.2014]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/eu\\_law/introduction/what\\_regulation\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/eu_law/introduction/what_regulation_fi.htm).

- Euroopan unioni (2009). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/125/EY, annettu 21 päivänä lokakuuta 2009, energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista. *EUVL N:o L 285*, 31.10.2009, 10–35.
- Euroopan unioni (2014). Komission asetus (EU) N:o 548/2014, annettu 21 päivänä toukokuuta 2014, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/Ey täytäntöönpanosta pienten, keskikokoisten ja suurten muuntajien osalta. *EUVL N:o L 152*, 22.5.2014, 1–15.
- Franklin, A.C. & D.P. Franklin (1983). *The J & P Transformer Book*. 11. painos. Lontoo: Butterworths. 815 s.
- Griinari, Simo. (2014). *Muuntajien osuus kantaverkon häviöistä*. Energiaselvitys, Fingrid Oyj. Sähköpostikeskustelu 25.4.2014.
- Haaranen, Marko (2011). *Rovakaira Oy:n keskijänniteverkon kehittämissuunnitelma toimitusvarmuuskriteeristön näkökulmasta*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 131 s.
- Heathcote, Martin J. (2007). *The J & P Transformer Book*. 13. painos. Burlington, MA: Newnes. 974 s.
- Kilponen, Joni. (2014). *Sähköverkon muuntajien keski-ikä*. Verkot, Energiavirasto. Sähköpostikeskustelu 9.5.2014.
- Kuisma, Kimmo (2008). *Sähköverkon häviöiden mallintaminen ja häviösähkön hankinta*. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 85 s.

- Kärnä, Anna (2001). *Ympäristömyötäinen tuotesuunnittelu - Opas sähkö- ja elektroniikkateollisuuden yritykselle* [online]. 2. painos. Helsinki: Sähkö- ja elektroniikkateollisuusliitto. 2001 [Viitattu 26.2.2014]. Saatavissa: [http://www.teknologia-teollisuus.fi/ymparistoosaaminen/file/11468/Ympristmytinentuotesuunnittelu2\\_uudistettup.pdf.html](http://www.teknologia-teollisuus.fi/ymparistoosaaminen/file/11468/Ympristmytinentuotesuunnittelu2_uudistettup.pdf.html)
- Lakervi, Erkki & Jarmo Partanen (2008). *Sähkönjakelutekniikka*. 3. painos. Helsinki: Otatieto. 285 s.
- Löf, Niklas (2009). *Pienjänniteverkon automaatiotarkaisuiden kehitysnäkymät*. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 119 s.
- Motiva (2014). *Taustatietoa – Energiankäyttö Suomessa – Energiankulutuksen hiilidioksidipäästöjen laskenta – CO<sub>2</sub>-päästökertoimet* [online]. Helsinki: Motiva Oy, 1.4.2014. [Viitattu 11.4.2014]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/taustatietoa/energiankaytto\\_suomessa/energiankulutuksen\\_hiilidioksidipaastojen\\_laskenta/co2-paastokertoimet](http://www.motiva.fi/taustatietoa/energiankaytto_suomessa/energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskenta/co2-paastokertoimet)
- Nykänen, Kaisa (2009). *Vaasan Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkon nykytilan määrittely sekä kehittämissuunnitelma käyttövarmuuden näkökulmasta*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 134 s.
- Palola, Jussi (2014). *Dynamic Scenario Modelling in Electricity Distribution System Asset Management*. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan laitos. Väitöskirja. 197 s.
- Partanen, Jarmo (2013). *Sähkönjakelutekniikka - Johdanto* [online]. Luentomoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2013. [Viitattu 14.3.2014]. Saatavissa [https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/sahkonjake-lu\\_johdanto\\_2013.pdf](https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0500/luennot/sahkonjake-lu_johdanto_2013.pdf)

- Ristamäki, Heli (2012). *Muuntajien häviölämmön hyödyntäminen lämpöpumpputekniikalla*. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 104 s.
- Strömberg (1982). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 3. painos. Vaasa: Oy Strömberg Ab. 480 s.
- Tekniikan käsikirja 3, Sähkötekniikka*. 8. painos. Jyväskylä: K.J. Gummerus Osakeyhtiö Jyväskylä, 1973. 792 s.
- Teknologiateollisuus (2010). *Ympäristölainsäädäntö - seuranta ja vaikuttaminen* [online]. Helsinki: Teknologiateollisuus ry, 2010 [Viitattu 26.2.2014]. Saatavissa: [http://www.teknologiateollisuus.fi/file/9277/ymparistolainsaadanto\\_verkkoversio\\_20092010.pdf.html](http://www.teknologiateollisuus.fi/file/9277/ymparistolainsaadanto_verkkoversio_20092010.pdf.html)
- UM (2012). *Kansainvälinen yhteistyö – Ilmastoyhteistyö – EU:n ilmastopoliittika ja Suomi* [online]. Ulkoasiainministeriö, 27.2.2012 [viitattu 6.2.2014]. Saatavissa: <http://www.formin.fi/Public/default.aspx?nodeid=43578&contentlan=1&culture=fi-FI>.
- Vessari, Marja Lotta (2014). *Vaasan Sähköverkon jakelumuuntajien tehot*. Vaasan Sähköverkko Oy. Sähköpostikeskustelu 22.4.2014.
- Vesti, Jussi (2013). *Kupariroottorin käyttö korkean hyötysuhteen oikosulkumoottorisissa*. Vaasan yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 83 s.
- Winders, John J., Jr. (2002). *Power Transformers: Principles and Applications*. 2. painos. New York: Marcel Dekker. 283 s.

VITO (2011). *LOT 2: Distribution and power transformers Tasks 1–7* [online]. Final report. Mol, Belgium: Vision on Technology, 2011. [Viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: [http://www.eceee.org/ecodesign/products/distribution\\_power\\_transformers/Final\\_report\\_Feb2011](http://www.eceee.org/ecodesign/products/distribution_power_transformers/Final_report_Feb2011)

## LIITTEET

## LIITE 1. Vaatimukset keskikokoisille muuntajille

**Taulukko 1.** Enimmäiskuormitushäviöt ja -tyhjäkäyntihäviöt neste-eristeisille, nimellistehoaltaan  $\leq 3150$  kVA:n keskikokoisille kolmivaihemuuntajille, joissa toisen käämin  $U_m \leq 24$  kV ja toisen  $U_m \leq 1,1$  kV (EU 2014: 6).

Nimellisteho (kVA)	Vaihe 1 (1.7.2015 alkaen)		Vaihe 2 (1.7.2021 alkaen)	
	Enimmäiskuormitushäviöt $P_k$ (W)	Enimmäis-tyhjäkäyntihäviöt $P_0$ (W)	Enimmäiskuormitushäviöt $P_k$ (W)	Enimmäis-tyhjäkäyntihäviöt $P_0$ (W)
$\leq 25$	$C_k$ (900)	$A_0$ (70)	$A_k$ (600)	$A_0-10\%$ (63)
50	$C_k$ (1 100)	$A_0$ (90)	$A_k$ (750)	$A_0-10\%$ (81)
100	$C_k$ (1 750)	$A_0$ (145)	$A_k$ (1 250)	$A_0-10\%$ (130)
160	$C_k$ (2 350)	$A_0$ (210)	$A_k$ (1 750)	$A_0-10\%$ (189)
250	$C_k$ (3 250)	$A_0$ (300)	$A_k$ (2 350)	$A_0-10\%$ (270)
315	$C_k$ (3 900)	$A_0$ (360)	$A_k$ (2 800)	$A_0-10\%$ (324)
400	$C_k$ (4 600)	$A_0$ (430)	$A_k$ (3 250)	$A_0-10\%$ (387)
500	$C_k$ (5 500)	$A_0$ (510)	$A_k$ (3 900)	$A_0-10\%$ (459)
630	$C_k$ (6 500)	$A_0$ (600)	$A_k$ (4 600)	$A_0-10\%$ (540)
800	$C_k$ (8 400)	$A_0$ (650)	$A_k$ (6 000)	$A_0-10\%$ (585)
1 000	$C_k$ (10 500)	$A_0$ (770)	$A_k$ (7 600)	$A_0-10\%$ (693)
1 250	$B_k$ (11 000)	$A_0$ (950)	$A_k$ (9 500)	$A_0-10\%$ (855)
1 600	$B_k$ (14 000)	$A_0$ (1 200)	$A_k$ (12 000)	$A_0-10\%$ (1 080)
2 000	$B_k$ (18 000)	$A_0$ (1 450)	$A_k$ (15 000)	$A_0-10\%$ (1 305)
2 500	$B_k$ (22 000)	$A_0$ (1 750)	$A_k$ (18 500)	$A_0-10\%$ (1 575)
3 150	$B_k$ (27 500)	$A_0$ (2 200)	$A_k$ (23 000)	$A_0-10\%$ (1 980)

Enimmäiskuormitushäviöitä ja -tyhjäkäyntihäviöitä esittävässä taulukoissa käytetyt kirjaimet A, B ja C viittaavat standardissa EN 50464-1 määriteltyihin hyötysuhdeluokkiin tai energiamerkintöihin (*energy label*) (VITO 2011: 3).

**Taulukko 2.** Kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöiden korjaaminen, silloin kun käämien jänniteyhdistelmä on jokin muu tai jos toinen tai molemmat käämeistä ovat kaksijännitteisiä (nimellisteho  $\leq 3150$  kVA) (EU 2014: 7–8).

Toisessa käämissä $U_m \leq 24$ kV ja toisessa $U_m > 1,1$ kV	Sallittuja enimmäishäviöitä korotetaan 10 prosenttia sekä tyhjäkäynti- että kuormitushäviöiden osalta.
Toisessa käämissä $U_m = 36$ kV ja toisessa $U_m \leq 1,1$ kV	Sallittuja enimmäishäviöitä korotetaan 15 prosenttia tyhjäkäyntihäviöiden osalta ja 10 prosenttia kuormitushäviöiden osalta.
Toisessa käämissä $U_m = 36$ kV ja toisessa $U_m > 1,1$ kV	Sallittuja enimmäishäviöitä korotetaan 20 prosenttia tyhjäkäyntihäviöiden osalta ja 15 prosenttia kuormitushäviöiden osalta.
Toinen käämeistä kaksijännitteinen	Mikäli muuntajassa on yksi yläjännitekäämi ja kaksi jännitettä saatavilla väliottoisesta alajännitekäämistä, häviöt lasketaan alajännitekäämin korkeamman jännitteen perusteella. Tällaisen muuntajan alajännitekäämin pienemmän jännitteen antama teho saa olla enintään 0,85 prosenttia alajännitekäämin nimellistehosta sen suuremmalla jännitteellä.
	Mikäli muuntajassa on yksi alajännitekäämi ja kaksi jännitettä saatavilla väliottoisesta yläjännitekäämistä, häviöt lasketaan yläjännitekäämin korkeamman jännitteen perusteella. Tällaisen muuntajan yläjännitekäämin pienemmän jännitteen antama teho saa olla enintään 0,85 prosenttia yläjännitekäämin nimellistehosta sen suuremmalla jännitteellä.
	Jos koko nimellisteho on käytettävissä jänniteyhdistelmästä riippumatta, häviötasoja voidaan korottaa 15 prosenttia tyhjäkäyntihäviöiden osalta ja 10 prosenttia kuormitushäviöiden osalta.
Molemmat käämit kaksijännitteisiä	Mikäli muuntajan molemmat käämit ovat kaksijännitteisiä, sallittuja enimmäishäviöitä voidaan korottaa 20 prosenttia tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöiden osalta. Häviötaso määritetään suurimmalle mahdolliselle nimellisteholle sillä perusteella, että nimellisteho on sama jänniteyhdistelmästä riippumatta.

**Taulukko 3.** Huippuhyötysuhdeindeksin (PEI) vähimmäisarvot neste-eristeisille, nimellisteholtaan  $> 3150$  kVA:n keskikokoisille kolmivaihemuuntajille (EU 2014: 8).

Nimellisteho $S_r$ (kVA)	Vaihe 1 (1.7.2015)	Vaihe 2 (1.7.2021)
	Huippuhyötysuhdeindeksi vähintään (%)	
$3150 < S_r \leq 4000$	99,465	99,532
5 000	99,483	99,548
6 300	99,510	99,571
8 000	99,535	99,593
10 000	99,560	99,615
12 500	99,588	99,640
16 000	99,615	99,663
20 000	99,639	99,684
25 000	99,657	99,700
31 500	99,671	99,712
40 000	99,684	99,724

**Taulukko 4.** Enimmäiskuormitushäviöt ja -tyhjäkäyntihäviöt keskikokoisille nesteeristeisille pylväsmuuntajille (EU 2014: 9–10).

Nimellisteho (kVA)	Vaihe 1 (1.7.2015)		Vaihe 2 (1.7.2021)	
	Enimmäiskuormitushäviöt $P_k$ (W)	Enimmäistyhjäkäyntihäviöt $P_0$ (W)	Enimmäiskuormitushäviöt $P_k$ (W)	Enimmäistyhjäkäyntihäviöt $P_0$ (W)
25	$C_k$ (900)	$A_0$ (70)	$B_k$ (725)	$A_0$ (70)
50	$C_k$ (1 100)	$A_0$ (90)	$B_k$ (875)	$A_0$ (90)
100	$C_k$ (1 750)	$A_0$ (145)	$B_k$ (1 475)	$A_0$ (145)
160	$C_{k+32\%}$ (3 102)	$C_0$ (300)	$C_{k+32\%}$ (3 102)	$C_{0-10\%}$ (270)
200	$C_k$ (2 750)	$C_0$ (356)	$B_k$ (2 333)	$B_0$ (310)
250	$C_k$ (3 250)	$C_0$ (425)	$B_k$ (2 750)	$B_0$ (360)
315	$C_k$ (3 900)	$C_0$ (520)	$B_k$ (3 250)	$B_0$ (440)

## LIITE 2. Vaatimukset suurille muuntajille

**Taulukko 1.** Huippuhyötysuhdeindeksin vähimmäisvaatimukset suurille nesteeristeisille muuntajille (EU 2014: 10).

Nimellisteho (MVA)	Vaihe 1 (1.7.2015)	Vaihe 2 (1.7.2021)
	Huippuhyötysuhdeindeksi vähintään (%)	
≤ 4	99,465	99,532
5	99,483	99,548
6,3	99,510	99,571
8	99,535	99,593
10	99,560	99,615
12,5	99,588	99,640
16	99,615	99,663
20	99,639	99,684
25	99,657	99,700
31,5	99,671	99,712
40	99,684	99,724
50	99,696	99,734
63	99,709	99,745
80	99,723	99,758
≥ 100	99,737	99,770

## LIITE 3. Aiempien sukupolvien standardimuuntajien suoritusarvoja

**Taulukko 1.** Eräiden Strömbergin valmistamien 110 kV öljyeristeisien standarditehohuuntajien laskennalliset tehot, häviöt ja huippuhyötysuhdeindeksit sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin (Strömberg 1982: 237).

$S_r$ (MVA)	$P_0$ (kW)	$P_k$ (kW)	PEI (%)	Vaatimusten täytyminen
10	11,2	61	99,477	Ei
16	16,1	88	99,529	Ei
20	16,8	106	99,578	Ei
25	21,8	121	99,589	Ei
31,5	24,5	136	99,633	Ei
40	33,5	178	99,613	Ei
50	32,7	212	99,666	Ei
63	38	260	99,684	Ei

**Taulukko 2.** Eräiden Strömbergin valmistamien öljyeristeisien standardijakelumuuntajien laskennalliset tehot ja häviöt sekä niiden vastaaminen asetuksen vaatimuksiin (Strömberg 1982: 235).

$S_r$ (kVA)	$U_{n1}/U_{n2}$ (V/V)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täytyminen
16	20 000 / 400	110	490	Ei
30	20 000 / 400	120	770	Ei
50	20 000 / 400	150	1 330	Ei
100	20 000 / 400	245	1 870	Ei
200	20 000 / 400	465	2 600	Ei
315	20 000 / 400	680	3 480	Ei
500	20 000 / 400	930	5 000	Ei
800	20 000 / 400	1 400	6 500	Ei
1 000	20 000 / 400	1 500	8 400	Ei
1 250	20 000 / 400	1 870	11 200	Ei
1 600	20 000 / 400	2 550	13 500	Ei
2 000	20 000 / 400	3 000	15 600	Ei

**Taulukko 3.** Eräiden ABB:n valmistamien 110 kV öljyeristeisien KATI-sarjan teho-  
muuntajien laskennalliset tehot, häviöt ja huippuhyötysuhdeindeksit sekä  
niiden vastaaminen asetuksen vaatimukseen (ABB 2000: 319).

$S_r$ (MVA)	$P_0$ (kW)	$P_k$ (kW)	PEI (%)	Vaatimusten täytyminen
10	9,0	51	99,571	Tier 1
16	11,0	74	99,643	Tier 1
20	13,5	87	99,657	Tier 1
25	15,5	100	99,685	Tier 1
31,5	18,0	122	99,702	Tier 1
40	23,5	146	99,707	Tier 1
50	27,0	175	99,725	Tier 1
63	32,0	210	99,739	Tier 1

**Taulukko 4.** Eräiden ABB:n valmistamien öljyeristeisien standardijakelumuntajien  
laskennalliset tehot ja häviöt sekä niiden vastaaminen asetuksen vaati-  
muksiin (ABB 2000: 317).

$S_r$ (kVA)	$U_{n1}/ U_{n2}$ (V/V)	$P_0$ (W)	$P_k$ (W)	Vaatimusten täytyminen
30	20 500 / 410	103	585	Ei
50	20 500 / 410	140	885	Ei
100	20 500 / 410	220	1 485	Ei
200	20 500 / 410	420	2 295	Ei
315	20 500 / 410	600	4 500	Ei
500	20 500 / 410	720	6 600	Ei
630	20 500 / 410	890	7 200	Ei
800	20 500 / 410	1 200	8 500	Ei
1 000	20 500 / 410	1 450	10 200	Ei
1 250	20 500 / 410	1 600	11 500	Ei
1 600	20 500 / 410	1 840	14 100	Ei
2 000	20 500 / 410	2 130	16 000	Ei