

Aki Terävä

Muuntajien ja kuristimien lopputarkastus- mittausten kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

14.1.2014

Alkulause

Tämä insinööriyö tehtiin Muuntosähkö Oy:lle. Haluan kiittää tuotesuunnitteluinsinööri Juha Horttanaista sekä tuotantopäällikkö Jari Taskista hyvästä työohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää työni ohjauksesta yliopettaja Jarno Vartevaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta ja kielenhuollon ohjauksesta lehtori Maritta Finskaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Helsingissä 14.1.2014

Aki Terävä

Tekijä Otsikko	Aki Terävä Muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittausten kehittäminen
Sivumäärä Aika	33 sivua + 1 liite 14.1.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	tuotesuunnitteluinsinööri Juha Horttanainen tuotantopäällikkö Jari Taskinen yliopettaja Jarno Varteva
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Muuntosähkö Oy:lle. Työssä tutkittiin ja kehitettiin muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittauksia. Lähtökohtana oli selvittää, millaisia eri mittauksia ja testauksia standardit vaativat lopputarkastuksilta. Lisäksi pohdittiin, miten mittauksia voitaisiin kehittää, muun muassa nopeuttamalla mittausten suorittamista sekä yksinkertaistamalla mittaustulosten keruuta.</p> <p>Työssä on aluksi käyty läpi muuntajien ja kuristimien perusrakenteita sekä toimintaperiaatteita, ja millaisia muuntajia ja kuristimia Muuntosähkö Oy valmistaa. Tämän jälkeen on tarkasteltu, millaisia eri mittauksia ja testauksia standardit vaativat muuntajien ja kuristimien lopputarkastuksilta. Lisäksi on selvitetty, mitä muita vaatimuksia lopputarkastusmittauksiin liittyy esimerkiksi mittalaitteistojen turvallisuuden suhteen. Lopuksi on esitelty lyhyesti muutamien mittalaittevalmistajien tarjoamia mittalaitteita sekä tarkemmin yhden mittalaittevalmistajan valmistama laitteisto, jolla vaaditut mittaukset voitaisiin suorittaa nykyistä tehokkaammin.</p> <p>Työssä keskityttiin Muuntosähkö Oy:n Helsingin tehtaassa valmistettuihin tyypillisimpiin muuntajiin sekä kuristimiin. Tällaisia ovat muuntajien osalta matalajännitteiset tehomuuntajat ja lääkintäsuojaerotusmuuntajat, sekä kuristimista sarja- ja estokelakuristimet. Työn painopiste oli muuntajien lopputarkastusmittausten tutkimisessa ja kehittämisessä.</p> <p>Työn tuloksena kohdeyritys sai tietoa siitä, mitä eri vaatimuksia standardit asettavat muuntajien ja kuristimien lopputarkastuksille. Vaatimukset koskevat mittausten lisäksi esimerkiksi turvajärjestelyjä, jotka täytyy ottaa huomioon mittauksia tehdessä. Lisäksi yritys sai tietoa siitä, millaisilla laitteilla olisi mahdollista nopeuttaa ja tehostaa mittausten suorittamista.</p>	
Avainsanat	muuntaja, kuristin, standardi, lopputarkastusmittaus

Author Title	Aki Terävä Improvement of Acceptance Testing of Transformers and Reactors
Number of Pages Date	33 pages + 1 appendix 14 January 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Juha Horttanainen, Product Design Engineer Jari Taskinen, Production Manager Jarno Varteva, Principal Lecturer
<p>This thesis was carried out for Muuntosähkö Oy. The aim of this thesis was to examine and improve acceptance testing of transformers and reactors. The initial aim was to determine the type of measurements and tests that should be performed on transformers and reactors according to different standards. A subsequent aim was to consider possibilities for improving these measurement techniques, such as speeding up the measurement process.</p> <p>First, the basic structures and functions of transformers and reactors are studied. Additionally, different models of transformers and reactors manufactured by Muuntosähkö Oy are reviewed. Following these steps, an examination of different measurements and tests that are required by different standards for the acceptance testing is performed. This phase also includes the consideration of other requirements, such as the safety of the measuring equipment. Finally, a short overview of the measuring instruments, by which the required measurements could be performed more efficiently, is presented.</p> <p>The study focused on the most typical transformers and reactors manufactured in Helsinki factory of Muuntosähkö Oy. These are low voltage power transformers, medical isolation transformers, line reactors and harmonic circuit filter reactors. The focus of this study was to examine and improve the process of transformers acceptance testing.</p> <p>As a result, the target company received information about the different requirements that are set by various standards for the transformers and reactors acceptance testing. In addition to the measurements themselves, the requirements consisted of safety arrangements as well. In addition, the company received information about the kind of measuring equipment that would be likely to enhance the measuring process.</p>	
Keywords	transformer, reactor, standard, acceptance testing

Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Muuntajat	2
2.1	Muuntajan perustoiminta ja rakenne	2
2.2	Muuntosähkö Oy:ssä valmistetut muuntajat	4
3	Kuristimet	5
3.1	Kuristimen perustoiminta ja rakenne	5
3.2	Muuntosähkö Oy:ssä valmistetut kuristimet	6
4	Laadunhallintastandardi ja CE-merkintä	8
4.1	ISO 9001 -standardi	8
4.2	CE-merkintä	9
5	Lopputarkastusmittausvaatimukset	10
5.1	Normien vaatimat mittaukset muuntajille ja kuristimille	10
5.1.1	Muuntajien lopputarkastukset	10
5.1.2	Kuristimien lopputarkastukset	22
5.2	Asiakaskohtaiset vaatimukset	23
5.3	Mittausten ja laitteiden turvallisuusvaatimukset	23
5.4	Eri jännitetasojen vaikutus vaadittuihin mittauksiin	26
6	Vaadittujen mittausten tekemiseen käytettävät laitteistot	28
7	Mittausten kehitysmahdollisuudet	29
8	Yhteenveto	31
	Lähteet	32
	Liite 1. Testausalueen pienimmät turvaetäisyydet	

Lyhenteet

ANSI	<i>American National Standards Institute.</i> Yhdysvaltalainen voittoa tavoittelematon yksityinen organisaatio, joka valvoo erilaisten standardien kehittymistä Yhdysvalloissa.
CE-merkintä	Merkintä, joka osoittaa, että tuote on EU:n uuden lähestymistavan direktiivien mukainen.
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
EN	Eurooppalainen standardi, joka on jonkin eurooppalaisen standardisoi- misjärjestön laatima.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i> Kansainvälinen sähköalan standardisoiomisjärjestö.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i> Kansainvälinen standardi- soimisjärjestö.
PLC	<i>Programmable Logic Controller.</i> Ohjelmoitava logiikka.
SFS	Suomen Standardisoiomisliitto SFS ry. Standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa.
SFS-EN	Tunnusyhdistelmä tarkoittaa, että sama standardi on sekä SFS:n että jonkin eurooppalaisen standardisoiomisjärjestön vahvistama.

1 Johdanto

Tämä insinööriyö on tehty Muuntosähkö Oy:lle. Yhtiö on perustettu vuonna 1947, ja pääkonttori sijaitsee Helsingissä. Sen lisäksi yhtiöllä on tehtaat Joensuussa, Viron Viljandissa sekä Kiinan Suzhoussa. Tuotantoon kuuluu muuntajien ja kuristimien lisäksi myös muita käämittyjä komponentteja. Vuodesta 1980 lähtien yritys on myös kehittänyt ja valmistanut vikavirranvalvontalaitteita. Tuotannosta menee vientiin noin 32 %. Vientikohteita ovat Pohjois- ja Keski-Eurooppa, USA sekä yksittäiset kohteet ympäri maailman. Yritys tunnetaan Suomen ulkopuolella nimellä Trafox.

Työssä esitellään muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittausten tutkimista ja kehittämistä. Työssä selostetaan mitä eri standardit vaativat muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittauksilta, esimerkiksi mitä asioita täytyy mitata ja millä tavalla. Standardien lisäksi käsitellään myös, millaisia asiakas- ja turvallisuusvaatimuksia mittauksiin liittyy. Työssä tarkastellaan lisäksi, mitä eri laitteita ja ohjelmistoja on nykypäivänä olemassa vaadittuja mittauksia varten, ja pohditaan, että voitaisiinko niillä korvata nykyiset, vanhentuneet laitteet. Työssä pohditaan myös, kuinka mittauksia voitaisiin nopeuttaa, mahdollisesti automatisoinnin avulla, ja kuinka mittaustulosten keruuta ja arkistointia voitaisiin yksinkertaistaa.

Aluksi kerrotaan perustietoa muuntajista ja kuristimista, sekä millaisia muuntajia ja kuristimia Muuntosähkö Oy valmistaa. Tämän jälkeen tarkastellaan, millaisia eri vaatimuksia lopputarkastusmittauksiin liittyy muun muassa standardien ja turvallisuuden suhteen. Sen jälkeen esitellään, millä tavalla vaaditut mittaukset tehdään, sekä mitä välineitä mittauksissa käytetään. Lisäksi kerrotaan, miten mittauksia voitaisiin kehittää esimerkiksi uusien laitteistojen sekä mittaustekniikoiden avulla.

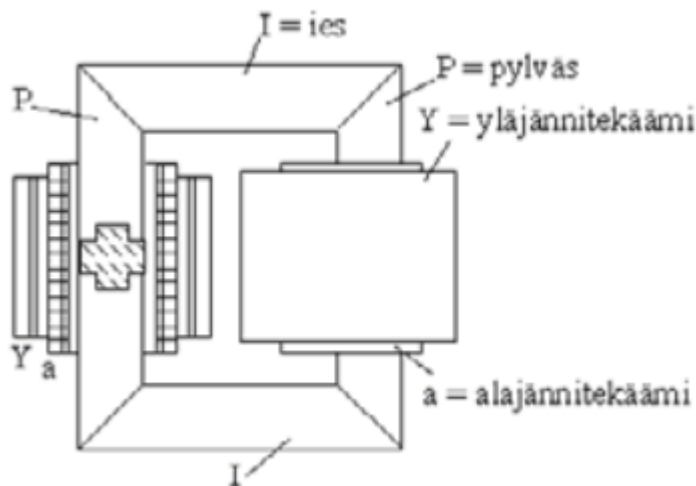
2 Muuntajat

Muuntaja on sähkökoje, jolla voidaan muuntaa jokin vaihtojännite tai -virta joksikin toiseksi samantaajuiseksi vaihtojännitteeksi tai -virraksi. Tämän lisäksi muuntajia käytetään vaihtovirtapiirien galvaaniseen erottamiseen sekä elektronisten piirien impedanssitasojen sovittamiseen [1]. Muuntajat voivat olla yksi- tai kolmivaiheisia.

2.1 Muuntajan perustoiminta ja rakenne

Yksinkertaisen muuntajan rakenne koostuu rautasydäimestä ja sen ympärille kierretystä eli käämistä johtimesta. Rautasydän koostuu kahdesta pylvästä, jotka on yhdistetty toisiinsa ikeillä. Muuntaja rakentuu kahdesta toisistaan eristetystä käämistä, ensiö- ja toisiokäämistä (tai vastaavasti yläjännite- ja alajännitekäämi), jotka on käämitty saman rautasydämen ympärille.

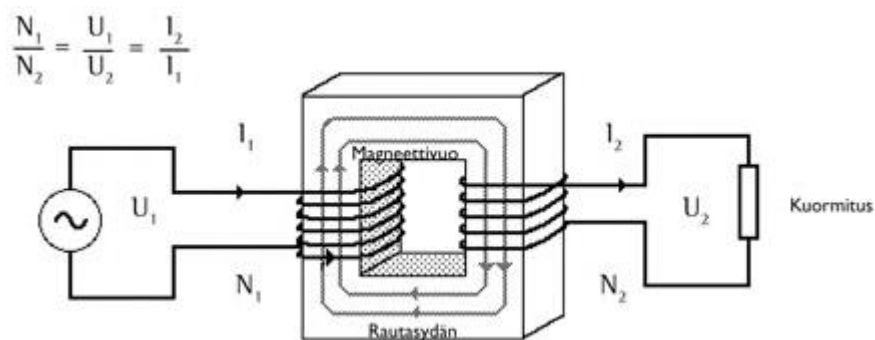
Ensiö- ja toisiokäämi rakennetaan yleensä päällekkäin samalle pylväälle. Tällöin hajavuo ja hajareaktanssit ovat pienemmät kuin käämien ollessa eri pylväillä. Esimerkiksi yksivaihemuuntajan käämitykset voidaan jakaa kahteen osaan ja sijoittaa ne molemmille pylväille (kuva 1). [2.]



Kuva 1. Yksivaihemuuntaja, jonka käämitykset on jaettu kahteen osaan ja sijoitettu molemmille pylväille [2]

Usein muuntajan rautasydän koostuu muuntajalevyistä. Sydän voidaan valmistaa myös muista materiaaleista kuten terässeosrainasta tai puristamalla ferriittisistä materiaaleista. Käämijohtimien materiaalina käytetään emalilla eristettyä kuparia tai alumiinia. [1.]

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, joten se toimii vain vaihtosähköllä [3]. Kun ensiökäämiin syötetään vaihtojännite (U_1), se muodostaa käämin sisällä olevaan rautasydämeen muuttuvan magneettivuon. Se puolestaan lävistää samalla sydämellä olevan toisiokäämin, jolloin siihen indusoituu sen kierrosmäärää vastaava vaihtojännite (U_2). Muuntajan yksinkertainen rakenne ja toimintaperiaate esitetään kuvassa 2. [4.]



Kuva 2. Muuntajan perusrakenne ja toimintaperiaate [4]

Muuntajan ensiökäämin jännitteen (U_1) ja toisiokäämin jännitteen (U_2) suhdetta kutsutaan muuntosuhteeksi. Se on ideaalisessa häviöttömässä muuntajassa sama kuin ensiö- ja toisiokäämien johdinkierrosten lukumäärien (N_1 ja N_2) suhde tai piireissä kulkevien virtojen (I_1 ja I_2) suhteen käänteisarvo.

Ideaalisessa muuntajassa muuntajan ensiökäämiin syötetty teho on yhtä suuri kuin toisiokäämistä saatu teho. Tällöin muuntajalla ei ole häviöitä. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, koska osa tehosta kuluu esimerkiksi muuntajan lämpiämiin. [5.]

2.2 Muuntosähkö Oy:ssä valmistetut muuntajat

Erilaisten muuntajien valmistus on alusta alkaen kuulunut Muuntosähkö Oy:n tuotantoon. Muuntosähkön valmistamia muuntajia ovat

- tehomuuntajat
- lääkintäsuojaerotusmuuntajat
- pakkamuuntajat
- muovikoteloidut muuntajat
- piirilevytuotantamuuntajat
- rengassydänmuuntajat
- ferriittimuuntajat.

Tämän insinööriyön kannalta tärkeimmät muuntajat ovat Muuntosähkö Oy:n Helsingin tehtaalla valmistetut muuntajat, joita ovat: tehomuuntajat sekä lääkintäsuojaerotusmuuntajat.

Muuntosähkön valmistamat tehomuuntajat täyttävät normit IEC 60726, IEC 61558-2-1, -4, -6 ja -13. Tarvittaessa valmistuksessa otetaan huomioon myös muita normeja, esimerkiksi lääkintäsuojamuuntajanormit ja laivamuuntajanormit käyttökohteesta riippuen. Muuntajat ovat matalajännitteisiä (max. 1 000 V) yksi- tai kolmivaiheisia (kuvat 3 ja 4, ks. seur. s.). Ne ovat ilmajäähdytteisiä, eli ne ovat ns. kuivamuuntajia. Kuivamuuntajassa rautasydän ja käämitykset ovat suoraan kosketuksissa ympäröivään ilmaan.



Kuva 3. Matalajännitteinen yksivaihemuuntaja

Kolmivaihemuuntajan kullekin vaiheelle on oma pylväänsä.



Kuva 4. Matalajännitteinen kolmivaihemuuntaja

Matalajännitteisten muuntajien lisäksi Muuntosähkö valmistaa tilaustyönä myös keskijännitemuuntajia.

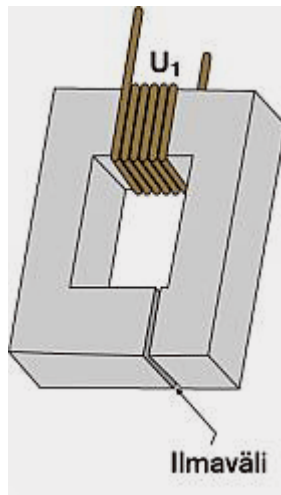
Muuntosähkössä valmistetut lääkintäsuojaerotusmuuntajat on valmistettu normien IEC 61558-2-15, IEC 60742, EN 60601-1, EN 60742 ja EN 61558-2-15 mukaisesti. Muuntajat on valmistettu vahvistetulla eristyksellä, ja niillä on hyvin pieni vuotovirta ensiö- ja toisiokäämien välillä. Ilman kuormaa suurin vuotovirta nimellisjännitteellä ja -taajuudella on 0,5 mA. Ensiö- ja toisiokäämien välillä on staattinen suoja.

3 Kuristimet

Kuristimet ovat rauta-, ferriitti- tai ilmasydämissä käämejä. Niitä käytetään loistehon synnyttämiseen sekä virran rajoittamiseen. Kuristimet voivat olla yksi- tai kolmivaiheisia.

3.1 Kuristimen perustoiminta ja rakenne

Perinteisen rautasydämissen kuristimen rakenne on samankaltainen kuin yksi- ja kolmivaiheisissa muuntajissa. Kuristin koostuu käämistä ja rautasydäimestä, jossa on ilmapäli (kuva 5). Ilmapälin suuruus määrittelee sen, miten suuri induktanssi kuristimella on. Induktanssi puolestaan kuvaa kuristimen kykyä vastustaa käämijohtimen läpi kulkevan virran muutosta. Induktanssin arvo riippuu myös käämin johdinkierrosmäärästä.



Kuva 5. Kuristimen yksinkertainen rakenne [1]

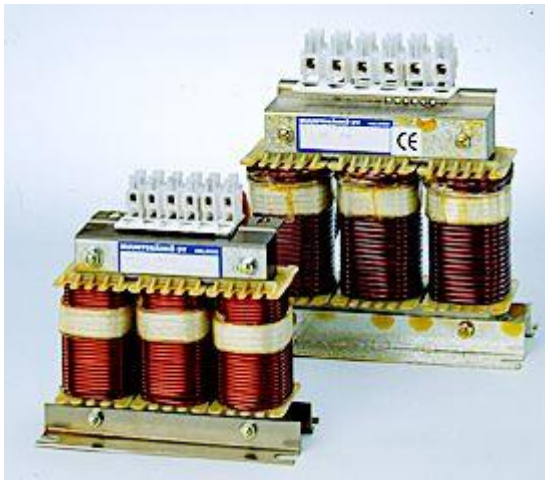
Käämityksessä kulkeva virta synnyttää kuristimen sydämeen magneettivuon, joka on verrannollinen virran suuruuteen. Sydämen magneettivuon muutos indusoi käämitykseen jännitteen, joka vastustaa virran muutosta. Ilmasydämisen kuristimen käämi voidaan käämiä esimerkiksi muovisen tukirungon päälle. Kuristin voidaan valmistaa myös ilman erillistä tukirunkoa, mikäli johdin on tarpeeksi jäykkä. Ilmasydämisten kuristimien induktanssi on virrasta riippumaton, koska magneettivuo kulkee kokonaan ilmassa. Ilmasydämissä kuristimia käytetäänkin erityisesti suurilla taajuuksilla. [7; 8.]

3.2 Muuntosähkö Oy:ssä valmistetut kuristimet

Muuntosähkö Oy:n tuotantoon on alusta alkaen kuulunut myös erilaisten kuristimien valmistus. Muuntosähkö valmistaa yksi- ja kolmivaiheisia AC- ja DC-kuristimia, joiden yleisimmät tyypit ja käyttökohteet ovat

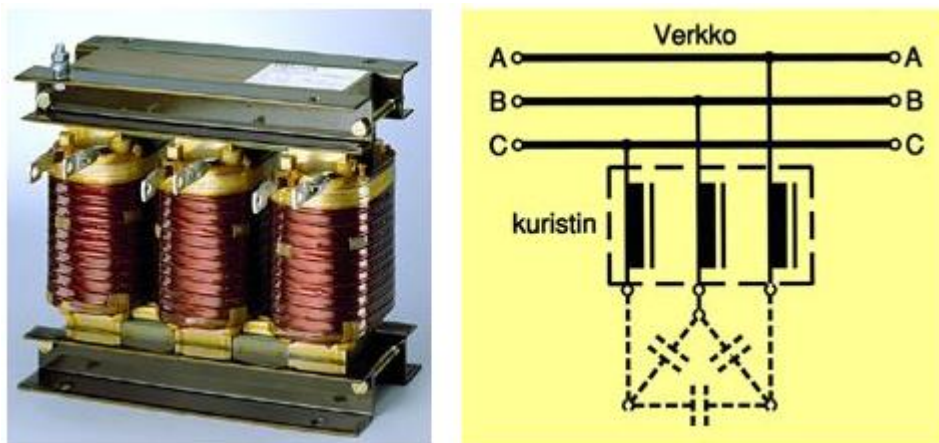
- loistehon kompensoimiseen tarkoitetut kuristimet
- kompensoinnin yhteydessä käytetyt estokelakuristimet
- sähköverkossa esiintyvien harmonisten yliaaltojen vaimennukseen ja suodattamiseen käytetyt kuristimet
- erilaisten häiriöiden suodattamiseen käytettyjen suodattimien kuristimet
- sarja- ja kommutointikuristimet.

Sarjakuristimet (kuva 6) sekä estokelakuristimet (kuva 8) ovat tyypillisimpiä Muunto-sähkö Oy:n valmistamia kuristimia.



Kuva 6. Sarjakuristimia [6]

Sarjakuristimia käytetään suurtaajuisten häiriöiden ja jännitepiikkien vaimentamiseen, verkosta tai kuormasta tulevien harmonisten yliaaltojen vaimentamiseen sekä käynnistysvirtasysäyksien ja oikosulkuvirtojen pienentämiseen [6].



Kuva 7. Estokelakuristin ja sen kytkentä verkkoon [6]

Estokelakuristimien päätehtävänä on resonanssiriskien pienentäminen loistehon kompensoinnin yhteydessä. Kuristimet estävät yliaaltojen kulun kompensointiparistoon.

Muuntosähkön valmistamien kuristimien valmistuksessa käytetty perusstandardi on IEC 61558-2-20.

4 Laadunhallintastandardi ja CE-merkintä

4.1 ISO 9001 -standardi

Muuntosähkö Oy:llä on käytössä sertifioitu laatujärjestelmä ISO 9001. Se on kansainvälinen laadunhallintastandardi, joka määrittelee vaatimukset laadunhallintajärjestelmälle. ISO 9001 takaa yrityksen laadukkaan toiminnan niin toimintatavasta asiakaspalveluun kuin myös tuotteiden valmistukseenkin. ISO 9001 perustuu kahdeksaan laadunhallinnan periaatteeseen, jotka kaikki ovat hyvään liiketoimintatapaan kuuluvia perusasioita, eli

- asiakassuuntautuneisuus
- johtajuus
- työntekijöiden sitoutuminen
- prosessiajattelu
- järjestelmäkeskeinen johtamistapa
- jatkuva toiminnan parantaminen
- tosiasioihin perustuva päätöksenteko
- molemminpuolista hyötyä tuottavat suhteet toimittajiin. [9.]

Bureau Veritas Certificationin merkki (kuva 8) on kansainvälisesti tunnettu vakuus siitä, että yritys panostaa jatkuvasti osaamiseen, luotettavuuteen ja kestävään kehitykseen.



Kuva 8. Bureau Veritas Certification -merkki [9]

4.2 CE-merkintä

CE-merkintä (kuva 9) tuotteessa on valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat EU-direktiivien vaatimukset. Vaatimukset koskevat esimerkiksi tuotteen suunnittelua, valmistusta ja testausta. Kaikissa suomalaisissa sähkölaitteissa täytyy olla CE-merkintä. Merkinnän avulla saa valmistaja tuotteelleen rajoittamattoman liikkumisoikeuden Euroopan talousalueella.



Kuva 9. CE-merkintä [10]

CE-merkintä on tarkoitettu pääasiassa viranomaisia varten, ja niin sanotun uuden menettelytavan mukaisissa direktiiveissä ei anneta yksityiskohtaisia tuotevaatimuksia. Direktiiveissä annetaan vain oleelliset turvallisuusvaatimukset, eli CE-merkintä ei ole yleinen turvallisuusmerkki. CE-merkintä ei myöskään erottele tuotteiden paremmuutta, eli se ei ole laatumerkki.

CE-merkinnän kiinnittämisestä tuotteeseen vastaa valmistaja itse tai hänen valtuuttamansa edustaja, joka on tuonut tuotteen Euroopan talousalueelle. Pääasia on, että merkin kiinnittäjä on varmistunut siitä, että tuote täyttää kaikki sitä koskevat olennaiset määräykset, jotka on direktiiveissä määritelty. [10.]

5 Lopputarkastusmittausvaatimukset

Muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittauksiin liittyy monia eri vaatimuksia niin standardien, turvallisuuden kuin asiakasvaatimuksienkin suhteen.

5.1 Normien vaatimat mittaukset muuntajille ja kuristimille

Standardeissa on määritelty tarkasti, mitä kaikkia muuntajien sekä kuristimien ominaisuuksia täytyy mitata ja millä tavalla, ennen kuin tuotteet voidaan ottaa käyttöön. Eri tuotteet voivat vaatia tarkkuudeltaan sekä mittauskyvyltään hyvinkin erilaisten mittalaitteiden käytön vaadittujen ominaisuuksien tarkastamiseksi. Aina ei ole edes käytettävissä suoraa mittalaitetta jokaista fysikaalista ominaisuutta varten, vaan vaadittu ominaisuus joudutaan laskemaan epäsuorasti kahden tai useamman mittauksen tuloksista.

5.1.1 Muuntajien lopputarkastukset

Kuivamuuntajat

Muuntosähkö Oy:n Helsingin tehtaassa valmistettujen kuivamuuntajien lopputarkastusmittauksiin käytetään standardia IEC 60076–11. Standardi koskee kuivamuuntajia jännitteeltään 1,1 kV–36 kV. Muuntosähkön valmistavat muuntajat ovat pääasiassa edellä mainitun jänniterajan alapuolella. Standardin soveltamisalan määrittelyn mukaisesti ko. standardia voidaan kuitenkin käyttää Helsingissä valmistettaviin muuntajiin soveltuvien osien. Standardi vaatii seuraavia rutiinimittauksia:

- kämmiresistanssien mittaus
- muuntosuhteen ja vaihe-eron mittaus
- oikosulkuimpedanssin ja kuormitushäviöiden mittaus
- tyhjäkäyntihäviöiden ja -virtojen mittaus
- eristyskoe, jännite erillisestä jännitelähteestä
- eristyskoe indusoidulla jännitteellä
- osittaispurkausmittaus (rutiini- ja erikoismittaus, koskee $\geq 3,6$ kV muuntajia). [11, s. 33–37.]

Käämiresistanssien mittaus

Käämiresistanssien mittauksella on tarkoitus varmistaa, että muuntajan käämit on kytketty oikein, ja että käämeissä ei esiinny mitään poikkeavuuksia esimerkiksi löysiä kytkentöjä tai viallisia johtimia. Käämiresistanssit mitataan jokaisen käämin kaikkien vaiheiden väliltä. Myös käämien lämpötilat mitataan. Mittauksissa käytetään tasajännitettä.

Käämien resistanssit voidaan laskea mittaamalla käämien vaiheiden väliset jännitteet, kun tiedetään käämien läpi kulkeva virta. Käämiresistanssien arvoja tarvitaan myös, kun lasketaan muuntajan kupari- eli kuormitushäviöitä.

Ennen mittauksia muuntajan täytyy olla levossa muuttumattomassa ympäristön lämpötilassa vähintään kolme tuntia. Muuntajan käämiresistanssit ja käämien lämpötilat mitataan samaan aikaan. Käämin lämpötila mitataan anturilla, joka on sijoitettu sopivaan asentoon, mieluiten käämitysten sisäpuolelle, esimerkiksi yläjännite- ja alajännitekäämin väliseen uraan. Resistanssimittauksissa täytyy noudattaa varovaisuutta, jotta itseinduktion vaikutukset minimoitaisiin. [12, s. 61.]

Muuntosuhteen ja vaihe-eron mittaus

Muuntosuhdemittauksella tarkastetaan, että muuntajan ensiö- ja toisiokäämissä on oikeat johdinkierrosmäärät. Jokaisen vaiheen muuntosuhde mitataan erikseen. Samalla tarkastetaan muuntajan kytkentäryhmä. [12, s. 63.]

Muuntosuhde saadaan tarkastettua siten, että muuntajan ensiökäämiin syötetään sen nimellisjännite ja toisiokäämistä mitataan tyhjäkäyntijännite. Muuntosuhde on ensiökäämin ja toisiokäämin jännitteiden suhde. Laskettu muuntosuhde ei välttämättä vastaa tarkalleen muuntajalle ilmoitettua muuntosuhdetta. Tämä johtuu esimerkiksi muuntajan kytkentäryhmästä, joka saadaan tarkastettua muuntosuhteen mittauksen yhteydessä. Vaihe-ero saadaan tarkistettua mittaamalla eri vaiheiden jännitteet.

Oikosulkuimpedanssin ja kuormitushäviöiden mittaus

Mittaukset tehdään nimellistaajuudella siten, että käämparin ensiöön syötetään likimäärin sinimuotoinen jännite ja toisio oikosuljetaan. Mahdolliset muut käämitykset (säätöpäillä olevat muuntajat) ovat avoinna. Ensiöön syötetyn virran pitäisi olla yhtä suuri kuin muuntajan ensiön nimellisvirta, mutta ei saa olla alle 50 % siitä. [12, s. 63.]

Jos mittausvirta I_m eroaa nimellisvirrasta I_N , niin nimellisvirtaa vastaava oikosulkujännite U_{Nk} ja kuormitushäviö P_{Nk} lasketaan kaavoilla 1 ja 2:

$$U_{Nk} = \frac{I_N}{I_m} \cdot U_{km}, \quad (1)$$

jossa U_{km} on mitattu oikosulkujännite.

$$P_{Nk} = \left(\frac{I_N}{I_m}\right)^2 \cdot P_{km}, \quad (2)$$

jossa P_{km} on mitatut kuormitushäviöt.

Mitatun oikosulkujännitteen U_{km} avulla voidaan laskea suhteellinen oikosulkuimpedanssi z_{km} (oikosulkujännite U_{km}) mittauslämpötilassa kaavalla

$$z_{km} = u_{km} = 100 \cdot \frac{U_{km}}{U_N} \%, \quad (3)$$

jossa U_N on muuntajan nimellisjännite. Suhteellinen oikosulkuresistanssi r_{km} ja oikosulkureaktanssi x_{km} mittauslämpötilassa voidaan laskea kaavoilla 4 ja 5.

$$r_{km} = 100 \cdot \frac{P_{km}}{S_N} \%, \quad (4)$$

jossa S_N on muuntajan nimellisteho. Suhteellinen oikosulkureaktanssi lasketaan kaavalla

$$x_{km} = \sqrt{z_{km}^2 - r_{km}^2} \% \quad (5)$$

Muuntajan kuormitushäviöt (kuparihäviöt) syntyvät kuormitusvirtojen vaikutuksesta muuntajan käämeissä. Ne voidaan laskea käämien resistanssien ja virtojen avulla. Tasajännitteellä mitattujen käämiresistanssien arvoilla lasketut kuormitushäviöt P_{DC} lasketaan kaavalla

$$P_{DC} = 1,5 \cdot (I_{1N}^2 \cdot R_{1m} + I_{2N}^2 \cdot R_{2m}), \quad (6)$$

jossa I_{1N} ja I_{2N} ovat ensiö- ja toisiokäämin nimellisvirrat ja R_{1m} ja R_{2m} tasajännitteellä mitatut ensiö- ja toisiokäämin resistanssit.

Muuntajan AC/lisähäviöt P_{AC} voidaan laskea yhtälöllä

$$P_{AC} = P_{km} - P_{DC}, \quad (7)$$

jossa P_{km} on mitatut kuormitushäviöt.

Kuormitushäviöt korjataan referenssilämpötilaan seuraavalla kaavalla:

$$P_k = P_{DC} \cdot \frac{T_k + T_r}{T_k + T_m} + P_{AC} \cdot \frac{T_k + T_m}{T_k + T_r} \quad (8)$$

T_k on 235 °C kuparille ja 225 °C alumiinille

T_r on haluttu referenssilämpötila

T_m on mittauslämpötila. [14.]

Referenssilämpötilat ovat käämin sallittuja keskimääräisiä lämpötilan nousuja, joihin lisätään 20 °C. Käämien sallitut keskimääräiset lämpötilan nousurajat löytyvät taulukosta 1 (ks. seur. s.).

Taulukko 1. Käämien lämpötilojen nousurajoja

Eristysjärjestelmän lämpötila °C (suluissa lämpöluokka)	Keskimääräinen käämin lämpötilan nousuraja nimellisvirralla K
105 (A)	60
120 (E)	75
130 (B)	80
155 (F)	100
180 (H)	125
200	135
220	150

Nyt voidaan määritellä suhteellinen oikosulkuresistanssi r_k ja oikosulkuimpedanssi z_k referenssilämpötilassa yhtälöillä

$$r_k = 100 \cdot \frac{P_k}{S_N} \% \quad (9)$$

ja

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_{km}^2} \% \quad (10)$$

Oikosulkureaktanssiin x_{km} ei vaikuta häviöt, joten se on sama mittauslämpötilassa ja referenssilämpötilassa. Oikosulkuimpedanssi Z_k saadaan laskettua kaavalla

$$Z_k = \frac{z_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_N} \quad (11)$$

Muuntajasta, jossa on säätöpäät ja säätöalue ± 5 %, mitataan oikosulkuimpedanssi perusasennosta ja kahdesta ääripäästä. [12, s. 63.]

Tyhjäkäyntihäviöiden ja -virtojen mittaus

Tyhjäkäyntimittaukset suoritetaan muuntajan nimellisjännitteellä ja -taajuudella. Mittaukset tehdään muuntajan pääsäätopäädstä. Mittaukset voidaan suorittaa myös muista säätopäistä, jolloin käytetään säätopään osoittamaa jännitettä. Tyhjäkäyntimittauksessa saadaan selville muuntajan tyhjäkäynti- eli rautahäviöt, jotka syntyvät muuntajan rautasydämessä magneettivuon vaihtelun seurauksena. Tyhjäkäyntihäviöt eivät riipu kuormitusvirrasta, joten niitä voidaan pitää vakioina kaikilla kuormilla.

Mittausjännite säädetään oikeaksi jännitteen keskiarvoa mittaavan jännitemittarin avulla. Tämän jännitemittarin näyttämä lukema on U' . Mittarin kanssa kytketään rinnan toinen jännitemittari, joka on säädetty näyttämään jännitteen rms-arvoa U . Testijännitteen aaltomuoto on sopiva mittauksiin, jos U' ja U eivät poikkea toisistaan yli 3 %.

Kolmivaihemuuntajista mitataan häviöiden ja virtojen lisäksi myös napojen jännitteet. Jos jännitettä syötetään kolmiokytkettyyn käämiin, jännitteet mitataan vaiheliittimien väliltä. Jos jännitteen syöttö tapahtuu YN- tai ZN-kytkettyyn käämiin, jännitteet mitataan vaihe- ja nollaliittimien väliltä.

Mitattu tyhjäkäyntihäviö P_m korjataan kaavan 12 mukaan:

$$P_0 = P_m(1 + d) \quad (12)$$

P_0 on korjattu tyhjäkäyntihäviö

$$d = \frac{U' - U}{U'} \text{ (yleensä negatiivinen)} \quad (13)$$

U' on jännitteen rms-arvo
 U on jännitteen keskiarvo.

Tyhjäkäyntivirran rms-arvo mitataan samaan aikaan kuin tyhjäkäyntihäviö. Kolmivaihemuuntajia mitattaessa kirjataan ylös myös vaihevirtojen keskiarvo. [12, s. 65.]

Eristyskoe, jännite erillisestä jännitelähteestä

Eristyskokeella varmistetaan, että eristys käämien välillä, käämien liittimissä ja käämien ja maadoitettujen osien välillä kestävät muuntajan normaaleissa käyttöolosuhteissa esiintyvät hetkelliset ylijännitteet.

Koestusjännite syötetään testattavaan käämiin ulkoisesta jännitelähteestä yksivaiheisena. Jännitteen täytyy olla mahdollisimman lähellä sinimuotoa ja taajuus ei saa olla alle 80 % nimellistaajuudesta. Testijännitteenä käytetään matalajännitteisissä muuntajissa ($U_n \leq 1,1$ kV) kolmea kilovolttia. Koestusaika on 60 sekuntia. Kokeessa testataan kaikki käämit keskenään sekä käämit yhdistettynä maadoitukseen. Muuntaja läpäisee testin, jos testin aikana ei tapahdu läpilyöntiä. [13, s. 37.]

Eristyskoe indusoidulla jännitteellä

Indusoidulla jännitteellä tehtävän eristyskokeen tarkoituksena on varmistaa, että muuntajan käämikierrosristus kestää korkean kierrosjännitteen. Testi tehdään suurtaajuusella jännitteellä. Kolmivaihemuuntajat testataan symmetrisellä kolmivaihesyötöllä. Jos muuntajassa on nollajohdin, se pitää maadoittaa testin ajaksi. Muuntajista, joissa on yhtenäisesti eristetyt käämit, tehdään eristyskoe vain vaiheiden väliltä (ei vaiheen ja maan). [13, s. 39.]

Testi suoritetaan siten, että toisiokäämiin syötetään vähintään kaksinkertainen toision nimellisyännite, jolloin myös taajuus on vähintään kaksinkertainen. Lähtökohtaisesti jännitteen tulisi olla mahdollisimman lähellä kaksinkertaista nimellisyännitettä. Syötettävän jännitteen suuruus ei saa ylittää muuntajalle asetettua maksimirajaa. Ensiökäämi jätetään avoimeksi. Koestusaika on vähintään 15 sekuntia ja enintään 60 sekuntia. Kokeen kesto riippuu koestustaajuuden suuruudesta kaavan 14 mukaan:

$$t = 120 \cdot \frac{\text{nimellistaajuus}}{\text{koestustaajuus}} \text{ s} \quad (14)$$

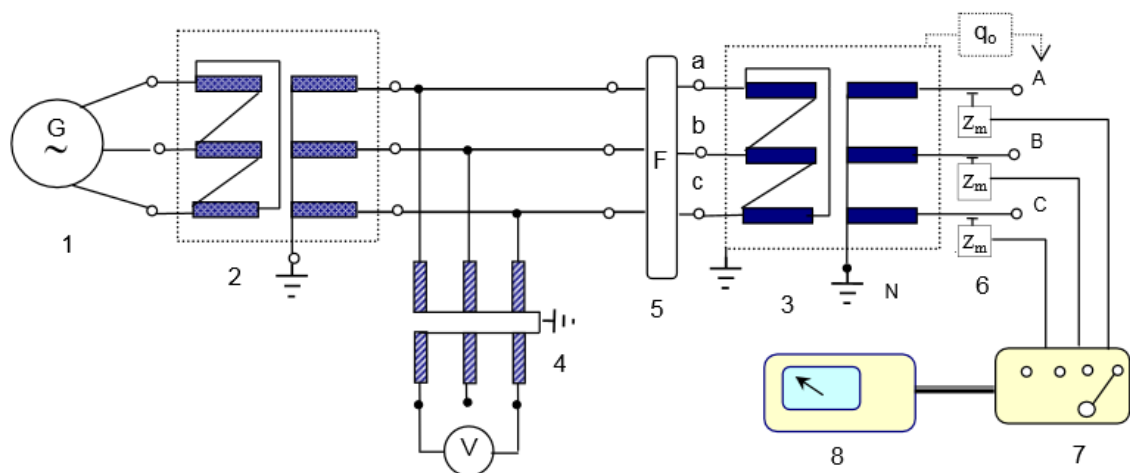
Testi aloitetaan syöttämällä käämiin jännitettä, joka on alle $\frac{1}{3}$ täydestä testijännitteestä, jonka jälkeen jännite nostetaan nopeasti haluttuun tasoon. Muuntaja läpäisee testin, jos testin aikana ei tapahdu läpilyöntiä. [13, s. 39.]

Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkaukset ovat eristeen sisällä tai pinnalla paikallisesti tapahtuvia pieniä sähköisiä purkauksia, jotka eivät välittömästi johda koko eristysvälin oikosulkeutumiseen. Osittaispurkaukset kuluttavat vähitellen käämin eristeitä, ja voivat lopulta johtaa läpilyöntiin. Osittaispurkausmittauksella voidaan havaita purkauksen olemassaolo ja sijainti. [13, s. 85.]

Osittaispurkausmittaus voidaan tehdä muuntajille, joiden nimellisjännite on yli 3,6 kilovoltia tai muuntajan valmistajan ja asiakkaan välisen sopimuksen mukaan. Sen tekeminen ei ole kuitenkaan pakollista muuntajille, joiden käyttöjännite on alle 72,5 kilovoltia. Osittaispurkausmittaus suoritetaan yleensä indusoidulla jännitteellä tehtävän eristyskokeen yhteydessä. [11, s. 37.]

Muuntajan osittaispurkausmittaus voidaan suorittaa kuvan 10 mukaisella menetelmällä.



- | | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1. syöttögeneraattori | 6. mittausimpedanssit |
| 2. syöttömuuntaja | 7. kytkin |
| 3. testattava muuntaja | 8. mittalaite ja oskilloskooppi |
| 4. jännitemuuntaja ja mittauspiiri | q_0 kalibrointigeneraattori |
| 5. suodatin | |

Kuva 10. Osittaispurkausmittauksen kytkentäkaavio [14]

Kytentäkaaviossa olevalla kalibrointigeneraattorilla kalibroidaan koko mittauspiiri ennen mittausten suorittamista. Kun kalibrointi on tehty, poistetaan kalibrointigeneraattori mittauspiiristä. Osittaispurkausarvot ennalta määritetyillä jännitetasoilla mitataan kaikista mitattavista liittimistä. Mittauksissa käytetään samoja jännitearvoja kuin indusoidulla

jännitteellä tehtävässä eristyskokeessa. Muuntaja läpäisee testin, jos mitatut osittaispurkausarvot jäävät ennalta määritettyjen rajojen alapuolelle. [14.]

Lääkintäsuojaerotusmuuntajat

Lääkintäsuojaerotusmuuntajien lopputarkastuksiin käytetään standardeja IEC 61558-1 ja IEC 61558-2-15. Näiden standardien mukaan lääkitäsuojaerotusmuuntajille täytyy tehdä seuraavanlaisia rutiinistestejä, ennen kuin ne otetaan käyttöön:

- suojamaadoituksen jatkuvuuden testaus
- tyhjäkäynnin lähtöjännitteiden tarkastus
- eristelujuuden testaus
- suojalaitteen asennuksen tarkastus
- silmämääräinen tarkastus
- oikosulkujännitteen tarkastus
- tyhjäkäynnin syöttövirran tarkastus
- syöksyvirran tarkastus. [15, s. 134–135; 16, s. 16.]

Suojamaadoituksen jatkuvuuden testaus

Suojamaadoituksen jatkuvuuden testaus koskee luokan 1 muuntajia. Mittauksen tarkoituksena on varmistaa, että suojajohdinpiirit ovat koko matkaltaan jatkuvia, eli että liitokset on tehty hyvin. Mittaus suoritetaan siten, että vaihtojännitelähteestä johdetaan 1,5-kertainen muuntajan nimellinen syöttövirta suojamaadoitusliittimen ja vuorotellen jokaisen kosketeltavan johtavan osan välille. Testivirran tulee olla vähintään 10 A ja enintään 25 A, ja jännitelähteen tyhjäkäyntijännite ei saa ylittää 12 V. Testausaika on yksi minuutti.

Testauksessa mitataan jännitteen alenema suojamaadoitusliittimen ja johtavan osan välillä. Mitatun jännitteen aleneman ja virran avulla lasketaan resistanssi. Resistanssin arvo ei saa ylittää 0,1 Ω . Testin aikana ei saa esiintyä liitosten keskeytyksiä tai huomattavaa virran alenemista suojamaadoitusliittimen ja testattavan johtavan osan välillä. [15, s. 134.]

Tyhjäkäynnin lähtöjännitteiden tarkastus

Tyhjäkäynnin lähtöjännite (vaiheiden välinen jännite) ei saa nousta yli 250 V:n vaihtojännitettä yksi- tai kolmivaiheisissa muuntajissa. Tyhjäkäynnin lähtöjännitteen ja kuormituksen alaisen lähtöjännitteen välinen eroavuus ei saa olla liian suuri. Eroavuus ilmoitetaan prosentiarvona ja lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$\frac{U_{\text{tyhjäkäynti}} - U_{\text{kuormitus}}}{U_{\text{kuormitus}}} \cdot 100 \%, \quad (15)$$

jossa $U_{\text{tyhjäkäynti}}$ on tyhjäkäynnin lähtöjännite ja $U_{\text{kuormitus}}$ on kuormituksen alainen lähtöjännite. Jännitteet mitataan kun muuntaja on kytketty nimelliseen syöttöjännitteeseen nimellisellä syöttötaajuudella.

Tyhjäkäynnin lähtöjännitteen ja kuormituksen alaisen lähtöjännitteen välinen eroavuus ei saa olla yli 5 %. [16, s. 8–9.]

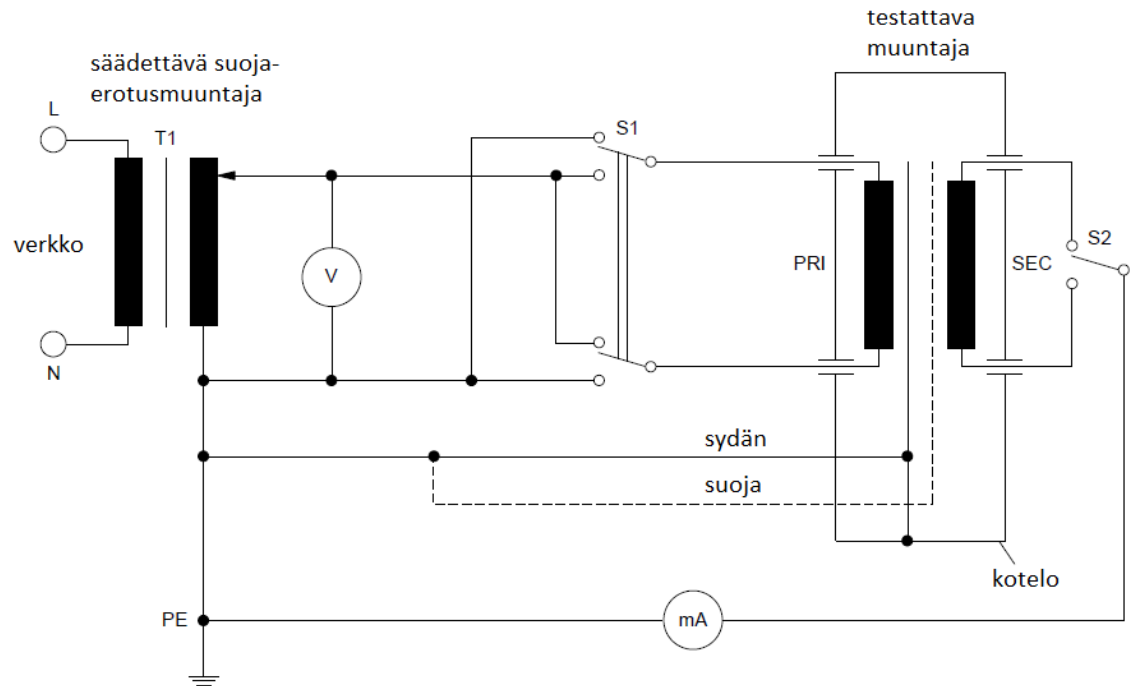
Eristelujuuden testaus

Ennalta määrättyä testijännitettä johdetaan yhden sekunnin ajan seuraavien osien välillä: tulopiirin jännitteisten osien ja kosketeltavien johtavien osien välillä; tulo- ja lähtöpiirien välillä. Muuntaja läpäisee testin, jos testin aikana ei esiinny kipinäpurkauksia tai läpilyöntiä. Testauksessa käytettävät jännitteet ovat taulukossa 2. [15, s. 134.]

Taulukko 2. Eristelujuuden testauksessa käytettävät jännitteet

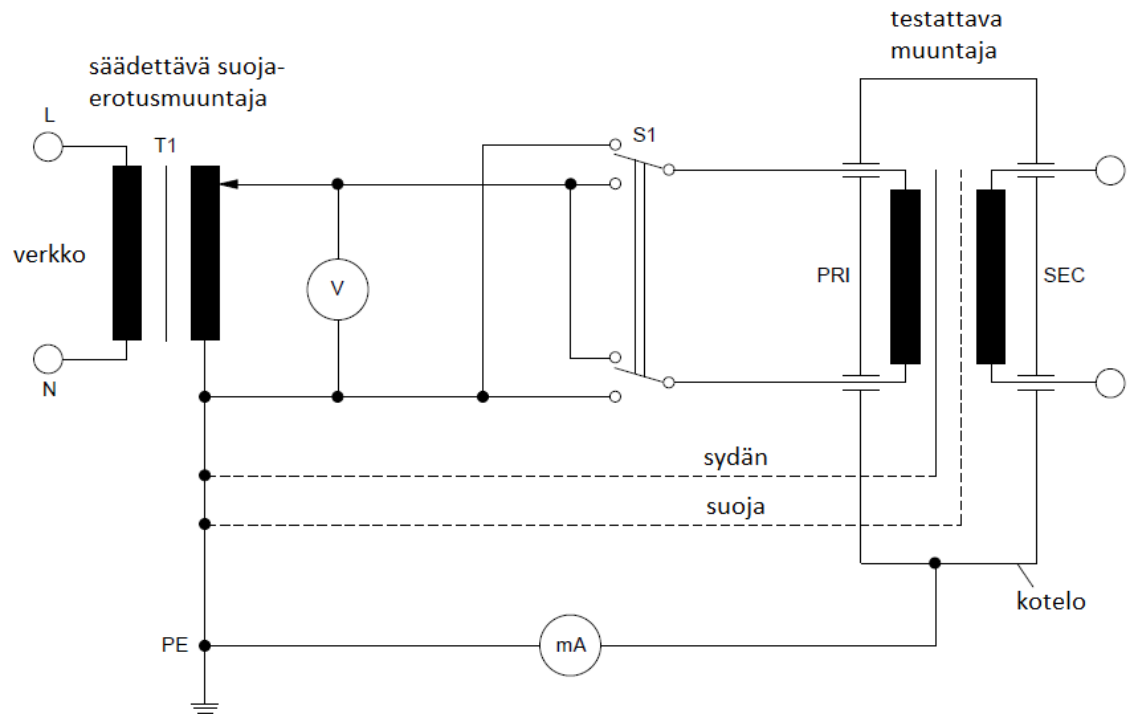
Muuntajan käyttöjännite V	Testijännite V
<50	500
150	2 800
300	4 200
600	5 000
1 000	5 500

Lääkintäsuojaerotusmuuntajista täytyy lisäksi varmistaa mittauksilla, että vuotovirta ulostulokäämistä maahan ja kotelovuotovirta eivät ylitä 0,5 mA. Mittaukset tehdään nimellisjännitteellä ja -taajuudella muuntajan ollessa tyhjäkäynnillä. Mittaukset suoritetaan kuvien 11- ja 12-mukaisilla kytkentäjärjestelyillä. [16, s. 11–12.]



Kuva 11. Kytkentäjärjestely toisiopiirin käämin vuotovirtamittaukselle maahan [16, s. 11]

- a) Testi suoritetaan kaikilla kytkimien S1- ja S2-asennoilla.
- b) Kolmivaiheisilla muuntajilla kytkintä S1 käytetään vain kiinni-asennossa. Mittaukset kytkimellä S2 toistetaan kytkemällä se vuorotellen kaikkiin vaiheisiin.
- c) Virta mitataan pieni-impedanssisella virtamittarilla. [16, s. 11.]



Kuva 12. Kytkentäjärjestely kotelon vuotovirtamittaukselle maahan [16, s. 12]

- a) Testi suoritetaan kaikilla kytkimen S1-asennoilla.
- b) Kolmivaiheisilla muuntajilla kytkintä S1 käytetään vain kiinni-asennossa.
- c) Virta mitataan pieni-impedanssisella virtamittarilla. [16, s.12.]

Suojalaitteen asennuksen tarkastus

Jos muuntajassa on suojalaite, virheellinen asennus ei saa estää sen toimintaa. Yhteensopivuus varmistetaan tarkastuksella. [15, s. 134.]

Silmämääräinen tarkastus

Silmämääräisellä tarkastuksella varmistetaan, että muuntaja on varustettu kaikilla vaadituilla ja asiaan kuuluvilla merkinnöillä. Samalla tarkastetaan, että muuntajassa on kaikki osat paikallaan ja että muuntajassa ei näy ulkoisia vaurioita tai virheitä. [15, s. 134.]

Oikosulkujännitteen tarkastus

Oikosulkujännite mitataan ensiökäämistä toisiokäämin ollessa oikosuljettuna ja toisiokäämin virran ollessa sen nimellisarvossa. Oikosulkujännite ei saa ylittää muuntajaan merkattua arvoa. Oikosulkujännite ilmaistaan yleensä prosenttimääräisenä osuutena nimellisestä käyttöjännitteestä. [15, s. 22; 16, s. 9.]

Tyhjäkäynnin syöttövirran tarkastus

Syöttövirta tarkastetaan, kun muuntaja on kytketty nimelliseen syöttöjännitteeseen nimellistaajuudella. Tyhjäkäynnin syöttövirta ei saa ylittää 3 % nimellisestä syöttövirrasta. Vaatimuksen pitää täytyä ilman, että muuntajan rakenteissa on käytetty kondensaattoreita muuntajan piireissä (tulo/lähtö) tai asennuksessa. [16, s. 9.]

Syöksyvirran tarkastus

Syöksyvirta on suurin hetkellinen muuntajan tyhjäkäynnin syöttövirran arvo, kun muuntaja kytketään nimelliseen syöttöjännitteeseen. Syöksyvirta ei saa olla yli kahdeksan kertaa suurempi kuin nimellisen syöttövirran huippuarvo. Jos syöksyvirta on yli kahdeksan kertaa tätä arvoa suurempi, saatu arvo täytyy merkitä muuntajaan. Syöksyvirran arvo saa nousta maksimissaan 12 kertaa nimellisen syöttövirran suuruiseksi. Vaatimuksen pitää täytyä ilman, että muuntajan rakenteissa tai asennuksessa on käytetty elektronisia laitteita ja lisätoimenpiteitä.

Tarkastus suoritetaan seuraavanlaisesti: muuntaja kytketään tyhjäkäynnillä nimelliseen syöttöjännitteeseen, minkä jälkeen jännite kytketään päälle ja pois 20 kertaa satunnaisin noin 20 sekunnin välein. Syöksyvirta ei saa ylittää sallittuja arvoja minkään kytkentätapahtuman aikana. [16, s. 9.]

5.1.2 Kuristimien lopputarkastukset

Muuntosähkössä valmistettujen kuristimien lopputarkastuksessa käytetään standardia IEC 61558-2-20. Kuristimista tarkastetaan induktanssiarvo kuristimen nimellisvirralla sekä eristelujuus käyttäen ulkoista jännitelähdettä. Nimellisjännitteeltään yli 1 000 V oleville kuristimille tehdään lisäksi rutiinitestinä käämilangan resistanssimittaukset standardin IEC 60076-6 mukaisesti, ellei toisin ole vaadittu.

Induktanssi saadaan määritettyä siten, että kytketään kuristin mittauspöytään ja syötetään mittauspiiriin kuristimen nimellisvirta. Tämän jälkeen mitataan jännitehäviö käämin navoissa. Kun tiedetään virran ja jännitteen arvot, saadaan laskettua kuristimen induktanssi. Kuristin läpäisee testin, jos sen induktanssi pysyy sille asetettujen sallittujen rajojen sisällä. Kuristimen induktanssi voidaan helposti määrittää käyttäen PC-avusteista mittausta, jolloin mittauspiiriin on kytketty tietokone, johon on määritelty tarvittavat kaavat ja toleranssit kutakin kuristinta varten. Tällöin mittausta tehdessä tietokone ilmoittaa välittömästi onko kuristin hyväksytty vai hylätty. Induktanssin mittauksen jälkeen kuristimelle tehdään eristelujuuden testaus ennalta määritellyllä jännitteellä, joka on matalajännitteisten kuristimien ($U_n \leq 1,1$ kV) kohdalla 3 kV.

5.2 Asiakaskohtaiset vaatimukset

Asiakaskohtaisille tuotteille tarkastuksia tehtäessä on myös huomioitava asiakkaan vaatimukset. Tarkastukset tehdään asiakkaan tai suunnittelijan määrittelemien kriittisimpien ominaisuuksien suhteen, mikäli se on mahdollista. Jos tarkastusten tekeminen kriittisimpien ominaisuuksien suhteen ei ole mahdollista suoraan olemassa olevilla laitteilla, sovitaan asiakkaan kanssa, miten tarkastukset on suoritettava tai suunnittelija päättää, mikä tarkastusmenettely on riittävä.

Muuntajien ja kuristimien suunnittelussa, valmistuksessa ja testauksessa pitää ottaa huomioon myös tuotteen käyttöympäristön erikoisvaatimukset. Tällaisia ovat esimerkiksi korkea korkeus merenpinnasta, erittäin korkea tai matala lämpötila, trooppinen ilmankosteus, seisminen aktiivisuus, kova saastuneisuus sekä epätavalliset jännitteen tai kuormavirran aallonmuodot ja epäsäännöllinen kuormitus. Nämä erikoisvaatimukset saattavat vaatia tuotteelta esimerkiksi lisäeristyksen käytön sekä tarkastuksien suhteen erikoistestien tekemisen.

5.3 Mittausten ja laitteiden turvallisuusvaatimukset

Turvallisuusvaatimukset asettavat myös omat haasteensa lopputarkastusmittauksille. Ennen mittauksia täytyy suunnitella, miten mittaukset voidaan tehdä turvallisesti ja mitä riskejä mittauksiin liittyy. Täytyy pohtia esimerkiksi, miten jännitteenousut vaikuttavat mittauksiin ja mitä vaaraa ne voivat mahdollisesti aiheuttaa. Muuntajien ja kuristimien

turvallisuuteen liittyy lisäksi erilaisia säädöksiä. Tällaisia ovat mm. EU:n pienjännitedirektiivi 2006/95/EY, EMC-direktiivi 2004/108/EY, sähköturvallisuuslaki (410/1996), sähköturvallisuusasetus (498/1996) sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteiden turvallisuudesta (1694/1993).

EU:n alueella käytettäviksi tai myytäviksi valmistettujen sähkölaitteiden tulee noudattaa pienjännitedirektiiviä 2006/95/EY. Noudattamalla pienjännitedirektiiviä sähkölaitteiden valmistaja takaa sen, että laitteet eivät oikein käytettyinä, asennettuina ja huollettuina vaaranna henkilöiden, kotieläinten tai omaisuuden turvallisuutta. Direktiivillä varmistetaan myös vaatimustenmukaisten sähkölaitteiden vapaa liikkuvuus. Direktiivi koskee sähkölaitteita, jotka on suunniteltu käytettäviksi nimellisjännitealueella 50–1 000 V AC ja 75–1 500 V DC. Direktiivi ei kuitenkaan koske tiettyjä direktiivissä lueteltuja laitteita, joita ovat mm. räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävät sähkölaitteet sekä radiologisiin ja lääketieteellisiin tarkoituksiin suunnitellut sähkölaitteet.

Direktiivissä esitetään olennaiset turvallisuustavoitteet, joiden mukaisia sähkölaitteiden on oltava päästäkseen EU:n markkinoille. Direktiivissä kuvatulla menettelyllä valmistaja tai valmistajan yhteisöön kuuluva edustaja varmistaa ja vakuuttaa, että markkinoille saatetut sähkölaitteet ovat direktiivin vaatimusten mukaisia. Menettelyyn sisältyvät teknisten asiakirjojen ja EU-vaatimustenmukaisuusvakuutuksen laadinta sekä toimenpiteet, joilla varmistetaan, että sähkölaitteet on valmistettu direktiivin vaatimusten mukaisesti.

Kolmannen osapuolen käyttö vaatimustenmukaisuuden varmistamisessa ei ole pakollista. Sähkölaitteen pienjännitedirektiivin mukaisuus voidaan osoittaa esimerkiksi testaamalla tai testauttamalla laite sille soveltuvien yhdenmukaistettujen eurooppalaisten standardien mukaisesti. Standardien käyttäminen ei kuitenkaan ole pakollista, vaan turvallisuusvaatimusten täytyminen voidaan osoittaa esimerkiksi erilaisia osoittamis- menettelyjä ja riskiarvioiteja käyttämällä.

Pienjännitedirektiivi on saatettu osaksi Suomen lainsäädäntöä seuraavien säädösten kautta: sähköturvallisuuslaki (410/1996), sähköturvallisuusasetus (498/1996) sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteiden turvallisuudesta (1694/1993).
[17.]

Päästäkseen EU:n markkinoille yrityksen tulee osoittaa valmistamiensa sähkölaitteiden turvallisuus noudattamalla pienjännitedirektiivin ohella myös EMC-direktiiviä 2004/108/EY. Direktiivi koskee kaikkia sähkölaitteita ja -laitteistoja lukuun ottamatta tiettyjä direktiivissä mainittuja laitteistoja. Tällaisia laitteita ovat direktiivin 1999/5/EY soveltamisalaan kuuluvat radio- ja telepäätelaitteet, ilmailualan tuotteet sekä radioamatöörrien käyttämät radiolaitteistot. Myös sellaiset laitteet, joiden vaikutus sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen on vähäinen, jäävät direktiivin ulkopuolelle.

Direktiivin tarkoituksena on ohjeistaa sähkölaitteiden valmistajia tekemään sähkömagneettisesti yhteensopivia tuotteita sekä taata tuotteiden vapaa liikkuvuus. Laitteiden tulee sietää tietty määrä sähkömagneettisia häiriöitä, jotta ne voivat toimia vielä tarkoituksen mukaisesti. Samalla ne eivät saa itse kehittää niin voimakasta häiriötä, että se estää radio- ja telekommunikaatiolaitteita, sähkö- ja tietoliikenneverkkoja sekä niihin liittyviä laitteita toimimasta tarkoituksen mukaisesti.

Direktiivissä määritellään vain laitteistolta vaadittavat olennaiset vaatimukset, jotka voidaan osoittaa täytetyksi noudattamalla yhdenmukaistettuja standardeja. Laitteen valmistaja huolehtii itse ominaisuuksien ja EMC-kriteereiden täyttymisestä, eikä direktiivi valvo niitä. Vaatimustenmukaisuuksien täytyminen sisältää tuotannon tarkastuksen lisäksi teknisten asiakirjojen ja EU-vaatimustenmukaisuusvakuutuksen laadinnan sekä CE-merkinnän kiinnittämisen tuotteeseen.

EMC-direktiivi 2004/108/EY on tuotu kansalliseen lainsäädäntöön sähköturvallisuuslaila (410/1996) sekä Valtioneuvoston asetuksella sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (1466/2007). [18.]

Myös testauslaitteistoille ja -välineille on määritelty turvallisuusvaatimuksia eri standardeissa. Tällaisia standardeja ovat mm. SFS-EN 50191 *Sähköisten testauslaitteistojen asennus ja käyttö* sekä sähkötyöturvallisuutta käsittelevä standardi SFS 6002.

Sähkölaitteilla, esimerkiksi mittareilla ja säätövastuksilla, täytyy olla tehokas vikasuojausmenetelmä. Tämä koskee myös testauskohteen jännitteelle alttiita johtavia osia, elleivät nämä testauskohteen osat sisälly testaukseen esim. eristysresistanssitesttiin tai vuotovirtatestiin. Standardin EN 50191 suosituksen mukaan tulisi käyttää suojaeristettyjä sähkölaitteita tai erotusmuuntajan kautta tapahtuvaa jännitteen syöttöä. [19, s. 11.]

Jos testauksia tehdään käyttämällä ulkopuolista syöttöä, on varmistettava, että

- laitteisto on erotettu kaikista normaaleista syötöistä
- laitteisto ei voi tulla uudelleen jännitteiseksi mistään muualta kuin ulkopuolisesta syötöstä
- testin aikana noudatetaan kaikkia varotoimia henkilöihin kohdistuvan sähköisen vaaran välttämiseksi
- erotuskohdissa on riittävät eristysominaisuudet, jotka kestävät samanaikaisesti testijännitteen ja erotuskohdan toisella puolella olevan käyttöjännitteen. [20, s. 600.]

Testauslaitteiston ohjaus- ja testauspiirien on oltava selvästi tunnistettavissa. Jos testauspiirit on kytketty sähköisesti tavalliseen jakeluverkkoon, ne on varustettava lisäsuojana toimivalla $I_{\Delta N} \leq 30$ mA vikavirtasuojalla. Jos vikavirta sisältää tasasähkökomponentteja, on käytettävä sopivia vikavirtasuojia. Mikäli testitehtävän takia lisäsuojausta ei pystytä toteuttamaan vikavirtasuojan avulla, pitää käyttää vikavirtavaltontajärjestelmää (RCM), jonka toimintavirta $I_{\Delta N}$ on ≤ 30 mA. Kun mitoitusvoimavirta ylitetään, poiskytkentäaika ei saa ylittää vikavirtasuojan poiskytkentäaikaa. Vikavirtavaltontalaitteen syöttöjännitteen katoamisen pitää aiheuttaa testipiirin poiskytkennän.

Testauslaitteistossa on oltava laitteet, jotka ilmoittavat toimintatilanteen (esim. merkkivaloilla) ja käyttötilanteen (varoitussuojilla). Toimintatilaa ilmoittamaan on asennettava riittävä määrä vihreitä ja punaisia varoitusvaloja. Vihreitä merkkivaloja ei tarvita korkeintaan 1 000 V jännitteellä. Punaiset varoitusvalot voidaan kuitenkin jättää pois, jos testausasennuksia pystytään valvomaan luotettavasti testejä suorittavan henkilön toimesta niin, ettei sivullisille aiheudu vaaraa. [19, s. 11.]

5.4 Eri jännitetasojen vaikutus vaadittuihin mittauksiin

Siirryttäessä pienjännitealueelta ($U \leq 1\,000$ V AC tai $1\,500$ V DC) suurjännitealueelle, lisääntyvät myös turvallisuusvaatimukset mittauksien suhteen. Kielletty alue on standardin EN 50191 mukaan jännitteisten osien ympärillä oleva tila, johon ei saisi päästä, jos jännitteisiä osia ei ole täydellisesti kosketussuojattu. Kun testausjännitteet vaihtosähköllä ovat enintään $1\,000$ V, jännitteisten osien pintoja pidetään kielletyn alueen rajoina. Jännitteiden ollessa yli 1 kV, kielletyn alueen rajojen paikka riippuu testausjännitteestä ja ne on määritettävä standardin EN 50191 taulukon A2 mukaisesti. Jos

testausjännitteet ovat yli 1 kV, kielletylle alueelle ulottumista pidetään samanarvoisena kuin jännitteisten osien koskettamista. [19, s. 9.]

Testauslaboratorioissa, joissa on yli 1 kV:n jännitteitä, on oltava käytettävissä maadoituslaitteet. Kun testausjännitteet ylittävät 1 kV on kaikki alueet ml. testausalueen ulkopuolella olevat alueet, joissa on todennäköistä tapahtua kapasitiivista purkausta, erotettava lisäsuojuksilla testauksen ajaksi. Näiden lisäsuojusten minimivaatimuksina on, että sivullisten henkilöiden pääsy testausalueille on estettävä seinämillä, verkoilla, ketjuilla, köysillä, puomeilla tai vastaavilla esteillä. Lisäksi sisäänkäynnit on varustettava standardin EN 61310-1 mukaisesti kuvan 13 *Asiattomilta pääsy kielletty* -varoituskilvellä. [19, s. 12.]



Kuva 13. Asiattomilta pääsyn kieltävä kilpi [20, s. 624]

Jos kosketussuojauksen käyttöön liittyy haittoja, esim. tehtaiden valmistuslinjojen kapaletestauspaikoilla, voidaan käyttää muita turvallisuutta varmistavia toimenpiteitä kuten kahden käden käyttöä vaativaa ohjauslaitetta tai testausjännitteen kohdistamista kahdella turvallisella testauskoettimella. Käytettävien testausjohtimien on oltava täysin kosketussuojatut. Kahden käden käyttöohjaimien on oltava EN 574: 1996 + A1:2008 lajin II- tai IIIB-mukaisia. Kun käytetään turvallisia testauskoettimia yli 1 kV:n jännitteillä, testauslaitteen suurjännitepuolen on oltava sähköisesti eristetty syöttävästä verkosta ja eristetty maasta. Sama koskee testauskoettimia ja niiden johtimia. Testauskohteen täytyy myös olla eristetty maasta, mikäli se on mahdollista. [19, s. 13; 20, s. 564.]

6 Vaadittujen mittausten tekemiseen käytettävät laitteistot

Ennen mittausten ja testien tekemistä on määritettävä testausalue, jonka on oltava erotettu työskentelyalueista ja kulkuteistä. Aitaukset täytyy rakentaa niin, että

- ne estävät muiden kuin testaushenkilöiden pääsyn testausalueelle
- ne estävät muiden kuin testaushenkilöiden ulottumisen kielletylle alueelle
- ne estävät aitausten ulkopuolella olevia henkilöitä ulottumasta aitausten sisäpuolelle sijoitettujen testauslaitteiston käyttölaitteisiin.

Testausalueen pienimmät turvaetäisyydet määritellään liitteessä 1. Aitaukset on maa-
doitettava, jos ne on valmistettu johtavista materiaaleista tai on käytettävä muita toi-
menpiteitä vikasuojaukseen. Aitaukset voivat olla kansallisten säännösten mukaisesti
seinämiä, verkkoaitoja, köysiä, ketjuja tai puomeja. Testauspaikan aitaukset ja suojuk-
set voidaan kuitenkin jättää pois, jos sivullisten turvallisuus on saavutettu muutoin tes-
tauspaikan järjestelyn ja rakenteen avulla. Testauslaitteiston ja testausalueen on oltava
selvästi ja näkyvästi merkitty varoituskilvillä. [19, s. 9–11.]

Kun mittauksia ja testauksia tehdään sähkölaitteistossa, pitää käyttää sopivia ja turval-
lisiä mittalaitteita. Mittalaitteet pitää tarkistaa ulkoisesti ennen käyttöä ja tarvittaessa
käytön jälkeen näkyvien vaurioiden tai vikojen havaitsemiseksi. Jos testauslaitteistossa
havaitaan vaaraa aiheuttavia merkkejä vaurioista tai vioista, laitteistoa ei saa käyttää.
Testauslaitteisto on varustettava käyttöohjeilla, jotka sisältävät turvalliseen toimintaan
tarvittavat tiedot. Testauslaitteisto on pidettävä käyttökunnossa määrävälein tehtävien
silmämääräisten tarkastusten ja tarvittavien sähköisten testien avulla. [19, s. 13; 20, s.
597.]

Mittausten ja testausten tekijöiden pitää olla ammattihenkilöitä tai opastettuja henkilöi-
tä. Maallikot saavat tehdä mittauksia ja testauksia vain ammattihenkilön ohjaamana ja
valvomana. [20, s. 600.]

7 Mittausten kehitysmahdollisuudet

Työn yhtenä osa-alueena on pohtia ja tutkia, miten mittauksia voitaisiin kehittää esimerkiksi nopeuttamalla mittausten suorittamista sekä yksinkertaistamalla mittaustulosten tallentamista ja arkistointia. Nykyään muuntajien mittaukset suoritetaan siten, että jokainen mitattava suure mitataan käsin käyttämällä esim. yleismittaria, minkä jälkeen jokainen saatu tulos kirjataan yksitellen Exceliin tehtyyn mittauspöytäkirjaan. Kun kaikki tarvittavat mittaukset on tehty, tulokset tallennetaan tietokoneen kovalevylle.

Mittauksia voitaisiin nopeuttaa esimerkiksi siten, että käytettäisiin monen eri mittalaitteen sijaan yhtä mittalaitetta tai systeemiä, jolla voi mitata monta eri suuretta muuttamatta välillä mittauskytkeä. Sekä käyttämällä mittalaitetta, joka lähettää mittaustulokset suoraan tietokoneeseen, jolloin ei tarvitse kirjata ylös erikseen jokaista mittaustulosta. Nykypäivänä monissa mittauslaitteissa tämä on mahdollista. Esimerkiksi muuntosähkön kuristimien induktanssin mittauksessa hyödynnetään PC-avusteista mittauslaitetta. Mittauspiiriin on liitetty tietokone, johon on määritelty tarvittavat kaavat ja toleranssit kutakin kuristinta varten. Tällöin jokaisen mittauksen jälkeen tietokone ilmoittaa välittömästi, onko kuristin hyväksytty vai hylätty. Suurempaa huomiota mittausjärjestelmien päivittämisessä kaipaakin erityisesti muuntajien mittaukset.

Muuntajien ominaisuuksien mittaamista varten tarkasteltiin monien eri mittalaittevalmistajien tarjoamia mittalaitteita, joista parhaimmiksi vaihtoehdoiksi mittalaitteiden päivitystä ajatellen osoittautuivat seuraavat laitteistot: Phenix Technologiesin valmistama TTS65 Transformer Test System, Shanghai Launch Electric Limitedin valmistama Automatic Transformer Test System, Haefely Test AG:n valmistamat 2285d Transformer Test System sekä TMS 580 Transformer Measuring System. Parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui insinööriyön tekijän mielestä Phenix Technologiesin valmistama TTS65 Transformer Test System.

Shanghai Launch Electric Limitedin valmistamalla laitteistolla voidaan suorittaa samoja mittauksia kuin Phenixin laitteilla, mutta Phenixin laitteiden ja ohjelmien muunneltavuus omien tarpeiden mukaisiksi sekä automatisoinnin mahdollisuus ovat Phenixin etuina. Haefelyn valmistamalla 2285d-laitteistolla voidaan suorittaa täysin automaattisesti muuntajan käämiresistanssien ja kierroslukusuhteen mittaukset. Sillä voidaan suorittaa myös lämpenemätesti. TMS 580 -laitteistolla pystytään suorittamaan tärkeimmistä mittauksista häviöiden (kuormitus ja tyhjäkäynti) mittaus, lämpenemätesti sekä indusoitu

jännitetesti. Parhaat ominaisuudet mittauksien ja ohjelmistojen suhteen olivat Phenix Technologiesin valmistamassa TTS65-laitteistossa.

Phenix Technologiesin valmistamalla TTS65 Transformer Test Systemillä voidaan testata muuntajia, joiden enimmäisteho on enintään 1 000 kVA. Toki yritys valmistaa vakiomallisia laitteistoja myös pienempi- sekä suurempitehoisille muuntajille. Vakiomallisella testilaitteistolla voidaan suorittaa seuraavat testit standardien ANSI C57 ja IEC 76 mukaisesti:

- herätysvirtamittaus
- herätyshäviö (tyhjäkäynti- tai sydänhäviö)
- oikosulkujännitteen mittaus
- täyskuormitusvirta
- kuparihäviö (kuormitushäviö)
- lämpenemätesti.

Lisäksi valinnaisilla lisälaitteilla voidaan vielä saavuttaa seuraavat testit:

- käämien kierroslukusuhte
- sovellettu jännitetesti (eristyskoe)
- indusoitu jännitetesti
- käämiresistanssien mittaus.

Phenix Technologies tarjoaa lisäksi laitteilleen erilaisia ohjelmistoja mm. kauko-ohjaukseen, mittaustietojen keruuseen sekä automaatiokykenevyyteen. Yritykseltä on myös mahdollista hankkia sopivia laitteistoja tilaustyönä vakiomallisten laitteistojen lisäksi. Yrityksellä on käytössä ISO 9001 -laatujärjestelmä, joka takaa tuotteiden laadukkaat suunnittelu- ja tuotantoprosessit. Yritys antaa tuotteilleen myös pitkän takuun.

Phenixin laitteistolla voidaan ohjelmoida halutut testit ja testaussarjat hyödyntämällä ohjelmoitavaa logiikkaa (PLC) laitteiston ohjausjärjestelmässä. Tämä on paljon taloudellisempaa kuin koestuslaitteiden uudelleen kytkeminen. Phenix Technologies on suunnitellut valmiin tiedonkeruujärjestelmän, joka tallentaa kaikki mittaustulokset ja suorittaa tarvittavat korjauslaskelmat standardien ANSI C57 ja IEC 76 mukaisesti. Näin

säästyä aikaa, kun ei ole tarpeen käsin kirjata muistiin mittaustuloksia eikä tehdä tarvittavia laskelmia. Järjestelmä käyttää Windows-pohjaista testausohjelmistoa, joka luo muuntajan mittaustuloksista tietokannan sekä tarkat lopputestausraportit.

Phenix Technologiesilta on myös mahdollista tilata täysin automatisoituja muuntajan testausjärjestelmiä, jotka ovat asiakkaan omien tarpeiden mukaan suunniteltuja. Valmistajan ilmoituksen mukaan automatisoidun testausjärjestelmän avulla yhden muuntajan kokonaistestausaika voidaan pienentää niinkin alhaiseksi kuin 90 sekuntia tai vähemmän riippuen siitä, mitä testejä ja testausarjoja suoritetaan. [21.]

8 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittauksia. Lisäksi pohdittiin mittausten kehitysmahdollisuuksia, esimerkiksi kuinka mittauksia voitaisiin nopeuttaa ja mittaustulosten tallentamista yksinkertaistaa. Työssä selvitettiin myös eri mittalaitteiden tarjoamia laitteistoja muuntajien ominaisuuksien mittausta varten, ja esiteltiin yhden valmistajan mittalaitteistoja, jolla mittaukset voidaan suorittaa entistä tehokkaammin.

Työssä selvitettiin, mitä eri standardit vaativat muuntajien ja kuristimien lopputarkastusmittauksilta esimerkiksi, mitä asioita täytyy mitata ja millä tavalla. Lisäksi työssä käytiin läpi, millaisia turvallisuusvaatimuksia standardit asettavat esimerkiksi mittalaitteistolle, sekä millaisia säädöksiä muuntajien ja kuristimien turvallisuuteen liittyy yleisesti.

Työssä keskityttiin Muuntosähkö Oy:n Helsingin tehtaalla valmistettuihin tyyppisimpiin muuntajiin, joita ovat matalajännitteiset tehomuuntajat sekä lääkintäsuojaerotusmuuntajat, sekä kuristimiin, joita ovat sarja- ja estokelakuristimet. Työn painopiste oli muuntajien lopputarkastusmittausten tutkimisessa ja kehittämisessä. Mittausten osalta tarkasteltiin ainoastaan standardien vaatimia rutiinimittauksia ja -testejä, ei tyyppi- ja erikoistestejä.

Työssä esitellyt mittalaitteistot antavat kuvan siitä, millaisilla laitteistoilla on mahdollista suorittaa standardien vaatimat mittaukset nykyistä tehokkaammin. Uusia mittalaitteistoja hankittaessa täytyy tarkasti laskea mittauksiin kuluva aika nykyisillä laitteilla, ja verrata tulosta uusilla laitteistoilla säästyvään aikaan sekä laitteiston takaisinmaksuaikaan.

Lähteet

- 1 Intertrafo Oy. Muuntaja ja kuristin: perustietoa. Verkkodokumentti. <<http://www.intertrafo.fi/muuntaja.html>>. Luettu 15.10.2013.
- 2 Korpinen, Leena. Muuntajat ja sähkölaitteet. Verkkodokumentti. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf>. Luettu 15.10.2013.
- 3 Trafomic Oy. Muuntaja. Verkkodokumentti. < <http://www.trafomic.fi/muuntaja>>. Luettu 16.10.2013.
- 4 Fingrid Oyj. Verkkohankkeet. Kantaverkon ABC. Teho- ja mittamuuntajat. Verkkodokumentti. <<http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCteho-ja-mittamuuntajat.aspx>>. Luettu 16.10.2013.
- 5 Wikipedia. Muuntaja. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Muuntaja>>. Luettu 16.10.2013.
- 6 Muuntosähkö Oy Trafox. Verkkodokumentti. <<http://www.trafox.fi/index.php?id=33>>. Luettu 17.10.2013.
- 7 Trafomic Oy. Kuristimet. Verkkodokumentti. < <http://www.trafomic.fi/kuristimet-tyyppi-ke-007-18ws>>. Luettu 17.10.2013.
- 8 Mattila, Simo. 2009. Kolmitasaisen nostavan hakkuriteholähteen kuristimen suunnittelu ja optimointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti. <http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dtyot/Mattila_Simo_julk.pdf>. Luettu 18.10.2013.
- 9 Bureau Veritas Finland. Verkkodokumentti. <http://www.bureauveritas.fi/wps/wcm/connect/bv_fi/local/services+sheet/iso_9001_sertifiointi>. Luettu 22.10.2013.
- 10 Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Toimialat. Kuluttajaturvallisuus. CE-merkintä. Verkkodokumentti. <<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kuluttajaturvallisuus/CE-merkki/>>. Luettu 24.10.2013.
- 11 CEI/IEC 60076-11:2004. Power transformers - Part 11: Dry-type transformers. International Electrotechnical Commission. Sveitsi. 2004.

- 12 CEI/IEC 60076-1:1993+A1:1999. Power transformers - Part 1: General. International Electrotechnical Commission. Sveitsi. 2000.
- 13 CEI/IEC 60076-3:2000. Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air. International Electrotechnical Commission. Sveitsi. 2000.
- 14 Best transformers. Testing. Test Processes Details. Verkkodokumentti. <<http://www.besttransformer.com/BEST-transformer-test-procedures-en.pdf>>. Luettu 7.11.2013.
- 15 IEC 61558-1:2005+A1:2009. Safety of power transformers, power supplies, reactors and similar products – Part 1: General requirements and tests. International Electrotechnical Commission. Sveitsi. 2009.
- 16 IEC 61558-2-15:2011. Safety of transformers, reactors, power supply units and combinations thereof – Part 2-15: Particular requirements and tests for isolating transformers for the supply of medical locations. International Electrotechnical Commission. Sveitsi. 2011.
- 17 Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Toimialat. Sähkö ja hissit. Sähkölaitteet. Sähkölaitteiden vaatimukset. LVD-sähköturvallisuus. Verkkodokumentti. <<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/LVD-sahkoturvallisuus/>>. Luettu 2.12.2013.
- 18 Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Toimialat. Sähkö ja hissit. Sähkölaitteet. Sähkölaitteiden vaatimukset. EMC - Sähkömagneettinen yhteensopivuus. Verkkodokumentti. <<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>>. Luettu 4.12.2013.
- 19 SFS-EN 50191. Sähköisten testauslaitteistojen asennus ja käyttö. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. 2011.
- 20 SFS-Käsikirja 600. Pienjännitesähköasennukset ja sähkötyöturvallisuus. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. 2007.
- 21 Phenix Technologies, Inc. Transformer Test Systems. Verkkodokumentti. <<http://www.phenixtech.com/transformertestsystems.php>>. Luettu 27.12.2013.

Testausalueen pienimmät turvaetäisyydet

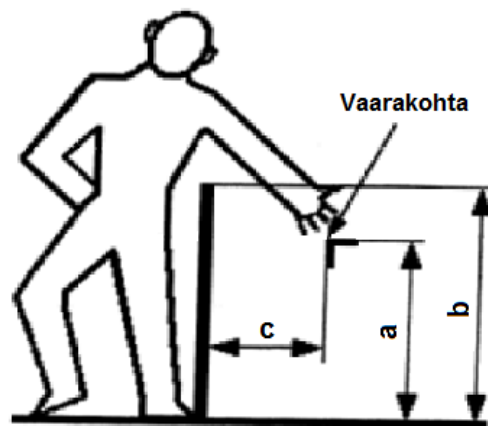
Pienin etäisyys testausalueen sulkevien aitausten ja kielletyn alueen rajojen tai käyttölaitteiden välillä määritellään taulukossa 1 ja kuvassa 1 (ks. seur. s.).

Taulukko 1. Vaakasuora etäisyys suojuksen ja kielletyn alueen välillä suhteessa suojuksen korkeuteen ja vaarakohteen etäisyys lattiasta [19]

Vaarakohdan etäisyys lattiasta	Suojuksen (suojuksen) yläreunan etäisyys b							
	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400
mm	Vaakasuora etäisyys c suojuksen (suojuksen) ja vaarakohdan välillä							
mm	mm							
2 400	100	100	100	100	100	100	100	100
2 200	600	600	500	500	400	350	250	
2 000	1 100	900	700	600	500	350		
1 800	1 100	1 000	900	900	600			
1 600	1 300	1 000	900	900	500			
1 400	1 300	1 000	900	800	100			
1 200	1 400	1 000	900	500				
1 000	1 400	1 000	900	300				
800	1 300	900	600					
600	1 200	500						
400	1 200	300						
200	1 100	200						

Alle 1 000 mm arvoja yläreunan etäisyydelle b ei määritellä, koska ne eivät lyhennä käden ulottuvuutta ja koska lisäksi voisi esiintyä vaara putoamisesta testausalueelle.

Suojukset esim. köydet, ketjut tai puomit pitää kiinnittää 1 000 mm ja 1 400 mm väliselle korkeudelle lattiasta. Minimikorkeus lattiasta (riippuma) ei saa pudota alle 800 mm.



Merkinnät

- a Vaarakohdan korkeus lattiasta (vaarakohta on se kohta kielletyn alueen rajalla, johon on lyhin etäisyys suojuksen reunasta)
- b Suojauksen reunan korkeus
- c Vaakasuora etäisyys suojauksen reunan ja vaarakohdan välillä

Kuva 1. Taulukossa 1 annettujen mittojen selvennys [19]

Jos testausalueen rajaamiseen käytetään verkkoaitauksia, on aitausten ja kielletyn alueen vähimmäisetäisyyden oltava taulukon 2 mukainen jokaisessa aukkopaikassa, josta on mahdollista ulottua aitauksen sisäpuolelle.

Taulukko 2. Pienin etäisyys suojuksessa olevan aukon ja kielletyn alueen välillä suhteessa aukon suuruuteen [19]

Aukon suuruus (halkaisija tai sivun pituus) mm	Pienin etäisyys kielletystä alueesta mm		
	rako	neliö	pyöreä
yli 4 - 6	10	5	5
yli 6 - 8	20	15	5
yli 8 - 10	80	25	20
yli 10 - 12	100	80	80
yli 12 - 20	120	120	120
yli 20 - 30	850	120	120
yli 30 - 40	850	200	120
yli 40 - 120	850	850	850

