

# Virtamuuntajien testaus Omicron CT Analyzer -testilaitteella

Mathias Sjö Dahl

OPINNÄYTETYÖ  
Syyskuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

SJÖDAHL, MATHIAS:  
Virtamuuntajien testaus Omicron CT Analyzer -testilaitteella

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Syyskuu 2023

---

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Omicron CT Analyzer -testilaitteen käyttöä sähköasema- ja pääsähkönjakeluprojektien virtamuuntajien käyttöönottokoestuksissa työmaa- ja kojeistotehdasoloissa. Opinnäytetyö tehtiin VEO Oy:lle.

Virtamuuntajien koestus on osa VEO Oy:n tyypillistä projektitoimitusta, johon on olemassa yrityksen sisäiset, valmiit koestusohjeet. Osassa projekteja suoritettava magnetointikäyrän mittaus, ja käännejännitteen määrittäminen, on yrityksessä sisällä koettu aikaa vievänä työvaiheena vanhoja menetelmiä käyttäen. CT Analyzer -testilaitteen ominaisuuksien odotettiin nopeuttavan tätä työvaihetta.

Työssä koottiin teoriapohja virtamuuntajan testausta varten tutustumalla Suomessa ja Pohjoismaissa yleisesti noudatettavan IEC 61869-2 -standardin mukaisiin virtamuuntajan nimellisarvoihin ja virtamuuntajan valintaan osana järjestelmän suunnittelua. Käytännön työ tehtiin tutustumalla testilaitteen käyttöohjeisiin, laitteen CT Analyzer Suite -ohjelmistoon, ja koekäyttämällä testilaitetta sähköasematyömaalla osana projektitoimitusta. Käyttökokemusten perusteella laadittiin testilaitteen käyttöä helpottava tiivistetty koestusohje yrityksen sisäiseen käyttöön. Koestusohje on poistettu julkaistavan opinnäytetyön liitteistä.

Testilaitteen todettiin soveltuvan virtamuuntajien työmaalla tehtäviin käyttöönottokoestuksiin tietyin varauksin. Laitte selvittää virtamuuntajan ominaisuudet nopeasti, ja laitteen luomat raportit ovat selkeät ja informatiiviset. Laitteella ei nykyisellään voida mitata virran suuntaa, eli polariteettia muista kohdista toisiopiiriä kuin virtamuuntajan välittömästä läheisyydestä. Kytkeytyneiden mittauskojeiden skaalausten tarkistamista ensiökokeen avulla haittaa laitteen rajoitettu kyky syöttää virtaa.

Polariteettimittausta varten CT Analyzer -testilaitteeseen on saatavilla lisälaitte, jolla mittaukset voidaan suorittaa. Jos tämän lisäksi mittauskojeiden skaalaukset tarkistetaan syöttämällä virtaa pelkästään toisiopiiriin, virtamuuntajasta käsin, voidaan testaukset suorittaa kokonaan CT Analyzer -testilaitteella. Muussa tapauksessa apuna on jatkossakin käytettävä osittain myös vanhoja koestusmenetelmiä.

---

Asiasanat: sähköasema, testaus, virtamuuntaja

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering

SJÖDAHL, MATHIAS:

Current Transformer Testing with the Omicron CT Analyzer  
Bachelor's thesis 49 pages, appendices 5 pages  
September 2023

---

Measuring, and calculating the characteristics of a current transformer, related to the excitation curve has been considered a time-consuming part of the in-use acceptance testing routine at VEO Oy, the commissioner of this thesis. To save time during the acceptance testing phase, a CT Analyzer test device has been acquired.

The purpose of the thesis was to create an internal user guide to help the device user. This guide is not a part of the published version of this thesis.

Current transformer theory, the selection and the requirements of the standard IEC 61869-2 were studied along with the concerned device manuals. The on-hand test-use of the device was done at an ongoing substation site.

The test device was found to be suitable for acceptance testing needs with a few exceptions. Testing is fast, the test results and the reports created by the device are detailed and informative. The device, however, lacks some capabilities in current polarity measuring, and scaling checking by the primary injection method.

For polarity measuring, a separate accessory can be acquired. If checking measuring device scaling with secondary current injection is regarded sufficient, the current transformer acceptance tests can be carried out using only the CT Analyzer. Otherwise, the in-use testing methods will need to be used complementary.

---

Key words: substation, testing, current transformer

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Yrityksen esittely .....	6
2	MITTAMUUNTAJA .....	8
2.1	Mittamuuntajan tehtävä .....	8
2.2	Muuntajan toimintaperiaate .....	8
2.3	Muuntajan sijaiskytkentä .....	10
2.4	Muuntajan sydänmateriaalin kyllästymisen .....	11
3	VIRTAMUUNTAJA.....	13
3.1	Virtamuuntajan tehtävä .....	13
3.2	Rakenne .....	14
3.3	Liitinmerkinnät.....	17
3.4	Toisiopiirin maadoitus .....	18
3.5	Virhetermistö .....	19
3.6	Nimellisarvot .....	20
3.6.1	Mittausvirtamuuntajan nimellisarvot .....	21
3.6.2	Suojausvirtamuuntajan nimellisarvot.....	23
3.7	Virtamuuntajan valinta.....	24
3.7.1	Taakan laskeminen .....	24
3.7.2	Tarkkuusraja- ja mittarivarmuuskertoimen laskeminen .....	25
4	VIRTAMUUNTAJAN KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUS.....	27
4.1	Tarkastuksen tarkoitus .....	27
4.2	Tarkastusmenetelmät.....	27
5	MITTAUKSET CT-ANALYZER TESTILAITTEELLA.....	32
5.1	Laitteen ominaisuudet .....	32
5.2	Käyttöliittymä.....	33
5.3	Mittausten valmistelu ja suorittaminen .....	34
5.4	Raporttien luominen .....	37
6	TESTAUS TYÖMAALLA.....	38
7	POHDINTA.....	41
	LÄHTEET .....	43
	LIITTEET .....	45
	Liite 1. CT-Analyzer testiraportti.....	45
	Liite 2. Käyttöohje .....	49

**LYHENTEET JA TERMIT**

ALF	accuracy limiting factor
CT	current transformer, virtamuuntaja
DC	direct current, tasavirta
$E$	sähkökentän voimakkuus, V/m
$f$	taajuus, Hz
FS	instrument safety factor
$H$	magneettikentän voimakkuus, A/m
$l$	pituus, m
N	käämin johdinkierroslukumäärä
SF <sub>6</sub>	rikkiheksafluoridi
$t$	aika, s
$\varphi$	vaihe-ero, vaihesiirtymä
$\Phi$	magneettivuo, Vs
$\rho$	ominaisvastus, $\Omega/\text{mm}^2 / \text{m}$

# 1 JOHDANTO

Virtamuuntaja on tärkeä osa sähköjakelujärjestelmää, joka tuottaa mittaustietoa energiamittareille, käyttöhenkilöstön tarpeisiin, sekä suojuareille, mahdollistaen suojausjärjestelmän toiminnan sähköverkon vikatilanteissa. Tämä virtamuuntajia, ja niiden testausta käsittelevä opinnäytetyö on tehty VEO Oy:n toimeksi antamana kesällä 2023. Työn tarkoituksena oli tutkia yrityksen käyttöönsä hankkiman testilaitteen, Omicron CT Analyzerin toimintaa.

Yrityksessä on testattu virtamuuntajia osana projektitoimituksia, aina yrityksen perustamisesta asti, ja testaukset tehdään nykyisillään pääasiassa Meggerin valmistamalla Sverker tuoteperheen testilaitteilla. CT Analyzer on hankittu nopeuttamaan virtamuuntajien käyttöönottokestuksia yrityksen projekteissa työmaaloissa sekä omalla kojeistotehtaalla.

Opinnäytetyön tarkoitus on tarkastella sähköasemilla ja pääsähköjakelussa käytettävien virtamuuntajien teoriaa sekä niiden valintaa osana suunnitteluprosessia, ja verrata CT Analyzerin testimenetelmiä käytössä oleviin menetelmiin. Tavoitteena oli hankitun tiedon pohjalta luoda testilaitteen käyttöä helpottavat käyttöohjeet yrityksen sisäiseen käyttöön.

Aihealue rajattiin koskemaan niin testauksen, kuin testilaitteen esiteltävien ominaisuuksien osalta VEO:n tarpeita. Virtamuuntajiin sovellettavia standardeja on tässä työssä käsitelty IEC 61869-2 -standardin lisäksi useita muitakin, ja testilaitteessa on paljon ominaisuuksia, joita ei tässä opinnäytetyössä käsitelty.

## 1.1 Yrityksen esittely

VEO Oy on Vaasassa vuonna 1989 perustettu energia-alan yritys, joka toimittaa sähköjakelu-, automaatio-, käyttö ja laiteratkaisuja projektitoimituksina asiakkailleen maailmanlaajuisesti, päämarkkina-alueenaan Pohjoismaat. Yritys on osa Vaasan energiaklusteria, joka kehittyi Vaasaan sotien jälkeen sähkötoimintonsa keskittäneen Strömbergin ympärille.

VEO Oy työllistää noin 500 henkilöä, josta valtaosa työskentelee yrityksen pääkonttorilla ja sen yhteydessä toimivassa, pohjoismaiden suurimmassa kojeisto-  
tehtaassa Vaasan Runsorissa. Tehtaalla valmistetaan pien- ja keskijännitekojeis-  
toja, taajuusmuuttajakeskuksia sekä ohjaustauluja projektien tarpeisiin sekä erik-  
seen tuotemyyntinä toimitettaviksi. Toimipisteitä Vaasan lisäksi Seinäjoella, Ro-  
vaniemellä sekä Paimiossa. Ulkomailla kiinteitä toimipisteitä on Ruotsin Väste-  
räsissa ja Norjassa Oslon alueella, sekä tytäryhtiö IC Electricalin kautta Iso-Bri-  
tanniassa. (VEO n.d)

## 2 MITTAMUUNTAJA

### 2.1 Mittamuuntajan tehtävä

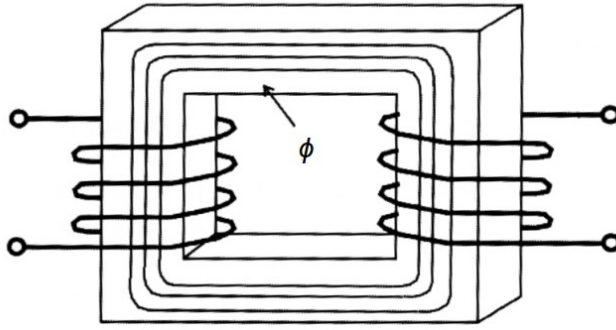
Mittamuuntaja on erikoisrakenteinen muuntaja, jonka tarkoitus on muuntaa mitattava ensiösuure, virta tai jännite, standardoidulle ja turvalliselle virta- tai jännite- tasolle, suojella kytkettyjä mittauskojeita ylikuormitukselta, erottaa mitattava ensiöpiiri mittauspiiristä galvaanisesti ja mahdollistaa mittauksen sijoitus etäälle mitauspaikasta. Mittamuuntajan on kyettävä toistamaan ensiöpiirin virrat ja jännitteet mahdollisimman vähin amplitudi- ja kulmavirhein, jotta mittaussignaalia voidaan käyttää laskutusperusteena. (Elovaara & Haarla 2011, 198.)

Suojauskäytössä mittamuuntajan tehtävä on välittää suojalaitteille mahdollisimman tarkka ensiöpiirin virtaa ja jännitettä kuvaava signaali tavanomaisen kuormitustilanteen lisäksi myös erilaisissa vikatilanteissa, kuten suurilla vikavirroilla ja erilaisissa transienttitilanteissa. Suojausmittamuuntajan tuottama signaali toimii perusteena esimerkiksi katkaisijoiden laukaisemiseksi, jolloin niillä on keskeinen rooli sähköjärjestelmän käyttövarmuuden ja turvallisen käytön kannalta. (Elovaara & Haarla 2011, 198.)

### 2.2 Muuntajan toimintaperiaate

Muuntaja siirtää sähköenergiaa magneetti- ja sähkökenttien avulla galvaanisesti erillään olevien järjestelmien välillä. Toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1, jossa yhteisen rautasydämen ympärille on kiedottu kaksi käämitystä. Rautasydämen muoto ja käämitystapa riippuu muuntajan käyttösovelluksesta. Muuntajan käämityksessä kulkeva virta kehittää käämilangan ympärille kentän, jonka kentänvoimakkuus synnyttää magneettivuon  $\phi$ , jota ohjataan sydänmateriaalin avulla. (Hietalahti 2011, 5)





KUVA 1. Muuntajan yksinkertaistettu esitys (Hietalahti 2011, muokattu)

Magneettivuon kentänvoimakkuus  $H$  on Ampèren lain mukaisesti verrannollinen käämityksen johdinkierroslukuun  $N$ , vuon kulkureitin pituuteen  $l$ , ja käämityksessä kulkevaan virtaan  $I$  kaavan (1) mukaisesti

$$\oint_s H \cdot ds = N \cdot I \Rightarrow H \cdot l = N \cdot I. \quad (1)$$

Edellä mainittu pitää paikkansa, jos väliaineen ominaisuudet jätetään huomiotta. Todellisuudessa vuon voimakkuus riippuu myös väliaineen permeabiliteetista. Kentänvoimakkuuden synnyttämää vuota  $\phi$  ohjataan muuntajassa kulkemaan toisen käämityksen läpi sydänmateriaalin avulla. Sydänmateriaalin pinta-ala  $A$  ja väliaineen permeabiliteetti  $\mu$  vaikuttavat kentänvoimakkuuden lisäksi vuon voimakkuuteen kaavan (2) mukaisesti,

$$\phi = \mu_0 \cdot \mu \cdot H \cdot A, \quad (2)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti ja  $H$  kentänvoimakkuus. Muuntajissa sydänmateriaalina käytetään yleisesti rautaa, jonka permeabiliteetti on tuhansia kertoja ilman permeabiliteettia korkeampi. Muuttuvan magneettivuon  $\phi$  lävistäessä toisen sydänmateriaalin ympärille kiedotun käämityksen, siihen indusoituu Faradayn induktiolain (3) mukaan jännite  $E$ , jonka suunta on sitä indusoivaan magneettivuohon nähden vastakkaisuuntainen ja riippuvainen käämin johdinkierroslukumäärästä  $N$

$$E = -N \frac{d\phi}{dt}. \quad (3)$$

(Hietalahti 2011, 6)

### 2.3 Muuntajan sijaiskytkentä

CT Analyzerin toiminta perustuu muuntajan sijaiskytkennän muodostamiseen, jolloin sijaiskytkennän eri komponentit on hyvä tuntea toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi. Muuntajan sijaiskytkentää muodostettaessa käämien kierroslukumäärien vaikutus poistetaan ensin ns. redusoinnilla, jolloin muuntaja voidaan mallintaa yhdessä jännitetasossa. Redusoidut suureet lasketaan ensiön ( $N_1$ ), ja toisiokäämin ( $N_2$ ) johdinkierroslukumäärien suhdeluvun, eli muuntosuhteen  $k_r$  avulla kaavan (4) mukaisesti.

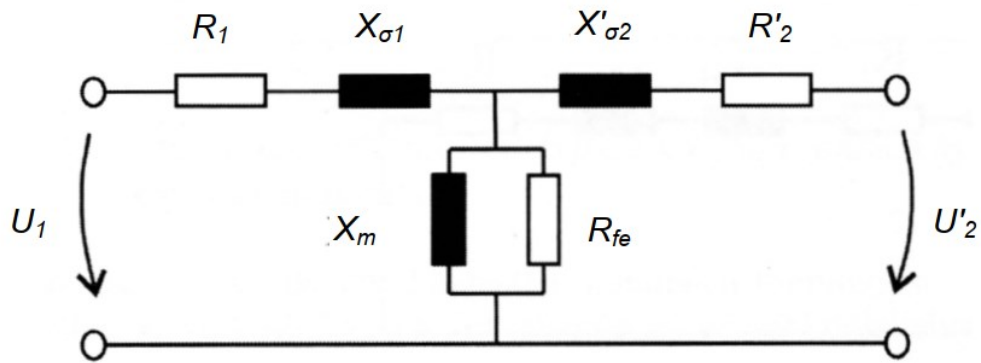
$$k_r = \frac{N_1}{N_2}. \quad (4)$$

Redusointikaavat ovat erilaiset virran, jännitteen ja impedanssin redusointiin. Esimerkiksi toisiovirta redusoidaan toisio jännitetasosta ensiön jännitetasoon jakamalla toisiovirta  $I_2$  muuntosuhteella kaavalla (5)

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_r}, \quad (5)$$

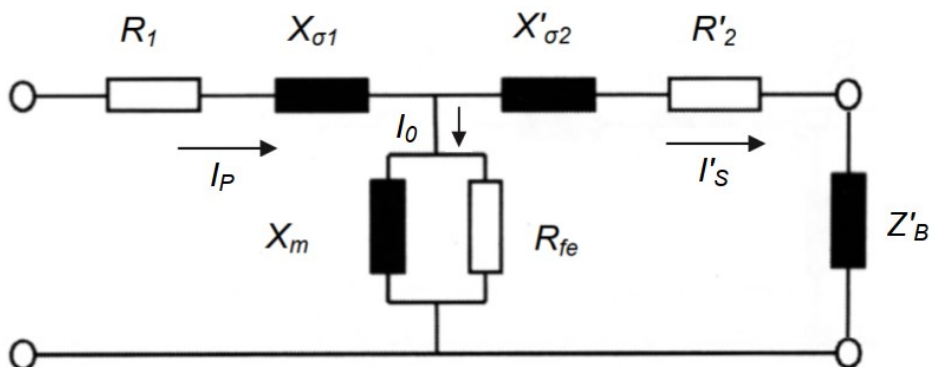
jossa  $I'_2$  on redusoitu toisiovirta. Redusoidut suureet merkitään tyypillisesti heitomerkillä. (Hietalahti 2011, 14)

Muuntajan ensiön jännitetasossa esitetyn sijaiskytkennän (Kuva 2) komponentit pitkittäishaarassa ovat käämilangan resistanssit  $R_1$  ja  $R'_2$ , sekä muun kuin sydänmateriaalin kautta sulkeutuvien vuon osien vaikutusta kuvaavat hajareaktanssit  $X_{\sigma 1}$  ja  $X'_{\sigma 2}$ . Sijaiskytkennän poikittaishaaran komponentit ovat rinnakkain kytkeytyvä magnetointireaktanssi  $X_m$ , sekä sydänmateriaalin rautahäviöitä mallintava vastuskomponentti  $R_{fe}$ . (Hietalahti 2011, 16–17)



KUVA 2. Muuntajan sijaiskytkentä ensiön jännitetasossa (Hietalahti 2011, 17, muokattu)

Kuvan sijaiskytkentä pätee yleisesti muuntajille, ja siinä on esitetty käämien yli vaikuttavat jännitteet  $U_1$  ja  $U'_2$ . Tässä työssä käsiteltävään virtamuuntajaan sovellettu sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 3, johon on lisätty ensiövirta  $I_P$ , redusoitu toisiovirta  $I'_s$ , ja toisiopuolelle kytketyn kuorman redusoitu impedanssi  $Z'_B$ .



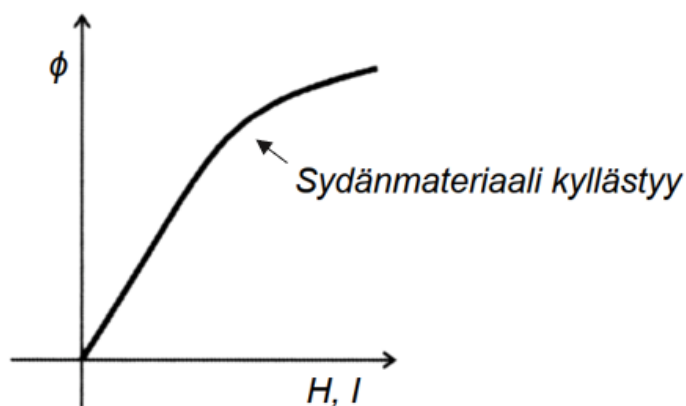
KUVA 3. Virtamuuntajan sijaiskytkentä (Hietalahti 2011, 17, muokattu)

## 2.4 Muuntajan sydänmateriaalin kyllästyminen

Muuntajan sydänmateriaalissa syntyvä magneettivuo on virran integraali, ja muuntajan käämitykseen indusoituva jännite on magneettivuon derivaatta. Magneettipiiri vaatii toimiakseen jatkuvasti muuttuvan virran, ja myös muuttuvan vuon, eli kyllästymättömän sydänmateriaalin (Lehesvuo 2019, 40)

Muuntajan sydänmateriaalina yleisesti käytettävän raudan permeabiliteetti muuttuu kentänvoimakkuuden ja vuon tiheyden kasvaessa. Sydänmateriaalin alkeishiukkaset järjestyvät materiaalissa voimakkuuden kasvaessa, kunnes tietyssä pisteessä kaikki alkeishiukkaset ovat järjestyksessä eikä kentänvoimakkuuden ja virran kasvattaminen enää merkittävästi lisää vuota materiaalissa, ja muuntajasydämen sanotaan olevan kyllästynyt. (Hietalahti 2011, 7)

Kyllästymisilmiö voidaan esittää kyllästymiskäyrän avulla (Kuvio 1). Kuviosta nähdään, että kentänvoimakkuuden ja magneettivuon suhde on likimain lineaarinen, kunnes sydänmateriaali kyllästyy, eikä kentänvoimakkuuden kasvattaminen tämän pisteen jälkeen enää kasvata magneettivuota samassa suhteessa. (Hietalahti 2011, 7)



KUVIO 1. Sydänmateriaalin kyllästymiskäyrä (Hietalahti 2011, 7, muokattu)

### 3 VIRTAMUUNTAJA

#### 3.1 Virtamuuntajan tehtävä

Virtamuuntaja on erikoisrakenteinen virran mittaukseen suunniteltu ja valmistettu mittamuuntaja, jonka tehtävä on galvaanisesti erottaa pää- ja mittaussiiri toisistaan, muuttaa mitta-alaa ja mahdollistaa standardoitujen mitta- ja suojalaitteiden käytön, suojella mittareita ylikuormituksilta ja tehdä mahdolliseksi mittausskojeiden sijoitus etäälle päävirtapiiristä. (Elovaara & Haarla 2011, 198.)

Virtamuuntajat jaetaan standardissa IEC-61689-2 käyttötarkoituksensa perusteella mitta- ja suojaustarkoituksiin valmistettuihin virtamuuntajiin. Karkeasti näiden kahden eri tyypin virtamuuntajan ominaisuudet eroavat toisistaan normaalia käytönaikaista ns. nimellisvirtaa korkeammilla virroilla, jolloin mittaustarkoitukseen valmistetun virtamuuntajan kuuluu suojella kytkettyjä mittalaitteita ylivirralla. Suojaustarkoitukseen valmistetun virtamuuntajan taas täytyy toistaa myös nämä korkeat virrat luotettavasti, jotta suojausjärjestelmällä on edellytykset toimia. (Elovaara & Haarla 2011, 198–199.)

Virtamuuntajan ensiövirta on tyypillisesti toisiiovirtaa suurempi. Virtamuuntajan valmistuksen kannalta tämä tarkoittaa, että toisiokäämityksen kierroslukumäärä on ensiökäämitystä suurempi. Virtamuuntajan käämityksen johdinkierroslukumäärän, virtojen ja jännitteiden välinen yhteys voidaan esittää kaavalla (6)

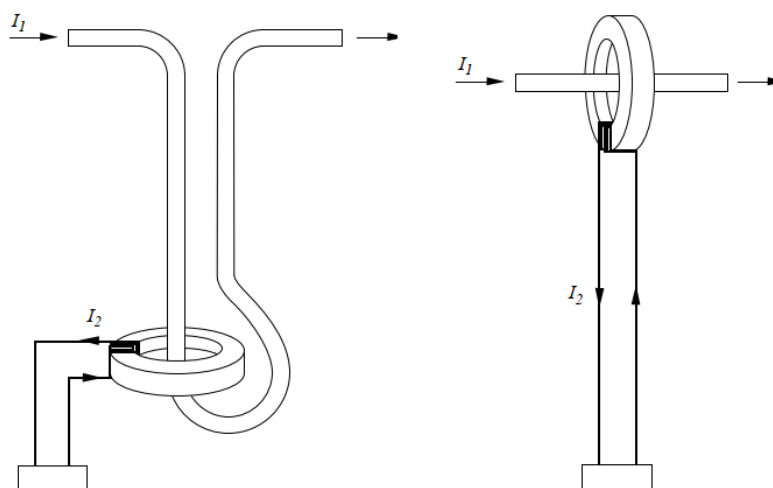
$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{U_P}{U_S}. \quad (6)$$

johdinkierroslukumäärien  $N$ , virtojen  $I$  ja käämien yli vaikuttavien jännitteiden  $U$  alaindeksi P on ensiö-, ja S toisiopuolen suure.

### 3.2 Rakenne

Virtamuuntajan rakenne määräytyy käyttöympäristön ja järjestelmän jännitetason mukaan. Yhteistä rakennetyypeille on, ettei virtamuuntajan ensiökäämitystä tyyppillisesti kiedota sydämen ympärille, vaan ensiövirta johdetaan sydänrenkaan läpi kerran, tai vaihtokytkenällisen muuntajan tapauksessa kahdesti. Virtamuuntajan ensiökäämi onkin käytännössä sydänrenkaan läpi johdettu eristemateriaaliin upotettu virtakisko. Samassa virtamuuntajassa voi olla useita sydämiä eri tarkoituksiin. Muuntajasydämet eivät häiritse toisiaan ja ne ovat virtamuuntajassa fyysisesti peräkkäin ensiövirtatien ympärillä. (Elovaara & Haarla 2011, 211.)

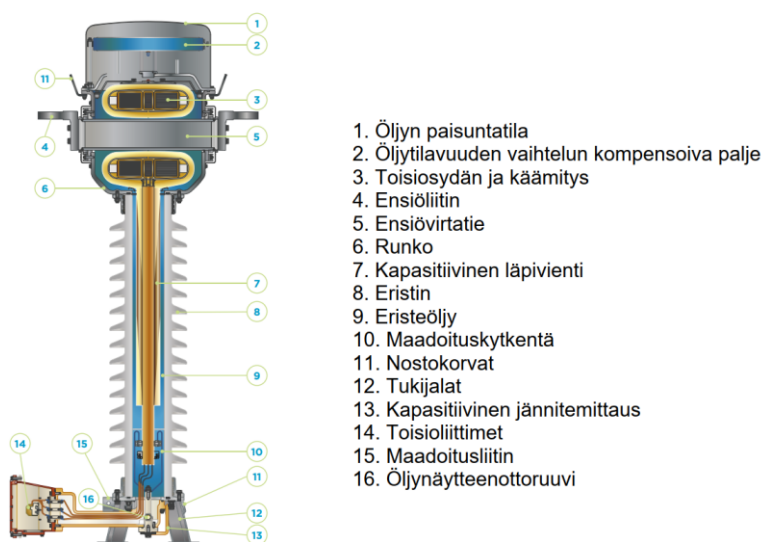
Ulos asennettavat virtamuuntajat ovat tavallisesti öljy- tai joissakin tapauksissa SF<sub>6</sub>-eristeisiä, hermeettisesti suljettuja yksivaiheisia muuntajia, joiden eristysaineena toimiva öljy ei pääse kosketuksiin ulkoilman kanssa. Ensiökäämi ja sydänosat voivat kuvan 4 mukaisesti olla asennettu joko maapotentiaalissa olevaan säiliöön virtamuuntajan alaosassa (hair-pin), tai ensiöpiirin potentiaalissa olevaan virtamuuntajan yläosaan (top-core). (Elovaara & Haarla 2011, 211.)



KUVA 4. Ulos asennettävien virtamuuntajien rakennetyypit. Vasemmalla hair-pin, oikealla top-core (Sjövall & Findell 2009, 77)

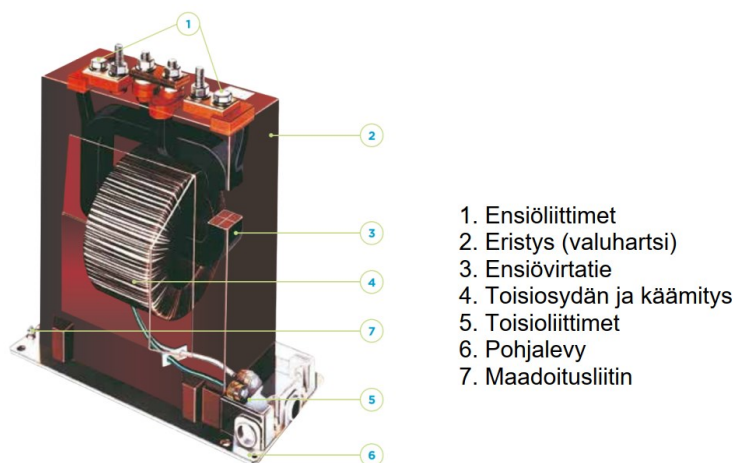
Virtamuuntajan eristin on valmistettu joko posliinista, tai yhä useammin silikoni-päälysteisestä komposiitista. Komposiittieristimen etuihin lukeutuu, ettei eristämateriaali vikatilanteessa, mahdollisen virtamuuntajan räjähdyksessä sirpaloidu posliinin tapaan.

Muuntaja asennetaan kojeterästelimeen päälle tukijalkojen varaan, ja toisiokaapelit sekä maadoitus tuodaan ulkoisia kaapelireittejä pitkin muuntajan alaosan liittimille. Virtamuuntaja kytketään ensiöpiiriin joko virtaköydellä, tai putkikiskolla virtamuuntajan yläosan ensiöliittimiin. Kuvassa 5 on esitetty top-core -tyyppisen virtamuuntajan läpileikkaus. Kuvan 5 virtamuuntaja on öljytäytteinen, jolloin paisuntatilassa on tarkistusikkuna öljypinnanosoitusta varten ja öljynäytteenotto-ruuvi muuntajan alaosassa. (Arteche 2023, 6)



KUVA 5. Arteche CA-sarjan virtamuuntaja ulkokytkinlaitoskäyttöön (Arteche 2023, 6)

Sisäkäyttöön, kuten esimerkiksi keskijännitekojeistoon asennettavaksi tarkoitetut virtamuuntajat ovat tyypillisesti valuhartsieristeisiä alle 123 kV käyttöjännitteellä. Valuhartsieristeisen virtamuuntajien etuina on pieni koko, asennettavuus mihin asentoon tahansa, ja se ettei se sisällä öljyä. Kuvassa 6 näkyvä kiskoa tukeva virtamuuntaja kiinnitetään pohjalevystään kojeistorakenteeseen tai seinään, ja se kytketään ensiöpiiriin kiskoliitynnällä. Valuhartsieristeisiä virtamuuntajia valmistetaan eri muotoisina, erilaisille kiskoliitynnöille. (Elovaara & Haarla 2011, 213)



KUVA 6. Arteche ACF-sarjan virtamuuntaja sisäkäyttöön (Arteche 2023, 5)

Virtamuuntaja voidaan valmistaa myös ilman varsinaista ensiökäämitystä, valuhartsiin valetuksi ns. läpivienti- tai rengasvirtamuuntajaksi (Kuva 7), jolloin virtamuuntajalla voidaan mitata esimerkiksi kaapelissa tai kiskossa kulkevaa virtaa katkaisematta ensiöpiirin virtatietä. Suomen keskijänniteverkossa tyypillinen käyttökohde rengasvirtamuuntajalle on keskijännitekaapelin summavirtamittaus, jossa rengasvirtamuuntaja asennetaan kaapelin kaikkien kolmen vaiheen ympärille. (Elovaara & Haarla 2011, 213–214.)



KUVA 7. Rengasvirtamuuntajia (ABB 2017, 2018, 2022)

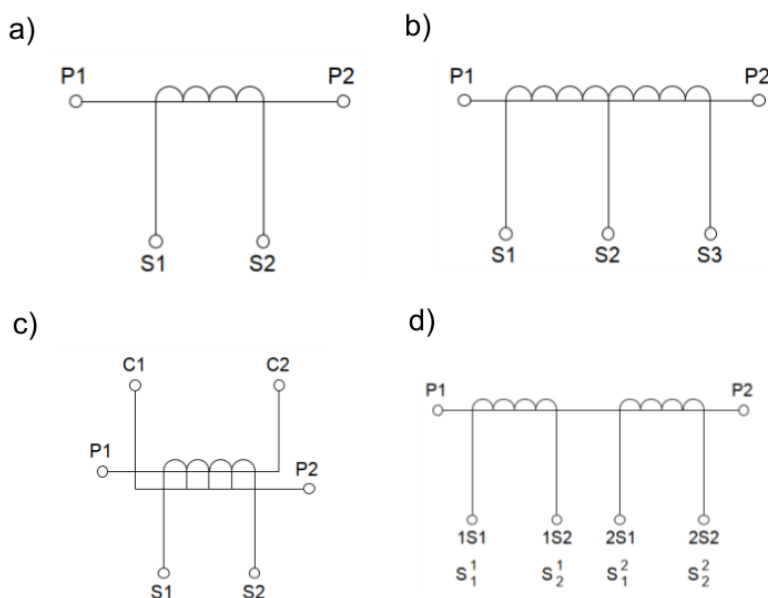
Virtamuuntajat voidaan varustaa myös ensiökäämin eristyksen osakapasitansseja hyödyntämällä kapasitiivisella jänniteulosotolla, jolloin virtamuuntajan ensiöpuolen jännitemuotoa voidaan tutkia. Kapasitiivisen jänniteulosoton käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset jänniteindikoinnit ja tahdissaolon valvonnan sovellukset. (Elovaara & Haarla 2011, 211–213.)



### 3.3 Liitinmerkinnät

Muuntajan polariteetti, eli virran kulkusuunta toisiokäämityksissä riippuu toisiokäämin käämityssuunnasta, ja siitä miten käämien päät tuodaan toisioliittimille. Muuntajan polariteettia merkitään tyypillisesti pistemerkinnoilla, jossa ensiö- ja toisiopuolen pistepäiden suhteen samaan suuntaan kulkevat virrat vahvistavat sydänmateriaalissa kiertävää magneettivuota. (Korpela 2021, 5)

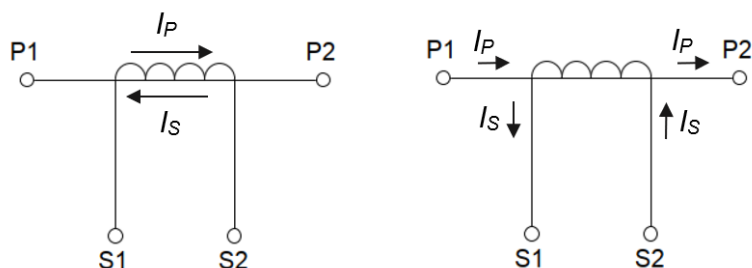
Virtamuuntajan liitinmerkinnät, ja virtojen kulkusuunnat ovat standardoitu IEC-61869-2 -standardissa eri virtamuuntajakokoonpanoille, joista tavallisimmat ovat esitetty kuvassa 8. Liitinmerkinnän kirjain P viittaa ensiöpiiriin liittimeen, ja S toisiin. Virtamuuntajan muuntosuhde voi olla valittavissa joko toisiokäämityksen käämiväliotolla (kuva 8b), tai ensiöpiiriin vaihtokytkennällä, jolloin kirjaimella C varustetut ensiöliittimet ovat tarkoitettu muuntosuhteen vaihtokytkentään (kuva 8c).



KUVA 8. Virtamuuntajan IEC 61869-2 -standardinmukaisia liitinmerkintöjä (IEC 61869-2, 28, muokattu)

Jos sydämiä on enemmän kuin yksi, tosioliittimet numeroidaan kuvan 8d mukaisesti juoksevasti jompaakumpaa numerointitapaa noudattaen. Liittimillä, jolla on merkinnät P1, S1 ja C1 on oltava sama polariteetti samalla ajanhetkellä. (IEC 61869-2, 28)

Polariteettimääritelmän mukaisesti virtamuuntajan toisiovirran  $I_S$  kulkusuunta on liitinmerkinnöiden mukaan vastakkaisvaiheinen ensiöpiirin virtaan  $I_P$  verrattuna. (Porrelli 2020, 12:20)



KUVA 9. Virran kulkusuunta virtamuuntajan toisiopiirissä (IEC 61869-2, 28, muokattu)

### 3.4 Toisiopiirin maadoitus

Jännite virtamuuntajan suljetussa toisiossa on normaalisti alhainen (muutaman voltin luokkaa). Jotta toisiopiirin potentiaali ei nousisi vaarallisen korkeaksi, on virtamuuntajan toisionavoista jompikumpi maadoitettava, jolloin toisiopiirin potentiaali sidotaan maapotentiaaliin. (Elovaara & Haarla 2011, 214–215.)

Käytössä olevan virtamuuntajan toisiopiirin on oltava joka tilanteessa ehyt. Jos virtamuuntajan tosio avataan käytön aikana, koko ensiövirta magnetoi sydänmateriaalia, jolloin muuntajasydän kyllästyy nopeasti ja toisiopiirin jännite nousee ihmiselle ja laitteistolle vaaralliselle tasolle. Käytössä olevan virtamuuntajan toisiopiiri on aina oikosuljettava ennen piirin avaamista, ja käyttämättömät muuntajasydämet on pidettävä käytön aikana oikosuljettuna. (Elovaara & Haarla 2011, 214–215.) Jos virtamuuntajassa on kapasitiivinen jänniteulosotto, joka ei ole käytössä, on sekin pidettävä oikosuljettuna ja maadoitettuna muuntajan ollessa käytössä. (Arteche 2022, 6)

### 3.5 Virhetermistö

Jos virtamuuntaja olisi ideaalinen, eli rautasydämen permeanssi asetettaisiin äärettömäksi, ja muuntajan oma impedanssi nolllaksi, olisi virtamuuntajan toisiovirran amplitudi suoraan verrannollinen muuntosuhteeseen ja kulmavirhettä ei esiintyisi. Todellisuudessa sijaiskytkennän poikittaishaaran impedanssia ei voi jättää huomioimatta, vaan sen kautta kulkeva magnetointivirta  $I_0$  on otettava huomioon, jolloin todellinen toisiovirta  $I_S$  on käämien johdinkierroslukumäärien suhdeluvulla kerrotun ensiövirran  $I_P$ , ja magnetointivirran erotus

$$\bar{I}_S = \frac{N_P}{N_S} \cdot \bar{I}_P - \bar{I}_0. \quad (7)$$

(Sjövall & Findell 2009, 9)

Standardointitarkoituksessa virtamuuntajille on määritelty joukko käsitteitä, jotka määräävät virtamuuntajan tarkkuusluokan. Virtamuuntajan virtavirhe  $\varepsilon$  on todellisen ensiövirran  $I_P$ , ja teoreettisen muuntosuhteella  $k_r$  kerrotun toisiovirran  $I_S$  erotuksen suhdeluku ensiövirtaan, joka lasketaan kaavalla (8),

$$\varepsilon = \frac{k_r \cdot I_S - I_P}{I_P} \cdot 100\%, \quad (8)$$

ja ilmoitetaan prosentteina. (IEC 61869-2, 10)

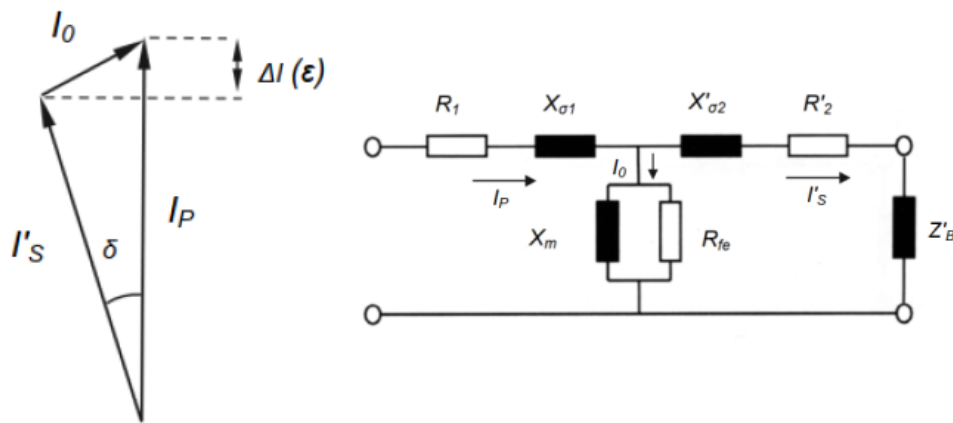
Kulmavirhe  $\delta$  (tai  $\Delta\phi$ ) on virtamuuntajan ensiö- ja toisiovirtojen välinen kulmaero senttiradiaaneissa. Kulmavirhe on etumerkiltään positiivinen, kun toisiovirran osoitin on ensiövirran osoitinta edellä. Kulmavirheen yksikkö standardien taulukoissa on joko senttiradiaani tai kulmaminuutti. (Sjövall & Findell 2009, 8–11)

Virta- ja kulmavirheen yhteisvaikutuksesta lasketaan yhdistetty virhe  $\varepsilon_c$ , joka muodostuu virta- ja kulmavirheen yhteisvaikutuksesta. Yhdistetty virhe huomioi virtamuuntajan tyhjäkäyntivirran ja magnetoimiskäyrän epälineaarisuuden aiheuttaman toisiovirran epäsuoruuksien. (Elovaara & Haarla 2011, 201.)

Virtamuuntajan yhdistetty virhe lasketaan kaavan (9) avulla,

$$\varepsilon_c = \frac{1}{I_P} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_r \cdot i_S - i_P)^2 dt} \cdot 100\% \quad (9)$$

jossa  $I_P$  on ensiökäämin virta,  $T$  jaksonaika,  $k_r$  muuntosuhde sekä  $i_P$  ja  $i_S$  ensiö- ja toisiovirtojen hetkellisarvot. (IEC 61869-2, 11)



KUVA 10. Virtamuuntajan sijaiskytkentäesitys virta- ja kulmavirheosoittimilla.

### 3.6 Nimellisarvot

Virtamuuntajan standardoidut ensiön **nimellisensiövirrat**  $I_{pr}$  ovat 10, 12,5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 ja 75, (yleisimmät alleviivattu) sekä näiden kymmenkerrat. Nimellisensiövirta valitaan käyttökohteen mukaan niin, ettei sitä ylitetä jatkuvassa käytössä. Standardoidut **nimellistoisiovirrat**  $I_{sr}$  ovat vastaavasti 1, 2 ja 5 A. **Suurin jatkuva terminen nimellivirta**  $I_{cth}$ , on suurin sallittu virta muuntajan ensiökäämityksessä, kun toisipuolelle on kytketty nimellistaakka. Jos arvoa ei ilmoiteta erikseen, on se nimellisensiövirran suuruinen. Arvo ilmoitetaan prosentteina nimellisvirrasta, tai sen kertoimena, ja tyypillisiä arvoja ovat 120, 150 tai 200 %. (IEC 61869-2, 9–10)

**Suurin terminen kestovirta**  $I_{th}$  on suuri ensiövirran tehollisarvo, jonka muuntaja kestää sekunnin ajan toisiopiirin ollessa oikosuljettu. **Suurin dynaaminen kestovirta**  $I_{dyn}$ , on suurin ensiövirran huippuarvo, jonka muuntaja kestää sähköisesti

ja mekaanisesti kun toisiopiiri on oikosuljettu. Jos dynaamista kestopvirtaa ei ole ilmoitettu, sen oletetaan olevan 2,5 kertaa terminen kestopvirta. (IEC 61869-2, 10)

Virtamuuntajan **nimellistaakka**  $R_b$  on muuntajan toisioon kytketyssä kokonaisimpedanssissa kuluva teho nimellisvirralla. Nimellistaakka ilmoitetaan näennäistehona, ja sille on standardoitu arvot 2,5, 5,0, 10, 15, 30, 45, 60 VA. Virtamuuntajalle määritellään lisäksi arvokilvessä **nimellistaajuus**  $f_R$ , ja **nimellisestystaso** käyttöjännitteelle, yhden minuutin vaihtojännitteelle sekä syöksyjännitteelle. Suuremmilla käyttöjännitteillä määritellään lisäksi kytkentäjännitekestoisuus. (IEC 61869-2, 11)

### 3.6.1 Mittausvirtamuuntajan nimellisarvot

Mittausvirtamuuntajan **tarkkuusluokka** määräytyy virtavirheen suuruudesta, ensiövirran ollessa 100...120 % nimellisvirrasta, taakalla 25...100 % nimellistaakasta. Tarkkuusluokka ilmoitetaan virtavirheenä prosentteina, ja sille on standardoitu arvot 0.1, 0.2, 0.2S, 0.5, 0.5S, 1, 3 ja 5. Tarkkuusluokkien 0,2S ja 0,5S lisäkirjain S tarkoittaa, että virtamuuntajan tarkkuus säilyy aina alas 20 % nimellisvirtaan saakka (20...120 %). (IEC 61869-2, 21)

TAULUKKO 1. Virta- ja kulmavirherajat mittaustarkkuusluokille 0,1–1 (IEC 61869-2, 21)

Tarkkuusluokka	Virtavirhe				Kulmavirhe							
	±%				± kulmaminuuttia				± senttiradiaania			
	% nimellisvirrasta				% nimellisvirrasta				% nimellisvirrasta			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

TAULUKKO 2. Virta- ja kulmavirherajat mittaustarkkuusluokille 0,2S ja 0,5S (IEC 61869-2, 22)

Tarkkuus- luokka	Virtavirhe					Kulmavirhe									
	±%					± kulmaminuuttia					± senttiradiaania				
	% nimellisvirrasta					% nimellisvirrasta					% nimellisvirrasta				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tarkkuusluokat sisältävät myös vaatimukset kulmavirheelle ( $\delta$ ) eri nimellisvirran kertoimilla. Tarkkuusluokilla 3 ja 5 ei ole kulmavirhevaatimuksia, jolloin ne eivät sovellu muihin sovelluksiin kuin pelkän virran amplitudin mittaukseen. Mittausvirtamuuntajan tarkkuusluokka voi olla myös laajennettu, jolloin se pysyy tarkkuusluokassaan annettuun nimellisvirran kertoimen mukaiseen ensiövirtaan asti. Laajennettu tarkkuusluokka ilmoitetaan lisämerkinnällä *ext.* ja alue prosentteina, esim. 0,2 ext. 150 %. (Mörsky 1993, 109)

TAULUKKO 3. Virta- ja kulmavirherajat mittaustarkkuusluokille 3 ja 5 (IEC 61869-2, 22)

Luokka	Virtavirhe	
	±%	
	% nimellisvirrasta	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Mittausvirtamuuntajan **mittarivarmuuskerroin**  $FS$  on suhdeluku  $I/I_N$  jolla mittausvirtamuuntajan virhe on vähintään 10 % nimellistaakalla. Kun virtaa kasvatetaan mittarivarmuuskertoimen mukaisesta tasosta, toisiovirta ei enää merkittävästi kasva. Mittarivarmuuskertoimen avulla pyritään varmistamaan, että toisiopiirin virrat pysyvät verkon vikatilanteissa piiriin kytkettyjen laitteiden kannalta turvallisella tasolla. Mittarivarmuuskertoimen standardoituja arvoja ovat  $FS5$  ja  $FS10$ . (Mörsky 1993, 108–110.)

### 3.6.2 Suojausvirtamuuntajan nimellisarvot

Suojausvirtamuuntajan **tarkkuusluokka** tarkoittaa virtamuuntajan suurinta sallitua yhdistettyä virhettä prosentteina, nimellisellä virralla  $I_N$ . Standardoituja tarkkuusluokkia ovat luokat 5P, 10P, 5PR, 10PR, PX, PXR, TPX, TPY ja TPZ. (IEC 61869-2, 23)

TAULUKKO 4. Virherajat suojausvirtamuuntajan tarkkuusluokille P ja PR (IEC 61869-2, 23)

Tarkkuusluokka	Virtavirhe nimellisenä virralla $\pm\%$	Kulmavirhe nimellisenä virralla		Yhdistetty virhe nimellisenä virralla %
		$\pm$ kulmaminuuttia	$\pm$ senttiradiaania	
5P ja 5PR	1	60	1,8	5
10P ja 10PR	3	-	-	10

Tarkkuusluokat 5P ja 10P ovat yleisimmät suojausvirtamuuntajien tarkkuusluokat Suomessa. Luokan PR suojausvirtamuuntajalle on P luokan ominaisuuksien lisäksi määritelty rajat jäännösmagnetismi- eli remanenssikäyttäytymisen osalta, PX luokassa kyllästymiskarakteristiikalle on tarkemmat vaatimukset, ja TP luokan virtamuuntajilla taas käyttäytymiselle transienttitilanteissa on lisävaatimuksia. (IEC 61869-2, 23)

Suojausvirtamuuntajan **tarkkuusrajakero**  $ALF$ , eli ylivirtaluku on suhdeluku  $I/I_N$  jolla suojausvirtamuuntaja pysyy tarkkuusluokassaan nimellistajuisella virralla, nimellisellä taakalla (tehokertoimella 0,8 kun nimellistaakka on yli 5 VA, muuten 1,0). Tarkkuusrajakertoimen standardiarvoja ovat 5, 10, 15, 20 ja 30. (IEC 61869-2, 23–24)

Tarkkuusrajakero muistuttaa mittarivarmuuserroa, mutta suojausvirtamuuntajalla kertoimen tarkoitus on varmistaa, että virtamuuntaja toistaa myös korkeat vikavirrat riittävällä tarkkuudella. Mittauspiiristä poiketen suojauspiiri suunnitellaan mittaamaan myös tavanomaista mitta-alueen korkeampia virtoja, eikä virtamuuntaja saa vian aikana kyllästyä vaarantaen suojausten toimintaa.

### 3.7 Virtamuuntajan valinta

Virtamuuntajan on täytettävä vaadittu kansainvälinen tai kansallinen standardi, sekä olla soveltuva asennuspaikan ympäristöolosuhteisiin. Virtamuuntaja kytketään sähköjärjestelmään ensiöpuoleltaan sarjaan, jolloin sen on kestävä käyttäjännitteen ja mahdollisten ylijännitteiden lisäksi ensiöpiirin vikavirrat rikkoutumatta. Virtamuuntajan rikkoutuessa saattaa suojausjärjestelmän toimintaedellytykset kadota kokonaan, suojausjärjestelmän toimiessa tällöin ilman virranmittausta. (Sjövall & Findell 2009, 40–41.)

Virtamuuntajan nimellisvirta valitaan niin, ettei virta ympäristön lämpötila huomioiduna ylity jatkuvassa käytössä. Virtavirhe kasvaa pienemmillä virroilla, joten tarpeettoman suuri mittausvirtamuuntajan nimellisvirta tekee mittauksesta epätarkan. Nimellisvirraksi valitaan standardiarvo, joka on n. 10–40 % korkeampi kuin arvioitu nimellisvirta, jolloin mittauksen resoluutio on hyvällä tasolla. (Sjövall & Findell 2009, 38.) Tarkkuusluokan S mittausvirtamuuntajien pysyessä samassa tarkkuudessa aina alas 20 % nimellisvirtaan asti, nimellisensiövirralla ei tarkkuuden kannalta ole yhtä suurta merkitystä. Virtamuuntajan toisiovirta, sydänten lukumäärä ja näiden ominaisuudet valitaan tarvittavien liityntöjen mukaan. (Mörsky 1993, 109)

#### 3.7.1 Taakan laskeminen

Virtamuuntajan todellinen taakka  $S_a$  muodostuu toisiojohdotuksien ja mittauskojeiden yhteenlasketusta kuormasta.

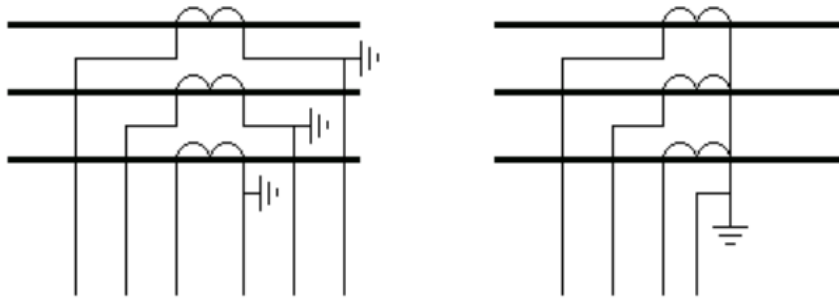
$$S_a = S_j + S_b \quad (10)$$

Kytkeytyjen laitteiden osataakka  $S_b$  selvitetään datalehdistä ja lasketaan yhteen. Johdotuksien ja kaapeleiden osataakka  $S_j$  lasketaan nimellisvirralla  $I_N$ , johdinmateriaalin resistiivisyyden  $\rho$ , johdinpoikkipinnan  $A$ , johdinpituuden  $l$  avulla, kaavalla (11). Kuparin resistiivisyys on noin 0,0178  $\Omega/m$ .



$$S_j = I_N^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (11)$$

Johdinpituus  $l$  riippuu käytetystä mittauskytkennästä (kuva 11). Jos jokaisella virtamuuntajalla on oma paluujohdin koko kytkennän matkalta, on johdinpituus luonnollisesti kaksi kertaa virtamuuntajan ja mittauskojeen välinen matka. Jos kolmella virtamuuntajalla on yhteinen paluujohdin, on johdinpituus puolet, eli sama kuin välimatka. Tyypillisesti käytetään yhteistä ja erillistä paluujohdinta samassa piirissä, jolloin voidaan käyttää sopivaa korjauskerrointa, esim. 1,2 kertaa välimatka. (ABB 2004, 7)



KUVA 11. Mittauskytkentä erillisillä ja yhteisellä paluujohtimella (ABB 2004, 7)

Jos valittavan toisiovirtaan voidaan suunnitteluvaiheessa vaikuttaa, niin pienemällä toisiovirralla voidaan saada säästöjä niin itse virtamuuntajan hinnassa kuin kaapeloinnissa. Taakka kasvaa eksponentiaalisesti virran suhteen, joten 1 A toisiovirralla virtamuuntajan taakka on 1/25 suuruinen 5 A toisiovirtaan verrattuna. (ABB 2004, 6–7)

### 3.7.2 Tarkkuusraja- ja mittarivarmuuskertoimen laskeminen

Virtamuuntajan mittarivarmuus- ja tarkkuusrajakerroin on ilmoitettu nimellisellä taakalla. Jos taakka on nimellistaakkaa pienempi, virtamuuntaja kyllästyy suuremmalla virralla. Todelliset kertoimet  $FS_a$  ja  $ALF_a$  lasketaan todelliselle taakalle  $S_a$  kaavalla (12)

$$FS_a = FS_N \frac{|\bar{S}_{in} + \bar{S}_N|}{|S_{in} + S_a|} \quad (12a)$$

$$ALF_a = ALF_N \frac{|\bar{S}_{in} + \bar{S}_N|}{|S_{in} + S_a|}, \quad (12b)$$

missä  $S_N$  on nimellis- ja  $S_{in}$  virtamuuntajan sisätaakka. (ABB 2000, 290)

Mittarivarmuuskerroin mitoitetaan tarkistamalla käytettyjen mittauskojeiden ylikuormitettavuus datalehdistä, ja mitoittamalla varmuuskerroin tätä pienemmäksi, jolloin virtamuuntaja kyllästyy ennen kuin virta nousee mittarille vaaralliselle tasolle. Suojausvirtamuuntajan tarkkuusrajakerroin valitaan niin että se kattaa suoja-alueiden asettelualueen. Tavoite on, että virtamuuntaja ei kyllästy sijoituspaik- kansa suurimman kolmivaiheisen oikosulkuvirran vaikutuksesta. Mikäli virta- muuntajan tulee toistaa myös tasakomponentin sisältäviä epäsymmetrisiä oiko- sulkuvirtoja, on tarkkuusrajakerroin ylimitoitettava, tai on käytettävä linearisoitua suojausvirtamuuntajaa. (Elovaara & Haarla 2011, 206–207.)

Tyypillinen sovellus, jossa suojausvirtamuuntajan tarkkuusrajakerroin ylimitoi- taan, on muuntajan erovirtasuojaus. Suojarelevalmistajat antavat ohjeita ylimitoi- tamiseen suunnitteluoppaissa. Ylimitoitus riippuu mm. virtamuuntajan nimellisvir- rasta, vikavirrasta ja tasakomponentin aikavakiosta.

## 4 VIRTAMUUNTAJAN KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUS

### 4.1 Tarkastuksen tarkoitus

VEO Oy:n virtamuuntajien tarkastusmenetelmät ovat räätälöity yrityksen omiin tarpeisiin. Yritys ei valmista virtamuuntajia, vaan nämä tilataan laitevalmistajilta, joka toimittaa tehdastarkastuspöytäkirjan osana toimitusta. Virtamuuntajan standardinmukaisuus tarkastetaan valmistajan toimesta ennen toimitusta, eikä kaikkia testejä uusita asennustarkastuksessa. Asennustarkastuksen tarkoitus on lähinnä varmistaa, että virtamuuntaja on asennettu oikein suunnitelmien mukaisesti, eikä se ole vaurioitunut kuljetuksen aikana.

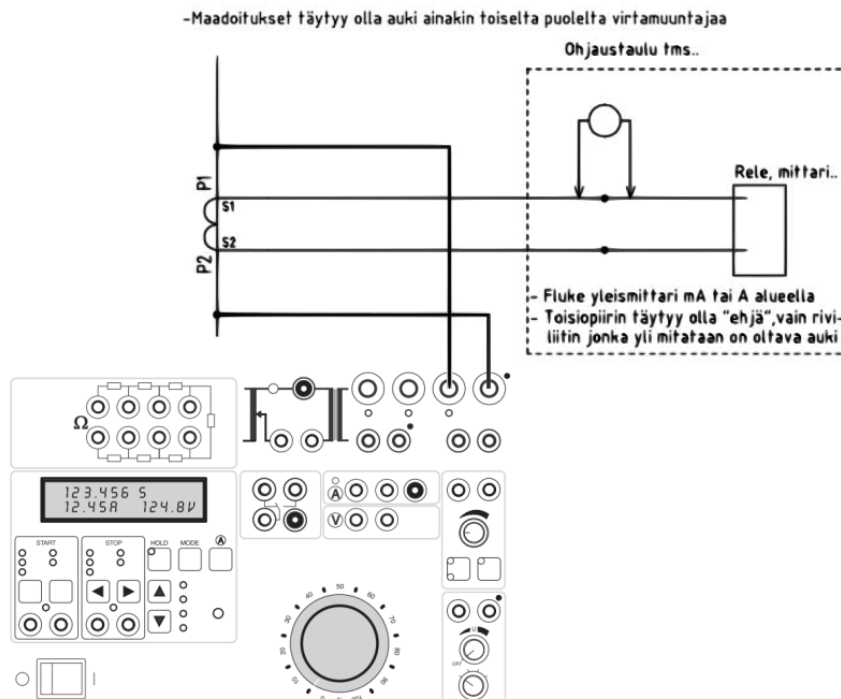
Tarkastuksissa noudatetaan yrityksen koestusohjetta. Tarkastusmenetelmille saattaa lisäksi olla eritelty lisävaatimuksia ja tarkennuksia osana projektin spesifikaatioita. Eräs asiakas on esimerkiksi kirjannut keskijännitekojeiston koestusohjeeseen, että mittamuuntajan eristysvastus mitataan 1000 VDC mittausjännitteellä, tarkastetaan muuntosuhde ja polariteetti, ja tarkastetaan, että suojaukseen on käytetty suojaussydämiä ja mittaukseen mittaussydämiä mittaamalla muuntajien navoista magnetointikäyrä ja käännejännite. Mitatusta käännejännitteestä, nimellistoisiovirrasta ja mitoitustaakasta lasketaan likimääräinen mittarivarmuus ja tarkkuusrajakerroin, joita verrataan kilpiarvoihin.

### 4.2 Tarkastusmenetelmät

Virtamuuntajan asennustarkastus aloitetaan vertaamalla virtamuuntajan kilpiarvoja suunnitelmiin. Tämän jälkeen suoritetaan **silmämääräinen tarkastus**, jossa tarkastetaan, että muuntaja on päällisin puolin ehjä, ja ensiö- ja toisiokytkennät, maadoitukset sekä käyttämättömien sydänten oikosulkukytkennät ovat kunnossa. Riippuen onko kyseessä sisä- vai ulkoasennus, tarkastetaan myös koje-teräs, asennusalusta ja öljynpinta pinnankorkeus. (VEO 2020, 1)

**Muuntosuhde** eli ensiö- ja toisiovirran amplitudin suhdeluku tarkistetaan syöttämällä muuntajan ensiöliittimiin virtaa koestuslaitteella ja mittaamalla virta

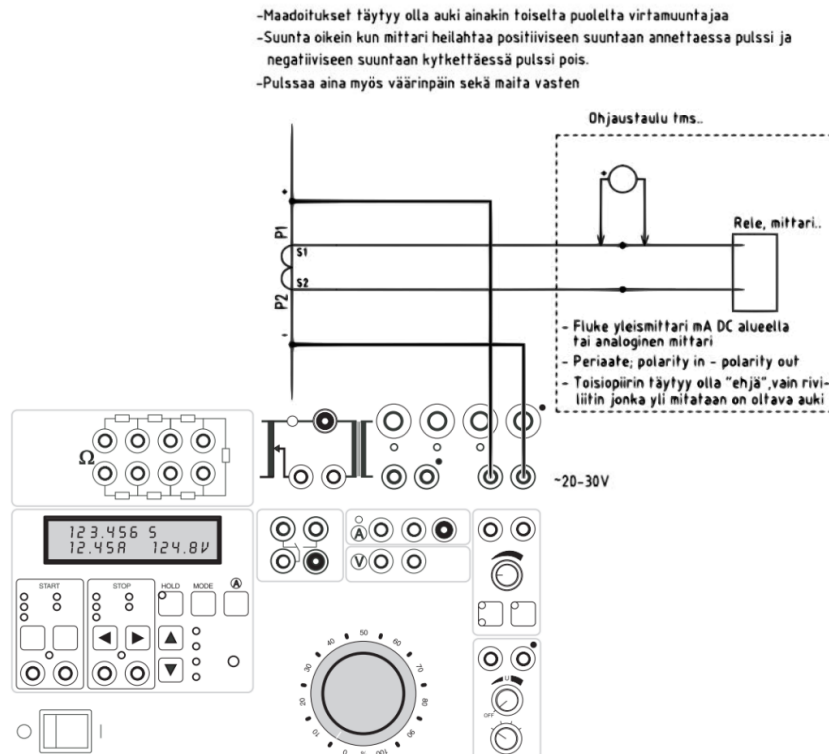
suljetusta toisiopiiristä (kuva 12). Samalla tarkistetaan kytkettyjen mittauskojeiden virtatulojen skaalaukset mittausvalikoista. Vaihtoehtoisesti muuntosuhde voidaan tarkistaa myös syöttämällä toisiopiiriin kyllästymisjännitettä pienempi vaihtojännite ja mittaamalla ensiöpuolelta jännite. (VEO 2020, 3)



KUVA 12. Muuntosuhteen tarkastus (VEO 2020, muokattu)

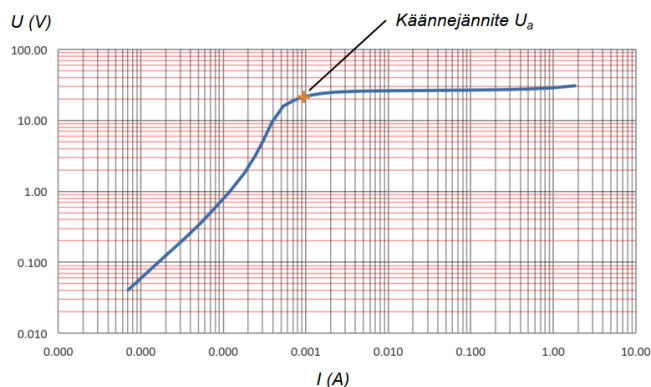
**Suunnan mittauksella** (pulssausmenetelmä) tarkastetaan virtamuuntajan polariteetti. Polariteetin oikeellisuus on tärkeä tehonmittauksissa, analogisessa virranmittauksessa ja suunnatuissa suojaussovelluksissa. Pulssausmenetelmällä voidaan tarkastaa polariteetti, niin virtamuuntajan toisoliittimien kohdalta, kuin myös muualta toisiopiiristä, kuten ohjaustaulusta, kun suunnan mittaus toistetaan eri kohdissa piiriä.

Pulssausmenetelmässä hyödynnetään päälle- ja poiskytkentähetken virran muutosilmiötä, jolloin muuttuva virta hetkellisesti indusoi toisiopiiriin virran. Tasajännitelähde kytketään kuvan 13 osoittamalla tavalla, jolloin kytkentähetkellä virtapulssin etumerkki on positiivinen, ja poiskytkentähetkellä negatiivinen. (VEO 2020,2)



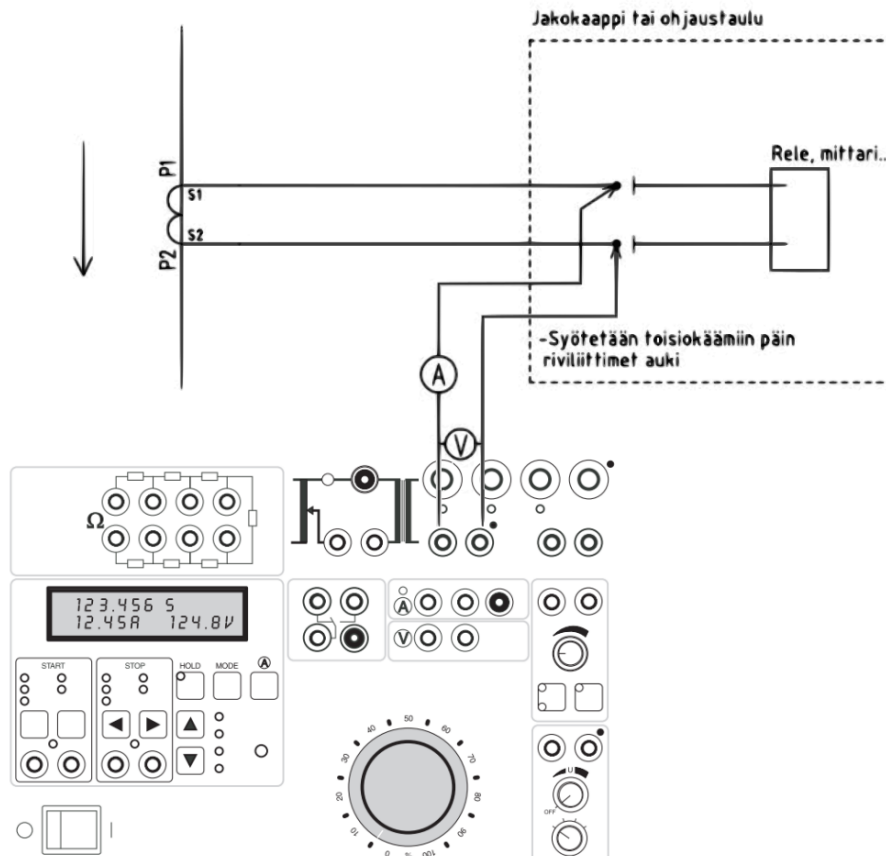
KUVA 13. Suunnan mittaus (VEO 2020, muokattu)

**Magnetointikäyrän mittaus** tehdään tarvittaessa suorittamalla toisioliittimiltä muuntajan tyhjäkäyntikoe vaihtojännitteellä, ensiöpiirin ollessa auki ja maadoittamaton (kuva 15). Jännitettä nostetaan askelmaisesti samalla mittaamalla mitauskytkennän toisiokäämityksen läpi kulkeva virta. Mitattu virta nousee aluksi jännitteen suhteen lineaarisesti, kunnes sydänmateriaali kyllästyy, jolloin pieni jännitteen nosto aiheuttaa suuren virran muutoksen. Jännite- ja virtamittausten tulokset taulukoidaan ja esitetään tyypillisesti kuvan 14 mukaisesti kuvaajassa, jossa pysty ja vaaka-akseleilla on logaritmiasteikot.



KUVA 14. Omicron CT Analyzer testilaitteen suorittama käännejännitemittaus.

- Syötetään V AC jännitettä toisiopiiriin 50V välein ja mitataan virta.
- Huom! Mittauskäämissä riittää pienempi jännite (ks. pöytäkirja)
- Älä anna virran nousta ainakaan yli virtamuuntajan nimellisen tai Sverkerin salliman rajan yli.
- Vertaa arvoja mittamuuntajan toimittajan tehdaskoestuspöytäkirjaan



KUVA 15. Magnetointikäyrän mittaus (VEO 2020, muokattu)

Käännejännite  $U_a$  määritellään kuvaajan pisteinä, jossa jännitteen nostaminen 10 % aiheuttaa virtaan 50 % nousun. Kun käännejännite saavutetaan, jatketaan testiä laskemalla jännitettä samalla askelluksella hystereesin määrittämiseksi. Samalla poistetaan sydänmateriaalin magnetointi. Käännejännitteen avulla voidaan laskea virtamuuntajan tarkkuusraja- ja mittarivarmuuskerroin riittävällä tarkkuudella nimellisvirran  $I_N$  ja -taakan  $S_N$  avulla, kaavalla (13)

$$FS \text{ tai } ALF \approx \frac{U_a \cdot I_N}{S_N}. \quad (13)$$

(Mörsky 1993, 114)

Virtamuuntajan **taakka** mitataan, kun toisiojärjestelmä on kytketty kokonaisuudessaan. Toisiopiiriin taakan läpi syötetään nimellistoisiovirta (vaihtovirta) ja mitataan taakan yli vaikuttava jännite, jolloin ohmin lailla voidaan laskea taakan impedanssi ja näennäisteho.

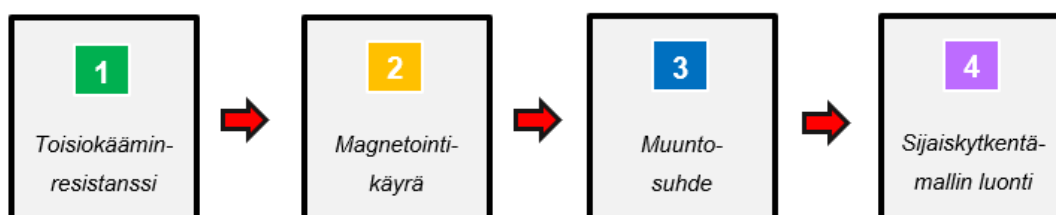
Muuntajan **toisiokäämin resistanssi** voidaan tarvittaessa mitata syöttämällä toisiokäämiin tunnetun suuruinen tasavirta, ja mittaamalla käämin yli vaikuttava jännite. Edellisten lisäksi virtamuuntajan **eristysvastus** mitataan ensiön ja maapotentiaalin väliltä 5000 VDC, 15 s, sekä ensiö-toisio, toisio-maa, sekä mahdollisten eri toisiokäämien väliltä 500VDC, 15 s mittauksilla. (VEO 2020, 1)

## 5 MITTAUKSET CT-ANALYZER TESTILAITTEELLA

### 5.1 Laitteen ominaisuudet

CT-Analyzer on Omicron Electronics GmbH:n valmistama virtamuuntajien testaukseen tarkoitettu koestuslaite, jolla voidaan mitata virtamuuntajan muuntosuhde, virta- ja, kulmavirhe, polariteetti, käännejännite, tarkkuusluokka, magnetointi- ja remanenssikäyttäytyminen. Virtamuuntajaan toisiopiiristä voidaan mitata taakan impedanssi. CT Analyzer on pääasiassa tarkoitettu virtamuuntajien testaukseen, mutta sillä voidaan myös mitata jännitemuuntajan muuntosuhde ja käämiresistanssi. (Omicron 2022, 6)

Laitteen toiminta eroaa aiemmin työssä esitellyistä mm. ensiösuureen syöttöön perustuvista koestusmenetelmistä. CT Analyzer käyttää sijaiskytkentään perustuvaa testausmenetelmää (Model Based testing). Testilaite luo virtamuuntajalle sijaiskytkentämallin mittaamalla toisiokäämin resistanssin, magnetointikäyrän ja muuntosuhteen. Sijaiskytkentämallin ja mittaustulosten pohjalta testilaite laskee virtamuuntajan ominaisuudet, ja vertaa ja arvioi niitä valittuun standardiin.



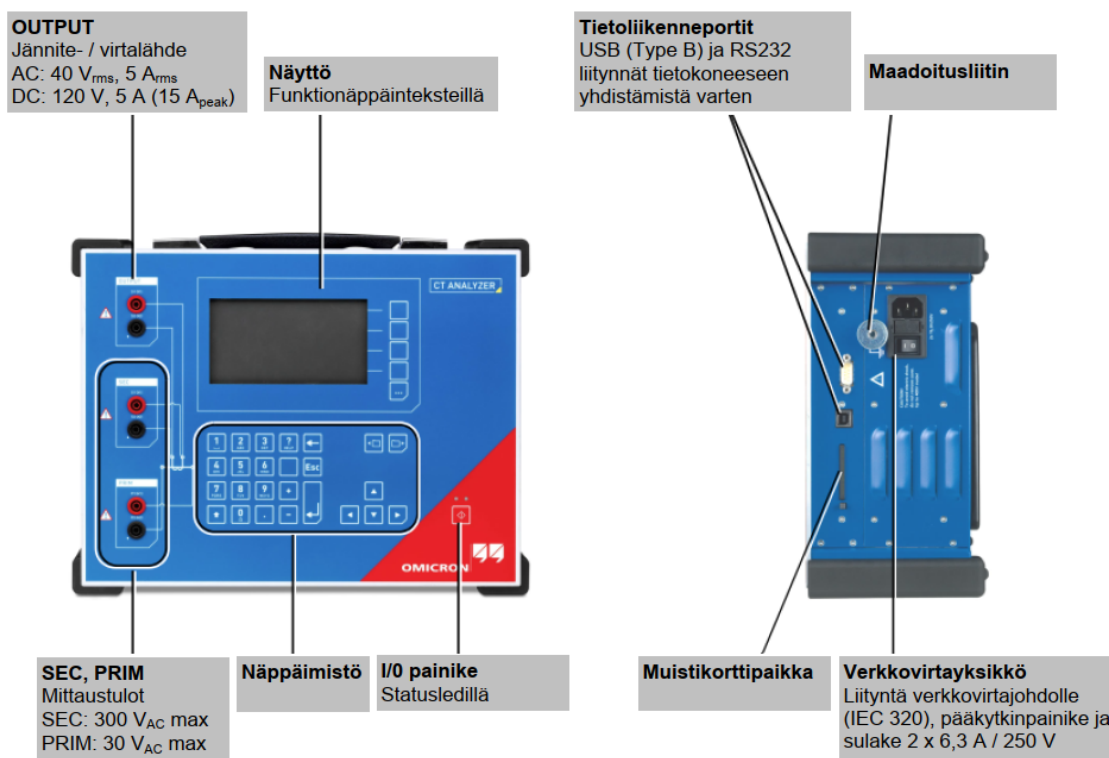
KUVA 16. CT analyzerin sijaiskytkentämallin perustuva testausmenetelmä.

CT Analyzer mittaa toisiokäämin resistanssin tasavirtamenetelmällä, muuntosuhteen syöttämällä toisiopiiriin jännitteen ja mittaamalla ensiöjännitteen (huomioiden toisiokäämin resistanssin aiheuttama jännitehäviö) ja magnetointikäyrän syöttämällä nimellistaajuinen jännite toisioliittimiin. Magnetointikäyrän laitteen jännitesyöttökykyä korkeammat käännejännitteet mitataan laskemalla mittausjännitteen taajuutta, jolloin tuloksena raportoitava nimellistaajuinen magnetointikäyrä on laskennan tulos. Koko mittauksen aikana testilaite ei siis syötä ensiöpiiriin virtaa eikä jännitettä. (Porrelli 2020, 1:03:00)



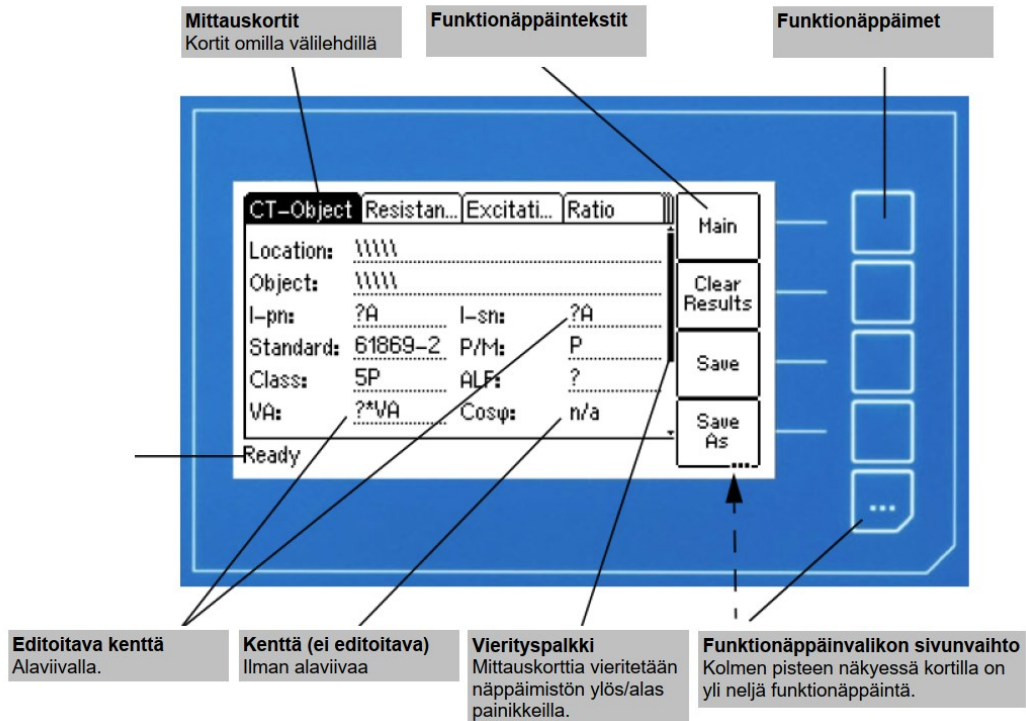
## 5.2 Käyttöliittymä

Testilaitteen etupaneelissa on laitteen oma käyttöliittymä, joka koostuu näppäimistöstä, näytöstä, mittauskytkentägrafiikasta, mittauspistokkeista mittauskytkentää varten. Laitteen sivusta löytyy verkkovirta- ja USB- liitännät, pääkytkinpainike, muistikorttipaikka ja laitteen rungon maadoitusliitin. (Omicron 2021, 17)



KUVA 17. Testilaitteen etu- ja sivupaneeli (Omicron 2021, 17, muokattu)

Näytön valikoissa navigoidaan näppäimistön nuolinäppäimillä, ja näytön oikeassa reunassa olevilla funktionäppäimillä. Testikortteja muokatessa editoitavat kentät erottuvat alleviivatusta tekstistä, ja näihin kirjoitetaan navigoimalla kentän päälle. Kirjoittaminen tehdään laitteen näppäimistöllä, tai valitsemalla jokin ehdotetuista arvoista funktionäppäimillä. (Omicron 2021, 18)



KUVA 18. Testilaitteen näyttö (Omicron 2021, 21, muokattu)

### 5.3 Mittausten valmistelu ja suorittaminen

Mitattavasta virtamuuntajasta kerätään ensin tarvittavat nimellisarvot, jonka jälkeen testi valmistellaan joko tietokoneella, CT Analyzer Suite -ohjelmistolla, tai suoraan laitteen omassa käyttöliittymässä. Tietokoneella tehtävä valmistelu on suositeltavaa, varsinkin jos testattavia virtamuuntajia on useita, jolloin testitiedostojen hallinta ja kopiointi on helppoa. Testitiedoston tiedostomuoto on .xml ja tiedostoja luodaan yksi jokaista virtamuuntajasydäntä kohti.

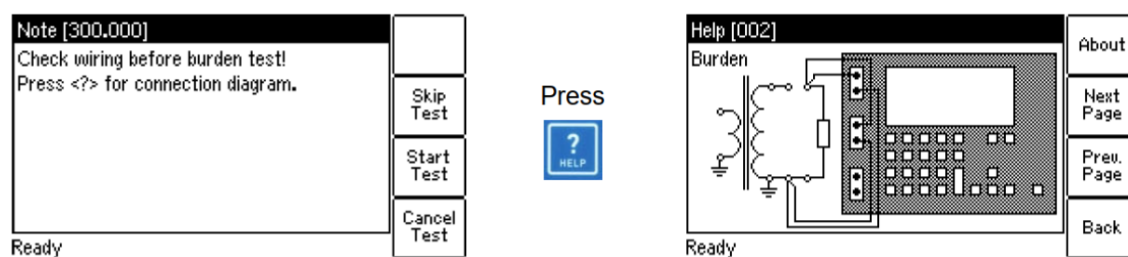
Testitiedostoa luodessa valitaan testipohjaksi joko *CT Test* jolloin testi sisältää mittauskortit toisiokäämin resistanssin, magnetointikäyrän sekä muuntosuhteen mittaukseen. Vaihtoehtoisesti voidaan valita *Advanced CT Test*, jolloin valittavissa on edellisten lisäksi mittauskortit, joilla voidaan suorittaa taakan, ensiön kääminresistanssin ja jäännösmagnetismin mittaukset.

Testitiedostoon määritellään mitattavan kohteen yksilöiviä tietoja *CT-Object* -kortille (CT Analyzer Suite -ohjelmistossa *Preparation*-osiossa) Tiedot ovat osaltaan testiraporttia varten kirjattavia yksilöintitietoja, kuten yritys, sähköasema, vaihe ja

kojetunnustietoja, jotka eivät vaikuta testin suorittamiseen, ja virtamuuntajan nimellisarvoja, joiden mukaan testilaitte määrittelee testin toleranssit, joiden mukaan mittaustulokset joko hyväksytään tai hylätään.

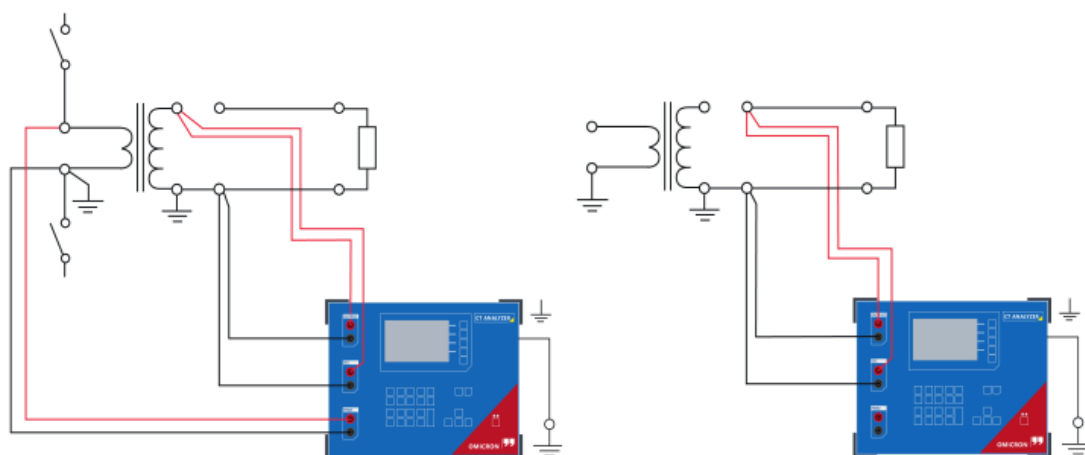
Tietokoneella valmisteltu testitiedosto siirretään joko muistikortilla, tai USB-kaapelilla testilaitteeseen. Tiedostonhallintaa varten CT Analyzer Suite -ohjelmistossa on *File transfer* työkalu, jonka avulla tiedostoja voidaan siirtää tietokoneelta testilaitteeseen tai toisin päin. Tiedostoja voi siirtää myös Windowsin resurssin hallinnan avulla.

Testit voidaan suorittaa joko laitteen oman käyttöliittymän avulla, tai laitteen ollessa yhdistettynä CT Analyzer Suite -ohjelmasta. Testilaitteessa testitiedosto avataan *Load* komennolla, ja valmisteltu testi käynnistetään I/O-painikkeesta. Laitte ohjaa mittauskytkentöjen tekemistä osaltaan laitteen etupaneelin kiinteän grafiikan avulla. Ennen testin suorittamista näytössä näytetään ilmoitusikkuna, joka muistuttaa käyttäjää varmistamaan kytkennän oikeellisuus. Tässä kohtaa mittauskohtaisen oikean kytkennän saa näkyville painamalla näppäimistön *?Help* -painikkeesta.



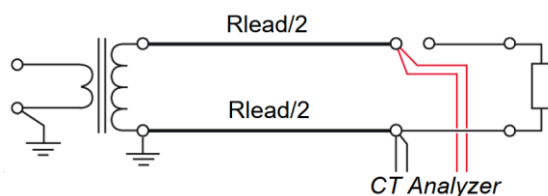
KUVA 19. Mittauskytkennän tarkistus (Omicron 2021, 62)

Jos sama testitiedosto sisältää testikortteja, jossa on eri mittauskytkentä, testilaitte muistuttaa käyttäjää ilmoitusikkunalla muuttamaan mittauskytkentää kesken testin.



KUVA 20. Mittauskytkentä mm. virtamuuntajan muuntosuhde- magnetointikäyrä- ja käämiresistanssimittaukseen (vas.) ja taakkamittaukseen (oik.) (Omicron 2021, 30-31)

Jos mittaukset tehdään muualta kuin suoraan virtamuuntajan toisioliittimiltä (esim. kenttäjakokaapilta tai kojeiston toisiokaapista), on mittauksissa huomiotava mittauspisteen ja virtamuuntajan välisen johdotuksen resistanssi. Testitiedoston *CT-Object*-kortin parametri *Rlead* on tarkoitettu johdotuksen kompensointiin. Kenttään syötetään johdotuksen resistanssi (edestakainen) ohmeina. CT Analyzer Suite -ohjelma sisältää resistanssilaskurin, jolla johdinresistanssi voidaan likimäärin laskea johdinpituuden, -poikkipinnan ja -materiaalin avulla. Laskuri löytyy hakemistosta *Advanced CT test -> Preparation section -> Burden pane*. Kompensointia käytettäessä johdotuksen resistanssin vaikutus lisätään taakkamittaukseen, ja vähennetään toisiokäämin resistanssimittauksesta. (Omicron 2021, 60)



KUVA 21. Johdotuksen kompensointi (Omicron 2021, 60)

Testiä edeltävät ilmoitusikkunat kuitataan joko *Start test* tai painamalla I/O-painiketta uudelleen (tai tarvittaessa *Skip-* tai *Cancel test* jos halutaan perua suoritus). Testin ollessa käynnissä, ja mittauskytkennän jännitteinen I/O -painikkeen status-ledi vilkkuu punaisena. Suoritetun testin indikoimiseksi näytön ala-oikeassa

reunassa on riippulukon kuva, jolloin testikortti pitää tyhjentää *Clear results*-funktio-painikkeesta ennen kuin testin voi suorittaa uudelleen. Suoritettu testi tallennetaan joko *Save* tai *Save As* komennolla muistikortille.

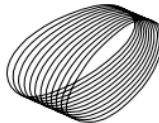
#### **5.4 Raporttien luominen**

Suoritetusta testistä voidaan luoda raportti CT Analyzer Suite -ohjelman *Create Report* komennolla. Aukeavasta ikkunasta voidaan haluttaessa valita samaan raporttiin useita testitiedostoja. Raporttipohjat ovat laajasti muokattavissa omien tarpeiden mukaisiksi *Design Report* toiminnolla.

Työn liitteenä oleva raportti (Liite 1) on tehty ohjelman mukana tulevaan *CT-01 General\_SingleTest* vakiopohjaan, josta on vaihdettu yrityksen logo ohjelman kotinäytön oikeasta yläkulmasta löytyvästä asetusvalikosta (rataan kuva). Samasta asetusvalikosta valitaan myös mm. testi ja raportti tiedostojen oletustallennuspolku ja testien oletusarvot.

## 6 TESTAUS TYÖMAALLA

CT Analyzeria kokeiltiin eräällä sähköasematyömaalla, jonka asiakasvaatimukset virtamuuntajan käyttöönottotarkastuksille olivat sopivat. Käyttöön otettavista virtamuuntajista tuli muuntosuhteen ja suunnan mittausten lisäksi mitata magneetointikäyrä ja toision käämiresistanssi. Mitattava virtamuuntaja on induktiivinen top-core tyyppinen, Arteche CA-123 -mallinen virtamuuntaja ulkokytkeilaitoskäyttöön.

		VIRTAMUUNTAJA CA-123							
Nro		22024490	2022	IEC 61869-2:2012					
Eristystaso:		123/230/550 kV	Öljytyyppi:		NYNAS NYTRO 10XN		<b>artech</b>		
Ipr:		1200A	Icth:	120%	f <sub>N</sub> :	50Hz	Öljyn paino: 40kg		
Ith:		31.5kA	1s	Idyn:	80kA	T :	-40°/+40°		Kokonaispaino: 240kg
MADE IN SPAIN	Toisio	1S1-1S2	2S1-2S2	3S1-3S2	4S1-4S2	5S1-5S2			
	Ipr(A)	1200 600	1200 600	1200 600	1200 600	1200 600			
	I <sub>sr</sub> (A)	1	1	1	1	1			
	Taakka (VA)	5	5	10	10	10			
	Luokka	0.2S	0.2S	5P	5P	5P			
	SF-ALF	5	5	20	20	20			
Tärkeä: HERMEETTISESTI SULJETTU, AVAAMINEN KIELLETTY									

KUVA 22. Testatun virtamuuntajan arvokilpi.

Virtamuuntajassa on viisi sydäntä, josta kaksi ovat keskenään identtiset mittaus-sydämet 1S ja 2S, ja kolme keskenään identtistä suojaussydäntä 3S, 4S ja 5S. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä työssä tarkastellaan vain mittaussydämen 1S, ja suojaussydämen 3S mittaustuloksia.

Testaus valmisteltiin selvittämällä virtamuuntajan nimellisarvot arvokilvestä, suunniteltu taakka ja tarkkuusrajakerroin suunnitteluaineistosta ja valmistajan tehdastarkastuspöytäkirjasta toisiokäämin resistanssi. Lähtötiedot ovat koottu taulukkoon 5.

TAULUKKO 5. Testattujen virtamuuntajasydänten lähtötiedot

Virtamuuntajasydän	1S	3S
<b>Muuntosuhde</b>	600–1200 / 1A	600–1200 / 1A
<b>Mitoitettu taakka</b> (Kaapelointi ja kojeet)	2,1 VA (42 %)	0,56 VA (6 %)
<b>Mitoitettu tarkkuusrajakerroin</b> (todellisella taakalla)	-	334,8
<b>Vaadittu tarkkuusrajakerroin</b> (oikosulkuvirran mukaan)	-	147
<b>Käämiresistanssi Rct 75° (Ω)</b> (Valmistaja pöytäkirjan arvo)	4,298	6,107

Mittaukset tehtiin sähköaseman ulkokentällä, virtamuuntajan toisioliitinkotelosta käsin henkilönostimen avulla. Virtamuuntajan toisioriviliittimet eivät olleet avattavaa mallia, joten liitinkotelolla jouduttiin kytkemään irti sisälle sähköasemarakennuksen relekaappiin menevät johtimet, ja käyttämään mittalaitteen mukana tulevia mittapääadaptoreita ja hauenleukoja mittauskytkennän tekemiseen (Kuva 20). Testaus CT Analyzerilla sujui ongelmitta, ja vaaditut testit suoritettiin hyväksytysti.



KUVA 23. Mittauskytkentöjä toisioliitinkotelossa (Sjödahl 2023).

Testien jälkeen tulokset tuotiin tietokoneelle ja luotiin raportti (Liite 1). Tärkeimmät testitulokset ovat esitetty taulukossa 6. Mittaustuloksista näemme, että suojaussydämen käännejännite on yli kymmenkertainen mittaussydämen vastaavaan. Asennustarkastusvaiheen mittauksen yksi tarkoitus on varmistaa, ettei suojaus- ja mittaussydämet ole epähuomiossa kytketty ristiin. Suojaussydämen käännejännite on mittaussydämen käännejännitettä huomattavasti korkeampi, jolloin voimme päätellä, ettei virtamuuntajasydämet ole ristissä.

TAULUKKO 6. Testitulokset

Virtamuuntajasydän	1S	3S
<b>Muuntosuhde</b> Nimellinen taakka	600 / 1.0 $\varepsilon = -0,0011\%$	600 / 0,9986 $\varepsilon = -0,1410\%$
<b>Taakka</b>	1,68 VA (34 %)	0,54 VA (5 %)
<b>Käännejännite</b>	21,459 V	275,593 V
<b>Mittaus- / tarkkuusrajakerroin</b> (todellisella taakalla)	FS = 4,79	ALF>53,30
<b>Käämiresistanssi <math>R_{ct} 75^\circ (\Omega)</math></b>	4,220	6,159

CT Analyzer laskee mittarivarmuus- ja tarkkuusrajakertoimet nimellisellä, ja todellisella taakalla. Suojaussydämen tarkkuusrajakertoimen mittaustulos todellisella taakalla on >53,30. CT Analyzer ei käytä työssä aiemmin esiteltyä nimellistaakan ja todellisen taakan suhdelukuun perustuvaa kaavaa (12) tarkkuusrajakerroimen laskemiseen, vaan sijaiskytkennän poikittaishaaran yli vaikuttavaa magnetointijännitettä  $V_{core}$  kaavan (14) mukaisesti,

$$ALF_a = \frac{V_{core}}{I_{sr} \cdot (R_{CT} + Z_B)} \quad (14)$$

missä,  $I_{sr}$  on nimellistoisiovirta,  $R_{CT}$  on toisiokäämin resistanssi, ja  $Z_B$  tosiopiirin taakan mitattu impedanssi. Mitatun magnetointikäyrän viimeisestä mitatusta pisteestä laskettu tarkkuusrajakerroin ilmoitetaan testituloksena. (Matt 2023)

Suojaussydämen taakka on lähellä mitoitettua. Mittaussydämen toteutunut taakka on hieman pienempi kuin suunniteltu, mutta kuitenkin yli vaaditun 25 %. Muuntosuhde ja suunnan mittaus ovat oikein. Lämpötilakompensoidut toisiokäämien resistanssit ovat tehdastestien tuloksiin verrattuna lähes identtiset.



## 7 POHDINTA

CT Analyzer mittaa virtamuuntajan muuntosuhteen, magnetointikäyrän ja toisio-  
käämin resistanssin mittauksen noin puolessa minuutissa. Vaikka tämän lisäksi  
mitataan toisiotaakka, jolloin mittauskytkentää joudutaan vaihtamaan kesken mit-  
tausten, niin mittaukseen menee aikaa vain hieman yli minuutti. Mittaustulokset,  
virheinen ja todellisten tarkkuusraja- ja mittarivarmuuskerrointen osalta ovat pal-  
jon perinteisillä menetelmillä saatuja mittaustuloksia informatiivisemmat. Testi-  
laite myös demagnetoi muuntajasydämen jokaisen suoritettun testin jälkeen, mikä  
poistaa mahdollisuuden virranmittauksen virhetoimintaan sydänmateriaalin tes-  
tauksesta johtuvan jäännösmagnetismin vuoksi. (Omicron 2022, 17)

Työn aikana tehtiin kuitenkin muutama huomio, joiden vuoksi laite ei välttämättä  
sovi ainoaksi virtamuuntajan testilaitteeksi. Ensimmäinen liittyy laitteen kykyyn  
syöttää virtaa. Osana muuntosuhteen tarkastusta tarkistetaan itse muuntosuh-  
teen lisäksi kytkettyjen mittauskojeiden skaalaukset lukemalla mittausarvot suo-  
jareleista ja energiamittareista. Tällöin varmistetaan myös, että kaikki avattavat  
riviliittimet ovat mittausten jälkeen suljettu ja virtapiiri on ehjä. CT Analyzerilla voi-  
daan syöttää virtaa manuaalisesti *CT-Quick* -testikortilla, mutta virtalähde on ra-  
joitettu viiteen ampeeriin. Varsinkin suuremmilla muuntosuhteilla, riippuen mit-  
tauskojeen resoluutiosta voi olla haasteita saada mittausarvo näkyviin. Skaalauk-  
set voidaan kuitenkin tarvittaessa tarkistaa myös CT Analyzerillä, syöttämällä vir-  
taa virtamuuntajalta toisiopiiriin manuaalisesti, esimerkiksi taakkamittauksen jäl-  
keen samalla mittauskytkennällä.

Toinen huomio on, että yksinään CT Analyzerilla polariteettia ei voida mitata muu-  
alta kuin virtamuuntajan välittömästä läheisyydestä, koska laitteen on samalla ol-  
tava kytkettynä ensiöliittimiin. Pulssausmenetelmällä mitatessa polariteetin voi  
tarkistaa mistä kohtaa toisiopiiriä tahansa yleismittarilla. Tähän on kuitenkin ole-  
massa valmis ratkaisu. Omicronin valmistamalla CPOL2 -lisälaitteella, voidaan  
tarkistaa polariteetti useasta kohtaa virtapiiriä CT Analyzerin *Polarity check*  
-mittaustoiminnolla. (Omicron 2021, 161)

Testilaitte sopii hyvin käyttötarkoitukseensa, virtamuuntajan ominaisuuksien ja standardinmukaisuuden tarkastamiseen. Vaikka laitteella on rajoitteita, voidaan sillä kuitenkin saavuttaa huomattavaa ajansäästöä erityisesti magnetointikäyrien mittauksissa. CPOL2 -lisäosalla se olisi vielä astetta parempi testilaitte sähköasematyömaalla suoritettaviin virtamuuntajan asennustarkastuksiin mainittujen polariiteettimittausten osalta.

Työn tavoite oli luoda pikakäyttöohje CT Analyzerille madaltamaan kynnystä käyttää laitetta. Käyttöohje on julkaistu yrityksen sisällä, ja käyttökoulutuksia on pidetty henkilöstölle. Käyttöohje sisältää pääpiirteittäin tämän työn viidennessä kappaleessa läpikäydyn mittausten valmistelun, suorittamisen, ja raporttien luonnin. Ohjeessa on myös mittaustulosten tulkintaa helpottava lyhyt teoriaosio, jossa käydään läpi virtamuuntajien nimellisarvoja ja termejä, sekä esitellään testilaitteen toimintaa.

Työ oli kokonaisuudessaan mielenkiintoinen ja opettava. Virtamuuntajien teoriasta hankittua osaamista voi hyödyntää myös laajemmin muun tyyppisissä muuntajasovelluksissa. Virtamuuntajaan teoria osoittautui odotettua laajemmaksi kokonaisuudeksi, jossa lopulta piti rajata tarkemmin mitä kaikkea tässä työssä halutaan esittää. Vaihtoehtoisia suuntia, joihin työtä olisi voinut laajentaa oli monia. Virtamuuntajan erilailla käyttäytyvien sydänten fyysiset eroavaisuudet, transientti- ja tasakomponentin sisältävän virran vaikutus virtamuuntajaan ovat esimerkkejä aihepiireistä, jotka jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Opinnäytetyö kattaa mielestäni kuitenkin oleellimmat virtamuuntajien testaukseen liittyvät asiat, ja lähdemateriaalista voi tarvittaessa hankkia lisää tietoa niin virtamuuntajista, näiden testauksesta kuin Omicron CT Analyzer -testilaitteesta.

## LÄHTEET

ABB Application Note Calculation of the Current Transformer Accuracy Limit Factor 1MRS 755481 EN 11.2004. Vaasa. Luettu 1.8.2023 Osoitteesta:[https://library.e.abb.com/pulic/194811e319ce2bb7c2256f9e00324a2f/applicationCT\\_accuracylimitfactorENa.pdf](https://library.e.abb.com/pulic/194811e319ce2bb7c2256f9e00324a2f/applicationCT_accuracylimitfactorENa.pdf)

ABB Datalehti KOLMA, KOLA Indoor cable current transformers 1VLC000761 Rev.2, en 2022.10.12 Luettu 31.7.2023 Osoitteesta: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/instrument-transformers-and-sensors-id/products/indoor-current-transformers/cable/indoor-current-transformer-cable-kolma>

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa.

Arteche Datasheet CA Series – HV Current Transformers. Luettu 31.7.2023 Osoitteesta: <https://www.arteche.com/en/ca-series-hv-current-transformers>

Arteche User Manual High Voltage Instrument Transformers CA/UT/KA V: A1 24/11/2022 Luettu 31.7.2023

Osoitteesta: <https://www.arteche.com/en/ca-series-hv-current-transformers>

Arteche Brochure Instrument transformers. Medium voltage indoor Version A7 Luettu 31.7.2023 Osoitteesta: <https://www.arteche.com/en/current-transformers-0>

Elovaara, J & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. 1. painos. Helsinki: Otatiето Oy

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Korpela, A. Virtapiirien mallintaminen, keskinäisinduktanssi luentomateriaali. 22.1.2021 Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere

Lehesvuo, V. ABB Distribution Solutions. 2019. Relesuojauksen peruskurssi 11.4.2019 Tampereella, Inspecta

Matt, F. Technical Support Engineer, Omicron E. Sähköpostiviesti 7.8.2023.

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. 2. painos. Helsinki: Otatiето Oy

Omicron electronics GmbH. 2021. CT Analyzer User Manual – Manual Version: ENU 1039 05 05 : OMICRON electronics GmbH. VEO Oy sisäinen.

Omicron electronics GmbH. 2022. Diagnostic testing of instrument transformers L4138 : OMICRON electronics GmbH. Luettu 19.6.2023 Osoitteesta: <https://www.omicronenergy.com/download/document/5DA2921F-9691-4CCF-A1CE-C7687789B015/>

Porrelli, T. 2020. Time-optimized CT diagnostics with CT Analyzer. OMICRON Academy koulutuswebinaari. Julkaisija OMICRON electronics GmbH 19.5.2020. Osoitteesta: <https://my.omicronenergy.com/training/detail/time-optimized-current-tranformer-diagnostics-with-ct-analyzer-1/2251/>

Sjövall, K. & Findell M. 2009. Instrument Transformers Application Guide Edition 3. Ludvika, Sweden.

VEO. 2020. Koestusohje, virtamuuntajat. VEO Oy sisäinen

VEO. n.d. Yritys. Verkkosivu. Viitattu 4.8.2023.  
<https://veo.fi/fi/tietoa-meista/yritys/>

## LIITTEET

## Liite 1. CT Analyzer -testiraportti

1(4)

Asset		Object		Location	
Ipn	600.0 A	Manufacturer	Arteche	Company	VEO Oy
Isn	1.0 A	Type	CA-123	Country	Finland
Rated burden	5.0 VA /0.80	Serial number	22024490/1	Station	
Operating burden	1.68 VA /1.00	Core	1	Feeder	
Standard	IEC 61869-2	Tap		Phase	
Application	Metering	Optional		IEC-ID	
Class	0.2S	Comment			
Frequency	50.0 Hz				
Rct max					
FS	5.0				
Ext Ipn	120 %				

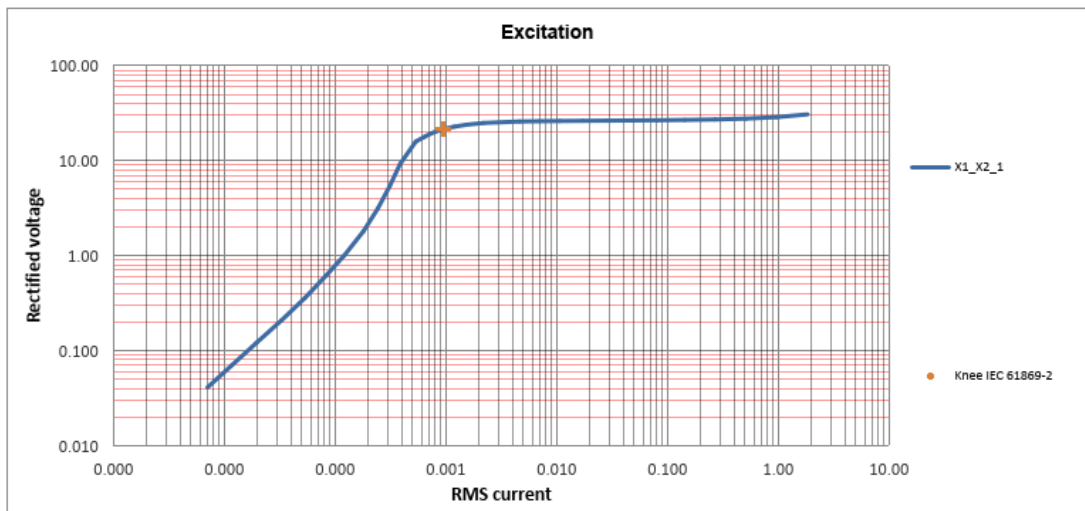
Secondary winding resistance		Primary winding resistance	
R-meas (25.0 °C)	3.538 Ω	R-meas (25.0 °C)+Rlead	3.538 Ω
R-ref (75.0 °C)	4.220 Ω	R-ref (75.0 °C)+Rlead	4.220 Ω
		R-meas	
		R-ref	

Burden			
Burden	1.68 VA	cos φ:	1.000
V-meas	1.661 V	Z	1.675 Ω
		I-meas	0.991 A

Excitation				
Ls	0.001990 H	Lm	84.96681 H	
Kr	62.98 %	Results at rated burden (5.00 VA)	Results at operating burden (1.68 VA)	
Standard	IEC 61869-2	FS	3.30	
V-kn	21.459 V	Fsi	3.11	
I-kn	0.0009 A	eci (@ FS=5)	> 36.704 %	
		Ts	10.336 s	
			FS	4.79
			Fsi	4.66
			eci (@ FS=5)	> 36.704 %
			Ts	14.412 s

Ratio				
Turns ratio	599.7945	Results at rated burden (5.00 VA)	Results at operating burden (1.68 VA)	
et	-0.0343 %	Ratio	600.0 : 1.0	
Polarity	OK	ε	-0.0011 % Δφ	
		ec	0.0134 %	
			Ratio	600.0 : 1.0001
			ε	0.0144 % Δφ
			ec	0.0282 %

Residual magnetism	
Residual flux	
Residual magnetism	



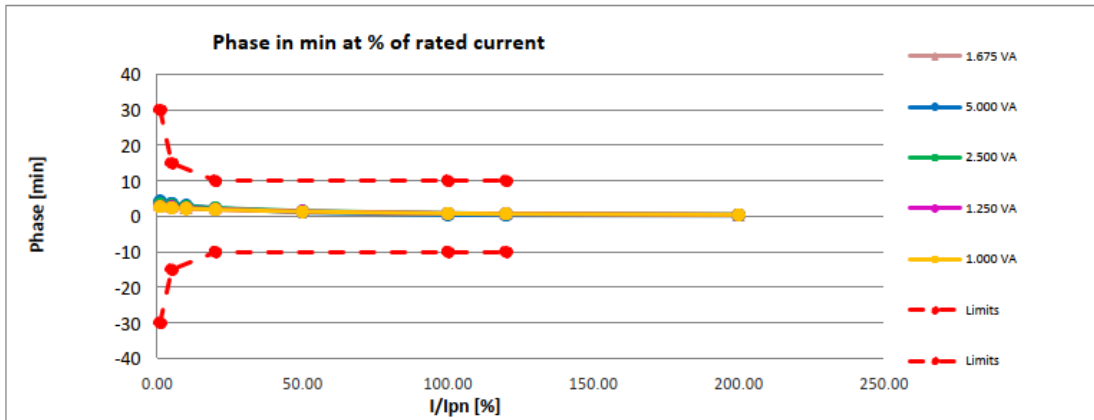
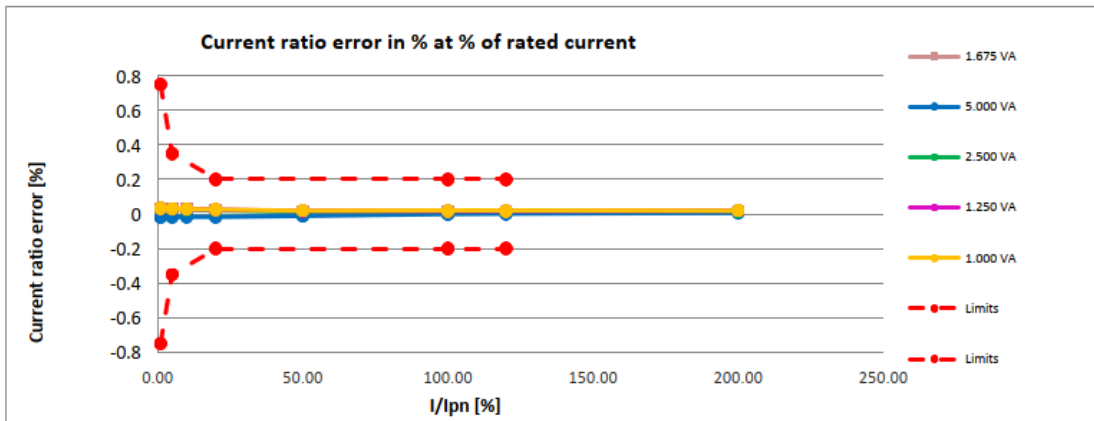
2(4)

Current ratio error in % at % of rated current

VA/cos φ	1.00 %	5.00 %	10.00 %	20.00 %	50.00 %	100.00 %	120.00 %	200.00 %		
1.68/1.00	0.0327	0.0294	0.0274	0.0231	0.0157	0.0144	0.0151	0.0174		
5.00/0.80	-0.0186	-0.0178	-0.0165	-0.0175	-0.0113	-0.0011	0.0014	0.0065		
2.50/1.00	0.0325	0.0285	0.0259	0.0202	0.0117	0.0120	0.0129	0.0157		
1.25/1.00	0.0333	0.0303	0.0284	0.0248	0.0178	0.0162	0.0164	0.0184		
1.00/1.00	0.0334	0.0306	0.0289	0.0257	0.0190	0.0171	0.0171	0.0190		

Phase in min at % of rated current

VA/cos φ	1.00 %	5.00 %	10.00 %	20.00 %	50.00 %	100.00 %	120.00 %	200.00 %		
1.68/1.00	3.0501	2.7565	2.4836	2.1098	1.3918	0.8329	0.7142	0.4613		
5.00/0.80	4.2439	3.6520	3.0803	2.2942	1.0970	0.4578	0.3505	0.2847		
2.50/1.00	3.5017	3.1461	2.7970	2.3210	1.4692	0.8551	0.7274	0.5018		
1.25/1.00	2.8144	2.5540	2.3192	1.9885	1.3475	0.8262	0.7067	0.4419		
1.00/1.00	2.6758	2.4338	2.2207	1.9097	1.3177	0.8187	0.6997	0.4344		



3(4)

Asset		Object	Location
Ipn	600.0 A	Manufacturer	Arteche
Isn	1.0 A	Type	CA-123
Rated burden	10.0 VA /0.80	Serial number	22024490/1
Operating burden	0.54 VA /1.00	Core	3
Standard	IEC 61869-2	Tap	Optional
Application	Protection	Comment	
Class	5P		
Frequency	50.0 Hz		
Rct max			
ALF	20.0		
Ts			

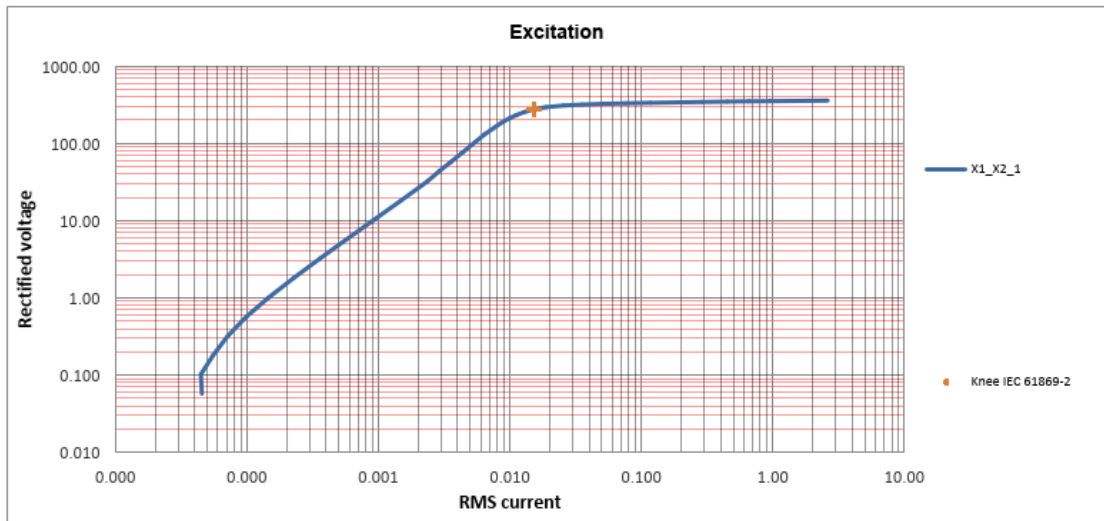
Secondary winding resistance		Primary winding resistance	
R-meas (25.0 °C)	5.164 Ω	R-meas (25.0 °C)+Rlead	5.164 Ω
R-ref (75.0 °C)	6.159 Ω	R-ref (75.0 °C)+Rlead	6.159 Ω

Burden			
Burden	0.54 VA	cos φ:	1.000
V-meas	0.546 V	Z	0.543 Ω
		I-meas	1.004 A

Excitation			
Ls	0.003500 H	Lm	67.885115 H
Kr	91.18 %	Results at rated burden (10.00 VA)	
Standard	IEC 61869-2	ALF	> 23.69
V-kn	275.593 V	ALFi	22.95
	I-kn	0.0152 A	
		eci (@ ALF=20)	0.149 %
		Ts	4.795 s
		eci (@ ALF=20)	0.060 %
		Ts	10.129 s

Ratio			
Turns ratio	600.1682	Results at rated burden (10.00 VA)	
et	0.0280 %	Ratio	600.0 : 0.9986
Polarity	OK	ε	-0.1410 % Δφ 1.70 min
		ec	0.1495 %
		Results at operating burden (0.54 VA)	
		Ratio	600.0 : 0.9994
		ε	-0.0634 % Δφ 1.54 min
		ec	0.0777 %

Residual magnetism	
Residual flux	
Residual magnetism	



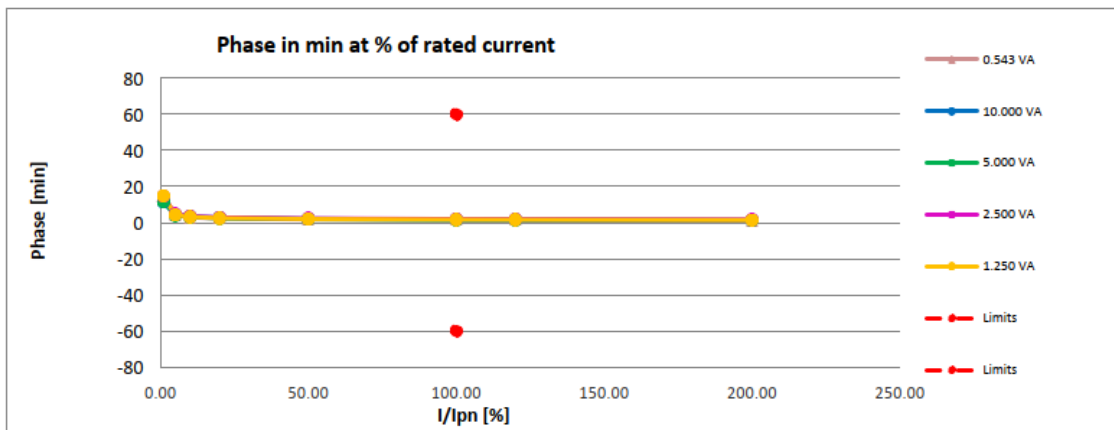
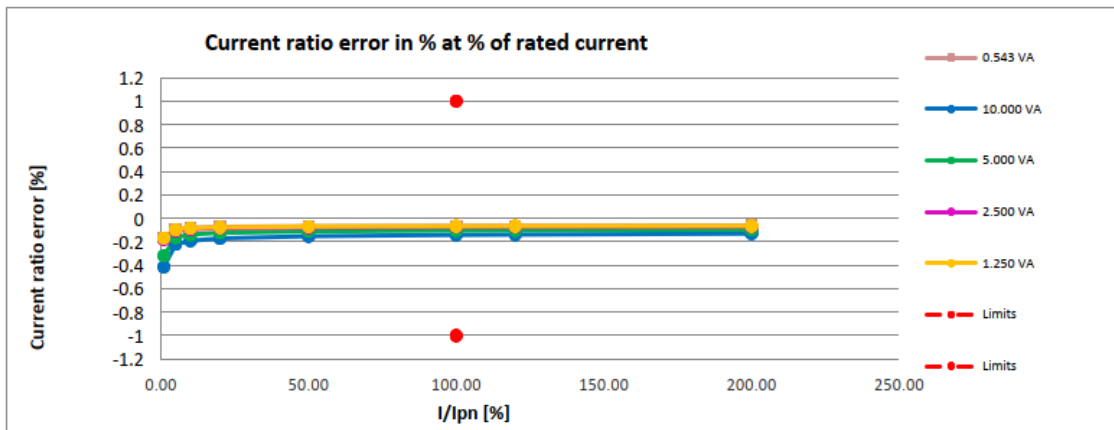
4(4)

Current ratio error in % at % of rated current

VA/cos φ	1.00 %	5.00 %	10.00 %	20.00 %	50.00 %	100.00 %	120.00 %	200.00 %		
0.54/1.00	-0.1662	-0.0928	-0.0798	-0.0721	-0.0661	-0.0634	-0.0628	-0.0613		
10.00/0.80	-0.4140	-0.2217	-0.1908	-0.1706	-0.1523	-0.1410	-0.1383	-0.1298		
5.00/0.80	-0.3186	-0.1632	-0.1379	-0.1228	-0.1101	-0.1031	-0.1013	-0.0966		
2.50/1.00	-0.1795	-0.1062	-0.0924	-0.0839	-0.0772	-0.0741	-0.0734	-0.0714		
1.25/1.00	-0.1676	-0.0974	-0.0843	-0.0763	-0.0700	-0.0672	-0.0666	-0.0649		

Phase in min at % of rated current

VA/cos φ	1.00 %	5.00 %	10.00 %	20.00 %	50.00 %	100.00 %	120.00 %	200.00 %		
0.54/1.00	14.7605	4.1002	2.9002	2.3002	1.8154	1.5436	1.4835	1.3173		
10.00/0.80	11.4363	4.4121	3.4560	2.8103	2.1397	1.7047	1.5913	1.2879		
5.00/0.80	11.7840	4.0812	3.0629	2.4788	1.9395	1.5947	1.5136	1.2892		
2.50/1.00	14.6301	4.7199	3.5215	2.8511	2.2807	1.9461	1.8647	1.6524		
1.25/1.00	14.8356	4.2967	3.1338	2.5076	1.9857	1.6947	1.6272	1.4439		





Liite 2. Käyttöohje

Liite poistettu julkaistavasta työstä