



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Joni Rytivaara

# **Eräs oikosulkumoottorin tyyppitestilaitteiston käyttöönotto**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö  
Diplomityö  
Sähkötekniikka

Vaasa 2022

---

**VAASAN YLIOPISTO**
**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Joni Rytivaara
<b>Tutkielman nimi:</b>	Eräs oikosulkumoottorin tyyppitestilaitteiston käyttöönotto
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka
<b>Valvoja:</b>	Timo Vekara
<b>Tarkastaja:</b>	Henrik Tarkkanen
<b>Ohjaaja:</b>	Jari-Pekka Avantola
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2022
	<b>Sivumäärä: 83</b>

---

**TIIVISTELMÄ:**

Diplomityö tehdään ABB oy:n toimeksiannosta Vaasan moottoritehtaalla. Työn aiheina ovat uuden tyyppitestilaitteiston käyttöönotto testauskapasiteetin kasvattamiseksi sekä tyyppitestauksessa suoritettavan kylmävastusmittauksen automatisoiminen työturvallisuuden parantamiseksi. Käyttöönotto kattaa tyyppitestilaitteiston turvallisen käytön varmistamisen, testilaitteiston kyvykkyyden selvittämisen, mittaustarkkuuden varmentamisen sekä mittausluotettavuuden tutkimisen. Tavoitteena on todentaa, että uudella tyyppitestilaitteistolla voidaan suorittaa hyväksyttäviä tyyppitestejä. Kylmävastusmittauksen automatisoinnissa tavoitteena on selvittää, miten manuaalisesti mikro-ohmimittarilla suoritettava kylmävastusmittaus saataisiin tietokoneelta ohjatuksi mittaukseksi ja mittaustulokset tulostumaan automaattisesti testiraportiksi. Tyyppitestilaitteiston turvallisen käyttämisen varmistamiseksi laaditaan diplomityöstä erilliset käyttöohjeet testikentälle. Tyyppitestilaitteiston kyvykkyyden selvittämiseksi suoritetaan koeajoja. Mittaustarkkuuden varmentamista varten selvitetään standardin ISO/IEC 17205:2017 vaatimukset koskien testaus- ja kalibroitilaboratorioiden pätevyyttä suorittaa mittauksia. Mittausluotettavuuden tutkimiseksi suoritetaan ristiintestauksia käyttäen toimeksiantajan kalibrointimoottoreita. Ristiintestauksessa suoritetaan tyyppitesti kalibrointimoottorilla varmennetulla käytössä olevalla sekä uudella testaamattomalla tyyppitestilaitteistolla ja tuloksia vertaillaan keskenään. Kylmävastusmittauksen automatisointia varten laaditaan selvitys ja sen perusteella suoritetaan demonstraatio.

Ristiintestauksien perusteella voidaan todeta, että uudella tyyppitestilaitteistolla saadaan onnistuneesti hyväksyttäviä tyyppitestituloksia, vaikka häviötehokomponenttien välille syntyikin eroja eri tyyppitestilaitteistoilla. Käytettävä epäsuora menetelmä oikosulkukoneen hyötysuhteen määrittämiseksi kompensoi osin ristiintestauksessa esiintyviä häviötehokomponenttien eroavaisuuksia ja täten uudella tyyppitestilaitteistolla päästään yleisesti samoihin suoritusarvoihin kuin muilla tyyppitestilaitteistoilla. Uudella tyyppitestilaitteistolla esiintyvien suurempien rautahäviöiden takia suoritettiin kuitenkin ylimääräisiä tyyppi- ja tyhjäkäyntitestejä, joilla saatiin poissuljettua uuden tyyppitestilaitteiston tehoanalyysointin ja virransyöttöpiirien vaikutukset poikkeaviin rautahäviöihin. Työssä jäi kuitenkin tutkimatta inhimillisten tekijöiden vaikutus ristiintestauksien tuloksiin. Demonstraatio kylmävastusmittauksesta releohjauksen avulla onnistui ja täten toimeksiantaja voi edetä kylmävastusmittauksen automatisoinnissa. Demonstraation perusteella voidaan myös todeta käytettävien mittapäiden vaikuttavan merkittävästi mikro-ohmimittarin mittaustuloksiin. Täten mikro-ohmimittarilla mitatessa pieniresistanssisia staattorikäänin vaiheväliden vastusarvoja on mittapäiden valinnassa oltava erityisen huolellinen.

---

**AVAINSANAT:** Tyyppitestaus, käyttöönotto, oikosulkumoottori, mittausluotettavuus, hyötysuhde

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of technology and innovations**

**Author:** Joni Rytivaara  
**Title of the Thesis:** A squirrel cage induction motor type test equipment commissioning  
**Degree:** Master of Science  
**Major:** Electrical Engineering  
**Supervisor:** Timo Vekara  
**Evaluator:** Henrik Tarkkanen  
**Instructor:** Jari-Pekka Avantola  
**Year:** 2022 **Number of pages:** 83

---

**ABSTRACT:**

This thesis is commissioned by ABB oy at the Vaasa motor factory. The topics of the thesis are the introduction of new type test equipment to increase testing capacity and the automation of cold resistance measurement in type testing to improve occupational safety. Commissioning covers ensuring the safe use of the type test equipment, determining the capability of the test equipment, verifying the measurement accuracy, and examining the measurement reliability. The aim is to verify that the new type test equipment can perform acceptable type tests. In automation of cold resistance measurement, the aim is to find out how a cold resistance measurement performed with a micro-ohmmeter can be obtained from a computer as a controlled measurement and the measurement results can be automatically printed out as a test report. To ensure the safe use of the type test equipment, separate operating instructions are prepared for the test field. Test runs are performed to determine the capability of the type test equipment. For the verification of measurement accuracy, the requirements of ISO / IEC 17205: 2017 regarding the competence of testing and calibration laboratories to perform measurements shall be clarified. To investigate the reliability of the measurements, cross-tests are performed using the client's calibration motors. In cross-testing, a type test is performed with existing and new untested type test equipment with a calibration motor and the results are compared. To automate the cold resistance measurement, a report is prepared, and a demonstration is performed on the basis of it.

Based on the cross-tests, it can be stated that the new type test equipment successfully obtains acceptable type test results, although there were differences between the power loss components with different type test equipment. The indirect method used to determine the efficiency of the squirrel cage induction motor partially compensates for the differences in the power dissipation components in the cross-test, and thus the new type test equipment generally achieves the same performance values as other type test equipment. However, due to the higher iron losses in the new type test equipment, additional type and no-load tests were performed to exclude the effects of the new type test equipment power analyser and power supply circuits on abnormal iron losses. However, the effect of human factors on the results of cross-testing was not studied. The demonstration of the cold resistance measurement by means of relay control was successful and thus the client can proceed with the automation of the cold resistance measurement. Based on the demonstration, it can also be stated that the measuring heads used significantly affect the measurement results of the micro-ohmmeter. When measuring the low resistance values of the stator winding phase intervals with a micro-ohmmeter, special care must be taken in the selection of the probes.

---

**KEYWORDS:** Type testing, commissioning, squirrel cage induction motor, measurement reliability, efficiency

## Sisällys

1	Johdanto	11
1.1	Tutkimuksen rakenne	11
1.2	Tutkimuksen rajaus	12
2	Oikosulkumoottorin häviöt ja hyötysuhteen määrittäminen	13
2.1	Hyötysuhde	17
2.2	Käämityksissä tapahtuvat häviöt	20
2.3	Kitka- ja tuuletinhäviöt	22
2.4	Rautahäviöt	23
2.5	Lisähäviöt	24
2.6	Hyötysuhteen määrittäminen	26
3	Oikosulkumoottorin tyyppitestaus	28
3.1	Silmämääräinen tarkistus	28
3.2	Kylmävastusmittaus	29
3.3	Käynnistystesti	29
3.4	Momenttikäyrätesti	30
3.5	Lämpöajotesti	30
3.6	Ylikuormitustesti	30
3.7	Osakuormatesti	31
3.8	Oikosulkutesti	31
3.9	Tyhjäkäyntitesti	31
3.10	Tärinämittaus	32
3.11	Eristyskoestus	32
3.12	Eristysvastusmittaus	33
4	Mittausvirhe	34
5	Tyyppitestilaitteiston käyttöönotto	36
5.1	Testipaikkojen historia	36
5.2	Testipaikka TP23	37
5.3	Testilaitteiston kyvykyys	45

5.4	Testilaitteiston mittaustarkkuuden varmentaminen	45
5.5	Ristiintestaus	47
6	Mittaustulokset ristiintestauksin	48
6.1	Mittaustulokset M3BP 200MLA 6 -moottorilla	48
6.2	Mittaustulokset M3BP 200MLA 2 -moottorilla	51
6.3	Mittaustulokset M3AA 225SMD 2 -moottorilla	53
6.4	Mittaustulokset M3GP 250SMA 2 -moottorilla	55
6.5	Lisätestien mittaustulokset	56
7	Kehityselvitys vastusmittauksien automatisoinnille	61
7.1	Kylmävastusmittaus testipaikalla TP23	61
7.2	Työjärjestys manuaalisessa kylmävastusmittauksessa	61
7.3	Työjärjestys automatisoidussa kylmävastusmittauksessa	62
7.4	Automatisoinnin toteuttamiseen liittyvät haasteet	65
7.5	Automatisointiin sopiva mikro-ohmimittari ja rele	65
7.6	Vaihevälin vastusarvon mittaus releohjauksilla mikro-ohmimittarilla	67
7.7	Testituloksien kirjaaminen valmiiksi testiraportiksi	73
8	Johtopäätökset	74
	Lähteet	77
	Liite. Hongfa HFE82P-20-datalehti	80

## Kuvat

<b>Kuva 1.</b> Oikosulkumoottorin rakenne (mukaillen ABB oy, 2014).	13
<b>Kuva 2.</b> Häkkikäämityn roottorin osat (mukaillen Inst Tools, 2020).	14
<b>Kuva 3.</b> 4-napaisten vaihtovirtamoottoreiden IE-hyötysuhdeluokkien minimirajat 0,12–1000kW:n tehoilla 50Hz:n verkossa (mukaillen ABB oy, 2014).	18
<b>Kuva 4.</b> Kitka- ja tuuletinhäviöiden $P_{fw,0}$ määrittäminen tyhjäkäyntitestistä (Avantola, 2020).	22
<b>Kuva 5.</b> Rautahäviöiden $P_{Fe}$ määrittäminen tyhjäkäyntitestistä (Avantola, 2020).	24
<b>Kuva 6.</b> Vakion B:n vaikutus lisähäviöihin (IEC, 2014).	25
<b>Kuva 7.</b> Prosessikaavio ABB:n tyyppitestauksesta (ABB oy, 2021).	28
<b>Kuva 8.</b> Tärinätestin mittauspisteet esitettynä nuolilla (ABB oy, 2018c).	32
<b>Kuva 9.</b> Eristyskoestuksen mittauskytkentä U-vaiheesta, kun tähtipiste on käytettävissä (ABB Oy, 2018b).	33
<b>Kuva 10.</b> Staattorikäänin eristysvastusmittauksen mittauskytkentä (ABB oy, 2018b).	33
<b>Kuva 11.</b> Testipaikan TP23 jakelukaavio.	38
<b>Kuva 12.</b> Testipaikan TP23 jarrumoottori.	39
<b>Kuva 13.</b> Testipaikan TP23 momenttianturi, johon testattava moottori sekä jarrumoottori sovitetaan.	39
<b>Kuva 14.</b> Testipaikan TP23 alusta, johon testattava moottori kiinnitetään. Kuvassa moottori on kiinnitettynä.	40
<b>Kuva 15.</b> Testipaikan TP23 pääpiirikaavio virta- ja jännitemittauksineen.	41
<b>Kuva 16.</b> Automaation käyttöliittymän pääikkuna.	42
<b>Kuva 17.</b> Motlab:n käyttöliittymä.	43
<b>Kuva 18.</b> Fluke Norma 4000 -tehoanalysaattori.	44
<b>Kuva 19.</b> Lämpötilapiirturin lämpötilakäyrät erään oikosulkumoottorin eri kohdista.	44
<b>Kuva 20.</b> Testipaikan TP23 rakenne automatisoidussa vastusmittauksessa.	64
<b>Kuva 21.</b> Vastusmittauksen kytkentäkaavio U-V vaihevälillä ilman releitä.	67
<b>Kuva 22.</b> Vastusmittauksen kytkentäkaavio nelijohdinmenetelmällä.	68
<b>Kuva 23.</b> Vastusmittauksen kokoonpano releohjauksella.	69

**Kuva 24.** Vaihevälin resistanssin mittaus U-V välistä mutterilla kiristetyillä kaapelikengillä. 71

**Kuva 25.** IOR-tankokontaktori (ABB oy, 2015). 72

## Taulukot

**Taulukko 1.** Oikosulkumoottorin teoreettiset tahtinopeudet napapariluvuilla 1–6. 16

**Taulukko 2.** Hyötysuhdeluokkavaatimukset eräissä maissa ja alueissa standardin IEC 60034-30-1 verrattuna (ABB oy, 2014; ABB oy, 2018a; ABB oy, 2020a). 19

**Taulukko 3.** IEC 60034-2-1 -standardin mukaiset testausmenetelmät oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittämiseksi (IEC, 2014). 20

**Taulukko 4.** Standardin IEC60034-14 mukaiset värinätestin maksimi värinärajat (IEC, 2014). 32

**Taulukko 5.** Mittalaitteen, mittaajan, työkappaleen ja ympäristötekijöiden vaikutus mittavirheiden syntyyn. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 96–97) 35

**Taulukko 6.** Generaattorin teoreettiset nimellisvirrat. 46

**Taulukko 7.** Testimoottorin teoreettiset nimellisvirrat 90 kW:n maksimiteholla. 46

**Taulukko 8.** Generaattorin todennetut maksimivirrat. 46

**Taulukko 9.** Tarkkuusvaatimukset tyyppitestauksessa (IEC 2014; IEC 2016). 47

**Taulukko 10.** M3BP 200MLA 6 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP2 ja TP23. 49

**Taulukko 11.** M3BP 200MLA 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP21 ja TP23. 51

**Taulukko 12.** M3AA 225SMD 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP0 ja TP23. 53

**Taulukko 13.** M3GP 250SMA 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP2 ja TP23. 55

**Taulukko 14.** Tyyppitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla eri virran mittauspiireillä. 57

**Taulukko 15.** TP23 Virtamuuntajan tyhjäkäyntitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla. 58

<b>Taulukko 16.</b> TP23 virta-anturin tyhjäkäyntitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla.	58
<b>Taulukko 17.</b> Virran mittaussiirien välisten tyhjäkäyntitestien tuloksien eroavaisuudet.	59
<b>Taulukko 18.</b> Tyhjäkäyntitestin tulokset M3JP 225SMB 2 -moottorilla eri tehoanalysointilaitteilla.	60
<b>Taulukko 19.</b> Cropico Microhmeter 5000 -mittausvirrat eri vastusalueilla (Cropico, 2011).	67
<b>Taulukko 20.</b> Vaihevälien vastusarvojen mittaustulokset eri mittapäillä.	70
<b>Taulukko 21.</b> Vaihevälien vastusarvojen mittaustulokset mittapäinä kaapelikengät.	71

### Kreikkalaiset symbolit

$\theta_c$	Ilman lämpötila moottorin ilmanoton läheisyydessä
$\theta_w$	Käämityksen lämpötila moottorin nimelliskuormalla

### Muut symbolit

$\gamma$	Korrelaatiokerroin
$A$	Kulmakerroin
$B$	Leikkauspiste
$\varphi$	Vaiheensiirtokulma
$E_r$	Roottorikäänin lähdejännite
$f$	Taajuus
$h$	Akselikorkeus
$I$	Sähkövirran voimakkuus
$i$	Kuormapisteiden lukumäärä
$I_0$	Tyhjäkäyntivirta
$I_1$	Staattorin vaihevirtojen keskiarvo
$I_k$	Oikosulkuvirta
$I_n$	Nimellisvirta
$I_r$	Roottorivirta



$I_s$	Staattorin vaihevirta
$k_\theta$	Resistanssin lämpötilakertoimen arvo
$n$	Roottorin pyörimisnopeus
$n_s$	Staattorikentän pyörimisnopeus
$\eta$	Hyötysuhde
$p$	Sähkömoottorin napaluku
$P_0$	Moottorin tyhjäkäyntiteho
$P_1$	Moottorin sähköteho
$P_{1,\theta}$	Moottorin sähköteho korjattuna 25 °C lämpötilaan
$P_2$	Moottorin mekaaninen teho
$P_c$	Jatkuvat häviöt
$P_{Fe}$	Rautahäviöt
$P_{Fe,0}$	Rautahäviöt tyhjäkäynnillä
$P_{fw}$	Kitka- ja tuuletinhäviöt
$P_{fw,\theta}$	Kitka- ja tuuletinhäviöt korjattuna 25 °C lämpötilaan
$P_{fw,0}$	Kitka- ja tuuletinhäviöt tyhjäkäynnillä
$P_k$	Oikosulkuteho, Virtalämpöhäviöt
$P_{LL}$	Lisähäviöt
$P_{Lr}$	Jäännöshäviöt
$P_n$	Sähkömoottorin nimellisteho
$P_r$	Roottorikäämin häviöt
$P_s$	Staattorikäämin häviöt
$P_{s,\theta}$	Staattorikäämin häviöt korjattuna 25 °C lämpötilaan
$P_T$	Kokonaishäviöt
$R$	Resistanssi
$R_0$	Moottorin tyhjäkäyntiresistanssi
$R_{2,0}$	Interpoloitu käämi-resistanssi
$s$	Moottorin suhteellinen jättämä
$s_\theta$	Moottorin suhteellinen jättämä korjattuna 25 °C lämpötilaan
$T$	Vääntömomentti
$T_{max}$	Moottorin maksimimomentti

$T_{\min}$	Moottorin minimimomentti
$T_n$	Moottori nimellismomentti
$T_s$	Moottorin käynnistysmomentti
$U_0$	Tyhjäkäyntijännite
$U_i$	Sisäinen jännite
$U_k$	Oikosulkujännite
$U_n$	Nimellisjännite

## Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri, teollisuuskonserni
CSA	Canadian Standards Association, kanadalainen standardointiorganisaatio
D-pää	Drive End, moottorin käyttöpää
FINAS	Finnish Accreditation Service, Suomen akkreditointilaitos
HVF	Harmonic Voltage Factor, Harmonisia jänniteylijältoja kuvaava kerroin
IEC	International Electrotechnical Commission, sähköalan kansainvälinen standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan organisaatio
LEM	Life Energy Motion, yritys, joka on erikoistunut sähköisten ilmiöiden mittaamiseen
MEPS	Minimum Energy Performance Standard, energiatehokkuuden vähimmäisstandardi
N-pää	Non-drive End, moottorin käyttöpään vastakkainen pää
RITZ	RITZ Instrument Transformers, yritys, joka erikoistunut instrumenttimuuntajiin, kiinteisiin virtakiskojärjestelmiin ja tehomuuntajiin.
TP**	IEC LV Motors -divisioonan numeroitu testipaikka

# 1 Johdanto

Diplomityö tehdään ABB oy:n toimeksiannosta Vaasan moottoritehtaalla. Tutkimuksen aihealue on uuden tyyppitestilaitteiston käyttöönotto tehtaan testauskapasiteetin kasvattamiseksi. Käyttöönotto sisältää laitteiston turvallisen käyttämisen varmistamisen, mittaustarkkuuden varmentamisen sekä mittausluotettavuuden tutkimisen. Tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena on todentaa, että testipaikalla voidaan suorittaa oikosulkoneelle hyväksytysti International Electrotechnical Commission (IEC) standardien mukainen tyyppitestaus. Toisena tavoitteena on edistää koestustapahtuman työturvallisuutta selvittämällä, kuinka tyyppitestin aikainen vastusmittaus voitaisiin automatisoida. Tutkimuskysymykset ovat:

- Voidaanko uudella tyyppitestipaikalla suorittaa hyväksytysti IEC standardien mukainen tyyppitestaus?
- Ovatko uudella tyyppitestipaikalla saadut tulokset luotettavia?
- Voidaanko manuaalisesti suoritettava kylmävastusmittaus automatisoida osaksi koestusohjelmaa?
- Miten automatisointi toteutettaisiin?
- Kuinka kylmävastusmittauksen tulokset saataisiin kirjautumaan valmiiksi testiraportiksi ?

## 1.1 Tutkimuksen rakenne

Diplomityö koostuu kahdeksasta luvusta. Ensimmäisenä on johdanto. Toisessa luvussa käydään läpi oikosulkumoottorin rakenne ja toiminta, miten oikosulkumoottorin hyötysuhde voidaan määrittää ja mikä merkitys moottorin hyötysuhteella on. Kolmannessa luvussa käydään läpi moottoritehtaalla valmistettavan ja testattavan moottorin tyyppitestin vaiheet. Neljäs luku käsittelee lyhyesti mittausvirhettä. Viidennessä luvussa kerrotaan moottoritehtaan tyyppitestipaikkojen historiasta, uuden tyyppitestauslaitteiston rakenteesta, laitteiston suoritusarvoista, mittaustarkkuudesta sekä kuinka testilaitteiston mittausluotettavuus tutkitaan ristiintestauksin. Kuudennessa luvussa esitetään käyttöönoton aikana suoritettujen testien mittau tulokset ja suoritetaan mittau tuloksien

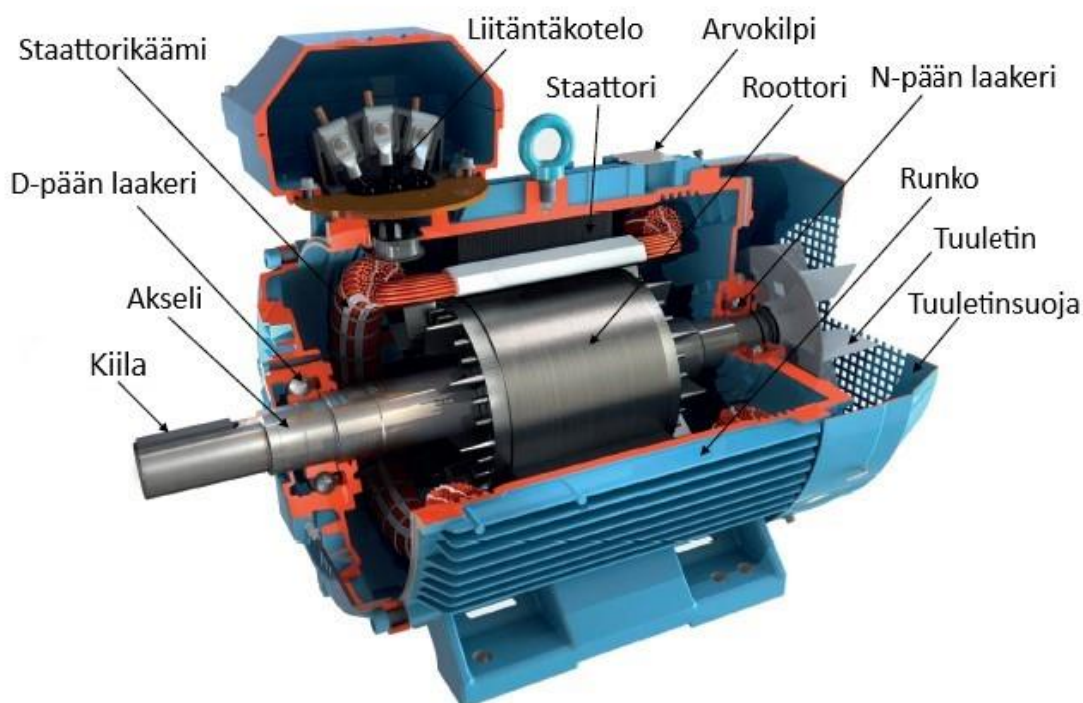
analysointi. Seitsemäs luku käsittelee työturvallisuuden parantamista tyyppitestauksen aikana mittauksen automatisointia kehittämällä. Kahdeksannessa luvussa on esitetty diplomityön keskeisimmät havainnot.

## **1.2 Tutkimuksen rajaus**

Ristiintestauksissa testattavien moottorien määrä rajattiin lopulta neljään kalibrointi-moottoriin runkokovälillä 200–250, koska haluttiin erityisesti tutkia testilaitteiston suorituskyvyn ylärajoja. Valitut 2-napaiset oikosulkukoneet ovat myös eniten testilaitteistoa rasittavia koneita suuren pyörimisnopeutensa ja nimellisvirtansa vuoksi.

## 2 Oikosulkumoottorin häviöt ja hyötysuhteen määrittäminen

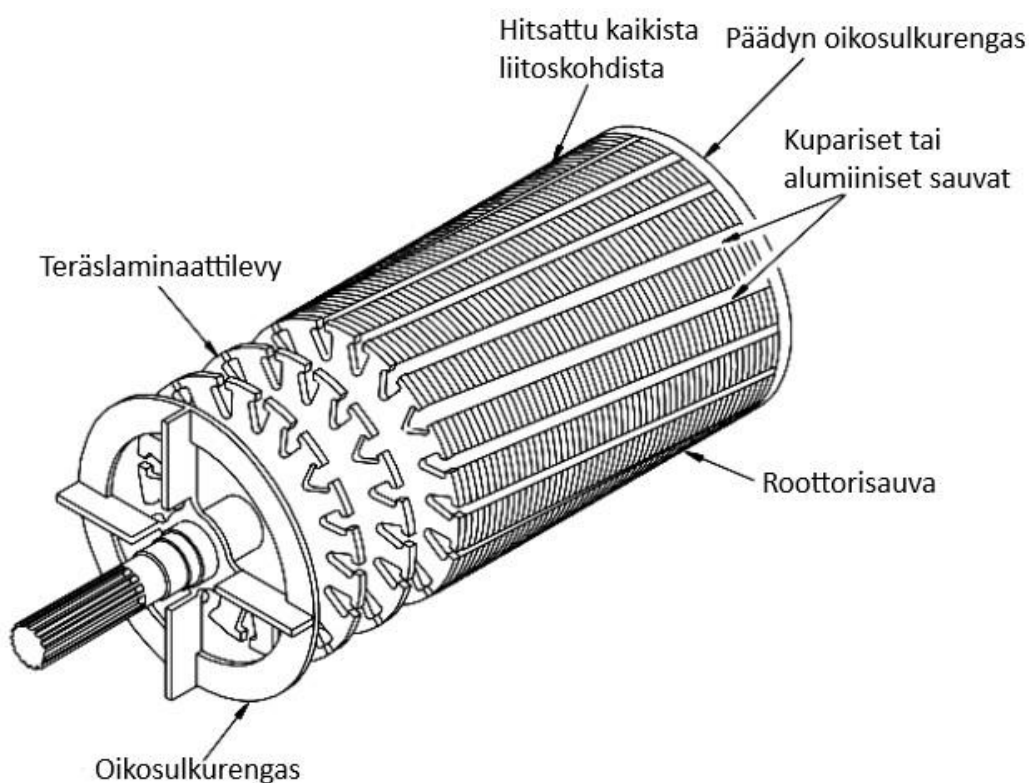
Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa sekä hyvän kestäväytensä takia teollisuudessa yleisin sähkökonetyyppi. Sen suuri tehoalue sekä sarjatuotanto tekevät kone-tyypistä myös edullisen. Oikosulkumoottorin rakenne on esitetty kuvassa 1. Sähkökoneen tehtävä on muuttaa sähköenergia mekaaniseksi energiaksi, jolloin siitä käytetään nimitystä moottori. Moottoreiden tyypillisimpiä käyttökohteita ovat erilaiset pumput, puhaltimet, työkoneet, kuljettimet, valssaimet ja nostimet. (Hietalahti, 2011, s. 59)



**Kuva 1.** Oikosulkumoottorin rakenne (mukaillen ABB oy, 2014).

Oikosulkumoottorin tärkeimmät osat ovat staattori ja roottori. Staattori koostuu pinoituista ohuista samanmuotoisista vähähäviöisistä sähkölevyistä, jotka on liitetty toisiinsa puristamalla sekä metallisella sidontanauhalla. Staattorin urissa on eristetystä kuparilangasta kiedottu staattorikäänitys, johon syötetty virta tuottaa ympärilleen vahvan magneettikentän. Staattorissa on lisäksi vaiheväliseriste, joka eristää vaihejohtimet toisistaan, sekä uraseriste, joka eristää staattorikäänin staattorin metallirungosta. Roottori sijaitsee staattorin sisällä kiinnittyneenä akseliin. Roottori koostuu päissä olevista

oikosulkurenkaista, ohuista pinotuista teräslaminaateista sekä sitä ympäröivästä häkkikämmityksestä. Häkkikämmitys koostuu alumiinisista tai kuparisista sauvoista, mitkä juotetaan pinotun roottoripaketin uriin oikosulkurenkaiden väliin. Häkkikämmitty roottori on esitetty kuvassa 2. Muita oikosulkumoottorin osia ovat akseli, jonka tarkoitus on välittää roottorin vääntömomentti akselin D-päähän ja laakerit, joiden tarkoituksena on vähentää kitkaa moottorin rungon ja akselin väliltä, laakerikilvet D- ja N-päässä, jotka kannattelevat laakereita, runko, johon laakerikilvet kiinnitetään sekä tuuletin, joka sijaitsee moottorin N-päässä ja liitännäkotelo, josta löytyy moottorin sähköliitännät. Arvokilvestä löytyvät moottorin nimellisarvot. D-pään eli akselipään nimitys tulee englannin kielen sanasta *drive* ja N-pään eli vapaan pään nimitys sanasta *non-drive*. (Hietalahti, 2011, s. 59–60; ABB oy, 2014, s. 59–60; Suonsyrjä, 2015, s. 7–11)



**Kuva 2.** Häkkikämmityksen roottorin osat (mukaillen Inst Tools, 2020).

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu jättämään. Kun oikosulkumoottoriin kytketään kolmivaiheinen jännite, staattorikäämiin syntyy pyörivä magneettikenttä. Magneettikentän vaikutuksessa oikosuljettuun roottorikäämiin sauvoihin indusoituu lähdejännite  $E_r$ , joka saa aikaan roottorivirran  $I_r$ . Roottorin ja staattorin magneettikenttien välille syntyy voimavaikutus eli vääntömomentti akselin kääntämiseksi. Jos sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin pyörimistä vastustava kuormitusmomentti, joka esimerkiksi tyhjäkäynnissä muodostuu laakerien ja tuulettimen aiheuttamasta kitkasta, niin roottori alkaa pyöriä. Kun roottorin pyörimisnopeus kasvaa pienenee staattorin magneettikentän ja roottorisauvojen välinen leikkausnopeus, jolloin roottorikäämiin lähdejännite  $E_r$  ja roottorivirta  $I_r$  pienenevät. Tämän myötä myös roottorin sähköinen vääntömomentti pienenee. Roottorin pyörimisnopeus pyrkii momenttitasapainoon, missä sähköinen vääntömomentti on yhtä suuri kuin vastustava kuormitusmomentti. (Korpinen, 1998; Hietalahti, 2011, s. 61–62)

Jotta induktio moottorin roottorissa säilyy, tulee roottorin pyörimisnopeuden olla pienempi kuin staattorikäämiin luoman magneettikentän pyörimisnopeuden. Tilanteessa, jossa roottori pyörii tahdissa staattorikäämiin magneettikentän kanssa, eivät roottorisauvat leikkaa muuttuvaa magneettikenttää eikä roottoriin induoidu lähdejännitettä  $E_r$  eikä täten synny sähköistä vääntömomenttia. Täten moottorin roottorin pyörimisnopeus jää aina staattorikäämiin magneettikentän pyörimisnopeutta pienemmäksi. (Korpinen, 1998; Hietalahti, 2011, s. 61–62)

Oikosulkumoottorin teoreettinen tahtinopeus eli staattorikentän pyörimisnopeus  $n_s$  lasketaan yhtälöllä

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}, \quad (1)$$

missä  $f$  on syöttävä verkon taajuus ja  $p$  on moottorin napapariluku. Napapariluku määräytyy moottorin napojen määrän mukaisesti. Esimerkiksi 2-napaisen koneen napapariluku on 1 ja 4-napaisen koneen napapariluku on 2. Verkon taajuus on yleensä 50 Hz tai

60 Hz riippuen maantieteellisestä sijainnista. Tahtinopeudet esitetty taulukossa 1. (Korpinen, 1998)

**Taulukko 1.** Oikosulkumoottorin teoreettiset tahtinopeudet napapariluvuilla 1–6.

Napapariluku <i>p</i>	Taajuus <i>f</i>	
	50 Hz	60 Hz
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600

Oikosulkumoottorin todellinen pyörimisnopeus ilmaistaan suhteellinen jättämän *s* avulla, joka lasketaan yhtälöllä

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%, \quad (2)$$

missä *n* on roottorin pyörimisnopeus. Siitä saadaan staattorikentän pyörimisnopeuden ja roottorin pyörimisnopeuden välinen kierrosnopeusero prosentteina. Tyypillinen jättämä täydellä kuormalla ajettaessa on 1–5 % konetyypistä riippuen. Oikosulkumoottorin mekaanisen kuormituksen kasvaessa kasvaa myös jättämä, sillä mekaanisen kuormituksen kasvaessa vääntömomentti ei pidä tasapainotilaa yllä ja roottorin pyörimisnopeus pienenee, jolloin roottorikäänin sauvoihin indusoituu suurempi lähdejännite ja myös siten suurempi roottorivirta, mikä kasvattaa vääntömomenttia ja moottori asettuu uuteen tasapainotilaan, jossa mekaanisen kuormituksen aiheuttama momentti on yhtä suuri koneen vääntömomentin kanssa. Jättämä myös pienenee mekaanisen kuormituksen pienentyessä, sillä roottorin pyörimisnopeus kasvaa mekaanisen kuormituksen pienentyessä. Tämän ominaisuuden takia oikosulkumoottorit sopivat erityisesti säädettyjen sähkömoottorikäyttöjen sovelluksiin. (Hietalahti, 2011, s. 60–63)



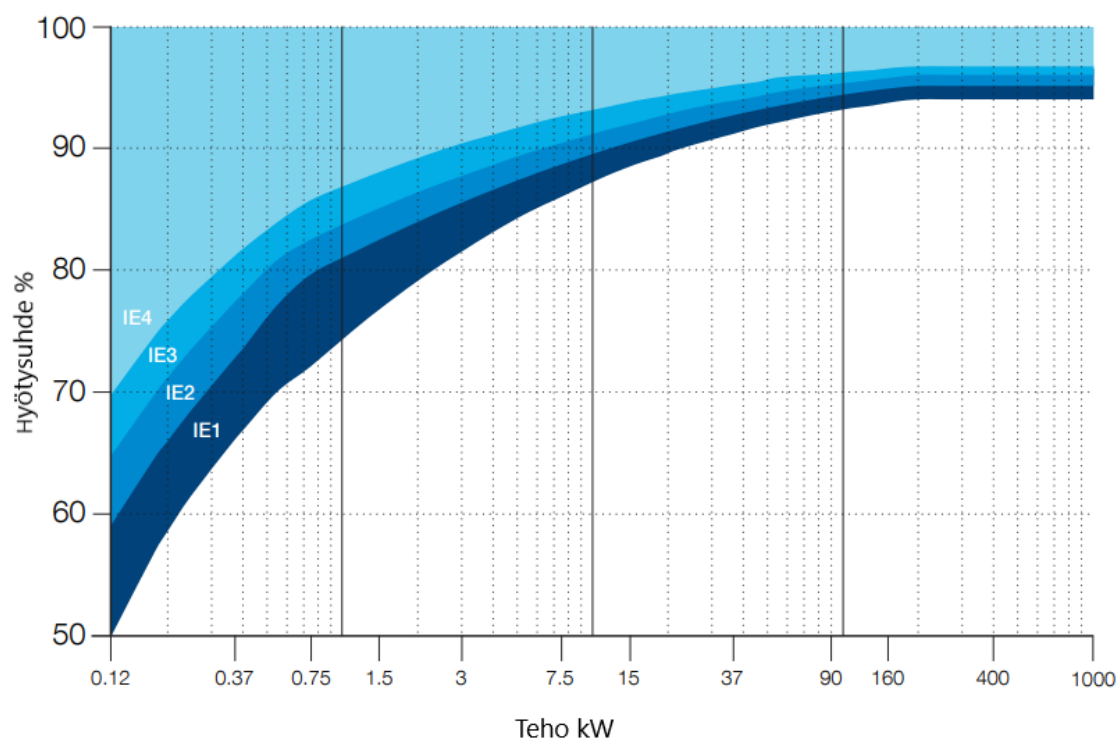
## 2.1 Hyötysuhde

Korkean hyötysuhteen koneiden arvostus on ilmastopolitiikan vuoksi nousussa, sillä on arvioitu, että sähkömoottorit kuluttavat teollisuudessa käytettävästä sähköstä 65 %, joten entistä energiatehokkaammat sähkömoottorit ovat yksi merkittävä hiilidioksidipäästöjen torjuntakeino. Moottorin elinkaarikustannuksia laskettaessa moottorin hankintahinta on vain 1–3 % siitä määrästä, minkä se tuottaa kustannuksia elinkaarensa aikana. Suuri merkitys on myös käytettävällä taajuusmuuttajaohjauksella, jolla varmistetaan, että moottori pyörii tarvittavalla nopeudella, jolloin käyttö on energiatehokasta. (ABB oy, 2014, s. 16–19)

Pelkästään Euroopassa on arviolta kahdeksan miljardia sähkömoottoria, jotka käyttävät 50 % Euroopan unionin (EU) alueella tuotetusta sähköstä. Heinäkuussa 2021 voimaan tulleella vaatimuksella moottorien IE3-hyötysuhdeluokasta, on arvioitu vuosittain säästettävän EU:n nykyisestä sähkönkulutuksessa 57 TWh. Kokonaisvaikutuksen uskotaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä 110 TWh vuodessa, mikä vastaa Alankomaiden vuotuista sähkönkulutusta. Hiilidioksidipäästöjen on laskettu pienenevän samalla 40 miljoonaa tonnia vuodessa. Energiatehokkaat sähkömoottorit ovat siis yksi ratkaisu globaaliin sähkönkysynnän kasvukompensointiin. Kysynnän kasvu on ollut tähän asti suurinta kehitysmaissa, joissa väkiluku kasvaa myös voimakkaimmin. (ABB oy, 2014, s. 16–19; Euroopan unioni, 2021)

The International Electrotechnical Commission (IEC) on laatinut yksinopeuksisille suorasäätöisille vaihtovirtamoottoreille standardin IEC 60034-30-1 (*Standard on efficiency classes for low voltage AC motor*), joka määrittelee suoran käytön hyötysuhderajat käyttöympäristön lämpötilan ollessa  $-20\text{ °C} - +60\text{ °C}$  ja alle 4000 m korkeudessa merenpinnasta 50 Hz ja 60 Hz verkoissa toimiville, 2–8 napaisille, 0,12–1000 kW nimellistehon  $P_n$  ja 50–1000 V nimellisjännitteen  $U_n$  omaaville vaihtovirtamoottoreille. Standardissa määritellään moottoreille neljä eri hyötysuhdeluokkaa: *standard efficiency-IE1*, *high efficiency-IE2*, *premium efficiency-IE3* ja *super-premium efficiency-IE4*. IE4-luokan moottoreilla on paras hyötysuhde ja hyötysuhdeluokan tulee löytyä standardin mukaan

moottorin arvokilvestä. Kuvassa 3 on esitelty eri hyötysuhdeluokkien minimirajat 50 Hz verkossa 4-napaisille vaihtovirtamoottoreille eri nimellistehoilla. (ABB Oy, 2014, s. 17–18; ABB Oy, 2018a)



**Kuva 3.** 4-napaisten vaihtovirtamoottoreiden IE-hyötysuhdeluokkien minimirajat 0,12–1000 kW:n tehoilla 50Hz:n verkossa (mukaillen ABB oy, 2014).

Useilla valtioilla on oma energiatehokkuuden vähimmäisstandardinsa (*minimum energy efficiency performance standard, MEPS*), mikä sisältää energiaa käyttävien laitteiden suorituskykyvaatimuksia, kuten määrittelee energiaa käyttävien laitteiden sallitun energiankulutuksen. MEPS edellyttää yleensä testimenetelmän käyttöä, jossa määritetään, kuinka suorituskykyä mitataan. Taulukko 2 esittää tietyillä alueilla MEPS:ien vaatimat moottorien hyötysuhdeluokat standardin IEC 60034-30-1 mukaisena. Taulukosta 2 on nähtävissä, kuinka IE1-hyötysuhteen sähkömoottoreita ei saa toimittaa kuin muutamain poikkeuksin. Huomattavaa on myös, että Euroopan unionin alueella hyötysuhteen minimaatimuksen siirryttyä vuodesta 2021 alkaen hyötysuhdeluokkaan IE3 ja alle 0,75 kW teholuokan sähkömoottorit saavat olla enää hyötysuhdeluokassa IE2.

**Taulukko 2.** Hyötysuhdeluokkavaatimukset eräissä maissa ja alueissa standardin IEC 60034-30-1 verrattuna (ABB oy, 2014; ABB oy, 2018a; ABB oy, 2020a).

IEC 60034-30-1	IE1	IE2	IE3	IE4
EU		$P_n < 0,75\text{kW}$	1. heinäkuuta 2021 $P_n < 1000\text{ kW}$	2023 $75 < P_n < 200\text{kW}$
Korea			vaaditaan	
Kiina		vaaditaan		
Australia		vaaditaan		
USA		vaaditaan osalta	vaaditaan osalta	
Kanada		vaaditaan osalta	vaaditaan osalta	
Brasilia		vaadittu 2018		
Meksiko		vaadittu 2018		
Japani			vaadittu	
Taiwan	vaadittu			
Israel	vaadittu			

Vuonna 2023 tulee seuraava uudistus, joka siirtää keskitehoiset sähkömoottorit tällä hetkellä parhaimpaan IE4-hyötysuhdeluokkaan. Brasiliassa ja Meksikossa tullaan myös siirtymään IE3-hyötysuhde-luokkaan 2020-luvun puolella. Muualla maailmassa toimitettavien sähkömoottorien vaadittu minimihyötysuhde on pääosin IE2- tai IE3-hyötysuhdeluokissa ja tulevaisuudessa painottuu IE3- ja IE4-hyötysuhdeluokkiin.

Standardin IEC 60034-30-1 hyötysuhdeluokat perustuvat standardiin IEC 60034-2-1 (*Standard methods for determining losses and efficiency from test (excluding machines for traction vehicles)*), missä määritellään pienen epävarmuuden testimenetelmät tarpeeksi tarkkojen testituloksien saavuttamiseksi. Molemmat standardit ovat osa pyrkimystä yhtenäistää moottorien testausmenetelmät muiden merkittävien testausstandardien CSA390-10 (*Test methods, Marking requirements, and Energy efficiency levels for three-phase induction motors*) ja IEE 112-2017 (*Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*) kanssa, jotta korkean hyötysuhteen moottorit erottuisivat edukseen. CSA on kanadalainen standardisoimisjärjestö, jonka toimialaan kuuluu standardien kehittäminen, testaus ja sertifiointi. IEEE on nykyisin maailman suurin teknisen kehityksen ammatillinen järjestö, jonka tavoitteena on edistää teknologian kehitystä muun muassa standardien määrittelyn kautta. ABB suorittaa testaamisen perustuen standardin IEC 60034-2-1 menetelmiin. (ABB oy, 2014, s. 16–20; CSA, 2021; IEEE, 2021)

Standardissa IEC60034-2-1 hyötysuhteen määrittämiseen on määritelty kolme eri tapaa, jotka on esitelty taulukossa 3. ABB:n Vaasan moottorilaboratoriossa hyötysuhteen mittaus tapahtuu standardin IEC60034-2-1 menetelmän 2-1-1B mukaisesti jäännöshäviöiden määrittämisen kautta. Jäännöshäviöiden testimenetelmässä oikosulkumoottorin häviöt koostuvat rauta-, kitka-, tuuletin-, staattori-, roottori- ja lisähäviöistä. Häviöiden suuruutta mitataan kuormitustesteillä, jotka on kuvailtu luvussa 3 oikosulkumoottorin tyyppitestaus. (IEC, 2014)

**Taulukko 3.** IEC 60034-2-1 -standardin mukaiset testausmenetelmät oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittämiseksi (IEC, 2014).

Menetelmä	Kuvaus	Käyttökohde
2-1-1A Suora mittaus: sähköinen teho – mekaaninen teho	Vääntömomentin mittaus	Kaikki yksivaiheiset oikosulkumoottorit
2-1-1B Epäsuora mittaus: Jäännöshäviöt	Lisähäviöiden määrittäminen jäännöshäviöiden avulla	Alle 2 MW:n kolmivaiheiset oikosulkumoottorit
2-1-1C Epäsuora mittaus: Kiinteät arvot	Lisähäviöt määritetään laskennallisesti kiinteiden arvojen perusteella	Yli 2 MW:n kolmivaiheiset oikosulkumoottorit

## 2.2 Käämityksissä tapahtuvat häviöt

Oikosulkumoottorin käämityksen resistansseista syntyviä häviöitä kutsutaan virtalämpöhäviöiksi  $P_k$ , koska häviöt syntyvät käämityksessä kulkevan virran seurauksena ja ovat neliöllisesti verrannollisia moottorin ottamaan virtaan. Lämpöajotestin perusteella voidaan määrittää virtalämpöhäviöt. Virtalämpöhäviöt jaetaan staattorikämin häviöihin  $P_s$  ja roottorikämin häviöihin  $P_r$ . Staattorikämin häviöt lasketaan yhtälöstä

$$P_s = 1,5 \cdot I_1^2 \cdot R, \quad (3)$$

missä  $I_1$  on staattorin vaihevirtojen keskiarvo ja  $R$  on mitattu resistanssi. Staattori- ja roottorikämin häviöitä laskettaessa huomioidaan ympäristön lämpötilan vaikutus käyttämällä korjauskerrointa  $k_\theta$ , sillä metalleilla resistiivisyyden lämpötilakerroin on

positiivinen eli resistanssi kasvaa lämpötilan kasvaessa. Ilman korjausta häviöt olisivat todellista pienempiä ja hyötysuhde todellista parempi. Korjauskertoimen lasketaan yhtälöstä

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}, \quad (4)$$

missä 235 on kuparin lämpötilakerroin 25 °C lämpötilassa,  $\theta_w$  käämityksen lämpötila nimelliskuormalla,  $\theta_c$  ilman lämpötila moottorin ilmanoton läheisyydessä. Lämpötilakorjatut staattorihäviöt  $P_{s,\theta}$  lasketaan yhtälöstä

$$P_{s,\theta} = P_s \cdot k_{\theta}. \quad (5)$$

Roottorikäänin häviöt lasketaan yhtälöstä

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{Fe}) \cdot s, \quad (6)$$

missä  $P_1$  on moottorin sähköinen teho,  $P_{Fe}$  on rautahäviöt ja  $s$  on jättämä, joka lasketaan yhtälöllä

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}. \quad (7)$$

Lämpötilakorjattu jättämä lasketaan yhtälöllä

$$s_{\theta} = s \cdot k_{\theta}. \quad (8)$$

Lämpötilakorjatut roottorihäviöt lasketaan yhtälöllä

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{Fe}) \cdot s_{\theta}. \quad (9)$$

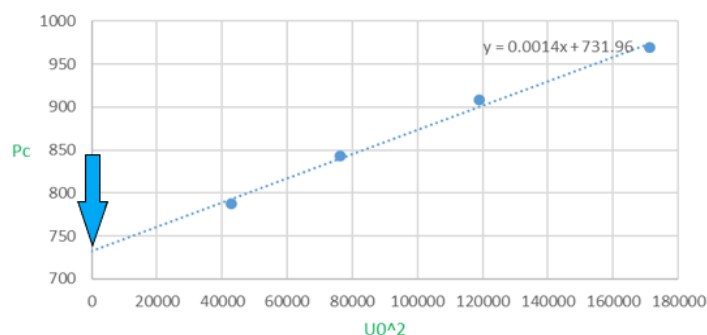
Lämpötilakorjattujen staattori- ja roottorihäviöiden avulla voidaan laskea moottorin korjattu sähköinen teho  $P_{1,\theta}$  yhtälöllä

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}). \quad (\text{IEC, 2014}) \quad (10)$$

### 2.3 Kitka- ja tuuletinhäviöt

Kitka- ja tuuletinhäviötä kutsutaan myös mekaanisiksi häviöiksi. Kitkahäviöt syntyvät akselin ja laakerien välisessä vuorovaikutuksessa. Lisäksi moottorissa käytettävien tiivisteiden hankaus aiheuttaa kitkahäviöitä. Myös liiallinen laakerien rasvaus kasvattaa kitkahäviöitä. Tuuletushäviöt syntyvät akselille sijoitetun tuulettimen pyöriessä synnyttämästä ilmanvastuksesta ja ilmavälin läpi virtaamasta ilmasta. Häviöt ovat likimain kuormituksen riippumattomia, mutta häviöt kasvavat neliöllisesti pyörimisnopeuden kasvaessa. Hitaammin pyörivien moottorien kitka- ja tuuletinhäviöt ovat täten pienemmät kuin suurnopeuksisten moottorien. (Hietalahti, 2011; IEC, 2014, ABB oy, 2018c)

Rautahäviöiden ja mekaanisten häviöiden summaa kutsutaan jatkuviksi häviöiksi  $P_c$ . Jatkuvat häviöt sovitetaan tyhjäkäyntitestin 30–60 % jännitepisteiden jatkuvien häviöiden ja tyhjäkäyntijännitteen  $U_0$  neliön suhteen suoraksi, jota ekstrapoloidaan nolajännitteen saakka. Kitka- ja tuuletinhäviöt saadaan määritettyä ekstrapoloidulta suoralta nolajännitteen kohdalta kuvasta 4, joka vastaa kitka- ja tuuletinhäviöitä  $P_{fw,0}$  synkroninopeudella. (IEC, 2014; Avantola, 2020)



**Kuva 4.** Kitka- ja tuuletinhäviöiden  $P_{fw,0}$  määrittäminen tyhjäkäyntitestistä (Avantola, 2020).

Jatkuvat häviöt määritetään yhtälöstä

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{Fe}, \quad (11)$$

missä  $P_0$  on tyhjäkäyntiteho ja  $P_s$  on staattorikäänin häviöt, mikä lasketaan yhtälöstä

$$P_s = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_{2,0}, \quad (12)$$

missä  $I_0$  on tyhjäkäyntivirta ja  $R_{2,0}$  on interpoloitu kääniresistanssi jokaiselle testijännitteelle. Kitka- ja tuuletinhäviöt korjataan jättämän mukaiseksi yhtälöllä

$$P_{fw,\theta} = P_{fw,0} \cdot (1 - s_\theta)^{2,5}. \quad (\text{IEC, 2014}) \quad (13)$$

## 2.4 Rautahäviöt

Rautahäviöt  $P_{Fe}$  syntyvät moottorin aktiivisissa rautaosissa eli staattorissa ja roottorissa, muuttuvan magneettivuon vaikutuksesta ja ovat likimain kuormituksesta riippumattomia. Rautahäviöt määritetään tyhjäkäyntitestin 90–110 % jännitepisteiden jatkuvien häviöiden avulla yhtälöstä

$$P_{Fe,0} = P_c - P_{fw}, \quad (14)$$

muodostettavalla käyrällä suhteessa tyhjäkäyntijännitteeseen  $U_0$ . Rautahäviöiden määrittämiseksi täydellä kuormalla tulee sisäinen jännite  $U_i$  huomioida. Sisäinen jännite koostuu resistiivisen jännitteenaleneman moottorin käämeissä.  $U_i$  määritellään moottorille yhtälöstä

$$U_i = \sqrt{\left(U_n - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2}, \quad (15)$$

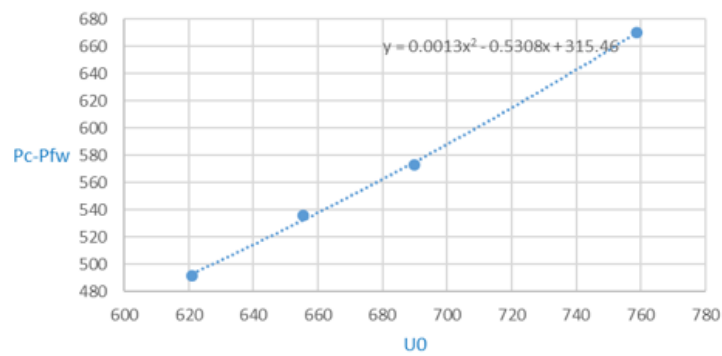
missä  $\cos \varphi$  lasketaan yhtälöstä

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (16)$$

ja  $\sin \varphi$  lasketaan yhtälöstä

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (17)$$

Nimelliskuormaa vastaavat rautahäviöt määritetään sisäisen jännitteen  $U_i$  avulla interpoloimalla rautahäviöt tyhjäkäyntijännitteen  $U_0$  käyrästä eli sijoitetaan sisäinen jännite  $U_i$  kuvan 5 käyrän yhtälöön. (IEC, 2014; Avantola, 2020)



**Kuva 5.** Rautahäviöiden  $P_{Fe}$  määrittäminen tyhjäkäyntitestistä (Avantola, 2020).

## 2.5 Lisähäviöt

Muista oikosulkumoottorissa syntyvistä häviöistä käytetään nimitystä lisähäviöt  $P_{LL}$ . Lisähäviöitä syntyy moottorin aktiivisissa metalliosissa kuormituksen aikana aiheutuvista haja- ja pyörrevirroista. Lisähäviöt määritetään jäännöshäviöistä  $P_{Lr}$ . Jäännöshäviöt kussakin kuormituspisteessä lasketaan yhtälöstä

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{Fe} - P_{fw}, \quad (18)$$

missä  $P_2$  on moottorin antama mekaaninen teho ja se lasketaan yhtälöstä

$$P_2 = 2\pi \cdot T \cdot n, \quad (19)$$



missä  $T$  on moottorin antama vääntömomentti. Lisähäviöt tasoitetaan käyttäen lineaarista regressioanalyysiä, mikä perustuu häviöiden ilmaisemiseen kuormitusmomentin neliön funktiona yhtälöllä

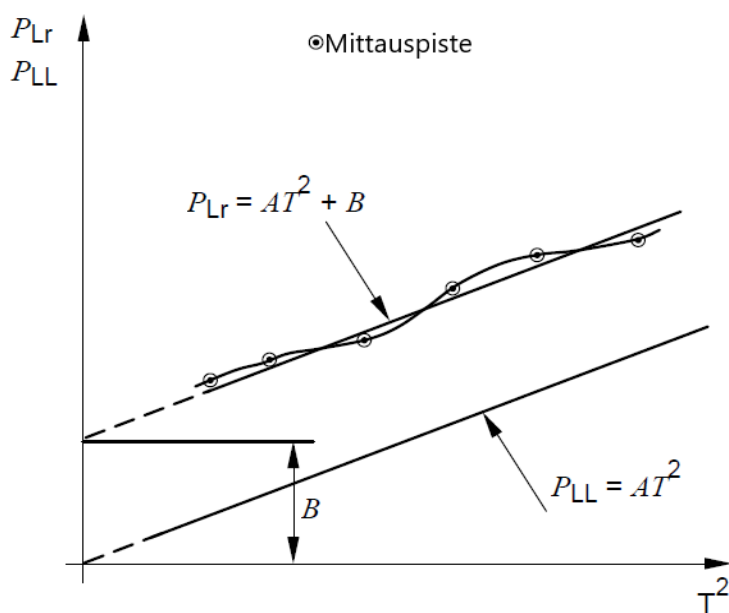
$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B, \quad (20)$$

missä  $A$  ja  $B$  ovat vakioita, jotka lasketaan kuudessa kuormituspisteessä yhtälöillä

$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (21)$$

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum T^2}{i}, \quad (22)$$

missä  $i$  on kuormituspisteiden lukumäärä. Leikkauspisteen  $B$  tulisi olla huomattavasti pienempi (<50 %) kuin lisähäviöt  $P_{LL}$  nimellisvääntömomentilla. Jos näin ei ole mittausta voi olla virheellinen ja se on tarkistettava. Kuvassa 6 havainnollistettu vakion  $B$  vaikutusta lisähäviöihin. (IEC, 2014)



**Kuva 6.** Vakion  $B$ :n vaikutus lisähäviöihin (IEC, 2014).

Regressioanalyysin tarkkuuden arvioimiseksi lasketaan korrelaatiokerroin  $\gamma$  yhtälöstä

$$\gamma = \frac{i \cdot \sum (P_{Lr} \cdot T^2) - (\sum P_{Lr}) \cdot (\sum T^2)}{\sqrt{(i \cdot \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \cdot (i \cdot \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2)}} \quad (23)$$

Tarkassa mittauksessa korrelaatiokertoimen tulisi olla vähintään 0,98, jotta mittaustulos voidaan hyväksyä. Standardin 60034-2-1 mukaan korrelaatiokertoimen ollessa alle 0,95 tulee huonoin mittaustulos poistaa ja toistaa regressioanalyysi. Jos toistetun regressioanalyysin korrelaatiokerroin on yli 0,95 hyväksytään toistetun regressioanalyysin tulos. Jos korrelaatiokerroin jää toistamiseen regressioanalyysissä alle 0,95, niin regressioanalyysi tulkitaan virheelliseksi ja sitä ei hyväksytä. Virheen syy tulisi selvittää ja korjata ja regressioanalyysi toistaa. Kun vakio  $A$  on hyväksytysti määritelty, voidaan lisähäviöt  $P_{LL}$  laskea kaikissa kuormituspisteissä yhtälöstä

$$P_{LL} = A \cdot T^2. \quad (\text{IEC, 2014}) \quad (24)$$

## 2.6 Hyötysuhteen määrittäminen

Hyötysuhde ilmoitetaan moottoreille, joiden käyttötapana on S1–S4, S6, S8 tai S10. Hyötysuhteen määrittäminen epäsuorassa menetelmässä perustuu moottorin eri häviökomponenttien laskemiseen. Häviöt vaikuttavat negatiivisesti moottorin hyötysuhteeseen. Epätahmoottorin kokonaishäviöt  $P_T$  lasketaan yhtälöstä

$$P_T = P_{Fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL}, \quad (25)$$

missä on huomioitu lämpötilan vaikutukset staattori- ja roottorikämmiin, rautahäviöiden sekä kitka- ja tuuletinhäviöiden osalta. Moottorin todellinen hyötysuhde  $\eta$  lasketaan yhtälöstä

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (26)$$

missä  $P_{1,\theta}$  on moottorin sähköinen teho korjattuna lämpötilakertoimella ja  $P_2$  moottorin antama mekaaninen teho. (IEC, 2014)

Standardi IEC 60034-30-1 asettaa hyötysuhteelle rajat, miten paljon laskettu teoreettinen hyötysuhde saa poiketa mitatusta hyötysuhteesta. Hyväksymisraja määräytyy moottorin nimellistehon  $P_n$  mukaan yhtälöillä

$$P_n \leq 150 \text{ kW: } - 15\% (1 - \eta), \quad (27)$$

ja

$$P_n \geq 150 \text{ kW: } - 10\% (1 - \eta). \text{ (IEC, 2014)} \quad (28)$$

### 3 Oikosulkumoottorin tyyppitestaus

Tyyppitestauksella saadaan selvitettyä erityisesti moottorin sähköiset ominaisuudet sekä tietoa käyttöturvallisuudesta. Oikosulkumoottori voidaan tyyppitestauttaa useammastakin syystä: asiakas on tilannut oikosulkumoottorille tyyppitestauksen, oikosulkumoottori on sertifioitava laivaluokituslaitosten vaatimusten mukaisesti, kyseinen oikosulkumoottori on prototyyppikappale, suoritetaan laadunvalvontaa sekä mahdollisissa takuutapauksissa oikosulkumoottori voidaan testata. Tyyppitesti koostuu sarjasta testejä, mitkä on esitetty kuvassa 7. Testien jälkeen mittausohjelma suorittaa hyötysuhteen laskemisen ja tuottaa koestuspöytäkirjan. (ABB oy, 2018b; ABB oy, 2021)



**Kuva 7.** Prosessikaavio ABB:n tyyppitestauksesta (ABB oy, 2021).

#### 3.1 Silmämääräinen tarkistus

Kaikki moottorit testataan vaakatasossa. Tyyppitesti aloitetaan asentamalla oikosulkumoottori testipenkkiin, jossa se kytketään jarrumoottoriin. Asennuksen jälkeen oikosulkumoottorille suoritetaan silmämääräinen tarkistus, jossa tarkastetaan oikosulkumoottorin arvokilvet, tuuletin, mahdollinen tuuletinmoottori, akseli ja kiila, pääliitäntäkotelot, riviliittimet sekä lisälaitteet. Kun osien ja arvokilpien oikeellisuus on todettu, suoritetaan

moottorille kylmävastusmittaus ja pyörimissuunnan tarkistus. (ABB oy, 2018b; ABB oy, 2021)

### 3.2 Kylmävastusmittaus

Kylmävastusmittauksessa mitataan käämistä vaihevälien U-V, U-W ja V-W vastusarvot ympäristön lämpötilassa ennen moottorin käynnistämistä. Kylmävastusmittauksella varmistetaan, että käämit on liitetty oikein ja vaiheet ovat symmetrisesti liitettynä. Resistanssit mitataan vastusmittarilla nelijohdinmenetelmällä, jonka jälkeen mitattuja arvoja verrataan teoreettisesti laskettuihin arvoihin. Nelijohdinmenetelmää käytetään, koska se eliminoi vuotovirran vaikutuksen resistanssimittauksessa. Lämpöajotestin jälkeen mitataan uudestaan vaihevälin U-W vastusarvo moottorin lämpenemän määrittämistä varten. Tarkasti mitattuja vastusarvoja voidaan hyödyntää lämpöajotestin jälkeen lämpenemän määrittämisessä. (ABB oy, 2018b)

### 3.3 Käynnistystesti

Standardin IEC 60034-8 (*Rotating electrical machines – part 8*) mukaan moottorin tulee pyöriä myötäpäivään katsottuna moottorin D-päästä eli käyttöpäästä ja syöttöliittimet tulee kytkeä järjestyksessä L1-U, L2-V ja L3-W. Käynnistystestin tarkoitus on mitata käynnistysmomentin suhdetta nimellismomenttiin  $T_s/T_n$  sekä käynnistysvirran suhdetta nimellisvirtaan  $I_s/I_n$ . Käynnistystestissä roottori lukitaan mekaanisesti nostamalla lukitusrauta kiinni akseliin. Moottorin kytkentä ja testausjännite valitaan moottorin arvokilven leimaustietojen perusteella ja mitattuja arvoja verrataan laskettuihin arvoihin. Testille on määritetty hyväksymisrajat standardissa IEC 60034-1 (*Rotating electrical machines – part 1*).  $T_s/T_n$  -suhde saa olla 15 % pienempi tai 25 % suurempi kuin laskettu arvo.  $I_s/I_n$  -suhteelle on määritetty vain toleranssin yläraja eli mitattu  $I_s/I_n$  -suhde voi olla 20 % suurempi kuin laskettu arvo. (ABB oy, 2018c)

### 3.4 Momenttikäyrätesti

Momenttikäyrätestin tarkoituksena on mitata minimimomentin suhdetta nimellismomenttiin  $T_{\min}/T_n$  sekä maksimimomentin suhdetta nimellismomenttiin  $T_{\max}/T_n$ . Tieto minimi- ja maksimimomentista on välttämätön, jos moottorin on käynnistettävä inertialtaan suuri tai isolla vastusmomentilla oleva kuorma. Moottorin kytkentä ja testausjännite valitaan moottorin arvokilven leimaustietojen perusteella ja mitattuja arvoja verrataan laskettuihin arvoihin. Testin aikana mitataan syöttöjännite, virta, pyörimisnopeus sekä momentti. Minimi- ja maksimimomentille on määritelty vain toleranssin alarajat. Mitattu minimimomentti voi olla 15 % pienempi kuin laskettu arvo ja maksimimomentti voi olla 10 % pienempi kuin laskettu arvo. (ABB oy, 2018c)

### 3.5 Lämpöajotesti

Lämpöajotestissä on tarkoitus määrittää muun muassa moottorin käämin, laakerien ja rungon loppulämpötila halutulla teholla (yleensä nimellisteholla). Joillain Ex-luokituksen moottoreilla mitataan myös roottorin lämpötilaa. Lämpöajossa kuormana toimii testipenkin jarrumoottori, jota testattava moottori pyörittää halutulla momentilla. Lämpöajotestin aikana mitataan lämpötilojen lisäksi jännitettä  $U$ , virtaa  $I$ , taajuutta  $f$ , virran symmetrian tasapainoa, tehokerrointa  $\cos \varphi$ , sähköistä tehoa  $P_1$ , vääntömomenttia  $T$ , pyörimisnopeutta  $n$  sekä mekaanista tehoa  $P_2$ . Moottori saavuttaa standardin IEC 60034-1 mukaisen loppulämpötilan, kun minkään moottoria mittaavan lämpötila-anturin lämpötila ei laske tai nouse 1 Kelviniä 30 minuutin aikajaksolla. Kun loppulämpötila on saavutettu, moottori pysäytetään ja mitataan vaihevälin U-W resistanssi standardissa IEC 60034-1 mainitun säännön mukaisesti. Lämpöajotestissä mitatuista vastusarvoista ekstrapoloidaan jäähtymiskäyrä. (ABB oy, 2018b; ABB oy, 2018b)

### 3.6 Ylikuormitustesti

Ylikuormitustestissä on tarkoitus tarkistaa, että moottorin vääntömomentti on tarpeeksi suuri kestämään lyhytkestoista ylikuormitusta. Testi suoritetaan 160 % momentilla nimellismomentista ja testin kesto on 15 sekuntia. Moottori läpäisee testin, jos roottori ei mekaanisesti jumitu testin aikana. (ABB oy, 2018c)

### 3.7 Osakuormatesti

Osakuormatestissä on tarkoitus mitata kuormitus kuudessa eri kuormituspisteessä. Standardi IEC 60034-2-1 määrittää kuormituspisteiksi 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 % ja 25 % nimellisestä kuormituksesta. Kustakin kuormituspisteestä mitataan jännite  $U$ , virta  $I$ , sähköinen teho  $P_1$ , pyörimisnopeus  $n$ , taajuus  $f$  sekä vääntömomentti  $T$ . Testi tulee suorittaa heti lämpöajotestin jälkeen, jolloin moottori on vielä lämmin. Moottorin hyötysuhde paranee moottorin lämmitessä loppulämpötilaansa. Jos testiä ei ole mahdollista suorittaa heti lämpöajotestin jälkeen täytyy moottorin lämpötilan olla 5 K sisällä loppulämpötilasta, jotta testin voi suorittaa IEC-standardin mukaisesti. Taajuus voi vaihdella korkeintaan 0,1 % kussakin kuormituspisteessä. (IEC, 2014)

### 3.8 Oikosulkutesti

Oikosulkutestiä varten on moottori lukittava mekaanisesti nostamalla lukitusrauta kiinni akseliin, jolloin vältetään mekaanisten häviöiden synty testin aikana. Oikosulkutestissä moottorin jännitettä säädetään nimellistaajuudella siten, että oikosulkuvirta  $I_k$  on 0,5-, 0,8-, 1- sekä 1,5-kertainen nimellisvirrasta  $I_n$  ja mitataan kukin oikosulkupiste. Testissä mitataan oikosulkuvirtaa  $I_k$ , oikosulkujännitettä  $U_k$  ja oikosulkutehoa  $P_k$  ja verrataan laskettuihin arvoihin. (ABB oy, 2018c)

### 3.9 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntitesti tulee tehdä moottorin loppulämpötilassa. Tyhjäkäyntitesti suoritetaan ilman kuormaa. Standardin IEC 60034-2-1 mukaisessa tyhjäkäyntitestissä mitataan tyhjäkäyntivirtaa  $I_0$ , tyhjäkäyntijännitettä  $U_0$  sekä tyhjäkäyntitehoa  $P_0$  seuraavissa jännitepisteissä suhteessa nimellisjännitteeseen: 110 %, 100 %, 95 %, 90 %, 60 %, 50 %, 40 % ja 30 %. 110–90 % alueen tuloksista määritetään moottorin rautahäviöt ja 60–30 % alueen tuloksista määritetään kitka- ja tuuletinhäviöt. Myös tyhjäkäyntiresistanssi  $R_0$  mitataan ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin. (IEC, 2014)

### 3.10 Tärinämittaus

Tärinämittauksessa tarkoitus on mitata moottorin käynnistä syntyviä tärinöitä tyhjäkäynnissä IEC 60034-14 Edition 4.0 2018-08 -standardin mukaisesti. Tärinämittaus suoritetaan moottorin ollessa vaakatasossa ilman kovakiinnitystä. Tärinää mitataan viidestä eri kohdasta kuvassa 8 näkyvistä pisteistä. Tärinämittauksen hyväksymisrajat riippuvat moottorin akselikorkeudesta ja rajat on esitetty taulukossa 4. (ABB oy, 2018c)



**Kuva 8.** Tärinätestin mittauspisteet esitettynä nuolilla (ABB oy, 2018c).

**Taulukko 4.** Standardin IEC60034-14 mukaiset tärinätestin maksimi tärinärajat (IEC, 2014).

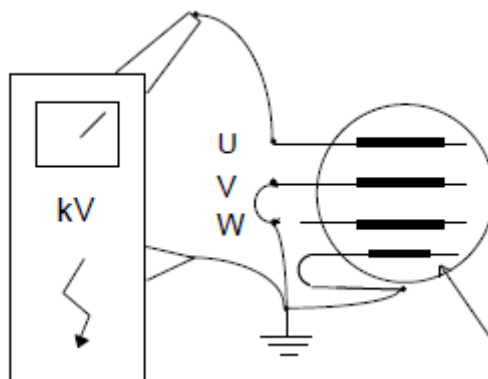
Tärinäluokka	Kiinnitystapa	Akselikorkeus $h$ (mm)			
		$56 \leq h \leq 132$		$h > 132$	
		Siirtymä ( $\mu\text{m}$ )	Nopeus (m/s)	Siirtymä ( $\mu\text{m}$ )	Nopeus (m/s)
A	Vapaa kiinnitys	45	2,8	45	2,8
A	Kovakiinnitys			37	2,3
B	Vapaa kiinnitys	18	1,1	29	1,8
B	Kovakiinnitys			24	1,3

### 3.11 Eristyskoestus

Eristyskoestuksella varmistetaan, ettei käämien, lämpötilailmaisimien tai lämmitysvas-  
tuksien eristyksessä ole heikkoja kohtia. Eristyskoestus käämitykselle suoritetaan 2400  
V:n jännitteellä kaikille moottoreille, joiden nimellisjännite on alle 690 V. Testin kesto on  
60 sekuntia. Käämissä oleville lisälaitteille eristyskoestus suoritetaan 1500 V:n jännit-  
teellä ja testin keston on 60 sekuntia. Alle 200 kW:n nimellistehon omaaville moottoreille  
testi voidaan suorittaa vaihtoehtoisesti 120 % testausjännitteellä, jolloin mittauksen  
kesto on 1 sekunti. Eristyskoestusta täydellä testijännitteellä ei toisteta. Eli jos



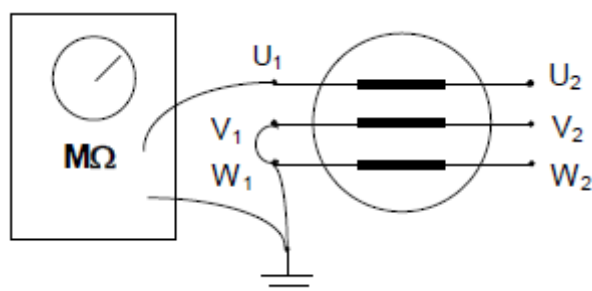
eristyskoestus tarvitsee suorittaa toisen kerran, niin testi suoritetaan alennetulla 80 %:n testajännitteellä. Testi on hyväksytty, jos testin aikana ei synny oikosulkuja. Kuvassa 9 esitetty eristyskoestuksen mahdollinen mittauskytkeä.



**Kuva 9.** Eristyskoestuksen mittauskytkeä U-vaiheesta, kun tähtipiste on käytettävissä (ABB oy, 2018b).

### 3.12 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksen tarkoituksena on mitataamalla varmistaa, että lisälaitteiden sekä staattorin käämityksen eristyksen taso on tarpeeksi korkea moottorin turvallista käyttöä varten. Eristysvastusmittaus suoritetaan tyyppitestauksessa moottorin ollessa lämmin eli tyyppillisesti lämpöajon jälkeen 1000 V:n tasajännitteellä ja mittauksen kesto on 60 sekuntia. 60 sekunnin jälkeen vastusmittarin lukema kirjataan testipöytäkirjaan. Eristysvastusmittauksen mittauskytkeä on kuvassa 10. (ABB oy, 2018b; ABB oy, 2018c)



**Kuva 10.** Staattorikäänin eristysvastusmittauksen mittauskytkeä (ABB oy, 2018b).

## 4 Mittausvirhe

Tässä luvussa käsitellään mittausvirheeseen johtavia tekijöitä, sillä mittausta ei koskaan saada suoritettua absoluuttisen tarkasti eli mittaustuloksessa on aina jonkun verran virhettä. Mittausvirheellä tarkoitetaan mitattavan suuren todellisen arvon ja mitatun arvon eroa. Lämpötilan vaihtelu on eräs merkittävä mittausvirheitä aiheuttava tekijä. Etenkin laser ja optiset mittalaitteet reagoivat välittömästi ympäristön lämpötilan vaihteluihin, koska valon aallonpituus muuttuu lämpötilan vaikutuksesta. Erityisen tarkkoissa mittauksissa virhettä saattavat aiheuttaa jo ilmastointikoneiden syklisestä käytöstä johtuvat lämpötilanmuutokset. Useasti toistuneiden identtisten mittaustilanteiden eli toistomittauksen mittaustuloksista voidaan laskea mittaustulokselle keskiarvo, jolloin yksittäisten mittaustulosten mittausvirhettä on mahdollista arvioida. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 95–96)

Mittausvirheet voidaan yleisesti jaotella karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. Karkealla virheellä tarkoitetaan mittaustuloksissa selkeää virhettä, jolle löytyy selkeä syy. Tällaisia syitä ovat mitta-asteikon väärin lukeminen, mittalaitteen toimintahäiriö tai tiedonsiirrossa tapahtuva virhe. Jos jonkin mittaustuloksen kohdalla epäillään karkeaa virhettä, mittaustulos pyritään hylkäämään. Toisaalta jos poikkeavalle mittaustulokselle ei löydy selvää syytä, ei mittaustulosta saa hylätä. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 95)

Systemaattisella virheellä tarkoitetaan virhettä, joka johtuu käytetystä mittalaitteesta tai mittaumenetelmästä. Systemaattisen virheen syitä ovat esimerkiksi epätarkasti mittaustilanteessa asetettu nollakohta sekä mittalaitteiston puutteellinen kalibrointi. Systemaattisen virheen välttämiseksi mittalaitteet tulee kalibroida säännöllisesti. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 95)

Satunnaisella virheellä tarkoitetaan tilastollista virhettä, joka on mittauksessa aina läsnä. Satunnainen virhe on helpommin havaittavissa suurista aineistoista ja satunnaisten virheiden merkitys heikentyy, jos mittausta on mahdollista toistaa tarpeeksi monta kertaa. Satunnaisen virheen syitä ovat huolimattomuus, väsymys sekä epästabiilit

mittausolosuhteet. Taulukossa 5 on esitetty eri tekijöistä aiheutuvia mittausvirheitä. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 95)

**Taulukko 5.** Mittalaitteen, mittaajan, työkappaleen ja ympäristötekijöiden vaikutus mittavirheiden syntyyn. (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 96–97)

Virheeseen johtava tekijä			
Mittalaite	Mittaaja	Työkappale	Ympäristötekijät
Mittalaitetta luetaan väärin – parallaksivirhe ja lukematarkkuusvirhe	Heikentynyt näkökyky	Poikkeava koko	Valaistus on heikko tai liian kirkas
Käsilämmöstä johtuva lämpöpiteneemisvirhe	Mittaus suoritetaan liian kiireellisesti ja huolimattomasti	Poikkeava muoto tai hankala asento	Värähtely
Mittalaitteen heikentynyt kunto	Ammattitaito on puutteellinen	Karkea pinnanlaatu	Likaisuus
Epäpuhtaudet mitta-päissä	Huonosti laadittu mitta-ohje	Materiaali on pehmeää, joustavaa tai mittaajalle vieras	Poikkeava tai kohonnut lämpötila
Väärän mittausvoiman käyttö	Heikko motivaatio tai vireystila	Kohonnut lämpötila	Ilman väräily

Mittaustulos ei koskaan ole täysin oikea, vaan se on arvio mitattavasta arvosta. Jos mittausvirhettä aiheuttavat tekijät tiedettäisiin aina tarkasta, niin ne korjattaisiin välittömästi. Systemaattinen virhe pysyy yleensä vakiintuneessa mittauksessa samansuuruisena (Keinänen & Järvinen, 2014, s. 98). Satunnaisvirheet taas voivat aiheutua monista toisistaan riippumattomista tekijöistä. Mittausepävarmuus on arvio siitä, kuinka suuri mittausvirhe voi olla. Mittausepävarmuuden laskemiseen on olemassa useita standardeja ja suosituksia. Niiden käsittely on kuitenkin jätetty tässä tutkielmassa rajauksen ulkopuolelle.

## 5 Tyypitestilaitteiston käyttöönotto

Tässä luvussa käsitellään ABB:n Vaasan yksikön moottorien testausta koskevaa historiaa, uuden testipaikan rakennetta ja siihen kuuluvia mittalaitteita sekä testipaikan suorituskykyä. Luvussa käsitellään myös miten uusi testipaikka täyttää sille asetettujen IEC-standardien vaatimukset sekä kuinka uuden testipaikan mittausluotettavuutta tutkitaan.

### 5.1 Testipaikkojen historia

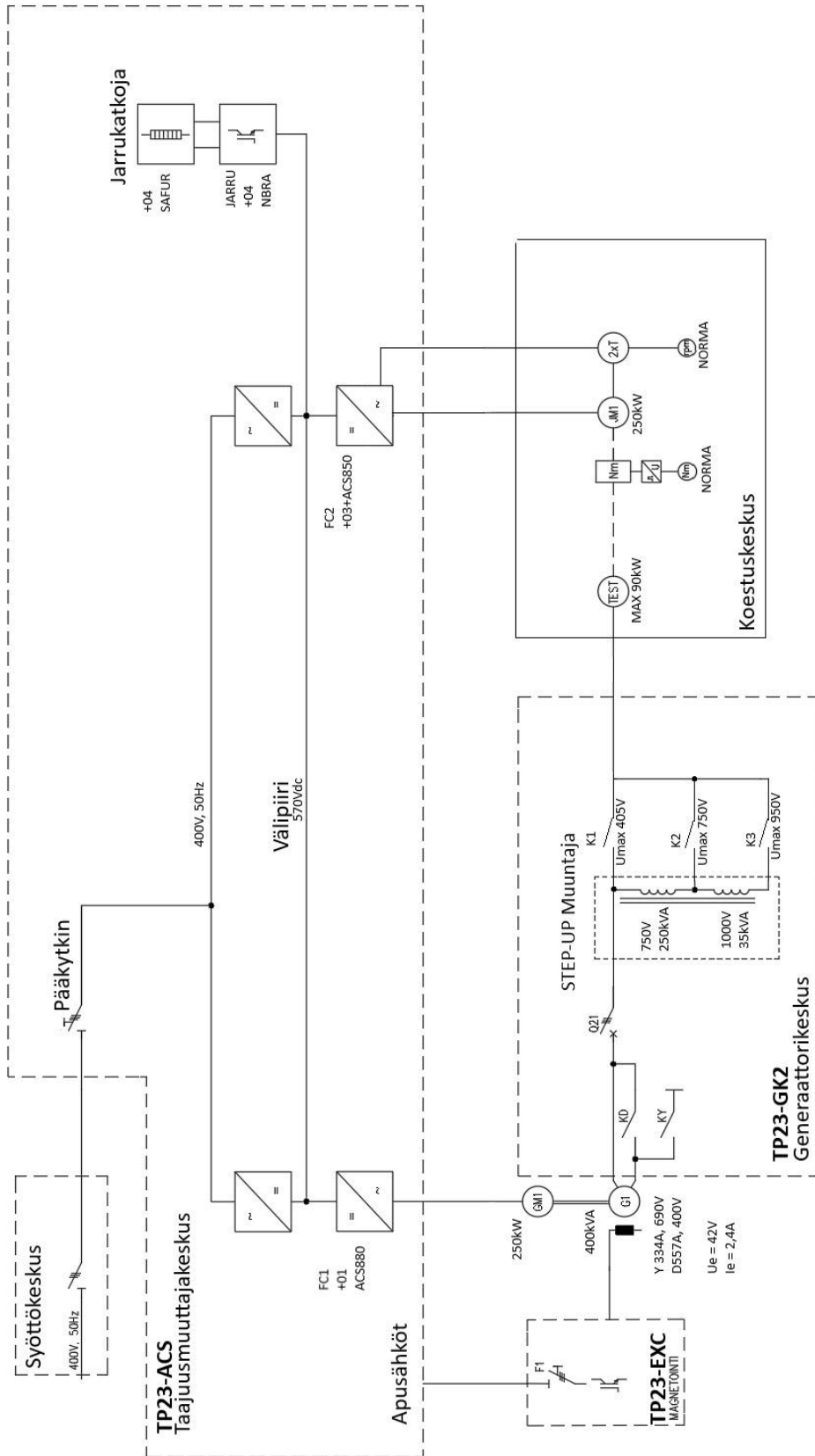
ABB IEC LV Motors -divisioonan Vaasan yksikön testilaboratorion kahdessa rakennuksessa sijaitsee nykyään yhteensä yksitoista testipaikkaa TP0, TP1, TP2, TP4, TP5, TP9, TP21, TP22, TP23, TP24 ja TP25. Oy Strömberg Ab:llä (nyk. ABB oy) oli aluksi Suomessa tehdas vain Helsingissä, mutta jatkosodan aikana tapahtuneiden Helsingin suurpommitusten myötä muun muassa sotatarviketuotanto päätettiin turvallisuussyistä siirtää Vaasaan vuosina 1944–45. Tällöin myös ensimmäiset testipaikat TP1, TP2 ja TP4 evakuoitiin Helsingistä Vaasaan. Tehtaan tuotevalikoiman kasvaessa tarvittiin myös enemmän testauskapasiteettiä ja Vaasaan rakennettiin vuosina 1993–94 testipaikka 0 eli TP0. Tehtaan valmistaessa entistä suurempia moottoreita tarvittiin kasvaneen tehon takia uusi testipaikka ja vuonna 1995 rakennettiin testipaikka TP5, jossa pystytään testaamaan nimellisteholtaan 1 MW sähkömoottoreita. Aikaisemmin käyttöön otettujen testipaikkojen tehohorajat ovat TP1 300 kW, TP2 noin 75 kW, TP4 10 kW ja TP0 700 kW. (Museovirasto, 2009; Avantola, 2021)

Vuonna 2010 valmistui testipaikka TP9, joka rakennettiin teholtaan yhä isompien moottoreiden tarpeisiin ja sillä pystytään testaamaan nimellisteholtaan 1,5 MW:n sähkömoottoreita. Tähän asti kaikki testipaikat oli rakennettu samaan rakennukseen. Tilan puutteen vuoksi sekä kapasiteetin kasvattamiseksi vuonna 2015 rakennettiin toiseen tehdasrakennukseen testipaikat TP21 ja TP22, jolloin myös testattavien sähkömoottorien siirtely tehdasrakennusten välillä loppui. Vuonna 2018 tuotiin suljettavasta Ruotsin tehtaasta Vaasaan testipaikka TP24. Samana vuonna valmistuivat vielä testipaikat TP25 ja TP26 taajuusmuuttajakäyttöttestausta varten. Vuonna 2019 toteutettiin testipaikkojen TP0 ja TP4

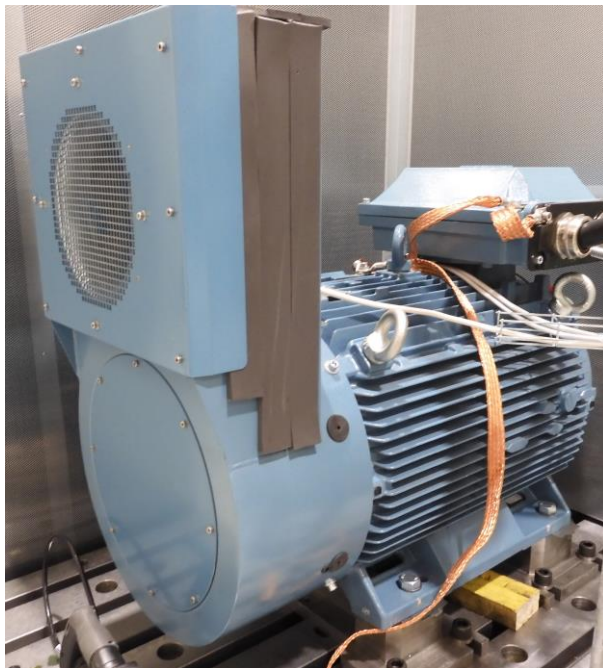
modernisointi ja nyt testipaikat vastaavat paremmin nykyiseen testaustarpeeseen. Vuonna 2020 valmistunut TP23 on nyt uusiin Vaasan yksikön testipaikka ja sillä pystytään testaamaan nimellistehoaltaan 90 kW:n sähkömoottoreita. Vuonna 2021 on tarkoitus modernisoida testipaikka TP5. (Avantola, 2021)

## 5.2 Testipaikka TP23

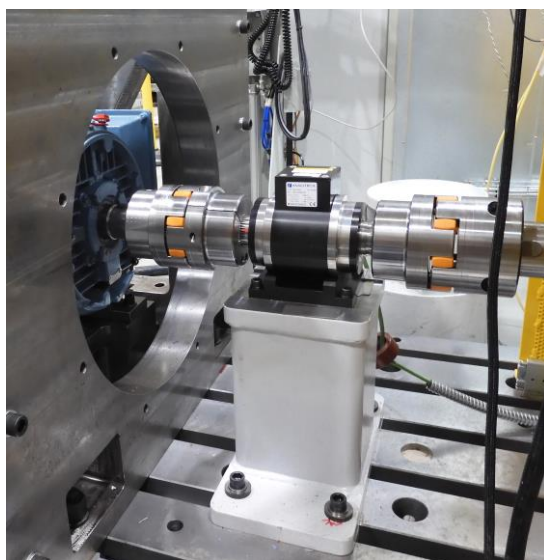
Testipaikka TP23 on rakennettu testauskapasiteetin kasvattamiseksi ja sillä pitäisi voida suorittaa IEC-standardien mukaisesti tyyppitestejä. Ennen tyyppitestaustalaitteiston käyttöönottoa laitteistolle laadittiin käyttöohje työturvallisuusmääräyksien noudattamiseksi. TP23 koostuu kokonaisuudessaan syöttö-, taajuusmuuttaja-, magnetointi-, generaattori- ja koestuskeskuksesta, mitkä esitetään kuvassa 11. Syöttökeskus toimii koestuspaikan syöttöpisteenä. Syöttökeskuksesta lähtee liitäntä taajuusmuuttajakeskukseen, mihin on kytkettynä generaattori sekä jarrumoottori. Taajuusmuuttajakeskuksesta saadaan myös apusähkö mittalaitteille, automaatiolle sekä magnetoinnille. Taajuusmuuttajakeskudessa sijaitsee myös testipaikan pääkytkin. Generaattorilta lähtee liitäntä generaattori-keskukseen, mistä valitaan generaattorin kytkentä. Step-up jännitemuuntajalta valitaan moottorin testaamiseen sopiva jännitealue. Koestuskeskukseen kuuluu myös jarrumoottori (kuva 12), momenttianturi (kuva 13) sekä testattava moottori, mikä on kuvassa 14. Pysäytettäessä testattavaa moottoria jarrumoottori toimii hetkellisesti generaattorina. Jarrumoottorin tuottama ylimääräinen sähköenergia ohjataan taajuusmuuttajakeskukseen välipiiriin jarrukatkojaan ja jarruvastukseen, jossa se muuttuu lämpöenergiaksi.



Kuva 11. Testipaikan TP23 jakelukaavio.



**Kuva 12.** Testipaikan TP23 jarrumoottori.



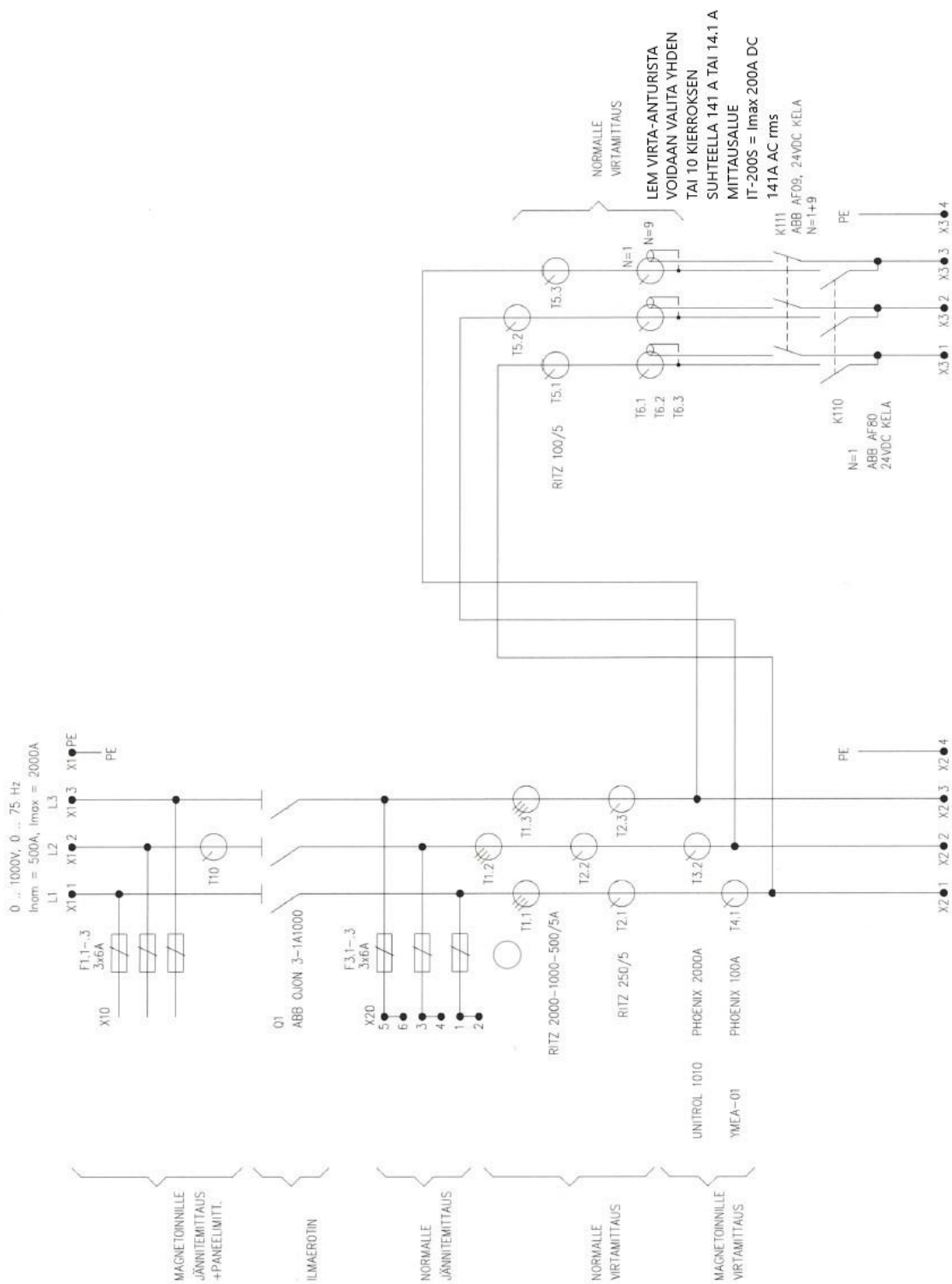
**Kuva 13.** Testipaikan TP23 momenttianturi, johon testattava moottori sekä jarrumoottori sovitetaan.



**Kuva 14.** Testipaikan TP23 alusta, johon testattava moottori kiinnitetään. Kuvassa moottori on kiinnitettynä.

Kuvassa 15 on esitetty testipaikan TP23 pääpiirikaavio virta- ja jännitemittauksineen. Kuvassa näkyvät magnetoinnin jännite- ja virtamittaukset, automaatiosta ohjattava ilmaerotin, RITZ-merkkiset virtamuuntajat sekä LEM-merkkiset virta-anturit. Moottorin syöttö voidaan ottaa suoraan kiskosta tai testipaikalle asennetusta voimavirtapistokkeesta riippuen moottorin nimellisvirrasta. Koestajalle voimavirtapistokkeen käyttö moottorin syöttämiseen on kytkemisen kannalta helpompaa ja täten sitä käytetään ensisijaisesti moottoreita testatessa. Moottorin syötön tapahtuessa suoraan kiskolta on virranmittaukseen käytettävissä nimellisvirraltaan 2000, 1000, 500 ja 250 A virtamuuntajat. Syötettäessä moottoria voimavirtapistokkeesta on virranmittaukseen käytettävissä lisäksi 100 A virtamuuntaja sekä 141 ja 14.1 A virta-anturit. Koestaja valitsee käytettävän virtamuuntajan testattavan moottorin nimellisvirran perusteella. Voimavirtapistokkeen käytön maksimivirraksi on sovittu 141 A. Sen ylittyessä on testattavan moottorin syöttö otettava suoraan kiskosta. Moottorin nimellisvirta kerrotaan kertoimella 1,6 ja sen perusteella valitaan tarpeeksi suuri virtamuuntaja tai virta-anturi. Kerroin määräytyy alaluvun 3.6 ylikuormitustestistä.

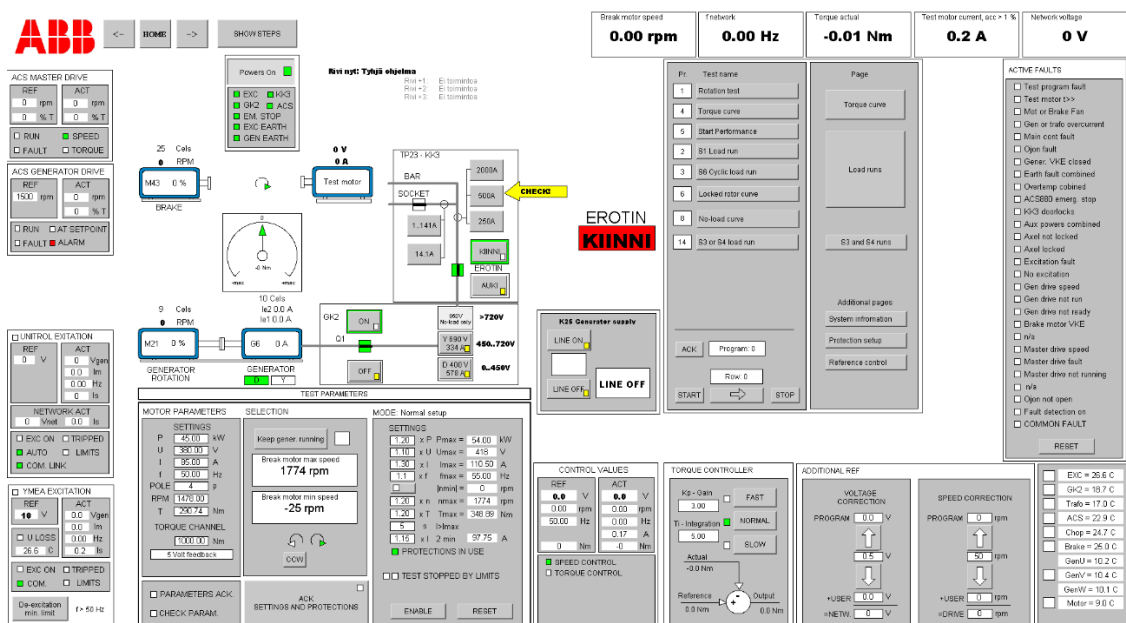




Kuva 15. Testipaikan TP23 pääpiirikaavio virta- ja jännitemittauksineen.

Testipaikkaa hallitaan automaation käyttöliittymästä tietokoneelta. Automaatio valitsee generaattorin kytkennän ja suojausasetukset sopiviksi moottorin kilpiarvojen ja kunkin testin perusteella. Automaatio ei valitse koestajan puolesta käytettävää syöttöä tai ohjaa ilmaerottimen asentoa. Automaation lisäksi testipaikalla on seuraavat mittalaitteet: momenttianturi Magtrol, tehoanalysaattori Fluke Norma 4000 Power Analyzer, tehollähde Yokogawa GS200 DC Voltage/Current Source, lämpöpiirturi Yokogawa MV2000, megaohmimittari Sefelec SE6541, mikro-ohmimittari Cropico microhmmeter DO5000 sekä erillinen mittaushjelma MotLab, joka lukee mittalaitteita.

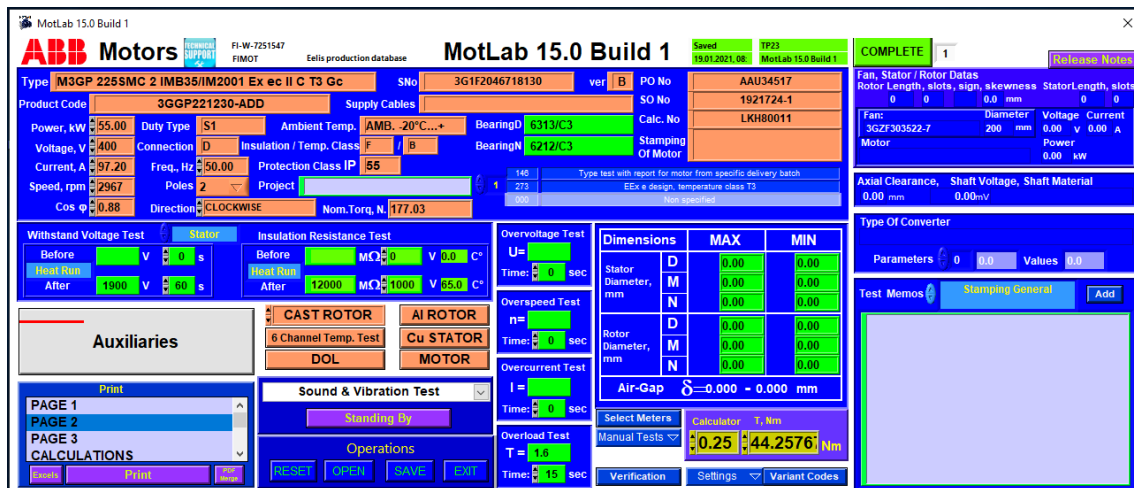
Kuvassa 16 on automaation käyttöliittymän pääikkuna, mikä esittää testattavan moottorin tilatiedot sekä näyttää moottorin kilpiarvot, releiden suojausasetukset, jarrumoottorin pyörimisnopeuden ja -suunnan, tarkistusarvot sekä aktiiviset vikatilat. Automaation käyttöliittymästä koestajalla on valittavissa testaukseen käytettävä virtamuuntaja tai -anturi, pää- ja ilmaerottimen asento, generaattorin kontaktorin asento, momenttianturin ja jänniteohjauksen manuaalinen säätö. Luvussa 3 kuvailut testit ovat valittavissa automaation pääikkunasta. Valittu testi aukeaa uuteen ikkunaan.



Kuva 16. Automaation käyttöliittymän pääikkuna.

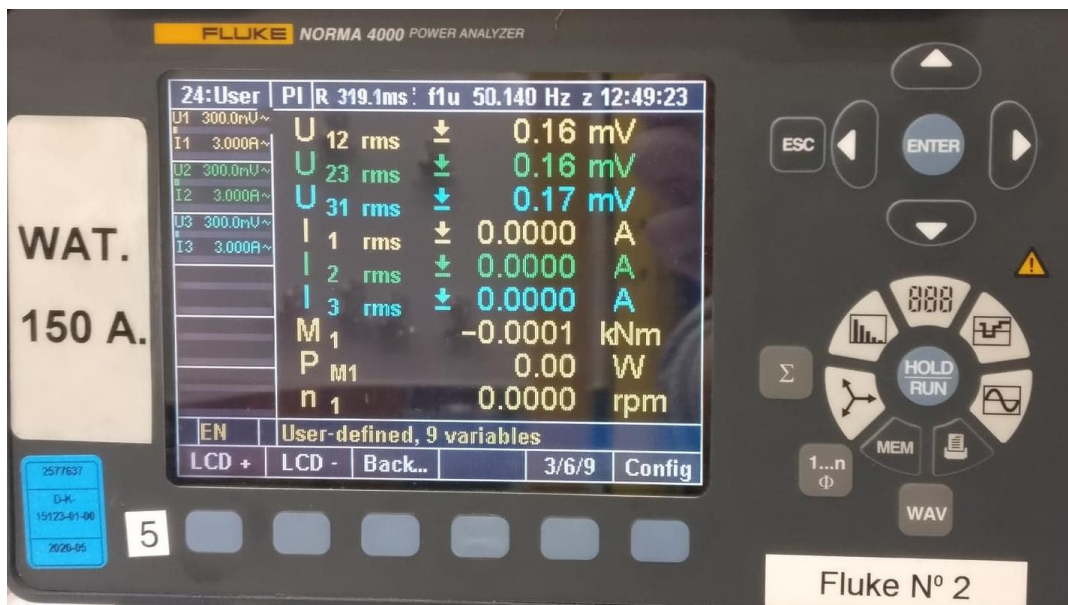
Automaatio valitsee generaattorin kytkennän ja suojausasetukset moottorin kilpiarvojen ja kunkin testin perusteella sopiviksi. Koestajan on valittava testattavan moottorin mukaan tarpeeksi suuri virtaraja. Testipaikalle tehdyssä käyttöohjeessa on järjestyksessä kuvattu tyyppiteistiin kuuluvat testivaiheet.

MotLab mittausohjelmaan kerätään mittalaitteista saatava mittausdata sekä kirjataan käsin syötettävät mittaustulokset. MotLab luo mittauksista koestuspöytäkirjan. Testitulosien tarkastelu jälkikäteen tapahtuu myös MotLab:ssa. MotLab:n käyttöliittymä esitetty kuvassa 17.



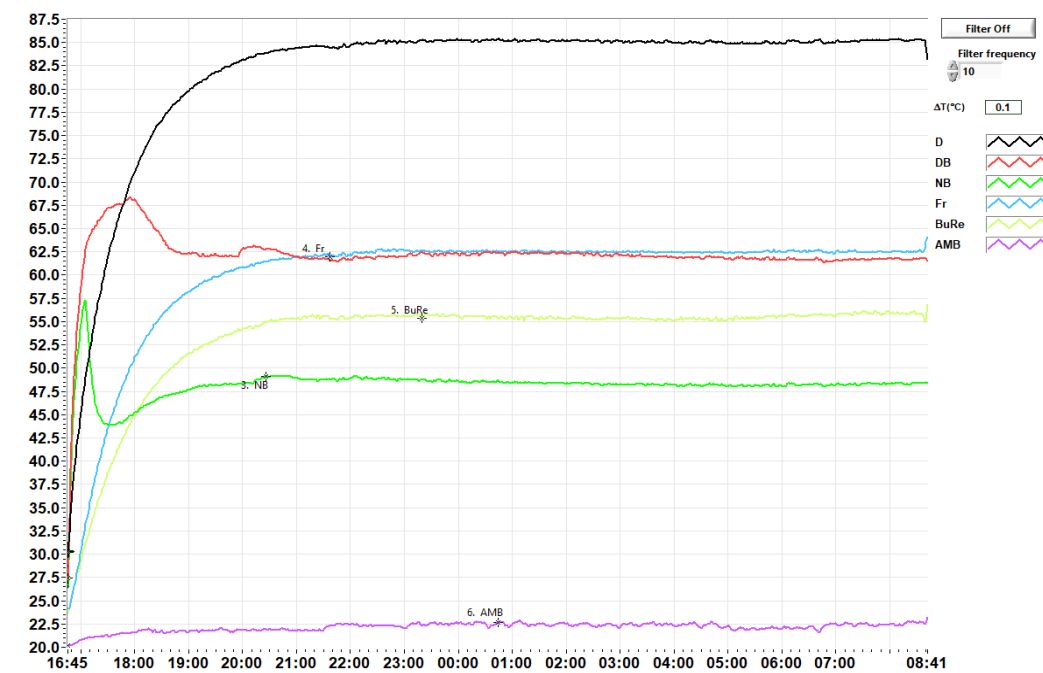
Kuva 17. MotLab:n käyttöliittymä.

Tehoanalysaattori, joka on kuvassa 18, mittaa moottorin vaihejännitteet, vaihevirrat, moottorin tuottaman momentin, moottorin verkosta ottaman tehon, pyörimisnopeuden, tehokertoimen sekä verkon taajuuden.



Kuva 18. Fluke Norma 4000 -tehoanalysaattori.

Lämpötilapiirturi piirtää lämpöajotestin aikana lämpötilakäyriä moottorin eri kohdista, jotka ovat nähtävissä myös automaation käyttöliittymässä. Kuvassa 19 on esitetty erään oikosulkumoottorin valmistunut lämpöajotestin lämpötilakäyrä. Lämpötilapiirturin kuvasta havaintaan, milloin moottori on saavuttanut lopullisen käyntilämpötilansa.



Kuva 19. Lämpötilapiirturin lämpötilakäyrät erään oikosulkumoottorin eri kohdista.

### 5.3 Testilaitteiston kyvykkyys

Koestuskeskuksen koestuspenkkiin voidaan kiinnittää runkokokovälin 132–250 mootto-reita testattavan moottorin maksimitehon ollessa 90 kW. Generaattorin (G1) maksimipyörimisnopeus on 4320 rpm ja sen nimellisvirrat eri kytkennöille on esitetty taulukossa 6. Testimoottorin nimellisvirrat eri kytkennöillä esitetty taulukossa 7. Jarrumoottorina on ABB:n 4-napainen oikosulkumoottori M3BP 280MLB. Käytetyn magtrol-momenttiantu-rin mittayläraja on 1000 Nm.

**Taulukko 6.** Generaattorin teoreettiset nimellisvirrat.

Kytkenä	Jännite (V)	Nimellisvirta (A)
Y	690	335
D	400	578
Y/D	> 720	30

**Taulukko 7.** Testimoottorin teoreettiset nimellisvirrat 90 kW:n maksimiteholla.

Kytkenä	Jännite (V)	Nimellisvirta (A)
Y	690	90
D	400	150
D	230	259

Testilaitteiston koeajossa momenttikäyrää mitattaessa havaittiin jännitesäätäjän rajoit-tavan generaattorin maksimivirrat taulukon 8 mukaisiksi.

**Taulukko 8.** Generaattorin todennetut maksimivirrat.

Kytkenä	Nimellisvirta (A)
Y	250
D	370

### 5.4 Testilaitteiston mittaustarkeuden varmentaminen

Testilaitteiston mittaustarkeuden varmentaminen ABB IEC LV Motors -divisioonassa pe-rustuu standardiin ISO/IEC 17205:2017 (*General requirements for the competence of*

*testing and calibration laboratories*) velvoitteisiin. Standardi ISO/IEC 17205:2017 velvoittaa, että laboratorion on toimittava:

- puolueettomasti
- luottamuksellisesti

sekä täytettävä seuraavat kriteerit:

- henkilöstöllä on määritelty pätevyys suorittaa mittauksia
- mittausympäristö ei voi heikentää tulosten oikeellisuutta
- laboratorio on valvottu tila
- mittauslaitteistolla on saavutettava vaadittu mittaustarkkuus
- mittauslaitteistolle on laadittu kalibrointiohjelma
- mittaukset suoritetaan vain kalibroiduilla mittalaitteilla
- mittalaitteet ovat yksilöityjä
- mittaustulosten on perustuttava SI-järjestelmään
- mittausmenetelmät ovat standardisoituja
- näytteenottomenetelmät on kuvattu
- mittaustulosten oikeellisuus on tarvittaessa pystyttävä varmistamaan
- mittaustulokset raportoidaan.

Mainittujen kohtien toteutuvuus varmistetaan akkreditoinnilla ja toteutuvuutta valvoo akkreditointilaitos vuosittaisilla seuranta-arvioinneilla. Suomen akkreditointilaitos FINAS (Finnish Accreditation Service) on akkreditoinut ABB IEC LV Motors -divisioonan Vaasan yksikön testilaboratorion ensimmäisen kerran vuonna 2020 (FINAS, 2021). Täten testilaboratorio täyttää standardin ISO/IEC 17205:2017 vaatimukset. Lisäksi testilaboratorio suorittaa mittaukset IEC-standardien IEC 60034-1, IEC 60034-2-1 ja IEC 60051-1 (*Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories*) mukaisesti. Ne määrittelevät tyyppitestauksessa vaadittavat tarkkuusvaatimukset taulukon 9 mukaisesti.

**Taulukko 9.** Tarkkuusvaatimukset tyyppitestauksessa (IEC 2014; IEC 2016).

Suure, nimike tai laite	Tarkkuusvaatimus
Yksiköt	Käytettävä SI-järjestelmän yksiköitä
Jännitteen epäsymmetria	Harmonisia yliaaltoja kuvaavan kertoimen HVF oltava $\leq 0,015$
Taajuus	Mittaustarkkuuden oltava $\leq 0,1$ % täydestä skaalasta ja taajuusvaihteluiden oltava $\leq 0,1$ %
Momentti	Mittaustarkkuuden oltava $\leq 0,2$ % täydestä asteikosta
Pyörimisnopeuden mitta	Mittaustarkkuuden oltava $\leq 0,1$ % tai 1 rpm
Lämpötilan mitta	Mittaustarkkuuden oltava $\leq 1$ °C
Mittalaitteet	Tarkkuusluokka 0,2
Virtamuuntajat	Mittaustarkkuuden oltava $\leq 0,3$ %

## 5.5 Ristiintestaus

Testilaitteiston mittausluotettavuuden varmentaminen suoritetaan ristiintestauksin eli ajetaan tyyppitestit valituilla ABB:n kalibrointimoottoreilla uudessa testilaitteistossa TP23 sekä käytössä olevilla testilaitteistoilla ja verrataan näiden tuloksia. Kalibrointimoottoreita on aikaisemmin tyyppitestattu usealla eri koestuspaikalla, joten kalibrointimoottorin suoritusarvot ovat tarkasti tiedossa. Jos uudella tyyppitestilaitteistolla testattaessa saadaan suuresti poikkeavia arvoja, niin erot johtuvat ensisijaisesti uuden testilaitteiston ominaisuuksista olettaen, että tyyppitesti on suoritettu moitteetta.

Ristiintestauksesta saadaan vertailukelpoisia tuloksia, jos verrattavilla testipaikoilla käytetään samaa moottoria. Täten moottorin sarjanumero ja laskelma on oltava testipöytäkirjoissa identtinen. Tällöin mahdolliset eroavaisuudet testitulosten välillä eivät voi johtua moottorin rakenneosista, sillä jokaisen sähkömoottorin suoritusarvot kuitenkin hieman poikkeavat todellisuudessa toisistaan johtuen käytettävien materiaalien ja komponenttien laatueroista sekä moottorin valmistuksesta, joka on enimmäkseen käsityötä. Edellä mainituista syistä tilanteessa, jossa laskelmat ovat samat, mutta sarjanumerot ovat eriäviä, tulokset eivät ole vertailukelpoisia. Standardi 60034-2-1 määrittää oikosulkumoottorista mitattaville suureille luvussa 2 esitetyt toleranssit, joiden sisällä mitattujen arvojen tulee olla lasketuista arvoista.

## 6 Mittaustulokset ristiintestauksin

Neljällä eri moottorilla tehtyjen ristiintestauksien tulokset on koottu tämän luvun taulukoiksi 10, 11, 12 ja 13, joista kustakin löytyvät kyseisestä moottorista mitatut suureet, moottorin arvokilpitiedot, testipaikka ja testin suoritus aika. Taulukoihin on myös laskettu prosentteina, kuinka paljon TP23:n kunkin suureen arvo poikkeaa toisella testipaikalla tehdystä testistä.

### 6.1 Mittaustulokset M3BP 200MLA 6 -moottorilla

Kalibrointimoottorilla M3BP 200MLA 6 on suoritettu aikaisempi tyyppitesti 11.4.2019 testipaikalla TP2. Uudella testipaikalla TP23 on suoritettu tyyppitesti 3.12.2020. Tyyppitestituloksien vertailu on esitetty taulukossa 10. Ensimmäisessä sarakkeessa vasemmalta katsoen ovat moottorista mitatut suureet. Seuraavassa sarakkeessa näkyvät moottorin arvokilpitiedot, joiden toteutuvuutta tyyppitestissä tarkastellaan. Kolmannesta sarakkeesta löytyvät aikaisemman tyyppitestin tulokset ja neljännessä sarakkeesta löytyvät TP23 suoritettujen tyyppitestin suoritusarvot. Viidennessä sarakkeessa on jo mainittu testipaikan TP23 suureiden prosentuaalinen eroavaisuus toiseen testipaikkaan verrattaessa. Testattavan moottorin kytkentä on 400 V, D, 50 Hz ja 18,5 kW.



**Taulukko 10.** M3BP 200MLA 6 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP2 ja TP23.

Suure	Leimaus	TP2 Mittaustulos 11.4.2019	TP23 Mittaustulos 3.12.2020	Ero (%)
$U$ (V)	400	400,4	400,7	0,07
$I$ (A)	38,1	37,52	37,42	-0,27
$P_{fw}$ (W)		107,8	106,9	-0,84
$P_{Fe}$ (W)		415,0	466,2	10,98
$P_s$ (W)		686,4	680,3	-0,90
$P_r$ (W)		195,9	193,3	-1,35
$P_{LL}$ (W)		105,5	108,6	2,85
$P_T$ (W)		1510,5	1555,3	2,88
$P_2$ (kW)	18,5	18,59	18,54	-0,27
$P_1$ (kW)		20,10	20,09	-0,05
$\eta$ (%)	92,4	92,48	92,26	-0,24
$\cos \varphi$	0,76	0,772	0,774	0,26
$s$ (%)		1,03	1,02	-1,08
$n$ (rpm)	990	990,27	989,79	-0,05
$DQ_{Cu10}$ (°C)		51,9	51,3	-1,17
$DQ_{Cu1}$ (°C)	50	49,9	49,3	-1,22
$DQ_D$ (°C)		57,6	57,0	-1,05
$DQ_F$ (°C)		35,8	36,4	1,65
$DQ_{DB}$ (°C)		41,1	39,1	-5,12
$u_{amb}$ (°C)		21,4	20,3	-5,42
Käynnistystestin tulokset:				
$U_{start}$ (V)		402,0	398,2	-0,95
$I_s/I_n$	7,6	7,42	7,43	0,13
$T_s/T_n$	2,92	2,85	2,88	1,04
Momenttikäyrätestin tulokset:				
$U_{torq}$ (V)		395,1	397,9	0,70
$T_s/T_n$	2,92	2,92	2,88	-1,39
$T_{min}/T_n$		2,62	2,53	-3,56
$T_{max}/T_n$	3,54	3,42	3,52	2,84

Tehtäessä ristiintestauksia tulisi jälkimmäisessä tyyppitestissä pystyä toistamaan ensimmäisen tyyppitestin tulokset eli tässä tapauksessa päästä uudella testipaikalla TP23 mahdollisimman lähelle verifioidun testipaikan tuloksia. Kuten taulukosta 10 havaitaan, on testattavasta moottorista mitatut jännite ja virta lähellä teoreettisia arvoja ja keskinäisten testien arvojen eroavaisuus hyvin pientä. Häviötä tarkastellessa testipaikalla TP23 suoritettussa testissä rautahäviöiden osuus on suurempi kuin testipaikalla TP2 tehdyssä testissä ja tämä näkyy kokonaishäviöiden ollessa hieman suuremmat testipaikalla TP23 tehdyssä testissä kuin testipaikan TP2 testissä. Tämä vaikuttaa moottorin hyötysuhdetta

laskettaessa. Testipaikan TP2 testissä moottori ylittää moottorin arvokilpeen merkittyyn hyötysuhteeseen, kun taas testipaikan TP23 testissä moottorin hyötysuhde jää hieman alle arvokilpeen merkitystä hyötysuhteesta. Koska IEC-standardissa IEC 60034-30-1 on määritelty moottorin hyötysuhteelle toleranssit, niin tyyppitesti voidaan hyväksyä, vaikka moottorin mitattu hyötysuhde jää lasketusta hyötysuhteesta, kunhan mitattu hyötysuhde on toleranssin rajoissa.

Moottorin sähköisen tehon ja mekaanisen tehon välillä ei tyyppitesteissä näy kuitenkaan eroa. Myöskään tehokertoimessa, jättämässä tai pyörimisnopeudessa ei ole merkittävää eroa. Moottorin eri kohdista mitatuista lämpenemissä ei ole merkittävää eroa. Lämpenemiä mitatessa voidaan käyttää moottorin omia PT100-antureita, jos sellaiset on asennettu moottoriin tai moottorin ulkopuolisia lämpötila-antureita, kuten termoparia. Ulkoisten lämpötila-antureiden mittaustuloksiin toistomittauksessa vaikuttaa, kuinka ne on aseteltu ja kiinnitetty moottorin runkoon. Käynnistystestin tai momenttikäyrätestin tuloksissa ei ole merkittäviä eroavaisuuksia testipaikkojen välillä. Käynnistystestissä lasketun käynnistysvirran suhde nimellisvirtaan on hieman suurempi kuin mitä testeissä on mitattu. Havaittu ero lasketun ja mitatun käynnistysvirran välillä johtuu tyyppillisesti moottorin laskelmalla olevasta virheestä.

Rautahäviöiden suurempi osuus vaatii tarkempaa tutkimista, sillä mahdollisia selityksiä on monia. Testipaikka TP23 sijaitsee eri rakennuksessa kuin testipaikka TP2 ja täten testipaikoilla verkkoa syöttävät eri generaattorit. Testipaikalla TP23 on virranmittaukseen valittavissa joko virtamuuntaja tai virta-anturi ja niiden välillä voi olla eroja. Testipaikka TP23 on myös käytössä eri tehoanalysaattorit kuin muilla testipaikoilla ja tehoanalysaattorien välillä voi esiintyä eroja. Testipaikoilla työskentelee useampia koestajia ja koestajien työtavat voivat erota toisistaan, jolloin eri koestajien välillä on mahdollista saada eroavia tuloksia, vaikka tyyppitesti suoritettaisiin samalla moottorilla samalla koestuspaikalla.

## 6.2 Mittaustulokset M3BP 200MLA 2 -moottorilla

Kalibrintimoottorilla M3BP 200MLA 2 on suoritettu tyyppitesti 4.12.2020 testipaikalla TP21. Uudella testipaikalla TP23 on suoritettu tyyppitesti 1.12.2020. Tyyppitestituloksien vertailu on esitetty taulukossa 11. Taulukkoa luetaan samoin kuin alaluvussa 6.1. Testatavan moottorin kytkentä on 380 V, D, 50 Hz ja 30 kW.

**Taulukko 11.** M3BP 200MLA 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP21 ja TP23.

Suure	Leimaus	TP21 Mittaustulos 4.12.2020	TP23 Mittaustulos 1.12.2020	Ero (%)
$U$ (V)	380	380,3	380,7	0,11
$I$ (A)	54,6	55,19	55,41	0,40
$P_{fw}$ (W)		392,8	443,2	11,37
$P_{Fe}$ (W)		316,9	406,0	21,95
$P_s$ (W)		764,8	774,1	1,20
$P_r$ (W)		521,5	527,0	1,04
$P_{LL}$ (W)		541,8	403,5	-34,28
$P_T$ (W)		2537,8	2553,8	0,63
$P_2$ (kW)	30	30,02	30,18	0,53
$P_1$ (kW)		32,55	32,74	0,58
$\eta$ (%)	93,3	92,20	92,20	0,0
$\cos \varphi$	0,9	0,896	0,896	0,0
$s$ (%)		1,66	1,67	0,78
$n$ (rpm)	2949	2949,96	2949,86	0,0
$DQ_{Cu10}$ (°C)		59,3	60,5	1,98
$DQ_{Cu1}$ (°C)	60	57,5	58,8	2,21
$DQ_D$ (°C)				
$DQ_F$ (°C)		33,7	29,9	-12,71
$DQ_{DB}$ (°C)		39,3	42,6	7,75
$u_{amb}$ (°C)		19,8	20,2	1,98
Käynnistystestin tulokset:				
$U_{start}$ (V)		287,1	283,4	-1,16
$I_s/I_n$	6,9	6,56	6,30	-4,13
$T_s/T_n$	2,4	2,15	2,13	-0,94
Momenttikäyrätestin tulokset:				
$U_{torq}$ (V)		284,2	283,4	-0,28
$T_s/T_n$	2,4	2,18	2,20	0,91
$T_{min}/T_n$		1,85	1,85	0,0
$T_{max}/T_n$	2,8	2,71	2,60	-4,23

Edellisestä moottorista poiketen tämä on ensin testattu uudella testipaikalla TP23 ja sitten testipaikalla TP21. Nämä testipaikat sijaitsevat samassa rakennuksessa ja testipaikojen verkkoa syöttää sama generaattori. Moottorista mitatun jännitteen ja virran erot ovat tyyppitestien välillä hyvin pienet, mutta siirryttäessä tarkastelemaan moottorin häviökomponentteja huomataan taulukosta 11 kitka- ja tuuletinhäviöiden sekä rautahäviöiden poikkeavan testipaikkojen välillä. Myös lisähäviöissä on huomattava ero. Tarkasteltaessa kokonaishäviöitä häviökomponentit summautuvat kuitenkin niin, että kokonaishäviöissä ei ole merkittävää eroa testien välillä, joten vaikutus moottorin hyötysuhteeseen ei muodostu merkittäväksi. Rautahäviöt ja kitka- ja tuuletinhäviöt määritetään tyhjäkäyntitestissä mitatusta tyhjäkäyntitehosta laskemalla. Mahdollisesti korkeamman tyhjäkäyntitehon takia testipaikalla TP23 niin rautahäviöiden kuin kitka- ja tuuletinhäviöiden osuus on isompi, mikä näkyy suoraan pienempinä lisähäviöinä yhtälön 18 mukaisesti. Ero tyyppitestien tyhjäkäyntitehoissa viittaisi testipaikkojen eri tehoanalyysointien välillä oleviin eroavaisuuksiin tai moottorin lämpötilaeroihin testien välillä.

Sähköisen ja mekaanisen tehon osalta testien välillä ei ole suurta eroa. Testipaikalla TP23 moottorin ottama virta on hieman suurempi kuin testipaikalla TP21, ja täten myös testipaikalla TP23 moottorin ottama sähköteho on hieman suurempi kuin testipaikan TP21 testissä, jolloin myös mekaaninen teho on hieman isompi TP23:lla kuin TP21:lla. Testatun moottorin hyötysuhde on sama molemmilla testipaikoilla, mutta poikkeaa suuresti arvokilpeen merkitystä hyötysuhteesta. Ero hyötysuhteissa vaatii tarkemman tutkimisen ennen koestustuloksien hyväksymistä. Tehokertoimessa, jättämässä sekä pyörimisnopeudessa ei ole testien välillä merkittävää eroa. Moottorin rungosta ja D-pään laakerista mitatussa lämpenemässä on eroavaisuutta testipaikkojen välillä, mikä viitanee siihen, että moottorin ympärille asetetut termoparit ovat olleet testien välillä hieman eri kohdissa moottoria. Käynnistystestin käynnistysvirran ja nimellisvirran suhteessa ja momenttikäyrätestin maksimimomentin ja nimellismomentin suhteessa on poikkeamaa laskettujen leimausarvojen ja testattujen arvojen välillä. Poikkeama johtuu todennäköisemmin myös moottorin laskelmassa tai leimausarvoissa olevista virheistä kuin siitä, että moottorissa olisi mekaanista vikaa.

### 6.3 Mittaustulokset M3AA 225SMD 2 -moottorilla

Kalibrintimoottorilla M3AA 225SMD 2 on suoritettu tyyppitesti 10.12.2020 testipaikalla TP0. Uudella testipaikalla TP23 on suoritettu tyyppitesti 16.12.2020. Tyyppitestituloksien vertailu on esitetty taulukossa 12. Taulukkoa luetaan samoin kuin alaluvussa 6.1. Testatavan moottorin kytkentä on 440 V, D, 60 Hz ja 80 kW.

**Taulukko 12.** M3AA 225SMD 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP0 ja TP23.

Suure	Leimaus	TP0 Mittaustulos 10.12.2020	TP23 Mittaustulos 16.12.2020	Ero (%)
$U$ (V)	440	440,2	440,8	0,14
$I$ (A)	124	124,68	125,02	0,27
$P_{fw}$ (W)		638,8	644,1	0,82
$P_{Fe}$ (W)		1069,7	1133,7	5,65
$P_s$ (W)		973,1	983,4	1,05
$P_r$ (W)		750,7	763,9	1,73
$P_{LL}$ (W)		929,0	929,1	0,01
$P_T$ (W)		4361,3	4454,3	2,09
$P_2$ (kW)	80	79,61	80,06	0,56
$P_1$ (kW)		83,97	84,52	0,65
$\eta$ (%)	94,4	94,81	94,73	-0,08
$\cos \varphi$	0,89	0,884	0,886	0,23
$s$ (%)		0,92	0,93	1,19
$n$ (rpm)	3566	3566,97	3566,60	-0,01
$DQ_{Cu10}$ (°C)		70,3	70,4	0,14
$DQ_{Cu1}$ (°C)	73	66,8	67,1	0,45
$DQ_D$ (°C)				
$DQ_F$ (°C)		32,5	36,3	10,47
$DQ_{DB}$ (°C)		27,1	37,5	27,73
$u_{amb}$ (°C)		21,8	21,5	-1,4
Käynnistystestin tulokset:				
$U_{start}$ (V)	440	441,2	174,7	-152,55
$I_s/I_n$	7,8	7,14	7,49	4,67
$T_s/T_n$	2,8	2,96	2,81	-5,34
Momenttikäyrätestin tulokset:				
$U_{torq}$ (V)	440	435,4	174,2	-149,94
$T_s/T_n$	2,8	2,99	3,01	0,66
$T_{min}/T_n$				
$T_{max}/T_n$	2,9	2,89	3,12	7,37

Tyyppitestien mittaustuloksia vertaillen havaitaan, että moottorista mitatussa jännitteessä ja virrassa ei ole merkittävää eroa. Häviökomponentteja tarkasteltaessa tämänkin moottorin kohdalla testipaikalla TP23 suoritettussa testissä rautahäviöiden osuus on suurempi, mutta ero ei ole niin suuri kuin testipaikoilla TP2 ja TP21. Tyyppitestituloksista voidaan huomata kokonaishäviöiden summautuvan niin, että testipaikalla TP23 mitatut kokonaishäviöt ovat noin 2 % suuremmat kuin testipaikalla TP0, mikä ei ole merkittävän suuri ero, mutta vaikuttaa kuitenkin negatiivisesti hyötysuhteeseen ja rajatapauksissa toisella testipaikalla saadaan hyväksytty tyyppitesti ja testipaikalla TP23 hylätty tyyppitulos. Testipaikalla TP23 testattaessa moottorin hyötysuhde näyttäisi jäävän hieman huonommaksi kuin muilla testipaikoilla testatessa. Teoriassa on myös mahdollista, että muut testipaikat antavat todellista parempia tuloksia.

Tehokerrointa, jättämää ja moottorin pyörimisnopeutta vertailtaessa ei tyyppitestien välillä näytä olevan merkittäviä eroja. Moottorin lämpenemiä mitattaessa on toisella testipaikalla tullut karkea mittausvirhe moottorin D-pään laakerin lämpenemän mittauksessa, sillä muuten 10 °C lämpenemäero laakerissa kahden testipaikan välillä ei selity. Käynnistystesti ja momenttikäyrätesti on todennäköisesti pitänyt ajaa testipaikalla TP23 virta- ja momenttirajojen takia alennetuilla arvoilla, mikä selittää miksi testit on tehty eri jännitteellä kuin testipaikalla TP0. Alennetuilla arvoilla laskettaessa lopputuloksissa voi olla hieman eriäviä tuloksia, koska lopulliset arvot on suhteutettu alennetulta jännitteeltä nimellisjännitteelle. Lasketun käynnistysvirran suhde nimellisvirtaan on testituloksiin nähden yläkantissa, joten virhe on todennäköisesti leimausarvoissa ja peräisin laskelmasta. Laskettua alempi käynnistysvirta ei ole kuitenkaan asia, mistä asiakas tyyppillisesti reklamoisi, sillä asiakkaalla on yleensä moottorille käynnistysvirtavaatimus ja suurempi haaste suunnittelun osalta on päästä tarpeeksi mataliin käynnistysvirtoihin. Tämän moottorin ristiintestauksessa mitatut suoritusarvot ovat tähän asti testipaikkojen välillä rautahäviöitä lukuun ottamatta lähimpänä toisiaan, joten myös tarkempi tutkimus testipaikkojen TP0 ja TP23 eroavaisuuksista voisi antaa syitä testipaikan TP23 suuremmille rautahäviöille.

## 6.4 Mittaustulokset M3GP 250SMA 2 -moottorilla

Kalibrintimoottorilla M3GP 250SMA 2 on suoritettu tyyppitesti 28.11.2020 testipaikalla TP2. Uudella testipaikalla TP23 on suoritettu tyyppitesti 2.12.2020. Tyyppitestituloksien vertailu on esitetty taulukossa 13. Taulukkoa luetaan samoin kuin alaluvussa 6.1. Testatavan moottorin kytkentä on 400 V, D, 50 Hz ja 55 kW.

**Taulukko 13.** M3GP 250SMA 2 -moottorin tyyppitestitulokset testipaikoilla TP2 ja TP23.

Suure	Leimaus	TP2 Mittaustulos 28.11.2020	TP23 Mittaustulos 2.12.2020	Ero (%)
$U$ (V)	400	400,1	400,0	-0,03
$I$ (A)	95,1	94,53	94,48	-0,05
$P_{fw}$ (W)		742,9	852,1	12,82
$P_{Fe}$ (W)		643,9	694,7	7,31
$P_s$ (W)		879,6	882,5	0,33
$P_r$ (W)		575,0	579,2	0,73
$P_{LL}$ (W)		516,1	423,8	-21,78
$P_T$ (W)		3357,5	3432,3	2,18
$P_2$ (kW)	55	54,94	55,00	0,11
$P_1$ (kW)		58,30	58,43	0,22
$\eta$ (%)	94,2	94,24	94,13	-0,12
$\cos \varphi$	0,89	0,890	0,893	0,34
$s$ (%)		1,01	1,02	0,59
$n$ (rpm)	2975	2970,41	2969,41	-0,03
$DQ_{Cu10}$ (°C)		61,1	62,1	1,61
$DQ_{Cu1}$ (°C)	60	58,7	59,6	1,51
$DQ_D$ (°C)				
$DQ_F$ (°C)		33,9	33,1	-2,42
$DQ_{DB}$ (°C)		44,7	47,0	4,89
$u_{amb}$ (°C)		20,8	19,8	-5,05
Käynnistystestin tulokset:				
$U_{start}$ (V)		200,3	199,3	-0,5
$I_s/I_n$	7,2	7,03	6,99	-0,57
$T_s/T_n$	2	1,86	1,86	0,0
Momenttikäyrätestin tulokset:				
$U_{torq}$ (V)		198,3	198,6	0,15
$T_s/T_n$	2	2,04	2,04	0,0
$T_{min}/T_n$		1,76	1,76	0,0
$T_{max}/T_n$	3,1	3,60	3,13	-15,02

Tyyppitestejä tarkasteltaessa moottorista mitattu jännite ja virta ovat hyvin lähekkäin ja lähellä arvokilven arvoja. Häviökomponentteja vertailtaessa huomataan rauta-, kitka-, tuuletin- ja lisähäviöiden eriävät mittaustulokset testipaikkojen TP23 ja TP2 välillä. TP23:n tyyppitestin häviökomponenteissa on yhteneväisyyksiä alaluvun 6.2 ristiintestauksen tulosten kanssa, jolloin syntyneet erot viittaisivat paremminkin tyyppilaitteistojen eroavaisuuksiin kuin koestajista johtuviin eroavaisuuksiin. Summattaessa häviökomponentit, kokonaishäviöiden osuus on testipaikan TP23 tyyppitestissä hieman suurempi kuin testipaikan TP2 tyyppitestissä, mikä vaikuttaa moottorista mitattavaan hyötysuhteeseen negatiivisesti ja moottorin hyötysuhde jää hienoisesti alle teoreettisen arvon.

Sähkötehon ja mekaanisen tehon erot tyyppitestien välillä ovat merkitsevän pienet. Myöskään verrattaessa tehokerrointa, jättämää ja moottorin pyörimisnopeutta merkittäviä eroja ei ole. Lämpenemässä esiintyvät pienet eroavaisuudet johtuvat todennäköisesti ulkoisten termoparien eroavasta asettelusta moottoriin testien välillä. Käynnistystesti ja momenttikäyrätesti on molemmilla koestuspaikoilla tehty alennettuja arvoja käyttäen virta- tai momenttirajojen vuoksi. Momenttikäyrätestissä on saatu testipaikkojen välillä eriäviä tuloksia, jolloin toisella testipaikalla on tapahtunut mittausrvirhe maksimummomenttia mitattaessa.

## 6.5 Lisätestien mittaustulokset

Suurempien rautahäviöiden syiden selvittämiseksi ajettiin muutamia ylimääräisiä tyyppi- ja tyhjäkäyntitestejä. Koska kitka- ja tuuletinhäviöt samoin kuin myös rautahäviöt määritetään tyhjäkäyntitehosta laskemalla, tutkittiin, mikä aiheuttaisi testipaikalla TP23 testattaessa muita testipaikkojen suuremman tyhjäkäyntitehon. Ensimmäiseksi ajettiin tyyppitestit M3BP 200MLB 2 -moottorille käyttäen ensin virran mittaukseen virtamuuntajaa ja toiseksi virta-anturia. Vertailemalla eri valmistajien virtamuuntajia ja virta-antureita keskenään selviäisi, onko virran mittausrvirrien välillä merkittäviä eroavaisuuksia, mitkä selittäisivät ristiintestauksessa tehtyjä havaintoja. Toiseksi ajettiin tyhjäkäyntitestit M3JP 225SMB 2 -moottorilla käyttäen eri tehoanalysointireiteitä, jolloin mahdollisesti selviäisi, onko saman valmistajan eri tehoanalysointireiteiden välillä eroja, mitkä selittäisivät



ristiintestauksessa tehtyjä havaintoja. Eri virran mittauspiirien tyyppitestitulokset on esitetty taulukoissa 14 ja eri virran mittauspiirien tyhjäkäyntitestien tulokset taulukoissa 15 ja 16. Eri tehoanalyysointien väliset tulokset on esitetty taulukossa 18. Prosentuaalinen ero lasketaan virtamuuntajan poikkeamasta virta-anturin arvoon verrattuna. Taulukossa 14 nähdään testipaikan TP23 virransyöttöjen välillä eroa kitka- ja tuuletinhäviöissä kuin rautahäviöissä, mutta kokonaishäviöteho on lähes sama molemmissa testeissä.

**Taulukko 14.** Tyyppitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla eri virran mittauspiireillä.

Suure	Leimaus	TP23 Virta-anturi 8.12.2020	TP23 Virtamuuntaja 8.12.2020	Ero (%)
$U$ (V)	400	400,4	400,4	0,00
$I$ (A)	61,6	63,27	63,27	0,00
$P_{fw}$ (W)		354,2	323,3	-9,56
$P_{Fe}$ (W)		324,3	357,0	9,16
$P_s$ (W)		791,5	791,5	0,00
$P_r$ (W)		640,7	640,0	-0,11
$P_{LL}$ (W)		469,9	470,9	0,21
$P_T$ (W)		2580,6	2582,6	0,08
$P_2$ (kW)	37	36,95	36,94	-0,03
$P_1$ (kW)		39,53	39,53	0,00
$\eta$ (%)	93,7	93,47	93,47	0,00
$\cos \varphi$	0,92	0,901	0,901	0,00
$s$ (%)		1,67	1,67	0,00
$n$ (rpm)	2951	2949,93	2949,93	0,00

Testattavalla moottorilla on ensin suoritettu tyyppitesti luvun 3 mukaisessa järjestyksessä käyttäen virran mittaukseen virtamuuntajia moottorin saavuttaessa loppulämpötilansa. Tämän jälkeen moottorin virran mittauspiiriksi vaihdettiin virta-anturit, mikä vaatii uudelleenkytkemisen. Uudelleenkytkemiseen kuluneen ajan moottori on saanut jäähtyä. Uudelleenkytkemisen jälkeen moottoria ei ole ajettu takaisin loppulämpötilaan ja toinen tyyppitestausta on suoritettu tarvittavin osin, mihin viittaavat taulukoiden 15 ja 16 mittaustulokset tyhjäkäyntitestistä. Viileämmästä moottorista mitatessa kitka- ja tuuletinhäviöiden osuus on suurempi, sillä laakereiden ollessa viileämmät, niissä oleva laakerirasva on jäykempää kuin kuumassa laakerissa. Tämä selittäisi kitka- ja tuuletinhäviöiden välistä eroa tyyppitestien välillä ja mahdollisesti ristiintestauksissa.

**Taulukko 15.** TP23 Virtamuuntajan tyhjäkäyntitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla.

$U_0$ (V)	$I_0$ (A)	$P_0$ (W)	$f_0$ (Hz)	$R_0$ ( $\Omega$ )	$P_s$ (W)	$P_c = P_0 - P_s$ (W)
439,8	14,62	827,9	50,0	0,11970	38,4	789,5
400,0	12,71	734,5	50,0	0,11937	28,9	705,5
380,1	11,88	694,5	50,0	0,11924	25,3	669,3
360,0	11,14	658,6	50,0	0,11910	22,2	636,5
320,0	9,71	597,0	50,0	0,11880	16,8	580,2
240,0	7,11	492,3	50,0	0,11834	9,0	483,3
200,0	5,93	446,0	50,0	0,11816	6,2	439,8
160,0	4,84	406,8	50,0	0,11797	4,2	402,7
120,0	3,98	376,1	50,0	0,11782	2,8	373,3
80,1	3,74	350,7	50,0	0,11770	2,5	348,3

**Taulukko 16.** TP23 Virta-anturin tyhjäkäyntitestin tulokset M3BP 200MLB 2 -moottorilla.

$U_0$ (V)	$I_0$ (A)	$P_0$ (W)	$f_0$ (Hz)	$R_0$ ( $\Omega$ )	$P_s$ (W)	$P_c = P_0 - P_s$ (W)
439,9	14,85	805,7	50,0	0,10680	35,3	770,4
399,9	12,99	728,7	50,0	0,10677	27,0	701,7
380,1	12,14	699,0	50,0	0,10675	23,6	675,4
360,0	11,38	668,4	50,0	0,10674	20,7	647,7
320,1	9,97	607,6	50,0	0,10671	15,9	591,7
239,9	7,32	510,1	50,0	0,10666	8,6	501,5
200,0	6,12	469,1	50,0	0,10665	6,0	463,1
159,9	5,02	431,1	50,0	0,10663	4,0	427,1
120,0	4,15	405,7	50,0	0,10661	2,8	402,9
80,1	4,07	390,2	50,0	0,10660	2,6	387,5

Rautahäviöiden ja kitka- ja tuuletinhäviöiden välillä on riippuvuus yhtälön 14 ja kuvan 5 mukaisesti, mikä selittäisi juuri päinvastaisen tulokset rautahäviöissä tyyppitestien välillä, mutta tätä riippuvuutta ei kuitenkaan esiinny kaikkien ristiintestauksien välillä, joten syitä eroihin on mahdollisesti useita. Tyyppitestien tuloksia verrattaessa kuitenkin kokonaisuuden suuruus on likimain sama, joten todennäköisin selitys häviökomponenttien eroille on testattavan moottorin eri loppulämpötila tyyppitestien aikana. Taulukoiden 15 ja 16 mittaustulosten vertailu on esitetty taulukossa 17, mihin on laskettu mittaustuloksien prosentuaalinen eroavaisuus tyhjäkäyntitestien välillä nimellisjännitteen eri pisteissä eri virran mittausspiireillä. Positiivinen ero mittaustuloksissa tarkoittaa virtamuuntajilla tyhjäkäyntitestissä mitatun arvon olevan suurempi kuin virta-antureilla mitatun arvon.

**Taulukko 17.** Virran mittaussiirien välisten tyhjäkäyntitestien tuloksien eroavaisuudet.

$U_0/U_n$	$R_0(\%)$	$P_0(\%)$	$I_0(\%)$	$U_0(\%)$	$P_s(\%)$	$P_c(\%)$
1,1	10,78	2,68	-1,59	-0,01	7,92	2,42
1	10,56	0,79	-2,18	0,02	6,62	0,55
0,9	10,47	-0,64	-2,20	0,00	6,48	-0,91
0,8	10,38	-1,48	-2,12	-0,01	6,53	-1,76
0,7	10,18	-1,77	-2,71	-0,02	5,25	-1,98
0,6	9,87	-3,60	-3,00	0,04	4,38	-3,75
0,5	9,74	-5,18	-3,22	0,01	3,84	-5,31
0,4	9,62	-5,96	-3,61	0,03	2,97	-6,05
0,3	9,51	-7,87	-4,26	0,01	1,64	-7,95
0,2	9,43	-11,25	-8,69	-0,03	-7,00	-11,28

Taulukosta 17 huomataan tyhjäkäyntiresistanssin olevan järjestäen suurempi kaikilla tyhjäkäyntijännitteen pisteillä virranmittauksen tapahtuessa virtamuuntajilla tyhjäkäyntitestissä, mikä viittaisi myös siihen, että ensimmäisessä tyhjäkäyntitestissä moottori on lähempänä lämpöajon loppulämpötilaa kuin jälkimmäisessä tyhjäkäyntitestissä, sillä lämpötilan kasvaessa metallien resistiivisyys kasvaa, jolloin resistanssi on suurempi. Tyhjäkäyntijännitteissä ei ole mainittavaa eroavaisuutta. Tyhjäkäyntivirta on järjestäen pienempi virranmittauksen tapahtuessa virtamuuntajilla, mutta pienempi tyhjäkäyntivirta johtuu suuremmasta tyhjäkäyntiresistanssista. Tyhjäkäyntitehon erot kaventuvat siirryttäessä kohti nimellisjännitettä ja nimellisjännitteen läheisyydessä erot ovat merkitsevän pienet, ja johtuvat moottorin loppulämpötilan eroavaisuudesta tyhjäkäyntitestien aikana. Staattorikäymissä syntyvien häviöiden eroihin vaikuttaa tyhjäkäyntivirta ja tyhjäkäyntiresistanssi, mihin taas staattorin lämpötila vaikuttaa. Jatkuvat häviöt ovat tyhjäkäyntihäviöiden ja staattorikäymien häviöiden erotus ja erot jatkuvissa häviöissä johtuvat mainittujen häviökomponenttien eroista.

Rautahäviöt määritetään tyhjäkäyntitestin 90–110 % jännitealueelta tyhjäkäyntihäviöiden avulla. M3BP 200MLB 2 -moottorilla suoritettujen tyyppi- ja tyhjäkäyntitestien perusteella voidaan todeta etteivät suuremmat rautahäviöt muihin koestuspaikkoihin verrattuna johdu testipaikalla TP23 käytettävien virran mittaussiirien eroavaisuuksista, sillä 90–110 % jännitealueella tyhjäkäyntitestien tyhjäkäyntitehossa ei ole merkittäviä eroja. Poikkeavat mittaustulokset tyhjäkäyntitestien välillä ovat selitettävissä testattavan moottorin eri loppulämpötilalla testien aikana.

Eri tehoanalysaattorien vaikutusta tyhjäkäyntitehoon ja rautahäviöihin tutkittiin ajamalla ensin M3JP 225SMB 2- moottorilla tyyppitesti käyttäen Norma 4000 -tehoanalysaattoria, jonka aikana moottori saavutti loppulämpötilansa. Tehoanalysaattorin vaihtoa varten testattava moottori pysäytettiin ja vaihdon jälkeen ajettiin välittömästi tyhjäkäyntitesti käyttäen Norma 5000 -tehoanalysaattoria. Mittaustulokset esitetty taulukossa 18.

**Taulukko 18.** Tyhjäkäyntitestin tulokset M3JP 225SMB 2 -moottorilla eri tehoanalysaattoreilla.

Suure	Fluke Norma 4000 Power Analyzer 16.9.2021	Fluke Norma 5000 Power Analyzer 16.9.2021	Ero (%)
$I_0$ (A)	17,99	18,15	0,88
$\cos \varphi_0$	0,1177	0,1199	1,83
$P_0$ (W)	1614,5	1658,45	2,65
$n_0$ (rpm)	3598	3598	0,00
$P_{fw}$ (W)	917,0	958,56	4,33
$P_{Fe}$ (W)	662,31	664,11	0,27

Kitka- ja tuuletinhäviöissä on havaittavissa pieni ero, mikä viittaisi siihen, että tehoanalysaattorien vaihdon aikana ja Norma 5000 -tehoanalysaattorilla suoritettuna jälkimmäisen tyhjäkäyntitestin aikana moottori on jäähtynyt loppulämpötilastaan. Hieman suuremmat kokonaishäviöt selittyvät myös samasta syystä. Rautahäviöissä ei ole merkittävää eroa tehoanalysaattoreiden välillä, joten voidaan todeta, ettei saman valmistajan eri tehoanalysaattoreiden välillä ole vaikutusta rautahäviöihin tyyppitesteissä, kunhan kalibrointiohjelmaa noudatetaan.

## 7 Kehitysselvitys vastusmittauksien automatisoinnille

Selvitys tuli tarpeelliseksi testikentällä sattuneessa *läheltä piti* -tilanteessa, jonka jälkeen vastaavan tapahtuminen uudelleen halutaan estää. Selvityksessä käydään läpi nykyinen testijärjestely sekä ratkaisu kuinka *läheltä piti* -tilanne on estettävissä. Selvityksessä karotetaan myös mahdollisuuksia saada testitulokset kirjautumaan suoraan valmiiksi testiraportiksi. Nykyinen toimintatapa on, että vastusmittauksen tulokset kirjataan paperiselle pöytäkirjalle. Kylmävastusmittauksen suorittaminen on käsitelty alaluvussa 3.2. Mittattava kylmävastuksen vastusarvo testipaikalla TP23 on yleensä 1 m $\Omega$  ja 50  $\Omega$  välissä.

### 7.1 Kylmävastusmittaus testipaikalla TP23

Kylmävastus mitataan ensimmäisen kerran kylmästä moottorista kaikista vaiheväleistä ennen lämpöajotestiä. Lämpöajotestin perään mitataan jäähtymäkäyrä eli mitataan yhdestä vaihevälistä vastusarvo 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150 ja 180 sekunnin kuluttua moottorin pysäytyksestä. Mittaus suoritetaan vielä osakuormatestin jälkeen U-W vaihevälistä sekä ennen että jälkeen tyhjäkäyntitestin. Testipaikalla TP23 vastusmittauksessa käytetään mikro-ohmimittaria tyypiltään *Cropico Microhmeter DO5000*, jonka ominaisuudet ovat seuraavat:

- mittausalue 3 m $\Omega$  – 30 k $\Omega$
- resoluutio 10  $\mu\Omega$
- mittauksen virta-alue 1–10 A
- tarkkuus näyttämästä  $\pm 0,03$  %
- varastoi 4000 mittausta aikaleimalla
- suurin mittatiheys 50 mittausta sekunnissa
- toimii vain verkkovirralla (Cropico, 2011).

### 7.2 Työjärjestys manuaalisessa kylmävastusmittauksessa

Moottorin siirtyessä testaukseen se asennetaan kiinni koestusalustaan. Asennuksen jälkeen koestaja asettaa hauenleuoilla varustetut mittapäät kullekin vaihevälille yksitellen

ja suorittaa mittaukset, jotka kirjataan paperiseen pöytäkirjaan. Jokaisen vaihevälin vastusarvot mitattuaan koestaja irrottaa mittapäätestä testattavasta moottorista, koska mikro-ohmimittari ei kestä moottorin käynnistyksessä syntyviä virtoja.

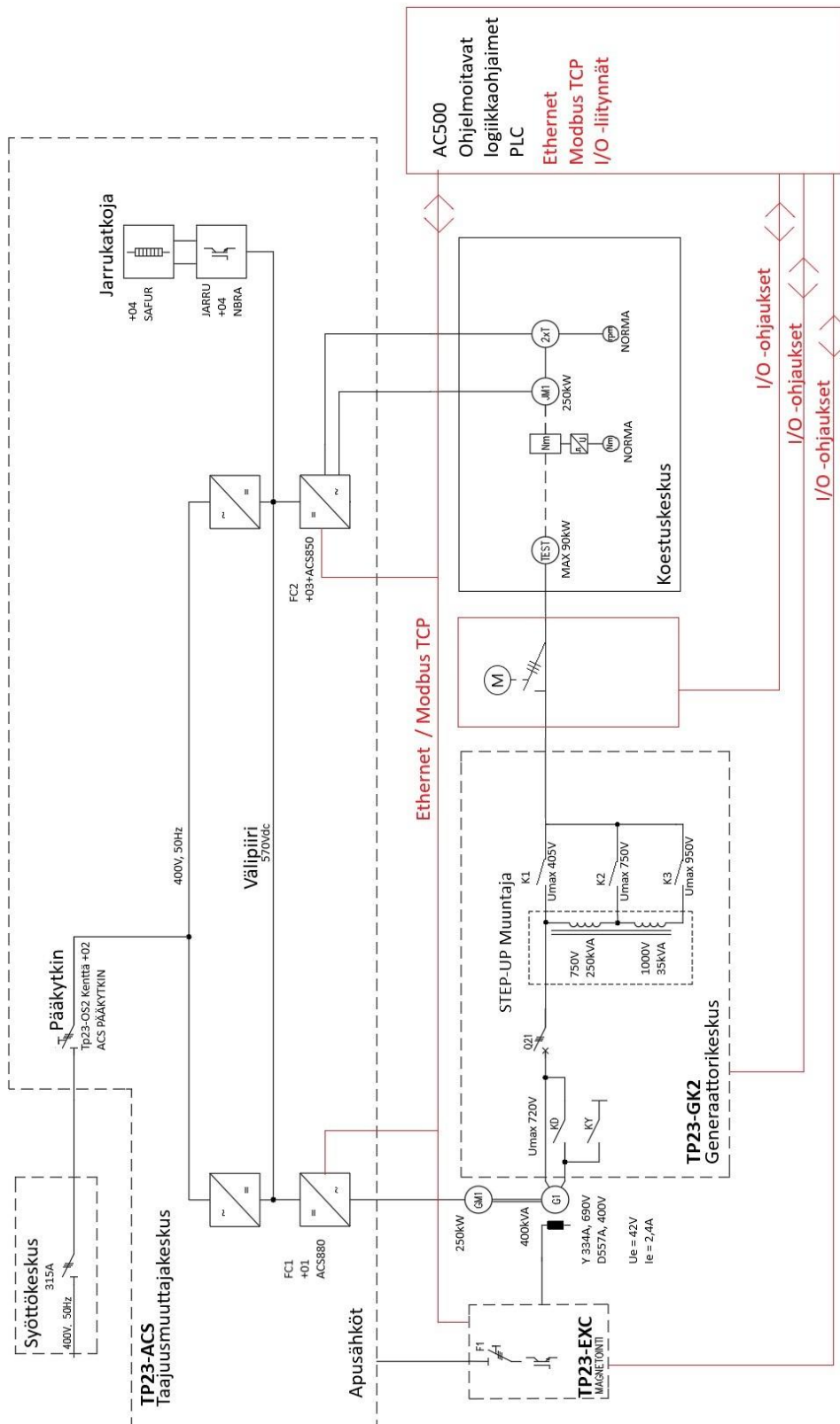
Lämpöajon valmistuttua koestaja pysäyttää moottorin automaation käyttöliittymästä, jolloin taajuusmuuttajaohjaus jarruttaa moottorin pyörimisnopeuden nolnaan. Jarrutus tapahtuu vastamomentin avulla. Kun jarrumoottori on taajuusmuuttajaohjauksen perusteella pysähtynyt, niin taajuusmuuttaja kytkee jarrumoottorin pois verkosta. Tällöin moottorin akselin ei pitäisi enää pyöriä. Todettuaan moottorin olevan jännitteetön ja pysähtynyt koestaja suorittaa jäähtymäkäyrää varten tarvittavan mittauksen asettamalla mikro-ohmimittarin mittapäästä haluamansa vaihevälin välille moottorin liitäntäkotelossa ja kirjaa vastusmittarin näytöstä lukemat tiettyinä ajanhetkinä, mitkä koestaja katsoo sekuntikellosta. Jäähtymäkäyrää mitattaessa saadaan yleensä vasta 30 sekunnin kuluttua pysäytyksestä luotettavia mittaustuloksia jäännösvirtojen purkauduttua.

### **7.3 Työjärjestys automatisoidussa kylmävastusmittauksessa**

Tässä luvussa kuvataan kuinka kylmävastusmittaus tapahtuisi automatisoituna. Automatisoinnin myötä ideana on, että koestaja asentaa käytettävän mikro-ohmimittarin mittapäästä ns. kovakiinnityksellä moottorin liitäntäkoteloon jokaiselle vaihevälille tai vain yhdelle vaihevälille. Jälkimmäisessä tapauksessa kaikki mittaukset suoritettaisiin yhdeltä vaiheväliltä. Käytettävän mittalaitteen on tarkoitus olla koko lämpöajon kytkettynä releen tai kontaktorin kautta moottoriin. Tämän menettelyn myötä koestaja irrottaa mittapäästä moottorista vasta, kun tyyppitesti on suoritettu, jolloin vaaratilannetta, jossa koestaja unohtaa irrottaa mikro-ohmimittarin moottorista käynnistyksen yhteydessä ei synny.

Mittalaitteen ja mittapäiden väliin tuleva rele kytkee irti mittalaitteen jännitteisestä moottorista käynnistyksen ja ajon aikana. Automaatio ohjaa relettä kahden tilatiedon perusteella. Tilatietoja ovat moottorin jännitteettömyys ja jarrumoottorin pyörimisnopeus. Kun automaatio toteaa moottorin pysäytyksen jälkeen jännitteettömäksi ja

jarrumoottorin pyörimisnopeuden nolaksi kytkee se releen kiinni. Toinen vaihtoehto on, että koestaja ohjaa releen kiinni automaation käyttöliittymästä painonapilla. Tämän jälkeen automaation käyttöliittymä kommunikoi Motlab-ohjelmiston kanssa mittauksen suorittamiseksi. Motlab suorittaa mittaukset mittalaitteella ja mittauksen valmistuttua automaatio kytkee releen tai muun suojausauki. Motlab muodostaa mittaustuloksista excel-tiedoston. Kuvassa 20 on hahmoteltu automatisoidun testipaikan rakennetta. Uutena elementtinä TP23 tulisi rele- tai kontaktorisuojaus mittalaitteen ja moottorin välille sekä kaksisuuntaiset I/O-ohjaukset magnetointikeskukseen, generaattorikeskukseen, ilmaerottimeen ja Ethernet- tai Modbus-tiedonsiirtoväylä magnetointikeskukseen.



Kuva 20. Testipaikan TP23 mahdollinen rakenne automatisoidussa vastusmittauksessa.



## 7.4 Automatisoinnin toteuttamiseen liittyvät haasteet

Automatisointiin liittyvä haasteita on useita. Nykyisestä mittalaitteesta löytyy vain RS232-sarjaportti, mikä mahdollistaa toimivan ja luotettavan tiedonsiirron muutamien metrien verran. Mikä on nykyisen mittalaitteen arvioitu jäljellä oleva elinikä? Onko kustannustehokkaampaa hankkia uusi, valmiiksi räätälöity mittalaite, joka mahdollisesti pystyisi havainnoimaan, onko mitattava kohde jännitteetön, ja täten suorittamaan kylmävastusmittaukset jopa ilman rele- tai kontaktorisuojausta. Kuinka mittapäiden kovakiinnitys voidaan tehdä moottorin päällitöntäkotelossa. Kylmävastusmittauksessa käytettävä 100 mA – 10 A virta-alue pitäisi mahdollisesti saada suppeammaksi, koska 10 A nimellisvirran rele ei välttämättä päästä läpi 100 mA virtaa ja taas pienempi kontaktori ei mahdollisesti kestä 10 A tasavirtaa.

## 7.5 Automatisointiin sopiva mikro-ohmimittari ja rele

Nykyisen mikro-ohmimittarin RS232-sarjaportin tilalle toimivia vaihtoehtoja ovat RS485-sarjaliikenneväylä tai Ethernet-kaapeli. Nykyisen mittarin RS232-sarjaportti saadaan muuntimen avulla muutettua joko RS485- tai Ethernet-liitännäksi. Ethernet-kaapelilla mittalaite voidaan kytkeä suoraan tietokoneeseen, josta automaation käyttöliittymää käytetään, jolloin mittalaitteen mittaustulokset saadaan siirrettyä tietokoneelle, missä automaation käyttöliittymä kommunikoi Motlab-ohjelman kanssa, joka luo koestuspöytäkirjan. Automaation käyttöliittymästä suoritettava kylmävastusmittaus vaatii ainakin kylmävastusmittauksen testiohjelman koodaamisen, mikä edellyttää moottorin tilatietojen lukemista sekä koodauksen, joka ohjaa releitä.

Toisena vaihtoehtona selvitettiin, onko markkinoilla olevissa mikro-ohmimittareissa tarvittavia ominaisuuksia sisäänrakennettuina, mikä vähentäisi tarvetta lisätä automaation koodausta verrattuna nykyisen mittalaitteen vaatimaan koodaustarpeeseen. Nykyinen mikro-ohmimittari on kuitenkin ollut käytössä muilla testipaikoilla 2000-luvun alusta. Mikro-ohmimittareita myy moni yritys, kuten Perel oy, Elfa Distrelec oy, SLO, Kvalitest Industrial oy, Tekfinland ja Hantekno.

Suurin osa tarjotuista mikro-ohmimittareista olivat salkkumallisia eli helposti mukana kannettavia kevyitä akkukäyttöisiä mikro-ohmimittareita, joissa osasta sai paperisen tulosteen, pdf-raportin tai csv-tiedoston mittaustuloksista. High-end-mittalaitteista löytyi nykyistä mikro-ohmimittaria tarkempia ja useammilla kanavilla varustettuja mittalaitteita, joissa on ominaisuuksina muun muassa kontaktin hyvyyden monitorointi ja muistiinoturi mittaustuloksien seuranta varten, mutta high-end-mittalaitteissa testausvirta oli paljon nykyistä mikro-ohmimittaria pienempi.

Tarjotuissa mittalaitteissa oli yleensä USB- tai Ethernet-liitäntä tietokonetta varten. Mittaus tapahtui asetuksista riippuen automaattisesti tai käsivalinnalla. Jossain mittalaitteissa oli akkukäytön rinnalla myös mahdollisuus käyttää mittalaitetta verkkovirralla. Yhdestä mittalaitteesta löytyi myös ominaisuus, joka tunnistaa, onko mitattava kohde jännitteinen eli mittalaite suostuu mittamaan vain kohteen ollessa jännitteetön. Akkukäyttöiset mittalaitteet eivät kuitenkaan soveltuneet testikentälle, koska testikentällä tehdään kaksivuorotyötä ja siten nykyinen mittalaite on jatkuvasti kytkettynä verkkovirtaan ja aina mittausvalmiudessa, mihin pelkästään akkukäyttöisillä mittareilla ei päästä. Uuden mittarin lisävaatimukseksi tulikin, että sen on oltava verkkovirtakäyttöinen.

Huolimatta useista kyselyistä markkinoilta ei löytynyt mikro-ohmimittaria, joka olisi ylivoimaisesti parempi kuin jo käytössä oleva mittalaite, joten vastusmittauksen automaattioratkaisu kannattaisi ensisijaisesti toteuttaa käyttämällä nykyistä mikro-ohmimittaria. Tämän seurauksena pohdittiin, mitä vaatimuksia releelle tulisi asettaa. Käytettävien releiden ja mahdollisten kontaktorien täytyy mittausteknisesti soveltua kohteeseen ja sähkötyöturvallisuus tulee varmistaa. Tämä tarkoittaa, että koestajan tulisi silmin nähdä releen tai kontaktorin erotusväli, jolloin voidaan varmasti todeta mitattavan kohteen olevan jännitteetön ennen vastusmittausta. Releen ja kontaktorin jännitekestoisuuden tulee olla 1 kV suuruinen eristysvastusmittauksen takia. Virrankestoisuus määräytyi nykyisen mikro-ohmimittarin maksimimittausvirran mukaan 10 A. Cropico mikro-ohmimittarin mittaussvirrat eri vastusalueilla on esitetty taulukossa 19. Lisäksi releen ohjauksen tulisi tapahtua 24 V tasajännitteellä.

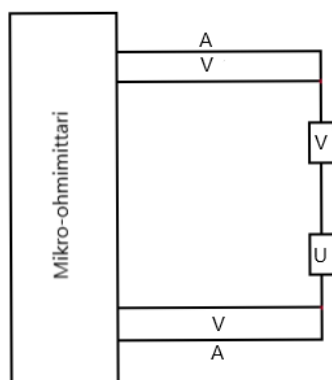
**Taulukko 19.** Cropico Microhmeter 5000 -mittausvirrat eri vastusalueilla (Cropico, 2011).

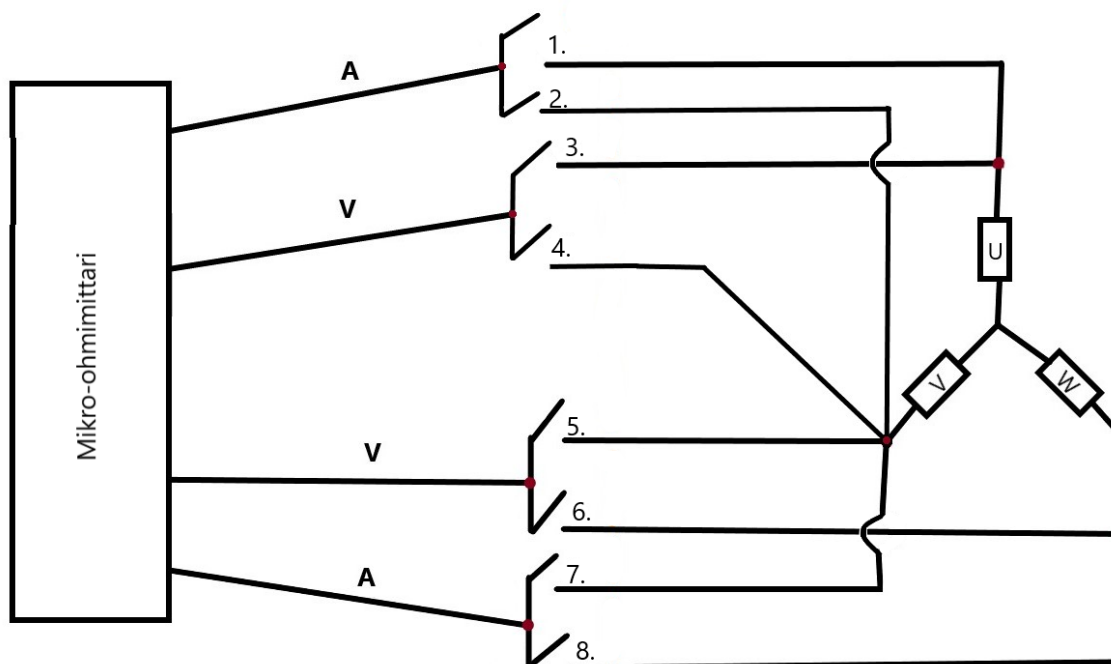
Alue	Resoluutio	Minimivirta	Maksimivirta
30 k $\Omega$	1 $\Omega$	10 $\mu$ A	100 $\mu$ A
3 k $\Omega$	100 m $\Omega$	100 $\mu$ A	1 mA
300 $\Omega$	10 m $\Omega$	1 mA	10 mA
30 $\Omega$	1 m $\Omega$	10 mA	100 mA
3 $\Omega$	100 $\mu\Omega$	100 mA	1 A
200 m $\Omega$	10 $\mu\Omega$	1 A	10 A
30 m $\Omega$	1 $\mu\Omega$	1 A	10 A
3 m $\Omega$	100 n $\Omega$	1 A	10 A

Etsimisen jälkeen sopiva rele olisi esimerkiksi Hongfa HFE82P-20, minkä datalehti on liitteenä. Kyseessä on yhden vaihtokoskettimen tasavirtarele, jonka koskettimen nimellisarvo on 20 A. Kosketinresistanssi on pieni, 4,5 m $\Omega$ . Ohjausjännite on haluttu 24 V ja eristysresistanssi 1000 M $\Omega$ , mikä vastaa 1000 V:n tasajännitettä ja eristyslujuus kelan ja koskettimen välillä on 4000 V.

## 7.6 Vaihevälin vastusarvon mittaus releohjauksilla mikro-ohmimittarilla

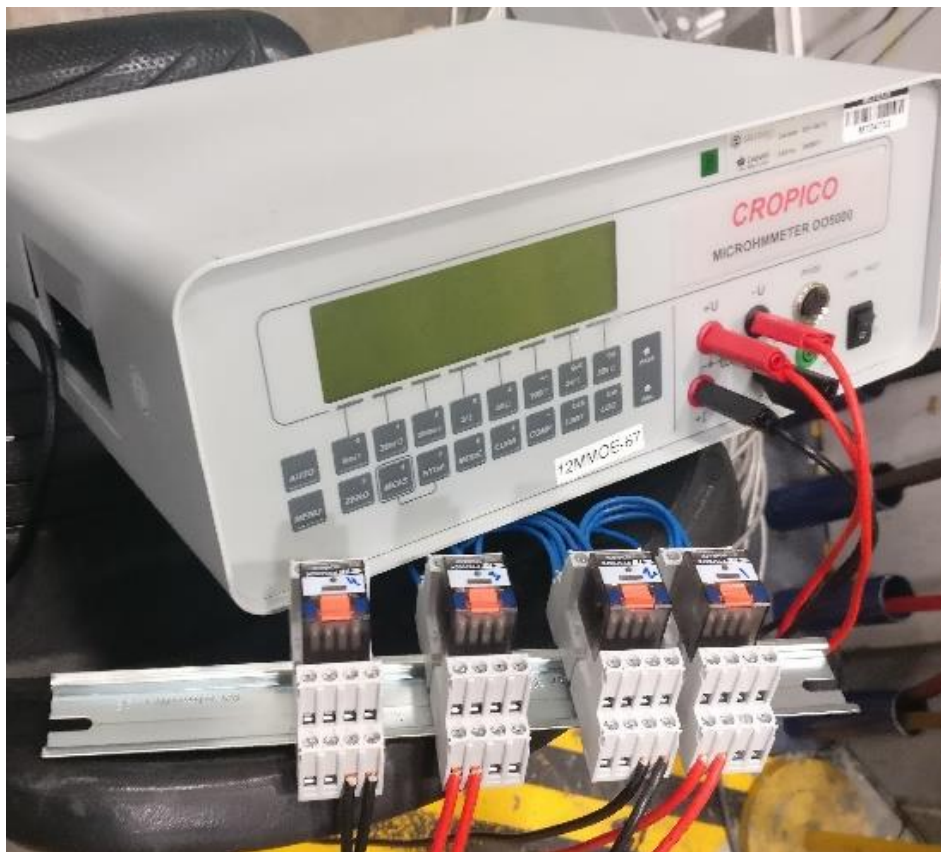
Kuvassa 21 esitetty U-V vaihevälin vastusmittauksen kytkentäkaavio ilman releohjausta. Releohjausta varten piirrettiin kytkentäkaavio, mikä on esitettynä kuvassa 22 ja jossa näkyy releiden asettelu moottorin vaiheiden ja mikro-ohmimittarin välillä. Releiden koskettimet on merkitty kuvaan numeroilla 1–8 ja jännitemittausta varten olevat johtimet V-kirjaimella ja virtamittausta varten olevat johtimet A-kirjaimella.

**Kuva 21.** Vastusmittauksen kytkentäkaavio U-V vaihevälistä ilman releitä.



**Kuva 22.** Vastusmittauksen kytkentäkaavio nelijohdinmenetelmällä.

Oikosulkumoottorin vaihevälien vastusarvojen mittauksen demonstrointi releohjauksella toteutettiin lopulta käyttämällä nimellisvirraltaan 6 A nelikoskettimista vaihtorelettä, jolloin releiden määrä saatiin vähennettyä kahdeksasta neljään. Laitteiston kokoonpano on kuvassa 23. Testattavaksi moottoriksi valittiin kalibrointimoottori M3BP 355SMA 4, sillä suurissa staattorikämeissä on pienin vaihevälin vastusarvo. Releitä ohjattiin käsin, niissä olevan kytkimen kautta ja mitattiin kuvan 22 kytkennän vastusarvot vaiheväleistä U-V, U-W ja V-W ja mittaustuloksia vertailtiin samaisten vaihevälien mittaustuloksiin ilman releitä. Mittaustulokset esitetty taulukossa 20. Esimerkiksi vaihevälin U-V vastusarvon mittaus kahdeksan releen kautta tapahtuu kytkemällä kiinni kuvan 22 koskettimet 1, 3, 5 ja 7. Koskettimet 2, 4, 6 ja 8 pysyvät auki. Vaihevälin V-W vastusarvon mittaus tapahtuu kytkemällä kiinni koskettimet 2, 4, 6 ja 8 ja avaamalla koskettimet 1, 3, 5 ja 7.



**Kuva 23.** Vastusmittauksen kokoonpano releohjauksella.

Taulukossa 20 on ensimmäisenä mitattu vaihevälien U-V, U-W ja V-W vastusarvot Cropico mikro-ohmimittarilla ilman releitä kuvan 21 tavalla kustakin vaihevälistä. Cropico mikro-ohmimittarissa on mittapäinä laitteen mukana toimitetut kullatut hauenleukaliittimet. Taulukossa toisena on mittaustulokset releiden kautta mitattuna. Releiltä lähtevät mittajohtimet leikattiin yhtä pitkiksi ja mittapäinä kokeiltiin elektroniikkaliikkeestä hankittuja ei-kullattuja hauenleukoja ja testipaikalta löytyneitä kapeakärkisiä mittauskoskettimia. Vaihevälin resistanssin tarkka mittaus kestää 10–30 sekuntia staattorikäimin induktanssista johtuen. Vastusmittaukset toistettiin hauenleuoilla neljästi, jotta nähtiin, antaako uusi mittalaitteisto identtisiä tuloksia peräkkäisissä mittauksissa.

**Taulukko 20.** Vaihevälien vastusarvojen mittaustulokset eri mittapäillä.

Vaiheväli		
U-V	U-W	V-W
<i>Cropico Microhmeter DO5000</i> mitatut vaihevälien vastusarvot kullatuilla hauenleuoilla (mΩ)		
19,78	19,78	19,79
Releiden läpi mitatut vaihevälien vastusarvot ei-kullatuilla hauenleuoilla (mΩ)		
24,53	25,70	25,64
24,51	25,70	25,65
24,50	25,72	25,65
24,51	25,73	25,66
Releiden läpi mitatut vaihevälien vastusarvot kapeakärkisillä mittauskoskettimilla (mΩ)		
24,30	24,28	23,91

Teoriassa releiden lisäys mitattavan moottorin ja mikro-ohmimittarin väliin ei pitäisi vaikuttaa vastusmittauksen mittaustuloksiin, koska nelijohdinmenetelmässä vuotovirran vaikutus kumoutuu ja siten mittausjohtimien resistanssi ei vaikuta mittaukseen ja täten myös releiden koskettimien resistanssi kompensoituu pois. Mittaustulosten ollessa eriäviä haluttiin selvittää, mikä aiheuttaa suuremman vastusarvon releiden läpi mitattaessa. Tätä varten mitattiin hauenleukojen sekä mittajohtimien kontaktien välistä resistanssia kytkemällä vuorotellen hauenleuat sekä mittajohtimet keskenään yhteen mahdollisen kosketushäiriön löytämiseksi. Molemmat mittapäät osoittautuivat lopulta todella huonoiksi vastusmittaukseen.

Yhteenkytkettyjen mittausjohtimien resistansseiksi mitattiin 0,37 mΩ, 0,36 mΩ sekä 0,37 mΩ. Yhteenkytkettyjen hauenleukojen resistanssia oli mahdotonta tarkasti määrittää, sillä kosketuksesta riippuen mikro-ohmimittari näytti arvoja 10–40 mΩ. Mittakoskettimilla mitatessa saatiin U-V vaihevälin vastusarvoksi 23,20–24,28 mΩ riippuen siitä, kuinka kovasti mittakoskettimia painoi mitattavaan pintaan. Mittausten perusteella todettiin hauenleukojen kosketuksen pinta-alan moottorin vaiheisiin liitäntäkotelossa sekä kosketuksen voimakkuuden vaikuttavan merkittävästi mittaustuloksiin, joten mittajohtimien päihin vaihdettiin kaapelikengät ja kaapelikengät kiristettiin moottorin vaiheisiin kiinni kuvan 24 mukaisesti. Kytkennän jälkeen vaihevälien vastusarvojen mittaus toistettiin ja tulokset esitetty taulukossa 21.



**Kuva 24.** Vaihevälän resistanssin mittaus U-V välistä mutterilla kiristetyillä kaapelikengillä.

**Taulukko 21.** Vaihevälän vastusarvojen mittaustulokset mittapäinä kaapelikengät.

Vaiheväli		
U-V	U-W	V-W
<i>Cropico Microhmeter DO5000</i> mitatut vaihevälän vastusarvot kullatuilla hauenleuoilla (mΩ)		
19,78	19,78	19,79
Releiden läpi mitatut vaihevälän vastusarvot kaapelikengillä (mΩ)		
19,79	19,77	19,79

Kaapelikenkiin vaihdon ja mittapäiden kunnollisen kiinnityksen myötä suoran mittauksen ja releiden läpi mitatessa mittaustulokset ovat samat ja täten voidaan todeta vastusmittauksen onnistuvan releiden kanssa ja täten vastusmittauksen automatisoinnin olevan mahdollista tällä kokoonpanolla. Testaamatta jäi vielä 180 sekunnin jatkuva vaihevälän vastusarvon mittaus kuumasta moottorista, mikä vaatii mikro-ohmimittarin tiedonkerääjän lukemista. Tässä testissä mittaustulokset kirjattiin vielä käsin paperille.

Lopullisessa automaattioratkaisussa on huomioitava releiden elinkaari, sillä releille tulee yhden moottorin testauksen aikana useita kytkemiskertoja ja vaihtokoskettimet löystyvät kytkentäkertojen myötä, jolloin releen koskettimen huono kontakti voi vääristää

mittaustulosta merkittävästi. Käytettävälle releelle tulisi määrittää vaihtoväli, jotta releen vanheneminen ei aiheuta mittausrvirhettä. Automatisoidun vastusmittauksen myötä releistä tulisi kulutustavaraa ja kuluerä ja releiden saatavuuden vaikutusta koestuspaikkojen vuotuisen käyttöaikaan olisi hyvä arvioida.

Toinen huomioitava asia on sähkötyöturvallisuusnäkökulma. Releitä käyttämällä on mahdollonta silmin todentaa releen koskettimen asentoa, jolloin koestajan on luotettava releohjauksen toimivan kaikissa tilanteissa. Kun moottorin ja mittalaitteen välille halutaan kunnollinen silmin havaittavissa oleva erotusväli jännitteettömyyden toteamiseksi, on vaihtoehtona käyttää releiden kanssa teollisuuskäyttöön suunniteltuja IOR-tankokontaktoreita, joissa on mekaaninen avaus ja lukitus. Tällöin koestaja voi kytkeä mittapiirin aktiiviseksi vastusmittausta varten. Tankokontaktoreita on saatavilla 1–4 kanavaisina, jolloin releiden ohella tarvitaan vähintään yksi IOR-tankokontaktori. Releiden ja tankokontaktorien yhdistelmässä tankokontaktori liitettäisiin testattavan moottorin ja releiden välille. Tankokontaktorissa on silmin havaittava erotinväli ja se voidaan suojata läpinäkyvällä kotelolla, jolloin erotinväli on näkyvässä. Eräs tankokontaktori esitetty kuvassa 25.



**Kuva 25.** IOR-tankokontaktori (ABB oy, 2015).



## 7.7 Testituloksien kirjaaminen valmiiksi testiraportiksi

Valmiin testiraportin luomista kylmävastusmittauksen tuloksista Cropicon mikro-ohmittarilla yritettiin, mutta kokeilu pysähtyi jo yhteysongelmiin, sillä Cropicon ja PC:n välille ei saatu muodostettua tiedonsiirtoyhteyttä. Yhteyden muodostamista kokeiltiin kahdesti. Ensimmäinen yhteyskokeilu tapahtui mikro-ohmimittarin RS323-sarjaportin kautta Nport 5110-sarjalaitepalvelimeen ja siitä edelleen Ethernet-yhteyttä käyttäen PC:seen. Toisessa yhteyskokeilussa PC:n ja mikro-ohmimittarin välillä käytettiin USB RS232-muunninta, mutta kummassakaan yhteyskokeilussa ei saatu yhteyttä muodostettua. Kyseisen Cropicon mikro-ohmittarin RS323-sarjaportti on mahdollisesti vikaantunut tai yhdistämiseen tarvitaan vielä jokin laitteen valmistajan lisäosa, mikä puuttui tämän yhteyskokeilun aikana.

## 8 Johtopäätökset

Diplomityössä suoritettiin oikosulkumoottoreiden testausta varten rakennetun uuden tyyppitestilaitteiston käyttöönotto. Käyttöönottoon kuului tyyppitestilaitteiston turvallisen käytön varmistaminen, testilaitteiston kyvykkyyden selvittäminen, mittaustarkkuuden varmentaminen sekä mittaustarkkuuden tutkiminen. Diplomityössä tutkittiin myös, voidaanko tyyppitestaukseen kuuluvaa kylmävastusmittausta automatisoida ja täten lisätä koestajien työturvallisuutta.

Tutkimus jakautui kahdeksaan eri lukuun. Ensimmäinen luku on johdanto. Toisessa luvussa kuvataan oikosulkumoottorin rakenne, toiminta ja oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittäminen ja merkitys. Kolmannessa luvussa on toimeksiantajan tehtaalla valmistettavan oikosulkumoottorin tyyppitestin vaiheet. Neljännessä luvussa käsitellään mittaustarkkuutta aiheuttavia tekijöitä. Viidennessä luvussa on kuvattu uusi rakennettu tyyppitestilaitteisto. Kuudes luku sisältää käyttöönoton aikana suoritettujen testien mittaustulokset analysoineen. Seitsemäs luku käsittelee työturvallisuuden parantamista tyyppitestauksissa suorittavan kylmävastusmittauksen aikana. Kahdeksannessa luvussa on esitetty keskeisimmät havainnot.

Tyyppitestilaitteiston turvallisen käyttämisen varmistamiseksi laadittiin toimeksiantajalle diplomityöstä erilliset käyttöohjeet, joissa on kuvattu testipaikan laitteisto, laitteiston tarkoituksenmukainen käyttö, tyyppitestauksessa olevat työvaiheet sekä toimintaohjeet vikatilanteisiin. Tyyppitestilaitteiston kyvykkyyden arviointi suoritettiin koeajoin tyyppitestilaitteiston toimittajan kanssa. Testilaitteiston suoritusarvot on taulukoitu alaluvussa 5.3. Toimeksiantajan testauslaboratoriossa mittaustarkkuuden määrittelee standardi ISO/IEC 17205:2017. Mittaustarkkuuden varmentaminen tapahtuu kolmannen osapuolen suorittamalla vuosittaisella akkreditoinnilla, mikä on kuvattu alaluvussa 5.4. Mittaustarkkuuden varmistamiseksi suoritettiin ristiintestauksia käyttäen toimeksiantajan yksilöityjä kalibrointimoottoreita, joiden suoritusarvot tiedetään tarkasti. Tulokset on esitetty luvussa 6. Kylmävastusmittauksen automatisointia ja kylmävastusmittauksen

aikaista työturvallisuuden parantamista varten tehtiin selvitys ja sen perusteella suoritettiin demonstraatio, mikä esitetään luvussa 7.

Ristiintestauksien perusteella voidaan todeta, että testipaikalla TP23 saadaan suoritettua onnistuneesti hyväksyttäviä tyyppitestejä, vaikka häviötehokomponenttien välille syntyykin eroja. Käytettävä epäsuora menetelmä hyötysuhteen määrittämiseksi nimittäin kompensoi häviökomponenttien välille syntyvät eroavaisuudet lisähäviöitä laskettaessa. Täten testipaikalla TP23 testattaessa päästään yleisesti samoihin suoritusarvoihin muiden testipaikkojen kanssa, mikä oli tavoite.

Muihin testipaikkoihin verrattuna testipaikan TP23 suurempien rautahäviöiden takia suoritettiin testipaikalla TP23 ylimääräisiä tyyppi- ja tyhjäkäyntitestejä, jotta voidaan olla varmoja siitä, ettei uuden testipaikan laitteistossa ole vikaa testauskäytäntöjen ollessa identtiset testipaikkojen välillä. Testipaikan TP23 virransyöttöjen välillä esiintyi lisätesteissä pieniä eroja, mutta erot ovat selitettävissä testattavien moottorien eri loppulämpötiloilla testien aikana. Havaintoa tukee taulukon 17 tyhjäkäyntiresistanssissa esiintyvä ero. Täten suuremmat rautahäviöt testipaikalla TP23 eivät johdu virransyöttöpiirien välisistä eroista. Myöskään testipaikoilla käytettävien tehoanalysaattorien välillä ei tyhjäkäyntitesteissä ollut sellaista eroa, mikä selittäisi testipaikan TP23 suuremmat rautahäviöt verrattuna muihin testipaikkoihin. Tutkimuksessa ei saatu lopulta selville, mistä testipaikan TP23 muita testipaikkoja suuremmat rautahäviöt johtuivat. Tosin kummassakin lisätestissä moottorin loppulämpötila vaikutti selvästi saatuihin mittaustuloksiin. Täten jatkossa ristiintestauksia suorittaessa tulisi tyyppitestit pyrkiä suorittamaan mahdollisimman identtisesti. Tutkimuksessa jäi selvittämättä inhimillisten tekijöiden, kuten koestajien työtapojen vaikutus tyyppitestin lopputuloksiin, mikä voi olla yksi eroja selittävä tekijä testipaikkojen välillä.

Ensimmäinen kokeilu vastusmittauksen automatisoimiseksi ja täten työturvallisuuden parantamiseksi onnistui lopulta käytettäessä oikeanlaisia mittapäitä. Mikro-ohmimittarilla mitatessa pientä resistanssin arvoa tulee erityisesti mittapäiden valintaan kiinnittää huomiota, sillä väärin valitut mittapäät vääristävät mittaustuloksia merkittävästi.

Vastusmittauksen automatisoinnin edistämiseksi tulisi vielä suorittaa 180 sekunnin jatkuva vaihevälin vastusarvon mittaus kuumasta moottorista ja mittaustulosten kirjaus tulisi saada koneellisesti onnistumaan. Lopulliseen toteutukseen tulisi työturvallisuuden näkökulmasta muodostaa selkeä erotusväli moottorin ja mittalaitteiston välille sekä määrittellä lopullinen kokoonpano kuvan 22 releohjaukselle ottaen huomioon releiden elinkaaren.

Jatkotutkimuksena diplomityölle olisi selvittää ihmillisten tekijöiden vaikutus tyyppitestaukseen joko ajamalla tyyppitestejä samalla moottorilla ja koestuspaikalla eri koestajilla tai ajamalla tyyppitestejä samalla moottorilla eri koestuspaikoilla samalla koestajalla, jolloin ristiintestauksessa syntyneet erot voidaan tulkita varmemmin koestuspaikkakohtaisiksi ja tehdä tarvittavat toimenpiteet.

## Lähteet

- ABB oy. (2011). *Pehmökäynnistinopas*. ABB oy Kotimaan myynti. Noudettu 14.12.2020 osoitteesta [https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%201FI12\\_01.pdf](https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%201FI12_01.pdf)
- ABB oy. (2014). *Low voltage motors Motor guide* (3. painos). Noudettu 12.12.2020 osoitteesta <https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>
- ABB oy. (2015). R contactors Control of AC and DC power circuits up to 5000 A. Noudettu 23.9.2021 osoitteesta [https://library.e.abb.com/public/c89347ab617a4dc4801b9529978dc2b2/1SXU106047C0201\\_RContactorsCatalogJuly2015.pdf](https://library.e.abb.com/public/c89347ab617a4dc4801b9529978dc2b2/1SXU106047C0201_RContactorsCatalogJuly2015.pdf)
- ABB oy. (2018a). *IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*. Noudettu 12.1.2021 osoitteesta [https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf)
- ABB oy. (2018b). *Final testing procedures for motors manufactured by ABB oy, Motors tested with frequency converter*. Noudettu 15.2.2021 osoitteesta yrityksen tietokanta [Rajattu pääsy]
- ABB oy. (2018c). *Final testing procedures*. Noudettu 15.2.2021 osoitteesta yrityksen tietokanta [Rajattu pääsy]
- ABB oy. (2020a). *EU MEPS Efficiency requirements for low voltage motors Revised Commission Regulation (EU) 2019/1781*. Noudettu 12.1.2021 osoitteesta <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107913&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB oy. (2021). *Witness Type Test Procedure at FAT*. Noudettu 15.2.2021 osoitteesta yrityksen tietokanta [Rajattu pääsy]
- Avantola, J.P. (2020). *Efficiency determination IEC60034-2-1:2014* (5.10.2020). Noudettu 19.01.2021 osoitteesta yrityksen tietokanta [Rajattu pääsy/Julkaisematon]
- Avantola, J.P. (2021). *Teams-keskustelu*. (3.3.2021)
- Cropico. (2011). *Microhmeter Type DO5000 Series Operation Instructions*. Noudettu 8.9.2021 osoitteesta <https://www.seaward.com/gb/support/download/343>

- CSA. (2021). *About Us*. Noudettu 12.1.2021 osoitteesta <https://www.csagroup.org/about-csa-group/>
- European unioni. (2021). *Electric motors*. Noudettu 12.1.2021 osoitteesta [https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-eco-design/energy-efficient-products/electric-motors\\_en](https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-eco-design/energy-efficient-products/electric-motors_en)
- Finas. (2021). *Akkreditoitu testauslaboratorio*. Noudettu 27.9.2021 osoitteesta [https://www.finas.fi/Documents/T345\\_M02\\_2021.pdf](https://www.finas.fi/Documents/T345_M02_2021.pdf)
- Hietalahti, L. (2011). *Muuntajat ja sähkökoneet* (1. painos). Amk-Kustannus oy Tammer-teknikka. <https://www.amk-kustannus.fi/p/muuntajat-ja-sahkokoneet>
- Hongfa. (2020). *HFE82P-20*. Noudettu 21.9.2021 osoitteesta: <https://www.hongfa.com/Product/Item/HFE82P-20>
- IEC. (2014). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from test*. (IEC 60034-2-1 edition 2.0)
- IEC. (2016). *IEC 60051-1 Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories. Part 1: Definitions and general requirements common to all parts*. (IEC 60051-1 edition 6.0)
- IEC. (2017). *IEC 60034-1 Rotating electrical machines. Part 1: Rating and performance*. (IEC 60034-1 edition 13.0)
- IEEE. (2021). *About IEEE*. Noudettu 12.1.2021 osoitteesta <https://www.ieee.org/about/index.html>
- Inst Tools. (2020). *Induction Motor*. Instrumentationtools. Noudettu 15.12.2020 osoitteesta <https://instrumentationtools.com/induction-motor/>
- Keinänen, T. & Järvinen M. (2014). *Mittaustekniikka* (1. painos). Sanoma pro.
- Korpinen, L. (1998). *Sähkökoneet, osa 1*. Noudettu 13.12.2020 osoitteesta [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)
- Museovirasto. (2009). *Strömbergin teollisuus- ja asuinalue*. Noudettu 8.3.2021 osoitteesta [http://www.rky.fi/read/asp/r\\_kohde\\_det.aspx?KOHDE\\_ID=4503](http://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_det.aspx?KOHDE_ID=4503)

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2017). *SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 Testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyys. Yleiset vaatimukset.* (3. painos) = *ISO/IEC 17025\_2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.* (3. edition)

Suonsyrjä, S. (2015). *Virheellisten staattoreiden laatuongelmien analysointi* [Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto, Centria Ammattikorkeakoulu]. Theseus. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93172/Suonsyrja.Sari.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## Liite. Hongfa HFE82P-20-datalehti

### HFE82P-20

### DIRECT CURRENT RELAY



File No.: E133481  
RoHS compliant



#### Features

- Ceramic brazing sealed technology guarantees no risk of arc leaking and ensures no fire or explosion.
- Filled with gas ( mostly hydrogen) to effectively prevent the oxidation burnt when exposed to electricity; the contact resistance is low and stable, and the parts exposed to electricity can meet IP67 protection level.
- Carrying current 20A continuously at 85°C.
- Insulation resistance is 1000MΩ( 1000 VDC), and dielectric strength between the coil and contacts is 4kV, which meets the requirements of IEC 60664-1.
- No specific polarity requirements for the connection
- For 1500 VDC energy storage application

#### CONTACT DATA

Contact arrangement	1 Form A	
Contact resistance	4.5mΩ max.(at 20A)	
Contact rating	20A	
Mechanical endurance	2 x 10 <sup>6</sup> ops	
	<b>Type 1000V</b>	<b>Type 1500V</b>
Max. switching voltage	1000 VDC	1500 VDC
Max. breaking current	200A (1000 VDC) 1op	200A (1000 VDC) 1op
Max. switching power	30kW	30kW
Electrical endurance <sup>1)</sup>	Switching: 1 x 10 <sup>6</sup> ops (1000 VDC, 15A)	Switching: 1 x 10 <sup>4</sup> ops (1500 VDC, 15A)
		Making: 1.5 x 10 <sup>6</sup> ops (1500 VDC, 40A)
Current carrying <sup>2)</sup> capacity	20A:Cont.	
	30A:1h	
	40A:20min	
	80A: 30s	
	120A:10s	
	200A:0.6s	

Notes: 1) Unless otherwise specified, the temperature of electrical endurance is at 23°C and the on-off ratio is 0.6s:5.4s.

The coil was not connected to the surge suppression device during the test. Please note that the use of a well-connected diode will greatly increase the release time of the relay, resulting in a reduced lifetime.

2) Ambient temperature is at 85°C and cross section area of wire is 4mm<sup>2</sup> min. See Fig. Endurance Capacity Curve for more information.

#### COIL

23°C

Rated Voltage VDC	Pick-up Voltage VDC	Drop-out Voltage VDC	Coil power W
12	≤9.6	≥1	2.6
24	≤18.2	≥2	2.6

#### CHARACTERISTICS

Insulation resistance		1000MΩ(1000VDC)
Dielectric strength	Between coil & contacts	4000 VAC 1 min
	Between open contacts	4000 VAC 1 min
Operate time (at rated volt.)		≤30ms
Release time (at rated volt.)		≤10ms
Shock resistance	Functional	196m/s <sup>2</sup>
	Destructive	490m/s <sup>2</sup>
Vibration resistance		10Hz ~ 55Hz 1.5mm 49m/s <sup>2</sup>
Humidity		5%~85% RH
Ambient temperature		-40°C ~ 85°C
Load terminal structure		QC terminal
Unit weight		Approx. 160g
Outline Dimensions		78.2x 39.8 x 46.1mm

Notes: The above values are the initial values measured at room temperature.



## ORDERING INFORMATION

Type	HFE82	P	-20/	1000-	12-	H-	Q	2	J	-1	(XXX)
Application	P: PV and energy storage										
Contact rating	20: 20A										
Load voltage	1000: 1000 VDC 1500: 1500 VDC										
Coil voltage	12: 12 VDC 24: 24 VDC										
Contact arrangement	H: 1 Form A										
Coil terminal structure	Q: QC terminal										
Load terminal structure	2: QC terminal										
Base structure	J: Layout base without mounting boss										
Coil characteristic	1: Single coil										
Special code <sup>1)</sup>	XXX: Customer special requirement Nil: Standard										

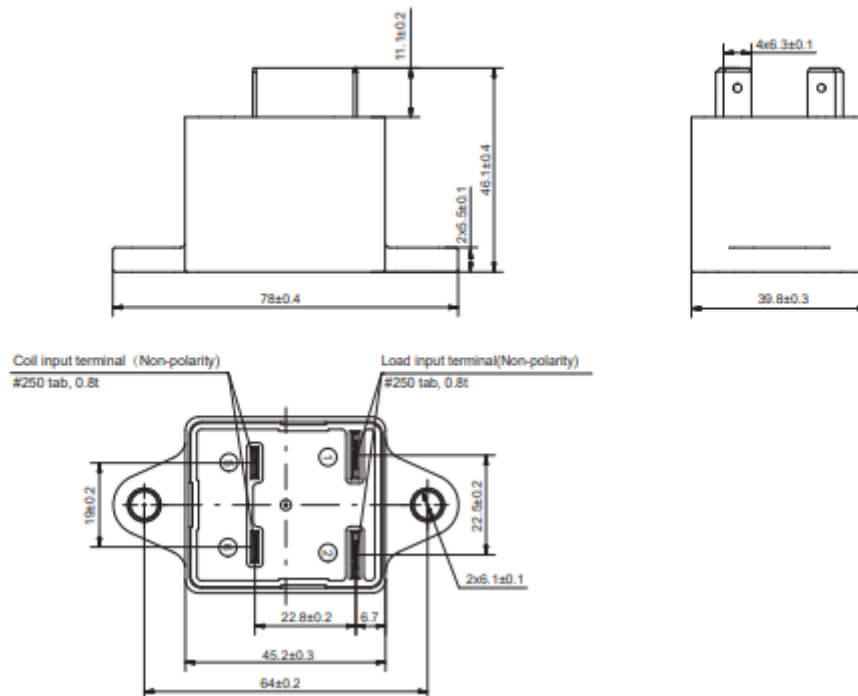
Notes: 1) The customer special requirement express as special code after evaluating by Hongfa.

## OUTLINE DIMENSIONS, MOUNTING HOLE, TERMINAL ARRANGEMENT

Unit: mm

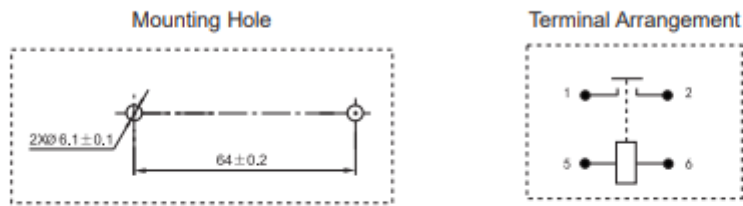
## Outline Dimensions

HFE82P-20/XXX-XX-H-Q2J-1



## OUTLINE DIMENSIONS, MOUNTING HOLE, TERMINAL ARRANGEMENT

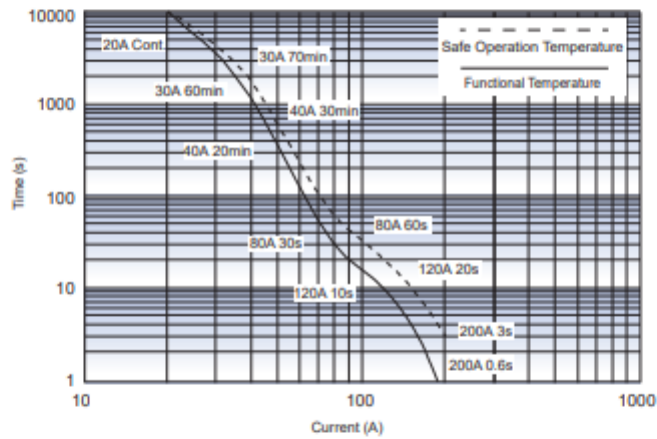
Unit: mm



Note: No polarity on the load and coil sides.

## CHARACTERISTIC CURVES

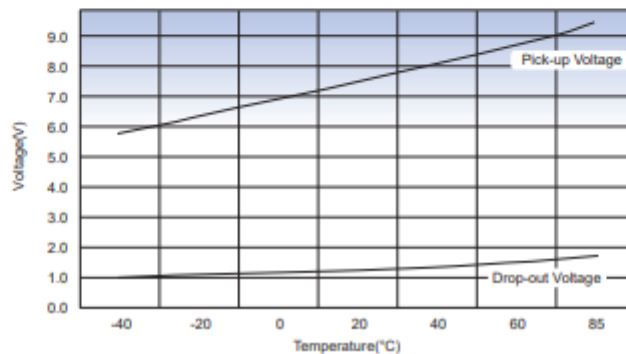
### Endurance Capacity Curve



#### Notes:

1. This data is only for reference and please do not use it for fuse selection.
2. The upper limit of safe operation temperature and functional temperature are set for 180 °C and 130 °C respectively.
3. To maintain the maximum long-term operating performance, absolute temperature should not exceed 130 °C.
4. The data above is measured at the environment temperature 85 °C with cross section area of wire  $\geq 4\text{mm}^2$ .

### Pick-up Voltage / Drop-out Voltage Curve



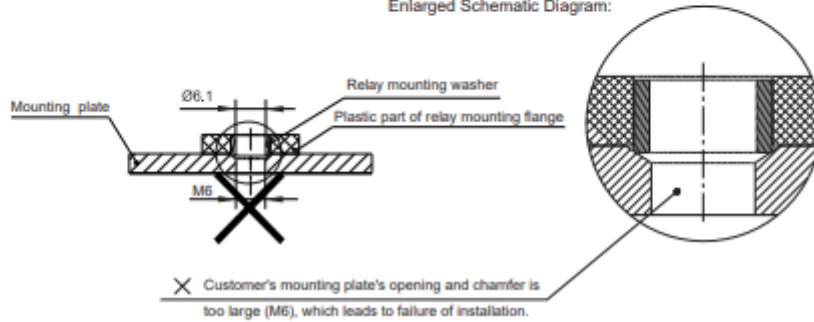
## CAUTIONS

1. In case of loosening, please use washer when mount the relay with M5 screw, and the torque within 3N-m to 4N-m, the push and pull force for terminals is 49N for load terminals and 49N for coil terminals. The torque beyond the range may cause damage.
2. Be careful that oils and foreign matter do not stick to the main terminal part and please use the wire with min. cross section area 4mm<sup>2</sup>, otherwise the terminal parts may have abnormal heating.
3. Cautions of Relay mounting:

### Unrecommended method

The hole of mounting plate at customer-side is too large.

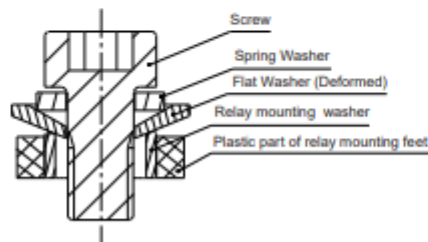
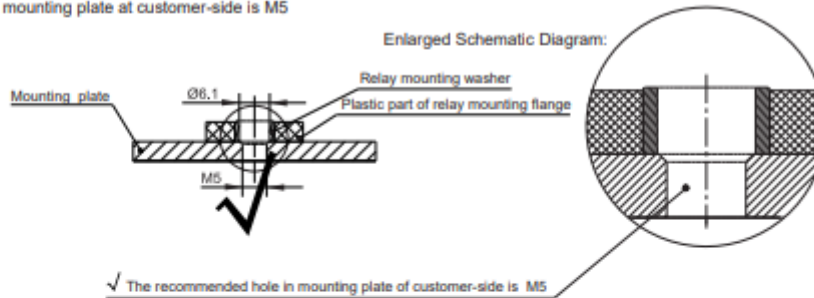
Enlarged Schematic Diagram:



### Recommended method

The hole in mounting plate at customer-side is M5

Enlarged Schematic Diagram:



When use M5 screw, the thickness and strength of the washer needs to be guaranteed or it may deform and burst the cover.