

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Ville Takala

**SÄHKÖMOOTTORITESTAUSASEMAN MODERNISOINNIN JÄLKEISEN  
MITTAAMISEN LUOTETTAVUUDEN VARMISTAMINEN**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 2.4.2019

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Tommi Pantti

Työn tarkastaja

Henrik Tarkkanen

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö tehtiin ABB Oy:n Motors and Generators -yksikön koestuslaboratoriolle. Haluan kiittää työn ohjaajaa Timo Vekaraa tuesta työn aikana ja Henrik Tarkkasta työn tarkastamisesta sekä koestuslaboratorion Tommi Panttia ja Jari-Pekka Avantolaa hyvästä aiheesta sekä aktiivisesta ohjaamisesta. Haluan myös osoittaa kiitokset perheelleni, ystäväilleni ja työkavereilleni tuesta ja kannustuksesta sekä opintojeni että lopputyön kirjoittamisen aikana.

Vaasassa 2.4.2019

Ville Takala

## SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| ALKULAUSE   | 2  |
| SISÄLLYSLUETTELO  | 3  |
| SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO   | 6  |
| TIIVISTELMÄ   | 10 |
| ABSTRACT  | 11 |
| 1 JOHDANTO  | 12 |
| 2 OIKOSULKUMOOTTORIN HYÖTYSUHTEEN MITTAAMINEN                                 | 17 |
| 2.1 Oikosulkumoottorin suora mittaustapa                                      | 17 |
| 2.2 Oikosulkumoottorin epäsuora mittaustapa                                   | 19 |
| 2.2.1 Kuormitustesti  | 21 |
| 2.2.2 Kuormitushäviöt   | 21 |
| 2.2.3 Osakuormitustesti   | 23 |
| 2.2.4 Tyhjäkäyntitesti  | 23 |
| 2.2.5 Jatkuvat häviöt   | 24 |
| 2.2.6 Lisähäviöt  | 26 |
| 2.2.7 Kokonaishäviöt ja hyötysuhde  | 28 |
| 2.3 Oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittäminen ABB:n koestuslaboratoriossa | 28 |
| 2.3.1 Silmämääräinen tarkastus  | 29 |
| 2.3.2 Vastusmittaus vallitsevassa lämpötilassa                                | 29 |
| 2.3.3 Käynnistysmomentin ja -virran mittaus                                   | 30 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.3.4  | Lämpenemätesti  | 30 |
| 2.3.5  | Osakuormatesti  | 32 |
| 2.3.6  | Ylikuormitustesti   | 32 |
| 2.3.7  | Oikosulkutesti  | 32 |
| 2.3.8  | Tyhjäkäyntikoe  | 32 |
| 2.3.9  | Tärinätasotesti   | 33 |
| 2.3.10 | Eristyskoestus  | 34 |
| 2.3.11 | Eristysvastusmittaus  | 35 |
| 3      | MITTAAMISEN LUOTETTAVUUS JA SEN YHTYMÄKOHDAT<br>SÄHKÖMOOTTORIN KOESTUKSEEN                      | 37 |
| 3.1    | Mittausvirheet ja niitä aiheuttavat tekijät   | 37 |
| 3.2    | Mittaamisen luotettavuus  | 39 |
| 3.3    | Näkökohtia mittaamisen luotettavuuteen oikosulkumoottorin<br>hyötysuhdemittauksessa             | 44 |
| 4      | TESTAUSASEMAN RAKENNE JA MODERNISOINTI  | 49 |
| 4.1    | Taajuusmuuttajat  | 51 |
| 4.1.1  | Tasasuuntaaja   | 51 |
| 4.1.2  | Vaihtosuuntaajat  | 53 |
| 4.2    | Generaattorin vetomoottorit   | 55 |
| 4.3    | Jarrumoottorit  | 56 |
| 4.4    | Virranmittaus   | 58 |
| 4.5    | Tahtigeneraattorin magnetointilaite   | 61 |
| 4.6    | Automaatiojärjestelmä   | 63 |
| 5      | SÄHKÖMOOTTORITESTAUSASEMAN MODERNISOINNIN JÄLKEISEN<br>MITTAAMISEN LUOTETTAVUUDEN VARMISTAMINEN | 65 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.1 | Hyötysuhdemittaus  | 65 |
| 5.2 | Hyötysuhteen toistomittaukset ja ohjauskortti                | 69 |
| 5.3 | Mittalaitteiden epävarmuuksien vaikutus hyötysuhdelaskentaan | 72 |
| 6   | JOHTOPÄÄTÖKSET   | 74 |
| 7   | YHTEENVETO   | 81 |

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Kreikkalaiset symbolit*

|               |   |
|---------------|---|
| $\eta$        | Hyötysuhde                                    |
| $\eta_{\max}$ | Hyötysuhteen maksimiarvo                      |
| $\eta_{\min}$ | Hyötysuhteen minimiarvo                       |
| $\gamma$      | Korrelaatiokerroin                            |
| $\theta_1$    | Käämityksen lämpötila lämpenemätestin alussa  |
| $\theta_2$    | Käämityksen lämpötila lämpenemätestin lopussa |
| $\theta_c$    | Jäähdytysilman lämpötila                      |
| $\theta_w$    | Käämityksen lämpötila lämpötasapainossa       |

*Muut symbolit*

|       |   |
|-------|---|
| $F$   | Voima   |
| $H$   | Sähkömoottorin akselin korkeus  |
| $I$   | Sähkövirran voimakkuus  |
| $I_0$ | Tyhjäkäyntivirta  |
| $I_p$ | Mittamuuntajan rengaskäämin läpi kulkevan sähkövirran voimakkuus      |
| $I_s$ | Fluxgate-mittamuuntimen rengaskäämille ohjaama sähkövirran voimakkuus |
| $k$   | Käämimateriaalinen resistanssin lämpötilakerroin                      |

|                |  |
|----------------|--|
| $k_{\theta}$   | Käämityksen lämpötilan korjauskerroin                          |
| $m$            | Keskiarvo  |
| $N$            | Tulosten lukumäärä   |
| $N_p$          | Rengaskäämin käämikierrosten lukumäärä                         |
| $N_s$          | Rengaskäämin ympärillä olevan käämilangan kierrosten lukumäärä |
| $n$            | Pyörimisnopeus   |
| $n_s$          | Synkrooninen pyörimisnopeus                                    |
| $p$            | Napapariluku   |
| $P_0$          | Tyhjäkäyntiteho  |
| $P_1$          | Syöttöteho   |
| $P_{1,\theta}$ | Korjattu syöttöteho  |
| $P_{1,max}$    | Suurin mahdollinen syöttöteho                                  |
| $P_{1,min}$    | Pienin mahdollinen syöttöteho                                  |
| $P_2$          | Ulostuloteho, akseliteho                                       |
| $P_c$          | Jatkuvat häviöt  |
| $P_{el}$       | Sähköteho  |
| $P_{Fe}$       | Rautahäviöt  |
| $P_{fw}$       | Hankaus- ja tuuletushäviöt                                     |
| $P_{fw0}$      | Tyhjäkäynnin aikaiset hankaus- ja tuuletushäviöt               |
| $P_{LL}$       | Lisähäviöt   |
| $P_{Lr}$       | Jäännöshäviö   |
| $P_{mech}$     | Akseliteho   |
| $P_N$          | Nimellisteho   |
| $P_r$          | Korjaamattomat roottorihäviöt                                  |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $P_{r,\theta}$    | 25 celsiusasteen lämpötilaan korjatut roottorihäviöt       |
| $P_s$             | Korjaamattomat staattorikäämihäviöt                        |
| $P_{s,\theta}$    | 25 celsiusasteen lämpötilaan korjatut staattorikäämihäviöt |
| $P_T$             | Kokonaishäviöt   |
| $P_{T,\max}$      | Suurimmat mahdolliset kokonaishäviöt                       |
| $P_{T,\min}$      | Pienimmät mahdolliset kokonaishäviöt                       |
| $R_{\parallel,0}$ | Interpoloitu käämityksen resistanssi                       |
| $R_1$             | Resistanssi lämpenemätestin alussa                         |
| $R_2$             | Resistanssi lämpenemätestin lopussa                        |
| $R_N$             | Staattorikäämityksen resistanssi lämpötilatasapainossa     |
| $r$               | Vipuvarren pituus  |
| $s$               | Jättämä  |
| $s_\theta$        | 25 celsiusasteen lämpötilaan korjattu jättämä              |
| $T$               | Vääntömomentti   |
| $\Delta t$        | Moottorin käämityksen lämpenemä                            |
| $t_1$             | Käämityksen lämpötila lämpenemätestin alussa               |
| $t_2$             | Käämityksen lämpötila lämpenemätestin lopussa              |
| $t_a$             | Jäähdytysaineen lämpötila lämpenemätestin lopussa          |
| $T_n$             | Nimellismomentti   |
| $U_0$             | Tyhjäkäyntijännite   |
| $U_{ek}$          | Eristyskoestuksen mittausjännite                           |
| $U_i$             | Sisäinen jännite   |
| $U_N$             | Nimellisjännite  |



*Lyhenteet*

|      |  |
|------|--|
| ABB  | Asea Brown Boveri  |
| AC   | Alternative Current, vaihtovirta                                 |
| DOL  | Direct on-line, suora verkkokytkenä                              |
| DTC  | Direct torque control, suora momentinsäätö                       |
| HVF  | Harmonic voltage factor, harmoniset yliaallot                    |
| IEC  | International Electrotechnical Commission, standardointijärjestö |
| PROM | Programmable Read Only Memory, lukumuisti                        |
| RAM  | Random Access Memory, luku- ja kirjoitusmuisti                   |
| UPS  | Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön virransyöttö         |

---

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

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Tekijä:</b>                       | Ville Takala   |
| <b>Diplomityön nimi:</b>             | Sähkömoottoritestausaseman modernisoinnin jälkeisen mittaamisen luotettavuuden varmistaminen |
| <b>Valvoja:</b>                      | Prof. Timo Vekara  |
| <b>Ohjaaja:</b>                      | Ins. Tommi Pantti  |
| <b>Tarkastaja:</b>                   | DI Henrik Tarkkanen  |
| <b>Tutkinto:</b>                     | Diplomi-insinööri  |
| <b>Oppiaine:</b>                     | Sähkötekniikka   |
| <b>Opintojen aloitusvuosi:</b>       | 2013   |
| <b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b> | 2019   |

**Sivumäärä: 86**

---

**TIIVISTELMÄ**

ABB oy:n Motors and Generators -yksikön koestuslaboratorion sähkömoottoreiden testausasemien laitteistoja ja kojeita uusitaan aika ajoin niiden ikääntymisen ja käyttöluotettavuuden parantamisen vuoksi. Tämän työn aikana eräälle koestuslaboratorion testausasemalle tehtiin mittava uudistus, jossa muun muassa taajuusmuuttajat vaihdettiin uusiin. Laitteiston vaihduttua on varmistuttava uuden laitteiston mittaamisen luotettavuudesta, johon tämä diplomityö keskittyy.

Tässä työssä määritetään kriteerit mittaamisenkin luotettavuudelle, joiden pohjalta uskottava mittaaminen modernisointiprojektin jälkeen voidaan todeta. Työssä perehdytään yleisimmän teollisuudessa käytetyn sähkömoottorityypin, oikosulkumoottorin, hyötysuhteen mittaamisen luotettavuuteen. ABB:llä käytetty hyötysuhteen määrittystapa perustuu IEC-standardeissa esitettyyn moottorin erillishäviöiden määrittämiseen, joka monipuolisena mittauksena todettiin sopivaksi mittaamisen luotettavuuden indikaattoriksi.

Työn teoriaosuudessa esitellään IEC-standardien mukainen ja ABB:n niihin pohjautuva oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittäminen. Teoriaosuudessa kerrotaan myös mittaamisen luotettavuudesta, sen osa-alueista ja liityntäkohdista sähkömoottorin koestukseen. Edellä olevat luvut ovat pohjana työn tutkimusosuudelle. Ennen työn tutkimusosuutta esitellään ja vertaillaan lyhyesti vielä testausaseman vanhoja ja uusia mittalaitteita. Tutkimusosuus pitää sisällään hyötysuhteen toistomittaukset ja asetettujen tarkkuusvaatimusten mukaisten mittaamisen luotettavuuden arvioinnin. Tarkkuusvaatimukset perustuivat samalla oikosulkumoottorilla tehtyihin hyötysuhdemittauksiin, joiden keskiarvo oli tavoitearvo testausaseman uudistuksen jälkeiselle hyötysuhdemittauksen tulokselle.

Työn tuloksena voitiin todeta sähkömoottoritestausaseman modernisoinnin jälkeinen mittaamisen luotettavuus. Tämän lisäksi analysoitiin työn aikana saatuja tuloksia ja esitettiin konkreettisia parannuskeinoja mittaamisen luotettavuuden parantamiseksi. Työssä tutkitun mittaamisen luotettavuuden teorian ja työnaikaisten havaintojen perusteella parannettiin koestuslaboratorion sisäistä laadunvarmistusta.

---

**AVAINSANAT:** Oikosulkumoottori, koestustekniikka, mittaamisen luotettavuus, hyötysuhdemittaus

---

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

**Author:** Ville Takala  
**Topic of the Thesis:** Ensuring the reliability of measurement of electric motor testing station after its modernization  
**Supervisor:** Prof. Timo Vekara  
**Instructor:** B.Sc. (Tech.) Tommi Pantti  
**Evaluator:** M.Sc. (Tech) Henrik Tarkkanen  
**Degree:** Master of Science in Technology  
**Major of Subject:** Electrical engineering  
**Year of Entering the University:** 2013  
**Year of Completing the Thesis:** 2019

**Pages:** 86

---

**ABSTRACT**

ABB oy, Motors and Generators BU's testing laboratory's equipment and instruments for electric motor test stations are renewed from time to time due to their aging and to improve reliability. During this work, a major reform was carried out on one testing station at a testing laboratory, where for example frequency converters were renewed. When the equipment was changed, the reliability of the measurement of the new equipment, to which this thesis is focused, must be ensured.

In this work the criteria for the reliability of the measurement are determined. The reliability of measurement of efficiency of the most common electric motor type, squirrel cage motor, is studied. The method of determining the efficiency used by ABB is based on the determination of the individual loss of the motor in the IEC standards, which, as a versatile measurement, was found to be suitable as an indicator of reliability of measurement.

In the theory part of the thesis is introduced, how the efficiency of the squirrel cage motor is determined in accordance with IEC standards and based on them in ABB. The theory part also describes the reliability of the measurement, its sub-areas and interfaces to the testing of the electric motor. The above chapters are the basis for the research part of the work. Before the research part of the work, the old and new measuring devices of the testing station are presented and compared briefly. The research chapter includes the evaluation of reliability of measurement, which is based on the repeated efficiency determination measurements and established accuracy requirements. The accuracy requirements were based on the repeated efficiency measurement results, which average was the target value for the result of the efficiency determination after the testing station modernization.

As result, the reliability of measurement could be ensured. Also, the results obtained during the work were analyzed and concrete improvements were presented to improve the reliability of the measurement. According to the researched theory of the reliability of measurement and observations noticed during the work, the internal quality assurance of the testing laboratory was improved.

---

**KEYWORDS:** Squirrel cage motor, testing, reliability of measuring, efficiency measurement

## 1 JOHDANTO

Investointi korkean hyötysuhteen sähkömoottoriin on kannattavaa sekä talouden että ympäristön näkökulmasta. Kun lasketaan yhteen sähkömoottorin hankintahinta ja sen käytön aikana kulutettu sähköenergian hinta, havaitaan, että hankintahinnan osuus on vain 1–3 prosenttia summasta (ABB 2018: 15). Mitä korkeampi hyötysuhde sähkömoottorilla on eli miten tehokkaasti se pystyy välittämään siihen syötetyn sähkötehon akselilleen, sitä enemmän säästyy rahaa. Maailmanlaajuisesti teollisuus, jonka eri sovelluksissa käytetään sopivia sähkömoottoreita, kuluttaa 65 prosenttia tuotetusta sähköstä (ABB 2018a: 10). Siten teollisuuteen ja sähkömoottoreihin liittyvä energiansäästöpotentiaali on iso.

Sähkömoottorin hyötysuhteen määrittäminen on tärkein ABB oy Motors and Generators -Vaasan tehtaan koestuslaboratoriossa tehtävä mittaaminen. Koestuslaboratoriossa hyötysuhde määritetään epäsuorasti eli se lasketaan muiden testitulosten avulla. Suoraa eli akseli- ja syöttötehon suhteen määrittämiseen perustuvaa hyötysuhteen mittaustapaa käytetään harvemmin. Koestuslaboratoriossa on useampi testauspaikka, jotka ovat suunniteltuja siten, että tietyillä testauspaikoilla voidaan testata tietyn tehoisia sähkömoottoreita. Suoraan verkkoon kytkettävän DOL-testauksen (*direct on-line*) lisäksi testauspaikoilla on mahdollista testata moottoria syöttämällä sitä taajuusmuuttajan kautta sekä suorittaa generaattoritestauksia.

Testauspaikkoja uusitaan aika ajoin vastaamaan paremmin sähkömoottorin koestuksen vaatimuksia, ja tämä diplomityö liittyy yhden testauspaikan modernisointiin. Tämän työn keskeisin osa on varmistua testauspaikan uudistustyön jälkeisestä mittaamisen luotettavuudesta. Uudistusprojekti on laaja, koska testausasemalla uudistetaan muun muassa generaattori- ja kuormamoottorit, niitä ohjaava taajuusmuuttaja, mittamuuntaja sekä ohjausjärjestelmä. Mittaamisen luotettavuuden varmistamisen keskiössä ovat hyötysuhteen epäsuorassa mittaustavassa käytetyt mittaukset, joita käsitellään tarkemmin työn edetessä.

Tämä diplomityö koostuu seitsemästä luvusta. Käyn ensin lukujen sisällön läpi pääpiirteissään ja sen jälkeen kerron yleisimmän sähkömoottorityypin, oikosulkumoottorin, rakenteesta.

Luvussa 2 kerrotaan, miten sen hyötysuhde tulee mitata IEC-standardien mukaisesti. Luvussa käsitellään myös, miten hyötysuhde mitataan käytännössä ABB:n sähkömoottoreiden koestuslaboratoriossa. Työn rajaamisen vuoksi keskityn hyötysuhdemittauksiin keskittyvissä luvuissa oikosulkumoottoriin, koska se on valmistus- ja testausmäärältään suurin moottorityyppi ABB:n Motors and Generators -yksikön Vaasan tehtaalla ja koska työhön liittyvä testauslaitteistokin on rakennettu oikosulkumoottorin testaamista varten.

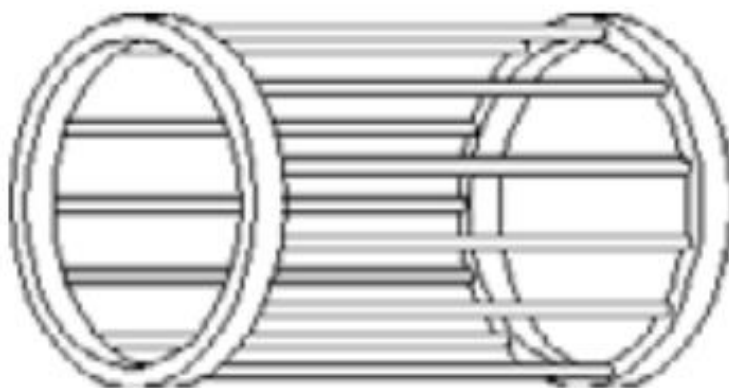
Luvussa 3 paneudutaan muun muassa kirjallisuus- ja haastattelulähteitä apuina käyttäen tekijöihin, jotka vaikuttavat mittaamisen luotettavuuteen oikosulkumoottorin koestuksessa. Luvussa kerrotaan myös, mitä mittaamisen luotettavuudella tarkoitetaan sekä sivutaan mittaustarkkuuden käsitettä kontekstin rajoissa. Luvussa 4 esitellään koestusaseman pääpiirteinen rakenne ja kerrotaan, mitkä komponentit muuttuvat modernisointiprojektin aikana. Lukuun kuuluu lisäksi vertailu testausaseman vanhojen ja uusien laitteiden välillä.

Testiaseman uudistustöiden jälkeen on varmistuttava mittaamisen luotettavuudesta, jota käsitellään luvussa 5. Mittaamisen luotettavuuteen toteamiseen kuuluu olennaisena osana määrittää kriteerit, joilla mittaamisen luotettavuus voidaan todeta. Osuuteen kuuluu suorittaa koestukset yhdellä referenssimoottorilla ennen ja jälkeen uudistustöitä sekä toisella testiasemalla. Koestustulosten pohjalta varmistutaan mittaamisen luotettavuudesta pääasiassa vertaamalla tuloksia keskenään tarkastellen erityisesti laskettuja hyötysuhteita. Luku 6 pitää sisällään työn johtopäätökset, jossa on esitetty muun muassa tutkimustulosten analysointia ja niiden perusteella havaittuja konkreettisia mittaamisen luotettavuuden parannuskeinoja. Luvussa 7 on esitetty työn yhteenveto.

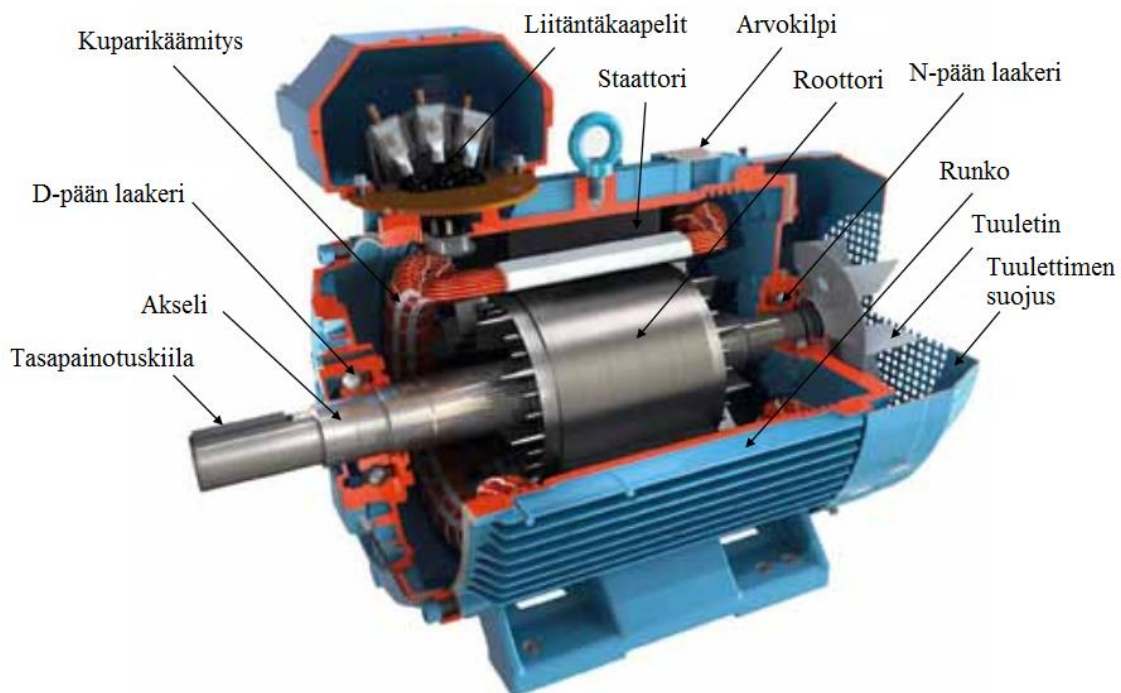
### *Oikosulkumoottori ja sen ominaisuudet*

Oikosulkumoottori on suosittu moottori, koska sen rakenne ja toimintaperiaate ovat yksinkertaisia. Tärkeimmät osat toiminnan kannalta ovat alumiinisauvoista koostuva häkkikäämitty roottori (kuva 1), jonka päihin on asennettu oikosulkurenkaat sekä sähkölevy-pakettiin liitetty staattorikäämitys, jonka materiaali ABB:n valmistamissa oikosulkumoottoreissa on kupari. Muita tärkeitä osia ovat laakerikilvet, tuuletin, akseli, joko valu-

raudasta tai alumiinista valmistettu runko sekä laakerit, joita voidaan pitää ainoina oikosulkumoottorin kuluvin osina. (Korpinen 1998a ja ABB 2018a: 59.) Oikosulkumoottorin läpileikkaus on esitetty kuvassa 2.



**Kuva 1.** Periaatekuva roottorin häkkikämmityksen rakenteesta (Korpinen 1998a).



**Kuva 2.** Läpileikkaus oikosulkumoottorista (ABB 2018a: 60). Kuvaa muokattu.

Oikosulkumoottorin toiminta on yksinkertaistettuna seuraavan kaltainen: staattorikäämi-tykseen johdettu vaihtovirta luo pyörivän magneettikentän, joka indusoi roottorin häkki-käämitykseen jännitteen ja saa aikaan roottorivirran. Roottorin päihin liitettyjen oikosul-kurenkaiden johdosta virta alkaa kulkea roottorin häkkikäämityksessä, mikä luo myös magneettikentän ympärilleen. Staattorin ja roottorin magneettikentät vuorovaikuttavat toistensa kanssa siten, että roottorin magneettikenttä alkaa seuraamaan staattorin mag-neettikenttää, joka tuottaa vääntömomentin. Oikosulkumoottori on epätahtimoottori, jonka nimitys johtuu staattorin ja roottorin magneettikenttien toisistaan eriävistä pyöri-misnopeuksista. (Korpinen 1998a ja ABB 2018a: 33.)

Sähkömoottorin tahtinopeus  $n_s$  riippuu staattorikäämityksen napaparien lukumäärästä  $p$  ja sitä syöttävän verkon nimellistaajuudesta  $f$

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

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus kuvataan jättämän avulla, joka kertoo eron tahtino-peuteen nähden. (Korpinen 1998a.) Suhteellinen jättämä  $s$  lasketaan

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

missä  $n$  on oikosulkumoottorin pyörimisnopeus.

Sähkömoottorin hyötysuhde lasketaan arvokilven tietojen perusteella yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}, \quad (3)$$

missä  $P_2$  on akseliteho,  $U$  on nimellisjännite,  $I$  on nimellisvirta ja  $\cos \varphi$  on tehokerroin. (Korpinen 1998a).

Oikosulkumoottorin ottamasta sähkötehosta suurin osa kuluu mekaanisen työn tekemiseen eli akselin pyörittämiseen. Teho, joka ei välity akselille, kuluu häviöihin. Nämä häviöt jaetaan

- käämihäviöihin,
- rautahäviöihin,
- hankaus- ja tuuletushäviöihin sekä
- lisähäviöihin. (De Almeida, Ferreira, Busch & Angers 2001.)

Käämihäviöihin kuuluvat staattorikäämyksessä ja roottorin häkkikäämyksessä tapahtuvat häviöt. Rautahäviöiksi lasketaan kaikki rauta- tai muiden metalliosien häviöt. Hankaus- ja tuuletushäviöt koostuvat laakereiden kitkasta ja moottoriin liitetyn tuulettimen ilmanvastuksesta johtuvista häviöistä. Lisähäviöiksi luetaan muun muassa staattorin ja roottorin käämyksien pyörrevirroista johtuvat häviöt. (De Almeida ym. 2001.) Näiden häviöiden suuruudet voidaan määrittää IEC 60034-2-1 -standardissa esitetyllä hyötysuhteen epäsuoralla mittaustavalla, josta kerrotaan luvussa 2.



## 2 OIKOSULKUMOOTTORIN HYÖTYSUHTEN MITTAAMINEN

Luvussa 2 paneudutaan oikosulkumoottorin hyötysuhteen mittaamiseen. Alaluvussa 2.1 kerrotaan oikosulkumoottorin hyötysuhteen mittaamisesta IEC:n standardien mukaan. IEC-standardi 60034-2-1 esittelee kolme erilaista mittaustapaa oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittämiseen, jotka on esitetty taulukossa 1. Alaluvuissa kerrotaan tarkemmin kahdesta eri mittaustavasta, suorasta ja häviötarkasteluihin perustuvasta epäsuorasta mittaustavasta.

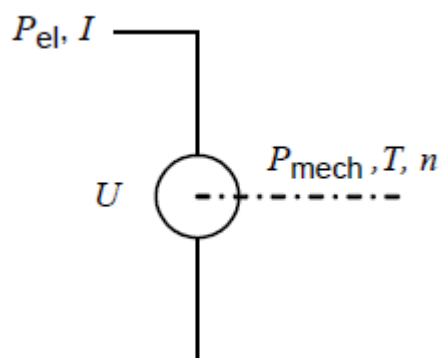
Yli kahden megawatin tehoisten oikosulkukoneiden hyötysuhteen määrittäminen on jätetty pois, koska sen tehoisia oikosulkukoneita ei valmisteta ABB:n Motors and Generators -yksikön Vaasan tehtaalta. Alaluvussa 2.2 käydään läpi hyötysuhteen määrittäminen käytännössä ABB:n koestuslaboratoriossa.

**Taulukko 1.** Oikosulkumoottorin hyötysuhteen määritystavat (IEC 2014: 20).

| Mittaustapa                                | Kuvaus                                       | Sovelluskohde                                   |
|--|--|---|
| Suora                                      | Vääntömomentin mittaaminen                   | Yksivaiheiset moottorit                         |
| Epäsuora: häviöiden määrittäminen erikseen | Lisähäviöiden määrittäminen mittaamalla      | Kolmivaihemoottorit,<br>$P_N \leq 2 \text{ MW}$ |
| Epäsuora: häviöiden määrittäminen erikseen | Lisähäviöiden määrittäminen laskennallisesti | Kolmivaihemoottorit,<br>$P_N > 2 \text{ MW}$    |

### 2.1 Oikosulkumoottorin suora mittaustapa

Suorassa hyötysuhteen mittaustavassa hyötysuhde määritetään mittaamalla dynamometrillä vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta, joiden avulla voidaan määrittää akselitehon  $P_{\text{mech}}$  suuruus. Samalla mitataan syöttävän sähkötehon  $P_{\text{el}}$  suuruutta. Mittausjärjestely on kuvan 3 kaltainen. (IEC 2014: 20.)



**Kuva 3.** Suoran hyötysuhdemittauksen mittausjärjestely (IEC 2014: 20).

Mittauksessa moottoria tulee kuormittaa nimellismomentilla, kunnes moottorin lämpötilan muutos on enää alle 1 kelviniä puolen tunnin aikana. Koneen hyötysuhde määritetään yhtälöillä

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4)$$

missä syöttöteho  $P_1$  ja akseliteho  $P_2$  tarkoittavat moottorin hyötysuhdemittauksessa

$$P_1 = P_{el}; P_2 = P_{mech} \quad (5)$$

ja generaattorin hyötysuhdemittauksessa

$$P_1 = P_{mech}; P_2 = P_{el}, \quad (6)$$

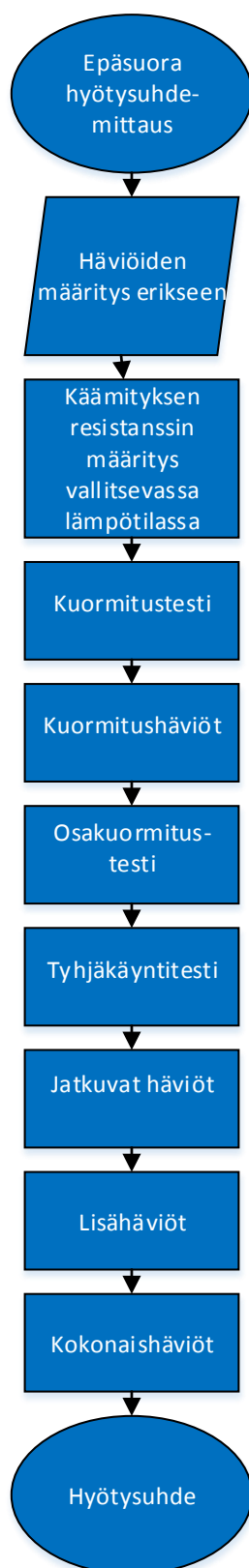
missä

$$P_{mech} = 2\pi \cdot T \cdot n, \quad (7)$$

missä  $T$  on vääntömomentti ja  $n$  on pyörimisnopeus. (IEC 2014: 20.)

## 2.2 Oikosulkumoottorin epäsuora mittaustapa

Epäsuoran mittaustavan tarkoitus on mitata hyötysuhde erillisillä häviötarkasteluilla. Mittattavat häviökomponentit ovat rautahäviöt, tuuletus- ja hankaushäviöt, staattorin ja roottorin kuparihäviöt ja lisähäviöt. (IEC 2014: 22.) Kuvassa 4 on esitetty kaaviokuvana epäsuoran hyötysuhdemittauksen kulku.



**Kuva 4.** Epäsuoran hyötysuhdemittauksen kulku (IEC 2014: 22).

### 2.2.1 Kuormitustesti

Ennen kuormitustestin aloitusta tulee lämpötila ja käämityksen resistanssi mitata vallitsevassa lämpötilassa. Koneita kuormitetaan nimellisteholla ja -momentilla niin kauan, kunnes lämpötilan tasapaino saavutetaan eli moottorin lämpötilan muutos on korkeintaan 1 kelviniä puolen tunnin aikana. Testissä tarkkaillaan lisäksi syöttävän tehon, virran ja jännitteen suuruutta, vääntömomenttia, pyörimisnopeutta, taajuutta ja käämityksen lämpötilaa. Tämän lisäksi mitataan staattorikämmityksen resistanssi  $R_N$  ja lämpötila  $\theta_2$ , kun lämpötilan tasapaino on saavutettu. (IEC 2014: 22.)

### 2.2.2 Kuormitushäviöt

Kuormitushäviöillä tarkoitetaan staattori- ja roottorikäämmeissä tapahtuvien häviöiden suuruutta. Kummankin häviön suuruus määritetään kuormitustestissä mitattujen arvojen perusteella, mutta lopullisessa hyötysuhteen määrittämisessä käytetään 25 celsiusasteen lämpötilaan korjattuja arvoja. (IEC 2014: 23.)

Korjaamattomat staattorikämmihäviöt  $P_s$  lasketaan yhtälöllä

$$P_s = 1,5 \cdot I^2 \cdot R, \quad (8)$$

missä  $I$  on sähkövirran voimakkuus ja  $R$  on resistanssi  $R_N$ , jotka ovat mitattu kuormitustestissä lämpötilan tasapainon saavutettua (IEC 2014: 23).

25 celsiusasteen lämpötilaan korjatut staattorikämmihäviöt  $P_{s,\theta}$  lasketaan yhtälöllä

$$P_{s,\theta} = P_s \cdot k_\theta, \quad (9)$$

missä  $k_\theta$  on käämityksen lämpötilan korjauskerroin, joka määritetään yhtälöllä

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}, \quad (10)$$

missä  $\theta_w$  lasketaan yhtälöllä

$$\frac{\theta_2+k}{\theta_1+k} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (11)$$

missä  $\theta_w$  on  $\theta_2$  on käämityksen lämpötila lämpenemätestin lopussa,  $\theta_c$  on jäähdytysilman lämpötila,  $R_1$  on käämityksen resistanssi lämpenemätestin alussa,  $R_2$  on käämityksen resistanssi lämpenemätestin lopussa ja  $k$  on johdinaineen resistanssin lämpötilakerroin, joka on kuparille 235. Mikäli käämityksen johdinaine on alumiini, niin lämpövakiona käytetään arvoa 225. (IEC 2014: 17–18; IEC 2017: 40–41.)

Korjaamattomat roottorihäviöt  $P_r$  lasketaan kuormitustestin pohjalta yhtälöillä

$$P_r = s \cdot (P_1 - P_s - P_{Fe}) \quad (12)$$

ja

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f}, \quad (13)$$

missä  $s$  on jättämä,  $p$  on napapariluku ja  $P_{Fe}$  rautahäviöt, jotka määritetään jatkuvien häviöiden määrittämisen yhteydessä (IEC 2014: 23).

25 celsiusasteen lämpötilaan korjatut roottorikämmihäviöt  $P_{r,\theta}$  lasketaan yhtälöillä

$$P_{r,\theta} = s_\theta \cdot (P_1 - P_{s,\theta} - P_{Fe}) \quad (14)$$

ja

$$s_\theta = s \cdot k_\theta, \quad (15)$$

missä  $s_\theta$  on 25 celsiusasteen lämpötilaan korjattu jättämä ja  $k_\theta$  on edellä yhtälön 10 mukaisesti laskettu käämityksen lämpötilan korjauskertoimen (IEC 2014: 23).

Korjattujen staattori- ja roottorihäviöiden perusteella lasketaan korjattu syöttöteho  $P_{1,\theta}$  yhtälöllä (IEC 2014: 23)

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}). \quad (16)$$

### 2.2.3 Osakuormitustesti

Osakuormatesti tulee suorittaa heti kuormitustestin jälkeen moottorin käyntilämpötilassa  $\theta_N$  tai korkeintaan 5 kelvinin päässä siitä. Testattavaa konetta kuormitetaan kuudella eri osakuormalla: 125, 115, 100, 75, 50 ja 25 prosentin kuormilla nimelliskuormitukseen nähden. Osakuormatestit tulisi suorittaa mahdollisimman nopeasti, jotta mahdollisella lämpötilan vaihtelulla ei olisi vaikutusta tuloksiin. Jokaisella osakuormalla taajuuden vaihtelu saa olla enintään 0,1 prosenttia suuntaansa. (IEC 2014: 23.)

Käämityksen resistanssi tulee mitata ennen isoimman osakuorman testiä ja pienimmän osakuormamittauksen jälkeen. Staattori- ja roottorikäämihäviöt  $P_s$  ja  $P_r$  lasketaan jokaiselle osakuormalle erikseen yhtälöiden 8 ja 12 mukaan, kuten kuormitushäviötestissä. Kunkin osakuorman häviöiden määrittämiseen tarvittava resistanssi  $R$  määräytyy seuraavasti:

- 125, 115 ja 100 prosentin osakuormien häviötarkasteluissa käytetään ennen isoimman osakuorman testiä mitattua arvoa ja
- 75, 50 ja 25 prosentin osakuormien häviötarkasteluissa käämityksen resistanssi määräytyy lineaarisesti kuormituksen mukaan muuttuen. Resistanssin määrittämisessä kunkin osakuorman kohdalla käytetään ennen ja jälkeen osakuormatestin mitattuja arvoja. (IEC 2014: 24.)

### 2.2.4 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntitesti pitää tehdä kuumalle koneelle välittömästi osakuormitustestin jälkeen. Konetta syötetään kahdeksan eri jännitteen suuruudella seuraavasti:

- nimellisjännitteeseen verrattuna 110, 100, 95 ja 90 prosentin jännitteillä rautahäviöiden  $P_{Fe}$  määrittystä varten sekä
- 60, 50, 40 ja 30 prosentin jännitteillä nimellisjännitteeseen nähden hankaus- ja tuuletushäviöiden  $P_{fw}$  määrittystä varten. (IEC 2014: 25.)

Testin aikana mitataan tyhjäkäyntivirtaa  $I_0$ , -jännitettä  $U_0$  ja -tehoa  $P_0$ . Tyhjäkäyntitestissä käämityksen resistanssi  $R_0$  tulee mitata ennen ja jälkeen testin, joiden pohjalta voidaan laskea kunkin osajännitteen resistanssiarvo. Käämityksen resistanssi on riippuvainen tyhjäkäyntitehosta, joten sen voi interpoloida kullekin osajännitteelle mukailien tyhjäkäyntitehon muutosta.

### 2.2.5 Jatkuvat häviöt

Jatkuvat häviöt koostuvat rauta- sekä tuuletus- ja hankaushäviöistä. Niiden suuruus saadaan laskettua yhtälöillä

$$P_c = P_0 - P_s \quad (17)$$

ja

$$P_c = P_{fw} + P_{Fe}, \quad (18)$$

missä

$$P_s = 1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_{||,0}, \quad (19)$$

missä  $P_0$  on mitattu tyhjäkäyntiteho kullakin tyhjäkäyntitestin jännitteellä ja  $R_{||,0}$  on kunkin osajännitteen interpoloitu käämityksen resistanssiarvo. (IEC 2014: 25.)



Tuuletus- ja hankaushäviöt  $P_{fw}$  saadaan määritettyä mittaamalla tyhjäkäyntitestissä vähintään neljää mittauspistettä nimellisjännitteeseen nähden 30 ja 60 prosentin välillä olevilla jännitteillä. Mittauspisteistä luodaan käyrä jatkuvien häviöiden  $P_c$  suhteesta tyhjäkäyntijännitteen  $U_0$  neliöön nähden. Kun ekstrapoloidaan suora viiva nolajännitteeseen nähden, saadaan risteyskohdasta osoitettua tuuletus- ja hankaushäviöiden suuruus synkroninopeudella  $P_{fw0}$ . (IEC 2014: 25.)

Rautahäviöt  $P_{Fe}$  määritetään myös tyhjäkäyntikokeen mittausten perusteella. Nimellisjännitteeseen nähden noin 90 ja 110 prosentin suuruisen jännitteiden perusteella luodaan käyrä  $P_{Fe} = P_c - P_{fw}$ . Rautahäviöiden määrittämiseksi täydellä kuormalla tulee myös laskea sisäinen jännite  $U_i$ , joka ottaa huomioon pääkäämissä tapahtuvan resistiivisen jännitteenaleneman. Se määritetään moottorille yhtälöllä

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2}, \quad (20)$$

ja generaattorille yhtälöllä

$$U_i = \sqrt{\left(U + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2}, \quad (21)$$

missä

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}, \quad (22)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (23)$$

ja  $U$ ,  $P_1$ ,  $I$  ja  $R$  ovat kuormitustestissä mitattuja arvoja. Rautahäviöt nimelliskuormalla saadaan määritettyä interpoloimalla edellä mainittua tyhjäkäyntitestin rautahäviökäyrää  $P_{fe} = P_c - P_{fw}$ , jossa sisäisen jännitteen  $U_i$  suuruinen jännite osoittaa rautahäviöiden suuruuden nimelliskuormalla. (IEC 2014: 25–26.)

### 2.2.6 Lisähäviöt

Lisähäviöiden  $P_{LL}$  määrittämistä varten on laskettava jäännöshäviö  $P_{Lr}$ . Se lasketaan kul-  
lekin kuormalle erikseen vähentämällä syöttötehosta ulostuloteho, korjaamaton staattori-  
ja roottorikäymihäviö, rautahäviöt sekä korjaamattomat tuuletus- ja hankaushäviöt. Jään-  
nöshäviön suuruus lasketaan yhtälöllä

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{Fe} - P_{fw}, \quad (24)$$

missä  $P_2$  lasketaan moottorille yhtälöllä

$$P_2 = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot n \quad (25)$$

ja generaattorille yhtälöllä

$$P_1 = 2 \cdot \pi \cdot T \cdot n, \quad (26)$$

ja  $P_{fw}$  on korjaamattomat hankaus- ja tuuletushäviöt

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - s)^{2,5}, \quad (27)$$

missä  $P_{fw0}$  on tyhjäkäynnin aikaiset hankaus- ja tuuletushäviöt. (IEC 2014: 26.)

Ennen lisähäviöiden suuruuden lopullista määrittämistä jäännöshäviödata pitää oikoa  
käyttäen regressioanalyysia ja laskemalla korrelaatiokerroin  $\gamma$ . Regressioanalyysi perus-  
tuu häviöiden kuvaamiseen vääntömomentin neliössä yhtälöllä

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B, \quad (28)$$

missä A ja B ovat vakioita, jotka määritetään kuuden eri kuormituspisteen mittaustulosten  
perusteella yhtälöillä

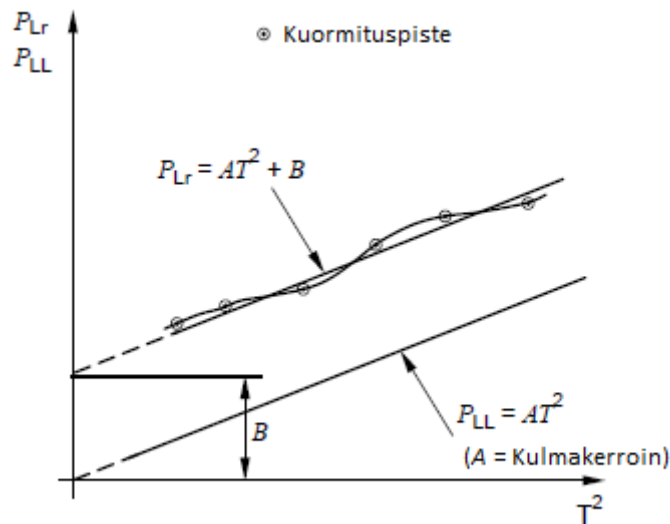
$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (29)$$

ja

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum T^2}{i}, \quad (30)$$

missä  $i$  on kuormituspisteiden lukumäärä. (IEC 2014: 26–27.)

Kuvassa 5 on esitetty havainnoiva kuva jäännöshäviödatan oikomisesta. Nimellismomentilla laskettu vakio  $B$  tulee olla huomattavasti, vähintään 50 prosenttia, pienempi, kuin lisähäviöiden  $P_{LL}$  suuruus. Muussa tapauksessa mittaus voi olla virheellinen ja se tulisi tarkistaa. (IEC 2014: 27.)



**Kuva 5.** Havainnekuva jäännöshäviödatan oikomisesta, jossa on otettu huomioon kuusi kuormituspistettä (IEC 2014: 27). Kuvaa muokattu.

Korrelaatiokerroin  $\gamma$  lasketaan yhtälöllä

$$\gamma = \frac{i \cdot \sum (P_{Lr} \cdot T^2) - (\sum P_{Lr}) \cdot (\sum T^2)}{\sqrt{(i \cdot \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \cdot (i \cdot \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr})^2)}}, \quad (31)$$

jonka perusteella voidaan varmistua mahdollisesta mittaus- tai lukuvirheestä. Jos korrelaatiokerroin on pienempi kuin 0,95, huonoin kuormituspisteen mittausarvo tulee poistaa

laskennasta ja sen jälkeen toistetaan regressioanalyysi. Mikäli korrelaatiokerroin nousee arvoon 0,95 tai ylemmäksi, käytetään sen tulosta. Jos taas korrelaatiokerroin ei nouse arvoon 0,95, testiä voidaan pitää epäonnistuneena ja testilaitteet sekä mittausravot tulee tarkastaa. Mittausta voidaan pitää riittävän tarkkana, jos korrelaatiokerroin on 0,98 tai lähellä sitä. (IEC 2014: 27.)

Korrelaatiokerroinlaskennan jälkeen lisähäviöt  $P_{LL}$  määritetään yhtälöllä (IEC 2014: 27)

$$P_{LL} = A \cdot T^2. \quad (32)$$

### 2.2.7 Kokonaishäviöt ja hyötysuhde

Ennen hyötysuhteen määrittämistä tulee laskea kokonaishäviöiden  $P_T$  suuruus. Se määritetään laskemalla yhteen rautahäviöt, korjatut hankaus- ja tuuletushäviöt, korjatut staatori- ja roottorihäviöt sekä lisähäviöt yhtälöllä

$$P_T = P_{Fe} + P_{fw} + P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{LL}, \quad (33)$$

jonka perusteella hyötysuhde lasketaan yhtälöllä

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}, \quad (34)$$

missä  $P_{1,\theta}$  on korjattu syöttöteho ja  $P_2$  on kuormitustestissä mitattu ulostuloteho. (IEC 2014: 28.)

## 2.3 Oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittäminen ABB:n koestuslaboratoriossa

Sähkömoottorin hyötysuhde määritetään ABB:n koestuslaboratoriossa epäsuoralla mittaustavalla mittaamalla syöttävän tehon suuruus ja laskemalla akseliteho mitattujen kokonaishäviöiden pohjalta. Hyötysuhde voidaan määrittää samalla tavalla S1–S4, S6, S8 sekä S10 -käyttöihin suunnitelluille sähkömoottoreille. Suoraa mittaustapaa käytetään,

kun sähkömoottoria syötetään taajuusmuuttajalla. Hyötysuhde saadaan määritettyä, kun jaetaan mitatun akselitehon suuruus syöttävän sähkötehon suuruudella. (Pantti 2019.)

Ennen hyötysuhdemittausten aloittamista sähkömoottorista on poistettava hankaavat osat, kuten tiivisteet. Hankaavat osat voidaan poistaa, jos voidaan eräille samankaltaisen rakenteen omaaville sähkömoottorityypeille tehtyjen lisätestien avulla osoittaa, että ajan kuluessa hyötysuhdemittauksessa poistettavien hankaavien osien kitkavaikutus on olematon. On myös hyvä kiinnittää huomiota laakerirasvan määrään, koska liika laakerirasvan määrä heikentää hyötysuhdetta. (Pantti 2019.)

Alalukuihin 2.3.1–2.3.11 on listattu koestusohjelma, jonka pohjalta hyötysuhde määritetään epäsuorasti ABB:n sähkömoottoreiden koestuslaboratoriossa. Tärinätestiä lukuun ottamatta hyötysuhdemittaus tehdään IEC 60034-1- ja IEC 60034-2-1 -standardien vaatimusten mukaisesti.

### 2.3.1 Silmämääräinen tarkastus

Visuaalisen tarkastuksen päätarkoitus on varmistua sähkömoottorin oikeasta rakenteesta. Ennen koestuksen aloitusta sähkömoottorista tulee tarkastaa

- arvokilpitiedot,
- tuulettimen tai tuulettinmoottorin, pääkytkentäkotelon, kytkentäalustan sekä lisälaitteiden oikeellisuus,
- väri ja asennusasento,
- akseli sekä kiila ja
- kaapelitiivisteet sekä mahdolliset vesiliitännät. (Pantti 2019.)

### 2.3.2 Vastusmittaus vallitsevassa lämpötilassa

Käämityksen vaihevastukset mitataan U-V-, U-W- ja V-W -vaiheiden väliltä nelijohtomenetelmällä käyttäen vastusmittaria. Mahdollisten käämityksen lämmityslaitteiden ja

lämpötilanvalvontalaitteiden vastusarvo mitataan niiden riviliittimistä. Käämityksen resistanssi mitataan vallitsevassa lämpötilassa johtuen seuraavista syistä:

- varmistetaan kytkentöjen oikeellisuudesta,
- huomataan mahdolliset vaihevastusarvojen eroavaisuudet toisiinsa nähden,
- mitatun ja lasketun vastusarvojen vertailun vuoksi ja
- määritetään niin sanottu kylmä resistanssiarvo, jota käytetään moottorin lämpenemän määrittämiseen lämpenemätestin jälkeen. (Pantti 2019.)

### 2.3.3 Käynnistysmomentin ja -virran mittaus

Testissä mitataan sähkömoottorin käynnistysmomentin suhdetta nimellismomenttiin sekä käynnistysvirran suhdetta nimellisvirtaan. Mittauksessa roottori lukitaan mekaanisesti ja sitä syötetään nimellisjännitteellä samalla mitaten moottorin virtaa sekä vääntömomenttia. (Pantti 2019.)

### 2.3.4 Lämpenemätesti

Lämpenemätesti tehdään, jotta saadaan määritettyä käämityksen, D-pään laakerin, rungon sekä muiden tärkeiden moottorin osien lämpenemät. Testauspaikan generaattorilla syötetään testattavaa moottoria sen nimellisjännitteellä ja -taajuudella sekä kuormitetaan nimellismomentilla kuormamoottoreiden avulla. Testauspaikalla on myös mahdollista tehdä lämpenemätesti käyttämällä moottoria generaattorina. Mitattavien kohteiden lämpötilat tallennetaan testin ajan. Lisäksi roottorin lämpenemä mitataan E(E)x e- ja E(E)x nA -tyyppien moottoreilta. (Pantti 2019.)

Moottoria pidetään käynnissä, kunnes lämpötilan muutos on enää alle 1 kelviniä puolessa tunnissa. Tämän jälkeen moottori pysäytetään ja sen käämityksen resistanssi mitataan. (Pantti 2019). Sen perusteella lasketaan käämityksen lämpenemä  $\Delta t$  yhtälöllä

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (k + t_1) + t_1 - t_a, \quad (35)$$

missä  $R_1$  on käämityksen resistanssi lämpenemätestin alussa,  $R_2$  on käämityksen resistanssi lämpenemätestin lopussa,  $t_1$  on käämityksen lämpötila lämpenemätestin alussa vastarvon  $R_1$  mittaushetkellä,  $t_2$  on käämityksen lämpötila lämpenemätestin lopussa vastarvon  $R_2$  mittaushetkellä,  $t_a$  on jäähdytysaineen lämpötila lämpenemätestin lopussa ja  $k$  on käämimateriaalin resistanssin lämpötilakerroin, joka on kuparille 235 ja alumiinille 225 (Pantti 2019).

Käämityksen resistanssi lämpenemääjon jälkeen mitataan nelijohtomenetelmällä ja mitaus aloitetaan mahdollisimman pian moottorin sähkönsyötön katkaisun jälkeen. Mittauksen viimeinen mahdollinen aloitusaika on taulukon 2 mukaisesti riippuvainen sähkömoottorin nimellistehosta. Mittauksen aloituksesta käämityksen resistanssia mitataan noin kaksi minuuttia. Ajan mukaisesti muuttuvan käämityksen resistanssin perusteella voidaan määrittää jäähtymäkäyrä, josta arvioidaan käämityksen resistanssi heti sähkönsyötön katkaisun jälkeen. Jäähtymäkäyrää tarvitaan lisäksi, kun määritetään hyötysuhde nimellistehoisenä. (Pantti 2019.)

**Taulukko 2.** Jäähtymäkäyrän määrittämiseen tarvittavan käämityksen resistanssin mittauksen aloitusajan riippuvaisuus moottorin nimellistehosta (Pantti 2019).

| Nimellisteho $P_N$ (kW tai kVA) | Viimeisin mahdollinen aloitusaika sähkönsyötön katkaisusta (s) |
|---------------------------------|--|
| $P_N \leq 50$                   | 30   |
| $50 < P_N \leq 200$             | 90   |
| $200 \leq P_N < 5000$           | 120  |
| $5000 < P_N$                    | Erikseen sovitun mukaan  |

### 2.3.5 Osakuormatesti

Osakuormatestissä moottoria kuormitetaan 25, 50 ja 75 prosentin kuormilla nimelliskuormaan nähden. Tapauksissa, joissa testattavan moottorin nimellismomentti on pieni, voidaan käyttää myös muita osakuormia. (Pantti 2019.) Osakuormatestissä moottoria kuormitetaan lisäksi 125, 115 ja 100 prosentin kuormilla nimellismomenttiin nähden koestusstandardin vaatimusten mukaisesti.

### 2.3.6 Ylikuormitustesti

Ylikuormitustestissä sähkömoottoria kuormitetaan 15 sekunnin ajan nimellismomenttiin suhteutettuna 1,6-kertaisella vastamomentilla. Testillä halutaan varmistua, että sähkömoottori kestää lyhytkestoisen ylikuormituksen. (Pantti 2019.)

### 2.3.7 Oikosulkutesti

Oikosulkutestissä sähkömoottorin akseli lukitaan mekaanisesti siten, ettei se voi pyöriä vapaasti. Mittauksessa syöttöjännite säädetään siten, että nimellisvirta saavutetaan. Testin aikainen sähkömoottorin virta ja jännite sekä syöttöteho mitataan ja tallennetaan. (Pantti 2019.)

### 2.3.8 Tyhjäkäyntikoe

Tyhjäkäyntikokeessa sähkömoottorin akselin annetaan pyöriä vapaasti ja sitä syötetään sen nimellisjännitteen lisäksi useilla muilla eri jännitteillä samalla mitaten sähkömoottorin virtaa sekä syöttötehoa. Mittausten perusteella muodostetaan tyhjäkäyntikäyrä, jota käytetään hankaushäviöiden määrittämiseen. (Pantti 2019.)



### 2.3.9 Tärinätesti

Sähkömoottorin tärinätesti mitataan IEC 60034-14 -standardin (edition 4.0:2018) vaatimusten mukaisesti poissulkien moottorin siirtymän määrittämiseksi. Tärinän nopeus mitataan viidestä eri mittauspisteestä kuvan 6 mukaisesti. Taulukon 3 mukaiset hyväksymisrajat ovat riippuvaisia tärinäluokasta, mittauksen aikaisesta kiinnitystavasta ja akselin korkeudesta. (Pantti 2019.)



**Kuva 6.** Tärinätestin mittauspisteet (Pantti 2019).

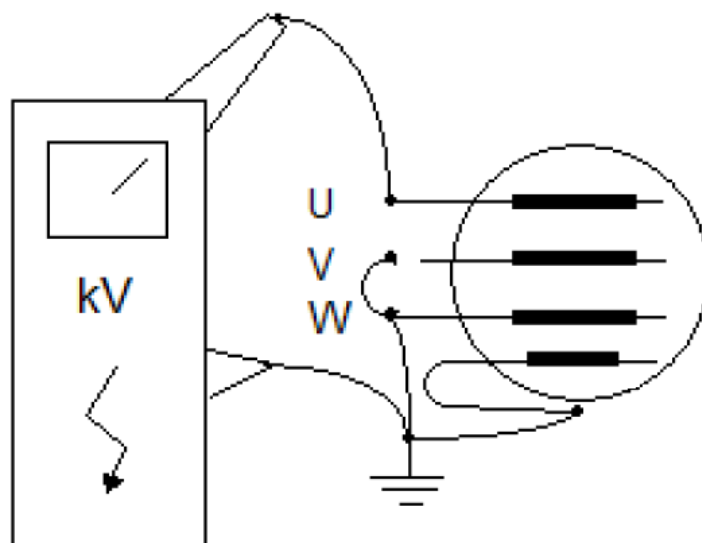
**Taulukko 3.** Tärinätestin hyväksymisrajat (Pantti 2019).

| Tärinätesti | Akselin korkeus $H$ (mm) | $56 \leq H \leq 132$                 |                       | $H > 132$                            |                       |
|-------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
|             | Kiinnitystapa            | Moottorin siirtymä ( $\mu\text{m}$ ) | Tärinän nopeus (mm/s) | Moottorin siirtymä ( $\mu\text{m}$ ) | Tärinän nopeus (mm/s) |
| <b>A</b>    | Kannatin                 | 45                                   | 2,8                   | 45                                   | 2,8                   |
|             | Jäykkä                   | -                                    | -                     | 37                                   | 2,3                   |
| <b>B</b>    | Kannatin                 | 18                                   | 1,1                   | 29                                   | 1,8                   |
|             | Jäykkä                   | -                                    | -                     | 24                                   | 1,5                   |

### 2.3.10 Eristyskoestus

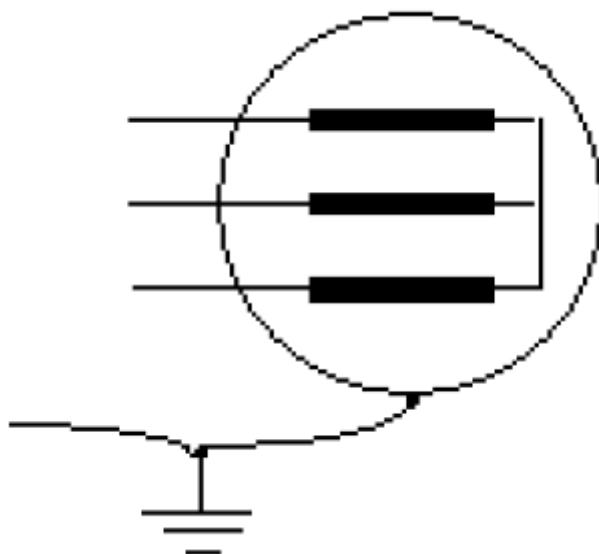
Eristyskoestuksen tarkoitus on varmistua, ettei sähkömoottorin käämityksessä tai lisälaitteissa ole oikosulkuja. Testin hyväksymiskriteerinä on, että koestettava vaihe tai lisälaitte kestää koestuksen jännitteen määrätyn ajan. (Pantti 2019.)

Sähkömoottorin vaiheiden eristyskoestuksen mittauskytkentä riippuu käämityksestä. Sähkömoottoreille, joista voidaan erottaa tähtipiste, eristyskoestus suoritetaan erikseen kunkin vaiheen ja rungon väliltä kahden muun vaiheen ja käämityksen lisälaitteiden ollessa maadoitettuna sähkömoottorin runkoon. Kuvassa 7 on esitetty U-vaiheen eristyskoestuksen mittauskytkentä sähkömoottorille, josta voidaan erottaa tähtipiste. (Pantti 2019.)



**Kuva 7.** Eristyskoestuksen U-vaiheen mittauskytkentä sähkömoottorille, josta voidaan erottaa tähtipiste (Pantti 2019).

Tapauksessa, jossa sähkömoottori on käämitty siten, että siinä on sisäinen tähtikytkentä, eristyskoestus suoritetaan kullekin vaiheelle erikseen ylimääräisiä maadoituksia tekemättä. Tämän käämitystavan mittauskytkentä on esitetty kuvassa 8. (Pantti 2019.)



**Kuva 8.** Eristyskoestuksen mittauskytkentä sähkömoottorille, jonka käämitys sisältää tähtikytkennän (Pantti 2019).

Sähkömoottorin käämitykselle tehtävän eristyskoestuksen koestusjännite  $U_{ek}$  on riippuvainen sähkömoottorin nimellijännitteestä ja se määritetään yhtälöllä

$$U_{ek} = 2 \cdot U_N + 1000 \text{ V}, \quad (36)$$

missä  $U_N$  on sähkömoottorin nimellijännite. Käämityksen lisälaitteiden koestusjännite on 1500 V. Sekä käämitykselle että lisälaitteille tehtävän eristyskoestuksen mittausaika on 60 sekuntia. Käämityksen ulkopuolisille lisälaitteille, kuten lämpötilan valvontalaitteille eristyskoestuksessa käytettävä jännite on 500 V ja mittausaika 15 sekuntia. (Pantti 2019.)

### 2.3.11 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksen tarkoituksena on varmistua, että käämityksen eristystaso on riittävän korkea sähkömoottorin turvallisen toiminnan kannalta. Eristysvastus mitataan yhden vaiheen ja rungon väliltä muiden vaiheiden ollessa maadoitettuina sähkömoottorin runkoon. Mittauksessa käytetään 1000 voltin tasajännitettä ja mittausaika on 60 sekuntia. Hyväksymisraja on riippuvainen vallitsevasta ilmankosteudesta taulukon 4 mukaisesti. (Pantti 2019.)

**Taulukko 4.** Käämityksen eristysvastusmittauksen hyväksymisrajat (Pantti 2019).

| <b>Vallitseva ilmankosteus (%)</b> | <b>Eristysvastuksen hyväksymisraja (M<math>\Omega</math>)</b> |
|------------------------------------|---|
| < 40                               | 2000  |
| $\geq$ 40                          | 1000  |

Eristysvastusmittaus tehdään sekä käämitykseen kuuluville, että kuulumattomille lisälaitteille erikseen pyydettäessä. Mittausjännite ja -aika ovat samat kuin käämityksen eristysvastusmittauksessa, mutta hyväksymisraja, 1000 M $\Omega$ , on riippumaton vallitsevasta ilmankosteudesta. (Pantti 2019.)

### 3 MITTAAMISEN LUOTETTAVUUS JA SEN YHTYMÄKOHDAT SÄHKÖMOOTTORIN KOESTUKSEEN

Ennen tämän luvun pääaiheen eli mittaamisen luotettavuuden aiheen esittelyä on hyvä tuoda esiin, mitä mittaamisella ylipäätään tarkoitetaan. Aumala (2006: 206) määrittelee mittauksen sarjaksi toimintoja, joiden tarkoituksena on määrittää suureen arvo. Yleisimpien standardointijärjestöjen hyväksymän mittausterminologiasta kertova julkaisu *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (2008) sanoo mittaamisen olevan kokeellinen prosessi, jossa yhtä tai useampaa suurearvoa tarkkaillaan ja saadaan tulokseksi suure. Mittauksiin liittyvää tiedon aluetta kutsutaan metrologiaksi eli mittaustieteeksi, joiden osa-alueita ovat suureet, mittanormaalit ja -yksiköt, mittaukset, mittaustulosten käsittely ja arviointi niiden luotettavuudesta sekä mittauksen inhimilliset tekijät (Aumala 2006: 13).

On mahdotonta suorittaa mitään mittausta absoluuttisen tarkasti. Tulevissa alaluvuissa käydään läpi erilaisia mittausvirheitä ja niitä aiheuttavia tekijöitä. Tämän lisäksi kerrotaan, mitä osa-alueita mittaamisen luotettavuuteen kuuluu sekä miten luotettavuus on ilmaistavissa. Sen lisäksi keskitytään mittaamisen luotettavuuden osa-alueisiin sähkömoottorin hyötysuhdetta määritettäessä.

#### 3.1 Mittausvirheet ja niitä aiheuttavat tekijät

Mittausvirhe määritellään havainnoitavan suureen mitatun ja todellisen arvon eroksi. Mittausvirheen arvio perustuu normaalisti saman havainnon toistomittauksiin, joiden perusteella mittausvirheelle voidaan antaa arvio. Voidaankin todeta, että ilman toistomittauksia mittausvirheen arviointi on mahdotonta. Alla on lueteltu, miten mittausvirheet voidaan jaotella kolmella eri tavalla. (Keinänen & Järvinen 2014: 95)

### *Karkea virhe*

Mittaustekniikassa karkea virhe tarkoittaa samaa, kun puhutaan arkikielessä virheestä. Karkea virhe johtuu yleensä mittalaitteen mitta-asteikon väärin lukemisesta, sen toimintahäiriöstä tai tietojen tallennuksen virheestä. Jos mittaustuloksessa epäillään karkeaa virhettä, se pyritään yleensä hylkäämään. Mittaaja ei kuitenkaan saa hylätä mittauspisteen erikoista arvoa, jos hän on epätietoinen, mistä se johtuu. (Keinänen & Järvinen 2014: 95)

### *Systemaattinen virhe*

Systemaattisella virheellä mitaustekniikassa tarkoitetaan virhettä, jonka syy on mittausmenetelmä tai mittalaite. Jos esimerkiksi huoneenlämmössä käytettäväksi suunniteltua mittanauhaa käyttää korkeissa lämpötiloissa, näyttää se lämpölaajenemisen takia liian pieniä lukemia. Tämän kaltainen systemaattinen virhe on mahdollista korjata, kun mittalaite kalibroidaan standardin mukaisesti. (Keinänen & Järvinen 2014: 95)

### *Satunnainen virhe*

Satunnainen virhe tarkoittaa tilastollista virhettä, joka on aina mukana mittauksissa. Erittäin tarkkaa mittalaitetta käytettäessä kasvaa satunnaisen virheen osuus. Mittauksia toistettaessa riittävän monta kertaa satunnaisesta virheestä ei aiheudu harhaa tuloksiin, koska erisuuntaisten virheiden oletetaan kumoavan toisensa. (Keinänen & Järvinen 2014: 95)

Mittausvirheet voivat aiheutua monista eri tekijöistä, kuten esimerkiksi mittalaitteesta. Esimerkiksi mittalaitteen kulumisen takia virheet voivat lisääntyä tietyillä mittausalueilla tai käytettävä mittausvoima on väärä. Mittalaitteiden säännöllisillä kalibroinneilla voidaan pienentää mittalaitteiden aiheuttamaa mittausvirhettä. Erityisen tärkeää mitaamisen onnistumisen kannalta on, että mitaussyöreen mitaamiseen käytetty mittalaite on soveltuva. Sen on annettava riittävän tarkka mitaustieto suureesta, jota mitataan. (Aumala 2014: 157; Keinänen & Järvinen 2014: 96)

Mittauksen tekijä voi myös aiheuttaa mittaukseen virhettä. Mittaaja voi käyttää mittalaitetta väärin tai toimia liian kiireellisesti. Tämän lisäksi mittaajan ammattitaito voi olla puutteellinen tai mittaajan mahdollisesti käyttämä mittausohje on laadittu huonosti. Mittauksessa onnistuakseen mittauksen tekijän on ymmärrettävä ja pystyttävä suorittamaan mittaustehtävä oikein. Tämän lisäksi mittaukselle on oltava riittävästi aikaa, jotta mittaajan pystyy suorittamaan sen mahdollisimman tarkasti sekä kirjaamaan havaintonsa rauhassa. (Aumala 2014: 157; Keinänen & Järvinen 2014: 96)

Mittauksessa onnistuakseen on noudatettava asianomaisia käyttöedellytyksiä. Vallitsevien olosuhteiden, kuten lämpötilan sekä ilmankosteuden on oltava mittalaitteelle sopivat. Käyttöedellytyksiin kuuluvat lisäksi mittauskohteen riittävä valaistus sekä työympäristön siisteys. Mittaukset on myös tehtävä sekä mittaajan että mittalaitteiden edellytysten puitteissa. Mittalaitteisiin liittyviin käyttöedellytyksiin kuuluvat mittalaitteen kalibrointi sekä virtalähteen kunto, kun käytetään paristoa tai akkua. (Aumala 2014: 157; Keinänen & Järvinen 2014: 97)

### 3.2 Mittaamisen luotettavuus

Mittaamisen luotettavuuden arvioimiseksi on suoritettava mittaustulosten arviointi, jota hyödynnetään mittausjärjestelmän kehittämistarkoituksiin sekä mahdollisen suurimman epävarmuuslähteen havaitsemiseen. Mittaustulosten luotettavuuden arviointia voidaan kutsua myös epävarmuustarkasteluksi, joka antaa tietoa mittaussuureen oletetusta vaihtelusta. (Hiltunen, Linko, Hemminki, Hägg, Järvenpää, Saarinen, Simonen & Kärhä 2011: 35, 63.)

Mittaamisen luotettavuuden arvioinnissa havainnollistavia käsitteitä ovat tarkkuus ja täsmällisyys. Mittaustekniikassa tarkkuudella tarkoitetaan mitattavan suureen todellisen ja mitatun arvon yhtäpitävyyttä. Mittaustarkkuudella ei ole lukuarvoa, mutta mittausta voidaan sanoa tarkaksi, jos sen mittausvirhe on pieni. Mittausvirhettä tarkastellessa ongelmana on, että mitattavan kohteen arvosta ei voida yleensä saada varmuudella virheettömiä

mittaustuloksia. Siksi usein tarkastellaan pelkästään mittaustuloksia ja niiden epävarmuuksia. Siten mittaustarkkuuden suuruutta kuvattaessa on sopivampaa ilmaista mittaustuloksen epätasällisyys eli mittausepävarmuus, joka voidaan ilmoittaa joko absoluuttisesti eli lukuarvona tai suhteellisesti, joka on absoluuttisen epävarmuusarvon suhde todelliseen pidettyyn arvoon. (Aumala 2006: 157, 163; Hiltunen ym. 2011: 35, 63.)

Eräs tapa tarkastella mittausepävarmuutta on arvioida virhekomponenttien virherajoja ja muodostaa näiden perusteella virherajat mittaustulokseen. Tätä tarkastelua voidaan pitää takuarvona mittaustulokselle. Kuitenkin yleensä tämänkaltainen virhetarkastelu arvioi mittausepävarmuuden todellisuudessa esiintyviin arvoihin nähden liian suureksi. Käytännössä parempi tapa kuvata mittausvirhettä on käyttää tilastomatematiikkaan ja toistomittauksiin perustuvaa arvioimistapaa. Tällä tavalla mittausvirheen ominaisuudet voidaan kuvata sen jakautumaa esittämällä käyttäen esimerkiksi histogrammia. Kyseisellä tarkastelulla saadaan selville oletettu virheetön kohdesuureen arvo, vaikkakaan sen todellista arvoa ei saada selvitettyä. (Aumala 2006: 163–164.)

Jakautuman kaksi tärkeää suuretta ovat keskiarvo ja varianssi. Keskiarvoa  $m$  pidetään tilastoihin perustuvana odotusarvona, joka lasketaan yhtälöllä

$$m(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (37)$$

missä  $x_i$  on tulos ja  $N$  tulosten lukumäärä. (Aumala 2006: 165.)

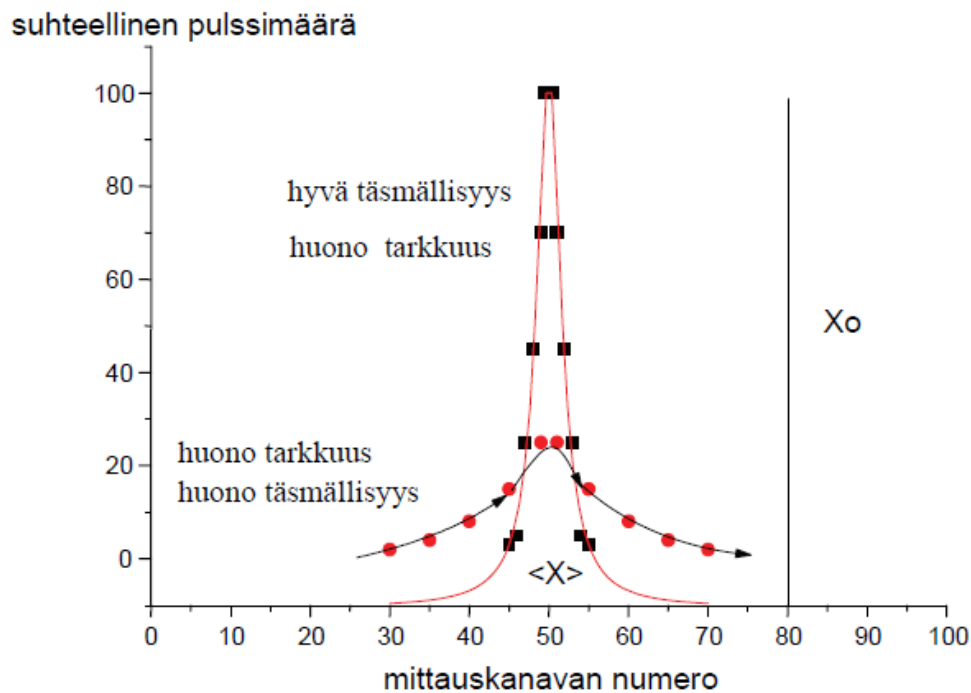
Varianssi tarkoittaa keskiarvon poikkeaman neliön odotusarvoa. Usein sen sijaan käytetään kuitenkin vain keskihajontaa, joka on varianssin neliöjuuri. Varianssi  $s^2$  lasketaan yhtälöllä

$$s^2(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [x_i - m(x)]^2, \quad (38)$$

missä varianssin neliöjuuresta laskettua keskihajontaa merkitään  $s$ :llä. (Aumala 2006: 165.)



Täsmällisyydellä tarkoitetaan mitattujen arvojen yhteneväisyyttä, jotka ovat mitattu hyvin määritellyissä olosuhteissa mitaten joko samaa tai samankaltaista kohdetta. Mittaus-tarkkuuden ja -täsmällisyyden ero on esitetty kuvassa 9, jossa toistomittauksen tulokset on ilmaistu graafisesti. Mitä kapeampi jakauma on, sitä täsmällisempi mittaus on. Mit-taustarkkuus on taas parempi, mitä lähempänä mittaustulos on vertailuarvoon nähden. (Hiltunen ym. 2011: 63.)



**Kuva 9.** Mittauksen täsmällisyyden ja tarkkuuden eroavaisuus (Hiltunen ym. 2011: 64).

Tilastoihin ja toistomittauksiin perustuvat mittausepävarmuuksien määrittystavat jaetaan kahteen luokkaan seuraavasti:

- Tyypin A epävarmuuden määrittäminen, mikä tarkoittaa epävarmuustarkastelua, joka on mahdollista tehdä tilastollisin menetelmin ja
- Tyypin B epävarmuuden määrittäminen, mikä tarkoittaa epävarmuustarkastelua, joka ei ole mahdollista tehdä tilastollisin menetelmin. (Hiltunen ym. 2011: 38.)

Tyypin A epävarmuus määritetään toistomittausten avulla. Kun samaa mittausta toistetaan  $N$  kertaa, saadaan mittaustuloksista laskettua keskiarvo. Mittauksen toistettavuuden aiheuttama laskennallisena epävarmuutena pidetään keskiarvon keskihajontaa, joka lasketaan jakamalla mittauspisteiden keskihajonta toistokertojen neliöjuurella. Tämä tarkoittaa, että tyypin A epävarmuus siis pienenee mittauksia toistamalla. Mikäli mittaukseen sisältyy enemmän kuin yksi tyypin A epävarmuuskomponentti, tulee epävarmuuskomponentit laskea neliöllisesti yhteen. Tyypin B epävarmuutta taas ei ole mahdollista määrittää mittauksia toistamalla eikä se pienene toistamalla mittauksia. Tyypin B epävarmuus tulee arvioida tai se voidaan saada joko mittalaitteen teknisistä tiedoista tai kalibrointitodistuksesta. (Hiltunen ym. 2011: 38, 47.)

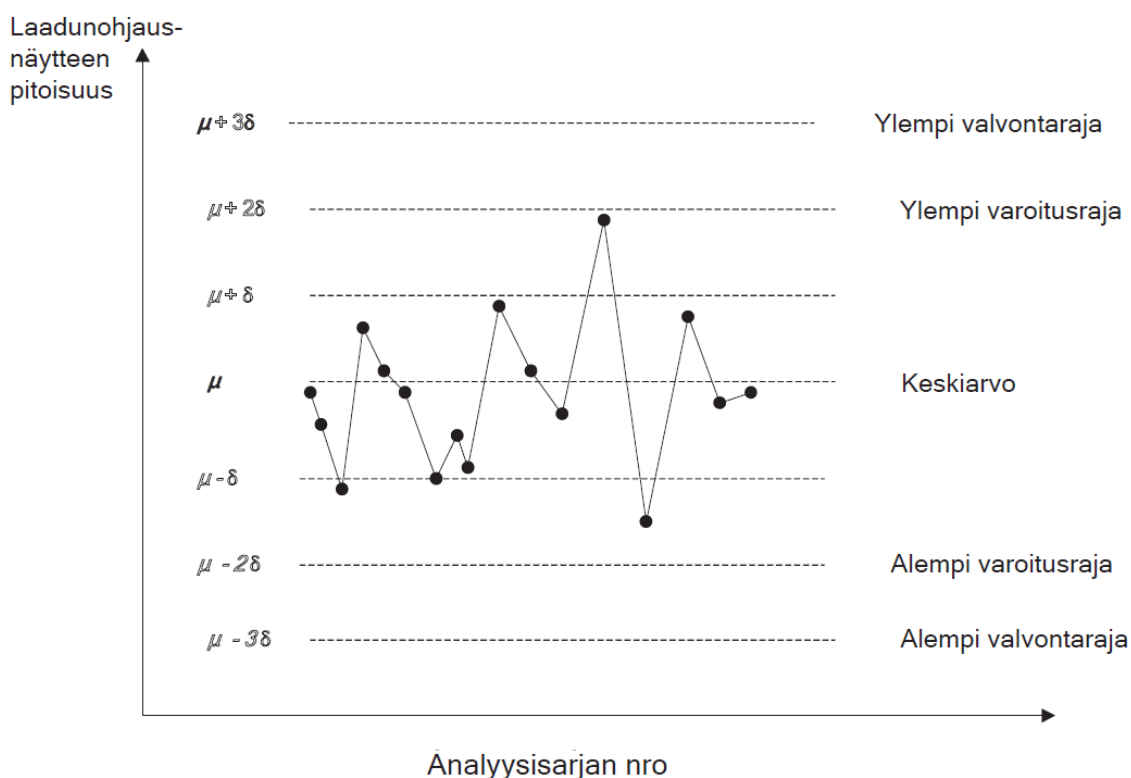
#### *Mittausten laadun varmistaminen*

Mittausten laadun varmistaminen voidaan jakaa laboratorion sisäiseen ja ulkoiseen laadunvarmistukseen. Laboratorion sisäisen laadunvarmistuksen tai -ohjauksen tarkoitus on varmistaa, että käytetyn mittausmenetelmän epävarmuus ei ylity jokapäiväisissä mittauksissa. Sisäinen laadunohjaus ei ole korvattavissa laboratorioden välisillä vertailumittauksilla. Laboratorion ulkoisen laadunvarmistuksen päätarkoituksena taas on mittaamisen pätevyuden eli oikeellisuuden arviointi, joka suoritetaan ulkopuolisen tahon puolesta vertaamalla laboratorion mittausnäytettä oikeaksi pidettyyn arvoon. (Hiltunen ym. 2011: 63, 67.) Taulukossa 5 on esitetty sisäisen ja ulkoisen laadun varmistamisen pääeroavaisuudet.

**Taulukko 5.** Mittausten sisäisen ja ulkoisen laadun varmistaminen erot (Hiltunen ym. 2011: 63–68).

|                                    | <b>Sisäinen laadun varmistaminen</b>  | <b>Ulkoisen laadun varmistaminen</b>                                       |
|------------------------------------|---|--|
| <b>Mittausten järjestäjä</b>       | Laboratorio itse  | Kansainväliset kriteerit täytävä ja/tai alalla tunnettu ja arvostettu taho |
| <b>Mittausten syy</b>              | Varmistaminen, ettei todettu mittausepävarmuus ylity päivittäisessä toiminnassa | Pätevyyden arviointi, akkreditointi, viranomaisvaatimukset, alan käytännöt |
| <b>Mittausten toteutus</b>         | Vertailukelpoiset toistokokeet  | Mittaustuloksen lähettäminen vertailumittauksen järjestäjälle              |
| <b>Mittaustulosten analysointi</b> | Vertailu edellisiin mittaustuloksiin esimerkiksi ohjauskorttia käyttäen         | Tilastollinen analysointi ja vertailu asetettuun tavoitearvoon             |

Sisäiseen laadunvarmistukseen kuuluva mittaustulosten analysoinnissa käytettävän ohjauskortin esimerkki on esitetty kuvassa 10. Mittaustapahtumien tulokset voidaan näin esittää graafisesti ja havaita mahdollisia normaalista poikkeavia vaihteluja. Ohjauskorttiin on usein merkitty mittaushistorian keskiarvo sekä ylimmät ja alimmat raja-arvot. Tämän lisäksi ohjauskorttiin voidaan asettaa valvontarajat seuranta varten. Eräs tapa valvonta- ja varoitusrajojen asettamiseen on käyttää mittaustulosten keskihajontaa  $s$ , jota voidaan pitää mittausten sattumanvaraisena vaihteluna. Varoitusrajat voidaan määrittää esimerkiksi kuten kuvassa 10 käyttäen yhtälöä  $\mu \pm 2s$  ja valvontarajat yhtälöllä  $\mu \pm 3s$ , missä  $\mu$  on keskihajonta. Laboratorio voi myös asettaa tavoiterajat itse tarpeidensa mukaan. (Hiltunen ym. 2011: 64–65.)



**Kuva 10.** Eräs esimerkki sisäisessä laadunvarmistuksessa käytetyistä mittauksista raja-arvoineen (Hiltunen ym. 2011: 65).

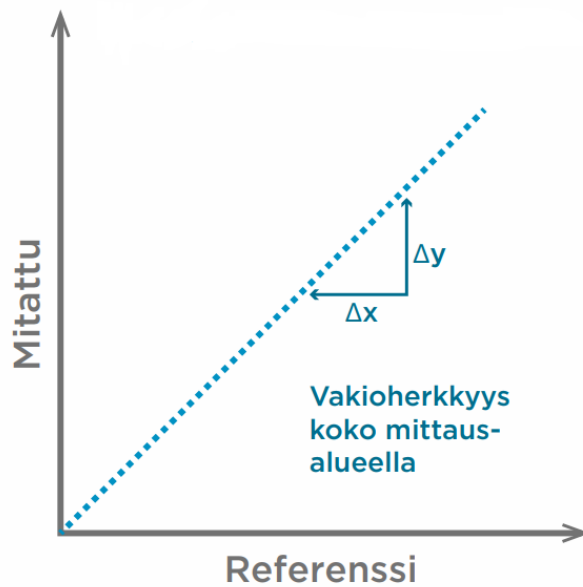
### 3.3 Näkökohtia mittaamisen luotettavuuteen oikosulkumoottorin hyötysuhdemittauksessa

Mittaamisen luotettavuuden takaamiseksi oikosulkumoottorin hyötysuhdemittauksessa tulee ottaa huomioon alaluvussa 3.1 mainitut virhelähteet sekä pyrkiä minimoimaan niiden vaikutukset. Mittauksen tekijästä johtuvien virheiden välttämiseksi mittaajien on oltava ammattitaitoisia ja ammattitaitoa tulee pitää yllä esimerkiksi säännöllisillä koulutuksilla sekä pitämällä työohjeet ajan tasalla. Mittaamisen käyttöedellytysten, joista oikosulkumoottorin hyötysuhdemittauksen kontekstissa voidaan mainita esimerkiksi mittaamiseen sopiva lämpötila, kosteus sekä työympäristö ja työkalut, tulee myös vastata mittauksen vaatimuksia. Erityisen tärkeää on käyttää vaatimukset täyttäviä mittalaitteita. IEC 60034-2-1 ja 60034-1 -standardit määrittelevät mittaamisen ja mittalaitteiden tarkkuusvaatimukset, jotka ovat lueteltu taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Oikosulkumoottorin hyötysuhdemittauksen tarkkuusvaatimukset (IEC 2014: 15–16; IEC 2017: 31).

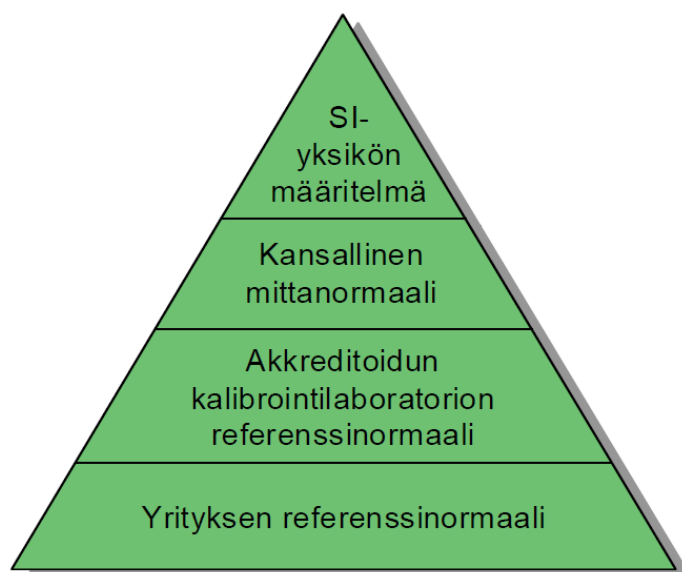
| Suure, nimike tai mittalaite          | Tarkkuusvaatimus   |
|---------------------------------------|--|
| Jännite                               | Harmonisia yliaaltoja kuvaava<br>HVF-arvo oltava $\leq 0,2$  |
| Taajuus                               | Käytetyn testitaajuuden vaihtelu<br>korkeintaan $\pm 0,1$ %  |
| Sähköisten suureiden<br>mittalaitteet | Tarkkuusluokka mittaustavasta riippuvainen,<br>suoralle 0,2 epäsuoralle 0,5.<br>Suureen mittaamisen mittalaitteiden<br>yhdistetty epävarmuus oltava $\leq 0,2$ % |
| Vääntömomentin mittaus                | Sallittu mittauserävarmuus $\leq 0,2$ %  |
| Pyörimisnopeuden mittaus              | Tarkkuus oltava $\pm 0,1$ rpm  |
| Lämpötilan mittaus                    | Tarkkuus oltava $\pm 1$ K  |
| Yksiköt                               | Käytetään SI-järjestelmän yksiköitä  |

Mittalaitteiden tulosten oikeellisuutta valvotaan kalibroimalla mittalaitteet säännöllisesti. Kalibrointi tarkoittaa mitatun arvon vertaamista tunnettuun referenssiarvoon eli mittanormaaliiin. Mittaustulosten poiketessa referenssiarvosta tulee mittalaite virittää, mikä tarkoittaa mittalaitteen herkkyyden säätämistä. Herkkyys määritellään mittaustuloksen ja referenssiarvon muutoksen väliseksi suhteeksi. Parhaimmassa tapauksessa suhde on lineaarinen, kuten kuvassa 10, mutta käytännössä näiden arvojen välillä on aina epäsuhtaa. Mittalaitteen herkkyys voi muuttua esimerkiksi ikääntymisen, ympäröivien kemikaalien tai ympäristöolosuhteiden takia. Usein käytäntönä on kalibroida mittalaitteet joko kerran vuodessa tai laitevalmistajan tai kalibrointiohjelman mukaisesti. (Hiltunen ym. 2011: 48; Vaisala 2016.)



**Kuva 11.** Mittaus- ja referenssiarvojen muutosten välinen suhde ihannetapauksessa (Vaisala 2016). Kuvaa muokattu.

Mittalaitteiden kalibrointeja saavat tehdä akkreditoidut kalibrointilaboratoriot. Nämä tahot vertaavat mittalaitteen tuloksia käytössään olevaan referenssinormaaliiin. Referenssinormaaliiia verrataan kansalliseen tai kansainväliseen mittanormaaliiin ja referenssinormaaliiin tarkkuustasoa pidetään yllä säännöllisin mittauksin. Mittanormaaliiien perustana on SI-järjestelmä. Näin mittalaitteen arvo on vertailtavissa SI-järjestelmän mittayksikköön, mitä kutsutaan metrologiseksi jäljitettävyydeksi, joka on kuvattu yksinkertaisesti kuvassa 12. Mittalaitteen kalibroinnista annetaan todistus, jossa on esitettävä kalibrointituloksen lisäksi epävarmuus, jäljitettävyyys, referenssinormaalit ja kalibroinnin menetelmä sekä kalibrointijakso. Mittalaitteeseen liitetään kalibroinnin jälkeen kalibrointitarra, mutta se ei välttämättä takaa, että mittalaite näyttää oikeaa lukemaa. Kalibrointitodistukseen tulee merkitä, mikäli mittaustuloksille tulee mittausten yhteydessä laskea korjaus. (Andersson & Tikka 1997: 169–170; Hiltunen ym. 2011: 28, 47; Vaisala 2016.)



**Kuva 12.** Metrologinen jäljitettävyys SI-järjestelmään (Hiltunen ym. 2011: 28).

Viitaten edellä alaluvussa 3.2 mainittuun Aumalan (2006: 163–164) toteamukseen, että mittausten virhetarkastelu kannattaa tehdä mittalaitteiden virherajatarkastelun sijaan mitaushistorian tilastomatematiikkaan perustuvaan tarkasteluun pohjautuen, lienee tämä sopiva tapa myös oikosulkumoottorin hyötysuhdemittauksen epävarmuustarkasteluun. Täten sopivaksi katsotuin väliajoin on hyvä suorittaa hyötysuhdemittauksia samanlaisissa olosuhteissa ja samanlaisia mittalaitteita käyttäen, jotta voidaan varmistua mittaamisen luotettavuudesta. Tämä on osa edellä alaluvussa 3.2.1 määriteltyä laboratorion sisäistä laadunvarmistusta, joka varmistaa sen, että päivittäin käytetty mittaustapa ei ylitä todettua mittausepävarmuutta. Sisäisen laadunvarmistuksen lisäksi ulkoinen laadunvarmistus tulee kyseeseen esimerkiksi akkreditoinnin kautta.

IEC:n hyötysuhdemittauksen standardit eivät ota kantaa toistomittausten epävarmuuksiin, niiden rajoihin tai mahdollisiin eroavaisuuksiin oikean ja mitatun arvon välillä, kunhan standardin vaatimukset mittauksen vaiheista ja käytetyistä mittalaitteista täyttyvät, mutta yksittäisen hyötysuhdemittauksen hyväksymisessä voidaan tarvittaessa käyttää taulukossa 7 esitettyä negatiivista toleranssia. Sen mukaan hyötysuhdemittauksen toleranssi riippuu akselitehosta ja arvokilvellä tai katalogissa ilmoitetusta hyötysuhteesta. Toleranssi kattaa mahdolliset eroavaisuudet käytettyjen materiaalien ja valmistustapojen välillä. (IEC 2017: 64–65.)

**Taulukko 7.** Hyötysuhdemittauksen negatiivinen toleranssi, missä  $\eta$  on arvokilvellä tai katalogissa ilmoitettu hyötysuhde (IEC 2017: 65).

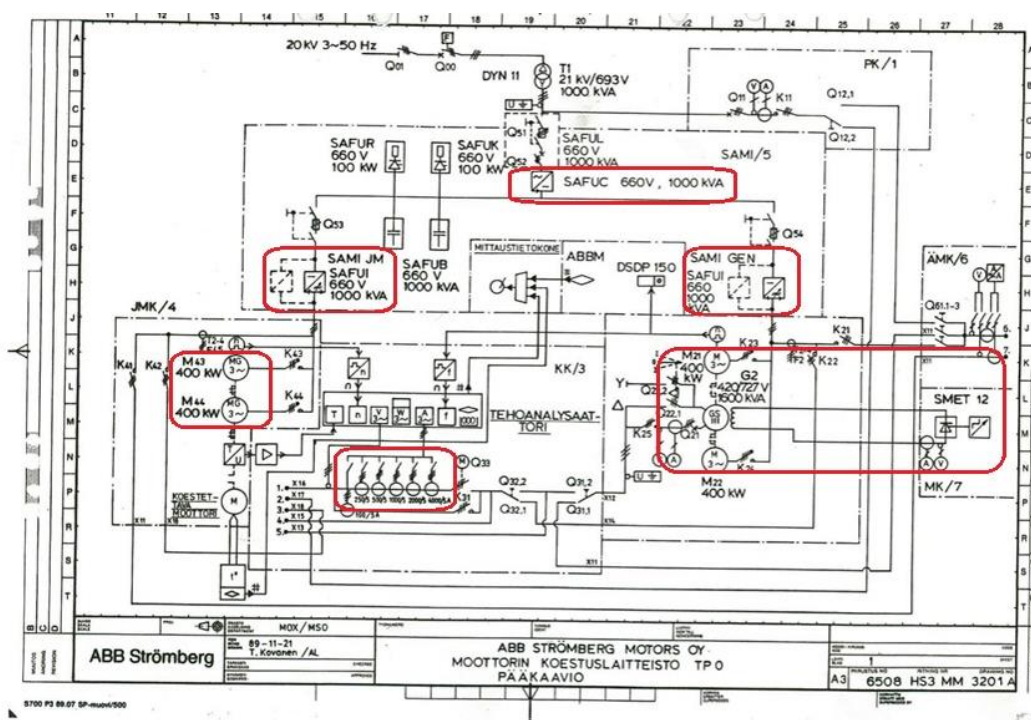
| <b>Teho (kW tai kVA)</b> | <b>Toleranssi</b>   |
|--------------------------|---------------------|
| $\leq 150$               | $- 15(1 - \eta) \%$ |
| $> 150$                  | $- 10(1 - \eta) \%$ |



#### 4 TESTAUSASEMAN RAKENNE JA MODERNISOINTI

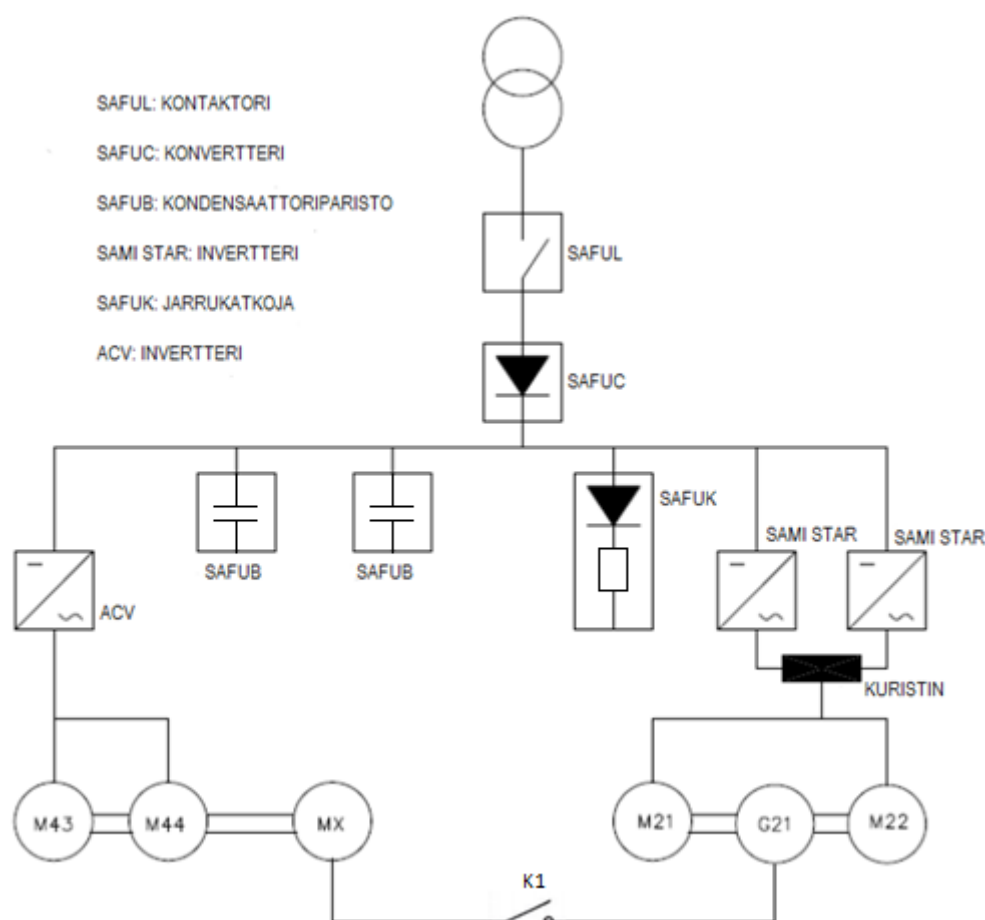
ABB Motors and Generators -Vaasan yksikön koestuslaboratoriossa on mahdollista koestaa 0,1–2000 kW:n tehoisia pienjännitteisiä sähkömoottoreita. Hyötysuhdemittaus- ten lisäksi koestuslaboratoriossa on mahdollista suorittaa luokituslaitosten ja viranomais- ten määrittämiä testauksia sekä määrittää koneen äänitaso käyttötarkoitusta varten raken- netussa tehdasympäristöä hiljaisemmassa tilassa. Testauspaikat on suunniteltu ja raken- nettu siten, että tietyillä koestuspaikoilla on mahdollista koestaa tietyn tehoisia ja vääntö- momentin koneita. Tällä hetkellä toiminnassa on kahdeksan testauspaikkaa.

Tämän työn kohteena olevalla testauspaikalla, jota kutsutaan TP0-nimellä koestuslabora- toriossa, on mahdollista koestaa maksimissaan noin 500 kW:n tehoisia sähkömoottoreita sekä 50 että 60 Hz:n taajuuksilla. Koestuslaitteiston rakennekuva on esitetty kuvassa 13 ja sen pääkomponentit ovat 21 kV/690 V syöttömuuntaja, ACV- ja SAMI STAR -taa- juusmuuttajat, tahtigeneraattori magnetointilaitteinen, tahtigeneraattoria pyörittävät ve- tomoottorit sekä koestettavaa moottoria kuormittavat jarrumoottorit.



**Kuva 13.** TP0-testausaseman periaatekuva, jossa on ympyröitynä vaihtuvat kom- ponentit (Kovanen 1990: liite 1). Kuvaa muokattu.

TPO-aseman toiminnassa hyödynnetään niin sanottua säästölenkkikytkentää energian säästämiseksi. Kuvassa 14 esitetyn TPO-testausaseman säästölenkkikytkennän toimivuus on seuraavan kaltainen: koestustilanteessa koestettavaa moottoria MX kuormittavat kaksi sarjaan kytkettyä jarrumoottoria M43 ja M44 toimivat generaattoreina ja syöttävät energiansa ACV-vaihtosuuntaajan kautta tasajännitesiltaan, joka sulkee säästölenkin kytkeytyessään generaattoria G21 pyörittävien vetomoottoreiden M21 ja M22 SAMI STAR -vaihtosuuntaajiin. Kun koestus lopetetaan, avataan generaattorin ja koestettavan moottorin välissä oleva kontaktori K1, jolloin säästölenkki avautuu. Alasajotilanteessa syntyvä energia ohjautuu tasajännitekiskoon kytketyn jarrukatkojan kautta vastuksiin ja niiden lämmetessä lämpö haihtuu ympäröivään ilmaan. Säästölenkin käyttö pienentää merkittävästi testauspaikan sähköenergian tarvetta ja siten kuluja, koska kulutettu sähköenergia koostuu lähes kokonaan mitta- ja säätölaitteistojen häviöistä. (Hannuksela 1994: 3–4.)



**Kuva 14.** Havainnekuva TPO-testausaseman säästölenkkikytkennästä (Soini 2014: 18). Kuvaa muokattu.

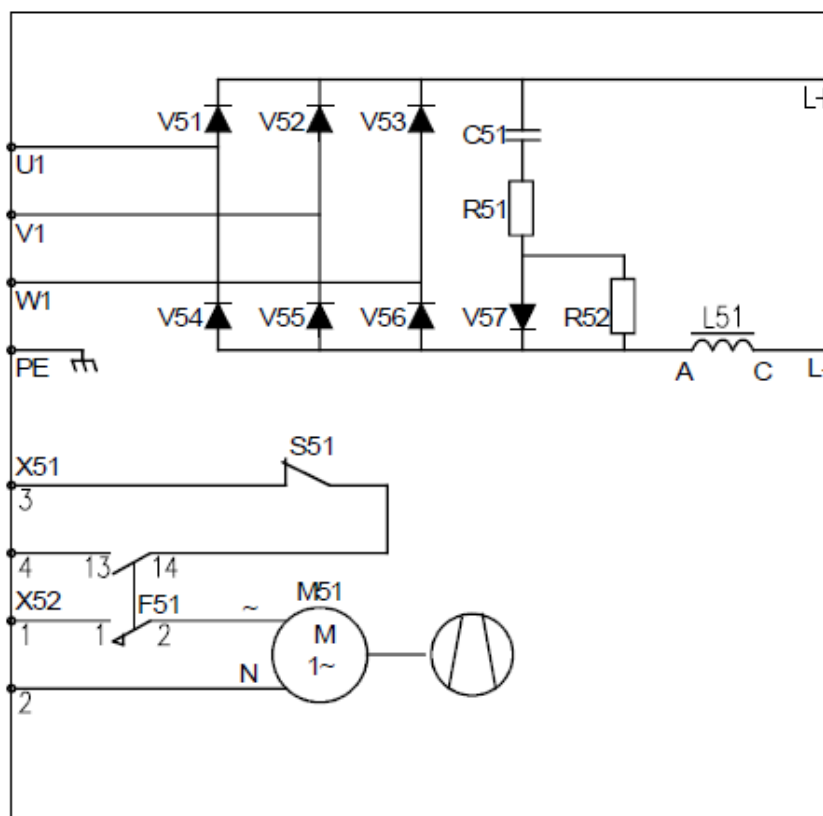
Vastatakseen paremmin muun muassa koestuksen nykypäivän vaatimuksia ja parantaakseen laitteiston käytön luotettavuutta sekä käyttäjystävällisyyttä, koestuslaitteistoa tai sen osia uusitaan aika ajoin, johon tämäkin työ liittyy. Uudistusprojektin kohteena ollelle testausasemalle tehtiin viimeisin iso uudistus vuonna 1989, jolloin asemalle tehtiin koestuksen automatisointi sekä samalla laitteistoa vaihdettiin. Laitteiston ollessa käytökänsä loppupuolella sille tehdään tämän diplomityöprosessin aikana uudistus, jolloin vaihdetaan testauspaikan generaattoria pyörittävät vetomoottorit, jarrumoottorit, näitä moottoreita ohjaava taajuusmuuttaja, generaattorin magnetointijärjestelmä sekä kokonaisuutta ohjaava automaatiojärjestelmä. Kuvassa 13 esitetyssä testausaseman periaatekuvassa on ympyröity vaihtuvat komponentit. Alaluvuissa 4.1–4.6 on esitelty vanhat ja uudet komponentit sekä kerrottu niiden eroavaisuuksista.

#### 4.1 Taajuusmuuttajat

TPO-asemalla jarru- ja generaattorimoottoreiden ohjauksessa käytettiin ennen uudistustöitä ABB Drivesin valmistamia ACV 700- ja SAMI STAR -vaihtosuuntaajia, jotka oli kytketty SAMI STAR:n SAFUC-tasasuuntaajaan kuvan 14 mukaisesti. Uudistustöiden yhteydessä kokonaisuus päivitettiin ABB:n valmistamilla ACS880-sarjan tuotteilla, joista on kerrottu enemmän alaluvuissa 4.1.1 ja 4.1.2.

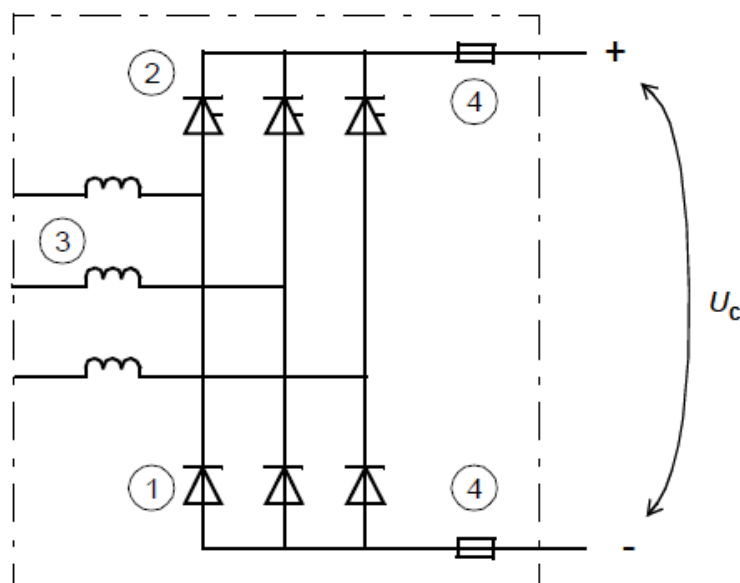
##### 4.1.1 Tasasuuntaaja

TPO-testausaseman kuvassa 14 SAFUC-komponentti kuvaa tasasuuntaajaa, johon on kytketty generaattorin vetomoottoreita ja jarrumoottoreita ohjaavat vaihtosuuntaajayksiköt. SAFUC-tasasuuntaajayksikkö on 6-, 12- tai 24-pulssisuuntaaja, jonka tasajännitesiltaan on kytketty kondensaattoriparisto ja tasajännitekuristin. TPO-asemalla käytetty tasasuuntaaja on kuvan 15 kaltainen 6-pulssisuuntaaja, joka on 1000 kVA:n tehoinen. Tasasuunnattu jännite on 660 V:n suuruinen. (ABB 1994: 30.)



**Kuva 15.** TP0-asemalla käytetty SAFUC-tasasuuntaaja (ABB 1994: 30).

TP0-asemalle vaihdettiin ABB:n ACS880-307 -mallinen tasasuuntaaja, jonka yksinkertaistettu periaatekuva on esitetty kuvassa 16. Uusi tasasuuntaajayksikkö on samankaltainen vaihtuneen SAFUC-tasasuuntaajayksikön kanssa, mutta merkittävimmät erot ovat ACS880-307 -mallissa olevat vaihtosuuntauskuristimet, tyristorit ja tasajännitesillan ylikuormitussuojat. Vaihtovirtakuristimien tarkoituksena on tasoittaa syöttövirran siniaaltoa ja tyristorien avulla voidaan säätää tasasuuntausyksikön virran suuruutta. Eroina myös vaihtuvaan tasasuuntaajayksikköön ovat tehon ja tasajännitesillan jännitteen suuruus, mitkä ACS880-307 -mallissa ovat 976 kVA ja 690 V. (ABB 2018b: 14, 96.)



**Kuva 16.** Periaatekuva uudesta TP0-aseman ACS880-307 -tasasuuntaajayksiköstä, missä numero 1 kuvaa tasasuuntausdiodeja, 2 tyristoreita, 3 vaihtovirtakuristimia ja 4 ylikuormitussuojia (ABB 2018b: 14).

#### 4.1.2 Vaihtosuuntaajat

TP0-aseman vanhojen vaihtosuuntaajien toimintaperiaate oli seuraavanlainen: jarrumootoreita ohjasi ACV 700 -mallinen vektorisäätötappaa käyttävä taajuusmuuttaja, joka sai säätöönsä tarvittavan akselin pyörimisnopeustiedon Leine & Linden pulssitakometriltä. Generaattorin vetomootoreita ohjasi kaksi SAMI STAR -taajuusmuuttajaa, jotka olivat rinnankytketty toisiinsa tasauskuristimella. SAMI STAR -taajuusmuuttajien kytkentä oli niin sanottu isäntä-orja -kytkentä, joka tarkoittaa sitä, että isäntänä toimivan taajuusmuuttajan ohjelmisto ohjaa myös orjana toimivan taajuusmuuttajan toimintaa. SAMI STAR -taajuusmuuttajat olivat myös vektoriohjattuja. (Hannuksela 1995: 5, 7.)

ACV 700- ja SAMI STAR -vaihtosuuntaajat korvattiin ACS880-107 -mallin vaihtosuuntaajilla, joiden asennusvaihe on esitetty kuvassa 17. ACS880-sarjan vaihtosuuntaajia on saatavilla kahdeksassa eri kokoluokassa suurimman yksittäisen vaihtosuuntaajayksikön tehon ollessa 500 kW. Suurempaa tehontarvetta varten vaihtosuuntaajayksikköjä on mah-

dollista kytkeä modulaarisesti yhteen, jolloin voidaan saavuttaa jopa 5600 kW:n suurin teho. (ABB 2018b: 19.) Uuden TP0-testausaseman yhden vaihtosuuntaajayksikön nimellisteho ja -virta ovat 400 kW ja 410 A (ABB 2018d: 28).



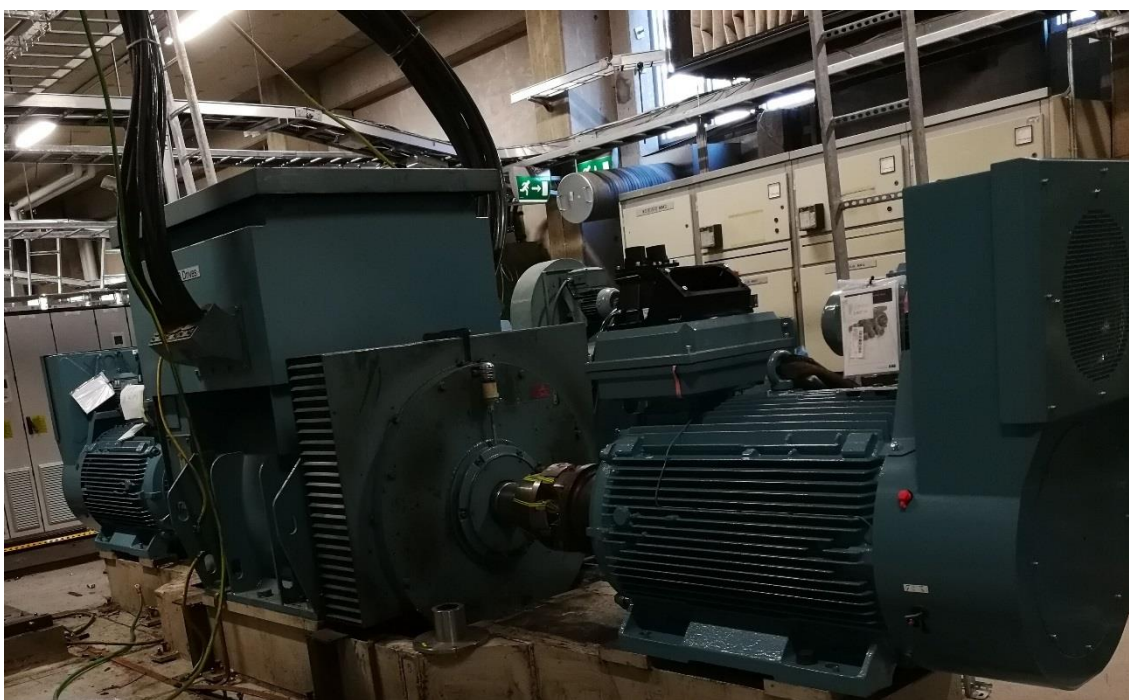
**Kuva 17.** TP0-testausaseman ACS880-mallin tasa- ja vaihtosuuntausyksiköt asennusvaiheessa.

Merkittävin ero vanhojen ACV 700- ja SAMI STAR- ja uusien ACS880-vaihtosuuntaajien välillä on pääohjaustapa. Siinä missä vanhojen vaihtosuuntaajien säätö perustui vektorihjaukseen, niin ACS880-vaihtosuuntaajissa on käytössä suora momentinsäätö (DTC, direct torque control). Vektorisäätö perustuu moottoria syöttävän jännitteen ja taajuuden säätöön modulaattorin kautta pulssinleveysmodulaatiotekniikkaa hyödyntäen, kun taas suorassa momentinsäädössä säädetään suoraan moottorin vääntömomenttia ja magneettivuota. Tällöin modulaattorille ei ole tarvetta, jolloin säätövaiheiden määrä vähenee sekä käytön momenttivaste ja momentinsäädön tarkkuus parantuvat huomattavasti. (ABB 2001a.)



## 4.2 Generaattorin vetomoottorit

TP0-testausaseman oma generaattori varmistaa koestettavan sähkömoottorin tasalaatuisen syöttöjännitteen. Kuvassa 14 näkyvässä periaatekuvassa generaattoria G21 pyörittävät vetomoottorit M21 ja M22, jotka päivitettiin uudistustöiden yhteydessä. Generaattori uusine vetomoottoreineen on esitetty kuvassa 18. Vanhat vetomoottorit olivat toimivia, mutta jo käyttöikänsä lopulla. Vanhoille vetomoottoreille ei myöskään ollut enää saatavilla varaosia, mikä olikin pääsyy uusimistarpeeseen. Testausaseman generaattoria ei katsottu tarpeelliseksi korvata uudella.



**Kuva 18.** TP0-testausaseman tahtigeneraattori ja sitä pyörittävät vetomoottorit.

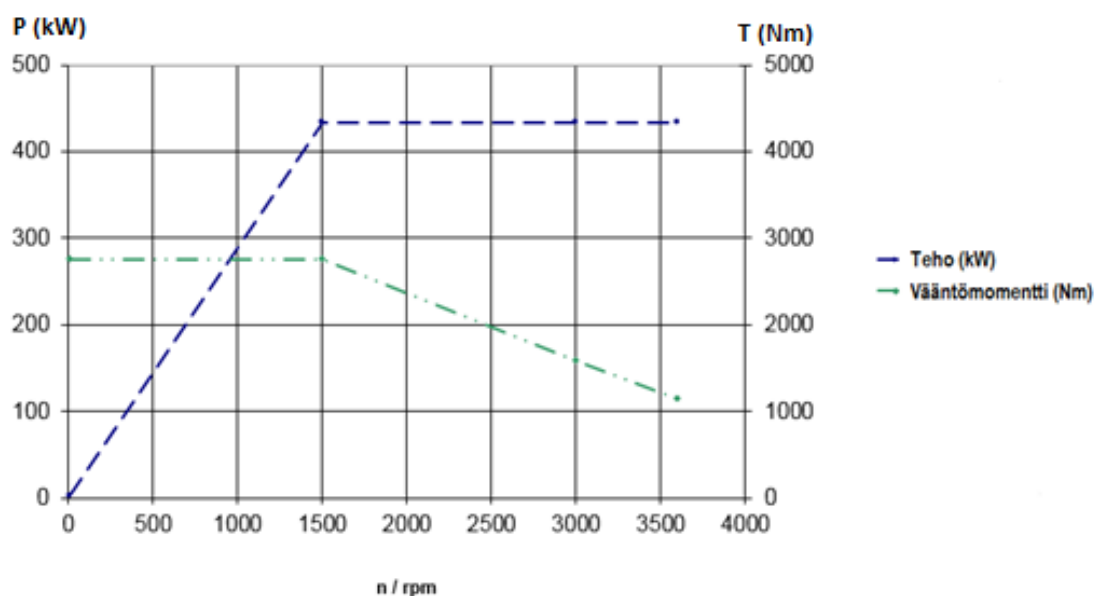
Uudet vetomoottorit suunniteltiin vanhojen vetomoottoreiden sähköisten arvojen pohjalta eikä eroavaisuuksia vanhoihin vetomoottoreihin nähden ollut. Taulukossa 8 on esitetty uusien vetomoottoreiden tekniset tiedot. Vetomoottoreita jäähdyttävät niihin liitetyt erillispuhaltimet.

**Taulukko 8.** TP0-testausaseman generaattorin vetomoottoreiden tekniset tiedot.

| Tyyppi           | Teho (kW) | Jännite (V) | Virta (A) | Tehokerroin | Hyötysuhde (%) |
|------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|----------------|
| M3BP<br>355MLB 4 | 400       | 690         | 414       | 0,85        | 96,3           |

### 4.3 Jarrumoottorit

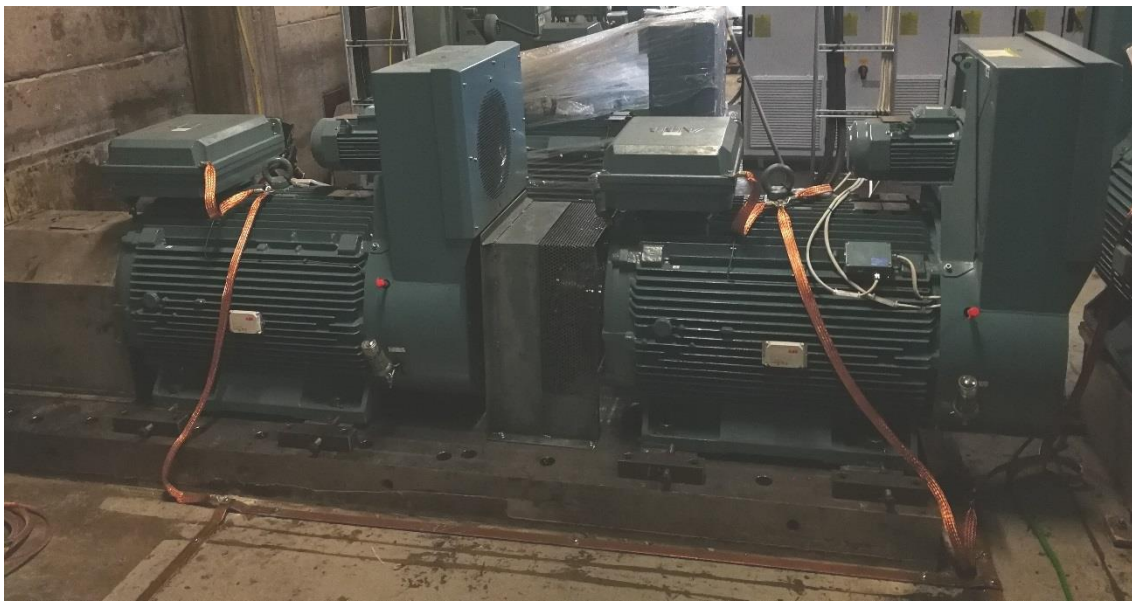
Koestettavaa moottoria kuormittavat kaksi peräkkäin kytkettyä jarrumoottoria. Kuten generaattorin vetomoottorit, TP0-testausaseman uudet jarrumoottorit mitoitettiin vanhojen jarrumoottoreiden kilpiarvojen perusteella, joten merkittäviä eroavaisuuksia vanhojen ja uusien jarrumoottoreiden välillä ei ollut. Mitoituksen pohjana käytetään kuvassa 19 esitettyä yhden jarrumoottorin kuormituskäyrää. Testausaseman uusien jarrumoottoreiden tekniset tiedot ovat esitettyinä taulukossa 9 ja asennetut jarrumoottorit kuvassa 20. Jarrumoottoreiden päihin on liitetty erillispuhaltimet riittävän jäähdytyksen takaamiseksi.

**Kuva 19.** Yhden jarrumoottorin mitoituksen pohjana käytetty kuormituskäyrä.

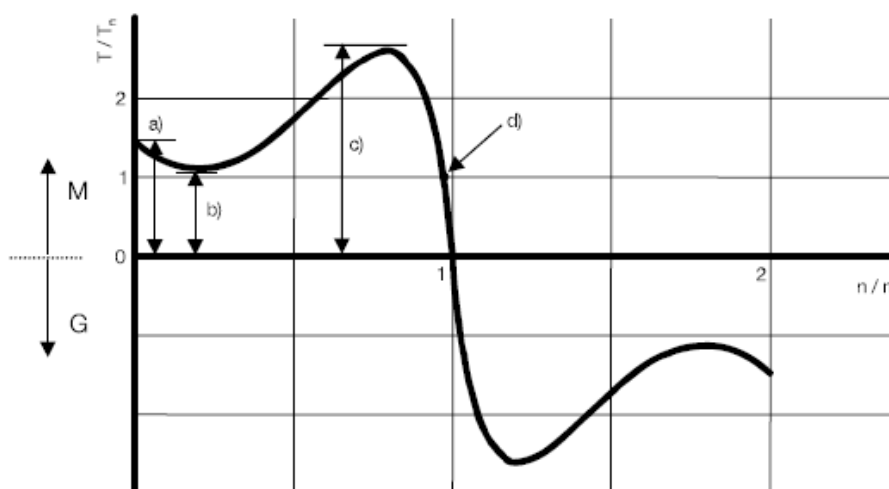


**Taulukko 9.** TP0-testausaseman jarrumoottoreiden tekniset tiedot.

| Tyyppi           | Teho (kW) | Jännite (V) | Virta (A) | Tehokerroin | Hyötysuhde (%) |
|------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|----------------|
| M3BP<br>355MLB 4 | 430       | 690 Y       | 461       | 0,89        | 96,3           |

**Kuva 20.** TP0-testausaseman uudet jarrumoottorit.

Jarrumoottoreiden mitoituksen kriteerinä on, että testattavalle moottorille on oltava mahdollista tehdä niin sanottu momentti-nopeus -testi. Momentti-nopeus -testissä on tarkoitus määrittää sekä minimi- että maksimimomentin suuruudet. Mittaus suoritetaan syöttämällä moottoria nimellisjännitteellä ja -taajuudella ohjaten testattava moottori sen nimellisko-  
peudesta pysähdyksiin jarrumoottoreita käyttäen. Testin tuloksena saadaan määritettyä kuvan 21 tapainen momentti-nopeus -käyrä. (Pantti 2019.) TP0-testausaseman moment-  
tianturi on mitoitettu mittaamaan korkeintaan 5 kNm:n suuruista vääntömomenttia, joka samalla määrittää ylärajan testausaseman maksimimomentille.



**Kuva 21.** Yleinen oikosulkumoottorin momentti-nopeus -käyrä, jossa b on minimi- eli satulamomentti, c on maksimi- eli huippumomentti ja d on nimellismomentti (ABB 2001b).

#### 4.4 Virranmittaus

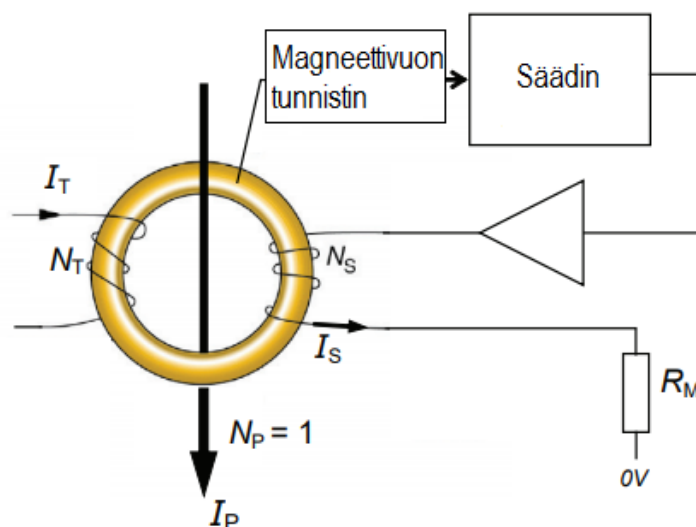
Ennen testauslaitteiston uudistusta testattavaa moottoria syöttävän virran suuruutta mitattiin Ritzin valmistamilla mittamuuntajilla. Kuvassa 22 on esitetty yhden vaiheen mittamuuntajat, jotka pystyvät mittaamaan 250, 500 ja 1000 A:n suuruista virtaa mittamuuntajasta riippuen. Tämän lisäksi testausasemalla oli kussakin kolmessa vaiheessa 2000 ja 4000 A:n suuruista virtaa mittaavat mittamuuntajat. Testausilanteessa aseman operaattorin tuli valita oikea mittamuuntaja tarkkaa virranmittausta varten.

Testausasemalla käytetyt Ritzin mittamuuntajat ovat rengasmallisia, jotka ovat asennetut virtakiskon ympärille galvaanisesti erotettuina. Mittamuuntajien toiminta perustuu Faradayn lakiin: johtimessa kulkevan virran ympäröimä magneettikenttä indusoi johtimen ympärille asennettuun rengaskäämiin jännitteen, jonka suuruus mitataan. Indusoituneen jännitteen suuruudesta voidaan lopulta johtaa virran suuruus. Edellä kuvattua virranmittausmenetelmää pidetään tarkkana, josta kertoo myös Ritzin lupaama tarkkuusluokka, joka testausaseman mittamuuntajilla oli 0,1. Tämä tarkoittaa, että mitatun virran mittauksen epävarmuus on 0,1 prosenttia. (Ritz 2015: 26, 91; Ziegler, Woodward, Ho-Ching Lu & Borle 2009.)



**Kuva 22.** TP0-testausasemalla käytössä olleet Ritzin valmistamat mittamuuntajat 250, 500 ja 1000 A:n suuruisten virtojen mittaamista varten.

Testausaseman uudistustöiden yhteydessä 500-4000 A:n virtaa mittaavat mittamuuntajat korvattiin LEM:n valmistamalla ITC 4000-s -mallin mittamuuntajilla, joita asennettiin yksi kuhunkin vaiheeseen. Kyseinen mittamuuntaja hyödyntää niin sanottua Fluxgate-tekniikkaa, jonka yksinkertaistettu periaatekuva on esitetty kuvassa 23.



**Kuva 23.** LEM ITC 4000-s -mittamuuntajan periaatekuva (LEM 2018). Kuvaa muokattu.

Mittamuuntajan läpi kulkeva vaihtovirta  $I_p$  luo sen ympärillä olevaan yksikierroksiseen rengaskäämiin magneettivuon, jonka suuruuden magneettivuon tunnistin mittaa. Magneettivuon suuruuden perusteella säädin ohjaa rengaskäämin ympärillä olevaan käämilankaan  $N_s$  virran  $I_s$ , joka luo rengaskäämiin magneettivuon. Virran  $I_s$  luoma magneettivuon on vastakkainen rengaskäämin läpi kulkevan virran  $I_p$  luomaan magneettivuohon nähden, jolloin rengaskäämin magneettivuon on nolla. Tällöin rengaskäämin läpi kulkeva virta voidaan määrittää yhtälöllä

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s, \quad (38)$$

missä  $N_p$  on johtimen ympärillä oleva käämikierrosten lukumäärä, joka tässä tapauksessa on yksi. (LEM 2018.)

Testausasemalle asennetut LEM ITC 4000-s -mittamuuntajat ovat mitoitettu 4000 A:n virran mittaukseen. Niiden mittausepävarmuuden luvataan olevan korkeintaan 0,5 prosenttia, kun mitataan 400–4800 A:n suuruista virtaa. (LEM 2011: 3.) Tämä täyttää taulukossa 6 esitetyt vaatimukset sähköisten suureiden suurimmista mahdollisista mittausepävarmuuksista.

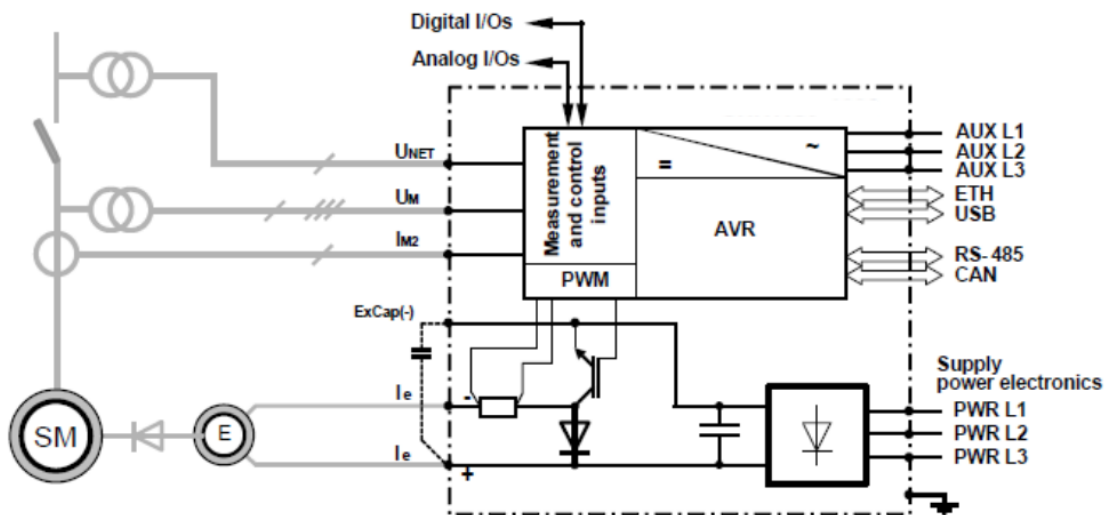
LEM ITC 4000-s -mittamuuntajien käytössä on kaksi etua vanhoihin Ritzin mittamuuntajien nähden: testausaseman operaattoreiden ei LEM-mittamuuntajia käyttäessä tarvitse vaihtaa entiseen tapaan virranmittausalueita sekä testausaseman kalibroitavien mittalaitteiden määrä on pienempi. Koska LEM ITC 4000-s -mittamuuntajan mittauserävarmuus kasvaa alle 400 A:n virtaa mitattaessa (LEM 2011: 3), testausasemalle asennettiin pienien virtojen mittausta varten uudet Ritzin valmistamat 250 A:n mittamuuntajat, jotka olivat samaa mallia poistuneiden mittamuuntajien kanssa. Tätä mittamuuntajaa käytetään virranmittauksessa tyhjäkäyntikokeen aikana.

#### 4.5 Tahtigeneraattorin magnetointilaitte

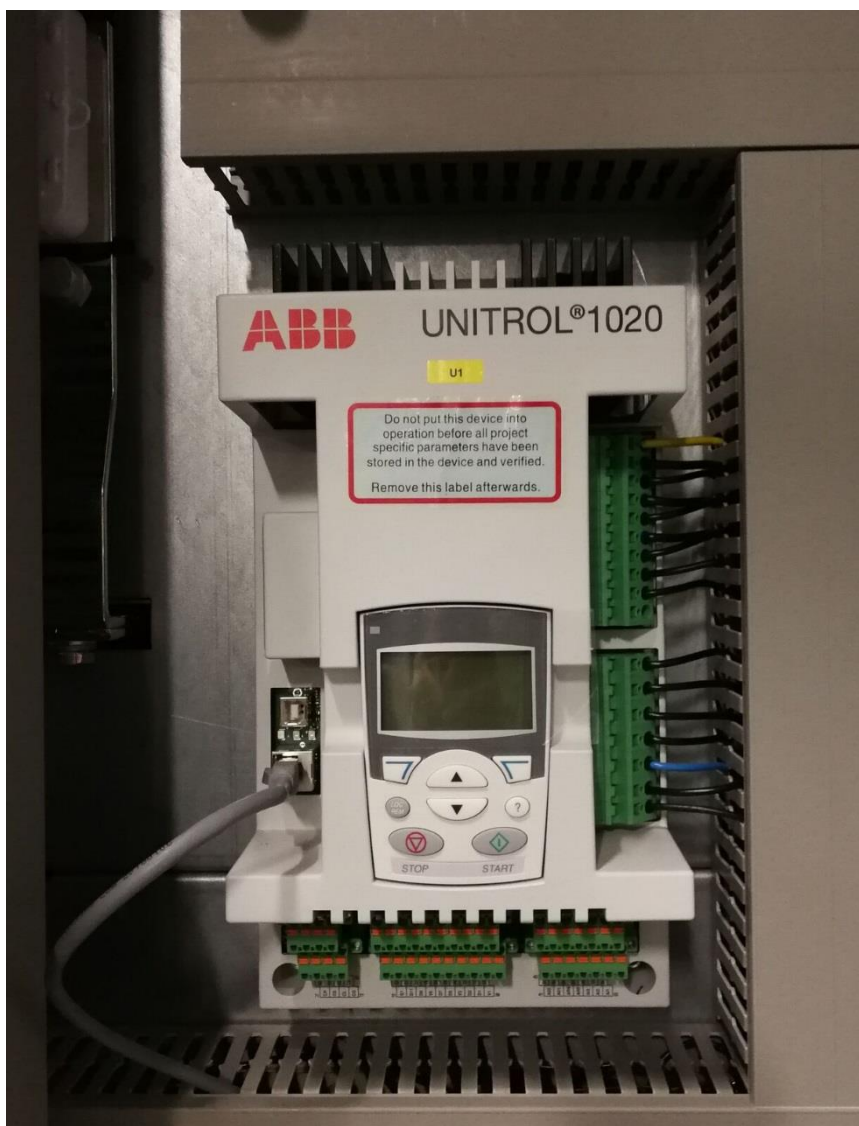
Koestusaseman laitteistoon kuuluu tahtigeneraattori mahdollisimman sinimuotoisen koestusjännitteen tuottamiseksi. Nelinapainen tahtigeneraattori on ABB:n valmistama ja sen nimellisteho on 1600 kW 50 Hz:llä tai 1900 kW 60 Hz:llä. Generaattorikeskuksessa olevalla kytkimellä generaattori voidaan kytkeä joko tähteen tai kolmioon. Tähtikytkennällä nimellisarvot ovat 727 V ja 1271 A sekä kolmiokytkennällä 420 V ja 2200 A. Tavallisesti tahtigeneraattorin jänniteensäätö perustuu sen roottorin magnetointikäämitykseen johdettavan tasavirran suuruuteen, joka synnyttää roottoriin pysyvän magneettivuon. Roottorin pyöriessä indusoituu staattorikäämitykseen sinimuotoinen vaihtojännite. (Hannuksela 1995: 10; Korpinen 1998b.)

TPO-testausasemalla generaattorin magnetointiin on käytetty erikoisvalmisteista SMET-12 -magnetointilaitetta, joka on suunniteltu käytettäväksi yhdessä testausaseman automaatiojärjestelmän kanssa. Magnetointilaitte on releohjattu ja siihen asetetaan haluttu jänniteohje digitaalikortin avulla. Magnetointivirtaa voidaan myös säätää käsin potentiometrillä. Kyseisen magnetointijärjestelmän etuna on ollut kyky pitää asetettu koestusjännite tasaisena. Heikkoutena on ollut jännitesäädön 2,5 voltin välein oleva portaittainen säätö, joten koestusjännite on harvoin säätynyt täsmälliseksi. (Kovanen 1990: 49.)

SMET-12 -magnetointilaite korvataan uudistusprojektin yhteydessä ABB:n valmistamalla Unitrol 1020 -automaattisella jännitteensäätimellä, joka on suunniteltu tahtimootoreiden ja -generaattoreiden magnetoinnin säätöön. Kyseinen jännitteensäädin on todettu hyvin toimivaksi koestuslaboratorion toisen testauspaikan automaatiojärjestelmän kanssa, jonka kaltainen asennetaan myös TP0-testausasemalle, mikä vaikutti positiivisesti korvauspäätökseen. Unitrol 1020 käyttää magnetoitivirran säätöön IGBT-transistoritekniikkaa ja kykenee tuottamaan jopa 20 ampeerin virran. Laitetta on mahdollista käyttää laitteen nestekidenäytön lisäksi myös etäohjauksella, kun siihen kytketään joko Ethernet- tai USB-kaapelilla tietokone, johon on asennettu ohjaukseen tarkoitettu CMT1000-ohjelma. (ABB 2017.) Kuvassa 24 on esitetty Unitrol 1020 -jännitteensäätimen tavallinen kytkentä sekä kuvassa 25 TP0-testausasemalle asennettu vastaava laite.



**Kuva 24.** Unitrol 1020 -jännitteensäätimen kytkentäkaavio (ABB 2017).



**Kuva 25.** ABB Unitrol 1020 -jännitteensäädin asennettuna TP0-testausaseman magnetointikaappiin.

#### 4.6 Automaatiojärjestelmä

TP0-koestusaseman korvattava automaatiojärjestelmä on Motorolan MC68020-keskussyksikköön pohjautuva MasterPiece 200/1, jonka toimintoja ohjataan MasterView 830 -näyttöyksiköltä. MasterPiece 200/1 pitää sisällään 512 kB sekä PROM-muistia (*Programmable Read Only Memory*) että RAM-muistia (*Random Access Memory*). PROM-muisti pitää sisällään muun muassa järjestelmään ohjelmoidut funktioaliohjelmat, binää-



riologiikan ja binäärimuuttujien funktioelementit. I/O-signaalien määrän teoreettinen maksimi on 4000 ja analogiatuloja ja -lähtöjä voi olla enintään 900. Automaatiojärjestelmän I/O-viestien siirrossa käytetään FieldBus-protokollaa, jonka tiedonsiirtonopeus on 2 Mbit/s. Keskeytymättömän tehonsyötön turvaamiseksi järjestelmään on myös asennettu Fiskarsin valmistama 0,8 kVA:n tehoinen UPS-laite (*Uninterruptible Power Supply*), joka on erotettu galvaanisesti verkosta häiriösuojauksen vuoksi. (Hannuksela 1995: 12, 14.)



1

**Kuva 26.** TP0-testausaseman MasterPiece 200/1 -automaatiojärjestelmä.

MasterPiece 200/1 -automaatiojärjestelmä korvataan uudistuksen yhteydessä ABB AC500 PLC -järjestelmällä. AC500-sarja toimii alustana automaattoratkaisuille, joille on helppo rakentaa sekä yksinkertaisia ohjaukskomentoja että monimutkainen automaatio. AC500-sarjan etuna on modulaarisuus: laitteistoon on liitettävissä erilaisia suorittimia, I/O-, väylä- ja liitäntämoduuleja. (ABB 2019.) TP0-testausaseman AC500 PLC varustetaan PM591-ETH -ohjaimella, joka vastaa koestusjärjestelmän laitteiden ohjauksesta.



## 5 SÄHKÖMOOTTORITESTAUSASEMAN MODERNISOINNIN JÄLKEISEN MITTAAMISEN LUOTETTAVUUDEN VARMISTAMINEN

Tässä luvussa keskitytään työn pääaiheeseen eli sähkömoottoritestausaseman mittaamisen luotettavuuden varmistamiseen laitevaihdosten jälkeen. Sen pohjana käytetään luvussa 2 kuvattua hyötysuhdemittausohjelmaa, toistomittauksia samalla oikosulkumoottorilla ja luvussa 3 kuvattua teoriaa. Tämän lisäksi tutkitaan testausaseman mittalaitteiden tarkkuuksien vaikutusta hyötysuhteen mittaustarkkuuteen. Saatujen mittaustulosten ja yhdessä koestuslaboratorion määritettyjen rajoitusten perusteella voidaan päästä työn päätavoitteeseen eli todeta laitevaihdosten jälkeinen mittaamisen luotettavuus.

### 5.1 Hyötysuhdemittaus

Mittaamisen luotettavuuden määrittämisessä käytetyt hyötysuhdemittauksen vaiheet on esitetty kuvassa 27. Ne pohjautuvat yksinkertaistettuna edellä luvussa 2 kuvattuun koestuslaboratorion hyötysuhteen mittausohjelmaan, josta on poistettu hyötysuhteen määrittämiseen vaikuttamattomat mittaukset, kuten värinäitasomittaus. Mittauksissa käytetyn oikosulkumoottorin tiedot on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Mittauksessa käytetyn oikosulkumoottorin tiedot.

| <b>Kuvaus</b>       | <b>Tieto</b>                  |
|---------------------|-------------------------------|
| Moottorin tyyppi    | M3BP 355SMA 4                 |
| Arvokilpitiedot     | 400 V D, 50 Hz, 250 kW, 436 A |
| Laskettu hyötysuhde | 96,2 %                        |
| Käyttötapa          | S1                            |



**Kuva 27.** Mittaamisen luotettavuuden määrittämisessä käytetyn hyötysuhdemittauksen osat.

#### *Moottorin kiinnitys testauspenkkiin*

Ennen varsinaisten mittausten aloitusta tulee testattava moottori valmistella testausta varten. Akselin päähän tulee kiinnittää sovitte, joka mahdollistaa kiinnityksen momenttianturiin ja edelleen jarrumoottoreihin. Testausaikaisen liikkeen estämiseksi moottori tulee kiinnittää sen jaloista testauspenkkiin pulteilla. Mikäli moottorissa ei olisi jalkoja vaan siinä olisi niin sanottu laippalaakerikilpi, tulisi silloin testauspenkkiin asentaa laippalaakerikilpeä vastaava sovitte ja kiinnittää moottori siihen.

Käytettyjen mittalaitteiden kalibrointitarrat tulee myös tarkistaa siltä varalta, että kalibrointiväli olisi ylittynyt. Tarvittaessa mittalaite tulee viedä kalibroitavaksi. Usein koestuslaboratorion varalaittekaapista löytyy samanlainen kalibroitu laite, jolla kalibroimaton mittalaite voidaan korvata heti. Valmisteluvaiheessa asennetaan myös lämpötila-anturit mittaamaan käämityksen, laakereiden ja jäähdytystuloilman lämpötilaa. Lopuksi kytketään virtakaapelit moottorin kytkentänapoihin kytkentäohjeen mukaisesti. Testausta varten valmisteltu moottori on esitetty kuvassa 28.



**Kuva 28.** Testattava moottori valmisteltuna ja kiinnitettynä testauspenkkiin.

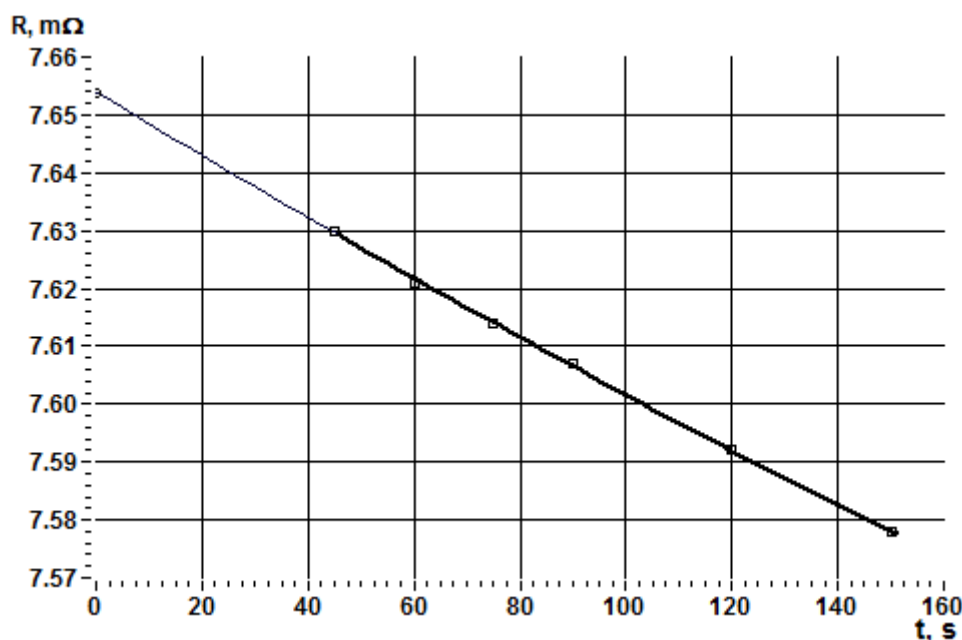
#### *Vastusmittaus vallitsevassa lämpötilassa*

Ennen lämpenemätestin aloitusta tulee mitata moottorin vaiheiden väliset vastusarvot. Mikäli vastusarvot eivät mainittavasti eroa toisistaan ja voidaan todeta kytkennän olevan kunnossa, voidaan saatuja vastusarvoja käyttää niin sanottuina kylmäresistanssiarvoina. Käytännön syistä koestuslaboratoriossa käytetään vain yhtä kahden vaiheen välistä vastusarvoa kylmäresistanssina ja on sovittu, että tämä arvo on U- ja W-vaiheiden väliltä mitattu vastusarvo.

#### *Lämpenemätesti ja jäähtymän määrittäminen*

Lämpenemätesti suoritetaan alaluvun 2.3.4 mukaisesti ja sen tarkoituksena on määrittää moottorin suurin lämpenemä. Moottoria kuormitetaan niin kauan kuin sen käämityksen lämpötilan muutos on alle 1 kelviniä tunnissa. Tämänkaltaisen käämityksen lämpötilan

tasapainon saavuttamiseen menee moottorista riippuen useampi tunti, joten usein lämpenemätesti aloitetaan illalla ja moottori pidetään kuormitettuna käynnissä yön yli. Lämpötilan tasaannuttua moottori pysäytetään ja kytketään U- ja W-vaiheiden välille resistanssinmittausjohdot. Jäähdytymäkäyrä määritetään ottamalla tasaisin väliajoin ylös kahden minuutin ajan vaiheiden välinen resistanssiarvo. Jäähdytymäkäyrästä voidaan määrittää käämityksen todellinen toimintalämpötila jäähdytymäkäyrästä ekstrapoloidun toimintalämpötilan resistanssiarvon avulla ja siten yhtälön 35 avulla voidaan laskea lämpenemä. Resistanssin muutoksen perusteella määritetty toimintalämpötilan aikainen käämityksen resistanssi on esitetty kuvassa 29.



**Kuva 29.** Erään oikosulkumoottorin ekstrapoloitu toimintalämpötilan aikainen käämityksen resistanssi.

### *Osakuormitustesti*

Osakuormitustesti tehdään alaluvun 2.3.5 mukaisesti staattori- ja roottorikäähäviöiden määrittämistä varten. Testi tulee aloittaa mahdollisimman pian lämpenemätestin ja jäähdytymäkäyrän määrittämisen jälkeen. Staattori- ja roottorikäähäviöt lasketaan jokaiselle osakuormalle standardissa ja edellä alaluvussa 2.2.2 esitettyjen yhtälöiden mukaan.

### *Tyhjäkäyntikoe*

Osakuormitustestin jälkeen moottori irrotetaan testauspenkistä tyhjäkäyntikoetta varten. Tyhjäkäyntikokeessa akselin annetaan pyöriä vapaasti alaluvun 2.2.4 mukaan. Tyhjäkäyntikokeen perusteella voidaan määrittää loppujen häviöiden suuruudet.

#### 5.2 Hyötysuhteen toistomittaukset ja ohjauskortti

Mittaamisen luotettavuuden toteamisessa testausaseman uudistuksen jälkeen sovellettiin luvussa 3 esitettyjä sisäisen laadunohjauksen periaatteita, joiden tarkoitus on estää käytössä olevan mittausmenetelmän todetun mittausepävarmuuden ylittyminen. Mittaukset tulee tällä menetelmällä toteuttaa vertailukelpoisilla toistokokeilla, jossa käytetyt mittalaitteet, mittauksen kohde ja mittaustapa pysyvät samoina. Toistomittausten tulokset voidaan esittää graafisesti ohjauskorttia käyttäen.

Käytännössä mitaamisen luotettavuuden analyysi suoritettiin seuraavasti:

1. Valittiin mittausmenetelmäksi hyötysuhdemittaus, koska se on koestuslaboratorion tärkein mittaus ja antaa kattavan kuvan mittausjärjestelmän toimivuudesta.
2. Etsittiin testausasemalle sopiva moottori, jonka hyötysuhdemittaus on toistettu useasti ja tulokset saatavilla koestusohjelmasta. Tähän tarkoitukseen löytyi taulukossa 10 esitetty niin sanottu kalibraattorimoottori, jota käytetään koestuslaboratoriossa erilaisiin käyttötarkoituksiin. Sille eri testausasemilla tehtyjen hyötysuhdemittausten tuloksia käytettiin harkiten, koska vertailukelpoisuuksista ei täysin voitu varmistua. Tämän vuoksi mittaushistoriaa kasvatettiin kahdella mittauksella ennen testausaseman vanhojen laitteiden purkutöitä, kun hyötysuhdemittaus tehtiin vanhan laitteiston lisäksi koestuslaboratorion toisella testauspaikalla. Kyseisellä testausasemalla on muuten vastaava laitteisto, mutta sen momenttanturi kykenee mittaamaan 10 kNm:n vääntömomenttia, kun TP0-testausaseman momenttanturi on mitoitettu korkeintaan 5 kNm:n vääntömomentille.

3. Mittaushistorian hyötysuhdemittauksen tulokset esitettiin ohjauskortilla, johon vihreällä viivalla merkitty tulosten keskiarvo  $m$  laskettiin yhtälöllä

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i, \quad (38)$$

missä  $\eta_i$  on mittauskerran  $n$  hyötysuhdemittauksen tulos. Keskiarvoa pidettiin tavoitearvona testausaseman remontin jälkeiselle hyötysuhdearvolle, koska sen voidaan ajatella edustavan parhaita mahdollista arviota kyseisen moottorin todellisesta hyötysuhteesta. Ohjauskorttiin merkittiin kuvassa 10 esitettyä ohjauskorttia mukailien valvontarajat, jonka ylä- ja alarajat määrättiin itse pitäen vertailuarvona mittaushistorian keskiarvoa. Ohjauskortin valvontarajojen väli katsottiin sopivammaksi perustaa koestusstandardiin ja se laskettiin IEC 60034-1 -standardiin perustuen taulukon 7 mukaisesti, jonka tuloksena saatiin toleranssi, joka kattaa eroavaisuudet työtapojen ja käytettyjen materiaalien välillä. Täten varoitusrajaväliksi määriteltiin 0,38 prosenttia, joka laskettiin kalibraattorimoottorin arvokilpitietojen perusteella, jotka löytyvät taulukosta 10.

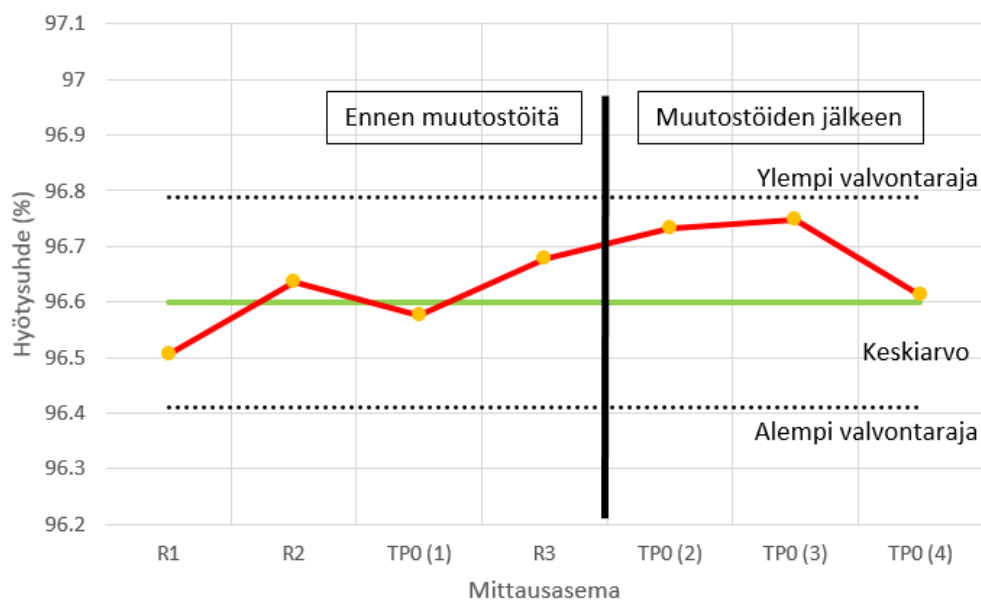
4. Koestusaseman uudistustöiden jälkeen tehtiin neljä hyötysuhdemittaus, kolme uudistetulla laitteistolla ja yksi niin sanottuna ristiintestauksena verrokkitestausasemalla. Mittausten tulokset esitettiin ohjauskortilla ja luotettavuuden varmistamisen kriteereiksi määriteltiin mittaustulosten yhteneväisyys ja valvontarajojen sisällä olevat mittaustulokset.

Taulukossa 11 on esitetty ennen ja jälkeen koestusaseman uudistustöitä tehdyt hyötysuhdemittausten tulokset. Mittaushistorian ensimmäinen hyötysuhdemittaus on tehty koestuslaboratorion testausasemalla, joka on suunniteltu suurimpien Vaasan yksikössä valmistettujen moottoreiden koestuksiin. Tällä testausasemalla on käytössä momenttianturi, joka kykenee mittaamaan 20 kNm:n suuruista vääntömomenttia. Kyseisen testausaseman mittausjärjestelyt ovat muuten täysin vastaavat testausasemien kanssa.

**Taulukko 11.** Kalibraattorimoottorin hyötysuhdemittauksen tulokset, missä taulukossa esiintyvä R-kirjain kuvaa ristiintestaustulosta.

|                | Ennen koestusaseman uudistusta |           |          |           | Koestusaseman uudistusten jälkeen |         |           |         |
|----------------|--------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------------------------------|---------|-----------|---------|
| Hyötysuhde (%) | 96,51 (R)                      | 96,64 (R) | 96,58    | 96,68 (R) | 96,73                             | 96,75   | 96,61 (R) | 96,61   |
| Päivä          | 4.7.13                         | 25.5.17   | 31.10.18 | 6.11.18   | 21.1.19                           | 23.1.19 | 19.2.19   | 22.2.19 |

Kuvassa 30 mittaustulokset on esitetty ohjaukortilla, johon on merkitty myös varoitusrajat. Ohjaukortista nähdään, että uudistetun TPO-mittausaseman hyötysuhdemittauksen tulokset ovat valvontarajojen sisällä ja viimeinen tulos lähellä keskiarvoa. Uudistustöitä edeltävät ja niiden jälkeen tehdyt hyötysuhdemittausten tulokset ovat erotetut toisistaan vertikaalisella viivalla. Taulukosta 11 nähdään, että 19.2.2019 tehdyn ristiintestausten tulos on sama viimeisen TPO-asetamalla tehdyn hyötysuhdemittauksen tuloksen kanssa, joka vahvistaa samalla sekä keskiarvon oikeellisuuden että TPO-asetaman viimeisen mittaustuloksen. Saatujen tulosten perusteella mittaamisen luotettavuus voidaan todeta.



**Kuva 30.** Mittaamisen luotettavuuden määrittämiseksi käytetty hyötysuhdemittauksen ohjaukortti, missä R1-R3 merkitsevät muulla kuin TPO-asetamalla mitattuja tuloksia.

### 5.3 Mittalaitteiden epävarmuuksien vaikutus hyötysuhdelaskentaan

Eräänä työn osa-alueena oli tutkia TP0-testausaseman mittalaitteiden epävarmuuksien vaikutuksia hyötysuhdelaskennan tuloksiin. Tämä tarkastelu vastaa edellä alaluvussa 3.2 mainittua tyypin B epävarmuuden määrittystä. Käytännössä tutkimus suoritettiin siten, että ensin tutkittiin kunkin mittalaitteen epävarmuus joko teknisistä tiedoista tai kalibrointitodistuksista. Taulukossa 12 on esitetty mittaussuureiden virheet ja niiden lähteet. Tämän jälkeen laskettiin kunkin mittaussuureen maksimi- ja minimiarvot ja huomioitiin niiden vaikutukset häviöiden laskennassa. Laskennassa huomioitiin myös syöttävän sähkötehon laskennallinen suurin ja pienin arvo. Näin hyötysuhteen maksimiarvo  $\eta_{\max}$  laskettiin yhtälöllä

$$\eta_{\max} = \frac{P_{1,\max} - P_{T,\min}}{P_{1,\min}}, \quad (39)$$

missä  $P_{1,\max}$  on suurin mahdollinen syöttöteho,  $P_{T,\min}$  ovat pienimmät mahdolliset kokonaishäviöt ja  $P_{1,\min}$  on moottorin pienin mahdollinen syöttöteho. Vastaavasti saatiin hyötysuhteen minimiarvo  $\eta_{\min}$

$$\eta_{\min} = \frac{P_{1,\min} - P_{T,\max}}{P_{1,\max}}, \quad (40)$$

missä  $P_{T,\max}$  on suurimmat mahdolliset kokonaishäviöt.



**Taulukko 12.** Testausaseman mittalaitteista aiheutuvat epävarmuudet ja niiden lähteet.

| Suure                  | Epävarmuuden suuruus | Epävarmuuslähde tai -lähteet  |
|------------------------|----------------------|---|
| Jännite ( $U$ )        | 0,10 %               | Tehoanalysaattori   |
| Virta ( $I$ )          | 0,10 %               | Virtamittamuuntajat ja tehoanalysaattori                              |
| Kierrosnopeus ( $n$ )  | 0,02 %               | Jarrumoottorin takometri ja tehoanalysaattori                         |
| Vääntömomentti ( $T$ ) | 0,15 %               | Momenttianturi, tehoanalysaattori ja näiden väliin kytketty vahvistin |
| Taajuus ( $f$ )        | 0,01 %               | Tehoanalysaattori   |
| Resistanssi ( $R$ )    | 0,03 %               | Resistanssin mittauslaite   |
| Lämpötila ( $t$ )      | 0,08 K               | Lämpötila-anturit   |

Laskennan pohjana käytettiin koestuslaboratorion käytössä olevaa laskenta-Exceliä, jonka alkuperäinen käyttötarkoitus on käytössä olevan koestusohjelman laskennan oikeellisuuden varmistaminen. Sen pohjalle oli mielekästä tehdä myös tämän aiheen epävarmuustarkastelu. Laskenta-Exceliin voidaan ladata koestusohjelmasta mittaustiedot mistä tahansa moottorista, jolle hyötysuhdemittaus on tehty. Laskennan oikeellisuuden varmistamisen lisäksi uudistettu laskenta-Excel määrittää myös mittalaitteiden epävarmuuksien aiheuttamat hyötysuhdemittauksen ylä- ja ala-arvot.

Taulukossa 10 kuvatun moottorin erästä hyötysuhdemittausta käytettiin tutkimaan, miten paljon mittalaitteet voivat vaikuttaa hyötysuhdelaskennan lopputulokseen. Kyseisen hyötysuhdemittauksen tulos oli 96,58 %, jota käytettiin mittalaitteiden aiheuttaman epävarmuuden vertailuarvona. Tässä mittauksessa voidaan todeta, että mittalaitteiden epävarmuuksien vuoksi esimerkkimittauksen hyötysuhteen vaihteluväli voi olla 96,03–97,12 %. Suhteellinen epävarmuus on siten 1,13 prosenttia.

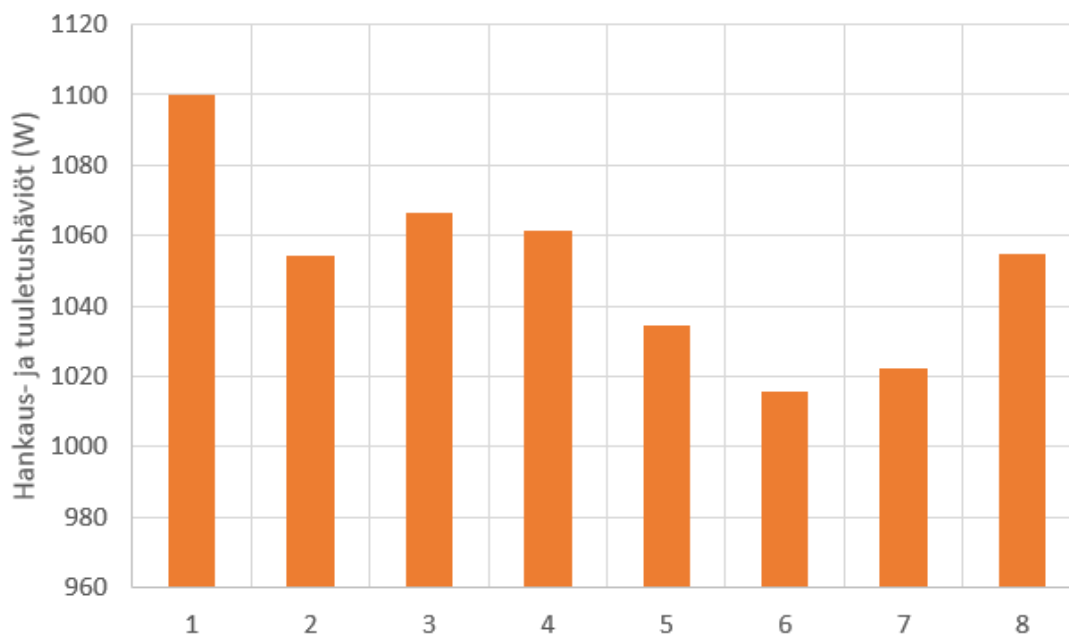
## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuvassa 30 esitetyn toistomittauksiin ja mittaushistoriaan perustuvien hyötysuhdemittausten tulosten perusteella voidaan todeta uudistetun testausaseman mittaamisen luotettavuus, kun uudistustöiden jälkeen tehtyjen hyötysuhdemittausten tulokset olivat asetettujen valvontarajojen sisällä ja viimeinen tulos lähellä mittaushistorian keskiarvoa. Täten voidaan todeta työn saavuttaneen päätavoitteen.

Pääosin tulosten eroavaisuuksien voidaan ajatella johtuvan mittauksissa olevista satunnaisista virheistä, joita voi esiintyä erittäin tarkkoissa mittauksissa. Huomioitavaa myös on, että alaluvun 2.2 mukaista epäsuoraa hyötysuhteen määrittäytapaa käyttäen eräiden häviöiden suuruudet ovat riippuvaisia toisten häviöiden suuruuksista, kuten yhtälön 12 mukaan roottorikäähäviöt riippuvat mitatun syöttötehon sekä staattori- ja rautahäviöiden suuruuksista. Täten esimerkiksi pienikin ero hyötysuhdemittauksissa mitattujen virtojen tai jännitteiden välillä voi aiheuttaa merkittäviä eroja lopputuloksiin.

Mittaustuloksia vertailtaessa haluttiin tutkia, mistä kuvassa 30 näkyvä mittausten välinen hyötysuhteen paraneminen johtui. Lisä- sekä hankaus- ja tuuletushäviöitä lukuun ottamatta mitattujen ja laskettujen häviöiden välillä ei todettu merkittäviä eroavaisuuksia. Hankaus- ja tuuletushäviöiden osalta huomattiin, että sen suuruuden trendi on laskeva, kuten kuvasta 31 nähdään. Tuuletushäviöiden ei voida ajatella pienenneen, kun tuuletin sekä tuuletusrivoilla varustettu roottori ovat pysyneet samoina.

Hankaushäviöt voivat pienetä, kun koneen kitkaa aiheuttavat osat, kuten laakerit, laakerirasva ja tiivisteet, kuluvat käytössä. Tämä voidaan todeta kuvan 31 testitulosten perusteella. IEC 60034-2-1 -standardissa (2014: 18) mainitaan, että edellä mainitusta syystä koneelle voidaan tehdä niin sanottu sisäänajo ennen varsinaista hyötysuhdemittausta. Mittausten välillä on pieniä eroavaisuuksia ja vaikkakin viimeisessä mittauksessa hankaus- ja tuuletushäviöt hieman nousivat, ensimmäisen ja viimeisen mittauskerran hankaus- ja tuuletushäviöitä vertaillen voidaan kitkaa aiheuttavien osien kuluminen todeta.



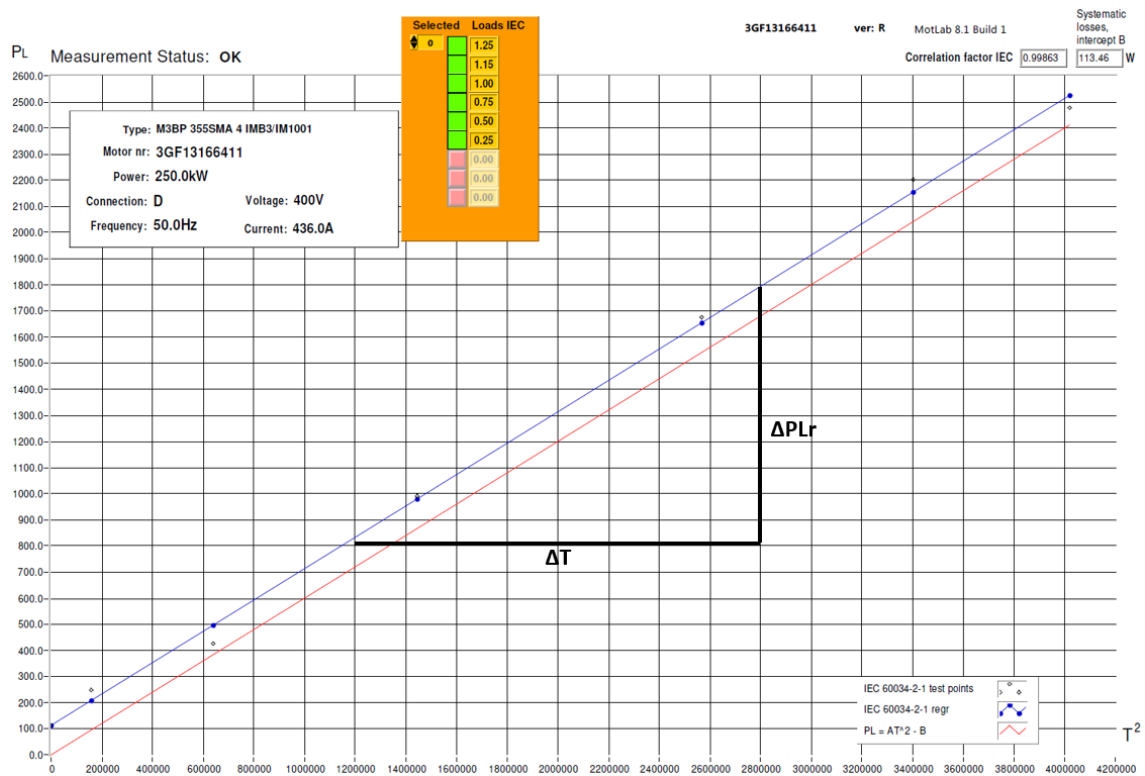
**Kuva 31.** Mittauskertojen 1–8 hankaus- ja tuuletushäviöt.

Hankaus- ja tuuletushäviöitä enemmän vaihtelivat mitattujen lisähäviöiden suuruudet. Lisähäviöiden laskennallinen muodostuminen on kuvattu alaluvussa 2.2.6 ja niiden suuruus lasketaan yhtälön 32 mukaisesti kertomalla lisähäviökulmakerroin momentin neliöllä. Tehtyjen hyötysuhdemittausten lisähäviöitä tarkastellessa huomattiin, että pienikin eroavaisuus koestusohjelman laskemassa kulmakertoimessa mittaustulosten välillä vaikuttaa merkittävästi lisähäviöiden suuruuteen (taulukko 13). Lisähäviökulmakerroin muodostuu kuvan 32 mukaisesti, kun yhtälön 24 perusteella lasketut jäännöshäviöt  $P_{Lr}$  kuvataan mitatun vääntömomentin neliön funktiona. Koska jäännöshäviöt lasketaan vähentämällä moottoria syöttävästä sähkötehosta muut häviöt, on niiden suuruudella merkittävä vaikutus määritettyyn lisähäviökulmakertoimen suuruuteen.

Koska jäännöshäviöiden suuruuteen vaikuttavat muut häviöt, tulisikin muiden häviöiden suuruudet määrittää mahdollisimman tarkasti. Tämä tarkoittaa mahdollisimman tarkkojen mittalaitteiden käyttöä, jotta häviöiden suuruudet voidaan määrittää mahdollisimman tarkasti. Alalukuun 3.3 on kerätty oikosulkumoottorin mittaamisen tarkkuuteen ja luotettavuuteen liittyviä näkökohtia, kuten listaus koestusstandardien vaatimista mittalaitteiden tarkkuuksista taulukossa 6, jotka toimivat selkänojana päivittäisessä mittaustoiminnassa.

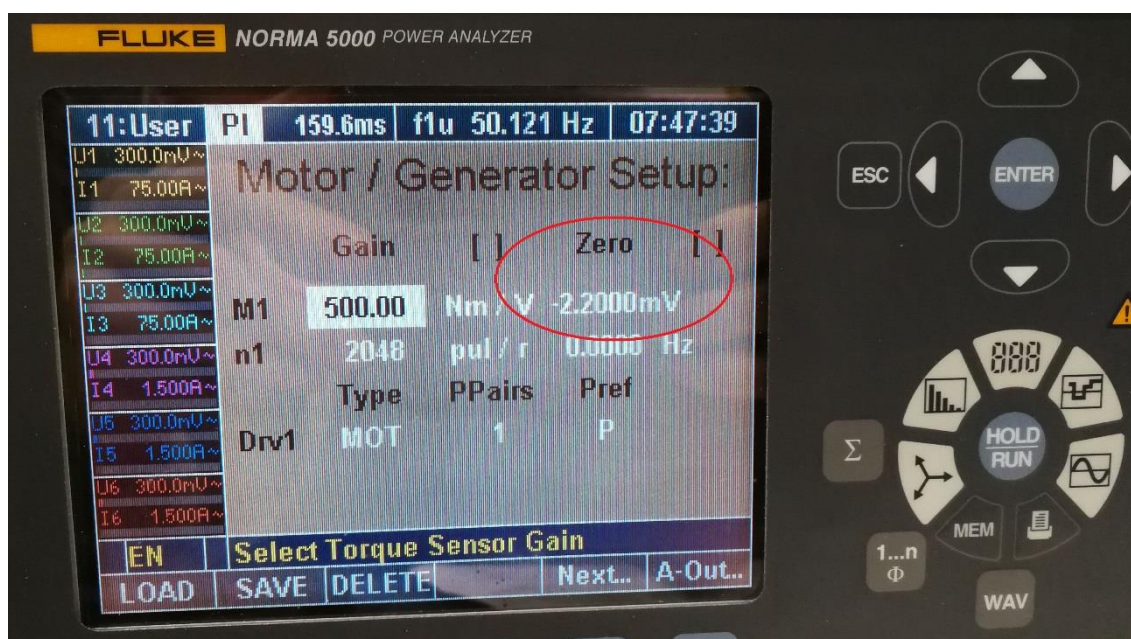
**Taulukko 13.** Hyötysuhdemittausten lisähäviökulmakertoimet ja lisähäviöt.

| Lisähäviökulmakerroin ( $\cdot 10^{-3}$ ) | Lisähäviöt (W) |
|---|----------------|
| 0,694                                     | 1783           |
| 0,622                                     | 1594           |
| 0,568                                     | 1464           |
| 0,529                                     | 1356           |
| 0,516                                     | 1324           |
| 0,505                                     | 1294           |
| 0,600                                     | 1544           |
| 0,634                                     | 1627           |

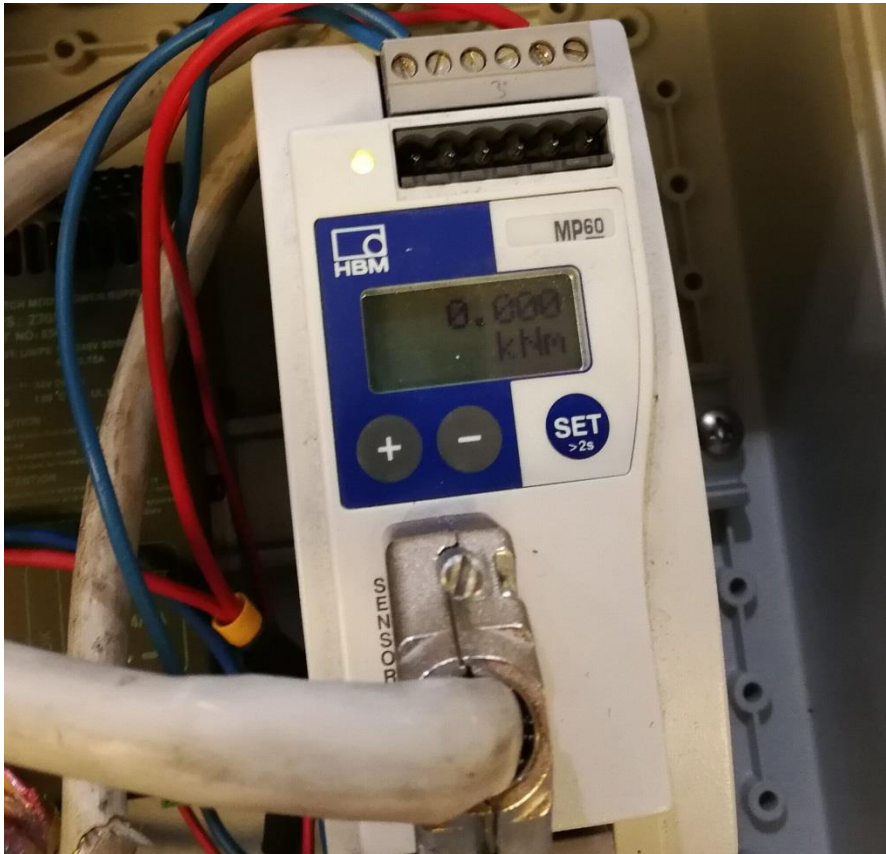
**Kuva 32.** Lisähäviökulmakertoimen muodostuminen jäännöshäviöiden ja mitatun vääntömomentin perusteella.

Lisähäviökulmakertoimen suuruuteen vaikuttava vääntömomentti tulisi myös mitata mahdollisimman tarkasti. Vääntömomentin mittalaitteiston mittauserävarmuus tulisi olla pienempi kuin 0,2 prosenttia taulukon 6 mukaisesti. Säännöllisestä kalibroinnista on myös huolehdittava. Tämän työn tutkimuksissa ja aluvussa 5.2 esitetyissä tuloksissa todettiin, että käytetyn vääntömomentin mittauslaitteiston, joka koostuu momenttianturista, tehoanalysaattorista ja niiden väliin kytketystä vahvistimesta, mittauserävarmuus on 0,15 prosenttia. Vääntömomentin mittauslaitteisto kalibroidaan kahden vuoden välein.

Vääntömomentin tarkan mittaamisen varmistamiseksi päivittäisessä koestustoiminnassa tulee tiettyjä toimintatapoja ottaa huomioon. Tehoanalysaattorin vääntömomentin näyttämä tulee asettaa nollassi ennen testauksen aloitusta säätämällä momenttianturin vahvistimen kautta tehoanalysaattorille tulevaa mittauserävarmuus signaalia kuvan 33 mukaisesti. Tämän lisäksi tulee tarkistaa, että myös vahvistimen näyttämän lukema on nollassa kuvan 34 mukaisesti.



**Kuva 33.** Tehoanalysaattorin vääntömomentin nollakohdan asettaminen.



**Kuva 34.** Vääntömomentin mittauslaitteistoon kuuluva HBM:n MP60-vahvistin.

Vääntömomentin näyttämä voidaan todentaa myös manuaalisesti vipuvarsimenetelmällä kuvan 35 mukaisesti lukitsemalla momenttianturi paikalleen lukitusraudalla, asettamalla momenttianturiin nähden kohtisuorasti vipuvarsi ja sen päähän punnus. Koestuslaboratoriossa menetelmää käytetään pääasiassa silloin, kun momentin mittauksessa epäillään virheellisyttä. Vipuvarren kohtisuorasti momenttianturille kohdistama vääntömomentti  $T$  lasketaan yhtälöllä

$$T = F \cdot r, \quad (39)$$

missä  $F$  on voiman suuruus ja  $r$  on vipuvarren pituus, joka tässä mittauksessa tarkoittaa momenttianturin ja punnuksen välistä etäisyyttä (Hurme 2016). Saatua tulosta verrataan tehoanalysointin näkymään ja mikäli arvojen välillä on eroavaisuutta, tulee tehoanalysointin näyttämää säätää valmistajan ohjeiden mukaisesti.





**Kuva 35.** Momentianturiin kiinnitetty vipuvarsi, jonka päähän on asennettu punnus.

Tarkimman mahdollisen mittaustuloksen saamiseksi edellä kuvattu vääntömomentin näyttämän tarkistus ja säätö tehtiin ennen kahta viimeistä hyötysuhdemittausta. Tämä osoittautui erittäin hyödylliseksi toimintatavaksi, koska kahdella eri testauspaikalla tehdyn hyötysuhdemittauksen tulos oli sama, kuten taulukosta 11 nähdään. Tämän lisäksi mittaushistorian keskiarvoon peilaten tuloksia voidaan pitää luotettavina.

Alaluvussa 5.2 tutkittiin testausaseman mittalaitteiden epävarmuuksien vaikutuksia hyötysuhdemittauksen tarkkuuteen. Tähän tutkimukseen käytettiin erästä mittaamisen luotettavuuden toteamiseen käytettyä hyötysuhdemittausta ja tulokseksi saatiin, että kyseisen

mittauksen hyötysuhteen maksimi- ja minimituloksen välillä voi olla eroa jopa 1,09 prosenttiyksikköä. Huomattavaa onkin, että vaikka koestuslaboratoriossa käytetään koestusstandardien vaatimukset täyttäviä mittalaitteita ja tutkimuksessa todettiin käytössä olevien mittalaitteiden tarkkuuksien olevan minimivaatimuksia tarkempia, on hyötysuhde-mittauksen tuloksessa mahdollista esiintyä isojakin eroavaisuuksia.

Taulukossa 11 esitetyistä tuloksista voidaan kuitenkin huomata, että samalla moottorille tehdyissä toistomittauksissa maksimi- ja minimitulosten välillä on eroa vain 0,24 prosenttiyksikköä. Tämä tutkimus vahvistaa siten alaluvussa 3.2 esitetyn Aumalan (163–164) toteamuksen, että virhekomponenttien virherajoihin perustuva epävarmuustarkastelu arvioi mittausepävarmuuden liian suureksi. Täten parempi tapa on käyttää toistomittauksiin ja tilastomatematiikkaan perustuvaa lähestymistapaa, joka tämänkin työn tutkimuksessa todettiin sopivaksi menetelmäksi. Kuvaa 30 mukailten luotiin jokaiselle testausasemalle oma ohjauskortti, jonka pohjana ovat tämän työn tutkimukset. Ohjauskortit toimivat tulevaisuudessa koestuslaboratorion sisäisen laadunvarmistuksen työkaluna.



## 7 YHTEENVETO

Tämän diplomityön päätarkoituksena oli varmistaa ABB oy:n Motors and Generators -yksikön Vaasan koestuslaboratorion TPO-sähkömoottoritestausaseman mittaamisen luotettavuus testausasemalle tehtyjen laitevaihdosten jälkeen. Tälle työlle oli tarve, koska koestuslaboratoriossa ei ollut olemassa aihepiiriin suoraan liittyvää ohjeistusta. Lisäksi tämän työn tuloksia haluttiin hyödyntää tuleviin, muille koestuslaboratorion testausasemille tehtäviin uudistusprojekteihin, joissa mittaamisen luotettavuus pitää varmistaa. Mittaamisen luotettavuuden pohjana olivat koestuslaboratorion tärkeimmän mittauksen, hyötysuhdemittauksen, tulokset, joka monipuolisena mittaustapahtumana antaa hyvän kuvan testausaseman suorituskyvystä. Työn tutkimuksen pohjana olivat aihepiirin kirjallisuus ja standardit, joita hyödyntämällä löydettiin tutkimuskysymykseen sopivat vastaukset.

Työn toisessa luvussa esiteltiin oikosulkumoottorin hyötysuhteiden mittaustavat laskentayhtälöineen. Koestuslaboratorion käyttämä mittaustapa perustuu standardin suosittelemaan epäsuoraan hyötysuhteen määrittämiseen, jossa häviöt voidaan eritellä. Kolmannessa luvussa paneuduttiin mittaamisen luotettavuuden teoriaan sekä pohdittiin aihepiiriä sähkömoottorin osalta. Mittaamisen luotettavuus on laaja käsite ja se pitää sisällään mittausvirheet, -epävarmuudet ja laskennalliset määrittäykset. Luku pitää sisällään myös kuvauksen tavoista, joilla voidaan varmistua luotettavasta mittauksesta. Näitä tapoja ovat esimerkiksi mittauksen käyttöedellytyksistä huolehtiminen ja sisäinen sekä ulkoinen mittaamisen laadunvarmistus.

Neljännessä luvussa esiteltiin uudistuksen kohteena olevan TPO-testausaseman vaihtuvat komponentit. Pääasiallinen syy testausaseman uudistustöihin oli laitteiston vanhentuminen. Viimeksi vuonna 1989 uudistetun testausaseman laitteisiin ei ollut enää saatavilla varaosia, joten yhdenkin laitteen rikkoutuessa testausasema olisi ollut pysähdyksissä. Laitteivaihdoilla siis pyrittiin ensi sijassa varmistamaan mittauslaitteiston luotettava toiminta.

Viidennessä luvussa käytiin läpi modernisoinnin jälkeisen mittaamisen luotettavuuden varmistaminen TPO-testausasemalla. Luotettavuuden varmistamisen pohjana oli hyötysuhdemittaus, joka oli toistettu useampaan kertaan koestuslaboratorion niin sanotulle kalibraattorimoottorille. Luvun 3 teoriaan perustuen sopivammaksi keinoksi varmistua mittaamisen luotettavuudesta katsottiin vertailukelpoiset toistomittaukset ohjauskortteineen. Asetettujen kriteerien perusteella mittaamisen luotettavuus voitiin todeta TPO-aseman uusitulla laitteistolla, joten työn voidaan katsoa päässeen tavoitteeseensa. Luvussa tutkittiin lisäksi testauspaikalla käytössä olleiden mittalaitteiden epävarmuuksien vaikutuksia hyötysuhteen mittaustulokseen.

Työn johtopäätökset pitävät sisällään analyysiä hyötysuhdemittauksen tuloksista sekä työn aikana havaituista tavoista, joiden avulla mittaamisen luotettavuutta voidaan parantaa. Tehtyjen tutkimusten pohjalta työssä esitetty ohjauskorttijärjestelmä laajennettiin koskemaan kaikkia koestuslaboratorion testauspaikkoja ja ne toimivat uutena osana koestuslaboratorion sisäistä laadunvarmistusta.

Työn jatkotutkimuksena voisi olla ohjauskortteihin perustuvat mittaamisen luotettavuuden tutkiminen kullakin testausasemalla ja mahdollisten parannustöiden selvittäminen. Vaikkakin testausjärjestelyt ovat kullakin testausasemalla samankaltaiset, mittalaitteissa on eroavaisuuksia, joiden epävarmuudet voivat vaikuttaa merkittävästikin hyötysuhteen mittaustulokseen. Johtopäätöksissä kuvattu momenttianturin näyttämän tarkistaminen vipuvarsimenetelmällä osoittautui tärkeäksi momentin mittaustarkkuuden osalta. Vipuvarren ja sen punnuksen asettaminen paikoilleen on kuitenkin melko vaivalloista, koska painavia kappaleita pitää siirrellä käsin. Kehittäisin siksi tätä osaa mittauksesta helpommaksi, koska se tekisi momentin näyttämän tarkistuksesta huomattavasti sujuvampaa.

## LÄHDELUETTELO

ABB (1994). *SAMI STAR frequency converters: functional description*. ABB oy, Drives. 60 s.

ABB (2001a). *Tekninen opas nro 1: Suora momentinsäätö – maailman kehittynein vaihtovirtakäyttökone* [verkkodokumentti]. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekninenopasnro1.pdf>

ABB (2001b). *Tekninen opas nro 7: Sähkökäytön mitoitus* [verkkodokumentti]. [Viitattu 26.10.2018]. Saatavissa: [https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen\\_opasnro7.pdf](https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf)

ABB (2017). *Unitrol 1000: Compact and powerful automatic voltage regulators*. Tuote-esite. ABB oy. Ref. 3BHS353843 E01. Rev. G.

ABB (2018a). *Low voltage motors: Motor guide*. 3<sup>rd</sup> edition. ABB oy. 108 s. ISBN 952-91-0728-5.

ABB (2018b). *Hardware manual: ACS880-307+A018 diode supply units*. ABB oy, Drives. 92 s.

ABB (2018c). *Hardware manual: ACS880-107 inverter units*. ABB oy, Drives. 172 s.

ABB (2018d). *ABB industrial drives: ACS880, multidrives 1,5 to 5600 kW*. Tuote-esite. ABB oy. Ref. 3AUA0000115037. Rev. V.

ABB (2019). *AC500* [verkkosivu]. [Viitattu 25.1.2019]. Saatavissa: <https://new.abb.com/plc/fi/ohjelmoitavat-logiikat/ac500>

- Andersson, P. H., H. Tikka (1997). *Mittaus- ja laatutekniikat*. 1. painos. Porvoo: WSOY. 323 s. ISBN 951-0-21440-x.
- Aumala, Olli (2006). *Mittaustekniikan perusteet*. 13. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 223 s. ISBN 951-672-321-7.
- De Almeida, A. T., F. T. E. Ferreira, J.F. Busch & P. Angers (2001). *Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low voltage three-phase, cage induction motors*. In IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 2001, May 15–16, 2001, New Orleans, United States of America.
- Hannuksela, Jukka (1995). *Automatisoidun moottorikoestuspaikan käyttöohjeet*. Teknkkotyö. Sähkötekniikka. Vaasan teknillinen oppilaitos. 68 s.
- Hiltunen, E., L. Linko, S. Hemminki, M. Hägg, E. Järvenpää, P. Saarinen, S. Simonen & P. Kärhä (2011). *Laadukkaan mittaamisen perusteet*. Vantaa: Multiprint Oy. 134 s. ISBN 978-952-5610-75-8.
- Hurme, Susanna (2016). *Luentomateriaali: statiikka ja dynamiikka*. 24.2.2016. Aalto-yliopisto.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2014). *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests*. 2<sup>nd</sup> edition. Geneva: IEC. 87 s.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2017). *IEC 60034-1 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*. 13<sup>th</sup> edition. Geneva: IEC. 71 s.

- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (2008). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)* [verkkodokumentti]. [Viitattu 8.1.2019]. Saatavissa: [https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2008.pdf](https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf)
- Keinänen, T., M. Järvinen (2014). *Mittaustekniikka*. 1. painos. Helsinki: Sanoma Pro oy. 182 s. ISBN 978-952-63-1478-5.
- Korpinen, Leena (1998a). *Sähkökoneet, osa 1* [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.11.2018]. Saatavissa: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)
- Korpinen, Leena (1998b). *Sähkökoneet, osa 2* [verkkodokumentti]. [Viitattu 24.1.2019]. Saatavissa: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf)
- Kovanen, Timo (1990). *Moottorikoestuksen automatisointi*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 112 s.
- LEM (2011). *ITC series current transducers: DC & AC class accuracy R current measurement*. Tuote-esite. LEM International SA. Ref. PTE111027/2.
- LEM (2018). *Current transducer ITC 4000-s* [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.3.2018]. Saatavissa: [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/itc\\_4000-s.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/itc_4000-s.pdf)
- Pantti, Tommi (2019). *Final testing procedures*. Motors ohjeet. Vaasa. ABB oy, Motors and Generators. 16 s.
- Ritz (2015). *Ritz instrument transformers*. Katalogi. Ritz Group. 100 s.
- Soini, Heikki (2014). *Huollot ja konerikon riskit: koekenttä TP0 & TP5*. Insinöörityö. Vaasan ammattikorkeakoulu. 94 s.

Vaisala (2016). *Miten tulkita mittalaitteiden suorituskykyä ja teknisiä tietoja*. Sovellusite. Ref. B211482FI-A. 4 s.

Ziegler, S., R. C. Woodward, H. Ho-Ching Lu & L. J. Borle (2009). *Current sensing techniques: a review*. In IEEE Sensors Journal, volume 9, issue: 4, April 2009. 354–376 s.