



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ida Similä

SÄHKÖMOOTTORIN TESTILAITTEIS-  
TON JA SÄHKÖNSYÖTÖN UUSIMINEN  
SEKÄ MITTAUSLUOTETTAVUUDEN  
VARMENTAMINEN

Tekniikka  
2019

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ida Similä
Opinnäytetyön nimi	Sähkömoottorin testilaitteiston ja sähkönsyötön uusiminen sekä mittausluotettavuuden varmentaminen
Vuosi	2019
Kieli	suomi
Sivumäärä	60 + 2 liitettä
Ohjaaja	Kari Jokinen

---

Tämä insinöörityö käsittelee sähkömoottoreiden testilaitteiston ja sähkönsyötön uusimista ja mittausluotettavuuden varmistamista Työn toimeksiantaja on Vaasan ABB Oy, Motors and Generators -yksikön koestuslaboratorio.

Työn tarkoituksena oli modernisoida vanhanaikaista testilaitteistoa ja samalla yhdenmukaistaa testilaitteistoa muiden uudempien testilaitteistojen kanssa. Työssä käydään läpi sekä vanha että uusi testilaitteisto, mittalaitteet ja laitteistojen toiminta. Projektin suunniteltua ja toteutunutta aikataulua käydään myös läpi. Lisäksi tutkitaan uuden testilaitteiston mittausluotettavuutta ja sen varmistamista ristiintestauksin vastaavien testilaitteistojen kanssa koestuslaboratoriossa.

Mittausluotettavuutta tutkitaan hyötysuhdemittauksen kannalta. Hyötysuhdemittaus käydään läpi standardin sekä koestuslaboratoriossa suoritettavan hyötysuhdemittauksen pohjalta. Lisäksi työssä perehdytään hieman mittausepävarmuustekijöihin. Työn tutkimusvaiheessa käydään läpi hyötysuhteen mittautuloksia eri koestuspaikoilla tehtyjen vertailumittausten pohjalta, sekä uuden laitteiston mittauksia.

Tehtyjen mittausten pohjalta voidaan todeta, että testilaitteiston mittausluotettavuus on vaatimusten mukainen ja voidaan sen perusteella ottaa käyttöön.

## ABSTRACT

Author	Ida Similä
Title	Modernization of Test Equipment and Power Supply for Electric Motors and Verification of the Measurement Reliability
Year	2019
Language	Finnish
Pages	60 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Kari Jokinen

---

The subject of this thesis is the power supply renewal for electric motors test equipment and verification of measurement reliability. Thesis was assigned by Vaasa ABB Oy, Motors and Generators unit's test laboratory.

The purpose of this work is to modernize the old fashion test equipment and harmonize the test equipment with the newer test equipment. This thesis reviews both the old and new test equipment, measurement devices and equipment operation. The planned project schedule and the actual schedule of the project are reviewed as well. In addition, this work examines the verification of measurement reliability by cross testing similar test equipment in the test laboratory.

The measurement reliability is examined with efficiency measurements. Efficiency measurement is reviewed based on standard and based on how efficiency measurement is done in the testing laboratory. Moreover, measurement uncertainty factors are examined. In the research stage, efficiency measurements are examined based on measurements with different the test places and based measurements done with new test equipment.

Based on measurements it can be stated that the test equipment measurement reliability is acceptable, and it can be deployed.

---

Keywords                    test equipment, renewal, measurement reliability and cross testing

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO.....	6
LIITELUETTELO .....	8
SYMBOLIT .....	9
1 JOHDANTO.....	11
1.1 Yleistä .....	11
1.2 Taustaa koestuslaboratoriosta .....	11
1.3 Työn tarkoitus .....	13
2 VANHA LAITTEISTO.....	14
2.1 Laitteisto .....	14
2.2 Mittalaitteet.....	15
2.3 Toiminta.....	16
3 UUSI LAITTEISTO .....	19
3.1 Laitteisto .....	19
3.2 Mittalaitteet.....	20
3.3 Toiminta.....	23
4 PURKU JA KÄYTTÖÖNOTTO .....	26
4.1 Purun ja käyttöönoton suunniteltu aikataulu.....	26
4.2 Vanhan laitteiston purku .....	27
4.3 Toteutunut aikataulu .....	27
4.4 Ohjausautomaatio ja sen käyttöönotto .....	29
5 HYÖTYSUHTEEN MITTAUS .....	30
5.1 Standardinmukainen epäsuora mittaus .....	30
5.1.1 Kuormitustesti .....	32
5.1.2 Osakuormatesti.....	33
5.1.3 Tyhjäkäyntitesti.....	33
5.1.4 Jatkuvat häviöt .....	34
5.1.5 Lisäkuormitushäviöt.....	35
5.2 Standardinmukainen suora mittaus .....	37

5.2.1	Testiohjelma.....	38
5.2.2	Hyötysuhteen määrittäminen .....	38
5.3	Hyötysuhdevaatimukset.....	39
6	HYÖTYSUHTEN MITTAUS KOESTUSLABORATORIOSSA	
	OIKOSULKUMOOTTORILLA.....	40
6.1.1	Visuaalinen tarkistus .....	41
6.1.2	Vastusmittaus ympäristön lämpötilassa .....	42
6.1.3	Kytken ja pyörimissuunnan tarkastaminen .....	42
6.1.4	Käynnistysvirta- ja momenttitesti .....	42
6.1.5	Lämpenemätesti .....	43
6.1.6	Osakuormatesti.....	44
6.1.7	Ylikuormitustesti.....	44
6.1.8	Oikosulkutesti .....	45
6.1.9	Tyhjäkäyntitesti.....	45
6.1.10	Tärinätasotesti .....	45
6.1.11	Eristyskoestus.....	46
6.1.12	Eristysvastusmittaus.....	47
6.1.13	Hyötysuhteen määrittäminen .....	47
7	MITTAUSEPÄVARMUUS.....	48
8	MITTAUSLUOTETTAVUUDEN VARMENTAMINEN.....	49
8.1	Testimoottorit ja testipaikat .....	49
8.2	Testitulokset ja analysointi .....	50
8.2.1	M3BP 80ME 2 -testit .....	50
8.2.2	M3BP 132SMC 6 -testit.....	51
8.2.3	Testitulosten analysointi.....	52
8.2.4	Tulosten perusteella tehtyjä lisämittauksia .....	53
8.2.5	Taajuusmuuttajatestaus .....	54
9	YHTEENVETO JA KEHITYSIDEAT.....	55
	LÄHTEET.....	57
	LIITTEET	

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Kuvassa vasemmalta oikealle: Generaattori G4, tasavirtakone G34 ja vetomoottori M4. ....	15
<b>Kuva 2.</b> Vanha TP4:n ohjauspulpetti. ....	15
<b>Kuva 3.</b> Toiminta 50 Hz:llä .....	17
<b>Kuva 4.</b> Toiminta 60 Hz:llä .....	18
<b>Kuva 5.</b> Uusi TP4-yleiskaavio. /18/ .....	19
<b>Kuva 6.</b> LEM IT60-S -virtamuuntimen periaatekuva. ....	22
<b>Kuva 7.</b> TP4-laitteet konehuoneessa. ....	23
<b>Kuva 8.</b> TP4-laitteet koestamon puolella. ....	24
<b>Kuva 9.</b> Hyötysuhteen määrittäminen menetelmän 2-1-1B mukaan. /2/ .....	31
<b>Kuva 10.</b> Jäännöshäviödatan tasoittaminen.....	36
<b>Kuva 11.</b> Momentin mittaus. ....	37
<b>Kuva 12.</b> Hyötysuhteen määrittäminen menetelmän 2-1-1A mukaan. /2/ .....	38
<b>Kuva 13.</b> Hyötysuhteen määrittäminen koestuslaboratoriossa.....	41
<b>Kuva 14.</b> Tärinätasojen mittauspisteet. /4/ .....	45
<b>Kuva 15.</b> Tärinätasotestin hyväksymisrajat. /4/ .....	46
<b>Kuva 16.</b> Eristyskoestus staattorin vaiheelle U. /4/.....	46
<b>Kuva 17.</b> Eristyskoestus staattorin sisäisellä kytkennällä. /4/ .....	46
<b>Kuva 18.</b> Staattorin käämityksen eristysvastusmittaus. /4/ .....	47
<b>Taulukko 1.</b> Testipenkkien koot/rajoitukset .....	12
<b>Taulukko 2.</b> Vanhan TP4:n laitteet .....	14
<b>Taulukko 3.</b> Vanhan TP4:n mittalaitteet.....	16
<b>Taulukko 4.</b> Uuden TP4:n laitteet.....	20
<b>Taulukko 5.</b> Uuden TP4:n mittalaitteet.....	21
<b>Taulukko 6.</b> Suunniteltu ja toteutunut aikataulu .....	26
<b>Taulukko 7.</b> Jäähtymäkäyrän vastusmittauksen aloitusaika sähkön syötön katkaisusta moottorin nimellistehon mukaan. /4/ .....	43
<b>Taulukko 8.</b> Eristysvastusmittauksen hyväksymisrajat. /4/ .....	47
<b>Taulukko 9.</b> Testeissä käytetyt moottorit.....	49

<b>Taulukko 10.</b> TP22:n mittalaitteet. ....	50
<b>Taulukko 11.</b> M3BP 80ME 2 -hyötysuhdetulokset .....	51
<b>Taulukko 12.</b> M3BP 132SMC 6 -hyötysuhdetulokset.....	52
<b>Taulukko 13.</b> Taajuusmuuttajatestissä käytetty moottori. ....	54

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** M3BP 80ME 2 -testitulokset

**LIITE 2.** M3BP 132SMC 6 -testitulokset



**SYMBOLIT**

$\cos \varphi$	Tehokerroin
$f$	Taajuus, Hz
$I$	Virta, A
$k_{\theta}$	Lämpötilakorjauskerroin
$n$	Pyörimisnopeus
$P$	Teho, W
$P_0$	Syöttöteho tyhjäkäynnissä, W
$P_1$	Ottoteho, W
$P_2$	Antoteho, W
$P_{el}$	Sähköteho, W
$P_{fe}$	Rautahäviöt, W
$P_{fw}$	Hankaus ja tuuletushäviöt, W
$P_c$	Vakiohäviöt, W
$P_L$	Kuormahäviöt, W
$P_{Lr}$	Jäännöshäviöt, W
$P_{LL}$	Lisäkuormahäviöt, W
$P_{mech}$	Mekaaninen teho, W
$P_s$	Staattohäviöt
$P_r$	Roottorihäviöt

$P_T$	Kokonaishäviöt, W
$R$	Käämiresistanssi, $\Omega$
$R_{II}$	Keskimääräinen vaiheesta vaiheeseen resistanssi, $\Omega$
$s$	Jättämä
$T$	Momentti, Nm
$U$	Jännite, V
$U_0$	Tyhjäkäyntijännite, V
$U_N$	Nimellisjännite, V
$\eta$	Hyötysuhde
$\theta$	Lämpötila

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Yleistä

Tämä opinnäytetyö tehtiin ABB Oy:n Moottorit ja generaattorit -yksikölle Vaasassa. Työssä perehdytään koestuslaboratoriossa olevan sähkömoottorin testilaitteiston ja sähkönsyötön uusimiseen ja mittausluotettavuuden varmentamiseen.

Koestuslaboratorio on yksi osasto Moottorit ja generaattorit -yksikössä. Koestuslaboratoriossa on yhteensä 19 työntekijää, joista 4 on toimistossa toimihenkilötehtävissä ja loput 15 koestuslaboratoriossa koestajina.

Kaikki tehtaalta valmistuvat moottorit eivät tule koestuslaboratorioon testeihin. Koestuslaboratoriossa tehtävät testit ovat asiakkaiden erikseen tilaamia koestuksia, laivaluokituslaitosten sertifiointeja, tuotekehityksen protokoestuksia tai laatu-tapauksien tutkintaan liittyviä testejä.

## 1.2 Taustaa koestuslaboratoriosta

Koestuslaboratoriossa on yhteensä kahdeksan tyyppitestipaikkaa. Kaksi näistä on KK-rakennuksessa, TP21 ja TP22. Niitä syöttää yksi generaattori ja niillä on yhteiset mittalaitteet, jolloin vain toinen testipenkki voi olla käytössä kerrallaan. Loput kuusi testipaikkaa sijaitsevat MM-rakennuksessa, TP0, TP1, TP2, TP4, TP5 ja TP9. Lisäksi on yksi sähkönsyöttö äänihuoneessa, jossa voidaan tehdä äänitestejä moottorin ollessa tyhjäkäynnissä, eli kuormakonetta ei ole. Taulukosta 1 löytyy testipaikkojen runkokoko- ja tehorajoitukset. Runkokokorajoitus määräytyy testipaikalla olevien moottorialustojen ja laippahyllykiinnikkeiden perusteella ja tehorajoitus määräytyy laitteiston mukaan.

**Taulukko 1.** Testipenkkien koot/rajoitukset

Testipaikka	Runkokoko	Suurin sallittu teho
TP9	315-450	1 500 kW
TP5	280-400	1 000 kW
TP0	250-355	750 kW
TP1	200-315	300 kW
TP2	132-250	75 kW
TP4	71-132	7,5 kW
TP21	160-250	45 kW
TP22	71-132	100 Nm momenttianturi suurin käytössä oleva
PP2	71-112	
VSD I	71-250	
VSD II		

TP21 ja TP22 on rakennettu vuonna 2015, joka on automaatio-ohjattu testipaikka. TP9 on rakennettu vuonna 2010, jossa on myös automaatio-ohjaus (uudistus automaation yhdenmukaistukseen tarpeellinen). TP5 on rakennettu vuonna 1995 ja on myös automaatio-ohjattu. TP5-generaattorin staattori ja roottori on käämitty uudelleen vuonna 2014. Generaattorin vetomoottori on uusittu vuonna 2015 (uudistus automaation yhdenmukaistukseen tarpeellinen). TP0 on rakennettu vuonna 1992. Sen uusiminen on aloitettu 2018 vuoden lopulla ja valmistui 2019 vuoden alkupuolella. Generaattori jää alkuperäiseksi, mutta generaattorin vetomoottorit ja testattavan moottorin jarrumoottorit vaihtuvat uusiin. Automaatio-ohjaukset uudistetaan ja yhdenmukaistetaan TP21 kanssa. TP1, TP2 ja TP4 on tuotu koestuslaboratorioon 1980-luvun alkupuolella. TP2 -laitteet ovat muuten alkuperäiset, mutta jarrugeneraattori on uusittu vuonna 1998. TP1:n generaattorin roottori on uudelleenkäämitty vuonna 2011. TP1:llä ja TP2:lla ei ole ollenkaan automaatio-ohjausta. Uusimpana KK-rakennukseen on siirretty Ruotsin moottoritehtaalta VSD-laboratorio vuonna 2017, jossa on kaksi VSD-testipenkkiä (VSD I ja VSD II) ja yksi tyyppitestilaitteisto DOL-käyttöön (PP2). VSD-laboratorion testilaitteistoa ei kuitenkaan ole vielä otettu koestuskäyttöön. /13/

### 1.3 Työn tarkoitus

Tämän opinnäytetyön taustalla on koestuspaikka TP4:n laitteiston ja sähkönsyötön uudistaminen. TP4:n testilaitteisto on käyttöikänsä vanha. Vanhan laitteiston huoltaminen on hankalaa ja kallista, koska varaosat ovat vaikeasti saatavilla. Uudistuksen myötä laitteiston käytettävyys paranee ja yhdenmukaistuu muiden koestuspaikkojen kanssa, ohjausautomaation kannalta erityisesti. Testilaitteiston suojauksia lisätään, jolloin voidaan hyödyntää myös miehittämätöntä aikaa. Tämän myötä koekentälle saadaan lisää kapasiteettia pienten moottoreiden osalta. Koestuspaikka on ollut yhtenäinen TP1- ja TP2 -koestuspaikkojen kanssa. Moottoreiden 60 Hz testeissä vain yhdellä näistä koestuspaikoista on voinut olla kerrallaan 60 Hz käytössä, koska niillä on sama tasasuuntaaja käytössä. Uudistuksen myötä TP4 on kokonaan itsenäinen laitteisto.

Projektin suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi ABB. Asennukset ja purkutyöt hoiti eräs alihankkijayritys. Pääkomponentit toimitti ABB.

## 2 VANHA LAITTEISTO

### 2.1 Laitteisto

Testipaikan TP4:n pääosia ovat tahtigeneraattori G4, tasavirtakone G34, tahtimoottori M4, jarrugeneraattori JG4. Jarrugeneraattori JG4 on uusittu vanhan jarrugeneraattorin rikkoutumisen vuoksi vuonna 2017. Lisäksi näitä ohjaava PLC ja ohjausjärjestelmää on päivitetty samassa yhteydessä. Koska jarrugeneraattoria ohjaava taajuusmuuttaja on lisätty, ei enää kuormitusvastusta tarvita. Seuraavissa osissa vanhan TP4:n toimintaa ja laitteistoa kuvataan näiden uudistuksen jälkeisessä tilassa. Taulukossa 2 on esitetty vanhan TP4:n laitteet.

**Taulukko 2.** Vanhan TP4:n laitteet

Laite	Tyyppi	Nimellisarvot	Muuta
Generaattori G4	Tahtigeneraattori	56 kVA, 1 000 rpm	$U_m = 100 \text{ V}$ $I_m = 11 \text{ A}$
Tasavirtakone G34	Tasavirtakone	55 kW, 1 000 - 1 200 rpm, 240 V, 250 mA	$U_m = 162 \text{ V}$ $I_m = 2,4 \text{ A}$
Vetomoottori M4	Tahtimoottori	48 kW, 1000 rpm, 99 mA, 380 VY	$U_m = 185 \text{ V}$ $I_m = 5,8 \text{ A}$
Jarrugeneraattori JG4	Oikosulkumoottori	22 kW, 400 V, 1 500 rpm $T_s/T_n = 2,6$ $T_{max}/T_n = 3$	KytKentä vastapäivään, vahvennettu eristys TAMU käyttöön.
Jarrugeneraattorin taajuusmuuttaja FC1	ACS880-11-087A-3	$P_N = 45 \text{ kW}$ , $I_N = 87 \text{ A}$	Turvamoduuli, modbus väylämoduuli, takoliityntäkortti DTC



**Kuva 1.** Kuvassa vasemmalta oikealle: Generaattori G4, tasavirtakone G34 ja vetomoottori M4.



**Kuva 2.** Vanha TP4:n ohjauspulpetti.

## 2.2 Mittalaitteet

Mittalaitteet ovat tärkeä osa testilaitteiston toimintaa. Taulukossa 3 on lueteltu vanhalla TP4:lla käytössä olleet mittalaitteet, niiden malli ja valmistaja, tarkkuudet ja nimellisarvot.

**Taulukko 3.** Vanhan TP4:n mittalaitteet.

Laite	Valmistaja ja malli	Nimellistiedot	Tarkkuus
Tehoanalysointilaitte	Fluke Norma 5000, PP50	Jännite: 0,3 – 1 – 3 – 10 – 30 – 100 – 300 – 1 000 V (8 aluetta) Virta: 30 – 100 mA – 0,3 – 1 – 3 – 10 A (6 aluetta)	0,1 % (0,05 % rg + 0,05 % rg)
Vastusmittari	Cropico DO5000	3 mΩ – 30 kΩ	± (0,03 % Rdg + 0,01 % FS)
Momenttianturi	Magtrol TM308/011	20 Nm Max speed 20 000 rpm	<±0,1 %
Momenttianturi	Magtrol TMB311/411	100 Nm Max speed 4 000 rpm	<±0,1 %
Lämpöpiirturi	Yokogawa LR8100E		
Virtamuuntajat	P. Gossen & Co GmbH, Stw 2	Ensiö: 5/10/20/50/100 A Toisio: 5 A	CL 0,2

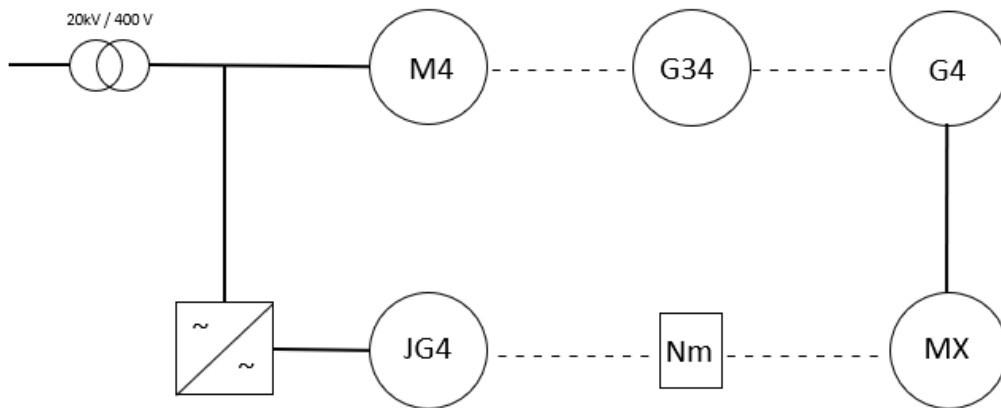
Virtamuuntajan tarkkuusluokka on 0,2. Tällöin ensiön nimellisvirralla virhe on prosentteina 0,2 %. Pienempiä virtoja kuin nimellisvirtaa mitattaessa virhe kasvaa.

### 2.3 Toiminta

Tahtigeneraattori G4, tasavirtakone G34 ja tahtimoottori M4 on kytketty mekaanisesti yhteen Kuvan 1 mukaisesti. Testattava moottori ja jarrugeneraattori kytketään mekaanisesti yhteen, joiden väliin asennetaan momenttianturi. Testilaitteistossa on käytössä eri kokoisia momenttiantureita, jotka ovat vaihdettavissa testien välissä. Momenttianturi valitaan riippuen testattavan moottorin nimellismomentista. Momenttianturi pyritään valitsemaan niin, että sen nimellisarvot eivät ylity, tällöin mittaustarkkuus on parempi. Jarrugeneraattorin perään on kytketty takometri mittaamaan pyörimisnopeutta.

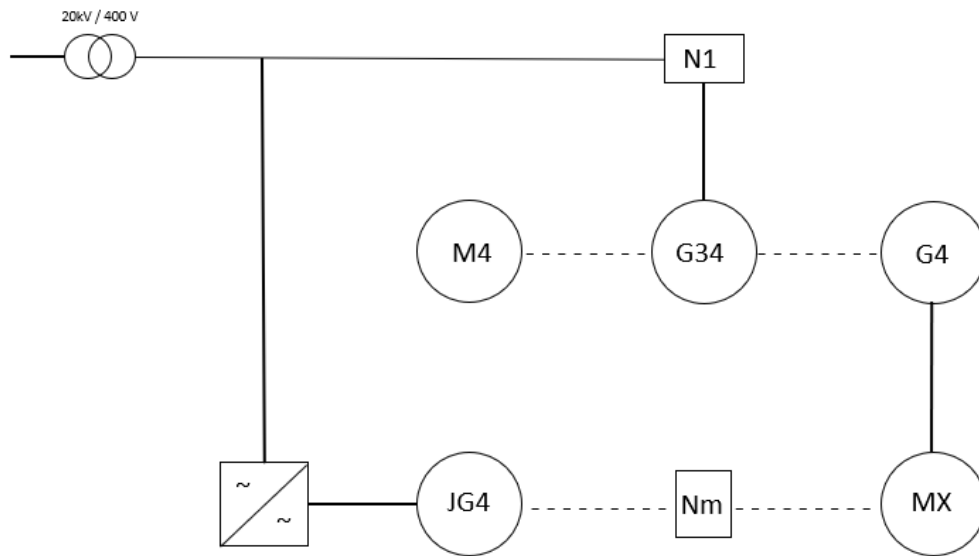


Laitteistoa ohjataan kytkimillä ja potentiometreillä. Laitteistoon lisätyllä PLC:llä ohjataan vain jarrugeneraattorin taajuusmuuttajaa. Sen ohjausautomaatiosta on tehty hyvin yksinkertainen toteutus, koska tiedossa on ollut koko laitteiston uusiminen.



**Kuva 3.** Toiminta 50 Hz:llä

Koestusta suoritettaessa 50 Hz:llä tahtimoottori M4 ottaa suoraan verkosta syötön ja pyörittää tahtigeneraattoria G4, joka syöttää sähköä testattavalle moottorille MX. Testimoottorin kuormakoneena toimii jarrugeneraattori JG4. Jarrugeneraattorin taajuusmuuttaja syöttää jarrugeneraattorin tuottaman tehon takaisin samaan verkkoon. Tällöin tahtimoottori M4 ottaa verkosta vain laitteistosta aiheutuneet häviötehot. Kuvassa 3 katkoviiva tarkoittaa mekaanista liitosta ja jatkuva viiva sähköistä kytkentää. /6/

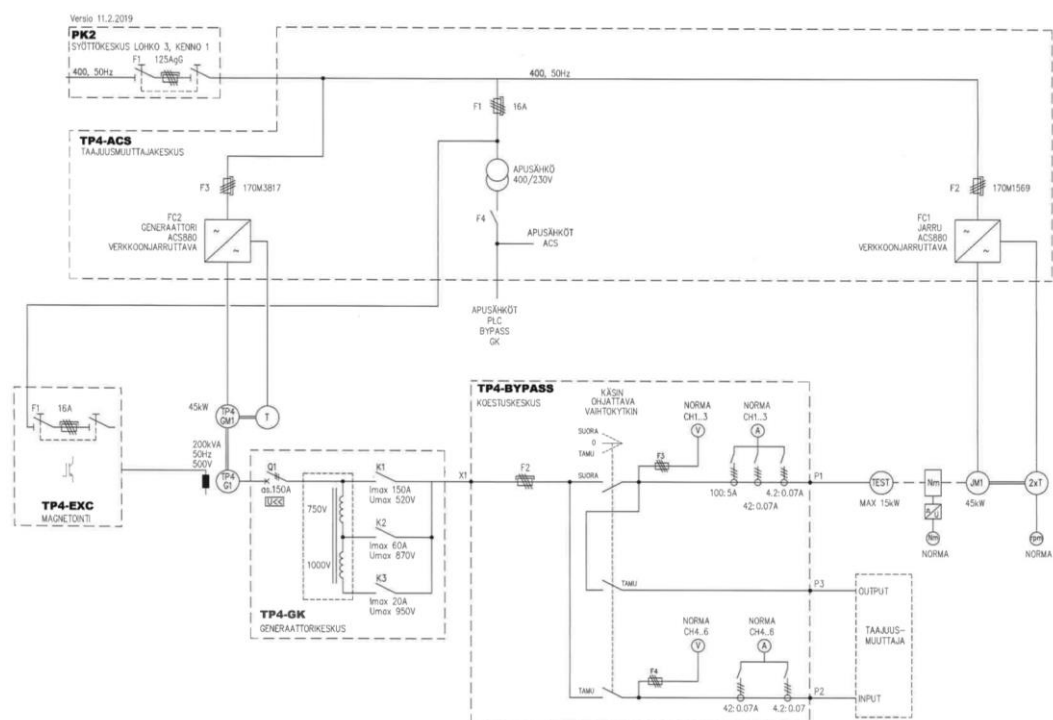


**Kuva 4.** Toiminta 60 Hz:llä

Kun koetus suoritetaan 60 Hz:llä, laitteisto toimii hieman eri tavalla kuin 50 Hz:llä. Tällöin tasavirtakonetta syötetään tasasuuntaajalla N1. Tasavirtakone toimii tällöin generaattorin vetomoottorina ja tahtikoneen M4 syöttö verkosta katkaistaan ja se pyörii letkassa mukana. Generaattorin nopeus on säädettävä niin, että testattavalle moottorille saadaan syöttötaajuudeksi 60 Hz. Jarrugeneraattorin teho syötetään taajuusmuuttajan kautta takaisin verkkoon. Kuvassa 4 katkoviiva tarkoittaa mekaanista liitosta ja jatkuva viiva sähköistä kytkentää. /6/

### 3 UUSI LAITTEISTO

Uusi testilaitteisto on paljon yksinkertaisempi kuin vanha laitteisto. Laitteisto on automaatiolla ohjattu ja näin ollen laitteiston käyttäminen on paljon helpompaa. Tässä luvussa käydään läpi uuden laitteiston pääkomponentit ja mittalaitteet sekä niiden toiminta. Kuvassa 5 on esitetty uuden laitteiston yleiskaavio. Kuvassa on esitetty pääkomponentit ja tehoanalysaattorille menevät virran-, jännitteen-, momentin ja nopeuden mittaukset. Tarkemmin toiminta on kuvattu kappaleessa 3.3.



**Kuva 5.** Uusi TP4-yleiskaavio. /18/

#### 3.1 Laitteisto

Uuden TP4:sen laitteisto on suurimmalta osin uusittu. Testipenkki, jarrugeneraattori ja sitä ohjaava taajuusmuuttaja pysyvät vanhoina. Jarrugeneraattorin ja sen taajuusmuuttajan tiedot löytyvät vanhan laitteiston esittelyssä taulukosta 2 ja TP4:n uudet laitteet ja niiden tiedot on listattu taulukkoon 4.

**Taulukko 4.** Uuden TP4:n laitteet.

Laite	Tyyppi	Nimellisarvot	Muuta
Generaattori TP4-G1	Vierasherätteinen tah- tikone	200 kVA, 600 V, 60 Hz, 1 800 rpm	$U_m = 36 \text{ V}$ $I_m = 1,8 \text{ A}$
Generaattorin ve- tomoottori TP4- GM1	Oikosulkumoottori	45 kW, 400 V, 1 500 rpm	KytKentä vastapäi- vään, vahvennettu eristys TAMU käyt- töön.
Generaattorin ve- tomoottorin taa- juusmuuttaja FC2	ACS880-11-105A-3	$P_N = 55 \text{ kW}$ $I_N = 105 \text{ A}$	Turvamoduuli, modbus väylämo- duuli, takoliityntä- kortti DTC
Muuntaja TP4-GK	Väliulosotto toisiossa	117 kVA, 450 V, 150 A 76 kVA, 750 V, 60 A 35 kVA, 1000 V, 20 A	450 V, $I_{\max} 150 \text{ A}$ 750 V, $I_{\max} 60 \text{ A}$ 1 000 V, $I_{\max} 20 \text{ A}$

Generaattorin vetomoottorin taajuusmuuttaja lisätään jarrugeneraattorin taajuusmuuttajan kanssa samaan taajuusmuuttajakeskukseen. Magnetointilaitteeksi oli suunniteltu alun perin Unitrol 1005, se kuitenkin rikkoutui ennen käyttöönottoa ja tilalle vaihdettiin YMEA-01-magnetointilaite.

Muuntaja on varustettu väliulosottokykimellä, joka on muuntajan toisiossa. Väliulosottokykimellä jännitettä voidaan säätää vain silloin, kun muuntaja on jännitteetön [7]. Muuntajan avulla saadaan testattavalle moottorille syötettyä suurempaa jännitettä kuin generaattori itsessään pystyy syöttämään.

### 3.2 Mittalaitteet

Uuden TP4:n mittalaitteet pysyvät pääosin samoina kuin vanhalla TP4:llä. Samat mittalaitteet kuin vanhalla TP4:lla ovat tehoanalysaattori, momenttianturit, vastusmittari ja lämpöpiirturi, nämä on merkitty tähdellä taulukossa 5. Virta-anturit vaihtuvat uusiin. Uusina laitteina lisätään momenttianturin vahvistin ja tasajännitelähde. Edellä mainitut mittalaitteet ovat koestuspaikalle kiinteitä mittalaitteita.

Ne voidaan tarvittaessa vaihtaa, tai korvata toisella vastaavalla mittalaitteella, esimerkiksi toisen rikkoutuessa tai sen ollessa kalibroinnissa.

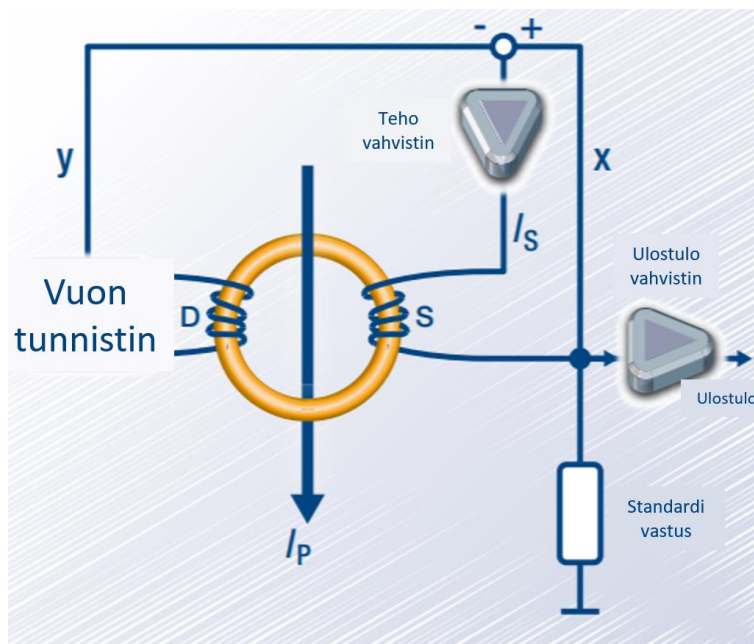
**Taulukko 5.** Uuden TP4:n mittalaitteet.

Laite	Valmistaja ja malli	Nimellistiedot	Tarkkuus
Tehoanalysointilaitte* <sup>*</sup>	Fluke Norma 5000, PP50	Jännite 0,3 – 1 000 V Virta 30 mA – 10 A	0,1 % (0,05 % rg + 0,05 % rg)
Vastusmittari* <sup>*</sup>	Seaward Cropico DO5000	3 mΩ – 30 kΩ 10 μA – 10 A	0,03 % ± (0,03 % R <sub>dg</sub> +0,01 % FS)
Momentianturi* <sup>*</sup>	Magtrol TM308/011	20 Nm Max speed 20 000 rpm	<±0,1 %
Momentianturi* <sup>*</sup>	Magtrol TMB311/411	100Nm Max speed 4 000 rpm	<±0,1 %
Lämpöpiirturi* <sup>*</sup>	Yokogawa LR8100E		
Virtamuunnin	LEM IT 60-s	Ensiön mitta-alue: 42 A (RMS) Toisio: -100 – 100 mA Muuntosuhde: 1:600	0,02725 %
Virtamuuntaja	Ritz, KSW 73	100/5 A, 5 VA	CL 0,2
Tasajännitelähde	Yokogawa 7651		Jännite 0,01 % Virta 0,02 %
Momentianturin vahvistin	Magtrol 3411		Nopeus 0,01 % Momentti 0,02 %

\* = sama laite kuin vanhalla TP4:llä

Virtamuuntimia ja virtamuuntajia on kolme kappaletta, yksi jokaiselle vaiheelle. Ritz-virtamuuntajassa on suljettu ydin(rengaskela), jossa on ensiökäämitys ja kiinteät ensiöliittimet. Toisiokäämi on asennettu ytimen rengaskelaan. /11/ Uudet LEM-virtamuuntimet perustuvat Fluxgate-teknologiaan. Toiminta perustuu virran mittaamiseen epäsuorasti virtajohtimen ympärillä olevaa magneettikenttää hyödyntäen. Mittamuuntajassa on renkaan muotoinen magneettista materiaalia oleva sydän, jonka läpi mitattava johdin kulkee. Johtimessa kulkeva virta  $I_p$  muodostaa ympärilleen magneettikentän  $\Phi_p$ , jonka suuruuden magneettivuon tunnistin mittaa.

Magneettivuon perusteella säädin muodostaa kompensointivirran  $I_s$  käämiin, joka on  $N_s$  kierrosta sydämen ympärillä. Kompensointivirta muodostaa sydämeen vastakkaisen vuon. Virran mittaus perustuu virtamuuntimen sydämen nollavuohon. Suurena etuna Fluxgate-teknologiassa on pieni nollapistepoikkeama. Tämä mahdollistaa hyvään tarkkuuteen. /8/, /12/



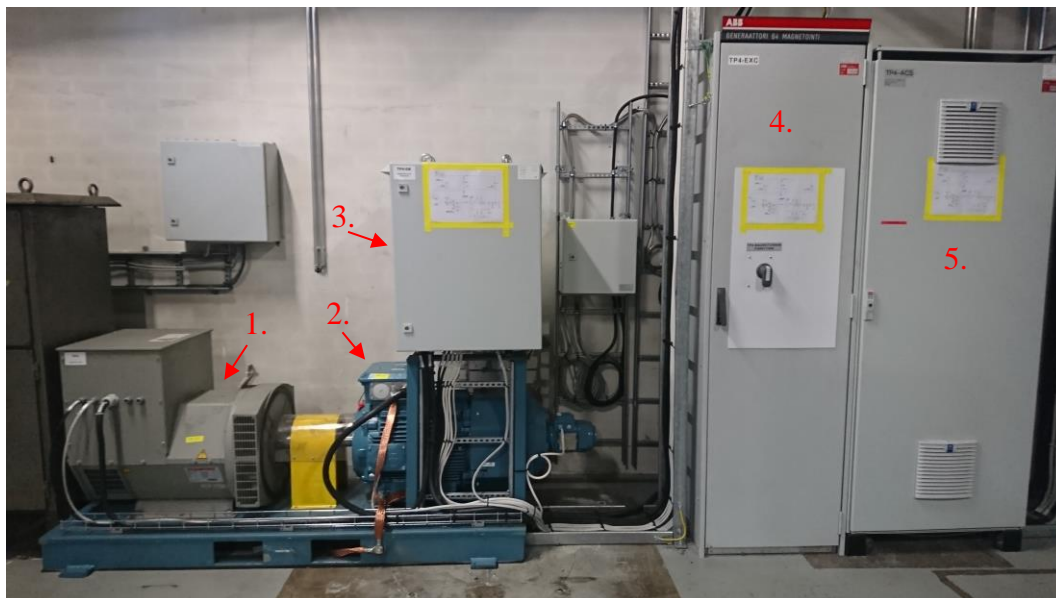
**Kuva 6.** LEM IT60-S -virtamuuntimen periaatekuva.

Tehoanalysointilaitteet kerää erilaisia mittausdataa eri mittalaitteilta, joiden perusteella se osaa näyttää ja laskea dataa. Tehoanalysointilaitteet kerää dataa muun muassa virtaantureilta, momentianturilta, jarrumoottorin takometrilta ja näiden perusteella se osaa näyttää momentin, pyörimisnopeuden, akselitehon, jättämän, virta- ja jännitetiedot, sähkötehon, taajuuden ja tehokertoimen.

Tasajännitelähteellä annetaan milliampeeriviesti, joka säätää moottorille menevää jännitettä. Tätä ei kuitenkaan tarvita kuin tietyissä testeissä, koska automaatiolla säädetään jännite haluttuun arvoon.

### 3.3 Toiminta

Kuvassa 7 on esitetty konehuoneen puolella olevat laitteet. Kuvan alla on listattu kuvaan numeroidut laitteet.



**Kuva 7.** TP4-laitteet konehuoneessa.

1. Generaattori G4
2. Generaattorin vetomoottori GM4
3. Muuntajakeskus TP4-GK
4. Magnetointikeskus TP4-EXC
5. Taajuusmuuttajakeskus TP4-ACS

Uudella TP4:lla on kaksi ACS880-verkkoonjarruttavaa taajuusmuuttajaa, jotka sijaitsevat taajuusmuuttajakeskuksessa. Toinen taajuusmuuttaja ohjaa testimootorin jarrugeneraattoria ja toinen ohjaa generaattorin vetomoottoria. Jarrugeneraattorilta ja generaattorin vetomoottorilta on molemmilta takometrillä nopeuden mittausta, joista takaisinkytkennät taajuusmuuttajille. Jarrugeneraattorin takometriltä on myös mittaus tehoanalysaattorille. PLC AC500:lla ohjataan taajuusmuuttajia ja magnetointia. Magnetointilaite on magnetointikeskuksessa. Magnetoinnilla ohjataan generaattoria. Generaattorilta menee syöttö muuntajan kautta testattavalle

moottorille. Jännitteet alle 520 V, 520 – 750 V ja 750 – 1 000 V jänniteportaata menevät muuntajan toisiokäämien ulosottojen kautta.



**Kuva 8.** TP4-laitteet koestamon puolella.

1. Bypass- ja PLC -keskus
2. Jarrugeneraattori JG4
3. Testimoottori MX
4. Momenttianturi
5. Lämpöpiirturi
6. Vastusmittari
7. Tehoanalysaattori
8. Momenttianturin vahvistin
9. Tasajännitelähde
10. Automaatitietokone
11. Motlab-tietokone
12. Jarrugeneraattorin ja generaattorin vetomoottorin vahinkokäynnistyksen estokytkimet sekä hätä-/seis -painike

Bypass-keskuksessa valitaan joko syöttö suoraan testimoottorille tai testitajuusmuuttajan kautta vaihtokytkimellä. Bypass-keskuksessa sisällä on valittavissa olevat virtamuuntimet ja virtamuuntajat. Virtamuuntimet ovat käytössä suora- ja



TAMU-käytöissä. Taajuusmuuttajatestissä virran- ja jännitteenmittaus on tehoanalyysointia ennen ja jälkeen taajuusmuuttajan. Pienempiä virtoja varten virtamuuntimesta on kierretty 10 kertaa. Virtamuuntajat ovat käytössä vain suorassa käytössä ja tarkoitettu käytettäväksi vain starttitesteihin, joissa virrat nousevat korkeammaksi. Virta-antureilta on mittausta tehoanalyysointia varten. Momentin mittausta momenttianturilla on testimoottorin ja jarrugeneraattorin välillä. Momenttianturin ja pyörimisen akselien päällä on pyörimissuoja, johon on automaatiolla ohjelmoitu pyörimisen esto, jos suoja ei ole paikoillaan. Momenttianturilta menee signaali vahvistimelle, joka näyttää momentin ja pyörimisnopeuden. Kuten vanhalla TP4:llä, eri kokoiset momenttianturit ovat vaihdettavissa testien välillä, riippuen testattavan moottorin nimellismomentista.

Turvallisuusvarusteina on jarrugeneraattorin ja generaattorin vetomoottorin vahinkokäynnistyksen estokytkimet. Näillä varmistetaan, että automaatiolta niitä ei vahingossa pystytä käynnistämään silloin kun ei pitäisi. Laitteisto on varustettu hätäseis-painikkeilla, joka on liitetty koekentän yhteiseen hätä-/seis -piiriin. Hätä-/seis -painikkeita on TP4:llä yhteensä kolme. Yksi on vahinkokäynnistysestokytkimien yhteydessä ohjauspöydän luona, toinen on Bypass-keskuksen viereisessä pienessä keskuksessa sekä kolmas on PK2-keskuksessa takaseinällä. Usealla hätä-/seis -painikkeella taataan turvallisuutta koestajan työskennellessä eri alueilla.

## 4 PURKU JA KÄYTTÖÖNOTTO

Tässä luvussa käydään projektin aikataulu läpi. Taulukossa 6 on esitetty projektin suunniteltu ja toteutunut aikataulu. Aikataulu on myös käyty alla sanallisesti läpi molempien osalta ja syyt miksi aikataulu ei ollut täysin suunnitellun mukainen kaikilta osin.

### 4.1 Purun ja käyttöönoton suunniteltu aikataulu

**Taulukko 6.** Suunniteltu ja toteutunut aikataulu

Viikot	50	51	52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Työpöydän purku																	
Purku																	
Generaattorin asennus																	
Taajuusmuuttajan asennus																	
Magnetoinnin asennus																	
Bypass- ja PLC-keskuksen asennus																	
Käyttöönotto																	
Testaus																	
Suunnitellut esiasennukset																	
Suunnitellut varsinaiset asennukset																	
Toteutunut																	

Taulukossa 6 keltaisella on esitelty suunnitellut esiasennukset. Tummanvihreällä on esitelty suunniteltu aikataulu purkutöille, asennuksille, testeille ja käyttöönotolle. Vaaleanvihreällä värillä on esitetty todellinen toteutunut aikataulu.

Viikoilla 50 ja 51 suunniteltu generaattori, generaattorin vetomoottorin ja muuntajapakettin esiasennukset ja modifioinnit. Viikoille 1 ja 2 suunniteltu Bypass- ja PLC-keskuksen sekä magnetoinnin asennukset paikoilleen. Ensimmäiset vertailutestit vanhalla TP4-laitteistolla ja TP22:lla suunniteltu tehtävän ennen vanhan

TP4-laitteiston purkamista viikkojen 1 ja 2 aikana. Varsinaiset asennukset ja purkutöiden oli suunniteltu alkavan viikolla 3 ja suunniteltu sähkökatko, jonka aikana purkutyöt on saatava niin pitkälle, että sähköt voidaan kytkeä muille koestuspaikoille ja töitä TP4:lla voidaan jatkaa turvallisesti, vaikka muilla koestuspaikoilla on sähköt. Samassa yhteydessä TP4:n hätä-/seis -piiri on irrotettava koestuslaboratorion yhteisestä hätä-/seis -piiristä. Asennusten suunniteltiin jatkuvan viikolle 4 purkutöiden jälkeen. Viikoilla 5 ja 6 suunniteltiin suoritettavan käyttöönotto ja laitteiston testaukset.

## **4.2 Vanhan laitteiston purku**

Ennen purkamisen aloittamista testipaikka on irrotettava koestuslaboratorion hätä-/seis -piiristä sähkökatkon aikana. Hätä-/seis -piirissä on kaikki MM -rakennuksen koestuspaikkojen hätä-/seis -painikkeet kytkettynä sarjaan.

Purkutöissä haasteena nähtiin TP1- ja TP2 -laitteistojen keskinäinen yhteys. TP4:n erottaminen näistä tulisi tehdä mahdollisimman nopeasti, että niillä voitaisiin jatkaa koestuksia normaalisti mahdollisimman pian. Sähkökatkon jälkeisen, muiden kuin TP4, testilaitteistojen ylösajon yhteydessä TP1 käynnistyksen kanssa oli ongelmia erotuksen jälkeen.

## **4.3 Toteutunut aikataulu**

Viikolla 1 suoritettiin ensimmäinen vertailutesti vanhalla TP4-laitteistolla pienemmällä testattavalla moottorilla ja viikolla 2 testattiin isompi moottori. Testatut moottorit on esitetty taulukossa 9. Viikolla 3 testattiin isompi moottori TP22:lla ja viikolla 4 pienempi moottori. Testaukset TP22:lla viivästyivät suunnitellusta ison työkuorman vuoksi.

Viikolla 2 paikoilleen saatiin Bypass-keskus, generaattori, vetomoottori ja muuntajapaketti. Generaattoripaketin alustaan täytyi tehdä modifikaatioita ennen paikoilleen asennusta. Alle lisättiin kumimatto tärinän vaimentamiseksi, alustan kiinnitystassut lisättiin alustan sivuihin kiinnityksen ja irrottamisen helpottamiseksi.

Viikolla 3 TP4:n kytkennät saatiin purettua niin, että yhteyttä muihin koestuslaitteisiin ei ole ja työskentelyä voitiin jatkaa turvallisesti, vaikka sähköt olivat muilla koestuslaitteistoilla. Myös vanha koestuspulpetti ja mittauskeskus KTP4 saatiin purettua suunnitellun mukaisesti.

Viikolla 4 suoritettiin generaattorin vetomoottorin taajuusmuuttajan asennus jarrugeneraattorin taajuusmuuttajan kanssa samaan keskukseen ja magnetointi keskuksen asennus. Uusi ohjauspöytä saatiin paikalleen. Kaapelointia keskusten ja laitteiden välillä aloitettiin.

Viikon 5 aikana tehtiin ohjauspöytään sähköasennukset ja tarvittavat kytkennät sekä kaapeloinnit keskusten välillä jatkuu. Viikolla 6 kaapeloinnit jatkuivat vielä ja PLC:n automaatiosovelluksen testaus voitiin aloittaa, kun kaapeloinnit saatiin valmiiksi. Automaation käyttöönottoa käsitellään lisää kappaleessa 4.4.

Viikon 7 alussa, kun automaatiosovelluksen testit oli tehty, voitiin aloittaa uudella testilaitteistolla ristiintestausmittaukset. Viikon lopussa pidettiin alustava käyttöönottopalaveri, 13.2.2019. Käyttöönottopalaverissa todettiin tehtyjen ristiintestauksen perusteella, että koestuspaikka voidaan ottaa käyttöön ja aloittaa normaali testien teko. Testien tulokset esitetty ja analysoitu myöhemmin kappaleessa 8.2.

Viikolla 12 oli päivän mittainen sähkökatko, jonka yhteydessä asennetaan lisää pistorasioita mittalaitteille työpöydän yhteyteen, laitteisto liitetään koekentän yhteiseen hätä-/seis -piiriin ja lisätään puuttuvia kaapelimerkintöjä. Viikolla 14 alkuvuikosta tehtiin vielä viimeiset vertailumittaukset TP4:llä, kun huomattiin, että yksillä virta-antureilla ei ole vielä tehty vertailumittauksia. Lopullinen käyttöönottopalaveri pidettiin viikon 14 lopussa, 3.4.2019.

Suunniteltua ja toteutunutta aikataulua verratessa voidaan todeta, että aikataulussa pysyttiin melko hyvin. Poikkeuksena alustavia asennuksia ei ehditty tehdä suunnitellun mukaisesti. Lisäksi käyttöönotto ja laitteiston testaus venyi asennustöiden viivästymisen takia. Yksi syistä oli asennusten toteuttaneen alihankkijan vähäiset käytössä olevat työntekijäresurssit tälle projektille. Lopullinen käyttöönotto venyi,

muun muassa puuttuvien sähköasennusten vuoksi, joita suoritettiin viikolla 12 sähkökatkon yhteydessä. Sähkökatko vaikutti kaikkiin MM-koestuslaboratorion koestuspaikkoihin, ja suuren työkuorman takia sähkökatkon ajankohta venyi.

#### **4.4 Ohjausautomaatio ja sen käyttöönotto**

Ohjausautomaation toiminnallisissa testauksissa käytettiin samoja moottoreita kuin lopullisissa vertailutesteissä. Automaatio on suunniteltu koestuslaboratoriossa tehtävien testien suorittamiseen. Näin ollen testauksessa käytiin mahdollisimman laajasti testilaitteistolla tehtävät testit läpi, jotta voitiin varmistua, että kaikki ohjaukset toimivat oikein. Automaatiosovellus toteutettiin vastaavanlaiseksi kuin aikaisemmin uusittujen TP21/TP22- ja TP0 -automaatiosovellukset.

Automaation käyttöönotto sujui nopeasti ja hyvin aikataulun mukaan, vaikka aloitus viivästyikin hieman asennusten takia. Taajuusmuuttajakäytön toimintoja testattaessa havaittiin huomattavia häiriöitä. Tämän perusteella kytkentöihin tehtiin parannuksia Bypass- ja PLC -keskuksessa lisäämällä maadoituksia. Momenttianturin vahvistimen syöttö siirrettiin vanhasta keskuksesta uuteen TP0-keskukseen väliaikaisesti, mikä vähensi häiriöitä merkittävästi. Viikon 12 sähkökatkon aikana lisätyistä pistorasioista yksi on muun muassa momenttianturin vahvistimen syöttöä varten.

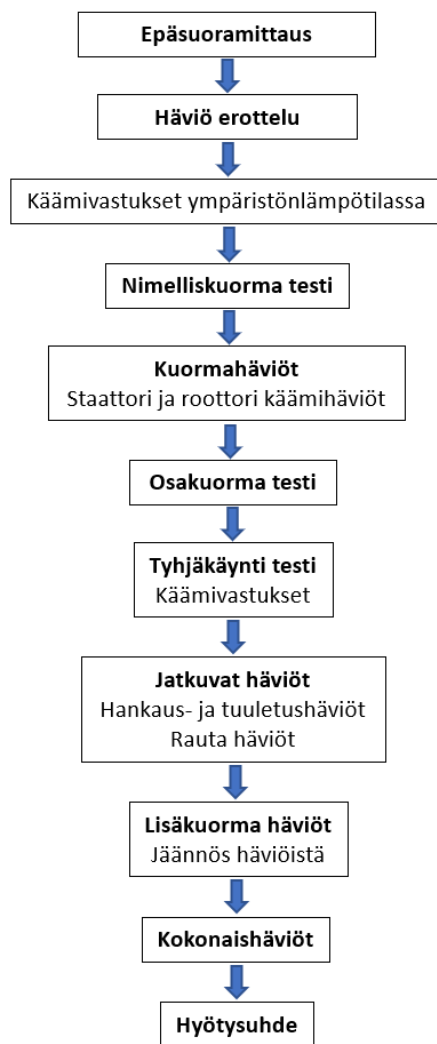
## 5 HYÖTYSUHTEEN MITTAUS

Uudelle testilaitteistolle tehtiin vertailumittauksia mittausluotettavuuden varmentamiseksi. Testiksi valittiin hyötysuhdemittaus, koska se on oleellisimpia testejä, joita koestuslaboratoriossa tehdään. Tässä luvussa käydään läpi standardien vaatimukset hyötysuhteen mittaamiselle.

Standardi IEC60034-2-1(2014) määrittää millä menetelmillä häviöt ja hyötysuhteet on määritettävä. 2-1-1B -menetelmällä hyötysuhde määritetään epäsuoralla mittauksella, laskemalla häviöiden kautta, mitä käytetään oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittämisessä. 2-1-1A -menetelmän mukaan hyötysuhde määritetään suoralla mittausmenetelmällä. Tätä käytetään taajuusmuuttajakäyttöisten moottoreiden hyötysuhteen määrittämiseksi. Standardi määrittää, mitkä testit, missä järjestyksessä ja mitä suureita on mitattava hyötysuhdetta määritettäessä.

### 5.1 Standardinmukainen epäsuora mittaus

Kuvassa 9 on esitetty standardin määrittämä lohkoakaavio hyötysuhteen määrittämisestä epäsuoralla mittausmenetelmällä. Epäsuorassa mittauksessa hyötysuhde määritetään summaamalla eri häviöitä.



**Kuva 9.** Hyötysuhteen määrittäminen menetelmän 2-1-1B mukaan. /2/

Hyötysuhde lasketaan moottorille lämpötilakorjatusta ottotehosta  $P_{1,\theta}$ , joka on määritelty kuormitustestissä kappaleessa 5.1.1.

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

Kokonaishäviöt lasketaan määritettyjen rautahäviöiden, korjattujen hankaus- ja tuuletushäviöiden, kuormahäviöiden ja lisäkuormahäviöiden summasta

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL}, \quad (2) /2/$$

Näistä lämpötilakorjattu roottorihäviö  $P_{r\theta}$  voidaan määrittää osakuormatelistä kohdan 5.1.2 mukaan.

Tyhjäkäyntitestin avulla voidaan määrittellä kohtien 5.1.3 ja 5.1.4 mukaan rautahäviöt  $P_{fe}$  sekä tuuletus- ja hankaushäviöt  $P_{fw}$ .

Lisäkuormitushäviöiden  $P_{LL}$  määritetään jäännöshäviöiden kautta. Laskemiseen tarvitaan myös momenttia  $T$  ja siitä laskettua antoteho  $P_2$  kohdan 5.1.5 mukaisesti.

Kaiken tämän laskennan tekee Motlab-ohjelma automaattisesti testisarjan tulosten perusteella.

### 5.1.1 Kuormitustesti

Ensin mitataan moottorin käämityksen kylmävastusarvot ympäristön lämpötilassa. Sen jälkeen ajetaan kuormitustesti moottorin nimellisarvoilla, kunnes lämpenemä on tasaantunut niin, että lämpenemän muutos on 1 K tai vähemmän puolen tunnin aikana. Kuormitustestissä on mitattava ottoteho  $P_1$ , momentti  $T$ , virta  $I$ , jännite  $U$ , pyörimisnopeus  $n$ , taajuus  $f$ , sisään menevän jäähdytysilman lämpötila  $\theta_c$  ja käämityksen lämpötila nimelliskuormalla  $\theta$ . Kuormitustestin perusteella määritellään kuormahäviöt, joita ovat staattorikäämihäviöt ja roottorikäämihäviöt ja ne suhteutetaan 25°C lämpötilaan.

Korjaamaton staattorikäämihäviö

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad (3)$$

suhteuttaminen 25°C lämpötilaan

$$P_{s\theta} = P_s \times k_\theta \quad (4)$$

korjaamaton roottorikäämihäviö

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s, \quad (5)$$

missä

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f}$$



suhteuttaminen 25°C lämpötilaan

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times s_{\theta} \quad (6)$$

missä

$$s_{\theta} = s \times k_{\theta}$$

Lämpötilakorjaus moottorin ottoteholle korjattujen staattori- ja roottorihäviöiden määrittämisen jälkeen

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}) \quad (7) / 2/$$

### 5.1.2 Osakuormatesti

Osakuormatesti on suoritettava välittömästi kuormitustestin jälkeen moottorin toimintalämpötilassa. Mitattavat osakuormapisteet ovat 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 % ja 25 % nimelliskuormasta. Testi on suoritettava mahdollisimman nopeasti, että vältetään moottorin lämpötilamuutoksilta. Staattori- ja roottorikäähäviöt on laskettava jokaisessa osakuormapisteessä.

Syöttötaajuus osakuormapisteiden välillä saa vaihdella korkeintaan 0,1 %.

Staattorikäähäviöt

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

Korjaamaton roottorikäähäviö

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s, \quad (9)$$

missä

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f} \quad (10)$$

### 5.1.3 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntitestillä määritellään rauta-, tuuletus- ja hankaushäviöt. Noin 110 %, 100 %, 95 % ja 90 % nimellisjännitteestä mitattuja suureita käytetään määrittämään rautahäviöitä. Noin 60 %, 50 %, 40 % ja 30 % nimellisjännitteestä mitattuja

suureita käytetään määrittämään tuuletus- ja hankaushäviöt. Tyhjäkäyntitesti on tehtävä kuumalle moottorille välittömästi osakuormatestin jälkeen. Testi on suoritettava mahdollisimman nopeasti ja jännitteet on mitattava alenevassa järjestyksessä.

$R_0$  on määriteltävä välittömästi ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin. Interpoloitu käämin resistanssi tulee laskea jokaiselle pisteelle interpoloimalla resistanssit ennen ja jälkeen lineaarisesti sähkötehon  $P_0$  kanssa. Oikosulkukoneille  $R_0$  on  $R_{II,0}$ , missä resistanssimittaus on epäkäytännöllinen, johtuen erittäin matalista resistansseista, lasketut arvot ovat sallittuja. Vaihtovirtakoneissa resistanssi voidaan myös määrittellä mittaamalla staattorikäämin lämpötila käämiin asennetuilla lämpötilasensoreilla. Resistanssi jokaiselle jännitepisteelle voidaan määrittää käämin lämpötilasta suhteuttamalla mitattuun resistanssiin ja lämpötilaan ennen testiä. /2/

#### 5.1.4 Jatkuvat häviöt

Tyhjäkäynnin käämihäviöt vähennetään tyhjäkäynnin ottotehosta, mistä saadaan jatkuvat häviöt, joka on summa hankaus- ja tuuletus- sekä rautahäviöistä.

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

missä

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

Tuuletus- ja hankaushäviöt saadaan, kun neljästä tai useammasta peräkkäisestä tyhjäkäyntipisteestä noin 60 % ja 30 % välillä jännitteestä muodostetaan käyrä jatkuvista häviöistä  $P_c$  verrattuna jännitteen neliöön  $U_0^2$ . Ekstrapoloidaan suora viiva nollajännitteeseen. Määritellään nollajännitteen risteyskohta, mikä katsotaan olevan hankaus- ja tuuletushäviöt  $P_{fw0}$  noin synkroninopeudella.

Rautahäviöt saadaan, kun noin 90 % ja 110 % välillä jännitteen arvoista tehdään käyrä  $P_{fe} = P_c - P_{fw}$  verrattuna jännitteeseen  $U_0$ . Rautahäviöiden määrittämiseksi täydellä kuormalla, tulee laskea sisäinen jännite, joka ottaa huomioon jännitteena- lenemän pääkäämissä.

Moottorilla:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \sin\varphi\right)^2} \quad (13)$$

Generaattorilla:

$$U_i = \sqrt{\left(U + \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \sin\varphi\right)^2}, \quad (14)$$

missä

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U * I}; \sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (15)$$

Rautahäviöt täydellä kuormalla tulee interpoloida rautahäviöiden ja jännitteen  $U_0$  käyrästä jännitteellä  $U_i$ . /2/

### 5.1.5 Lisäkuormitushäviöt

Lisäkuormitushäviöt  $P_{LL}$  määritellään jäännöshäviöiden  $P_{Lr}$  avulla. Jäännöshäviöt määritellään jokaiselle kuormapisteelle vähentämällä ottotehosta.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}, \quad (16)$$

moottorille:

$$P_2 = 2\pi * T * n \quad (17)$$

generaattorille:

$$P_1 = 2\pi * T * n \quad (18)$$

Missä korjatut tuuletus- ja hankaushäviöt ovat

$$P_{fw} = P_{fw0} * (1 - s)^{2,5}, \quad s = 1 - \frac{p \times n}{f} \quad (19)$$

Jäännöshäviö data tasoitetaan käyttäen lineaarista regressioanalyysiä (**Kuva 10**).

Perustuen häviöiden ilmaisemiseen kuorman momentin neliönä seuraavasti

$$P_{LL} = A \times T^2 + B \quad (20)$$

A ja B ovat vakioita, jotka määritellään kuudesta kuormituspisteestä. Kulmakerroin A määritetään seuraavasta

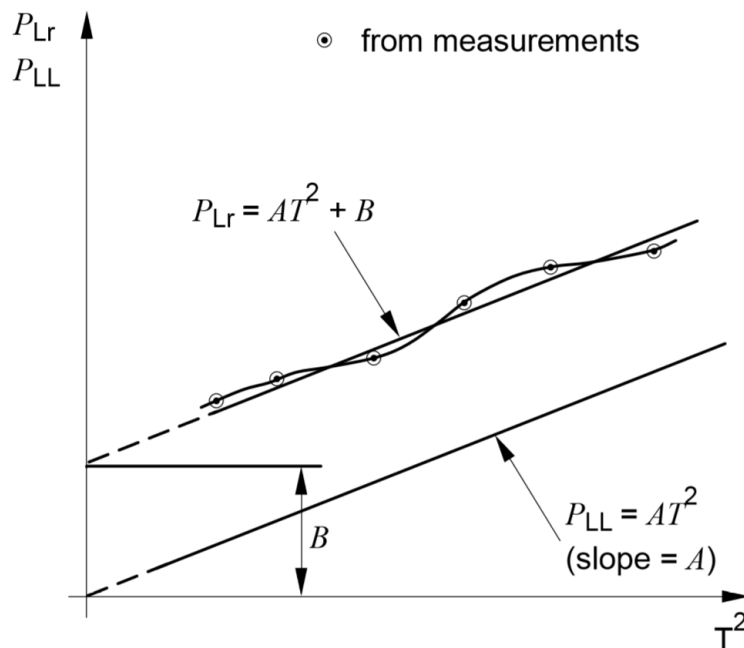
$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (21)$$

ja leikkauspiste B seuraavasta

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

i on kuormapisteiden määrä summattuna.

Leikkauspiste B tulisi olla huomattavasti pienempi (<50 %) kuin kuorman lisähäviöt  $P_{LL}$  nimellismomentilla. Jos näin ei ole, mittaus saattaa olla virheellinen ja tulisi tarkastaa.



IEC 1310/07

**Kuva 10.** Jännöshäviödatan tasoittaminen.

Korrelaation korjauskerroin lasketaan seuraavasta

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

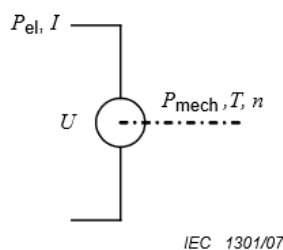
Kun korrelaation korjauskerroin  $\gamma$  on alle 0,95, poista huonoin piste ja toista regressio. Jos  $\gamma$  nousee yli tai yhtä suureksi kuin 0,95, käytä toista mittausta, jos  $\gamma$  pysyy alle 0,95, testi on epätydyttävä ja virhe ilmenee laitteistossa tai testilukemissa tai molemmissa. Virheen lähde tulee tutkia ja korjata ja testi tulee toistaa. Kun testitulokset ovat riittävät, korrelaation korjauskertoimen tulisi olla 0,98 tai parempi. Kun kulmakerroin  $A$  on määritetty, lisäkuormahäviöt jokaiselle kuormapisteelle tulee määrittää seuraavasti:

$$P_{LL} = A \times T^2 \quad (24) /2/$$

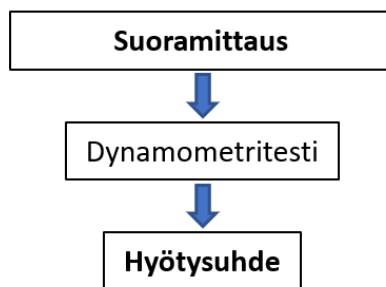
## 5.2 Standardinmukainen suora mittaus

**Kuva 12** on esitetty lohkokaavio hyötysuhteen määrittämisestä suoralla mittausmenetelmällä. Tätä menetelmää käytetään muun muassa taajuusmuuttajakäyttöisten moottoreiden, reluktanssi- ja kestopagneettimoottoreiden hyötysuhteen määrittämiseen.

Tällä menetelmällä koneen mekaaninen teho  $P_{\text{mech}}$  määritellään mittaamalla akselin vääntömomentti ja pyörimisnopeus. Staattorin sähköteho  $P_{\text{el}}$  mitataan samassa testissä.



**Kuva 11.** Momentin mittaus.



**Kuva 12.** Hyötysuhteen määrittäminen menetelmän 2-1-1A mukaan. /2/

### 5.2.1 Testiohjelma

Liitä testikone kuormakoneeseen momenttimittarin tai dynamometrin kanssa. Käytä konetta testissä vaaditulla kuormalla, kunnes lämpötasapaino on saavutettu (muutos 1 K puolessa tunnissa tai vähemmän). /2/

### 5.2.2 Hyötysuhteen määrittäminen

Hyötysuhde määritetään seuraavalla kaavalla

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (25)$$

Moottorille:

$$P_1 = P_{el}; P_2 = P_{mech} \quad (26)$$

Generaattorille:

$$P_1 = P_{mech}; P_2 = P_{el} \quad (27)$$

missä

$$P_{mech} = 2\pi * T * n \quad (28)$$

Taajuusmuuttajatestin vaatimukset tulevat IEC60034-2-3 -standardista. /2/

### 5.3 Hyötysuhdevaatimukset

Toleranssi hyötysuhteelle voidaan määrittää alla olevan mukaan riippuen moottorin tehosta, joka on määritelty standardissa IEC60034-1:2017.

Alle ja 150 kW koneet:

-15 % arvosta ( $1-\eta$ )

Yli 150 kW koneet:

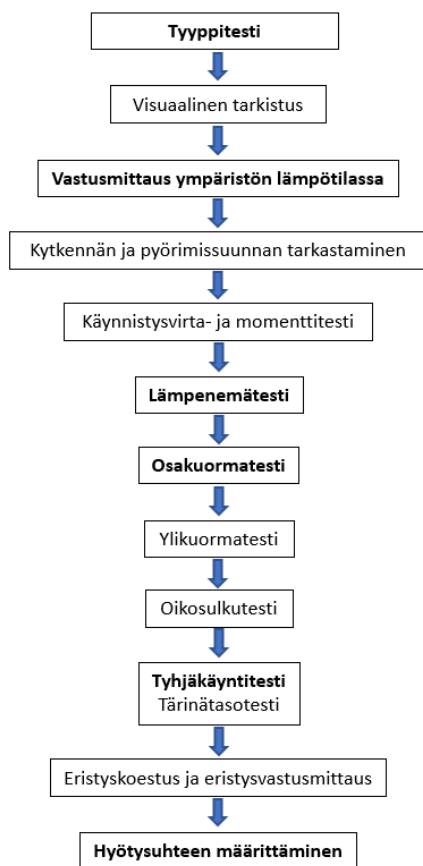
-10 % arvosta ( $1-\eta$ )

Hyötysuhteena  $\eta$  voidaan käyttää mittaushistorian keskiarvoa tai moottorin laskelmalla tai arvokilvellä määriteltyä hyötysuhdetta.

## **6 HYÖTYSUHTEEN MITTAUS KOESTUSLABORATORIOSSA OIKOSULKUMOOTTORILLA**

Koestuslaboratoriossa oikosulkumoottorille tehtävä hyötysuhdemittaus käytöille S1-S4, S6, S8 ja S10 määritetään epäsuoran hyötysuhdemittauksen pohjalta. Käytön S9 moottoreille, kun moottoria syötetään taajuusmuuttajalla, hyötysuhde määritetään suoran hyötysuhdemittauksen pohjalta. Tässä luvussa käydään läpi koestuslaboratorion koestusohjelma epäsuoraa mittausmenetelmää hyödyntäen, joka noudattaa standardeja IEC60034-1 (2017) ja IEC40034-2-1(2014). Lisäksi tehdään muutamia muita testejä, jotka eivät kuulu hyötysuhdemittaukseen, mutta tehdään muihin tarkoituksiin.





**Kuva 13.** Hyötysuhteen määrittäminen koestuslaboratoriossa.

Kuvassa 13 vahvennetulla tekstillä on kuvattu standardin vaatimat testit hyötysuhteen määrittämiseksi. Normaalilla tekstillä on kuvattu lisätestejä, mitä koestuslaboratoriossa tehtävässä tyypitestissä tehdään, jolla hyötysuhde määritetään.

### 6.1.1 Visuaalinen tarkistus

Visuaalisessa tarkistuksessa tarkastetaan, että moottori on tilatun mukainen. Moottorista on tarkastettava seuraavat asiat:

- arvokilven tiedot
- tuulettimen tai tuuletinmoottorin, pääkytkentäkotelon, kytkentäalustan ja muiden lisälaitteiden oikeellisuus
- vesiliittimien oikeellisuus
- kaapelitiivisteet
- akseli ja kiila

- maalin väri ja
- asennusasento. /4/

### 6.1.2 Vastusmittaus ympäristön lämpötilassa

Vastukset mitataan seuraavista syistä:

- varmistetaan käämityksen kytkentöjen olevan oikein
- huomataan mahdollinen vaiheidenvälinen epätasapaino
- voidaan verrata laskettuja ja mitattuja vastusarvoja
- saadaan tarkka kylmävastusarvo, jota käytetään lämpenemän määrittämiseen lämpenemätestin jälkeen.

Käämityksen vaihevastukset mitataan vaiheiden U-V, U-W ja V-W väliltä. Vastukset mitataan vastusmittarilla käyttäen nelijohdinmenetelmää. Lämpenemätestin aikana käämityksen lämpötila mitataan käämitykseen asennetuilla lämpötilantureilla, jos mahdollista.

Mahdollisten lämpötilantureiden ja käämityksen lämmittimien vastusarvot mitataan niiden riviliittimiltä. /4/

### 6.1.3 Kytkennän ja pyörimissuunnan tarkastaminen

Standardin IEC60034-1 mukaan moottori pyörii myötäpäivään, katsoen moottorin D-päästä, kun syöttökaapelin vaiheet on kytketty järjestykseen L1, L2, L3 -> U, V, W kytkentäkotelossa. Moottoria pyöritettäessä vastapäivään, kytketään kaksi vaihetta ristiin. /4/

### 6.1.4 Käynnistysvirta- ja momenttitesti

Käynnistysvirta- ja momenttitestissä selvitetään käynnistysmomentin ( $T_L$ ) ja nimellismomentin ( $T_N$ ) suhde sekä käynnistysvirran ( $I_s$ ) ja nimellisvirran ( $I_N$ ) suhde. Testi tehdään mekaanisesti lukitulla roottorilla. Mittaus tehdään nimellisjännitteellä ja taajuudella, jos ei mahdollista, käytetään redusoitua jännitettä. /4/

### 6.1.5 Lämpenemätesti

Lämpenemätesti tehdään, että voidaan määrittää käämityksen, D-pään laakerin ja rungon sekä muiden tärkeiden moottoriosien lämpenemä. Testattavaa moottoria syötetään testilaitteiston generaattorilla, joka syöttää testattavan moottorin nimellisjännitettä ja taajuutta. Testattavaa moottoria kuormitetaan mekaanisesti kuormakoneella valitulla momentilla. Koestuslaboratorion testilaitteilla on myös mahdollista testata oikosulkukonetta generaattorina. /4/

Moottorin lämpötilatiedot tallennetaan testin ajan. Moottoria kuormitetaan, kunnes kaikki lämpötilat ovat tasaantuneet ja lämpötilamuutos on alle 1 K puolessa tunnissa. Moottorin pysäytyksen jälkeen staattorin käämityksen lämpötilan nousu määritetään vastusmenetelmällä. Moottorin pysäytyksen ja sähkönsyötön katkaisun jälkeen mitataan jäähtymäkäyrä vastusmittarilla käyttäen nelijohdinmenetelmää. Jäähtymäkäyrämittausta tarvitaan hyötysuhteen määrittämiseen. Pysäytyksen jälkeinen vastusarvo ekstrapoloidaan jäähtymäkäyrästä. Jäähtymäkäyrämittaus on aloitettava mahdollisimman pian sähkönsyötön katkaisusta. Taulukossa 7 on osoitettu, milloin viimeistään mittaus on aloitettava.

**Taulukko 7.** Jäähtymäkäyrän vastusmittauksen aloitusaika sähkönsyötön katkaisusta moottorin nimellistehon mukaan. /4/

Nimellisteho $P_N$ (kW)	Aika sähkönsyötön katkaisusta (s)
$P_N \leq 50$	30
$50 < P_N \leq 200$	90
$200 < P_N \leq 5000$	120

Lämpenemä  $\theta_2 - \theta_a$  määritetään seuraavasti:

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (29)$$

joka voidaan muotoilla käytännön syistä seuraavasti:

$$\theta_2 - \theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} * (k + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a, \quad (30)$$

missä

$\theta_1$  = käämityksen lämpötila (°C) resistanssin  $R_1$  mittaushetkellä

$\theta_2$  = käämityksen lämpötila (°C) resistanssin lämpenemätestin lopussa

$\theta_a$  = jäähdytysaineen lämpötila (°C) lämpenemätestin lopussa

$R_1$  = käämityksen vastusarvo lämpötilassa  $\theta_1$

$R_2$  = käämityksen vastusarvo lämpenemätestin lopussa

$k$  = käämijohdinmateriaalin lämpötilakerroin vastukselle 0 °C. Kuparilla 235 K ja alumiinilla 225 K, ellei toisin määritelty.

Eristysluokassa B maksimi lämpötila ympäristön lämpötilassa 40 °C on 130 °C ja hotspotmarginaali on 10 °C, sallittu lämpenemä on 80 K. Eristysluokassa F maksimi lämpötila ympäristön lämpötilassa 40 °C on 155 °C ja hotspotmarginaali on 10 °C, sallittu lämpenemä on 105 K. /4/

### 6.1.6 Osakuormatesti

Osakuormapisteet mitataan 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 115 % ja 125 % momentilla nimellismomentista. Testattavan moottorin nimellismomentin ollessa hyvin pieni, voidaan käyttää muita osakuormapisteitä. /4/

### 6.1.7 Ylikuormitustesti

Testillä varmistetaan, että moottorin momentti on tarpeeksi suuri, että se kestää hetkellisiä ylikuormitustilanteita. Testi suoritetaan 160 %:n nimellismomentilla 15 sekunnin ajan. /4/

### 6.1.8 Oikosulkutesti

Oikosulkutesti tehdään moottorin roottori mekaanisesti lukittuna. Syöttöjännitettä säädetään siten, että saadaan nimellisvirta. Mittaus otetaan usealla eri jännitteen arvolla. Tälle testille ei ole standardinmukaisia eikä ABB:n omia vaatimuksia. /4/

### 6.1.9 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntitesti tehdään testattavan moottorin nimellisjännitteellä ja -taajuudella sekä muilla jännitteen arvoilla muodostaen tyhjäkäyntikäyrän. Moottorin akselin annetaan pyöriä vapaana. Tyhjäkäyntikäyrää tarvitaan tuuletus- ja hankaushäviöiden sekä rautahäviöiden määrittämiseen hyötysuhdemittauksessa. /4/

### 6.1.10 Tärinätesti

Moottorin tärinätesti mitataan standardin IEC60034-14 mukaisesti. Poiketen standardista, vain tärinän nopeus mitataan. Mittaus suoritetaan moottorin pyöriesissä tyhjäkäynnissä, vapaalla kiinnityksellä riippuen tai pehmustetulla alustalla, moottorin ollessa vaaka-asennossa riippumatta moottorin asennusasennosta. Tärinätesti mitataan viidestä eri mittauspisteestä, jotka on esitetty kuvassa 14. Tärinätestin raja-arvot on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 14.** Tärinätestin mittauspisteet. /4/

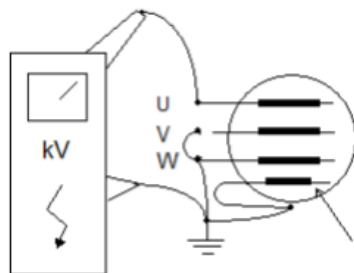
Table 2. Limits of maximum vibration magnitude in displacement and velocity.

Shaft height mm		56 ≤ H ≤ 132		H > 132	
Vibration grade	Mounting	Displacement μm	Velocity mm/s	Displacement μm	Velocity mm/s
A	Free suspension	45	2,8	45	2,8
	Rigid mounting	-	-	37	2,3
B	Free suspension	18	1,1	29	1,8
	Rigid mounting	-	-	24	1,3

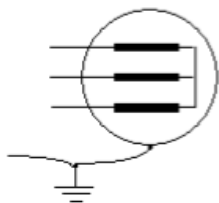
**Kuva 15.** Tärinätasotestin hyväksymisrajat. /4/

### 6.1.11 Eristyskoestus

Eristyskoestus tehdään moottorin käämitykselle, lämpötila-antureille ja käämityksen lämmittimille. Testillä varmistetaan, ettei eristyksessä ole heikkoja kohtia tai mahdollista oikosulkua. Mittausperiaate on esitetty kuvissa 16 ja 17.



**Kuva 16.** Eristyskoestus staattorin vaiheelle U. /4/



**Kuva 17.** Eristyskoestus staattorin sisäisellä kytkennällä. /4/

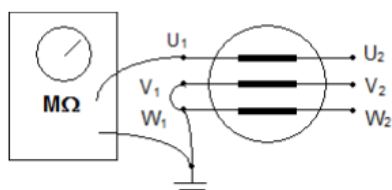
Testijännitteet määritellään standardissa IEC60034-1. Eristyskoestuksen jännite määritellään moottorin nimellisjännitteen perusteella, se määritellään seuraavasti:

$$2 * U_N + 1000 V \quad (31)$$

Jos testi toistetaan, se on tehtävä 80 % ensimmäisen testin testijännitteestä. /4/

### 6.1.12 Eristysvastusmittaus

Mittauksella varmistetaan, että moottorin käämityksen eristystaso on riittävän korkea moottorin turvalliseen toimintaan. Testi tehdään 1000 V DC:llä 60 sekunnin ajan. Mittauksen kytkentä tehdään kuvan 18 mukaisesti, yhden vaiheen ja rungon väliltä, kun muut vaiheet on kytketty rungon maadoitukseen. Mittaus tehdään lämpenemätestin jälkeen. Taulukossa 8 on esitetty eristysvastusten hyväksymisrajat riippuen ilmankosteudesta.



**Kuva 18.** Staattorin käämityksen eristysvastusmittaus. /4/

**Taulukko 8.** Eristysvastusmittauksen hyväksymisrajat. /4/

Suhteellinen ilmankosteus (%)	Eristysvastuksen hyväksymisraja ( $\Omega M$ )
< 40	2000
$\geq 40$	1000

### 6.1.13 Hyötysuhteen määrittäminen

Hyötysuhde määritetään mittaamalla ottotehoa ja laskemalla antotehoa moottorin kokonaishäviöiden pohjalta. Hyötysuhde epäsuoralla mittausmenetelmällä määritellään standardin IEC60034-2-1 menetelmän 2-1-1B mukaan, joka on esitetty kappaleessa 5.1, samalla tavalla käytöille S1-S4, S6, S8 ja S10.

Moottoria syötettäessä taajuusmuuttajalla, hyötysuhde määritetään suoralla sisään-ulostulomittausmenetelmällä (mitattua mekaanista ulostulotehoa verrataan mitattuun sähköiseen ottotehoon), mikä on määritelty standardissa IEC60034-2-1 menetelmässä 2-1-1A, joka on esitetty kappaleessa 5.2. /4/

## 7 MITTAUSEPÄVARMUUS

Mittausepävarmuus jaetaan kahteen eri tyyppiin, joita ovat A- ja B-tyypin epävarmuudet. A-tyypin epävarmuus määräytyy toistamalla samaa mittausta  $n$  kertaa, joista voidaan laskea keskiarvo. Epävarmuutena voidaan käyttää keskiarvon keskihajontaa. B-tyypin epävarmuus saadaan esimerkiksi mittalaitteiden spesifikaatioista tai aikaisempien mittausten ja kokemuksen perusteella. /5/

Mittausepävarmuus koostuu useasta eri komponentista. Näitä ovat esimerkiksi mittalaitteen epävarmuus, ympäristötekijät, käyttäjästä aiheutuva epävarmuus, mittauskohteesta aiheutuva epävarmuus sekä mittaus- ja laskuvirheet. /5/

Mittalaitetta valitessa on otettava huomioon, että se soveltuu suoritettavaan mittaukseen ja, että se on riittävän tarkka. On myös huomioitava, että kyseinen laite on kalibroitu. Kalibroinnilla varmistetaan, että mittalaitteen näyttämä vastaa laitteen vaatimuksia. Kalibrointiaikaväliä ei ole erikseen määritelty standardissa, vaan se selviää seuraamalla laitteen muutosta. Hyvin yleinen käytäntö on kalibroida mittalaitteet vuoden välein. /5/. Koestuslaboratoriossa mittalaitteita pidetään yllä kalibroimalla ne säännöllisesti. Pääasiassa kaikki mittalaitteet koestuslaboratoriossa kalibroidaan vuoden välein.

Mittalaitteen lisäksi tuloksen epävarmuuteen voi vaikuttaa ympäristön lämpötila tai ilmankosteus. Muita epävarmuustekijöitä voi olla esimerkiksi ihmisestä aiheutuva epävarmuus mittaustilanteessa. Esimerkiksi mittarin asettelu tai analogisen mittarin lukemiskulma vaikuttaa mittaustulokseen. Osa näistä virheistä pystytään välttämään huolellisella työskentelyllä. /5/



## 8 MITTAUSLUOTETTAVUUDEN VARMENTAMINEN

Mittausluotettavuuden varmentamisella tarkastetaan, onko uuden laitteiston mittauksset luotettavia. Tässä tapauksessa uuden testilaitteiston mittausluotettavuuden varmentaminen toteutetaan mittaamalla uutta testilaitteistoa ja kahta muuta laitteistoa kahdella eri moottorilla. Jotta voidaan todeta mittaustulosten olevan luotettavia, on useiden samalla tavalla toteutettujen mittaustulosten oltava riittävän lähellä toisiaan. Tuloksia vertaillaan toisiinsa ja niiden hajonta ei saa olla liian suuri.

### 8.1 Testimoottorit ja testipaikat

Testit tehdään kahdella erikokoisella moottorilla kaikilla ristiintestauslaitteistoilla, jotta saadaan mahdollisimman laaja näkemys uuden laitteiston luotettavuudesta ja toimivuudesta. Kaksi muuta testilaitteistoa ovat vanha TP4 ja TP22, joka on toiminnaltaan vastaavanlainen kuin uusi TP4. Taulukossa 9 on tiedot testattavista moottoreista. Testeissä käytetyt moottorit ovat koestuslaboratorion kalibraattorimoottoreita. Testi tehdään koestuslaboratorion hyötysuhdemittauksen, kappaleen 6 mukaisesti. Tämä testi valittiin, koska se on riittävän laaja mittaus ja siinä käsitellään koestuslaboratoriolle tärkeää hyötysuhdemittauksen tarkkuutta.

#### Taulukko 9. Testeissä käytetyt moottorit

Moottori tyyppi	Arvokilven leimaustiedot
M3BP 80ME 2	400 VD, 50 Hz, 1,1 kW, 2,3 A, 2865 rpm, S1
M3BP 132SMC 6	400 VD, 50 Hz, 4 kW, 10 A, 960 rpm, S1

Mittalaitteet eri testipaikoilla eroavat osittain toisistaan. Kaikilla paikoilla on sama tehoanalyysointilaite, vastusmittari ja momenttianturit. Näiden tiedot löytyvät tähdellä merkittynä taulukosta 5. Uuden TP4:n kanssa samoja mittalaitteita on tasajännitelähde, jonka tiedot löytyvät taulukosta 5. Taulukossa 10 on esitetty mittalaitteet, jotka eroavat TP4:n uudesta ja vanhasta laitteistosta.

**Taulukko 10.** TP22:n mittalaitteet.

Laite	Valmistaja ja malli	Nimellistiedot	Tarkkuus
Lämpöpiirturi	Yokogawa MV2000		
Virtamuunnin	LEM ITN 900-s	Ensiö: 636 A (rms) Toisio: -0,6 – 0,6 A Muuntosuhde 1:1500	0,00115 %
Momenttianturi	Magtrol TMB308/411	20 Nm Max speed 6 000 rpm	<±0,1 %

Kuten uudella TP4:lla, TP22:lla virtamuuntimeen on myös kierretty 4 lisäkierrosta, että saadaan pienempi mittausalue. Tällöin virtamuuntimen ensiön virta on 159 A.

132 runkokoon moottoria mitatessa on ollut käytössä 100 Nm momenttianturi ja 80 runkokoon moottoria mitatessa käytössä on ollut 20 Nm momenttianturi.

## 8.2 Testitulokset ja analysointi

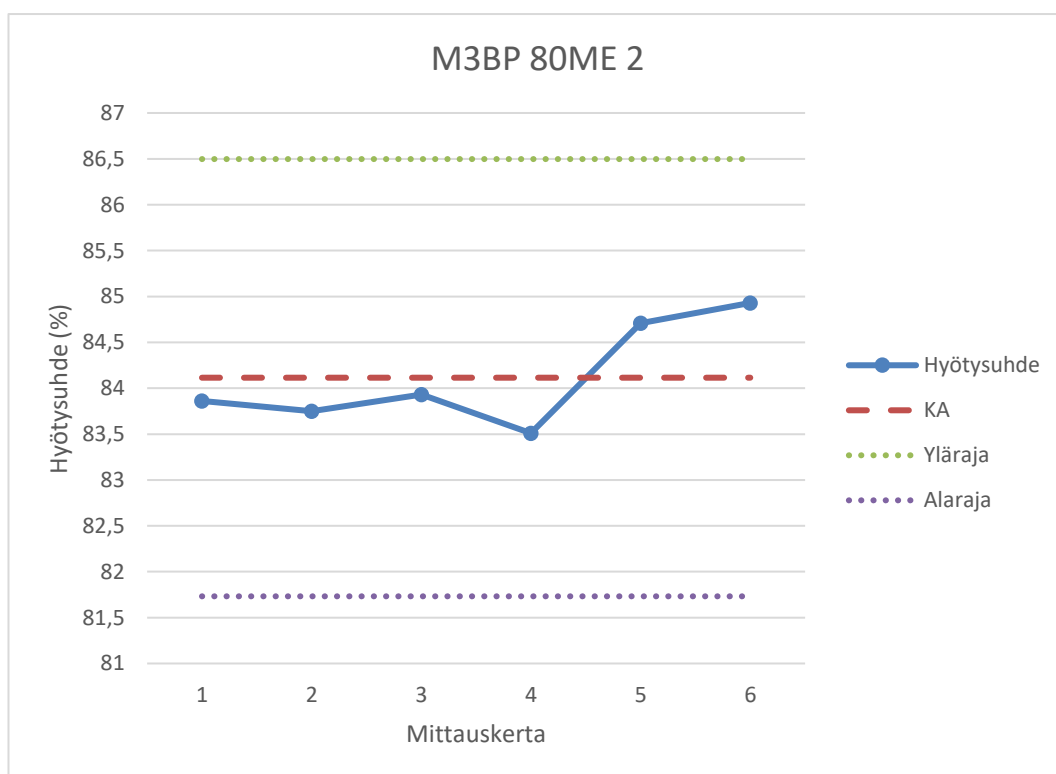
Seuraavaksi käydään läpi tehdyt testit ja niiden tulokset. Kaikki testit on suoritettu samalla tavalla toisiinsa nähden. Seuraavissa mittauksissa hyötysuhteen hyväksymistoleranssina käytettiin mittausten keskiarvosta saatua hyötysuhdetta, koska testeissä käytetyt moottorit eivät olleet mittauksia tehdessä täysin laskelman ja alkuperäisen designin mukaisia, joten laskelman tai arvokilvellä ilmoitettua hyötysuhdetta ei voitu käyttää vertailuarvon.

### 8.2.1 M3BP 80ME 2 -testit

Taulukossa 11 on esitetty eri mittausten hyötysuhdearvot. Sen jälkeen on eritelty tarkemmin mitatut ja lasketut arvot, mistä hyötysuhde määräytyy mittausjärjestyksessä. Ensimmäinen mittaus on suoritettu vanhalla TP4-laitteistolla. Toinen mittaus suoritettiin TP22-laitteistolla. Mittaukset 3–6 on suoritettu uudella TP4-laitteistolla käyttäen jokaista virta-anturia. Mittaus 3 on tehty virtamuuntimilla

käyttäen 42 A:n aluetta. Mittaus 4 on tehty 100 A:n virtamuuntajalla. Mittaukset 5 ja 6 on tehty virtamuuntimilla käyttäen aluetta 4,2 A. Näiden kahden viimeisen mittauksen erona on ollut erilainen momenttianturin nollausmenetelmä. Mittauksessa 5 momenttianturi on nollattu momenttianturilta sekä näyttämä tehoanalyysaattorilta on korjattu noin 35,5 mV ylöspäin. Mittauksessa 6 momenttianturi on nollattu ja tehoanalyysaattorilta näyttämää ei ole korjattu ollenkaan. Tarkemmat testitulokset on esitetty liitteessä 1.

**Taulukko 11.** M3BP 80ME 2 -hyötysuhdetulokset

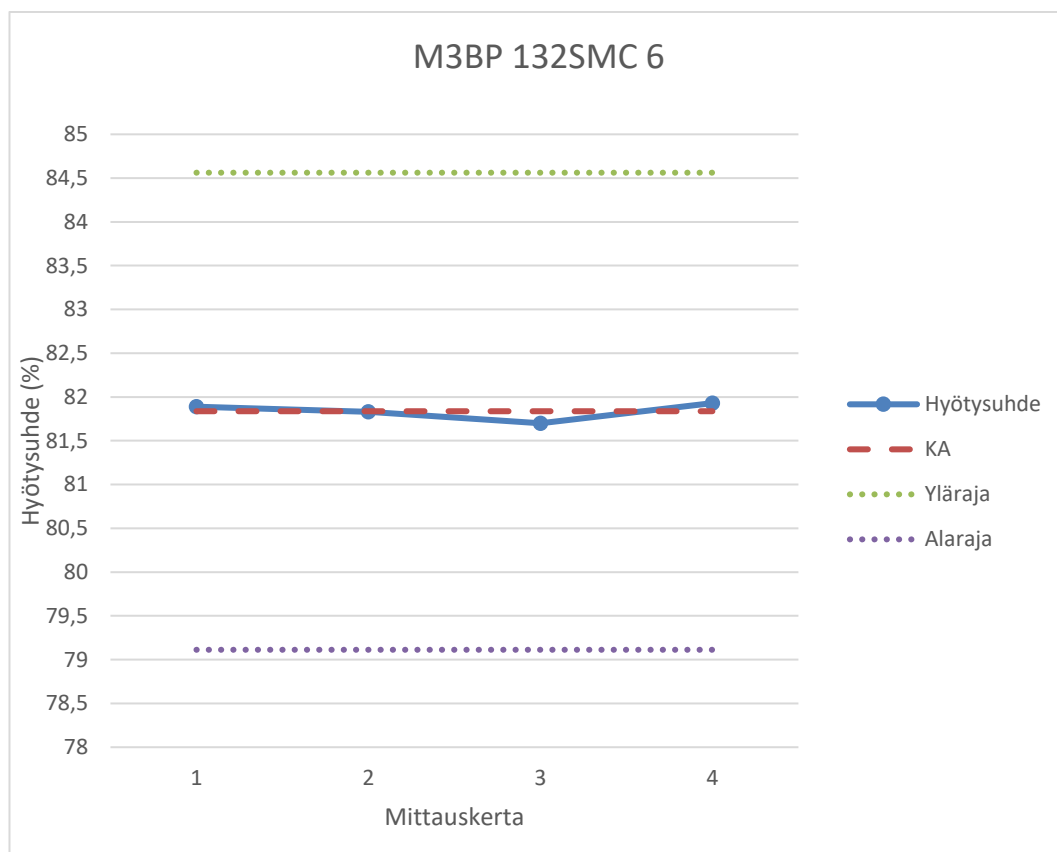


### 8.2.2 M3BP 132SMC 6 -testit

Taulukossa 13 on esitetty eri mittauskertojen hyötysuhde arvot ja toisessa taulukossa on mittausjärjestyksessä eritelty häviöt ja muut mitatut arvot, joiden perusteella hyötysuhde määräytyy. Mittaus 1 on suoritettu vanhalla TP4-laitteistolla. Mittaus 2 on suoritettu TP22-laitteistolla. Mittaukset 3–4 on tehty uudella TP4-laitteistolla. Mittauksessa 3 on käytetty 100 A virtamuuntajaa ja mittauksessa 4 on

käytetty virtamuuntimen 42 A:n aluetta. Tarkemmat testitulokset on esitetty liitteessä 2.

**Taulukko 12.** M3BP 132SMC 6 -hyötysuhdetulokset



### 8.2.3 Testitulosten analysointi

Kuten jo uuden testilaitteiston mittalaitteita esiteltäessä todettiin, 100 A Ritz-virtamuuntajat on suunniteltu starttitestien suurempien virtojen mittaamiseen. Mittaustuloksista nähdään, että kyseiset virtamuuntajat eivät sovellu mittaamaan pieniä virtoja. Tämä on nähtävissä erityisesti tyhjäkäyntitestin perusteella määräytyvistä hankaus- ja tuuletushäviöistä ( $P_{fw}$ ) sekä rautahäviöistä ( $P_{fe}$ ). Eroa ilmenee myös lisähäviöissä ( $P_{LL}$ ), joka määritellään jäännöshäviöiden perusteella, kuten esitetty kappaleessa 5.1.5. Hyötysuhdetulos Ritz-virtamuuntajilla tehtynä pysyy kuitenkin lähellä muita mittaustuloksia toleranssien sisällä, mutta häviöerottelun ollessa näinkin suuri, niitä ei suositella käytettävän muuta kuin starttitesteihin, joihin ne on laitteistossa suunniteltu.

M3BP 132SMC 6 -moottorin testituloksia vertaillen ei ilmennyt suuria eroja, lukuun ottamatta edellä mainittuja Ritz-virtamuuntajilla ilmenneitä eroja. Mitatut hyötysuhteet olivat erittäin lähellä toisiaan, eikä muutenkaan poikkeamia mittaus-tuloksissa juurikaan ollut.

M3BP 80ME 2 -moottorin testituloksia tutkiessa voidaan todeta sama kuin M3BP 132SMC 6 -moottoria testatessa Ritz-virtamuuntajilla. Hyötysuhdetuloksia ver-taillen huomataan, että TP4:n 4,2 A virtamuuntimilla saadaan lähes prosentin parempi hyötysuhde kuin muissa testeissä. Suurimmat erot mittaus-tuloksissa on tyhjäkäyntitestin perusteella määritellyissä häviöissä. Mitatut virrat tyhjäkäynti-testissä on niin pieniä, että mittalaitteiden mittaus-tarkkuudet menevät huonoiksi niin pienillä alueilla.

Tyhjäkäyntitestissä tehoanalyysoija mittaa jännitteen ja virran tehollisarvoa sekä niiden välisen vaihesiirtoeron  $\cos \varphi$ :n. Näiden perusteella tehoanalyysoija laskee tyhjäkäyntitehon. Tyhjäkäyntitesteissä jännitteet ovat likimain samat ja virrassa on parin prosentin ero, mutta tehoanalyysoijan laskemissa tyhjäkäyntitehoissa on noin kahdenkymmenen prosentin erot. Tällöin virheen on johdettava tehoanaly-soijan mittaamasta  $\cos \varphi$  -arvosta.

#### **8.2.4 Tulosten perusteella tehtyjä lisämittauksia**

Tyhjäkäyntihäviöiden erot oletettiin aiheutuvan virran mittausten epätarkkuudes-ta. Tämän perusteella virta-antureille tehtiin uudella TP4:llä kalibrointimittaukset. Kalibrointimittauksen suoritti alihankkijana toimiva kalibrointiyritys. Mittaukset tehtiin virtamuuntajille ja virtamuuntimille molemmilla alueilla, jokaiselle vai-heelle. Mittaukset tehtiin välillä 0,1 A – 20 A, koska suurin virhe ilmeni pieniä virtoja mitattaessa. Virta-antureiden läpi syötettiin virtaa ja mitattiin ulostuleva virta ja sen perusteella laskettiin jokaiselle mittaukselle epätarkkuus. Kalibrointi-mittauksista ei ilmennyt mitään poikkeavaa. Näin ollen virta-anturi on valittava mahdollisimman tarkasti moottorin virtojen perusteella jokaista testiä tehdessä, että saadaan mahdollisimman tarkat mittaus-tulokset. Vastaava mittaus TP22:lle,

vertailun vuoksi, ei onnistunut, koska on niin paljon taustakohinaa (noin 6 mA), vaikka mitään virtaa ei ole vielä edes syötetty läpi.

Lisäksi tehtiin mittausta varmistuksena, ettei 42 A LEM -virtamuuntimeen aiheudu häiriöitä, kun se on kierretty 10 kertaa. Mittaus suoritettiin muuten normaalilla menetelmällä, mutta moottoria ennen syöttökaapelin väliin lisättiin toinen samanlainen tehoanalyysointilaite mittaamaan suoraan virtaa ja jännitettä. Mittaustulokset olivat erittäin lähellä toisiaan ja tämän mittauksen perusteella voitiin todeta, että häiriöitä virtamuuntimeen ei synny, vaikka se on kierretty. Tämän mittauksen yhteydessä huomattiin suorassa hyötysuhteessa iso ero. Tehoanalyysointilaitteen syöttöjohto laitettaessa Bypass- ja PLC -keskuksen vieressä olevan keskuksen pistorasiaan mitattiin melkein 10 % huonompi hyötysuhde kuin silloin, kun syöttöjohto on kytketty työpöydän yhteydessä oleviin pistorasioihin, missä tehoanalyysointilaitteen syöttöjohto normaalitilanteessa on.

### 8.2.5 Taajuusmuuttajatestaus

Uudella TP4:lla tehtiin lisäksi taajuusmuuttajalla testaus. Moottorin tiedot on esitetty taulukossa 15. Kyseiselle moottorille oli jo aikaisemmin suoritettu taajuusmuuttajatestauksia vanhalla TP4-laitteistolla. Testin tarkoituksena oli varmistua, että saadaan vastaavanlaisia mittaustuloksia kuin aiemmin. Tuloksia ei tässä työssä sen tarkemmin käydä läpi.

**Taulukko 13.** Taajuusmuuttajatestissa käytetty moottori.

Moottori tyyppi	Leimaus	Muuta
132 ALU 4	400 VD, 50 Hz, 5,5 kW, 13 A, 1465 rpm	Alumiinikäämi

Taajuusmuuttajana käytetty ACS800-01-0020-3. DTC, FWP 400 V 50 Hz. Vuonoptimointi päällä. Taajuusmuuttaja ja asetukset ovat olleet samat kuin testissä, joka on suoritettu vanhalla TP4:llä. Häiriöitä ilmeni lisää automaation testausvaiheessa tehtyihin testeihin nähden. Tehoanalyysointilaitteen ja momenttianturin vahvistimen väliin lisättiin maadoitus, tällä saatiin virrat vastaamaan samaa kuin vanhalla TP4:lla.

## 9 YHTEENVETO JA KEHITYSIDEAT

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä selvitys ABB Oy Vaasan Moottorit ja Generaattorit -yksikön koestuslaboratorion TP4-testilaitteiston uusimisesta ja mittausluotettavuuden varmentamisesta. Työssä perehdyttiin vanhan ja uuden testilaitteiston toimintaan ja laitteisiin. Työssä ilmenee uuden ja vanhan laitteiston eroavaisuudet. Projektin eteneminen ja aikataulu on käyty läpi. Työssä oli tärkeää päästä selville uuden laitteiston mittausluotettavuudesta.

Toisessa luvussa käytiin läpi vanha testilaitteisto. Ensin kuvattiin laitteiston pääkomponentteja ja mittalaitteita. Näiden pohjalta kuvattiin laitteiston toimintaa. Kolmannessa luvussa käytiin läpi uuden testilaitteiston uudet pääkomponentit ja mittalaitteet. Mittalaitelistassa on esitetty myös vanhasta laitteistosta samana pidetyt mittalaitteet. Sen jälkeen kuvattiin uuden laitteiston toiminta. Toiminnan kuvauksista ja kaavioista käy ilmi, että uusi ja vanha laitteisto eroavat hyvinkin paljon.

Neljännessä luvussa käytiin läpi projektin aikataulua. Ensin käytiin läpi työn suunniteltu aikataulu purkamis-, asennus-, testaus- ja käyttöönottojen osalta. Seuraavaksi käytiin läpi toteutunut aikataulu näiden osalta.

Viidennessä ja kuudennessa luvuissa käytiin läpi hyötysuhdemittaus. Hyötysuhdemittaus on koestuslaboratoriossa yksi tärkeimmistä mittauksista ja sen perusteella saadaan hyvin laaja käsitys koestuslaitteiston toiminnasta ja mittausluotettavuudesta. Hyötysuhdemittaus käytiin ensin läpi standardin vaatimusten pohjalta. Luvussa kuusi käsiteltiin koestuslaboratorion hyötysuhdemittaus. Koestamon hyötysuhdemittauksessa tehdään myös muita testejä, jotka ei liity hyötysuhteen mittaukseen, mutta liittyy moottorin toiminnan testaamiseen.

Luvussa 7 käsiteltiin mittausluotettavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Kahdeksas luku on tärkeimmistä osuuksista koko työssä. Luvussa käydään läpi vertailumittaukset eri testipaikoilla ja eri testimoottoreilla. Näiden mittausten pohjalta vertaillaan tuloksia. Tehtyjen mittausten ja niiden tulosten pohjalta voidaan

uusi testilaitteisto ottaa käyttöön ja todeta, että sen mittausluotettavuus on riittävä standardin vaatimusten mukaan.

Työn tutkimusten pohjalta jatkossa kuitenkin tulisi kiinnittää huomiota virran mittauksiin, erityisesti kun mitataan pieniä virtoja. Virtamuuntimet ovat melko suuret ja aiheuttavat täten suurempaa virhettä pieniä virtoja mitatessa. Erityisesti pienten moottoreiden tyhjäkäyntitestejä varten olisi hyvä olla pienemmät virtamuuntimet.

Testilaitteistoon sähköä tuottava generaattori on uusittu ja tämän työn yhteydessä sen syöttämää sähköä ei ehditty tutkimaan. Lähitulevaisuudessa olisi tärkeää selvittää, että sen tuottama sähkölaatu on vaatimusten mukainen. Myös laitteistossa ilmeneviä häiriöitä olisi syytä tutkia enemmän.



## LÄHTEET

- /1/ IEC 60034-1 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance. s. 148
- /2/ IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). 2014. s. 186.
- /3/ IEC 60034-2-3 Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors. 2013. s. 44.
- /4/ Pantti, T. 2019. Final testing procedures. ABB Oy, Vaasa Motors and Generators. s.15
- /5/ Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. Julkaisu J4/2011. Laadukkaan mittaamisen perusteet. Mikes. Viitattu 23.4.2019. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>
- /6/ Autio, K. 1998. Moottorilaboratorion sähkönsyöttöjärjestelmän selvittäminen ja modernisointiehtotusten tekeminen. Ylivieskan tekniikan ja sosiaalialan oppilaitos sähkö ja energiatekniikan osasto, opinnäytetyö.
- /7/ Verkkonen, V. 2005. Sähkökoneet - 1 Muuntajat, luentomateriaali VAMK, s.143.
- /8/ Mustonen, H. 2014. Virtakiskon virran mittaaminen avoimen magneettiipiirin hall-anturilla. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma, diplomityö.
- /9/ LEM – Current Transducer IT 60-S Ultrastab 2014. Versio 3. Viitattu 9.4.2019. [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/it\\_60-s\\_ultrastab.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/it_60-s_ultrastab.pdf)
- /10/ LEM – Current Transducer ITN 900-S Ultrastab 2014. Versio 2. Viitattu 9.4.2019. [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/itn%20900-s%20ultrastab.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/itn%20900-s%20ultrastab.pdf)
- /11/ Ritz Instrument transformers - Low Voltage Transformers for Special Applications katalogi N7-02. Viitattu 9.4.2019. <http://ritz-international.com/wp-content/uploads/2015/12/N7-2002-111.pdf>
- /12/ LEM - High Precision Current Transducers. Tuoteluettelo, julkaisu CAE110901/0.
- /13/ Pantti, T. 2018. Test pench history log v.2018. ABB.

/14/ Yokogawa 7651 tasavirtalähde. Viitattu 24.4.2019.

<https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/generators-sources/programmable-dc-sources/7651-programmable-dc-source/#Details>

/15/ Seaward Cropico DO5000, datalehti. Viitattu 24.4.2019.

[http://www.seaward.co.uk/downloads/do5000\\_series\\_datasheet\\_rev\\_2\\_v2.pdf](http://www.seaward.co.uk/downloads/do5000_series_datasheet_rev_2_v2.pdf)

/16/ Fluke norma 5000, datalehti. Viitattu 24.4.2019. <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/11259-eng-04-A.pdf?vx.Y6RA6T7Z47QNaNoM5JOpfGAlDXkiV>

/17/ Magtrol Momenttianturit, datalehti. Viitattu 24.4.2019.

<https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/tm-series.pdf>

/18/ Wredfors, A. 2019. TP4 – yleiskaavio. Versio 11.2.2019. ABB.