



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Santeri Lammi

# SÄHKÖMOOTTORIEN TESTIPAIKKA TP24:N KÄYTTÖÖNOTON JATKO

Tekniikka  
2020

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Santeri Lammi
Opinnäytetyön nimi	Sähkömoottorien testipaikka TP24:n käyttöönoton jatko
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	62
Ohjaaja	Timo Rinne

---

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena selvittää alkuperäisessä sähkömoottoreiden testipaikan käyttöönotossa TP24:llä ilmenneitä ongelmia ja voiko testipaikkaa käyttää testaukseen. Työn toimeksiantajana oli ABB Oy:n Motion, Motors and Generators -yksikön koestamo.

Mittausluotettavuutta tarkasteltiin enimmäkseen hyötysuhteen osalta, joka oli ristiin verrattuna muihin testipaikkoihin verrattuna. Tarkastelua suoritettiin usealla eri moottorilla useiden testien muodossa. Lisäksi momenttikäyrä, tyhjäkäynti- ja osakuormatetit olivat puutteellisia, joten niidenkin osalta vaadittiin tarkempaa tarkastelua. Työssä perehdyttiin mahdollisiin mekaanisiin tekijöihin, jotka saattavat vaikuttaa testeihin ja testausohjelmistoon. Työn tutkimusosiossa vertailtiin testipaikkojen tuloksia ja niiden mahdollisia poikkeavuuksia.

Suoritettujen testien ja kokeilujen puolesta voidaan todeta testauspaikan olevan ainakin osittain luotettava ja voidaan ottaa käyttöön tietyin rajoituksin.

## ABSTRACT

Author	Santeri Lammi
Title	Continuing commissioning of electric motors at testplace TP24
Year	2020
Language	Finnish
Pages	62
Name of Supervisor	Timo Rinne

---

In this thesis the purpose was to continue commissioning of the TP24. The main thing was to examine the problems that were found in earlier commissioning and to find out if this test site was reliable for testing electric motors. The thesis was assigned by the test laboratory of Motions Motors and Generators unit of ABB Oy.

The reliability of measurement was researched mostly with respect to the efficiency that was inconsistent with other test places. The research was conducted with several motors and tests. Additionally, torque-speed curve, no load and partial load tests needed closer scrutiny than other tests. In this thesis mechanical factors of the test site were also discussed because they might cause problems for tests and testing software. In the research part of this thesis the test results of different test sites and possible abnormalities of the test results were compared.

Based on of the tests performed at the test site, the testing of electric motors can be started at the TP24 with some limitations.

---

Keywords	testing software, measurement reliability, efficiency and commissioning
----------	---

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO.....	6
SYMBOLIT JA LYHENTEET.....	7
1 JOHDANTO.....	8
2 ABB YRITYKSENÄ .....	9
3 TYÖN AIHE JA TAVOITTEET .....	10
3.1 Työn aihe .....	10
3.2 Työn tavoite .....	10
4 TEORIAA OIKOSULKUMOOTTORISTA JA TESTAUKSISTA.....	11
4.1 Oikosulkumoottorin teoriaa .....	11
4.1.1 Oikosulkumoottorin toiminta.....	13
4.2 Tyypitestausta .....	14
4.2.1 Silmämääräinen tarkastus.....	14
4.2.2 Kylmävastusmittaus .....	14
4.2.3 Käynnistysvirta- sekä käynnistysmomenttitesti.....	15
4.2.4 Momenttikäyrä .....	15
4.2.5 Lämpenemätesti .....	16
4.2.6 Osakuormatesti.....	18
4.2.7 Ylikuormitustesti.....	18
4.2.8 Oikosulkutesti .....	18
4.2.9 Tyhjäkäyntitesti.....	18
4.2.10 Tärinämittaus.....	19
4.2.11 Eristyskoestus.....	19
4.2.12 Eristysvastusmittaus .....	20
5 HYÖTYSUHTTEEN MÄÄRITYS .....	21
5.1 Kuormitustesti (Lämpenemätesti).....	22
5.2 Osakuormatesti .....	23
5.3 Tyhjäkäyntitesti.....	24
5.3.1 Jatkuvat häviöt .....	24
5.4 Lisäkuormitushäviöt (lisähäviöt) .....	25

6	TESTEISSÄ KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO .....	28
6.1	Testipaikan oma laitteisto .....	28
6.2	Mittalaitteet .....	29
7	50/10 NM -PUOLEN TESTAUS .....	32
7.1	Alumiinimoottorin ensimmäinen testi .....	33
7.2	Alumiinimoottorin toinen testi.....	34
7.3	Alumiinimoottorin kolmas ja neljäs testi.....	35
7.4	Alumiinimoottorin ristiintestaus ja vertailu .....	37
7.5	Valurautamoottorin testaukset, ensimmäinen ja toinen .....	38
7.6	Asiakasmootorin M3BP 90SLB 2-testaus .....	41
8	10/2 NM -PUOLEN TESTAUS .....	43
8.1	Ensimmäinen, toinen ja kolmas testi 10/2 Nm testauspuolella.....	43
8.2	Testausten tulokset pienellä testauspuolella .....	45
8.2.1	TP24:n käsinmittauksen vertailu TP22:n vertailutestiin .....	48
8.2.2	Käsinmittauksen ja automaattimittauksen vertailu .....	49
8.3	Lisätestejä M2AA 63-moottoreilla, napaluvut 4 ja 6.....	50
8.4	Asiakasmootorin M3BP 71ME 2-testaus .....	50
9	TESTIOSIOISTA JA NIIDEN LUOTETTAVUUDESTA .....	53
9.1	Momenttikäyrä.....	53
9.2	Lämpenemätesti .....	54
9.3	Tyhjäkäyntitesti.....	54
9.4	Oikosulkutesti .....	55
9.5	Osakuormatesti .....	55
9.6	Sähkömoottorin tyhjäkäyntitesti, värinä- sekä äänimittaus .....	56
10	YHTEENVETO JA KORJausehdotukset.....	58
10.1	Yhteenveto .....	58
10.2	Korjausehdotukset.....	59
	LÄHTEET.....	61

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Oikosulkumoottorin poikkileikkaus, M3BP 71-132, laippamoottori. ....	12
<b>Kuva 2.</b> Oikosulkumoottori ja sen tärkeimmät osat .....	13
<b>Kuva 3.</b> Oikosulkukoneen momenttikäyrä, verkkoon kytketty .....	15
<b>Kuva 4.</b> Eristyskoestus moottorin U-vaiheelle .....	20
<b>Kuva 5.</b> Eristyskoestus, kun tähtipiste-kytkentä on saatavilla .....	20
<b>Kuva 6.</b> Jäännöshäviöiden tasoittaminen, jossa leikkauspiste B on positiivinen. 27	
<b>Kuva 7.</b> Yleiskuva TP24:stä. ....	28
<b>Kuva 8.</b> Yokogawa WT1800-tehoanalysaattori .....	30
<b>Kuva 9.</b> Burster Resistomat 2318-vastusmittari .....	30
<b>Kuva 10.</b> Kistler Dual Range 4503A-momenttianturi.....	31
<b>Kuva 11.</b> Prikat lisättyinä kiilojen alle .....	33
<b>Taulukko 1.</b> Staattorin käämien resistanssin mittaaminen lämpenemätestin jälkeen ..	17
<b>Taulukko 2.</b> Mittalaitteet TP24-testipaikalla .....	29
<b>Taulukko 3.</b> M3AA 90L 2-moottorin nimellistiedot. ....	32
<b>Taulukko 4.</b> M3AA 90L 2-moottorin testit TP24:llä.....	36
<b>Taulukko 5.</b> M3AA 90L 2-moottorin keskiarvo TP24:ltä ja vertailutestit. ....	37
<b>Taulukko 6.</b> M3BP 90SLD 4-moottorin nimellistiedot. ....	39
<b>Taulukko 7.</b> M3BP 90SLD 4-moottorin testi 1. ja vertailutestit. ....	39
<b>Taulukko 8.</b> M3BP 90 SLB 2-moottorin nimellistiedot. ....	41
<b>Taulukko 9.</b> M3BP 90 SLB 2-moottorin ristiintestaus. ....	41
<b>Taulukko 10.</b> M3BP 80ME 2-moottorin nimellistiedot. ....	43
<b>Taulukko 11.</b> M3BP 80ME 2-moottorin testit TP24:llä. ....	45
<b>Taulukko 12.</b> M3BP 80ME 2-moottorin vertailutestit. ....	46
<b>Taulukko 13.</b> M3BP 80ME 2-moottorin keskiarvo TP24:ltä ja vertailutestit. ....	47
<b>Taulukko 14.</b> M3BP 80ME 2-moottorin testi käsinmittauksella ja vertailu.....	48
<b>Taulukko 15.</b> M3BP 71ME 2-moottorin nimellistiedot. ....	51
<b>Taulukko 16.</b> M3BP 71ME 2-moottorin ristiintestaus .....	51

## SYMBOLIT JA LYHENTEET

D-pää	Drive end
N-pää	Non drive end
$\cos \varphi$	Tehokerroin
f	Taajuus, Hz
I	Virta, A
n	Pyörimisnopeus
P	Teho, W
P <sub>1</sub>	Sähköteho, W
P <sub>2</sub>	Mekaaninen teho, W
P <sub>Fe</sub>	Rautahäviöt, W
P <sub>fw</sub>	Hankaus ja tuuletushäviöt, W
P <sub>LL</sub>	Lisäkuormitushäviöt (lisähäviöt), W
P <sub>s</sub>	Staattorihäviöt
P <sub>r</sub>	Roottorihäviöt
P <sub>T</sub>	Kokonaishäviöt, W
T	Momentti, Nm
U	Jännite, V
$\eta$	Hyötysuhde
$\theta$	Lämpötila
TP	Testipaikka
s	Jättämä
K	Kelvin
$\Delta\theta_{Cu}$	Lämpenemä
V&B	Vogelsang & Benning

## 1 JOHDANTO

Työ tehtiin ABB Oy:n Motors and Generators -yksikölle. Työssä tarkasteltiin testipaikka TP24:n mittausluotettavuutta ja ongelmia. TP24 on yksi kolmesta testipaikasta, jotka siirrettiin Vaasaan Ruotsista vuonna 2017. Eroa tässä testipaikassa muihin testipaikkoihin on se, että sillä voi halutessaan suorittaa testit lähes täysin automaattisesti alusta loppuun. Testipaikan käyttöönotto on jo pääpiirteittäin suoritettu aikaisemmin, mutta mittauksen ristiriitaisuus testipaikkojen välillä vaati lisätestejä.

Vaasassa koestuslaboratoriot sijaitsevat KK- ja MM-tehtaissa. Sähkömoottoreille on koon ja tehon puolesta jaoteltu koestuspaikat, eli kaiken kokoisia moottoreita ei voi testata yhdellä testipaikalla. Koestuslaboratorio on ensisijaisesti asiakkaiden tilaamia testejä varten, mutta mittausluotettavuus on myös tärkeässä roolissa varsinkin protokoestusvaiheessa, kun moottorille määritetään arvoja tuoteluetteloon. Niiden testien pohjalta suoritetaan myös laskentaa suunnitteluosastolla.

Koestuslaboratoriossa on menossa uuden automaatiojärjestelmän sisäänajo testipaikoille ja TP0, TP4, TP21 ja TP22 ovat jo uudistettu. Tällä saadaan koestuksesta jouhevampaa ja yhden testipaikan hallitsemalla voi tarvittaessa siirtyä toiselle testipaikalle koestamaan ongelmitta. TP24 on uusi testipaikka, johon uudelle henkilölle tulee suorittaa perehdytys.



## 2 ABB YRITYKSENÄ

ABB (Asea Brown Boveri) on globaali yritys, joka toimii Suomessa noin 20 paikakakunnalla. ABB syntyi, kun ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen Brown, Boveri & Cie yhdistyivät. Tämä tapahtui vuonna 1988. Yritys toimii yli 100 maassa ja työllistää noin 147 000 henkilöä. Suomessa ABB työllistää noin 5 400 henkilöä. /1/

Yrityksellä on neljä globaalia liiketoimintaa: Electrification, Industrial Automation, Motion ja Robotics & Discrete Automation. Tehtaat sijaitsevat Vaasassa, Helsingissä, Porvoossa ja Haminassa. ABB on Suomessa yksi suurimmista työnantajista nimenomaan teollisuudessa. /2/

Motors and Generators-yksikkö, jolle työ on toteutettu, työllistää globaalisti noin 13 000 henkilöä. Suomessa työntekijöitä on noin 1 520 henkilöä. Vaasan tehtaalla valmistetaan pienjännitemoottorit ja vastataan tuotekehityksestä vaativiin käyttöihin. Helsingin tehtaassa valmistetaan korkeajännitemoottorit, dieselgeneraattorit ja kestmagneettimoottorit. /3/

### **3 TYÖN AIHE JA TAVOITTEET**

#### **3.1 Työn aihe**

Työn aiheeksi valikoitui koekentän testipaikka TP24. Testipaikka on osa ABB Oy:n Motors & Generators -koestuslaboratoriota. Tarkoitus oli tutkia mittausluotettavuutta kyseisellä paikalla, koska mittauksia ei pidetty luotettavina ristiriitaisten testitulosten perusteella. Tarkoituksena oli olla yhteydessä laitteiston toimittajaan Vogelsang & Benningiin, jotta heiltä saataisiin tarvittavia tietoja laitteistoon liittyen. Vogelsang & Benning mainitaan tässä työssä lyhenteellä V&B.

Ongelmanratkaisu oli tarkoitus aloittaa useiden eri moottoreiden testauksilla. Suurimpana epäilyksen ja korjauksen kohteena ovat hyötysuhteet, koska ne ovat olleet TP24:llä testatuissa moottoreissa parempia kuin muilla testauspaikoilla. Mittausajoissa oli ollut myös ongelmia ja V&B:n testausohjelmisto mittaa liian nopeasti mittauspisteet. Ongelmat olivat ilmestyneet enimmäkseen momenttikäyrissä, tyhjäkäyntitesteissä ja osakuormatesteissä, mutta muutkin testiosiot oli syytä tutkia.

#### **3.2 Työn tavoite**

Työn päätavoite oli tutkia hyötysuhdetta, koska aikaisemmassa käyttöönotossa ilmeni eroja testituloksissa testipaikkojen välillä. Työssä myös tarkasteltiin eri testejä ja mietittiin, että miten ne saataisiin toimimaan halutusti. Mittaustulosten tuonti testausohjelmistosta ABB:n mittausohjelmaan oli tarkoitus saada toimimaan. Tarkoituksena oli myös selvittää V&B:ltä, että voiko TP24:n vanhan tietokoneen päivittää uudempaan pilaamatta testausohjelmistoa.

Valmiin työn tavoitteena oli saattaa TP24:n käyttöönotto loppuun ja saada siitä luotettava testipaikka, jotta pienmoottoreiden tuotantokapasiteettia saataisiin nostettua koestamon osalta. Tavoitteeseen pääseminen edellyttää useita testauksia eri moottoreilla.

## 4 TEORIAA OIKOSULKUMOOTTORISTA JA TESTAUKSISTA

Tässä luvussa käsitellään hiukan oikosulkumoottorin teoriaa, miten sitä testataan ja työjärjestystä testauksia suoritettaessa. Tarkastelussa on tarkemmin tyyppitesti, joka sisältää momenttikäyrän.

### 4.1 Oikosulkumoottorin teoriaa

Oikosulkumoottori kuuluu epätahtikoneisiin, mikä tarkoittaa, että roottorin pyörimisnopeus on staattorin magneettikentän pyörimisnopeutta hitaampi. Oikosulkumoottorin olennaisimpiin osiin kuuluvat paikallaan pysyvä staattori ja pyörivä osa, roottori. /4, 6/

Staattorissa on staattorikäämit ja levyt magneettiipiireineen. Roottorissa on myös käämit ja levyistä tehty magneettiipiiri. Roottorin ja staattorin välistä löytyy il-maväli, jonka kautta vuo kulkee kaksi kertaa. Vuo kulkee magneettiipiirissä ja on sulkeutuva. Sähkömoottorissa magneettivuo kulkee staattorista roottoriin ja takaisin staattoriin. Yleistäen moottorin ainoat kuluvat osat ovat laakerit. Aktiivisiksi osiksi oikosulkumoottorissa katsotaan käämit ja magneettiipiiri. /4, 6/

Moottorin kehän pituus sähköasteina on eri kuin normaali kehän pituus asteina. Havainnollistavana esimerkkinä 4-napainen moottori pyörähtää kierroksen eli  $360^\circ$ , niin magneettikenttä on pyörähtänyt  $2 \cdot 360^\circ = 720^\circ$ . Sähköaste määräytyy napapariluku kerrottuna geometrisella asteella, mikä nähdään kaavassa yksi:

$$\alpha_s = p\alpha_g \quad (1)$$

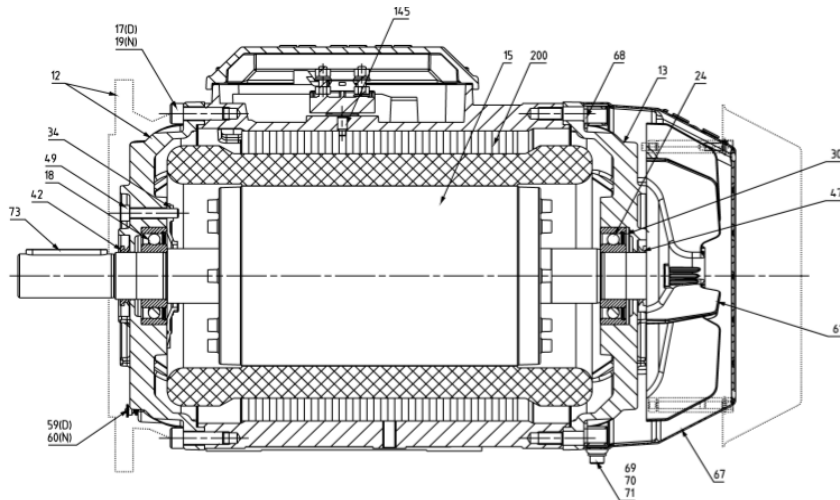
Jossa

$\alpha_s$  on sähköaste

$\alpha_g$  on geometrinen aste

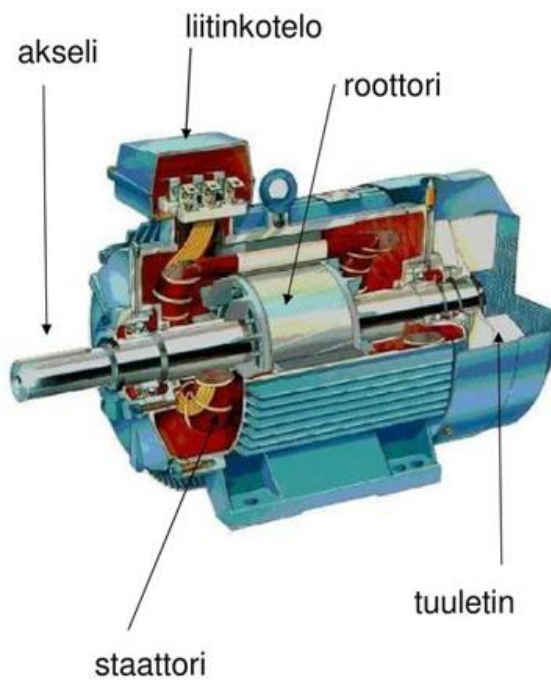
$p$  on napapariluku

Staattorissa käämien eristykseen käytetään johdineristystä, uraeristettä, joka eristää rautasydämen vyyhdestä ja urakiilaa, joka estää johtimien purkaantumisen. Roottorikäämituksessa käytetään alumiinisauvoja ja oikosulkurenkaita. Käämitys voidaan myös suorittaa kuparisauvoilla. /5, 7/



**Kuva 1.** Oikosulkumoottorin poikkileikkaus, M3BP 71-132, laippamoottori. /8/

Kuvassa 1 nähdään poikkileikkaus ja kaikki osat. Kuvassa 2 nähdään tärkeimmät osat kuvauksineen.



**Kuva 2.** Oikosulkumoottori ja sen tärkeimmät osat /9/

#### 4.1.1 Oikosulkumoottorin toiminta

Staattorikäimityksiin syötetään kolmivaiheinen jännite, jolloin syöttävä verkko tulkitsee moottorin induktanssina. Sen jälkeen staattorikäämiin muodostuu induktiivinen virta eli magnetoimisvirta. Magnetointivirran aiheuttamat magnetomotoriset voimat staattorissa tekevät pyörivän magneettivuon. Pyörimisnopeuden ollessa nolla, roottoriin indusoituu jännite. Roottorikäämien ollessa yhdistettynä, syntyy roottorikäämiin virta. Syntyy voima ja momentti, kun pyörivässä magneetikentässä olevassa sauvassa on virta. Sähkömoottori alkaa pyöriä, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttava vääntömomentti. Olennaista on, että roottori ei pyöri samaa nopeutta kentän kanssa, koska silloin roottorisauvat eivät leikkaisi vuoviivoja. Silloin sähkömotorinen voima, joka saa aikaan roottorivirran, olisi nolla, eikä silloin syntyisi momenttia, joka ylläpitää pyörimistä. /5, 7/

## 4.2 Tyypitestausta

Tässä osiossa käsitellään oikosulkumoottorin tyypitestausta ja työjärjestystä, jonka mukaan koestaja koestuslaboratoriossa tekee tyypitestausta.

Tyypitestejä suoritetaan pääsääntöisesti asiakastestauksina, laivaluokituslaitosten vaatimusten mukaisesti, prototyypitestauksina ja laatu- tai takuutapausten testauksina. Oikosulkumoottoreiden testaukseen käytetään monia eri testejä. Yleensä kokonaisvaltaiseen moottorin testaukseen asiakas valitsee tyypitestausta. Tyypitestausta kestää tavallisesti 3–12 tuntia moottorin koosta riippuen. Pienet moottorit pystytään testaamaan läpikotaisin 3–6 tunnissa, kun taas isoihin menee yleensä 12 tuntia. Tämä siitä syystä, että suuremmilla moottoreilla loppulämpötilan saavuttaminen vie kauemman aikaa. /10/

### 4.2.1 Silmämääräinen tarkastus

Moottorille täytyy tehdä ensin silmämääräinen tarkastus. Siinä tarkastetaan alla olevan listan mukaiset tiedot:

- arvokilpitiedot
- lisälaitteet ja niiden tiedot, kytkentäkotelo, tuuletin ja mahdollisen tuuletinmoottorin oikeellisuus
- vesiliittimet ja niiden tiiveys
- kaapelitiiveys
- maalin väri ja mahdolliset maalausvirheet
- asennusasento. /10/

### 4.2.2 Kylmävastusmittaus

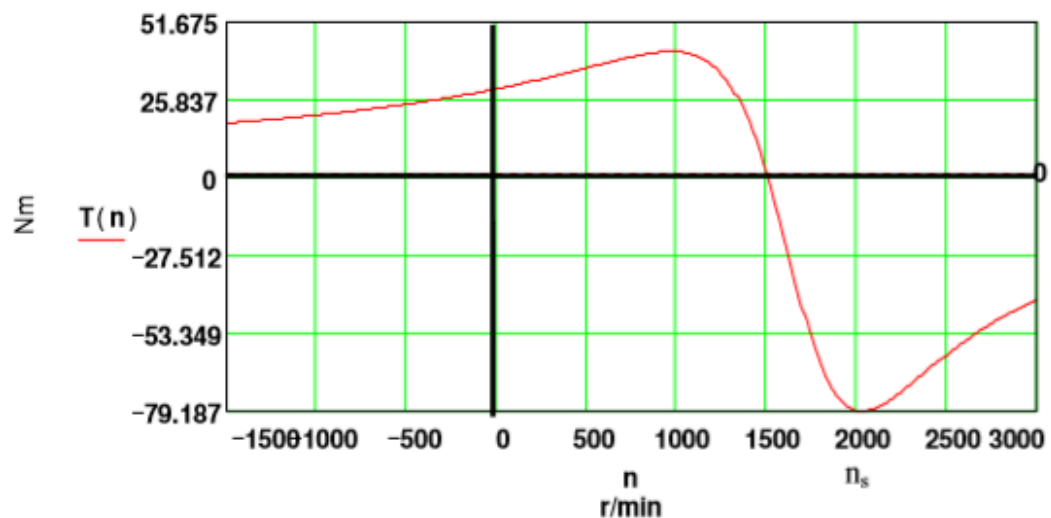
Mittaus suoritetaan ympäristön lämpötilassa. Sen avulla määritetään lämpenemälämpöajon jälkeen, varmistetaan käämikytcentöjen oikeellisuus ja mahdollinen vaiheiden välinen ero. Koestaja tarkistaa myös laskettujen ja mitattujen arvojen erot vastusten avulla, ennen kuin testaus aloitetaan. Mittaus tapahtuu vaiheiden väleiltä liittimistä U1-V1-, U1-W1- ja V1-W1. Lisälaitteiden vastusmittaukset mitataan niiden riviliittimiltä. Lisälaite on esimerkiksi termistori. /10/

### 4.2.3 Käynnistysvirta- sekä käynnistysmomenttitesti

Moottorin roottori lukitaan mekaanisesti lukitusraudalla. Moottoriin syötetään nimellisjännite ja -taajuus. Jos nimellisarvojen käyttö ei ole mahdollista, testi voidaan tehdä alijännitteellä. Testin tarkoituksen on mitata moottorin käynnistysmomentin ja nimellismomentin suhde  $T_L/T_N$ , sekä käynnistysvirran ja nimellisvirran suhde  $I_S/I_N \cdot 10$ .

### 4.2.4 Momenttikäyrä

Mekaaninen vääntömomentti kasvaa moottoria kuormitettaessa, joten roottorin pyörimisnopeus pienenee. Staattorin ja roottorin kentän välinen nopeusero kasvaa ja täten myös roottorin virta. Sähköisen vääntömomentin kasvaessa, roottori jää pyörimään uudella nopeudella ja moottorin sekä kuormituksen momentit ovat samat. Momenttikäyrästä saadaan moottorin huippumomentti, jolla sitä voidaan kuormittaa. Kun momentti ylittää huippumomentin arvon, se kippaa. /7/



**Kuva 3.** Oikosulkukoneen momenttikäyrä, verkkoon kytketty. /11/

Positiiviset momentin arvot saadaan jarrutettaessa moottoria alle synkroninopeuden ja negatiiviset pyöritettäessä yli synkroninopeuden. Moottorikäytössä oleellista on, että teho siirtyy moottorista laitteeseen, joka on kuormana. /11/

Kun moottoria aletaan jarruttamaan, moottori ylittää maksimomentin ja kippaa. Se joko pysähtyy kokonaan tai jää hiljaa pyörimään. Suurimmaksi osaksi pysähtyy kokonaan, koska kuormamoottorit omaavat yleensä huomattavasti enemmän vääntöä. Yli synkroninopeuden pyöritettäessä, moottori muuttuu generaattoriksi ja syöttää sähköä verkkoon. Yleensä moottorin momenttikäyrän testaamiseen käytetään vastakkaiseen suuntaan jarruttamista.

Momenttikäyrän mittaamisessa on tarkoitus selvittää minimi- ja maksimimomentti ja niitä verrataan nimellismomenttiin. Momenttikäyrän mittaus tapahtuu nimellistaajuudella ja -jännitteellä. Syöttökapasiteetti ei välttämättä riitä moottorin ollessa iso, joten testi on suoritettava alijännitteellä. Rajoittavana tekijänä saattaa myös olla momenttianturi. /10/

Oleennaista on tietää alijännitteellä testattaessa, että moottorin napajännite vaikuttaa moottorin huippumomenttiin neliöllisesti. Tilanteessa, jossa esimerkiksi jännite moottorin navoissa laskee 10 %, momentti pienenee 19 %. /7/

#### **4.2.5 Lämpenemätesti**

Lämpenemätesti suoritetaan moottorin nimellisarvoilla. Lämpenemätestissä mitataan moottorin lämpenemää pääasiassa laakereissa, vyyhdessä ja rungossa. Tietyissä moottorityypeissä mitataan lisäksi roottorin lämpenemä. Lämpenemätestin tarkoituksena on määrittää oleellisten moottoriosien lämpenemä. Lämpenemätestin aikana moottoria kuormitetaan kuormamoottorilla valitulla momentilla. /10/

Moottorin lämpötilat tallentuvat piirturille koko testin ajan ja moottoria testataan niin kauan, että lämpötilat ovat tasaantuneet. Lämpenemätesti voidaan lopettaa, kun lämpötilanmuutos on alle yhden kelvinin puolessa tunnissa tai vaihtoehtoisesti alle kahden kelvinin tunnissa. Sähkönsyöttö katkaistaan moottorille ja pysähtyneen moottorin staattorin käämeistä mitataan resistanssi käsin. V&B:n testausohjelmistossa resistanssin mittaus tapahtuu automaattisesti. /10/

Lämpenemätestissä taltioidaan myös mekaaninen teho, tehokerroin, virta, jännite, momentti, pyörimisnopeus, jättämä ja sähköinen teho. /10/



Käämien resistanssia mitataan yleensä 120 sekuntia ja tietyissä moottorityypeissä 180 sekuntia. Mittaus aloitetaan yleensä vaiheväliltä U-W. Jäähtymäkäyrän mittaus on siitä tärkeä, että sillä voidaan määrittää staattorin keskimääräinen lämpenemä. Taulukosta 1 voidaan nähdä, miten nopeasti mittaus olisi syytä aloittaa sähkönsyötön katkaisusta.

**Taulukko 1.** Staattorin käämien resistanssin mittaus lämpenemätestin jälkeen

Mekaaninen teho ( $P_N$ ) kW	Kulunut aika, alkaen sähkönsyötön katkaisusta (s)
$P_N \leq 50$	30 s
$50 < P_N \leq 200$	90 s
$200 < P_N \leq 5000$	120 s
$5000 < P_N$	Sopimuksen mukaan

/10,16, s. 40-41/

Lämpenemä  $\theta_2 - \theta_a$  voidaan laskea kaavalla: /10, 16, s. 40-41/

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Missä

$\theta_1$  on käämin lämpötila kylmävastusmittauksen aikana

$\theta_2$  on käämin lämpötila lämpenemätestin lopussa

$\theta_a$  on jäähtytteen lämpötila lämpenemätestin lopussa

$R_1$  on käämin resistanssi kylmänä

$R_2$  on käämin resistanssi lämpenemätestin lopussa

$k$  on lämpötilakerroin johdinmateriaalille 0°C:ssa. Kuparille lämpötilakerroin  $k$  on 235 ja alumiinille 225, jos ei toisin määritellä.

Vaihtoehtoinen kaava käytännön tarkoituksiin: /10, 16, s. 40-41/

$$\theta_2 - \theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (k + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a \quad (3)$$

#### 4.2.6 Osakuormatesti

Osakuormatestissä moottorista mitataan pisteet 25 %, 50 % ja 75 % nimelliskuormasta. Moottoreilla testataan myös pisteet 100 %, 115 % ja 125 % nimelliskuormasta. Osakuormien pisteet on määritelty standardissa IEC 60034-2-1. /10, 17, s. 24/

#### 4.2.7 Ylikuormitustesti

Ylikuormitustestissä testataan moottorin momenttia, jotta se kestä ylikuormitusta lyhyen ajan. Se testataan 160 %:lla nimelliskuormasta 15 sekunnin ajan. /10/

#### 4.2.8 Oikosulkutesti

Oikosulkutesti tyyppitestissä sisältää useita mittauspisteitä. Mittauspisteet mitataan joko käsin tai automaatiolla jännitettä säätämällä. Testissä moottorin roottori on lukittuna. Testissä jännite, sähköteho ja virta tallennetaan mittaustuloksiin. /10/

#### 4.2.9 Tyhjäkäyntitesti

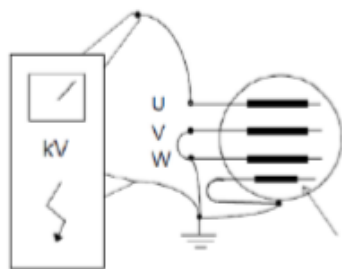
Tyhjäkäyntitestin tarkoitus on määrittää hankaushäviöt ja rautahäviöt, jotka vaikuttavat hyötysuhteeseen. Tyhjäkäyntitesti tyyppitestissä sisältää useita mittauspisteitä. Mittauspisteet mitataan joko käsin tai automaatiolla jännitettä säätämällä. Mittausta varten moottori irrotetaan testipenkistä, jotta akseli saa pyöriä vapaasti ilman mitään kuormaa. Testissä tulisi testata vähintään kahdeksan jännitteen arvoa. Neljä tai enemmän 110 % ja 80 % välillä nimellisjännitteestä laskettuna ja neljä tai enemmän välillä 70 % ja 30 %. Välillä 110-80 % mitataan rautahäviöitä ja 70-30 % hankaushäviöitä. Tarpeeksi alhaisessa jännitearvossa virta ei enää laske, jolloin mittaus lopetetaan. Staattorin käämien vastukset on mitattava aina ennen ja jälkeen testin. /10, 17, s. 24-25./

#### 4.2.10 Tärinämittaus

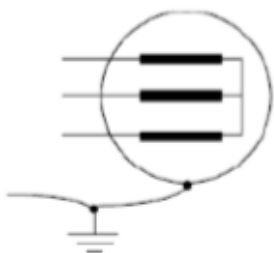
Tärinämittauksessa moottorin tärinät mitataan tyhjäkäynnillä, eli akseli saa pyöriä vapaasti. Tärinämittaus suoritetaan yleensä ennen tyhjäkäyntitestiä. Tässä testissä mitataan ainoastaan nopeusarvo tärinälle. Testi suoritetaan kaikille moottoreille horisontaalisessa asennossa, eli moottorin asennusasento ei vaikuta testin suorittamiseen. Testi sisältää viisi mittausta: aksiaalinen, D-pään vaaka, D-pään pysty, N-pään vaaka ja N-pään pysty. D-pää tarkoittaa akselin päätä ja N-pää toista päätä, missä sijaitsee tuuletin. Kuvasta 2 voidaan havaita yleinen oikosulkumoottorin kokonaisuus ja mistä mittaukset tehdään. Tärinämittaus tehdään IEC 60034-14-standardin pohjalta. /10/

#### 4.2.11 Eristyskoestus

Eristyskoestuksessa testataan lisälaitteiden ja käämien eristykset. Standardimoottoreille käämien koestus suoritetaan erikseen tähtipistekytken (Kuva 5.) ollessa saatavilla. Jos näin ei ole, suoritetaan koestus kaikki vaiheet yhdessä (Kuva 4.). Testi suoritetaan 2400 voltin jännitteellä ja 60 sekunnin ajan. Lisälaitteille käämityksessä testi suoritetaan 1500 voltilla 60 sekunnin ajan ja lisälaitteille, jotka eivät sijaitse käämityksessä, 500 voltilla ja 15 sekunnin ajan. Testiä ei tule suorittaa täydellä jännitteellä uudestaan. /10/



**Kuva 4.** Eristyskoestus moottorin U-vaiheelle /10/



**Kuva 5.** Eristyskoestus, kun tähtipiste-kytkentä on saatavilla /10/

#### 4.2.12 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksessa testataan käämien ja lisälaitteiden eristeet kaikkien eristeitä kuormittavien testien jälkeen. Mittauksessa käytetään 1000 voltin tasajännitettä, joka syötetään käämeihin 60 sekunnin ajaksi. Mitattaessa eristysvastusta, esimerkiksi U1/U2-vaiheeseen kytketään plus (+) ja maapotentiaaliin miinus (-). Samalla yhdistetään kaksi muuta vaihetta ja liitetään ne maapotentiaaliin. /10/

Lisälaitteiden eristysvastusmittauksessa lisälaitteet kytketään yhteen ja käämitys liitetään maapotentiaaliin. /10/

## 5 HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITYS

Tässä työn osiossa käsitellään standardin IEC 60034-2-1 vaatimuksia hyötysuhteen mittaamiselle. Hyötysuhteen määrittäminen tapahtuu mittaamalla moottoriin tuleva teho ja mittaamalla moottorista lähtevä teho:

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

Moottorin tapauksessa:

$$P_1 = \text{sähköinen}; P_2 = \text{mekaaninen}$$

Kolmivaiheinen sähköteho voidaan määrittää kaavalla

$$P_1 = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (5)$$

ja mekaaninen teho kaavalla: /17, s. 21/

$$P_2 = 2\pi * T * n. \quad (6)$$

ABB:llä hyötysuhteen määrittämiseen käytetään 2-1-1B-menetelmää, jossa otetaan huomioon häviöiden summa. Kyseessä on epäsuora mittaus.

Hyötysuhteen määrittely menetelmän 2-1-1B:n mukaan: /17, s. 21-22/

- Epäsuora mittaus
- Häviöiden erottelu
- Käämien vastukset ympäristön lämpötilassa
- Testi nimelliskuormalla
- Kuormahäviöt
- Osakuormatesti
- Tyhjäkäyntitesti
- Jatkuvat häviöt
- Lisäkuormahäviöt (lisähäviöt)
- Kokonaishäviöt

- Hyötysuhde.

Tässä työssä ilmenevät kokonaishäviöt  $P_T$  lasketaan määritettyjen rautahäviöiden, korjattujen hankaus- ja tuuletushäviöiden, kuormahäviöiden ja lisäkuormahäviöiden summasta /17, s. 28/. Nämä häviöt ovat tarkastelussa tarkemmin seuraavissa alaotsikoissa.

### 5.1 Kuormitustesti (Lämpenemätesti)

Ennen kuormitustestiä tulee mitata kylmävastukset ympäristön lämpötilassa. Moottori testataan nimellisarvoilla ja testaus voidaan lopettaa, kun lämpenemä on tasaantunut tarpeeksi. Lämpenemän tasaantuminen tarkoittaa, että lämpenemän muutos on 1 kelvin tai vähemmän puolen tunnin aikana. Vaihtoehtoisesti se voi olla 2 kelviniä tai vähemmän tunnissa. /17, s. 22-23/

Kuormitustestissä talletetaan mitattu sähköteho  $P_1$ , vääntömomentti  $T$ , virta  $I$ , jännite  $U$ , pyörimisnopeus  $n$ , taajuus  $f$  ja jäädytysilman lämpötila tuulettimen läheisyydessä  $\theta_c$ . Tuulettimen läheisyydestä siksi, että tämä lämpötila saattaa hiukan poiketa ympäristön lämpötilasta. Lisäksi mitataan ja lasketetaan vaiheresistanssien keskiarvo  $R$  ja käämityksen lämpötila moottorin nimelliskuormalla  $\theta$ . /17, s. 22-23/

Seuraavaksi kuormatestin perusteella saadaan kuormahäviöt. Ne ovat staattorikäämihäviöt ja roottorikäämihäviöt.

Staattorikäämihäviöt korjaamattomana saadaan yhtälöllä

$$P_s = 1,5 * I^2 * R, \quad (7)$$

ja staattorikäämihäviöiden korjaaminen 25°C lämpötilaan

$$P_{s,\theta} = P_s \times k_\theta, \quad (8)$$

jossa  $k_\theta$  on lämpötilan korjauskerroin. /17, s. 23/

Roottorikäämihäviöt korjaamattomana saadaan yhtälöllä: /17, s. 23/

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

jossa

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

Korjattujen staattorikäähäviöiden avulla saadaan korjatut roottorikäähäviöt: /17, s. 23/

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \times s_{\theta}, \quad (11)$$

jossa  $s_{\theta}$  korjaa roottorikäähäviöt 25°C lämpötilaan. Se määritteellään seuraavan kaavan avulla:

$$s_{\theta} = s \times k_{\theta}. \quad (12)$$

Lämpötilan korjaus moottorin sähköteholle saadaan korjattujen staattori- ja roottorikäähäviöiden avulla: /17, s. 23/

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}) \quad (13)$$

## 5.2 Osakuormatesti

Osakuormatestissä mitattavia osakuormapisteitä on kuusi: 125 %, 115 %, 100 %, 75 %, 50 % ja 25 % nimelliskuormasta. Osakuormatesti suoritetaan välittömästi kuormitustestin jälkeen moottorin toimintalämpötilassa. Tämä testi tulee suorittaa niin nopeasti kuin mahdollista, jotta moottorin lämpötilanmuutokset olisivat mahdollisimman minimaalisia. Syöttötaajuuden vaihtelu osakuormapisteiden välillä täytyy olla vähemmän kuin 0,1 %. /17, s. 24/

Staattorikäähäviöt jokaiselle kuormapisteelle saadaan kaavalla:

$$P_s = 1,5 * I^2 * R \quad (14)$$

Roottorikäähäviöt jokaiselle kuormapisteelle saadaan kaavalla

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s, \quad (15)$$

jossa

$$s = 1 - \frac{p \cdot x \cdot n}{f}. \quad (16)$$

Osakuormatestissä tulee taltioida jokaiselle kuormapisteelle virta, jännite, taajuus, pyörimisnopeus, sähköteho ja vääntömomentti. /17, s. 24/

### 5.3 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntitesti suoritetaan välittömästi lämpimälle moottorille osakuormatestin jälkeen. Tyhjäkäyntitestissä testataan kahdeksan jännitteen arvoa. Neljää ensimmäistä arvoa 110 %, 100 %, 95 % ja 90 % nimellisjännitteestä käytetään rautahäviöiden määrittämiseen. Neljää jälkimmäistä arvoa 60 %, 50 %, 40 % ja 30 % nimellisjännitteestä käytetään tuuletus- ja hankaushäviöiden määrittämiseen. Jännitteet mitataan alkaen 110 %:sta ja päättyen 30 %:iin. Tyhjäkäyntiresistanssi  $R_0$  määritellään välittömästi ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin. /17, s. 24-25/

#### 5.3.1 Jatkuvat häviöt

Jatkuvat häviöt saadaan, kun tyhjäkäynnin käännehäviöt vähennetään tyhjäkäynnin sähkötehosta. Jatkuvat häviöt ovat summa hankaus-, tuuletus- ja rautahäviöistä. Jatkuvat häviöt voidaan määrittää jokaiselle mitatulle jännitteen arvolle kaavalla

$$P_c = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}, \quad (17)$$

jossa

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{2,0}, \quad (18)$$

missä  $R_{2,0}$  on interpoloitu käänin vastusarvo jokaiselle jännitteen arvolle. /17, s. 25/

Noin 60 %–30 % välillä nimellisjännitteestä testataan neljä tyhjäkäyntipistettä tai enemmän. Tyhjäkäyntipisteiden jännitteestä saadaan käyrä jatkuvista häviöistä ( $P_c$ ) ja sitä verrataan tyhjäkäyntijännitteen neliöön ( $U_0^2$ ). Sen jälkeen ekstrapoloidaan suora viiva nollijännitteeseen. Sen perusteella saadaan nollijännitteen leikkauspiste. Tämän leikkauspisteen katsotaan vastaavan hankaus- ja tuuletushäviöitä  $P_{fw0}$  noin sykroninopeudella. /17, s. 25/



Noin 110 %–90 % välillä nimellisjännitteestä saadaan rautahäviöt. Tyhjäkäyntipisteiden jännitteen arvoista saadaan käyrä  $P_{fe} = P_c - P_{fw}$  ja sitä verrataan tyhjäkäyntijännitteeseen  $U_0$ . Rautahäviöiden määrittämiseen täydellä kuormalla tarvitaan sisäinen jännite  $U_i$ , mikä huomioi resistiivisen jännitteenaleneman pääkäämissä. Sisäinen jännite  $U_i$  voidaan laskea moottorille kaavalla

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * I * R * \sin \varphi\right)^2}. \quad (19)$$

ja generaattorille kaavalla

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

jossa  $\cos \varphi$  on

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U * I} \quad (21)$$

ja  $\sin \varphi$  on

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (22)$$

Täydellä kuormalla rautahäviöt interpoloidaan rautahäviöiden ja tyhjäkäyntijännitteen  $U_0$  käyrästä jännitteellä  $U_i$ . /17, s. 25-26/

#### 5.4 Lisäkuormitushäviöt (lisähäviöt)

Jäännöshäviöt  $P_{Lr}$  määritetään jokaiselle kuormapisteelle vähentämällä sähkötehosta. Kaavan 23 mukaan määritellään jäännöshäviöt: /17, s. 26/

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_{Fe} - P_{fw} - P_r, \quad (23)$$

jossa moottorin mekaaninen teho

$$P_2 = 2\pi * T * n \quad (24)$$

ja sähköteho

$$P_1 = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi. \quad (25)$$

Korjatut tuuletus- ja hankaushäviöt ovat

$$P_{fw} = P_{fw0} * (1 - s)^{2,5}, \quad (26)$$

jossa

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f}. \quad (27)$$

Lineaarilla regressioanalyysillä tasoitetaan jäännöshäviöt. Siinä häviöt esitetään kuormitusmomentin neliön funktiona

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

Kulmakerroin A ja leikkauspiste B ovat vakioita. Ne määritellään kuudessa (6) kuormituspisteessä (ks. Osakuormatesti s. 19 ja s. 23-24). Kulmakerroin ja leikkauspiste määritellään kuormituspisteistä seuraavien kaavojen avulla:

Kulmakerroin A:

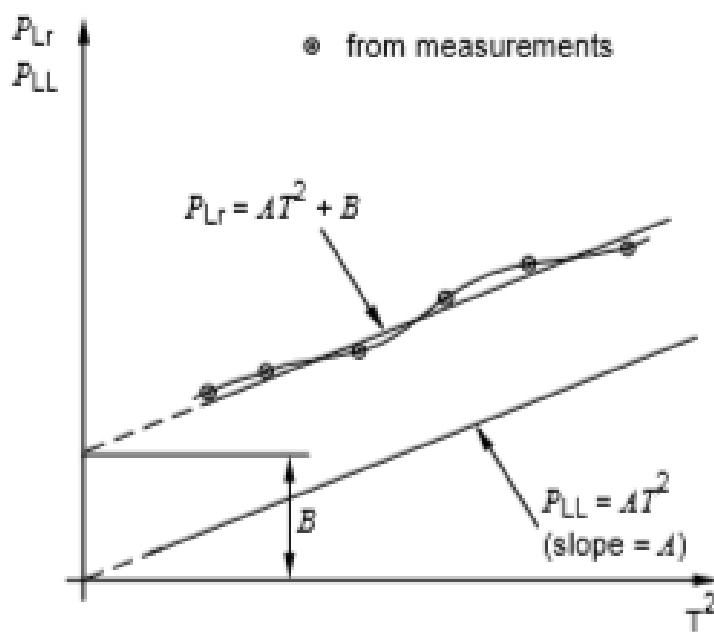
$$A = \frac{i * \sum(P_{Lr} * T^2) - \sum P_{Lr} * \sum T^2}{i * \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (29)$$

Leikkauspiste B:

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

Kuormapisteiden summaa kuvaa arvo  $i$ .

Leikkauspisteen B pitäisi olla pienempi (< 50 %) kuin lisäkuormitushäviöiden  $P_L$  moottorin nimellismomentilla. Jos ehto ei täyty, olisi mittaustulos syytä tarkistaa. Kuvassa 6 nähdään jäännöshäviöiden tasoittaminen.



**Kuva 6.** Jännöshäviöiden tasoittaminen, jossa leikkauspiste B on positiivinen. /17, s. 27/

Seuraavalla kaavalla lasketaan korrelaation korjauskerroin  $\gamma$ :

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

Sen ollessa alle 0,95, täytyy poistaa kuudesta pisteestä huonoin ja toistaa laskenta. Jos korjauskerroin on pisteen poistamisen jälkeen 0,95 tai sen yli, voidaan käyttää mittausta. Mutta jos korjauskerroin on alle 0,95, testi on epäonnistunut ja käyrälle virheen aiheuttanut ongelma tulisi poistaa ja testi toistaa. Korjauskertoimen olisi suotavaa kuitenkin olla 0,98 tai parempi, kun testidata on pätevä. /17, s. 27/

Lisäkuormahäviöt voidaan määrittää jokaiselle kuormapisteelle, kun kulmakerroin A on määritetty: /17, s. 27/

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

Lisäkuormitushäviöt mainitaan tässä työssä jatkossa nimellä lisähäviöt.

## 6 TESTEISSÄ KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO

### 6.1 Testipaikan oma laitteisto

Testipaikalla sijaitseva testauslaitteisto on V&B:n valmistama. Testauslaitteisto sisältää seuraavat laitteet: testausohjelmisto moottoreiden testaukseen, moottorin kiinnitysalusta, kuormamoottorit, keskusket, muuntajat ja mittalaitteet. /15/

Kuvassa 7 yleisjärjestely testipaikasta ja osa testipenkkiin sijoitetuista laitteista.



**Kuva 7.** Yleiskuva TP24:stä.

Testauksen kannalta olennaiset laitteet esitettynä kuvassa 7.

1. Lämpötilojen mittausyksikkö, PT100 ja K-tyyppin termoparit
2. Moottoreiden kiinnitysalusta, sähkösäätöinen korkeus
3. Sähkönsyöttökaappi
4. Momentianturit Kistler 4503A 10/2 Nm, 50/10 Nm ja akselisuojat, kaksi kappaletta

5. Kuormamoottorit, 1,1 kW ja 7,5 kW
6. Mittauskaappi momenteille, sisältää logiikan
7. Mittauskaappi lämpötilan mittauksille, sisältää logiikan. /15/

Testipaikka on suunniteltu kolmi- ja yksivaiheisille vaihtojännitemoottoreille, joiden jännite on maksimissaan 1000 VAC. /15/

## 6.2 Mittalaitteet

Testipaikalla sijaitsevat mittalaitteet voidaan nähdä taulukosta 2. Lisäksi kuvissa 8-10 nähdään testauksen kannalta oleellisia mittalaitteita.

**Taulukko 2.** Mittalaitteet TP24-testipaikalla. /15/

Laite	Valmistaja ja malli	Mittaustarkkuudet
Vastusmittari	Burster Resistomat 2318	$\leq \pm 0,05\%$ jokaisella mittausalueella /12/
Lämpötilojen mittaus	RTD PT100	Mittausalue 0...200°C, mittausepävarmuus $\pm 0,5\%$ mittausalueesta /15/
Virtamuuntaja	LEM IT200-S Ultrastab	$\leq 100$ ppm, eli 0,01% /15/
Virtamuuntaja	LEM IT60-S Ultrastab	$\leq 100$ ppm, eli 0,01% /15/
Tehoanalysointori	Yokogawa WT1800	Virralle ja jännitteelle ( $45 \text{ Hz} \leq f \leq 66 \text{ Hz}$ ) $\pm 0,1\% + 0,05\%$ lopullisesta arvosta /13,15/ Taajuus $\pm 0,06\%$ , momentti $\pm 0,05\%$ , $\pm 0,05\%$ lopullisesta arvosta, nopeus $\pm 0,05\%$ /15/
Momenttianturi	Kistler 4503A, Dual range	Standardi-mittausalueella 0,1 ja laajennetulla alueella 0,2 /14, 15/

Kuvassa 8 nähdään Yokogawa WT1800-tehoanalysaattori, jolla voidaan mitata virtaa, jännitettä, tehoa, momenttia, kierrosnopeutta ja taajuutta. Tässä sovelluksessa momentin mittaus Yokogawalla rajoittuu ainoastaan momenttikäyrään ja muissa testitilanteissa mittauksen suorittaa PLC. /15/

Kuvassa 9 nähdään vastusmittari Burster Resistomat 2318, jolla mitataan kylmävastukset, vastukset testien välissä sekä jäähtymäkäyrä staattorin käämeistä. Mittaus tapahtuu automaattisesti tai vaihtoehtoisesti käsin. Mittausjohdot ovat valmiina kiinni moottorissa, mikä lisää testipaikan turvallisuutta. /15/



**Kuva 8.** Yokogawa WT1800-tehoanalysaattori



**Kuva 9.** Burster Resistomat 2318-vastusmittari

Kuvassa 10 nähdään Kistlerin 4503A-momenttianturi, jolla mitataan testattavan moottorin momenttia. Momenttianturin paikka testauslaitteistossa on kuormamootorin ja testattavan moottorin välissä (**Kuva 7.**). Tässä testipenkissä antureita on kaksi, 10/2 Nm anturi ja 50/10 Nm anturi. Momenttianturien päistä löytyy KTR Rotex GS-akselikytkimet. Momenttianturit ovat kaksialueisia, joten koestaja voi itse valita käytettävän momenttialueen testausohjelmistosta. /15/



**Kuva 10.** Kistler Dual Range 4503A-momenttianturi

## 7 50/10 NM -PUOLEN TESTAUS

Tarkoituksena oli tutkia testauslaitteiston toimivuutta ja mittausluotettavuutta aikaisempaan tutkimukseen pohjautuen. Tämä työ jatkoi käyttöönottoprojektia, joten työssä prosenttilaskentaan käytetyt kaavat 33–48 pohjautuvat edelliseen tutkimukseen. Osaa tämän tutkimuksen moottoreista oltiin testattu jo aikaisemmin TP24:llä. Uusia testejä päätettiin suorittaa, koska aikaisemman käyttöönoton kaikista testausasetteluista ei ollut varmaa tietoa. Tulosten tasaisuus TP24:llä oli todettu aikaisemmassa tutkimuksessa, mutta asiaan haluttiin varmistus. /18/

Testauksia lähdettiin tekemään ja testauspuolen momenttianturin nollausta tarkasteltiin uusien testien avulla. Jos momenttianturissa on jäännöksiä, niin tämä johtaa siihen, että automaatio säätää momentin väärin, mikä taas aiheuttaa väärää hyötysuhteita. Tässä työssä ei tehty ylikuormitustestiä, tärinämittausta, eristyskoestusta tai eristysvastusmittausta, koska ne eivät ole oleellisia hyötysuhdetta selvittäessä.

Moottoriksi valikoitui 2,2 kW:n M3AA 90L 2, jota oli testattu jo TP4:llä ja TP22:lla. Näin voitiin varmistua, että hyötysuhteet todella ovat korkeampia TP24:llä. Raportista mittaustulokset otettiin IEC<sub>Tested</sub>- sarakkeesta.

Tässä asiayhteydessä ristiintestaus tarkoittaa sitä, että sähkömoottori testataan ensin testauspaikalla x ja sen jälkeen testauspaikalla y. Testipaikka y on todettu jo aikaisemmin luotettavaksi, joten tuloksia voidaan vertailla keskenään ja tämän perusteella voidaan arvioida, että onko testipaikka x luotettava.

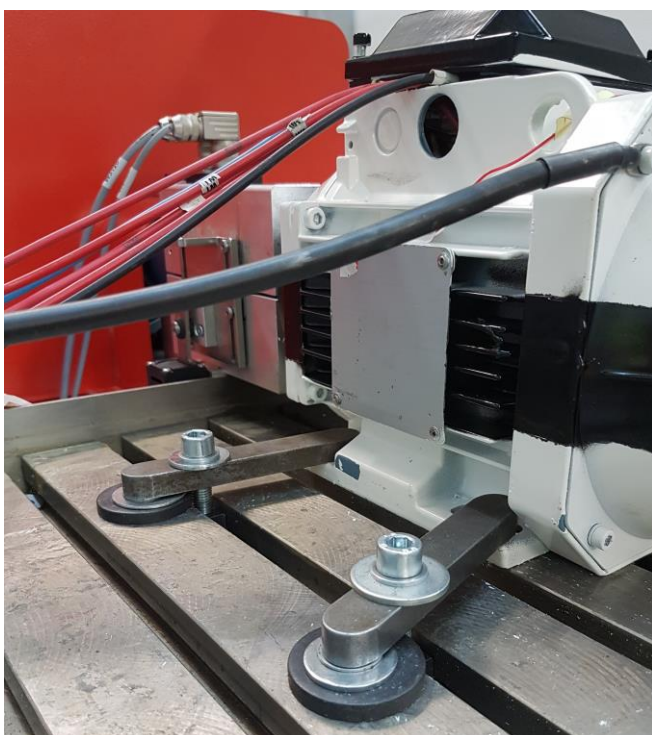
**Taulukko 3.** M3AA 90L 2-moottorin nimellistiedot.

Jännite, U	Taajuus, f	Momentti, T	Teho, P	Pyörimisnopeus, n	Virta, I	cos φ	Käyttöluokka
400 V	60 Hz	6,01 Nm	1,5 kW	3495 rpm	4,4 A	0,84	S1

Moottorin nimellistiedot nähdään taulukossa 3. Ennen testiä suunniteltiin pienien muutoksien tekemistä testipenkin moottorin kiinnitykseen. Moottori kiinnitettiin akselikiiloilla, joiden alle laitettiin prikkoja (**Kuva 11.**). Prikat siitä syystä, että



moottoria kiristäessä voima kohdistuu alaspäin, eikä siten työnnä moottoria pois rihtauksesta. Rihtaukseen vaikuttavia tekijöitä ovat myös maalijäämät jalkojen alla, joten ne poistettiin ennen koestusta. Lisäksi vaihdettiin akselikytkinten kumit, koska ne olivat todella tiukat ja kovat. Pehmoisemmat kumit antavat enemmän liikkumavaraa ja mahdollistavat paremman rihtauksen. Testipaikan ympäristön lämpötila mitattiin öljyssä olevalla anturilla, jotta ympäristön lämpötilan muutokset olisivat tasaisempia kuvaajalla. Ympäristön lämpötilan muutos huoneessa on kuitenkin väistämätön, jos TP25:llä testataan moottoreita.



**Kuva 11.** Prikat lisättynä kiilojen alle

### 7.1 Alumiinimoottorin ensimmäinen testi

Moottorille suoritettiin tyypitesti, joka sisälsi momenttikäyrän. Momenttikäyrä ajettiin 50%:lla nimellisestä jännitteestä ja tätä arvoa tullaan käyttämään tässä työssä jokaisessa 90-runkokoon moottorin testissä TP24:llä, poikkeuksena asiakkaan tilaama moottori. Testauksessa käytettiin testauslaitteiston omaa sähköistä momentin nollausta.

Testitulokset näyttivät onnistuneilta V&B:n testausohjelmistossa. Testitulokset käännettiin ABB:n mittausohjelmaan ja paljastui ongelmia. Suurin osa häviöistä oli negatiivisia, joten ohjelmien välisessä kommunikoinnissa oli siis ongelma. Lisäksi moottorin lisähäviöt olivat nimellisteholla 1,3 kW ja hyötysuhteet sekä kaikki vastukset olivat tuhannella kerrottuna tuloksissa. Esimerkiksi 85 % hyötysuhde oli 85 000 %. Näistä lähtötiedoista voitiin päätellä, että ensimmäinen korjattava kohde on testaavan ohjelman ja ABB:n mittausohjelman välinen kommunikointi.

Hyötysuhteiden ja vastusten arvojen korjaus saatiin suoritettua V&B:n ohjelman kautta valitsemalla oikeat suureet. Suureet pitivät olla watteina, ampeereina ja voltteina. Suureet vaihdettiin ja Excel-tiedoston tuonti testausohjelmistosta saatiin oikeassa muodossa ABB:n omaan mittausohjelmaan. Testiraportissa hyötysuhteet ja häviöt olivat sen jälkeen luettavissa. Testausasettelut suoritettiin testipaikalle tehdyn käyttöohjeen mukaan. Käyttöohjeeseen tulee tehdä maininta suureiden valinnasta, jotta samalta ongelmalta vältyttäisiin tulevaisuudessa.

Seuraavana havaittiin ongelma lämpötilakanavien näkymisessä ABB:n mittausohjelmassa ja osakuormapisteiden virheellisyys. Osakuormatestistä puuttuivat kokonaan lämpötilat vyyhdistä, laakereista, rungosta ja lämpötilapiirturin käyrät eivät näkyneet ABB:n mittausohjelman testaustuloksissa. Vanhoja testituloksia tutkimalla huomattiin, että V&B:n ohjelmisto ei taltioi kuin kaksi lämpötilaa, jotka ovat vyyhdestä ja rungosta. Osakuormatestissä testausohjelmisto oli ajanut kuusi pistettä, mutta kuormapisteet olivat sattumanvaraiset. Asettelut osakuormille oltiin tehty standardi IEC-60034-2-1 mukaan, jotka ovat nähtävissä tässä työssä sivulla 18.

## **7.2 Alumiinimoottorin toinen testi**

Moottorin toista testausta lähdettiin suorittamaan samoilla lähtökohdilla kuin ensimmäistä. Muutoksia testausohjelman asetteluun tehtiin aikaisemmin mainitut osakuormien mittauspisteet. Osakuormatestin pisteet olivat tällä kertaa halutut, mutta lämpötilakanavien tulokset puuttuivat edelleen osakuormatestistä. Huomattiin, että

ABB:n mittausohjelman ohjelmakoodiin oli tullut pieni muutos päivityksen yhteydessä, joka saatiin korjattua. Tämän ohjelmakoodin muutoksen takia ei nähty osakuormatestin lämpötiloja.

Tyhjäkäyntitesti suoritettiin kahdellatoista mittauspisteellä ja testitulokset itsessään onnistuivat, mutta tuonnissa ABB:n mittausohjelmaan huomattiin, että yksi mittauspisteistä on tuloksissa kahteen kertaan. Tässä testissä ei suoritettu momenttikäyrätestiä, vaan testattiin ainoastaan lämpöajo ja testituloksien tuonti testausohjelmistosta ABB:n mittausohjelmaan.

### **7.3 Alumiinimoottorin kolmas ja neljäs testi**

Kolmannessa testissä moottoria lähdettiin testaamaan muutamalla muutoksella. Suoritettiin ensin 30 minuutin lämpöajo, jonka jälkeen testaus pysäytettiin ja testauslaitteisto suoritti sähköisen momentin nollauksen. Tarkoituksena oli ajaa momenttianturi lämpimäksi, mikä tuottaisi siten tarkempia mittauksia. Tämä nollauskäytäntö on käytössä uusimmilla testipaikoilla, mutta niissä se täytyy suorittaa käsin.

Nollauksen jälkeen testaus käynnistettiin mahdollisimman nopeasti uudelleen. Tämän testiversioon ajettiin myös momenttikäyrä. Momenttikäyrä ja virran kerroinikäyrä onnistuivat, mutta tuonti ABB:n mittausohjelmistoon paljasti ongelman virran kerroinikäyrässä, josta on luettavissa käynnistysvirta. V&B:n raportissa käyrän arvot ovat oikeat, joten tiedoston tuonnissa tapahtuu ongelma. Tyhjäkäyntitesti suoritettiin 30 pisteellä edellisen 15:sta sijaan. Testin kuvaaja näytti hyvin samalta kummassakin raportissa, mutta edelleen yksi jännitteen arvoista oli kahteen kertaan.

Neljäs testi tehtiin ilman 30 minuutin lämpöajoa. Raportista voitiin todeta momenttikäyrän ja virran käyrän olleen onnistuneita, mutta tiedoston tuonnissa tapahtuva ongelma ei ollut vain yksittäinen poikkeus, vaan ongelma oli toistuva.

Testistä 4 saatu hyötysuhde oli 86,12 % ja testistä 3 saatu hyötysuhde oli 86,05 %, joten testien 3. ja 4. välillä ero on pieni. Täten myös muutokset eri häviöissä olivat erittäin pienet. Tyhjäkäyntikäyrä suoritettiin toistamiseen 30 pisteellä. Korjaukseksi edellisen testin jälkeen tehtiin testausohjelmistoon muutos. Jännitteen

mittauspisteet asetettiin välille  $1,25 \cdot U_N$  ja  $0,2 \cdot U_N$ . Tuloksista poistui yhden mittauspisteen kahdentuminen, joka ilmeisesti johtui siitä, että tiedoston tuonnissa ABB:n mittausohjelma tarvitsi  $0,2 \cdot U_N$  pisteen ja sen puuttuessa ohjelmisto korvasi sen jonkun muun mittauksen kahdentumisena. Testitulosten taulukoissa näkyvä  $\Delta\theta_{Cu}$  on moottorin lämpenemän arvo 30 sekunnin jälkeen sähkönsyötön katkaisusta. Testiä 1 ei tulla esittämään taulukossa 4, koska se oli testi, jolla tutustuttiin testausohjelmistoon ja -laitteistoon.

**Taulukko 4.** M3AA 90L 2-moottorin testit TP24:llä.

	Testi 2. TP24, 4.2.2020	Testi 3. TP24, 5.2.2020, 30 minuutin läm- pöajo ennen	Testi 4. TP24, 6.2.2020	Keskiarvot tuloksista
Hyötysuhde	86,17%	86,05%	86,12%	86,11 %
Mekaaninen teho, $P_2$	2,2 kW	2,19 kW	2,19 kW	2,193 kW
Moottorin sähkö- teho, $P_1$	2,55 kW	2,54 kW	2,54 kW	2,543 kW
Virta, I	4,31 A	4,28 A	4,28 A	4,29 A
Jättämä, s	2,988 %	3,184 %	3,192 %	3,121 %
Lämpenemä, $\Delta\theta_{Cu}$ (30 sek)	53,7 K	53,8 K	52,8 K	53,43 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	31,8 W	29,6 W	30,8 W	30,73 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	66,1 W	66,6 W	65,9 W	66,2 W
Staattorihäviöt, $P_s$	139,0 W	137,9 W	136,4 W	137,77 W
Roottorihäviöt, $P_r$	70,8 W	74,5 W	74,6 W	73,3 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	45,4 W	46,1 W	44,7 W	45,4 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	352,3 W	356,1 W	352,5 W	353,63 W

Taulukon 4 tuloksista voidaan todeta testipaikan tuottavan samalla moottorilla tasaisia tuloksia ja testien 3 ja 4 välillä ei ole juurikaan eroa. Tulosten tasaisuus oli

todettu myös edellisessä käyttöönotossa ja nyt se oli varmistettu tällä testauspuolella. /18/

Näistä tuloksista voitiin myös päätellä, että TP22:lla ja TP4:lla suoritettava 30 minuutin lämpöajo ennen varsinaista lämpöajoa ei vaikuttanut tuloksiin merkittävästi tällä moottorilla. TP24:llä suoritettujen testien häviötkin ovat lähellä toisiaan, joten saadut tulokset voitiin todeta järkeviksi.

#### 7.4 Alumiinimoottorin ristiintestaus ja vertailu

Moottorin viides ja kuudes testi suoritettiin TP22:lla. Testin numero viisi tarkoituksena oli saada vertailutulos aikaisemmille testeille, jotka suoritettiin TP24:llä. Moottorin testaus TP22:lla suoritettiin lähes samoissa olosuhteissa kuin testaus TP24:llä. Ainoa muutos moottorin testausasetteluun oli TP22:lla olevat moottorin kiinnitysalustat, jolloin moottoria ei tarvinnut kiinnittää kiiloilla. Nämä mahdollistavat helpommat ja usein myös tarkemmat rihtaukset. Taulukosta 5 voidaan nähdä saadut tulokset.

**Taulukko 5.** M3AA 90L 2-moottorin keskiarvo TP24:ltä ja vertailutestit.

	Keskiarvot taulukon 4 tu- loksista	Testi 5. Vertai- lutesti TP22, 12.2.2020	Testi 6. Vertai- lutesti TP22, 12.2.2020, tyh- jäkäyntikäyrä n. 15 min. myöhemmin
Hyötysuhde	86,11 %	85,96 %	85,75 %
Mekaaninen teho, P <sub>2</sub>	2,193 kW	2,16 kW	2,16 kW
Moottorin sähkö- teho, P <sub>1</sub>	2,543 kW	2,52 kW	2,52 kW
Virta, I	4,29 A	4,25 A	4,25 A
Jättämä, s	3,121 %	3,192 %	3,192 %
Lämpenemä, $\Delta\theta Cu$ (30 sek.)	53,43 K	52,6 K	52,6 K

Hankaushäviöt, $P_{fw}$	30,73 W	25,2 W	26,5 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	66,2 W	65 W	68,4 W
Staattorihäviöt, $P_s$	137,77 W	133,7 W	133,7 W
Roottorihäviöt, $P_r$	73,3 W	74 W	73,8 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	45,4 W	55,4 W	56,2 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	353,63 W	353,3 W	358,6 W

Taulukosta 5 voidaan huomata, että moottorin ristiintestauksessa ei ilmennyt kuin pieni ero. Seuraavassa laskennassa on käytetty vain alkuperäisen mittauksen hyötysuhdetta, koska toisessa mittauksessa testattiin vain moottorin seisottamisen vaikutusta tuloksiin. Hyötysuhteen erotukseksi saatiin

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22} = 86,11\% - 85,96\% = 0,15\%. \quad (33)$$

Kuudes testi (**Taulukko 5.**) nostaa esiin uuden mahdollisen haasteen, jotka ovat koestajien toimintatavat. V&B:n testauslaitteiston automaatio mittaa vastukset välittömästi testien jälkeen, kun taas käsinmittauksissa aikaa kuluu useita minuutteja ennen kuin mittaukset saadaan aloitettua. Tämä siitä syystä, että TP22:lla ja muilla testipaikoilla moottoriin käämeihin asetettavat vastusten mittausjohdot asetetaan käsin koestajan toimesta. TP24:llä vastuksiin käytettävät mittausjohdot ovat kiinni koko testin ajan moottoreiden käämeissä.

Varsinkin pienten moottoreiden kohdalla tämä voi vaikuttaa, koska moottori jäähtyy nopeasti ja muun muassa laakerien rasvat jähmettyvät. Moottoria päätettiin seisottaa 15 minuuttia, koska siinä ajassa se ehtii selvästi jäähtyä. Moottorin 15 minuutin seisottaminen tuotti hyötysuhteeseen eroa

$$\eta_{TP22} - \eta_{TP22,15 \text{ min}} = 85,96\% - 85,75\% = 0,21\% \quad (34)$$

## 7.5 Valurautamoottorin testaukset, ensimmäinen ja toinen

Seuraavaksi testipenkkiin kiinnitettiin M3BP 90SLD 4-valurautamoottori, jolle suoritettiin testi TP24:llä. Moottorilla oli ennestään tehtyjä tyyppitestejä TP24:llä ja muilla testipaikoilla. Aiemmistä tuloksista hyödynnettiin TP22:lla suoritettua

testiä, koska testipaikan toimintatavat tiedettiin. Alla olevassa taulukossa (**Taulukko 6.**) on nimellistiedot, joilla moottoria testattiin. Ennen tätä työtä hyötysuhde-eroa M3BP 90SLD 4 -moottorin ristiintestauksessa oli ollut 0,45 %. Tässä työssä ei käytetty vanhan TP4:n tuloksia. /18/

**Taulukko 6.** M3BP 90SLD 4-moottorin nimellistiedot.

Jännite, U	Taa- juus, f	Momentti, T	Teho, P	Pyörimis- nopeus, n	Virta, I	cos φ	Käyttö- luokka
400 V	50 Hz	10,02 Nm	1,5 kW	1430 rpm	3 A	0,83	S1

Taulukossa 7 on TP24:llä suoritettu testi ja vertailutestit, jotka on tehty TP22:lla. 30 sekunnin lämpenemä jätettiin pois vertailusta, koska se puuttui edellisestä työstä, jota käytin tämän testituloksen lähteenä.

Moottorille M3BP 90SLD-4 suoritettiin mittaukset käsinmittauksena, eli lämpöajo käynnistettiin asettamalla itse arvot, osakuormapisteet laskettiin ja mitattiin käsin sekä oikosulkutesti mitattiin käsin. Kaikki muut testiosiot suoritettiin automaattilla. Tyhjäkäyntitesti ja oikosulkutesti todettiin melko vaikeaksi suoritettavaksi käsinmittauksella. Testien suorittamisesta löytyy tarkempi kuvaus kohdista 9.3 ja 9.4.

**Taulukko 7.** M3BP 90SLD 4-moottorin testi 1. ja vertailutestit.

	Testi 1. TP24:llä suoritettu testi, kä- sinmittaus	Vertailutesti 1. TP22, 15.3.2019 /18/	Vertailutesti 2. TP22, 4.3.2020	Vertailutesti 3. TP22, 4.3.2020, tyh- jäkäynti n. 15 min. myöhem- min
Hyötysuhde	83,66 %	83,21 %	83,36 %	83,34 %
Mekaaninen teho, P <sub>2</sub>	1,5 kW	1,5 kW	1,51 kW	1,51 kW
Moottorin sähkö- teho, P <sub>1</sub>	1,79 kW	1,8 kW	1,81 kW	1,81 kW

Virta, I	3,2 A	3,2 A	3,22 A	3,22 A
Jättämä, s	4,441 %	4,95 %	4,898 %	4,898 %
Hankaushäviöt, P <sub>fw</sub>	7,68 W	9,10 W	7,3 W	7,6 W
Rautahäviöt, P <sub>Fe</sub>	63,29 W	64,59 W	64 W	64,1 W
Staattorihäviöt, P <sub>s</sub>	131,66 W	133,01 W	132,1 W	132,1 W
Roottorihäviöt, P <sub>r</sub>	73,04 W	79,11 W	79 W	79 W
Lisähäviöt, P <sub>LL</sub>	14 W	16,45 W	18,7 W	18,7 W
Kokonaishäviöt, P <sub>T</sub>	291,58 W	302,25 W	301 W	301,4 W

Testaustuloksista voitiin huomata, että testipaikkakohtaiset erot ovat hyvin pienet. Hyötysuhteen erotukseksi saadaan

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22} = 83,66 \% - \left( \frac{83,21 \% + 83,36 \%}{2} \right) = 0,375 \%. \quad (35)$$

Vuonna 2019 tehdyissä testeissä hyötysuhteen ero oli 0,45 %, eli pientä eroa on havaittavissa. Seuraavassa laskennassa 17,575 watin lisähäviö saatiin laskemalla TP22:n vertailutestien keskiarvo taulukosta 7. Laskennassa ei huomioitu 15 minuutin jälkeen tehtyä tyhjäkäyntitestiä. Lisähäviöt oli todettu poikkeavaksi jo edellisessä tutkimuksessa /18/. Nyt lisähäviöissä oli eroa

$$\frac{P_{LL,TP22} - P_{LL,TP24}}{P_{LL,TP22}} * 100 \% = \frac{17,575 W - 14 W}{17,575 W} * 100 \% = 20,34 \%. \quad (36)$$

Moottorin hyötysuhteeseen vaikuttaa kuitenkin moni eri asia ja pienikin ero testausympäristössä tai muutos testimoottorissa voi aiheuttaa jopa prosenttien eron. Näissä testeissä käytettiin useaan kertaan ajettuja sähkömoottoreita, joten tiedettiin, että hyötysuhteet eivät voi paljon poiketa toisistaan.

Testituloksista voitiin myös huomata, että epäilty koestajista johtuva virhe ei pätenyt tällä moottorilla. Eroa hyötysuhteissa oli

$$\eta_{TP22} - \eta_{TP22,15 m} = 83,36 \% - 83,34 \% = 0,02 \%. \quad (37)$$



## 7.6 Asiaksmoottorin M3BP 90SLB 2-testaus

Lopuksi TP24:llä 50/10 Nm-puolella testattiin asiaksmoottori, joka vielä ristiin-testattiin TP22:lla. Moottorin sarjanumero on 3G1F2007651712. Taulukosta 8 nähdään testattavan moottorin nimellistiedot.

**Taulukko 8.** M3BP 90 SLB 2-moottorin nimellistiedot.

Jännite, U	Taa- juus, f	Momentti, T	Teho, P	Pyörimis- nopeus, n	Virta, I	cos $\phi$	Käyttö- luokka
660 V	50 Hz	3,61 Nm	1,1 kW	2910 rpm	1,35 A	0,85	S1

Ensimmäinen tyyppitesti epäonnistui. Testauslaitteisto tulkitsi moottorin olevan reilun tunnin lämpöajon jälkeen valmis, mikä osoittautui liian vähäiseksi. Syynä saattoi olla, että termopari oli huonosti aseteltu runkoa vasten. Testiosiot suoritettiin käsin, mutta ne epäonnistuivat moottorin ollessa liian kylmä. Käsinmittauksen määritelmä on mainittu osiossa 7.5.

Moottorille suoritettiin toinen tyyppitesti, joka sisälsi momenttikäyrän. Momenttikäyrä suoritettiin onnistuneesti täydellä jännitteellä, mutta mittausdata ja kuvaaja eivät ole käyttökelpoisia tuotteita esitettäessä asiakkaalle, koska virran kerroinkäyrä on virheellinen. Taulukosta 9 nähdään testaustulokset.

**Taulukko 9.** M3BP 90 SLB 2-moottorin ristiintestaus.

	Käsinmittauksella suoritettu testi, TP24, 17.3.2020	Vertailutesti, TP22, 30.3.2020
Hyötysuhde	84,15 %	83,98 %
Mekaaninen teho, P <sub>2</sub>	1,11 kW	1,1 kW
Moottorin sähköteho, P <sub>1</sub>	1,32 kW	1,31 kW
Virta, I	1,35 A	1,34 A

Jättämä, s	2,694 %	2,621 %
Lämpenemä, $\Delta\theta_{Cu}$ (30 sek.)	20,5 K	29,5 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	36,2 W	34,8 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	44,6 W	44 W
Staattorihäviöt, $P_s$	74,1 W	70,2 W
Roottorihäviöt, $P_r$	32,3 W	31,3 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	21,9 W	29,4 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	209,1 W	209,7 W

Moottorin testaustulokset ovat hyvinkin samankaltaiset ja hyötysuhteen erotukseksi saatiin

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22} = 84,15 \% - 83,98 = 0,17 \%. \quad (38)$$

Tämän testin perusteella 90-runkokoa ja sitä suurempia moottoreita voidaan hyötysuhteen puolesta testata luotettavasti TP24:llä. Moottorin lämpenemä oli ollut suurempi TP22:n testissä, mikä voi selittää tässä tilanteessa pienen eron hyötysuhteessa.

Moottorin tyhjäkäyntitesti suoritettiin välittömästi oikosulkutestin jälkeen, eli testattava moottori vedettiin irti kuormamoottorista ja testi ajettiin testipenkissä ilman kuormaa. Lisähäviöissä on pientä eroa edelleen, mutta vähintään tällä runkokoolla kokonaishäviöt ovat niin suuret, että vaikutus on minimaalinen. Häviöt saattavat vaihdella useita watteja häviöosuutta kohden, kuten taulukosta voidaan huomata.

## 8 10/2 NM -PUOLEN TESTAUS

### 8.1 Ensimmäinen, toinen ja kolmas testi 10/2 Nm testauspuolella

Moottoriksi testeihin valikoitui M3BP 80ME 2-moottori, jonka sarjanumero on 3G1C18030638685001. Tätä kyseistä moottoria oltiin testattu myös edellisessä käyttöönotossa /18/. Moottorin vanhoja testituloksia ei käytetty ja syy on mainittu osiossa 7. Moottori pyrittiin asentamaan testipenkkiin samalla lailla kuin isommat moottorit. Taulukosta 10 nähdään moottorin nimellistiedot. Raportista kaikki mitaustulokset otettiin IEC<sub>Tested</sub>- sarakkeesta.

**Taulukko 10.** M3BP 80ME 2-moottorin nimellistiedot.

Jännite, U	Taajuus, f	Momentti, T	Teho, P	Pyörimisnopeus, n	Virta, I	cos phi	Käyttöluokka
400 V	50 Hz	3,67 Nm	1,1 kW	2865 rpm	2,3 A	0,84	S1

Ainoa muutos testausasetteluun TP24:llä oli akselikytkimen lisäpalan asennus, koska muuten moottorin akselin pituus ei olisi riittänyt testaukseen. Moottorin testaus aloitettiin momenttikäyrällä, joka epäonnistui lukuisista yrityksistä huolimatta. Moottorin momenttikäyrän asettelu oli aluksi 50 % nimellisjännitteestä. Testi saatiin onnistumaan 30 %:n asettelulla. Ongelma johtuu taajuusmuuttajan virtarajan asettelusta. V&B:n toimittamassa testipaikan käsikirjan tiedoissa ja todellisuudessa on ristiriitoja. Kuormamoottori on 1,5 kW testipaikan käsikirjassa, testausohjelmistossa 0,55 kW ja testipenkissä on kiinni 1,1 kW:n moottori.

Rajat on aseteltu 0,55 kW moottorille, joten on lähes mahdotonta ajaa momenttikäyrää 80-runkokoon moottorille ja varsinkaan suuremmille napaluvuille kuin kaksi. V&B:n mukaan heidän tarjouksessaan laskenta tehtiin 0,55 kW:n kuormamoottorille. Taajuusmuuttajassa kuormamoottorin nimellisvirta on asetettu 2,1 ampeerin arvoon. V&B:n arvion mukaan arvon voi muuttaa taajuusmuuttajalta korkeintaan 2,8 ampeeriin hetkellisesti, mutta tämä arvo ei sovellu jatkuvaan käyttöön. Taajuusmuuttaja kestää 175 % ylivirtaa 40 sekuntia, mutta esimerkiksi 1,1 kW:n

testattavalla moottorilla tämä ylittyi nopeasti ja tästä syystä momenttikäyrät eivät onnistuneet.

Toisessa testissä momenttikäyrää ei testattu edellä mainitusta syystä. Testausohjelmistoon säätötavaksi vaihdettiin tehonsäätö momenttisäädön sijaan, jolla haettiin ratkaisua liian nopeisiin mittauksiin. Oletuksena oli, että ohjelmisto säätää tehoa hiukan kauemmin kuin momenttia ja näin saataisiin pidempiä sekä tarkempia mittauksia.

Testausajoissa ei huomattu eroa, joka riippuisi kuorman säätötavasta. Osakuormat testissä mittauksen nopeuteen vaikutti enimmäkseen moottorin momentti, eli jos moottorissa oli todella pieni nimellismomentti, esimerkiksi 0,6 Nm, niin testauslaitteisto suoritti koko mittauksen nopeammin. Moottorin nimellismomentin ollessa yli yhden newtonmetrin, mittauksen kesto oli useita sekunteja pidempi. Huomattiin, että ajan pidentyminen johtui ainoastaan siitä, että testauslaitteisto sääteli kuormaa, eikä täten mitannut itse kuormapistettä yhtään sen pidempään kuin aikaisemmin.

Kolmanteen testiin ajettiin 30 minuutin lämpöajo ennen varsinaista lämpöajoa. Sama lämpöajo suoritettiin myös 90-runkokoon moottorille. Testi aiheutti pienen eron hyötysuhteeseen, mikä oli 30 minuutin lämpöajolla huonompi. Moottori on lämpenemätuloksen perusteella hiukan viileämpi, kun 30 minuutin lämpöajo on suoritettu ennen varsinaista lämpöajoa. Lämpenemän ero oli

$$\Delta\theta C u_{norm} - \Delta\theta C u_{30min} = \left( \frac{33,2 K + 33,9 K}{2} \right) - 27,6 K = 5,95 K. \quad (39)$$

Lämpenemän ero ei korreloi tässä suoraan hyötysuhteeseen, koska kuumemmalla moottorilla hyötysuhde pitäisi olla huonompi. Tulosten puolesta (**Taulukko 9.**) voitiin todeta, että pienempien moottorien testauspuoli tuotti tasaisia mittaustuloksia ja on tasaisuuden puolesta käyttökelpoinen testipaikka. Tulosten tasaisuus oli todettu myös edellisessä käyttöönotossa ja nyt se oli varmistettu. /18/

## 8.2 Testausten tulokset pienellä testauspuolella

Taulukosta 11 nähdään testit, jotka suoritettiin TP24:llä ja niiden tulokset. Tässä osiossa käytettiin myös uusitun TP4:n vertailutestiä apuna analysoinnissa. Testit 1. ja 2. suoritettiin samalla asettelulla, vaikka tuloksissa oli eroa hyötysuhteessa.

**Taulukko 11.** M3BP 80ME 2-moottorin testit TP24:llä.

	Testi 1. TP24, 10.2.2020	Testi 2. TP24, 11.2.2020	Testi 3. TP24, 30 minuutin lämpöajo en- nen, 11.2.2020	Testien kes- kiarvot
Hyötysuhde	85,61%	85,82%	85,54%	85,66%
Mekaaninen teho, $P_2$	1,1 kW	1,1 kW	1,1 kW	1,1 kW
Moottorin sähkö- teho, $P_1$	1,29 kW	1,28 kW	1,28 kW	1,283 kW
Virta, $I$	2,24 A	2,23 A	2,24 A	2,236 A
Jättämä, $s$	3,913 %	3,851 %	3,943 %	3,902 %
Lämpenemä, $\Delta\theta Cu$ (30 sek.)	33,2 K	33,9 K	27,6 K	31,57 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	23,9 W	25,1 W	25,1 W	24,7 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	19,1 W	19,7 W	19,4 W	19,4 W
Staattorihäviöt, $P_s$	87,5 W	86,4 W	87,2 W	87,03 W
Roottorihäviöt, $P_r$	46,2 W	45,1 W	46,4 W	45,9 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	8,5 W	5,0 W	7,5 W	7 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	185,1 W	181,2 W	185,6 W	183,97 W

Seuraavaksi suoritettiin vertailutesti TP22:lla ja vertailutestit on nähtävissä taulukossa 12. Lisäksi suoritettiin toinen tyhjäkäyntitesti 15 minuutin päästä edellisestä tyhjäkäyntitestistä, koska haluttiin selvittää mahdollista koestajasta johtuvaa virhettä mittaustuloksissa.

**Taulukko 12.** M3BP 80ME 2-moottorin vertailutestit.

	Vertailutesti, TP4, 8.5.2019	Vertailutesti, TP22, 20.2.2020	Vertailutesti, TP22, 20.2.2012, tyhjäkäyntikäyrä n. 15 min. myöhemmin
Hyötysuhde	84,90 %	85,06 %	84,94 %
Mekaaninen teho, P <sub>2</sub>	1,1 kW	1,11 kW	1,11 kW
Moottorin sähköteho, P <sub>1</sub>	1,3 kW	1,31 kW	1,31 kW
Virta, I	2,25 A	2,27 A	2,27 A
Jättämä, s	3,984 %	4,027 %	4,027 %
Lämpenemä, ΔθCu (30 sek.)	30,7 K	33,7 K	33,7 K
Hankaushäviöt, P <sub>fw</sub>	22,9 W	23,2 W	24,9 W
Rautahäviöt, P <sub>Fe</sub>	20,1 W	20,1 W	19,8 W
Staattorihäviöt, P <sub>s</sub>	87,3 W	89,8 W	89,8 W
Roottorihäviöt, P <sub>r</sub>	47,4 W	48,3 W	48,4 W
Lisähäviöt, P <sub>LL</sub>	18,2 W	14,3 W	14,4 W
Kokonaishäviöt, P <sub>T</sub>	195,8 W	195,7 W	197,3 W

TP4:llä ajatussa testistä voitiin huomata lisähäviöiden ero TP24:llä ajettuun testiin, joka oli yli 2,5-kertainen. TP22:lla suoritetusta testistä voitiin huomata, että lisähäviöiden suuruus oli edelleen kaksinkertainen verrattuna TP24:llä ajettuihin testeihin.

$$\frac{P_{LL,VERT} - P_{LL,TP24}}{P_{LL,VERT}} * 100 \% = \frac{16,25 \text{ W} - 7 \text{ W}}{16,25 \text{ W}} * 100 \% = 56,92 \% \quad (40)$$

Tässä moottorissa teoria koestajista johtuvasta virheestä näytti pätevän, koska hyötysuhde oli laskenut 15 minuutin tauolla 0,12 %. Tällä moottorilla tyhjänä pyörimisestä aiheutui näissä olosuhteissa huonompia mittaustuloksia. Taulukossa 13 nähdään TP24:n testien keskiarvot ja vertailutestien keskiarvot.

**Taulukko 13.** M3BP 80ME 2-moottorin keskiarvo TP24:ltä ja vertailutestit.

	Testien keskiarvo, arvot taulukosta 11.	Vertailutestien keskiarvot, arvot taulukosta 12. (ilman 15 min. jälkeen ajettua tyhjäkäyntikäyrää)
Hyötysuhde	85,66 %	84,98 %
Mekaaninen teho, $P_2$	1,1 kW	1,105 kW
Moottorin sähköteho, $P_1$	1,283 kW	1,305 kW
Virta, I	2,236 A	2,26 A
Jättämä, s	3,902 %	4,006 %
Lämpenemä, $\Delta\theta_{Cu}$ (30 sek.)	31,57 K	32,2 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	24,7 W	23,05 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	19,4 W	20,1 W
Staattorihäviöt, $P_s$	87,03 W	88,55 W
Roottorihäviöt, $P_r$	45,9 W	47,85 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	7 W	16,25 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	183,97 W	195,75 W

Hyötysuhteiden erotukseksi saatiin

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22\ ja\ 4} = 85,66\ \% - 84,98\ \% = 0,68\ \%. \quad (41)$$

Lisähäviöissä oli iso ero suhteessa muihin häviöihin tässäkin tutkimuksessa. Pelkästään lisähäviöiden korjaus poistaisi ongelman. Lisähäviöitä mitataan osakuormatestissä, joten osakuormatesti otettiin tarkasteluun. Pienillä moottoreilla tarkasteluun otettiin mittausten nopeus, mikä oli selkeä ongelma testauslaitteiston automaattimittauksella. Automaattimittausten nopeus oltiin todettu mahdolliseksi ongelmaksi jo aikaisemmassa käyttöönotossa. /18/

Tästä johtuen seuraava mittaus tehtiin käsinmittauksilla, jotta voitiin simuloida muilla testipaikoilla tapahtuvia mittauskäytäntöjä mahdollisimman tarkasti. Lisäksi moottorin irrotuksen jälkeen odotettiin muutama minuutti normaalia pidempään, koska muilla testipaikoilla tyhjäkäyntitestin aloitukseen menee aikaa. Moottori irrotetaan kokonaan testipenkistä ja siirretään nosturilla erilliselle alustalle TP22:lla, kun taas TP24:llä testattava moottori vain irrotetaan kuormamoottorista ja testi aloitetaan.

Lisäksi testien suorittaminen käsin yhtä nopeasti kuin automaattimittauksella on lähes mahdotonta. Käsin suoritetuilla mittauksilla kuitenkin päästiin lähemmäksi todellista mittauksiin menevää kokonaismittausaikaa.

### 8.2.1 TP24:n käsinmittauksen vertailu TP22:n vertailutestiin

Seuraavissa testeissä tehtiin suurpiirteinen ajanotto työvaiheista TP22:lla ja aikoja käytettiin hyväksi TP24:llä, eli moottori päästettiin normaaliin tapaan jäähtymään. Tarkoituksena oli tutkia, miten paljon jäähtyminen voi vaikuttaa testituloksiin. Taulukosta 14 nähdään mittaustulokset ja miten käsinmittaaminen vaikutti. Vertailussa on käytetty viimeisintä vertailutestiä TP22:lta ja taulukosta 11 poimittuja automaattimittauksella tehtyjä testejä, joista jätettiin pois 30 minuutin lämpöajolla suoritettu testi.

**Taulukko 14.** M3BP 80ME 2-moottorin testi käsinmittauksella ja vertailu.

	Käsinmittauksella suoritettu testi, TP24, 28.2.2020	Taulukosta 11 1. ja 2. testien keskiarvo (ilman 30 min lämpöajoa)	Vertailutesti, TP22, 20.2.2019
Hyötysuhde	85,52 %	85,715 %	85,06%
Mekaaninen teho, P <sub>2</sub>	1,1 kW	1,1 kW	1,11 kW
Moottorin sähköteho, P <sub>1</sub>	1,29 kW	1,285 kW	1,31 kW
Virta, I	2,24 A	2,235 A	2,27 A
Jättämä, s	3,887 %	3,882 %	4,027 %



Lämpenemä, $\Delta\theta_{Cu}$ (30 sek.)	33,2 K	33,55 K	33,7 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	24,3 W	24,5 W	23,2 W
Rautahäviöt, $P_{Fe}$	19 W	19,4 W	20,1 W
Staattorihäviöt, $P_s$	87,6 W	86,95 W	89,8 W
Roottorihäviöt, $P_r$	45,8 W	45,65 W	48,3 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	9,6 W	6,75 W	14,3 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	186,2 W	183,15 W	195,7 W

Käsinmittauksella hyötysuhteen erotus TP22:n vertailutestiin oli

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22} = 85,52 \% - 85,06 \% = 0,46 \% \quad (42)$$

Tuloksista voitiin huomata, että käsinmittauksella saatiin lisähäviöt lisääntymään. Seuraavassa laskennassa on vielä mukana TP4:n testi. Lisähäviöiden eroksi saatiin

$$\frac{P_{LL,VERT} - P_{LL,TP24}}{P_{LL,VERT}} * 100 \% = \frac{16,25 W - 9,6 W}{16,25 W} * 100 \% = 40,92 \%, \quad (43)$$

mikä on pienempi kuin aikaisempi automaattimittauksilla saatu tulos. Jos verrataan vain viimeisimpään testaukseen, joka on testattu TP22:lla, saadaan

$$\frac{P_{LL,TP22} - P_{LL,TP24}}{P_{LL,TP22}} * 100 \% = \frac{14,3 W - 9,6 W}{14,3 W} * 100 \% = 30,77 \%. \quad (44)$$

Jos oletetaan muiden häviöiden olevan täysin samat, pois lukien lisähäviöt, ero hyötysuhteessa pienenee entisestään.

### 8.2.2 Käsinmittauksen ja automaattimittauksen vertailu

Lisäksi suoritettiin vertailu ensimmäisen ja toisen testin keskiarvon (**Taulukko 11.**) ja käsinmittauksella suoritettujen testien välillä. Taulukosta 11 poimitut testit ovat tehty automaattimittauksella. Tämä vertailu siitä syystä, että nähtäisiin erot automaattimittauksen ja käsinmittauksen välillä. Hyötysuhteiden erotus oli

$$\eta_{TP24,autom.} - \eta_{TP24,käsin} = 85,715 \% - 85,52 \% = 0,195 \%. \quad (45)$$

Tämän tuloksen perusteella voitiin todeta, että moottorin käsinmittaustuloksella ja automaattimittaustuloksella on eroa. Käsinmittauksen tulokset ovat lähempänä TP22:lla suoritettua vertailutestiä. Lisähäviöissä oli eroa käsinmittauksen ja automaattimittauksen välillä

$$\frac{P_{LL,TP24,1}-P_{LL,TP24,2}}{P_{LL,TP24,1}} * 100 \% = \frac{9,6 W-6,75 W}{9,6 W} * 100 \% = 29,68 \% \quad (46)$$

Näiden tuloksien perusteella käsinmittaus ja varsinkin työvaiheiden suoritus kelloitettu arvojen avulla näytti tekevän vaikutusta moottorin lisähäviöihin. Käsinmittauksella saatiin myös lämpenemät vastaamaan paremmin toisiaan, kun vertaillaan TP24:llä tehtyä käsinmittaustestiä ja TP22:lla suoritettua vertailutestiä.

### 8.3 Lisätestejä M2AA 63-moottoreilla, napaluvut 4 ja 6

Testipaikalla testattiin 63-runkokoon prototyypimoottoreita ja niiden testauksissa huomattiin puute testausohjelmistossa. Kahden newtonmetrin mittausalueella ei päästy 0,3 newtonmetriä alemmas, joten osakuormapiste 25 %:lla jäi testaamatta kaikista moottoreista. Mittaus suoritettiin korvaavasti 35 %:lla. Standardin IEC60034-2-1 mukaan yksi mittauspiste pitäisi olla noin 25 %.

V&B:ltä tiedusteltiin, että onko testausohjelmistoon asetettu rajoja joiden vuoksi alinta pistettä ei saada testattua. Heidän mukaansa automaattimittaus laskee generaattorin nollakuormaan, mikä tarkoittaa, että testattavan moottorin täytyy ajaa kuormamoottoria. Heidän mukaansa käsinmittauksella pääsee nollakuormaan testattavalla moottorilla ja täten testi saadaan suoritettua pienillekin moottoreille.

### 8.4 Asiaksmoottorin M3BP 71ME 2-testaus

Lopuksi TP24:llä testattiin asiakasmoottori, joka vielä ristiintestattiin TP22:lla. Moottorin sarjanumero on 3G1F2008660488. Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 15.**) nähdään testattavan moottorin nimellistiedot.

**Taulukko 15.** M3BP 71ME 2-moottorin nimellistiedot.

Jännite, U	Taajuus, f	Momentti, T	Teho, P	Pyörimisnopeus, n	Virta, I	cos $\phi$	Käyttöluokka
400 V	50 Hz	1,91 Nm	0,55 kW	2755 rpm	1,25 A	0,83	S1

Moottorille suoritettiin tyyppitesti, joka sisälsi moottorin käynnistysvirtatestin. Moottorille suoritettiin momenttikäyrätesti, koska erillistä käynnistysvirran mittaukseen käytettävää testausparametriä ei löydy testausohjelmasta. Lisäksi laitteen mekaniikka ei tue käynnistysvirran mittaamista koestamon käyttämällä tavalla. Momenttikäyrätesti jouduttiin suorittamaan 70 %:n jännitteellä, koska kuormamoottori ei pystynyt suorittamaan kippia 100 %:n jännitteellä. Moottori jäi pyörimään usean kymmenen kierroksen pyörimisnopeudella ja mittaus jäi vajaaksi.

Mittaus suoritettiin käsin alusta asti ja lämpöajoa ajettiin yli kolme tuntia, jotta moottori on varmasti lämmin. On myös oleellista ajaa lämpöajoa useampi tunti, koska laakerit saattavat olla aluksi hiukan jäykät ja täten huonontavat hyötysuhdetta. Taulukosta 16 nähdään testaustulokset.

**Taulukko 16.** M3BP 71ME 2-moottorin ristiintestaus.

	Käsinmittauksella suoritettu testi, TP24, 19.3.2020	Vertailutesti, TP22, 2.4.2020
Hyötysuhde	77,89 %	77,36 %
Mekaaninen teho, $P_2$	0,55 kW	0,56 kW
Moottorin sähköteho, $P_1$	0,71 kW	0,72 kW
Virta, I	1,22 A	1,24 A
Jättämä, s	7,122 %	7,408 %
Lämpenemä, $\Delta\theta_{Cu}$ (30 sek.)	35,8 K	37,1 K
Hankaushäviöt, $P_{fw}$	14,9 W	13,9 W

Rautahäviöt, $P_{Fe}$	18,4 W	18,1 W
Staattorihäviöt, $P_s$	72,9 W	73 W
Roottorihäviöt, $P_r$	44,2 W	46,8 W
Lisähäviöt, $P_{LL}$	7 W	11,9 W
Kokonaishäviöt, $P_T$	157,4 W	163,7 W

Moottorin testaustulokset olivat samankaltaiset ja hyötysuhteen erotukseksi saatiin

$$\eta_{TP24} - \eta_{TP22} = 77,89 \% - 77,36 \% = 0,53 \%. \quad (47)$$

Suurin häviöiden ero on lisähäviöissä. Tämä todennäköisesti johtuu osakuormates-  
tin vaikeudesta testata TP24:lla. Mitatuilla pisteillä on hajontaa aina enemmän  
TP24:llä ajetulla testillä kuin TP22:lla.

$$\frac{P_{LL,TP22} - P_{LL,TP24}}{P_{LL,TP22}} * 100 \% = \frac{11,9 W - 7 W}{11,9 W} * 100 \% = 41,17 \% \quad (48)$$

Testitulokset pienemmälläkin moottorilla olivat odotettua paremmat, mutta näitä  
testituloksia täytyy tarkastella kriittisesti, koska koestajien mukaan osakuormien  
testaamisessa oli ollut vaikeuksia TP22:lla moottorin vääntömomentin pienuuden  
vuoksi.

## 9 TESTIOSIOISTA JA NIIDEN LUOTETTAVUUDESTA

### 9.1 Momenttikäyrä

Momenttikäyrän testauksessa oli myös ongelma koko käyrän mittauksen nopeudessa. Ongelmaa lähdettiin tarkastelemaan mittausajan säädöllä, joka on muokattavissa V&B:n ohjelmistossa. Momenttikäyrää oli testattu aikaisemmin kymmenen sekunnin ohjeella ja testejä päätettiin tehdä useammalla eri aika-arvolla. Lopulta päädyttiin siihen, että noin 20 sekunnin mittausaika on järkevin, koska käsinmittauksessakin menee sen verran aikaa muilla testipaikolla. Huomattiin, että käyrästä tulee hyvin vajavainen, jos aika-asettelu on 10-15 sekuntia. Kippi saattaa jäädä kokonaan pois, jos aika-asettelu on liian lyhyt. Testatut käyrät näyttivät oikeilta, mutta todennäköisesti mittausten harva tiheys tuottaa käyrästä ”sahalaitaisen”. Kaikilla testipaikoilla momenttikäyrän mittauspisteet mitataan 70 millisekunnin välein ja sitä pystytään tarvittaessa säätämään. Tällaista mahdollisuutta ei löydy V&B:n ohjelmistosta.

Lisäksi ABB:n mittausohjelmiston testiraportissa on ongelma virran käyrän esittämisessä. Y-akselilla esitetään mitatun virran suhdetta nimellisvirtaan. Normaalien mittausten tulokset näkyvät kuvaajalla karkeasti sanottuna 5-10 kertoimella, mutta generoinnissa V&B:n ohjelmiston ja ABB:n mittausohjelmiston välillä tapahtui jotain ja luvut näyttivät liian suurilta.

Excel-tiedostoja tutkimalla selvisi, että tiedoston tuonnissa testausohjelmistosta ABB:n mittausohjelmaan virta näkyy suoraan ampeereina y-akselilla, eikä siellä täten näy mitatun virran ja nimellisvirran suhdetta. Jos momenttikäyrä on testattu esimerkiksi 50 % jännitteellä nimellisjännitteestä, virta näkyy käyrän Y-akselilla 100 %:lla. Havainnollistava esimerkki: Momenttikäyrä on testattu 50 % jännitteellä ja maksimivirraksi ollaan saatu noin 16 ampeeria. ABB:n mittausohjelmassa y-akselilla näkyvä tulos on noin 32 ampeeria, eli 100 %. Toinen esimerkki: moottori on testattu 100 %:lla jännitteellä ja maksivirraksi on saatu 11 ampeeria. ABB:n mittausohjelmassa y-akselilla näkyy suoraan tuo 11 ampeeria, koska momenttikäyrä on testattu 100 % jännitteellä.

10/2 Nm -puolella momenttikäyrän testaaminen on haasteellista, ja 71-80-runkokojen moottoreille ei voida ajaa momenttikäyrää täydellä jännitteellä, joka johtuu taaajuusmuuttajan virtarajoista. 80-runkokoon moottorille ei voi suositella kokonaista tyyppitestiä tällä testauspuolella, koska kuormamoottori ei pysty suorittamaan kippia muuta kuin 30 % tai sitä alhaisemmilla jännitteillä. Eli 80-runkokoon moottorit olisi syytä testata 50/10 Nm -puolella ja 71-runkokoko on suurin, jonka voi testata 10/2 Nm -puolella. Tämä koskee niitä moottoreita, joihin on tilattu momenttikäyrä tai käynnistysvirtatesti. Pelkät lämpöajot voidaan suorittaa 10/2 Nm -puolella.

Momenttikäyrä toimii myös käynnistysvirtatestinä TP24:llä, koska testausohjelmistossa ei ole erikseen käynnistysvirtatestiä, eli jokaiselle tyyppitestattavalle moottorille tulee testata momenttikäyrä.

## 9.2 Lämpenemätesti

Testattavalle moottorille voidaan suorittaa lämpöajo käsinmittauksella ja automaattimittauksella. Automaattimittauksella lämpöajo saattaa jäädä liian lyhyeksi ja se vääristää testaustuloksia. Siksi automaattimittauksella testattaessa koestajan on syytä asettaa itse aika testauksen lämpöajolle, jotta moottori saadaan varmasti loppulämpötilaan.

## 9.3 Tyhjäkäyntitesti

Tyhjäkäyntikäyrää varten suoritettiin useampi testi ja tarkoituksena oli saada järkeviä tuloksia, kun mittaustulokset generoidaan V&B:n testausohjelmasta ABB:n mittausohjelmaan. Tyhjäkäyntitestin tarkoituksena on testata vähintään kahdeksan jännitteen arvoa välillä 110 %-30 %.

Testauksia tehtiin useita automaatiomittauksella, jossa oli 10-15 pistettä, mutta ne eivät olleet riittäviä. Näillä mittauspisteiden määrillä ABB:n mittausohjelma poimii kaksi samaa jännitteen arvoa mielivaltaisesti. Esimerkiksi arvo  $U_N * 0,9$  tai  $U_N * 0,3$  voi olla mittaustuloksissa kahteen kertaan. Tämä saatiin korjattua tarpeeksi monella mittauspisteellä ja tyhjäkäyntitestin mittauspisteiden alku- ja loppuarvolla. Pisteiden määräksi vakiintui 30 pistettä ja mittausväli tyhjäkäyntitestissä pitää olla

$1,25*U_N - 0,2*U_N$ . Tällä mittauspisteiden määrällä ja välillä ABB:n mittausohjelmisto osaa poimia oikeat jännitteen arvot eikä tuloksiin tule yhtään mittausta kahden kertaan.

Testejä suoritettiin myös käsinmittauksella, jossa mittauspisteitä oli standardin vaatimat kahdeksan tai kymmenen pistettä, jota ABB:n mittausohjelma käyttää. Testeissä todettiin, että käyrän arvot eivät ole sitä mitä niiden pitäisi olla, joten käsinmittaaminen ei ole järkevä vaihtoehto tyhjäkäyntikäyrälle tässä laitteistossa. Mittaus todennäköisesti onnistuisi myös käsin tarpeeksi monella mittauspisteellä, mutta jännitteen arvot täytyisi laskea käsin ja se veisi liian kauan aikaa.

#### **9.4 Oikosulkutesti**

Oikosulkutesti voidaan suorittaa joko automaattimittauksella tai käsinmittauksella TP24:llä, mutta suositeltavaa on käyttää automaattimittausta, koska sillä mittaukset onnistuvat lähes poikkeuksetta. Käsinmittauksessa ongelmana saattaa olla mittaukset hoitava PLC. Se saattaa vaihtaa mittausaluetta juuri sillä hetkellä, kun painetaan mittauspainiketta. Itse mittausdata on hyvinkin samankaltaista, mutta kuvaaja raportissa ei välttämättä ole oikeanlainen ja mittaus joudutaan toistamaan.

#### **9.5 Osakuormatesti**

Osakuormatestissä on kauttaaltaan ongelmia, moottorin runkokoosta rippumatta. 90-runkokoon alumiini- ja valurautamoottorilla saatiin muutamassa tyyppitestissä osakuormatesti onnistumaan automaattimittauksella. Automaattimittauksissa ongelma on se, että usein yksi tai useampi mielivaltainen piste poikkeaa selkeästi regressiosuoralta. Se oli osassa mittauksista nimellispiste 1,0 ja välillä esimerkiksi piste 1,15. Ongelma ajateltiin olevan mittausten nopeus, koska kuorman suuruudet saattoivat olla mittaustuloksissa esimerkiksi 1,28 kertaa nimellisen, kun sen pitäisi olla 1,25. Tässä mittausten nopeudella tarkoitetaan sitä, että ohjelma suorittaa liian nopeasti mittauksen, eikä kuorma ole tarpeeksi asettunut mitattavan kuormapisteen kohdalla.

Automaattimittauksen nopeudesta 2-napaisille moottoreille on jo maininta aikaisemmassa käyttöönötossa /18/. Tässä käyttöönötossa huomattiin, että mittaus on

liian nopea napaluvusta riippumatta. Ratkaisuna yritettiin käsinmittausta, jossa kuormapisteet saadaan asettumaan täsmällisesti ja haluttuun kohtaan. Kuormapisteiden kertoimet saatiin vastaamaan standardin vaatimia arvoja, mitatut pisteet regressiosuoralle ja korrelaation korjauskerroin vähintään 0,95:ksi.

M3BP 80ME 2-moottorille korrelaation korjauskertoimeksi automaattimittauksella saatiin kolmen testin keskiarvolla 0,957, joista kaksi ei mennyt läpi. Käsinmittaamisella samalle moottorille saatiin 0,996. Saaduista tuloksista voitiin päätellä, että käsinmittaukset saattavat tuottaa hieman parempia tuloksia TP24:llä kuin automaattimittaukset.

Käsinmittaamisessa oli oleellista odottaa noin yksi minuutti ennen mittauksen suorittamista. Tämä siitä syystä, että arvot ehtivät varmasti tasaantua. PLC mittaa liian lyhyttä keskiarvoa, joten liian nopeasti tehdyt käsinmittauksetkin aiheuttavat pisteiden hajaantumisen ja mittauksen epäonnistumisen. Asiakasmootoreilla huomattiin, että riski yhden pisteen epäonnistumiseen oli edelleen olemassa, mutta regressiosuora saatiin onnistumaan poistamalla yksi piste.

Yhteenvedona osakuormista voitiin pitää sitä, ettei näillä keskiarvon asetuksilla pystytä suorittamaan automaattimittausta osakuormatestissä. Käsinmittauksessa pienikin kuorman heiluminen vaikuttaa ja testin täydellinen onnistuminen perustuu liikaa siihen, missä kohtaa koestaja onnistuu mittauksen tekemään. Yhdeksi ongelmaksi muodostui se, että regressiosuoran onnistumisen näkee vasta kaikkien testien jälkeen, kun Excel-tiedosto on tuotu ABB:n omaan mittausohjelmaan. Osakuormatestin uusiminen vaatisi käytännössä moottorille uuden lämpöajon, koska tulosten tarkasteluun menneessä ajassa se on ehtinyt jäähtyä liikaa.

## **9.6 Sähkömoottorin tyhjäkäyntitesti, värinä- sekä äänimittaus**

Tämä osio on huomioksi kaikille testipaikoille, mikä tuli ilmi työssä. Kolmannessa sarakkeessa taulukossa viisi ovat moottorin häviöt ja hyötysuhde, kun moottorille suoritettiin uusi tyhjäkäyntitesti 15 minuutin kuluttua edellisestä tyhjäkäyntitestistä. Tuloksista voidaan huomata, että hyötysuhde on laskenut M3AA 90L 2-moottorilla 0,21 % edellisestä tyhjäkäyntitestistä. Mittauksessa on käytetty uusia vastusarvoja,



joten mittaus on pätevä. Kyseinen havainto todettiin myös M3BP 80ME 2-moottorilla, mutta vaikutuksen määrä on moottorikohtaista, joka voidaan huomata taulukosta 7. M3BP 90SLD 4-moottorilla eroa on 0,02 %, joten tällä moottorilla kyseinen väite ei päde. Tähänkin asiaan vaikuttaa moni eri asia, joten absoluuttista totuutta ei voida näiden testitulosten perusteella todeta.

## 10 YHTEENVETO JA KORJAUSEHDOTUKSET

### 10.1 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli saattaa kesken jäänyt käyttöönotto loppuun. Testipaikkaa varten oli tilattu momentin arvon tarkastelua varten näyttölaite. Kyseisen tuotteen käyttäminen ei tullut oleelliseksi, koska V&B vakuutti keskustelussa, että PLC nol-laa momentin sähköisesti joka kerta testin alkaessa. Ristiintestauksia tehtiin uusiksi kaikille moottoreille, jotka olivat olleet mukana aikaisemmassa käyttöönotossa. /18/

Testauksiin otettiin mukaan myös 90-runkokoon 2-napainen alumiinimoottori. Näin tehtiin, että saataisiin lisää mittaustuloksia joita verrata keskenään. Aikaisemmassa testipaikalle tehdyssä työssä vertailuihin oli käytetty vanhan TP4:n tuloksia ja testipaikka oli uusittu keväällä 2019. Tästä syystä tässä työssä ei käytetty vanhan TP4:n testaustuloksia ja kohdassa 8.2 käytettiin uuden TP4:n testiä.

Kolmelle oikosulkumoottorille tehtiin ristiintestaukset TP22:lla ja tuloksissa päästiin melko lähelle haluttuja tuloksia hyötysuhteen puolesta. Näiden kolmen moottorin lisäksi tehtiin ristiintestaus asiakkaalle meneville 90- ja 71-runkokoon moottoreille. 90-runkokoon moottorin ristiintestaukset osoittivat, että tulokset ovat hyvinkin samankaltaiset testipaikkojen välillä. 71-runkokoon moottorille suoritettussa testissä hyötysuhteiden erotus oli puolen prosenttiyksikön luokkaa, niin kuin aikaisemmissakin tässä työssä suoritetuissa testeissä. TP24 tuottaa kuitenkin tasaisia tuloksia, kuten myös aikaisemmassakin käyttöönotossa todettiin. /18/

Todennäköisesti osakuormien mittauksesta aiheutui lisähäviöiden ero testipaikkojen testitulosten välillä ja ne aiheuttivat pienen eron hyötysuhteeseen. Oletettavasti lisähäviöiden eron aiheutti mittauksen keskiarvo, mikä oli liian lyhyt. V&B:n mukaan mittauksen keskiarvo osakuormatestissä on tällä hetkellä noin 500 millisekuntia, eli 0,5 sekuntia. Keskiarvon mittausajan korjaamisella saatetaan päästä vielä parempiin tuloksiin TP24:llä ja sitä kautta koko testipaikka voidaan ottaa täysin luotettavasti käyttöön.

Muiden testiosioiden tarkastelun perusteella keskiarvon mittausaika on samaa luokkaa jokaisessa testiosiossa TP24:llä. Tämä voitiin havaita tarkkailemalla testausohjelmaa silloin, kun se suoritti testiä. Tämän takia mittauksista ei saada yhtä tarkkoja kuin muilla testipaikoilla. Momenttikäyrässä aika-asettelu näkyy jo aikaisemmin mainittuna ”sahalaitaisuutena”.

10/2 Nm-puolella suurena rajoittavana tekijänä on luvussa kahdeksan mainittu taa-juusmuuttajan virtaraja. Tämä tieto rajoittaa tyyppitestattavien moottorin teholuokkaa selvästi kyseisellä testauspuolella.

Pientä eroa hyötysuhteeseen saattaa aiheuttaa myös se, kun tehdään täysi automaattimittaus TP24:llä. V&B:n testausohjelmisto TP24:llä mittaa vastukset välittömästi testiosion jälkeen, mutta esimerkiksi TP22:lla vastuksen mittauksen aloittamiseen menee hiukan enemmän aikaa, koska mittausjohdot pitää käydä asettamassa kään- mitykseen käsin.

Yleisesti isommalla 50/10 Nm:n puolella moottoreita voidaan testata luotettavasti, kuten tulokset osoittivat. 10/2 Nm:n puolella on pientä epävarmuutta. Tällä hetkellä testipaikan automaattimittausta ei voi täysin käyttää, vaan osa testeistä täytyy tehdä käsin. Työssä jäi harmittavasti muutama kohta selvittämättä heikon kommunikoin- nin ja ajanpuutteen vuoksi.

Testausohjelmisto ja -laitteisto on turvallisuutensa ja helppokäyttöisyytensä puo- lesta erittäin hyvä, mutta koestajan täytyy tietää useampi yksityiskohta laitteistosta, jotta koestuksessa syntyneet ongelmat ovat nopeasti ratkaistavissa. Suurimmalla osalla vikakoodeista mitkä testausohjelmisto antaa, on S3-kaapin sulake palanut ja estää moottorin testauksen aloittamisen. Emme löytäneet koestajien kanssa piirus- tuksia tutkiessamme, että mitä tämä sulake suojaa. Kaapissa on kuuden ampeerin ja C-tyypin sulake, joten oletettavasti se suojaa mittalaitteita, koska jännite katoaa tä- män sulakkeen palaessa.

## **10.2 Korjausehdotukset**

TP24:n mittausluotettavuuden parantamiseksi olisi myös syytä tarkistaa kuormako- neiden rihtaukset, koska niitä ei ilmeisesti ole tarkastettu Ruotsista siirron jälkeen.

Moottoreille alustat ja laippalevyt olisivat hyvät lisäykset koestajien työskentelyn helpottamiseksi. Moottorin kiristäminen testipenkkiin kiiloilla ja prikoilla on hidasta ja moottori saattaa liikkua, jos ei ole juuri oikea määrä prikoja välissä kiristyksen tasapainottamiseksi. Lisäksi testipenkki olisi syytä puhdistaa kovettuneesta tehdasrasvasta. Eri määrä tehdasrasvaa eri kohdissa vaikeuttaa moottorin liikuttelua ja rihtausta testipenkillä.

Moottorin nimellistietoja ei pysty hakemaan V&B:n testausohjelmaan, vaan ne pitää kirjoittaa sinne käsin. Testipaikalle olisi hyvä saada verkkoyhteys, jolla voi tarkistaa moottoriin liittyviä tietoja sekä koestusohjeita.

ABB:n mittausohjelmaan TP24:lle on saatava mahdollisia asiakastestejä varten lämpötilapiirturin kuvaaja kuntoon, jotta voidaan nähdä moottorin kriittisten osien lämpötilat. Kuvaaja näkyy V&B:n ohjelmassa, mutta tiedoston tuonnin jälkeen se ei näy ABB:n mittausohjelmassa. Aiemmin työssä mainitut osakuormien puuttuvat lämpötilat olisi hyvä saada lisäyksenä, koska ne löytyvät muiltakin testipaikoilta. Ohjelmistojen välillä tapahtuva Excel-tiedostojen vienti toimii oikeilla asetuksilla, mutta aikaisemmin mainittu momenttikäyrä vaatii korjauksen sen virran kerroinikäyrään.

Yhtenä vaihtoehtona tulevaisuudessa pitäisin sitä, että tutkittaisiin mahdollisuutta tehdä uusittu automaatiojärjestelmä TP24:lle, joka löytyy nyt usealta testipaikalta. Tällä vältyttäisiin koestajien ylimääräiseltä perehdyttämiseltä testipaikalle. Testipaikalle on suotavaa vaihtaa tietokone tulevaisuudessa ja V&B:n mukaan se on mahdollista.

## LÄHTEET

- /1/ ABB lyhyesti. Viitattu 21.1.2020. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- /2/ ABB liiketoiminnat. Viitattu 21.1.2020. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat>
- /3/ ABB Motors & Generators. Viitattu 21.1.2020. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/motors-and-generators>
- /4/ Verkkonen, V. 2017. Sähkömoottorikäytöt, 2. Epätahtikoneet, luentomateriaali Vaasan ammattikorkeakoulu. 7 s. ja 8 s.
- /5/ Verkkonen, V. 2017. Sähkömoottorikäytöt, 2. Epätahtikoneet, luentomateriaali Vaasan ammattikorkeakoulu. 21 s. ja 34 s.
- /6/ ABB, Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Viitattu 21.1.2020 <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.aspx>
- /7/ Korpinen, L. 10 Sähkökoneet, osa 1. Viitattu 23.1.2020. [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)
- /8/ M3BP 71-132 IE3 Varaosaluettelo. Viitattu 23.1.2020. <https://new.abb.com/products/fi/3GBP132220-ADL/m3bp-132smb-4>
- /9/ Kinnunen, J. ABB Oy Kotimaan myynti, ABB:n pienjännitemoottorit. Viitattu 23.1.2020. <https://docplayer.fi/19154823-Jarno-kinnunen-abb-oy-kotimaan-myynti-2014-abb-n-pienjannitemoottorit.html>
- /10/ Similä, I. 2019. Final testing procedures.
- /11/ Jokinen, K. 2018. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus, luentomateriaali Vaasan ammattikorkeakoulu. 62 s.
- /12/ Burster Resistomat 2318. 2000. Instructions Manual. Viitattu 28.1.2020. [http://www.jandb.com.ph/jandb/pdf/Burster\\_RESISTOMAT\\_Type\\_2318.pdf](http://www.jandb.com.ph/jandb/pdf/Burster_RESISTOMAT_Type_2318.pdf)
- /13/ Yokogawa WT1800, User's manual, Precision Power Analyzer, Getting Started Guide. 2017. Viitattu 28.1.2020 <https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMWT1801-03EN.pdf>
- /14/ Kistler Type 4503A, Data sheet, 2013. Viitattu 28.1.2020. <https://www.kistler.com/?type=669&fid=106829&model=document>
- /15/ Vogelsang & Benning. 2013. Manual of test system. ABB Oy, Västerås Sweden.
- /16/ IEC 60034-1 International Standard. 2017. Rotating electrical machines.

/17/ IEC 60034-2-1 International Standard. 2014. Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests.

/18/ Tampusi, P-S. 2019. Erään sähkömoottorien testauslaitteiston käyttöönotto. Diplomityö, Vaasan yliopisto.