



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuomas Torpisto

OIKOSULKUMOOTTORIN HYÖTYSUHTEEN
MÄÄRITTÄMINEN JA TEHOHÄVIÖIDEN
MITTAAMINEN TAAJUUSMUUTTAJAKÄY-
TÖSSÄ

Standardin IEC 60034-2-3 mukaan

Tekniikka
2022

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikka

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tuomas Torpisto
Opinnäytetyön nimi	Oikosulkumoottorin hyötysuhteen määrittäminen ja tehohäviöiden mittaaminen taajuusmuuttajakäytössä
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	46 + 6 liitettä
Ohjaaja	Matti Niskala

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja toimi Vaasan ABB Oy:n Motors and Generators-yksikkö. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia maaliskuussa vuonna 2020 julkaistun IEC 60043-2-3-standardin testimetodeja, jotka määrittävät häviöt ja hyötysuhteen taajuusmuuttajakäytössä. Työssä esitetään standardin määrittämät testimenetelmät ja tutkitaan kahta erilaista tapaa, miten saadaan määritettyä hyötysuhde taajuusmuuttajakäytössä. Tutkittavat testaustavat ovat moottorin hyötysuhteen määrittely suoralla mittausmenetelmällä ja moottorin hyötysuhteen määrittely käyttäen häviösummausmenetelmää.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi standardin tarkoitusta ja standardin määrittämiä testausmenetelmiä. Teoriaosuuden jälkeen työssä tutkittiin kahta erilaista oikosulkumoottoria, joille tehtiin standardin määrittämät testit. Testien pohjalta tutkimme hyötysuhdetuloksia eri mittausmenetelmien välillä ja sekä niiden epävarmuutta.

Työn keskeisiä tuloksia ovat testausmenetelmien eroavaisuudet ja niiden lisätutkiminnan tarpeen toteaminen. Lisäksi työn lopussa tehdään ehdotuksia, miten hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä voitaisiin vielä tutkia.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikka

ABSTRACT

Author	Tuomas Torpisto
Title	Determining the efficiency of an induction motor and measuring power dissipation in frequency converter use
Year	2022
Language	Finnish
Pages	46 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Matti Niskala

This thesis was assigned by Vaasa ABB Oy, Motors and Generators unit. The purpose of this thesis was to study the test methods of the IEC60034-2-3 standard published in March 2020, which determine the losses and efficiency of motor in frequency converter use. Thesis presents the test methods defined by the standard and investigates two different ways to determine the efficiency in frequency converter operation. The test methods that we investigated are direct measurement of input and output and the determination of the engine efficiency using summation of losses.

Two different induction motors were tested according to the IEC standard in the thesis. Based on the tests, the efficiency results were studied between the different measurement methods and their uncertainty.

The main results of the thesis are the differences in testing methods found in the study and the need for further study regarding the differences. In addition, at the end of the work suggestions are made on how the factors affecting efficiency could be studied even more.

Keywords testing, efficiency, frequency converter use, IEC

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	10
1.1	Opinnäytetyön aihe	10
1.2	Yrityksen esittely.....	10
1.3	Taustaa sähkömoottoreiden testauksesta ABB:llä	11
1.4	Rajaus ja tarkoitus.....	12
2	TERMIT JA MÄÄRITELMÄT	13
2.1	IEC International Electrotechnical Commission.....	13
2.2	Moottorin häviöt taajuusmuuttajasyötössä	13
2.3	Perushäviöt	13
2.4	Ylimääräiset korkeataajuushäviöt.....	13
2.5	Perusnopeusalue.....	14
2.6	Kytkentätaajuus	14
2.7	Kaksitasoinen taajuusmuuttaja.....	14
2.8	Kiinteät häviöt.....	15
3	IEC 60034-2-3 STANDARDIN ESITTELY.....	16
3.1	Yleistä	16
3.2	Taajuusmuuttajakäytöt IEC 60034-2-3 standardin mukaan	17
3.3	Taajuusmuuttaja kokoonpano nimellisjännitteille 1kV asti	17
3.4	Testaus yli 1kV nimellisjänniteisillä taajuusmuuttajilla	18
4	TESTIMENETELMÄT TAAJUUSMUUTTAJA SYÖTTÖISTEN MOOTTOREIDEN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITTÄMISEKSI	19
4.1	Menetelmä 2–3-A moottorin hyötysuhteen määrittely suoralla menetelmällä input/output.....	19
4.2	Menetelmä 2-3-B moottorin hyötysuhteen määrittely häviösummaus menetelmää käyttäen (epäsuoralla menetelmällä).....	22

4.3	Menetelmä 2-3-C vaihtoehtoinen tehokkuuden määrittäminen ..	25
4.4	Menetelmä 2-3-D hyötysuhteen määrittäminen laskennallisesti	26
5	TESTAUS MÄÄRITELMÄ	28
5.1	Yleistä	28
5.1.1	2-3-B epäsuora mittausmenetelmä	28
5.1.2	2-3-A suora mittausmenetelmä	29
5.2	Testeissä käytettävät moottorit.....	30
5.3	Testeissä käytettävät taajuusmuuttajat	31
6	TESTITULOSTEN VERTAILU JA LASKENTA	32
6.1	M3BP 180MLC 4.....	32
6.2	M3BP 355SMA 4	38
6.3	Vertailu.....	42
7	YHTEENVETO JA JATKOKEHITYS	45
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	47

KUVA

- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Kaksitasoinen taajuusmuuttaja.....	15
Kuva 2. Testausasetukset sinimuotoisella jännitelähteellä IEC 61000-2-4:2002 .	23
Kuva 3. IEC 60034-2-1 mukainen DOL-tyyppistesti	24
Taulukko 1. Seitsemän standardoitua toimintapistettä.....	21
Taulukko 3. Moottorit.....	30
Taulukko 4. Taajuusmuuttajat	31
Taulukko 5. DOL-lämpenemätesti	32
Taulukko 6. DOL-tyhjäkäyntitesti	33
Taulukko 7. VSD-lämpenemätesti	34
Taulukko 8. VSD-tyhjäkäyntitesti.....	36
Taulukko 9. DOL-lämpenemätesti	38
Taulukko 10. DOL-tyhjäkäyntitesti	39
Taulukko 11. VSD-lämpenemätesti	40
Taulukko 12. VSD-tyhjäkäyntitesti.....	41
Taulukko 13. Vertailutaulukko hyötysuhteille.....	43

LIITELUETTELO

LIITE 1. Kaavuluettelo

LIITE 2. ACS850-04-094A-5 Taajuusmuuttajan tuote-esittely

LIITE 3. ACS880-04-880A-5 Taajuusmuuttajan tuote-esittely

LIITE 4. Laskelmat häviösummaus menetelmällä vaihevastukset huomioon ottaen

LIITE 5. Valurauta runkoisten moottorien esittely lyhyesti, koot 132-250

LIITE 6. Valurauta runkoisten moottorien esittely lyhyesti, koot 280-355

SYMBOLIT JA LYHENTEET

f	Taajuus, Hz
f_{MOT}	Moottorin perustaajuus, Hz
f_N	Moottorin nimellistaajuus, Hz
f_{SW}	Vaihtotaajuus, Hz
I_0	Tyhjäkäyntivirta, A
I_N	Nimellisvirta, A
n	nopeus, rpm
n_N	nimellinopeus, rpm
n_{ref}	vertailunopeus, rpm
P	Teho, W
P_0	Tyhjäkäyntiteho, W
P_{Ccon}	Kiinteät häviöt taajuusmuuttaja käytössä, W
P_{Csin}	Kiinteät häviöt sinimuotoisella syötöllä standardin IEC 60034-2-1:2014 mukaan, W
PDS	Voimansiirtojärjestelmä
P_{LHL}	Ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö johtuen taajuusmuuttajan syötöstä, W
P_N	Nimellisteho, W
P_{ref}	vertailuteho, W

P_{1C}	Moottorin ottama teho taajuusmuuttaja syötössä, W
$P_{1-60034-2-1}$	Moottorin ottama teho testattu standardin IEC 60034-2-1: 2014 mukaisesti, W
P_{2C}	Moottorin mekaaninen teho taajuusmuuttaja syötössä, W
$P_{2-60034-2-1}$	Moottorin mekaaninen teho testattu standardin IEC 60034- 2-1:2014 mukaisesti, W
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
T	Koneen vääntömomentti, Nm
T_C	Koneen vääntömomentti taajuusmuuttaja syötössä, Nm
T_N	Nimellismomentti, Nm
T_{ref}	Vertailumomentti, Nm
U_N	Nimellisjännite, V
η	Hyötysuhde
θ	Lämpötila

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön aihe

Tämä opinnäytetyö toteutettiin Vaasan ABB Oy:n Motors and Generators -yksikölle. Tarkemmin työ tehtiin Motors and Generators – yksikön koestuslaboratoriossa, jossa tehdään asiakkaiden erikseen tilaamia koestuksia, laivaluokituslaitosten sertifiointeja, tuotekehityksen protokoestuksia tai laatutapauksien tutkintaan liittyviä testejä. Työssä perehdyttiin uuteen 2020-vuonna julkaistuun IEC 30034-2-3 standardin antamiin metodeihin taajuusmuuttaja käytön hyötysuhteen ja häviöiden määrittämiseksi.

1.2 Yrityksen esittely

ABB Oy syntyi vuonna 1988, kun ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen BBC yhdistyivät. ABB:n pääkonttori sijaitsee Zürichissä, Sveitsissä ja sen päätoiminta keskittyy automaatiotekniikkaan ja sähkövoimatekniikkaan. ABB:n konserni toimii tällä hetkellä jo yli 100 maassa. Suomessa ABB toimii noin 20 eri paikkakunnalla ja työllistää noin 5000 henkilöä.¹

ABB:n Motors and Generators liiketoiminta työllistää noin 10 000 henkilöä 7:ssä eri maassa. Vaasassa Motors and Generators puolella työskentelee noin 600 henkilöä. ABB toimii tällä hetkellä maailman johtavana moottorivalmistajana ja sen moottorit ovat tärkeänä osana nykypäivän teollisuutta. Jokainen Vaasassa valmistettava moottori on jo valmiiksi tilattu eikä moottoreita tehdä erikseen varastoon. Moottori spesifioidaan asiakkaiden tilauksien mukaisesti ja ne valmistetaan toimimaan korkealla hyötysuhteella.²

¹ ABB Lyhyesti Historia. Viitattu 16.5.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia>

² ABB. ABB Suomessa. Viitattu 16.5.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>

1.3 Taustaa sähkömoottoreiden testauksesta ABB:llä

Testauksen tarkoituksena on varmistaa ja tarkastaa, että moottorin ominaisuudet ja suorituskyky täyttävät asiakkaiden, luokituslaitoksen, asiaankuuluvien standardien ja valmistajan vaatimukset.

Tavalliset testiohjelmat on luokiteltu kolmeen osaan: rutiinitesti, tyyppitesti ja erikoistesti. Rutiinitesti suoritetaan jokaiselle moottorille kokoonpanolinjalla. Tyypitesti suoritetaan yleensä rutiinitestin lisäksi yhdelle moottorille määritetystä toimituserästä. Erikoistesti tehdään, mikäli asiakas on sellaisen tilannut.

Rutiinitestissä moottorille tehdään visuaalinen tarkistus, vastusmittaus ympäristön lämpötilassa, kytkennän ja pyörimissuunnan tarkistus, tyhjäkäyntitesti, tärinätesti, jännitekoee, oikosulkutesti ja eristysvastusmittaus.

Tyypitestissä lisänä rutiinitesteissä tehtäville kokeille tulevat käynnistysvirran ja –momentin mittaus, lämpenemätesti, ylikuormitustesti, osakuormatesti, hyötysuhteenmääritys ja momentti-nopeustesti, mikäli sellainen on asiakkaan toimesta tilattu.

Erikoistesti riippuu asiakkaan määrittelemistä testeistä ja se liittyy yleensä tärinämittauksiin. Tärinätesti voi pitää sisällään esimerkiksi tärinän mittauksen jäykällä alustalla.³

Ennen testausta testausohjelman täytyy olla hyväksytty kaikkien osapuolten osalta, että välttyttäisiin väärinymmärryksiltä ja viivästyksiltä testin aikana.⁴

³ Avantola, J-P. Testing Development Engineer. Teams puhelu.

⁴ Vieri, J. 2018. Final testing procedures

1.4 Rajaus ja tarkoitus

Opinnäytetyössä esitellään standardi IEC 60034-2-3 määrittämät testimetodit, jotka määrittävät häviöt ja hyötysuhteen taajuusmuuttajakäytössä. Työssä otetaan vertailuun kaksi erikokoista oikosulkumoottoria ja tehdään niille standardin esittämät testit. Työn päätarkoituksena on tutkia standardin IEC 60034-2-3 mukaisten testien antamia hyötysuhdelukuja.

2 TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

2.1 IEC-International Electrotechnical Commission

International Electrotechnical Commission (IEC) on johtava globaali organisaatio, joka valmistaa ja julkaisee kansainväliset standardit kaikille sähkö-, elektroniikka- ja vastaaville teknologian aloille.⁵

2.2 Moottorin häviöt taajuusmuuttajasyötössä

Taajuusmuuttaja käytössä moottorihäviöt ovat yhdistelmä häviöitä, jotka aiheutuvat perustaajuudesta ja taajuusmuuttajan korkeista taajuuksista.

2.3 Perushäviöt

Moottorinperushäviöt voidaan jakaa viiteen eri komponenttiin: rautahäviöt (vaihtelee moottorin taajuuden ja käytetyn perusjännitteen mukaan), kitka- ja tuuletushäviöt (vaihtelee moottorin nopeuden ja rakenteen mukaan), roottorin käämityshäviöt, staattorinkäämityksen häviöt ja lisäkuormituksen häviöt (kaikki kolme vaihtelevat moottorin virran mukaan). Perushäviöt ovat moottorin häviöitä, jotka toimivat nimellisjännitteellä merkityllä taajuudella, mutta eivät sisällä yliaaltoja.

2.4 Ylimääräiset korkeataajuushäviöt

Ylimääräiset korkeataajuushäviöt syntyvät moottorissa ei-sinimuotoisesta jännitteestä ja taajuusmuuttajan generoimista virran aaltomuodoista. Korkeataajuushäviöt ovat lisänä raudasta, kitkasta ja käämityksestä, eli roottorin ja staattorin käämityksestä, ja lisäkuormituksesta aiheutuville häviöille.⁶

⁵ IEC 60034-2-3 2020 Rotating electrical machines, Osa 2-3, s. pdf 2

⁶ IEC 60034-2-3 2020 Rotating electrical machines, Osa 2-3 s.9

2.5 Perusnopeusalue

Perusnopeusalue on nopeusalue pysähdyksestä korkeimpaan nopeuteen, jossa moottoria voidaan syöttää jännitteellä, joka muuttuu suhteessa nopeuteen niin, että magneettivuo pysyy vakiona (vakiosuhde U/f) oikosulkumoottoreille ja (maksimi vääntömomentti per ampeeri) synkronisille koneille. Perusnopeusalueella moottorin suurin vääntömomentti on vakio (vakiomomenttialue) jos vakiovuon ohjausta käytetään.

2.6 KytKentätaajuus

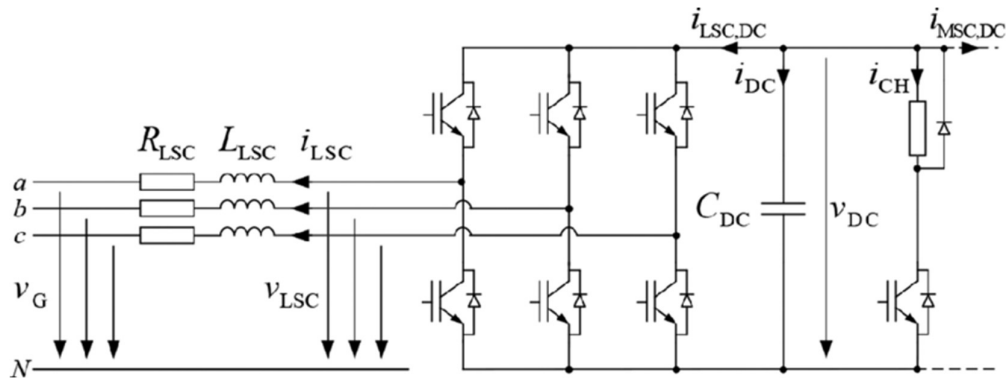
KytKentätaajuus tarkoittaa yhden puolijohteen kytKentätapahtumien lukumäärä yhden sekunnin sisällä. Se määrittää yhdessä valitulla pulssikuviolla ja muuntimen topologialla alhaisimman ei-ohjattavista korkeataajuuksista tai yliaallot IPC:ssä (in-plant point of coupling) tai moottorissa.⁷

2.7 Kaksitasoinen taajuusmuuttaja

Pienjännitteiset eli alle 1000 V:n taajuusmuuttajat ovat pääsääntöisesti kaksitasoisia ja yli 1000 V:n kolme-, viisi- jne. tasoisia taajuusmuuttajia. Kaksitasoisissa taajuusmuuttajissa IGBT:t kytkevät suoraan täyteen välipiirin + (plus) ja – (miinus) jännitteeseen. Monitasoisilla taajuusmuuttajilla voidaan kytkeä portaittain täyteen jännitteeseen, tietenkin sekä + (plus) että – (miinus) haarat, jolloin jännitepiikit ja rasiukset ovat pienempiä ja myös kytKentätaajuudet ovat pienempiä kuin kaksitasoisilla. Kuvassa 1 nähdään piirikaavio kuva kaksitasoisesta taajuusmuuttajasta.⁸

⁷ IEC 60034-2-3 2020 Rotating electrical machines, Osa 2-3, s. 9

⁸ Hannuksela, J. Head of Global Standards and Compliance. Teams puhelu.



Kuva 1. Kaksitasoinen taajuusmuuttaja⁹

2.8 Kiinteät häviöt

Rauta-, hankaus- ja tuuletushäviöiden summa. Vaikka nämä häviöt muuttuvat kuorman ja jännitteen mukaan, standardi kutsuu niitä silti kiinteiksi häviöiksi. Kiinteät häviöt saadaan tyhjäkäyntitestillä. Tyhjäkäyntitestissä moottoria ajetaan nimellisjännitteellä- ja taajuudella sekä muilla jännitteet arvoilla, joista saadaan muodostettua tyhjäkäyntikäyrä. Standardi IEC 60034-2-1 antaa kiinteiden häviöiden P_c määrittämiseksi kaavan.

$$P_c = P_0 - P_s$$

(1)

jossa

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R$$

(2)¹⁰

⁹ Elnaggar, A. Two-level voltage source converter. ResearchGate. Viitattu 18.5.2022. https://www.researchgate.net/figure/Two-level-voltage-source-converter_fig1_305658935

¹⁰ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s.9

3 IEC 60034-2-3 STANDARDIN ESITTELY

3.1 Yleistä

IEC 60034-2-3 pyöriävät sähkökoneet standardin tavoitteena on määritellä ylimääräiset korkeataajuiset moottorihäviöt ja taajuusmuuttajasyöttöisten moottoreiden hyötysuhde. Ylimääräisiä korkeataajuisia häviöitä esiintyy lisänä häviöille, jotka aiheutuvat nimellisestä sinimuotoisesta tehonsyötöstä niin kuin aiemmassa standardissa IEC 60034-2-1:2014 esitetään. Tämän standardin mukaan määritettyjen tuloksien on tarkoituksena mahdollistaa häviöiden ja hyötysuhteen vertailu erilaisista moottoreista taajuusmuuttaja syötössä.

Lisäksi standardi antaa seitsemän standardoitua ajopistettä kuvaamaan häviöiden ja hyötysuhteen kehittymistä koko vääntö/nopeus alueella. Interpolointimenetelyä käytetään häviöiden ja hyötysuhteen laskentaan, miltä tahansa toimintapistteeltä (vääntömomentti, nopeus).

Voimansiirtojärjestelmässä (PDS), moottori ja taajuusmuuttaja ovat usein valmistettu eri valmistajien toimesta. Moottorit, jotka ovat samaa designia, valmistetaan suurissa erissä. Niitä voidaan ajaa erilaisissa verkoissa ja erilaisilla taajuusmuuttajilla, joka vaikuttaa järjestelmän hyötysuhteeseen. Myös yksittäisen taajuusmuuttajan ominaisuudet vaikuttavat hyötysuhteeseen. Koska on epäkäytännöllistä määrittää moottorihäviöt jokaiselle moottorin, taajuusmuuttajan, liitäntäkaapelin ja parametriasetuksien yhdistelmälle, tämä standardi antaa rajoitetun määrän

lähestymistapoja, riippuen moottorin jännitetasosta ja testattavan moottorin luokituksesta.

3.2 Taajuusmuuttajakäytöt IEC 60034-2-3 standardin mukaan

IEC 60034-2-3 standardin menetelmät perustuvat pääasiassa pulssinleveysmodulaatiolla (PWM) varusteltuihin taajuusmuuttajiin.

On huomattava, että tässä kuvatut testimenetelmät taajuusmuuttaja syötöllä on standardoituja menetelmiä, joiden tarkoituksena on antaa vertailukelpoisia hyötysuhdelukuja standardoiduille testiolosuhteille. Moottorin luokitus soveltuvuudesta taajuusmuuttajakäyttöön voidaan johtaa, mutta se ei vastaa todellisten moottorihäviöiden määrittämistä, joka vaatii koko voimansiirtojärjestelmän (PDS) testin tietyllä taajuusmuuttajalla.¹¹

3.3 Taajuusmuuttaja kokoonpano nimellisjännitteille 1kV asti

Alempana määriteltyjä vertailuolosuhteita saa käyttää ainoastaan kansainvälisten energiatehokkuusmääräysten vaatimustenmukaisuuden todentamiseen, erityisesti 90 % nopeuden ja 100 % vääntömomentin kuormituspiste.

Seuraavat vertailuolosuhteet ovat määritetty:

- Kaksitasoinen taajuusmuuttaja.
- Lähtöjännitteeseen tai lähtövirtaan vaikuttavia lisäkomponentteja ei saa asentaa taajuusmuuttajan ja moottorin välille, lukuun ottamatta niitä, joita käytetään mittavälineinä

¹¹ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s. 6

- Ajo 90 % nopeudella ja nimellisvääntömomentilla vakionimellisvuolla (noin 90 % nimellisjännitteestä) sekä oikosulkumoottoreille että synkronisille moottoreille
- Moottoreissa, joiden nimellinopeus on enintään 3 600 rpm, kytkentätaajuus ei saa olla suurempi kuin 5kHz
- Moottoreille, joiden nimellinopeus on yli 3600 rpm, kytkentätaajuus ei saa olla yli 10 kHz
- Moottorikaapelin johtimen poikkipinta-ala ja pituus tulee valita sellaiseksi, että jännitteen alenema ei ole merkittävä nimelliskuormalla.¹²

3.4 Testaus yli 1kV nimellisjänniteisillä taajuusmuuttajilla

Taajuusmuuttajilla, joiden nimellisjännite on yli 1kV, yleisesti hyväksytyä vertailukelpoista taajuusmuuttajaa ja kaapelin pituutta ei voida määrittää. Tällaisia moottoreita, kaapeleita ja tiettyjä taajuusmuuttajia voidaan testata vain kokonaisena voimainsiirtojärjestämänä. Taajuusmuuttajien pulssimallien vuoksi suuremmat lähtötehot vaihtelevat valmistajien välillä ja eroavat vaikuttavasti tyhjäkäynnin ja nimelliskuormituksen välillä.¹³

¹² IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s. 11-12

¹³ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s. 12

4 TESTIMENETELMÄT TAAJUUSMUUTTAJA SYÖTTÖISTEN MOOTTOREIDEN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITTÄMISEKSI

4.1 Menetelmä 2–3-A moottorin hyötysuhteen määrittely suoralla menetelmällä input/output

Tämä on testimenetelmä, jossa koneen mekaaninen teho P_{2C} määritetään akselin vääntömomentin ja nopeuden mittauksella. Moottorin ottama teho P_{1C} mitataan samassa testissä.

Testimenettely

Testit on suoritettava taajuusmuuttajalla ja moottorilla, jonka kokoonpano on suoritettu valmiiksi, jotta testiolosuhteet ovat samat tai samankaltaiset kuin normaalit käyttöolosuhteet

- Tarkistetaan vääntömomentin mittauslaitteen poikkeama ja asetetaan se nolnaan IEC 60034-2-1:2014
- Kytetään testattava moottori kuormakoneeseen, jossa on vääntömomentin mittauslaite.
- Käytetään testattavaa konetta nimellisvääntömomentilla- ja -nopeudella kunnes loppulämpenemä (muutos 1K tai vähemmän puolessa tunnissa) on saavutettu.

Lämpenemätestin lopussa kirjataan tulokset:

T_c Vääntömomentti

n Nopeus

P_{1c} Moottorin ottama teho

Tarkistetaan vääntömomentin mittauslaitteen poikkeama koneen pysäyttämisen jälkeen. Mitattaessa useita kuormituspisteitä vääntömomentin mittauslaitteen poikkeama on tarkistettava vasta viimeisen kuormituspisteen mittaamisen jälkeen.

Korjataan vääntömomentti T_c määritetyllä poikkeamalla

Hyötysuhteen määrittäminen

Mekaaninen teho

$$P_{2c} = 2\pi * T_c * n$$

(3)

Hyötysuhde

$$\eta = \frac{P_{2c}}{P_{1c}}$$

(4)

Mikäli tarvitaan ero sinimuotoisen ja taajuusmuuttajasyöttöisen häviöiden välillä, mittaus sinimuotoisesta syötöstä heti taajuusmuuttajasyötön jälkeen (kone pysäytetään testien välissä) voidaan suorittaa samalla perusjännitteellä. Tämä on käytännöllistä vain oikosulkumoottoreille.

Mittaus seitsemässä standardoidusta toimintapisteestä

Menetelmässä asetetaan kuormitus koneeseen seitsemään standardoituun toimintapisteeseen, jotka on annettu taulukossa 1. Näitä pisteitä voidaan käyttää hyväksi, mikäli hyötysuhteen määrittäminen tehdään interpolointimenetelmää käyttäen.

Taulukko 1. Seitsemän standardoitua toimintapistettä¹⁴

	n	T	P
P_1	0,9	1	0,9
P_2	0,5	1	0,5
P_3	0,25	1	0,25
P_4	0,9	0,5	0,45
P_5	0,5	0,5	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,0625

Tämän testisarjan ensimmäinen toimintapiste tulee ajaa kun loppulämpenemä on saavutettu (muutos 1K tai vähemmän puolessa tunnissa).

Mittaukset seuraavista standardoiduista toimintapisteistä (2 ,3 ,4, 5, 6 ja 7) tulee tehdä mahdollisimman nopeasti, että lämpötilan muutokset saadaan minimoitua moottorissa testauksen aikana. Vaihtoehtoisesti mittaukset voidaan suorittaa toimintapisteistä järjestyksessä 4, 2, 5, 6, 3 ja 7.

¹⁴ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s.19

Jokainen seitsemästä kuormituspisteestä tulee olla säädettyä tarkkuudelle ± 1 % nimellisestänopeudesta ja ± 1 % nimellismomentista ennen lähtötehon kirjaimista.

Välittömästi toimintapistemittauksen jälkeen tarkista poikkeama vääntömomentin mittauslaitteesta.¹⁵

4.2 Menetelmä 2-3-B moottorin hyötysuhteen määrittely häviösummaus menetelmää käyttäen (epäsuoralla menetelmällä).

Ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö jänniteohjatun taajuusmuuttajan (VSC) syötössä on yleensä periaatteessa riippumaton kuormasta. Sen vuoksi, ylimääräinen korkeataajuinen häviö, joka aiheutuu taajuusmuuttajan syötöstä, voidaan määrittää tyhjäkäyntitestistä perustaajuuden syötöstä ja tyhjäkäyntitestillä taajuusmuuttajasyötössä. Ylimääräinen korkea taajuushäviö on molempien testien mitattujen häviöiden välinen ero.

Kuvasta 2 nähdään testausasetukset sinimuotoiselle jännitelähteelle IEC 6100-2-4:2002, luokan 1 mukaan. Standardi pyytää käyttämään näitä testaus asetuksia taajuusmuuttajan kanssa testejä suorittaessa.

¹⁵ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s.14

Table 1 – Compatibility levels for voltage tolerance, voltage unbalance and power-frequency variations

Disturbance	Class 1	Class 2	Class 3
Voltage tolerance, relative to nominal voltage U_N : $\Delta U/U_N$	±8 %	±10 % ^a	+10 % to -15 % ^b
Voltage unbalance U_{neg}/U_{pos}	2 %	2 %	3 %
Power-frequency deviations ^c Δf	±1 Hz	±1 Hz	±1 Hz
^a Value not defined in IEC 61000-2-2. ^b See 5.2 ^c ±2 Hz in case of isolated networks.			

Kuva 2. Testausasetukset sinimuotoisella jännitelähteellä IEC 61000-2-4:2002¹⁶

Testausmenettely

Testien järjestys:

Tyhjäkäyntitesti suoritetaan sinimuotoisella jännitelähteellä (taajuus ja jännite) standardin IEC 60034-2-1:2014 mukaisesti vakiohäviöiden määrittämiseksi. P_{Csin} (testiohjelma esitetty taulukossa 2).

¹⁶ IEC 61000-2-4:2002 Electromagnetic compatibility



Kuva 3. IEC 60034-2-1 mukainen DOL-tyyppitesti¹⁷

¹⁷ IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s.36

Tyhjäkäyntitesti suoritetaan taajuusmuuttaja syötöllä (taajuus ja jännite) määrätyltä toimintapisteeltä kiinteiden häviöiden määrittämiseksi P_{Ccon} .

Nämä mittaukset tulee suorittaa välittömästi peräkkäin.

Ero kiinteissä häviöissä välillä käytettäessä taajuusmuuttaja syöttöä P_{Ccon} ja sinimuotoista virtalähdettä P_{Csin} on ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö.

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin} \quad (5)$$

Hyötysuhteen määrittäminen

Ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö P_{LHL} lisätään perusmoottorihäviöihin määritettyä sinimuotoisella virtalähteellä IEC 60034-2-1:2014 standardin mukaisesti, jotta saadaan moottorin hyötysuhde taajuusmuuttajakäytössä.¹⁸

Hyötysuhde taajuusmuuttaja syötössä määritetään:

$$\eta = \frac{P_{2_{60034-2-1}}}{P_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}} \quad (6)$$

4.3 Menetelmä 2-3-C vaihtoehtoinen tehokkuuden määrittäminen

Tämä menetelmä esittää hyötysuhteen laskemista käyttämällä työkalua, jota joskus kutsutaan nimellä analyttinen malli. Tämän mallin hyväksyminen edellyttää useita vaiheita. Koska laskelmat määräytyvät valmistustavan mukaan, jokaisen

¹⁸ IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2, s.14-15

valmistajan on määritettävä omat analyttiset mallit. Mallin hyväksymiseen edellytetään:

- Tunnetun testimenetelmän käyttämistä.
- Testilaboratorion on oltava pätevä testien suorittamiseen vaaditulla tarkkuudella.
- Riittävästi erilaisia tyyppejä tai perusmalleja, jotka on valittu testattavaksi ja arvioitavaksi työkalun tarkkuuden todentamiseksi kaikissa tuotteissa.
- Riittävä näyte jokaisesta perusmallista identtisellä suunnitelulla täytyy testata, että varmistetaan työkalun ennustavan nimellishyötysuhteen tarkasti.
- Kaikki syötöt perustuvat tilastolliseen analyysiin, joka varmistaa niiden tarkkuuden.

Valittujen perusmallien tulisi tyypillisesti vaihdella nimellistehon, kotelon, nopeuden, sähköisten ominaisuuksien ja muiden fyysisten tai funktionaalisten ominaisuuksien osalta, jotka vaikuttavat energian kulutukseen ja hyötysuhteeseen.

4.4 Menetelmä 2-3-D hyötysuhteen määrittäminen laskennallisesti

Tätä menetelmää käytetään suurille moottoreille, joiden nimellislähtöteho on yli 2MW, tilanteessa, jossa moottorin nimellisarvo ylittää käytettävissä olevat testausominaisuudet, ylimääräisten korkeataajuisien moottorihäviöiden määrittämisen laskelmiin perustuvalla muuntimen toiminnalla voi olla vaihtoehtoinen menetelmä antaa suurusluokka lisähäviöistä. Tämän laskelman on perustuttava todelliseen taajuusmuuttajan pulssikuvioon, taajuusriippuvaisiin vastaaviin

sähkömoottorin piiriparametreihin ja käyttämällä moottorimalleja, jotka pystyvät peittämään korkeampien taajuuksien vaikutuksia.¹⁹

¹⁹ IEC 60034-2-3 2020 Rotating electrical machines, Osa 2-3, s.15

5 TESTAUS MÄÄRITELMÄ

5.1 Yleistä

Testeissä halusimme verrata standardin IEC 60034-2-3 antamia testimetodeja. Testimetodit, joita vertaamme tässä työssä ovat menetelmä 2-3-A moottorin hyötysuhteen määrittely suoralla menetelmällä ja 2-3-B moottorin hyötysuhteen määrittely käyttäen häviösummausmenetelmää (epäsuoralla menetelmällä). Testeissä tulee noudattaa kappaleessa 4.4 määritettyjä perusolosuhteita.

5.1.1 2-3-B epäsuora mittausmenetelmä

Ensimmäiseksi halusimme suorittaa mittaukset standardin IEC 60034-2-1 antamalla menetelmillä taulukon 1 mukaisesti. Testit ajetaan sinimuotoisella nimellisjännitteellä (taajuus, jännite). Testistä saamme määritettyä vakiohäviöt (P_{Csin}).

Tyhjäkäyntitestin jälkeen sinimuotoisella syötöllä, moottorille tulee tehdä tyhjäkäyntitesti käyttäen taajuusmuuttajasyöttöä. Testi tulee suorittaa mahdollisimman nopeasti, että testiolosuhteet pysyvät mahdollisimman samanlaisina. Testillä saamme määritettyä vakiohäviöt (P_{Ccon}).

Ero kiinteiden häviöiden välillä käytettäessä testimuunninta P_{Ccon} ja sinimuotoista virtalähdettä P_{Csin} on ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö.

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

(5)

Ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö P_{LHL} lisätään perusmoottorihäviöihin määritettynä sinimuotoisella virtalähteellä IEC 60034-2-1:2014 standardin mukaisesti, jotta saadaan moottorin hyötysuhde taajuusmuuttajakäytössä.

Hyötysuhde taajuusmuuttaja syötössä määritetään:

$$\eta = \frac{P_{2_{60034-2-1}}}{P_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}}$$

(6)

5.1.2 2-3-A suora mittausmenetelmä

Näiden testien jälkeen kytkemme moottorin kuormakoneeseen.

Tämä testi tulee suorittaa samalla perusjännitteellä kuin sinimuotoisella virtalähteellä.

Ennen testiä tulee tarkistaa vääntömomentin mittauslaitteen poikkeama IEC 60034-2-1:2014

Testattavaa konetta käytettiin nimellis- vääntömomentilla ja -nopeudella kunnes loppulämpenemä (muutos 1K tai vähemmän puolessa tunnissa) oli saavutettu.

Lämpenemätestin lopussa kirjataan tulokset:

T_c Vääntömomentti

n Nopeus

P_{1c} Moottorin ottama teho

Tarkista vääntömomentin mittauslaitteen poikkeama koneen pysäyttämisen jälkeen.

Hyötysuhteen määrittäminen tulon ja lähdön suorasta mittauksesta

Mekaaninen teho

$$P_{2c} = 2\pi * T_c * n$$

(3)

Hyötysuhde

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}}$$

(4)

Testattaessa induktioakoneita standardi kehottaa suorittamaan myös tämän testin heti siniajon jälkeen. Tämä ei ole kuitenkaan välttämätöntä, sillä voimme ajaa moottorin samaan lämpötilaan kuin sinikäytössä ja suorittaa tulon ja lähdön mittauksen.

5.2 Testeissä käytettävät moottorit

Testeissä käytimme kahta erikokoista nelinapaista ABB:n prototyyppimoottoria. Kummatkin moottorit ovat puhallinjäähdytteisiä valurautarunkoisia oikosulkumoottoreita. Moottoreissa numerot 355 ja 180 kertovat runkokoon, joka määräytyy akselin keskikohdan korkeudesta moottorin jalkoihin. 355 ja 180 ovat yksiköittäin millimetrejä. Testeissä käytettävät moottorit on esitelty taulukossa 3. Liitteissä 5 ja 6 esitellään moottoreita tarkemmin.

Taulukko 2. Moottorit

Moottori tyyppi	Arvokilven leimaustiedot
M3BP 180MLC 4	400 VD, 50 Hz, 30 kW, 58.4 A, 1479 rpm, S1
M3BP 355SMA 4	400 VD, 50 Hz, 250 kW, 253 A, 1491 rpm, S1

5.3 Testeissä käytettävät taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajina testeissä käytimme kahta erikokoista ABB:n valmistamaa taajuusmuuttajaa. Pienempää ACS850-04-094A-5-taajuusmuuttajaa käytimme M3BP 180MLC 4-moottorin testeihin ja isompaa ACS880-04-880A-5-taajuusmuuttajaa M3BP 355SMA 4-moottorin testeihin. Testeissä käytettävät taajuusmuuttajat on esitetty taulukossa 4. Liitteessä 2 ja 3 tuote-esitteet taajuusmuuttajista.

Taulukko 3. Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttaja tyyppi	Arvokilven leimaustiedot
ACS850-04-094A-5	400 VD, 50 Hz, 45 kW, 94 A
ACS880-04-880A-5	400 VD, 50 Hz, 630 kW, 880 A

6 TESTITULOSTEN VERTAILU JA LASKENTA

6.1 M3BP 180MLC 4

Tälle nelinapaiselle 30kW:n oikosulkumoottorille suoritimme aluksi standardin 60034-2-1 mukaisen DOL-tyyppitestin ilman taajuusmuuttajaa käyttäen 370V:n pääjännitettä ja 50Hz:n taajuutta. DOL-tyyppitestiin kuuluu myös tyhjäkäyntitesti, kuten taulukosta 2 voi huomata.

Testeissä esitetyistä Time-sarakkeista näemme arvoja, jotka ovat mitattu koneesta eri kellonaikoina testiä suorittaessa. Esimerkiksi taulukon 5 testin ensimmäinen mittaus on suoritettu illalla kello 21.24 ja viimeinen mittaus seuraavana aamuna kello 06.36.

Taulukko 4. DOL-lämpenemätesti

Time	U, V	I, A	cos p	n %	P in , kW	P ML , kW	rpm	T , Nm	P out , kW	f , Hz
21:24	369,78	59,96	0,847	92,24	32,566	2,52	1475,6	194,40	30,04	49,99
22:44	368,88	59,78	0,853	91,71	32,63	2,70	1469,9	194,44	29,93	49,98
0:04	368,70	59,66	0,855	91,53	32,631	2,76	1468,0	194,29	29,86	49,98
1:24	368,62	59,65	0,856	91,50	32,649	2,77	1468,6	194,25	29,87	50,01
2:44	368,59	59,60	0,856	91,50	32,614	2,77	1466,9	194,27	29,84	49,96
6:34	369,93	59,60	0,85	91,53	32,703	2,77	1467,2	194,82	29,93	49,96
6:36	369,90	59,96	0,85	91,5	32,919	2,79	1467,7	195,99	30,12	49,99

Taulukossa 5 näkyvät kuormitustestin tulokset. Vertailuarvoiksi otamme alimmaisen rivin arvot, jotka ovat mitattu moottorista, kun loppulämpenemä 1 K tai vähemmän puolessa tunnissa on saavutettu.

Vaihevastus ennen tyhjäkäyntitestiä: 187,2 mΩ

Vaihevastus tyhjäkäyntitestin jälkeen: 187,7 mΩ

Taulukossa 5 näkyvät arvot:

<i>Time</i>	Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana
<i>U</i>	Jännite
<i>I</i>	Virta
<i>cos p</i>	Tehokerroin
<i>n%</i>	Hyötysuhde
<i>P in, kW</i>	Moottorin ottama teho
<i>P ML, kW</i>	Moottorin häviöt
rpm	Moottorin kierrosnopeus
<i>T, Nm</i>	Vääntömomentti
<i>P out, kW</i>	Moottorin akseliteho
<i>f, Hz</i>	Taajuus

Taulukko 5. DOL-tyhjäkäyntitesti

U, V	I0, A	P0, W	f0, Hz
370,44	19,96	720,33	49,99

Taulukossa 6 on esitetty vain nimellisellä jännitteellä mitatut arvot, jotka ovat tutkielmalle kiinnostavia.

Taulukossa 6 näkyvät arvot:

<i>U, V</i>	Mitattu jännite
<i>I0, A</i>	Mitattu virta

P_0, W Tyhjäkäyntiteho

f_0, Hz Taajuus

DOL-tyhjäkäyntitestistä saimme kiinteät häviöt, jotka ovat esitetty taulukossa sarakkeessa P_0 . P_0 arvoa käytämme ylimääräisen korkeataajuisen moottorihäviön laskennassa P_{csin} määritelmänä.

DOL-tyyppitestin jälkeen suoritimme VSD-lämpenemätestin, jossa käytetään taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajalla moottoria ohjattiin skalaariohjauksella. Kytettätaajuutena käytimme 3kHz:ä ja syöttöjännitettä ohjattiin siten, että perusaallon jännite moottorille on 370V.

Taulukko 6. VSD-lämpenemätesti

Time	U, V	I, A	cos p	PM input/PC output, kW	P ML, kW	η_M	n rpm	T, Nm	PM out, kW	f, Hz
12:07	397,86	52,31	0,930	32,86	2,82	91,40	1474	194,5	30,03	50,0
14:07	397,96	52,43	0,931	32,96	3,02	90,80	1468	194,6	29,93	49,9
16:07	400,35	52,48	0,930	33,17	3,12	90,59	1467	195,6	30,05	50,0
18:07	399,86	52,57	0,930	33,19	3,13	90,55	1467	195,6	30,06	50,0
20:07	400,19	52,50	0,930	33,17	3,12	90,58	1467	195,6	30,05	50,0
22:07	400,61	52,44	0,930	33,17	3,12	90,58	1467	195,6	30,04	50,0
0:07	399,79	52,55	0,930	33,17	3,12	90,60	1467	195,6	30,05	50,0
2:07	399,64	52,57	0,931	33,18	3,13	90,57	1467	195,6	30,05	50,0
4:07	400,41	52,48	0,930	33,17	3,13	90,56	1467	195,6	30,04	50,0
6:07	400,36	52,47	0,930	33,17	3,12	90,59	1467	195,6	30,05	50,0
7:37	400,69	52,48	0,930	33,20	3,13	90,57	1467	195,8	30,07	50,0
7:40	400,03	49,61	0,988	33,08	3,03	90,84	1467	195,6	30,05	49,9
7:41	400,68	52,47	0,930	33,19	3,13	90,58	1467	195,7	30,06	49,9
7:42	400,73	52,42	0,930	33,17	3,13	90,58	1467	195,6	30,04	50,0

Taulukossa 7 näkyvät VSD-kuormitustestin tulokset. Tästäkin testistä haluamme ottaa vertailuarvoiksemme alimman rivin arvot, jotka kuvastavat mitattuja arvoja loppulämpenemän ollessa 1 K tai vähemmän kuin puolessa tunnissa on saavutettu.

Taulukossa 7 näkyvät arvot:

<i>Time</i>	Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana
<i>U, V</i>	Taajuusmuuttajaa syöttävä jännite
<i>I, A</i>	Taajuusmuuttajaa syöttävä virta
<i>cos p</i>	Taajuusmuuttajalta mitattu tehokerroin
<i>PM input, kW</i>	Moottorin ottama teho
<i>P ML, kW</i>	Moottorin häviöt
<i>ηM</i>	Moottorin hyötysuhde
<i>rpm</i>	Moottorin kierrosnopeus
<i>T, Nm</i>	Vääntömomentti
<i>P out, kW</i>	Moottorin akseliteho
<i>f, Hz</i>	Taajuus

Testisarjasta saamme moottorin häviöt vähentämällä moottorin akselitehon moottorin ottamatehosta ja hyötysuhteen jakamalla moottorin akselitehon moottorin ottamateholle.

DOL- ja VSD-testien välillä teimme huomion moottorin häviöiden välillä. Vertailussa huomasimme, että DOL-testissä moottorin häviöt ovat noin 386 wattia pienemmät kuin VSD-testissä laskulla 3,13kW-2,74kW.

VSD-tyyppitestin jälkeen moottorille ajettiin tyhjäkäyntitesti taajuusmuuttajalla. Myös tässä testissä syöttöjännitettä ohjattiin siten, että moottorin perusaallon jännite on 370V. Testissä mittasimme vaihevastuksen ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin.

Taulukko 7. VSD-tyhjäkäyntitesti

Time	U, V	I, A	cos p	P0, kW	f, Hz
9:32	371,40	20,32	0,053	0,807	50,0
9:42	371,35	20,45	0,053	0,808	50,0
9:52	371,34	20,44	0,053	0,807	50,0
10:02	371,33	20,50	0,053	0,8109	50,0
10:12	371,33	20,55	0,053	0,8125	50,0
10:15	371,33	20,55	0,053	0,811	50,0

Taulukossa 8 esitetään VSD-tyhjäkäyntitestin tuloksia. Vertailussamme käytämme alimmalla rivillä näkyvää pistettä.

Vaihevastus ennen tyhjäkäyntitestiä: 182,2 mΩ

Vaihevastus tyhjäkäyntitestin jälkeen: 178,8 mΩ

Taulukossa 8 näkyvät arvot:

Time Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana

U, V Jännite mitattuna moottorilta

I, A Virta mitattuna moottorilta

cos p Tehokerroin mitattuna moottorilta

P0, kW Tyhjäkäyntihäviö

$f, \text{ Hz}$ Taajuus

VSD-tyhjäkäyntitestistä saamme kiinteät häviöt, jotka ovat esitetty taulukossa sarakkeessa P_0 , kW. P_0 , kW arvoa käytämme ylimääräisen korkeataajuisen moottorihäviön laskennassa P_{ccon} määritelmänä.

Moottorinkokonaishäviöistä taajuusmuuttajakäytössä P_{ccon} ja moottorin kokonaishäviöistä sinimuotoisella syötöllä P_{csin} saamme ylimääräiset korkeataajuiset moottori häviöt P_{LHL}

$$P_{LHL} = P_{ccon} - P_{csin}$$

(5)

$$P_{LHL} = 811,475\text{W} - 720,33\text{W} = 91,145\text{W}$$

Ylimääräinen korkeataajuinen häviö P_{LHL} lisätään perusmoottorihäviöihin määritettynä sinimuotoisella virtalähteellä, josta saadaan hyötysuhde taajuusmuuttajakäytössä.

$$\eta = \frac{P_{2_{60034-2-1}}}{P_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}}$$

(6)

$$P_{1_{60034-2-1}} = 32.91926956 \times 10^3 \text{W}$$

$$P_{2_{60034-2-1}} = 30.12560463 \times 10^3 \text{W}$$

$$\eta = \frac{30,12560463 \times 10^3 \text{W}}{32,91926956 \times 10^3 \text{W} + 91,145 \text{W}}$$

$$\eta = 0,913$$

Hyötysuhde käyttämällä häviösummaus menetelmää on 91,3 %

6.2 M3BP 355SMA 4

Tämän moottorin testisarjassa käytimme hyväksi jo aikaisemmin moottorille tehtyä DOL-tyyppitestiä. Sen vuoksi hyötysuhteen määrittämisessä voi olla jonkinlaista lämpenemä eroavaisuuksista johtuvaa epävarmuutta. Niihin emme ottaneet kantaa tulosvertailussa. Muuten moottorille suoritettiin samat testit, mitkä moottorille M3BP 180MLC. Tämän moottorin testauksessa on käytetty 400V pääjännitettä 50Hz taajuutta. Taulukossa 9 ja 10 esitetään DOL-tyyppitestin lämpöajo ja tyhjäkäyntitesti, joita tarvitsemme hyötysuhteen määrittämiseen.

Taulukko 8. DOL-lämpenemätesti

Time	U, V	I, A	cos p	n %	P in , kW	P ML, kW	n rpm	T , Nm	P out , kW	f , Hz
19:55	399,62	435,40	0,857	96,79	258,44	8,30	1492,2	1600,7	250,1	49,99
20:55	400,55	434,71	0,857	96,77	258,41	8,35	1491,8	1600,6	250,0	49,99
23:05	400,40	434,09	0,858	96,73	258,36	8,44	1491,4	1600,2	249,9	49,99
1:15	400,34	433,94	0,858	96,73	258,37	8,46	1491,3	1600,2	249,9	50,00
3:25	400,34	433,96	0,859	96,72	258,41	8,49	1491,2	1600,5	249,9	49,99
5:35	400,36	433,91	0,859	96,72	258,40	8,48	1491,2	1600,3	249,9	49,99
7:45	400,63	433,57	0,859	96,71	258,32	8,49	1491,2	1599,7	249,8	49,99
9:55	400,42	433,96	0,859	96,70	258,47	8,53	1491,2	1600,5	249,9	49,99
11:05	400,45	433,83	0,859	96,70	258,40	8,52	1491,2	1600,1	249,9	49,99

Taulukossa 9 näkyvät arvot:

Time Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana

U Jännite

I Virta

cos p Tehokerroin

$n\%$	Hyötysuhde
P_{in}, kW	Moottorin ottama teho
P_{ML}, kW	Moottorin häviöt
rpm	Moottorin kierrosnopeus
T, Nm	Vääntömomentti
P_{out}, kW	Moottorin akseliteho
f, Hz	Taajuus

Taulukko 9. DOL-tyhjäkäyntitesti

U, V	I₀, A	P₀, W	f₀, Hz
399,93	131,33	3662,59	49,99

Vaihevastus ennen tyhjäkäyntitestiä: 7,015 mΩ

Vaihevastus tyhjäkäyntitestin jälkeen: 6,888 mΩ

Taulukossa 10 näkyvät arvot:

U, V	Mitattu jännite
I_0, A	Mitattu virta
P_0, W	Tyhjäkäyntiteho
f_0, Hz	Taajuus

VSD-testauksissa moottorin syöttöjännitettä ohjattiin siten, että moottorin perusaallon jännite on 400V. Taulukossa 11 ja 12 on esitetty moottorille tehty lämpö ja tyhjäkäyntitesti käyttäen taajuusmuuttajaa.

Taulukko 10. VSD-lämpenemätesti

Time	U, V	I, A	cos p	P input, kW	P ML, kW	η_M	n rpm	T, Nm	P out, kW	f, Hz
14:21	420,72	421,85	0,862	259,68	9,47	96,35	1492,7	1600,7	250,2	49,99
17:21	420,74	422,90	0,8612	259,97	9,87	96,20	1491,2	1601,6	250,1	49,99
20:21	420,69	422,94	0,861	259,94	9,88	96,20	1490,9	1601,6	250,1	50,00
23:21	420,74	421,43	0,864	260,03	9,98	96,16	1490,9	1601,5	250,0	50,00
2:21	420,79	422,67	0,862	259,99	9,94	96,18	1490,9	1601,5	250,1	49,99
5:21	420,84	421,80	0,863	259,98	9,97	96,17	1490,9	1601,3	250,0	49,99
6:04	419,70	423,61	0,862	259,96	9,97	96,17	1490,9	1601,2	250,0	50,00
6:22	419,72	423,45	0,862	259,95	9,94	96,18	1490,9	1601,3	250,0	49,99
6:23	419,41	374,25	0,979	259,18	9,15	96,47	1490,9	1601,4	250,0	49,99
6:24	419,72	422,55	0,864	260,00	9,98	96,16	1490,9	1601,4	250,0	49,99
6:26	419,71	422,20	0,865	260,02	10,00	96,15	1490,8	1601,3	250,0	49,99

Taulukossa 11 näkyvät arvot:

<i>Time</i>	Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana
<i>U, V</i>	Taajuusmuuttajaa syöttävä jännite
<i>I, A</i>	Taajuusmuuttajaa syöttävä virta
<i>cos p</i>	Taajuusmuuttajalta mitattu tehokerroin
<i>PM input, kW</i>	Moottorin ottama teho
<i>P ML, kW</i>	Moottorin häviöt
<i>η_M</i>	Moottorin hyötysuhde
<i>rpm</i>	Moottorin kierrosnopeus
<i>T, Nm</i>	Vääntömomentti
<i>P out, kW</i>	Moottorin akseliteho
<i>f, Hz</i>	Taajuus

Taulukko 11. VSD-tyhjäkäyntitesti

Time	U, V	I, A	cos p	P0, kW	f, Hz
11,57	399,11	136,67	0,5058	4,824	50,00

Vaihevastus ennen tyhjäkäyntitestiä: 7,015 mΩ

Vaihevastus tyhjäkäyntitestin jälkeen: 6,43 mΩ

Taulukossa näkyvät arvot:

Time Mittaushetki ilmoitettuna kellonaikana

U, V Jännite mitattuna moottorilta

I, A Virta mitattuna moottorilta

cos p Tehokerroin mitattuna moottorilta

P0, kW Tyhjäkäyntihäviö

f, Hz Taajuus

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

(5)

$$P_{LHL} = 4824W - 3663W = 1161W$$

$$\eta = \frac{P_{2_{60034-2-1}}}{P_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}}$$

(6)

$$P_{1-60034-2-1} = 258,4005737 \times 10^3 \text{W}$$

$$P_{2-60034-2-1} = 249,8801575 \times 10^3 \text{W}$$

$$\eta = \frac{258,4005737 \times 10^3 \text{W}}{249,8801575 \times 10^3 \text{W} + 1161 \text{W}}$$

$$\eta = 0,963$$

Hyötysuhde käyttämällä häviösummaus menetelmää on 96,3 %

6.3 Vertailu

Taulukossa 13 on otettu esille kaikki tekemistämme mittauksista saadut hyötysuhdet. Lisänä taulukossa on otettu vertailuun vaihevastuksien vaikuttamat hyötysuhde-erot häviösummaus menetelmällä moottorille M3BP 180 MLC 4. Häviösummaus R0, B ja häviösummaus R0, A näyttävät ne arvot, joissa on käytetty vaihevastusmittausta ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin. Tarkennetut laskelmat niille löytyvät liitteestä 4.

Taulukko 12. Vertailutaulukko hyötysuhteille

M3BP 180MLC 4	U,V	f, Hz	P ML, kW	P in- put/DOL	P out- put/DOL	η_M
Input/output DOL		50	2,79	32,92	30,13	91,51
Input/output VSD	369,59	50	3,13			90,6
Häviösummaus	371,33/370,44	50	0,808/0,720			91,3
Häviösummaus R0, B	371,33/370,44	50	0,696/608			91,27
Häviösummaus R0, A	371,33/370,44	50	0,698/0,608			91,26
M3BP 355SMA 4						
Input/output DOL	400,38	50	8,52	258,4	249,9	96,7
Input/output VSD	400,45	50	10,00			96,15
Häviösummaus	399,11/399,50	50	4,824/3,663			96,27

Taulukossa 13 näkyvät arvot:

U,V Jännite mitattuna moottorilta. Häviösummausmenetelmän kohdalla jännite on esitetty ensin VSD-tyhjäkäyntitestistä ja sitten DOL-tyhjäkäyntitestistä.

f,Hz Taajuus

P ML, kW Moottorin häviöt. Häviösummausmenetelmän kohdalla esitetty kiinteät häviöt ensin VSD-tyhjäkäyntitestistä ja sitten DOL-tyhjäkäyntitestistä.

P input/DOL Moottorin ottama teho DOL-tyyppitestissä

P output/DOL Moottorin akseliteho DOL-tyyppitestissä

η_M Moottorin hyötysuhteet

Vertailemalle näitä kahta mittausmenetelmää voimme huomata, että epäsuora mittausmenetelmä antaa paremman hyötysuhteen kuin suora

mittausmenetelmä. Suorassa mittausmenetelmässä hyötysuhde päätellään suoraan akselitehosta ja kaikkia sen sisältämiä häviökomponentteja ei pystytä mallintamaan.

Voidaan myös epäillä pitääkö standardissa kerrottu tieto paikkaansa siitä, että korkeataajuinen moottorihäviö jänniteohjatun taajuusmuuttajan syötössä on yleensä periaatteessa riippumaton kuormasta. Sillä vertaamalla moottorin M3BP 180MLC 4 moottorihäviöitä kuormitetun ja kuormittamattoman testin välillä voidaan huomata merkittäviä eroja. Nämä erot saattavat johtua osakseen moottorin lämpötilan noususta, mutta se jättää varaa lisätutkimuksille asian suhteen.

7 YHTEENVETO JA JATKOKEHITYS

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ja testata standardin IEC60034-2-3 määrittämät testit oikosulkumoottorin hyötysuhteen ja häviöiden määrittämiseksi taajuusmuuttajakäytössä. Työssä ilmenee standardin määrittämät erilaiset testaustavat sekä suoran ja epäsuoran hyötysuhteen mittauksen testitulokset.

Haastavinta työssä olivat standardin tulkitseminen, se miten standardi määrittää testimetodit ja mitä ehtoja standardi antaa hyötysuhteen määrittämiseen. Työssä opittiin paljon uutta liittyen sähkömoottoreiden koestukseen sekä testauslaboratorion toimintaan.

Tutkimuksessa huomattiin, että testausmenetelmien välillä on hieman eroja ja hyötysuhde tulokset eivät ole identtisiä. Jatkotutkimuksena työ tarvitsee useampien moottorimallien testausta ja niiden hyötysuhdetuloksien vertausta. Jatkossa tehtäessä samanlaisia koestuksia taajuusmuuttajalle tehtävät kokeet olisivat hyvä suorittaa ennen verkkokäytöllä suoritettavia testauksia. Näin pystymme varmistamaan, että perusaallon jännite on 90 % syöttöjännitteestä ja vertailuarvot ovat identtisiä.

Jatkokehityksenä voitaisiin myös tutkia miten syöttötaajuus vaikuttaa hyötysuhteeseen ajamalla moottorille testit käyttäen erikokoisia syöttötaajuuksia. Lisäksi standardin määrittämää 2-3-C vaihtoehtoista hyötysuhteen määrittämismenetelmää olisi mielenkiintoista kokeilla ABB:n laskentaohjelmalla Adeptilla ja tutkia miten sen antamat laskentatulokset eroavat näiden kahden testitavan hyötysuhdelukuihin.

LÄHTEET

ABB Lyhyesti Historia. Viitattu 16.5.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia>

ABB. ABB Suomessa. Viitattu 16.5.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>

Avantola, J-P. Testing Development Engineer. Teams puhelu.

Elnagar, A. Two-level voltage source converter. ResearchGate. Viitattu 18.5.2022
https://www.researchgate.net/figure/Two-level-voltage-source-converter_fig1_305658935

Hannuksela, J. Head of Global Standards and Compliance. Teams puhelu.

IEC 61000-2-4:2002 Electromagnetic compatibility

IEC 60034-2-1 2014 Rotating electrical machines, Osa 1-2

IEC 60034-2-3 2020 Rotating electrical machines, Osa 2-3

Vieri, J. 2018. Final testing procedures. ABB.

LIITTEET

LIITE 1 Kaavaluettelo

Kaavat

1. Kiinteä häviö

$$P_{csin} = P_0 - P_s$$

2. Staattorin käämityksen häviöt ja lämpötilan korjaus

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R$$

3. Mekaaninen teho

$$P_{2C} = 2\pi * T_C * n$$

4. Hyötysuhde suoralla mittauksella

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}}$$

5. Ylimääräinen korkeataajuinen moottorihäviö

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

6. Hyötysuhde häviösummaus menetelmää käytettäessä

$$\eta = \frac{P_{2_{60034-2-1}}}{P_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}}$$

LIITE 2 ACS850-04-094A-5 Taajuusmuuttajan tuote-esittely



 PRODUCT-DETAILS

ACS850-04-094A-5

ACS850-04-094A-5 PN:45kW, IN:94A



General Information

Global Commercial Alias	ACS850-04-094A-5
Product ID	3AJUA0000050932
ABB Type Designation	ACS850-04-094A-5
Catalog Description	ACS850-04-094A-5 PN:45kW, IN:94A

Ordering

Country of Origin	Finland (FI) United States (US)
Customs Tariff Number	85044088
Invoice Description	ACS850-04-094A-5 PN:45kW, IN:94A
Made To Order	Yes
Minimum Order Quantity	1 piece
Order Multiple	1 piece
Quote Only	No
Selling Unit of Measure	piece

Dimensions

Product Net Weight	23 kg
Product Net Height	567 mm
Product Net Length	276 mm
Product Net Width	220 mm

Technical

Number of Phases	3
Frequency (f)	50 ... 60 Hz
Input Voltage (U _{in})	400 ... 500 V
Mounting Type	Module for cabinet assembly
Output Current, Heavy-Duty Use	75 A
Output Current, Light-Overload Use	90 A
Output Current, Normal Use	94 A
Output Power, Heavy-Duty Use	37 kW
Output Power, Light-Overload Use	45 kW
Output Power, Normal Use	45 kW

LIITE 3 ACS880-04-880A-5 Taajuusmuuttajan tuote-esittely



PRODUCT-DETAILS

ACS880-04-880A-5

ACS880-04-880A-5 PN: 630 kW, IN: 880 A



Yleiset tiedot

Global Commercial Alias	ACS880-04-880A-5
Tuotekoodi	3AUA0000169453
ABB Type Designation	ACS880-04-880A-5
Pitä tuotenimi	ACS880-04-880A-5 PN: 630 kW, IN: 880 A

The ACS880-04 drives are customized to meet the particular needs of specific industries, such as oil and gas, mining, metals, chemicals, cement, power plants, material handling, pulp and paper, sawmills, marine, water and wastewater, food and beverage, and automotive. They can control a wide range of applications, including cranes, extruders, winches, winders, conveyors, mixers, compressors, centrifuges, test benches, elevators, extruders, pumps and fans.

Tuotekuvaus

The ACS880-04 modules have all the essential features built-in including a choke for harmonic filtering as standard, and options such as a brake chopper, EMC filter and communication protocol adapter, functional safety and I/O extension modules. The all built-in design combined with IP20 protection significantly simplifies engineering. The drive's compact size, flexible cabling directions and versatile mounting possibilities from narrow bookshelf to flat mounting and horizontal mounting make it an ideal fit for almost any enclosure. The control unit with I/O and communication connections can be mounted outside the power module or integrated into it.

Ordering

Country of Origin	Finland (FI)
Tuikkoodi	85044088
Invoice Description	ACS880-04-880A-5 PN: 630 kW, IN: 880 A

LIITE 4 Laskelmat häviösummaus menetelmällä vaihevastukset huomioon ottaen

M3BP 180MLC

$$P_{csin} =$$

I=19,968 A, Before No-load R=0,1877ohm, After No-load R=0,1872ohm

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad P_s = 1,5 \times 19,968A^2 \times 0,1877ohm = 112,189W$$

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad P_s = 1,5 \times 19,968A^2 \times 0,1872ohm = 111,79 W$$

$$P_{csin} = P_0 - P_s, \quad P_0 = 720,3W$$

$$P_{csin} = 720,3W - 112,19W = 608,111W \quad \text{ja} \quad P_{csin} = 720,3W - 111,85W = 608,45W$$

$$P_{ccon} =$$

I=20,55 A, Before No-load R=0,1822ohm, After No-load R=0,1788ohm

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad P_s = 1,5 \times 20,55^2 \times 0,1822ohm = 115,415W$$

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad P_s = 1,5 \times 20,55A^2 \times 0,1788ohm = 113,262 W$$

$$P_{csin} = P_0 - P_s, \quad P_0 = 698,213W$$

$$P_{csin} = 811,475W - 115,415W = 696,06W \quad \text{ja} \quad P_{csin} = 811,475W - 113,262W = 698,213W$$

$$PLHL = P_{ccon} - P_{csin}, \quad PLHL = 696,06W - 608,111W = 87,949W \quad \text{ja} \quad PLHL = 698,213W - 608,4W = 89,763W$$

$$P_{1-60034-2-1} = 32,919kW \quad P_{2-60034-2-1} = 30,123kW$$

$$\eta = \frac{P_{2-60034-2-1}}{P_{1-60034-2-1} + P_{LHL}}, \quad \eta = \frac{30125,6W}{32919,3W + 87,949W} = 0,9127 \quad \eta = \frac{30125,6W}{32919,3W + 89,763W} = 0,9126$$

$$\eta = 0,9127 \quad \text{ja} \quad 0,9126$$

LIITE 5 Valurauta runkoisten moottorien esittely lyhyesti, koot 132-250

Motors in brief

Cast iron motors, sizes 132 - 250

Motor size	M2BAX	132	160	180	200	225	250
Stator and end shields	Material	Cast iron					
	Paint color shade	Munsell blue 8B 4.5/3.25					
	Corrosion class	C3					
Feet	Material	Integrated cast iron feet					
Bearings	D-end	6208-2Z/C3	6209-2Z/C3	6210-2Z/C3	6212-2Z/C3	6213-2Z/C3	6215-2Z/C3
	N-end	6208-2Z/C3	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	6210-2Z/C3	6212-2Z/C3
Axially locked bearings		Locked at D-end with retaining ring	Locked at D-end with inner bearing cover				
Bearing seals	D-end	V-ring					
	N-end	V-ring					
Lubrication		Permanently lubricated shielded bearings					
Measuring nipples for condition monitoring of the bearings		Not included					
Rating plate	Material	Stainless steel					
Terminal box	Cover, material	Steel					
	Corrosion class	C3					
	Cover screws	Zinc-electroplated steel					
Connections	Threaded openings	2xM32	2xM40, 1xM16		2xM63, 1xM16		
	Terminals	6 terminals for connection with cable lugs (not included)					
	Cable glands	Glands as option	Cable flange included, glands as option				
Fan	Material	Glass-fiber reinforced polypropylene					
Fan cover	Material	Steel					
	Paint color shade	Munsell blue 8B 4.5/3.25					
	Corrosion class	C3					
Stator winding	Material	Copper					
	Insulation	Insulation class F. Temperature rise class B unless otherwise stated.					
	Winding protection	3 PTC thermistors, 150 °C					
Rotor winding	Material	Pressure die-cast aluminum					
Balancing method		Half-key balancing as standard					
Key ways		Open key way					
Drain holes		Drain holes with closable plastic plugs, open on delivery					
Enclosure		IP 55 Higher protection on request					
Cooling method		IC 411					
Lifting lugs		Integrated cast iron lifting lug					

LIITE 6 Valurauta runkoisten moottorien esittely lyhyesti, koot 132-250

Motors in brief

Cast iron motors, sizes 280 - 355

Motor size	M2BAX	280	315	355
Stator and end shields	Material	Cast iron		
	Paint color shade	Munsell blue 8B 4.5/3.25		
	Corrosion class	C3		
Feet		Integrated cast iron		
Bearings	D-end 2-pole	6316/C3	6217/C3 or 6316/C3	6219/C3 or 6319/C3
	D-end 4-6 -pole	6316/C3	6219/C3 or 6316/C3	6222/C3 or 6322/C3
	N-end 2-pole	6316/C3	6217/C3 or 6316/C3	6219/C3 or 6316/C3
	N-end 4-6 -pole	6316/C3	6217/C3 or 6316/C3	6219/C3 or 6316/C3
Axially locked bearings		Locked at D-end with inner bearing cover		
Bearing seals	D-end	V-ring		
	N-end	V-ring		
Lubrication		Regreasable bearings, regreasing nipples M6x1		
Measuring nipples for condition monitoring of the bearings		Not included		
Rating plate	Material	Stainless steel		
Terminal box	Material frame	Cast iron		
	Cover	Cast iron terminal box cover		
	Corrosion class	C3		
	Screws	Zinc-electroplated steel		
Connections	Threaded openings	2xM63, 2 x M20	2xM63, 2 x M20	2xM75, 2 x M20
	Terminals	6 terminals for connection with cable lugs (not included)		
	Cable glands	Cable glands as option		
Fan	Material	Glass-fiber reinforced polypropylene		
Fan cover	Material	Steel fan cover		
	Paint color shade	Black / Munsell blue 8B 4.5/3.25		
	Corrosion class	C3		
Stator winding	Material	Copper		
	Insulation	Insulation class F. Temperature rise class B unless otherwise stated.		
	Winding protection	3 PTC thermistors, 150 °C		
Rotor winding	Material	Pressure diecast aluminum		
Balancing method		Half key balancing as standard		
Keyway		Open key way		
Heating elements	On request	60 W	2x60 W	2x60 W
Enclosure		IP 55 Higher protection on request		
Cooling method		IC 411		
Drain holes		Drain holes with closable plastic plugs, open on delivery		
Lifting lugs		Bolted lifting lugs		