



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Niko Loukkaanhuhta

STANDARDIN IEC 61800-9-2 MU- KAISEN LASKENNAN RAKENNUS SEKÄ VAATIMUSTEN SELVITYS

Tekniikka

2025

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikka

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Niko Loukkaanhuhta
Opinnäytetyön nimi	Standardin IEC 61800-9-2 mukaisen laskennan rakennus sekä vaatimusten selvitys
Vuosi	2025
Kieli	suomi
Sivumäärä	64
Ohjaaja	Jukka Hautala

Työn tavoitteena oli luoda ABB Oy, IEC LV Motorsille koekentälle standardin IEC 61800-9-2 selvitys ja sen pohjalta rakentaa laskentaohjelma Exceliin. Standardiselvitys liittyy PDS-testaukseen ja moottorin interpolointikertoimien eli häviökertoimien määrittämiseen. Kyseisiä mittauksia ei ole ennen tehty, mutta Pohjois-Amerikkaan myytävillä taajuusmuuttajakäyttöön menevillä moottoreilla tulee olla standardin mukainen häviöiden määrittäminen vuoden 2026 alkuun mennessä.

Työ pohjautuu standardiin IEC 61800-9-2. Paremman käsityksen saamiseksi aiheesta täytyi lukea myös muita standardeja, joista IEC 60034-2-3 tuli hyvin vahvasti mukaan työhön. Muita mainittavia standardeja ovat IEC 60034-2-1, IEC 60034-30-2 ja 61800-9-1. Työn myötä tuli myös tutustuttua EU-asetukseen (EU) 2019/1781.

Laskenta rakennettiin Exceliin työtoimeksiantajan pyynnöstä. Exceliä rakentaessani ja laskentaa selvittäessäni olin myös paljon yhteydessä testausohjelman kehittäjän kanssa, jotta hän pystyi rakentamaan laskentaa testausohjelmaan samalla. Myös palaverieita pidettiin paljon. Niissä pääsin kertomaan, mitä olin oppinut ja mitä tulisi huomioida testausohjelmaa rakentaessa.

Lopputuloksena rakentui tiivis selvitys standardista IEC 61800-9-2 sekä standardinmukainen laskentasovellus Exceliin. Valitettavasti testausohjelma ei ehtinyt valmistua ajoissa, jotta olisin voinut tehdä testausohjelman laskennan tarkastuksesta selvityksen.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Sähkötekniikka

ABSTRACT

Author	Niko Loukkaanhuhta
Title	Construction of Calculation to Standard IEC 61800-9-2 and Requirements Specification
Year	2025
Language	Finnish
Pages	64
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The aim of the thesis was to create an analysis of the IEC 61800-9-2 standard for ABB Oy, IEC LV Motors' test field, and based on that, to develop a calculation tool in Excel. The standard analysis relates to PDS (Power Drive System) testing and the determination of motor interpolation factors, i.e., loss factors. These specifications have not been carried out before, but for motors intended for variable frequency drive use and sold to the American market, a standard-compliant loss specification must be performed starting from the beginning of 2026.

The thesis is based on the IEC 61800-9-2 standard. To gain a better understanding of the topic, it was necessary to read other standards as well, with IEC 60034-2-3 becoming a significant part of the work. Other notable standards include IEC 60034-2-1, IEC 60034-30-2, and IEC 61800-9-1. During the project, the EU regulation (EU) 2019/1781 was also reviewed. The calculation tool was built in Excel at the request of client of the project. While developing the Excel tool and exploring the calculations, close cooperation with the test program developer was necessary so that they could simultaneously implement the calculations into the test software.

As a result, a concise analysis of the IEC 61800-9-2 standard was produced, along with a standard-compliant calculation application in Excel. Unfortunately, the test program was not completed in time to carry out an analysis on the validation of the test software calculation.

Keywords standard, calculation, PDS, regulations

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO.....	10
1.1 Työn tausta	10
1.2 Tutkimusongelma	11
1.3 Työn tavoite ja rakenne	11
1.4 opinnäytetyön toimeksiantaja	12
1.4.1 ABB Suomessa	12
1.4.2 ABB Oy, IEC LV Motors Vaasa	13
2 STANDARDIT.....	14
2.1 IEC 61800-9-2	14
2.2 IEC 60034-2-3	15
3 STANDARDIN VAATIMUKSET	17
3.1 Mittauksen vaatimukset häviöiden määritykseen.....	17
3.1.1 Yleiset mittausvaatimukset	17
3.1.2 Mittausvaatimukset moottorin interpolointikertoimien määritykselle	19
3.1.3 Mittausvaatimukset PDS:lle input- output metodilla	20
3.2 Laskennan vaatimukset	22
3.2.1 CDM-häviöiden laskenta	22
3.2.2 Moottorin häviöiden laskenta	30
3.2.3 PDS-häviöiden laskenta.....	34
3.3 Dokumentaation vaatimukset	35
3.3.1 Interpolointikertoimien dokumentointi	35
3.3.2 PDS-testauksen dokumentointi.....	35
4 LASKENNAN TOTEUTUS.....	36
4.1 Laskennan teko	36
4.1.1 Moottorin häviöiden laskenta	36
4.1.2 CDM-häviöiden laskenta	42
4.1.3 PDS-häviöiden laskenta.....	47
4.2 Käyttäjäsivu	53

	5
4.3 Laskennan käyttäminen	56
4.4 Laskennan vertaaminen ABB EcoDesing-laskuriin	58
5 YHTEENVETO	62
5.1 Vaikutus koekentälle	62
5.2 Tulevaisuus	63
LÄHDELUETTELO	64

KUVAT

Kuva 1. Standardin IEC 60034-2-3 kuva 3. Interpolointikertoimien määrittämiseen käytettävät ajopisteet (IEC_61800-9-2, 2023).....	20
Kuva 2. Standardin IEC 61800-9-2 Taulukko 1. Pienimmät testikuormitusvirrat toimintapisteissä (IEC_61800-9-2, 2023).	21
Kuva 3. Standardin IEC 61800-9-2 kuva 24. PDS häviöiden mittaukseen määritetyt ajopisteet (IEC_61800-9-2, 2023).	22
Kuva 4. Standardin IEC 61800-9-2 kuva F.1. Segmentit toiminta alueella (IEC_61800-9-2, 2023).	23
Kuva 5. Moottorin nimellisarvot (Excel-sivu: cL for motor).	37
Kuva 6. ccon, cvolt ja nFW (Excel-sivu: cL for motor).	37
Kuva 7. Standardin määrittämät kertoimet interpolointikertoimen laskentaan (Excel-sivu: cL for motor).	38
Kuva 8. Mitatut arvot (Excel-sivu: cl for motor).	39
Kuva 9. Häviöt laskettu suhteellisiksi (Excel-sivu: cL for motor).	39
Kuva 10. Lasketut interpolointikertoimet (Excel-sivu: cL for motor).	40
Kuva 11. Interpolointikertoimilla laskettuja häviöitä käyttäjän määrittelemissä pisteissä (Excel-sivu: cL for motor).....	40
Kuva 12. Optimoinnille tehty arvojen vertailu (Excel-sivu: cL for motor).	41
Kuva 13. Optimoidut interpolointi kertoimet (Excel-sivu: cL for motor).	42
Kuva 14. Moottorin ja TaMun nimellisarvot (Excel-sivu: cL for CDM).	42
Kuva 15. Moottorin IO, ccon ja nFW (Excel-sivu: cL for CDM).	43
Kuva 16. Mitatut taajuusmuuttaja häviöt (Excel-sivu: cL for CDM).	43

Kuva 17. TaMu-häviöt laskettu suhteellisiksi (Excel-sivu: cL for CDM).	44
Kuva 18. Käyttäjän määrittämille pisteille lasketut suhteelliset häviöt (Excel-sivu: cL for CDM).....	45
Kuva 19. Käyttäjän määrittämällä ylinopeuspisteille laskettu iop (Excel- sivu: cL for CDM).	46
Kuva 20. Määritettyjen iop pisteiden oikeaan segmenttiin sijoitus (Excel- sivu: cL for CDM).	46
Kuva 21. Häviöt laskettu ylinopeuspisteissä (Excel-sivu: cL for CDM).	47
Kuva 22. Moottorin ja TaMu:n nimellisarvot (Excel-sivu: PDS losses).	48
Kuva 23. Lasketut moottorihäviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).....	49
Kuva 24. TaMu-häviöiden laskenta alueiden määritystaulukko (Excel- sivu: PDS losses).	50
Kuva 25. Ylinopeusalueen kuormanlaskenta-alueen valinta (Excel-sivu: PDS losses).	50
Kuva 26. Lasketut CDM-häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).....	51
Kuva 27. Lasketut CDM-häviöt käyttäjän määrittämässä ylinopeus pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).	51
Kuva 28. PDS-häviöt laskettu käyttäjän määrittämässä pisteissä (Excelsivu: PDS losses).	52
Kuva 29. PDS-hyötysuhde käyttäjän määrittämässä pisteissä (Excel- sivu: PDS losses).	53
Kuva 30. Moottorin ja TaMun nimellisarvot (Excel-sivu: User page).	54
Kuva 31. Taulukko, johon sijoitetaan katalogin CDM-arvot (Excel-sivu: User page).....	55
Kuva 32. Käyttäjän haluamat ajopisteet (Excel-sivu: User page).	55

Kuva 33. Datavalitsijan ohjeistus (Excel-sivu: User page).	56
Kuva 34. Käyttäjän tarvitsemat tiedot raporttiin laskennasta (Excel-sivu: User page).	56
Kuva 35. Laskenta Excelin sisälllys.	57
Kuva 36. Excelin solver-sijainti (Ratkaisin).	57
Kuva 37. Solver-tiedot.	58
Kuva 38. EcoDesign-standardin määräämät 8 pistettä (ABB_EcoDesign, 2025).	59
Kuva 39. Testatut standardin määräämät 6 pistettä.	60
Kuva 40. EcoDesign-häviöt käyttäjä määritellyissä pisteissä (ABB_EcoDesign, 2025).	60
Kuva 41. PDS-häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä mitatuilla arvoilla.	61

LYHENTEET

ABB	Asea Brown Boveri
ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
BBC	Brown, Boveri & Cie
PDS	Sähkökäyttöjärjestelmä (Power Drive System)
CDM	Täydellinen käyttömoduuli (Complete drive module)
SDM	Alikäyttömoduuli (Sub drive module)
IEC	International Electrotechnical Commission
RTD	Vastuslämpömittari (Resistance Temperature Detector)
VSC	Jännitelähdemuunnin (Voltage source converter)

TaMu	Taajuusmuuttaja
RMS	Vaihtojännitteen tehollisarvo
EU	Euroopan Unioni
TWh	Tera watti tunti
IE / IES	Energiatehokkuus luokka (International Efficiency)

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tuodaan esille standardien IEC 61800-9-2 ja IEC 60034-2-3 vaatimuksia. Työhön kuuluu myös Excel-laskennan rakentaminen, sillä verifioidaan, onko koekentällä käytettävän testausohjelman rakennus onnistunut virheittä.

1.1 Työn tausta

Power Drive System (PDS) eli sähkökäyttöjärjestelmä koostuu moottorista ja sitä ohjaavasta taajuusmuuttajasta tai muusta ohjaimesta. Termi sekä siihen liittyvät standardit ja määritykset on luotu, jotta sähkökäytöstä saataisiin entistä tehokkaampia ja pystyttäisiin paremmin valitsemaan optimaaliset komponentit asiakaskohtaisiin käyttöihin, joka johtaa huomattaviin energiasäästöihin. (IEC_61800-9-2, 2023.)

PDS-käytöt ovat erittäin yleisiä, sillä taajuusmuuttajaohjatut käytöt taipuvat lähes mihin vain. Taajuusmuuttajaohjattuja järjestelmiä käytetään kaikkialla, esimerkiksi ajoneuvoissa, tehdasautomaatiossa, pumpuissa, kompressoreissa, sähköntuotannossa, sähköverkoissa ja ihan kodinkoneissa. (Manias, 2016.) Taajuusmuuttajakäytöissä on monia etuja kuten energiatehokkuus, portaaton nopeudensäätö, pehmeämmät startit (taajuusmuuttaja rajoittaa starttivirtoja) sekä automaatiojärjestelmiin integroiminen on helpompaa.

Nykyisin myynti käyttää PDS-järjestelmien mitoituksessa apuvälineenä ABB Drives-yksikön ylläpitämää ABB EcoDesing-laskuria. EcoDesing-laskuri on erittäin hyvä apuväline, mutta moottorin arvot ovat täysin laskennallisesti määritetty, mikä on standardien hyväksymä tapa. EcoDesing-laskuri on luotu (EU) 2019/1781 määräyksiensä myötä. EU-komission säädöksen (EU) 2019/1781 vaikutusarvion mukaan vuoteen

2030 mennessä säästettäisiin 10 TWh sähköenergiaa vuodessa. (EU_komissio, 2019)

ABB haluaa organisaationa olla etulinjassa kehittämässä sähköjärjestelmiä ekologisempaan suuntaan ja johtaa esimerkillä muita yrityksiä. Työn avulla mahdollistetaan koko ajan kehittyvien energiatehokkuusvaatimusten mukaisen testauksen edelläkäynti, josta muodostuu myyntivaltti muihin yrityksiin nähden. Työn myötä ABB valmistautuu esimerkiksi DOEn (Department of Energy) ja EU-komission kehittyviin energiatehokkuusvaatimuksiin.

1.2 Tutkimusongelma

Vuonna 2026 kaikkiin Pohjois-Amerikkaan taajuusmuuttajakäyttöön myytävälle moottoreille pitää toteuttaa PDS tai interpolointikertoimien määritystestit (Pantti, 2024). Tämän johdosta työ vaatii kipeästi ratkaisuja, sillä Pohjois-Amerikka on suuri markkina-alue, johon myydään nimenomaan taajuusmuuttajakäyttöön paljon moottoreita. Tämänhetkellisellä taajuusmuuttajaohjatun moottorin häviöiden määrityksellä on ongelmana joko se, että tulokset ovat täysin lasketut tai testauksessa määritetään vain nimellispisteen hyötysuhde. Molemmat tavat ovat hyväksyttäviä, mutta etenkin tuotekehityksen kannalta lasketut arvot eivät ole yhtä arvokkaita kuin mitatut. Lasketuilla arvoilla lähtökohtaisesti saadaan epätarkempia tuloksia, jotka voivat johtaa huonompiin lopputuloksiin.

1.3 Työn tavoite ja rakenne

Työssä on kaksi tavoitetta, 1) luoda koekentälle standardiselvitys, jonka pohjalta standardien mukainen testaus pystytään toteuttamaan ja 2) rakentaa standardinmukainen laskentaohjelma Exceliin. Ohjelmaa käytetään koekentällä käytettävän testausohjelman arvojen verifiointiin.

Exceliä käytetään testausohjelman päivitysten jälkeen varmistamaan, ettei testausohjelman laskentaan ole joutunut virheitä.

Lopputavoitteena on tuottaa myynnin avuksi ja tuotekehitykselle standardien vaatimusten mukaan toteutettuja mittauksia. Työn myötä myynnille mahdollistuu moottorin häviökertoimien määritysmittaukset ja PDS-testauksen myynti asiakkaille.

Työ koostuu kahdesta pääasiasta: standardien vaatimusten selvittäminen ja verifiointi laskentaohjelman rakennus. Opinnäytetyön rakenne on seuraava: 1) esitellään standardit, joita työssä käytetään, 2) käsitellään kaikki merkittävät vaatimukset, jotka standardi asettaa, 3) käydään läpi laskentaohjelman teko ja lopputulos sekä 4) käydään läpi, kuinka PDS-testausta voidaan lähteä kehittämään tulevaisuudessa.

1.4 opinnäytetyön toimeksiantaja

ABB on maailman teknologia-alan johtaja sähköistyksessä ja automaatiassa. ABB on vuonna 1988 syntynyt yritys, joka muodostui ruotsalaisen ASEAn ja sveitsiläisen BBC:n yhdistyessä. ABB työllistää noin 110 000 henkilöä ympäri maailman. ABB on jakautunut neljään divisioonan: Electrification, Motion, Process automation ja Robotics & Discrete Automation. (ABB_Global, 2024.)

1.4.1 ABB Suomessa

ABB työllistää Suomessa noin 5000 henkilöä ja toimii 20 paikkakunnalla. Tehdaskeskittymät ovat Vaasassa, Helsingissä, Porvoossa ja Haminaassa. ABB on Suomessa yksi suurimmista teollisuuden työnantajista. (ABB, 2024.)

1.4.2 ABB Oy, IEC LV Motors Vaasa

ABB Oy, IEC LV Motors on Vaasassa sijaitseva pienjännitemoottori tehdas, joka työllistää noin 600 ammattilaista. Vaasassa pienjännitemoottoreita on valmistettu jo vuodesta 1944. Vaasassa panostetaan suuresti korkean hyötysuhteen moottoreiden tuotekehitykseen ja tutkimukseen. Vaasassa valmistetaan asiakaskohtaisesti räätälöityjä pienjännitemoottoreita kaikkiin sovelluksiin. (ABB, 2024.)

Vaasassa on akkreditoitu koekenttä, jossa tehdään asiakkaille, tuotekehitykselle ja luokituslaitoksille erilaisia testejä, esimerkiksi tyyppitestejä, joilla määritetään moottorin IE luokitus. Koekenttä työllistää yli 20 kokenutta ja asiantuntevaa työntekijää.

2 STANDARDIT

Tässä luvussa käydään eniten työssä käytettäviä standardeja läpi. Vaikka työn pohjautuessa standardiin IEC 61800-9-2, moni asia on kuitenkin kerrottu selkeämmin eri standardeissa, jolloin saadaan yksiselitteisempi ja tarkempi tulkinta standardista.

2.1 IEC 61800-9-2

Standardi IEC 61800-9-2 eli PDS-standardi käsittelee säädettävän nopeuden sähkökäyttöjärjestelmiä. Tärkeässä roolissa on moottorijärjestelmien ekologinen suunnittelu ja energiatehokkuuksien määrittäminen ja luokittelu. Standardi on kehitetty mahdollistamaan SDM:ien (sub drive module), CDM:ien (complete drive module) ja PDS:ien tehohäviöiden arviointiin, jolla saavutetaan sähkökäytössä suuriakin energia säästöjä. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Standardi on alaosa IEC 61800-sarjaa, jossa on yhdeksän osaa. Tässä käsittelemäni osa on yhdeksän, joka on moottorijärjestelmien ekosuunnitteluun perehtyvä osa. Osan yhdeksän alaosa kaksi käsittelee ekologista suunnittelua ja moottorikäyttöjen hyötysuhteen määrittämistä ja luokittelua. Standardi koostuu kahdeksasta kappaleesta sekä kymmenestä liitteestä (Annex A-J). (IEC_61800-9-2, 2023.)

Luvussa 1 käydään läpi standardin laajuus. Luvussa 2 on normatiiviset viittaukset eli asiakirjat, jotka muodostavat osittain tai kokonaan tämän asiakirjan. Luku 3 käsittelee termistön, määritelmät ja symbolit, joita asiakirjassa käytetään. Luvussa 4 käydään läpi PDS hyötysuhde, joko referenssi CDM:llä tai moottorilla. Luvussa 5 käsitellään CDM, PDS ja moottorin häviöt laskennallisesti. Luvussa 6 on IE ja IES luokkien rajat. Luku 7 sisältää häviöiden määrittelyn. Luvussa 8 on esitetty käyttäjän dokumentaatioon liittyvät vaatimukset. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Liite A sisältää RCDM-häviöt ja esimerkin IES-luokan rajojen määrittämisestä. Liite B sisältää informaatiota eri elementtien vaikutuksesta häviöihin PDS kokonaisuudessa. Liite C sisältää CDM matemaattisen häviöiden mallinnuksen. Liite D sisältää muuntaja topologioita. Liite E käsittelee moottori häviöiden ja virtojen interpoloinnin. Liite F sisältää sovellesimerkin häviöiden laskennalle CDM:lle ja PDS:lle. Liite G käy läpi häviöiden epävarmuuden määrittämis menetelmän. Liite H sisältää CDM:n kalorimetrisen häviöiden mittaustavan. Liite I käy läpi PDS häviöiden laskun nimellisuopeuksien ja nimellismomenttien yläpuolella. Liite J käy läpi korjauskertoimet ja referenssihäviöt taulukossa kahdeksan. (IEC_61800-9-2, 2023.)

2.2 IEC 60034-2-3

Standardi IEC 60034-2-3 käsittelee testausmenetelmiä häviöiden ja hyötysuhteiden määrittämiseen, muuntajalla syötetyille AC-moottoreille. Asiakirjan tarkoituksena on määrittää testausmenetelmät kokonaishäviöiden määrittämiselle. Se sisältää ylimääräiset suurtaajuiset moottorihäviöt ja muuntajakäyttöisten moottorien hyötysuhteet. Asiakirja määrittelee seitsemän testauspistettä, joiden kautta interpoloimalla pystytään määrittämään häviöt kaikissa toimintapisteissä. (IEC_60034-2-3, 2024.)

Standardi koostuu seitsemästä luvusta ja neljästä liitteestä. Kappale 1 on standardin laajuuden käsittely. Luku 2 normatiiviset referenssit. Luku 3 käsittelee termistön ja määritelmät. Luku 4 sisältää symbolit ja lyhenneet. Luku 5 sisältää perusvaatimukset. Luku 6 käsittelee testaus menetelmät hyötysuhteen määrittämiseen muuntajasyötetyille moottorille. Luku 7 käsittelee moottori häviöiden interpoloinnin kaikissa toiminta pisteissä. (IEC_60034-2-3, 2024.)

Liitteessä A käsitellään AC moottorin häviöitä. Liite B sisältää esimerkin häviöiden ja hyötysuhteen määrittämisestä monessa eri pisteessä. Liite C käsittelee häviöiden interpolointia eri käämin kytkennöillä. Liitteessä

D on esitelty esimerkkejä lisä kuormituspisteistä numeeriselle interpolointimenettelylle. (IEC_60034-2-3, 2024.)

3 STANDARDIN VAATIMUKSET

Tässä luvussa käsitellään standardien asettamat vaatimukset niin laskennalle kuin mittausolosuhteille. Osa vaatimuksista on merkattu löytyväksi jostain muusta standardista, jonka vuoksi en ole sen tarkemmin niitä työssäni käsitellyt, välttääkseni ylimääräistä ja työhöni liittymätöntä tietoa.

3.1 Mittauksen vaatimukset häviöiden määrittämiseen

Mittausvaatimukset pitää määrittää PDS:lle ja pelkälle moottoritestille. Tarkoituksena on mahdollistaa PDS-testien teko, mutta aluksi valtaosa testauksista tulee olemaan moottorin interpolointikertoimien määrittämistä, jolloin käytämme IEC 60034-2-3 vaatimuksia.

3.1.1 Yleiset mittausvaatimukset

Mittauksen aikana tapahtuvien arvojen muutosten takia mittaus toteutetaan aritmeettisella keskiarvolla. PDS-testauksessa aikajakson olisi hyvä olla 1–3 min (IEC_61800-9-2, 2023) ja moottorin interpolointikertoimien määrittämisessä 5–60 s (IEC_60034-2-3, 2024), joten voidaan todeta, että 60 s mittaus on paras, koska se käy molemmille testeille.

Tehomittareiden toimittajan määritelmän epävarmuuden pitää olla 0,2 % $S_{r,eq}$:sta tai parempi taajuuksilla 50Hz/60Hz. Tarkkuuden pitää olla ilmoitettuna mittarin kokonaistarkkuutena mahdollisten mittausantureiden kanssa. Tehomittareiden kaistaleveyden tulee olla riittävä, jolloin saavutetaan näennäistehon arvo tai alle 0,3 % näennäistehon arvosta. On myös suositeltavaa syöttää virta ja jännitetieto suoraan tehoanalyysaattorille. Tehon sekä virran mittauksen enne ja jälkeen CDM:n täytyy olla standardin IEC 60034-2-1 mukainen. (IEC_61800-9-2, 2023)

Momentin mittauksessa laitteiston tulee olla vähintään luokkaa 0,2. Piezin momentti, joka mitataan, tulee olla vähintään 10 % momenttianturin nimellismomentista. Jos käytetään tarkemman luokituksen laitteistoa, voidaan sallittua momentti aluetta laajentaa vastaavasti, esimerkiksi luokan 0,1 anturilla voidaan mitata 5 % nimellisestä riittävällä tarkkuudella. Tarkempaa 0,1-luokan anturia tulisi myös käyttää, jos moottorin hyötysuhde on yli 92 % ja hyötysuhteen ollessa yli 95 % tulisi käyttää luokituksen 0,05 omaavaa anturia. Sallittuja momentinmittausjärjestelyitä ovat linjassa oleva anturi, joka on moottorin ja kuorman välissä tai reaktiomomenttimittari moottorin ja sen alustan välissä. Momenttianturin lämpötila on moottorin vuoksi lämpimämpi, kun ympäristö. Tämä aiheuttaa mittausvarmuuden heikentymistä, jonka vuoksi lämpötilan vaikutus pitää rajoittaa 0,15 % täydestä asteikosta. Jos ei ole käytännöllistä mahdollisuutta toteuttaa rajausta, on käytettävä lämpötilan korjausta. Mittauksessa tulee minimoida loiskuormat, esimerkiksi moottorin hyvällä linjauksella kuormituskoneiston suhteen sekä käyttämällä joustavaa kytkentää. Nopeuden mittauksen tarkkuuden tulee olla 0,1 kierrosta minuutissa. (IEC_60034-2-3, 2024.)

Lämpötilan mittaus tulee suorittaa laitteistolla, jonka tarkkuus on ± 1 K. Lämpötilan mittaukseen soveltuu mikä tahansa standardisoitu mittausmenetelmä, esimerkiksi termoparit tai RTD:t. Lämpötilan mittaus tulee sijoittaa moottorin pinnalle, suojaten mittauskohta moottorin jäähdytys ilmalta, tai jos on mahdollista, mitataan lämpötila suoraan vyyhdiltä. Kaikki lämpötilat testauksen ajalta tulee dokumentoida. (IEC_60034-2-3, 2024.)

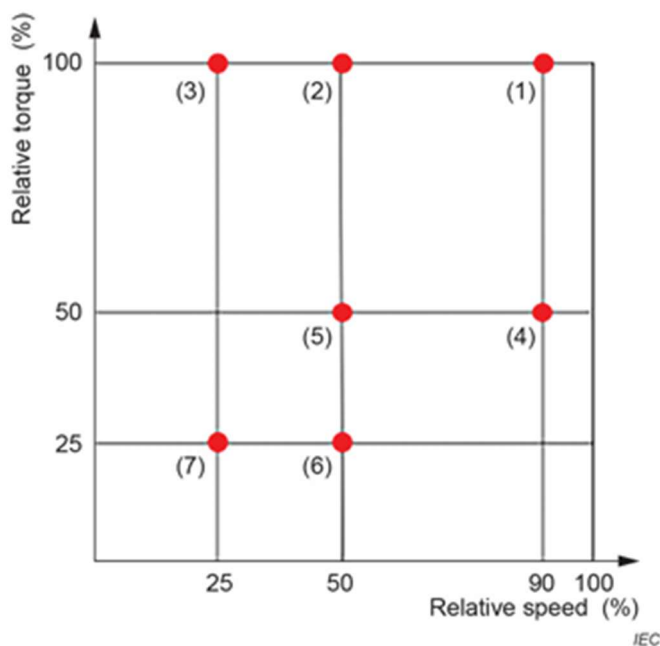
Testauksen aikana laitteisto tulee olla kasattu ja sillä pitää olla kaikki oleelliset komponentit paikallaan. Tällä saavutetaan yhtäläiset tai hyvin lähelle samanlaiset olosuhteet, kuin laitteiston käyttökohteessa. Laitteiston on toivottavaa olla satunnan varaisesti valittuja tuotanto sarjasta. Asiakastestauksissa satunnanvarainen testaus ei onnistu, sillä laitteiston pitää olla testauksessa sama kuin asiakkaalle lähtevä laitteisto on. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Testiä ajetaan määritetyllä kuormalla ja nopeudella, kunnes moottori saavuttaa lämpötasapainon (lämpötilan muutos 1 K tai vähemmän puolessa tunnissa). Taajuusmuuttajan lämpötila yleisesti tasaantuu huomattavasti nopeammin, minkä vuoksi PDS-testin aikana taajuusmuuttajan lämpötasapainoa ei tarvitse seurata. Vyyhdin resistanssin mittaus toteutetaan IEC 60034-2-1 mukaan. (IEC_61800-9-2, 2023.)

3.1.2 Mittausvaatimukset moottorin interpolointikertoimien määrittämiselle

Ohjeet pätevät laitteistoilla, joiden nimellisjännite on alle 1 kV. Yli 1 kV laitteistot tulee testata aina kokonaisuutena, mutta standardi ei ota kyseisiin laitteistoihin enempää kantaa. Testauksen aikana tulee käyttää (jos erikseen ei pyydetä) jännitteen ja virran arvoina kolmen vaiheen aritmeettista keskiarvoa. (IEC_60034-2-3, 2024.)

Moottorin interpolointikertoiminen määrittämisessä ajopisteitä on seitsemän, kuvan 1 mukaan. Referenssitajuusmuuttajan pitää olla ainakin kaksitasoinen VSC-muuttaja. KytKentätaajuuden ei tule ylittää 5 kHz, kun moottorin nopeus on 3600 rpm tai alle. Yli 3600 rpm moottoreille kytKentätaajuus ei saa ylittää 10 kHz. Moottori-kaapeloinnissa tulee huomioida riittävä kaapeli koko, jotta kaapeloinnissa ei syntyisi jännitteen alenemaa. Ympäristö lämpötila tulisi olla 15–40 °C välissä. (IEC_60034-2-3, 2024.)



Kuva 1. Standardin IEC 60034-2-3 kuva 3. Interpolointikertoimien määrittämiseen käytettävät ajopisteet (IEC_61800-9-2, 2023).

3.1.3 Mittausvaatimukset PDS:lle input- output metodilla

Testausolosuhteet on määritelty yhdenmukaistamaan eritahojen mitaustuloksia. Tämän myötä eri valmistajat eivät saisi etuja eri olosuhteista. Testin aikana ei saa käyttää mitään sellaisia asetuksia tai lisätarvikkeita, jotka eivät ole käytettävissä tai hyödyllisiä PDS:n normaalitoiminnalla kentällä. Lähtötilanteen taajuusmuuttajalla tulee olla "factory default" (tehdasasetukset). (IEC_61800-9-2, 2023.)

Joissain taajuusmuuttajissa on mahdollisuus tehdä ohjelmiston nollaus, joka on suositeltavaa tehdä aina ennen testauksen aloittamista. Ohjeistus koskee myös uusia, käyttämättömiä, muuttajia. Testauksen aikaista lämpötilaa ei ole rajattu, mutta suositeltava ympäristönlämpötila on 20 °C - 25 °C. Testausmoottorin lämpötilan tulisi olla 15 °C - 30 °C. Lämpötilan ollessa jotain muuta, tulee käyttää sopivaa lämpötilan korjausta moottorihäviöiden määrittämiseen standardien IEC 60034-1 ja 60034-2-

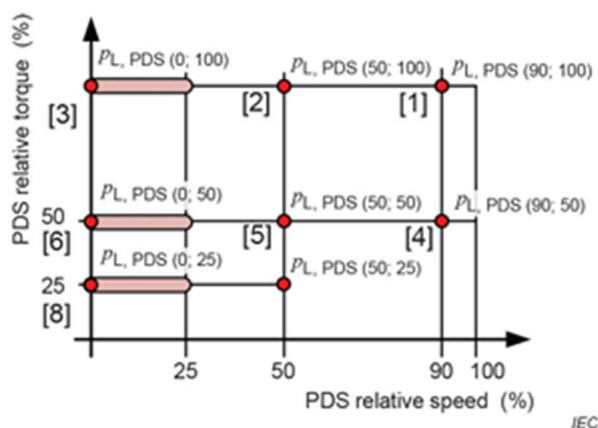
1 mukaan. Taajuusmuuttaja tulee olla varusteltu ja asennettu täyttämään IEC 61800-5-1 vaatimukset, sähköisen turvallisuuden takaamiseksi. Kaikki muutokset taajuusmuuttajan asetuksiin tulee dokumentoida. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Tehohäviöiden optimaalisen mittauksen varmistamiseen tulee seuraavien testiolosuhteiden täytyä: taajuusmuuttajan syöttöjännitteen ja taajuuden tulee olla määritetyllä alueella. Syöttöjännitteen huippukertoimen (crest factor) tulee olla 1,35 ja 1,44 välissä. Syöttöverkon oikosulkutehojen tulee täyttää standardi IEC 61000-3-12:2012. Taajuusmuuttajan syöttövirran ei tule olla alle kuvan 2 mukaisen taulukon arvojen. Alemmat virrat johtaisivat pienempiin häviöihin. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Torque current %	Test load current $\frac{I_{out}}{I_{r,out}}$ for the apparent power range $S_{r,eq}$ of				
	0,278 kVA (0,12 kW) to < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) to < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) to < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) to < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) to < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Kuva 2. Standardin IEC 61800-9-2 Taulukko 1. Pienimmät testikuormitusvirrat toimintapisteissä (IEC_61800-9-2, 2023).

Testauksessa on kuvan 3 mukaiset 8 pistettä. 0-nopeuden sijaan käytetään 25 % arvoa, jonka standardi sallii. Nopeutena käytetään 25 %, mikä mahdollistaa moottorin kertoimien määrityksen samoilla mittauksilla. (IEC_61800-9-2, 2023.)



Kuva 3. Standardin IEC 61800-9-2 kuva 24. PDS häviöiden mittaukseen määritetyt ajopisteet (IEC_61800-9-2, 2023).

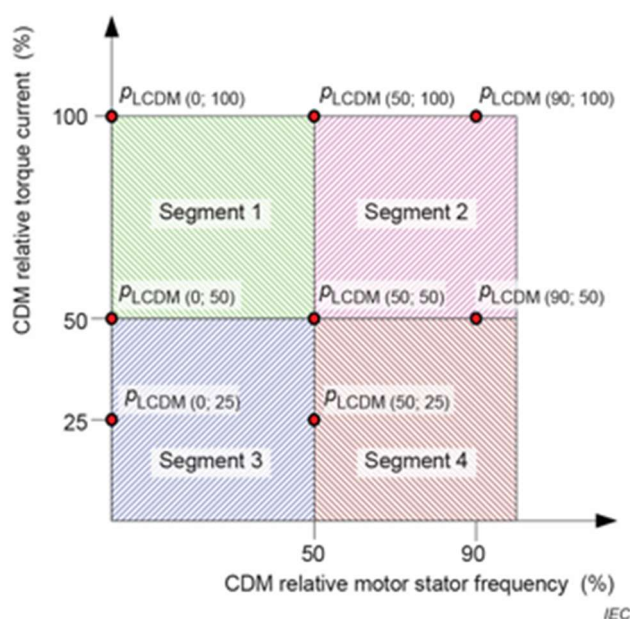
3.2 Laskennan vaatimukset

Laskentamalleja voidaan käyttää määrittämään CDM:n, PDS:n ja moottorin häviöitä ilman testausta. Ilman testausta viittaa enimmäkseen asiakaskohtaisten pisteiden häviöiden määritykseen. Moottorityypille ja taajuusmuuttajatyypille täytyy aluksi tehdä tyyppitestausta, josta saadaan laskennan käyttämät arvot. Laskennan avulla vältetään siltä, ettei kokonaisuuksille tarvitse ajaa satoja eri pisteitä ja jotta saadaan tarkka kuva häviöistä. Käsittelyssä olevat kaavat liittyvät käyttäjäkohtaisten pisteiden laskentaa, koska koekentällä tullaan tekemään input- output-metodilla testit PDS-vaatimusten mukaiselle 8 pisteelle.

3.2.1 CDM-häviöiden laskenta

Laskennalle on annettu kaksi erilaista laskentatyyliä: kaksiulotteinen lineaarinen inter- tai ekstrapolointi vierekkäisistä häviöpisteistä tai häviölaskenta matemaattisen mallinnuksen mukaan. (IEC_61800-9-2, 2023.) Työssä käydään läpi kaksiulotteinen tyyli ja sitä tullaan käyttämään laskennan rakentamisessa.

Kaksiulotteisessa laskennassa muuttajan toiminta-alue on jaettava neljään lohkokon kuvan 4 mukaan. Alue 1 sisältää moottorin staattoritaajuuden 0–50 % ja momenttivirta alueen 50–100 %. Alue 2 sisältää moottorin staattoritaajuuden 50–100 % ja momenttivirta alueen 50–100 %. Alue 3 sisältää moottorin staattoritaajuuden 0–50 % ja momenttivirta alueen 0–50 %. Alue 4 sisältää moottorin staattoritaajuuden 50–100 % ja momenttivirta alueen 0–50 %. (IEC_61800-9-2, 2023.)



Kuva 4. Standardin IEC 61800-9-2 kuva F.1. Segmentit toiminta alueella (IEC_61800-9-2, 2023).

Käyttäjän määrittämien pisteiden häviöt nimellisellä käyttöalueella voidaan laskea seuraavilla kaavoilla 1, 2, 3 ja 4. Kaavalla 1 voidaan laskea häviöt alueella 1 (f_z 0–50 ja i_{qz} 50–100). Kaavalla 2 lasketaan häviöt alueella 2 (f_z 50–100 ja i_{qz} 50–100). Kaavalla 3 lasketaan häviöt alueella 3 (f_z 0–50 ja i_{qz} 0–50). Kaavalla 4 lasketaan häviöt alueella 4 (f_z 50–100 ja i_{qz} 0–50). Kaavat ovat standardin IEC 61800-9-2 liitteessä F kaavat F.5, F.6, F.7 ja F.8. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Standardin IEC 61800-9-2 kaava F.5. Laskenta alueella 1.

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_z, iq_z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_z + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(0,100)} + \frac{p_{L,CDM(50,100)} - p_{L,CDM(0,100)}}{50} \cdot f_z \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left(p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_z \right)}{50} \right) \cdot (iq_z - 50)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Missä

$p_{L,CDM(0,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 0;50.

$p_{L,CDM(50,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;50.

$p_{L,CDM(0,100)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 0;100.

$p_{L,CDM(50,100)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;100.

f_z on käyttäjän määrittämä taajuus prosentteina.

iq_z on käyttäjän määrittämä kuormitus prosentteina.

Standardin IEC 61800-9-2 kaava F.6. Laskenta alueella 2.

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_z, iq_z) = & \\
 & p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_z - 50) + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(50,100)} + \frac{p_{L,CDM(90,100)} - p_{L,CDM(50,100)}}{40} \cdot (f_z - 50) \right)}{50} - \right. \\
 & \left. \frac{\left(p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_z - 50) \right)}{50} \right) \cdot (iq_z - 50)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Missä

$P_{L,CDM(50,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;50.

$P_{L,CDM(90,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 90;50.

$P_{L,CDM(90,100)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 90;100.

$P_{L,CDM(50,100)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;100.

f_z on käyttäjän määrittämä taajuus prosentteina.

iq_z on käyttäjän määrittämä kuormitus prosentteina.

Standardin IEC 61800-9-2 kaava F.7. Laskenta alueella 3.

$$P_{L,Z}(f_z, iq_z) = \left(\begin{array}{l} P_{L,CDM(0,25)} + \frac{P_{L,CDM(50,25)} - P_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_z + \\ \left(\frac{P_{L,CDM(0,50)} + \frac{P_{L,CDM(50,50)} - P_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_z}{25} \right) \\ \left(\frac{P_{L,CDM(0,25)} + \frac{P_{L,CDM(50,25)} - P_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_z}{25} \right) \end{array} \right) \cdot (iq_z - 25) \quad (3)$$

Missä

$P_{L,CDM(0,25)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 0;25.

$P_{L,CDM(50,25)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;25.

$P_{L,CDM(0,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 0;50.

$P_{L,CDM(50,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;50.

f_z on käyttäjän määrittämä taajuus prosentteina.

iq_z on käyttäjän määrittämä kuormitus prosentteina.

Standardin IEC 61800-9-2 kaava F.8. Laskenta alueella 4.

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_z, iq_z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_z + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_z - 50) \right)}{25} - \frac{\left(p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_z \right)}{25} \right) \cdot (iq_z - 25)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Missä

$p_{L,CDM(0,25)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 0;25.

$p_{L,CDM(50,25)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;25.

$p_{L,CDM(50,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 50;50.

$p_{L,CDM(90,50)}$ on CDM:n häviöt pisteessä 90;50.

f_z on käyttäjän määrittämä taajuus prosentteina.

iq_z on käyttäjän määrittämä kuormitus prosentteina.

Jännitekertoimella c_{volt} otetaan laskennassa huomioon taajuusmuuttajan jännitteen alenemat ja erot moottorin nimellisjännitteen ja muuttajalle syötetyn jännitteen välillä. Jännitekerroin c_{volt} voidaan laskea kaavan 5 mukaan. Kaava löytyy IEC 61800-9-2 liite E kaava E.2. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$c_{\text{volt}} = \frac{U_i}{U_N} \cdot 0,95 \quad (5)$$

Missä

U_i on todellinen syöttöjännite muuttajalle.

U_N on moottorin nimellinen jännite.

Kentänheikennysalueen alkamisen kohtaa tarvitaan laskuissa, joilla lasketaan häviöitä kentänheikennysalueella. Suhteellinen nopeus n_{FW} , jossa alkaa kentänheikennysalue, voidaan laskea kaavalla 6. Standardista 61800-9-2 liite E kaava E.3. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$n_{FW} = c_{\text{volt}} \cdot c_{\text{con}} \quad (6)$$

Missä

c_{volt} on kaavasta 5.

c_{con} on standardissa määritetty arvo, joka riippuu kytkennästä. Y tai D kytketyssä moottorissa 1. D kytketyssä Y moottorissa 1,73. YY kytketyssä Y moottorissa 2.

Moottorin virtojen interpolointia tarvitaan määrittämään taajuusmuuttajan häviöt kentänheikennysalueella, sillä muuttajan häviöt eivät ole kentänheikennyksellä enää suhteessa nopeuteen, koska muuttaja syöttää jo maksimi jännitettä ja vaihekulma pysyy vakiona. Tämän takia ainoa muuttuja on syöttövirran suuruus, joka voidaan laskea kaavalla 7, kun nopeus on 0...1. Muuttajan virtojen laskuun, kun nopeus on n_{FW} ...2 käytetään kaavaa 8. Standardista IEC 61800-9-2 liite E kaava E.6 ja E.7. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{con} \sqrt{\left[\left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right]}$$

(7)

Missä

I_N on moottorin nimellisvirta.

c_{con} on standardissa määritetty arvo, joka riippuu kytkennästä. Y tai D kytketyssä moottorissa 1. D kytketyssä Y moottorissa 1,73. YY kytketyssä Y moottorissa 2.

I_0 on moottorin tyhjäkäynti virta.

T on käyttäjän määrittämä momentti 0...2.

$$I(n, T) = I_N \cdot c_{con} \cdot \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2} + \left(1 - \frac{\left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2}{(n - (n_{FW} - 1))^2} \right) \cdot (T \cdot (n - (n_{FW} - 1)))^2 \right]}$$

(8)

Missä

I_N on moottorin nimellisvirta.

c_{con} on standardissa määritetty arvo, joka riippuu kytkennästä. Y tai D kytketyssä moottorissa 1. D kytketyssä Y moottorissa 1,73. YY kytketyssä Y moottorissa 2.

n on käyttäjän määrittämä nopeus n_{FW} ...2.

n_{FW} on kaavasta 6.

I_0 on moottorin tyhjäkäynti virta.

T on käyttäjän määrittämä momentti 0...2.

Kentänheikennysalueen häviöiden laskuun tarvitaan i_{op} , eli suhteellinen momenttivirta käyttöpisteessä, joka lasketaan kaavassa 9. Suhteellinen momenttivirta tarvitaan, jotta kuormituspiste osataan sijoittaa häviölas-kennan oikealle alueelle. Standardista IEC 61800-9-2 liite I kaava I.1. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$i_{op} = \frac{I_{out}(n_{op}, T_{op})}{I_{r,M}} \quad (9)$$

Missä

$I_{out}(n_{op}, T_{op})$ on kaavasta 8.

$I_{r,M}$ on moottorin nimellenvirta.

CDM:n häviöt kentänheikennysalueella lasketaan kaavalla 10. Nopeuden arvona käytetään aina 90, koska nopeuden ylittäessä kentänheikennysalueen rajan, ei nopeus enää ole vaikuttava tekijä häviöiden määrään taajuusmuuttajalla. Laskennassa käytetään kaavan 1 tai 2 antamaa tulosta. Kun kaavan 9 tulos on sijoitettu oikein jompaankumpaan kaavoista 1 tai 2, tulos kerrotaan taajuusmuuttajan näennäisteholla, jolloin saadaan tulos häviöiden määrä watteina. Standardi IEC61800-9-2 liite I kaava I.2 (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$P_{L,CDM}(n_{op}, T_{op}) = P_{L,CDM(90, i_{op})} \cdot S_{r,CDM} \quad (10)$$

Missä

$P_{L,CDM(90, i_{op})}$ on kaavasta 1 tai 2, kun kuormituskohtaan sijoitetaan kaavan 9 tulos.

$S_{r,CDM}$ on muuttajan näennäisteho.

3.2.2 Moottorin häviöiden laskenta

Moottorin häviöiden laskentaan tulee testata 7 ajopistettä. Pisteiden häviöistä lasketaan interpolointikertoimet, joilla voidaan laskea häviöt kaikissa pisteissä. Interpolointikertoimet lasketaan kaavojen 11, 12, 13, 14, 15, 16 ja 17 mukaan, jos ajopisteet on standardissa normalisoidut testauspisteet (kuva 1). Jos testaus suoritetaan ei-normalisoidulla menetelmällä, jolloin pisteet 1 ja 4 ajetaan $n=1$ normalisoidun $n=0,9$ sijaan tulee laskenta toteuttaa eri kaavoilla. Epänormalisoitua tapaa ei käydä työssä läpi, koska sen käyttäminen testauksien kannalta ei tuo mitään hyötyjä, vaan aiheuttaisi pelkästään testausohjelmaan lisää turhia muuttujia. (IEC_60034-2-3, 2024.)

Standardi 60034-2-3 kaavat 11–16.

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot P_{L1} + \frac{529}{780} \cdot P_{L2} - \frac{12}{65} \cdot P_{L3} + \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{103}{39} \cdot P_{L5} - \frac{56}{195} \cdot P_{L6} + \frac{192}{65} \cdot P_{L7} \quad (11)$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot P_{L1} - \frac{599}{390} \cdot P_{L2} + \frac{112}{195} \cdot P_{L3} - \frac{50}{13} \cdot P_{L4} + \frac{50}{13} \cdot P_{L5} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \quad (12)$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot P_{L1} + \frac{22}{13} \cdot P_{L2} - \frac{16}{39} \cdot P_{L3} + \frac{200}{39} \cdot P_{L4} - \frac{200}{39} \cdot P_{L5} - \frac{256}{39} \cdot P_{L6} + \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \quad (13)$$

$$c_{L4} = -\frac{50}{13} \cdot P_{L1} + \frac{2542}{195} \cdot P_{L2} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L3} + \frac{50}{13} \cdot P_{L4} - \frac{50}{13} \cdot P_{L5} - \frac{1792}{195} \cdot P_{L6} + \frac{1792}{195} \cdot P_{L7} \quad (14)$$

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot P_{L1} - \frac{152}{13} \cdot P_{L2} + \frac{256}{39} \cdot P_{L3} - \frac{200}{39} \cdot P_{L4} + \frac{200}{39} \cdot P_{L5} + \frac{256}{39} \cdot P_{L6} - \frac{256}{39} \cdot P_{L7} \quad (15)$$

$$c_{L6} = -2 \cdot P_{L2} + 10 \cdot P_{L5} - 8 \cdot P_{L6} \quad (16)$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot P_{L1} - \frac{181}{195} \cdot P_{L2} + \frac{192}{65} \cdot P_{L3} - \frac{25}{39} \cdot P_{L4} - \frac{287}{39} \cdot P_{L5} + \frac{1616}{195} \cdot P_{L6} - \frac{192}{65} \cdot P_{L7} \quad (17)$$

Joissa

P_{L1} on mitattu häviö P1 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L2} on mitattu häviö P2 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L3} on mitattu häviö P3 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L4} on mitattu häviö P4 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L5} on mitattu häviö P5 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L6} on mitattu häviö P6 suhteessa moottorin nimellistehoon.

P_{L7} on mitattu häviö P7 suhteessa moottorin nimellistehoon.

Häviöiden ollessa käyttäjän määrittämässä pisteessä alueella a, eli nopeuden ollessa $0 \dots n_{FW}$ lasketaan häviöt kaavalla 18. Nopeuden ollessa $n_{FW} \dots 2$ käytetään kaavaa 19. Standardi 61800-9-2 liite E kaavat E.4 ja E.5. (IEC_61800-9-2, 2023)

$$R_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \cdot n + c_{L3} \cdot n^2 + c_{L4} \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T + c_{L7} \cdot T^2 \quad (18)$$

Missä

c_{L1} on kaavasta 11.

c_{L2} on kaavasta 12.

c_{L3} on kaavasta 13.

c_{L4} on kaavasta 14.

c_{L5} on kaavasta 15.

c_{L6} on kaavasta 16.

c_{L7} on kaavasta 17.

n on käyttäjän määrittämä nopeus $0 \dots 1$.

T on käyttäjän määrittämä momentti $0 \dots 2$.

$$\begin{aligned}
P_L(n, T) = c_{L1} \cdot & \left(c_{WHf} \cdot \frac{1}{(n - (n_{FW} - 1))^2} - c_{WHf} \cdot T^2 + T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \right. \\
& \left. + (1 - c_{WHf}) \right) + c_{L2} \cdot \left(c_{BH} \cdot n + (1 - c_{BH}) \cdot \frac{n_{FW}}{(n - (n_{FW} - 1))} \right) + n_{FW}^2 \\
& \cdot c_{L3} + c_{L4} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n^2 \cdot T^2 \\
& + c_{L6} \cdot T \cdot (n - (n_{FW} - 1)) + c_{L7} \cdot T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2
\end{aligned} \tag{19}$$

Missä

- c_{L1} on kaavasta 11.
- c_{L2} on kaavasta 12.
- c_{L3} on kaavasta 13.
- c_{L4} on kaavasta 14.
- c_{L5} on kaavasta 15.
- c_{L6} on kaavasta 16.
- c_{L7} on kaavasta 17.
- n on käyttäjän määrittämä nopeus 0...1.
- T on käyttäjän määrittämä momentti 0...2.
- n_{FW} on kaavasta 6.
- c_{WHf} on standardissa määritetty 1, jos oikeaa arvoa ei tiedetä.
- c_{BH} on standardissa määritetty 0,5, jos oikeaa arvoa ei tiedetä.

Numeerisesti voidaan tarkentaa interpolointikertoimia vastaamaan tarkemmin testattuja tuloksia käyttämällä optimointisovellusta. Optimointiin tarvitaan arvo, jonka mukaan optimointi suorittaa parannuksia.

Tämä arvo on Q_{ISI} , joka lasketaan kaavalla 20. Q_{ISI} testattujen arvojen ja laskettujen arvojen keskinäinen ero. Standardi IEC 61800-9-2 liite E kaava E.9. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$Q_{SI} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n \left(\frac{P_{L,n}^{\text{determined}} - P_{L,n}^{\text{interpolated}}}{P_{L,n}^{\text{determined}}} \right)^2} \quad (20)$$

Missä

$P_{L,n}^{\text{determined}}$ on testatut häviöt.

$P_{L,n}^{\text{interpolated}}$ on lasketut häviöt.

Optimoinnilla tavoite on saada tarkemmat interpolointikertoimet, jolloin kertoimia käyttäessä tulokset olisivat todenmukaisempia. Saadaksesen hyvä interpolointitarkkuuden varsinkin kentänheikennysalueella, on suositeltavaa tehdä enemmän mittauksia kuin vain vaaditut seitsemän. Suositeltava määrä on 16–20, joista osa pisteistä olisi kentänheikennysalueella ja osa olisi ylikuorma-alueella. Ennen optimoinnin tekoa tulisi selkeät poikkeamat jättää optimoinnista pois, eli pisteet, joissa mitatun ja lasketun pisteen ero on merkittävän suuri. (IEC_61800-9-2, 2023.)

Optimoinnissa haetaan kertoimien $c_{L1} \dots c_{L7}$, c_{WHf} ja c_{BH} parhaita arvoja, joilla lasketut häviöt ovat mahdollisimman lähellä mitattuja arvoja. Hyvä ratkaisija standardin mukaan on Newton-Raphsonin menetelmä, joka on sisällytetty valmiiksi moniin kaupallisiin sovelluksiin esimerkiksi Exceliin. (IEC_61800-9-2, 2023.)

3.2.3 PDS-häviöiden laskenta

Moottorin ja CDM:n häviöiden laskennan jälkeen PDS:n häviöiden laskenta on vaivatonta. PDS:n häviöt lasketaan summaamalla moottorin ja taajuusmuuttajan häviöt kaavan 21 mukaan. Standardi IEC 61800-9-2 kaava 1. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$P_{L,PDS} = P_{L,M} + P_{L,CDM} \quad (21)$$

Missä

$P_{L,CDM}$ on CDM:n häviöt määritetyssä pisteessä.

$P_{L,M}$ on moottorin häviöt määritetyssä pisteessä.

Kentänheikennysalueella PDS:n suhteelliset häviöt lasketaan kaavan 22 mukaan. Kentänheikennysalueella tulee lisätä kerroin k_{VD} kuvaamaan moottorin kasvavia fundamentaalisia häviöitä. Arvoksi on annettu 1,11 10 % jännitehäviöiden mukaan. Standardi IEC 61800-9-2 liite I kaava I.3. (IEC_61800-9-2, 2023.)

$$P_{L,PDS}(n_{op},T_{op}) = \frac{P_{L,CDM}(n_{op},i_{op}) + k_{VD} \cdot P_{L,M}(n_{op},T_{op})}{P_{r,M}} \quad (22)$$

Missä

$P_{L,CDM}(n_{op},i_{op})$ on CDM:n suhteelliset häviöt määritetyssä pisteessä kentänheikennysalueella.

k_{VD} on standardissa määritetty 1,11.

$P_{L,M}(n_{op},T_{op})$ on moottorin suhteelliset häviöt määritetyssä pisteessä.

$P_{r,M}$ on moottorin nimellisteho.

3.3 Dokumentaation vaatimukset

Tässä luvussa käydään läpi uusia vaatimuksia, jotka syntyvät interpolointikertoimien määrittämisessä tai PDS-testauksessa, sillä ABB:llä on jo dokumentaatiopohja, joka on toteutettu standardien mukaan. Käsittelemme tässä luvussa sitä, mitä dokumentaatioon tulisi lisätä. Vaihtoehtoisesti voi tehdä oman liitteen, joka voidaan ottaa käyttöön kyseisten testien yhteydessä.

3.3.1 Interpolointikertoimien dokumentointi

Interpolointikertoimien määrittämisessä dokumentaatioon kuuluu taajuusmuuttajan tietoja ja moottorin häviöt. Taajuusmuuttajasta tulee dokumentoida ajon aikana ollut laitteisto eli taajuusmuuttajamalli, syöttöjännite, ohjelmistoversio, parametrisoinnit ja kytkentätaajuus - siis kaikki arvot, jotka voivat vaikuttaa lopputulokseen. Tarkalla taajuusmuuttajan dokumentaatiolla saavutetaan varmuus tuloksien olevan toteutettu vertailukelpoisella taajuusmuuttajalaitteistolla. (IEC_60034-30-2, 2016.)

Moottorin arvot, jotka tulevat näkyä dokumenteissa, ovat standardisoitujen seitsemän pisteen mitatut häviöt. Valinnaisesti voidaan ilmoittaa myös interpolointikertoimet. Jos moottorille on ajettu optimointia varten enemmän kuin seitsemän pistettä, voidaan nekin halutessa ilmoittaa. (IEC_60034-30-2, 2016.)

3.3.2 PDS-testauksen dokumentointi

PDS-dokumentaatioon tulee ilmoittaa normaalien IE-luokitustenvaatimusten lisäksi syöttöjännitteen RMS-arvo (vaihtojännitteen tehollisarvo), syöttötaajuus, kytkentätaajuus, DC-linkin jännite, moottorin pyörintänopeus ja taajuusmuuttajan syöttämän jännitteen RMS-arvo. Taajuusmuuttajan häviöt standardin määräämissä kahdeksassa pisteessä tulee myös ilmoittaa.

4 LASKENNAN TOTEUTUS

Laskentaohjelma toteutetaan Excelillä toimeksiantajan pyynnöstä. Excel on hyvä valinta, koska testausohjelmasta saadaan luotua Excel-tiedosto ja vaatimusten mukainen laskenta on riittävän yksinkertaista, jolloin toteutus Excelissä on vielä vaivatonta. Kaavojen toistamista on paljon, ja se on Excelillä vaivatonta.

4.1 Laskennan teko

Laskennan rakennus alkoi sovelluksen valinnalla, jonka oli määrätty olevan Excel. Seuraavaksi tutustuttiin standardeihin ja selvitettiin kaavat. Kaavasta 21 huomataan PDS-häviöiden olevan CDM:n ja moottorin häviöiden summa. Tämä on syy, jonka takia aloin rakentamaan moottorin laskentaa ensin. Siitä etenin taajuusmuuttaja laskentaan ja lopuksi PDS:n sekä käyttäjämääritettyjen pisteiden laskentaan.

Moottorilaskennasta aloittaminen oli muutenkin luontaista, sillä aluksi koekentällä testaukset painottuvat vain moottorihäviöiden mittaukseen standardin määräämissä seitsemässä pisteessä interpolointikertoimia varten. Kun laskenta oli rakennettu, lähdin tekemään käyttäjäisivua eli sivua, johon on kerätty kaikki oleellinen data. Tällöin sitä ei tarvitse etsiä eri sivuilta. Käyttäjäisivua rakentaessa huomasin, että laskentaa kannattaa automatisoida enemmän, sillä se helpottaa käytettävyyttä huomattavasti.

4.1.1 Moottorin häviöiden laskenta

Moottorin häviöiden laskennan rakennus alkoi määrittämällä tarvittavat nimellisarvot ja kertoimet laskennalle. Kuvassa 5 on moottorin nimellisarvot, jotka tarvitaan. Kuvassa 6 on moottorin kytkentätavan määrittämä kerroin C_{con} ja kertoimet C_{volt} ja n_{FW} , jotka on laskettu kaavoilla 5 ja

6. Kuvassa 7 on interpolointikertoimien laskentaan standardin antamat vakiokertoimet.

Motor nominal values	
UN	400,00 V
Pn	7,50 kW
nN	1460,00 rpm
TN	49,05 nm

Kuva 5. Moottorin nimellisarvot (Excel-sivu: cL for motor).

ccon	1,000000
------	----------

cvolt	0,967121
nFW	0,967121

Kuva 6. ccon, cvolt ja nFW (Excel-sivu: cL for motor).

	x PL1	x PL2	x PL3	x PL4	x PL5	x PL6	x PL7
(cL1)	-25	529	-12	25	-103	-56	192
	156	780	65	39	39	195	65
(cL2)	25	-599	112	-50	50	1792	-1792
	26	390	195	13	13	195	195
(cL3)	-50	22	-16	200	-200	-256	256
	39	13	39	39	39	39	39
(cL4)	-50	2542	-1792	50	-50	-1792	1792
	13	195	195	13	13	195	195
(cL5)	200	-152	256	-200	200	256	-256
	39	13	39	39	39	39	39
(cL6)		-2			10	-8	
(cL7)	25	-181	192	-25	-287	1616	-192
	39	195	65	39	39	195	65

Kuva 7. Standardin määrittämät kertoimet interpolointikertoimen laskentaan (Excel-sivu: cL for motor).

Nimellisarvojen ja kertoimien jälkeen toin mitatut häviöt työhön. Kuvassa 8 ovat mitatut häviöt standardin määrittämässä seitsemässä pisteessä sekä U_i , joka on testin aikana taajuusmuuttajalle syötetty jännite. Kuvassa 9 häviöt on laskettu suhteellisiksi, minkä jälkeen kuvassa

10 niistä on laskettu kaavojen 11, 12, 13, 14, 15, 16 ja 17 mukaan interpolointikertoimet.

From test results	
Input voltage at inverter	
U _i	407,21 V
Measured motor losses	
P1	0,794266 kW
P2	0,724327 kW
P3	0,657738 kW
P4	0,363519 kW
P5	0,308849 kW
P6	0,193991 kW
P7	0,154598 kW

Kuva 8. Mitatut arvot (Excel-sivu: cl for motor).

n/T %	Relative losses	
90/100	PL1	0,105902 %
50/100	PL2	0,096577 %
25/100	PL3	0,087698 %
90/50	PL4	0,048469 %
50/50	PL5	0,041180 %
50/25	PL6	0,025865 %
25/25	PL7	0,020613 %

Kuva 9. Häviöt laskettu suhteellisiksi (Excel-sivu: cL for motor).

Interpolation coefficients	
cL1	0,008110
cL2	0,024099
cL3	-0,005409
cL4	0,025493
cL5	-0,013362
cL6	0,011722
cL7	0,056642
cWHF	1,000000
cBH	0,500000

Kuva 10. Lasketut interpolointikertoimet (Excel-sivu: cL for motor).

Kuvassa 11 on laskettu interpolointikertoimella moottorin suhteelliset häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä kaavojen 18 ja 19 mukaan. Alueen a häviöt lasketaan kaavalla 18 ja alueen b häviöt kaavalla 19.

Userdefined points with measured coefficients			
	n	T	Relative losses
range a	0,250	0,250	0,020613
	0,400	0,400	0,031925
	0,500	0,600	0,049617
	0,700	0,800	0,075188
	1,000	1,000	0,107295
range b	1,250	0,500	0,060668
	1,500	0,500	0,073865
	1,250	0,250	0,035057
	1,250	0,750	0,100847

Kuva 11. Interpolointikertoimilla laskettuja häviöitä käyttäjän määrittelemässä pisteissä (Excel-sivu: cL for motor).

Standardissa annetaan mahdollisuus optimoida interpolointikertoimia. Optimointi parantaa oikein tehtynä erityisesti ylinopeus- ja ylikuormapisteiden tarkkuutta. Jos halutaan optimoida arvoja, tulisi mittauspisteitä olla seitsemän sijaan 16–20 ja osan pisteistä tulisi olla ylinopeus- ja ylikuormapisteitä. Kuvassa 12 on taulukko, jossa rivillä PL meas on mitatut häviöt ja PL calc rivillä on lasketut arvot. Näiden arvojen kautta kaavalla 20 voidaan laskea Qisi eli interpolointivirhe. Tämän jälkeen voidaan Excelin omaa ratkaisijaa käyttäen optimoida Qisi:n mukaan interpolointikertoimia. Kuvassa 13 on optimoidut interpolointikertoimet.

	n	T	PL M meas	PL clac	diff %	Interpo. Er.
(a) PL(n,T) a	0,250	0,251	0,020613	0,020409	0,989971	0,000098
	0,250	1,003	0,087698	0,089794	-2,389201	0,000571
	0,499	1,255	0,139120	0,137667	1,044398	0,000109
	0,499	1,002	0,096577	0,095527	1,086670	0,000118
	0,499	0,502	0,041180	0,040157	2,482897	0,000616
	0,500	0,250	0,025865	0,026522	-2,536937	0,000644
	0,898	1,005	0,105902	0,106867	-0,911124	0,000083
	0,899	0,501	0,048469	0,048175	0,605895	0,000037
	0,998	1,255	0,158448	0,155061	2,137689	0,000457
	0,998	1,003	0,108044	0,109621	-1,458723	0,000213
	0,999	0,502	0,049628	0,049925	-0,599461	0,000036
(b) PL(n,T) b	1,248	1,003	0,160409	0,155545	3,032235	0,000919
	1,248	0,803	0,106981	0,107977	-0,931276	0,000087
	1,248	0,405	0,045537	0,044702	1,833657	0,000336
	1,497	0,835	0,171062	0,173005	-1,135959	0,000129
	1,497	0,329	0,045651	0,045532	0,260370	0,000007
	1,497	0,659	0,110262	0,116080	-5,276848	0,002785
	1,996	0,625	0,236850	0,216557	8,567796	0,007341
	1,996	0,502	0,140177	0,148645	-6,040459	0,003649
	1,996	0,251	0,056812	0,056216	1,048781	0,000110
					QISI	0,030285

Kuva 12. Optimoinnille tehty arvojen vertailu (Excel-sivu: cL for motor).

For optimisation	
Optimised	
cL1	0,008704
cL2	0,032728
cL3	-0,010747
cL4	-0,013558
cL5	0,016681
cL6	-0,002208
cL7	0,077624
cWHF	2,610246
cBH	0,585644

Kuva 13. Optimoidut interpolointi kertoimet (Excel-sivu: cL for motor).

4.1.2 CDM-häviöiden laskenta

Taajuusmuuttajan laskennan rakennus alkoi tutkimalla tarvittavia kaavoja ja selvittämällä mitä arvoja laskenta vaatii. Kuvassa 14 on moottorin ja taajuusmuuttajan nimellisarvot. Kuvassa 15 on c_{con} ja n_{FW} , jota on haettu moottori laskenta sivulta. Kuvassa 15 on myös moottorin tyhjäkäyntivirta, joka voidaan testien aikana mitata tai voidaan käyttää myös katalogista saatua tyhjäkäyntivirtaa.

Nominal values	
Motor	
Power	7,5 kW
Voltage	400 V
Current	15,5 A
Frequency converter	
S _{r, equ}	9,95 kVA
Current	15 A

Kuva 14. Moottorin ja TaMun nimellisarvot (Excel-sivu: cL for CDM).

Needed for over speed losses	
Motor no-load current (measured or catalogue value)	
I0	3,5
From user page	
ccon	1
nFW	0,967121048

Kuva 15. Moottorin I0, ccon ja nFW (Excel-sivu: cL for CDM).

Nimellisarvojen jälkeen hain mitatut taajuusmuuttajan häviöt, jotka ovat kuvassa 16. Kuvassa 17 häviöistä on laskettu suhteellisiksi. Jos laskennassa halutaan käyttää katalogiarvoja, taajuusmuuttajalle jää suhteelliseksi muuttaminen pois, koska ABB ilmoittaa suurimmalle osalle taajuusmuuttajistaan suoraan suhteelliset häviöt.

Measured losses	
PL,cdm (0;25)	0,281407 kW
PL,cdm (0;50)	0,310553 kW
PL,cdm (0;100)	0,40402 kW
PL,cdm (50;25)	0,287437 kW
PL,cdm (50;50)	0,329648 kW
PL,cdm (50;100)	0,466332 kW
PL,cdm (90;50)	0,362814 kW
PL,cdm (90;100)	0,586935 kW

Kuva 16. Mitatut taajuusmuuttaja häviöt (Excel-sivu: cL for CDM).

Relative losses	
PL,cdm (0;25)	2,83 %
PL,cdm (0;50)	3,12 %
PL,cdm (0;100)	4,06 %
PL,cdm (50;25)	2,89 %
PL,cdm (50;50)	3,31 %
PL,cdm (50;100)	4,69 %
PL,cdm (90;50)	3,65 %
PL,cdm (90;100)	5,90 %

Kuva 17. TaMu-häviöt laskettu suhteellisiksi (Excel-sivu: cL for CDM).

Häviöiden suhteelliseksi muunnon jälkeen voidaan laskea suhteelliset häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä kaavojen 1, 2, 3 ja 4 mukaan. Kuvassa 18 on laskettu suhteelliset häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä. Alueen 1 laskut lasketaan kaavalla 1, alueen 2 kaavalla 2, alueen 3 kaavalla 3 ja alueen 4 kaavalla 4. Kuvassa 18 jokaisella alueella on 5 kohtaa, mikä mahdollistaa viiden käyttäjä määritetyn pisteen laskennan kerralla. Jos rivillä fZ tai iqZ on 0, on käyttäjän määrittämä piste eri alueella.

User defined points (from user page)			Realtive losses at user defined points	
Segment	fZ (n)	iqZ (T)	Segment	%
1	25	0	1	2,06055
	40	0		1,98783
	0	60		3,30901
	0	80		3,68476
	0	100		4,06050
2	0	0	2	2,62115
	0	0		2,62115
	50	60		3,58779
	70	80		4,56756
	100	100		6,20186
3	25	25	3	2,85851
	40	40		3,11548
	0	0		2,53529
	0	0		2,53529
	0	0		2,53529
4	0	25	4	2,82821
	0	40		3,71758
	50	0		1,02018
	70	0		0,88988
	100	0		0,69443

Kuva 18. Käyttäjän määrittämille pisteille lasketut suhteelliset häviöt (Excel-sivu: cL for CDM).

Ylinopeusalueella laskentaa muuttuu, koska nopeus ei ole enää vaikuttava tekijä taajuusmuuttajan häviöihin. Ylinopeusalueella tulee interpoloida moottorivirtoja kaavojen 7 ja 8 mukaan. Kaavaa 7 ei käytetä, koska moottorivirtoja ei tarvitse interpoloida nimellinopeusalueella. Kuvassa 19 on laskettu moottorivirrat käyttäjän määrittämässä ylinopeuspisteissä, joilla on voitu laskea iop. Virrat lasketaan kaavalla 8 ja virroista lasketaan iop kaavalla 9.

Determination of iop (for over speed calculation)				
	n	T	Current A	iop b)
Range b)	1,25	0,5	10,1122	0,6524
	1,5	0,5	11,8972	0,7676
	1,25	0,25	5,5809	0,3601
	1,25	0,75	14,8585	0,9586

Kuva 19. Käyttäjän määrittämällä ylinopeuspisteille laskettu iop (Excel-sivu: cL for CDM).

Kun iop on laskettu, tulee arvot kuvassa 20 olevaan taulukkoon. Kuvassa 20 olevassa taulukossa ovat kertoimet, joilla lasketaan suhteelliset häviöt ylinopeuspisteessä. Taulukko on rakennettu antamaan iop-sarakkeeseen 0 kyseisellä alueella, jos piste on laskenta-alueen rajan ulkopuolella.

Determination of fZ and iqZ for loss calculation		
Segment	fZ (n)	iop (iqZ)
2	90	65,24
Check iop that it fits	90	76,76
in T range (iop > 50)	90	0,00
	90	95,86
4	90	0,00
Check iop that it fits	90	0,00
in T range (iop < 50)	90	36,01
	90	0,00

Kuva 20. Määritettyjen iop pisteiden oikeaan segmenttiin sijoitus (Excel-sivu: cL for CDM).

Kuvan 20 kertoimilla lasketaan kaavalla 2 tai 4 riippuen alueesta suhteelliset häviöt. Kuvassa 21 on laskettu suhteelliset häviöt ja häviötehot. Alueella 2 käytetään kaavaa 2 ja alueella 4 kaavaa 4.

Over speed loss calculation		
Segments	Relative loss	losses (kW)
2	4,3329	0,4311
	4,8517	0,4827
	1,3939	0,0000
	5,7124	0,5684
4	0,7596	0,0000
	0,7596	0,0000
	3,8960	0,3877
	0,7596	0,0000

Kuva 21. Häviöt laskettu ylinopeuspisteissä (Excel-sivu: cL for CDM).

Laskentasisivulla on myös toinen vastaava laskenta rakennettu katalogi arvojen laskentaa varten. Tätä en työssä esitellyt, koska se on täysin samanlainen laskentarakenne, joka käytiin läpi edellä, häviöiden suhteelliseksi muuttamista lukuun ottamatta. ABB:n tuotesivuilta saa nimittäin taajuusmuuttajalle suoraan suhteelliset häviöt.

4.1.3 PDS-häviöiden laskenta

PDS-häviöiden laskenta alkoi nimellisarvojen merkkäamisella. PDS-häviö laskentasisivulla ei tarvittaisi kuin moottorin nimellisteho ja taajuusmuuttajan näennäisteho, mutta kuten kuvasta 22 huomaa on sivulla ylimääräisiä arvoja. Tämä johtuu siitä, että laatikko on suora viittaus käyttäjäsivun nimellisarvotaulukosta.

Nominal values	
----------------	--

Motor	
PN	7,5 kW
nN	1460 rpm
UN	400 V
TN	49,05 nm
IN	15,5 A

CDM	
Sr, equ	9,95 kVA
I	15

Kuva 22. Moottorin ja TaMu:n nimellisarvot (Excel-sivu: PDS losses).

Välisivulle on tuotu omat laatikot kaikille häviöille, jotta vian selvitys on helpompaa, mikäli Exceliin tarvitsee tehdä joskus muutoksia. Kuvassa 23 on moottorin häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä. Kuvassa 24 on taajuusmuuttajahäviöiden laskenta-alueen valitsin. Kuvassa 25 on taajuusmuuttajan laskenta-alueen määrittäminen ylinopeuspisteissä. Kuvassa

26 ja 27 on laskettu häviöt käyttäjän määrittämissä pisteissä. Kuvassa 27 on pisteet ylinopeusalueella.

Motor losses without optimising	
range a)	0,154598 kW
	0,239436 kW
	0,372131 kW
	0,563907 kW
	0,804711 kW
range b)	0,455012 kW
	0,553986 kW
	0,262930 kW
	0,756352 kW

Kuva 23. Lasketut moottorihäviöt käyttäjän määrittämissä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).

Segment 1	n	T
n = 0 - 0,5	0,25	0
T = 0,5 - 1	0,4	0
	0	0,6
	0	0,8
	0	1
Segment 2	n	T
n = 0,5 - 1	0	0
T = 0,5 - 1	0	0
	0,5	0,6
	0,7	0,8
	1	1
Segment 3	n	T
n = 0 - 0,5	0,25	0,25
T = 0 - 0,5	0,4	0,4
	0	0
	0	0
	0	0
Segment 4	n	T
n = 0,5 - 1	0	0,25
T = 0 - 0,5	0	0,4
	0,5	0
	0,7	0
	1	0

Kuva 24. TaMu-häviöiden laskenta alueiden määrittystaulukko (Excel-sivu: PDS losses).

Fieldweakening	n	iop
Segment 2	1,25	0,65
iop > 0,50	1,5	0,77
	1,25	0,36
	1,25	0,96
Segment 4	1,25	0,65
iop < 0,50	1,5	0,77
	1,25	0,36
	1,25	0,96

Kuva 25. Ylinopeusalueen kuormanlaskenta-alueen valinta (Excel-sivu: PDS losses).

Coverter losses catalog cdm values	
Segment 1	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
Segment 2	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,1095 kW
	0,1403 kW
	0,1866 kW
Segment 3	0,0746 kW
	0,0896 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
Segment 4	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,0000 kW

Kuva 26. Lasketut CDM-häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).

Fieldweakening	
Segment 2	0,4311 kW
	0,4827 kW
	0,0000 kW
	0,5684 kW
Segment 4	0,0000 kW
	0,0000 kW
	0,3877 kW
	0,0000 kW

Kuva 27. Lasketut CDM-häviöt käyttäjän määrittämässä ylinopeus pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).

Kun taajuusmuuttajan ja moottorin häviöt on laskettu, voidaan laskea PDS-häviöt kaavoilla 21 ja 22. Kaavalla 22 lasketaan häviöt ylinopeus alueella, silloin käytetään aina nopeuden arvolla 90 % kaavassa 22 on kerroin k_{VD} , joka kuvaa moottorilla kasvavia fundamentaalisia häviöitä. Kuvassa 28 on laskettu PDS-häviöt käyttäjän määrittämissä pisteissä. Kuvassa 29 on laskettu PDS-hyötysuhde samoissa pisteissä.

PDS losses	
With catalogue CDM values	
Motor losses without optimising	
	0,2292 kW
	0,3290 kW
	0,4816 kW
	0,7042 kW
	0,9913 kW
Fieldweakening	
	0,9362 kW
	1,0977 kW
	0,6795 kW
	1,4079 kW

Kuva 28. PDS-häviöt laskettu käyttäjän määrittämissä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).

PDS efficiency	
With catalogue CDM values	
Motor losses without optimising	
	68,136 %
	79,141 %
	82,986 %
	86,094 %
	88,723 %
Fieldweakening	
	88,107 %
	89,049 %
	83,661 %
	87,890 %

Kuva 29. PDS-hyötysuhde käyttäjän määrittämissä pisteissä (Excel-sivu: PDS losses).

Laskentatyökalun helppokäyttöisyyden takia rakensin paljon "automaatiota". PDS-häviösivulla on käytetty todella paljon jos-tai-ja ehtoja, jolloin taajuusmuuttajan häviölaskenta on pystytty toteuttamaan ilman, että käyttäjä joutuu siirtelemään arvoja. Käyttäjän määrittelemät kuormituspisteet tuodaan taajuusmuuttajanlaskennalle ehtojen kautta, jolloin laskenta huomaa itse, ettei kyseistä pistettä lasketa täällä alueella, se taas helpottaa laskennan loppuun tekoa.

PDS-laskenta sivulla on laskettu neljät eritulokset eri arvoilla. Niitä en esitellyt, koska kaikki laskenta on rakennettu samalla lailla kuin edellä esitetty laskenta. Vain lähtöarvot eroavat toisistaan.

4.2 Käyttäjäsivu

Käyttäjäsivun rakentamisen alussa oli tärkeää tietää, mitä tietoja soveluksen käyttäjä hakee ja tarvitsee ohjelmasta. Kun tiedetään, mitä tar-

vitaan, on helppo rajata kaikki ylimääräinen pois sivulta. Tämä johti sivun todella selkeään ulkonäköön. Kuvassa 30 on moottorin ja taajuusmuuttajan oleellisille nimellisarvoille merkintäpaikat. Kuvassa 31 on paikka taajuusmuuttajan katalogiarvoille, jos niitä halutaan käyttää. Kuvassa 32 on paikat käyttäjän määrittämille kuormituspisteille. Näistä taulukoista välittyy tieto kaikille välilehdille. Tällä vältytään kirjoitusvirheiltä sekä turhalta työltä.

Nominal values

Motor	
PN	7,5 kW
nN	1460 rpm
UN	400 V
TN	49,05 nm
IN	15,5 A
IO	3,5 A

CDM	
Sr, equ	9,95 kVA
I	15 A

ccon	1
------	---

Check from standard:

IEC 61800-9-2:2023, Annex E, E.3

Kuva 30. Moottorin ja TaMun nimellisarvot (Excel-sivu: User page).

Relative losses from catalogue for CDM				
PL,cdm (0;25)	0 / 25 %	73 W	0,70 %	87,80 %
PL,cdm (0;50)	0 / 50 %	88 W	0,90 %	92,00 %
PL,cdm (0;100)	0 / 100 %	135 W	1,40 %	93,70 %
PL,cdm (50;25)	50 / 25 %	76 W	0,80 %	93,50 %
PL,cdm (50;50)	50 / 50 %	96 W	1,00 %	95,70 %
PL,cdm (50;100)	50 / 100 %	153 W	1,50 %	96,50 %
PL,cdm (90;50)	90 / 50 %	106 W	1,10 %	97,30 %
PL,cdm (90;100)	90 / 100 %	178 W	1,80 %	97,70 %

Kuva 31. Taulukko, johon sijoitetaan katalogin CDM-arvot (Excel-sivu: User page).

User defined load points		
	n	T
Range A)	0,25	0,25
n = 0 - 1	0,4	0,4
T = 0 - 2	0,5	0,6
	0,7	0,8
	1	1
Range B)	1,25	0,5
n = 1 - 2	1,5	0,5
T = 0 - 2	1,25	0,25
	1,25	0,75

Kuva 32. Käyttäjän haluamat ajopisteet (Excel-sivu: User page).

Rakensin myös valitsijan, jonka avulla saadaan käyttäjäsivulle näky-
mään vain halutut arvot. Kuvassa 33 on valitsijaruutu sekä ohjeistus

siitä, millä numerolla saa mitäkin arvoja. Kuvassa 34 on loppunäkymä käyttäjän saamista arvoista.

1	PDS losses with catalogue CDM values and original motor interpolation coefficients
2	PDS losses with catalogue CDM values and optimised motor interpolation coefficients
3	PDS losses with measured CDM values and original motor interpolation coefficients
4	PDS losses with measured CDM values and optimised motor interpolation coefficients

3

Kuva 33. Datavalitsijan ohjeistus (Excel-sivu: User page).

3

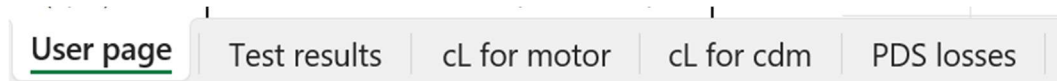
Interpolation coefficients		PDS losses		PDS efficiency	
cL1	0,00811	With measured CDM values		With measured CDM values	
cL2	0,02410	Motor losses without opimising		Motor losses without opimising	
cL3	-0,00541		0,4390 kW		94,15 %
cL4	0,02549		0,5494 kW		92,67 %
cL5	-0,01336		0,7291 kW		90,28 %
cL6	0,01172		1,0184 kW		86,42 %
cL7	0,05664		1,4218 kW		81,04 %
cWHF	1,00000	Fieldweakening		Fieldweakening	
cBH	0,50000		0,6391 kW		91,48 %
			0,7238 kW		90,35 %
			0,3137 kW		95,82 %
			0,8973 kW		88,04 %

Kuva 34. Käyttäjän tarvitsemat tiedot raporttiin laskennasta (Excel-sivu: User page).

4.3 Laskennan käyttäminen

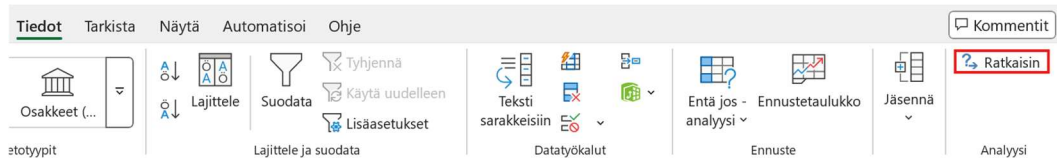
Laskenta on hyvin helppokäyttöinen, mikä oli tärkeä ominaisuus ohjelmalle. Kuvassa 35 on esitelty ohjelman välilehdet. Ensimmäiseksi käyttäjän tulee kopioida testausohjelmasta Excel-taulukko, jonka käy kopioidessa Test results-sivulle. Testaustulosten siirron jälkeen käyttäjä voi siirtyä User page-sivulle. Käyttäjän avatessa User page, tulee eteen ku-

vien 30, 31 ja 32 taulukot, jotka hän täyttää haluamallaan arvoilla. Tämän jälkeen hän valitsee tulosvalitsijalla, minkä skenaarion laskennan hän haluaa.



Kuva 35. Laskenta Excelin sisälllys.

Käyttäjän halutessa optimoidut interpolointikertoimet on ainut tilanne, jossa käyttäjä joutuu avaamaan laskentavälilehden. Ensin tulee testausohjelman tulokset siirtää Test results-sivulle ja User page-sivulla laittaa nimellisarvot kuntoon, minkä jälkeen voi siirtyä cL for motor-sivulle. Sivulla avatessa tulee kopioida kuvan 10 taulukon arvot ja sijoittaa kuvan 13 taulukon arvojen päälle. Tämän jälkeen avataan kuvan 36 mukaan yläpalkista Data (Tiedot) ja oikeassa reunassa on solver (ratkaisin), joka avataan.



Kuva 36. Excelin solver-sijainti (Ratkaisin).

Ratkaisijasivun auetessa pitäisi olla kuvan 37 mukaiset tiedot jo valmiiksi, mutta tarkistus on suositeltavaa. Tietojen tarkastuksen jälkeen painetaan ratkaise ja hyväksytään ratkaisijan ratkaisu. Tämän jälkeen kuvan 13 taulukossa on optimoidut arvot, ja voi käyttäjä palata User page-sivulle ja käyttää sitä normaalisti. Helppo tapa varmistua ratkaisijan laskeneen arvot, on katsoa arvoja cBH ja cWHF. Jos ne eivät ole 1 ja 0,5, on laskenta tapahtunut.

Ratkaisimen parametrit

Aseta tavoite:

Kohde: Suurin Pienin Arvo:

Muuttamalla muuttujasoluja:

Reunaehdot:

Tee ei-negatiivisia muuttujista, joilla ei ole reunaehtoja

Valitse ratkaisumenetelmä:

Ratkaisumenetelmä

Valitse GRG Nonlinear -moduuli sileiden, ei-lineaaristen Ratkaisin-ongelmien ratkaisemiseen. Valitse LP Simplex -moduuli lineaaristen Ratkaisin-ongelmien ratkaisemiseen. Valitse Evolutionary-moduuli muiden kuin sileiden Ratkaisin-ongelmien ratkaisemiseen.

Kuva 37. Solver-tiedot.

4.4 Laskennan vertaaminen ABB EcoDesing-laskuriin

Laskennan rakentamisen jälkeen voidaan vertailla ABB EcoDesing-laskuria vasten ja katsoa, paljonko moottorihäviöt eroavat toisistaan. Huomioitavaa vertailussa on se, ettei moottori ole täysin sama (EcoDesing-moottori valinnasta ei löytynyt juuri vastaavaa). Taajuusmuuttajasta ei ole tiedossa, esimerkiksi millä sovellusversiolla katalogiarvot on testattu. Moottori on nimellisarvojen ja IE-luokituksen mukaan valittu osuun lähimmäs testattua yksilöä.

ABB EcoDesign on ABB Drives-yksikön ylläpitämä verkkosivu, jolla pystytään matemaattisesti mallintamaan PDS-järjestelmää. CDM-laskenta on toteutettu IEC 61800-9-2:2023 mukaan. Moottorin arvot on laskettu EU:n Ecodesign-asetuksen 2019/1781 mukaan. Moottorin käyttäjämääritetyt pisteet on laskettu IEC60034-2-3 versio 1.0 mukaan. PDS-laskenta on toteutettu IEC61800-9-2:2023 mukaan. (ABB_EcoDesign, 2025.)

Moottori Ecodesign-sovelluksessa oli M3BP 132SMG 4, joka on IE3 luokan moottori ja testissä käytettiin moottoria M3BP 132SME 4, joka on myös IE3 luokiteltu. Taajuusmuuttaja Ecodesign-sovelluksessa ACS880-01-034A-5 ja testissä käytetty oli ACS880-01-034-5. (Pantti, 2024.)

Ensin verrataan kahdeksaa ajopistettä, joista lasketaan häviöt. Kuvassa 38 on kuva EcoDesignin laskemista arvoista standardin määräämissä kahdeksassa pisteessä. Kuvassa 39 on esitetty mitatut pisteet. Mitatuissa pisteissä, pistettä n 25 / T 50 ei ole mitattu. Pistettä ei ole testattu, joten joudutaan käyttämään valistunutta arvausta.

Standard and pre-defined points

POINT	SPEED	TORQUE	CDM LOSSES	MOTOR LOSSES	PDS ABSOLUTE LOSSES	PDS RELATIVE LOSSES	PDS EFFICIENCY
*1	0 %	25 %	128 W	191.4 W	319 W	4.3 %	58.5 %
*2	0 %	50 %	133 W	318.6 W	452 W	6.0 %	66.6 %
*3	0 %	100 %	156 W	827.9 W	984 W	13.1 %	64.6 %
4	50 %	25 %	127 W	227.1 W	354 W	4.7 %	72.6 %
5	50 %	50 %	134 W	330.9 W	465 W	6.2 %	80.1 %
6	50 %	100 %	161 W	746.4 W	907 W	12.1 %	80.5 %
7	90 %	50 %	135 W	421.4 W	556 W	7.4 %	85.8 %
8	90 %	100 %	168 W	825.8 W	993 W	13.2 %	87.2 %

Kuva 38. EcoDesign-standardin määräämät 8 pistettä (ABB_EcoDesign, 2025).

n	T	PCL, W	PML, W
0,25	0,25	81,97	154,60
0,25	0,50	95,00	290,00
0,25	1,00	140,38	657,74
0,50	0,25	83,29	193,99
0,50	0,50	99,83	308,85
0,50	1,00	159,15	724,33
0,90	0,50	115,03	363,52
0,90	1,00	179,70	794,27

Kuva 39. Testatut standardin määrämät 6 pistettä.

Kuvista 38 ja 39 huomataan välittömästi mitattujen arvojen olevan parempia tuloksia (vähemmän häviötehoa). Tästä voidaan tehdä jo päätelmä, että loppuhyötysuhteet voivat olla huomattavastikin paremmat mitatuilla arvoilla. EcoDesign-ohjelman PDS-häviöt ovat kuvassa 40 ja lasketut häviöt testattujen arvojen pohjalta ovat kuvassa 41.

User-defined load points

POINT	SPEED	TORQUE	CDM LOSSES	MOTOR LOSSES	PDS ABSOLUTE LOSSES	PDS RELATIVE LOSSES	PDS EFFICIENCY
1	25 %	25 %	128 W	192.4 W	320 W	4.3 %	59.4 %
2	40 %	40 %	131 W	268.6 W	399 W	5.3 %	75.0 %
3	50 %	60 %	137 W	391.8 W	529 W	7.1 %	81.0 %
4	70 %	80 %	149 W	568.0 W	717 W	9.6 %	85.4 %
5	100 %	100 %	169 W	884.4 W	1054 W	14.1 %	87.7 %

Kuva 40. EcoDesign-häviöt käyttäjä määritellyissä pisteissä (ABB_EcoDesign, 2025).

PDS efficiency	
With measured CDM values	
Motor losses without optimising	
	68,136 %
	79,141 %
	82,986 %
	86,094 %
	88,723 %

Kuva 41. PDS-häviöt käyttäjän määrittämässä pisteissä mitatuilla arvoilla.

Kun PDS-hyötysuhteita tarkastellaan kuvista 40 ja 41, huomataan mitattujen arvojen pohjalta tehdyn laskennan antavan huomattavasti paremmat lopputulokset. Mitatuilla arvoilla n 25 / T 25 pisteen ero Eco-Design laskentaan oli huima 8,74 % yksikköä.

Kuten tehdystä vertailusta huomataan, testaustuloksilla yleensä saadaan vähän parempia tuloksia, koska puhtaalla matemaattisella mallinnuksella joudutaan käyttämään erilaisia korjauskertoimia, jotka ovat yleensä aina huonoimmasta tapauksesta. Tästä johtuvat "huonot" tulokset. Testattujen tulosten pohjalta pystytään myymään vähän parempia tuotteita, joilla saavutetaan kilpailuetua.

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli luoda tiivistetty tulkinta standardista IEC 61800-9-2 ja rakentaa laskentaohjelma Exceliin, jolla verifioidaan testausohjelman laskennan rakennus käyttöönotossa sekä aina silloin, kun sovellukseen tulee päivitys. Nopeasti työn alettua heräsi kysymyksiä, joiden myötä tuli myös IEC 60034-2-3 tulkintaa mukaan.

Työn myötä koekentällä on helppo lähteä rakentamaan standardien mukaista testausta ja raportointia. Laskentasovelluksen luovutuksen jälkeen pystytään kokeilemaan testausohjelman toimivuus ja voidaan ajaa ensimmäiset testit.

5.1 Vaikutus koekentälle

Työn myötä työntekijöiden taakka koekentällä ei juurikaan nouse. Muutokset heidän työkuormaansa pohjautuvat taajuusmuuttajan asetteluun. Testaajan tulee huomioida taajuusmuuttajan nollaus ja oikea asetelu, jotta saadaan vertailukelpoisia tuloksia. Ennen lämpöajon loppua tulee myös muistaa ottaa ylös kytkentätaajuus ja DC-linkin jännite. Lämpöajon jälkeen automaatiosta asetellaan PDS-testaus päälle. Automaatio ajaa testit, joten itse testauksesta ei tule muuta kuormaa. Testaajat tulee myös kouluttaa katsomaan oikeita arvoja testin jälkeen, jotta heti koekentällä huomattaisiin mittausvirheet tai muut poikkeamat.

Koekentän työkuorma nousee huomattavasti, jos aletaan tekemään PDS-testauksia asiakas taajuusmuuttajilla. Tällöin testaaja joutuu ottamaan käyttöön uuden taajuusmuuttajan ja kaapeloimaan sen. Myös asiakastaajuusmuuttajan kuljetus ja paketin purkaminen kuormittavat testaajaa.

Toimistotyö tulee kuormittumaan enemmän, sillä normaalin dokumentin lisäksi tulee täyttää lisäliite. Jos PDS-testaus on kyseessä, on raportoitavaa vielä huomattava määrä enemmän.

5.2 Tulevaisuus

Lähitulevaisuudessa työn pohjalta saadaan testausohjelman käyttöönotto valmiiksi sekä dokumentointi toteutettua vaatimusten mukaisesti. Raportoinnin ja testausohjelman valmistuttua koekenttä on valmis ottamaan vastaan PDS-testejä sekä moottorin interpolointikertoimien määrityksiä.

Pidemmällä aikavälillä näen kannattavaksi kehittää ABB Drivesin kanssa tiiviimpää yhteistyötä. Esimerkiksi datapankkien jakaminen toisillemme helpottaisi PDS-laskennan teossa. On molempien osapuolien etu kehittää PDS-testauksia ja ajopaketteja yhdessä. Testien yhdessä teko olisi myös heille hyödyllistä, sillä he saisivat arvokkaita testituloksia, mikä auttaa myös heitä tuotekehityksessä.

Suurin yksittäinen hyöty on, ettei taajuusmuuttaja käyttöön menevien moottoreiden myynti Pohjois-Amerikkaan keskeydy vuoden 2026 alussa, koska työn myötä DOEn vaatimukset pystytään täyttämään. Myyntiosasto pystyy myös lähitulevaisuudessa alkaa myydä asiakkaille kahta uutta testiä, joko moottorin interpolointikertoimien määrittystä tai PDS-testausta. Myös tuotekehitys hyötyy, sillä testien myötä se saa dataa, jonka pohjalta syntyvä kehitys pitää ABB:n markkinajohtajana. Työn kautta ABB on valmistautunut kehittyviin energialainsäädäntöihin, mikä luo myyntietua.

LÄHDELUETTELO

- ABB. (2024). *ABB Oy, IEC LV Motors Viitattu 15.4.2025*. Noudettu osoitteesta <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/iec-lv-motors>
- ABB. (2024). *ABB Suomessa. Viitattu 15.4.2025*. Noudettu osoitteesta <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>
- ABB_EcoDesign. (2025). *Viitattu 19.4.2025*. Noudettu osoitteesta <https://ecodesign.drivesmotors.abb.com/>
- ABB_Global. (2024). *Viitattu 15.4.2025*. Noudettu osoitteesta <https://global.abb/group/en>
- EU_komissio. (25. 10 2019). *EUR-Lex Europa. Säädös (EU) 2019/1781. Viitattu 19.4.2021*. Noudettu osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj/eng>
- IEC_60034-2-3. (3 2024). *Standardi IEC 60034-2-3:2024, edition 2.0. Viitattu 15.4.2025*. Noudettu osoitteesta Webstore IEC: <https://webstore.iec.ch/en/publication/67758>
- IEC_60034-30-2. (12 2016). *Standardi IEC60034-30-2:2016, Edition 1.0. Viitattu 19.4.2025*. Noudettu osoitteesta Webstore: <https://webstore.iec.ch/en/publication/30830>
- IEC_61800-9-2. (10 2023). *Standardi IEC 61800-9-2:2023, edition 2.0. Viitattu 15.4.2025*. Noudettu osoitteesta Webstore IEC: <https://webstore.iec.ch/en/publication/62107>
- Manias, S. (2016). *Power Electronics and Motor Drive Systems. Viitattu 15.4.2025*. Academic Press.
- Pantti, T. (15. 10 2024). *Power Point esitys: Power Drive System (PDS) Test. Noudettu osoitteesta Viitattu 19.4.2025*. Rajattu pääsy (ABB sisäinen esitys).