SÄHKÖISEN VOIMANSIIRRON LABORATORIOTESTAUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan Diplomityö

2022

Juha Dahlman

Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Työn ohjaaja: DI Marko Savela

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Juha Dahlman

Sähköisen voimansiirron laboratoriotestaus

Diplomityö
2022
54 sivua, 26 kuvaa ja 2 liitettä
Tarkastaja: Prof. Juha Pyrhönen

Ohjaaja: DI Marko Savela

Avainsanat: Sähköinen voimansiirto, sähköinen akseli, voimansiirron sähköistäminen, regenerointi, akkuemulaattori, sähkönlaatuanalysaattori, tehoanalysaattori.

Viimeisimpien kymmenen vuoden aikana on laitteiden ja ihmisten energiankulutustottumuksissa tapahtunut merkittävä muutos. Energian säästäminen ja vihreät aatteet ovat lisääntyneet merkittävästi, eikä vähiten energian- ja ruuanhinnan nousun sekä ilmastonmuutostietoisuuden myötä. Näistä edellä mainituista syistä autoteknologiassa on pyritty erilaisiin uusiutuviin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin kuten biopolttoaineisiin sekä sähköistämiseen. Henkilöautopuolella sähköistys on ollut perustekniikkaa jo toistakymmentä vuotta, mutta maansiirto ja maatalouskoneiden puolella sarjatuotantoa on ollut vähemmän koska vaadittavat jatkuvat tehotasot ja kestävyysvaatimukset ovat merkittävästi suuremmat kuin autoilussa. Siten myös sarjatuotannon testausvaatimukset ovat toisenlaiset.

Tässä diplomityössä käsitellään sähköisen voimansiirron laboratoriotestausta traktorituotannon tuotekehityksen näkökulmasta ja keskitytään erityisesti testausympäristön vaatimuksiin ja laitevalintoihin. Tuotekehityksen vaatimukset testaukselle poikkeavat sarjatuotannon testausvaatimuksista, mutta ovat alaspäin yhteensopivat siten, että samoilla testausjärjestelyillä voitaisiin hoitaa myös sarjatuotannon lopputestaus.

Työssä tehtyjen valintojen ja selvityksien perusteella voidaan kehittää sähköisen voimansiirron testausympäristön integraatio olemassa olevaan polttomoottorien laboratoriotestaukseen. Työn tuloksia saadaan hyödynnettyä myös tulevaisuudessa suunniteltujen lisäominaisuuksien jatkokehittelyssä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Juha Dahlman

E-drivetrain testing in laboratory

Master's thesis
2022
54 pages, 26 figures and 2 appendices
Examiners: Prof. Juha Pyrhönen

Supervisor: DI Marko Savela

Keywords: Electric propulsion, E-axle, Regeneration, Drivetrain electrification, Battery emulator, Electricity Quality Analyzer, Power Analyzer.

In the latest ten years it has been a remarkable change in peoples and machines energy usage principles. Energy savings and green thinking have been growing fast. This growth is driven by increased price of food and energy and of course the awareness of the climatic change. Because of these reasons automotive technology has been moving towards alternative and renewable fuel sources like biofuels and electrification. In automotive technology electrification has been industry standard over ten years but offroad (agriculture and earth moving) technology serial production has been smaller quantities mainly because constant power and lifetime requirements are much bigger. This makes also requirements for testing more challenging.

This master's thesis considers laboratory testing of electrified transaxle and other electrification problems from the agricultural tractor manufacturing point of view, focusing heavily on the research and development department testing. Thesis focuses in selection of testing equipment and testing infrastructure requirements and evaluation. Requirements for research and development are different than in testing serial production devices but are downwards compatible so that serial production testing is possible with same hardware.

Based on the selections and studies in this thesis, it is possible to create integration of electrified drivetrain testing infrastructure for present internal combustion engine laboratory infrastructure. Studies are also useful for future development of next level electric vehicle properties testing.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Valtra Oy:n tuotekehitysosastolle vuoden 2022 aikana. Ohjaajana Valtran puolelta toimi RAE-jaoston DI Marko Savela. Työn tarkastajana toimi LUT:n professori Juha Pyrhönen.

Kiitän työnantajaani Valtra Oy:n tuotekehitystä diplomityön tekemisen mahdollistamisesta vaikkakin välillä työkiireet, ja osatoimitusten vaikeudet tuntuivatkin ylitsepääsemättömän hankalilta.

Äänekoskella 10.10.2022

Juha Dahlman

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

P	pätöteho	[W]
S	näennäisteho	[VA]
p	paine	[bar, Pa]
q_m	massavirta	[kg/s]
T	lämpötila	[ºC, K]
U	jännite	[V]
V	tilavuus	[m^3]
v	ominaistilavuus	[m^3/kg]

Kreikkalaiset

α	lämpötilakerroin	[/ °C]
λ	lämmönjohtavuus	[W/(mK)]
ρ	resistiivisyys	[Ωm]
ΔT	lämpötilan muutos	[°C, K]

Lyhenteet

LAT	Limiting Ambient Temperature
EMI	Electro Magnetic Interference
EMC	Electro Magnetic Compatibility
PTO	Power Take Off
SAE	Society of Automotive Engineers, yhdysvaltalainen autoalan standardisointi-järjestö.
J1939	CAN-väylä, yhteinen standardi liikkuville työkoneille
NVH	Noise, Vibration, Harshness. Melu- ja värähtelyominaisuuksien tutkimus
ppm	Parts Per Million. Suhdeyksikkö, joka ilmaisee Kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1. Johdanto 10
   1.1. Valtra Oy tuotekehitys 12
2. Dieselmoottoreilla varustettujen traktorien testaaminen 13
   2.1. Mitä ja miksi testejä tehdään tuotekehityksessä 13
      2.1.1. Tehoajo 13
      2.1.2. LAT-testiajo 14
3. Vaatimusmäärittelyt sähköisen voimansiirron testaukselle 16
   3.1. Mitattavat suureet sähköisen voimansiirron testissä 16
   3.2. Testausjärjestelmässä tarvittavat apujärjestelmät 17
      3.2.1. Kalorimetrinen hyötysuhdemittaus 17
4. Riskianalyysi 20
   4.1. Merkittävimmät riskit sähköisten järjestelmien testeissä 21
   4.2. Vaatimukset testausta suorittaville henkilöille 21
5. Laitevalinnat laboratoriojärjestelmään 22
   5.1. Invertterin DC-syötön valinta 22
      5.1.1. Suora DC-syöttö laboratorion jarrujärjestelmän välipiiristä 24
      5.1.2. DC-syöttö akkuemulaattorilla 24
      5.1.3. Eristysvastuksen valvonta 27
   5.2. Invertterin valinta 28
      5.2.1. Danfoss EC-C1200-450-L+MC350+HS 28
   5.3. Invertterin syöttö- ja välikaapeleiden mitoitus 31
   5.4. Tehoanalysaattorin valinta 33
      5.4.1. Yokogawa PX8000 33
      5.4.2. Dewesoft Sirius i-HS-8xHV 34
      5.4.3. HBM(HBK) 1-EDRV-6P-4T 35
   5.5. Virtamuuntajat mittausjärjestelmään 36

5.6. Voitelu ja jäähdytyspiiri testattavalle sähkökoneelle sekä invertterille 38
5.6.1. Erilliset voitelupiirit sähkökoneelle 38
5.6.2. Jäähdytyspiiri invertterille 40
5.7. Vaihteensiirtäjän ohjausyksikkö 42
5.7.1. Ongelmia H-siltojen käyttöönotossa 46
5.7.2. Kehitysmahdollisuuksia ohjaukselle 48
5.8. Testauksessa käytettävä jarrudynamometri 49
5.9. Vääntömomenttianturin valinta jarrudynamometrin ja sähkökoneen välille 50
5.10. Invertterin DC-syötön virtamuuntaja 51
6. Johtopäätökset 53
Lähteet 55

Liitteet

Liite 1: Vaihteensiirtäjän ohjauskytkentä

Liite 2: Jarrumoottorin testausraportti

Kuvaluettelo

Kuva 1: Ketjujarruun kytketty traktori (JDa 2017, omat valokuvat)

Kuva 2: Kalorimetrisen testauksen periaatekuva

Kuva 3: Havainnekuva PT100-antureiden asettelusta ilmakanavissa

Kuva 4: Havainnekuva riskianalyysityökalusta (Valtra Engineering 2022)

Kuva 5: Erotusmuuntaja ACS800 jarruinvertterjärjestelmän syöttöverkossa (JDa 2022, omat valokuvat)

Kuva 6: Akkuemulaattorin lohkokaavio (muokattu Heinziger ERS-BIC käyttöohjeesta 2021)

Kuva 7: Heinziger akkuemulaattorin jännite ja virtakäyrät rinnan- ja sarjakytkennässä (muokattu Heinziger ERS-BIC käyttöohjeesta 2021)

Kuva 8: Elektroniikkalaitteissa käytettävät X ja Y häiriönpoistokondensaattorit

Kuva 9. Havainnekuva Danfoss EC-C1200-450 Invertteri (Danfoss datalehti 2022)

Kuva 10: EC-C1200-450 Invertterin sisäinen periaatekytkentä (Danfoss Datalehti 2022)

Kuva 11: Havainnekuva ajoneuvokäyttöön suunnitellusta suurjännitekaapelista (muokattu Radox datalehdestä 2022)

Kuva 12: Havainnekuva Dewesoft Sirius analysaattorin käyttöliittymästä

Kuva 13: Havainnekuva CTS400ID virtamuuntajan taajuusvasteesta

Kuva 14: Havainnekuva virtamuuntajasta

Kuva 15: Voitelukoneikon hydraulikaavio

Kuva 16: Danfoss EC-C1200-450 invertterisarjan jäähdytysnesteen painehäviö vs. virtaus

Kuva 17: Invertterin jäähdytysvesikierron kaaviokuva

Kuva 18: B&R X90CP174.48-00 ohjain (B&R X90 käyttöohje 2022)

Kuva 19: IBT_2 H-siltamoduuli

Kuva 20: H-sillan periaatekytkentä

Kuva 21: IBT-2 moduulin ohjausnastojen kytkentä

Kuva 22: X90-ohjaimen ja H-siltojen tasonsovituskytkentä

Kuva 23: Vaihteensiirtäjän virta NDE-suuntaan, kela #1

Kuva 24: Vaihteensiirtäjän virta NDE-suuntaan, kela #2

Kuva 15: Havainnekuva dynamometrikäyttöön suunnitellun moottorin vääntökäyristä

Kuva 26: Havainnekuva ensiövirtamuuntajan virtakiskoratkaisusta

1. Johdanto

Viimeisimpien kymmenen vuoden aikana on laitteiden ja ihmisten energiankulutustottumuksissa tapahtunut merkittävää muutosta. Energian säästäminen, ”vihreät” aatteet ja ilmastonmuutostietoisuus ovat lisääntyneet merkittävästi, eikä vähiten energian- ja ruuanhinnan nousun myötä. Näistä edellä mainituista syistä autoteknologiassa on pyritty erilaisiin uusiutuviin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin kuten biopolttoaineisiin sekä sähköistämiseen. Myös EU-alueella kiristyneet päästövaatimukset ohjaavat laitevalmistajia kehittämään vähäpäästöisiä laitteita.

Henkilöautopuolella voimalinjan sähköistys on ollut perustekniikkaa jo pitkälti toistakymmentä vuotta. Maansiirto- ja maataloustyökoneiden puolella sarjatuotantoa on ollut vähemmän, koska vaadittavat jatkuvat tehot ovat merkittävästi suuremmat kuin henkilöautoissa eivätkä akustojen energiatiheydet suoranaisesti ole tukeneet järkevää sähkökäyttöä liikkuvissa työkoneissa. Toki maansiirtokoneissa erilaiset hybridijärjestelmät ovat olleet jo pitkään käytössä.

Erilaisia kokeiluja on ollut eri valmistajilla maatalouskoneiden sähköistyksessä kautta aikain, mutta varsinaista menestystä ei ole tullut, ja pääasiallinen voimanlähde on perinteisesti ollut ja on edelleen dieselmoottori. Täysin sähköinen laite ei tällä hetkellä ole realistinen, koska vaadittava akkukapasiteetti olisi käytännössä mahdotonta toteuttaa järkevästi. Erilaisiin polttokennoihin perustuvat järjestelmät ovat yksi mahdollisuus, mutta nekin vaativat vetyä polttoaineeksi. Vedyn tuotanto, jakelu ja varastointi eivät ole toistaiseksi kehittyneet tasolle, jossa traktoreilla operoivat voisivat helposti siirtyä polttokennovoimaisen traktorin käyttöön. Hiilineutraaleihin polttoaineisiin turvautuen voi mäntäkoneiden käyttö jatkua vielä tulevaisuudessa pitkäänkin. Myös pienet kaasuturbiinit voisivat ehkä tulla kyseeseen tulevaisuuden traktoreiden sähkövoimantuotannossa. Niiden käyttövoimaksi soveltuisi mainiosti esim. biometaani, jonka saatavuutta varsinkin isot maatalousyritykset voisivat itse edistää tulevaisuudessa.

Koska aiempia sähköistysprojekteja ei ole päästy kunnolla testaamaan Valtran tuotekehityksen laboratoriossa, on nyt tarkoituksena suunnitella ja kehittää uusi testauskeskus tuotekehityksen laajennuksen yhteydessä. Keskuksessa on aiempaa paremmin otettu huomioon vaihtoehtoisten polttoaineiden ja sähköistyksen vaatimukset tuotekehityksen näkökulmasta. Tässä työssä keskitytään tarvittaviin laitevalintoihin sekä pyritään ratkaisemaan suurempien tehojen ja suurjännitteiden aiheuttamat haasteet. Samalla pohditaan myös, voidaanko uudet järjestelmät integroida vanhaan laboratoriohuoneeseen vai olisiko järkevämpää siirtää uusien asioiden testaus tulevaan laajennukseen ja sinne tehtävään nykyaikaisempaan laboratorioon.

1.1. Valtra Oy tuotekehitys

Valtra Oy kuuluu kansainväliseen AGCO-konserniin, joka valmistaa traktoreita pääasiassa maatalous-, urakointi- ja maansiirtotehtäviin. AGCO-konserniin kuuluvat Valtran tuotemerkin lisäksi Fendt ja Massey Ferguson -tuotteet sekä Challenger puimurit. Valtran tehtailta valmistuu vuosittain lähes kymmenentuhatta tuotetta. Valtran tavoitteena on tarjota paras mahdollinen tuotekokemus asiakkaille.

Tuotekehitys kehittää ja tuottaa uusia tuotteita n. 150 henkilön voimin Äänekosken Suolahdessa. Tuotekehityksen tehtäviin kuuluvat myös prototyyppien testaus ja validointi sekä viranomaisvaatimusten täyttäminen ja seuranta. Tuotekehityksellä on oma laboratorio, jossa tuotteet testataan suunnitteluvaiheessa luotavan validointisuunnitelman mukaisesti. Myös ulkopuolisia testausyrityksiä käytetään mm. viranomaisvaatimuksien täyttämiseksi. Näistä esimerkkeinä ovat erilaiset jarru- ja ohjauslaitetestaukset sekä sähköautomaatiopuolen EMC ja EMI testaukset.

2. Dieselmoottoreilla varustettujen traktorien testaaminen

Dieselmoottoreiden käyttöön perustuvan voimansiirron testaaminen sisältää useita eri testivaiheita, joihin kuuluvat erilaiset vaihteisto ja voimansiirtotestit, hydrauliikkatestit sekä moottorin ja apulaitteiden testit. Kolme tärkeintä moottoreista mitattavaa suuretta ovat: Teho, vääntö ja polttoaineenkulutus. Myös imu ja pakojärjestelmille tehdään erityyppisiä testejä tuotekehitysvaiheessa. Erityisesti pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiden erilaiset testausmenetelmät ovat lisääntyneet merkittävästi EU-päästönormien kiristymisen johdosta. Merkittävä sähköautomaation kehittyminen ja lisääntyneet tarpeet laitteiden autonomian suhteen ovat lisänneet elektroniikan testaustarvetta entisestään. Enää ei puhuta pelkästään neljän vetävän pyörän ja voimalinjan testaamisesta, vaan kokonaisuuden testeistä, jotka taas vaativat merkittäviä investointeja testausresursseihin sekä testausinfrastruktuuriin.

2.1. Mitä ja miksi testejä tehdään tuotekehityksessä

Tässä käsitellään vain muutamia yleisimpiä vakiotestejä, joita tehdään polttomoottorilla varustetulla traktorille, joilla on jokin yhteys myös tuleviin sähköisen voimansiirron testeihin.

2.1.1. Tehoajo

Tehoajo on yksi tärkeimmistä tuotekehityksen testeistä. Sillä varmistetaan testattavan tuotteen toimivuus sekä spesifikaatioiden täyttyminen. Tehoajossa moottoria kuormitetaan jarrudynamometrissä traktorin voimanulosoton (PTO, Power Take Out) kautta. Tehoajossa ajetaan ennalta määritellyillä pyörimisnopeuksilla jarrua vastaan, ja lopputuloksena on mitattu teho- ja vääntökäyrät, joita verrataan moottorispesifikaatioon. Yleensä pyörimisnopeus kattaa alueen maksiminopeudesta tyhjäkäyntinopeudelle 100 r/min portain. Yhtä porrasta ajetaan määrätty aika, jotta mitattavat suureet ehtivät tasaantua ja saadaan luotettava keskiarvo tuloksista. Tehoajo ajetaan vakioidussa ympäristölämpötilassa, joka on 25 °C±1°C. Myös moottorin ja voimansiirron lämpötilojen tulee olla tasaantuneita. Tehoajo voidaan ajaa perinteisellä pyörrevirtajarrulla sekä myös uudemmalla sähkömoottorijarrulla.

2.1.2. LAT-testiajo

LAT-testiajo (Limiting Ambient Temperature) suoritetaan testattavalle tuotteelle, jotta saadaan selville korkein mahdollinen lämpötila, jossa tuotetta voidaan käyttää turvallisesti siten, että jäähdytysnesteen, voiteluöljyn tai hydrauliikan lämpötilat eivät ylitä niille määrättyjä rajoja. LAT-ajo jaetaan tässä tapauksessa vielä muun muassa maantieajo- ja ns. peltoLAT-ajona. Nämä poikkeavat toisistaan käytettävän pyörimisnopeuden ja vääntömomentin osalta. Pelkkä LAT ajetaan jarrua vasten PTO:n kautta, maantie ja peltoLAT ajetaan yleensä ketjujarrussa, jossa traktori kiinnitetään molemmista pyörännavoista tasausakselin kautta ketjuvälitteisesti jarrudynamometriin. Kuva 1 selventää ketjujarrun toimintaa ja kuinka testattava laite on kiinnitetty vetopyörästöstä tasausakselin kautta sähködynamometriin.

Kuva 1: Ketjujarruun kytketty traktori (Valtra tuotekehitys 2017)

Kun tulevaisuuden sähkömoottorikäyttövetoisia traktoreita testataan, on periaatteessa mahdollista käyttää samaa tekniikkaa kokonaisen traktorin testaamiseen kuin dieselmoottorivetoisessakin tapauksessa. Kuitenkin esim. kestotestauksen kustannusten kannalta saattaa tulla järkeväksi käyttää sähköverkkoa ja akkuemulaattoria syöttämään sähköistä voimansiirtojär-

jestelmää, jolloin dynamometrienkin ollessa sähköisiä, voidaan tehoa järjestelmässä kierrättää niin, että sähköverkosta tarvitaan vain traktorin voimansiirron ja dynamometrien häviöt. Tämä on huomattavasti edullisempaa kuin tehdä pitkiä testiajoja dieselpolttoaineella ja pyörrevirtajarrua soveltaen.

200 kW dieselmoottori kuluttaa kestotestissä noin 50 litraa tunnissa polttoainetta, jolloin tuhannen tunnin testauksessa polttoainetta tarvitaan jopa 50 kuutiometriä, jolloin nykyisillä polttoaineen hinnoilla puhutaan jo yli 100 000 euron kustannuksesta.

Jos vastaavasti 200 kW:n sähköpropulsiojärjestelmän ja dynamometrin kokonaishyötysuhde on noin 90 %, tulee testaushäviöitä vain noin 20 kW. 20 000 kWh häviön kustannus vaikkapa tämän hetken noin 30 c/kWh energian kokonaishinnalla vastaa vain 6000 euron kustannusta. On siis helppo ymmärtää, että sähköinen testaus voi tulla paljon polttoainetestausta edullisemmaksi. Tietenkin järjestelmän voimantuotantoyksikköä on testattava polttoaineita käyttäen myös tulevaisuudessa, mutta sen osuus voi jäädä merkittävästi nykyistä alemmaksi, jolloin testauksen kustannussäästöt voivat olla merkittäviä.

3. Vaatimusmäärittelyt sähköisen voimansiirron testaukselle

Testausjärjestelmän suunnitteluvaiheessa käytiin läpi vaatimuksia sähköisen voimansiirron testaukselle, missä harkittiin mitä ja miten pitäisi mitata. Tämä vaikuttaa merkittävästi järjestelmän rakentamiseen, koska mahdolliset muutokset jälkeenpäin ovat hankalia ja kalliita. Tässä vaiheessa oli jo tiedossa, että ensimmäinen sähköinen voimansiirto on niin sanottu ”toimintamalli”, eli testattavaksi tulisi pelkästään sähkökoneen sisältävä kaksinopeuksinen vaihteistopaketti. Koska toimintamalli ei sisällä tasauspyörästöä eikä vetoakseleita, kuormitusmenetelmäksi valikoitui pelkkä PTO-sähköjarru.

3.1. Mitattavat suureet sähköisen voimansiirron testissä

Alkuvaiheessa projektia ei ollut vielä tiedossa kaikkea tarvittavaa mittaustarvetta, mutta perusmittauksilla aloitetaan. Mittaukset tarkentuvat projektin edetessä.

- Eristysvastusmittaus, sähköturvallisuuden varmistaminen
- DC-tulojännite [VDC] invertterille sekä virtamittaus invertterin ottaman virran mittaus [ADC]
- Sähkövoimakoneelle menevien vaiheiden (3kpl) jännite sekä virtamittaus
- Teho ja vääntökäyrien mittaus, vrt. dieselmoottoreiden testaus
- Lämpötasapainon mittaus pitkäkestoisessa ajossa
- Lämpötilamittauskanavia PT100 sekä termopariantureille
- Virtausmittaus voitelupiireille sekä jäähdytykselle
- Melu- ja värähtelyominaisuuksien tutkimus (NVH Noise, Vibration, Harshness). Tämä suoritetaan erillisenä mittauksena
- Hyötysuhde. Vaatimuksena sähkökoneen, invertterin sekä vaihteiston häviöitten määrittely

- Kallistusmahdollisuus testattavalle sähköakselille >20°, tutkitaan kuinka voitelu- ja jäähdytysöljy poistuvat poistoaukkojen kautta eri kallistuksilla.

3.2. Testausjärjestelmässä tarvittavat apujärjestelmät

Koska alkuvaiheessa testattavaksi tulee pelkkä toimintamalli, sen toiminnan vaatimat apujärjestelmät on rakennettava testausjärjestelmän yhteyteen. Näitä ovat voitelu- ja jäähdytysjärjestelmät sekä vaihteenohjausjärjestelmä. Jatkossa testattavana olevat kokonaiset traktorit sisältävät nämä järjestelmät integroituna, joten erillisiä apulaitteita ei aina tarvita.

Sähköisistä suureista suurin osa saadaan toteutettua erillisellä tehoanalysaattorilla, jonka kanavamäärä täytyy valita tarvittavien mittausten perusteella. NVH-mittaukset saadaan tehtyä olemassa olevilla mittalaitteilla tarvittaessa.

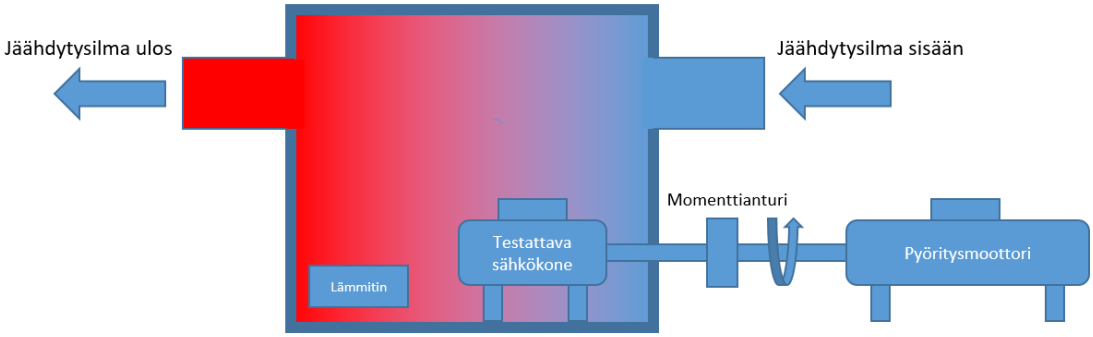
Lisäksi sähkökoneiden hyötysuhdemittauksissa tarvitaan testattavalle sähkökoneelle säädeltävä ympäröivä lämpötila. Tähän tarvitaan pienempää kotelointia testattavan kohteen ympärille, koska suurikokoinen testaushuone kylmenee pienillä tehoilla eikä ympäröivää lämpötilaa ei ole mahdollista nostaa normaalilla IV-ohjauksella. Vain kuuman ilman poistaminen onnistuu.

3.2.1. Kalorimetrinen hyötysuhdemittaus

Tarkempaa sähkökoneiden hyötysuhdemittausta varten olisi tarve kehittää testattavan koneen ympärille eristetty tila, jonka avulla testattavan koneen tehohäviöt saadaan mitattua kalorimetrisellä menetelmällä. Perinteinen menetelmä, jossa mitataan vain sähkökoneen otto- ja antoteho saattaa antaa vääristyneitä tuloksia hyötysuhdemittauksissa. Tämä johtuu siitä, että suuren sähkötehon ja suuren mekaanisen tehon mittauksissa pienikin virhe johtaa suureen hyötysuhdevirheeseen. Olisikin edullista, jos sähkökoneen lämpöhäviöt voitaisiin mitata suoraan. Tässä tapauksessa kyseessä olisi niin kutsuttu avoin kalorimetri, joka olisi ilmajäähdytteinen.

Testaushuoneeseen kyseinen mittausjärjestelmä voisi olla mahdollista toteuttaa tekemällä polystyreeni- tai polyuretaanilevyistä rakennettu noin 1 m^3 kokoinen laatikko testattavan koneen ympärille. Levyn sisäpuolinen alumiinipinta heijastaa sähkökoneen lämpösäteilyn ja

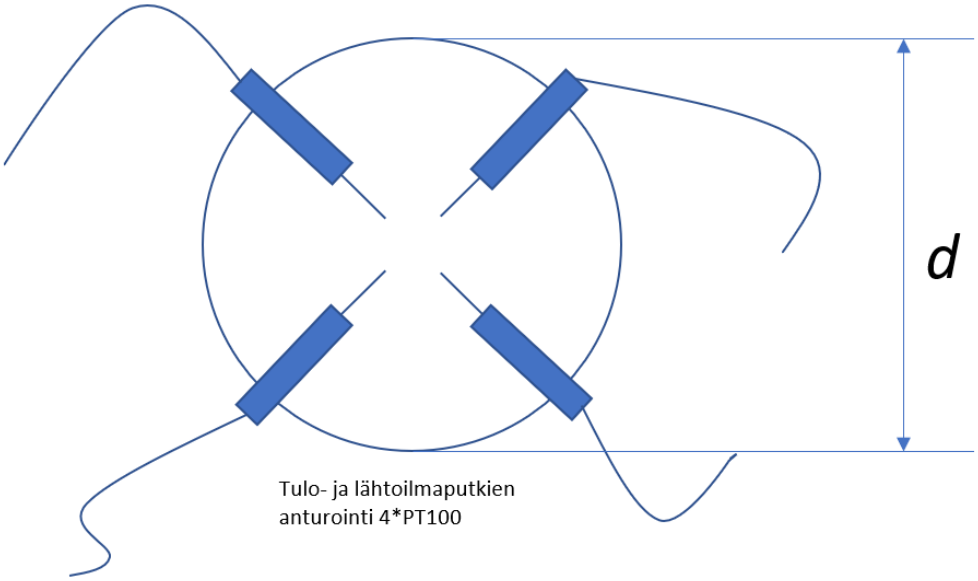
uretaanilevyn hyvä eristyskyky vähentäisi sähkökoneen lämpöhäviöiden johtumista ympäröivään tilaan. Koteloinnin jäähdytysilma tuodaan ja poistetaan hallitusti erillisiä kanavia pitkin, joissa tarvitaan riittävän tarkka lämpötila- ja virtausmäärämittaus, joilla saadaan testattavan koneen tehohäviöiden lämmittävä vaikutus mitattua. Lisäksi mittauskotelossa tulisi olla erillinen termostaattiohjattu lämmitin, jolla saavutetaan testattavan kohteen lämpötasapaino nopeammin. Kuva 2 selventää avoimen kalorimetrin toimintaperiaatetta.



Kuva 2: Kalorimetrisen testauksen periaatekuva

Avoimen kalorimetrin toiminnan kannalta on myös välttämätöntä mitata kalorimetrin tuloilman sekä lähtöilman kosteus koska ilman ominaislämpökapasiteettiin vaikuttaa myös kosteus merkittävästi. Myös jäähdytysilman tulokanavaan tulisi laittaa termostaattiohjattu esilämmitin. Tällä saataisiin nopeutettua lämpötilojen tasaantumista. Lämpöantureita sijoitetaan kalorimetrin sisätiloihin useisiin pisteisiin, jotta saadaan keskimääräinen lämpötila tarkasti selville. Tulo- ja lähtökanavat anturoidaan PT100-antureilla, jotka sijoitellaan ristikkäisesti 90° välein ilmaputkiin. Kaikki lämpö- ja kosteusanturit kytketään Labview-tiedonkeruujärjestelmään, jolloin tarvittavia analogiatuloja tarvitaan noin kaksikymmentä kappaletta.

Tällä mittausjärjestelyllä saadaan kustannustehokkaasti järjestettyä riittävän tarkka hyötysuhdemittaus erityyppisiä sähkökoneita tutkittaessa (Aarniovuori et al. 2012). Kuva 3 havainnollistaa PT100-antureiden kytkentää jäähdytysilmakanavissa. Antureiden päät sijoitellaan putken halkaisijan kolmasosan etäisyydelle toisistaan.



Kuva 3: Havainnekuva PT100-antureiden asettelusta ilmakanavissa

Tarveharkintaa on kuitenkin syytä käyttää tässä tapauksessa, koska sähkökoneiden tuotekehitys ja vaativammat mittaustoimenpiteet voidaan suorittaa ostopalveluna, ja omissa mittauksissa keskityttäisiin kokonaisen tuotteen mittauksiin. Siten erillinen kalorimetri olisi tässä vaiheessa testausympäristön kehitystä tarpeeton ja tilaa vievä ratkaisu.

4. Riskianalyysi

Riskianalyysi tai riskienarviointi on osa normaalia tuotekehitysprojektia ja on myös vaatimuksena työsuojeluorganisaation sekä työterveyden näkökulmasta. Riskianalyysissä pohditaan mahdollisia vahinkoja tai onnettomuuksia, joita voisi tapahtua testauksessa esimerkiksi konerikon tai testattavan kappaleen irtoamisen yhteydessä. Sähköisen voimansiirron aiheuttamat lisäominaisuudet, kuten esimerkiksi korkeat jännitteet, tuovat uusia riskejä, joita ei ole aiemmin tarvinnut ottaa huomioon.

Riskianalyysissä arvioidaan riskin taso ongelmakohtaisesti numeroimalla nollasta ylöspäin, missä nollataso vastaa merkityksetöntä ja taso yhdeksän taas sietämätöntä riskiä, jolloin kyseessä olevaa testiä ei voi suorittaa. Suojauksilla sekä muutoksilla toimintatapoihin saadaan mahdollista riskiä pienennettyä ja riskianalyysin jäännösriski pitää saada pudotettua tasolle, joka on siedettävä. Kuva 4 esittelee Valtran käyttämän riskianalyysityökalun näkymää.

VALTRA

RISKIKARTOITUS

PVM.: 8.10.2015 H.Pietiläinen — TYÖRYHMÄ: Valtra Oy
Päivitetty: 24.08.2021 T.Koskiniemi, 26.10.2021 H. Pietiläinen
TYÖ: e-akselin testaus sinisessä huoneessa (asennus, käyttö ja irroitus)
LAATIJAT: H.Pietiläinen, Jämsen, Mailas, Kurkinen, Koskiniemi — KOHTEET: Henkilö, ympäristö sekä omaisuus

TAPATURMAN TODENNÄKÖISYYS (P):
0 = vaara on kokonaan poistettu
1 = harvinainen vaara (kerran pari 10 vuodessa)
2 = melko todennäköinen (muutamia kertoja vuodessa)
3 = välitön vaara (päivittäin)

TAPATURMAN SEURAUS (C):
0 = mitätön (korjeintaan käyntl ensiapuasemalla)
1 = vähäinen (ei pysyvää haittaa)
2 = vakava (jää pysyvia haittoja)
3 = kuolema/ yli 300 sairauspäivää

RISKILUKU (R) 0...9:
0 / 1 = merkityksetön riski
2 = siedettävä riski
3 / 4 = kohtalainen riski
6 = merkittävä riski
9 = sietämätön riski

TOIMENPITEET:
Rakenteelliset ratkaisut
Suojaustekniset ratkaisut
Turvajärjestelmät ja laitteet
Varoitukset, merkinnät ja ohjeet
Työmenetelmien muuttaminen

			ENNEN TOIMENP.				TOIMENP. JÄLKEEN				
NO	KOHDE	VAARA/VAARAN SYY	P	C	R	TOIMENPITEET	P	C	R	JÄÄNNÖSRISKI	JÄÄNNÖSRISKIN PIENENNYSTOIM.
17		Voimansiirron kiinnityksen irtoaminen lattiasta - > nivelakselin katkeaminen	1	2	2	Nivelakseleiden suojaus mekaanisesti, turvaraja voimansiirrosta lattiaan	1	1	1	Turvaraja puuttuu	
18	Sähköperäiset vaaratekijät	Jännitteisten osien kosketus asennuksen aikana.	0	3	0	Ei jännitteisiä osia kosketeltavissa (koteloidut keskukset)	1	1	1	kaappiin mennään avaimilla	
19		Ylikuormitus laitteistossa.	0	3	0	Taajuusmuuttajien momentti- teho- ja virtarajat suojaavat ylikuormitukselta	1	1	1		
20		Ulkoiset vaikutukset, esim.salamat?	1	2	2	Vaikutuksista ei vielä tietoa.	1	1	1		
		Jännitteisten kaapeleiden vioittuminen testin tai asennuksen aikana				suojavaipalliset kaapelit, vioittumisen tunnistaminen -> testin pysäytys. Asennuksen aikana laitteet virrattomina.					Eristysvastusmittaus asennuksen yhteydessä. Ajonaikainen eristysvastusmittaus?
		e-akselin sähkökoneen eristeiden vioittuminen ajon aikana				e-akselin, invertterin ja penkin metalliosien suojamaadoitus					Eristysvastusmittaus asennuksen yhteydessä. Ajonaikainen eristysvastusmittaus?
		e-akselin sähkökoneen oikosulku -> invertterin ylivirta				Invertterin virtarajat				Virtarajat väärin asetettu	
	(jos akkuemulaattori)	invertterin vioittuminen -> akkuemulaattorin ylikuormittuminen				Akkuemulaattorin virtarajat ja mahdollinen sulakesuojaus					
	(jos akkuemulaattori)	Akkuemulaattorin vioittuminen -> ylivirta sähköverkosta				Sulakesuojaus välimuuntajan jälkeen akkuemulaattorin syötössä					
	(jos syöttö ACS800 välipiiristä)	invertterin vioittuminen -> ACS800-välipiirin ylikuormittuminen				Sulakesuojaus ACS800 lähdössä					
		Sähkökatkos -> testipenkin joutuminen hallitsemattomaan tilaan (DC-välipiiri tai HV-akku syöttää osaa järjestelmistä, osa jännitteettömiä)				Testin hallittu pysähtyminen varmistettava (miten?)					

Kuva 4: Havainnekuva riskianalyysityökalusta (Valtra Engineering 2022)

4.1. Merkittävimmät riskit sähköisten järjestelmien testeissä

Testaushuoneessa olevat järjestelmät ovat kehitetty jo aiemmin voimansiirto- ja polttomoottorikäyttöjen testaamiseen ja olemassa oleva riskianalyysi on laadittu näiden perusteella. Sähköisten voimansiirtojen testausjärjestelmien lisääminen tuo mukanaan korkeat jännitteet, joiden kaapelointi ei ole laitekaappien sisällä välttämättä kosketussuojattuna. Sähkökoneen invertterin DC-syöttökaapelointi on tehty kaksoissuojatusta kaapelista, jonka suojavaippa on maadoitettu. Tämä ei kuitenkaan poista täysin riskiä mekaaniselle vauriolle, joka mahdollistaa jännitteisten osien koskettelun.

4.2. Vaatimukset testausta suorittaville henkilöille

Koska sähköiset testit poikkeavat olemassa olevista testausjärjestelyistä merkittävästi jännitteiden osalta, on työturvallisuuden kannalta suositeltavaa, että testejä suorittavilla henkilöillä olisi SFS6002-normin mukainen sähkötyöturvallisuuskortti suoritettuna. Varsinaisesti Valtran laatukäsikirja ei ota kantaa sähkötyöturvallisuuskortin vaatimiseen muilta kuin sähkökunnossapidon asentajilta. Koska sähköisten propulsiojärjestelmien testausta suorittavat henkilöt joutuvat työskentelemään hengenvaarallisia jännitteitä sisältävien laitteiden läheisyydessä, on perusteltua suosittaa laajempaa koulutusta sähkötyöturvallisuudesta.

5. Laitevalinnat laboratoriojärjestelmään

Tässä osiossa käsitellään testausjärjestelmän tehonsyöttöä, kuormitusjärjestelyjä sekä mittalaitevalintoja. Lisäksi käsitellään muita laitevalintoja, jotka eivät varsinaisesti kuuluisi laboratoriojärjestelmään, mutta tässä tapauksessa jako eri osiin tapahtui kustannuspaikan kautta ja siten kuuluivat tämän työn projektiin.

5.1. Invertterin DC-syötön valinta

Sähkökoneen invertterin tarvitsema DC-jännitesyöttö valittiin invertterin datalehden perusteella. Tässä tapauksessa nimellisjännite on 750 VDC sekä 850 VDC maksimitulojännite. Tehontarve taas rajoittui laboratoriohuoneeseen tulevien syöttökaapeleiden kuormitettavuuden perusteella, ja varsinaiseksi rajoitukseksi tässä tapauksessa muodostui syöttökaapelointiin asennettu erotusmuuntaja. ACS800 järjestelmään on sijoitettu syöttöverkon puolelle erotusmuuntaja. Erotusmuuntajalla ABB:n mukaan varmistetaan, etteivät muut kiinteistössä käytettävät sähköjärjestelmät häiriinny sähköjarrun käytöstä aiheutuneista häiriöistä. Tämän erotusmuuntajan vuoksi maksimi kuormitusteho huoneen järjestelmässä rajoittuu noin 200 kW tasolle. Erotusmuuntajan nimellisteho on 240 kVA. Kuva 5 havainnollistaa invertterijärjestelmän syöttöverkon erotusmuuntajaa.

Kuva 5: Erotusmuuntaja ACS800 jarruinvertterjärjestelmän syöttöverkossa (JDa 2022, omat valokuvat)

Testausjärjestelmän laajennuksen suunnitelmissa on erotusmuuntajan tehoa kasvatettava merkittävästi, koska tulevat jarrudynamometrit ovat teholtaan suuremmat ja vaativat siten suuremman poikkipinta-alan myös syöttökaapeloinnilta. Lisäksi moottoritehojen jatkuva kasvaminen sekä testausvaatimuksien monimutkaistuminen aiheuttavat syöttöverkoston tehon kasvatustarpeen. Mahdollisesti usean jarrudynamometrin käyttö esimerkiksi nelivetojärjestelmien kestotestissä lisäävät syöttöverkosta otettavaa tehoa.

5.1.1. Suora DC-syöttö laboratorion jarrujärjestelmän välipiiristä

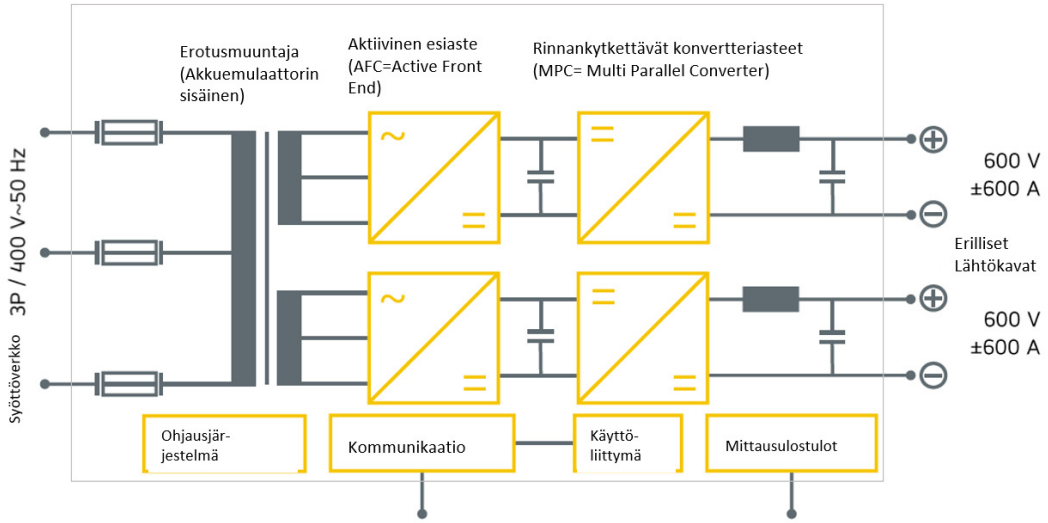
Ensimmäisenä vaihtoehtona oli testausjärjestelmän rakentaminen olemassa olevan järjestelmän lisäosaksi. Huoneessa on käytössä ABB:n ACS800-tuoteperheen taajuusmuuttajajärjestelmä, jota käytetään PTO-jarrun sekä ketjujarrun moottorin ohjaukseen. Järjestelmä sisältää aktiivisen jarrutusenergian sähköverkkoon takaisinsyötön, jolla järjestelmän hyötysuhde saadaan huomattavasti paremmaksi kuin perinteisen pyörrevirtajarrujärjestelmän. Siinä kaikki jarrutusenergia hukataan lämmöksi. Kierrätysjärjestelmän avulla kokonaishäviöiksi jäävät ainoastaan taajuusmuuttajan ja jarrumoottorin häviöt. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi tässä tapauksessa siten, että järjestelmään rakennetaan jatkoskenttä, josta otetaan DC-välipiiristä erillinen lähtö, johon rakennetaan suojausjärjestelmät sekä ulkoiset liitännät DC-kaapeloinnille. Tässä konsultoitiin ABB:n edustajaa, joka hyväksyi alustavat suunnitelmat. Itse DC-syötön rakentaminen oli suoraviivaista sähkömekaanista työtä, joka ulkoistettiin sähköurakointia tekevälle yritykselle.

Tämän järjestelyn hyvinä puolina pidettiin yksinkertaisuutta sekä nopeaa saatavuutta. Myös edullinen hinta oli yhtenä puoltavana valintakriteerinä vielä tässä vaiheessa. Myös maksimikuormitettavuus on kohtalaisen suuri ollen jo tuo edellä mainittu 200 kW. Huonoina puolina on pidettävä rajallista säädettävyyttä. Tämän järjestelmän nimellinen DC-lähtöjännite on noin 600 V. Mahdollinen säätöalue on noin 400 V – 700 V ja säätäminen onnistuu ABB:n hallintaohjelmalla parametreja muuttamalla. Täyttä varmuutta säätöalueen toimivuudesta sekä järjestelmän käyttäytymisestä tilanteessa, jossa jännite säädetään alas ja samalla yritetään ottaa maksimitehot välipiiristä, ei vielä rakennusvaiheessa ollut.

5.1.2. DC-syöttö akkuemulaattorilla

Akkuemulaattoreiden markkinoita tutkittaessa ja valmistajien tarjouskyselyiden perusteella selvisi heti alkuvaiheessa, että laitteiden fyysinen koko vaikeuttaa akkuemulaattorijärjestelmän rakentamista nykyiseen testaushuoneeseen. Akkuemulaattorilla voidaan matkia ajoakun käyttöä sähkökoneen tehonlähteenä (Heinziger, 2020). Vaatimuksena on muun muassa säädettävä jännite ja virranrajoitus, jolla voidaan matkia akun varaustason vähenemistä ajon

aikana. Myös jarrutusenergian talteenotto eli ”regenerointi” on mahdollista akkuemulaattorilla. Ohjausjärjestelmäksi vaaditaan CAN-väylä, koska jarrujärjestelmän ja tiedonkeruun väylän tämä on jo olemassa. Kuva 6 havainnollistaa akkuemulaattorin lohkokaaviota.



Kuva 6: Akkuemulaattorin lohkokaavio (muokattu Heinziger ERS-BIC käyttöohjeesta 2021)

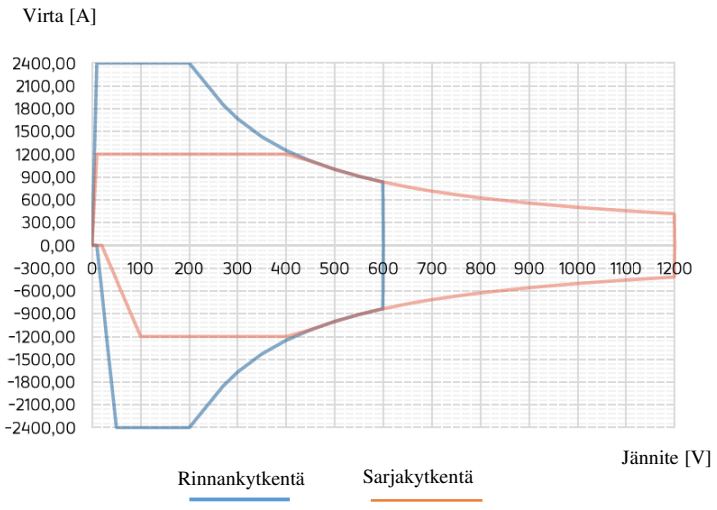
Akkuemulaattorin jännitevaatimuksena pidettiin 800 V jännitettä ja antotehoksi päädyttiin noin 300 kW luokkaan. Toimintamallin testaukseen riittäisi pienempitehoinen malli, mutta tulevia projekteja varten pidettiin tehoreserviä tarpeellisena. Markkinoilta löytyviä akkuemulaattoreita tutkittaessa todettiin, että 800 V jännitetaso on haasteellinen, koska useimmat tutkitut emulaattorit kykenevät 600–650 voltin ulostulojännitteeseen, jolla saadaan suuremmat virrat ulos tai sitten seuraava jännitetaso on n. 1200 V, jolloin antovirta jää pienemmällä jännitetasolla rajoittavaksi tekijäksi.

Tämä yleinen ongelma on peräisin akkuemulaattoreiden toimintaperiaatteesta, jossa syöttöverkon jännite tasasuunnataan ja suodatetaan välipiirin jännitteeksi, jolloin saadaan n. 700 VDC jännite. Tästä jännitteestä saadaan muokattua säädettävä vaihtojännite invertterillä, jolloin lähtöjännitteen huippu jää alle välipiirin jännitteen. Lähtöjännitettä voidaan säätää useissa tutkituissa tuotteissa lähes nollasta maksimijännitteeseen.

Lähtöjännitteen rajalliseen käyttöalueeseen on muun muassa Heinziger suunnitellut oman akkuemulaattoriperheen, jossa modulaarinen rakenne mahdollistaa lähtökanavien rinnan- ja sarjakytkennän. Näin saadaan samasta järjestelmästä 0–600 V suurella antovirralla ja jännitealue 1200 V saakka puolitetulla antovirralla. Järjestelmän nimellisteho rajoittaa antovirtaa jännitteen suhteen, joten suurilla lähtöjännitteillä ei saada samaa antovirtaa ulos kuin pienemmillä jännitteillä. Valinnassa päädyttiin Heinziger ERS-BIC 325 kW:n versioon. Tässä versiossa on optiona mukana rinnan- ja sarjakytkentä, jolla saavutetaan 1200 V jännitteellä tarvittaessa noin 300 A jatkuva virta. Lisäksi järjestelmää voidaan laajentaa lisäämällä moduuleja, joita voidaan kytkeä rinnan, jolloin saadaan antovirtaa kasvatettua. Tällä hetkellä kuitenkin suunnitelmissa on pitäytyä noin 800 V jännitetasoissa

Akkuemulaattorin aktiivinen etuaste ja kaksisuuntainen konvertteri mahdollistavat jarrutusenergian kierrättämisen takaisin verkkoon eli regeneroinnin. Regenerointi ei toimi aivan nollatasoon saakka. Esimerkiksi tutkimuksen kohteena oleva Heinziger ERS-BIC järjestelmän regenerointi toimii noin 50 VDC saakka, mikäli lähtökanavat ovat rinnankytketty, ja noin 100 VDC, jos ajetaan yksikanavaisena.

Kuvan 7 kaaviossa on Heinziger akkuemulaattorin jännite virran funktiona. Kuvasta voidaan havaita regeneroinnin toiminta negatiivisella virralla eli moottorijarrutuksen aikana.

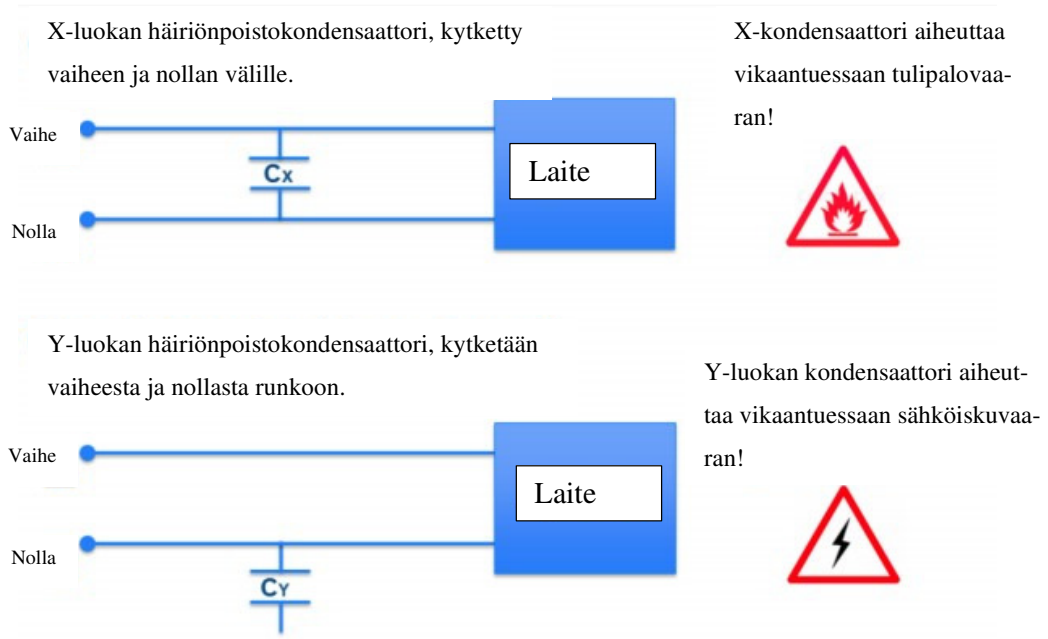


Kuva 7: Heinziger akkuemulaattorin jännite ja virtakäyrät rinnan- ja sarjakytkennässä (muokattu Heinziger ERS-BIC käyttöohjeesta 2021)

5.1.3. Eristysvastuksen valvonta

Akkuemulaattoreissa on käytettävissä eristysvastuksen valvontaa. Eristysvastus tarkoittaa laitteen eristyksen kykyä estää jännitteen vuotoa metalliseen kuoreen, joka suojamaadoituksen puuttuessa voisi muuttua jännitteelliseksi vikatilanteessa. Myös esimerkiksi häiriönpoistokondensaattorit aiheuttavat vuotovirtaa runkoon, vaikka eivät olisikaan vikaantuneet [3]. Normaalissa verkkojännitteeseen kytketyssä laitteessa eristysvastuksen tulisi olla vähintään 1 MΩ.

Tällä arvolla vuotovirta pysyy alle 1 mA arvossa, mitä pidetään arvona, jonka ihminen pystyy aistimaan (Fish et al, 2009). Vastaavasti 16 mA on raja, josta keskiverto ihminen pystyy vielä irrottamaan otteensa. Jos suojamaadoitukset ovat kunnossa, vuotovirrat maadoittuvat tätä kautta ja ainoastaan lämmittävät komponentteja, joiden kautta vuotovirrat syntyy. Suuremmilla jännitteillä vuotovirrat kasvavat, joten niitä on myös tarpeen valvoa, jotta järjestelmän käyttö on turvallista. Kuva 8 esittää x- ja y-kondensaattoreiden kytkentää laitteissa.



Kuva 8: Elektroniikkalaitteissa käytettävät X ja Y häiriönpoistokondensaattorit

Tutkimuksen kohteena olevassa Heinzinger ERS-BIC emulaattorissa on valittavana optiona eristysvastuksen valvonta, joka valvoo jatkuvasti DC-piirin vuotovirtaa suojamaata (PE) vasten. Oletusasetuksella varoituskynnys on < 50 kΩ, ja suojapiirin laukaisukynnys < 25 kΩ. Nämä oletusarvot ovat muutettavissa parametreilla 1 kΩ…10 MΩ välillä. Eristysvastuksen mittaus perustuu järjestelmän sisäiseen toimintaan, jossa kuormaan syötetään muutaman µA:n vuotovirta, joka analysoidaan ja valvotaan mittauksessa tapahtuvia muutoksia [2].

Vikatilanteessa emulaattorin suojauspiiri kykenee katkaisemaan ja purkamaan kondensaattoreiden varauksen kahden sekunnin aikana 1000 V jännitteestä alle 60 V jännitteeseen, mikäli kokonaiskapasitanssi on alle 1 mF. Jännite puretaan sisäisiin nestejäähdytteisiin vastuksiin, joten tämän option käytössä ollessa DC-lähdössä ei saa olla akkuja tai muita ulkoisia jännitelähteitä käytössä.

5.2. Invertterin valinta

Ensimmäinen uudessa testausjärjestelmässä testattava tuote on toimintamalli sähkökoneen ja kaksinopeuksisen voimansiirron yhdistelmästä. Sähkökoneen napaluvun sekä suunnitellun pyörimisnopeuden ja vaihteiston ajonopeuden perusteella päädyttiin invertterin perustaajuuden valinnassa 1000 Hz taajuuteen. Sähkökone vaatii maksiminopeudella 6000 r/min taajuudeksi 800 Hz joten 1 kHz perustataajuus mahdollistaa maltillisen ylinopeustestaamisen.

5.2.1. Danfoss EC-C1200-450-L+MC350+HS

Vastaavia inverttereitä on käytetty Valtran aiemmassa jarruvaunuprojektissa, joten muita valmistajia ei tässä tapauksessa edes harkittu. Vakioversiossa invertterin lähtötaajuus yltää vain 580 Hz taajuuteen, joka ei ensimmäiselle testattavalle toimintamallille riitä. Tällä taajuudella sähkökoneen pyörimisnopeus olisi yltänyt vain 4350 kierrokseen minuutissa. Danfoss datalehdessä (Danfoss EC-C1200-450 Data Sheet, 2022) oli kuitenkin maininta High-Speed-optiosta, jolla antotaajuus yltää 1000 Hz:iin saakka. Tyyppimerkinnässä oleva +HS-merkintä kertoo invertterin sisäisen firmwaren ja komponenttien tukevan tätä korkeampaa antotaajuutta. Tällä taajuudella saadaan toimintamallin sähkökoneen pyörimisnopeudeksi

maksimissaan 7500 kierrosta minuutissa. Tämä riittää tarkoitukseen hyvin, koska nimellinen pyörimisnopeus on 5550 kierrosta minuutissa. Itseasiassa maksimitaajuutta kannattaa rajoittaa, sillä moottorin sallittu maksiminopeus ei yllä 7500 kierrokseen minuutissa. Kuva 9 havainnollistaa kyseisen konvertterin ulkomuotoa.

Kuva 9. Havainnekuva Danfoss EC-C1200-450 Invertteri (Danfoss datalehti 2022)

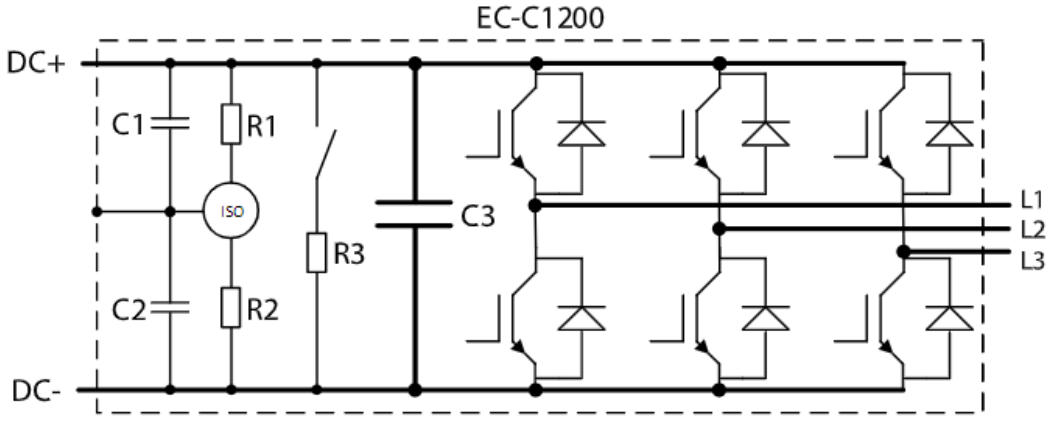
Invertterin teholuokka ja malli valittiin ajettavan sähkökoneen perusteella. Toimintamallisähkökoneen teho on 125 kW. Sen nimellisvirta on kuitenkin korkea, koska moottorin vastajännite on suunniteltu niin, että se ei tasasuunnattuna missään olosuhteissa voi ylittää 1000 V tasajännitetasoa, joka on muun laitteiston ehdoton yläraja. Invertterin valinta suoritettiin ennen kuin varsinaisia mittaustuloksia oli olemassa, joten peruslaskutoimituksilla malliksi valittiin malli MC300. Tämän mallin nimellistehoksi ilmoitetaan 250 kVA ja nimellisantovirraksi 300 A. Tämä osoittautui myöhemmässä vaiheessa hieman liian pieneksi koska sähkökoneen vaihevirrat ylittävät hetkellisesti 300 A. Tästä syystä kesken tilausprosessin vaihdettiin malliksi MC350, joka on muuten vastaava, mutta virtarajaksi muuttui 350 A. Tämä muutos taas aiheutti vaikeuksia tähänkin osioon, koska toimitusajat venyivät merkittävästi alkuperäisestä.

Lisäoptiona valittiin myös DC-syöttökaapeleiden tuplaliitäntä (+DC-extension). joka mahdollistaa tulokaapeleiden kahdentamisen, mikäli rinnalle halutaan kytkeä toinen invertteri tai tulokaapelin pinta-ala ei jostain syystä olisikaan riittävä.

Tietoliikennerajapintana testaushuoneen Labview-ohjausjärjestelmässä käytetään SAE J-1939 normin mukaista liitäntää, joten myös invertterin liitäntäoptioksi valittiin kyseinen liitäntä.

Invertterin tulojännitteen (HV-side voltage) maksimiarvoksi Danfoss ilmoittaa 850 VDC ja nimellisjännitteeksi 750 VDC.

Tällöin tulojännitteen ollessa 800 VDC, on välipiirin jännite myös (DC-link) 800 VDC. Välipiirin jännitteestä invertterin lähtöaste muodostaa kolmivaiheisen tehollisarvoltaan enintään 560 V vaihtojännitteen, jolla sähkökoneen staattori saa roottoria pyörittävän magneettikentän muodostettua. Alla olevassa periaatekuvassa (Kuva 10.) on invertterin sisäinen päävirtapiirin kytkentä, jossa näkyy tulopuolen suodatuskomponentteja sekä eristysvastuksen valvontamittaus. Kuvassa C3 edustaa välipiirin energiavarastona toimivaa kondensaattoripatteristoa. Myös invertterin pääteasteen IGB-transistorit (6 kpl) näkyvät kuvassa sekä IGB-transistorien sisäiset vapaakiertodiodit. Ilman kyseisiä diodeja IGB-transistorit vaurioituisivat, kun transistori ohjataan pois päältä ja moottorin magneettikenttään varastoitunut energia jatkaa moottorivirran kulkua. Jos se yritetään väkisin katkaista, aiheutuu siitä niin korkea jännitepiikki transistorille, että sen jännitelujuus pettää. Ilman vapaakiertodiodeja IGBT hajoaisi ensimmäisen sytytyksen yhteydessä.



Kuva 10: EC-C1200-450 Invertterin sisäinen periaatekytkentä (Danfoss Datalehti 2022)

5.3. Invertterin syöttö- ja välikaapeleiden mitoitus

Kaapeloinnin suunnittelu invertterin tulo- ja lähtöpuolelle edellyttää jännitekestoltaan parannettua suojattua kaapelia. Lisäksi kaapelin häiriösuojaus on tarpeen EMC ja EMI-vaatimusten täyttämiseksi. Toimitusaikataulun puitteissa kaapelivalmistaja Huber Suhnerin Radox-tuotevalikoimasta löytyi ajoneuvokäyttöön suunniteltua FHLR4GC13X-kaapelia, jonka käyttökohteita ovat sähkökäytöt sekä taajuusmuuttajakäytöt. Kaapelin tunnusvärinä on oranssi, jota käytetään ajoneuvojen hybridi- ja sähkökäyttöjen yhteydessä, kuva 11 esittää kyseisen kaapelin rakennetta.

RADOX® suojattu FLEX yksijohtiminen kaapeli (FHLR4GC13X)

Johtimien lukumäärä 1

Poikkipinta-ala 16-120 mm^2

Jännite 1000 VAC/1500 VDC

Käyttölämpötila-alue -55 … 150 °C

Minimitaivutussäde, 3x kaapelin ulkohalkaisija

1. Johdin, hienosäikeinen paljas kuparijohdin ISO rakenne C (joustava)
2. Teippi, (muovia)
3. Eristys, RADOX 155 (4G)
4. EMC vaippa, tinapäällysteinen optimoitu kuparipunos
5. Teippi, muovia (PEC)
6. Päällys, RADOX elastomeeriä S (13X), väri oranssi
7.

Kuva 11: Havainnekuva ajoneuvokäyttöön suunnitellusta suurjännitekaapelista (muokattu Radox datalehdestä 2022)

Kaapelin mitoitukselle ei etsinnöistä huolimatta löytynyt invertterin tai kaapelin valmistajalta varsinaista ohjetta. Kaapelin maksimikäyttölämpötilaksi datalehti sallii jopa +150 °C, mutta käyttöiän kustannuksella. Mitoitukselle valittiin sallituksi jännitealenemaksi 2 %, joka alittui valitulla 70 mm^2 kaapelin poikkipinta-alalla. Virrantiheydeksi tällä poikkipinta-alalla tulee 5 A/mm^2, jota voinee pitää maltillisena tälle kaapelityypille. Jännitehäviön laskennassa käytettiin huonointa tilannetta, jossa invertterin syöttöjännite on alhainen ja kuormitusteho ylittää nimellistehon. Ohmin laki kuuluu

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \tag{1}$$

Syöttökaapelien resistanssi lasketaan pituuden, johdinmateriaalin ja pinta-alan perusteella kaavalla (1). Siinä ρ on resistiivisyys, joka kuparille on $1.72 \cdot 10^{-8}$[Ωm] 20°C lämpötilassa. Kaapelin pituus on ”l” metreinä sekä ”A” kaapelin poikkipinta-ala neliömetreinä. Koska kaapeli lämpenee käytettäessä ja testihuoneen lämpötilaa nostetaan keinotekoisesti, kuparin resistiivisyys muuttuu lämpötilan funktiona.

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \tag{2}$$

Kaavalla (2) lasketaan resistiivisyys korkeammassa lämpötilassa. Kuparille ilmoitettu lämpötilakerroin on $3.93 \cdot 10^{-3}$.

Edellä esitettyihin kaavoihin sijoittaen saadaan 25 m syöttökaapeleiden resistanssiksi 7 mΩ. Ympäristön ja kaapelin yhteislämpötilaksi on oletettu laskennassa 70 °C. 25 m pituus sisältää 12.5 metrin + ja – kaapelit. Kaapeli sijoitetaan kaapelihyllyihin, mikä vähentää kaapeleiden mekaanista rasitusta ja parantaa työturvallisuutta. Kaapeli myös jäähtyy paremmin koska ympäröivä ilma pääsee paremmin jäähdyttämään kaapeleita.

Syöttöjännitteen ollessa 400 V ja kaapeleiden kuormituksen 200 kW saadaan syöttökaapeleiden tehohäviöksi 1837 W, josta saadaan lähes 75 W/m, mikä on korkea arvo. Jännitehäviö kaapelissa ~3.7 V ja prosentuaalisesti 0.92 %. Tehohäviö vaikuttaa suurehkolta, mutta todellisessa jatkuvassa käyttötilanteessa käyttöjännite on noin 700 VDC ja suunniteltu jatkuva kuormitus noin 150 kW. Tässä tilanteessa laskennallinen tehohäviö on 337 W (13.5 W/m) ja jännitehäviö vastaavasti noin 1.6 V (0.23 %). Tästä syystä myös pisimmät tulokaapelit suunniteltiin kahdennettavaksi, jolloin kaapelihäviöt puolittuvat.

5.4. Tehoanalysaattorin valinta

Tehoanalysaattorin valinnassa oli tavoitteena löytää ominaisuuksiltaan riittävä mittalaite, jota voidaan päivittää myöhemmin, jos havaitaan lisätarpeita mittauksille. Myös saatavuus vaikuttaa valintoihin, koska tällä hetkellä useilla mittalaitevalmistajalla on vaikeuksia saada komponentteja, mikä vaikuttaa hintaan sekä toimitusaikatauluihin.

Testausjärjestelmän vaatimusmäärittelyjen perusteella päädyttiin vähintään kuuteen mittauskanavaan sekä kahteen J1939 mukaiseen CAN-väylään. Tehoanalysaattori tarvitsee virta- ja jännitemittauksiin mittakanavat, joihin jännitemittaus saadaan kytkeä suoraan, mutta virranmittaukset tarvitsevat avukseen virtamuuntajat, joiden läpi kaapeli, jonka virtaa halutaan mitata, asennetaan.

Virtamuuntajan etuna on myös galvaaninen erotus, koska varsinainen virtasignaali ei kulje mittalaitteen sähköisten komponenttien kautta. Virtamuuntajat valitaan mitattavan virran sekä taajuuden (kaistanleveyden) mukaan. Lisäksi on muita toimintoja, jotka vaikuttavat valintaan, kuten esimerkiksi automaattinen tunnistus mittalaitteella. Perinteinen virtamuuntaja ei kuitenkaan toimi nollataajuudella, joten tähän tarkoitukseen tarvittaisiin esim. Hall-ilmiöön perustuvia mitta-antureita.

5.4.1. Yokogawa PX8000

Yokogawan tehoanalysaattoriin tutustuttiin LUT:n laboratoriossa, jossa heillä oli kyseinen malli mittauskäytössä. Laite on modulaarinen eli sen mittauskorttikokoonpanoa voidaan muuttaa tarvittaessa. Mittauskanavia voidaan laitteeseen lisätä 8 kappaletta (BUPX8000 Datalehti, 2019) mutta tehomittauskanavia ainoastaan 4 kpl koska jännite- ja virtamoduulit ovat erillisiä ja varaavat siten aina kaksi laajennusaukkoa. Mittauskanavat ovat 12 bittisiä ja jännitetulojen mittausalue yltää 1000 Vrms saakka. 12-bit näytteistys mahdollistaa A/D-muuntimelle 4096 porrasta, joten jännitemittauksen maksimierottelukyky voi olla noin 250 mV 1000V alueella.

Virtamittauskanavien suora mittausalue yltää 5 A arvoon, mutta niitä ei yleensä käytetä, vaan erilliset virtamuuntajat kytketään erilliseen virtamuuntajatuloon. Maksiminäytteis-

tykseksi datalehdellä ilmoitetaan 100 MS/s. Harmonisten yliaaltojen FFT-mittauksessa Yokogawa kykenee esittämään esimerkiksi 1 kHz perustaajuuden harmoniset 255 kertalukuun saakka datalehden perusteella.

Yokogawan spesifikaatioiden perusteella ei havaittu, että laitteeseen olisi mahdollista saada kahta J1939 protokollan mukaista CAN-väylää yhtäaikaisesti käyttöön. Lisävaatimuksena oli myös vähintään kuuden tehomittauskanavan käyttömahdollisuus. Lisäksi laitteen pääedustajaa ei löytynyt Valtran hyväksyttyjen toimittajien listalta, joten valinta jouduttiin kohdistamaan eri merkkiin.

5.4.2. Dewesoft Sirius i-HS-8xHV

Toisena merkkinä valintatesteihin otettiin Dewesoftin Sirius-sarjan tehoanalysaattori. Yrityksen käytössä on tältä valmistajalta useita muita mitta- ja tiedonkeruulaitteita, joten hankintakanavat ja tuotetuki olisivat jo valmiiksi kunnossa. Sirius-järjestelmän laajennettavuus on erinomainen koska valmistajan omat väyläliitännäiset tiedonkeruujärjestelmät ovat suoraan yhteensopivia ja valikoista löytyykin suoraan kaikki valinnat.

Dewesoftin tuotteet perustuvat suureen laskentatehoon (Dewesoft Sirius Datalehti, 2022) ja tässä sitten onkin se ehkä negatiivinen puoli. Laitteen käyttöliittymässä itsessään ei ole kaikkea valmiina tehoanalysaattorikäyttöön vaan käyttöliittymään valitaan tarvittavat ominaisuudet. Tämä taas ei välttämättä ole käyttöä helpottava ominaisuus, jos käyttö ei ole jokapäiväistä. Kolmen henkilön käyttötestien perusteella käyttö ei ollut aivan suoraviivaista. Kuvassa 12 on esimerkki Dewesoftin tehoanalysaattorin käyttöliittymästä, jota on muokattu siten että näkyvissä on muitakin tietoja.

Kuva 12: Havainnekuva Dewesoft Sirius analysaattorin käyttöliittymästä

Dewesoftin datalehden perusteella laitteeseen voi liittää 8 kappaletta kolmivaihemoottoreita kerralla. Jännite ja virtamittaustulot ovat 16-bittisiä, mikä lisää mittaustarkkuutta. Peruslaitteen näytteenottotaajuudeksi on ilmoitettu 15 MS/s joka vaikutti pienehköltä verrattuna pelkästään tehoanalysaattoriksi valmistettuihin tuotteisiin. Kaistanleveydeksi ilmoitettiin sama 5 MHz kuten esim. Yokogawalle. Osa valintaan vaikuttaneista henkilöistä tuli siihen tulokseen, että tarvitaan vielä ainakin kolmas vaihtoehto ennen lopullista valintaa.

5.4.3. HBM(HBK) 1-EDRV-6P-4T

Kolmantena vaihtoehtona tutkittiin HBM:n tuotetta, joka valmistajan mukaan on suunniteltu sähköpropulsiojärjestelmien tutkimukseen ja tuotekehitykseen. Myös tämän valmistajan järjestelmistä on yrityksessä runsaasti käyttökokemuksia ja myös tuotetuki ja saatavuus oli taattu. Datalehtien (HBM eDrive Power Analyzer, 2022) mukaan tässä laitteessa mittauskanavat ovat 18-bittiset, joilla saadaan esimerkiksi jännitealueen tarkkuutta parannettua. Lisäksi valittavana on kaistanleveydeksi 50 Mhz ja näytteistykseksi valittavana 250 MS/s. Tulojännitealueeksi luvataan 1000 V tai 1500 VDC. Tarkkuudeksi tehonmittauksiin valmistaja ilmoittaa 1 kHz taajuudella 0.075 %. Myös taajuustuloihin kytkettävien nopeus- ja vääntömomenttiantureiden liitännän tarkkuuden HBM väittää olevan noin kymmenkertainen muiden valmistajien tarkkuuksiin verraten (0.004 %-0.0005 %).

Laitteen optioina oli mahdollisuus valita kaksi J1939-liitäntää, Ethercat sekä muita mahdollisia kommunikaatioväyliä. Myös sähkökonetestaukseen valittu HBM:n vääntömomenttianturi käy suoraan analysaattoriin ja sen asetukset tunnistautuvat automaattisesti oikeiksi.

Laitteen koko mahdollistaa myös liikkuvan kaluston mittaukset, koska mittalaitteen käyttöliittymänä toimii normaali kannettava tietokone.

5.5. Virtamuuntajat mittausjärjestelmään

Virtamuuntajien valinnassa olennaista on mittaustarkkuus kyseiselle mitattavalle signaalille. Ei ole järkevää valita tarpeettoman suuren mittausalueen virtamuuntajia varmuuden vuoksi. Virtamuuntajat on yleensä porrastettu valmistajien valikoimissa mitattavan maksimivirran perusteella. Esimerkiksi, jos mitattava virta on luokkaa 300 A, ei ole suotavaa valita 2000 A mittaukseen kykenevää virtamuuntajaa.

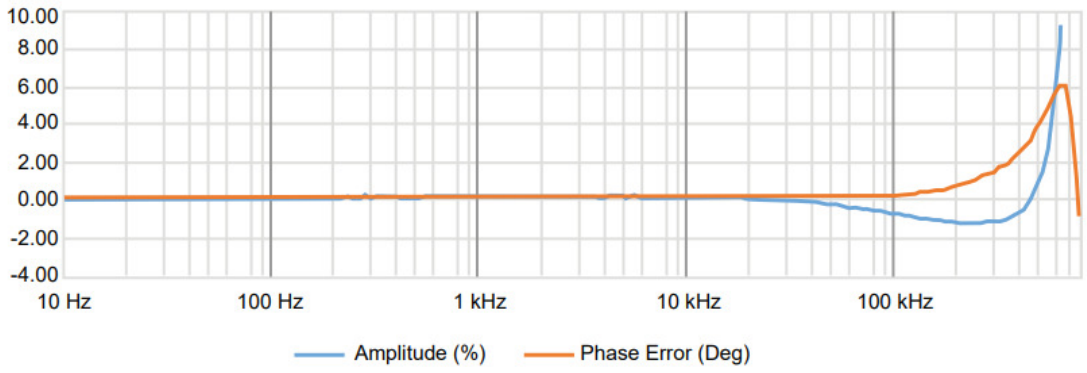
Koska tehoanalysaattorin valinnassa päädyttiin HBM:n hankintaan, olikin selkeintä valita käytettävät virtamuuntajat samalta valmistajalta. Mitattavien virtojen ollessa noin 300–350 A, vaihtoehtoina oli 600 A tai 400 A virtamuuntajatyyppi. 400 A versio sallii maksimivirraksi AC-signaalilla 400 Arms ja DC-käytössä ±600A. Kaistanleveys 400 A mallilla on 300 kHz (-3dB).

Virtamuuntajan kaistanleveys rajoittaa mitattavan signaalin taajuuskaistaa, eli tässä tapauksessa yli 300 kHz mitattavat signaalit vääristyvät merkittävästi. Jos esimerkiksi 1 kHz perustaajuuden tutkittavassa signaalissa on harmonisia yliaaltoja niin virtamuuntajan puolesta pitäisi vielä kolmannensadan kertaluvun mittaus onnistua teoriassa. Tutkimuksessaan A. Cataliotti (A. Cataliotti et al. 2008) toteaa kuitenkin, että virtamuuntajat voivat aiheuttaa suuria epävarmuuksia harmonisten yliaaltojen mittauksessa, jos tutkittavan yliaallon jännitteen ja virran vaihe-ero lähestyy ±90°.

Danisense (Buerger, Roland, 2022), joka on valmistanut myös HBM:n nimellä myytävät virtamuuntajat, kertookin omissa tutkimustuloksissaan, että valmistajat eivät mielellään paljasta mittaustuloksiaan omista virtamuuntajistaan luvatun kaistanleveyden ulkopuolella. Mittaustuloksessa saattaa olla suuria heittoja johtuen virtamuuntajan resonanssipiikeistä.

Kuva 13 selventää taajuusvastetta kyseisen CTS400ID mallin osalta. Taajuusvasteessa voidaan havaita amplitudivirheen ja vaihevirheen merkittävä muutos jo noin 100 kHz jälkeen.

Harmonisten yliaaltojen tutkimuksissa pitäisikin ehdottomasti rajoittaa taajuusalue luvatun kaistanleveyden alapuolelle mittaustulosten virheellisyyden minimoimiseksi.



Kuva 13: Havainnekuva CTS400ID virtamuuntajan taajuusvasteesta

Käyttöön valitun CTS400ID virtamuuntajan muuntosuhde on 1:2000 ja valmistajan ilmoittama lineaarisuusvirhe on 1.5 ppm, joka on ilmoitettu nimellisvirralla (DC). Toisaalta pitäisikin puhua virtamuuntimesta koska ”muuntaja”-sana viittaisi vaihtovirralla toimivaan komponenttiin. Kuitenkin myös valmistajan edustajat puhuvat ”virtamuuntajista” koska kyseinen nimitys on vakiintunut yleiskieleen. Kuva 14 esittää valitun virtamuuntajan ulkonäköä.

Kuva 14: Havainnekuva virtamuuntajasta

5.6. Voitelu ja jäähdytyspiiri testattavalle sähkökoneelle sekä invertterille

Sähkökoneen ja vaihteiston jäähdytykseen käytetään voiteluöljyä. Koska sähkökone ja vaihteisto sijaitsevat samassa kotelossa, voidaan käyttää samaa öljykiertoa molemmille. Voiteluöljy, joka voitelee alennusvaihteena toimivaa planeettapyörästöä, jäähdyttää myös staattorikäämitystä ja roottoria. Voiteluaineena käytetään Valtran XT60+ vaihteistoöljyä ainakin alkuvaiheessa.

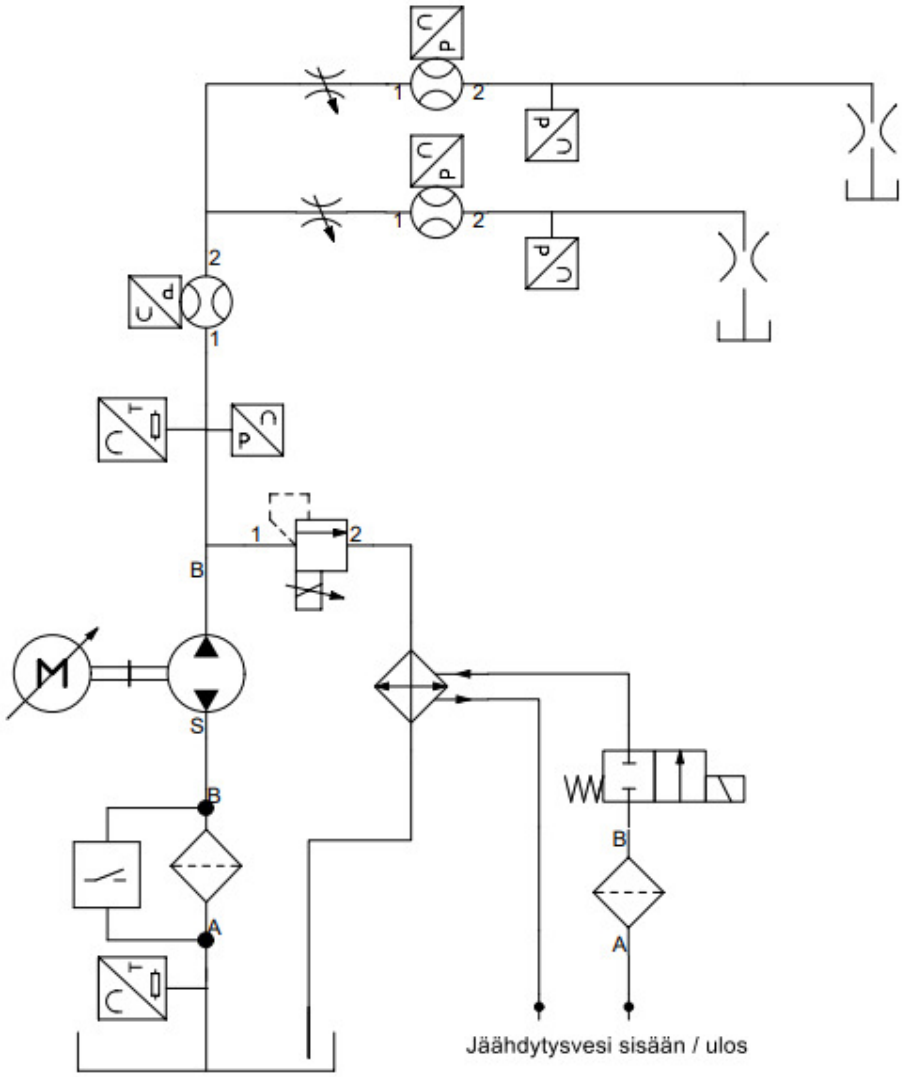
5.6.1. Erilliset voitelupiirit sähkökoneelle

Voitelupiiri joudutaan kahdentamaan, koska halutaan tutkia voitelun ja jäähdytyksen riittävyyttä eri ajotilanteissa. Tarvitaan erilliset säädettävät virtaukset vaihteiston voiteluun sekä sähkökoneen voiteluun. Tuotekehityksen valmiita hydraulikoneikkoja pyritään hyödyntämään mahdollisimman pitkälle, ettei tarvitsisi montaa eri laitetta rajallisissa tiloissa säilyttää.

Voitelu- ja jäähdytyskiertoon tarvitaan öljysäiliö, josta öljy pumpataan säädettävällä sähkömoottorikäyttöisellä hydraulipumpulla suodattimen läpi kiertoon. Sähkömoottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, jonka ohjaus tulee laboratorion LabView -tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmältä. Voitelupiirit varustetaan lämpö- ja painekompensoiduilla kuristimilla, joilla saadaan erilliset voitelupiirit säädettyä eri virtauksille. Tällä saadaan samasta kierrosta tehtyä eri piirit, jotta erillisiä pumppuja ja moottoreita ei tarvita. Sähkökoneen ja vaihteiston öljysuuttimien kokoa muuttamalla voidaan kyseisen piirin paineeseen vaikuttaa. Jokainen haara, johon tulee erillinen kuristin, varustetaan paine- ja virtausantureilla, jotka kytketään tiedonkeruujärjestelmään. Tässä käytetään analogisella virtasilmukkalähdöllä (4-20mA) varustettuja antureita, jotka ovat yhteensopivia mittausjärjestelmän analogisten tulojen kanssa.

Hydraulikoneikko varustetaan öljy-vesilämmönvaihtimella, jonka avulla säiliössä oleva öljyvarasto pyritään saamaan vakiolämpöiseksi. Öljysäiliön jäähdytyskiertoa voidaan säätää hydraulipumpun tuottoa muuttamalla ja painerajan kautta lämmönvaihtimelle kiertävän öljyn määrää säätämällä. Myös lämmönvaihtimelle tulevaa vesikiertoa voidaan säätää ohjausjärjestelmällä, jolla se myös tarvittaessa suljetaan kokonaan.

Jäähdytys- ja voiteluöljy poistuu testattavasta sähköakselista painovoimaisesti vapaiden poistoaukkojen kautta, joten paluusuodatinta ei voitelukiertoon voi laittaa. Öljyn viskositeetin takia öljy ei valuisi kunnolla suodattimen läpi, vaan kertyisi sähkökoneen tai vaihteiston sisälle aiheuttaen öljyn vatkaantumista vaahdoksi. Ylimääräinen öljy huonontaa myös sähkökoneen ja vaihteiston hyötysuhdetta merkittävästi. Kuva 15 esittää järjestelmän hydraulikaaviota.

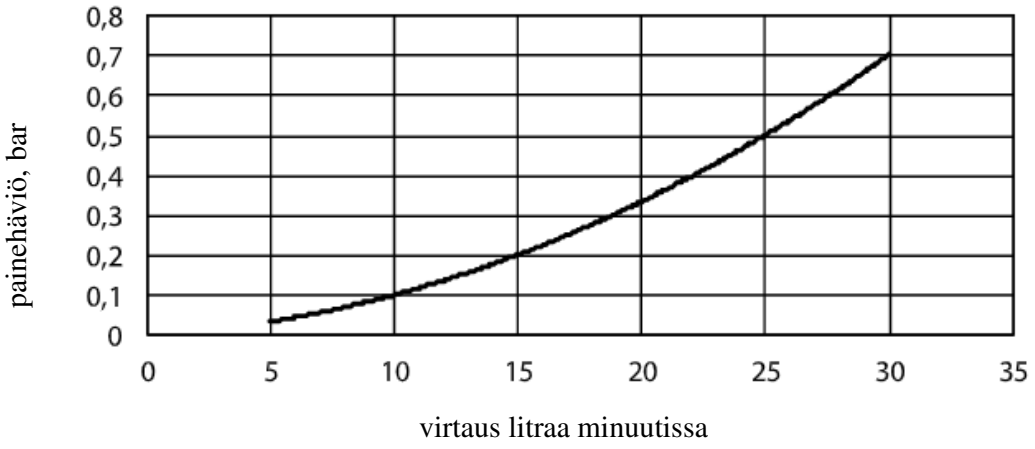


Kuva 15: Voitelukoneikon hydraulikaavio. Öljyä ohjataan sekä moottorin jäähdytykseen että vaihteiston voiteluun. Osa öljystä palautuu suoraan lämmönvaihtimen läpi tankkiin.

Tarvittava öljyn virtaus laskettiin XT60+ öljyn ominaisuuksien perusteella ja öljyn tavoitelämpötilan ollessa n. 70 °C tilavuusvirtaa pitää olla noin 10 l/min. Tämä tieto pohjautuu oletukseen, että tutkittavan sähkökoneen hyötysuhde olisi n. 96 % ja häviöteho 5.2 kW. Käytettävissä oleva sähkömoottorin ja hydraulipumpun yhdistelmä kykenee 60 l/min tuottoon ja noin 20 barin paineeseen pyörimisnopeudella 1500 r/min. Sähkömoottorin nimellisteho on 3 kW. Näillä oletusarvoilla saadaan ylimääräinen hydraulipumpun tuotto ajettua tarvittaessa lämmönvaihtimeen. Tarvittaessa koneikkoa voitaisiin muuttaa siten, että lämmönvaihdin on sarjassa pääkierron kanssa, mutta silloin lämpötilan säätö on hankalampaa, koska tilavuusvirta lämmönvaihtimen läpi jäisi pienemmäksi.

5.6.2. Jäähdytyspiiri invertterille

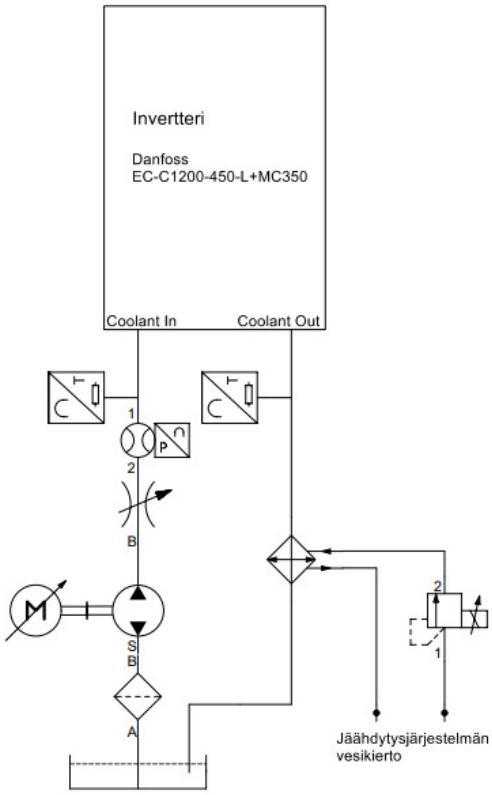
Danfossin invertteri, kuten muidenkin valmistajien vastaavat tuotteet, vaativat tässä teholuokassa jo nestekiertoon perustuvan jäähdytyksen. Valitun invertterimallin jäähdytysnesteen maksimilämpötilaksi Danfoss ilmoittaa +65 °C ja nesteenä voidaan käyttää pelkkää vettä tai vesi / glykoliseosta. Minimivirtaukseksi ilmoitetaan 10 l/min ja maksimipaineeksi 2 bar. Kuva 16 esittää invertterin jäähdytyspiirin painehäviötä virtauksen funktiona.



Kuva 16: Danfoss EC-C1200-450 invertterisarjan jäähdytysnesteen painehäviö vs. virtaus

Jäähdytysvaatimukset ovat varsin maltilliset ja invertterin jäähdytyskierto saadaan järjestettyä laboratorion olemassa olevaa jäähdytyskiertoa hyödyntämällä. Suljettu kierto on kuiten-

kin tutkimusmielessä tarpeellinen, joten jäähdytysnestettä kierrätetään omalla pumpulla suljetusta säiliöstä. Pumpun virtausta voidaan säätää ja ensiökierrossa on lämpötilakompensoitu kuristin, mikäli kiertoa on tarpeen haaroittaa mahdollisesti muille invertereille. Kuristimella saadaan virtaukset säädettyä tasapainoon kaikille laitteille. Myös lämpöanturit invertterin tulo- ja lähtöpuolelle antavat lisätietoa tiedonkeruujärjestelmään kuinka paljon lämpöä siirtyy invertteristä nesteeseen. Myös virtausanturin tieto ja pumpun ohjaus tulee testaushuoneen tiedonkeruujärjestelmästä. Kuvassa 17 esitetään invertterin jäähdytyspiirin kaaviokuva.



Kuva 17: Invertterin jäähdytysvesikierron kaaviokuva

5.7. Vaihteensiirtäjän ohjausyksikkö

Tämän diplomityön yhtenä osa-alueena oli myös sähkömagneettisen vaihteensiirtäjän ohjaimen sekä sen oheiskomponenttien kotelointi ja johdotus. Ohjaimena käytettiin Itävaltalaisen B&R-yhtiön valmistamaa X90 Mobile ohjainta. X90 perustuu Cortex-A9-300 mikrokontrolleriin, ja se on suunniteltu erityisesti ajoneuvokäyttöön, kuva 18 havainnollistaa ohjaimen ulkonäköä.

Kuva 18: B&R X90CP174.48-00 ohjain (B&R X90 käyttöohje 2022)

Ohjaimella ohjataan kahta erillistä H-siltaa, jotka toimivat virtavahvistimina vaihteenvaihtajan keloille. Ohjaimen ohjelmistokehitys ei kuulunut tämän työn piiriin. Ohjaimelle kytketään myös vaihteenvaihtajan kolme induktiivista anturia, joilla vaihteen paikkatieto kerrotaan ohjaimelle. Lisäksi sähkökoneen nopeustieto, vaihteiston planeetankannattimen kulma-asento, pyörimisnopeus ja suuntatieto kytketään myös tälle ohjaimelle.

Vaihteenvaihtajassa on kaksi kuparikäämiä, joilla planeettavaihteen lukitusrengasta ohjataan. Renkaan liike eri suuntiin saadaan aikaiseksi jännitteen napaisuutta vaihtamalla molemmissa käämeissä, jolloin toinen käämi ”vetää” ja toinen ”työntää”. Rengas saadaan pysäytettyä keskiasentoon eli vapaalle tai synkronointiasentoon. Keskiasentoon pysäyttäminen tapahtuu ohjauskäämien jännitteiden kytkennällä siten, että molemmat käämit ”työntävät” rengasta.

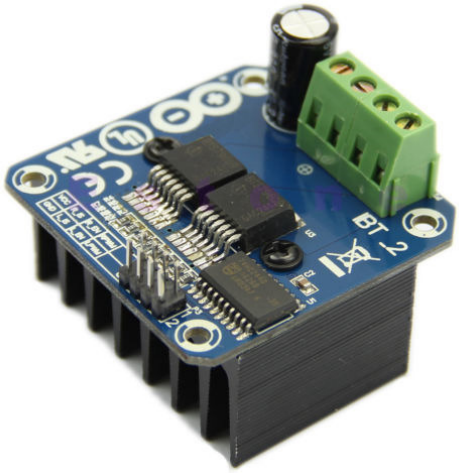
Ensimmäisissä mittauskokeiluissa vaihtajaa on ohjattu mekaanisesti keinukytkimillä. Laskennallisesti vaihteenvaihtajan käämien pitäisi ottaa 40 A virta 12 V jännitteellä.

Vaihteenvaihto on saatava vakioiduksi ja automaattisesti toimimaan pyörimisnopeuden suhteen. Tällöin tarvitaan sähköinen ohjaus vaihteenvaihtajan käämeille. Koska jännitteen napaisuutta on voitava vaihtaa, perinteinen ohjaus kytkintransistorilla tai MOSFETeillä ei ole mahdollista. Lisäämällä kytkinkomponenttien määrää neljään saadaan aikaiseksi H-silta, jolla napaisuutta voidaan tarvittaessa kääntää.

Koska tarkoitus oli kehittää vaihteistonohjainlaite testauskäyttöön, oli yritettävä pysyä kaupallisissa tuotteissa. Piirilevysuunnittelu ja komponenttien valinta oman H-sillan kehitykseen ei ollut tämän työn tarkoituksena. Elektroniikkaliikkeistä löytyikin tarkoitukseen sopiva valmis H-siltamoduuli, jonka hinta ja saatavuus olivat aikarajojen puitteissa. Kyseinen moduuli löytyy muun muassa Partcon valikoimista.

Mallimerkinnältään IBT-2 (Kuva 19) oleva H-silta on toteutettu BTS7960 puolisiltapiirillä, joka löytyy puolijohdevalmistaja Infineonin valikoimista. Koska komponentin rakenne on tyypiltään puolisilta, sitä tarvitaan kaksi kappaletta täyden H-sillan tekemiseen. BTS7960 sisältää P-kanavaisen MOSFETin yläpuolisena ohjaimena (Highside) ja N-kanavaisen MOSFETin alapuolisena ohjaimena. Lisäksi näissä komponenteissa on myös sisäinen suojadiodi suojaamaan induktiivisen kuorman aiheuttamalta jännitepiikiltä. Komponentin muita hyviä ominaisuuksia ovat monipuoliset suojaukset, kuten ylilämpö, ylivirtasuojaus sekä oikosulkusuojaus.

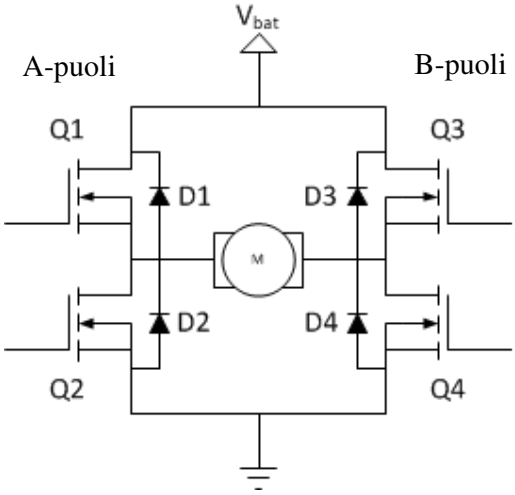
BTS7960 piireihin perustuvan IBT-2 moduulin virtakestoksi luvataan 43 A ja sen $R_{DS(on)}$ resistanssiksi ilmoitetaan 7 mΩ (High side) ja 9 mΩ (Low side). Täydellä kuormituksella jännitehäviöksi MOSFETteihin jää siis noin 0.7 V, joka tekee tehohäviönä 30 Wattia. Tämä vaikuttaa suurelta ottaen huomioon jäähdytysprofiilin koon, mutta tässä sovelluksessa kytkinten käyttöaika on alle 100 ms vaihteenvaihdon aikana, joten todellista lämpenemisvaaraa ei ollut. Tämä myös havaittiin koekäytön aikana, jolloin alustavana kestotestinä ajettiin vaihteenvaihtoa edestakaisin kahden sekunnin välein yhtäjaksoisesti parin tunnin ajan. IBT-2 moduulin kytkinfetit pysyivät huoneenlämpöisenä koko testijakson aikana.



Kuva 19: IBT_2 H-siltamoduuli

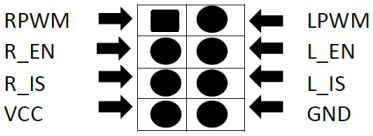
Koska H-sillan toimintaperiaatteeseen kuuluu ylä- ja alapuolisten kytkinkomponenttien samanaikainen ohjaus siten, että aina toinen yläpuolinen ja toinen alapuolinen komponentti johtaa ja ohjattava kuorma kytketään ristikkäisten komponenttien väliin, muodostuu kytkennästä H-kirjainta muistuttava kytkentä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 20) kuormana oleva moottori pyörii, jos Q1 ja Q4 johtavat. Vastaavasti jos Q2 ja Q3 johtavat, pyörimissuunta vaihtuu. Myös moottorijarrutus onnistuu, jos Q1 ja Q3 tai Q2 ja Q4 suljetaan.

H-siltaa käytettäessä on syytä varmistua ohjauksen toimivuudesta, ettei jouduta tilanteeseen, jossa sekä ylä- että alapuolen kytkinkomponentti menisivät johtavaksi samanaikaisesti. Tällöin on kyseessä suora oikosulku syöttöjännitteen ja maan välillä ja jos suojaukset eivät toimi kunnolla, tässä tilanteessa on seurauksena komponenttien tai piirilevyn johtimien tuhoutuminen.



Kuva 20: H-sillan periaatekytkentä

IBT-2 moduulin ohjaus tapahtuu J3-liittimen liittimien kautta. Kuva 21 esittää J3-liittimen-pinnijärjestyksen ja pinnien toiminnot. Koska IBT-2 on tarkoitettu eri mikro-ohjaimilla tehdyille kehitysalustoille, sitä ohjataan TTL-tasoisilla ohjauksilla. Ohjausnastoja on 8kpl, joita tosin ei tarvita kaikkia, että ohjaus saadaan toimimaan. Ehdottoman tärkeää on, että kaikki ohjausjännitteet pysyvät alle 6 voltin kaikissa tilanteissa.

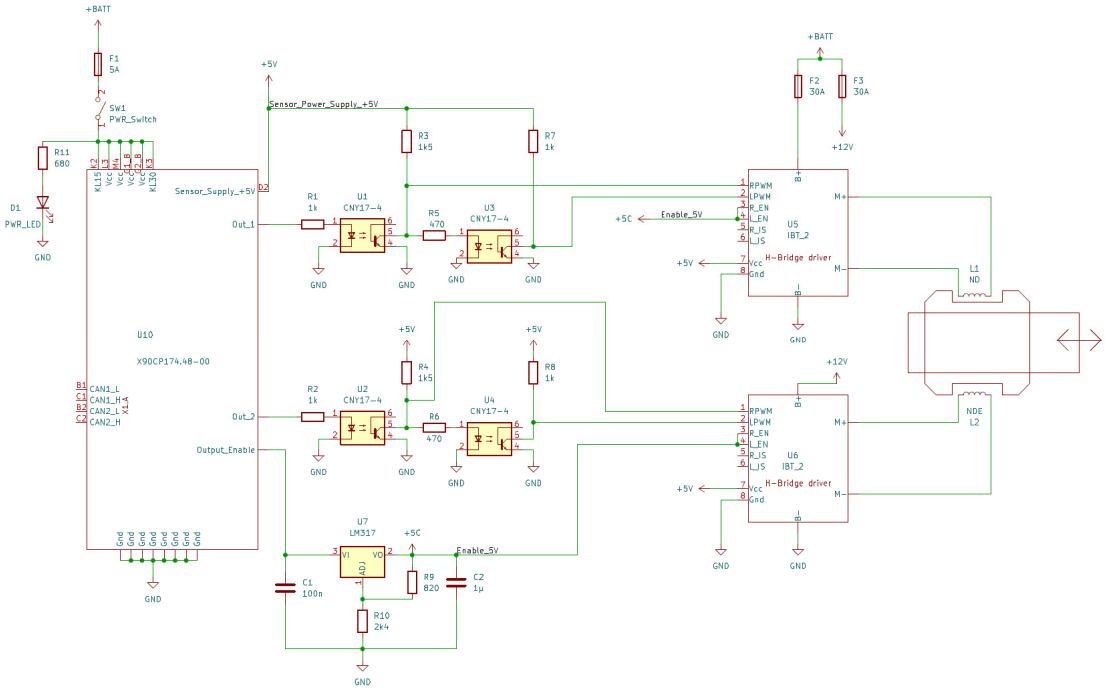


1	RPWM	Eteenpäin, pulssinleveysmodulaatio-ohajus, ylhäältä aktiivinen
2	LPWM	Taaksepäin, pulssinleveysmodulaatio-ohjaus, ylhäältä aktiivinen
3	R_EN	Eteenpäin-toiminnon aktivointi, ylhäältä aktiivinen, alhaalla suljettu
4	L_EN	Taaksepäin-toiminnon aktivointi, ylhäältä aktiivinen, alhaalla suljettu
5	R_IS	Eteenpäin-kytkennän virtamittaussignaali, virtarajoituksen hälytys
6	L_IS	Taaksepäin-kytkennän virtamittaussignaali, virtarajoituksen hälytys
7	VCC	IBT-2 moduulin käyttöjännite, +5V
8	GND	IBT-2 moduulin käyttöjännitteen maa

Kuva 21: IBT-2 moduulin ohjausnastojen kytkentä

B&R:n X90 ohjaimen kaikki I/O-liitännät olivat 0-12V jännitetasoisia, joten H-siltamoduulin ohjaus jouduttiin sovittamaan X90-ohjaimelle erillisellä jännitetason muuntimella. Lisäksi haluttiin varmistaa rautatason kytkennällä, että ylä- ja alapuolen kytkinkomponentteja ei voisi missään tilanteessa saada johtavaksi samanaikaisesti. Tasonsovitus tehtiin erillisillä optoerottimilla, joita oli käytettävissä toisen projektin jäämistöistä.

IBT-2 ohjausliittimiin tuodut signaali R- ja L_PWM saadaan käänteiseksi peräkkäisillä optoerottimilla, jolloin toisen signaalin ollessa aktiivinen, toinen jää automaattisesti ei aktiiviseksi. H-sillan lähtö ohjataan aktiiviseksi R_EN ja L_EN nastoilla, joihin tuotu aktiivinen signaali kytkee kyseisen lähdön päälle. Kuva 22 havainnollistaa tasonsovituskytkentää X90-ohjaimen ja H-siltamoduulien välillä.



Kuva 22: X90-ohjaimen ja H-siltojen tasonsovituskytkentä

5.7.1. Ongelmia H-siltojen käyttöönotossa

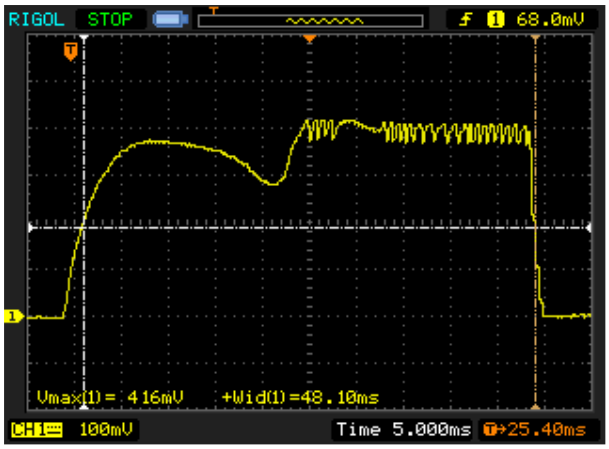
Ensimmäisen koekäytön jälkeen havaittiin, että ohjaus ei toimi lainkaan. Mittausten perusteella kaiken piti olla kunnossa, mutta H-siltojen lähtöä ei saatu aktiiviseksi, vaikka ohjaustulojen perusteella näin olisi pitänyt olla. Tutkimusten perusteella havaittiin moduulin datalehtien olevan virheellisiä ohjauksen osalta. Alkuperäinen oletus oli, että R_EN ja L_EN ohjausnastojen tilaa piti muuttaa, kun sillan tilaa muutetaan eli vaihteenvaihtoa ajetaan eri suuntiin. Näin ei kuitenkaan ollut, vaan molempien enable-nastojen pitää olla aktiivisena riippumatta H-sillan ajosuunnasta.

Tämän ongelman ratkettua ohjausjärjestelmä alkoi toimia halutulla tavalla, ja pääsimme tutkimaan varsinaista vaihteensiirron toimintaa. Ohjauskelojen virtaa ja pulssimuotoa tutkittiin oskilloskoopin ja virta-anturin avulla. Niillä saadaan kelojen ottaman ohjausvirran pulssimuotoa tarkasteltua. Käytettävissä oli LUT:n mittausdataa vaihteensiirtäjän toiminnasta, johon omia mittaustuloksia voitiin verrata. Mittauksissa käytettiin Tektronix A622 virtaprobea, jonka virta-alue yltää sataan ampeeriin. Antojännitteeksi oli valittu 10mV / A ja oskilloskoopissa asetuksena oli 100mV / Div.

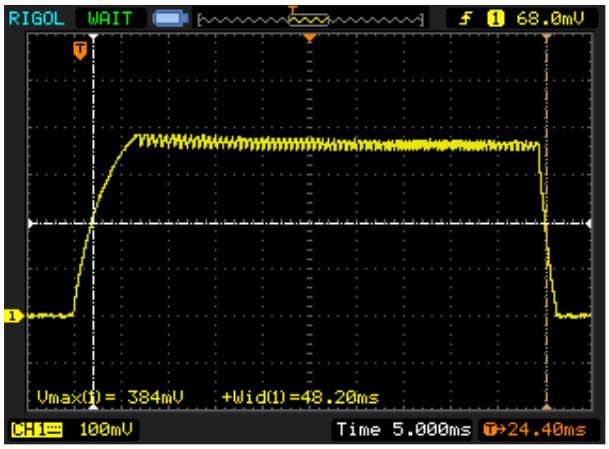
Koekäytön aikana huomio kiinnittyi erikoiseen värinään virtasignaalissa. Kelojen toiminta vaikutti kuitenkin normaalilta, ja toiminta oli luotettavaa. Testiohjelmassa oli vaihteensiirtäjän asentoanturit kytkettynä ja ohjelma käytti antureiden tietoja kelavirtojen pulssinpituuden säätöön. Eli keloja ohjattiin vain siihen saakka, kunnes anturin perusteella paikka oli vaihtunut. Keskimääräinen ohjauspulssin pituus oli n. 50 ms useiden mittausten perusteella.

Ohjausta kokeiltiin myös erimittaisilla pulsseilla ilman takaisinkytkentää, jolloin havaittiin 30 ms:n aika lyhimmäksi ajaksi, jolla vaihde vaihtui luotettavasti. Tätä lyhemmällä pulssilla vaihteensiirtäjärengas ei aina jaksanut siirtyä.

Useamman tunnin käyttötestin perusteella havaittiin, että toiminta alkoi heiketä, vaikka virrat pysyivät ennallaan. Jostain syystä siirtäjärenkaan keskitys oli ryöminyt ja rengas alkoi hangata ulkokuoreen. Uudelleen kokoaminen ja renkaan keskitys poistivat ongelman ja toiminta palasi ennalleen. Alla olevissa kuvissa 23 ja 24 esitetään mitatut kelavirtojen signaalit oskilloskooppikuvakaappuksena, kun vaihteensiirtäjää on ajettu toiseen reunaan.



Kuva 23: Vaihteensiirtäjän virta NDE-suuntaan, kela #1



Kuva 24: Vaihteensiirtäjän virta NDE-suuntaan, kela #2

Värinälle virtasignaalissa löytyi selitys H-sillan kytkinkomponenttien sisäisestä virtarajoituksesta. Infineonin BTS7960 puolisillan sisäinen virranmittaus ei ole muutettavissa ulkoisilla komponenteilla. Yläpuolen ja alapuolen kytkinFETeille on omat sisäiset virtamittaukset, joidenka perusteella läpimenevä virta aiheuttaa virtarajoituksen toimimisen. Yläpuolen tyypillinen virtaraja 25 °C lämmössä on 60 A, mutta alapuolen virtaraja on ainoastaan 43 A. Tässä tapauksessa mittausten perusteella alapuolen kytkimen rajoitus aiheuttaa tuon koko H-sillan virtarajoituksen. Koska komponenteissa on valmistuseräkohtaista hajontaa, on datalehden mukaan mahdollista, että alapuolen virtaraja voikin aktivoitua jopa 34 A:n arvolla.

5.7.2. Kehitysmahdollisuuksia ohjaukselle

BTS7960:n sisäistä virtarajaa ei ole mahdollista muuttaa, ja tässä sovelluksessa tarvittava ohjausvirta aiheuttaa virtarajoituksen aktivoitumisen. Oli siis etsittävä vaihtoehtoisia menetelmiä kelavirtojen ohjaamiseen. Infineonin valikoimista sattuikin löytymään astetta suuremman kytkentävirran salliva komponentti. Tyyppinimeltään BTS7970B kuuluu samaan tuoteperheeseen Infineonin valikoimissa. Sen maksimivirraksi ilmoitetaan 68A, ja sen komponenttikotelo on pinniyhteensopiva BTS7960 kanssa.

Paremman komponentin saatavuus näyttää tällä hetkellä huonolta maailmalla vallitsevan komponenttipulan takia. Kyseinen komponentti näyttäisi olevan monikäyttöinen autoteollisuuden puolella erilaisissa toimilaitteiden ohjauksissa, jotka vaativat suuria tehoja.

Samalla kun kehitys ja parannusideoita mietittiin vaihteensiirtäjän ohjaukselle, havaittiin että BTS7960 ja 7970B piireissä on jo sisäänrakennettuna ominaisuutena suojaus ylä- ja alapuolen kytkinMOSFET:ien yhtäaikaiselle sulkemiselle. Täten ohjaussignaaleja voitaisiin yksinkertaistaa X90-ohjaimen ja H-siltojen väliltä. Tarpeelliseksi jäisi siten ainoastaan tason siirto, joka tarvitaan edelleen estämään H-siltamoduulin puskuripiirin tuhoutuminen.

5.8. Testauksessa käytettävä jarrudynamometri

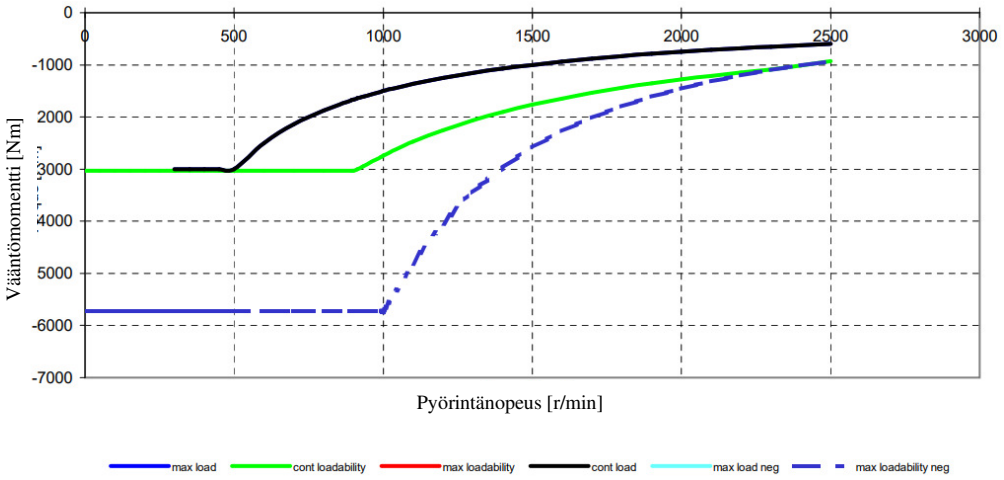
Alkuvaiheen testeissä sähkökoneen testaamiseen joudutaan käyttämään olemassa olevaa jarrudynamometriä. Nykyisenä moottorina dynamometrissä toimii ABB:n erikoistilauksena valmistama 315kW 6-napainen induktiomoottori. Sen synkroninen nimellispyörimisnopeus on siis 1000 r/min mutta jättämän takia todellinen nopeus on 992 r/min.

Moottori on valmistettu jarrudynamometrikäyttöön erikoistilauksesta ja sen roottorin on valmistaja keventänyt ja tasapainotus on tehty tarkemmin ja suuremmalle käyntinopeudelle. Lisäksi laakeroinnille on valmistajan mukaan tehty jotain, josta ei tuntunut olemaan kenelläkään mitään varmaa tietoa. Näillä muutoksilla moottorille on annettu poikkeuksellisen korkea maksimipyörimisnopeus eli 3000 r/min. Tämä on myös stanssattu moottorin tyyppikilpeen.

Nimellistaajuudella eli tässä tapauksessa 1000rpm moottori toimii vakiovuoalueella, jolloin sen vääntömomentti on datalehtien mukainen 3000Nm. Jos moottorin halutaan pyörivän nimellistaajuuden yläpuolella, sanotaan moottorin pyörivän kentänheikennysalueella. Koska induktiomoottorin maksimivääntömomentti on verrannollinen magneettivuon neliöön, johtaa tämä siihen, että kentänheikennyksessä momentin lasku on kääntäen verrannollinen taajuuden neliöön (ABB, Tekninen opas nro 7.) Kuvassa 25 havainnollistetaan testeissä käytettävän jarrumoottorin vääntökäyriä, joista nähdään vääntömomentin lasku kentänheikennyksessä.

Kentänheikennyksessä 2500 r/min pyörimisnopeudella jarrumomentiksi saadaan enää ABB:n mittaustulosten mukaan 932Nm. Tämä on tähän saakka riittänyt koska jarrudynamometriä ei ole ollut tarpeen pyörittää juurikaan yli 1000 r/min. Tämä johtuu siitä, että traktoreiden PTO:n yleisimmät pyörimisnopeudet ovat 540, 1000 ja 1000E. PTO:n välityssuhde

on noin 2 riippuen mallisarjasta, joten dieselin maksiminopeudella jarrudyno on pyörinyt noin 1100 r/min.



Kuva 25: Havainnekuva dynamometrikäyttöön suunnitellun moottorin vääntökäyristä

Koska testattava sähkökoneen toimintamalli pyörii maksimissaan 5550 r/min, on jarrudynamometriin saatava alennusvaihde, joka pudottaa dynamometrille pyörimisnopeuden turvalliseen alle 3000 r/min. Alennusvaihteen suunnittelu on mekaniikkasuunnittelijan työlistalla eikä sitä ole tarkoitus käsitellä tässä työssä.

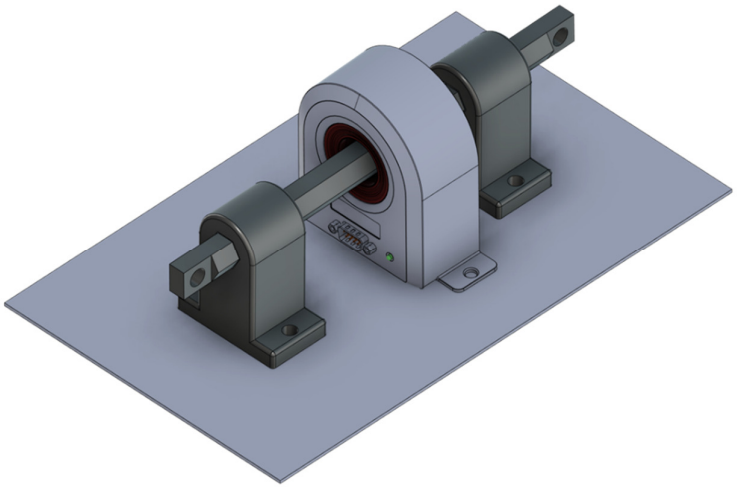
5.9. Vääntömomenttianturin valinta jarrudynamometrin ja sähkökoneen välille

Jarrudynamometriä käytetään edelleen myös perinteisiin PTO testeihin, joten käytettävä vääntömomenttianturi on mitoitettava kestämään maksimi vääntömomentti. Siten vääntömomenttianturin tulisi kestää vähintään 3000 Nm:n vääntö. Ohjausjärjestelmässä on aseteltavissa vääntömomenttiraja, jolla voidaan vääntömomenttianturia suojata mahdollisissa ylikuormitustilanteissa. Aiemmin käytössä on ollut HBM T40B-sarjan vääntömomenttianturreita, joiden vääntömomenttialue yltää mallin mukaan 10kNm saakka (HBM T40B datalehti. 2022). Nykyinen vääntömomenttianturi on 3 kNm versio, ja sen tarkkuus on antojännitteessä huonoimmassa tapauksessa ±0.003 %, kun mitattava vääntömomentti on 60–100 % nimel-

lisarvosta. Koska jarrudynamometriin kytketään sähköakselin testauksessa erillinen alennusvaihde, on myös toinen vääntömomenttianturi tarpeen. Se sijoitetaan vaihteiston ja sähköakselin välille.

5.10. Invertterin DC-syötön virtamuuntaja

Kaapeloinnin yhteydessä havaittiin ongelma virtamuuntajan läpäisyssä. Invertterin DC-syöttö suunniteltiin tehtäväksi kaksinkertaisella 70 mm² kaapeloinnilla. Radox FHLR4GC13X 70 mm² kaapelin halkaisija on 17 mm ± 0.3 mm ja käyttöön valitun virtamuuntajan reikä on 28 mm, joten tuplakaapeli ei mahtunut läpi. Tästä syystä suunniteltiin erillinen kotelointi ja virtakisko, joka mahtuu virtamuuntajan läpi ja kiskoon saadaan kaapelit kiinni pulttiliitoksilla. Virtakiskon ja sen pidikkeiden mallintamiseen käytin Fusion 360 3D-suunnitteluohjelmistoa ja pidikkeiden protomallit tehtiin 3D-tulostamalla PETG-materiaalista. Virtakisko on tehty 18 mm kuusiomessinkitangosta ja sen liitinpinnat on tasattu jyrsimellä. Päissä on reiät M10 läpipultille, johon rengaskengillä saadaan tuplakaapelointi luotettavasti kiinni. Virtakiskon poikkipinta-alaksi tulee noin 280 mm², jonka pitäisi riittää kahdelle 70 mm² kaapelille. Kuva 26 havainnollistaa virtakiskon rakennetta ja sille mallinnettuja kiinnikkeitä. Kuvassa ei näy ympärille tulevaa metallikoteloa eikä EMC-suojattuja PG-läpivientiholkkeja.



Kuva 26: Havainnekuva ensiövirtamuuntajan virtakiskoratkaisusta

Muut 3 kpl saman tyyppisiä virtamuuntajia on mekaniikkasuunnittelija koteloinut sähköakselin kiinnitysmekanismiin, joten niiden sijoittelu rajautuu tämän työn ulkopuolelle.

6. Johtopäätökset

Tässä diplomityössä oli tarkoituksena tutkia ja pohtia vaihtoehtoisia menetelmiä uudentyyppisen testausjärjestelmän kehittelyyn sekä mahdollista integrointia jo olemassa olevaan järjestelmään. Kuten työssä todetaan, kaikkia tarvittavia ominaisuuksia ei saatu sovitettua vanhaan tilaan sekä järjestelmiin. Pelkästään DC-syötön rajoitukset aiheuttavat merkittäviä puutteita tutkimus ja tuotekehityskäyttöön jatkossa. Tulojännitteen heikko säädettävyys vaikeutti sähköisen voimansiirron tutkimuksia eri kuormitustilanteissa koska mahdollisen ajoakun jännitteen laskemista ei pystytä kunnolla testaamaan. Perustelut uuden testaushuoneen käytölle tulivat hyvin selviksi myös tilankäytön kannalta. Ahtaassa testausympäristössä myös työturvallisuus heikkenee merkittävästi.

Järjestelmät kuitenkin ovat toimivat ja valmistusaikataulun venymisestä huolimatta järjestelmällä on jo saatu joitakin käyttöönottotestejä ajettua. Maailmantilanteesta johtuen projektin kohteena olevaa sähköistä voimansiirtoa ei päästy koekäyttämään vielä tässä järjestelmässä. Maailmalla vallitseva komponenttipula siirsi esimerkiksi valitun invertterin toimitusaikataulua useampaan kertaan. Oman lisämausteensa työhön toivat merkittävät toimimattomuusongelmat vaihteensiirtäjän ohjainyksikön rakennusvaiheessa. Siten pelkästään yhden osion tekemiseen tässä työssä kului merkittävästi aikaa. Johtopäätöksenä jälleen kerran tuli mieleen, että mikään sähköön liittyvä ei ole niin yksinkertaista, etteikö siihen voisi tulla ongelmia.

Myös mittalaitteilla oli ajoittain merkittäviä saatavuusongelmia, jotka osaltaan ohjasivat valintoja eri suuntaan. Kansainvälisten yrityksien erilaiset hankintamenetelmät ovat hyvin monimutkaisia ja kalliimmat mittalaitehankinnat joudutaan yleensä kilpailuttamaan. Lisäksi oman vaikeutensa hankintoihin tuo se, että mahdollisen laitetoimittajan pitää löytyä ostoosaston hyväksymien toimittajien listalta.

Tutkimuksen aihe oli mielenkiintoinen ja myös tarpeellinen, koska erilaisia näkemyksiä testausjärjestelyistä on olemassa ja tämä edustaa vain omaa näkökantaa. Kuitenkin vastaavia järjestelmiä on olemassa jo useilla eri valmistajilla, eri oppilaitoksilla sekä testauspalveluita tarjoavilla suuremmilla yrityksillä. Työn tieteellinen osuus olisi toisaalta voinut olla laajempikin, mutta tässä projektissa oli tarkoitus jakaa työkuormaa myös muiden henkilöiden

osalle, joten tässä työssä perehdyttiin laitteiden ominaisuuksiin, valmistukseen ja saatavuuteen. Useat mittalaitetoimittajat olivat kiitettävän halukkaita toimittamaan esittelytuotteita sekä järjestämään esittely- ja koulutuskäyntejä. Samalla tarjouskyselyiden ja laite-esittelyiden ansiosta myös oma hintatietoisuus avartui, koska ennen ei ole tullut pohdittua kuinka arvokkaita erilaiset mittalaitejärjestelmät sekä erityisesti isotehoiset syöttöjärjestelmät ovat.

Lähteet

Aarniovuori, L., Kosonen, A., Niemelä, M. ja Pyrhönen, J., 2012. Calorimetric measurement of variable speed induction motor. https://research.lut.fi/converis/portal/detail/Publication/2113454

ABB Tekninen opas #7, Sähkökäytön mitoitus, 2022. https://library.e.abb.com/public/b11dafe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf

Buerger, Roland, Danisense, 2022. Wide Bandwidth Current Transducer. https://danisense.com/wide-bandwidth-current-transducer/

Cataliotti, A. Di Cara, D, Emanuel, E. Nuccio, S. 2008, Influence of Current Transformers on the Measurement of Harmonic Active Power. https://www.imeko.org/publications/tc4-2008/IMEKO-TC4-2008-184.pdf

Danfoss EC-C1200-450 Data Sheet, 2022. https://www.bibus.es/fileadmin/product_data/danfoss/documents/EC-C1200-450_Electric_Converter_Data_Sheet.pdf

Dewesoft Power Analyzer Series Data Sheet, 2022. https://dewesoft.com/applications/power-and-energy/power-analyzer

Fish, Raymond M, & Geddes, Leslie, A. 2009, Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763825/

HBM eDrive Test Systems, 2022, EDRV-6P-4T Data Sheet.

HBM GEN series CTS400ID, 2022, 400Arms / 600ADC Current Transducer Data Sheet. https://www.hbm.com/en/8880/current-transducers/?product_type_no=Current%20Transducers

HBM Torque Sensor Catalog, T40B series, 2022. https://www.hbm.com/en/3004/t40b-universal-torque-transducer-for-test-benches/?product_type_no=Universal%20Torque%20Transducer

Heinzinger ERS-BIC user manual V2.1 2022.

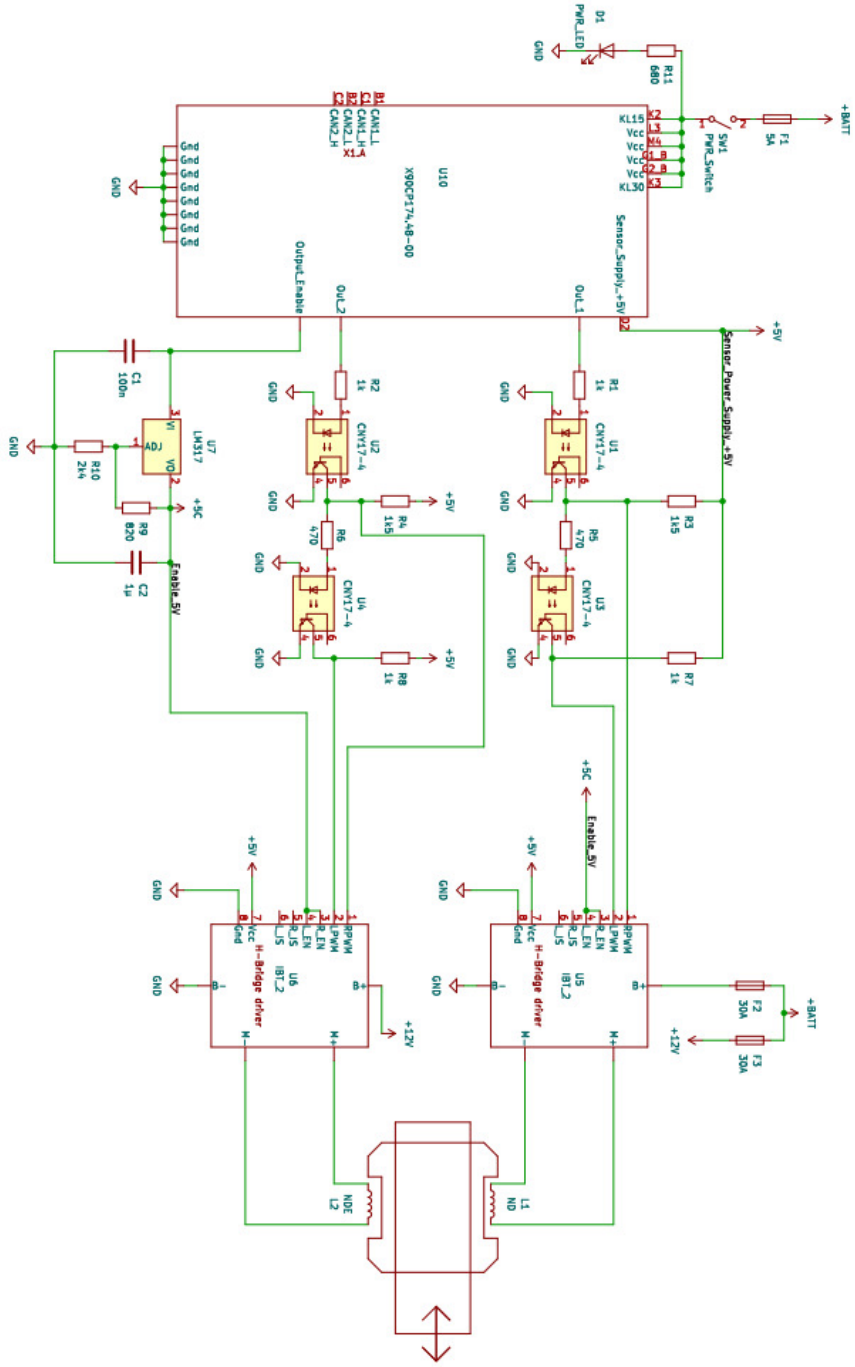
Huber Suhner, Radox Cable Catalog, 2022.

Shepard, Jeff, 2020, Safety capacitors for EMI filtering and voltage isolation. https://www.powerelectronictips.com/safety-capacitors-emi-filtering-voltage-isolation-faq/

Yokogawa PX8000 Power analyzer series, BUPX8000 Data Sheet, 2019. http://tmi.yokogawa.com/

LIITTEET

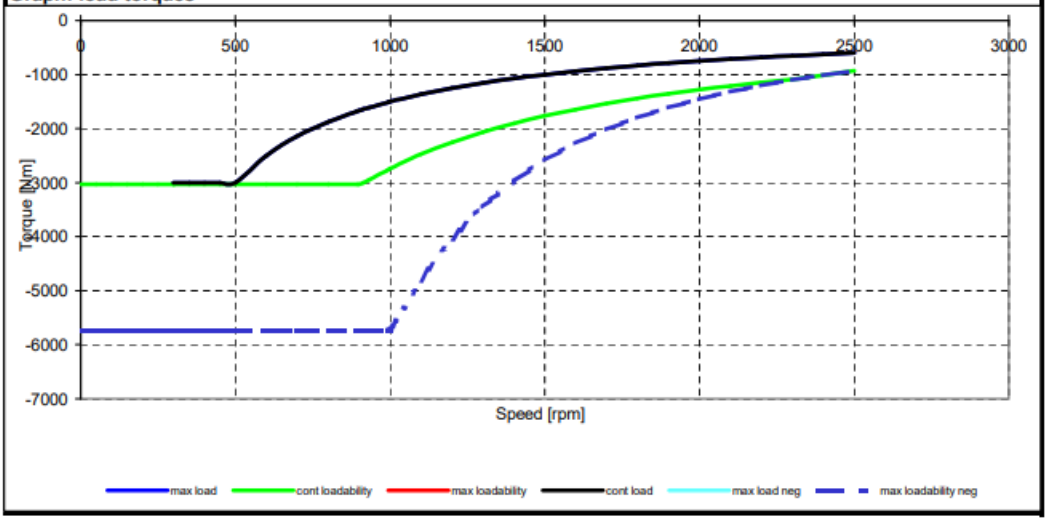
Liite 1: Vaihteensiirtäjän ohjauskytkentä



Liite 2: Jarrumoottorin testausraportti

ABB

Motor Technical Data Sheet			
Item No. 1.1.1		M3BP 355 MLB 6	
Specifications		**DOL Catalogue data**	
Name	[undefined]	Product code	3GBP 353 420-ADG (FI)
No.of motors	1	Voltage [V]	400
Motor type	IEC 34 catalog	Frequency [Hz]	50
FrameMaterial	Not specified	Power [kW]	315
Family	Not specified	Poles	6
Polenumber	6	Speed [rpm]	992
Design	Basic (Cenelec)	Max mech.speed [rpm]	2500
Connection	Not specified	Current [A]	572
IP class	IP55	Torque [Nm]	3032
IC class	IC416 force ventilated	Tmax/Tn	2.7
IM class	IM1001, B3(foot)	Power factor	0.83
Max. speed rule	Separate fan	Efficiency [%]	95.7
Temp. rise	B (<80 K)	Temperature rise class	B
Tmax margin	43 %	Insulation class	F

Motor load			**Calculations**			
Load type	Const. torque/power			Required	Result	Margin
Overload Type	Simple		Torque [Nm]			
n min [rpm]	300		n min	-2998	-3032	1 %
n base [rpm]	500		n base	-2998	-3032	1 %
n max [rpm]	2500		n max	-600	-932	55 %
Pbase [kW]	-157		Power [kW]			
Olbase [%]	100		n min	-94.2	-95.3	1 %
Olmax [%]	100		n base	-157	-159	1 %
Temperature [°C]	40		n max	-157	-258	65 %
Altitude [m]	1000		Overload [Nm]			
OI definition:	RMS 10min		n min	-2998	-5730	91 %
300-2500 rpm / 100 %		590s	n base	-2998	-5730	91 %
300-2500 rpm / 100 %		10s	n max	-600	-932	55 %

Graph: load torques