

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka, Tuotekehitys

2022

Antti Hakala

# Kestomagneettitahtimoottorin integrointi testauspenkkiin sekä sen johdotus ja ohjelmointi



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka, Tuotekehitys

2022 | 31 sivua, 6 liitesivua

Antti Hakala

## Kestomagneettitahtisähkömoottorin integrointi testauspenkkiin sekä sen johdotus ja ohjelmointi

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa akkujen testausalusta ABB Oy:n kestoplaneettitahtimoottorilla ja invertterillä Valmet-automotive EV Powerin tiloihin, tulevaisuuden akkujen tuotekehitystä/tutkimuksia varten. Työssä selvitettiin tarvittavat komponentit, valmistusmenetelmät ja laskelmat moottorin ja invertterin liittämiseksi testauspenkkiin, sekä niiden yhteistoimintaan vaadittava ohjelmisto ja oheislaitteisto sekä johdotus.

Komponenttien toiminta todistettiin testauspenkillä, johon liitettiin ABB:n moottori ja invertteri. Tämä opinnäytetyö keskittyy lähinnä testauspenkin sähkömekaaniseen ja ohjelmalliseen suunnitteluun ja kokoonpanoon, jättäen osan teoreettisesta osuudesta opinnäytetyön ulkopuolelle. VA:n tiloissa on valmiiksi testauspenkin runko, jota on käytetty aiemmin eri moottorin kuormitukseen ja testaukseen, kyseistä penkkiä käytetään pohjana tässä työssä.

Asiasanat:

EV, akkumoduuli, kestoplaneettitahtimoottori, suunnittelu

Thesis

Turku University of applied sciences

Mechanical Engineering, Product development

2022 | 31 Pages, 6 Attachment pages

Antti Hakala

# Integration of Permanent Magnet Synchronous Motor and Inverter to Test Bench Including Wiring and Model-Based Programming

The purpose of this thesis was to study the integration of ABB:s permanent magnet synchronous motor into testbench for Valmet-automotive EV Power's test facility use. The study concentrated around finding correct parts and manufacturing processes to acquire proper parts to attach the inverter and motor to the test bench along with battery modules and the required software to run them together.

The functionality of the components would be proven with the test bench, which will be integrated with ABB's motor and inverter, although this thesis consecrates mainly to the design of the test bench's electromechanical and software development and assembly. There was an already existing testbench frame in the Valmet automotive premises, that was previously used for a different motor. This testbench frame will be used as the base of this project.

Keywords:

EV, Battery module, Permanent magnet synchronous motor, design

# Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	6
1Johdanto	7
2Testipenkki	8
2.1 Runko	8
2.1Testauspenkin toiminta	10
2.2Komponenttien kiinnikkeet	10
2.2.1Moottorin kiinnikkeet	11
2.2.2Invertterin kiinnikkeet	12
2.3Moottoriadapteri	13
3Tehonmittaus ja dynaaminen vastus dynamometrillä	15
3.1Sähköjärjestelmän kuormitus	15
3.2Dynamometrit	16
3.2.1Moottoridynamometri	16
3.2.2Alustadynamometri	17
3.3Rototest	18
4Sähköjärjestelmä	20
4.1Komponentit	20
4.1.1Moottori	20
4.1.2Invertteri	21
4.1.3Vector VN1640A	21
4.1.4PDU ja Moduulit	22
4.2.1 Johdotus	23
5Ohjelmisto	26

5.1 Vector CANoe ohjelmointi	27
6 Yhteenveto	29
Lähteet	31

## Liitteet

Liite 1. Bill of Materials

Liite 2. Kiinnikkeiden piirustukset

## Kuva

1 Testauspenkin runko, ilman komponentteja ja levyosia	9
2 Alumiiniprofiili ja profiiliin sopivia muttereita ( <a href="http://www.Ubuy.fi">www.Ubuy.fi</a> , 2022)	11
3 Sähkömoottori ja invertteri asennettuna kiinnikkeisiin	13
4 Adapteri kiinnitettynä moottoriin ja Hiacen perään	14
5 AVL akkujentestausjärjestelmä, jossa akkuja kuormitetaan lataamalla toista akkua ( <a href="http://www.avl.com">www.avl.com</a> , 2022)	15
6 Rototest napadynamometrit kiinnitettynä autoon ( <a href="http://www.rototest.com">www.rototest.com</a> , 2022)	18
7 Moduulit ja PDU (Vas.) ja Testipenkki (Oik.)	22
8 HV johdin ja liittimen komponentit	24
9,10 Potentiaalintasausjohdot moduulien välillä, johtimet jatkuvat PDU:lle sekä invertterille ja moottorille	25
11 Vector CANOe ohjelmisto, Vector VN1640A ja viritalähde liitettynä LV johtosarjaan	28
12 Valmis testipenkki liitettynä rototestiin ja akkupakettiin	31
	17

## Käytetyt lyhenteet ja sanasto

CAN	Controller area network
PDU	Power Distribution Unit
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
BMS	Battery Management System
SOC	State Of Charge, Akun varauksen taso
EMI	Electromagnetic interference, Radiotaajuushäiriö
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
HV	High Voltage
LV	Low Voltage
Dynamometri	Tehon mittaukseen käytetty laite
Moduuli	Usean akkukennon kokoonpano
Perä	Toyota Hiacen taka-akseli tasauspyörästöllä
Kontakti	Sähköliittimen kontaktipinta
Läpilyönti	Korkeasta jännitteestä johtuva valokaari eristeaineen läpi

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytteen tarkoituksena oli rakentaa akkujen testausalusta ABB Oy:n kestopagneettitahtimotorilla ja invertterillä Valmet-automotive EV Powerin tiloihin, tulevaisuuden akkujen tuotekehitystä/tutkimuksia varten. Työssä selvitettiin tarvittavat komponentit, valmistusmenetelmät ja laskelmat moottorin ja invertterin liittämiseksi testauspenkkiin, sekä niiden yhteistoimintaan vaadittava ohjelmisto ja oheislaitteisto sekä johdotus.

Komponenttien toiminta todistetaan testauspenkillä, johon liitetään ABB:n moottori ja invertteri, tämä opinnäytetyö keskittyy lähinnä itse testauspenkin sähkömekaaniseen suunnitteluun ja kokoonpanoon sekä komponenttien yhteistoimintaan vaadittavaan ohjelmistoon ja laitteistoon. Työssä oli tarkoitus paneutua syvemälle myös koodaukseen ja eri toimintojen tutkimiseen mutta aika- sekä resurssi rajoitteet kaventavat ohjelmallisen puolen minimiin, jolla testausjärjestelmä saadaan toimimaan. VA:n tiloista löytyy valmiiksi testauspenkin runko, jota on käytetty aiemmin eri moottorin testaukseen, kyseistä penkkiä muokattiin ja käytettiin pohjana tälle työlle. Työn loppua kohden ilmeni myös useita laitteisto sekä ohjelmisto ongelmia, jotka hidastivat työn etenemistä huomattavasti, sillä kyseiset ongelmat rajoittivat suuresti testauspenkin tehonmittaus kykyä, sekä kykyä hallita moottoria.

## 2 Testipenkki

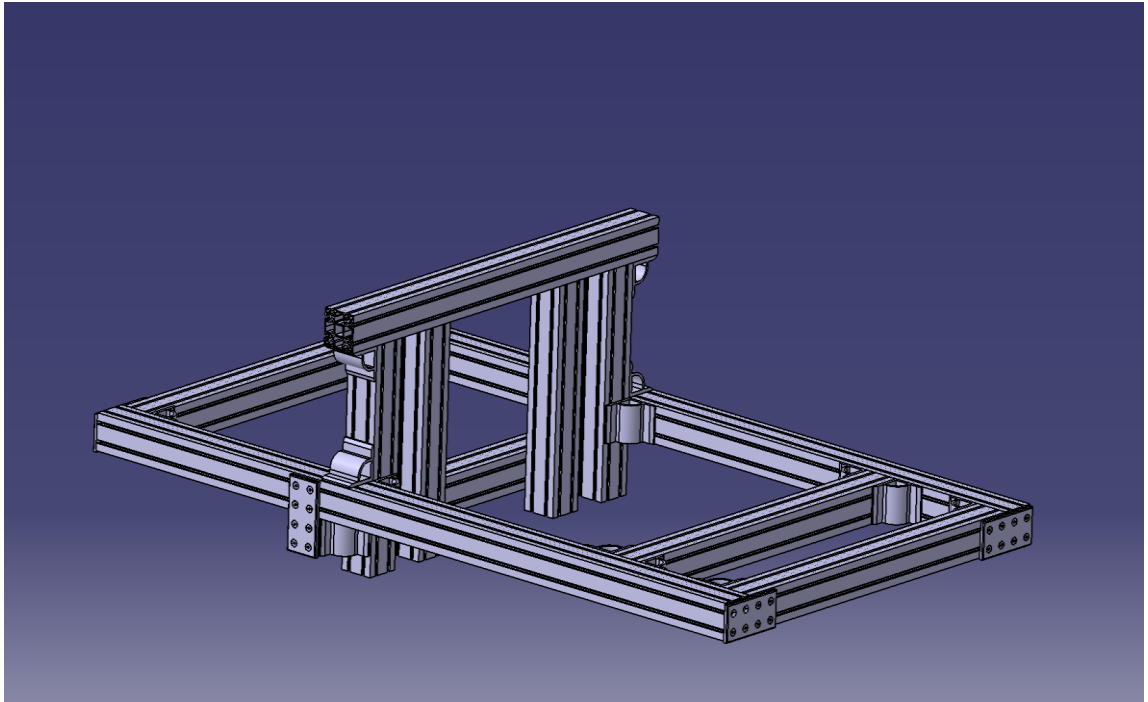
### 2.1 Runko

Testauspenkin runko on koottu enimmäkseen 90x90mm alumiiniprofiilista sekä laserleikatuista ja särmätyistä teräslevyistä. Moottori kiinnittyy runkoon sekä edestä, että takaa jotta saadaan minimoitua moottorin väännöstä ja painosta aiheutuva rasitus kiinnityspisteille ja testauspenkin rungolle. Testauspenkki ja komponentit on suunniteltu ja mallinnettu käyttäen Catia V5 R29 CAD ohjelmistoa, osa komponenttien malleista saatiin komponenttien valmistajien nettisivuilta tai suoraan valmistajilta itseltään.

Rungon kestävyuden kannalta mietittiin komponenttien painoa sekä moottorin aiheuttamaa vääntömomenttia perään ja runkoon. Moottorista itsestään vääntöä saisi n. 800 Nm, mutta Rototest dynamometri ei pysty mittaamaan tai vastustamaan vääntöä kuin vain 1200 newtonmetrin edestä, joka tarkoittaa, että moottoria ei voida käyttää täydellä teholla, kun moottori on liitettyä Toyota Hiacen taka-akseliin jonka välitys on 1:4,3. Taka-akselin tasauspyörästä nostaa vielä Rototestiin kohdistuvaa vääntömomenttia, samalla laskien moottorilta vaadittua momenttia.

Koska dynamometrin kestävä maksimivääntö on hyvin rajoitteinen ja se on todistetusti toiminut ennen toisella moottorilla, ei testauspenkin runkoa alettu vahvistamaan enempää kuin tarve. Testauspenkkiinliitettävä uusi moottori painaa kuitenkin 200 kg, joten penkkiä pitää vahvistaa niistä kohdista joihin moottorin kiinnittyy, jotta se kestäisi uuden moottorin painon. Muuten moottori roikkuu kiinnityslevyssä taivuttaen runkoa.





Kuva 1: testauspenkin runko, ilman komponentteja ja levyosia

## 2.2 Testauspenkin toiminta

Testauspenkin päätoiminto on kuormittaa moottoria siten, että moottorin vaihejohdoista sekä dynamometrin antureista pystytään mittaamaan sekä analysoimaan moottorin ja invertterin kuormitusta sekä akkumoduulien varaustasoa ja kuormitusta. Näiden mitta-arvojen perusteella ohjelma tekee säätöjä ohjaimen ja invertterin parametreihin, jotka suojelevat komponentteja, kuten akkuja, yli purkukuormitukselta, alijännitteeltä ja muilta mahdollisilta tilanteilta, jotka voisivat vaurioittaa komponentteja tai käyttäjää.

Moottori on kiinnitetty penkissä olevaan Toyota Hiacen taka-akseliin vakionopeusnivelellä ja adapterilla, jotta saatiin simuloitua auton voimansiirtoa eli akselia jossa on kaksi vetolaippaa. Moottorin akseli täytyi muuttaa vastaamaan autoa, koska testauspenkki tulitaisiin liittämään Rototest dynamometriin, joka on tarkoitettu käytettäväksi henkilöautojen tehonmittaukseen. Normaalisti Rototest liitettäisiin henkilöauton etupyörien tilalle, joille auto välittää moottorin tehon. Dynamometrillä pystytään siis vastustamaan moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia luoden erilaisia ajo-olosuhteita ja tilanteita, joihin moottori saattaisi lopullisessa käyttöympäristössään altistua.

## 2.3 Komponenttien kiinnikkeet

Kiinnikkeet suunniteltiin 8- ja 10 mm teräslevystä valmistettavaksi, sen helpon saatavuuden ja työstettävyyden vuoksi. Suunnittelun alussa mietittiin ja hahmoteltiin komponenttien paikat ja niiden tarvittavat toiminnot. Suunnittelussa otettiin huomioon kiinnikkeiden kestävyys ja erityisesti valmistettavuus. Erityistä huomiota jouduttiin myös kiinnittämään materiaalien saatavuuteen sekä alihankkijoiden toimitusaikoihin ja valmistusmahdollisuuksiin, sillä joissain materiaaleissa on normaalia pidemmät toimitusajat raaka-aine puutteen ja ison kysynnän vuoksi. Kiinnikkeiden kiinnitys testipenkin runkoon tapahtuu M8 pulteilla ja neliömuttereilla, jotka sopivat testipenkin alumiiniprofiilirungon hahloihin. Alumiiniprofiili, josta runko on kasattu on suunniteltu

modulaarisuus mielessä ja mitoitettu siten, että profiilien sisään voi liu'uttaa M8 neliömuttereita tai alumiiniprofiilille tarkoitettuja muttereita. (Kuva 2)



Kuva 2: Alumiiniprofiili ja profiiliin sopivia muttereita ([www.Ubuy.fi](http://www.Ubuy.fi), 2022)

### 2.3.1 Moottorin kiinnikkeet

Moottorin paikka oli kaikista tärkein suunnitteluprosessissa, koska sen on oltava keskellä testauspenkin runkoa, jotta sen akseli saataisiin mahdollisimman suoraan linjaan testauspenkissä olevan Toyota Hiacen taka-akselin kanssa. Kiinnikkeistä ensimmäisenä suunniteltiin ja mallinnettiin kiinnikkeet moottorille. Moottori kiinnitettiin kolmesta kohdasta: moottorin etulaipasta ja kahdesta kiinnityspaikasta moottorin takaa, jotka ovat peilikuvia toisistaan.

Etukiinnike ottaa vastaan suurimman osan moottorin vääntömomentista ja tukee myös runkoa sitomalla useita palkkeja toisiinsa, lisäten rungon jäykkyyttä. Moottorin etulaippa on siksi suunniteltu mahdollisimman vahvaksi ja kiinnitetty runkoon mahdollisimman monella pultilla. Etulaipan suunnittelussa vaikeuksia tuotti testauspenkin alkuperäinen kokoonpano, joka ei ollut täysin symmetrinen vaan hieman toispuoleinen suhteessa perään. (Kuva 3)

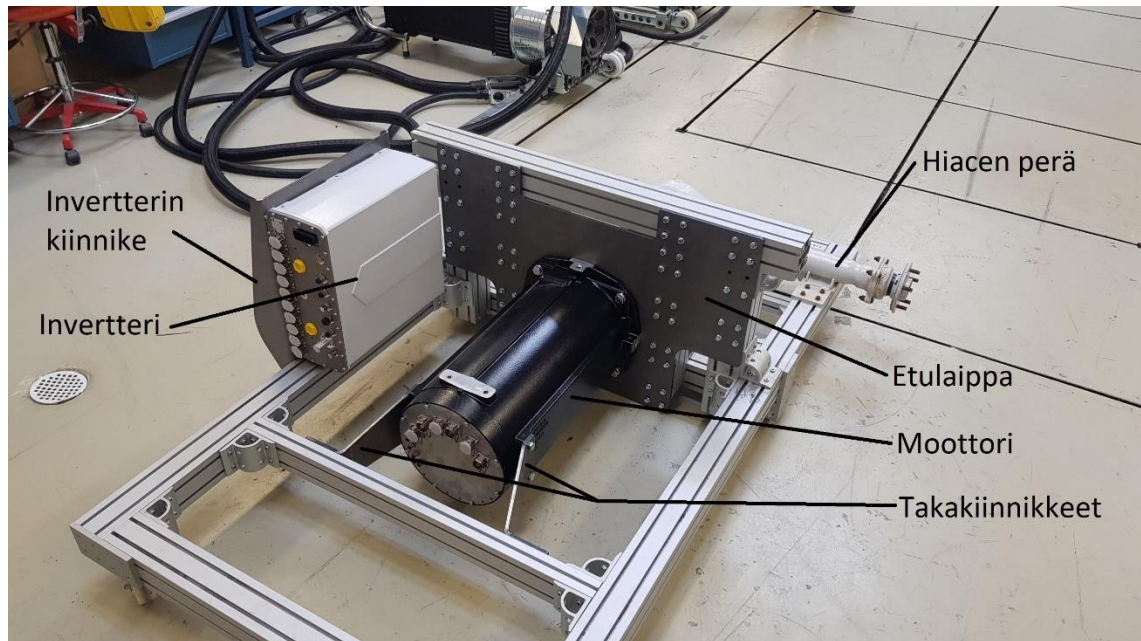
Ongelma ratkaistiin suunnittelemalla perän kiinnitys uudelleen, jotta sen akseli saataisiin linjaan moottorin akselin kanssa. Näin pystyttiin tekemään etulaipasta symmetrisen testauspenkin rungon suhteen.

Takakiinnikkeillä pyrittiin ensisijaisesti tukemaan moottoria sen oman painon aiheuttamalta roikkumiselta, joka tuottaisi ei haluttua taipumista ja rasiutusta rungon pystypalkkeihin sekä etulaippaan. Takakiinnikkeet auttavat myös moottorin luoman akselilinjan mukaisen vääntömomentin vastaanottamisessa, vähentäen myös siten etulaipan rasiutusta.

### 2.3.2 Invertterin kiinnikkeet

Invertterin kiinnityksessä tuli ottaa huomioon moottorin paikka sekä erityisesti suurjännite eli High Voltage (HV) vaihejohtojen sekä HV virtajohtojen kytkentä ja tuentamahdollisuudet. Vaihejohtot tulisi mielellään tehdä mahdollisimman lyhyeksi ja helpoksi kytkeä. Pelkästään johtojen luomat rajoitteet sulki pois ison osan asennus orientaatioista ja paikoista niin turvallisuuden, kustannuksen ja yksinkertaistamisen suhteen. Lisäksi invertteriin kytkettiin matalajännite eli Low Voltage (LV) johtoja joilla muun muassa ohjataan invertteriä Controller Area Network (CAN) viestien perusteella sekä kerrotaan invertterille moottorin sen hetkinen asento ja lämpötila.

Invertteri päätettiin asentaa kyljelleen moottorin viereen 8 mm särmättyyn teräslevyyn, joka kiinnitettiin alumiiniprofiiliin kuudella M8 pultilla. Invertterin kiinnike on staattinen osa eli se ei ota vastaan huomattavia dynaamisia voimia vähentäen suuresti suunnittelussa huomioon otettavia kohtia. Kiinnikkeen tulisi lähinnä vain kestää Invertterin paino ja joitain värähtelyitä, joita moottori saattaa luoda runkoon. Invertterin kiinnike liitettiin runkoon kuudella M8 pultilla sen alaosasta, jotka oli mitoitettu sopimaan Yhteen alumiiniprofiiliin. Invertteri kiinnitettiin kiinnikkeeseen Invertterin pohjassa olevista kiinnityspisteistä, joihin sopi M8 pultit. Kiinnikkeeseen suunniteltiin myös merkki, joka helpottaa taivutus suunnan määrittelyä koska invertterin pohjassa olleet kiinnitysreiät eivät olleet täysin symmetrisiä. (Kuva 3.)



Kuva 3: Sähkömoottori ja invertteri asennettuna kiinnikkeisiin

## 2.4 Moottoriadapteri

Moottoriadapterin suunnittelu osoittautui vaikeammaksi kuin oletettiin, koska moottorin ja vakionopeusnivelen booriin sopivan akselin valmistus oli hankala niillä kriteereillä, joita adapteri vaati. Adapterin oli tarkoitus valmistaa yhdestä kappaleesta kestävyden takaamiseksi mutta valmistustapojen rajoitteiden sekä aikarajoitteiden vuoksi, adapteria ei kyetty valmistamaan yhdestä kappaleesta.

Adapteri siis päätettiin valmistaa kahdesta osasta, jotka liitettiin toisiinsa kutisteliitoksella sekä kiilaliitoksella. Adapteri koostuu holkista, joka ostettiin valmiina sekä sorvilla muokatusta henkilöauton vetoakselista. Henkilöauton vetoakselia käytettiin koska siinä on valmiina hammastus, joka sopii adapterissa käytettyyn vakionopeusniveleen. Vakionopeusniveltä tarvittiin adapterissa, koska se mahdollistaa epälineaarisuuden perän- ja moottorin akselien välillä. (Kuva 4.)



Kuva 4: Adapteri kiinnitettynä moottoriin ja Hiacen perään

Aiempien adapterimallien valmistettavuus osoittautui hankalaksi ja toimitusajat nousivat useiksi viikoiksi tai jopa kuukausiksi suurimpana syynä valmistusmenetelmät, joita adapterin valmistaminen yhdestä kappaleesta olisi vaatinut. Jotta adapteriin olisi saatu tehtyä oikea hammastus olisi se tarvinnut tehdä erikoistyökaluilla. Adapterista suunniteltiin useita eri malleja yhteistyössä paikallisen konepajan sekä VA:n omien koneistajien kanssa, jolloin pohdittiin tarvittavia valmistusmenetelmiä adapterin tekemiseen.

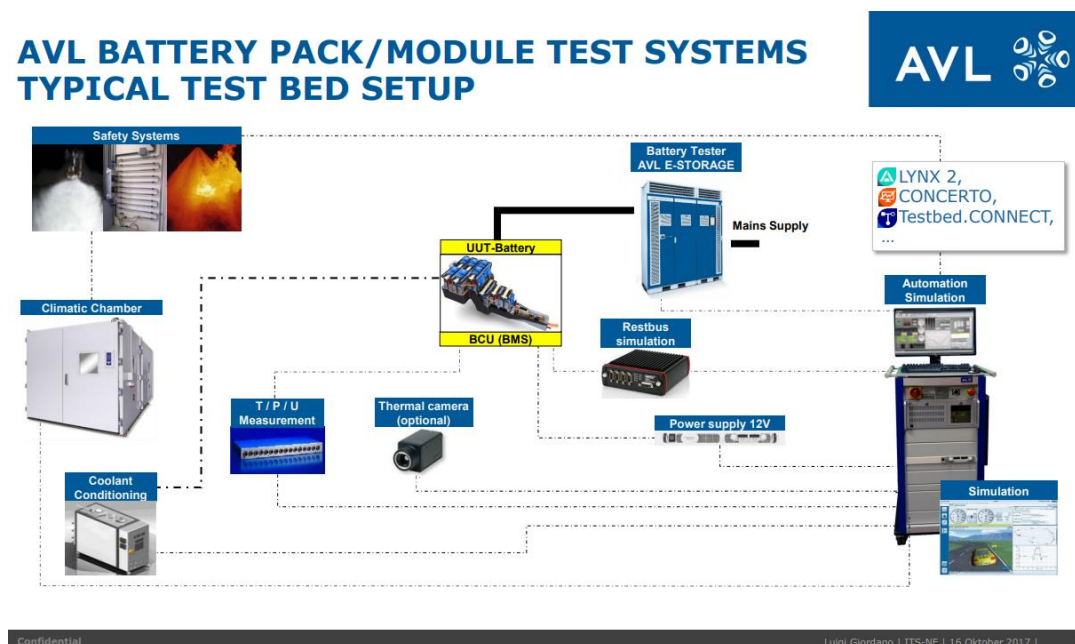
Suunnittelussa päädyttiin tulokseen, jossa saatiin mallinnettua konepajasta löytyvillä koneilla valmistettava adapteri (liite 2.). Adapterin valmistus onnistuisi kuitenkin vain jyrsinterillä, jotka on tarkoitettu niille hammastuksille, jotka sopivat moottoriin ja vakionopeusniveleen. Konepajalla ei ollut näitä teriä koneisiinsa eli ne olisi pitänyt tilata, joka on kallista.

### 3 Tehonmittaus ja dynaaminen vastus dynamometrillä

#### 3.1 Sähköjärjestelmän kuormitus

Yksi testipenkin tärkeimmistä toimista oli kuormittaa moottoria sekä invertteriä ja siten myös akkujärjestelmää. Normaalisti VA:lla testattavien akkujen kuormitus tapahtuu akkujen testaukseen erityisesti tarkoitettulla kaksisuuntaisella teholähteellä, joka regeneroi akuista puretun energian AC-verkkoon. (Kuva 5.) Toinen kuormitusmenetelmä on kuormittaa testattavia akkuja liittämällä ne invertteriin, joka on liitettyä verkkovirtaan, jolloin käytännössä akkujen virta siirretään verkkovirtaan kuormittaen testattavia akkuja.

Nämä kuormitusmenetelmät olisivat olleet huomattavasti yksinkertaisempia, sillä VA:ita löytyy tarvittavat tilat ja laitteistot kyseiseen kuormitusmenetelmään. Kuormitus edellä mainituilla menetelmillä ei kuitenkaan anna riittävää kuvaa akkujärjestelmän kyvykkyydestä toimia ympäristössä, jossa järjestelmän muut voimansiirtokomponentit tuottavat toiminnallaan sähkömagneettisia häiriöitä (EMI, eli Electromagnetic interference).



Kuva 5: AVL akkujentestausjärjestelmä, jossa akkuja kuormitetaan lataamalla toista akkuja ([www.AVL.com](http://www.AVL.com), 2022)

## 3.2 Dynamometrit

Dynamometri on laite, jolla pystytään mittaamaan tarkasti voimien suureita kuten tehoa ja vääntömomenttia. Dynamometrejä on useita erityyppisiä, joista jokaiselle on oma tarkoituksensa. Autodynamometrit jaetaan 2 pääryhmään: Moottoridynamometri ja alustadynamometri (Jyotindra S. Killedar, 2012). Tässä opinnäytetyössä käytettiin alustadynamometriä, joka tarkoitettu erityisesti ajovastuksen luomiseen autoille dynaamisessa ajoympäristössä sekä vaihtelevassa ilmastossa. Työssä käytettiin alustadynamometriä, koska sellainen oli valmiiksi saatavilla. Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti myös moottoridynamometrejä, sillä nekin tulevat esille myöhemmin tekstissä.

Molemmissa moottori- sekä alustadynamometrissä yhteisenä tekijänä on se, että niillä mitataan moottorin tuottamaa tehoa. Alusta- ja moottoridynamometrit eroavat toisistaan yksinkertaistettuna vain tehomittaus paikasta. Molemmissa dynamometreissä voidaan käyttää samoja mittausmenetelmiä. Työhön käytetty dynamometri käyttää sähköistä AC moottoria ja väännönmuunninta sekä nopeusanturia mittaamaan useita suureita ja vastustamaan moottoria.

### 3.2.1 Moottoridynamometri

Moottoridynamometriä käytetään silloin, kun moottori on irrallaan kulkuneuvon vetolaitteesta (esim. vaihdelaatikko, potkuri) ja kiinnitetään suoraan dynoon moottorin akselista. Tällä menetelmällä saadaan tarkimmat tulokset, mutta se on työläin menetelmistä moottorin irrotuksen takia. Moottoridynamometri voidaan myös saada pienempään tilaan, koska käytännössä tarvitaan vain yksi mittalaite moottorin akseliin kiinnitettynä.



### 3.2.2 Alustadynamometri

Alustadynamometri on helpoin auton tehon mittaamiseen käytetty menetelmä, koska sillä saadaan mitattua auton teho ilman moottorin irrotusta ja samalla pystytään testaamaan auton voimansiirron komponenttien toimivuus. Alustadynamometrillä mitataan siis moottorin tehoa voimansiirronkomponenttien jälkeen, joko navalta tai renkaalta. Tällä menetelmällä pitää kuitenkin ottaa huomioon useita seikkoja, jotka aiheuttavat häviöitä tehoon kuten:

- Kytkimen luistaminen
- Laakereiden vastus
- Vaihteiston vastus
- Nivelten vastus
- Voimansiirron inerttia
- Renkaiden luistaminen, jos rulladyno

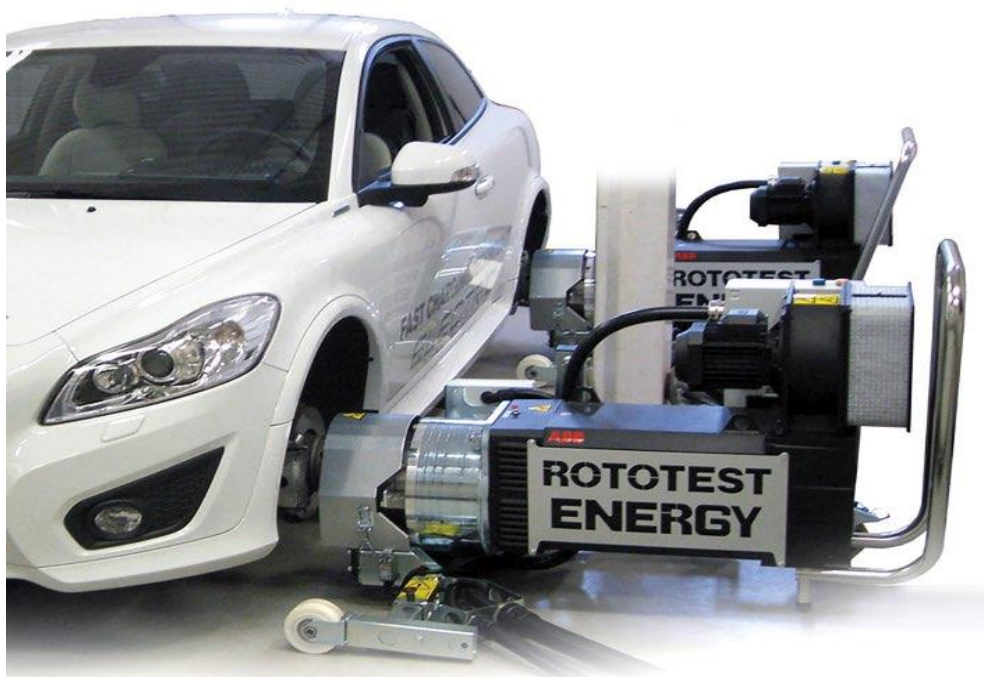
Alustadynamometrejä on kahdenlaisia napa- ja rulladynamometri (Jyotindra S. Killedar, 2012). Napadynamometriä käytettäessä ajoneuvosta poistetaan rengas, jonka jälkeen ajoneuvon napa liitetään suoraan dynamometrin mittalaitteeseen. Tällöin vältytään mahdolliselta renkaan luistamiselta. Rulladynamometriä käytettäessä ajoneuvon renkaan asetetaan isoille rullille, jotka ovat liitetty dynamometrin mittalaitteeseen. Tällöin ajoneuvon renkailla voidaan pyörittää rullia ja siten mitata tehoa hyvin helposti, mutta tämä menetelmä on riippuvainen rullien ja renkaan välisestä kitkasta, joten se saattaa olla epätarkka, jos rengas luistaa.

Usein alustadynamometrillä mitataan ajoneuvon niin sanottua rengastehoa, eli moottorin tehoa alustan ja voimansiirron komponenttien jälkeen. Alustadynamometrillä ei siis pystytä mittaamaan tarkkaa moottoritehoa, laskematta teoreettisia häviöitä voimansiirrosta ja ottamalla ne huomioon lopullisessa moottoritehossa (Jyotindra S. Killedar, 2012).

### 3.3 Rototest

Tehon mittaamiseen ja moottoria kuormittamaan, testauspenkkiin liitettiin VA:n käytössä oleva Rototest Ab:n dynamometri. Dynamometri järjestelmä koostuu kahdesta isosta dynamometriyksiköstä, jotka liitetään henkilöauton renkaiden tilalle eli kyseessä on napadynamometri. Rototest liitetään työssä kuitenkin laitteeseen, jossa ei ole normaalisti napoja, jonka takia testipenkkiin asennettiin Toyota Hiacen taka-akseli simuloimaan henkilöauton napoja. Napadynamometrit liitettiin Hiacen perään adapterien avulla, jotka tulivat Rototest systeemin mukana.

Rototest malli, jota työhön käytettiin, on erityisesti eri ajo-olosuhteiden simulointiin tarkoitettu malli, joka kestää suuria ympäristön lämpötilavaihteluita. Rototest dynamometrit eroavat suuresti muista dynamometreistä myös niiden kyvyllä sietää napojen kääntelyä ajon aikana, jolla voidaan simuloida autolla kääntymistä ajossa. Työssä käytetty malli, joka on hankittu VA:lle ajoneuvojen testaukseen on lähinnä ympäristön ja ajon simulointiin tarkoitettu eikä suurten tehojen mittaamiseen. (Kuva 6)



Kuva 6: Rototest napadynamometrit kiinnitettynä autoon ([www.rototest.com](http://www.rototest.com), 2022)

Rototest dynamometrin käytössä ilmeni ongelmia laitteiston alkuperäisen testaustarkoituksen sekä vähäisen informaation vuoksi, testipenkkiä suunniteltaessa ja sen käyttöönoton aikana. Suurimpina ongelmina ilmeni käytössä olleen Rototest mallin huono tehon kestävyys, sekä ohjausjärjestelmän ongelmat.

Kyseisen mallin tehonkesto on 125Kw ja väännönkesto 1200Nm. Moottorista saatava nimellisvääntö on noin 800Nm ja nimellisteho 140Kw, joka itsessään lähenee Rototestin rajoja. Koska moottori on liitettynä perään, jonka kautta moottorin vääntömomentti kertaantuu vielä perän välityksen verran seuraavanlaisesti.

$$\text{perän välitys} = 1:4,3$$

$$800Nm \times 4,3 = 3440Nm$$

*Tai toisaalta jos moottoria ajetaan Rototestin sallimien rajojen sisällä*

Näillä lukemilla testipenkkiä ei pystytä käyttämään läheskään täydellä moottorin väännöllä, joka kaventaa mahdollisten tutkittavien häiriötilanteiden aluetta.

Ohjausjärjestelmän käyttö on myös hankalaa, koska käytössä oleva laitteisto on vanhaa ja vaatii huoltoa sekä ohjelmistopäivityksiä. Rototestiä pystyttiin pyörittämään työn testaus vaiheessa, mutta dynamometriä ei saatu vastustamaan vääntöä tai rajoittamaan kierroksia. Ongelmaa pyrittiin ratkaisemaan olemalla yhteydessä valmistajaan, mutta kommunikaatio oli hyvin hidasta ja työ alkoi lähentyä jo loppua.

Testipenkin valmistuttua on tarkoitus purkaa Rototest laitteisto sen suuren koon takia, jolloin Rototest laitteisto poistettaisiin käytöstä lopullisesti. Koska valmistajan kanssa kommunikointi kesti jopa useita viikkoja ja aika opinnäytetyön kannalta oli vähissä, päätettiin työ tehdä loppuun ilman Rototestin vastustus ominaisuutta.

## 4 Sähköjärjestelmä

### 4.1 Komponentit

Työn suurimmat sähkökomponentit ovat ABB:lta ja Valmet Automotive EV Powerilta (VAEV), pienemmät osat löytyivät pääosin valmiiksi VA:n tiloista. Sähkömoottori sekä invertteri ovat ABB:n valmistamia ja akkumoduulit sekä Power Distribution Unit (PDU) eli tehonjakoyksikkö ovat VAEV:n valmistamia. Kommunikaatioon käytetään Vector CAN VN1640A:ta sekä CANoe ohjelmistoa. Järjestelmä vaatii myös 24 voltin jännitteen joidenkin komponenttien kommunikaatioon, sekä mm. kontaktorien sulkemiseen. Tämä 24 voltin jännite hoidetaan ulkoisella virtalähteellä. Työhön valmistetaan myös asianmukainen Low Voltage (LV) eli matalajännite johtosarja, mukaan lukien CAN kommunikaatioon vaadittavat johdot. Korkeajännitepuolelle valmistetaan High Voltage (HV) johtimet akkumoduulien ja PDU:n välille, sekä johdot PDU:lta invertterille ja Moottorin vaihejohdot.

HV johtimissa käytettiin Amphenol Powerlock Gen 1 ja Gen 2 HV liittimiä, joissa on sisäänrakennettu High Voltage Interlock Loop (HVIL) liitännät. Työn HV liittimet valikoituivat komponenttien valmistajien valitsemien liittimien perusteella, josta ABB:n komponenteissa käytettiin Gen 1- ja VAEV: komponenteissa Gen 2-Powerlock liittimiä.

#### 4.1.1 Moottori

Työssä käytetään ABB Oy:n *M3LK 160ML 4 B5* sähkömoottoria, koska ABB on käyttänyt kyseistä moottoria invertterillä, jota työssä käytetään ilman ongelmia. Moottori on tyypiltään kestopagneettitahtimoottori (PMSM, Permanent magnet synchronous motor) eli normaalista vaihtosähkö (AC) moottorista poiketen, PMSM moottorin roottorissa ei ole häkkiä, joka magnetoituu staattorin magneettikentästä, vaan PMSM moottorin roottorissa on kestopagneetteja (Dmitry Levkin, 2022). Moottori on mitoitettu 140 kilowatille ja 233 Ampeerille.

#### 4.1.2 Invertteri

Työssä käytetään ABB:n HES880 invertteriä, sen suuren jännitealueen ja modulaarisen luonteen takia. Invertteri on tarkoitettu pääosin käytettäväksi suurten laitteiden ja koneiden asennuksissa, eli sitä voidaan käyttää esimerkiksi sähköisissä työkoneissa tai laivoissa. Suuren tehonkeston ansiosta invertterissä on kaksi liitintä yhtä liitäntää kohden, eli esimerkiksi yhden positiivisen johtimen sijaan invertteriä voidaan käyttää kahdella positiivisella johtimella.

HES880 invertteriä voidaan ohjata kahdella eri menetelmällä, joko mukana tulleella ohjaimella tai Controller Area Network (CAN) käskyillä CAN verkoston välityksellä. Molempia menetelmiä käytetään invertterin ja siten myös moottorin ohjaamiseen, sillä molemmilla on hyvät puolensa ohjauksessa. Ohjaimella pystytään helposti ohjaamaan invertteriä ilman CAN verkoston mahdollisia ongelmia, jolloin pystytään todistamaan invertterin toiminta. CAN ohjausta käytetään työssä lopulliseen systeemin ohjaukseen, jotta koko systeemiä voidaan ohjata samalta tietokoneelta.

#### 4.1.3 Vector VN1640A

Ohjain, jolla invertteri ja PDU sekä moottori keskustelevat toistensa kanssa on Vector CAN VN1640A CAN käyttöliittymä ohjain. VN1640A on 4 kanavainen ohjain, joka liitetään tietokoneeseen USB johdolla ja ohjataan sitä kautta tietokoneessa olevalla käyttöliittymällä. Jokaisella kanavalla pystytään ohjaamaan yhtä CAN verkkoa, ja hoitamaan kommunikaatiota verkkojen välillä. Työssä käytetään kahta CAN verkkoa, toinen ohjaa PDU:ta sekä moduuleita ja toinen Invertteriä sekä moottoria. Molemmat CAN verkot kommunikoivat keskenään ja lähettävät ja vastaanottavat informaatiota toistensa välillä. Kaikki tämä informaatio kulkee käyttöliittymän eli tietokoneen kautta, josta käyttäjä pystyy seuraamaan informaatiota ja lähettämään käskyjä laitteille.

#### 4.1.4 PDU ja Moduulit

PDU ja akkumoduulit ovat Valmet-Automotive EV Powerin *modular battery platform* sarjasta, joka on modulaarisiin asennuksiin tarkoitettu moduuli ja PDU paketti. Moduuleissa ja PDU:ssa on sisäänrakennettu battery management system (BMS) eli akkujen hallinta järjestelmä, joka vähensi työtaakkaa sähköjärjestelmän suunnittelussa ja valmistamisessa. Työssä käytetyt akkumoduulit ovat modulaariseen HV sarjaan kuuluvia, eli niillä saadaan luotua korkeajännitteinen akkujärjestelmä laittamalla akkumoduulit sarjaan ja yhdistämällä ne ulkoiseen PDU:hun. (Kuva 7)



Kuva 7: Moduulit ja PDU (Vas.) ja Testipenkki (Oik.)

#### 4.2.1 Johdotus

Johdot valmistetaan pääosin täysin VA:n omissa tiloissa, sieltä löytyvillä työkaluilla ja tarvikkeilla. Johtojen valmistaminen on suhteellisen suoraviivaista, sillä lähestulkoon kaikki liittimet ovat saman valmistajan ja samaa sarjaa olevia. ensimmäiseksi valmistetaan kankeimmat ja suurimmat johdot eli HV johdot, joita työhön valmistetaan yhteensä viisi kappaletta: V, W ja U johdot eli Invertteriltä moottorille menevät vaihejohdot sekä Positiivinen ja negatiivinen johdin invertteriltä PDU:lle.

Johtojen liittiminä käytetään Amphenolin HV liittimiä, jotka on tarkoitettu erityisesti sähköajoneuvo käyttöön. Liittimien yksi tärkeimpiä ominaisuuksia virranjohtamisen ohella on sen HVIL toiminto, joka toimii yhdessä muiden komponenttien kanssa. HVIL järjestelmä varmistaa, että kaikki liittimet ovat paikoillaan eli kaikki kontaktit ovat sulkeutuneet ennen, kun järjestelmään syötetään suurjännitettä. HVIL järjestelmä käytännössä tutkii sähköpiirin jatkuvuutta, jossa liittimet toimivat katkaisijoina. Jokaisessa liittimessä ja komponentissa, joka on suurjännitepiirissä on siis liittimet HVIL piirille. Jos yksi katkaisija eli kontakti on auki niin myös piiri on auki, jolloin HVIL järjestelmä estää suurjännitteen kytkemisen päälle.

#### 4.2.2 Johtimet

HV johtimiin käytettiin erityisesti tähän tarkoitukseen tehtyä suojattua johdinta. Metallisella suojavaipalla (screening) varustetut johtimet, asian mukaisesti maadoitettuna estävät tehokkaasti elektromagneettisten häiriöiden pääsyn järjestelmästä ympäristöön (EMI, Electromagnetic interference). Toisaalta suojaus mahdollistaa järjestelmän oikean toiminnan häiriöisessä ympäristössä (EMC, Electromagnetic compatibility). Sormisuojatut liittimet (IPXXB) minimoivat sähköiskun vaaran.

Työssä käytetyssä johtimen kuoressa kolme keskeistä kerrosta: Ulkokuori, suojavaippa ja sisäkuori, jonka jälkeen tulee ydin eli sähköä johtava materiaali. Ulkokuoren tehtävä on suojata koko johdinta ulkopuolisilta mekaanisilta ja kemiallisilta rasituksilta ja toimia kerroksena läpilyönti eristeenä. Suojavaipan tarkoitus on parantaa johtimen EMI

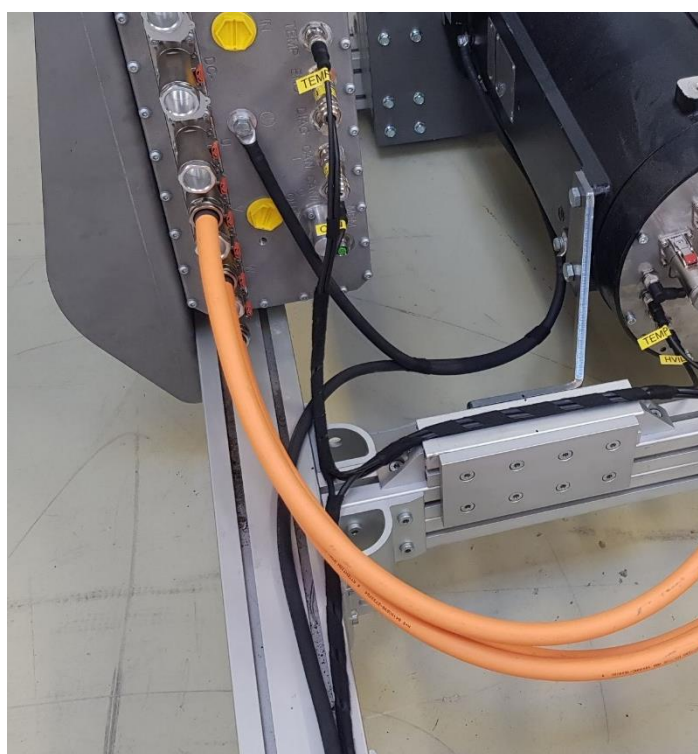
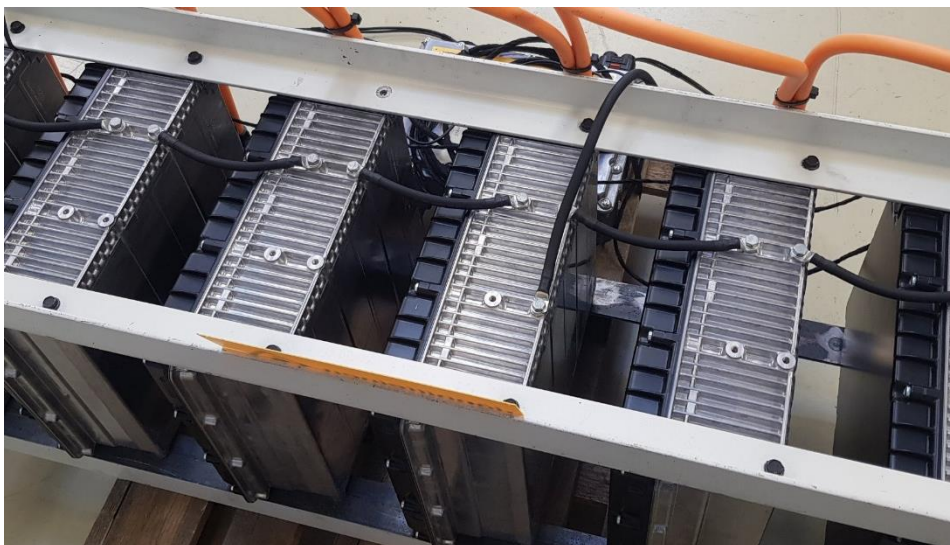
suojausta tekemällä koko johtimen ympärille faradein häkin, joka maadoitetaan molemmista runkoon. suojavaippa toimii samalla myös turvallisuutta lisäävänä elimenä eristäen läpilyöntejä. Sisäkuoren tarkoitus on erottaa suojavaippa ja ydin toisistaan tarpeeksi paksulla kerroksella, jotta EMC häiriötä ja läpilyöntimahdollisuutta saadaan pienennettyä. (Kuva 8)



Kuva 8: HV johdin ja liittimen komponentit

Koska kyseessä on HV systeemi, tehtiin siihen myös potentiaalintasausjohdot, eli johdot, jotka yhdistävät kaikki HV-komponenttien metallirungot toisiinsa, jotka saattavat olla kosketuksissa toisiinsa (kuva 9 ja 10). Johtona käytettiin standardin mukaan valittua 35 neliöistä kaapelia, joka on neliometri kooltaan puolet muista HV johdoista. (Dr. Horst Wunderlich, 2014) Potentiaalintasausjohdot varmistavat, että komponenttien runkojen välille ei voi syntyä potentiaaliero. Jos potentiaalintasausjohtoja ei olisi saattaisi käyttäjä samaan aikaan koskea esimerkiksi akkumoduulia ja invertteriä, joiden mahdollinen potentiaaliero kulkisi käyttäjän läpi potentiaalien tasaantuessa.





Kuva 9 ja 10: Potentialitasausjohdot moduulien välillä, johtimet jatkuvat PDU:lle sekä invertterille ja moottorille

## 5 Ohjelmisto

Työn kommunikaatioon laitteiden välillä käytetään VN1640A ohjainta, jonka kanssa käyttäjä kommunikoi Vectorin CANoe käyttöliittymän avulla. CANoe on suhteellisen helppo käyttöliittymä ohjelmoida, koska sen saa ohjelmoitua ilman koodaamista koodikielellä. Akkumoduuleita ja PDU:ta varten on valmis CANoe ohjelma jonka päälle tämän työn käyttöliittymä tehtiin. Valmiiseen koodiin on tehty CAN tietokanta ja tarvittavat mittarit sekä käskyt, akkumoduulien kanssa kommunikointiin ja niiden ohjaamiseen. (Vector Informatik GmbH, 2003) Valmiiseen käyttöliittymään tarvitsee lisätä invertterin varten toimintoja seuraavanlaisesti:

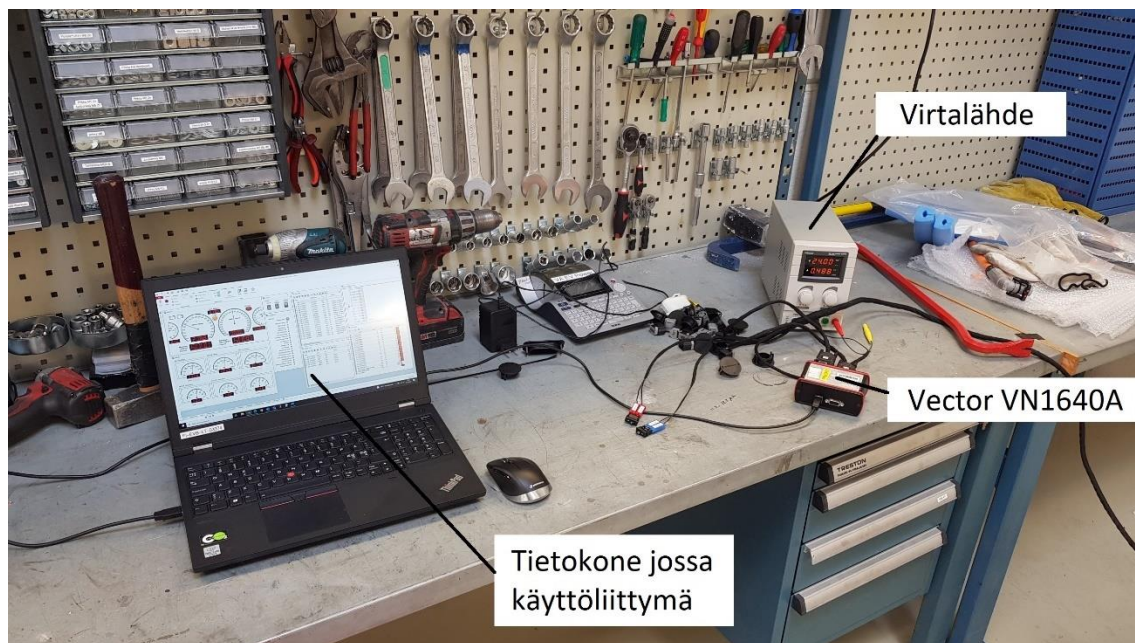
- CAN tietokanta, jotta käyttöliittymä tietää mitä invertterin lähettämät CAN viestit tarkoittavat
- Mittarit käyttäjää varten, joista näkee invertterin kriittiset tiedot
- Automatisoidut CAN viesti sekvenssit, joilla muun muassa voidaan käynnistää invertteri ilman tarvetta tehdä sekvenssiä manuaalisesti
- Käyttöliittymän virtuaaliset napit, joilla invertterin ohjataan
- Rajat ja suhdeluvut tietyille parametreille, jotka eivät saa ylittää tai alittaa tiettyä arvoa

## 5.1 Vector CANoe ohjelmointi

Aluksi ohjelmaan täytyy lisätä tietokanta invertterin käytössä olevista CAN viesteistä, koska ilman sitä ohjelmisto ei ymmärrä invertterin lähettämiä viestejä. HES880 invertterin tietokanta pyydettiin ABB:lta ja lisättiin ohjelmistoon. Tietokannan avulla ohjelmisto nyt ymmärtää kaikki viestit mitä invertteri sille lähettää ja pystyy prosessoimaan tiedon toimintoja varten. Ohjelmistoon lisätään mittarit, joille ohjelmisto pystyy lähettämään invertteriltä tulevan tiedon. Näistä mittareista käyttäjä pystyy sitten seuraamaan invertterin toimintaa, ja tekemään mahdollisia asetuksia niiden perusteella. (Kuva 11)

Jotta käyttäjä pystyy tekemään asetuksia tai lähettämään käskyjä invertterille, tulee sitä varten ohjelmistoon tehdä käyttöliittymä käyttäjälle. Käyttöliittymään lisättiin virtuaalisia nappeja, joita painamalla ohjelmisto lähettää invertterille haluttuja CAN viestejä tietokannan perusteella. Joitain toimintoja haluttiin myös automatisoida, jotta systeemin käyttö helpottuisi ja nopeutuisi. Käyttöliittymälle tehdään automatisoituja sekvenssejä, jossa yhtä nappia painamalla ohjelmisto lähettää useita käskyjä invertterille tietyssä järjestyksessä tietyin väliajoin. Nämä sekvenssit poistavat tarpeen käyttäjältä painaa useaa nappia, tehdäkseen yhden toiminnon invertterillä.

Jotkut CAN viestit sisältävät arvoja, joiden suhdetta tai suuretta ohjelmisto ei tiedä. Esimerkiksi kierrosluku tulee ohjelmalle numerona, mutta se ei tiedä sen suuretta tai suhdetta verrattuna todelliseen kierroslukuun. Ohjelmalle täytyy siis kertoa joidenkin lukujen suure, sekä kuinka suuria ne ovat suhteessa todellisuuteen. Suure pystytään asettamaan valikosta mutta suhde täytyy mitata todellisuudessa ja verrata sitä ohjelman luulemaan kierroslukuun ja joko kertoa tai jakaa lukua ohjelman sisällä.



Kuva 11: Vector CANOe ohjelmisto, Vector VN1640A ja virtalähde liitettynä LV johtosarjaan

## 6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli rakentaa fyysinen alusta millä pystytään testaamaan ja kuormittamaan akkuja simuloiden oikeita ajoympäristöjä, joille akku ajoneuvoon asennettuna alistuu. Työssä käytettiin mahdollisimman paljon valmiiksi hankittuja resursseja, jotta kustannukset saataisiin pidettyä alhaisina. Joitain ominaisuuksia ja komponentteja lisättiin tai poistettiin tarpeen mukaan, jotta testipenkki saatiin toimimaan halutulla tavalla. Tämä tarkoittaa, että työn aikana tehtiin huomattavia kompromisseja toiminnallisten ominaisuuksien kannalta. Testauspenkki liitettynä dynamometriin ja akkupakettiin on kuvattuna kuvassa 12, kuvasta puuttuu tietokone CANoe ohjelmistolla sekä Vector VN1640A.

Kompromisseista ja ongelmista huolimatta työ saatiin sellaiseen pisteeseen, että sillä pystyttiin:

- Ohjaamaan invertteriä ja moottoria sekä akkujärjestelmää CAN viesteillä
- Lukemaan tietoa, jota akut ja Inverteri lähettää
- Pyörittämään moottorilla dynamometriä, jolla pystyttäisiin mittaamaan ja vastustamaan moottorin voimia, jos dynamometri toimisi

Työn yksi ongelma on testipenkin suuri koko, lähinnä dynamometrin takia. Työn edessä kävi ilmi, että työssä käytetty napadynamometri tulitaisiin poistamaan käytöstä ja mahdollisesti korvattaisiin yrityksen tarpeita paremmin palvelevalla sähkömoottorien testaukseen soveltuvalla moottoridynamometrillä.

Työstä jäi puuttumaan toimeksiantajan toivoma ominaisuus ohjelmistosta, jolla pystyy rajoittamaan moottorin käyttämää virtaa akkujärjestelmän rajoitteiden perusteella. Valmet Automotiven kehittämä akunhallintajärjestelmä lähettää jatkuvasti väylälle tiedon akun sallimasta purku- ja latausvirrasta. Akunhallintajärjestelmä päivittää näitä dynaamisia arvoja akun varaustilan, lämpötilan, kennojännitteiden ja kuormitushistorian perusteella. Kuten mainittua, yksi työn tavoitteista oli toteuttaa Vector CANoe ohjaus-

ympäristöön akun ilmoittamat virtarajat huomioiva invertterin virranrajoitus. Tämä toteutus jouduttiin kuitenkin jättämään työn ulkopuolelle työn edetessä ilmaantuneitten viivästysten takia.



Kuva 12: Valmis testipenkki liitettynä rototestiin ja akkupakettiin

## Lähteet

[Manual VN1600 \(vector.com\)](#)

HES880 Inverter manual [EN / HES880 converter modules recycling instructions and environmental information, rev A \(abb.com\)](#)

EN\_HES880\_CANinterface\_UM\_B\_A4

[ABB Suomessa - ABB in Finland](#)

Dr. Horst Wunderlich – 2014 - Electrical Characteristics and Electrical Safety of High-Voltage Components in Road Vehicles – Requirements and Tests

Vector Informatik GmbH – 2003 - Introduction To The CANopen Protocol

Jyotindra S. Killedar – 2012 - Dynamometer: Theory and Application to Engine Testing

Dmitry Levkin – 2022- <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

## Liite 1

<b>ABB HES880: Connectors</b>			
Manufacturer	Part Num.	PCS.	Description
TE Connectivity	<a href="#">776164-1</a>	1	AUX. Connector
TE Connectivity	<a href="#">776463-1</a>	2	776164-1 strain relief
TE Connectivity	<a href="#">770854-3</a>	35	AUX. Connector Pin
MurrElektronik	<a href="#">7000-14521</a>	1	PC Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-13401</a>	1	CAN IN Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-13321</a>	1	CAN OUT Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-14001</a>	1	Temp. Sensor Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-17341</a>	1	Resolver Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-17121-2940150</a>	1	Diag. Connector and wire
MurrElektronik	<a href="#">7000-14021</a>	1	HVIL Connector
Amphenol	<a href="#">PL18W-301-50</a>	2	DC+ Connector
Amphenol	<a href="#">PL18Y-301-50</a>	2	DC- Connector
Amphenol	<a href="#">PL18U-301-50</a>	2	AC "U" Connector
Amphenol	<a href="#">PL18V-301-50</a>	2	AC "V" Connector
Amphenol	<a href="#">PL18X-301-50</a>	2	AC "W" Connector
MurrElektronik	<a href="#">7000-12651</a>	3	



Liite 1

## Bill Of Material

Test Bench				
Num.	Description	Manufacturer	Part Num.	PCS./Lenght
1	Inverter	ABB	HES 880	1
2	PMSM Motor	ABB	AMXE 160	1
3	Safety Controller Module	Epec	SC52	1
4	Can communication device	Vector CAN	VN1640A	1
5	Power Destripution Unit	Valmet Automotive EV	xxxx	1
6	Ampseal Connector	TE Connectivity	776164-1	2
7	776164-1 strain relief	TE Connectivity	776463-1	4
8	Ampseal Connector Pin	TE Connectivity	770854-3	70
9	M12 Connector	MurrElektronik	7000-14521	1
10	M12 Connector	MurrElektronik	7000-13401	1
11	M12 Connector	MurrElektronik	7000-13321	1
12	M12 Connector	MurrElektronik	7000-14001	1
13	M12 Connector	MurrElektronik	7000-17341	1
14	M12 Connector and wire	MurrElektronik	7000-17121-2940150	1
15	M12 Connector	MurrElektronik	7000-14021	1
16	HV Connector W	Amphenol	PL18W-301-70	2
17	HV Connector Y	Amphenol	PL18Y-301-70	2
18	HV Connector U	Amphenol	PL18U-301-70	2
19	HV Connector V	Amphenol	PL18V-301-70	2
20	HV Connector X	Amphenol	PL18X-301-70	2
21	Shielded Multicore Cable 4x0,25	Lapp	<a href="#">UNITRONIC LIYCY</a>	50m
22	Shielded Multicore Cable 7x0,5	Lapp	<a href="#">ÖLFLEX CLASSIC 115 CY 7</a>	50m
23	Single core power cable 70mm <sup>2</sup>	xx	xxxx	--
24	Adapter from motor to test bench	xx	xxxx	1
25	HES880 Cooling Jacket	xx	499566	2
26	Motor M12 connector	MurrElektronik	<a href="#">7000-12651</a>	3
27	M8x25 8.8 Bolt	Würth	27392825	64
28	M8x20 8.8 Bolt	Würth	27392820	14
29	Motor Rear Brace Left	xx	xxxx	1
30	Motor Rear Brace Right	xx	xxxx	1
31	Inverter Mounting Plate	xx	xxxx	1
32	Motor Mounting Plate Main	xx	xxxx	1
33	Square Nut for Alu Extrusion	Würth	33700018	64
34	M16x55 12.9 allen bolt	Würth	008316 55	4
35	M16 Nut	Würth	31716	4
36	M16 Washer	Würth	4111650	4
37	M12x30	Würth	273921230	4
38	M8 Square Nut	Würth	340098	100
39	Motor Cooling Jacket 1/2" x 20mm	Würth	5979001019	2
40	Akselinkiinnikkeet	Valmet Automotive EV	xxxx	2
41				

