



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Veli-Matti Soini

# Harjattoman sähkömoottorin testaus- laite

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

20.4.2019

Tekijä Otsikko	Veli-Matti Soini Harjattoman sähkömoottorin testauslaite
Sivumäärä Aika	23 sivua 20.4.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Elektroniikka
Ohjaajat	Eero Kupila, Lehtori
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa testauslaite harjattoman sähkömoottorin testamista varten, tarkoituksena oli erityisesti rakentaa pienikokoinen ja kompakti laite, jonka avulla voidaan ajaa erilaisia kuormituskokeita sähkömoottorilla ja näin selvittää moottorin ja nopeudensäätimen paras tehoalue.</p> <p>Testipenkin ohjelmisto koodattiin Arduino mikrokontrollerille, käyttöliittymänä toimi pieni 1.44" TFT -näyttö ja potentiometri, jonka avulla kuormitusta ohjattiin. Kuormitus toteutettiin tehovastuksilla, joiden johtavuutta ohjattiin MOSFET -transistorien ja PWM -signaalin avulla.</p> <p>Moottorina käytettiin harjatonta APS 6355 sähkömoottoria, jota ohjattiin VESC 4.2v nopeudensäätimellä. Moottorin vääntömomentti ja kierrosluku mitattiin Magtrol TM310 anturin avulla, samalla myös kokeiltiin teoriaa, jossa vääntömomentti arvioidaan ainoastaan virranmittauksen avulla.</p> <p>Tämä teoria toimi suuntaa-antavasti, mutta luotettavaa dataa varten menetelmä vaatii vielä parantelua. Dataa tuli todella paljon ja mittaustulokset suodatettiin Excelin avulla luettavaampaan muotoon. Suodatetusta datasta muodostettiin graafit. Mittaukset onnistuivat hyvin ja graafeista nähdään ohjausmenetelmien vaikutus moottorin käyttäytymiseen.</p>	
Avainsanat	elektroniikka, sähkömoottori, FOC, BLDC, nopeudensäädin

Author Title	Veli-Matti Soini Testbench for Brushless DC Motor
Number of Pages Date	23 pages 20 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electronics
Instructors	Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>The goal of this thesis project was to create a testbench for a brushless DC (BLDC) motor. Testbench is especially designed to be compact and only for medium size electric motors: for motors under 5 kilowatts of power.</p> <p>As a the “brain” of the testbench, Arduino microcontroller is used. The user interface works on 1.44” TFT display and the test load is adjusted with a potentiometer. For the load, power resistors adjusted by pulse width modulating are used. As test motor, APS 6355 BLDC motor is used, and for electronic speed controller (ESC) VESC 4.2v was selected. Measurements are recorded with Magtrol TM310 sensor. Theory of estimating torque of armature current is also tried in this project.</p> <p>This theory worked quite well, but for reliable data, it is not recommended. A lot of data was recorded, and it had to be filtered more readable; for this excel was used. Graphs of measurements can be found at the end of this report. Measurements worked well, and there can be seen differences between different controlling methods and loads.</p>	
Keywords	electronics, electric motor, FOC, BLDC, ESC

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Harjattoman sähkömoottorin rakenne	3
3	Harjattoman sähkömoottorin ohjausmenetelmiä	5
3.1	BLDC -ohjaus	6
3.2	FOC -ohjaus	6
4	Roottorin asentotieto	7
4.1	Asennon arvioiminen BEMF -signaalista	7
4.2	Asennon arvioiminen erillisellä anturilla	8
5	Testauslaitteiston suunnittelu ja rakentaminen	9
5.1	Suunnittelun toteutus ja osien valinta	9
5.2	Suunnittelulaitteiston rakentaminen	13
6	Teorian pohjalta päätellyt tulokset	13
7	Käytännön testin tulokset	14
8	Yhteenveto	22
	Lähteet	24

## Lyhenteet

BEMF	Back-EMF. Sähkömagneettisesta liikkeestä aiheutuva jännite moottorin käämien välillä.
BLDC	Brushless DC motor. Harjaton sähkömoottori. Tarkoitetaan myös kuuden askeleen ohjausmenetelmää.
BMS	Battery Management System. Akun seurantajärjestelmä, jonka tarkoituksena on suojata akkua erilaisilta virhetilanteilta.
ESC	Electronic Speed Controller. Sähköinen nopeudensäädin, joka vastaa BLDC -moottorin toiminnasta.
FOC	Field Oriented Control. Vektoriohjaus, kehittyneempi moottorin ohjausmenetelmä.
KT	Moottorin tuottama vääntömomentti / ampeeria kohti.
KV	Moottorin kierrosnopeus voltia kohti.
RPM	Revolutions Per Minute. Moottorin kierrosluku ilmoitettuna kierrosten määränä minuutissa.
Torque	Moottorin vääntömomentti, luku ilmoitettu newtonmetreinä (Nm).

## 1 Johdanto

Sähkömoottoreita on jo pidemmän aikaa käytetty monissa henkilökuljettimissa ja työkaluissa. Aiemmin moottoreina ovat riittäneet hiiliharjalliset sähkömoottorit, joissa sähkömoottorin ohjaamisesta huolehdittiin mekaanisesti hiiliharjojen ja mekaanisen kommunikaattorin avulla. Näiden moottorien ohjaaminen on helppoa, sillä ne eivät vaadi erillistä ohjauselektroniikkaa toimiakseen. Yksinkertaisella ohjauksella on kuitenkin haittapuolensa, nimittäin mekaanisten osien suuri massa ja koko. Tämän takia harjallisten moottorien teho-painosuhde on huono. (4.)

Harjalliset tasavirtamoottorit vaativat myös huoltoa, sillä hiiliharjat ovat jatkuvasti kontaktissa roottoriin, mikä kuluttaa hiiliharjoja ajan myötä. Moottorit myös aiheuttavat kipinöitä roottorin ja hiiliharjojen välisessä kontaktissa, ja tämän takia moottoreita ei saisi käyttää tiloissa, joissa ei saa aiheutua kipinöitä. Nämä moottorit eivät myöskään kestä kosteutta hyvin, sillä roottori ja hiiliharjat vaurioituvat kosteudesta. (4.)

Nykyisten lakisäädösten mukaisesti sähköisillä henkilökuljettimilla saa liikkua kevyen liikenteen seassa ja usein niitä myös kannetaan mukana. Tämän takia myös moottorien tulee olla mahdollisimman kevyitä, toimintavarmoja ja riittävän tehokkaita.

Harjattomat tasavirtamoottorit ovat huomattavasti kehittyneempiä edellä mainittuihin harjallisiin tasavirtamoottoreihin verrattuna. Harjattomat tasavirtamoottorit ovat käytännössä täysin huoltovapaita, sillä ainoa mekaaninen osa on akselin tukilaakeri, joka käytännössä kestää koko laitteen eliniän ajan. (4.)

Harjattomien tasavirtamoottorien ohjaus on toteutettu erillisellä ohjauselektroniikalla, tämä on vaikeampi toteuttaa monimutkaisen elektroniikan vuoksi. Hyvin suunniteltu nopeudensäädin mahdollistaa kuitenkin harjattoman tasavirtamoottorin tarkan ohjauksen läpi moottorin koko kierrosalueen. (4.)

Harjattomat tasavirtamoottorit myös sopivat kosteisiin tiloihin ja ulkokäyttöön paremmin, sillä moottorissa ei ole mitään kontaktialuetta, joka voisi ruostua tai mitä kosteus haittaisi. Normaalisti moottori ei myöskään synnytä kipinöitä ja kaikki virralliset johdot on suojattu eristelakalla. Myöskään oikosulun vaaraa ei pitäisi olla niin kauan kuin eristelakka säilyy ehjänä. Eristelakka on vahvaa, eikä se kulu helposti. Liian suuri virta saattaa ylikuumentaa käämejä niin paljon, että eristelakka saattaa palaa osittain ja vaurioittaa moottorin käämitystä. Tämän takia virran määrää tulee tarkkailla koko ajan sekä rajoittaa niin, että moottorikohtainen virran yläraja ei ylity. (1.)

Harjattomien sähkömoottorien hyötysuhde on useimmiten 70–90 % luokkaa suurelta osin käyttöaluetta. Hyötysuhde on huomattavasti harjallista sähkömoottoria parempi, osittain tämä ero johtuu hiiliharjojen aiheuttamasta kitkasta ja teho häviöstä. Harjattomissa moottoreissa on myös huomattavasti parempi teho-paino ja teho-kokosuhte. Tämä johtuu siitä, että moottorin sisällä ei ole ylimääräisiä mekaanisia osia lisäämässä painoa ja kokoa. Tästä johtuen harjaton moottori myös pyörii helpommin, koska liike-energiaa ei kulu hiiliharjojen aiheuttamaan kitkaan. (1.)

Nopeudensäätimen suunnitteleminen harjattomalle moottorille ei ole helppo tehtävä ja se vaatii paljon suunnittelua sekä testaamista. Ohjausmenetelmiä on monia erilaisia variaatioita, ja jokainen moottori on yksilöllinen ja optimointi usein vaatii paljon moottorin sekä ohjaimen hienosäätämistä.

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena on rakentaa testilaitte, joka helpottaa moottorin sekä moottorinohjaimen toiminnan testaamista. Testilaitteen avulla voidaan ajaa erilaisia kuormituskokeita ja selvittää moottorin toimintaa. Testilaitte kuormittaa myös akkua ja mahdollista BMS yksikköä, joten samalla voidaan testata akkupaketin toiminta.

## 2 Harjattoman sähkömoottorin rakenne

Harjaton sähkömoottori voidaan rakenteellisesti jaotella kolmeen osa-alueeseen, jotka vaikuttavat moottorin ominaisuuksiin. Näiden lisäksi moottoriin on mahdollista lisätä muita osia, jotka parantavat ohjaustarkkuutta ja hyötysuhdetta, mutta eivät kuitenkaan ole pakollisia normaalin toiminnan kannalta. (1.)

Moottorin rakenteelliset osat jaoteltuina ovat staattori, käämitys ja roottori.

Mekaanisesti yksinkertaisen rakenteensa ansiosta harjaton moottori on mahdollista rakentaa itsekkin kokeilumielessä, koska se on mahdollista saada pyörimään yksinkertaisella elektroniikalla. Kuitenkin käytännöllisen ja energiatehokkaan moottorin, sekä ohjauselektroniikan toteutus vaatii kyseiseen työhön tarkoitettua suunnitteluohjelmiston ja asiaan kuuluvan kehitysprosessin.

### Staattori

Staattori sijaitsee joko roottorin sisäpuolella tai ulkopuolella moottorin rakenteesta riippuen. Staattorin suunnitteluun liittyy paljon samoja asioita kuin muuntajan suunnitteluun. Staattorin sydänmateriaalin tulisi olla sellaista, että se johtaa magneettikentän tehokkaasti roottorin magneeteille asti. Magneettikentän muutokset aiheuttavat pyörrevirtoja staattorin sydänmateriaaliin. Pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviötä, mistä seuraa lämpöongelmia moottorissa. (2, s. 7-15)

Toinen vaatimus materiaalille on, että sen tulee tehokkaasti reagoida magneettikentän muutoksiin, eli materiaalin magneettisen hystereesin tulisi olla matala, ettei magneettikentän muutosnopeus hidastu liikaa hystereesin takia. Jos tämä muutosnopeus on hidas aiheuttaa se myös tehohäviötä moottorissa. Näitä vaatimuksia varten sydänmateriaalina käytetään erikoisvalmistettua rautaseosta, joka täyttää nämä ehdot. Rautaseoksesta on saatavilla monia erilaisia sekoituksia, useimmiten kyseessä on rautasilikoni -seos. Rautaa käytetään sen erinomaisten magneettisten ominaisuuksien takia. Silikonia lisäämällä saadaan nostettua materiaalin resistiivisyyttä. Silikonin määrä seoksessa vaihtelee useimmiten 0–3 % väliltä. (2, s. 7-15)

Staattorin muotoilulla on myös paljon merkitystä, ja muotoilun suunnittelu toteutetaan simuloimalla ja analysoimalla se tietokoneella. Esimerkiksi yksinkertainen tapa nostaa staattorin hyötysuhdetta, on rakentaa staattori useammasta laminoidusta metallilevystä, tämä vähentää virtaa johtavaa pinta-alaa staattorissa, näin ollen staattorin resistiivisyys nousee ja pyörrevirtojen määrä laskee. (2, s. 7-15)

### Käämi

Työssä käytetty sähkömoottori on eräänlainen versio yleisestä kolmivaihemoottorista. Tässä versiossa kuitenkin käämien päätejohdot ovat valmiiksi yhdistetty moottorin sisällä joko tähti- (Y) tai kolmiokytkennällä ( $\Delta$ ). Moottorilta tulee siis vain kolme virtajohtoa. Käämien materiaalina usein käytetään kuparia tai alumiinia. Kupari johtaa virtaa paremmin, mutta alumiini on kevyempää ja edullisempää. Yleinen tapa moottorin ominaisuuksien muuttamiseen jälkeenpäin on uudelleenkäämitys. Uudelleenkäämityksessä vanha käämi puretaan pois ja tilalle käämitään uusi käämi. (2, s. 74-81)

Uudelleenkäämityksessä käämien kierrosmäärää muutetaan sekä mahdollisesti käytetään suurempi pinta-alasta johdinta. Käämin silmukoiden kierrosmäärä on suorassa suhteessa moottorin huippukierrosnopeuteen sekä vääntöön, mutta kuitenkin sydänmateriaalin ominaisuuksien puitteissa. Moottorin huippunopeus usein ilmoitetaan KV -luvun perusteella, joka kertoo moottorin kierrosnopeuden voltia kohden. Tiedoissa voidaan myös ilmoittaa KT -luku, joka vastaa moottorin tuottamaa vääntömomenttia käämissä kulkevaa ampeeria kohti. (2, s. 74-81)

### Roottori

Roottori voi sijaita joko staattorin ulkopuolella tai sisäpuolella. Jos roottori sijaitsee staattorin sisäpuolella, on kyseessä sisäpyöräjä, ja jos roottori sijaitsee staattorin ulkopuolella, kutsutaan moottoria ulkopyöräjäksi. Roottorin magneettien asettelu sekä muotoilu vaihtelevat paljon eri moottorityyppien välillä. Magneettien asettelu ja muotoilu sekä magneettikentän suuntaus vaikuttavat moottorin BEMF -signaalin muotoon ja moottorin

toimintaan. Tässä työssä testattavassa moottorissa on käytetty säteittäistä magneetti järjestystä, ja tästä johtuen BEMF -signaali on trapetsimainen. (2, s. 74-83)

Sisäpyörijöistä on mahdollista saada enemmän tehoa kuin vastaavan kokoisesta ulkopyörijästä. Tämä johtuu siitä, että sisäpyörijän inertia on pienempi sekä käämien jäähtyminen on tehokkaampaa, koska käämit sijaitsevat roottorin ulkopuolella. Paremman jäähtyvyyden ansiosta moottorin läpi on mahdollista ajaa enemmän virtaa. Suurempi ohjausvirta nostaa moottorin vääntömomenttia, joka vastaavasti tarkoittaa tehon nousua. Vääntömomentin noususta huolimatta sisäpyörijöiden vääntömomentti on huomattavasti matalampi kuin ulkopyörijöiden. Tämä johtuu siitä, että ulkopyörijöissä magneettien etäisyys akselista on pidempi ja tämä luo suuremman vääntömomentin. Ulkopyörijän roottorin pinta-ala on myös suurempi, mikä mahdollistaa useamman magneetin asentamisen roottoriin, joka vastaavasti myös nostaa vääntömomenttia. Tästä johtuen sisäpyörijät ovat niin sanotusti kierrosmoottoreita. (2, s. 74-83)

Usein magneetteina käytetään neodyymimagneetteja, joiden tarkemmat ominaisuudet, kuten lämpötilan kesto ja magneettien voimakkuus, on kerrottu erikseen. Usein harjattomissa moottoreissa roottorit ovat muotoiltu niin, että BEMF -signaali on trapetsimainen. Käämien induktanssista johtuen ulostuleva signaali muistuttaa myös osittain siniaaltoja. (2, s. 22-37)

### **3 Harjattoman sähkömoottorin ohjausmenetelmiä**

Kuten edellä mainittiin, harjatonta sähkömoottoria pyörittäessä voidaan moottorin käämeistä mitata BEMF -signaali. Moottorin tuottama vääntömomentti on suurimmillaan, kun staattorin luoma sähkömagneettikenttä on kohtisuorassa roottorin kestomagneettien luomaan magneettikenttään nähden. Staattorin luoman magneettikentän voimakkuus riippuu senhetkisen käämissä kulkevan virran suuruudesta. Staattorin luoman magneettikentän suunta riippuu senhetkisestä staattorissa kulkevan virran suunnasta. Toivottavaa on, että magneettikentät olisivat koko ajan kohtisuorassa ja vääntömomenttia muutettaisiin kentän voimakkuutta muuttamalla, eli ohjaamalla virran määrää. Näin saadaan mahdollisimman paljon sähköenergiasta muutettua mekaaniseksi pyöriväksi energiaksi. Tämä kuitenkin on käytännössä vaikeaa ja vaatii prosessorilta jatkuvaa laskemista

magneettikenttien asennon arvioimiseksi. Tässä työssä perehdytään BLDC -ja FOC -ohjausmenetelmiin. (4.)

### 3.1 BLDC -ohjaus

Yksinkertaisin menetelmä ohjata harjatonta sähkömoottoria on käyttää BLDC ohjausta, eli ohjata moottoria pelkästään kanttiaallolla. Menetelmässä ainoastaan kahden moottorin käämin läpi johdetaan virtaa ja kolmas käämi on avoin. Avoimesta käämistä on mahdollista mitata BEMF -signaali. BEMF -signaalin muutoksen avulla voidaan tutkia, jos roottorin asento muuttui. Tämä tieto on oleellinen moottorin pyörittämistä varten. Menetelmässä virtaa ohjataan vain kuudella askeleella, jokainen käämeistä on vuorotellen yhdistettynä positiiviseen tai negatiiviseen jännitteeseen ja kolmas johto on avoin. Moottorien erittäin matalan resistanssin takia käämeissä kulkevaa virtaa rajoitetaan koko ajan PWM -modulaatiolla. Tämä kuuden askeleen menetelmä aiheuttaa moottorin vääntöön epätasaisuutta, koska virran suuntaa muutetaan portaallisesti. Tämä myös aiheuttaa resonointia moottorin sisällä, joka puolestaan aiheuttaa akustista ääntä, joka on ihmiskorvalla kuultavissa. BLDC -ohjaus ei vaadi paljon prosessori tehoa, sillä ohjausalgoritmi on yksinkertainen ja sisältää vain kuusi askelta, eikä vaadi paljon mitattavaa tietoa. (4.)

### 3.2 FOC -ohjaus

Kyseinen ohjausmenetelmä on vasta viime vuosina tullut suosituksi henkilökuljettimissa. Tämä johtuu siitä, että ohjaus vaatii huomattavasti enemmän prosessoritehoa ja tarkempaa mittausta, kuin yksinkertainen BLDC -ohjaus. Teknologian kehittyessä mikroprosessorit ovat nopeutuneet ja kehittyneet niin, että kyseisen ohjaustekniikan käyttäminen ei enää ole liian kallista. Kyseisessä metodissa moottorin kaikkia kolmea käämiä ohjataan samanaikaisesti, käämien väliset virrat muuttuvat portaattomasti, eikä jyrkkiä siirtymäkohtia ole. Tarkoituksena on ohjata virtaa niin, että se luo magneettikentän, joka olisi aina kohtisuorassa roottorin magneettikenttään nähden. Tätä varten moottorista tulee mitata ensin useita suureita, kuten induktanssi, resistanssi ja käämivuo. Mitattujen tietojen perusteella mikroprosessori arvioi reaaliajassa staattorin ja roottorin

magneetikentän. Laskukaavat ovat monimutkaiset ja tämän takia FOC ohjausmenetelmä vaatii tehokkaan mikroprosessorin. (4.)

#### 4 Roottorin asentotieto

Molemmat ohjausmenetelmät vaativat reaaliaikaisen tiedon tai vähintäänkin arvion roottorin asennosta, jotta virtaa osataan ohjata oikeiden käämien läpi. Käämien läpi tulisi ohjata virtaa niin, että virtojen luoma magneetikenttä tuottaisi halutun vääntömomentin moottorin akselille haluttuun pyörimissuuntaan. (2, s. 555-563)

Roottorin asennosta on mahdollista saada tietoa, joko erillisellä anturilla tai käämeistä tulevan BEMF -signaalin perusteella. Tämän lisäksi on kehitelty uusia tapoja arvioida roottorin asento sen ollessa paikallaankin, mainittakoon sen hetkisen induktanssin avulla pääättelemisen ja nykyään kehitteillä olevat tekoälyratkaisut. (2, s. 555-563)

##### 4.1 Asennon arvioiminen BEMF -signaalista

Työssä käytetyssä moottorissa kestopagneetit on kiinnitetty roottoriin, tämä aiheuttaa muuttuvan magneetikentän käämeille, kun roottorin pyörii. Muuttuva magneetikenttä aiheuttaa virran muutoksen käämeihin ja tästä indusoituu jännite käämin päiden välille. Toisin sanoen moottori toimii generaattorina, kun sitä pyöritetään. Saman ominaisuuden avulla moottorin pyörimistä on mahdollista jarruttaa, ja kyseistä laturi ominaisuutta käytetään tässä työssä kuorman luomiseksi.

BEMF -signaalin perusteella toteutetussa ohjauksessa on se ongelma, että se toimii ainoastaan, kun roottori pyörii. BEMF -signaali indusoituu vain, kun roottorin magneetit liikkuvat, eli roottorin täytyy olla jo liikkeessä. Tämän takia moottoria on hankala saada paikaltaan liikkeelle kyseisellä tekniikalla. Paikaltaan lähtiessä moottori aiheuttaa helposti nykimistä, sillä roottorin asentoa ei vielä tiedetä tarkkaan ja virtoja joudutaan ohjaamaan arvauksien perusteella. Tähän ongelmaan on kehitelty erilaisia tekniikoita, joilla

on mahdollista arvioida roottorin asento paremmin sen ollessa paikallaankin, ilman erillisiä antureita moottorissa. (4.)

#### 4.2 Asennon arvioiminen erillisellä anturilla

Yleisin ja kustannustehokkain tapa roottorin asennon selvittämiseen on käyttää hall-antureita, jotka ovat sijoitettu tasaisin välein roottorin ympärille. Yleensä hall-antureita on kolme kappaletta, ja ne sijaitsevat moottorissa 120 sähköisen asteen välein. Antureiden avulla saadaan tietoa roottorin nykyisestä asennosta. Tämä tieto on erityisen hyödyllinen, kun vaaditaan enemmän vääntöä liikkeelle lähtiessä. Hall-anturit ovat bipolaa-risia latch-tyyppisiä antureita, eli anturit vaihtavat digitaalisen tilansa vain, kun havaitun magneettikentän napaisuus on vaihtunut edelliseen havaintoon verrattuna. Kolmen hall-anturin avulla saadaan kolmebittinen binääriluku, jossa on kuusi vaihtoehtoa. Vaihtoehtoja on vain kuusi, sillä tilanteet 000 ja 111 eivät ole mahdollisia. Tätä tietoa yleensä käytetään hyödyksi myös vikatilanteiden havaitsemisessa. Jos ohjauspiiri saa kumman vain näistä binääriluvuista, tiedetään että jossain on vikaa. (4.)

Tässä menetelmässä on kuitenkin se ongelma, että sen tarkkuus on rajallinen, eikä näin tuota optimaalista moottorinohjausta. Menetelmän tarkkuus riippuu roottorin magneettien määrästä, jos roottorissa on esimerkiksi seitsemän paria magneetteja, vaihtuu hall-anturien ilmoittama tila aina kun moottori kääntyy  $8,57$  astetta. Tämä tulee kaavasta  $3 * \frac{360^\circ}{2*7} \approx 8,57^\circ$ . Tästä johtuen moottorin ohjaus usein vaihdetaan sensorittomaan tilaan sen jälkeen, kun moottori on saatu pyörimään tasaisesti. Sensorittomassa tilassa tätä epätarkkuutta ei varsinaisesti ole, sillä roottorin asento arvioidaan ohjelmallisesti. (4.)

Nopeudensäätimet usein tarjoavat vaihtoehdon vaihtaa ohjaus takaisin sensorittomaan tilaan, kun haluttu kierrosnopeus on saavutettu. Kierrosnopeuden noustessa ja tasaantuessa sensoriton ohjaus on hyötysuhteeltaan parempi kuin sensorillinen, mikä johtuu yksinkertaisesti siitä, että sensorillisessa ohjauksessa roottorinasento rajoittuu sensorien tarkkuuteen, kun taas sensorittomassa tilassa voidaan roottorin asento laskea lähes portaattomasti, kunhan kierrosnopeus pysyy riittävän tasaisena.

Muita tapoja roottorin asennon havaitsemiseen ovat resolverit ja enkooderit. Nämä erilliset anturit nostavat huomattavasti roottorin asentotiedon tarkkuutta, ja näin ollen parantavat moottorin ohjaustarkkuutta ja hyötysuhdetta. (4.)

## 5 Testauslaitteiston suunnittelu ja rakentaminen

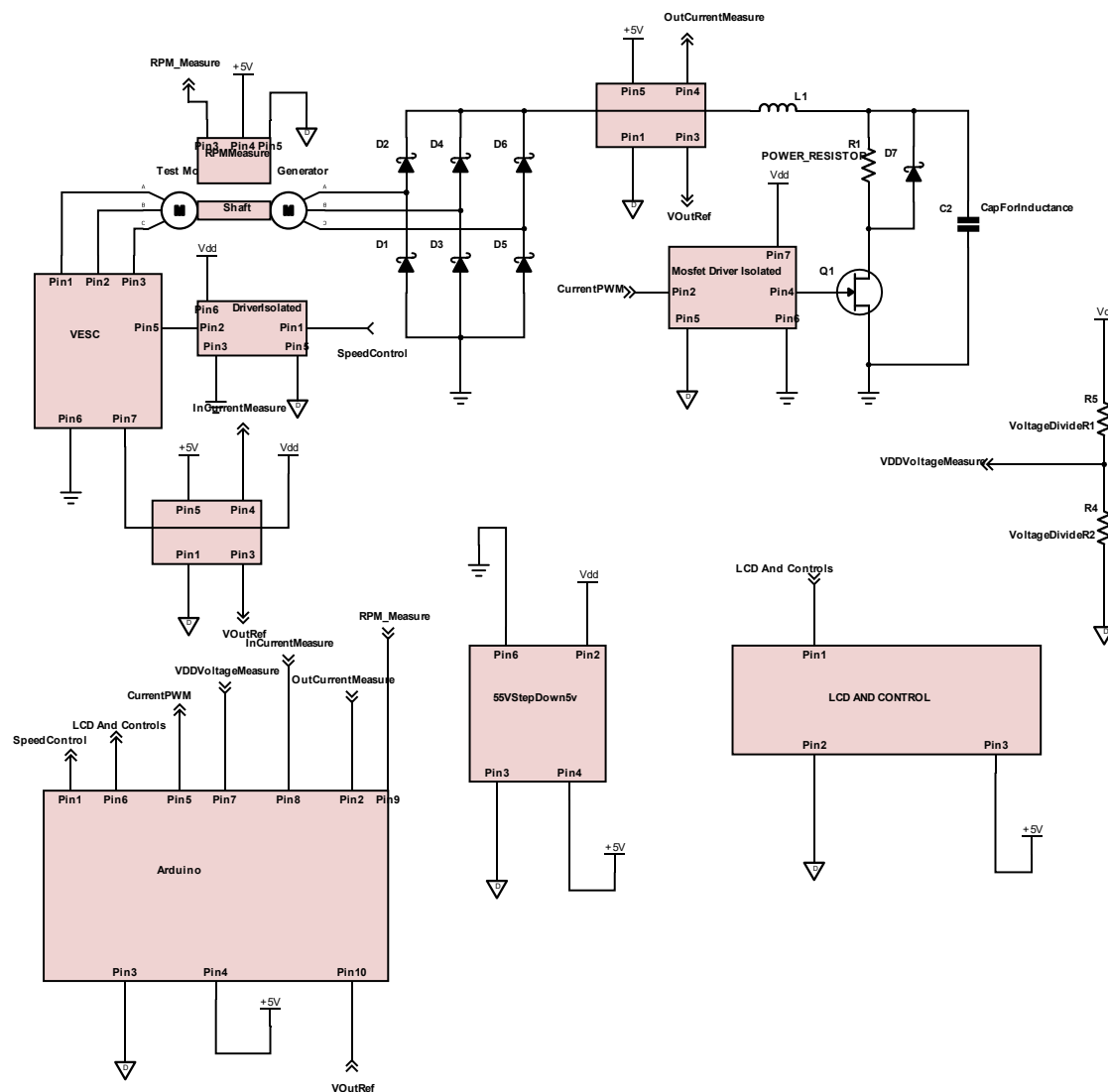
Edellä mainittujen ohjausmenetelmien toimintaa testataan ja mitataan erillisellä testauslaitteistolla, jonka suunnitteluun ja rakentamiseen perehdytään tässä luvussa. Mittauslaitteen avulla selvitetään moottorin hyötysuhde eri kierrosalueilla ja muuttuvalla kuormituksella. Testit suoritetaan FOC- ja BLDC- tilassa. Testattavana moottorina käytetään APSin 6355 BLDC -moottoria ja nopeudensäätimenä käytetään avoimen lähdekoodin VESC -nopeudensäädintä.

### 5.1 Suunnittelun toteutus ja osien valinta

Testauslaitteisto suunnitellaan Fusion360 -ohjelmistolla, testauslaite rakennetaan pääosin 3D -tulostetuista osista. 3D -tulostetut osat valitaan, koska ne ovat nopeita valmistaa ja riittävän vahvoja tämän teholuokan testejä varten.

Kuormana käytetään toista vastaavaa harjatonta moottoria, jonka tuottama kolmivaihevirta muutetaan tasavirraksi tasasuuntaajan avulla. Tasasuunnattu virta ohjataan tehovastuksille. Yleensä kuormamoottorin tulisi olla tehon kestoaltaan suurempi kuin testimoottorin, mutta tässä testissä moottoreita ei kuormiteta aivan niiden rajoille asti, joten tämä ei haittaa. Tasasuuntaajan jälkeen on lisätty kela L1, jonka tarkoituksena on tasoittaa virranmuutoksia niin, että virran mittaaminen on helpompaa ja kuormitus tasaisempi.

Tämän lisäksi on huomioitavaa piireissä esiintyvä loisinduktanssi. Esimerkiksi tehovastuksien yli tulee lisätä nopeasti avautuva Schottky -diodi D7, joka suojaa Mosfet -transistoria tehovastuksissa piilevän loisinduktanssin aiheuttamilta jännitepiikeiltä. Tämän lisäksi mahdollisimman lähelle kuormaa lisätään vielä kondensaattori (piirissä nimetty CapForInductance) varastoimaan indusoitunut virta.



Kuva 1. Piirikaavio testilaitteesta

Kuvassa 1 nähdään testauslaitteen kytkentä. Testauslaite ohjaa nopeudensäädintä ja kuormavastusta, rasituskokeen voi itse ohjelmoida. Testauslaite myös mittaa nopeudensäätimelle menevän jännitteen ja virran, jonka perusteelta lasketaan käytettävä teho. Generaattorin päädyssä on myös virranmittaus. Teorian mukaan tämä virta on suoraan verrannollinen generaattorin aiheuttamaan vääntömomenttiin, joten mahdollisuutena olisi ajaa erilaisia vääntökuormia riippumatta kierrosnopeudesta. Testissä käytettävät LAH 25-NP -virtamittarit antavat ulostulovirran. Tämä ulostulovirta viedään vastuksen läpi maihin ja vastuksen yli oleva jännite mitataan Arduinolla.

Tulevaisuudessa nämä olisi mahdollista vaihtaa tarkempiin komponentteihin. Kytkeä on kuitenkin suunniteltu niin, että ylimääräiset häiriöt saataisiin minimoitua. Esimerkiksi suurvirtamaa on eristetty pienvirtamaasta, ettei suurvirtamaa häiritse herkkiä analogisia mittauksia. Jos virta saadaan mitattua riittävän tarkasti, olisi mahdollisuus ottaa kokonaan momenttianturi pois ja kalibroida moottorin vääntömomentti mitatun virran mukaan. Tämän avulla jatkossa voitaisiin päätellä vääntömomentti pelkästään mitatun virran avulla.

Testauksen määritelmät ovat seuraavat:

- Huoneen lämpötila noin 20 astetta.
- Testattavan moottorin tehoa rajoitetaan lämpötilan mukaan, maksimi lämpötila 50 astetta.
- Testissä käytetään 22.2V Litium-Polymeeri akkua.
- Perus testissä testataan opinnäytetyön ja MAGTROL -momenttianturin eroavaisuudet ja selvitetään, kuinka hyvin virtaa mittaamalla on mahdollista arvioida vääntömomentti.
- Syvemmissä testissä kierrosnopeus ajetaan askelin 200→2900 kierrokseen minuutissa. Jokaisella askeleella pidetään kierroksia kahden sekunnin ajan, jotta saadaan mitattua tarpeeksi näytteitä luotettavaa keskiarvoa varten.
- Vääntömomentti ja kierrosnopeus mitataan 500 hertsin taajuudella, eli kahden millisekunnin välein, tämä auttaa tarkemman tuloksen saamisessa, kun useasta mittausnäytteestä lasketaan keskiarvo.
- Testattavan moottorin virta on rajoitettu 48,3 ampeeriin, joka on suoraan verrannollinen moottorin tuottamaan maksimivääntömomenttiin sekä moottorin lämpenemiseen.

- Akun varausta valvotaan, eikä varausta päästetä liian alas, sillä se vaikuttaa moottorin maksimikierronnopeuteen. Akun varauksen takia myös kierrokset mitataan vain 2900 rpm:iin asti, ettei mahdollinen jännitteen putoaminen haittaa mittausta.

Testauslaitteeseen kuuluvat seuraavat osat:

- kuormittava sähkömoottori, APS 6355 Sensored BLDC
- Magtrol TM310 -mittausanturi
- nopeudensäädin harjattomalle moottorille, VESC 4.2
- Arduino, joka ohjaa testattavan moottorin kuormitusta
- virtalähde, eli tässä tapauksessa akku
- testipenkkiin kuuluva 1.44” TFT näyttö ja säätövipu, jonka avulla kuormitusvastus valitaan

Testauksessa mitataan seuraavat suureet ja seuraavilla mittaus välineillä:

- Moottorien kierrosnopeuden sekä vääntömomentin mittaaminen tapahtuu koululta saatavan Magtrol TM310 -anturin avulla. Anturi kiinnitetään testattavan moottorin ja kuormavastuksen akselin väliin. Tiedot luetaan Torque7 -ohjelmistolla, jolta ne siirretään tietokoneelle.
- Nopeudensäätimen ottama teho luetaan VESC -ohjelmiston avulla ja tallennetaan sen avulla tietokoneelle.
- Moottorin lämpötila luetaan nopeudensäätimen kautta, joka saa tietonsa moottorin sisällä sijaitsevasta lämpötila-anturista.

- Arvio roottorin asennosta luetaan sensorillisessa ja sensorittomassa tilassa.
- Moottorin melu arvioidaan FOC -ja BLDC -tilassa.

Kuten yllä mainittiin osa datasta vastaanotetaan eri laitteen kautta ja data on muotoiltu eri formaatissa. Tämä datan käsittely vaatii paljon mittaustulosten käsittelytyötä, jotta tiedot saadaan yhdistettyä samaan taulukkoon.

## 5.2 Suunnittelulaitteiston rakentaminen

Rakentaminen aloitettiin ensin suunnittelemalla osat Fusion360 -ohjelmalla, minkä jälkeen osat tulostettiin ja kokeiltiin osien sopivuus. Ongelmia tuottivat varsinkin moottorien akselien keskitys ja kaikkien osien saaminen kohdalleen. Ensimmäisessä versiossa kaikki komponentit oli pultattu paikalleen, mikä aiheutti värähtelyä. Värähtelyä aiheutui, koska akseleita oli vaikea saada täysin keskitettyä. Ongelmasta päästiin eroon suunnittelemalla testaustelineen rakenne uudelleen tukevammaksi. Uudesta telineestä suunniteltiin niin tukeva, että anturin kiinnittämiseen ei tarvittu pultteja.

## 6 Teorian pohjalta päätellyt tulokset

BLDC- ja FOC -ohjauksen toiminnalliset erot

Teorian mukaan FOC -ohjauksen tulisi tuottaa tasaisempi ja voimakkaampi vääntömomentti BLDC -ohjaukseen verrattuna. Vääntömomentin epätasaisuutta ei välttämättä huomaa, sillä vääntömomentin epätasaisuus tapahtuu niin suurella taajuudella, että anturin näytteenottotaajuus ei riitä sitä havaitsemaan. BLDC -ohjauksen aiheuttama epätasaisuus tapahtuu jokaisella sähköisellä syklillä.

FOC -tilassa hyötysuhteen tulisi olla parempi, mutta ero voi olla hyvinkin pieni, eikä välttämättä näy testeissä.

BLDC -tilassa moottoreista myös kuuluu akustista melua, joka aiheutuu osittain siitä, kun magneettikentän suunta ei ole kohtisuorassa roottorinkenttään. FOC -tilassa tämä magneettikenttä on tarkemmin ohjattu, joten akustinen melukin on mahdollisesti pienempi.

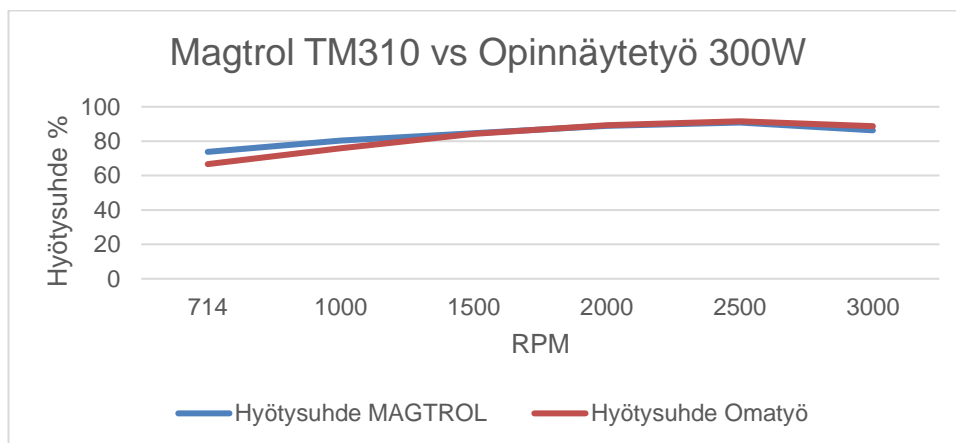
#### Testilaitteen toiminta

Kuorman vastuksen muuttaminen tulisi onnistua lähes ongelmitta, mutta virranmittaamiseen ja sen hyödyntämiseen liittyy paljon hankaluuksia. Testipenkissä käytettävän Arduino Duemilanoven ADC -sisääntulon resoluutio on kymmenen bittiä. Tämä tarkoittaa, että sisään tuleva jännite antaa arvon, joka on 0 – 1024 riippuen mitatusta jännitteestä 0 – 5 voltin välillä, eli noin 5 mV tarkkuudella. Virranmittausanturi antaa 100 mV/A, eli teoriassa Arduino pystyisi mittaamaan virran noin 0,05 A tarkkuudella. Signaalissa on kuitenkin kohinaa, Arduinon ja virtamittarin sekä kuorman epätasaisuuden vuoksi. Häiriöiden minimoimiseksi virta-anturilta otetaan useampi näyte ja muodostetaan näistä keskiarvo. Tulevaisuudessa olisi mahdollista käyttää tarkempaa ADC muunninta ja virtamittaria.

## 7 Käytännön testin tulokset

Mittaustulokset mitattiin koululta saadun Magtrol -anturin avulla ja opinnäytetyössä rakennetun testilaitteiston avulla. Tuloksia vertailtiin mittalaitteiden välillä. Magtrol -anturi mittasi vääntömomenttia ja kierrosnopeutta. Kierrosnopeudet eri laitteiden välillä olivat täysin samat, sillä kierrosnopeuden mittaaminen on melko luotettavaa ja tieto mitataan digitaalisessa muodossa. Vääntömomentin mittaaminen generaattorin virran avulla onnistui suuntaa-antavasti. Muutamissa mittauksissa huomattiin eroa anturien ilmoittamien tulosten välillä. Häiriötekijöitä virran mittauksessa on mitatun virran pulssimainen luonne. Pulssimaisuus virtasignaalisissa johtuu PWM -modulaatiosta. Virtaa voisi tasoittaa optimoimalla induktanssin ja kapasitanssin arvoja kuormassa. Opinnäytetyön aikataululla ei kuitenkaan löydetty sopivia komponentteja vielä tähän tarkoitukseen.

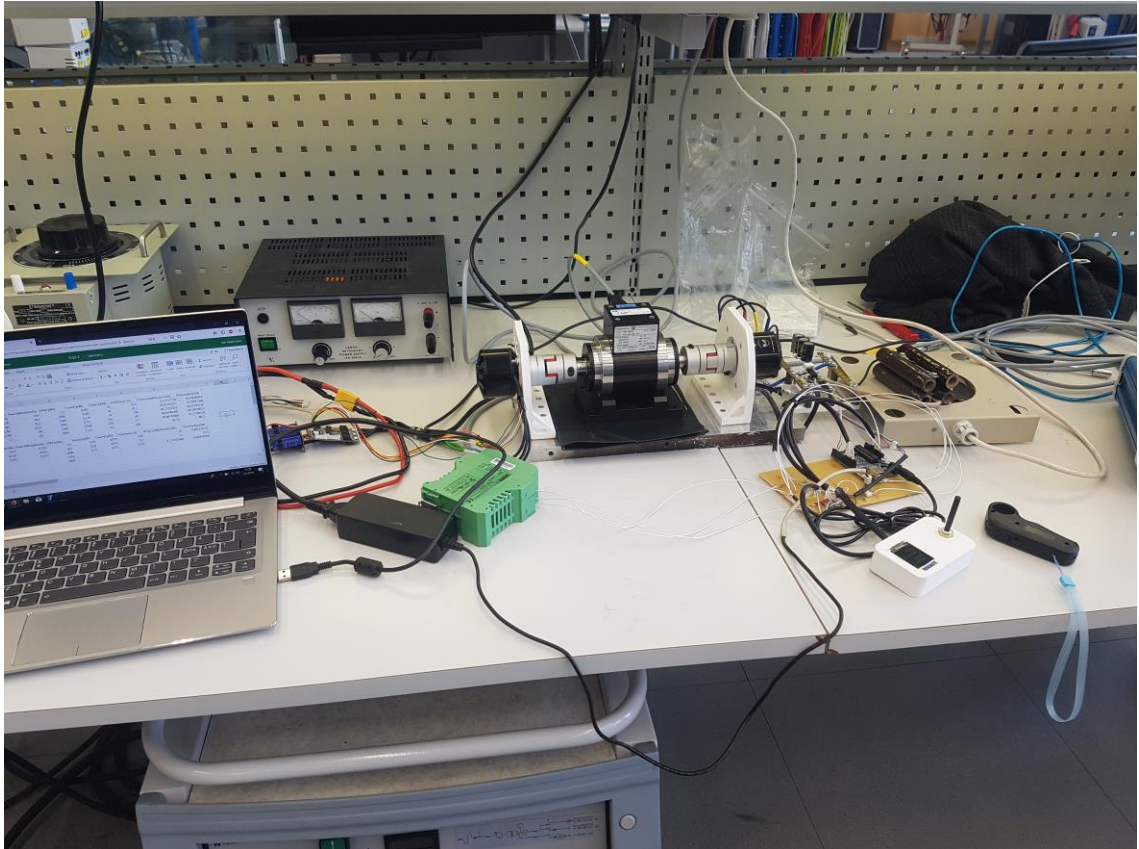
Kuormamoottori myös aiheuttaa itsessään vastusta magneettien voimien ja lakeerien kitkan takia. Tämä vastusarvo olisi mahdollista ohjelmoida laskentakaavaan tarkempaa arvioitua tulosta varten.



Kuva 2. Kuvassa hyötysuhteen mittaustuloksia

Kuvasta 2 nähdään mittaustuloksia eri kierrosalueilta ja erisuuruisella kuormituksella.

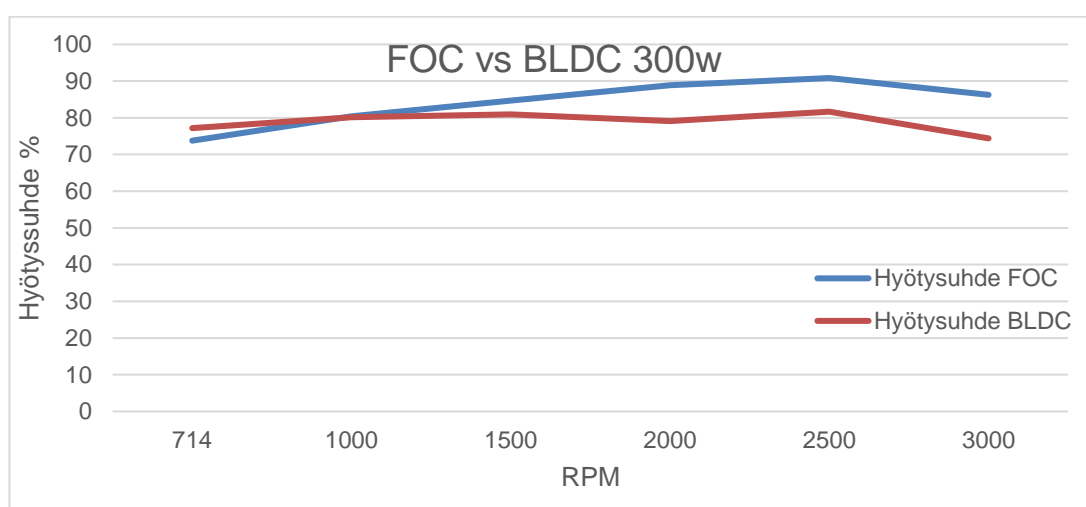
Tulokset otettiin niin, että mittalaitteiden välinen ero olisi helposti huomattavissa. Mittauksien ero johtuu siitä, että virran mittaaminen tarkasti on yhä vaikeaa, koska sopivia komponentteja ei vielä löytynyt. Tasasuuntaajan diodeihin jää lähes yhden voltin jännitehäviö, jonka takia vääntömomenttia syntyy vasta, kun generaattorin tuottama jännite on yli yhden voltin ja virta alkaa kulkemaan. Virran mittauksen luonteeseen vaikuttaa huomattavasti taajuus, jolla kuormaa ohjataan. Taajuutta nostamalla saadaan virta pysymään tasaisempana, sillä induktanssi hidastaa virran muutosta. Aluksi kuormaa ohjattiin 500 Hz taajuudella, joka oli aivan liian vähän ja virran mittaus oli hankalaa. Tällä hetkellä käytössä on 4 kHz:n PWM -taajuus generaattorin kuorman ohjaamiseksi. Nykyistä ohjaustaajuutta voisi vielä nostaa niin virranmuutos saataisiin mahdollisesti vielä matalammaksi. Taajuutta ei kuitenkaan saa nostaa liikaa, sillä se aiheuttaa tehohäviötä transistorien yli. Mittalaitteessa on vielä paljon paranneltavaa, jos sillä haluaa mitata tarkkoja tuloksia. Säädetävän kuorman ja moottorin ohjaustilojen erojen selvitykseen työ toimi erinomaisesti. Jatkossa olisi mahdollista poistaa käytöstä erillinen vääntömomenttianturi, kun virranmittaus on kalibroitu riittävän tarkasti. Moottorin teho olisi mahdollista mitata generaattorilta mitatun virran ja kierrosnopeuden perusteella.



Kuva 3. Mittausjärjestely

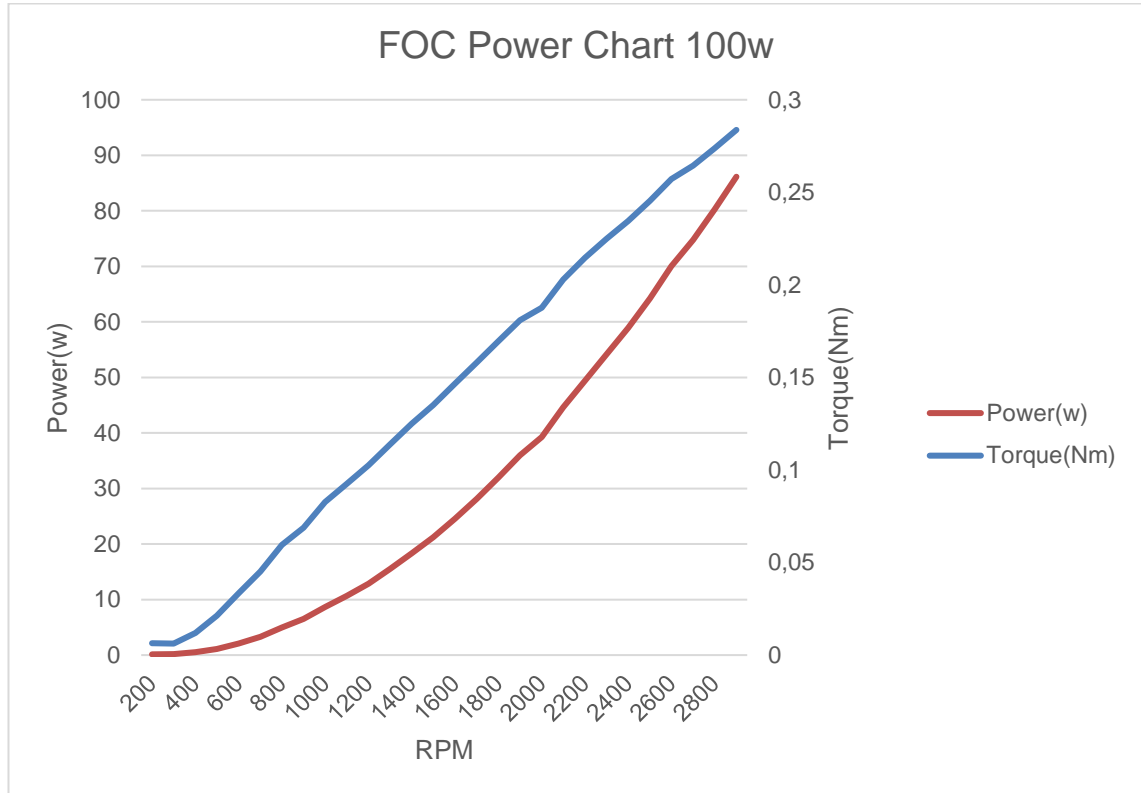
Kuvasta 3 nähdään mittauspahtuma koulun laboratorion: vasemmalla puolella on tietokone, jolla on kirjattu tuloksia sekä säädetty moottorin pyörimisnopeus. Vihreä ja musta laatikko keskellä pöytää ovat jännitelähteitä. Jännitelähteiden vieressä näkyy itse mittauspenkki. Mittauspenkissä on kiinni testattava moottori vasemmalla ja kuormitusmoottori oikealla. Moottorien välissä näkyy Magtrol -anturi. Pöydän alareunassa näkyy kuormituspenkin ohjausmoduuli, jonka näytöltä pystyttiin lukemaan kierrosnopeus, vääntömomentti ja teho. Kuorman vastuksen säätäminen onnistui samasta moduulista kiertämällä potentiometriä. Oikeassa reunassa näkyvät tehovastukset, joihin generaattorin tuottama energia ajettiin. Kuorman alle lisättiin vielä erillinen tuuletin jäähdyttämään kuormaa, ettei tämä kuumene liikaa.

Lisäksi ajettiin myös testit, joissa kierrosluku nostettiin 200 kierroksesta aina 2900 kierrokseen asti. Testit mitoitettiin tehon perusteella. Tehoa muutettiin säätämällä kuormituksen määrää. Magtrol -anturi otti näytteitä moottorin toiminnasta 2 millisekunnin välein, ja nopeudensäädin oli ohjelmoitu nostamaan kierroksia 100 rpm:n askelina kahden sekunnin välein. Tämä tarkoitti, että jokaiselta askeleelta saatiin noin tuhat näytettä. Yhdestä kokonaisesta kuormitustestistä tuli näytteitä yhteensä lähes 30 000 kappaletta. Näytteiden suuri määrä aiheutti ongelmia, tämä ratkaistiin laskemalla jokaiselle askeleelle keskiarvo Excel -ohjelmiston avulla. Keskiarvoista laadittiin kuvaajat, joiden avulla moottorin hyötysuhde oli helpommin havaittavissa.



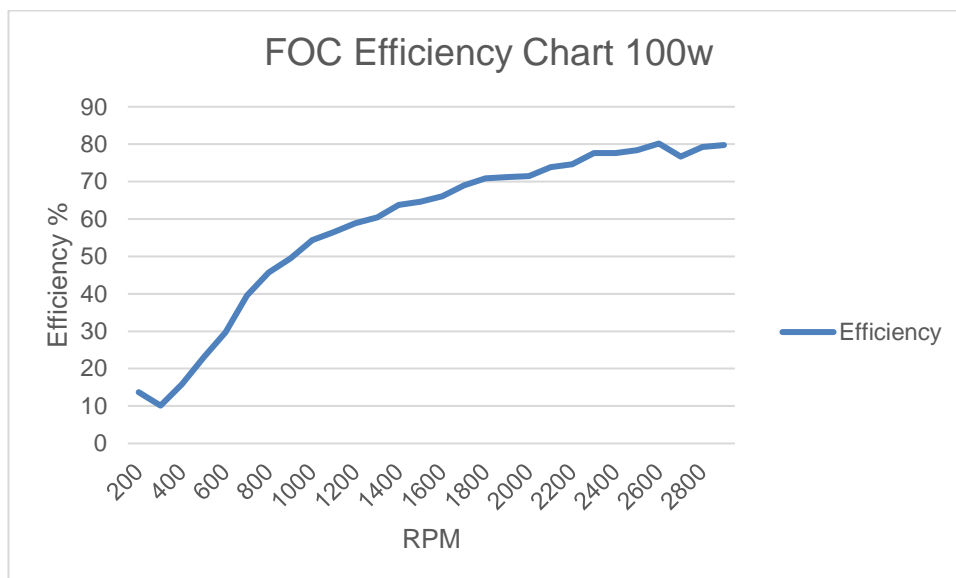
Kuva 4. Hyötysuhdemittausten vertailu 300 watin kuormalla

Kuvasta 4 huomataan, että FOC -tilassa hyötysuhde oli huomattavasti parempi kuin BLDC -tilassa. FOC -tilassa kokoonpanon hyötysuhde oli suurilta osin 80–90 % alueella ja muutaman kerran kävi yli 90 %. BLDC -tilassa taas hyötysuhde oli lähes koko ajan alle 80 %. Mittauksissa selvisi, että FOC -tilassa moottorin hyötysuhde oli korkeampi ja moottorin ohjauksesta kuuluva korkea ääni oli lähes kokonaan kadonnut.



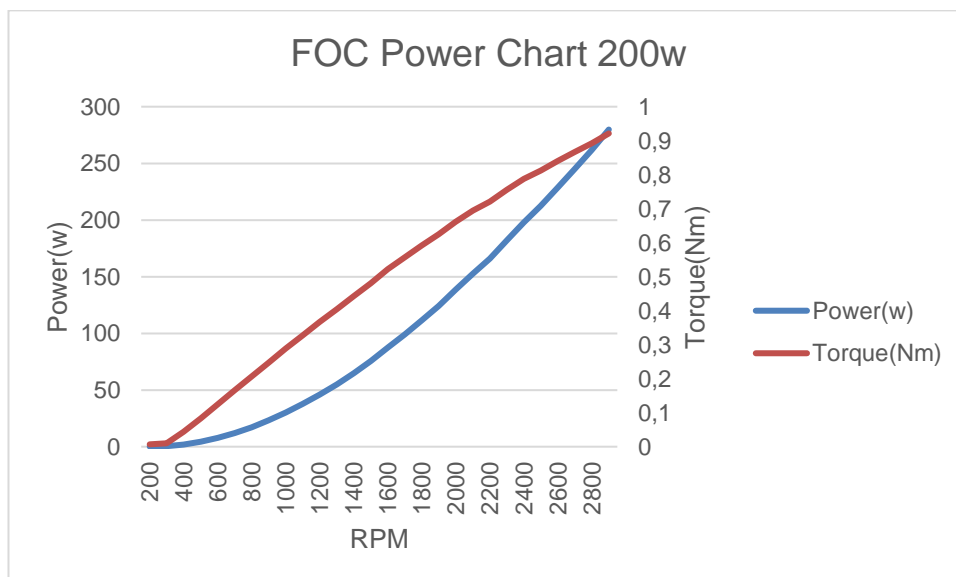
Kuva 5. Ensimmäinen tehomittaus FOC -tilassa 100 W kuormalla

Kuvassa 5 näkyvät ensimmäisen testin tulokset, missä moottorin pyörintänopeutta kasvatettiin 100 rpm:n askelilla 2 sekunnin välein. Askelkohtaisista keskiarvoista saatiin graafin mukainen teho -ja vääntökäyrä.



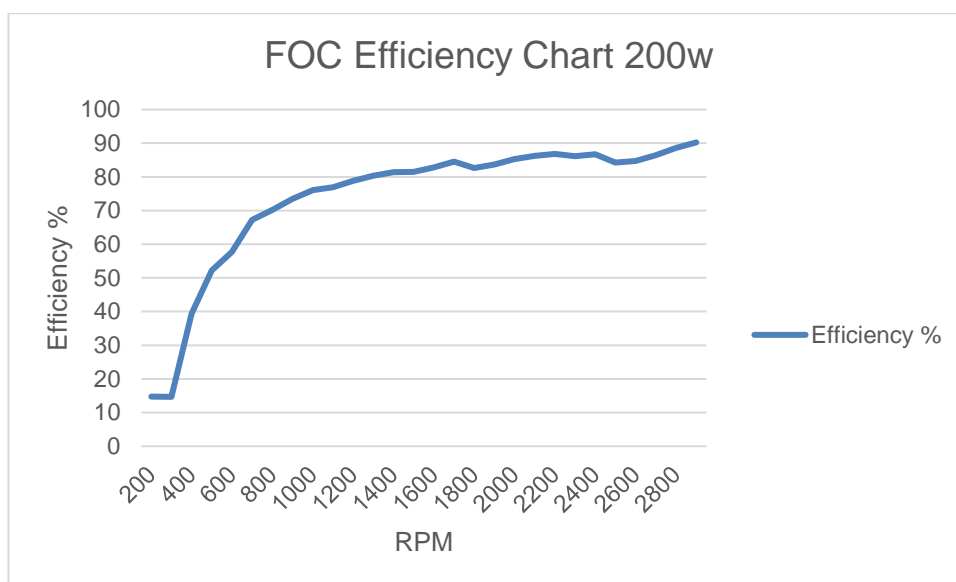
Kuva 6. Hyötysuhdemittaus FOC tilassa 100w kuormalla

Kuvassa 6 on muodostettu hyötysuhdekäyrä vertailemalla kahden eri taulukon dataja keskenään ja laskemalla näiden välinen suhde. Vertailussa vertailtiin nopeudensäätimelle menevää sähkötehoa moottorin mekaaniseen tehoon verrattuna. Mekaanisen tehon datana käytettiin samaa pohjaa kuin Kuvassa 5. Matalasta kuormituksesta johtuen moottorin hyötysuhde oli huono. Hyötysuhde kasvoi vasta kuormituksen noustua.



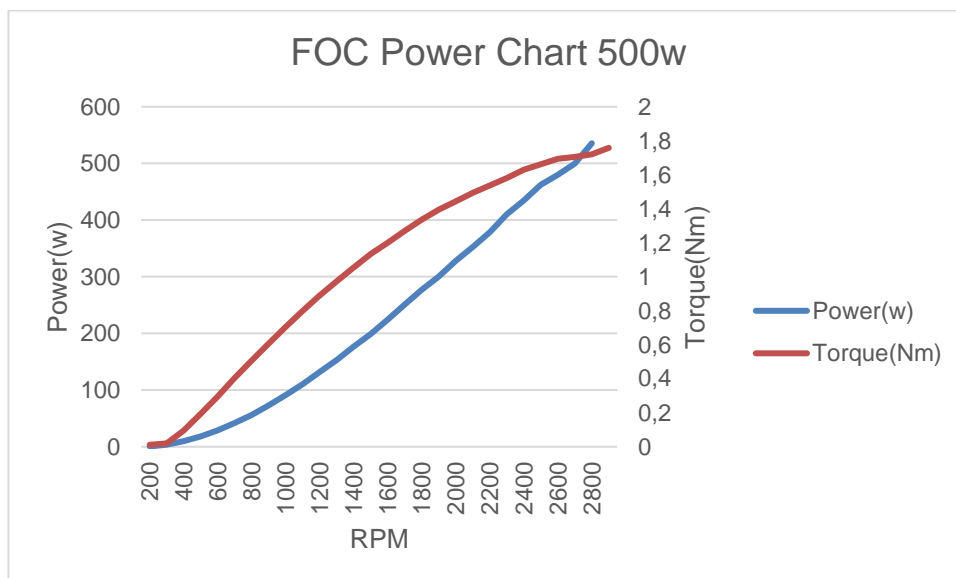
Kuva 7. Teho mittaus FOC tilassa 200 W kuormalla

Kuvassa 7 kuormaa nostettiin ja samat mittaukset suoritettiin uudestaan, mittauksista huomataan heti, että hyötysuhde on noussut jo matalammilla kierroksilla. Parhaimmillaan mitattu hyötysuhde on käynyt yli 90 %. Mittaukset muistuttavat muuten paljon 100 watin teholuokan mittauksia, mutta hyötysuhde on ollut tällä kertaa korkeampi. Asetukset pidettiin samana, vain kuorman suuruutta oli nostettu.



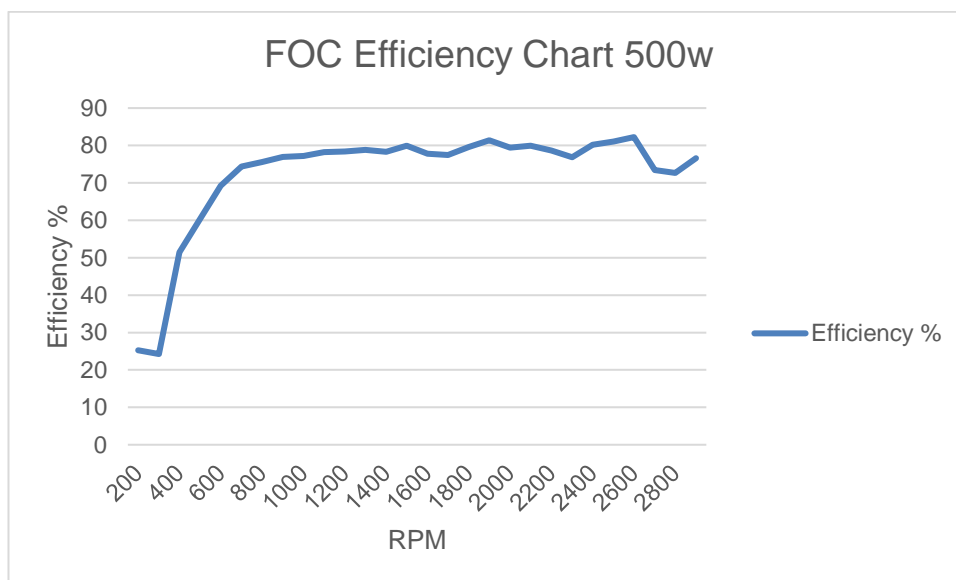
Kuva 8. Hyötysuhde mittaus FOC tilassa 200 W kuormalla

Kuvasta 8 huomataan, että kuormituksen määrää nostettaessa oli myös hyötysuhteen nousua huomattavissa. Mittauksia jatkettiin 500 wattiin asti, kuormaa nostamalla 100 wattia kerralla.



Kuva 9. Mittaustulokset FOC -tilassa 500 W kuormalla

Kuvassa 9 on viimeinen testi, joka moottorilla ajettiin. Testissä kuormitus oli maksimissaan tarkoittaen, että PWM -säädettyjen transistorien aukiolo oli täysin 100 %. Kuormitusta rajoitti tehovastusten resistanssi, ja jos kuormitusta haluaa nostaa, täytyisi hankkia pienemmän resistanssin tehovastukset.



Kuva 10. Hyötysuhdemittaus FOC -tilassa 500 W kuormalla

Kuvasta 10 huomataan, että hyötysuhde oli tällä kertaa alhaisempi. Hyötysuhde pysyi lähes koko alueella alle 80 %, eikä käynyt lähellä 90 % hyötysuhdetta, kuten aiemmissa mittauksissa oli näkynyt. Mittausten perusteella voisi päätellä, että hyötysuhde oli parhaimmillaan noin 200 – 300 watin kuormituksella ja kierrosten ollessa 1500 – 3000 rpm välillä.

Nopeudensäädin oli ohjelmoitu pitämään kierroksia tavoitearvossa PID -säätimen avulla. Viimeisessä testissä käytetyllä kuormalla kierrosnopeudessa oli huomattavasti vaihtelua, eikä kierrosnopeus pysynyt tasaisena. PID -arvoja optimoimalla kierrosnopeudesta olisi ehkä ollut mahdollista saada tasaisempi.

Nopeuden vaihteluun vaikutti myös kuorman pulssimainen katkominen. Tätä voisi mahdollisesti parantaa nostamalla kuorman PWM -taajuutta, sekä optimoimalla kuorman induktanssi ja kapasitanssi.

Tässä työssä kerättiin paljon dataa, joka käsiteltiin tietokoneella. Käsitelystä datasta oli helpompia havaita keskiarvoja, joka osiltaan kompensoi edellä mainittua kierrosnopeus ja virranmittaus ongelmaa.

## 8 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli alun perin testata ainoastaan yhden moottorin toiminnan eroja BLDC- ja FOC -tilan välillä. Työn edetessä kuitenkin tuli ajatus, että samalla olisi mahdollista valmistaa testauslaite, jonka avulla voidaan testata myös muita harjattomia sähkömoottoreita. Tämän seurauksena opinnäytetyön aihetta laajennettiin harjattoman sähkömoottorin -testauslaitteeksi. Samaan aikaan tuli ajatus vääntömomentin arvioimisesta mitatun virran avulla, joten tähän aiheeseen myös syvennyttiin lisää.

Erillistä vääntömomenttianturia ei vielä voi kokonaan jättää pois, sillä mitatun virran perusteella vääntömomentin arvioiminen ei vielä ole riittävän tarkka. Varsinaiseen hyötysuhde analyysiin kannattaa siis edelleen käyttää erillistä vääntömomenttianturia. Jatkossa olisi kuitenkin tarkoitus kehittää testauslaitetta lisää niin, että erillinen vääntömomenttianturi voitaisiin jättää pois.

Testauslaitteeseen olisi mahdollisuutena ohjelmoida myös kuormalle PID -säädin niin, että kierrosnopeuden muuttuessa vääntömomentti voitaisiin pitää vakiona.

Työn edetessä tuli ongelmia niin testauslaitteen mekaanisessa rakenteessa kuin elektronikan puolella. Lopuksi kuitenkin kaikki tarvittava tieto saatiin mitattua ja testauslaite saatiin toimimaan hyvin.

Testauslaitteen avulla saadaan kätevästi säädettyä kuormaa ja etsittyä moottorin hyötysuhde alue. Testauslaitteen avulla saadaan myös optimoitua nopeudensäätimen asetuksia korkeampaa hyötysuhdetta varten.

## Lähteet

- 1 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. 2003. Verkkoaineisto. Microchip <http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20%28BLDC%29%20Motor%20Fundamentals.pdf>. Luettu 03.03.2019.
- 2 R. Krishnan 2004: Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press, Florida.
- 3 BLDC Construction. 2013. Verkkoaineisto. EDN. <<https://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>>. Luettu 01.02.2019.
- 4 Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. 2010. Verkkoaineisto. NCBI.<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231115/>>. Luettu 01.02.2019.