

Synkronireluktanssi- ja oikosulku- moottorin vertailu

Jani Hänninen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK),automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

Tekijä(t) Hänninen, Jani	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 27.05.2016
	Sivumäärä 55	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: X
Työn nimi Synkronireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin vertailu		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Pasi Puttonen, Sirpa Hukari		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän ammattikorkeakoulu		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tilaajana toimi Jyväskylän ammattikorkeakoulun sähkölaboratorio. Työssä tutustuttiin oikosulkumoottorin ja synkronireluktanssimoottorin rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen sekä niiden eroihin vertaillen moottoreita keskenään. Lisäksi tutustuttiin hieman taajuusmuuttajan toimintaan. Työn tarkoituksena oli saada kattava käsitys moottoreiden rakenteesta, toiminnasta, ominaisuuksista ja vertailla niitä. Laajuudeksi taajuusmuuttajan osalta riittää moottorin ohjaukseen liittyvä tieto. Työn tuotoksena tehtiin laboratoriotyö, joka tulee opetustarkoituksiin tulevaisuudessa. Sen avulla lisätään tietoutta synkronireluktanssimoottorista ja edellä mainituista eroista oikosulkumoottoriin nähden. Opiskelijat voivat työelämässään valita synkronireluktanssimoottorin oikosulkumoottorin sijasta kun tietävät sen ominaisuuksista.</p> <p>Synkronireluktanssimoottorin ominaisuudet antavat suuntaa sille, että moottori saattaisi yleistyä tulevaisuudessa. Ominaisuuksista selkeästi nousee esiin parempi hyötysuhde taajuusmuuttajaohjatuissa sovelluksissa verrattuna taajuusmuuttajaohjattuun oikosulkumoottoriin. Synkronireluktanssimoottorin ominaisuuksien vuoksi sen huoltokustannukset ovat oikosulkumoottoria pienemmät. Esimerkiksi käyntilämpötila on oikosulkumoottorin käyntilämpötilaa alempi, mikä säästää laakereita.</p> <p>Synkronireluktanssimoottori osoittautui monella tapaa paremmaksi moottorivaihtoehdoksi oikosulkumoottoriin nähden, varsinkin puhallin- ja pumppusovelluksissa. Säästöjä voi syntyä energian hinnassa tuhansia euroja vuodessa kun valitaan synkronireluktanssimoottori. Tietoisuus tästä moottorityypistä on kuitenkin vielä aika vähäistä ja siksi moottori ei ole vielä kovin paljoa yleistynyt. Moottori tulee varmasti yleistymään kun nykyinen oikosulkumoottorikanta alkaa olemaan vaihdon tarpeessa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Synkronireluktanssimoottori, oikosulkumoottori		
Muut tiedot		

Description

Author(s) Hänninen, Jani	Type of publication Bachelor's thesis	Date 27.05.2016
	Number of pages 55	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: X
Title of publication Comparison of synchronous reluctance machine and induction machine		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Electrical and Automation Engineering		
Supervisor(s) Pasi Puttonen, Sirpa Hukari		
Assigned by Jyväskylä university of applied sciences		
Description <p>This bachelor's thesis was assigned by the electrical laboratory in JAMK university of applied sciences to examine and compare synchronous reluctance machines and induction machines structure, operational principles and other differences. The study also includes a frequency converters working principles and motor controlling methods. The purpose of the study was to get comprehensive perception of motors working principles, structures, qualities and compare them. Sufficient extent was motor controlling information.</p> <p>The qualities of synchronous reluctance machine suggests that it will may become more common in future. Synchronous reluctance machines have better efficiency than induction machines, especially in variable speed pump and fan applications. Their operation temperature is lower operating temperature which saves on bearings and money in their maintenance.</p> <p>Synchronous reluctance machine proved better to be a motor choice in many ways. Thousands of Euros can be saved in a year by choosing synchronous reluctance machine instead of inductance machine. The knowledge about this motor type is still insufficient, which is why it has not become very common yet. Synchronous reluctance machine will become more common in future because it has better qualities and the laboratory work with other studies will increase knowledge of this motor type. When students graduate and move into working life they will be more likely to choose synchronous reluctance machine to some applications instead of induction machine.</p>		
Keywords (subjects) Synchronous reluctance machine, induction machine		
Miscellaneous		

Sisältö

1 Johdanto	5
2 Moottoreiden toiminta ja rakenne	6
2.1 Oikosulkumoottori (IM)	6
2.1.1 Rakenne	6
2.1.2 Roottorin rakenne.....	7
2.1.3 Toimintaperiaate.....	10
2.2 Synkronireluktanssimoottori (SRM)	13
2.2.1 Rakenne	13
2.2.2 Roottorin rakenne.....	14
2.2.3 Toimintaperiaate.....	16
2.3 Ominaisuudet	19
2.3.1 Virta.....	19
2.3.2 Momentti, hyötysuhde ja tehokerroin	19
2.3.3 Moottorin ohjaus	26
2.4 Kustannusarvioesimerkki.....	29
3 Paremman hyötysuhteen moottoreiden kehitys	34
4 Laboratoriotyön valmistelu	35
4.1 Laboratoriotyön oppimistavoitteet ja sisältö	35
4.2 Laitteisto	35
4.3 Laitteiston kasaus ja käyttöönotto	36
4.4 Laboratoriotyön suunnittelu	39
5 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset	46
Lähteet	48
Liitteet	52
Liite 1. Taajuusmuuttajatelineen mitat	52
Liite 2. Laboratoriotyö, esitehtävät	53
Liite 3. Laboratoriotyö, mittausohje	54

Lyhenteet ja termit

ALA	Axially laminated anisotropic rotor, akselin suuntaisesti laminoitu roottori
DTC	Direct Torque Control, suora momentin säätö.
DOL	Direct on-line; Suoraan verkkoon kytkentä
FEM	Finite element method, elementtimentelmä jota käytetään laskennassa
HO	High Output, korotettu teho
IM	Induktion motor, induktiomoottori
I_N	Nominal current, nimellisvirta
n_s	Synchronous speed, synkroninopeus
rpm	Revolutions per minute, pyörimisnopeus
SRM/SynRM	Synchronous reluctance machine, synkronireluktanssimoottori
T_e	Sähköinen vääntömomentti
THD	Total harmonic distortion; Harmoninen kokonaissärö
TLA	Transverse laminated anisotropic rotor, poikittaislaminoitu roottori
VSD	Variable speed drive; Taajuusmuuttaja käyttö
ψ/Φ	Magneettivuo
η	Hyötysuhde

1 Johdanto

Oikosulkumoottorin (IM) isänä pidetään Nikola Teslaa, joka keksi sen jo 1880-luvulla (Kortelainen. 2009). Nykyään käytetyin sähkömoottorityyppi onkin juuri oikosulkumoottori. Oikosulkumoottoreiden osuus kaikista käytetyistä moottoreista teollisuudessa on yli 95 %, koska se on rakenteeltaan yksinkertainen, se käy moniin käyttötarkoituksiin ja sen hinta on halpa.

Synkronireluktanssimoottorin (SRM) teoria on keksitty jo 1900-luvun alkupuolella. 1960-luvulla huomattiin, että SRM toimii täysin synkronisesti staattorin magneettikentän taajuuden mukaan. Sillä tavalla synteettisiä kuituja pystyttiin tuottamaan paremmalla hyötysuhteella verrattuna oikosulkumoottoriin tai nopeussäätöiseen tasasähkömoottoriin. Silloin SRM alkoi yleistymään ja kehitys nopeutui. Siihen aikaan tekniikka ei ollut vielä niin kehittynyttä kuin nyt, eli moottorissa oli huonompi tehoeroin ja huonompi sähköinen hyötysuhde verrattuna oikosulkumoottoriin (Lipo. 1991). Vasta vuosituhaten vaihteen paikkeilla päästiin roottorin kehityksessä sellaisiin ominaisuuksiin, että SRM pärjää oikosulkumoottorille. Nykypäivänä tilanne on jo edennyt niin että SRM on jopa parempi kuin oikosulkumoottori ja se täyttää IE4 hyötysuhdeluokan vaatimukset.

Tämä opinnäytetyö keskittyi oikosulku- ja synkronireluktanssimoottorien ominaisuuksiin sekä niiden vertailuun. Raportissa tutustutaan myös moottoreiden rakenteellisiin ja toiminnallisiin eroihin. Työ tehtiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriolle. Työhön kuului tutustuminen molempiin moottorityyppeihin. Lisäksi siihen kuului synkronireluktanssimoottorin ja taajuusmuuttajan toiminnalliseksi saattamiseen vaadittava kasaaminen, käyttöönotto ja mittaukset.

Työn tavoitteena oli tehdä edellä mainittujen moottoreiden ominaisuuksiin ja toimintaan perehdyttävä laboratoriotyö sähkölaboratorioon. Laboratoriotyön tavoitteena oli antaa kattava käsitys siitä, miten synkronireluktanssimoottori toimii ja millaisia sen rakenteelliset ja toiminnalliset erot ovat oikosulkumoottoriin nähden.

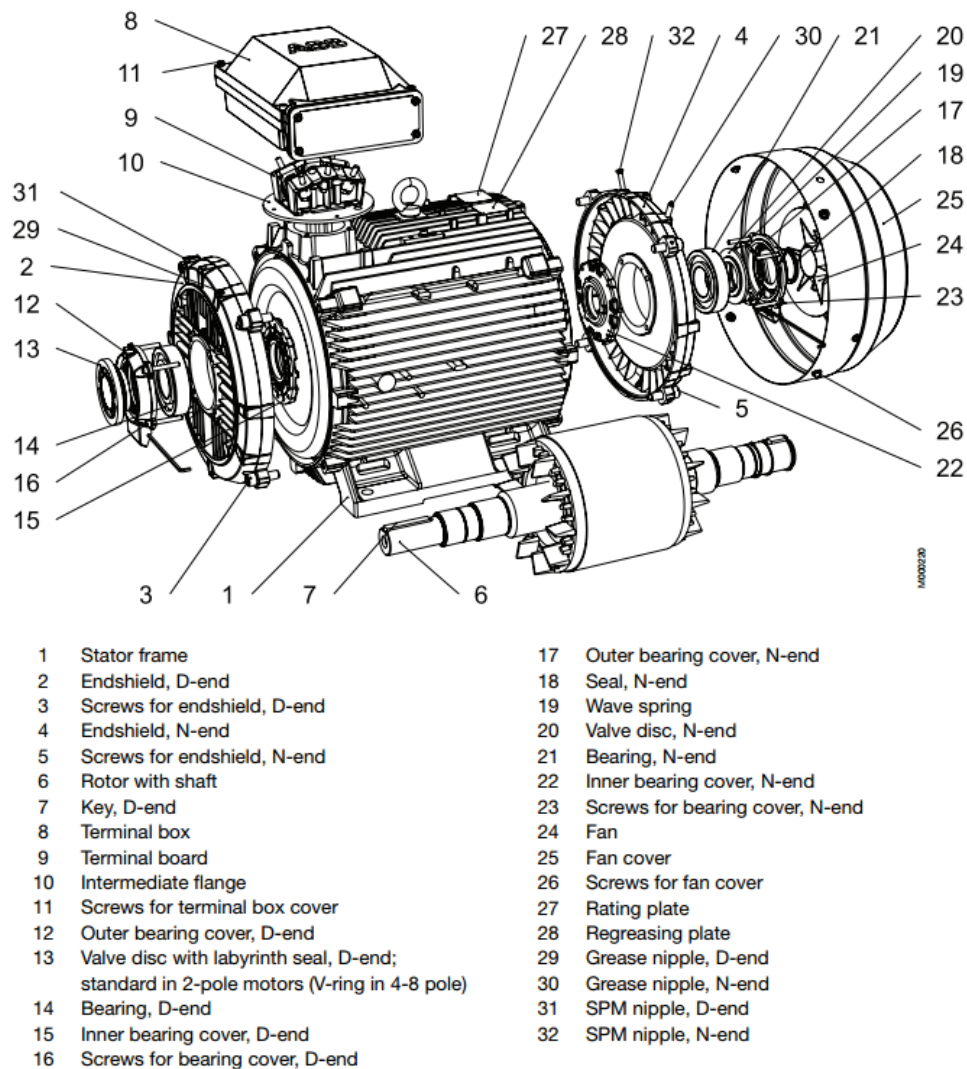
2 Moottoreiden toiminta ja rakenne

Tässä luvussa tutustutaan oikosulkumoottorin ja SRM:n rakenteeseen, toimintaan ja ohjaukseen sekä vertaillaan niiden ominaisuuksiin. Synkronireluktanssimoottori eroaa rakenteeltaan ja toiminnaltaan oikosulkumoottorista niin paljon, että luvussa on eroteltu eri osa-alueita alaotsikoiden alle.

2.1 Oikosulkumoottori (IM)

2.1.1 Rakenne

Oikosulkumoottori on yleisin tällä hetkellä käytössä oleva moottorityyppi. Se on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen ja sen toimintavarmuus on hyvä. Nämä ovatkin suurimpia syitä oikosulkumoottorin yleisyyteen. Oikosulkumoottorissa on yksinkertaiset roottori- ja staattorikäämitykset eikä siinä ole erillistä magnetointikäämiä. Oikosulkumoottorissa ei siis ole juurikaan muita kuluvia osia kuin laakerit (Korpinen, N.d. 7). Oikosulkumoottorin rungon sisään on sijoitettu staattori- ja roottorikäämitykset. Oikosulkumoottorin pyörivä osa, roottori ja sen läpi menevä akseli lepäävät laakereiden varassa. Akselin D-pää eli drive end yhdistetään kuormaan ja akselin toisessa päässä (N-pää, non drive end) on tuuletin, joka ohjaa kylmän ilman virtaamaan koneen jäähdytysripojen läpi. Oikosulkumoottorin osia on kuvattuna kuviossa 1.



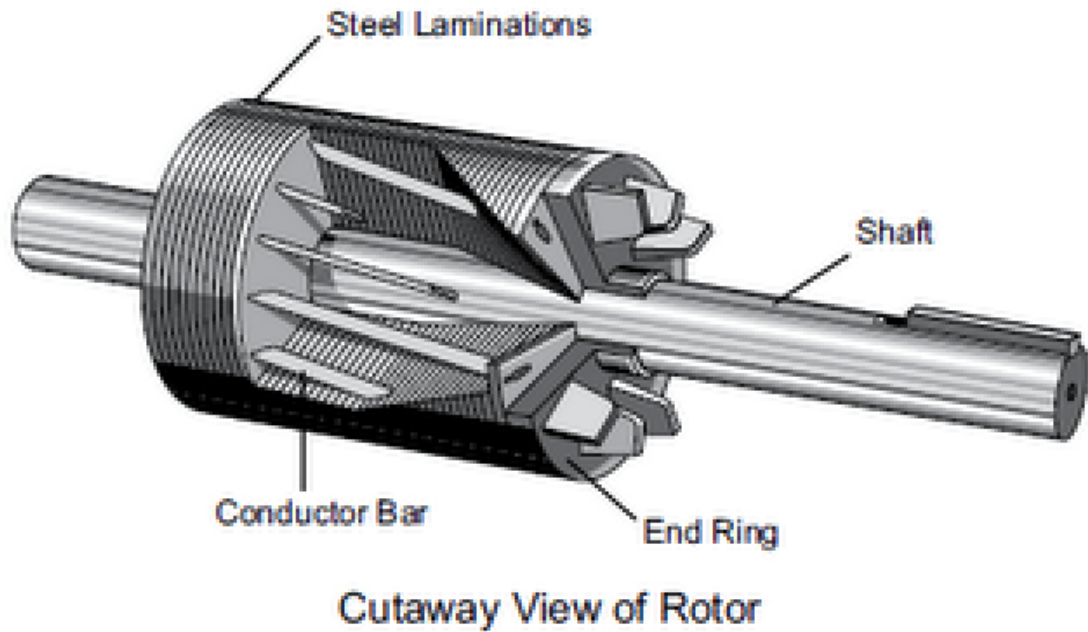
Kuvio 1. Oikosulkumoottorin rakenne (*Process_performance_motors*. 2012. 1).

Oikosulkumoottorin huonoina puolina ovat esimerkiksi kierrosnopeuden maksimi on staattorikämmityksen synnyttämän magneettikentän pyörimisnopeuden suuruinen, koneella on jättämää, johon koneen kuormitus vaikuttaa sekä suhteellisen pieni käynnistysmomentti ja suuri käynnistysvirta (Honkanen. N.d. 8). Käynnistysvirta on yleensä noin $5-7 \times I_N$ suorassa käynnistyksessä.

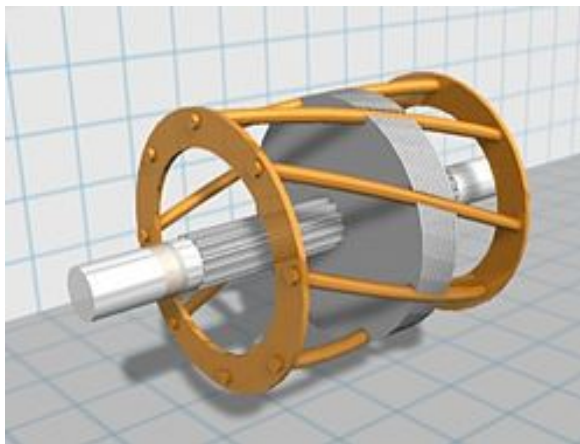
2.1.2 Roottorin rakenne

Roottori on ohuista symmetrisistä metallilevyistä koostuva moottorin osa, joka tuottaa moottorille ominaisen pyörimisliikkeen. Metallilevyjen ulkokehälle on jätetty sopivat urat häkkikämmityksen sauvoille, jotka ovat oikosuljettu molemmista päistä oikosulkurenkailla, (ks. kuviot 2 ja 3) (Sundgren. N.d. 22). Kuviossa 3 on esitetty häkki-

käämityksen rakenne tietokonemallina. Yleensä roottorikäimityksissä on yksi sauva uraa kohti, mutta jos halutaan moottorilta erilaiset ominaisuudet, voidaan muuttaa sauvojen lukumäärää ja/tai muotoa. (Sundgren. N.d. 22).



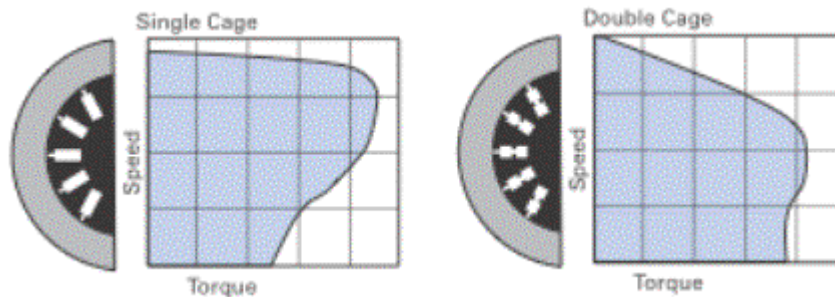
Kuvio 2. Roottorirakenne (Morehead. 2012.)



Kuvio 3. Tietokoneella tehty kaavio oikosulkuroottorin rakenteesta (Häkkikäämitty roottori. 2015).

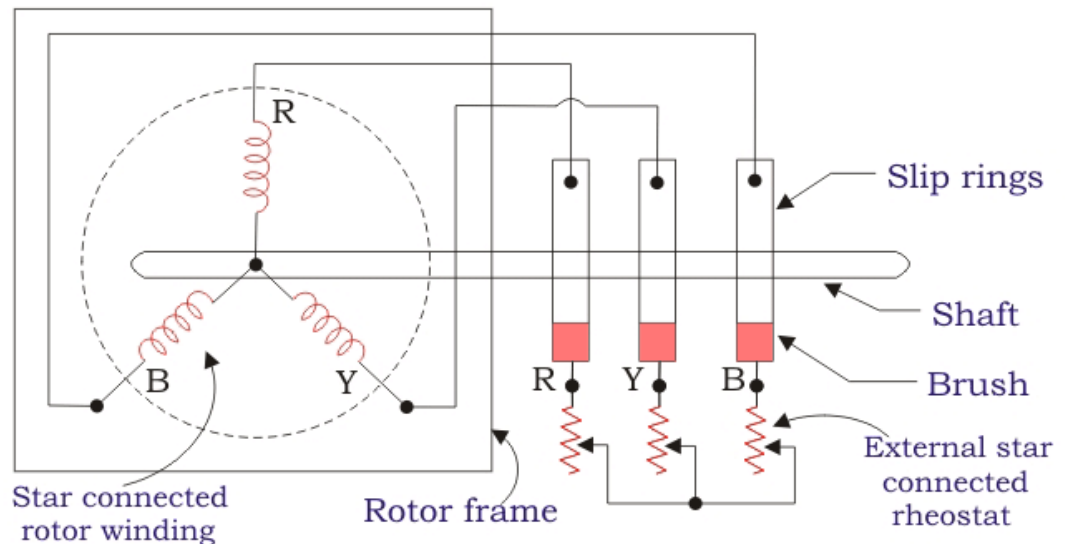
Häkkikäämitystä kutsutaan myös oravanpyöräksi (Squirrel cage). Häkkikäämityksen sauvat ovat vinoutetut, kuten kuviosta 3 näkyy. Vinoutuksella saadaan aikaan tasaisemmin roottoriin vaikuttavat voimat. Siten ei myöskään pääse syntymään tilannetta, jossa roottori jumittuu magneettikenttien takia (Magnetic locking). Vinoutuksen ansiosta moottori on myös hieman hiljaisempi. Kokonaisuudessaan häkkikäämityn

roottorin rakenne on siis hyvin yksinkertainen eikä se ole myöskään kovin vikaherkkä. Häkkikäämyissä moottoreissa voi olla millainen napaparilukumäärä tahansa. Tällaista rakennetta käytetään yleisimmin esimerkiksi puhaltimissa (Construction of Three Phase Induction Motor.N.d.). Kuviossa 4 nähdään miten erilaisella häkkirakenteella voidaan vaikuttaa moottorin momentti/nopeuskäyrään.



Kuvio 4. (vas.) Nopeus/momenttiverailu yksinkertaiselle ja (oik.) kaksinkertaiselle häkkikäämykselle (Ac gearmotors and motors. 2009).

Toinen epätahtimoottorin tyyppi on liukurengasmoottori. Liukurengasmoottorin roottorissa on sama napaparimäärä kuin staattorissa. Roottorikäämyksissä on myös tähti- tai kolmiokytkentä, kuten staattorissakin. Kaikki kolme päätä on kytketty liukurenkaisiin ja siitä hiiliharjojen kautta ulkoiseen vastukseen (ks. kuvio 4). Vastusta säätämällä voidaan vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin, kuten nopeuden säätöön ja käynnistysmomenttiin. Käynnistettäessä liukurengasmoottoria ulkoinen resistanssi on kytkettynä roottoriin, mutta kun roottori saavuttaa riittävän suuren pyörimisnopeuden liukurenkaat kytkeytyvät yhteen ja hiiliharjat irtoavat pinnasta, mikä vähentää hiiliharjojen kulumista. Tällaista rakennetta käytetään sovelluksissa, joissa tarvitaan suurta käynnistysmomenttia, esimerkiksi hisseissä ja nostureissa (Construction of Three Phase Induction Motor. N.d.). Kuviossa 5 esitellään 3-vaiheisen liukurengasmoottorin rakennetta.



Kuvio 5. Kolmivaiheisen liukurengasmoottorin rakenne (Construction of Three Phase Induction Motor. N.d.).

Liukurengasmoottorin ulkoisen vastuksen aiheuttamat lisähäviöt pienentävät liukurengasmoottorin hyötysuhdetta, mistä johtuu, että sillä on hieman huonompi hyötysuhde kuin häkkikäimityllä moottorilla. Roottorikäimitys on liukurengasmoottorissa samanlainen kuin staattorissa, kun taas häkkikäimityssä käämejä edustavat sauvat oikosulkurenkaiden välissä. Käynnistysmomenttia ja nopeutta pystytään liukurengasmoottorissa säätämään paremmin kuin häkkikäimityssä moottorissa.

2.1.3 Toimintaperiaate

Oikosulkumoottori on yksi epätahtimoottorin tyyppi, koska moottorin roottorin pyörimisnopeus on aina staattorin magneettikentän pyörimisnopeutta pienempi. Oikosulkumoottorin toiminta perustuu virrallisen johtimen ja siihen vaikuttavan magneettikentän väliseen voimavaikutukseen (Kortelainen. 2009. 16-18). Tämä on tyypillistä oikosulkukoneelle, sillä siinä sähköteho siirtyy koneen magneettikentän välityksellä pyörivään osaan eli roottoriin. Siitä syystä oikosulkukone on etäisesti samantapainen kuin muuntaja. Kummassakaan ei ole suoraa galvanista yhteyttä. Kolmivaiheista oikosulkukonetta käytetään enimmäkseen moottorina, vaikka se soveltuu myös generaattoriksi (Hietalahti, 2012. 55). Kuviossa 6 on esitetty staattorikentän vuon kierttäminen 1-vaihemoottorissa, jossa navat ovat 90° erillään. Kolmivaiheisessa moottorissa navat ovat 120° välein. Navat ovat osia, joiden kautta magneettikenttä suurim-

maksi osaksi kulkee. Jokaisella navalla on vastaanapa, joten moottorissa on aina parillinen määrä napoja. Napaparilukumäärä määrittää koneen pyörimisnopeuden.

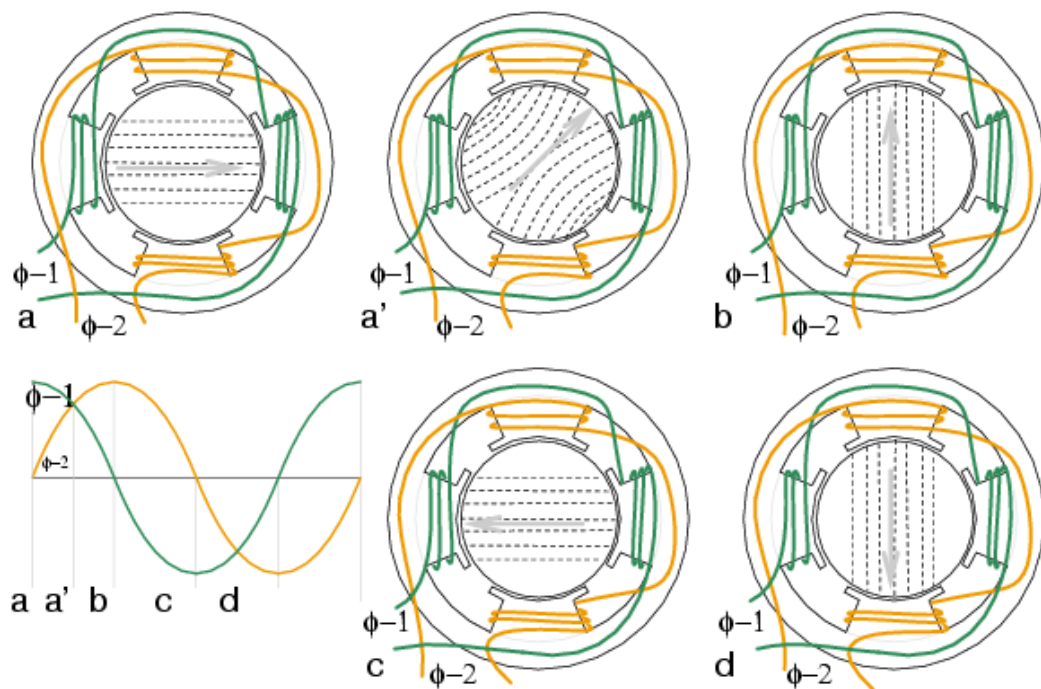
$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \quad (1)$$

missä

n = pyörimisnopeus

f = verkon taajuus

p = napaparilukumäärä



Kuvio 6. Staattoriipiirin magneettivuon kiertäminen (AC MOTORS. N.d.).

Kuvion 6 johtimissa oleva virta kussakin tilanteessa on

- a, $\phi-1$ maksimi, $\phi-2$ nolla
- a', $\phi-1$ 70 %, $\phi-2$ 70 %
- b, $\phi-1$ nolla, $\phi-2$ maksimi
- c, $\phi-1$ maksimi negat. , $\phi-2$ nolla
- d, $\phi-1$ nolla, $\phi-2$ maksimi negat.

Roottorivirta siis syntyy, kun oikosulkukoneen roottorikäänitys kohtaa kiertävän magneettikentän ja roottorikäänitys yhdistetään ulkoiseen kuormitukseen tai on sisäisesti oikosuljettu. Induktiolain perusteella käänityksen sauvoihin indusoituu jännite kaavan 2 mukaisesti.

$$e = \frac{d\Phi_{t,x}}{dt,x} = \Phi_t \frac{d\Phi_x}{dx} + \Phi_x \frac{d\Phi_t}{dt} \quad (2)$$

missä

e = jännite

Φ_t = käänin 1 magneettivuo

Φ_x = käänin 2 magneettivuo

$\Phi_{t,x}$ = Molempien käänien yhteinen magneettivuo

d = derivaatta

Koska häkki on oikosuljettu tai yhdistetty kuormaan, indusoituvaa jännitettä aiheuttaa käänitykseen virtoja, jotka luovat oman magneettikentän. Tämä magneettikenttä pyrkii seuraamaan staattorikenttää ja vetää perässä roottorin pyörivään liikkeeseen. Jos syntyvä vääntömomentti ylittää pyörimistä vastustavan kuormitusmomentin, niin moottori lähtee pyörimään. Lopulta pyörimisnopeus saavuttaa sellaisen arvon, että koneen sähköinen vääntömomentti on tasapainossa kuormittavan vastamomentin kanssa (Hietalahti. 2012. 56).

Jotta induktio roottorissa säilyisi, roottorin tulee pyöriä hieman staattorin magneettikenttää hitaammin. Kun roottori pyörii samassa tahdissa staattorin magneettikentän kanssa, ei sauvarakenne silloin ole muuttuvassa magneettikentässä, eikä silloin synny vääntömomenttia, sillä sähköinen vääntömomentti perustuu magneettikenttien väliseen vetovoimaan. Voima on laskettavissa staattori- ja roottorivuon ristitulosta kaavalla 3 (Hietalahti. 2012. 56).

$$T_e = \overline{\Psi_s} \times \overline{\Psi_r} \quad (3)$$

Missä

T_e = sähköinen vääntömomentti

Ψ_s = staattorivuo

Ψ_r = roottorivuo

Roottori pyörii aina epätahdissa staattorikenttään nähden ja moottorikäytössä se pyörii staattorikenttää hitaammin. Tätä kenttien välistä pyörimisnopeuksien eroa kutsutaan absoluuttiseksi jättämäksi, Δn . Täydellä kuormalla suhteellinen jättämä, s on yleensä luokkaa 2-5 % vaihdellen konetyypeittäin ja kokoluokittain (Hietalahti. 2012. 57). Absoluuttista jättämää Δn , havainnollistaa kaava 3 ja suhteellista jättämää s , kaava 4. Otetaan esimerkiksi moottori, jonka roottori pyörii täydellä kuormalla 1470 rpm. Sen synkroninopeus on $n_s = 1500$ rpm. Tällöin absoluuttinen jättämä Δn ja suhteellinen jättämä s ovat kaavojen 4 ja 5 mukaiset:

$$\Delta n = n_s - n = 1500 - 1470 = 30 \text{ rpm} \quad (4)$$

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{30 \text{ rpm}}{1500 \text{ rpm}} = 0.02 = 2 \% \quad (5)$$

2.2 Synkronireluktanssimoottori (SRM)

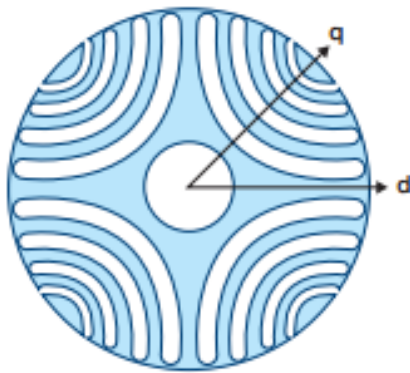
2.2.1 Rakenne

SRM ei eroa rakenteeltaan merkittävästi oikosulkukoneesta, sillä se valmistetaan pääosin samalla tekniikalla kuin oikosulkumoottorit. Suurimpana erona voidaan pitää roottoria, joka eroaa magneettisella epäsymmetriallaan (Hietalahti. 2012. 81).

SRM:n suurimpana heikkoutena voidaan pitää pientä ilmavälivaatimusta varsinkin raskaissa ja tärisevissä kohteissa. Ilmavälin kasvattaminen turvallisuussyistä heikentää koneen ominaisuuksia merkittävästi, sillä momentintuottokyvyn vuoksi ilmavälin on oltava huomattavasti pienempi kuin induktiokoneessa. Vain sillä, että ilmaväli on pieni, päästäisiin yhtä hyvään hyötysuhteeseen ja perusaallon tehokertoimeen (Hietalahti. 2012). Ilmavälin vaikutukset on kuvattu tarkemmin seuraavissa luvuissa 2.2.2 ja 2.3.2.

2.2.2 Roottorin rakenne

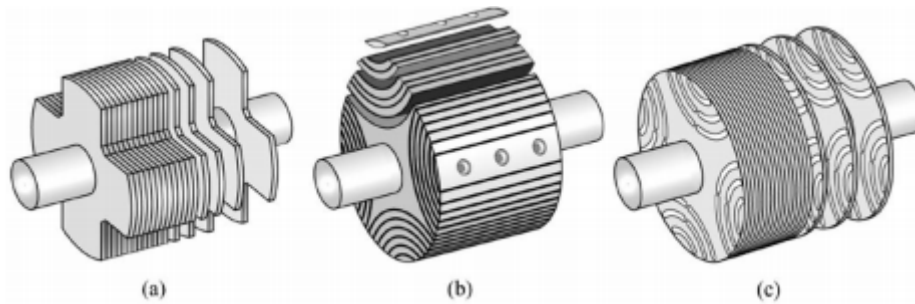
Synkronireluktanssikoneen ja oikosulkukoneen suurimmat erot ovat roottorirakenteessa. Roottorissa ei ole käämityksiä tai magneetteja ollenkaan, mikä johtaa pienempiin rautahäviöihin ja sitä kautta viileämpään käyntilämpötilaan (Low voltage High output... 2012. 4). SRM:n roottori koostuu pelkästään roottorissa olevista ohuisista rautalevyistä (ks. kuvio 2 sivulla 8). Lisäksi rautalevyt ovat anisotrooppisia, mikä tarkoittaa sitä, että niiden magneettiset ominaisuudet riippuvat siitä mistä suunnasta levyä katsotaan. Roottori on siis mekaaniselta rakenteeltaan lähes samanlainen kuin oikosulkumoottorissa, mutta ilman käämejä ja magneetteja, minkä vuoksi sen magneettiset ominaisuudet ovat erilaiset.



Kuvio 7. Eräs rautalevymalli (Low voltage High output... 2012. 9).

Kuvion 7 d-akseli (direct axis) on magneettisesti johtavampi akseli, jolla on suurempi induktanssi ja q-akseli (quadrature axis) on magneettisesti vähemmän johtava akseli, jolla on pienempi induktanssi. Näin ollen reluktanssi eli magneettinen vastus on d-akselilla pienempi ja q-akselilla suurempi. Ilmaväli vaikuttaa molempien akselien induktansseihin ja akseleiden induktanssien suhde vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin merkittävästi. Pienellä ilmavälillä saadaan aikaan sopiva suhde, jolla moottori tuottaa riittävästi momenttia. (Low voltage High output... 2012. 9)

SRM:lla on muitakin roottorimalleja, joilla kullakin on omat ominaisuutensa. Joitakin malleja on esitelty kuviossa 8.



Kuvio 8. Erilaisia 4-napaisia roottorimalleja (Kolehmainen. 2011. 18)

Kuvion 8 malli (a) on (Salient Pole) SP - roottori, joka on näistä rakenteeltaan yksinkertaisin. Sen rakenne on sellainen että se kestää nopeita ja jopa erittäin nopeita kierrosnopeuksia, mutta momentti ja hyötysuhde kärsivät. Malli (b) on ALA-roottori, jossa ohuet rautalevyt ovat pitkittäissuuntaisia ja taivutettuja. Rakenteella on hyvä suorituskyky, mutta pyörrevirtahäviöt ovat hieman suuremmat. Pyörrevirtahäviöt ovat rautasydämessä, tässä tapauksessa roottoriin indusoituvia virtoja, jotka muuttuvat lämmöksi. Teollisesti vaikean rakenteen vuoksi 4-napaisen ALA-roottorin valmistuskustannuksetkin ovat suuremmat, kun verrataan 2-napaiseen ALA-roottoriin, jossa laminointi on suora. Malli (c) on TLA-roottori, joka on teollisen valmistuksen kannalta paras näistä kolmesta. Siinä levyistä on poistettu stanssaamalla osia, kuten kuviossa 7 on esitetty. Näin saadaan helposti aikaan d- ja q- akseleille erilaiset magneettiset ominaisuudet. (Kolehmainen. 2011. 18)

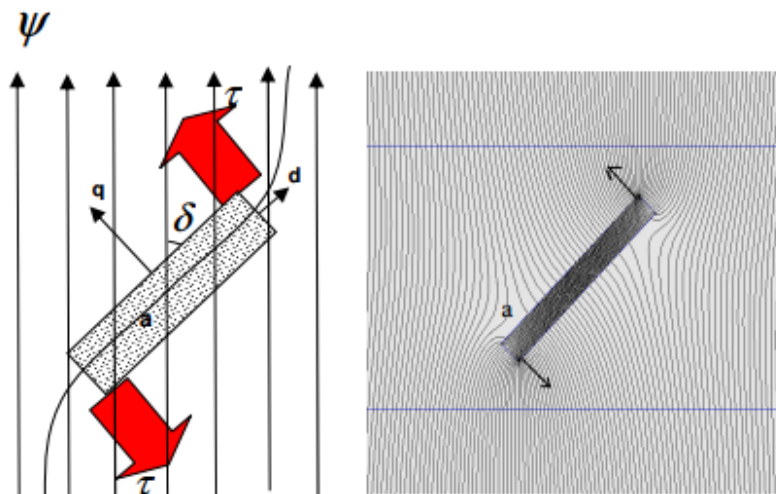
Näistä roottorimalleista ALA- ja TLA-roottorit ovat yleisimpiä niiden paremman momentintuottokyvyn takia. Moottorin momenttiin vaikuttaa vahvasti ero d- ja q- akselien induktansseissa, ks. kuvio 7.

Roottoreiden rakenteen takia moottorivalmistajat keskittyvät mieluummin TLA-roottoriin, koska niitä voidaan valmistaa samoilla välineillä kuin oikosulkumoottoreitakin. Kuitenkin ALA- roottorimallin mahdollisuuksien takia sitäkin valmistetaan. Sillä oletetaan olevan parempi d/q-suhde kuin TLA-roottorilla ja siten myös parempi tehokerroin ja momentintuottokyky. (Moghaddam. 2007. 13)

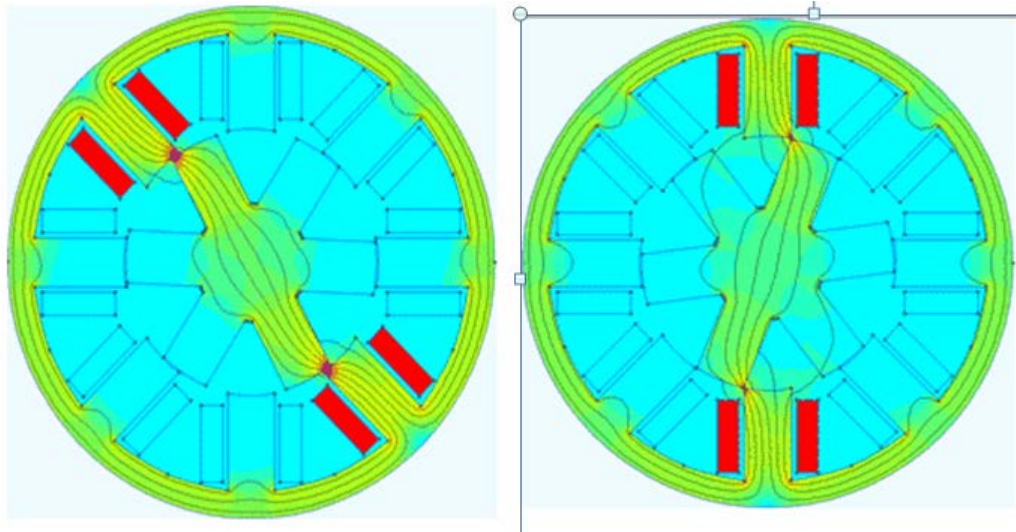
2.2.3 Toimintaperiaate

Synkronireluktanssimoottorin toiminta perustuu siihen, että staattorikäämeihin syötetty vaihtojännite aiheuttaa pyörivän magneettikentän samalla tavalla kuin induktiomoottorissa. Magneettikenttä vetää puoleensa roottorin parhaiten magneettikenttää johtavaa akselia eli d-akselia (ks. kuvio 7 sivulla 14). Magneettikentän pyöriessä roottorin d-akseli alkaa seuraamaan magneettikenttää ja roottori alkaa pyöriä pyrkien asemaan, jossa roottorin kautta kulkevalla magneettivuolla on helpoin reitti. Tämän vuoksi moottori pyörii synkronisella nopeudella yrittäen koko ajan pienentää magneettisen piirin reluktanssia. Tämän vuoksi konetta kutsutaan synkronireluktanssikoneeksi.

Kuvioissa 9 ja 10 havainnollistetaan moottorin toimintaa. Kuviossa 9 esitetään anisotrooppiseen kappaleeseen vaikuttavia voimia sen ollessa magneettikentässä. Kuten kuvioista nähdään, pyrkii kappale kääntymään magneettikentän suuntaiseksi. Kuvion 10 vasemmanpuoleisessa kuvassa roottori pyrkii kääntymään vastapäivään niin että vuoviivat menisivätkin suoraan. Oikeanpuoleisessa kuvassa navat ovat vaihtuneet ja tilanne on sama kuin ensimmäisessä kuvassa.

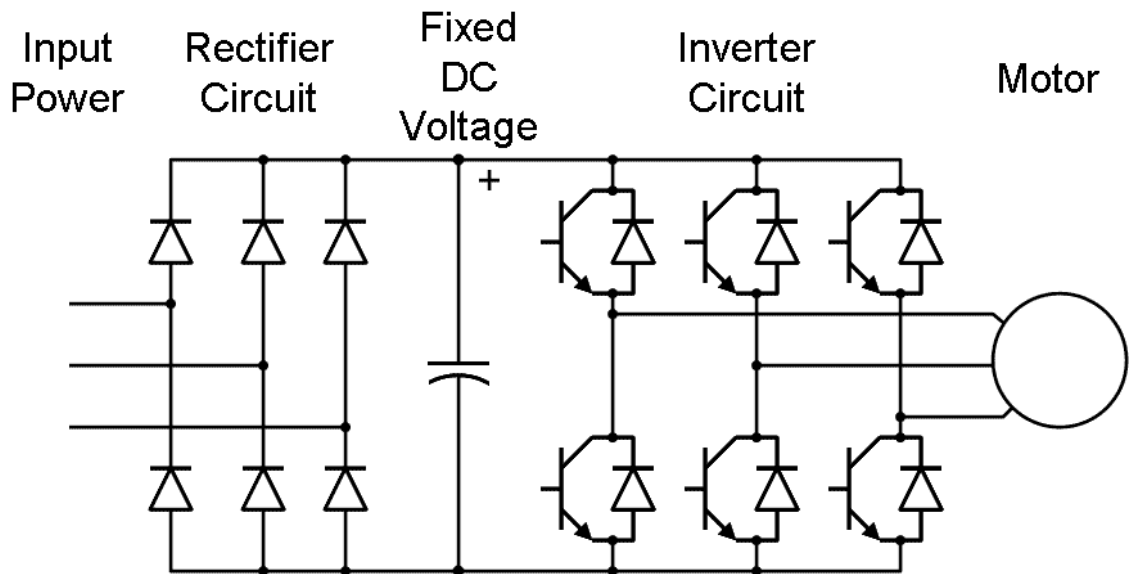


Kuvio 9. Anisotrooppiseen kappaleeseen kohdistuvat voimat (Moghaddam. 2007. 3).



Kuvio 10. Havainnekuva toimintaperiaatteesta (Boyev. 2009)

Moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää taajuusmuuttajalla, koska roottorin rakenne on selkeä ja kone pyörii synkroninopeudella. Silloin voidaan taajuusmuuttajan muodostaman moottorimallin avulla laskea akselin asento tarkasti, eikä tarvita asentoantureita. Anturittomuus säästää koneen koossa ja hinnassa. Taajuusmuuttaja on laite, jolla voidaan muuttaa sekä lähtötaajuutta että lähtöjännitettä. Yleisin taajuusmuuttajatyyppejä on kolmivaiheinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Siinä teho- ja jännitejohteilla muodostetaan vaihtosuuntaussilta, jolla voidaan moottorin vaiheiden lähdöt kytkeä positiiviseen tai negatiiviseen tasajännitepotentiaaliin. Lähtöjä kytketään "+" tai "-" potentiaaliin hyvin nopealla tahdilla, tällä tavalla saadaan lähdölle halutun suuruinen ja taajuinen vaihtojännitteen perusaalto. Tätä toimintaa kutsutaan myös pulssinleveysmodulaatioksi (Pulse Width Modulation). Kuviossa 11 on esitetty PWM taajuusmuuttajan kaaviokuva (Honkanen. N.d.). Synkronireluktanssimoottorin ohjaamiseen ei tarvita erikoisvalmisteista taajuusmuuttajaa, vaan sitä voidaan ajaa samalla taajuusmuuttajalla kuin oikosulkumoottoriakin. Ohjaamisesta lisää luvussa 2.3.4.



Kuvio 11. PWM taajuusmuuttajan kaaviokuva (Taajuusmuuttaja. 2016).

SRM:n momentti syntyy ilmavälissä staattorivuon magneettisen vektorin ja d-akselin välille silloin kun ne eivät ole linjassa, ks. kuvio 10. Momentin suuruus riippuu d- ja q-akselien välisestä induktanssien erosta. Mitä suurempi erotus on, sitä suurempi on vääntömomentti (ks. kaava 6) (Mostafa. 2010. 1364-1365).

$$T_e = \frac{3}{2}(L_d - L_q)i_d i_q \quad (6)$$

missä

T_e = sähköinen vääntömomentti

L_d = d-akselin induktanssi

L_q = q-akselin induktanssi

i_d = d- akselin suuntainen virran komponentti

i_q = q- akselin suuntainen virran komponentti

Suurinta momenttia haettaessa kuitenkin tehokerroin kärsii. Pientä tehokerrointa pidetäänkin yhtenä SRM:n huonona puolena ja sen takia ilmavälinoptimointi on tärkeässä roolissa SRM:a suunnitellessa. Siitä tarkemmin luvussa 2.3.2.

2.3 Ominaisuudet

Tässä luvussa käydään läpi moottoreiden ominaisuuksia, kuten virta, momentti, tehokerroin ja moottoreiden häviöt. Lisäksi tutustutaan moottoreiden ohjaus- ja käynnistystapoihin sekä taajuusmuuttajaohjauksiin.

2.3.1 Virta

Vertaillaan esimerkiksi 4-napaisten 7.5 - 22 kW oikosulku- ja synkronireluktanssimoottoreiden nimellisvirtoja. Oikosulkumoottorit ovat IE3 luokan moottoreita. käynnistysvirtojen vertailu ei ole mielestäni tarpeellista koska SRM:a ei voi ajaa ilman taajuusmuuttajaa.

SRM:n nimellisvirtaa voidaan nostaa pienempien häviöiden takia. Sen takia moottori kestää hieman suuremmatkin virrat SRM myös tarvitsee hieman suuremman virran tuottaakseen yhtä suuren momentin kuin oikosulkumoottori. Tämä johtuu siitä, että momentintuottoon vaikuttaa induktanssit L_d ja L_q (ks. kaava 6 sivulla 18).

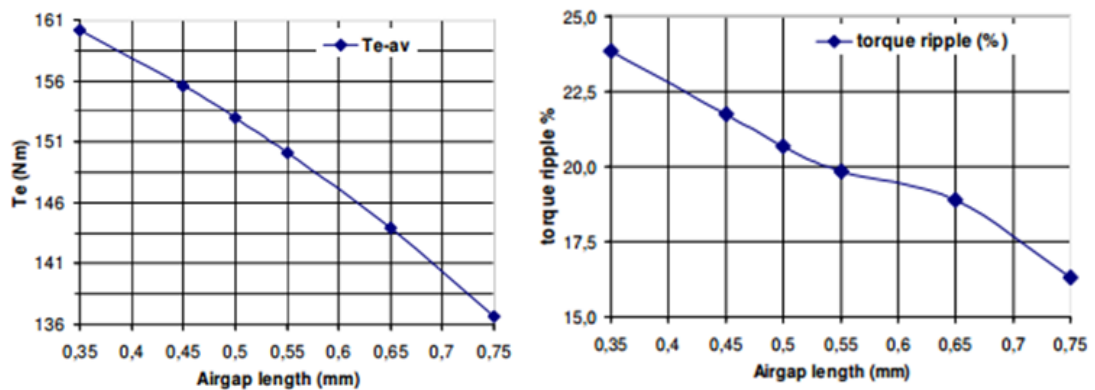
Taulukko 1. Oikosulku- ja synkronireluktanssimoottoreiden nimellisvirtojen vertailu (Low voltage High output synchronous reluctance motors. 2014. 6. ja Low voltage General performance motors. 2015. 16).

Moottori /kW	IM: I_N / A	SRM: I_N / A
7.5	15.5	17.4
11	21.1	25
15	28.5	34.5
18.5	34.9	42.2
22 IM/20 SRM	41.4	49.2

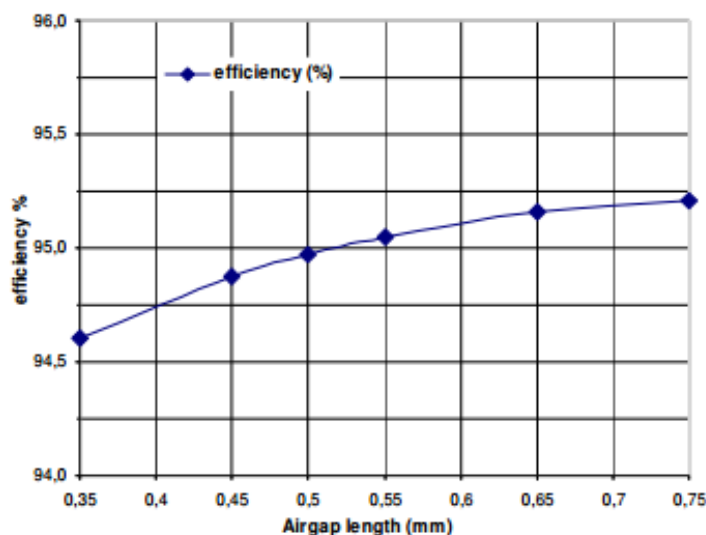
2.3.2 Momentti, hyötysuhde ja tehokerroin

Moghaddamin mukaan SRM voi tuottaa 20 - 40 % suuremman momentin kuin oikosulkumoottori (Moghaddam. 2007. 14). SRM:n ilmavälin suuruus ja roottorin rakenne vaikuttavat kuitenkin moottorin tuottamaan momenttiin niin paljon, että tuloksissa on paljon hajontaa.

Ilmavälin vaikutusta SRM:n tuottamaan momenttiin vertaillaan kuviossa 12. Kuvioista nähdään, että ilmavälin pienentäminen parantaa moottorin momentintuottokykyä, mutta lisää hieman rippelin määrää momenttikäyrässä kuten aiemmin mainittiin, momentin tuottokykyyn liittyy vahvasti d- ja q- akselien induktanssien suuruus. Ilmavälin muutos vaikuttaa d- akselin induktanssiin suhteessa paljon enemmän kuin q- akselin induktanssiin. Tämän vuoksi ilmaväli vaikuttaa niin vahvasti momentintuotto- kykyyn sekä tehokertoimeen ja siten myös vertailukelpoisten tutkimuksien tekemi- nen on vaikeaa. Ilmavälin vaikutusta hyötysuhteeseen kuvaa kuvio 13. Ilmavälin pie- nentämisen seurauksena hyötysuhde hieman heikkenen koneen lisääntyneiden rau- tahäviöiden takia. (Moghaddam. 2007.76-77)

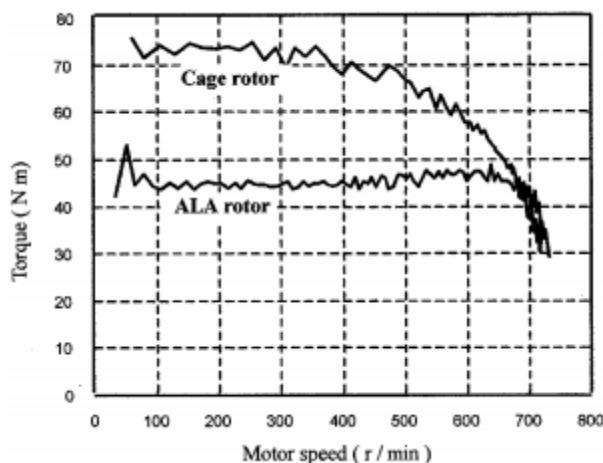


Kuvio 12. Ilmavälin vaikutus momentintuottokykyyn (Vas.) ja momenttirippeliin (Oik.) (Moghaddam. 2007. 76). Moottorina 35 kW:n Synkronireluktanssimoottori.



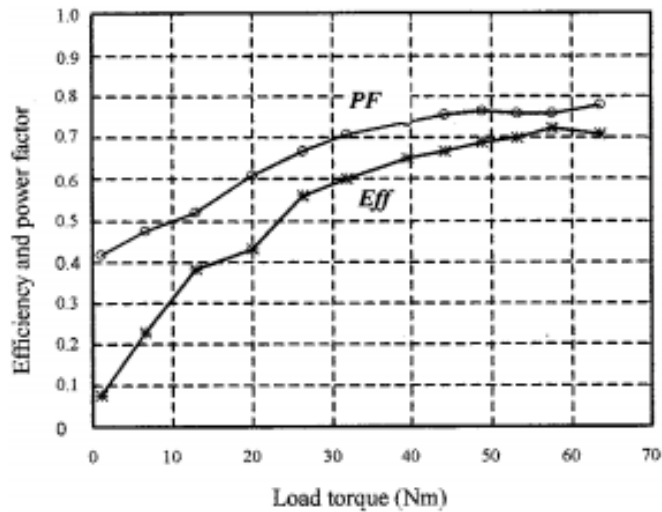
Kuvio 13. Ilmavälin vaikutus hyötysuhteeseen (Moghaddam. 2007. 78)

Kuviosta 14 nähdään, että SRM:n tuottama vääntömomentti on pienillä nopeuksilla paljon pienempi kuin oikosulkumoottorilla. Lähestyttäessä nimellisnopeutta eroa ei niinkään ole. Kuviosta nähdään siis, että oikosulkumoottorin tuottama momentti pienemmillä kierroksilla on n. 2.5- kertainen kuormamomenttiin (30 Nm) nähden, kun taas SRM:n kiihdytykseen tarvittava momentti on n. 1.5- kertainen ja pysyy suhteellisen muuttumattomana koko kiihdytyksen ajan. Tämä johtuu siitä, että oikosulkumoottorissa roottoriin indusoituva virta on suurempi, mikä nostattaa T_e :n arvoa, kun taas SRM:n momenttiin vaikuttaa kaavan 6 mukaan d/q-suhde.

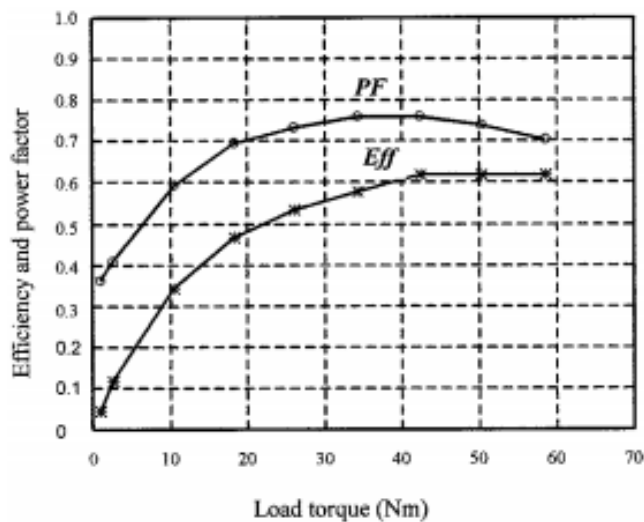


Kuvio 14. Vertailu ALA-roottorilla varustetun SRM:n ja häkkikäätymisen IM:n momenttikäyristä (Fengxiang, 2002. 1239).

Kuviossa 15 vertaillaan hyötysuhdetta ja tehokerrointa momentin funktiona. Kuvista nähdään että ALA-roottorillisen SRM:n hyötysuhde on pienellä kuormalla suunnilleen yhtä suuri kuin häkkikäätymisen oikosulkumoottorin. Tehokerroin kuitenkin pyrkii olemaan momentin kasvaessakin hieman heikompi kuin oikosulkumoottorilla. Kuvista voidaan myös nähdä se, että suhteessa suurimmat säästöt tulevat pienillä moottoreilla, koska samalla momentin määrällä ALA-roottorillisen koneen hyötysuhde on hiukan parempi kuin häkkikäätymisen. Vrt. taulukko 2 sivulla 24.



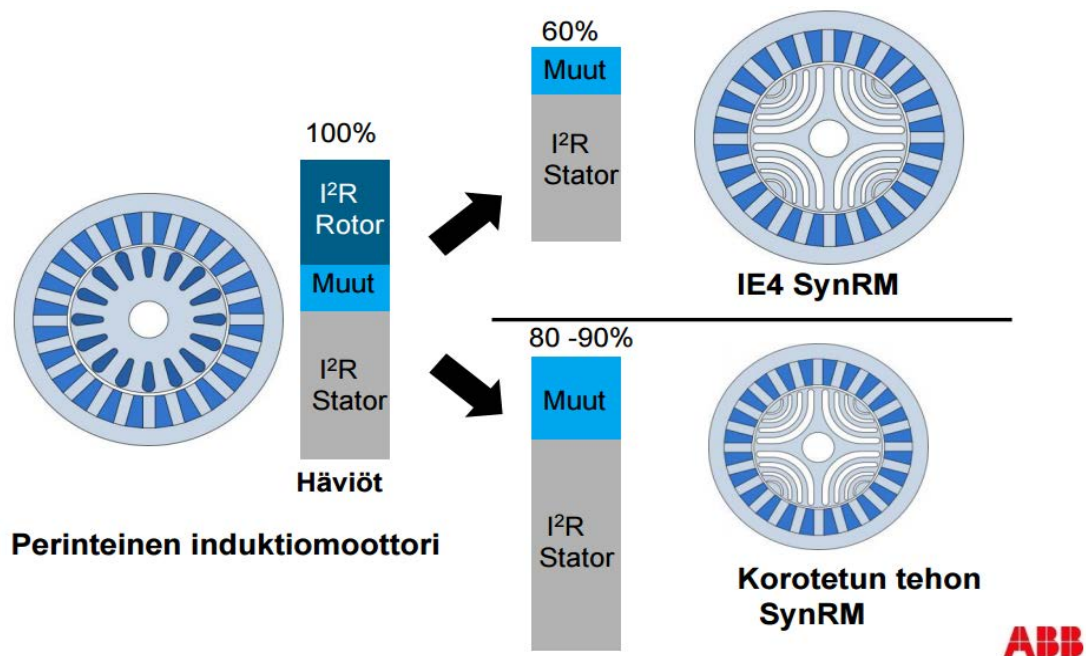
(a)



(b)

Kuvio 15. Vertailu ALA-roottorin ja häkkikäämityn rottorin suorituskyvystä ja tehokertoimista a) ALA-roottori. b) Häkkikäämitty (Fengxiang. 2002. 1241).

ABB:n mukaan SRM:n menestyksen syy on pienemmät häviöt, jota selventää kuvio 16. Kuten kuviosta nähdään niin SRM:n ja oikosulkumotorilla on samat staattorihäviöt. SRM:n rottorin rautahäviöt ovat lähes olemattomat rottorin rakenteen takia ja siksi rottorihäviöt on kuviosta jätetty pois.



Kuvio 16. Häviöt verrattuna perinteiseen oikosulkumoottoriin (Vuorivirta. 2014. 9).

Taulukossa 2 vertaillaan moottoreiden hyötysuhteita. Hyötysuhteet on saatu ABB:n katalogeista. Hyötysuhteet näyttävät olevan huonompia SRM:illa, mikä johtuu siitä, että SRM:n kohdalla on otettu huomioon myös taajuusmuuttajan aiheuttamat häviöt (Low voltage High output synchronous reluctance motors. 2014. 6. ja Low voltage General performance motors. 2015. 16).

Taajuusmuuttaja tuo moottorille 10–30 % lisää häviöitä ei sinimuotoisen virran ja jännitteen vuoksi ABB:n mukaan (ks. kuvio 18 sivulla 24). Taulukkoon 2 on laskettu kaavalla 7 taajuusmuuttajalla syötetyn oikosulkumoottorin hyötysuhteen arvoja eri teholuokissa (IM:VSD), jossa on otettu huomioon 20 %: n lisähäviöt.

$$\eta(VSD) = 100 - (100 - \eta) \cdot 1.2 \quad (7)$$

missä

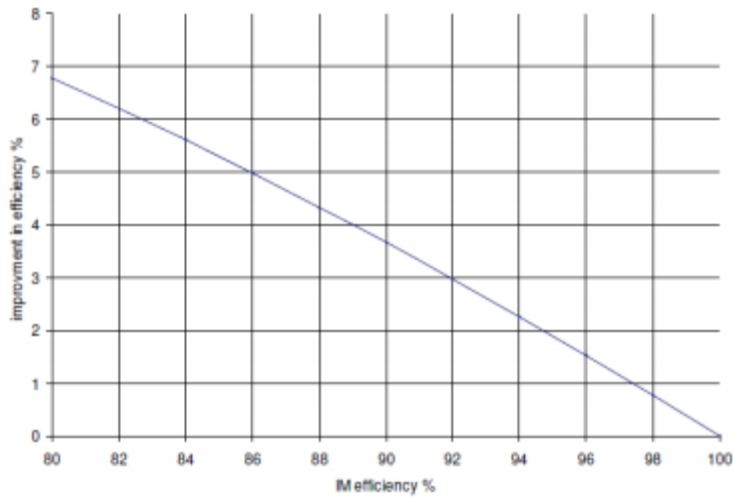
η = hyötysuhde

Taulukko 2. Moottoreiden hyötysuhdevertailu

Moottori / kW	IM: η / %		SRM: η / %	Säästö / %
Kuorma / %	100 (DOL)	100 (VSD)	100 (VSD)	
7.5	90.4	88.5	88.7	2.1
11	91.4	89.7	89.8	1.9
15	92.1	90.5	90.6	1.7
18.5	92.6	91.1	91.2	1.6
22 IM/20 SRM	93.0	91.6	92.0	1.5

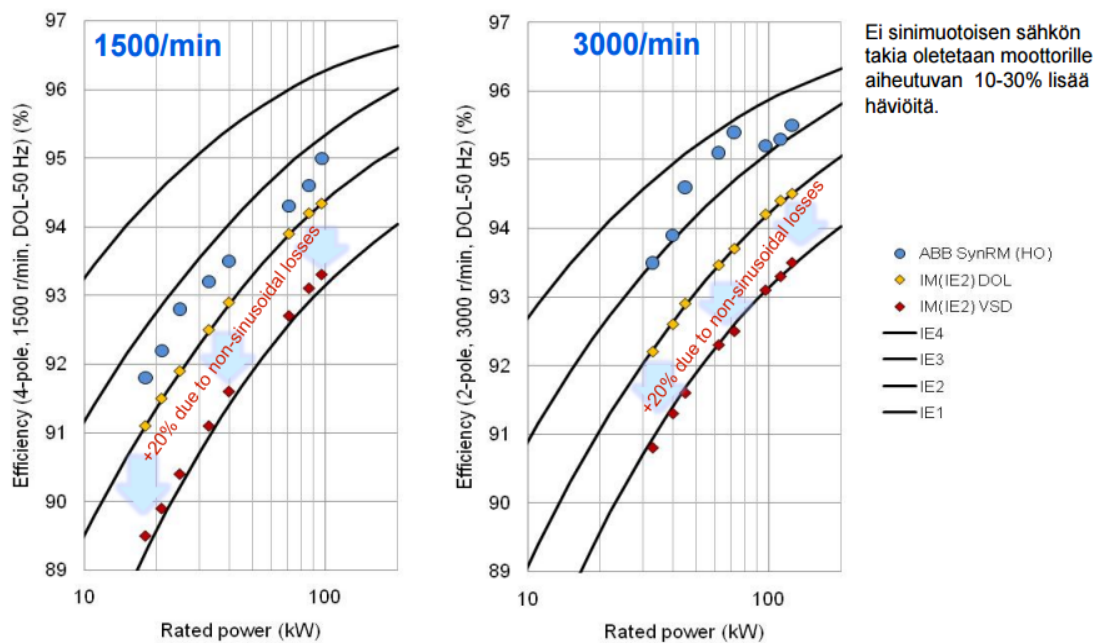
Kuten taulukosta 2 nähdään, verrattaessa SRM:n (+taajuusmuuttajan) hyötysuhdetta taajuusmuuttajalla syötettyyn samankokoiseen oikosulkumoottoriin, on SRM:n hyötysuhde hiukan parempi kuin oikosulkumoottorin. Samankokoisilla moottoreilla säästöjä syntyy suhteessa moottoreiden hyötysuhteiden erotukseen enemmän pienempi-tehoisilla moottoreilla, johtuen siitä, että oikosulkumoottorin roottorihäviöiden osuus kaikista moottorin häviöistä pienenee isompiin moottoritehoihin siirryttäessä ja samaan aikaan SRM:n roottorihäviöt pysyvät olemattomina. Suoraan verkkoon kytketyn IE3-luokan moottorin hyötysuhteeseen verrattuna, SRM:n hyötysuhde jää pienemmäksi. Muuttuvanopeuksiseen järjestelmään SRM on kuitenkin parempi valinta.

Suurinta mahdollista hyötysuhteen parantumista kuvaa kuvio 17 (Moghaddam. 2007. 78). Siitä nähdään että pienemmillä nimellistehoilla oikosulkumoottoreilla on huomattavasti parempi hyötysuhde ja hyötysuhteen parannus on suhteellisesti suurempaa kuin isommilla moottoritehoilla. Taulukon 2 säästöt vertailukohdaksi otettaessa saadaan 88–92 % hyötysuhteelle n. 3.0 - 4.4 %:n parannus. Tulokset taulukossa 2 ovat samansuuntaisia, mutta hieman pienempiä. (Moghaddam. 2007. 18).



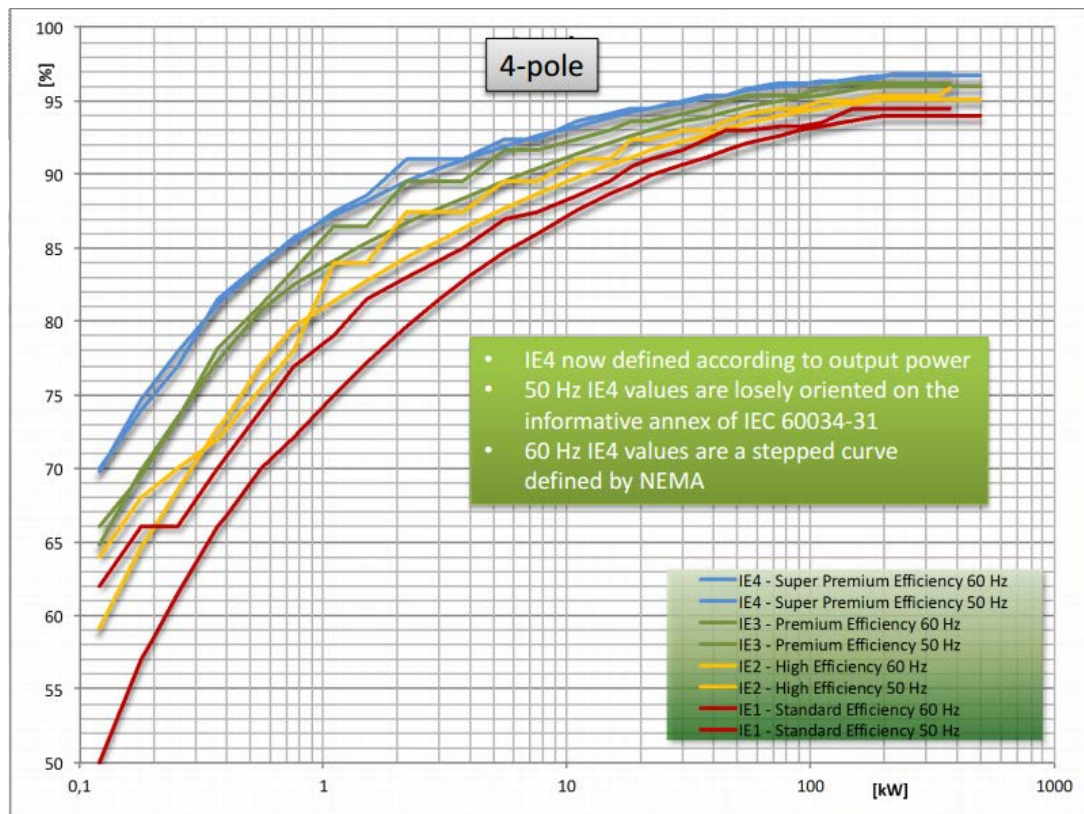
Kuvio 17. Suurin mahdollinen hyötysuhteen parantuminen IM:sta samankokoiseen SRM:n vaihdettaessa (Moghaddam. 2007. 18).

Kuvioissa 18 ja 19 vertaillaan jo olemassa olevia IE-luokkia ja eri nopeuksia moottoreita keskenään. Kuvioista nähdään, että SRM on hyötysuhteeltaan vain vähän parempi kuin parhaat suoraan verkkoon kytketyt (DOL) IE3-luokan oikosulkumoottorit.



ABB

Kuvio 18. Oikosulkumoottorin ja SRM:n hyötysuhdevertailu (Vuorivirta. 2014. 10).



Kuvio 19. IE-luokkavertailu (Doppelbauer. 2013. 7).

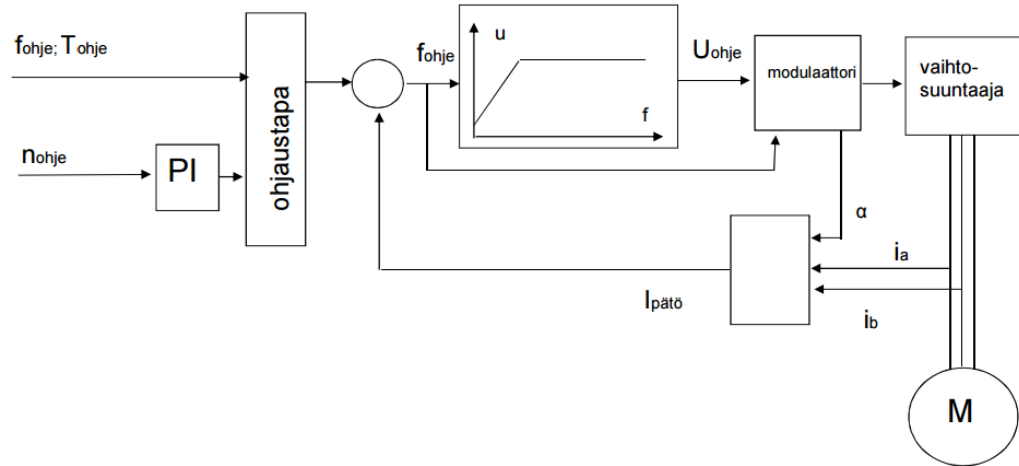
2.3.3 Moottorin ohjaus

Moottoreita ohjataan useimmiten siten, että saadaan moottori pyörimään määritettyä nopeutta. Siihen taajuusmuuttaja on paras ja yksinkertaisin vaihtoehto.

Moottorin käynnistykseen käytetään erilaisia tapoja, kuten suoraan verkkoon kytkentä (DOL), tähti-kolmiokäynnistys (Y/D) ja pehmokäynnistimet. Taajuusmuuttajakäynnistys on ominaisuuksiltaan paras vaihtoehto. Synkronireluktanssimoottoria voidaan ajaa vain taajuusmuuttajalla. Sen roottoria ei ole oikosuljettu ja sen vuoksi sitä ei voi käynnistää suoraan verkkoon. SRM:n ajamiseen ilman taajuusmuuttajaa tarvittaisiin apulaite, joka tahdistaisi koneen verkkoon. (Högfors. 2014. 12).

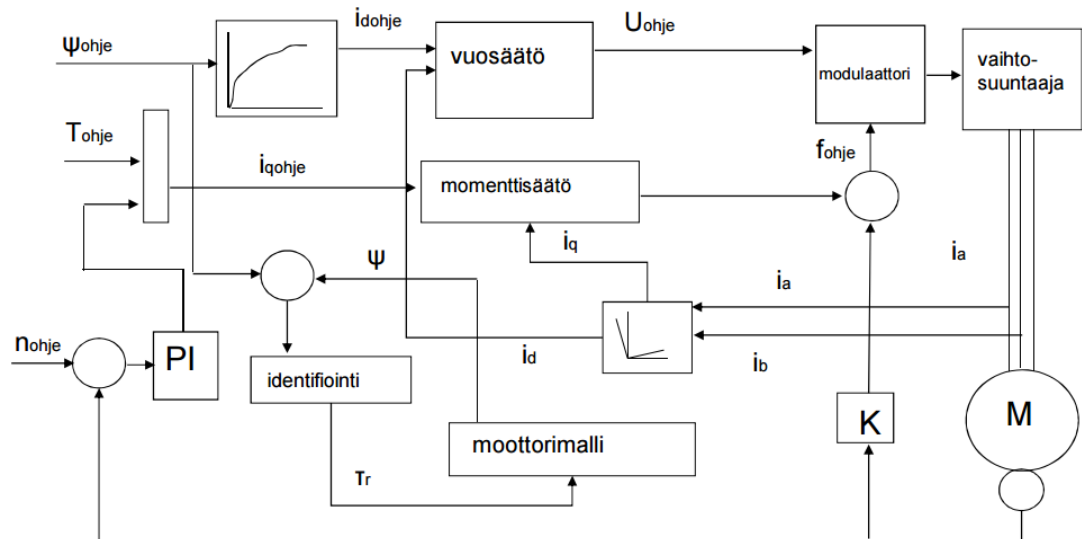
Taajuusmuuttajalla moottoria voidaan säätää- tai ohjata muutamalla eri tavalla. Ohjaustapana voidaan käyttää mm. skalaariohjausta, vektorisäätöä sekä suoraa momenttisäätöä (Direct Torque Control).

Skalaariohjaus on näistä tavoista yksinkertaisin eikä tarvitse toimiakseen moottorin mitattuja arvoja virrasta tai pyörimisnopeudesta. Skalaariohjauksessa säädettyjä suureita ovat jännite ja vaihtosuuntaajan lähtötaajuus. Skalaariohjausta käytetään yksinkertaisissa sovelluksissa kuten pumppu- ja puhallinsovelluksissa. Kuviossa 20 on esitetty skalaariohjauksen toimintaperiaate (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 31).



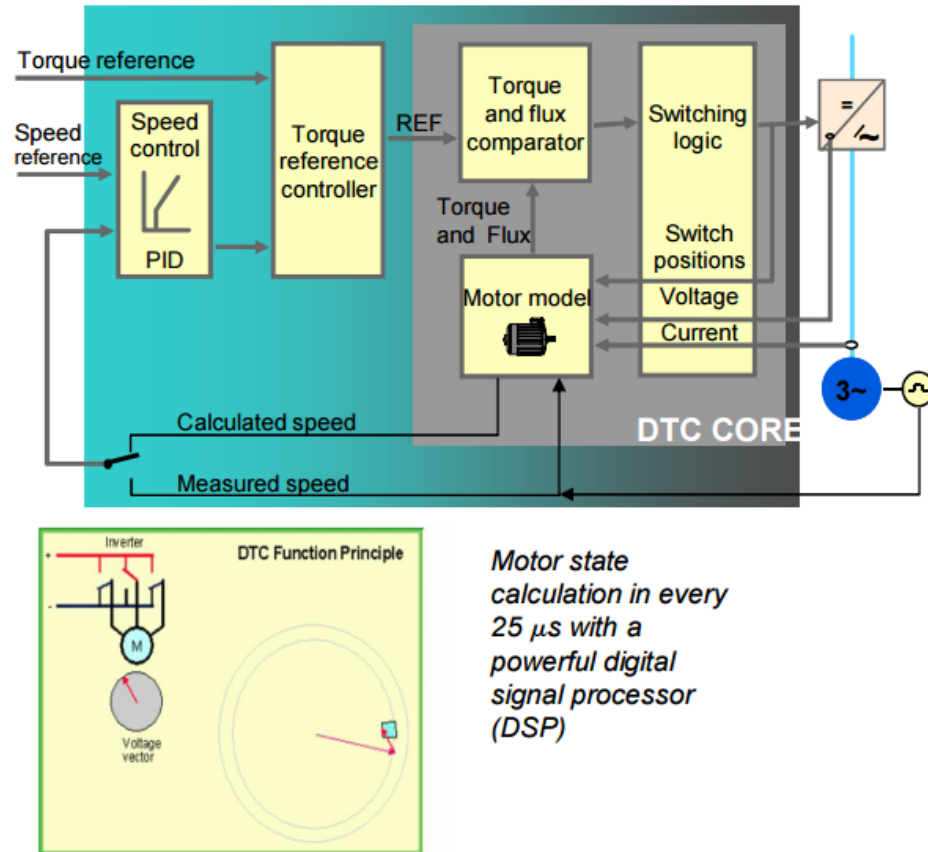
Kuvio 20. Skalaariohjauksen toimintaperiaate (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 31).

Vektorisäädössä säädetään moottorin käännavuota ja momenttia erikseen. Vektorisäädössä taajuusmuuttaja tarvitsee staattorin virran ja roottorin pyörimisnopeuden estimaattina tai mitattuna. Staattorivirta jaetaan kahteen komponenttiin, I_d :hen ja I_q :un. I_d on yhdensuuntainen magneettivuon kanssa ja sitä tarvitaan vuon säätämiseen. I_q taas on poikittaissuuntainen vuohon nähden ja sitä tarvitaan momentin säätämiseen. Vektorisäätö on monimutkaisempi kuin skalaariohjaus ja se tarvitsee moottorin kilpitietoja joiden pohjalta taajuusmuuttajalle luodaan sisäinen moottorimalli. Kuviossa 21 esitetään vektorisäädön toimintaperiaate (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 32).



Kuvio 21. Vektorisäädön toimintaperiaate (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 33).

Suorassa momenttisäädössä (DTC) säädettävät suureet ovat myös staattorinkäämi-vuo sekä momentti eli moottoria ohjataan kuten vektorisäädössäkin. Erona on kuitenkin se, että DTC:ssä pyritään pitämään vuon arvo tietyn hystereesikaistan sisällä. Hystereesikaistan leveys valitaan jännitevektorien avulla ja sen vuoksi taajuusmuuttaja tutkii jokaisen kytkennän erillisenä. Tämä säätö toimii ilman modulaattoria ja siten nopeuttaa säädön vastetta. Vasteen tarkkuus myös kasvaa DTC-säädössä, mikä mahdollistaa pehmeät kiihdytykset ja pysäytykset. DTC ohjaa momenttia lineaarisesti, mikä tarkoittaa sitä, että momentti pysyy tasaisena koko nopeusalueella. Kuviossa 22 on esitetty DTC-säädön toimintaperiaate. (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 34).



Kuvio 22. DTC-säädön toimintaperiaate (Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. 35).

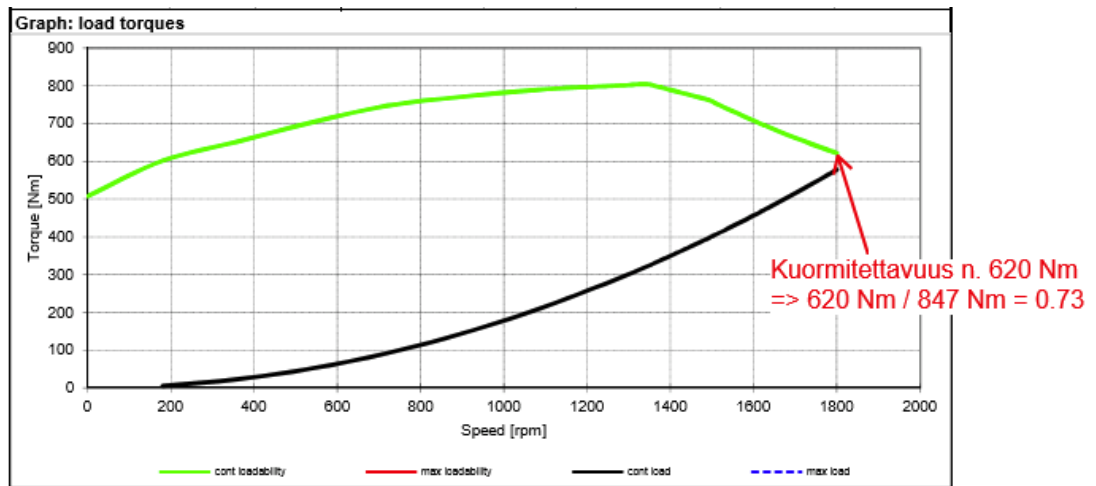
2.4 Kustannusarvioesimerkki

Tässä esimerkissä käytetään itse keksittyjä lähtötietoja ja mitoitetaan IM- ja SRM-moottorit niiden pohjalta ja lasketaan kuinka paljon energiansäästöjä syntyy. Otetaan esimerkiksi pumppusovellus, joka tarvitsee vääntömomenttia $T_{\max} = 580 \text{ Nm}$ kierrosnopeuden ollessa $n_{\max} = 1800 \text{ rpm}$. Pumpun vaatima teho lasketaan kaavalla 8.

$$P_{\max} = \frac{T_{\max} \cdot n_{\max}}{9550} = \frac{580 \text{ Nm} \cdot 1800 \text{ rpm}}{9550} = 109.3 \text{ kW} \quad (8)$$

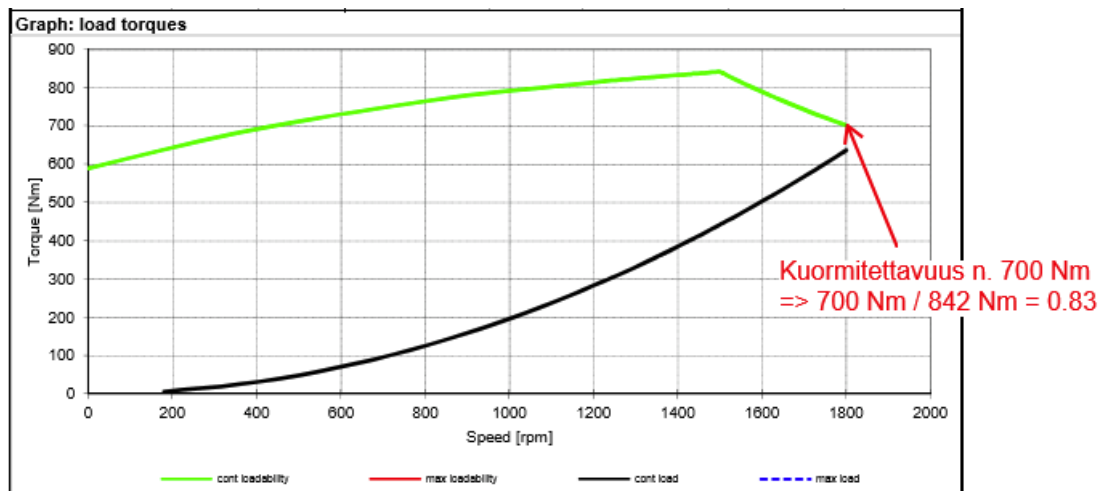
Esimerkissä vertaillaan 4-napaista synkronireluktanssimoottoria ja 4-napaista oikosulkumoottoria.

Oikosulkumoottorin kuormitettavuuskäyrän mukaan 4-napaista itsejähdyttävää moottoria voidaan kuormittaa 1800 rpm:n kierrosluvulla 73 %. Kuormitettavuuskäyrä on esitetty kuviossa 23.



Kuvio 23. IM:n kuormitettavuus Drivesize-käyrä (DriveSize. 2016)

SRM:n vastaava kuormitettavuus on 83 %. SRM:n kuormitettavuuskäyrä on esitetty kuviossa 24.



Kuvio 24. SRM:n kuormitettavuus Drivesize-käyrä (DriveSize. 2016)

Moottorin nimellismomentin T_n on oltava kaavan 9 mukaisesti vähintään,

$$T_n \geq \frac{T_{\max}}{\eta} \quad (9)$$

missä

T_n = Moottorin nimellismomentti

T_{\max} = Moottorin maksimimomentti

$$T_{n:IM} \geq \frac{580 \text{ Nm}}{0.73} = 795 \text{ Nm}$$

$$T_{n:SRM} \geq \frac{580 \text{ Nm}}{0.83} = 699 \text{ Nm}$$

Vastaavasti moottorin nimellistehon P_n on oltava kaavan 10 mukaisesti vähintään

$$P_n \geq \frac{T_n \cdot n_n}{9550} \quad (10)$$

missä

P_n = Moottorin nimellisteho

T_n = Moottorin nimellismomentti

n_n = nimellispöörimisnopeus

$$P_{n:IM} \geq \frac{795 \text{ Nm} \cdot 1500 \text{ rpm}}{9550} = 124.9 \text{ kW}$$

$$P_{n:SRM} \geq \frac{699 \text{ Nm} \cdot 1500 \text{ rpm}}{9550} = 109.8 \text{ kW}$$

Valitaan vertailtavat moottorit ABB:n katalogeista edellä lasketun nimellistehon P_n mukaan. Oletetaan oikosulkumoottorille tulevan 20 % lisää häviöitä taajuusmuuttajan aiheuttamien harmonisten värähtelyjen ja muiden haittavaikutusten takia. Oikosulkumoottorin hyötysuhde taajuusmuuttaja mukaan luettuna voidaan laskea kaavasta 7 (s. 23). Taulukkoon 3 on kerätty tietoja valituista moottoreista.

$$\eta(VSD) = 100 - (100 - 95.6) \cdot 1.2$$

Taulukko 3. Valittujen moottoreiden tiedot (Low voltage IE4 synchronous reluctance motors. 2016. 14. ja Low voltage General performance motors. 2015. 16).

Moottori	P/kW	I/A	n/rpm	T_n /Nm	η /%
SRM	110	244	1500	702	96.3
IM (VSD)	132	231	1488	847	94.7

Moottoreiden verkosta ottamat nimelliset tehot voidaan laskea hyötysuhteen avulla kaavasta 11.

$$P_{\text{notto}} = \frac{P_n}{\eta} \quad (11)$$

missä

P_{notto} = Moottorin verkosta ottama nimellinen teho

P_n = Moottorin akselilta saatava nimellinen mekaaninen teho

η = hyötysuhde

Nimelliset ottotehot:

$$P_{\text{notto:IM}} = \frac{132 \text{ kW}}{0.947} = 139 \text{ kW}$$

$$P_{\text{notto:SRM}} = \frac{110 \text{ kW}}{0.963} = 114 \text{ kW}$$

Todellinen ottoteho P_{otto} määräytyy pumpun aiheuttaman kuormituksen mukaan ja lasketaan kaavan 12 mukaan.

$$P_{\text{otto}} = \frac{P_{\text{max}}}{\eta} \quad (12)$$

missä

P_{otto} = todellinen ottoteho

P_{max} = pumpun maksimiteho

η = hyötysuhde

$$P_{\text{otto:IM}} = \frac{109.3 \text{ kW}}{0.947} = 115.4 \text{ kW}$$

$$P_{\text{otto:SRM}} = \frac{109.3 \text{ kW}}{0.963} = 113.5 \text{ kW}$$

Jos oletetaan, että moottori käy vuodessa 350 vrk saadaan laskettua vuotuinen energian kulutus kaavan 12 mukaan

$$E = P_{\text{otto}} \cdot t \quad (12)$$

missä

E = kulutettu energia

P_{otto} = moottorin verkosta ottama teho

t = aika

Energiankulutukset ovat siis

$$E_{IM} = 115.4 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 350 \text{ vrk} = 969360 \text{ kWh}$$

$$E_{SRM} = 113.5 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 350 \text{ vrk} = 953400 \text{ kWh}$$

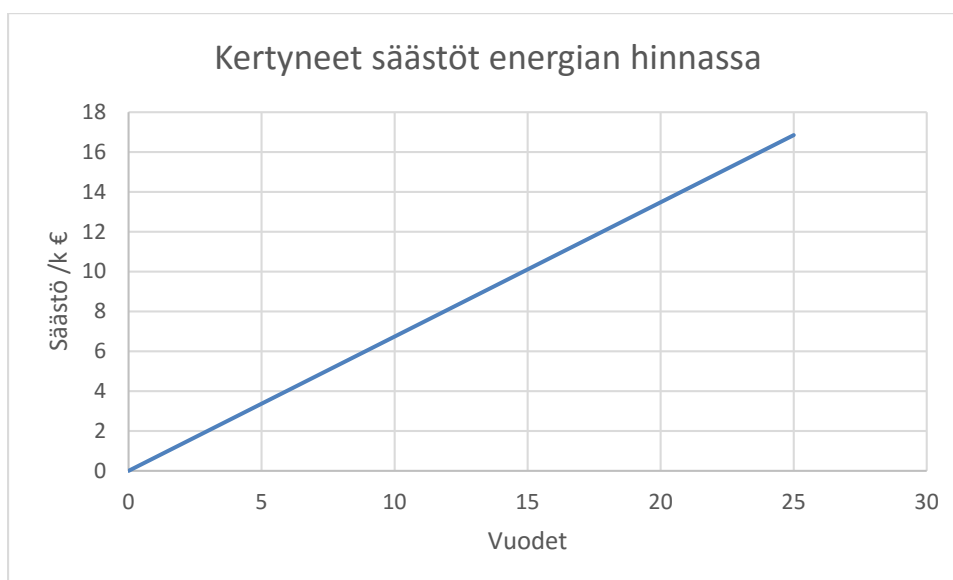
Saaduista tuloksista nähdään että, energiaa säästyisi 15960 kWh vuodessa, jos valitaan SRM. Vuonna 2015 teollisuusasiakkaan teholiittymän sähköenergian myyntihinnalla 0.0422 €/kWh (Sähköverkkopalvelun hinnasto. 2015), saadaan vuotuiseksi hinnaksi energialle:

$$IM: 969360 \text{ kWh} \cdot 0.0422 \text{ €/kWh} = 40907 \text{ €}$$

$$SRM: 953400 \text{ kWh} \cdot 0.0422 \text{ €/kWh} = 40233 \text{ €}$$

Kustannusero on 674 euroa vuodessa. Kertyminen kuvattu kuviossa 25.

Moottorin elinkaarikustannukset koostuvat hankinta-, energia- ja huoltokustannuksista. Moottori ja -taajuusmuuttajapakettien hintaero on noin 15–20 % siten, että SRM on kalliimpi (ABB. 2016.). Vuorivirran tekemien laskelmien mukaan takaisinmaksuaika vaihdettaessa IE2-luokan moottori IE3- moottoriksi 8000 tunnin vuotuisella käyntiajalla olisi 11 kW:n moottorilla alle 2 vuotta. Voidaan siis päätellä, että vaihdettaessa IE-3 luokan oikosulkumoottori synkronireluktanssimoottoriksi, takaisinmaksuaika olisi samaa luokkaa (Vuorivirta. 2014. 17) . Pelkkien energiakustannusten aiheuttamien säästöjen kertyminen on kuvattu kuviossa 25. Kuvion suora on laskettu Excelillä edellä laskettujen säästöjen mukaan. Lisäksi synkronireluktanssikoneen huoltokustannukset ovat hieman oikosulkumoottoria pienemmät yksinkertaisemmän rakenteen ja viileämmän käyntilämpötilan takia. Se nostaa hieman kuvion 25 suoran kulmakerrointa. Viileämpi käyntilämpötila esimerkiksi säästää laakereita, jotka ovat yksi eniten huoltoa vaativista moottoreiden osista.



Kuvio 25. Säästöjen kertyminen kuluneiden vuosien funktiona (Excel laskelma)

Tässä esimerkissä on laskettu IE3- ja IE4-luokan moottoreiden väliset säästöt. Nykyään kuitenkin on käytössä vielä paljon IE2-luokan moottoreita, mikä tarkoittaa sitä, että vaihtamalla ne IE4-luokan moottoreiksi olisivat säästöt tätä esimerkkiä suuremmat.

3 Paremman hyötysuhteen moottoreiden kehitys

Sähkömoottoreiden energiatehokkuuteen vaikuttavat monet asiat moottorin rakenteessa, esimerkiksi käämitysten muoto ja rakenne. Sähkömoottorin mallintaminen laskennallisesti on ollut vaikeaa, koska moottorin käyttäytyminen esimerkiksi magneettipiirien osalta on epälineaarista. Moottoreiden ominaisuuksia pystytään kuitenkin luotettavasti mallintamaan sijaiskytkentöjen ja numeerisiin elementtimenetelmiin (FEM) pohjautuvien ohjelmien avulla (Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. 2009. 16-18).

Sähkömoottoreiden hyötysuhdevaatimuksia on tiukennettu ja tiukennetaan edelleen asteittain, jotta saataisiin rajoitettua hiilidioksidipäästöjä EU-alueen osalta. 1.1.2015 alkaen sähkömoottorien 7.5- 375 kW täytyi täyttää hyötysuhdeluokka IE3 tai täytettävä IE2-luokan vaatimukset ja silloin varustettava taajuusmuuttajalla. 1.1.2017 edelliseen lisätään vielä sähkömoottorit 0.75-7.5kW:n moottorit (KOMISSION ASETUS (EY) N:o 640/2009).

Tulevaisuus tuo tullessaan yhä tehokkaampia moottoreita. Tulevaisuudessa kaavailaan IE5-luokkaa, joka olisi n. 20 % tehokkaampi kuin IE4-luokka. IE5-luokkaa ei ole vielä kovin paljoa kehitetty eikä sitä ole vielä markkinoilla (Doppelbauer. 2013. 11).

4 Laboriotyön valmistelu

Tässä luvussa esitellään Jyväskylän ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriolle valmisteltua laboriotyötä ja siihen liittyvää laitteistoa, sen kasaamista, valmistelua sekä tehtyjä mittauksia ja tulosten avaamista.

4.1 Laboriotyön oppimistavoitteet ja sisältö

Laboriotyön tavoitteena on, että opiskelija oppii ymmärtämään synkronireluktanssikoneen toimintaa ja sen eroja oikosulkukoneeseen nähden sekä analysoimaan ja raportoimaan mittaustuloksia. Opiskelijalla tulisi olla melko kattava käsitys oikosulkumoottorin toiminnasta jo ennen työn suorittamista.

Opiskelijat tekevät ennen varsinaista laboriotyötä laboriotyöhön liittyvät ennakkotehtävät. Itse työtä suoritettaessa opiskelijat tekevät yhdessä vaadittavan mittauskytken ja suorittavat mittaukset sekä kirjaavat ylös saamansa mittaustulokset. Saamiensa tulosten ja pohdintatehtävien avulla opiskelijat tekevät raportin, jossa he arvioivat ja pohtivat tuloksia teorian pohjalta.

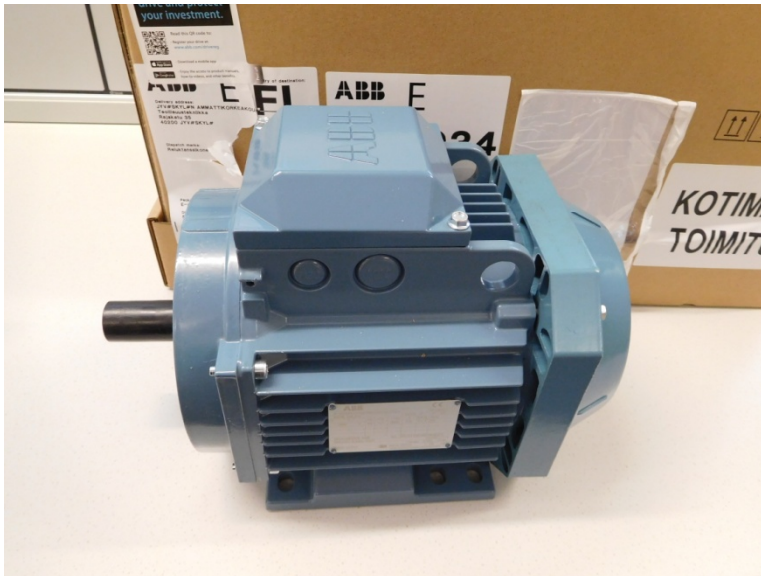
4.2 Laitteisto

Laboriotyössä käytettävä laitteisto on seuraava:

- ACS880-1 Taajuusmuuttaja ja ohjauspaneeli, jolla ohjataan SRM:a (ks. kuvio 26)
- ABB:n 3-vaiheinen 1,1 kW SRM (ks. kuvio 27)
- 1,1 kW Oikosulkumoottori (kuormamoottori)



Kuvio 26. ACS880-1 Taajuusmuuttaja + ohjauspaneeli



Kuvio 27. ABB:n 1,1 kW synkronireluktanssimoottori

4.3 Laitteiston kasaus ja käyttöönotto

Laitteiston kaasamiseen tarvittiin teline taajuusmuuttajan asentamiseksi pystyasentoon, jotta saatiin varmistettua taajuusmuuttajalle riittävä jäähdytys. Kuviossa 27 esitellään telinettä. Teline rakennettiin JAMKin protopajassa. Telineen mittapiirros on liitteessä 1.



Kuvio 28. Taajuusmuuttajan teline

Moottorit kiinnitettiin pyörillä olevan kärryn päälle niin, että oikosulkumoottori toimii kuormana SRM:lle. Oikosulkumoottorin tuottama jarrutusenergia syötetään takaisin sähköverkkoon oikosulkumoottoriin kytketyn taajuusmuuttajan avulla. Moottoreiden akselien päälle kiinnitettiin pleksilevystä tehty kosketussuoja, ettei pyöriviin osiin voi vahingossa koskettaa. Kuviossa 29 on kuva moottoreista.



Kuvio 29. Moottoreille tehty ratkaisu

Taajuusmuuttajan pohjaan kiinnitettiin kotelo, johon asennettiin turvaliittimet turvallisen kytkennän, liikuttelun ja säilytyksen helpottamiseksi. Kotelo näkyy kuviossa 28 oikealla. Kaapeleiden päihin tehtiin kuvion 30 mukaiset kotelot kytkentöjen helpottamiseksi.



Kuvio 30. Työtä varten valmistettu kaapeli

Käyttöön otossa taajuusmuuttajaan syötettiin tiettyjä säädössä tarvittavia raja-arvoja ja moottorin kilpitiedot. Tämän jälkeen moottorille tehtiin ID-ajo, jossa taajuusmuuttaja määrittä moottorin laskennallisessa mallissa tarvittavat parametrit.

4.4 Laboratoriotyön suunnittelu

Laboratoriotyön suunnittelu aloitettiin mittauksia ja haluttuja oppimistuloksia silmällä pitäen jo ennen laitteiston kasaamista. Laboratoriotyöhön valittiin mittaukset sillä periaatteella, että niistä piti saada eri moottorityypeille vertailukelpoiset tulokset, joita piti voida yhdistää teoriaan.

Suoritettaviksi mittauksiksi valittiin sähköön laadullisia mittauksia, joista saadaan selville mm. moottoreiden virtojen suuruus, yliaaltosisältö ja käyrämuodot. Tehdyistä mittauksista laboratoriotyöhön valikoituivat testailun jälkeen mittaukset, joissa mitataan virran ja jännitteen käyrämuodot, tehollisarvot ja virran yliaaltosisältö (spektri) sekä harmoninen särö THD (Total Harmonic Distortion). Mittaukset tehdään taajuusmuuttajan verkon ja moottorin puolelta erikseen. Mittaukset ovat seuraavat:

- SRM:lla verkon puoli
- SRM:lla moottorin puoli
- IM:lla verkon puoli
- IM:lla moottorin puoli.

Suoritettavissa mittauksissa kuormitetaan mitattavaa moottoria $70\% \pm 0,5$ prosenttiyksikköä nimellisestä momentista taajuusmuuttajan näyttöpaneelin mukaan. Kuormitus säädetään Drivestudio- ohjelmalla ohjattaessa kuormamoottoria. Moottoria vaihdettaessa täytyy moottoreille tehdä ID-ajo. ID-ajo on moottorin tunnistusajo, jossa taajuusmuuttaja tekee laskennallisen moottorimallin ja säätää parametrejä sen mukaan.

Taulukossa 4 on esitetty esimerkkimittausten tulokset verkon puolelta IM:lle ja taulukossa 5 SRM:lle

Taulukko 4. Verkon puoli, tehollisarvot IM.

Phase values							
Symbol	Name	L1	L2	L3	LN	Total	Unit
U	Voltage	230,64	228,40	229,27	24,769	---	V
I	Current	1,8699	1,7081	1,7015	0,0011	---	A
f	Frequency	49,998	---	---	---	---	Hz
THD U	Voltage THD	4,4658	4,1462	3,9803	3 180,5	---	%
THD U	Voltage THD	10,289	9,4617	9,1181	24,753	---	V
THD I	Current THD	70,688	75,959	78,045	195,90	---	%
THD I	Current THD	1,0788	1,0329	1,0465	0,0008	---	A
P	Active Power	343,39	299,20	300,11	---	942,69	W
Q	Reactive Power	-260,9	-250,4	-249,2	---	-760,5	VAr
S	Apparent Power	431,27	390,12	390,08	---	1 211,2	VA
Usym-	Negative Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	100,00	%
Usymo	Zero Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	45,415	%
Isym-	Negative Sequence Current Ratio	---	---	---	---	100,00	%
Isymo	Zero Sequence Current Ratio	---	---	---	---	5,6777	%
PF	Power Factor	0,80 cap	0,77 cap	0,77 cap	---	0,78 cap	
DPF	Displacement Factor	1,00 cap	0,99 cap	1,00 cap	---	---	

Taulukko 5. Verkon puoli, tehollisarvot SRM.

Phase values							
Symbol	Name	L1	L2	L3	LN	Total	Unit
U	Voltage	231,73	230,41	231,08	24,379	---	V
I	Current	1,7782	1,6891	1,6570	0,0012	---	A
f	Frequency	49,950	---	---	---	---	Hz
THD U	Voltage THD	4,1138	3,7269	3,6745	4 413,2	---	%
THD U	Voltage THD	9,525	8,5812	8,4852	24,369	---	V
THD I	Current THD	75,124	77,719	80,418	159,98	---	%
THD I	Current THD	1,0678	1,0363	1,0382	0,0008	---	A
P	Active Power	321,42	297,88	291,73	---	911,03	W
Q	Reactive Power	-257,9	-250,5	-248,0	---	-756,3	VAr
S	Apparent Power	412,06	389,19	382,90	---	1 184,1	VA
Usym-	Negative Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	100,00	%
Usymo	Zero Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	97,962	%
Isym-	Negative Sequence Current Ratio	---	---	---	---	100,00	%
Isymo	Zero Sequence Current Ratio	---	---	---	---	1,2133	%
PF	Power Factor	0,78 cap	0,77 cap	0,76 cap	---	0,77 cap	
DPF	Displacement Factor	1,00 cap	0,99 cap	1,00 cap	---	---	

Näistä tehollisarvoista (taulukot 4 ja 5) voidaan nostaa esiin virrat, pätöteho, loisteho, näennäisteho ja tehokerroin. Virran tehollisarvo oikosulkumoottorilla on hieman suurempi kuin SRM:lla. Pätöteho on SRM:lla 911 W ja oikosulkumoottorilla 942 W, mikä tukee teoriaa siltä osin. Myös loisteho, näennäisteho ja tehokerroin ovat SRM:lla pienempiä.

Taulukoista 6 ja 7 voidaan vertailla tehollisarvoja moottorin puolelta. Moottorin puolelta mitattuna oikosulkumoottorin ottama virta ja loisteho ovat suurempia, pätöteho ja tehokerroin taas ovat pienempiä SRM:lla. Suurempi virta ja loisteho moottorin puolella selittyy sillä, että roottoreiden rakenteet ovat niin erilaiset.

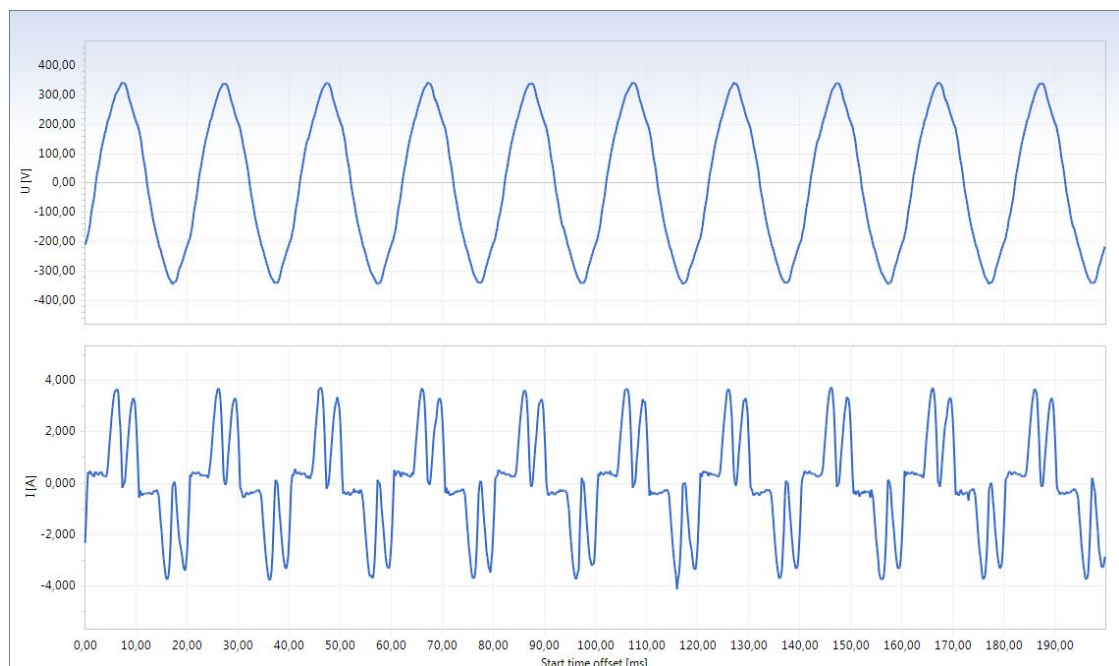
Taulukko 6. Moottorin puoli, tehollisarvot IM.

Phase values							
Symbol	Name	L1	L2	L3	LN	Total	Unit
I	Current	1,9934	1,9742	1,9801	---	---	A
THD I	Current THD	4,7021	5,2123	4,9170	---	---	%
THD I	Current THD	0,0934	0,1024	0,0970	---	---	A
P	Active Power	---	---	---	---	974,31	W
Q	Reactive Power	---	---	---	---	906,44	VAr
S	Apparent Power	---	---	---	---	1 330,8	VA
U _{sym-}	Negative Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	1,0435	%
U _{symo}	Zero Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	0,0134	%
I _{sym-}	Negative Sequence Current Ratio	---	---	---	---	0,4684	%
I _{symo}	Zero Sequence Current Ratio	---	---	---	---	0,9383	%
PF	Power Factor	---	---	---	---	0,73	ind

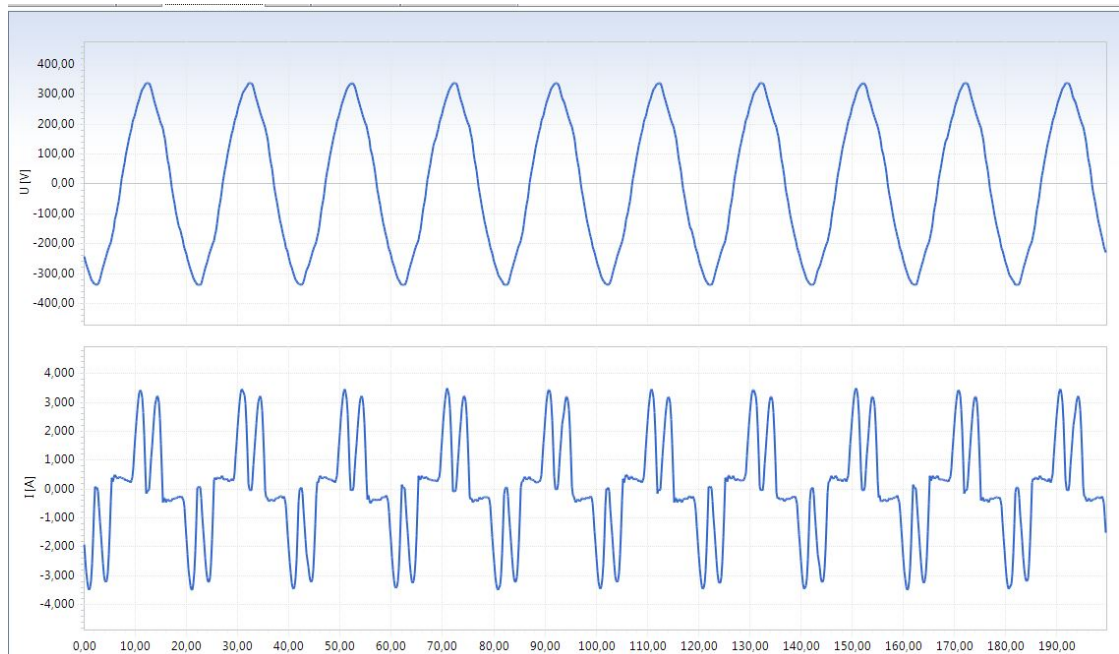
Taulukko 7. Moottorin puoli, tehollisarvot SRM.

Phase values							
Symbol	Name	L1	L2	L3	LN	Total	Unit
I	Current	2,1371	2,1479	2,1387	---	---	A
THDI	Current THD	3,5781	5,3575	3,3349	---	---	%
THDI	Current THD	0,0763	0,1146	0,0712	---	---	A
P	Active Power	---	---	---	---	945,63	W
Q	Reactive Power	---	---	---	---	930,24	VAR
S	Apparent Power	---	---	---	---	1 326,5	VA
Usym-	Negative Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	1,2270	%
Usymo	Zero Sequence Voltage Ratio	---	---	---	---	0,0132	%
Isym-	Negative Sequence Current Ratio	---	---	---	---	0,4835	%
Isymo	Zero Sequence Current Ratio	---	---	---	---	0,3793	%
PF	Power Factor	---	---	---	---	0,71	ind

Tutkittaessa Verkon puolen käyrämuotoja (Kuviot 31 ja 32) jännitteessä ei ole havaittavissa selkeitä eroja. Virran käyrämuodoissakaan ei ole selkeitä eroavaisuuksia. Virran käyrämuodosta nähdään, että taajuusmuuttajassa on 6-pulssidioditasasuuntaaja, koska virtapiikit ovat niin korkeat. (ABB tekn. opas nro 6. 20–21)

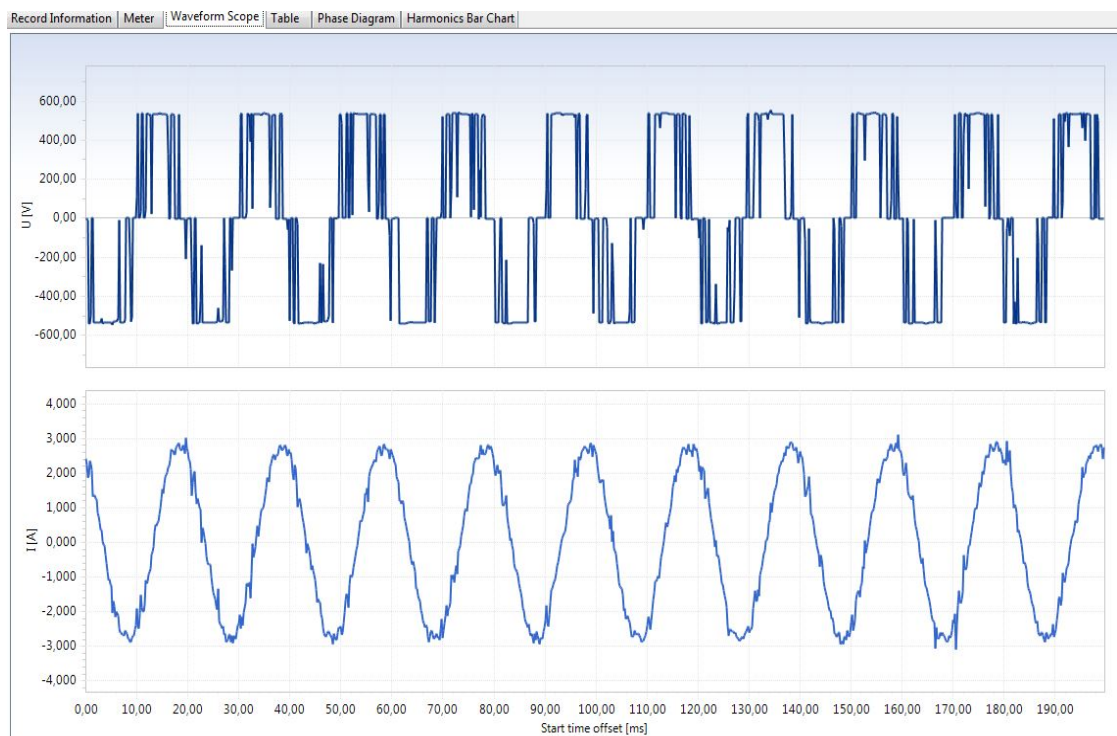


Kuvio 31. Jännitteen ja virran käyrämuodot, verkon puoli IM.

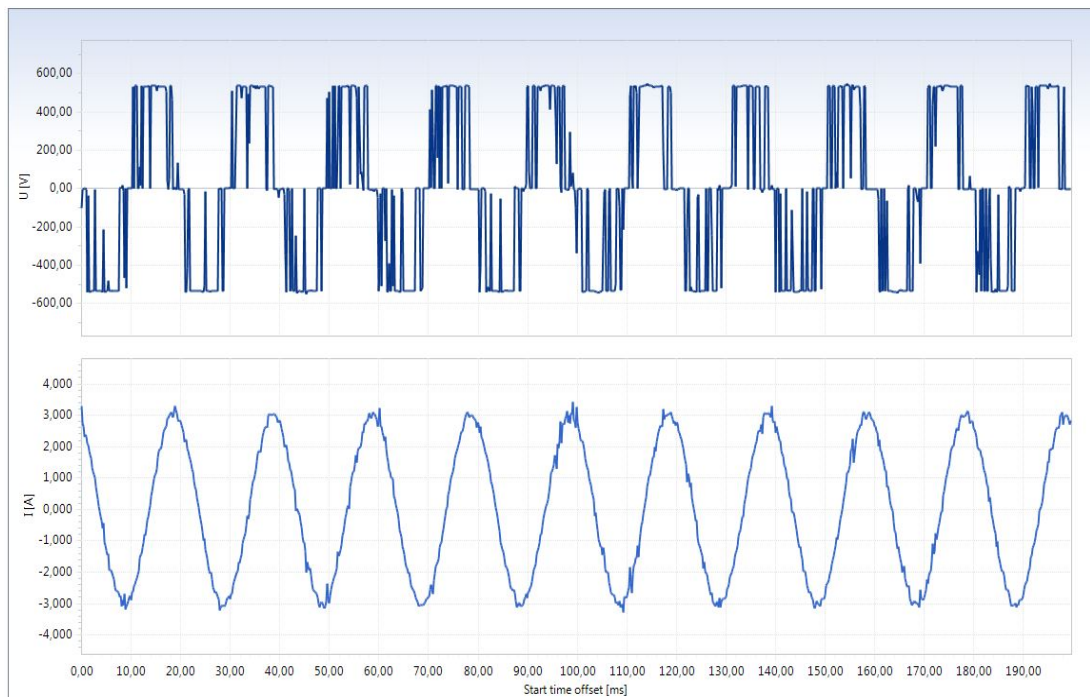


Kuvio 32. Jännitteen ja virran käyrämuodot, verkon puoli SRM.

(Kuvioit 33 ja 34) Moottorin puolen käyrämuotoja vertailtaessa nähdään, että jännitteen käyrämuoto on kanttiaaltoa, joka on oikosulkumoottorilla hieman SRM:n käyrämuotoa siistimpää. Virran käyrämuoto on melko siistiä sinikäyrää.

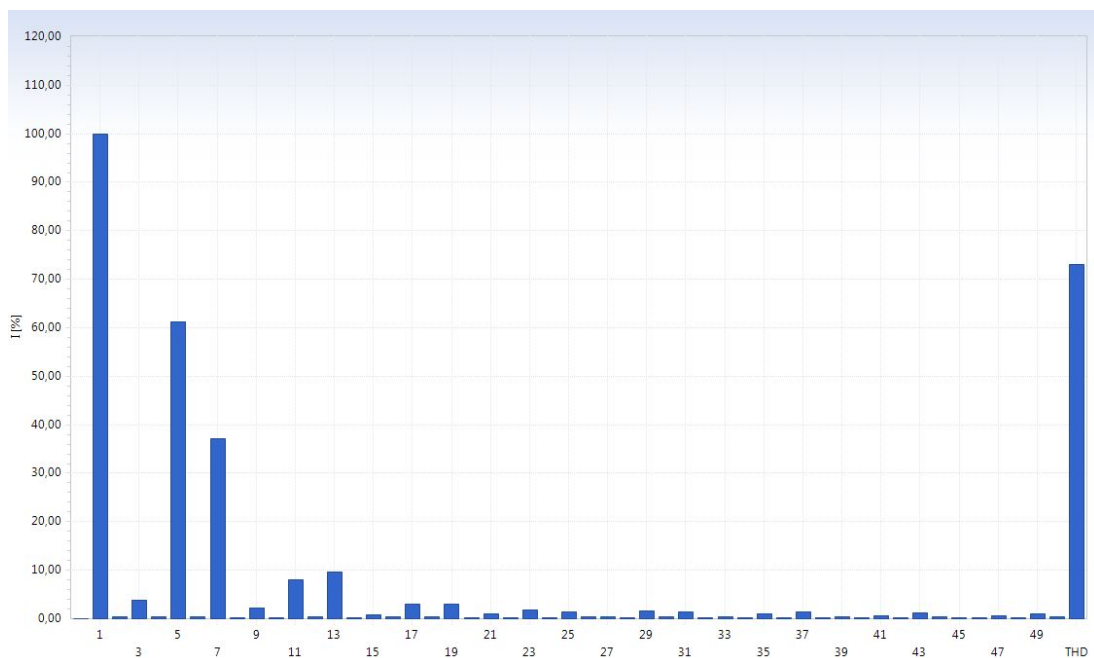


Kuvio 33. Jännitteen ja virran käyrämuodot, moottorin puoli IM.

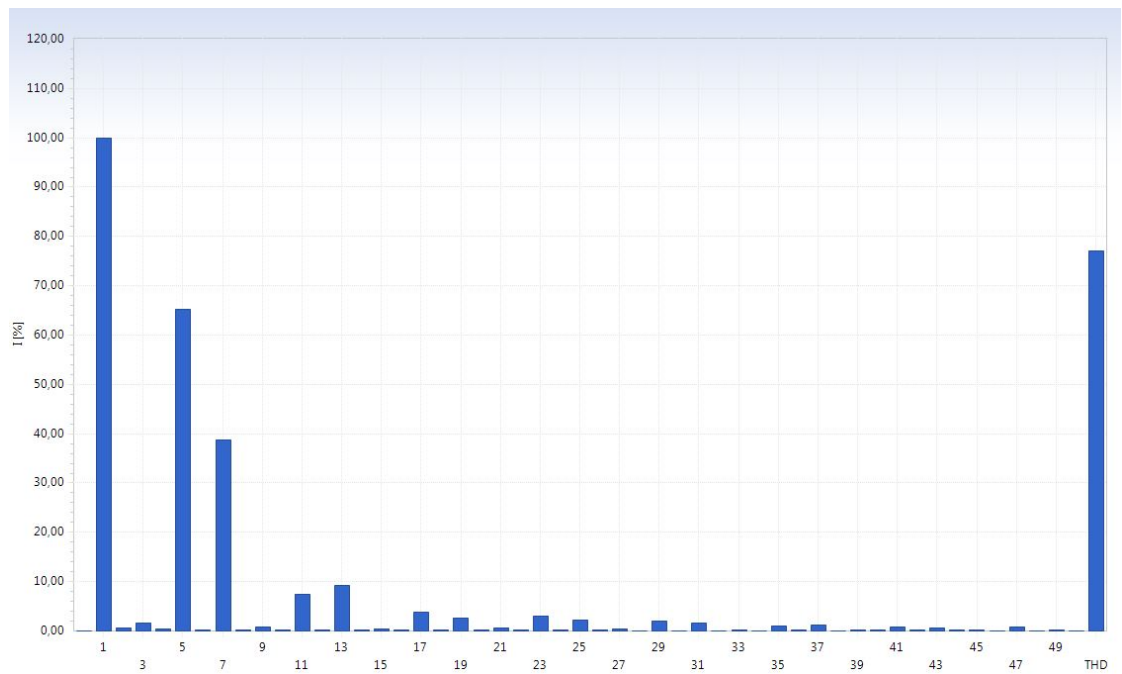


Kuvio 34. Jännitteen ja virran käyrämuodot, moottorin puoli SRM.

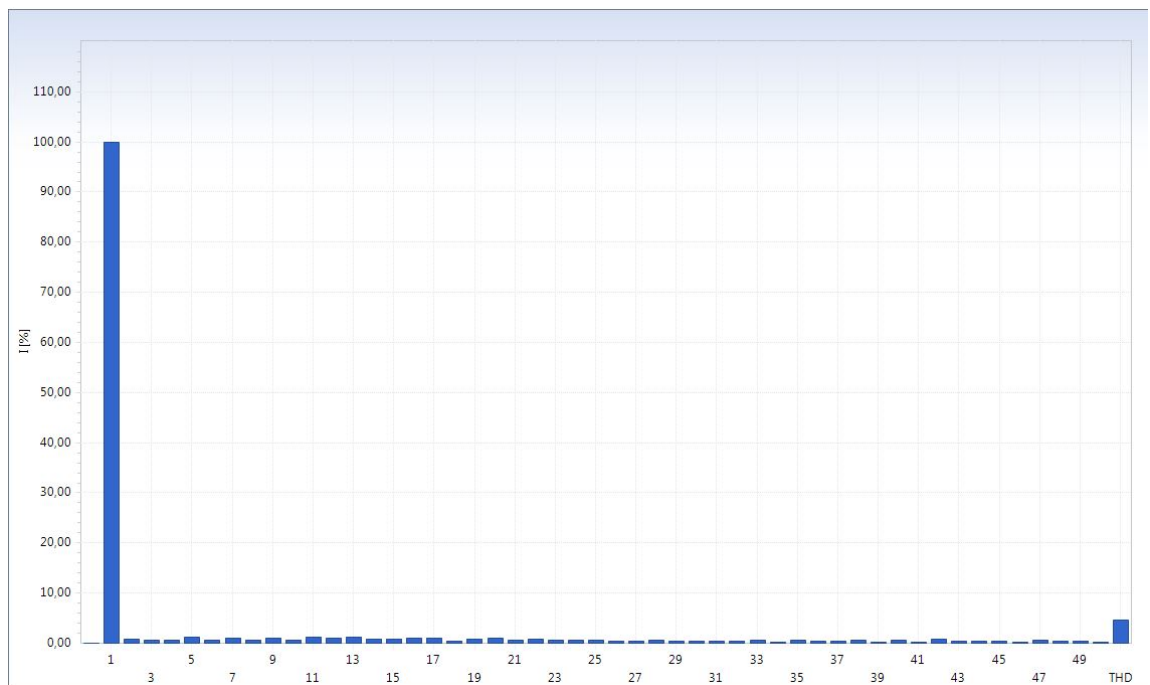
(THD) Spektriä ja harmonisia säröjä moottorin ja verkon puolella vertailtaessa nähdään, että moottorin puolella yliaaltoja on vähän, mikä tarkoittaa sitä että myös THD on pieni. Verkon puolella nähdään jo virran käyrämuodosta (ks. kuviot 35–38), että siinä vaikuttaa muitakin perusaallon monikertoja kuin perusaalto. Kuvioista 35–36 nähdään, että suurimpia yliaaltoja ovat 5, 7, 11 ja 13 eli 250, 350, 550 ja 650 Hz:n taajuudella olevat yliaallot.



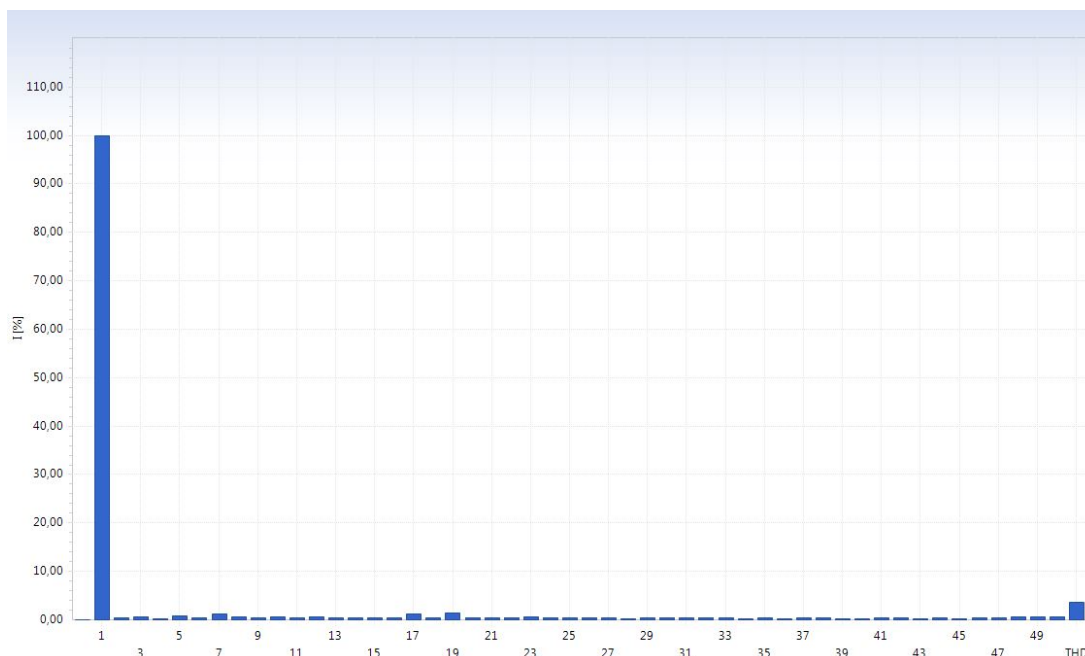
Kuvio 35. Virran THD, verkonpuoli IM.



Kuvio 36. Virran THD, verkon puoli SRM.



Kuvio 37. Virran THD, moottorin puoli IM.



Kuvio 38. Virran THD, moottorin puoli SRM.

5 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Työn tavoitteena oli saada kattava käsitys synkronireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin rakenteesta sekä niiden toiminnallisista eroavaisuuksista. Mielestäni pääsin hyvin tähän tavoitteeseen ja ymmärrän nyt, miten synkronireluktanssimoottori toimii ja millainen sen rakenne on. Suorittamieni mittausten tulokset tukevat teoriaa, esimerkiksi synkronireluktanssimoottorin paremman hyötysuhteen, pienemmän tehokertoimen ja suuremman nimellisvirran osalta. Työn tuotoksena tehtiin sähkölaboratorioon laboratoriotyö, jossa käydään läpi moottoreiden toimintaan ja rakenteeseen liittyviä eroavaisuuksia. Työtä tullaan jatkossa käyttämään hyväksi sähkövoimatekniikan opetuksessa. Työstä ei vielä ollut mahdollista saada palautetta, sillä se ei ole vielä ehtinyt opetuskäyttöön asti. Työhön kuuluvat mittaukset saatiin kuitenkin tehtyä ja sen ansiosta tiedetään, miten laboratoriotyön tekeminen sujuu ja kuinka kauan siihen kuluu aikaa. Laboratoriotyö tulee lisäämään tietoisuutta synkronireluktanssimoottorista. Kun opiskelijat valmistuttuaan siirtyvät työelämään, esimerkiksi hankinnasta vastaavaan toimenkuvaan, he voivat silloin valita synkronireluktanssimoottorin johonkin sovellukseen oikosulkumoottorin sijasta.

Työn ja tutkimusten perusteella synkronireluktanssimoottori on monin tavoin parempi kuin oikosulkumoottori. Paremmaksi sen tekee korkeampi hyötysuhde, joka säästää energiaa ja sitä kautta luontoa. Lisäksi sen rakenne on yksinkertainen ja pieni käyntilämpötila säästää laakereita. Näin ollen elinkaarikustannukset tulisivat tällä moottorilla olemaan oikosulkumoottoria pienemmät. Huonoina puolina voidaan mainita pieni ilmavälivaatimus ja 15–20 % suurempi hankintahinta. Moottori ei ole vielä saanut suurta huomiota teollisuudessa investoinneista päättävillä tahoilla eikä sen vuoksi ole vielä kovin paljoa yleistynyt.

Laboratoriotyön valmistelu ja tehtävät mittaukset eivät sujuneet aivan ongelmitta. Oikosulkumoottorin mittaukset jouduttiin tekemään moottorilla, jota käytetään toisessa laboratoriotyössä. Sen vuoksi sen kytkentäkoteloon jouduttiin tekemään uusi kytkentä. Kehitysehdotukseni kohdistuu tähän seikkaan. Olisi parempi jos oikosulkumoottorin mittauksen voisi suorittaa yhtä helposti kuin synkronireluktanssimoottorin, eli tarvittaisiin mittausta varten 400 V:n tähtikytkentäinen oikosulkumoottori. Lisäksi Drivestudio- ohjelmassa oli jotain yhteyongelmia, joiden selvittäminen sujuvoittaisi paljon laboratoriotyön tekemistä. Muutoin olen tyytyväinen tekemääni työhön. Ennen työn aloitusta olin joskus vain kuullut reluktanssikoneesta ja siihen nähden olen oppinut työn tekemisen ohessa paljon koneesta. Lisäksi oikosulkumoottorin toimintaa oli hyvä kerrata ja syventyä joidenkin asioiden kohdalla hieman enemmän.

Lähteet

Boyev, A. 2009. Determination of switched reluctance motor characteristics on the basis of magnetic field analysis. Master's work. Viitattu 29.2.2016

<http://masters.donntu.org/2009/eltf/boyev/diss/indexe.htm>

Doppelbauer, M. 2013. IEC Motor Efficiency Classes from IE1 to IE5. Esitysmateriaali.

Viitattu 22.2.2016

http://www.motorsummit.ch/data/files/MS_2012/presentation/ms12_doppelbauer_update.pdf

Fengxiang, W. Fengge, Z. ja Longya, X. 2002. Parameter and Performance Comparison of Doubly Fed Brushless Machine With Cage and Reluctance Rotors. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 38, NO. 5. Viitattu 2.3.2016.

<https://chppe.osu.edu/sites/chppe.osu.edu/files/uploads/Publications2/Parameter%20and%20Performance%20Comparison%20of%20Doubly-Fed%20Brushless%20Machine%20with%20Cage%20and%20Reluctance%20Rotors.pdf>

Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. 1.p. Vantaa. Hansaprint oy

Honkanen, H. N.d. Sähkömoottorit. Oppimateriaali. Kajaanin ammattikorkeakoulu.

Viitattu 1.2.2016.

http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/SVTEK_S%C3%A4hk%C3%B6moottorit_1.pdf

Honkanen, H. N.d. Taajuusmuuttajat. Oppimateriaali. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Viitattu 2.5.2016

http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/SVTEK_Taajuusmuuttajat.pdf

Högfors, R. 2014. Tahtireluktanssikoneiden lämpöajojen tehokas mittaaminen. Opin- näytetyö. Tekniikka ja liikenne. Vaasan ammattikorkeakoulu. Viitattu 11.4.2016

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/78677/Hogfors_Roy.pdf.pdf?sequence=1

Kolehmainen, J. 2011. Muotosuljetut roottorin navat tahtikestomagneettikoneissa ja tahtireluktanssikoneissa. Väitöskirja. Aalto yliopisto. Viitattu 22.2.2016.

<http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526041957/isbn9789526041957.pdf>

Korpinen, L. N.d. 10 Sähkökoneet osa 1. Viitattu 1.2.2016.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Kortelainen, A. 2009. Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Power & Automation ABB. oy:n asiakaslehti. Viitattu 1.2.2016

http://abb.smartpage.fi/fi/power309/pdf/ABB_309.pdf

Lipo, T. A. 1991. Synchronous reluctance machines, a viable alternative for ac-drives. Electric machines and power systems. University of Wisconsin- Madison. Viitattu 11.4.2016

http://lipo.ece.wisc.edu/1991pubs/1991_emps.pdf

Moghaddam, R.R. 2007. Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. Department of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power electronics. Master thesis. Stockholm royal institute of technology. Viitattu. 12.3.2016.

[https://www.researchgate.net/profile/Reza_Moghaddam4/publication/267794105_Synchro-nous_Reluctance_Machine_\(SynRM\)_Design/links/55f6a9e008ae07629dbae7e3.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Reza_Moghaddam4/publication/267794105_Synchro-nous_Reluctance_Machine_(SynRM)_Design/links/55f6a9e008ae07629dbae7e3.pdf)

Morehead, J. 2012. Nissan LEAF EV and What is a Permanent Magnet AC Motor. Motion control and electric motor blog. Viitattu 1.2.2016.

<http://www.johnwmorehead.com/nissan-leaf-ev-and-what-is-a-permanent-magnet-ac-motor/>

Mostafa, A. Fellani, Daw .E. Abaid. 2010. Matlab/Simulink-Based Transient Stability Analysis Of A Sensorless Synchronous Reluctance Motor. International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:4, No:8.

Viitattu 29.2.2016 <http://waset.org/publications/15398/matlab-simulink-based-transient-stability-analysis-of-a-sensorless-synchronous-reluctance-motor>

Sundgren, N.d. 9 Muuntajat ja sähkölaitteet. Opetusmateriaali. Viitattu 12.2.2016

<http://users.metropolia.fi/~k0200665/koulu/sundgren.pdf>

Tikka, P. 2016. Sähköpostiviesti 16.5.2016. ABB. Viitattu 16.5.2016

Vuorivirta, A. 2014. Uudet sähkömoottoritekniikat energiasäästöjen tuojana. Esitysmateriaali. Sairaalatekniikan päivät 2014. Viitattu 12.2.2016

http://ssty.fi/download/hki2014/014_Antti_Vuorivirta_ABB.ppt.pdf

Ac gearmotors and motors. 2009. Updated chapter 2, from the bodine handbook. Bodine electric company. Viitattu 15.2.2016.

<http://www.bodine->

[elec-](http://www.bodine-)

[tric.com/Motorgram/Asp/ViewArticle.asp?Context=/motorgram/200909/handbook.](http://www.bodine-)

[htm&Section=Engineer%27s%20Notebook](http://www.bodine-)

AC MOTORS. N.d. Lesson in Electric Circuits -- Volume II. Chapter 13. Viitattu 25.5.2016

https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/AC/AC_13.html#xtocid1088620

Construction of Three Phase Induction Motor. N.d. electrical4u. Electrical engineering study site. Viitattu.15.2.2016.

<http://www.electrical4u.com/construction-of-three-phase-induction-motor/>

DriveSize. 2016. ABB. Online mitoitustyökalu. Viitattu. 26.5.2016

<http://ds.nodus.info/starter.aspx>

Häkkikämmity roottori. 2015. Wikipedia. Viitattu 8.2.2016

https://fi.wikipedia.org/wiki/H%C3%A4kkik%C3%A4%C3%A4mitty_roottori

KOMISSION ASETUS (EY) N:o 640/2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöön panemisesta sähkömoottoreiden ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta. Euroopan unionin virallinen lehti. Viitattu 1.2.2016.

<http://eur-lex.europa.eu/legal->

[content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0640&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-)

Low voltage General performance motors. 2015. ABB. Katalogi. Viitattu 7.3.2016

<https://library.e.abb.com/public/fc87c03b2a7749999a0ae2cb16cc5d3a/General%20catalog%20012016.pdf>

Low voltage High output synchronous reluctance motors. 2014. ABB. Katalogi. Viitattu 7.3.2016.

https://library.e.abb.com/public/604de3fc8bc9b16fc1257d95003c79b9/Catalog_Low%20voltage%20High%20output_SynRM_11-2014_LOW.pdf

Low voltage High output synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications. 2012. ABB. Catalog. Viitattu 8.2.2016

https://library.e.abb.com/public/21ee11b9fddfa677c1257bd500219300/Catalog_IE4_SynRM_EN_06-2013_9AKK105828_lowres.pdf

Low voltage IE4 synchronous reluctance motors. 2016. ABB. Catlog. Viitattu 26.5.2016

https://library.e.abb.com/public/66d382e96e064af9ae66b3ec2d85e841/IE4_SynRM_04-2016_LOW.pdf

Pohjois-Karjalan sähkö. 2015. Sähköverkkopalvelun hinnasto. Viitattu 4.5.2016
<http://www.pks.fi/pkss-hinnastot>

Process performance motors. 2008. ABB. Catalog. Viitattu 25.5.2016

http://www.myren.com/files/6314/0471/3355/skiss_standardutrustning.pdf

Taajuusmuuttaja. 2016. Artikkel. Viitattu 25.5.2016

<https://fi.wikipedia.org/wiki/Taajuusmuuttaja>

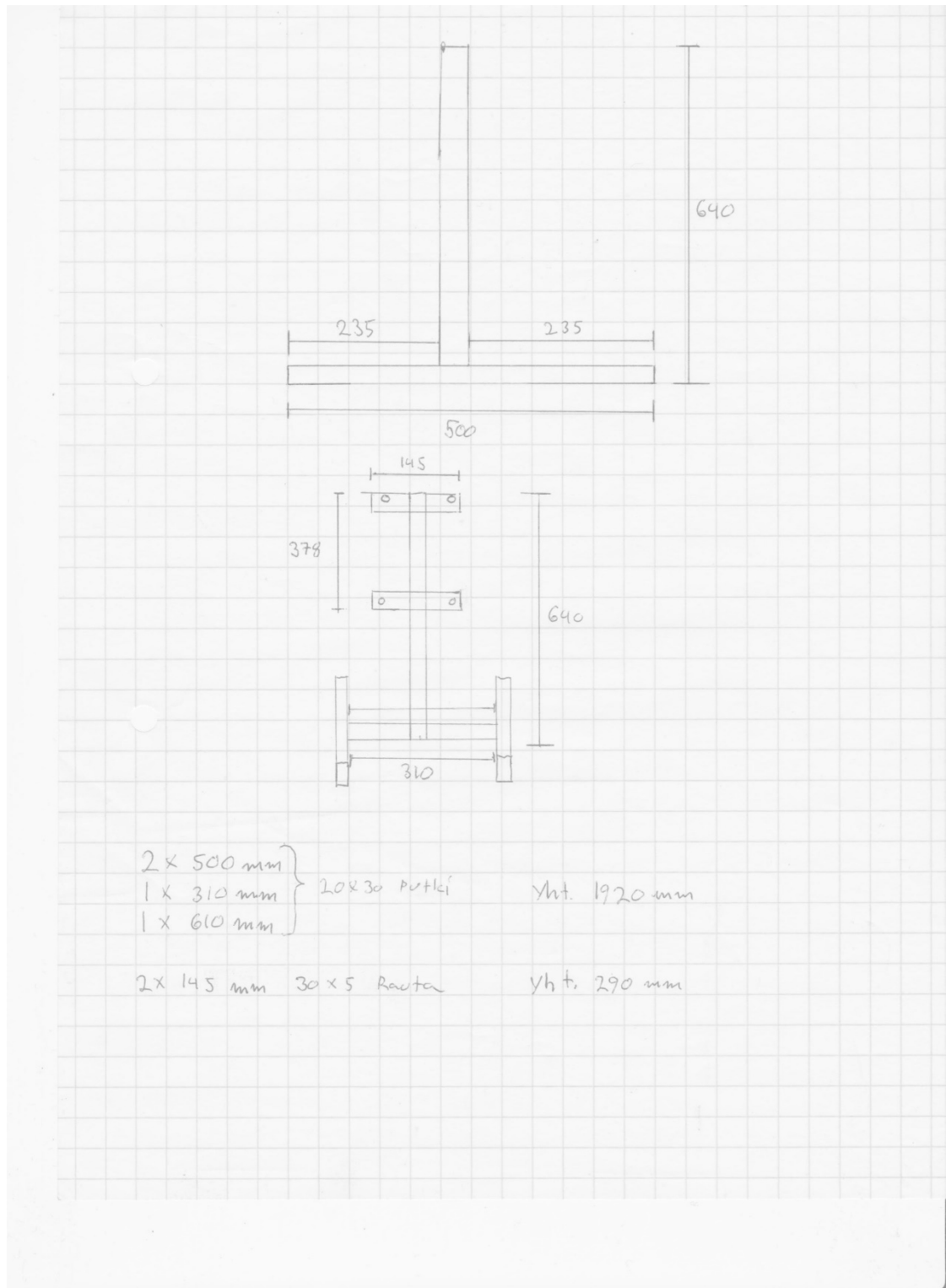
Taajuusmuuttajat koulutus. 2015. ABB. ABB:n tuottama koulutusmateriaali Säädetyt sähkömoottorikäytöt kurssille.

Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. N.d. Tekninen opas nro 6. ABB . Viitattu 8.5.2016

https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf

Liitteet

Liite 1. Taajuusmuuttajalinen mitat



Liite 2. Laboratoriotyö, esitehtävät

Synkronireluktanssi- ja oikosulkumoottorin vertailu

Laboratoriotyön esitehtävät. Esitehtävät tulee palauttaa Optimaan viimeistään mitausta edeltävänä päivänä ja lisäksi ne tulee olla tulostettuna mukana mittaamaan tullessa. Kirjoita esitehtävävastaukset koneella puhtaaksi (JAMK:n raporttipohjalle).

Ryhmältä riittää yksi raportti.

Työssä tutustutaan synkronireluktanssi- ja oikosulkumoottorin rakenteeseen ja toimintaan sekä niiden ohjaamiseen.

Tehtävä 1.

Millä tavalla synkronireluktanssikoneen roottori eroaa oikosulkumoottorin roottorista.

Tehtävä 2.

Selitä miksi synkronireluktanssimoottori tarvitsee suuremman virran saman momentin tuottamiseen kuin oikosulkumoottori.

Tehtävä 3.

Selvitä miksi synkronireluktanssimoottorin ilmavälin on oltava pieni.

Tehtävä 4.

Selvitä synkronireluktanssimoottorin toimintaperiaate ja vertaile sitä oikosulkumoottorin toimintaan

Tehtävä 5.

Selvitä miten seuraavat ohjaus/säätötavat toimivat

- Skalaariohjaus
- Vektoriohjaus
- Suora momenttisäätö

Liite 3. Laboratoriotyö, mittausohje

Synkronireluktanssi- ja oikosulkumoottorin vertailu

Tässä työssä perehdytään synkronireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin sekä hieman myös taajuusmuuttajan ominaisuuksiin. Mittauksissa hyödynnetään moottoripenkkejä, joissa on akselit yhteen kytkettynä. Moottorit ovat 1.1 kW:n 1500 rpm:n synkronireluktanssimoottori-oikosulkumoottori yhdistelmä ja 1.1 kW:n 1500 rpm:n oikosulkumoottori 1.5 kW:n 1500 rpm:n oikosulkumoottori yhdistelmä. ABB:n taajuusmuuttajalla ohjataan moottoria ja toisella taajuusmuuttajalla ohjataan kuormamoottoria Drivestudio ohjelman avulla. Drivestudio ohjelmalla voidaan säätää kuormamoottorin momenttia ja siten kuormittaa (= jarruttaa) portaattomasti kuormitettavaa moottoria. Jarrutuksessa syntyvä teho palautetaan sähköverkkoon kuormamoottorin taajuusmuuttajan kautta. Mittauksissa käytetään Metrel-sähkönlaatumittaria

Käyttöönotto:

1. Tee mittauskytkentä ja hyväksytä se opettajalla ennen käyttöönoton aloitusta.
2. Tutustu ohjauspaneelin käyttöön.
3. Syötä moottorin tiedot käsin tai varmista niiden olevan oikein. Parametrit 99. Ohjaustapana käytetään DTC:tä.
4. Tee moottorille ID-ajo
5. Aseta nopeusohjeeksi 1500 rpm.

Mittaukset:

1. Säädä Drivestudio-ohjelmalla kuormamoottorin momenttia siten että taajuusmuuttajan oloarvonäytössä momentin arvo on n. 70 % ($\pm 0.5\%$)
2. Mittaa sähkönlaatumittarilla ABB:n taajuusmuuttajan verkon puolelta tehollisarvot (Meter-välilehti), virran ja jännitteen käyrämuodot (Waveform Scope-välilehti) sekä virran spektri ja THD (Harmonics Bar Chart-välilehti). Ota näyttöleike (*Print Screen*) tai kuvakaappaus (*Snipping tool*) jokaisesta näistä sivusta ja tallenna. Nimeä kuvat siten että ne erottuvat. Esim. *Verkko_1_SRM* tai *Moottori_2_IM*
3. Pysäytä moottori, katkaise virta taajuusmuuttajalta ja vaihda sähkönlaatumittarin kytkentä moottorin puolelle. Vaihda mittaustavaksi verkon puolella TN-S ja moottorin puolella TN-C ja muista irrottaa sähkönlaatumittarin ja tietokoneen välinen johto, jotta päivitys onnistuu. Suorita samat mittaukset kuin kohdassa 2.
4. Vaihda moottoripenkki ja tee kytkennät. Muuta moottorin tiedot taajuusmuuttajalle ja suorita ID-ajo.
5. Suorita uudelleen kohdat 1-3
6. Pura mittauskytkentä.

Loppuraportti

Työstä palautetaan JAMK:n raportointiohjeen mukainen loppuraportti, jossa on:

1. Mittaustulokset verkkovirran käyrämuodoista ja spektreistä sekä vaihesuureista.
2. Pohdinta:
 - Miten synkronireluktanssimoottorin virta, tehot ja tehokerroin eroavat oikosulkumoottorin vastaavista arvoista a) verkon puolella ja b) moottorin puolella ja miksi?
 - Miten virran ja jännitteen käyrämuodot sekä spektrit eroavat a) moottoreiden välillä ja b) verkon ja moottorin puolien välillä ja miksi?

Mittausryhmä palauttaa yhden raportin, jossa on kansilehti, työn nimi ja kaikkien mittaajien nimet.