



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jani Lappalainen

RELUKTANSSIMOOTTORIN JA OIKO- SULKUMOOTTORIN VERTAILU

Tekniikka
2019

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jani Lappalainen
Opinnäytetyön nimi	Reluktanssimootorin ja oikosulkumootorin vertailu
Vuosi	2019
Kieli	Suomi
Sivumäärä	58
Ohjaaja	Kari Jokinen

Tämän opinnäytetyön teettäjänä toimi Vaasan ammattikorkeakoulu ja työn aiheena on verrata kahta reluktanssimootorityyppiä oikosulkumootoriin. Ensisijaisesti keskitytään tahtireluktanssimootorin ja oikosulkumootorin vertailuun. Oikosulkumootorin parannusmahdollisuudet ovat alkaneet käymään vähiin, joten viime aikoina on alettu tutkimaan mahdollista korvaajaa ja tahtireluktanssimootorilla on teoriassa siihen hyvät mahdollisuudet. Tarkoitus on verrata moottorien rakenteita ja toimintaa keskenään kirjallisten lähteiden ja tehtyjen tutkimusten perusteella, sekä tehdä moottoritestejä taajuusmuuttajaohjauksella 2,2kW ja DOL- käytöllä 5,5kW tahtireluktanssimootorille ja oikosulkumootorille.

Laboratoriossa tehtyjen mittausten perusteella tahtireluktanssimootori on kykenevä kilpailija. Tulokset vastasivat aika hyvin teoriaosiossa käytyjä päätelmiä. Taajuusmuuttajaohjauksessa molempien moottoreiden hyötysuhteet olivat samaa luokkaa, mutta testit ovat lähinnä suuntaa antavia, joten niiden perusteella ei voi tehdä suoraan päätelmiä. Tahtireluktanssimootorilla kuuluisi olla korkeampi hyötysuhde, koska sen roottori ei aiheuta virtalämpöhäviöitä ja syy siihen on, että se ei sisällä käämejä tai kestopagneetteja. Tehokerron on huomattavasti huonompi tahtireluktanssimootorilla. DOL-käytöllä ainoa merkittävä ero oli tahtireluktanssimootorilla käynnistysmomentin suuri heilahtelu, joka vaikutti myös pyörimisnopeuden heilahteluun.

Tahtireluktanssimootorin vahvimpia puolia on korkea hyötysuhde, yksinkertaisempi rakenne ja halvemmat materiaalit oikosulkumootoriin nähden. Tahtireluktanssimootorin muutamista parannusmahdollisuuksista on muuttaa ferromagneettista laminointia roottorissa tai lisäämällä ferriittikestopagneetteja roottoriin. Kuitenkin, karkeiden testien perusteella, tahtireluktanssimootori on hyvä vaihtoehto, mutta se ei ole vielä lähiaikoina korvaamassa oikosulkumootorin asemaa käytetyimpänä sähkömoottorina. Tahtireluktanssimootori on tällä hetkellä parhaimmassa asemassa ottaamaan oikosulkumootorin asema tulevaisuudessa.

Avainsanat reluktanssimootori, tahtireluktanssimootori, molemmin puolin avonapainen reluktanssimootori

ABSTRACT

Author	Jani Lappalainen
Title	Comparison of Reluctance motor and Induction motor
Year	2019
Language	Finnish
Pages	58
Name of Supervisor	Kari Jokinen

This thesis was commissioned by Vaasan ammattikorkeakoulu, University of Applied Sciences and the topic was to compare two different types of reluctance motor to induction motor. Primarily the comparison is between a synchronous reluctance motor and an induction motor. The possibilities to improve the induction motors are getting low, so lately a possible replacement has been researched and the synchronous reluctance motor has a good potential in theory. The purpose was to compare the structures and operation of the motors by using literary sources and researches done by others. In this thesis the motor tests were done by using frequency converter control at 2,2kW and DOL starting on a 5,5kW synchronous reluctance motor and induction motor.

Based on the laboratory tests the synchronous reluctance motor is a capable rival. The results were close to the conclusions in theory. In the frequency converter control the efficiency of both motors was more or less the same, but the results in the tests are not very accurate, so any conclusions based only by them are not conclusive. The synchronous reluctance motor should have a higher efficiency, because its rotor does not cause current heat losses and the reason for it is that its rotor does not have either windings or permanent magnets. The power factor in the synchronous reluctance motor is worse, which is the biggest weakness of the motor. In the DOL starting the only significant difference was the fluctuation of the starting torque of the synchronous reluctance motor, which also had an effect on the rotation speed.

The advantage of the synchronous reluctance motor is its high efficiency, simpler structure and cheaper materials compared to the induction motor. Some improvements for synchronous reluctance motor could be to change its rotors the ferromagnetic lamination of its rotor or to attach ferrite permanent magnets in the rotor. However, based on the rough test results the synchronous reluctance motor is a good alternative, but it is not going to replace induction motor as the most used electric motor in the near future. Currently, however, it is in the best place to take the place of the induction motor in the future.

Keywords Reluctance motor, synchronous reluctance motor, switched reluctance motor

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LYHENTEET JA TERMIT

1	JOHDANTO.....	9
2	RELUKTANSSIMOOTTORI.....	10
2.1	Reluktanssimoottorin historia.....	10
2.2	Reluktanssimomentin synty.....	11
2.3	Reluktanssimoottorityypit.....	13
2.3.1	Molemmin puolin avonapainen reluktanssimoottori (SRM).....	13
2.3.2	Tahtireluktanssimoottori (SynRM).....	15
2.3.3	Kestomagneetilla avustettu tahtireluktanssimoottori.....	19
2.3.4	SynRM verrattuna SRM.....	20
3	OIKOSULKUMOOTTORIN JA TAHTITELUKTANSSIMOOTTORIN VERTAILU.....	22
4	LABORATORIOMITTAUKSET.....	26
4.1	Taajuusmuuttajan käyttö.....	27
4.1.1	Taajuusmuuttaja.....	29
4.1.2	Moottorit.....	31
4.1.3	Mittalaitteet.....	32
4.1.4	Mittaukset.....	33
4.2	DOL-käyttö.....	45
4.2.1	Moottorit.....	46
4.2.2	Mittalaitteet.....	47
4.2.3	Mittaukset.....	48
5	LOPPUYHTEENVETO.....	55
	LÄHTEET.....	57

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Tahtikoneen vääntömomentin muodostuminen. /9/	12
Kuva 2. SRM-staattorin ja roottorin rakenne.	14
Kuva 3. Tahtireluktanssimootorin erilaisia roottorimalleja. /17/	16
Kuva 4. 4-napainen roottorin rautalevy. /17/	16
Kuva 5. Vertailu roottorisegmenttien paikasta staattorien hampaisiin nähden neljässä tilanteessa. /7/	17
Kuva 6. Objekti anisotrooppisella geometrialla (a) ja isotrooppisella geometrialla (b) magneettikentässä ψ . /7/	17
Kuva 7. SynRM-roottorin laminointi /2/	19
Kuva 8. Tahtireluktanssimootorin ja oikosulkumootorin runkokoko suhteessa teholuokkaan.	24
Kuva 9. Tahtireluktanssimootorin ja oikosulkumootorin hyötysuhde suhteessa teholuokkaan.	25
Kuva 10. Moottoreiden testauksessa käytetty huimamassa.	27
Kuva 11. DTC-säädön lohkokaavio. /16/	28
Kuva 12. Kytkenäkuvaa taajuusmuuttajaohjauksessa käytetystä kytkennästä.	28
Kuva 13. Tahtireluktanssimootorin nimellisarvojen parametrisointi.....	29
Kuva 14. Tahtireluktanssimootorin rajojen parametrisointi.....	30
Kuva 15. Oikosulkumootorin nimellisarvojen parametrisointi.....	30
Kuva 16. Oikosulkumootorin rajojen parametrisointi.....	31
Kuva 17. Tahtireluktanssimootorin ja oikosulkumootorin toimintatavan parametrisointi.....	31
Kuva 18. Voltech PM6000 tehoanalyysointilaite.....	33
Kuva 19. PM6000:ssa käytetty kytkentä.	33
Kuva 20. Nopeuden ohje- ja oloarvojen erotuksen aikaintegraali suhteessa nimelliseen nopeuteen.	34
Kuva 21. Tahtireluktanssimootorin nopeuden muutos, kun nimellismomentti pudotetaan pois.....	36
Kuva 22. Oikosulkumootorin nopeuden muutos, kun nimellismomentti pudotetaan pois.....	37

Kuva 23. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=100$ rpm.	38
Kuva 24. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=750$ rpm.	39
Kuva 25. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=n_N$	40
Kuva 26. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=1,2x n_N$	41
Kuva 27. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=100$ rpm.	42
Kuva 28. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=750$ rpm.	43
Kuva 29. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=n_N$	44
Kuva 30. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=1,2x n_N$	45
Kuva 31. DOL-käytössä käytetty kytkentä.	46
Kuva 32. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin virta ja tehokerroin momenttiin nähden.	48
Kuva 33. Oskilloskooppikuva tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirrasta ilman kuormaa.	49
Kuva 34. Oskilloskooppikuva oikosulkumoottorin käynnistysvirrasta ilman kuormaa.	50
Kuva 35. Oskilloskooppikuva tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirrasta täydellä kuormalla.	50
Kuva 36. Oskilloskooppikuva oikosulkumoottorin käynnistysvirrasta täydellä kuormalla.	50
Kuva 37. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti nopeuden funktiona ilman kuormaa.	51
Kuva 38. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti nopeuden funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla.	52

Kuva 39. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti ajan funktiona ilman kuormaa.....	53
Kuva 40. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti ajan funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla	53
Kuva 41. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) nopeus ajan funktiona ilman kuormaa.	54
Kuva 42. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) nopeus ajan funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla.....	54
Taulukko 1. tahtireluktanssimoottoritaulukko, kun $n_N = 1500\text{rpm}$. /8/	22
Taulukko 2. Oikosulkumoottori taulukko, kun $n_N = 1500\text{rpm}$ /11/.....	23
Taulukko 3. 2,2kW oikosulkumoottorin ja tahtireluktanssimoottorin nimellisarvot.....	32
Taulukko 4. Esimerkki hyvästä dynaamisesta tarkkuudesta kestopagneettimoottorilla ja oikosulkumoottorilla. /10/.....	34
Taulukko 5. 5,5kW oikosulkumoottorin ja SynRM:n nimellisarvot.	47

LYHENTEET JA TERMIT

SynRM = Synchronous reluctance motor = tahtireluktanssimoottori

SRM = Switched reluctance motor = molemmin puolin avonapainen reluktanssimoottori

IM = Induction machine = oikosulkumoottori

EMF = Electromagnetic field = sähkömagneettinenkenttä

1 JOHDANTO

Nykyään eniten käytetty moottorityyppi on oikosulkumoottori ja se on ollut ylivoimaisessa asemassaan kymmeniä vuosia. Sen kehittymismahdollisuudet ovat kuitenkin alkaneet saavuttaa päätepisteensä, koska muiden moottorityyppien kehitys on ollut kovassa nousussa. Yksi mahdollisista vaihtoehdoista tällä hetkellä, joka voisi viedä oikosulkumoottorin markkinat, on reluktanssimoottori ja erityisesti tahtireluktanssimoottori. Reluktanssimoottorit ovat hintaluokaltaan hyvin samaa kuin oikosulkumoottorit tai jopa halvempia. Reluktanssimoottoreissa on kuitenkin omat puutteensa, kuten molemmin puolin avonapaisessa reluktanssimoottorissa momentin pulsaatio, kova ääni ja tahtireluktanssimoottoreissa huono tehokerroin.

/2/

Sähkömoottoreiden tärkeimmät arvot ovat suorituskyky, luotettavuus ja hinta. Oikosulkumoottori on syystä markkinoiden käytetyin moottorityyppi, koska se on halpa sähkömoottori, jolla on hyvä suorituskyky ja sillä on myös erittäin yksinkertainen rakenne ja se on luotettava. Energiatohokkuuden tärkeys ja vaatimukset kirstyvät jatkuvasti, mikä pakottaa jatkuvaan kehitykseen. Nykyään löytyy muitakin sähkömoottorityyppejä, jotka pystyvät hyvään suorituskykyyn, mutta ongelmaksi muodostuu yleensä hinta. Tahtireluktanssimoottorilla on kuitenkin mahdollisuus kyetä samaan ja jopa parempaan. /2/

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on verrata oikosulkumoottoria ja kahta reluktanssimoottorityyppiä keskenään. Molemmin puolin avonapaisen reluktanssimoottorin käyttömahdollisuudet ovat rajallisemmat, koska se on askelmoottori, joten lähtökohtaisesti keskitytään tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin vertailuun. Aluksi käydään läpi reluktanssimoottorien rakennetta ja toimintaa, jonka jälkeen voidaan siirtyä mittauksiin. Mittaukset tehdään DOL-käynnistyksellä 5,5kW tahtireluktanssimoottorille ja oikosulkumoottorille, sekä taajuusmuuttaja-ohjauksella 2,2kW tahtireluktanssimoottorille ja oikosulkumoottorille.

2 RELUKTANSSIMOOTTORI

2.1 Reluktanssimoottorin historia

Reluktanssimoottori on vanha keksintö, joka on jo ennen 1900-lukua keksitty. Magneettisesti varautuneessa roottorissa virtaava vuo liikkuu ja menee kohti tilaa, jossa on pienin mahdollinen reluktanssi. Tämä ilmiö on nimeltään elektromagnetismi. /12/

Reluktanssimoottorit ovat kauan kiinnostaneet tutkijoita sen potentiaalın takia, jonka he uskoivat olevan mahdollista saavuttaa. Noin 1950-1970 luvuilla reluktanssimoottoreiden käyttö oli nousussa erityisesti linjakäytöissä. Moottori osoitautui sen aikaiselle teknologialle liian kalliiksi investoinniksi, koska uudet markkinoille tulleet osat eivät parantaneet sen suorituskykyä riittävästi. Reluktanssimoottorien hyötysuhteiden heikkous ja ongelmat olivat oikosulkumoottoriin nähden sen verran suuria, että tämän moottorityypin tutkiminen lopetettiin pitkäksi aikaa. 1980-luvun loppupuolella ne tulivat uudelleen suosioon tutkijoiden keskuudessa tekniikan kehityksen myötä. /2/

Viime vuosikymmeninä reluktanssimoottorien suorituskyky on ollut nousussa sen jälkeen, kun taajuusmuuttajan vektorisäätö ja IGBT-teknologia on kehittynyt. Nykyään reluktanssimoottoreita käytetään pääosin jännitevälipiirellisellä taajuusmuuttajalla ohjattuna. Nykyään on myös suoraan verkkoon liitettäviä tahtireluktanssimoottoreita. /2/

2.2 Reluktanssimomentin synty

Ennen kuin käsitellään reluktanssimomentin syntyä, on hyvä käsitellä tavallisen avonapaisen tahtikoneen momentin syntyä, koska se on perusta reluktanssimomentin syntymiselle. Tahtikoneen teho ja momentti ovat aina suoraan verrannolliset. Kuvassa 1 on piirrettynä tahtikoneen vääntömomentin muodostuminen. /9/

Vaihetehon kaava:

$$P_v = \frac{U_v E_{mv}}{X_d} \sin(\delta) + \frac{U_v^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (1)$$

Tahtikoneen momentin kaava:

$$M = \frac{3 \cdot U_v E_{mv}}{\omega_s \cdot X_d} \sin(\delta) + \frac{3 \cdot U_v^2}{\omega_s \cdot 2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (2)$$

E_{mv} indusoitunut vaihejännite staattorikäänissä

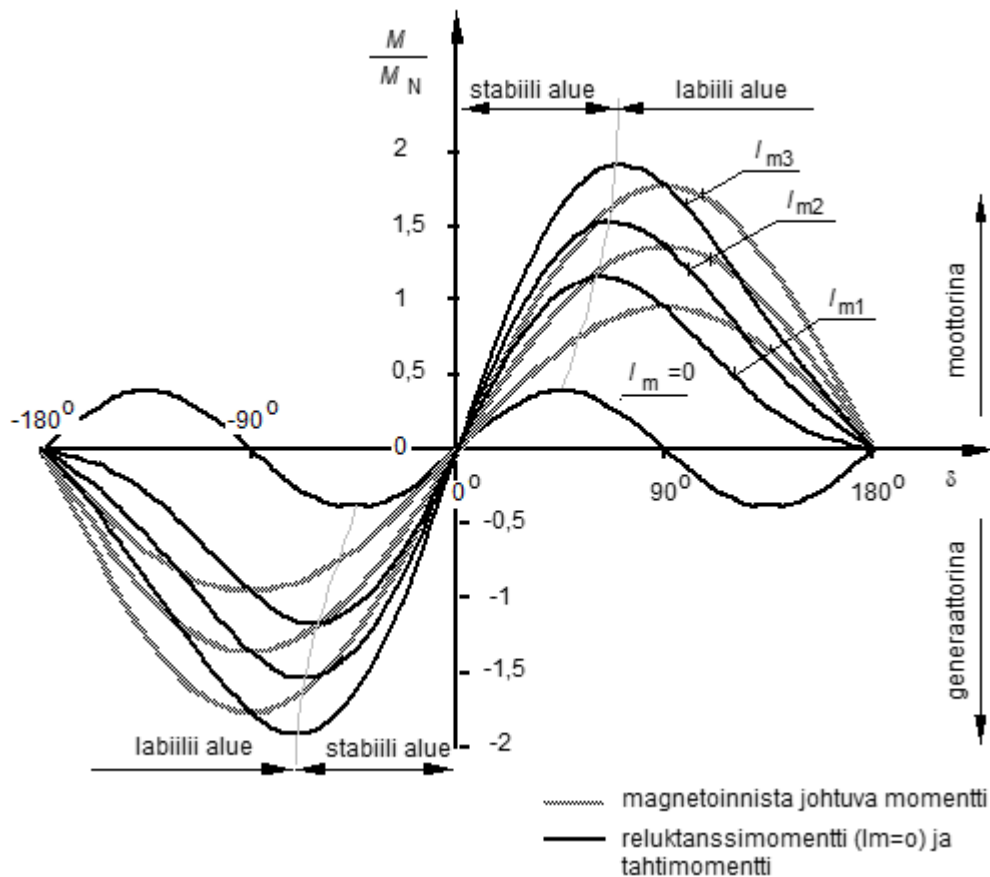
U_v vaihejännite

X_q poikittaisreaktanssi

X_d pitkittäisireaktanssi

ω_s kulmanopeus

δ tehokulma



Kuva 1. Tahtikoneen vääntömomentin muodostuminen. /9/

Reluktanssimomentinkaavaan päädytään, kun jätetään tahtikoneen momentin kaavasta yhtälön alkuosa pois ($E_{mv}=0$) eli kun ei ole magnetointia. Reluktanssimomentinkaavasta voidaan huomata, että tehokulman δ mukaisesti muuttuessa, momentti muuttuu. Roottorin magneettinen epäsymmetrisyys vaikuttaa maksimimomenttiin eli mitä suurempi pitkittäisreaktanssin X_d ja poikittaisreaktanssin X_q ero. Roottori, jolla on magneettisesti symmetrinen reluktanssimomentti $T_e=0$, jos ($X_d=X_q$) ovat siis samansuuruisia. /10/

Reluktanssimomentinkaava:

$$M_e = \frac{3 \cdot U_v^2}{\omega_s \cdot 2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (3)$$

2.3 Reluktanssimootorityypit

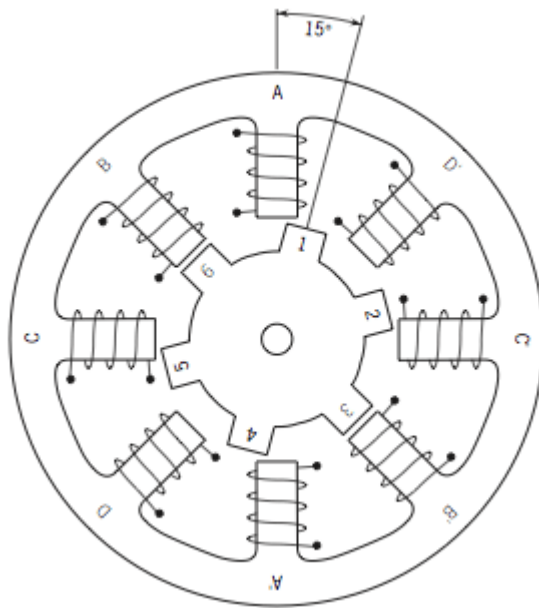
Kaksi yleisintä maailmalla käytettyä reluktanssimootorityyppiä ovat molemmin puolin avonapainen reluktanssimootori ja tahtireluktanssimootori. Niiden toimintaperiaate ja rakenne poikkeavat toisistaan merkittävästi.

2.3.1 Molemmin puolin avonapainen reluktanssimootori (SRM)

SRM on ollut tutkijoiden keskipisteenä sen huomattavien etujen ansiota, yksinkertainen ja vahva rakenne, harjaton, halpa tehdä, luontainen viansieto ja korkea hyötysuhde laajalla nopeusalueella. Kyseinen moottorityyppi on hyvä valinta monissa käytöissä, kuten lentolaitteiden käynnistysgeneraattoreissa, sähkökäyttöisissä kuluneuvoissa ja vaihtelevissa nopeusohjausjärjestelmissä. /4/

SRM on samantyyppinen kuin askelmoottori eli sähkömoottori, joka toimii reluktanssin momentin ansiota. Toisin kuin DC-moottorityypeissä syöttö tuodaan staattorin käämeihin, eikä roottoriin. Se yksinkertaistaa sen mekaanista suunnittelua, kun ei tarvitse suunnitella syöttöä liikkuvaan osaan. Se myös vaikeuttaa sähkösuunnittelua, koska se tarvitsee kytkentäjärjestelmän, jotta saadaan tuotua syöttö eri käämeihin. /3/

SRM:n staattori on tehty raudasta ja muotoiltu sauvoiksi, jotka on laminoitu ferromagneettisella seoksella. Staattorin jokaiseen sauvaan on kieritetty yksinkertainen käämintä kuparilangalla, joka on yleensä konsentrisen. Roottori on tehty raudasta ja päällystetty ferromagneettisella seoksella, jonka takia se ei sisällä käämejä tai kestmagneetteja. Magnetoinnin saa aikaan kuparilangat, jotka ovat käämitty staattorin sauvojen ympärille (**Kuva 2.**). /1/



Kuva 2. SRM-staattorin ja roottorin rakenne.

SMR:n toimintaperiaate perustuu siihen, että se vaihtelee virtoja staattorin käämeissä. Kun reluktanssi muuttuu magnetointipiirissä, roottori alkaa seuraamaan ja etsimään tilaa, jossa on pienin mahdollinen reluktanssi. Roottori kääntyy asentoon, jossa vuo pääsee mahdollisimman hyvin kulkemaan. Eli staattorin ja roottorin sauvat ovat samassa linjassa ilmvälissä. /1, 3/

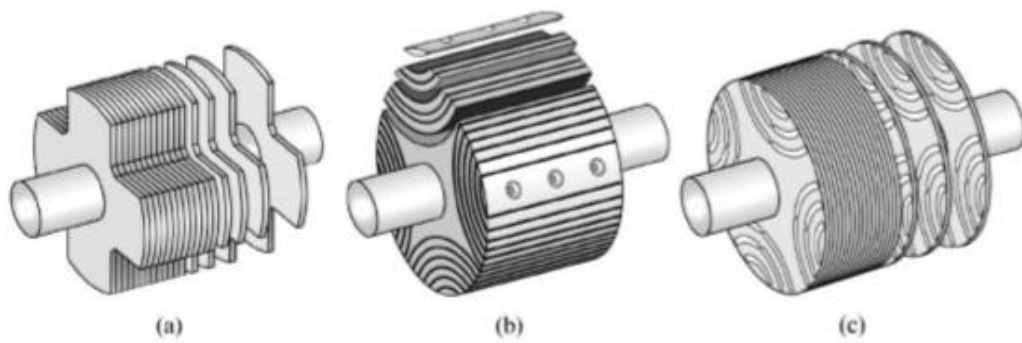
SRM:n suurimpia ongelmia on ollut momentin värähtelyn pienentäminen ja sen aiheuttama kova ääni. Tämä koskee lähtökohtaisesti tilanteita, joissa moottoria pyöritetään pienellä pyörimisnopeudella. Syy tähän momentin värähtelyyn pienellä pyörimisnopeudella on momentin aiheuttama pulsaatio, joka syntyy vuon harmonisten yliaaltojen seurauksena. Syy näiden vuon harmonisten yliaaltojen syntymiseen taas on roottorin ilmvälit ja staattorin sauvojen aiheuttama ”cogging torque”. Tämä ”cogging torque” syntyy muuttuvasta reluktanssista staattorin ja roottorin välillä. Suurella pyörimisnopeudella näitä vuon harmonisia yliaaltoja ei pääse syntymään. ”cogging torque” voidaan vähentää lisäämällä sauvojen määrää staattorissa ja roottorissa, paremmilla magnetointipiireillä ja paremmalla ohjaustekniikalla. /4/

2.3.2 Tahtireluktanssimoottori (SynRM)

Tehokkaiden sähkölaitteiden käyttötarpeiden lisääntyessä maailman kasvavaan energiatarpeeseen, tahtireluktanssimoottoria pidetään parhaimpana vaihtoehtona harjattomista koneista (lähtökohtaisesti oikosulkumoottorit). Se mikä tekee tahtireluktanssimoottorista paremman on sen parempi hyötysuhde ja momentin kapasiteetti samankokoisissa moottoreissa. Tämän moottorityypin käyttömahdollisuudet ovat viime aikoina herättäneet kiinnostusta, koska tahtireluktanssimoottoria voidaan käyttää sähköajoneuvoissa, junissa ja sitä pidetään kilpailijana tulevaisuuden kuljetuskäytöissä. /2, 6/

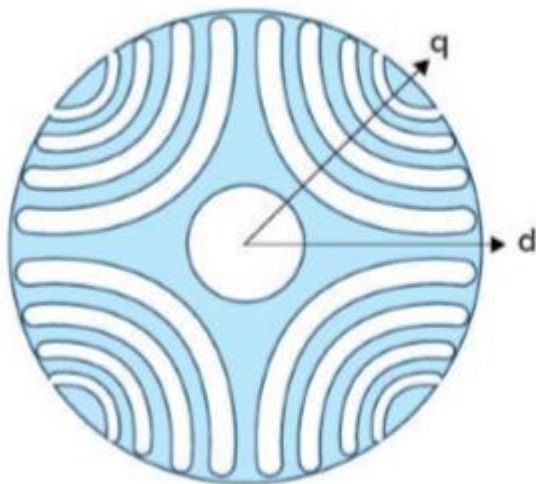
Tahtireluktanssimoottori poikkeaa muista reluktanssimoottorityypeistä sen rakenteen takia. Se on kolmivaiheinen sähkömoottori, jossa staattori on samanlainen kuin induktanssimoottorilla ja roottori koostuu ohuista rautalevyistä, jotka on päällystetty ferromagneettisella laminoillilla ja niistä on muotoiltu vuoreitit. Roottori ei sisällä kestopagneetteja tai käämejä. Laminoinnin syynä on se, että saadaan mahdollisimman suuri reluktanssi sen normaaliin eli d-akselin suuntaan ja pienin mahdollinen reluktanssi laminoinnin eli q-akselin suuntaan. /6/

Kuvassa 3 a) on esitetty SP-roottori, jossa voidaan nähdä yksinkertaisin roottorin rakenne kahdesta muusta vaihtoehdosta, jossa rautamateriaalia on vähennetty rautalevyistä muodostaen anisotrooppisen rakenteen. Kohdassa (b) on ALA-roottori ja se koostuu pitkittäissuuntaisista metalliosista, jotka liitetään toisiinsa ja eristetään toisistaan johtamattomalla materiaalilla. Päällekkäin asetetut metalliliuskat kiinnitetään roottorin runkoon sopivilla kiinnikkeillä. Kohdassa (c) on TLA-roottori ja se koostuu ohuista rautalevyistä, joista poistetaan pieni osa rautalevyistä ja muodostetaan halutut ilmavälit eli q- ja d-akselit. Käytetyimmät roottorimalit ovat ALA ja TLA. /17/



Kuva 3. Tahtireluktanssimoottorin erilaisia roottorimalleja. /17/

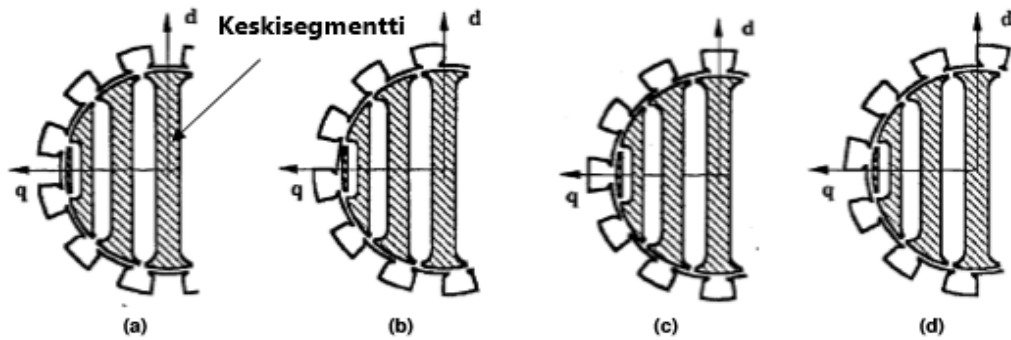
Tahtireluktanssimoottorin toimintaperiaate perustuu siihen, että roottori pyrkii kääntymään siten, että pyörivä magneettikenttä kohtaa pienimmän mahdollisen magneettisen vastuksen eli reluktanssin. Tarkemmin sanottuna se perustuu vuon eroon d-akselin (suora akseli) ja q-akselin (kvadratuuri akseli) välillä, jotka näkyvät kuvassa 4. Vuo pääsee kulkemaan hyvin d-akselin suuntaan, mutta huonosti q-akselin suuntaan. /2/



Kuva 4. 4-napainen roottorin rautalevy. /17/

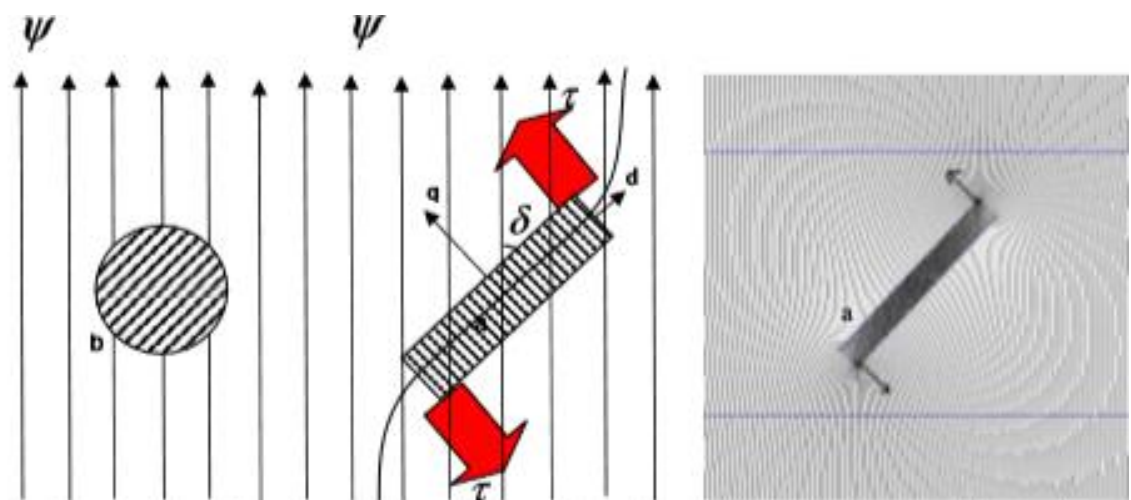
Kuvassa 5 on roottorin positio staattoriin nähden neljässä eri tilanteessa. Kuvan 6 kohdassa (a), kun hampaat ja segmentit ovat erillään. Tässä tapauksessa vuoreitin reluktanssi, joka sisältää keskisegmentin, on pienimmillään ja L_d on suurimmillaan. Toinen asento, joka näkyy kohdassa (c), kun hampaat ja segmentit ovat vastakkain. Nyt koko ilmvälireluktanssi, jossa keskisekmentti on vastakkain, on suu-

rimmillaan ja L_d on pienimmillään. Kun roottori on tilanteessa kohta (b) ja kuva (d), niin keskisegmentti jakaa puolet hampaista ja niiden välissä olevista raoista. Sen seurauksena se aiheuttaa vuon syntymisen d - ja q -akselille. /7/



Kuva 5. Vertailu roottorisegmenttien paikasta staattorien hampaisiin nähden neljässä tilanteessa. /7/

Kuvassa 6 havainnollistava kuva anisotrooppiseen kappaleeseen kohdistuvista voimavaikutuksista, kun se kohtaa magneettivuon. Vuota hyvin johtava d -akselin suunta pyrkii kääntymään vuon suuntaiseksi ja saa siten aikaan voimavaikutuksen. /17/



Kuva 6. Objekti anisotrooppisella geometrialla (a) ja isotrooppisella geometrialla (b) magneettikentässä ψ . /7/

Taajuusmuuttajalla ohjataan staattorin magneettikentän pyörimisnopeutta ja voimakkuutta. Roottorin asento voidaan saada selville ilman kalliita sensoreita, kun roottorin rakenne on selväpiirteinen ja akselien ollessa erotettavissa toisistaan, jolloin säästetään moottorin koossa sekä hinnassa. Tapoja selvittää roottorin asentotieto suurilla nopeuksilla on integroimalla käämijännitettä. Pienillä nopeuksilla tai pysähtyneillä moottoreilla sen sijaan asentotiedon arviointi on vaikeampaa, koska EMF (electromagnetic field) -signaalin tulkitseminen on vaikeampaa kohinan takia. Siinä tapauksessa asentotieto saadaan, kun syötetään sykkivää tai kiertävää suuritaajuista jännitesignaalia, joka tuottaa eri taajuuksia vastaavat virtasignaalit, joita taas voidaan käyttää asentotiedon selvittämisessä. /17/

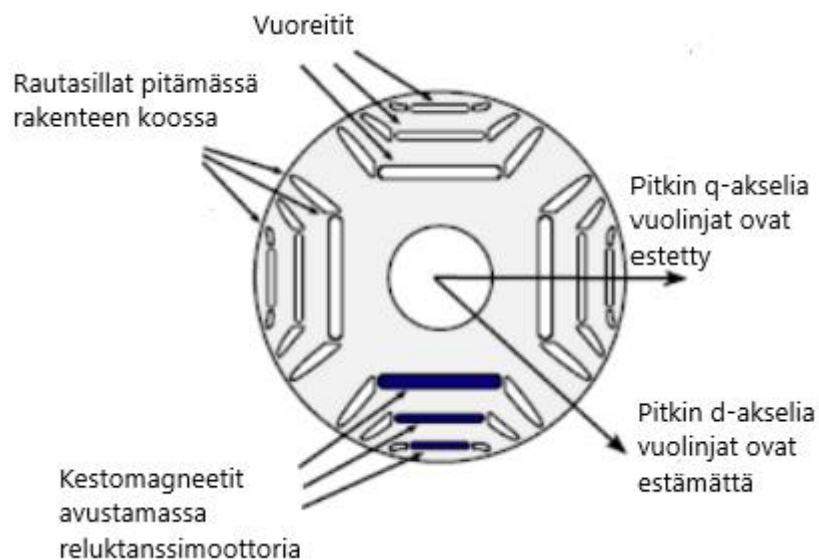
Tämä moottorityyppi toimii parhaimmillaan, kun ”saliency ratio” eli erottuvuuskerroin on suurimmillaan ja sitä voidaan nostaa muuttamalla ferromagneettista laminointia. Eli palaten reluktanssimomentin kaavaan, niin halutaan mahdollisimman suuri ero X_d ja X_q välille, jotta saadaan mahdollisimman suuri erottuvuuskerroin. Erottuvuuskerroimen merkitys on valtava, koska se määrittää tehokerroimen ja hyötysuhteen eli mitä korkeampi erottuvuuskerroin on, sitä paremmaksi kyseiset arvot tulevat. Suuri erottuvuuskerroin nostaa myös vääntömomenttia. /2/

Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde on korkea, koska roottorissa ei ole sähköisiä häviöitä. Tahtireluktanssimoottorin valmistaminen on myös yksinkertaista ja halpaa. Mahdollisia energiahäviöitä voi vielä vähentää AC-käytöissä käyttämällä taajuusmuuttajaa ilman, että moottorin paino kasvaisi tai parametrien määrä nousisi. On ehdotettu, että jos käyttää ohuempaa ferromagneettista laminointia, voidaan saavuttaa korkeampi hyötysuhde ja vähentää rautahäviöitä, mutta hinta nousisi sen seurauksena. Roottorin vuo ei muutu hirveästi, joten se ei kärsi rautahäviöistä. Sen sijaan staattorin vuon vaihtelu on suurta ja se aiheuttaa rautahäviöitä. Siitä voidaan todeta, että roottori ei tarvitse ohuempaa ferromagneettista laminointia, jotta voidaan vähentää merkittävästi rautahäviöitä, mutta staattoriin laminointi sen sijaan olisi suositeltavaa. /2/

Tahtireluktanssimootorin hyötysuhdetta voidaan parantaa tekemättä muutoksia staattoriin tai muuttamalla ferromagneettista seosta roottorissa. Erottavuuskertoimen parantuminen on tehnyt siitä kilpailukykyisen, koska sen seurauksena sen tehokerroin ja hyötysuhde on parantunut huomattavasti. Ohjaus on helpompaa kuin verrattuna oikosulkumootoriin pienissä ja keskisuurissa käytöissä. Täydellä kuormalla se kykenee tasaisesti pysähtymään kärsimättä sen suuremmasta ylikuumenemisestä. Tahtireluktanssimootorilla on parempi hyötysuhde kuin oikosulkumootorilla. Tahtireluktanssimootori myös saavuttaa korkeat hyötysuhdestandardit, kuten IE4, mutta tahtireluktanssimootorin merkittävämpänä heikkoutena voidaan pitää sen huonoa tehokerrointa, jota pitää tulevaisuudessa parantaa. /2/

2.3.3 Kestomagneetilla avustettu tahtireluktanssimootori

Nykyaikaisilta sähkömoottorikäyttöiltä vaaditaan suurta vääntömomenttia ja nopeuden säätöaluetta, jotta niitä voidaan käyttää täys-sähkö- ja hybridikäyttöisissä ajoneuvoissa. Tahtireluktanssimootori on yksi vaihtoehto kyseisiin käyttötarkoituksiin ja jossa voidaan myös hyödyntää kestmagneetteja. /2/



Kuva 7. SynRM-roottorin laminointi /2/

Viime aikoina maametallimineraalien hinta on ollut kovassa nousussa, jonka seurauksena on päädytty tutkimaan vaihtoehtoisia materiaaleja. Erityisesti kestopagneeteilla avustettuun reluktanssimoottoriin on päädytty käyttämään ferriittikestopagneetteja, jonka huomattavina etuina ovat jyrkkyys, korkea ylikuormituksen sieto, tehon tasaisuus laajalla nopeuden vaihtelulla ja edullisuus. /5/

Kestopagneeteilla avustettua reluktanssimoottorille on yleisesti luonteenomaista sen monimutkainen roottorin rakenne. Roottorissa on monta vuoseinämää sauvaa kohti, joka antaa sille mahdollisuuden tehostaa haluttua magnetoinnin suuntaa ja jolla voidaan kasvattaa reluktanssimomenttia. Kun sopiva määrä ferriittikestopagneetteja sijoitetaan roottorin vuoseinämien sisälle, se voi antaa suuren edun parantamalla merkittävästi tehokerrointa ja pienentämällä staattorin ottamaa virtaa näin antaen edun verrattaessa tavalliseen SRM:ään, tahtireluktanssimoottoriin tai oikosulkumoottoriin. /5/

Ferriittikestopagneetit ovat todistaneet hintaetunsa ja muiden etujen lisäksi vahvan kilpailukykyä, mutta sen ongelmat ovat matala remanenssi (B_r) ja koersiivisuus (H_c). Heikko remanenssi tarkoittaa matalaa magneettista kuormaa, joka rajoittaa väntömomentin kapasiteettia. Lisäksi erittäin matala koersiivisuus tekee sen alttiiksi demagnetoinnille. Demagnetointi voi tapahtua, kun moottori on toiminnassa kentänheikennyksessä ja tilanteissa, joissa oikosulku pääsee syntymään. Näihin ongelmiin voidaan vaikuttaa muuttamalla roottorityyppejä. /5/

2.3.4 SynRM verrattuna SRM

Aloitetaan vertaamalla tahtireluktanssimoottorin ja SRM:n rakenteita keskenään. Tahtireluktanssimoottorin staattori on samanlainen kuin oikosulkumoottorilla, joka antaa sille edun verrattaessa SRM:n, koska se on halvempi teettää ja se voidaan koota samassa pisteessä kuin oikosulkumoottorit. Tahtireluktanssimoottorin roottori on koottu ohuista rautalevyistä, joihin on tehty ilmavälit, kun taas SRM:n roottorin ohuet rautalevyt on muotoiltu sauvoiksi. Kummassakaan roottorissa ei ole kestopagneetteja tai käämejä, joten virtalämpöhäviöt ovat mitättömät. /2/

Niiden toimintaperiaate on kuitenkin hyvin erilainen, koska tahtireluktanssimootorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään ja SRM:ssä taas magneettikenttä pyörii askelmaisesti kuten askelmoottorissa. Tämän takia tahtireluktanssimoottoria voidaan syöttää jännitelähde invertterillä, joka taas on hyvin samanlainen kuin oikosulkumoottoreilla. SRM:ään se ei kuitenkaan sovi, joten siinä yleisesti käytetään epäsymmetristä puolisolukonvertteria, jonka saatavuus on haastavaa ja kalliimpaa kuin tahtireluktanssimootorilla. SRM:n suurimpia ongelmia on momentin pulsaatio ja siitä syntyvä kova ääni. Nämä ongelmat voidaan poistaa tahtireluktanssimootorista. /2/

3 OIKOSULKUMOOTTORIN JA TAHTITELUKTANSSI-MOOTTORIN VERTAILU

ABB:n katalogista otettu taulukko SynRM:n suorituskyvystä, kun $n_N = 1500$ rpm.

Taulukko 1. tahtireluktanssimoottoritaulukko, kun $n_N = 1500$ rpm. /8/

Output kW				Performance at nominal speed							
				Speed	Motor efficiency	Current	Torque	Torque	Max speed	Inertia	Weight
				n_n r/min	with VSD supply	I_n A	T_n Nm	T_{2s}/T_n	P kW	J kgm ²	m kg
Motor type	Product code			400 V network							
1500 r/min (50 Hz)				400 V network							
1.1	M3AL 90 LA 4	3GAL 092 006-SB	1500	81.4%	2.9	7.0	1.5	2100	0.00202	13	
1.5	M3AL 90 LB 4	3GAL 092 007-SB	1500	82.8%	3.8	9.6	1.5	2100	0.00276	16	
2.2	M3AL 90 LDA 4	3GAL 092 008-SB	1500	84.3%	5.5	14.0	1.5	2100	0.00351	17	
3	M3AL 100 LB 4	3GAL 102 002-SB	1500	85.5%	7.1	19.1	1.5	2100	0.00565	23	
4	M3AL 100 LDA 4	3GAL 102 003-SB	1500	86.6%	9.4	25.5	1.5	2100	0.00690	27	
5.5	M3AL 112 MB 4	3GAL 112 002-SB	1500	87.7%	13.1	35.0	1.5	2100	0.00813	33	
7.5	M3AL 132 SMB 4	3GAL 132 006-SB	1500	88.7%	17.4	47.7	1.5	2100	0.0184	47	
11	M3AL 132 SMC 4	3GAL 132 007-SB	1500	89.8%	25.0	70.0	1.5	2100	0.0226	57	
15	M3AL 132 SME 4	3GAL 132 008-SB	1500	90.6%	34.5	95.5	1.5	2100	0.0277	80	
18.5	M3AL 132 SMF 4	3GAL 132 009-SB	1500	91.2%	42.2	118	1.5	2100	0.0332	89	
17	M3BL 160 MLB 4	3GBL 162 004-SB	1500	91.2%	42.6	108	1.5	2100	0.0579	130	
20	M3BL 160 MLC 4	3GBL 162 005-SB	1500	92.0%	49.2	127	1.5	2100	0.0702	157	
25	M3BL 160 MLE 4	3GBL 162 006-SB	1500	92.8%	58.5	159	1.5	2100	0.0864	174	
33	M3BL 200 MLA 4	3GBL 202 003-SB	1500	93.2%	76.9	210	1.5	2100	0.242	279	
40	M3BL 200 MLC 4	3GBL 202 004-SB	1500	93.5%	92.9	255	1.5	2100	0.287	304	
71	M3BL 250 SMA 4	3GBL 252 003-SB	1500	94.3%	166	452	1.5	2100	0.499	396	
86	M3BL 250 SMB 4	3GBL 252 009-SB	1500	94.6%	200	547	1.5	2100	0.575	428	
97	M3BL 250 SMC 4	3GBL 252 004-SB	1500	95.0%	225	618	1.5	2100	0.633	454	
103	M3BL 280 SMA 4	3GBL 282 213-DB	1500	94.8%	221	656	1.5	2100	0.857	604	
118	M3BL 280 SMB 4	3GBL 282 223-DB	1500	95.3%	246	758	1.5	2100	1.00	639	
134	M3BL 280 SMC 4	3GBL 282 233-DB	1500	95.6%	279	853	1.7	2100	1.21	697	
155	M3BL 315 SMA 4	3GBL 312 213-DB	1500	95.7%	321	987	1.5	1800	1.64	873	
180	M3BL 315 SMB 4	3GBL 312 223-DB	1500	96.0%	374	1146	1.5	1800	1.87	925	
205	M3BL 315 SMC 4	3GBL 312 233-DB	1500	96.1%	423	1305	1.5	1800	2.04	965	
250	M3BL 315 MLA 4	3GBL 312 413-DB	1500	96.4%	516	1592	1.5	1800	2.45	1116	
275	M3BL 315 MLB 4	3GBL 312 423-DB	1500	96.5%	573	1751	1.6	1800	2.68	1169	
315	M3BL 315 LKA 4	3GBL 312 813-DB	1500	96.4%	659	2005	1.6	1800	3.04	1357	
350	M3BL 315 LKC 4	3GBL 312 833-DB	1500	96.5%	712	2228	1.7	1800	3.77	1533	

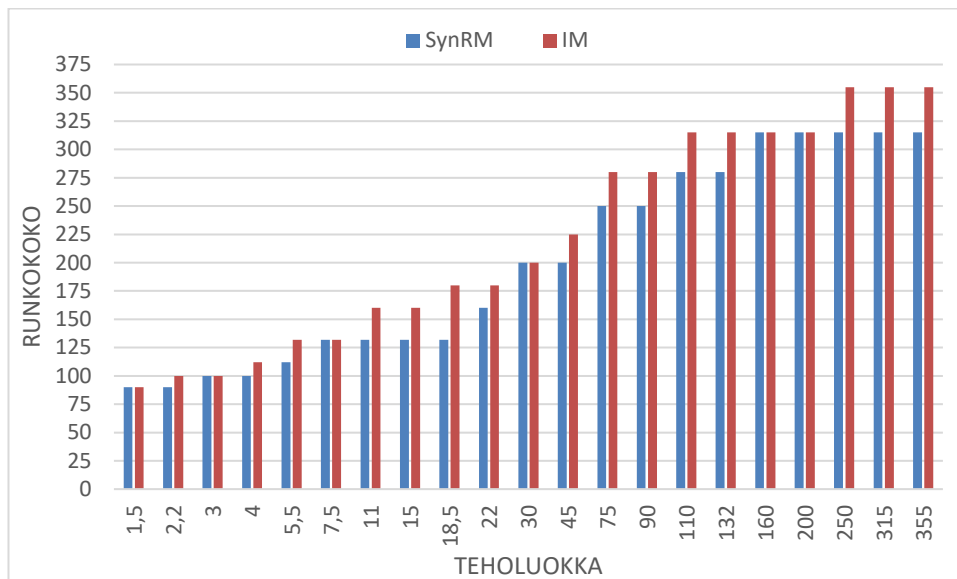
ABB:n katalogista otettu taulukko oikosulkumoottorin suorituskyvystä, kun $n_N = 1500$ rpm.

Taulukko 2. Oikosulkumoottori taulukko, kun $n_N = 1500$ rpm /11/

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos ϕ	Current		Torque		Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{pk} dB	
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _n A	I ₂ /I _n	T _n Nm	T ₂ /T _n				T ₁ /T _n
1500 r/min = 4 poles				400 V 50 Hz				CENELEC-design							
1.1	M3BP 90SLB 4	3GBP092322---B	1435	83,6	84,1	82,4	0,80	2,36	6,5	7,3	2,4	3,4	0,0044	25	50
1.5	M3BP 90SLD 4	3GBP092325---B	1430	84,3	85,1	83,9	0,83	3	6,3	10	2,7	3,4	0,0053	27	56
2.2	M3BP 100LC 4	3GBP102323---B	1450	85,9	85,1	83,4	0,78	4,6	7,7	14,5	2,7	4,1	0,00948	36	56
3	M3BP 100LD 4	3GBP102324---B	1450	86,8	86,9	85,3	0,79	6,1	7,7	19,8	2,9	3,4	0,011	38	58
4	M3BP 112MB 4	3GBP112322---B	1440	86,8	87,7	87,3	0,82	7,94	7,0	26,5	2,5	2,9	0,0125	44	59
5.5	M3BP 132SMB 4	3GBP132322---B	1460	89,0	89,8	88,9	0,80	10,8	6,7	36	2,2	3,2	0,0328	70	67
7.5	M3BP 132SMC 4	3GBP132323---B	1450	89,3	90,1	90,0	0,81	14,5	7,2	49,4	2,5	3,5	0,0366	73	64
11	M3BP 160MLA 4	3GBP162410---G	1466	90,4	91,6	91,3	0,84	20,9	6,8	71,6	2,2	2,8	0,081	135	62
15	M3BP 160MLB 4	3GBP162420---G	1470	91,4	92,3	92,2	0,83	28,5	7,1	97,4	2,6	3,0	0,099	165	62
18.5	M3BP 180MLA 4	3GBP182410---G	1477	91,9	92,8	92,6	0,84	34,5	7,2	119	2,6	2,9	0,166	205	62
22	M3BP 180MLB 4	3GBP182420---G	1475	92,3	93,3	93,2	0,84	40,9	7,3	142	2,6	3,0	0,195	222	62
30	M3BP 200MLA 4	3GBP202410---G	1480	93,2	94,0	93,7	0,84	55,3	7,4	193	2,8	3,0	0,309	291	63
37	M3BP 225SMA 4	3GBP222210---G	1479	93,4	93,9	93,4	0,84	68	7,1	238	2,6	2,9	0,356	324	66
45	M3BP 225SMB 4	3GBP222220---G	1480	93,9	94,3	93,9	0,85	81,3	7,5	290	2,8	3,2	0,44	356	66
55	M3BP 250SMA 4	3GBP252210---G	1480	94,4	94,9	94,6	0,85	98,9	7,0	354	2,6	2,9	0,765	414	67
75	M3BP 280SMA 4	3GBP282210---G	1484	94,5	94,7	94,4	0,85	134	6,9	482	2,5	2,8	1,25	625	68
90	M3BP 280SMB 4	3GBP282220---G	1483	94,7	95,0	94,5	0,85	160	7,2	579	2,5	2,7	1,5	665	68
110	M3BP 315SMA 4	3GBP312210---G	1487	95,1	95,1	94,3	0,86	194	7,2	706	2,3	2,8	2,3	900	70
132	M3BP 315SMB 4	3GBP312220---G	1487	95,4	95,4	94,7	0,86	232	7,1	847	2,3	2,7	2,6	960	70
160	M3BP 315SMC 4	3GBP312230---G	1487	95,3	95,3	94,8	0,85	284	7,2	1027	2,4	2,9	2,9	1000	70
200	M3BP 315MLA 4	3GBP312410---G	1486	95,6	95,6	95,3	0,86	351	7,2	1285	2,5	2,9	3,5	1160	70
250	M3BP 355SMA 4	3GBP352210---G	1488	95,9	96,0	95,5	0,85	442	7,1	1604	2,3	2,7	5,9	1610	74
315	M3BP 355SMB 4	3GBP352220---G	1488	95,9	96,2	95,8	0,86	550	7,3	2021	2,3	2,8	6,9	1780	74
355	M3BP 355SMC 4	3GBP352230---G	1487	95,9	96,2	95,9	0,87	614	6,8	2279	2,4	2,7	7,2	1820	78

Oikosulkumoottorin ja tahtireluktanssimoottorin suorituskyky on tällä hetkellä hyvin samaa luokkaa, kun verrataan näitä ABB:n katalogeista otettuja taulukoita 1 ja 2. Arvot, joihin erityisesti kiinnitetään huomiota, ovat moottorien momentti, virta, hyötysuhde ja koko.

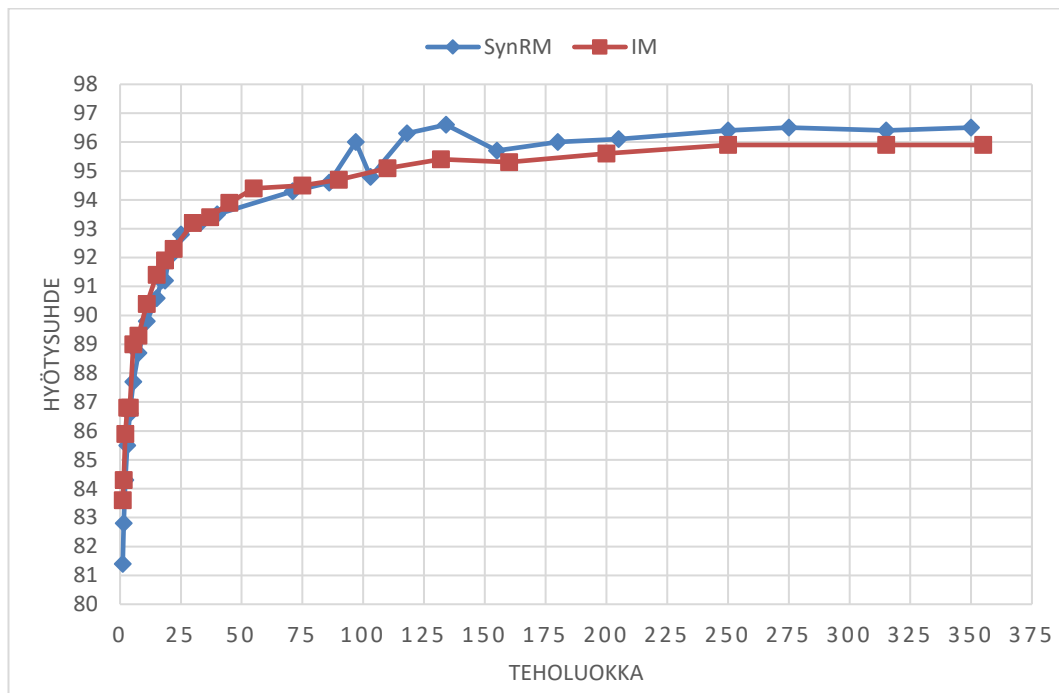
Reluktanssimoottoreiden yhtenä eduista oikosulkumoottoreihin verrattuna pidetään sen pienempää kokoa, joka voidaan huomata vertaamalla kokoluokkaa ulos-
tulotehojen mukaan. Aikaisemmin käsiteltynä syy reluktanssimoottoreiden pienempään painoon on roottorin rakenne, jonka takia se voidaan sijoittaa pienempään staattoriin toisin kuin oikosulkumoottorit.



Kuva 8. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin runkokoko suhteessa teholuokkaan.

Kun verrataan molempien moottoreiden maksimimomenttia eli tahtireluktanssimoottorilla kerroin T_a/T_N on noin 1,5-1,7 ja se kerrotaan nimellismomentin eli M_N :n kanssa, niin saadaan tahtireluktanssimoottoreiden maksimimomentti. Oikosulkumoottoreilla kerroin T_i/T_N , joka vastaa samaa kuin tahtireluktanssimoottoreiden T_a/T_N kerroin. Oikosulkumoottoreiden maksimimomentin kerroin vaihtelee 2,3-2,9 välillä. Tästä huomataan, että oikosulkumoottoreilla on paljon suurempi maksimimomentin kapasiteetti. Virta nostaa lämpötilaa moottorissa, joka aiheuttaa häviöitä. Molempien moottoreiden nimellisvirrat ovat lähes samanlaisia, joten siinä ei ole merkittävää etua kummallakaan toisiinsa nähden. Tämä kertoo sen, että tehokerroin on nimelliskuormalla suunnilleen samaa luokkaa, vaikka sitä ei ole reluktanssilla annettu.

Hyötysuhde on arvo, joka kertoo ulossaatavan akselitehon suhteen otettuun sähkötehoon. Oikosulkumoottoreilla on pienemmissä kokoluokissa parempi hyötysuhde kuin tahtireluktanssimoottorilla, mutta siirryttäessä suurempiin kokoluokkiin, tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde on parempi kuin vastaavan kokoisella oikosulkumoottorilla. Oikosulkumoottoreita tehdään moneen hyötysuhdeluokkaan, joten tässä vertailu ei ole yleispätevä vaan kohdistuu vain taulukkojen 1 ja 2 moottoreihin.



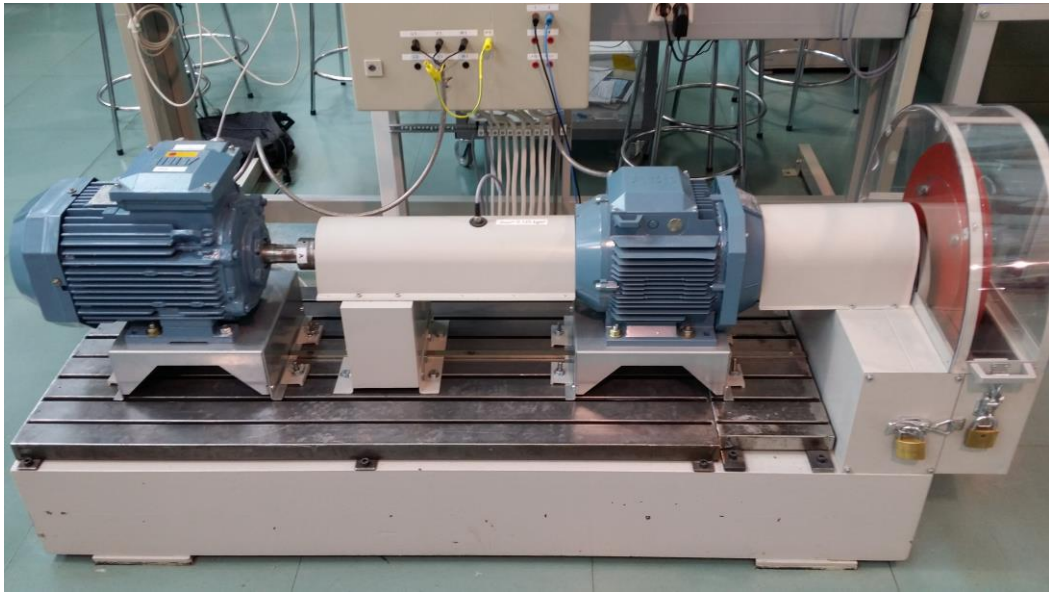
Kuva 9. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde suhteessa teholuokkaan.

4 LABORATORIOMITTAUKSET

Mittaukset suoritetaan Technobothnian laboratoriotiloissa, joka sijaitsee Palosaa-
ren kampuksella, Vaasassa. Se on Vaasan ammattikorkeakoulun, Vaasan yliopis-
ton ja Novian ammattikorkeakoulun yhteinen laboratorio- ja testaustila. Opinnäy-
tetyössä tehtävät mittaukset suoritetaan kyseisissä tiloissa ja kytöntöjä valvoo
opinnäytetyötä ohjaava opettaja.

Mittaukset tehdään kahdella eri ohjaustavalla eli taajuusmuuttajaohjauksella
2,2kW tahtireluktanssimoottorille ja oikosulkumoottorille. DOL-käyttö suorite-
taan 5,5kW tahtireluktanssimoottorille ja oikosulkumoottorille. Taajuusmuuttajal-
la ohjauksessa moottorien vertailun kohteena olevat arvot ovat moottorien dy-
naaminen tarkkuus, hyötysuhteet ja tehokerroin eri kuormilla sekä pyörimisno-
peuksilla. DOL-käytöllä lähtökohtaisesti keskitytään moottorien ottamaan käyn-
nistysvirtaan ja -momenttiin.

Moottoreiden testauksessa on käytetty kuvassa 10 näkyvää huimamassaa, jonka
hitausmomentti on noin $0,125 \text{ kgm}^2$ ja sitä voidaan nostaa lisäämällä metalli-
kiekkoja ($0,293 \text{ kgm}^2$). Tässä työssä vakio hitausmomentti on $0,418 \text{ kgm}^2$ ja
muuttuvana hitausmomenttina on mitattavan moottorin oma hitausmomentti. Sen
avulla voidaan muuttaa moottorin ottamaa kuormaa sekä havainnollistaa Catman
Easy-AP-sovelluksen avulla moottorin momenttia ja pyörimisnopeutta.

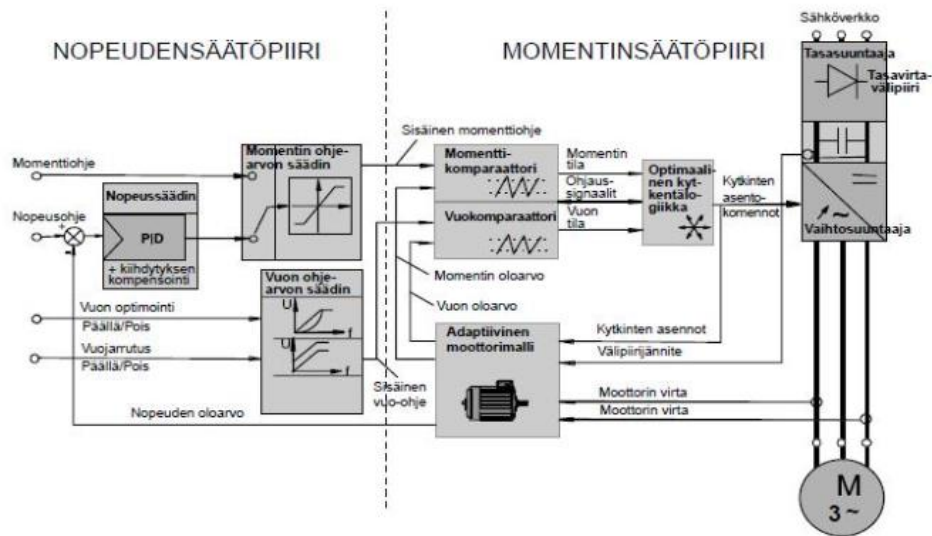


Kuva 10. Moottoreiden testauksessa käytetty huimamassa.

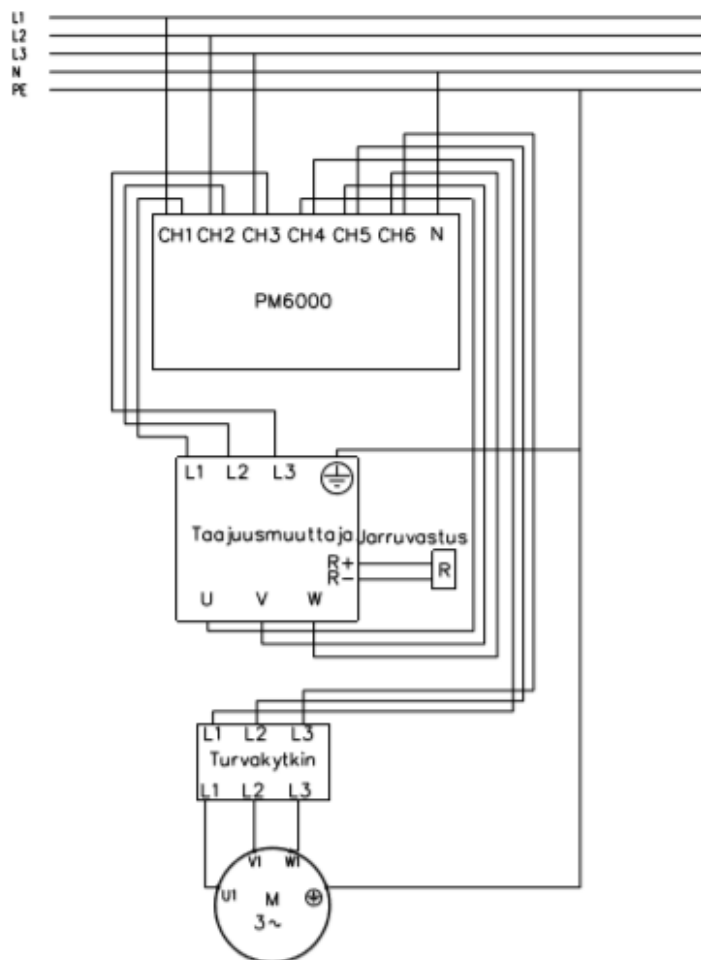
4.1 Taajuusmuuttajan käyttö

Reluktanssimoottorit ovat ensisijaisesti taajuusmuuttajaohjattuja, mutta nykyään löytyy myös suoraan verkkoon liitettäviä reluktanssimoottoreita.

Käytetyssä taajuusmuuttajaohjauksessa käytetään DTC-ohjaustapaa. DTC (Direct Torque Control) eli suora momenttisäätö on ABB:n kehittämä ja se ei tarvitse modulaattoria, takometriä tai asentoanturia moottorin akselin nopeuden tai asennon takaisinkytkentään. Kun käytetään nopeuden takaisinkytkentää, saadaan parempi nopeussäädön dynaaminen tarkkuus verrattuna ilman takaisinkytkentää toteutettuun käyttöön. Kuvassa 11 on DTC-säädön periaatteellinen lohkokaaquioikosulkumoottorikäytössä ja kuvassa 12 on kytkentäkuva taajuusmuuttajaohjauksessa käytetystä kytkennästä. /16/



Kuva 11. DTC-säädön lohkokkaavio. /16/



Kuva 12. Kytkentäkuva taaajuusmuuttajaohjauksessa käytetystä kytkennästä.

4.1.1 Taajuusmuuttaja

Mittauksissa käytetään ABB:n ACS880-taajuusmuuttajaa, jonka tyyppi on ACS880-01. Kyseisessä taajuusmuuttajassa käytetään DTC-ohjaustapaa, jolla saadaan tarkka nopeuden ja momentin ohjaus. Taajuusmuuttajassa käytetään valmistajan suosittelemaa 80Ω jarruvastusta.

Taajuusmuuttajan parametrisointiin käytetään Drive Composer Pro 1.8-sovellusta, jotta saadaan asetettua 2,2kW tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin nimellis- ja maksimiarvot, sekä haluttu ohjaustapa taajuusmuuttajamittauksia varten.

Tahtireluktanssimoottorin parametrisointi:

Taajuusmuuttajan parametrisointisovelluksella on asetettuna tahtireluktanssimoottorin nimellis- ja maksimiarvot.

99. Motor data		
3	Motor type	SynRM
4	Motor control mode	DTC
6	Motor nominal current	5,5
7	Motor nominal voltage	400,0
8	Motor nominal frequency	50,00
9	Motor nominal speed	1500
10	Motor nominal power	2,20
11	Motor nominal cos ϕ	0,72
12	Motor nominal torque	14,000
13	ID run requested	Standstill
14	Last ID run performed	None
15	Motor polepairs calculated	2
16	Motor phase order	U V W

Kuva 13. Tahtireluktanssimoottorin nimellisarvojen parametrisointi.

30. Limits		
1	Limit word 1	0b0000
2	Torque limit status	0b0000
11	Minimum speed	-3000,00
12	Maximum speed	3000,00
13	Minimum frequency	-50,00
14	Maximum frequency	50,00
17	Maximum current	8,25
18	Minimum torque sel	Minimum torque 1
19	Minimum torque 1	-150,0
20	Maximum torque 1	150,0
21	Minimum torque 2 source	Minimum torque 2
22	Maximum torque 2 source	Maximum torque 2
23	Minimum torque 2	-150,0
24	Maximum torque 2	150,0
25	Maximum torque sel	Maximum torque 1
26	Power motoring limit	300,00
27	Power generating limit	-300,00
30	Overvoltage control	Enable
31	Undervoltage control	Disable

Kuva 14. Tahtireluktanssimootorin rajojen parametrisointi.

Oikosulkumoottorin parametrisointi:

Oikosulkumoottorilla vastaavasti parametrisoidaan nimellis- ja maksimiarvot.

99. Motor data		
3	Motor type	Asynchronous m...
4	Motor control mode	DTC
6	Motor nominal current	4,6
7	Motor nominal voltage	400,0
8	Motor nominal frequency	50,00
9	Motor nominal speed	1450
10	Motor nominal power	2,20
11	Motor nominal cos ϕ	0,79
12	Motor nominal torque	14,500
13	ID run requested	Standstill
14	Last ID run performed	None
15	Motor polepairs calculated	2
16	Motor phase order	U V W

Kuva 15. Oikosulkumoottorin nimellisarvojen parametrisointi.

30. Limits		
1	Limit word 1	0b0000
2	Torque limit status	0b0000
11	Minimum speed	-3000,00
12	Maximum speed	3000,00
13	Minimum frequency	-50,00
14	Maximum frequency	50,00
17	Maximum current	6,90
18	Minimum torque sel	Minimum torque 1
19	Minimum torque 1	-150,0
20	Maximum torque 1	150,0
21	Minimum torque 2 source	Minimum torque 2
22	Maximum torque 2 source	Maximum torque 2
23	Minimum torque 2	-150,0
24	Maximum torque 2	150,0
25	Maximum torque sel	Maximum torque 1
26	Power motoring limit	300,00
27	Power generating limit	-300,00
30	Overvoltage control	Enable
31	Undervoltage control	Disable

Kuva 16. Oikosulkumoottorin rajojen parametrisointi.

Molemmissa moottoreissa käytettiin samaa nopeudenohjausta.

19. Operation mode		
1	Actual operation mode	Speed
11	Ext1/Ext2 selection	EXT1
12	Ext1 control mode	Speed
14	Ext2 control mode	Speed
16	Local control mode	Speed
17	Local control disable	No
20	Scalar control reference unit	Rpm

Kuva 17. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin toimintatavan parametrisointi.

4.1.2 Moottorit

Taajuusmuuttajakäytössä vertailun kohteena ovat 2,2kW tahtireluktanssimoottori ja saman kokoinen oikosulkumoottori.

Taulukko 3. 2,2kW oikosulkumoottorin ja tahtireluktanssimoottorin nimellisarvot.

Moottorit	Oikosulkumoottori	SynRM	
KytKentätapa	D	Y	
Napapari	2	2	
U	400	380	V
I	4,6	5,5	A
P	2,2	2,2	kW
M	14,5	14	Nm
n	1450	1500	rpm
f	50	50	Hz
cos ϕ	0,79	0,72	
Paino	25	17	kg
Runkokoko	100	90	
Hyötysuhde luokka	IE2	IE2	
Kotelointi luokka	IP55	IP55	
Käyttö	S1	S9	

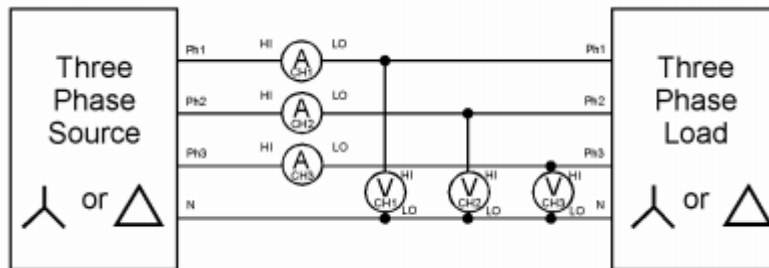
4.1.3 Mittalaitteet

Voltech PM6000

Mittauksissa käytetään 6-kanavaista Voltech PM6000 tehoanalysaattoria (**kuva 18.**), jolla voidaan mitata mm. verkosta taajuusmuuttajalle tuleva ja taajuusmuuttajalta moottorille menevä virta, jännite, teho ja tehokerroin. Kuvassa 19 on tehoanalysaattorissa käytetty kytkentäkuva.



Kuva 18. Voltech PM6000 tehoanalysaattori.



Kuva 19. PM6000:ssa käytetty kytkentä.

Oskilloskooppi

Työssä käytetty oskilloskooppi on Agilent Technologies InfiniiVision DSO5012A. Kyseistä oskilloskooppia käytetään virran käyrämuodon ja suuruuden mittaamiseen.

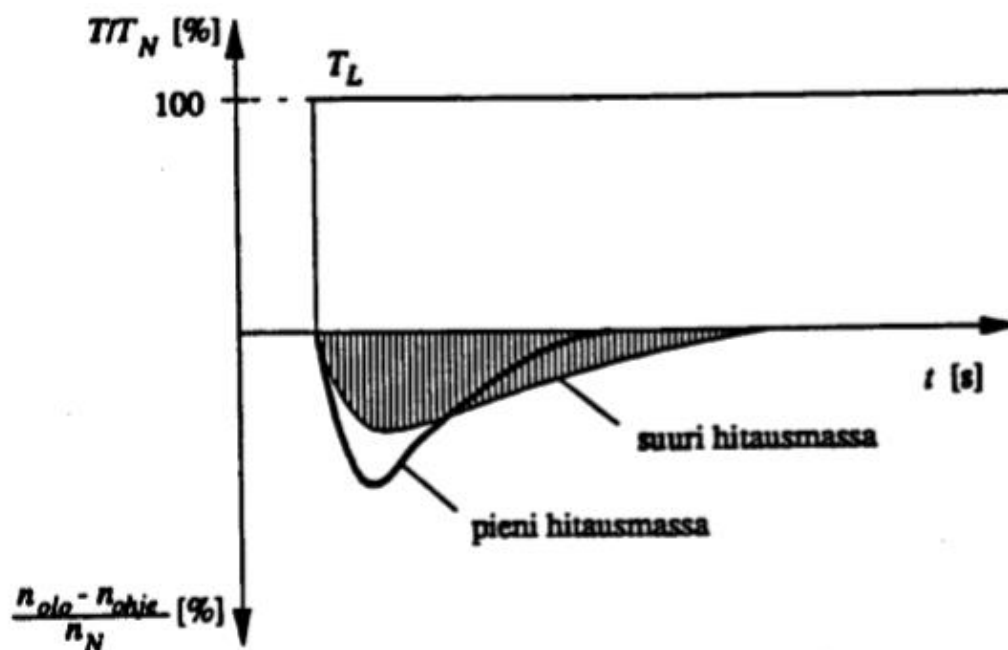
Catman Easy-AP

Catman Easy-AP sovellusta käytetään, jotta voidaan havainnollistaa momentin ja nopeuden muutosta käynnistyksessä. Tiedonkeruuta varten tarvitaan momentti- ja nopeusanturi. Momenttianturi mittaa moottorin ottamaa momenttia eli kuormaa ja nopeusanturi mittaa moottorin pyörimisnopeutta.

4.1.4 Mittaukset

Dynaaminen tarkkuus

Dynaaminen tarkkuus tarkoittaa sitä kuinka vakaana pyörimisnopeus pysyy, kun kuorma eli momentti muuttuu. Moottoreiden dynaaminen tarkkuus voidaan laskea nostamalla momenttia askelmaisesti nimelliskuormaan asti ja laskemalla siitä tapahtuva virhe (**Kuva 20.**). Toinen tapa on pudottaa nimelliskuorma pois nimellisnopeudella ja laskea siitä syntyvä virhe, josta voidaan vastaavasti laskea likimäärin kolmion pinta-ala.




Kuva 20. Nopeuden ohje- ja oloarvojen erotuksen aikaintegraali suhteessa nimelliseen nopeuteen. /10/

Molempien moottoreiden dynaaminen tarkkuus on todella huono. Tahtireluktanssimoottorin dynaamiseksi tarkkuudeksi on saatu 21 % s ja vastaavasti oikosulkumoottorille 15,69 % s. Tahtireluktanssimoottorilla on hieman yli 5 % s huonompi dynaaminen tarkkuus kuin oikosulkumoottorilla.

Esimerkki hyvästä dynaamisesta tarkkuudesta taulukossa 4, jossa on mitattu dynaamiseksi tarkkuudeksi kestopagneettimoottorille ja oikosulkumoottorille 0,2 % s ja 0,4 % s. Nopeussäätäjän viritys ei ilmeisesti ollut optimaalinen.

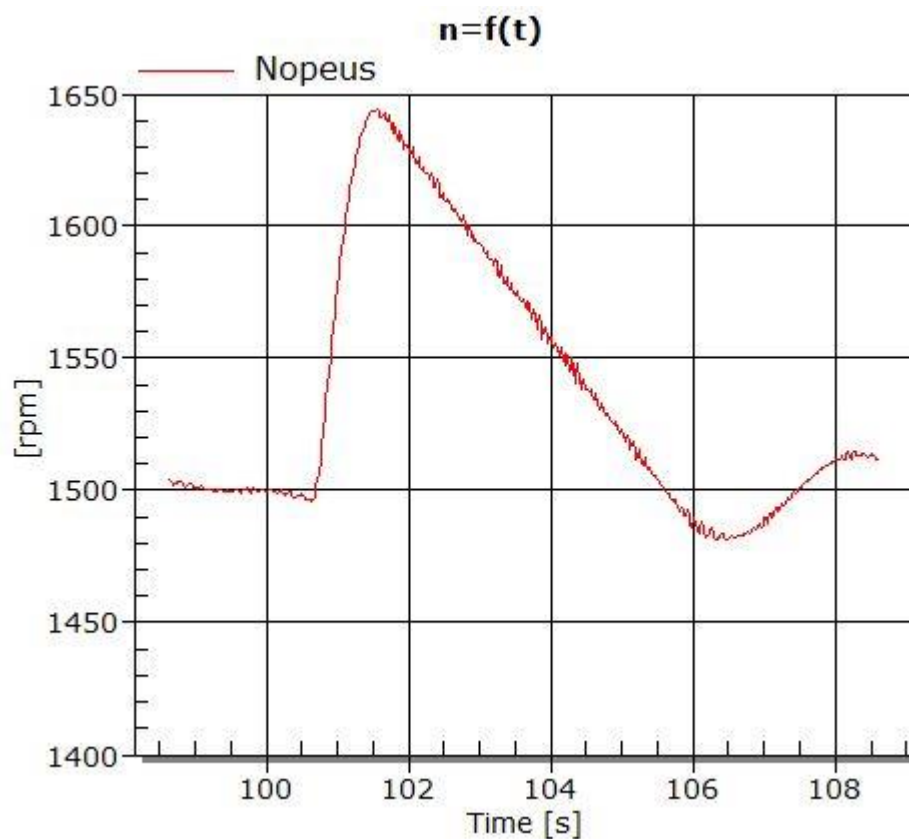
Taulukko 4. Esimerkki hyvästä dynaamisesta tarkkuudesta kestopagneettimoottorilla ja oikosulkumoottorilla. /10/

		With a pulse encoder		Without a pulse encoder	
Speed Control		PMM	IM	PMM	IM
Resolution		1:20000	1:20000	1:20000	1:20000
Static accuracy		± 0.01 % **	± 0.01 % **	± 0.02 % **	± 10 % */*
Dynamic accuracy		0.2 %s	0.2 %s	0.4 %s	0.4 %s
		* of nominal torque ** of nominal speed */* of motor slip			

Tahtireluktanssimoottorin dynaaminen tarkkuus:

Tahtireluktanssimoottorin aika Δt on ylityksen kesto, joka on noin 4,5 s ja nopeus $\Delta n = n_{olo} - n_{ohje}$ on 140 rpm. Tahtireluktanssimoottorin dynaamiseksi tarkkuudeksi saadaan 21 % s.

$$D_o := \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \Delta n}{n_N} \cdot 100 = 21 \% \text{ s} \quad (4)$$



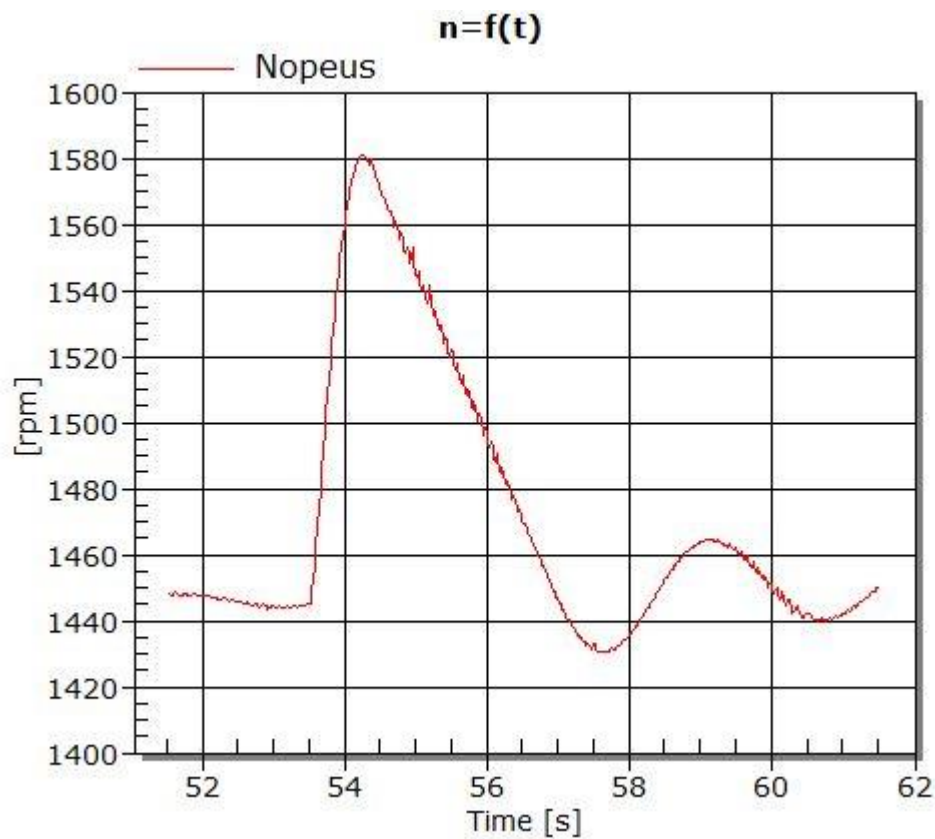
Kuva 21. Tahtireluktanssimoottorin nopeuden muutos, kun nimellismomentti pudotetaan pois.

Oikosulkumoottorin dynaaminen tarkkuus:

Vastaavasti, kun nimelliskuorma pudotetaan pois niin oikosulkumoottorin ylitysaika Δt on noin 3,5 s ja nopeuden huippu on noin 130 rpm. Oikosulkumoottorin dynaamiseksi tarkkuudeksi saadaan 15,69 % s.

$$D_o := \frac{\frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \Delta n}{n_N} \cdot 100 = 15.69 \% \text{ s}$$

(5)



Kuva 22. Oikosulkumoottorin nopeuden muutos, kun nimellismomentti pudotetaan pois.

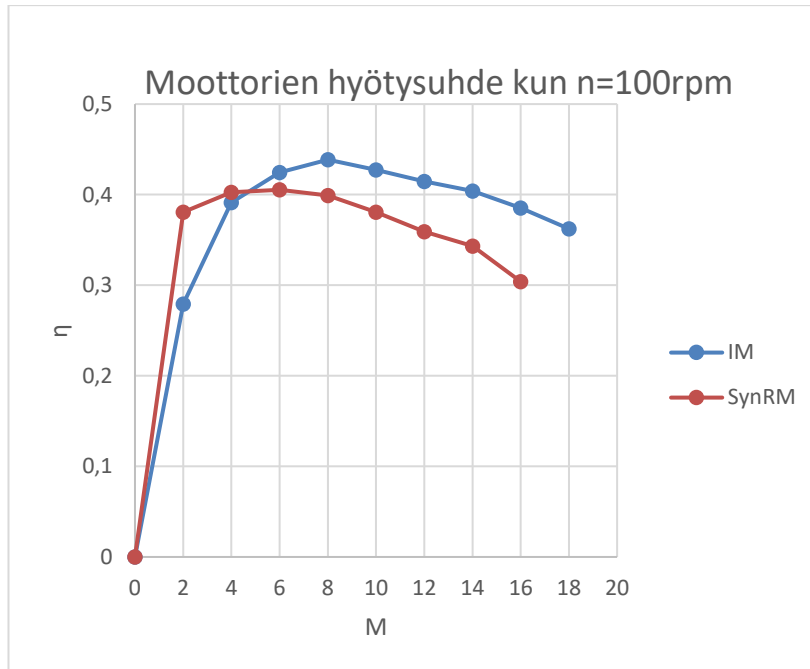
Hyötysuhteet

Tässä kohtaa käsitellään tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhteita neljällä eri nopeudella, nostamalla kuormaa niin paljon kunnes moottorin pyörimisnopeus tippuu tai se pysähtyy virtarajan tullessa vastaan. Teorian ja ABB:n taulukoiden perusteella tahtireluktanssimoottorilla kuuluisi olla hieman korkeampi hyötysuhde.

Pyörimisnopeus $n=100\text{rpm}$

Kun moottoreita pyöritetään pienellä pyörimisnopeudella eli 100 rpm, niin hyötysuhde on molemmilla alhainen. Hyötysuhde on tahtireluktanssimoottorilla pienellä kuormalla parempi kuin oikosulkumoottorilla. Hyötysuhde nousee molemmilla

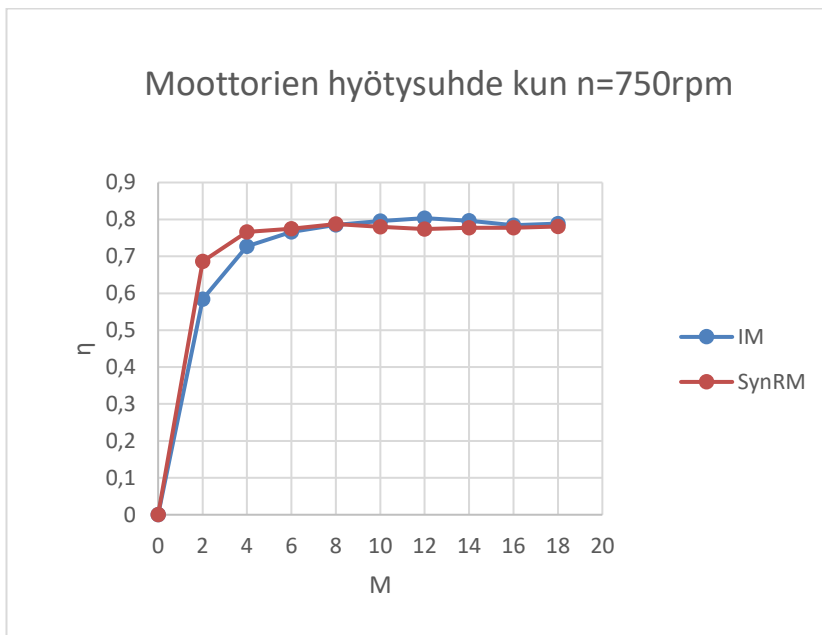
nopeasti lähelle huippuarvoaan, jonka jälkeen, kuorman kasvaessa, hyötysuhde laskee jyrkästi molemmilla. Oikosulkumoottorilla on huomattavasti korkeampi hyötysuhde tällä nopeudella, kun kuorma on suuri.



Kuva 23. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=100$ rpm.

Pyörimisnopeus $n=750$ rpm

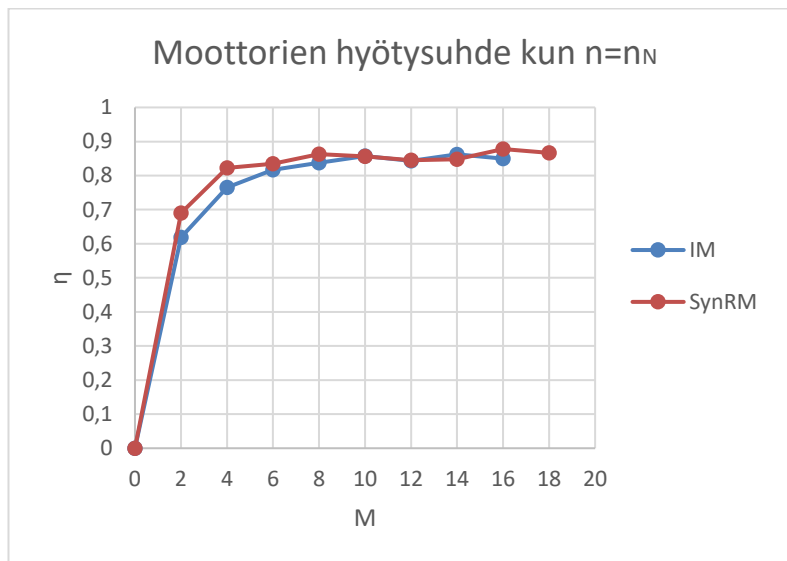
Tällä pyörimisnopeudella hyötysuhteet ovat kasvaneet noin 77-80 %. 750 rpm nopeudella vastaavasti pienellä kuormalla tahtireluktanssimoottorilla on suurempi hyötysuhde, mutta kun kuorma on suuri hyötysuhde tasoittuu ja on lähes samaa luokkaa molemmilla. Erona 100 rpm hyötysuhde ei lähde laskemaan suuremmilla kuormilla.



Kuva 24. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=750\text{ rpm}$.

Pyörimisnopeus $n=n_N$

Pyörimisnopeuden vastatessa moottoreiden omaa nimellisnopeutta, moottoreiden hyötysuhteet nousseet noin 85-89 %. Tahtireluktanssimoottorilla on pienellä kuormalla parempi hyötysuhde kuten aikaisemmin, mutta siirryttäessä suurempiin kuormiin hyötysuhteet ovat samaa luokkaa molemmilla.

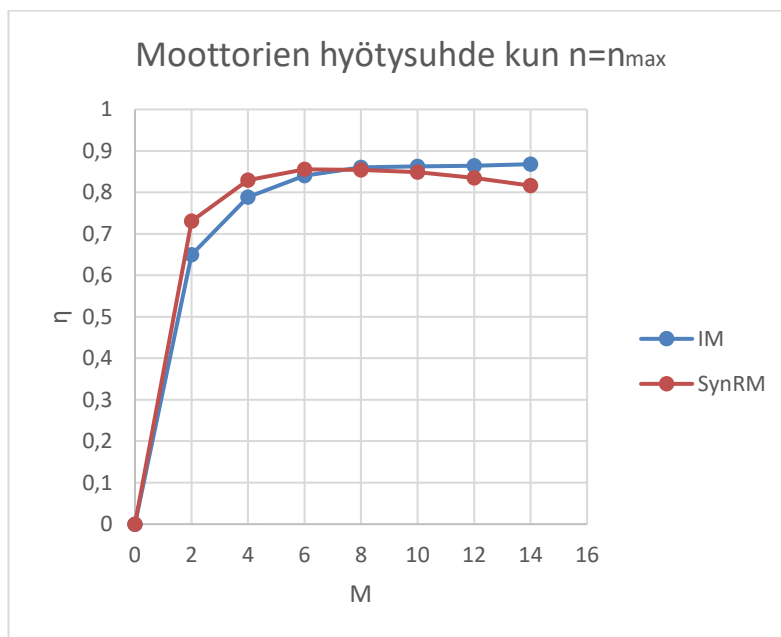


Kuva 25. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=n_N$.

Pyörimisnopeus $n=1,2x n_N$

Moottorien omalla maksimi pyörimisnopeudella tilanne on hyvin samantapainen kuin edellisissäkin kohdissa, eli pienellä kuormalla hyötysuhde on huonoin, mutta se nousee hyvin nopeasti kuorman kasvaessa ja tasoittuu. Tässä kohdassa kuitenkin poikkeuksena, tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde lähtee laskemaan 8 Nm ylittyessä. Sen sijaan oikosulkumoottorilla kuorman kasvaessa, hyötysuhde lähtee hieman nousemaan siinä kohtaa missä tahtireluktanssimoottorilla lähtee laskuun.

Moottorien omalla maksimi pyörimisnopeudella ei päästä enään yhtä suurin hyötysuhteisiin kuin nimellisnopeudella. Kuten kaikissa edellisissäkin nopeuksissa, tahtireluktanssimoottorilla on parempi hyötysuhde pienellä kuormalla. Siirryttäessä suurempiin kuormiin tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde lähtee laskemaan ja oikosulkumoottorilla se pysyy vakaana.



Kuva 26. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhde momenttiin nähden, kun $n=1,2x n_N$.

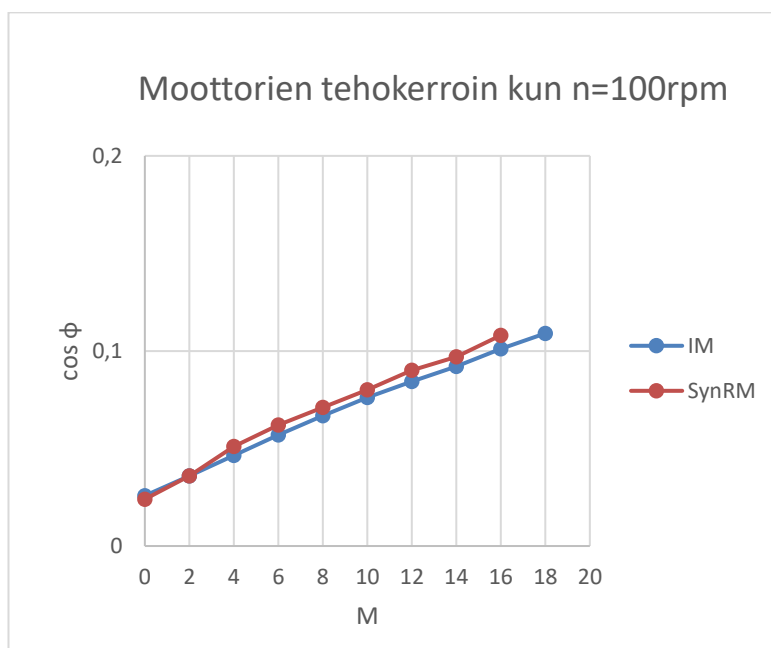
Tehokerroin

Tässä kohtaa on vastaavasti käsiteltynä samat mittaukset kuin hyötysuhdemittauksissa, mutta tällä kertaa verrataan tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerrointa. Teorian ja ABB:n taulukoiden perusteella vastaavasti oikosulkumoottorilla kuuluisi olla huomattavasti parempi tehokerroin suhteessa tahtireluktanssimoottoriin.

Tehokerroin kertoo pätötehon suhteen näennäistehoon. Optimaalisin tilanne on kun tehokerroin on 1, mikä tarkoittaa, että näennäisteho on pelkkää pätötehoa. Induktiivisilla kuormilla, kuten tässä tapauksessa, sähkömoottorit kuluttavat loistehoa, joka käytännössä tarkoittaa tehohäviötä. /18/

Pyörimisnopeus $n=100$ rpm

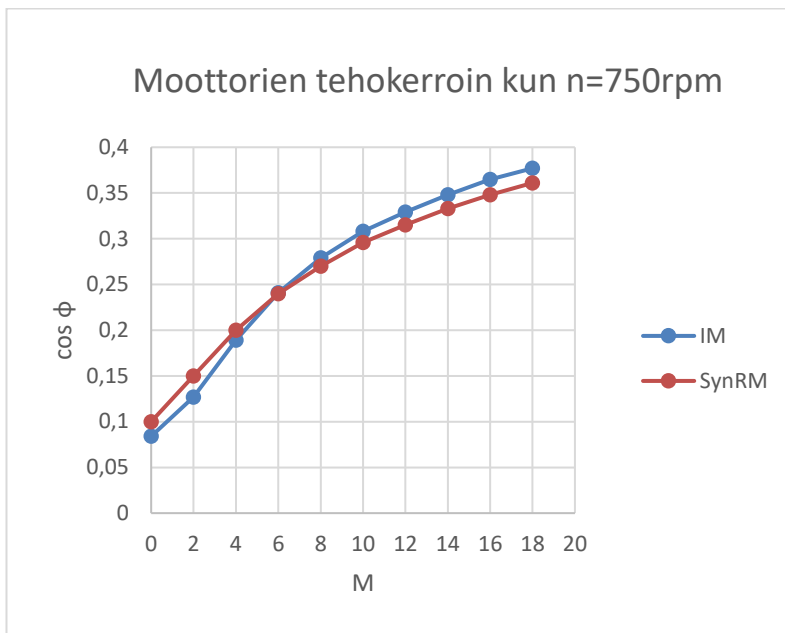
Kun pyörimisnopeus on vain 100 rpm, tehokerroin on erittäin huono. Yllättäen tahtireluktanssimoottorilla on kuitenkin hiukan parempi tehokerroin ja ero kasvaa hieman suuremmaksi kuorman kasvaessa.



Kuva 27. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=100$ rpm.

Pyörimisnopeus $n=750$ rpm

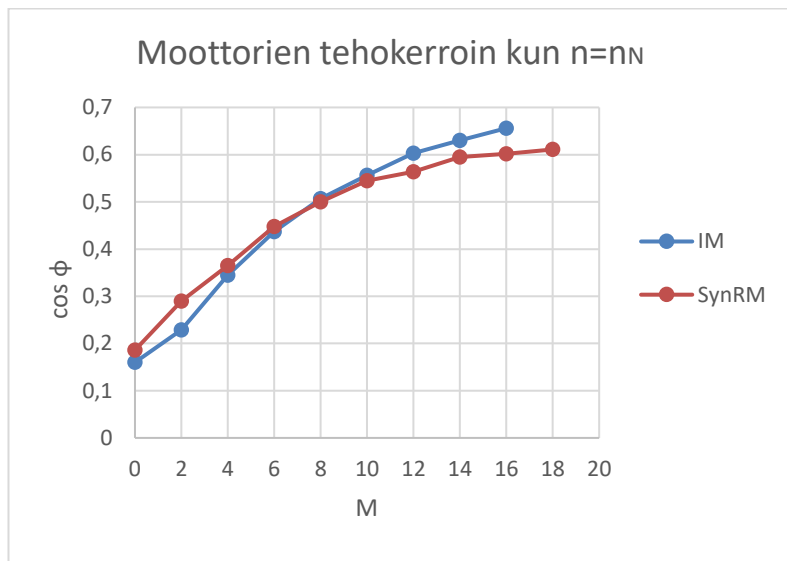
Siirryttäessä tilanteeseen kun pyörimisnopeus on 750 rpm, tilanne on toinen. Erot ovat edelleen hyvin pieniä, pienellä kuormalla tahtireluktanssimoottorilla on hieman korkeampi tehokerroin, mutta kun kuorma kasvaa, oikosulkumoottorin tehokerroin on parempi kuin tahtireluktanssimoottorilla.



Kuva 28. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=750$ rpm.

Pyörimisnopeus $n=n_N$

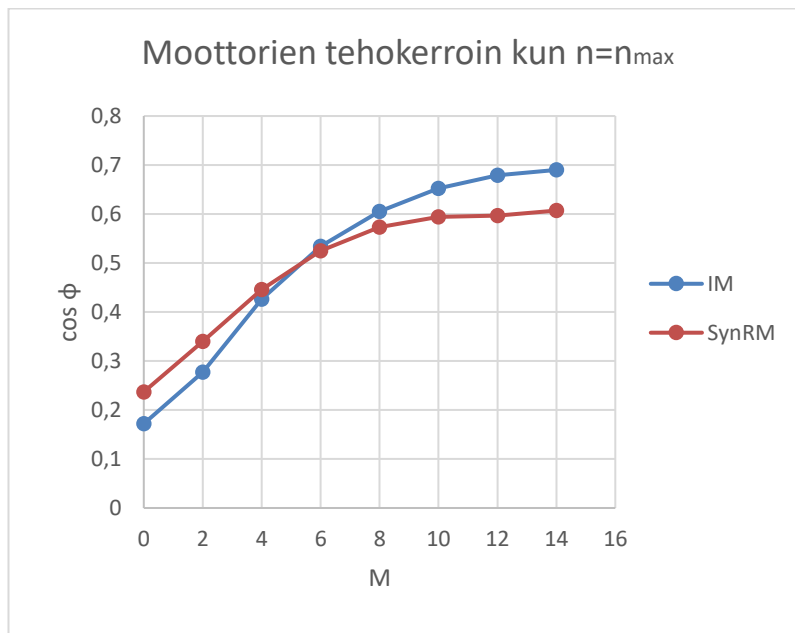
Moottoreiden omalla nimelliskäytännöllä pyörittäessä päädytään hyvin lähelle samaa tulosta kuin 750 rpm:n kohdalla. Erona näkyy, että tahtireluktanssimoottorin tehokerroin jämähtää lähes paikoilleen, kun kuorma kasvaa yli sen nimellismomentin. Oikosulkumoottorilla tehokerroin jatkaa kasvuaan vaikka kuorma nousee yli se nimellismomentin. Tehokerroin jää selvästi pienemmäksi kuin taulukkoarvoissa, koska näennäisteho lasketaan moottoria syöttävän PWM-tyyppisen jännitteen kokonaistehollisarvosta, joka on huomattavasti suurempi kuin perusaallon tehollisarvo.



Kuva 29. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=n_N$.

Pyörimisnopeus $n=1,2n_N$

Moottorien omalla maksimi pyörimisnopeudella vastaavasti pienellä kuormalla tahtireluktanssimoottorilla on hieman suurempi tehokerroin, mutta sen noustessa oikosulkumoottorilla on huomattavasti parempi. Kuitenkin erona nimellisa nopeudella pyörittäessä moottoreiden tehokertoimen ero on huomattavasti suurempi. Oikosulkumoottorilla on tehokerroin huomattavasti suurempi kuin tahtireluktanssimoottorilla.



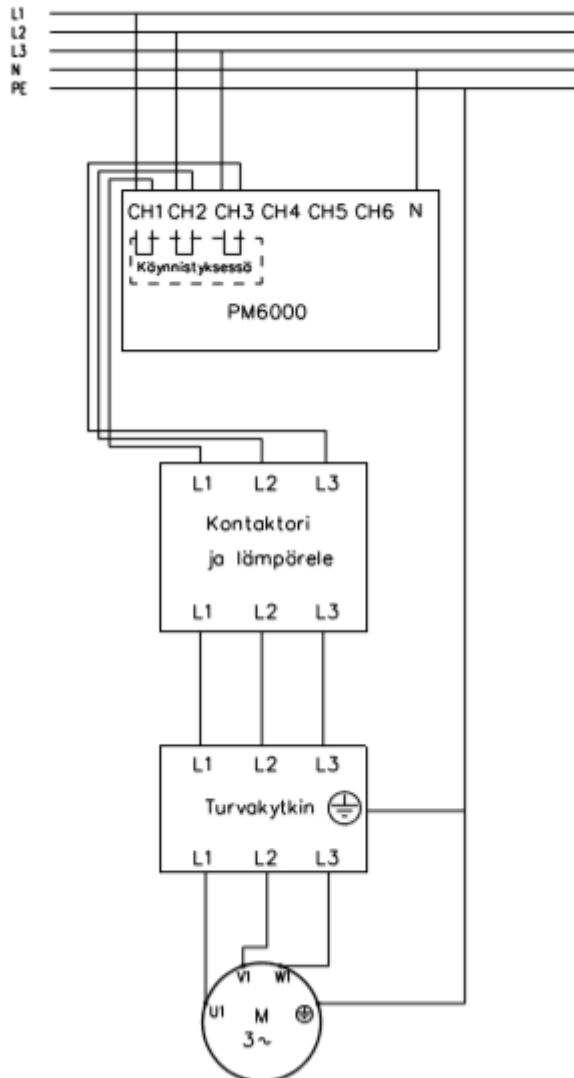
Kuva 30. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin tehokerroin momentin suhteen, kun $n=1,2 \times n_N$.

4.2 DOL-käyttö

Nykyään löytyy suoraan verkkoon liitettäviä reluktanssimoottoreita, joten voidaan tehdä vertailumittauksia DOL-käynnistyksellä tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin välillä.

DOL (Direct on Line) eli suora käynnistys on markkinoiden yleisin käynnistystapa. DOL-käynnistys on erittäin yksinkertainen käynnistystapa. Se koostuu pelkästään pääkontaktorista, lämpöreleestä ja oikosulkusuojana tavallisesti käytettävästä sulakkeesta. Tästä käynnistystavasta aiheutuu suuri käynnistysvirta ja -momentti. Oikosulkumoottorilla ja tahtireluktanssimoottorilla käynnistysvirta on noin 7-8 kertaa suurempi kuin moottorin nimellisvirta ja sen sijaan oikosulkumoottorin momentti käynnistyksessä on noin 2-3 kertaa suurempi kuin moottorin nimellismomentti. Tahtireluktanssimoottorilla vastaavasti käynnistysmomentti on samaa luokkaa. /13/

DOL-käyttöä varten tarvitaan erillinen kontaktori ja lämpörele, jotta DOL-käyttö voidaan toteuttaa, sekä painonapit moottorin käynnistykseen ja pysäytykseen.



Kuva 31. DOL-käytössä käytetty kytkentä.

4.2.1 Moottorit

Mittauksen vertailussa on mitattavana EX-oikosulkumoottori, koska laboratorioista ei löytynyt vastaavan tehoista normaalia oikosulkumoottoria. Tästä syystä on valittu EX-kone ja saman kokoinen ABB:n prototyyppi tahtireluktanssimoottori.

Moottorien nimellisarvot:

Taulukko 5. 5,5kW oikosulkumoottorin ja SynRM:n nimellisarvot.

Moottorit	EX oikosulkumoottori	SynRM	
KytKentätapa	D	D	
Napapari	2	2	
U	400	400	V
I	11,4	11,5	A
P	5,5	5,5	kW
M	36	35	Nm
n	1458	1500	rpm
f	50	50	Hz
cosφ	0,79	0,68	
Paino	98	47	kg
Runkokoko	132	132	
Hyötysuhde luokka	IE2	IE2	
Kotelointi luokka	IP55	IP55	
Käyttö	S1	S9	

4.2.2 Mittalaitteet

Voltech PM6000

Taajuusmuuttajaohjauksessa käytettyä Voltech PM6000 tehoanalysaattoria käytetään myös DOL-käytöllä. Sen lisäksi tehoanalysaattori tarvitsee erillisen kytkimen, jolla ohitetaan käynnistyksestä syntyvä suuri virta oikosulkemalla virtapää.

Oskilloskooppi

Taajuusmuuttajaohjauksessa käytettyä oskilloskooppia käytetään näissäkin mittauksissa.

Catman Easy-AP

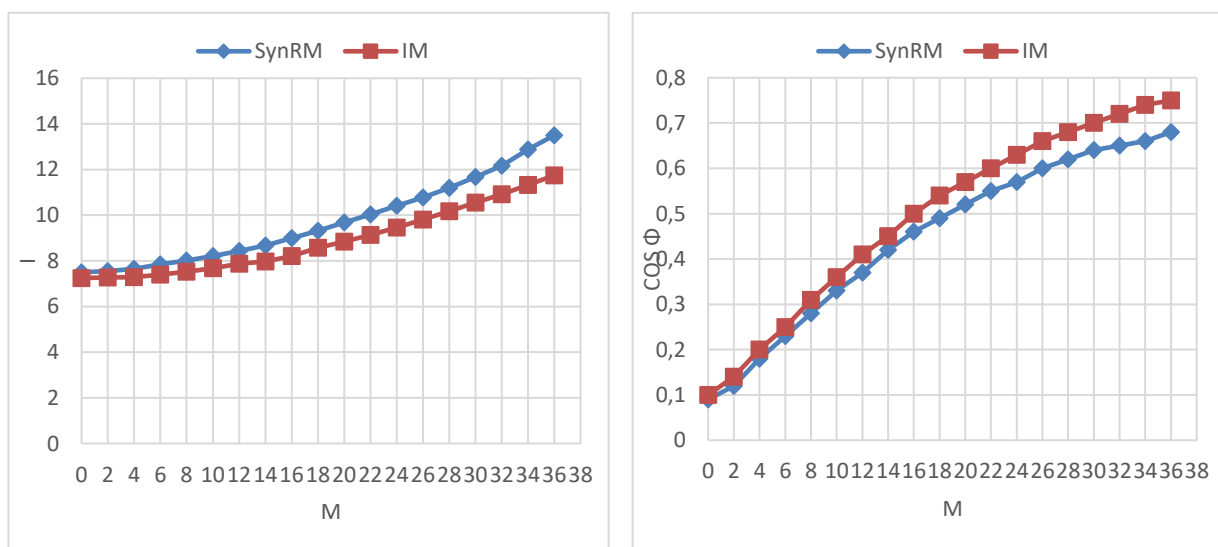
Taajuusmuuttajamittauksissa käytettyä Catman Easy-AP sovellusta käytetään myös näissä mittauksissa, jotta voidaan havainnollistaa momentin ja nopeuden muutosta käynnistyksessä.

4.2.3 Mittaukset

DOL-käytössä suoritettavissa mittauksissa kiinnitetään erityisesti huomiota moottorin ottamaan käynnistysvirtaan ja -momenttiin. Suoraan verkkoon liitettävät tahtireluktanssimoottorit ovat varsin uusi keksintö, mikä antaa sille lisää vaihtoehtoisia käyttöjä.

Virta ja tehokerroin momenttiin nähden

DOL-käytöllä moottoreiden erot ovat pienemmät kuin taajuusmuuttajaohjauksella. Kuten kuvasta 31 huomataan, tahtireluktanssimoottorilla on hieman suurempi virta kuin oikosulkumoottorilla virran kasvaessa ja tehokerroin oikosulkumoottorilla on hieman korkeampi kuin tahtireluktanssimoottorilla.

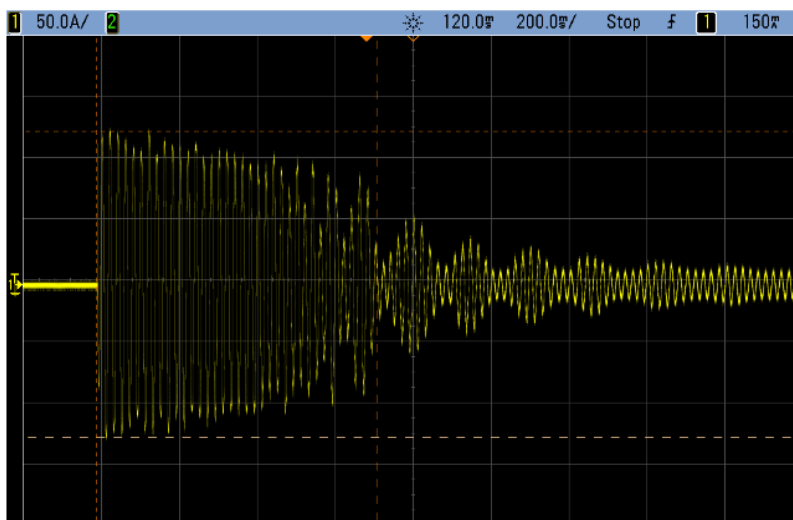


Kuva 32. Tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin virta ja tehokerroin momenttiin nähden.

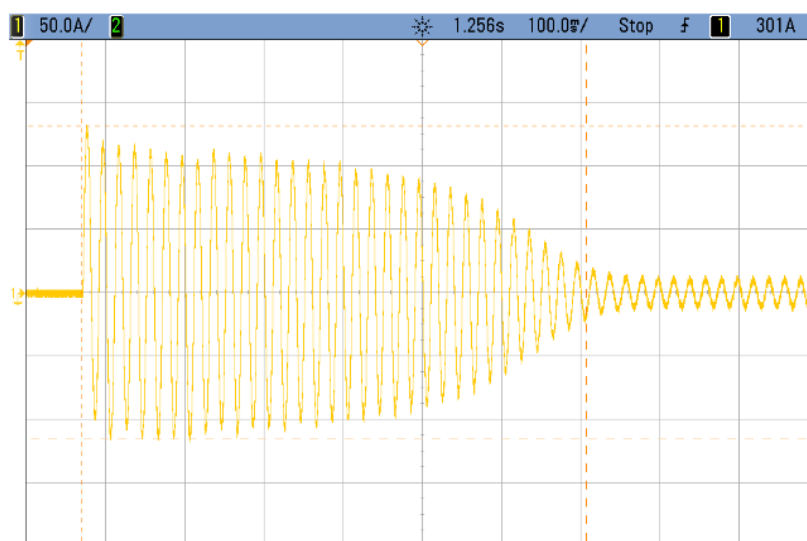
Käynnistysvirta

Oskilloskooppilla otetuissa kuvissa 22 ja 23 on näkyvissä käynnistysvirta ilman kuormaa. Kuvissa 24 ja 25 on näkyvissä käynnistysvirta täydellä kuormalla. Ilman kuormaa olevassa tilanteessa tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirta on 125A ja

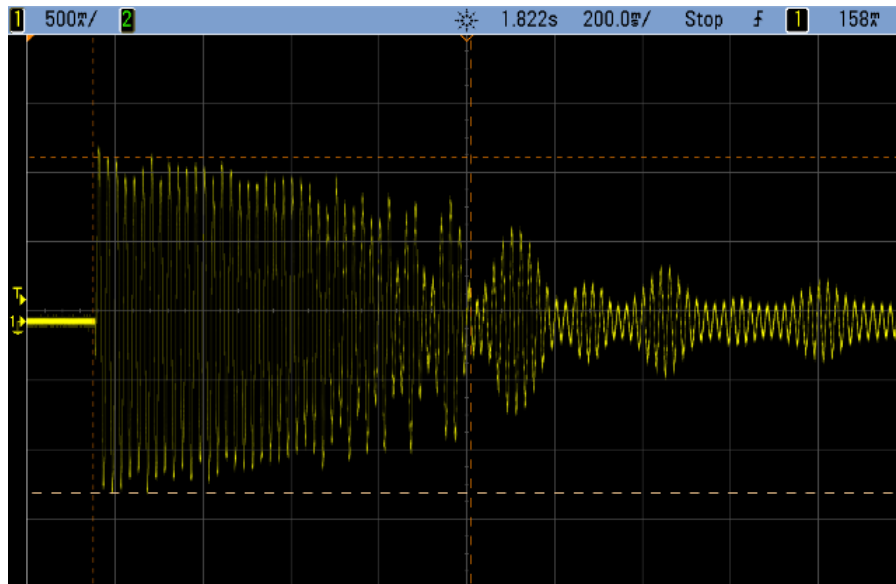
oikosulkumoottorin 132A. Täydellä kuormalla olevassa tilanteessa tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirta on 124A se ei kuitenkaan kyennyt käynnistymään tällä virralla ja oikosulkumoottorilla 121A. Virta käynnistysessä on suuri, koska DOL-käytössä moottori ottaa noin 7-8 kertaisen virran nimellisvirtaan nähden. Tahtireluktanssimoottori ei kyennyt käynnistymään ilman, että tippui tahdistusta täydellä kuormalla ja tähän viitataan lisää vielä myöhemmin. Tahtireluktanssimoottorin virta huojuu käynnistyksen aikana.



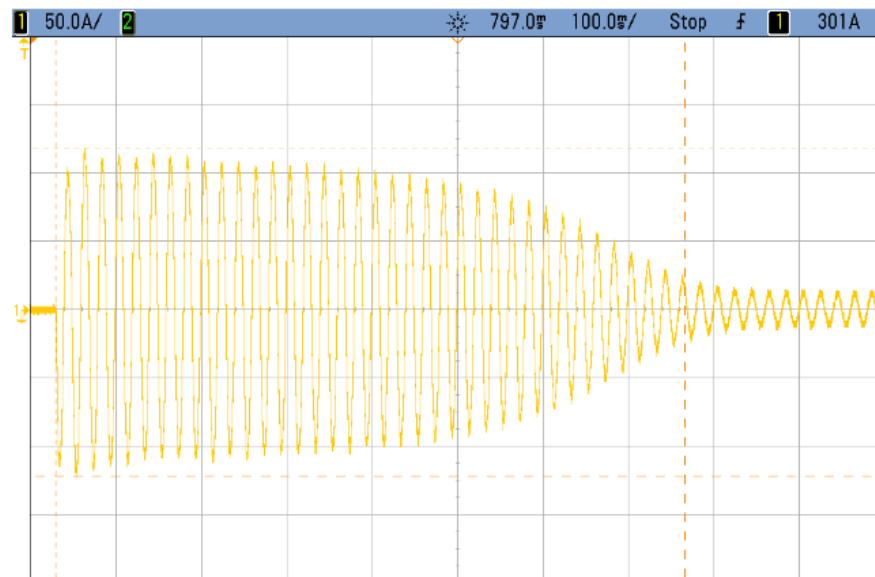
Kuva 33. Oskilloskooppikuva tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirrasta ilman kuormaa.



Kuva 34. Oskilloskooppikuva oikosulkumoottorin käynnistysvirrasta ilman kuormaa.



Kuva 35. Oskilloskooppikuva tahtireluktanssimoottorin käynnistysvirrasta täydellä kuormalla.



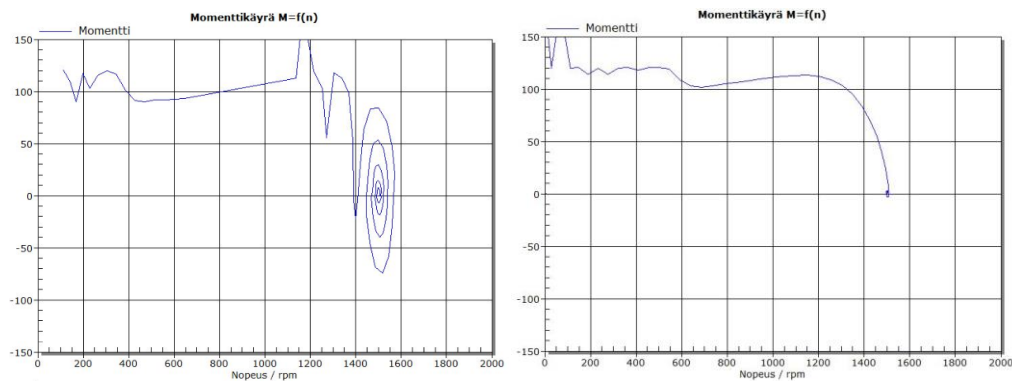
Kuva 36. Oskilloskooppikuva oikosulkumoottorin käynnistysvirrasta täydellä kuormalla.

Momenttikäyrät käynnistyksessä

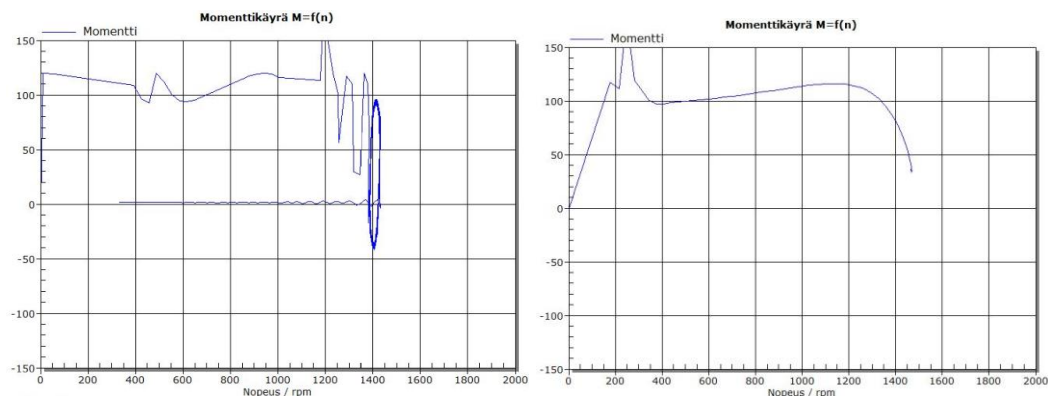
Momenttikäyräosiossa ovat momentti nopeuden ja ajan funktiona. Mittaustulosten tarkkuuten vaikutti laitteiston maksimimomentti, jonka takia se ei kyennyt mitaamaan todellista maksimimomenttia käynnistyksessä. Kaikki kuvan yläpuolelle menevät huiput ovat virheellisiä.

Momentti suhteessa pyörimisnopeuteen

Verrattaessa tilanteita, joissa seurataan käynnistysmomentin vaikutusta pyörimisnopeuteen kuvissa 26 ja 27, nähdään kuinka tahtireluktanssimoottorin momentti heilahtelee paljon käynnistyksen aikana, jonka seurauksena pyörimisnopeus myös vaihtelee rajusti. Kuvassa 27 tahtireluktanssimoottorin saavuttaessa loppunopeuden 1400 rpm, johon se jämähtää täydellä kuormalla. Tahtireluktanssimoottori piti pysäyttää, kun se käynnistettiin nimellismomentilla, koska se putosi tahdist. Vastaavasti oikosulkumoottorilla tilanne on toinen, sillä momentti pysyy vakaana, jolloin myös nopeus pysyy vakaana.



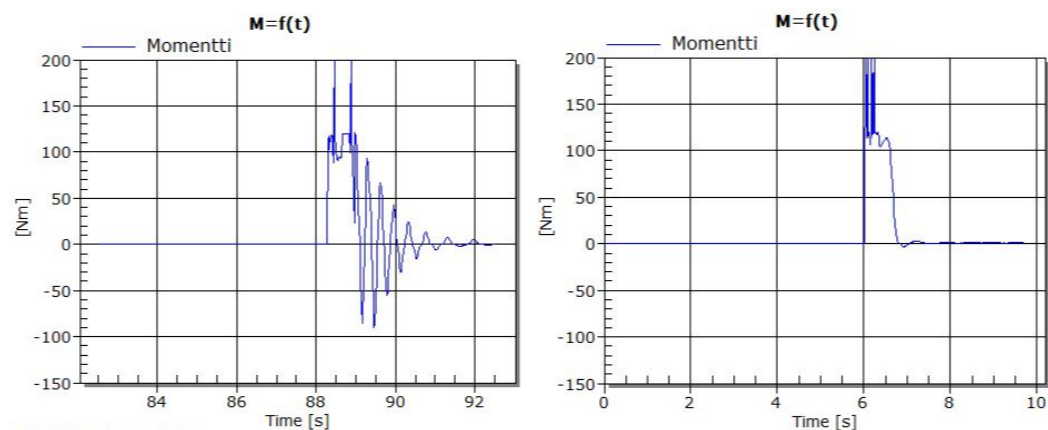
Kuva 37. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti nopeuden funktiona ilman kuormaa.



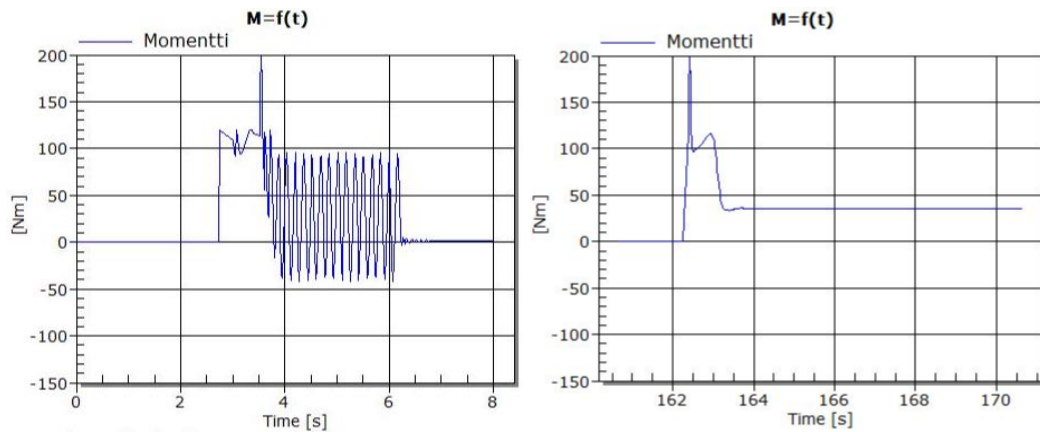
Kuva 38. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) momentti nopeuden funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla.

Momentti suhteessa aikaan

Momentti ajan funktiona olevassa tilanteessa, kuvissa 28 ja 29, nähdään tarkemmin moottorien momentin käyttäytyminen käynnistyksessä. DOL-käynnistykseen tyypillisesti moottorit ottavat suuren käynnistysmomentin, mutta sen sijaan tahtireluktanssimoottorilla momentti jää heilahtelemaan, kunnes se palautuu. Tahtireluktanssimoottorin nimelliskuormalla toteutetussa käynnistyksessä momentti jää heilumaan, mutta on kuitenkin keskiarvossaan nimellinen ja lopuksi pysäytetty. Oikosulkumoottorin käynnistysmomentti pysyy vakaana.



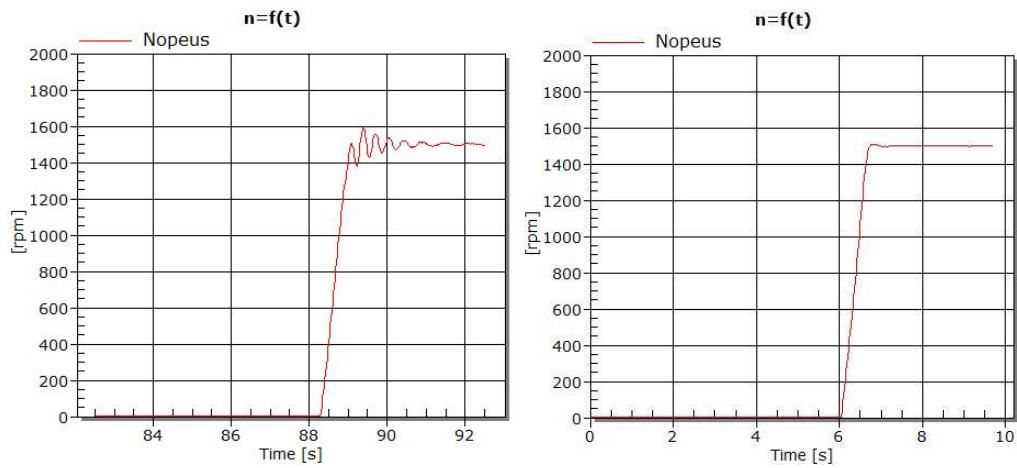
Kuva 39. Tahtireluktanssimootorin (oik) ja oikosulkumootorin (vas) momentti ajan funktiona ilman kuormaa.



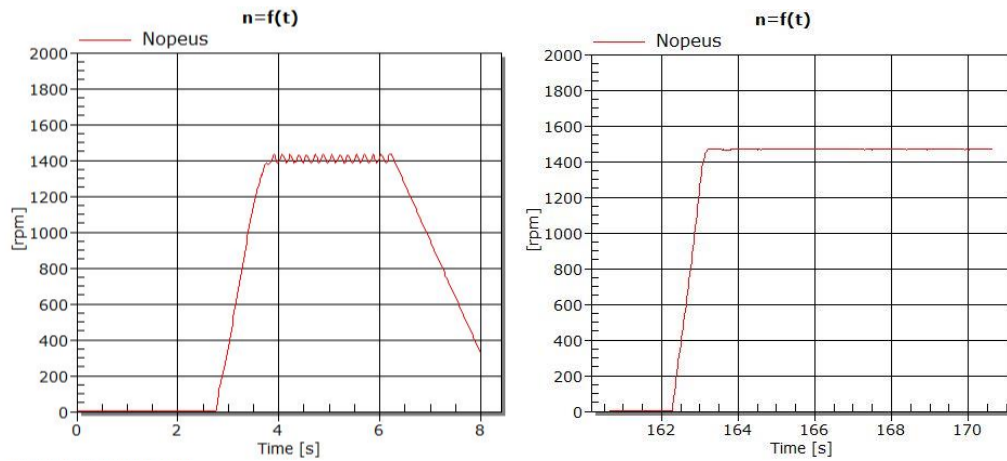
Kuva 40. Tahtireluktanssimootorin (oik) ja oikosulkumootorin (vas) momentti ajan funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla

Pyörimisnopeuskäyrät käynnistyksessä

Pyörimisnopeuskäyrissä, kuvissa 30 ja 31, nähdään sama tilanne kuin momenttikäyrissä. Suuri momentin vaihtelu tahtireluktanssimootorin käynnistyksessä saa nopeuden värähtelemään ennen kuin se vakaantuu. Tahtireluktanssimootorin täydellä kuormalla olevassa tilanteessa nähdään kun moottorin pyörimisnopeus jää paikalleen värähtelemään alisynkronisella nopeudella 1400 rpm kohdalle saavuttamatta nimellisuopeuttaan, kunnes se pysäytetään. Oikosulkumootorin pyörimisnopeus pysyy vakaana molemmissa tilanteissa.



Kuva 41. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) nopeus ajan funktiona ilman kuormaa.



Kuva 42. Tahtireluktanssimoottorin (oik) ja oikosulkumoottorin (vas) nopeus ajan funktiona täydellä kuormalla eli moottorien omalla nimellismomentilla

5 LOPPUYHTEENVETO

Aloitetaan aluksi käymällä läpi reluktanssimoottoreita keskenään. Eli SRM on askelmoottori ja tahtireluktanssimoottori on tahtimoottori. SRM:n käytöt rajoittuvat pientä vääntömomenttia vaativiin käyttöihin, sen sijaan tahtireluktanssimoottorilla ei ole vastaavia rajoitteita. SRM:n syöttö puolisolilla konvertterilla on huomattavasti kalliimpaa kuin verrattaessa tahtireluktanssimoottorissa käytettävää jännitelähde invertteriä, jota käytetään myös oikosulkumoottoreissa. Tahtireluktanssimoottorilla on samanlainen staattori kuin oikosulkumoottoreilla, joten se antaa edun SRM:n nähden, koska on huomattavasti helpompi siirtyä kyseiseen moottorityyppiin johon löytyy valmiiksi jo staattorit. Roottorit ovat samasta materiaalista tehty, mutta tahtireluktanssimoottoriin on muotoiltu vuoreitit ja SRM:n roottorit sen sijaan sauvoiksi. SRM:n suurin ongelma on ollut momentin pulsaatio ja siitä syntyvä kova ääni ja tahtireluktanssimoottorilla tehokerroin. Tahtireluktanssimoottorin edut SRM:n verrattuna on sen halvempi hinta, laajemmat käyttömahdollisuudet ja staattori.

Oikosulkumoottori on epätahtimoottori ja se maailman käytetyin sähkömoottorityyppi. Sen edut ovat yksinkertainen rakenne, edullisuus ja hyvä suorituskyky. Sen kehitys on kuitenkin alkanut saavuttaa päätepisteensä. Jos sen hyötysuhdetta halutaan parantaa, joudutaan lisäämään teräksen ja kuparin määrää ja käyttämään roottorissa kuparista häkkikäämitystä. Nämä lisäykset aiheuttavat suuremman roottorin ja staattorin, joka taas nostaa hintaa.

Tahtireluktanssimoottori on jo ennestään samaa hintaluokkaa tai jopa halvempi tehdä kuin oikosulkumoottori, sekä sillä on hieman korkeampi hyötysuhde, koska sen roottori ei synny juuri mitään rautahäviöitä eikä erityisesti virtalämpöhäviöitä. Tahtireluktanssimoottorilla kuitenkin tehokertoimen parantaminen on tärkeää ja sen parantaminen on mahdollista mm. muuttamalla roottorin magneettista laminointia tai käyttämällä ferriittikestomagneetteja.

Laboratoriotestit, jotka tässä opinnäytetyössä on tehty, eivät ole absoluuttisen tarkkoja tuloksia, joten ne ovat enemmän suuntaa antavia. Aloitetaan taajuusmuuttajaohjauksesta aluksi eli tahtireluktanssimoottoreilla pitäisi olla noin 2-5 %

parempi hyötysuhde jos verrataan taulukkoja 1 ja 2 keskenään. Pienellä pyörimisnopeudella molempien hyötysuhteet olivat huonot, mutta siirryttäessä nimellisnopeuksiin, hyötysuhteet lähenivät 90 %:a. Tahtireluktanssimoottorilla oli pienillä kuormilla suurempi hyötysuhde, mutta siirryttäessä suurempiin kuormiin hyötysuhteet olivat joko samaa luokkaa tai oikosulkumoottorilla se oli parempi. Sen sijaan tehokertoimessa nähtiin suuri ero suuremmilla pyörimisnopeuksilla, joka vastasi juuri sitä mitä osasi odottaa. Molempien moottoreiden dynaaminen tarkkuus oli todella huono, mutta oikosulkumoottorilla se oli kuitenkin hieman yli 5 % s parempi kuin tahtireluktanssimoottorilla.

Suoraan verkkoon liitettävät tahtireluktanssimoottorit ovat vasta viime aikoina tulleet markkinoille. DOL-käytön mittauksissa keskityttiin lähtökohtaisesti käynnistysvirtaan ja -momenttiin. Ilman kuormaa olevassa tilanteessa käynnistysvirta ja momentti olivat hyvin samaa luokkaa, mutta tahtireluktanssimoottorilla oli suurta momentin vaihtelua, mikä aiheutti nopeuden heilahtelua ennen kuin se vakaantui. Täydellä kuormalla oikosulkumoottorilla ei mitään suurempia poikkeuksia, mutta jostain syystä tahtireluktanssimoottori putosi tahdistasta ennen kuin se pääsi nimellispyörimisnopeuteensa. Syytä miksi näin tapahtui ei löytynyt, mutta se kuitenkin vaikutti käynnistysvirran ja -momentin suuruuteen.

Tahtireluktanssimoottorilla on hyvät mahdollisuudet menestyä, koska sillä on erittäin hyvä suorituskyky, mutta sen merkittävämmäksi heikkoudeksi jää tehokerroin. Tahtireluktanssimoottorin edut eivät ole vielä merkittävästi paremmat kuin oikosulkumoottorilla, minkä takia kuluttajat eivät lähiaikoina ole siirtymässä lähtökohtaisesti käyttämään tahtireluktanssimoottoreita. Tulevaisuudessa tämä on kuitenkin hyvin mahdollista, koska tahtireluktanssimoottorin potentiaali on kuitenkin suuri. Tahtireluktanssimoottorille on tärkeintä parantaa tehokerrointa. Sitä voidaan parantaa joko muuttamalla magneettista laminoitua roottorissa tai lisäämällä ferritikestomagneetteja roottoriin, jotta se saadaan halutulle tasolle.

LÄHTEET

/1/ Collins, D. 2017. Viitattu 15.1.2019. <https://www.motioncontroltips.com/how-do-switched-reluctance-motors-differ-from-stepper-motors/>

/2/ Kumar, D. 2016. Review of Synchronous Reluctance Motors. The University of Texas

/3/ Subramaniam. S. 2017. Design of Switched Reluctance Motor using Ansys Maxwell. Indian Institute of Technology Madras

/4/ Dhanaji, K.K. 2016. Comparative Study of Pi and Fuzzy Controllers to Minimize Periodic Torque and Speed Ripples in Switched Reluctance Motor. FAB-TECH College of Engineering and Research

/5/ Wenue, W., Xiaoyong, Z., Li, Q. & Deyang, F. Zi. 2017. Characteristic analysis of a less-rare-earth hybrid PM-assisted synchronous reluctance motor for EVs application. AIP Advances 01 May 2017, Vol.7(5), pp.056648-056648-6

/6/ Dobriyan, R., Lavrinovicha, L. & Dirba, J. 2016. Study of the Synchronous Reluctance Motor Design. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences

/7/ Moghaddam, R.R. 2017. Synchronous Reluctance Machine. Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering

/8/ ABB. Esite. 2014. Viitattu 31.1.2019. Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders.

/9/ Verkkonen, V. 2014. Tahtikoneet. Vaasa. VAMK. opetusmateriaali.

/10/ Jokinen, K. Moottorikäyttöjen säätö. Vaasa. VAMK. opetusmateriaali.

/11/ ABB. Katalogi. 2018. Low voltage process performance motors.

/12/ What-when-how artikkeli. Viitattu 3.2.2019. <http://what-when-how.com/electric-motors/history-of-switched-reluctance-machine-electric-motor/>

/13/ ABB. Pehmökäynnistinopas. Viitattu 19.2.2019. https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf

- /14/ ABB. Moottoriohje. 2014. Viitattu 18.2.2019. Low voltage motors
- /15/ ABB. Katalogi. 2017. Viitattu 18.2.2019. ABB industrial drives ACS880, single drives 0.55 to 3200 kW
- /16/ Harju, J. 2013. ACS880 Toiminnallisuus. Opinnäytetyö. Vaasa. VAMK
- /17/ Suomela, P. 2013. SYNKRONIRELUKTANSSIMOOTTORIN JA OIKO-SULKUMOOTTORIN VERTAILU. Opinnäytetyö. Tampere. TAMK
- /18/ Viitattu 18.3.2019. https://en.wikipedia.org/wiki/Power_factor

