

Kimmo Hirvonen

Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdemittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

5.5.2015

Tekijä Otsikko	Kimmo Hirvonen Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdemittaukset
Sivumäärä Aika	32 sivua + 2 liitettä 5.5.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	lehtori Eero Kupila
<p>Tässä insinööriyössä mitattiin tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdetta, eri pyörimisnopeuksilla ja kuormilla, ja verrattiin saatuja mittaustuloksia samankokoiseen oikosulkumoottoriin. Työn tarkoituksena oli selvittää tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde. Työ käsittelee sähkömoottoreista oikosulkumoottoria ja tahtireluktanssimoottoria. Työssä ei käydä läpi muita sähkömoottoreita tarkemmin.</p> <p>Lisäksi työssä käsitellään taajuusmuuttajaa ja erilaisia ohjaustapoja taajuusmuuttajalla sekä hyötysuhteita moottoreilla että niihin liittyviä hyötysuhdestandardeja ja hyötysuhteen eri mittaamenetelmiä.</p> <p>Hyötysuhde direktiiveistä käsitellään sekä vanhaa hyötysuhdestandardia että uutta. Moottorin hyötysuhde on tärkeä ominaisuus, kun prosessiin valitaan moottoreita. Hyvän hyötysuhteen ansiosta moottorin elinkaarikustannukset pienenevät ja moottorin elinikä pitenee.</p> <p>Työn lopputulos ei ollut paras mahdollinen, koska mittaamenetelmä ei tuottanut toivottua tulosta hyötysuhteen laskemiseen, mutta työn tuloksia voidaan hyödyntää uusien opiskelijoiden tulevien laboratoriotyöharjoitusten suunnittelussa.</p>	
Avainsanat	acs-880, tahtireluktanssimoottori, oikosulkumoottori, hyötysuhde

Author Title	Kimmo Hirvonen Efficiency Measuring of the Synchronous Reluctance Motor
Number of Pages Date	32 pages + 2 appendices 5 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>In this thesis the efficiency rate of the synchronous reluctance motor is measured and the received measurement results are compared with the short circuit motor of the same size at separate rotational frequencies and loads. The purpose was to determine the efficiency rate of the synchronous reluctance motor. This work is about short circuit motor and synchronous reluctance motor that are electric motors. The other electric motors are not handled in more detail.</p> <p>This work describes frequency converter, its different usages, efficiency rates and standards and also separate measuring methods of the efficiency rate.</p> <p>Both the old efficiency rate standards and the new are handled. The advantage relation of the motor is in an important role when motors are chosen to the process. Due to a good efficiency rate, the lifespan costs of the motor become smaller and the lifetime of the motor is longer.</p> <p>The final result of the work was not the best possible, because the measuring method did not produce a desired result for the calculation of the efficiency rate. The results of thesis can be utilized in the planning of Metropolia students' future laboratory work training.</p>	
Keywords	acs-880, synchronous reluctance motor, short circuit motor, efficiency

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömoottorit	1
2.1	Teollisen tuotannon historia	1
2.2	Erilaisia sähkömoottoreita	1
3	Oikosulkumoottori	2
4	Reluktanssimoottori	3
4.1	Erot oikosulkumoottoriin	6
4.2	Reluktanssimoottorin toimintaperiaate	6
5	Taajuusmuuttajat	8
5.1	Taajuusmuuttajan historiaa	8
5.2	Taajuusmuuttaja	8
5.3	Taajuusmuuttajan toiminta	8
6	Erilaisia ohjaustapoja taajuusmuuttajalla	9
6.1	Skalaariohjaus ja -säätö	9
6.2	Vektorisäätö	10
6.3	Suora vääntömomentin säätö eli DTC	10
7	Sähkömoottorin hyötysuhde	11
7.1	Hyötysuhde standardit	11
7.2	Eurooppalainen hyötysuhdeluokitus	11
7.2.1	Hyötysuhdeluokituksen historia	11
7.2.2	Hyötysuhdeluokituksen nykytila	11
7.3	ErP-direktiivi	14
7.4	Hyvän hyötysuhteen edut	14
7.5	Hyvän hyötysuhteen haitat	15
7.6	Moottorin elinkaarikustannukset	16

7.7	Hyötysuhteen mittaustavat	16
8	Laboratorio mittaukset	17
8.1	Mittauksissa käytetyt moottorit	17
8.2	Mittauksissa käytetyt muut laitteet	18
8.3	Taajuusmuuttaja	19
8.4	Mittaustapa ja -kytkentä	19
8.4.1	Työssä käytetty mittaustapa	19
8.4.2	Työssä käytetty mittauskytkentä	21
9	Mittaustulokset	22
9.1	Oikosulkumoottorista lasketut tulokset	22
9.2	Hyötysuhde oikosulkumoottorilla	23
10	Päätelmät mittauksista	24
10.1	Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde	24
10.2	Pienjännite prosessimoottorit	25
11	Yhteenveto mittauksista	26
12	Vaihtoehtoisia mittausten menetelmiä	26
12.1	Taajuudenmuuttaja jarruvastuksella	26
12.2	Hyötysuhteen mittaus vaihtoehtoisella mittausten menetelmällä	27
12.3	Mittauksissa käytetty mittaustapa ja -laitteet	27
12.4	Mittauksissa käytetty mittauskytkentä	28
12.5	Mittaustulokset	28
13	Yhteenveto vaihtoehtoisesta mittauksesta	30
13.1	Taajuudenmuuttaja verkkoon jarrutuksella	30
13.2	Yhteinen välipiiri taajuudenmuuttajissa	30
14	Loppusanat	30
	Lähteet	31
	Liitteet	
	Liite 1. Low Voltage Process Performance Motors According to EU MEPS	
	Liite 2. Mittauspöytäkirja	

Lyhenteet

C	kapasitanssi
$\cos\varphi$	tehokerroin
ErP	Ecodesign of Energy-related Products; ekologista suunnittelua koskeva EU:n direktiivi
IM	oikosulkumoottori
I_n	nimellisvirta
L_d	pitkittäinen induktanssi
L_q	poikittainen induktanssi
MEPS	Minimum Energy Performance Standard; EU:n asetus, joka kertoo pakollisen energiatehokkuuden vähimmäisstandardin oikosulkumoottoreille EU:n alueella
η_n	nimellishyötysuhde
P_n	nimellisteho
P_{LL}	lisähäviöt
Q	loisteho
R_m	magneettivastus
rpm	kierrosta minuutissa
S	näennäisteho
$\sin\varphi$	loistehon tehokerroin
SynRM	synkronireluktanssimoottori

U_n	nimellisjännite
VA	voltiampeeri
var	vari
X_d	pitkittäisreaktanssi
X_q	poikittäisreaktanssi
δ	tehokulma
μF	mikrofaradi
ω	kulmanopeus

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä mitattiin tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdetta, eri pyörimisnopeuksilla ja kuormilla, ja verrattiin saatuja mittaustuloksia samankokoiseen oikosulkumoottoriin. Työ toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Helsingin sähkökonelaboratoriossa syksyllä 2014 ja keväällä 2015. Työn tuloksia on mahdollista hyödyntää esimerkiksi uusien sähkövoimatekniikan opiskelijoiden tulevien sähkökonelaboratorioharjoitusten suunnitteluun ja toteutukseen.

Tämä insinööriyö käsittelee sähkömoottoreista oikosulkumoottoria sekä tahtireluktanssimoottoria. Lisäksi työssä käsitellään ACS880 -taajuudenmuuttajaa sekä erilaisia ohjaustapoja taajuusmuuttajalla. Työssä ei käydä läpi muita sähkömoottorityyppejä tarkemmin. Pääsisältönä työssä on tahtireluktanssimoottori sekä tahtireluktanssimoottorin ja oikosulkumoottorin hyötysuhteet että niihin liittyvät sähkömoottoreiden hyötysuhdestandardit sekä hyötysuhteen eri mittausmenetelmät.

2 Sähkömoottorit

2.1 Teollisen tuotannon historia

Ennen sähkömoottoreita ihminen tuotti erilaisia tuotteita ensin hyödyntäen tuuli- ja vesivoimaa. Seuraava askel tehokkaampaan tuotantoon oli höyrykone, joka olikin selvästi vesivoimaa tehokkaampi voimakone. Sähkömoottori syrjäytti höyrykoneen 1900-luvulla.

Suomessa ensimmäinen merkittävä työkoneiden sähköistys toteutui Turussa, Barkerin puuvillatehtaassa, jossa useita satoja kutomakoneita muutettiin sähkökäyttöisiksi asentamalla niihin pienet vaihtovirtasähkömoottorit [1].

2.2 Erilaisia sähkömoottoreita

Sähkömoottorilla muutetaan sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Jos mekaaninen energia muutetaan sähköiseksi energiaksi, puhutaan sähkögeneraattorista. Sähkömoott-

torin toiminta perustuu magneettikentässä olevan virrallisen johdinsilmukan ja magneettikentän väliseen voimavaikutukseen. Sähkömoottorin magneettikenttä synnytetään sähkömagneettisesti magnetointikäimityksen avulla [2, s.304.].

Sähkömoottoreita ovat tasasähkö- ja vaihtosähkömoottorit. Tasasähkömoottorit voidaan jakaa magnetoinnin perusteella vierasmagnetoituihin moottoreihin, sivuvirtamoottoreihin, sarjamoottoreihin tai yhdysvirtamoottoreihin. Vierasmagnetoituja ja sivuvirtamoottoreita käytetään työstökoneissa sekä hisseissä, kun taas sarjamoottori soveltuu ajoneuvoihin ja nostureihin.

Pieniksi sähkömoottoreiksi luetaan yleensä koneet, joiden teho on alle 500 W [2, s.375.]. Yksivaiheisista vaihtosähkömoottoreista tärkein on yleismoottori, jota käytetään kotitalouskoneissa ja sähkötyökaluissa. Kolmivaiheisia epätahtimoottoreita ovat liukurengasmoottori ja oikosulkumoottori. Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa ja kestäväytensä sekä vähäisen huollon tarpeen vuoksi yleisin käyttämämme sähkömoottori. Kolmivaiheisia tahtimoottoreita käytetään suuritehoisissa teollisuuskäytöissä, joissa vaaditaan moottorilta vakionopeutta sekä suurta vääntömomenttia.

Koska nykyään sähkömoottoreita on teollisuudessa hyvin suuri lukumäärä ja sen seurauksena energiaa kuluu myös paljon, on vanha keksintö, *reluktanssimoottori*, tullut uudelleen markkinoille. Sen yhtenä etuna oikosulkumoottoriin verrattuna on, ettei reluktanssimoottorin roottorilla ole lainkaan häviöitä.

3 Oikosulkumoottori

Täysin suljettu oikosulkumoottori on induktiokone (IM), joka on teollisuuden yleisin sähkökonetyyppi. Epätahtimoottori nimitys johtuu siitä, että roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikäimityksen kehittämän pyörivän magneettikentän kanssa [2, s.305.].

Epätahtimoottorin magneettikentän pyörimisnopeus eli *tahtinopeus* n_s noudattaa yhtälöä

$$n_s = \frac{60 * f / \text{Hz}}{p} \text{ r/min} \quad (1)$$

[2, s.310.]

Yhtälössä f on verkon taajuus ja p on sähkömoottorin napapariluku. Moottorin suhteellinen jättämä s ilmaisee, kuinka monta prosenttia hitaammin sähkömoottorin roottori pyörii, verrattuna verkon taajuudesta riippuvaan tahtinopeuteen n_s . Tämä voidaan laskea kaavalla

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\% \quad (2)$$

Moottorin akseliteho P_m voidaan esittää yhtälöillä

$$P_m = T_e * \Omega \quad (3)$$

$$P_m = \eta * P_s \quad (4)$$

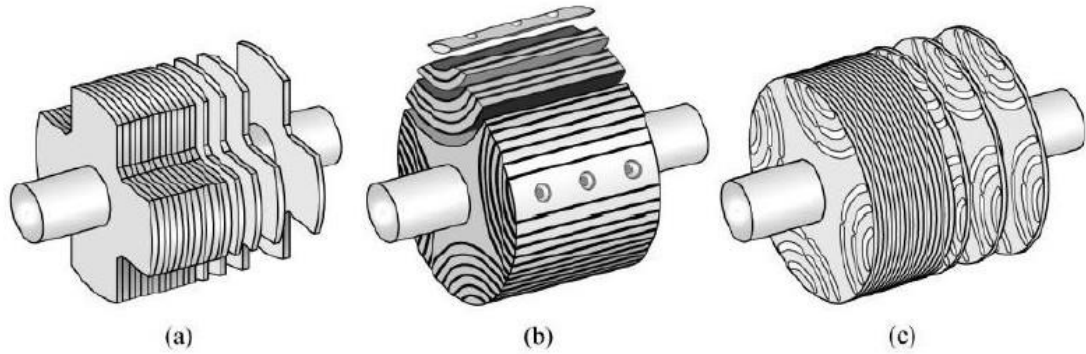
Yhtälössä (3) T_e on sähköinen vääntömomentti ja Ω on akselin kulmanopeus. Yhtälössä (4) η on hyötysuhde ja P_s on kolmivaiheisen vaihtovirran teho.

Sähkökone valmistajat tarjoavat vakiokoneita useille eri tehoille ja pyörimisnopeuksille.

4 Reluktanssimoottori

Synkroninen tahtireluktanssimoottori (SynRM) on viime aikoina ollut innokkaan tutkimuksen kohteena. Moottorin roottori poikkeaa magneettisen epäsymmetriansa johdosta merkittävästi oikosulkukoneen roottorista.[3, s.81.]. Siinä ei ole magnetointia ja se on tehty sellaiseksi, että induktanssiero pitkittäis- ja poikittaisinduktansseilla olisi mahdollisimman suuri. Tämä (L_d/L_q suhde) määrittelee tahtireluktanssimoottorin ominaisuudet, jotka ovat koneen huippuvääntömomentti, säätämisen helppous, tehokerroin ja moottorilla saavutettava hyötysuhde.[4; 5].

Tämä on saatu aikaan ferromagneettisen roottorin muotoilulla ja laminoinnilla. Pitkittäis- ja poikittaisinduktanssisuhteen maksimoinnilla saavutetaan maksimivääntömomentti.[6]. Tahtireluktanssimoottorin roottorille on olemassa erilaisia rakennetyyppejä. Seuraavassa kuvassa on yleisimpiä rakennetyyppejä roottorille.

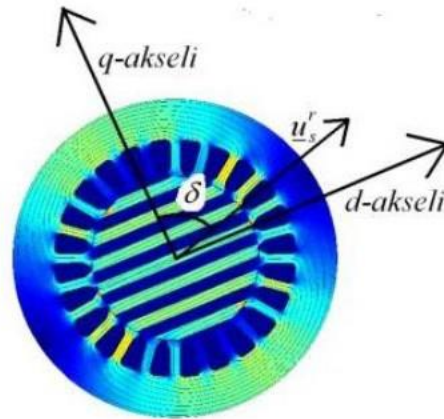


Kuva 1. Tahtireluktanssimootorin roottorimalleja [7].

Roottori a on SP-roottori (Simple Salient Pole Rotor), joka on yksinkertaisin roottorimalli. Siitä on poistettu rautamateriaalia siten, että sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnista. Sähköisesti tämä malli on huonoin. Roottori b on tyypiltään ALA -roottori (Axially Laminated Anisotropy Rotor). Se rakennetaan liittämällä pitkittäissuuntaisia metalliosia, jotka eristetään toisistaan. Osat kiinnitetään akseliin kiinnikkeillä. Rakenne on sähköisesti erinomainen, mutta tuottaa pyörrevirtahäviöitä. Roottori c:hen tehdään halutunlaiset ilmavälit, jotka muodostavat q- ja d -akselit. Roottoria kutsutaan TLA-roottoriksi (Transversally Laminated Anisotropy Rotor). Sähköisesti tämä on hyvä ja omaa vain vähän pyörrevirtoja. Roottorit b ja c ovat yleisimmin käytettyjä roottorimalleja [7;8].

Koska tahtireluktanssimootorin roottori on täysin käämitön, on roottorihäviöt hyvin pienet. Tämä johtaa siihen, että tahtireluktanssimootorilla on parempi hyötysuhde kuin tavanomaisella oikosulkumootorilla. Myös lämpötilat pysyvät alhaisina, mikä pidentää moottorin ikää [7].

Tahtireluktanssimootorin maksimimomentti saavutetaan tehokulman ollessa 45 asteen kohdalla. Kuorman tästä vielä noustessa, kone putoaa tahdistä. Epäsymmetrisyys vaikuttaa maksimimomenttiin, eli mitä suurempi on pitkittäisreaktanssin (X_d) ja poikittaisreaktanssin (X_q) ero. X_d/X_q suhde voi olla parhaimmillaan 10 - 25. Magneettisesti symmetrisillä roottoreilla, joilla $X_d = X_q$, reluktanssimomentti on nolla [8]. Seuraavassa kuvassa nähdään tahtireluktanssimootorin tehokulma.



Kuva 2. SynRM:n tehokulma [8].

Koneen merkittävin ominaisuus on synkroninen käynti, jolloin teollisuuden linjakäytöissä ei tarvitsisi pyörimisnopeusantureita. Konetyypin suorituskyky vastaa suunnilleen oikosulkukoneen suorituskykyä, mutta sen tehokerroin pyrkii olemaan hieman heikompi kuin oikosulkukoneella. Vastaavasti hyötysuhteessa se taistelee tasapäisesti induktiokoneen kanssa [3].

Ongelmana raskaissa ja tärisävissä kohteissa voidaan pitää vaatimusta pienestä ilmaväliltä, jolloin koneen ominaisuudet kärsivät selvästi, jos ilmaväliä kasvatetaan. Ilmavälin pitää olla selvästi pienempi kuin induktiokoneessa, jotta saadaan hyvä hyötysuhde ja tehokerroin [3].

Synkronista reluktanssimootoria voidaan käyttää virtavektorisäätöisellä taajuudenmuuttajalla. Tämän konetyypin ja kestopagneettikoneiden yhdistelmä on suosittua ajoneuvo-käytöissä.

Synkronireluktanssimootorin teho saadaan yhtälöstä

$$P = 3(U_{sv}^2 \frac{L_d - L_q}{2\omega_s L_d L_q} \sin 2\delta), \quad (5)$$

missä U_{sv} on staattorivyöhykkeen jännite, L_d on pitkittäinen induktanssi, L_q on poikittainen induktanssi, ω on staattorin sähköinen kulmanopeus ja δ on tehokulma.

[6, 9]

4.1 Erot oikosulkumoottoriin

Yksinkertaisin tapa tehdä tahtireluktanssimoottori on vaihtaa oikosulkukoneen roottori tahtireluktanssimoottorin roottoriksi. Koneiden staattorit ovat samankaltaiset. Tahtireluktanssimoottori pyörii tahdissa ja sen hyötysuhde on korkeampi, lisäksi pienemmästä moottorista saa suuremman tehon. Virta on pienempi eikä roottorissa ole virtalämpöhäviöitä. Roottori on viileämpi, samoin laakerit, jolloin käyttöikä on pidempi. Tehokerroin on huonompi kuin oikosulkukoneella. Tahtireluktanssimoottorin ohjaus on aina taajuusmuuttajalla, koska sitä ei voida käynnistää suoraan verkkoon kuten oikosulkumoottori [9].

4.2 Reluktanssimoottorin toimintaperiaate

Kun moottorin staattorin käämeihin syötetään vaihtovirtaa, syntyy magneettikenttä. Roottoriin on tehty vuopolut, jotka ovat magneettisesti hyvin johtavia. Vuopolut pyrkivät seuraamaan staattorin magneettikenttää, koska magneettivuo pyrkii löytämään magneettiselle johtavuudelle helpoimman kulkureitin. Tahtireluktanssimoottori on saanut nimensä siitä, että kun magneettikenttä pyrkii löytämään pienimmän reluktanssin omaavan akselin, niin se pyörii synkroninopeudella staattorin magneettikentän mukana [7].

Toiminta perustuu magneettipiirin Ohmin lakiin. Samoin kuin sähködynamiikassa on johtavuuden käänteisarvo, vastus, on magneettipiirissä magneettisen johtavuuden käänteisarvo, magneettivastus R_m eli reluktanssi [2, s.115].

Vaikka tahtireluktanssimoottorin napapyörää ei magnetoida tasavirralla, perustuu tahtireluktanssimoottorin toiminta siihen, että magneettisesti epäsymmetriselle avonapakooneelle syntyy momentti.[9]. Seuraava yhtälö on johdettavissa tahtireluktanssimoottorin momentille.

$$T_e = \frac{3p}{2\omega} \left[\frac{\hat{u}_u^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right], \text{ jossa} \quad (6)$$

T_e = reluktanssimomentti

[5; 6]

p = napaluku

$\omega = 2\pi f$, jossa f = taajuus

\hat{u}_s = vaihe jännitteen huippuarvo

X_q = poikittaisreaktanssi

X_d = pitkittäisreaktanssi

5 Taajuusmuuttajat

5.1 Taajuusmuuttajan historiaa

Suomessa taajuusmuuttajien kehitystyö aloitettiin 1960-luvulla. Vuonna 1976 Oy Strömberg Ab valmisti nykymuotoisen taajuusmuuttajan ensimmäisen version, nimeltään SAMI. Ensimmäinen merkittävä kehitysaskel saavutettiin vuonna 1981, jolloin valmistui ensimmäinen mikroprosessoreita hyödyntävä SAMI, mallinimeltään SAMI B. Mikroprosessorien ansiosta asetusten vaihtaminen tapahtui parametrejä muuttamalla [10; 11].

Toinen merkittävä kehitysaskel taajuusmuuttajavalmistuksessa koettiin vuonna 1995, jolloin nimensä Oy Strömberg Ab:sta, ABB Oy:ksi muuttanut yritys toi markkinoille Direct Torque Control -tekniikan (DTC). DTC-tekniikka mahdollisti, että taajuusmuuttajia voitiin ottaa käyttöön tasavirta-, vaihtovirta- sekä servokäyttöihin. Suurin DTC-tekniikan tuoma hyöty saatiin siitä, että se mahdollisti viiveettömän momentin säädön tehopooliohteiden alhaisilla kytkentätaajuuksilla. Tällä saavutettiin yhtä aikaa erinomainen säätökäyttäytyminen sekä hyvä taajuusmuuttajan hyötysuhde [10; 11].

5.2 Taajuusmuuttaja

ABB:n Pitäjänmäen elektroniikkatehtaalla valmistettavista taajuusmuuttajista on tullut sähköön käyttötekniikan yksi merkittävimmistä kehityshankkeista. Se on sähkölaite, joka kytketään kahden erillisen sähköverkon välille. Yleisin taajuusmuuttajan käyttökohde on sähkömoottorin tai -generaattorin ja valtakunnallisen sähköverkon väliin kytketty taajuusmuuttaja. Tässä tapauksessa taajuusmuuttaja vastaa moottorin tai generaattorin ohjauksesta [11; 12].

5.3 Taajuusmuuttajan toiminta

Taajuusmuuttajaa käyttämällä sähkömoottori saadaan pyörimään prosessin vaatimusten mukaisella nopeudella. Tämän ansiosta moottorilla suoritettava prosessi usein myös tehostuu merkittävästi. Jos sähkömoottori kytkettäisiin suoraan valtakunnalliseen sähköverkkoon, niin se pyörisi verkon taajuuden määräämällä nopeudella. Taajuusmuuttajan puuttuessa prosessin säätämiseen on käytettävä muita keinoja, esimerkiksi vaihteistoja.

Taajuusmuuttaja mahdollistaa moottorin pyörimisnopeuden portaattoman säädön muuttamalla moottorille syötettävää taajuutta [11; 12].

6 Erilaisia ohjaustapoja taajuusmuuttajalla

6.1 Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeuden ohjaaminen tapahtuu lähtöjännitettä muuttamalla. Tällöin moottorin pyörimisnopeus asettuu taajuuden ja kuormitusväätömomentin määräämään arvoon. Lähtöjännite on riippuvainen lähtötaajuudesta. Jännitteen kasvu tapahtuu lineaarisesti aina nimellisjännitteeseen asti. Nimellisjännite saavutetaan moottorin nimellistaajuudella. Nimellistaajuuden yläpuolella jännite pysyy vakiona. Jännitettä ja taajuutta on muutettava samassa suhteessa aina nimellistaajuuteen asti. Niiden välistä suhdetta pidetään vakiona kaikissa ohjaustilanteissa. Kun taajuus kasvaa ja jännite pysyy nimellisessä, moottorin väätömomentti pienenee. Tämä ilmiö on kentänheikennys. Kohta, jossa väätömomentti lähtee pienenemään, on nimeltään kentänheikennyspiste [11].

Skalaariohjauksessa mitataan moottorin vaihevirrät ja lasketaan pätövirtakomponentit. Pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin väätömomenttiin. Voidaan olettaa, että moottorin väätömomentti on suoraan verrannollinen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon. Tästä johtuu nimitys skalaariohjaus [13].

Skalaariohjauksessa ei mitata moottorin pyörimisnopeutta. Skalaarisäätö sisältää nopeussäädön ja sen jälkeisen väätömomenttisäädön. Skalaarisäädöllä voidaan säätää joko moottorin pyörimisnopeutta tai väätömomenttia, tai molempia vuorotellen. Pyörimisnopeus jää jättämän verran syöttötaajuutta vastaavaa tahtinopeutta pienemmäksi ja jättämä asettuu arvoon, jossa työkone saa vaatimansa tehon [14].

Skalaarisäätö soveltuu pumppu, puhallin ja kuljetuskäyttöön. Oikosulkumoottoreiden suurilla nopeuksilla säätö soveltuu vaativiin käyttöihin, koska tällöin koneen sisäinen vuonsäätö toteutuu hyvin. Koska skaalarisäätö ei vaadi moottorimallia toimiakseen, se soveltuu hyvin myös monimoottorikäyttöön. Skalaarisäätö ei sovellu hitaan väätömomenttivasteensa takia vaativiin servokäyttöihin eikä esimerkiksi valssikäyttöihin [13].

6.2 Vektorisäätö

Vektorisäädön tavoitteena on ohjata konetta oikein myös muutostilanteissa. Oikosulkumoottorin vääntömomentti on päävuon ja roottorivirran vektoritulo. Jos halutaan säätää vääntömomenttia, on myös vektorin suunta huomioitava. Tästä johtuu nimitys vektorisäätö. Jotta vektorisäätö olisi mahdollista toteuttaa, tarvitaan sekä moottorivirtojen, että pyörimisnopeuden tarkkaa mittausta. Mittaustiedot syötetään oikosulkumoottorista tehtyyn matemaattiseen malliin, joka on mikro-prosessorin muistissa. Moottorimalli laskee moottorin magneettivuon ja jakaa virran vääntömomenttia ja magneettivuota kuvaaviin osiin. Molempia virran komponentteja pystytään säätämään erikseen, joten vääntömomenttia säädettäessä vuon voi pitää vakiona [11].

Vektorisäätöä kannattaa käyttää sovelluksissa, joissa vaaditaan hyvää dynamiikkaa ja tarkkaa nopeudensäätöä esimerkiksi paperikoneissa. Vektorisäädöllä voidaan estää vuon heikkeneminen silloin, kun kuormassa tapahtuu äkillinen kasvu, ja kaikki virta tarvittaisiin lisäämään moottorin vääntömomenttia [14].

6.3 Suora vääntömomentin säätö eli DTC

Suora vääntömomentinsäätö on nykymarkkinoiden kehittynein vaihtovirtakäyttötekniikka. DTC-tekniikka on noussut käytetyimmäksi säätötavaksi, ja se on vakiona lähes kaikissa taajuusmuuttajissa. Suorassa vääntömomenttisäädössä annetaan moottorin tehtäväksi kehittää haluttu pyörimisnopeus ja vääntömomentti mahdollisimman nopeasti. Mitään muita reunaehtoja ei moottorille aseteta [15].

Tämän seurauksena moottori saavuttaa toimintavaiheen, jossa sitä syöttävät jännite- ja virtasuureet ovat sinimuotoisia ja ilmavälissä pyörii sinimuotoisesti ilmaväliin jakautunut magneettikenttä, vasta, kun se on jatkuvuustilassa tai hyvin hitaassa muutostilassa. Tämän takia järjestelmää ei voida tutkia muutostiloissa, eikä laskuja voida perustaa perinteiseen osoitinlaskentaan. Laskut suoritetaan hetkellisarvoilla numeerisesti. DTC soveltuu käyttökohteisiin, joissa vaaditaan tarkkaa nopeudensäätöä ja nopeaa momentinsäätöä [15].

7 Sähkömoottorin hyötysuhde

7.1 Hyötysuhde standardit

Hyötysuhde on tärkeä tekijä moottorimarkkinoilla, sillä moottorin ostajan kannalta moottorin hyvä hyötysuhde merkitsee taloudellisuutta pitkällä aikavälillä. Tästä johtuen hyötysuhde on merkittävä kriteeri moottorisuunnittelussa. Matala hyötysuhde sähkömoottorissa tarkoittaa tyypillisesti matalampaa materiaalien, komponenttien ja suunnittelun laatua.[16]. Moottorin hyötysuhteen määrittämisen mittaamenetelmät on määritelty IEC- ja IEEE-standardeissa.

7.2 Eurooppalainen hyötysuhdeluokitus

7.2.1 Hyötysuhdeluokituksen historia

EFF -luokat tulivat voimaan vuonna 1998. Sopimuksen osapuolet olivat Euroopan komissio sekä CEMEP; (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics). Hyötysuhde tuli nyt selvästi näkyville luetteloihin, sekä $\frac{3}{4}$ - että täydellä kuormalla. Lisäksi se oli leimattava moottorin arvokilpeen [16].

Kolme hyötysuhdeluokkaa; EFF1, EFF2, EFF3, joista EFF1 on korkein luokka.

Ei pakollista minimihyötysuhde luokkaa.

Perustuivat vanhentuneeseen hyötysuhteen mittaustandardiin: IEC 60034-2 (1996).

EFF -luokat kattoivat 2- ja 4-napaiset moottorit, tehoalue 1.1-90 kW, 400 V, 50 Hz, S1.

7.2.2 Hyötysuhdeluokituksen nykytila

Hyötysuhteen mittaustandardi on IEC 60034-2-1 vuodelta 2007.

Vanhassa mittaustandardissa lisähäviöt oli mahdollista määrittää 0,5 %:ksi sähkötehosta, jonka moottori ottaa verkosta. Uudessa mittaustandardissa on eri vaihtoehtoja lisähäviöiden määrittämiseksi, kuten kuormitustestin perusteella laskettava P_{LL} . Se voi-

daan määrittää myös 1,0 % - 2,5 % moottorin nimelliskuormalla verkosta ottamasta sähkötehosta. Vanhassa standardissa staattorin kuparihäviöt ja roottorihäviöt redusoiitiin aina 95 C° lämpötilaan, kun taas uudessa häviöt määritellään todellisen lämpenemän mukaan. Uusi standardi suorittaa moottoreita, joiden lämpenemä on pieni [16].

30 kW:n moottorin ottoteho ja energiankulutus täydellä kuormalla ja 6 000 h/a käyttöajalla:	
$\eta = 91,4\%$ (EFF2)	$\eta = 93,7\%$ (EFF1)
$30\text{ kW} / 0,914 = 32,8\text{ kW}$	$30\text{ kW} / 0,937 = 32,0\text{ kW}$
$32,8\text{ kW} \cdot 6\,000\text{ h/a} = 196,9\text{ MWh/a}$	$32,0\text{ kW} \cdot 6\,000\text{ h/a} = 192,1\text{ MWh/a}$
Kulutussäästö $196,9 - 192,1\text{ MWh/a} = 4,8\text{ MWh/a}$	

Kuva 3. Hyötysuhteen vaikutus moottorin ottotehoon ja energiankulutukseen, (vanha hyötysuhdestandardi) [18].

Esimerkkejä hyötysuhdearvojen muuttumisesta uuden ja vanhan mittausstandardin välillä on esitetty seuraavassa taulukossa.

Moottorin nimellisteho	'Vanha' mittausstandardi: EN/IEC 60034-2: 1996	Uusi mittausstandardi IEC 60034-2-1: 2007-09	Ero
	Hyötysuhde	Hyötysuhde	
5.5 kW, 4-nap.	89.50 %	88.80 %	- 0.70 %-yks.
11 kW, 4-nap.	91.50 %	90.70 %	- 0.80 %-yks.
160 kW, 4-nap.	96.00 %	95.50 %	- 0.50 %-yks.

Taulukko 1. Hyötysuhdearvojen muuttuminen [16].

Huolimatta ilmoitettujen hyötysuhdearvojen muuttumisesta moottorin *suorituskyky* ei kuitenkaan muutu.

IE -hyötysuhdeluokat (International Efficiency) ovat:

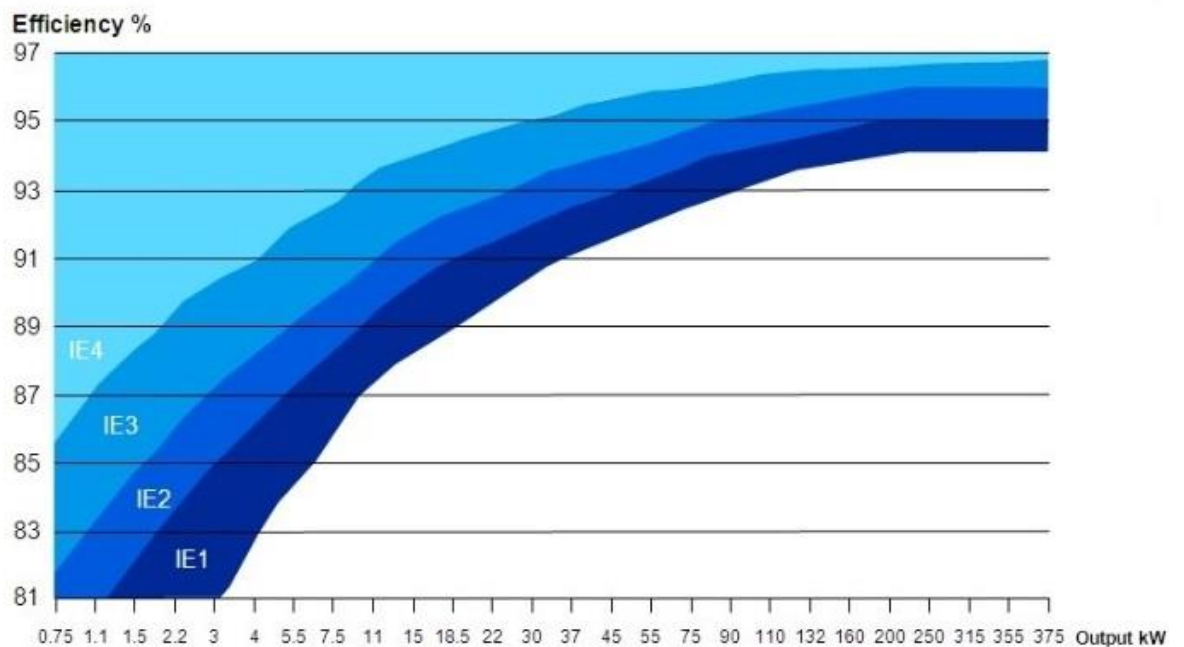
- IE1 Standard (EFF2)
- IE2 High (EFF1)
- IE3 Premium
- IE4 Super Premium

Standardi kattaa 2-, 4- ja 6-napaiset moottorit, tehoalue 0.75-375 kW, <1000 V, 50 Hz ja 60 Hz. Myös jarru- ja ATEX-moottorit sisältyvät uuteen luokitukseen.

IEC 60034–30 harmonisoi hyötysuhdeluokat maailmanlaajuisiksi.

Hyötysuhdeluokituksen tavoitteina on vähentää sähköenergiankäytöstä erityisesti teollisuudelle aiheutuvia kustannuksia, alentaa Euroopan energian kulutusta ja pienentää Euroopan CO₂ -päästöjä [18].

Seuraavassa kuvassa on IE-luokkien rajat 4-napaisille moottoreille 50 Hz:n taajuudella.



Kuva 4. IE-hyötysuhdeluokat [16].

7.3 ErP-direktiivi

Ekologista suunnittelua koskevan (EcoDesign-direktiivi) direktiivin 2009/125/EC:n tavoite on luoda puitteet energiaa käyttävien tuotteiden ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten asettamiselle (CO₂-päästöjen vähentäminen) [16].

EU MEPS -asetus on hyväksytty 22.7.2009 ja se asettaa EU:ssa pakollisen energiatehokkuuden vähimmäisstandardin oikosulkumoottoreille. Vaiheittainen käyttöönotto on vuosien 2014 ja 2017 välillä ja se koskee sekä tuontia että käyttöönottoa EU:n alueella [16]. Käyttöönoton aikataulu on esitetty seuraavassa taulukossa.

Vaihe 1: 16.6.2011 alkaen	Moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE2
Vaihe 2: 1.1.2015 alkaen	Tehoalue 7.5 – 375 kW, moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE3 TAI hyötysuhdeluokan IE2 moottori täytyy asentaa taajuusmuuttajakäyttöisenä
Vaihe 3: 1.1.2017 alkaen	Tehoalue 0.75 – 375 kW, moottoreiden täytyy täyttää hyötysuhdeluokka IE3 TAI hyötysuhdeluokan IE2 moottori täytyy asentaa taajuusmuuttajakäyttöisenä

Taulukko 2. Aikataulu käyttöönotolle [16].

7.4 Hyvän hyötysuhteen edut

Korkealla hyötysuhteella on seuraavia etuja:

- päästään pienempiin moottorin elinkaarikustannuksiin
- säästetään sähköenergia laskuissa sekä CO₂-päästöissä

- lisäksi moottorilla on pidempi elinikä, parempi luotettavuus sekä pidemmät huoltovälit
- korkean hyötysuhteen moottori käy myös viileämpänä pidentäen näin laakereiden ja käämityksen elinikää

Sähkömoottorit (alle 75 kW) kuluttavat noin 60 % teollisuuden käyttämästä sähköstä.[18]. Moottorin hankintahinnan osuus on kuitenkin vain 1-2 % elinkaarikustannuksista [16].

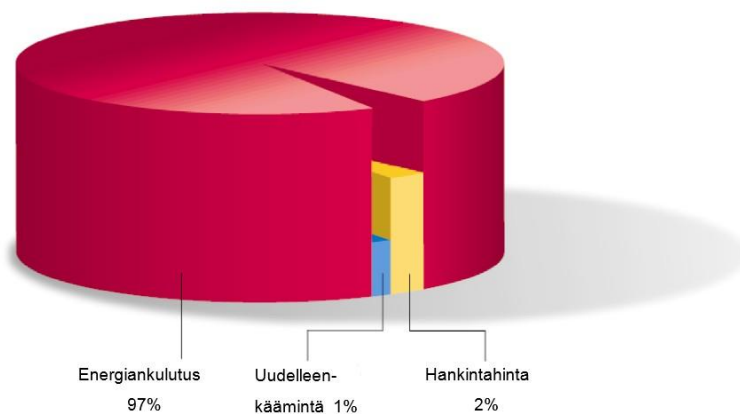
7.5 Hyvän hyötysuhteen haitat

Korkeahyötysuhteisten moottoreiden haittoina voidaan pitää lähinnä valmistamiseen liittyvinä, kuten

- laadultaan paremmat materiaalit ja niitä on myös moottorissa enemmän
- valmistamisen prosessin on oltava kehittyneempi ja tarkempi

Näistä johtuen on korkeahyötysuhteisen moottorin hinta perushyötysuhteiseen moottoriin nähden kalliimpi. Myös pienemmät valmistusmäärät saattavat nostaa hintaa joillakin valmistajilla [18].

7.6 Moottorin elinkaarikustannukset



Kuva 5. Moottorin elinkaarikustannukset [16].

Energiätehokkuuteen on olemassa myös laskentatyökaluja, kuten EffSave tai Operations savings analyzer. Moottorivalmistajilla on lisäksi omia laskentaohjelmia – ABB:llä esimerkiksi Optimazer [16].

7.7 Hyötysuhteen mittaustavat

Moottorien hyötysuhteen määrittämiseen käytettävät mittaustavat voidaan jakaa kahteen ryhmään: epäsuoriin- ja suoriin mittausten menetelmiin.

Suorassa mittausmenetelmässä hyötysuhteen määrittäminen perustuu moottorin vääntömomentin mittaukseen. Epäsuorassa mittausmenetelmässä hyötysuhteen määrittämiseksi ei mitata vääntömomenttia, vaan moottorin hyötysuhde pyritään määrittämään muilla menetelmillä. Tällainen muu menetelmä on esimerkiksi kalorimetrinen menetelmä, jossa moottorin hyötysuhteen määrittämiseksi mitataan siinä syntyvää häviölämpöä [17].

Moottorien teholuokka vaikuttaa moottorien hyötysuhteeseen. Pienen teholuokan moottoreilla on pienempi hyötysuhde, kuin suuremman teholuokan koneilla. Tämä johtuu siitä, että staattorin virtalämpöhäviöiden osuus kokonaishäviöistä on suurempi pienemmän teholuokan moottoreilla [18]. Suoraa mittausmenetelmää sovelletaan varsinkin pienen teholuokan koneille hyötysuhteen määrittämiseksi.

8 Laboratorio mittaukset

8.1 Mittauksissa käytetyt moottorit

Laboratorio mittauksissa käytettyjen moottoreiden kilpiarvot on alla olevassa taulukossa.

3~ Synchronous Reluctance Motor							
M3BL 160 MLA 4							
V	Hz	kW	r/min	A	eff %	Cl.	kg
370	50	11	1500	24,9	93,3	F	160
3~Motor							
M3AA132M 4							
V	Hz	kW	r/min	A	eff	Cl.	kg
380 - 420	50	7,5	1450	14,6	1	F	59

Taulukko 3. Moottoreiden kilpiarvot.



Kuva 6. Mittauksissa tahtireluktanssimoottori kytkettiin tähteen ja oikosulkumoottori kolmioon.

8.2 Mittauksissa käytetyt muut laitteet

Sähkönsyöttö otettiin teholähdevaunusta ja sillä syötettiin 400 V jännitettä taajuusmuuttajalle. Mitattuja arvoja luettiin tehoanalysaattorista, (Hioki 3193 Power HiTester), ja oikosulkumoottoriin oli kytketty 3~säätövastus tähteen sekä kolme 50 μF kondensaattoria kolmioon.



Kuva 7. ACS880 -taajuudenmuuttaja sekä muita laitteita.

8.3 Taajuusmuuttaja

Tahtireluktanssimoottoria ohjattiin ACS880-taajuudenmuuttajalla.

ACS 880 single drives -taajuusmuuttajat ovat yksittäisiä täydellisiä taajuusmuuttajia. Ne voidaan räätälöidä tarkasti eri teollisuuden tarpeisiin ja soveltuvat erilaisiin vaativiin sovelluksiin kuten nosturit, ekstruuderit, vinssit, rullaimet, kuljettimet, sekoittimet, kompressorit, pumput ja puhaltimet [19].

ACS880 single drives -taajuusmuuttajat ovat rakennettu uuden täysin yhteensopivan arkkitehtuurin mukaisesti ja tarjoavat kaikille asiakkaille eri teollisuudenaloilla ja sovelluksille, ennenkuulumattoman yhteensopivuuden tason, joustavuuden ja helppokäyttöisyyden [19].

8.4 Mittaustapa ja -kytkentä

8.4.1 Työssä käytetty mittaustapa

Koska moottoreiden välillä oli vain yksinkertainen kytky, (ei momenttianturia), ei momenttia, mekaanisen tehon laskentaa varten, ollut mittauksista siten suoraan saatavana. Lisäksi tahtireluktanssimoottori pyörii tahtinopeuttaan, eli 1500 r/min, eikä siten akselikulmanopeuttakaan ollut saatavilla pyörimisnopeudesta eri kuormituksilla.

Tahtireluktanssimoottorille oli kilpiarvoissa annettu hyötysuhteeksi 93,3 %. Oikosulkumoottorin nimellishyötysuhde olisi laskettavissa kilpiarvoista kaavalla:

$$\eta_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_n * I_n * \cos\varphi_n} \quad (7)$$

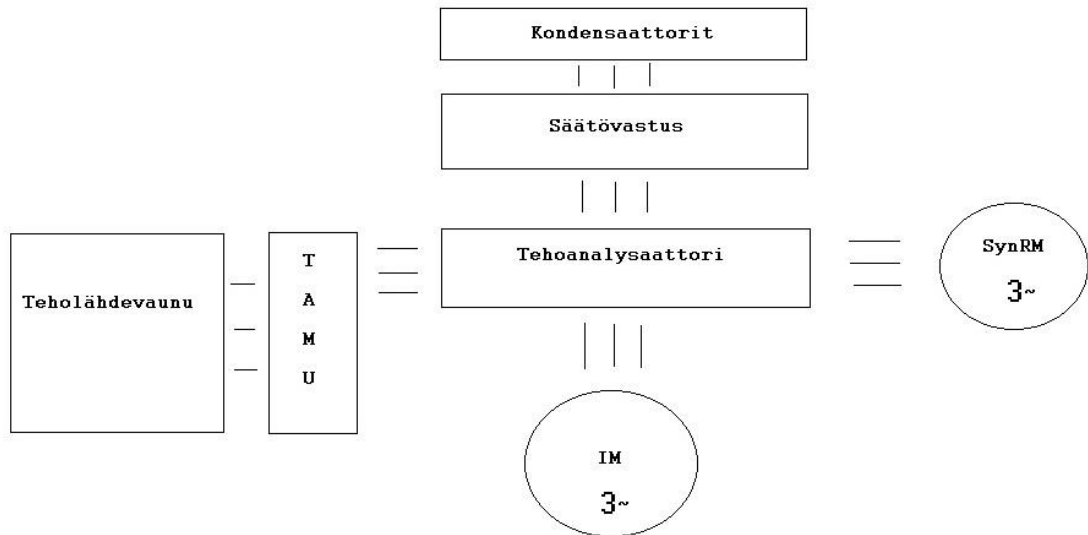
Kilpiarvoista puuttuu kuitenkin kaavassa tarvittava $\cos\varphi$:n arvo ja hyötysuhdeluokaksi oli annettu vain $\text{eff } 1$. Mittauksilla pyritään pääsemään käsiksi oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen ja sitä kautta tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdearvoon.

Teholähdevaunulla syötetään siis taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajalla valitaan sopivat kierrosnopeudet tahtireluktanssimoottorille. Tehoanalysaattorista luetaan tarvittavat arvot sekä tahtireluktanssimoottorista että oikosulkumoottorista. Oikosulkumoottorilla jarrutetaan tahtireluktanssimoottoria eri vastusarvoilla, jotka kuvaavat moottorin kuormaa. Magnetointikondensaattoreilla synnytetään tarvittava magnetointivirta, jonka johdosta virta kulkee oikosulkumoottorin magneettipiirissä ja jännite nousee oikosulkumoottorin navoissa eli ”herätellään” oikosulkumoottori pyörimään.

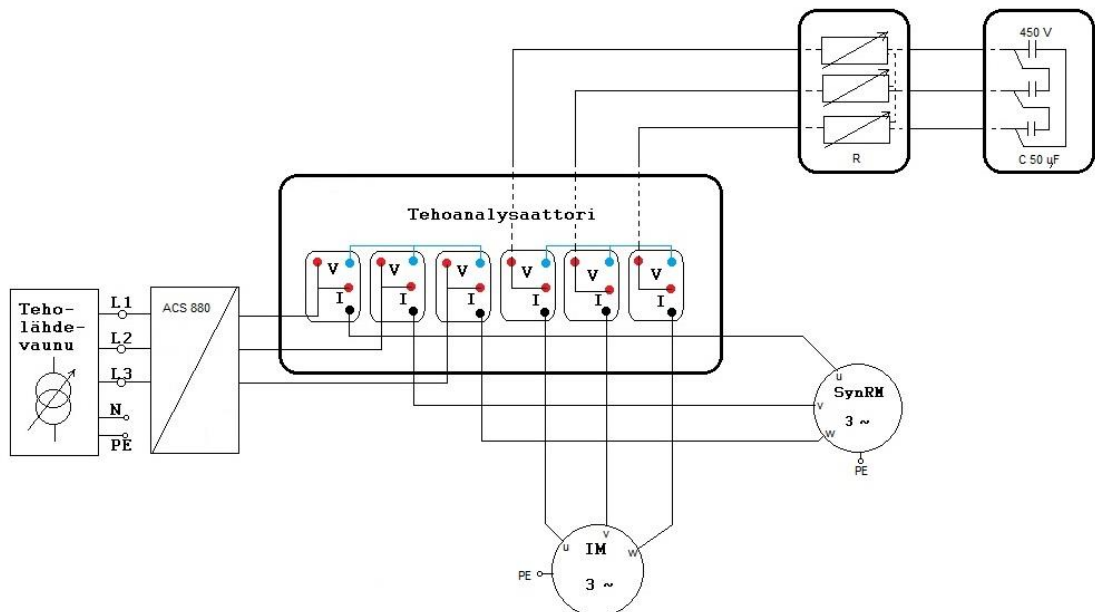
Tehoanalysaattorilta luettiin jokaisen kierrosnopeuden tasaannuttua P , P_1 , Q , Q_1 , I , U ja $\cos\varphi$. Mittaus tehtiin kahdella eri säätövastuksen arvolla, ensin 398Ω ja sitten 128Ω . Magnetointikondensaattorit olivat $50 \mu\text{F}$ koko mittausten ajan, pois lukien viimeinen (5) mittausta, jolloin oikosulkukoneen virta nousi liian korkeaksi.

Laboratoriotyön mittaustulokset ovat liitteessä 2.

8.4.2 Työssä käytetty mittauskytkentä



Kuva 8. Yksinkertainen kytkentäkaavio.



Kuva 9. Kytkentäkaavio.

9 Mittaustulokset

9.1 Oikosulkumoottorista lasketut tulokset

Kytkenän pääjännite saadaan kaavalla:

$$U_{1N} = \sqrt{3} * U_{L1} = \sqrt{3} * 183,62V = 318,04V$$

Yhden vaiheen näennäisteho S_{L1} .

$$S_{L1} = U_{L1} * I_{L1} = 183,62V * 6,458A = 1185,82VA$$

Kokokuormituksen näennäisteho.

$$S_{3V} = 3 * S_{L1} = 3 * 1185,82VA = 3557,45VA$$

Tehokerroin $\cos\varphi$.

$$\cos\varphi = P_{L1} / S_{L1} = -176,5W / 1185,82VA = -0,148842$$

$$\cos\varphi = \cos(98,58) = -0,14919$$

Yhden vaiheen teho P_{L1} .

$$P_{L1} = U_{L1} * I_{L1} * \cos\varphi = 183,62V * 6,458A * (-0,148842) = -176,5W$$

3 -vaiheen yhteisteho.

$$P_{3V} = 3 * P_{L1} = 3 * (-176,5)W = -529,5W$$

Yhden vaiheen loisteho Q_{L1} .

$$Q_{L1} = \sqrt{S_{L1}^2 - P_{L1}^2} = \sqrt{(1185,82VA)^2 - (-176,5W)^2} = 1172,61 \text{ var}$$

Kokokuormituksen loisteho.

$$Q_{3V} = 3 * Q_{L1} = 3 * 1172,61 \text{ var} = 3517,82 \text{ var}$$

Loistehon tehokerroin $\sin\varphi$.

$$\sin\varphi = Q_{L1} / S_{L1} = 1172,61 \text{ var} / 1185,82 \text{ VA} = 0,988868$$

Lasketut suureet ovat lähellä tehoanalysaattorilta saatuja lukuja, joten mittauksesta saatuja tuloksia voidaan pitää oikeansuuruisina.

9.2 Hyötysuhde oikosulkumoottorilla

Mittauksessa havaittiin, ettei oikosulkumoottori kehitä jännitettä eli herää, oikeastaan alle 1000 rpm/min, joten mittaukset tehtiin 1100–1500 rpm/min kierrosnopeusalueella.

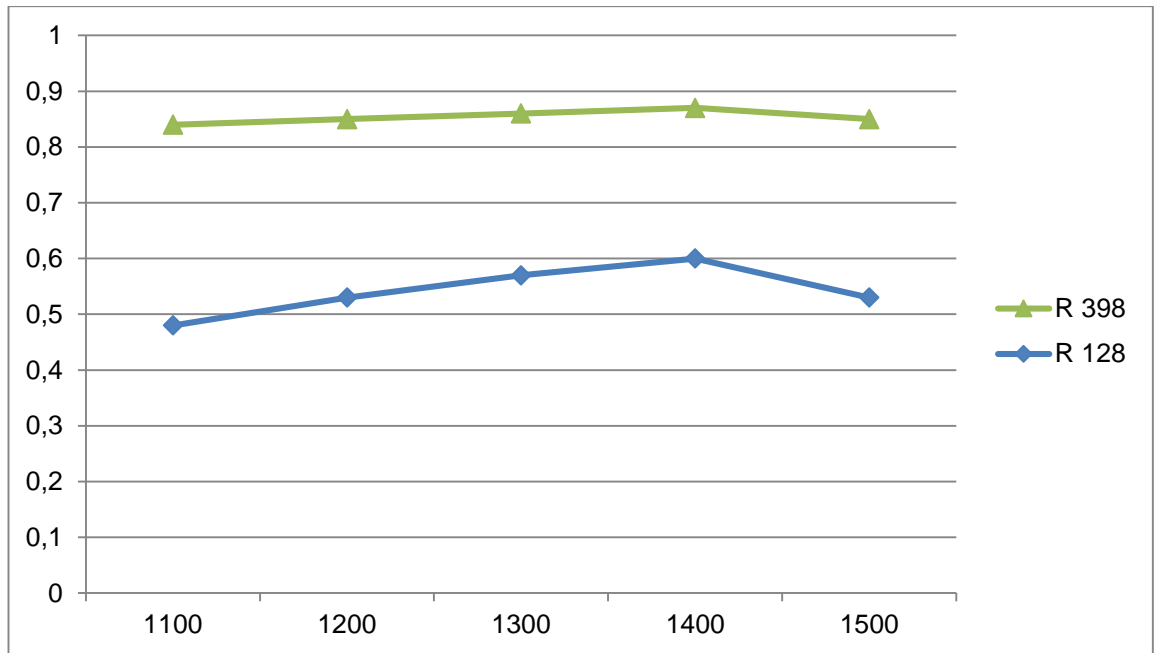
Hyötysuhde tarkoittaa jostakin laitteesta hyödyksi saadun tehon suhdetta laitteeseen vietyyn tehoon eli η on $P_{\text{Lähtö}} / P_{\text{Syöttö}}$. Hyötysuhde on aina pienempi kuin 1 [2, s.78.].

Mittaustuloksista voimme laskea oikosulkumoottorin hyötysuhteen η kaavalla

$$\eta = (Q + P) / S$$

missä Q on loisteho, P on pätöteho ja S on näennäisteho.

Saaduista arvoista voimme piirtää oikosulkumoottorin hyötysuhteen kuvaajan.



Kuva 10. Oikosulkumoottorin hyötysuhdekäyrät.

Vastusarvolla 128Ω oikosulkumoottorin virta nousi liian suureksi viimeisellä mittauksella ja kapasitanssin pudotus näkyy hyötysuhdekäyrässä.

10 Päätelmät mittauksista

10.1 Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde

Suorassa mittausmenetelmässä hyötysuhteen määrittäminen perustui moottorin vääntömomentin mittaukseen. Nyt vääntömomenttia ei ollut saatavissa. Epäsuorassa mittausmenetelmässä taas hyötysuhteen määrittämiseksi ei mitattu vääntömomenttia, vaan moottorin hyötysuhde pyrittiin määrittämään muilla menetelmillä. Tällainen muu menetelmä olisi esimerkiksi kalorimetrinen menetelmä, jossa moottorin hyötysuhteen määrittämiseksi mitattaisiin siinä syntyvää häviölämpöä. Mittaustuloksista voimme piirtää hyötysuhdekäyrästä oikosulkumoottorille, mutta tahtireluktanssimoottorin hyötysuhteen mittaamiseen tai tuloksista hyötysuhteen laskemiseen, mittausmenetelmä on hankala, koska momenttia tai häviölämpöä, ei mittauksesta saada. Jokin muu menetelmä voisi siis olla parempi tähän tarkoitukseen.

10.2 Pienjännite prosessimoottorit

Taulukosta 4 nähdään, että 4-napaisilla ja 11.0 kW moottoreilla minimi hyötysuhde on alimmillaan IE1-luokan moottoreilla, ollen 87,6 % ja korkeimmillaan IE4 luokassa, 93,3 %. Mittauksissa käytetty tahtireluktanssimoottori vastaa IE 4 luokan hyötysuhdetta eli parasta luokkaa oikosulkumoottoreilla.

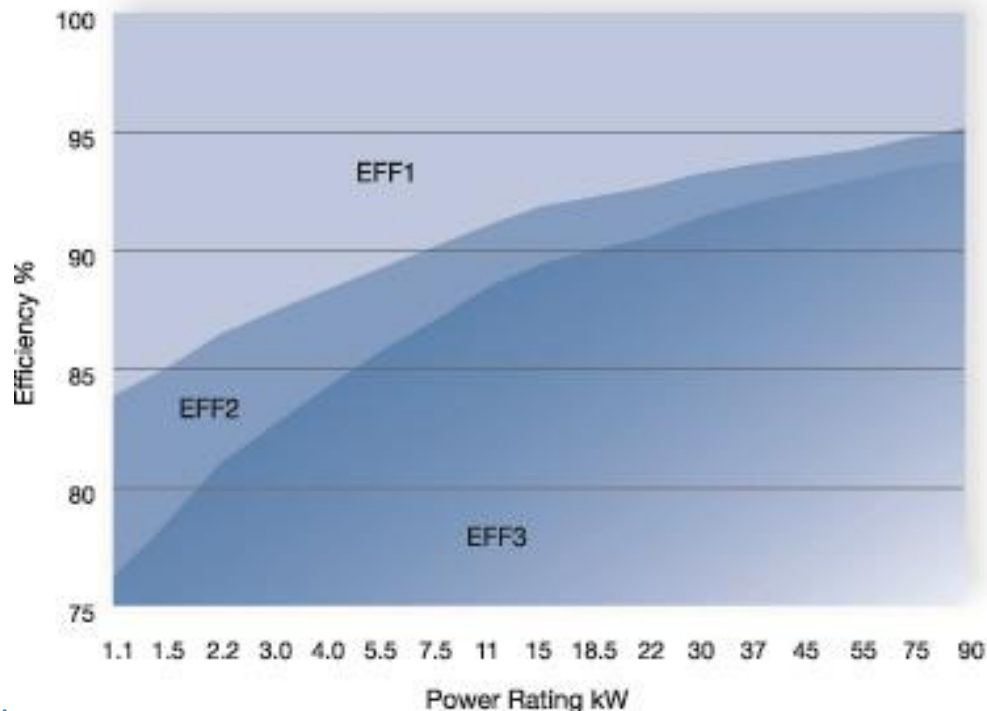
Minimum efficiency values defined in IEC/EN 60034-30-1: 2014 (reference values at 50 Hz, based on test methods specified in IEC 60034-2-1 which has been updated to edition 2.0, 2014-06).

Output kW	IE1 Standard efficiency				IE2 High efficiency				IE3 Premium efficiency				IE4 Super Premium efficiency			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4

Taulukko 4. Pienjännite prosessimoottoreiden minimi hyötysuhteita IE-luokissa [liite 1].

Mittausten oikosulkumoottori puolestaan oli eff 1-luokan moottori, jolle alla olevan kuvan käyrästä (7,5 kW) hyötysuhteen alarajaksi tulee noin 90 %. Mittauksista laskettu hyötysuhde ylittää parhaimmillaankin juuri alle 90 %, kuva 10.

EFF Classes - 4 pole



Kuva 11. Vanhat Eff-hyötysuhdeluokat [16].

11 Yhteenveto mittauksista

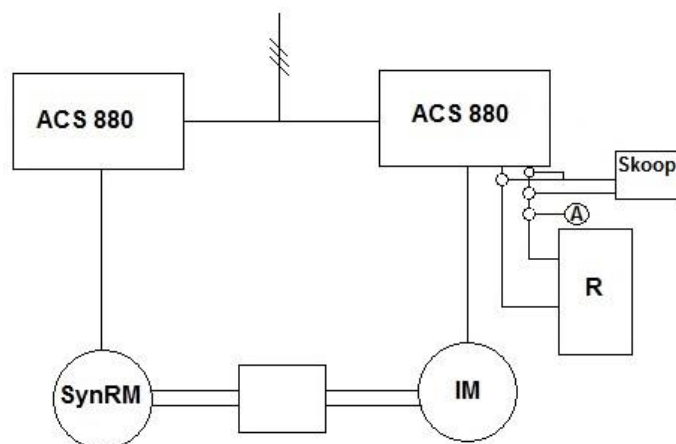
Mittausmenetelmä tahtireluktanssimoottorin hyötysuhteen määrittämiseksi ei ollut paras mahdollinen, koska momentin ja häviölämpöjen puuttuminen mittauksista vaikeutti laskeamista. Lisäksi mittauksen kierroslukualue oli liian kapea, sillä moottoria ei voinut kuormittaa alle 1000 r/min alueella, koska oikosulkumoottori ei herännyt toimintaan.

12 Vaihtoehtoisia mittausmenetelmiä

Jotta hyötysuhdemittauksessa tahtireluktanssimoottoria voisi kuormittaa alle 1000 r/min, pitäisi olla käytössä jokin muu mittausmenetelmä. Yksi tällainen mittausmenetelmä voisi olla esimerkiksi, jos käyttäisi kahta taajuudenmuuttajaa mittauskokeessa moottoreiden ohjaamiseen, ja siirtäisi energian esimerkiksi jarruvastukseen.

12.1 Taajuudenmuuttaja jarruvastuksella

Tässä menetelmässä käytetään kahta taajuudenmuuttajaa eli kumpaakin moottoria ohjataan omalla taajuudenmuuttajalla. Moottorit ovat samalla akselilla ja kun tahtireluktanssimoottori pyörii tahtinopeuttaan, jarrutetaan oikosulkumoottorilla siten, että sille annetaan vain pienempi kierrosnopeus kuin tahtireluktanssimoottorille. Jarrutusenergia ohjataan oikosulkumoottorin taajuudenmuuttajan jarruvastukselle.



Kuva 12. Kytkentäkuva, jossa on taajuudenmuuttaja jarruvastuksella.

12.2 Hyötysuhteen mittaus vaihtoehtoisella mittaussuunnitelmällä

Metropolian korkeakoulusta saatavilla laitteistoilla ehkä helpoin toteutettavissa oleva vaihtoehtoinen mittaussuunnitelma on kahden taajuudenmuuttajan ja jarruvastuksen käyttö mittauksissa. Tahtireluktanssimootorin ohjaukseen käytettiin ACS 880 -taajuudenmuuttajasta tarkemmin mallia ACS880-01-025A-3.

Oikosulkumootorin ohjaamiseen käytetystä ACS 880 -taajuudenmuuttajasta ei tarkempaa mallia saanut selville, joten jarruvastuksen jarrukatkojen teho ja vastuksen jatkuva tehohäviö (lämpöhäviö), eli energia E , joka siirtyy vastukseen 400 sekunnissa, määritettiin tahtireluktanssimootorin ohjaukseen käytetyn taajuudenmuuttajan arvoilla, koska runkokoko ja taajuudenmuuttajan mallinimi olivat samanlaiset.

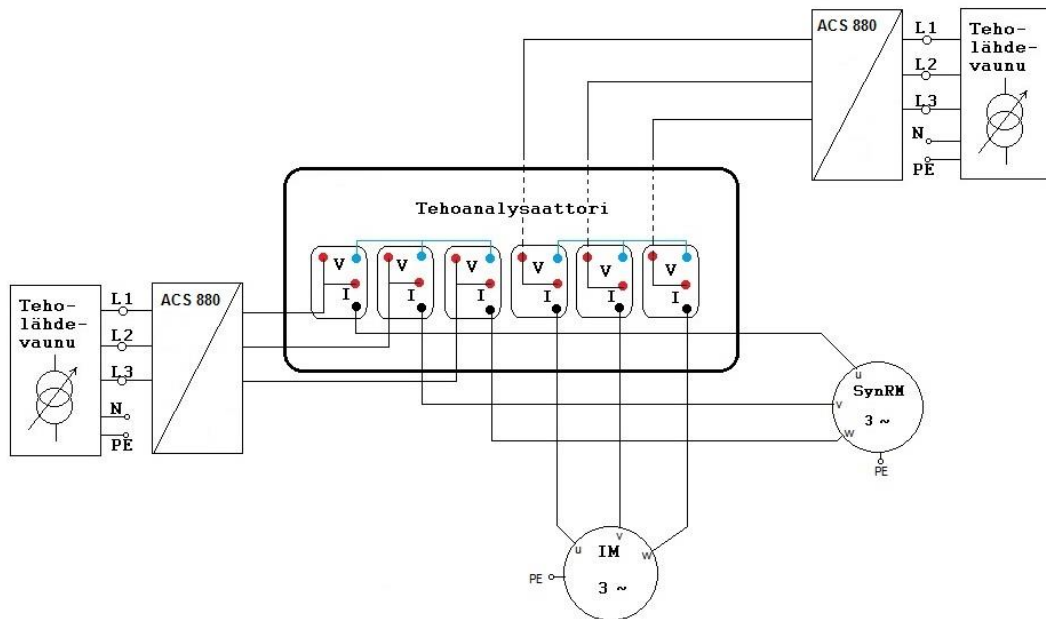
12.3 Mittauksissa käytetty mittaustapa ja -laitteet

Mittaus suoritettiin käynnistämällä ensin tahtireluktanssimootori tahtinopeuteensa. Seuraavaksi käynnistettiin oikosulkumootori käyttämällä oikosulkumootorin ACS 880 -taajuudenmuuttajassa skalaariohjausta ja käynnistettäessä moottoria, annettiin taajuusohjeeksi tahtireluktanssimootorin vastaava, mutta negatiivinen, pyörimisnopeus. Pyörimisnopeutta laskettiin tästä varovasti alaspäin. Oikosulkumootorin taajuudenmuuttajana oli ACS 880 -malli, jossa oli sisäinen jarrukatkoja. Jarrukatkojen teho oli oletettavasti 11 kW ja jarruvastuksen arvoksi säätövastuksella asetettiin 43,7 Ω , joka oli lähellä ohjearvoa 44 Ω . Näillä arvoilla katkoja siirtäisi tehona 1 kW vastukseen.

$U_N = 400 \text{ V (380–415 V)}$							
Jarrukatkojen teho	R_{\min} ohm	Jarruvastus (-vastukset)				Tyypimerkintä	Runkokoko
P_{brcont} [kW]		Tyyppi	R [ohm]	E_r [kJ]	P_{rcont} [kW]		
7,5	39	SACE08RE44	44	210	1	ACS880-01-017A-3	R2
11	39	SACE08RE44	44	210	1	ACS880-01-025A-3	R2

Kuva 13. Jarrun tuotetiedot [21].

12.4 Mittauksissa käytetty mittauskytkentä



Kuva 14. Vaihtoehtoisen mittausmenetelmän mittauskytkentä.

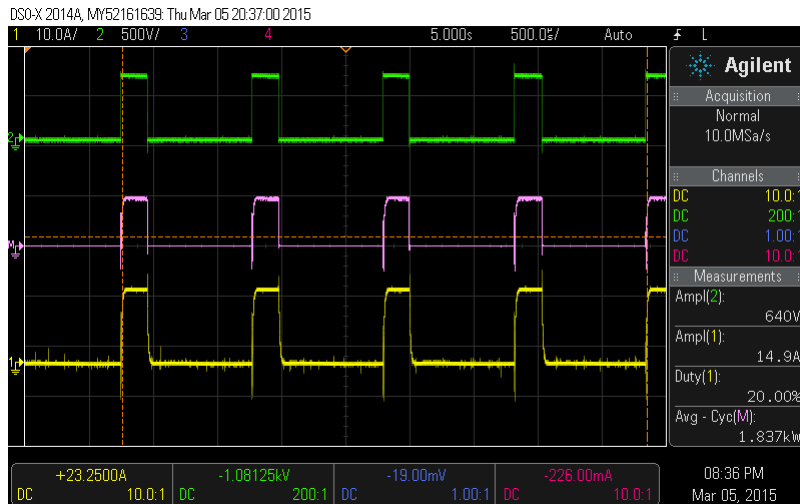
12.5 Mittaustulokset

Mittaustulokset ovat alla olevassa taulukossa. Mittaustuloksen negatiivinen arvo on taulukossa merkitty punaisella. Tahtireluktanssimootorin arvot ovat positiolla 1.

Mittaustulokset					
kierrosnopeuksilla 500 r/min ja 1500r/min					
r/min	U1	I1	P1	S1	Q1
500	210,7 V	8,72 A	1826 W	5517 VA	5206 var
	U4	I4	P4	S4	Q4
	239,5 V	6,5 A	1361 W	4668 VA	4465 var
1500	U1	I1	P1	S1	Q1
	239,7 V	8,5 A	2558 W	6107 VA	5545 var
	U4	I4	P4	S4	Q4
	283 V	6,27 A	1934 W	5320 VA	4960 var

Taulukko 5. Mittaustuloksia.

Mittaustuloksista nähdään, ettei arvoissa tapahtunut suuria muutoksia. Kokeessa katkojan toiminta taajuudenmuuttajassa askarrutti, sillä se toimi, eli oli auki, maksimissaan 20 % kierrosnopeuden ollessa 1500 r/min. Kokeessa oikosulkumoottorin toimintaa ohjaavaa taajuudenmuuttajaa ohjattiin PC -ohjelmalla, joka helpotti arvojen asettelua ja ohjaimista huomattavasti verrattuna taajuudenmuuttajan paneelikäyttöön.

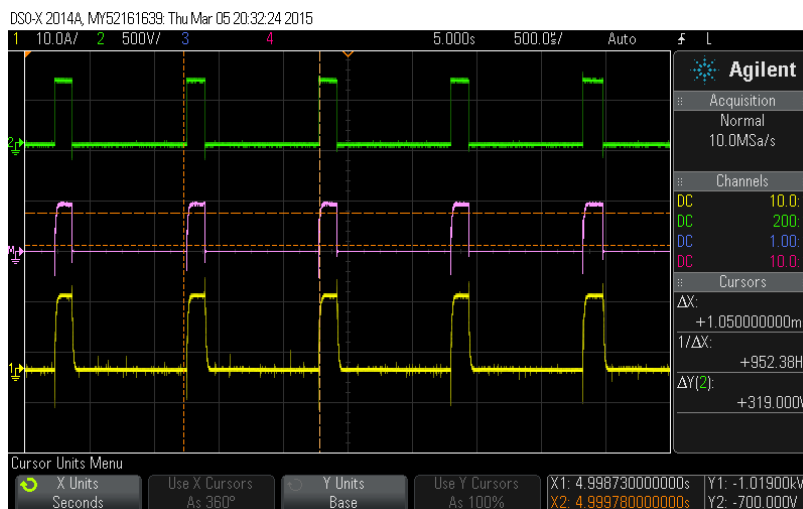


Kuva 15. Kuvakaappaus oskilloskoopista.

Kuvasta nähdään, että

- välipiirinjännite on 640 V {Ampl(2)}
- virran huippuarvo on 14,9 A {Ampl(1)}
- katkojan toiminta 20 % {Duty(1)}
- tehonsiirto 1,837 kW {Avg-Cyc(M)}

Kierrosnopeudella 500 r/min vastaavat arvot olivat 640 V, 14,9 A, 13,44 % ja 1,191 kW. Katkojan toiminta aika oli 1,05 ms ja taajuus 952,38 Hz.



Kuva 16. Kuvakaappaus oskilloskoopista.

13 Yhteenveto vaihtoehtoisesta mittauksesta

Tässä laboratoriotyössä ei saatu toivottua tulosta, jolla tahtireluktanssimoottorin hyötysuhde olisi selvinnyt laskemalla, johtuen ensimmäisen kokeen liian harvasta kierrosnopeusalueesta ja momentti tiedon puutteesta. Jarruvastus kokeessa ei saatu siirrettyä riittävää määrää energiaa vastukseen katkojan toiminnan johdosta.

Se, miten voisi tehdä lisää mittauksia ja kokeita, voisi olla, että olisi taajuudenmuuttaja, jossa olisi mahdollisuus siirtää energiaa suoraan verkkoon tai vaihtoehtoisesti taajuudenmuuttaja pari, joilla olisi yhteinen välipiiri käytössään kokeessa. Näin saatavia mittaustuloksia voisi sitten verrata momenttianturilla suoritettaviin mittaustuloksiin, kunhan sellainen saadaan laboratorioon.

13.1 Taajuudenmuuttaja verkkoon jarrutuksella

Toinen vaihtoehtoinen mittausmenetelmä voisi olla muuten samantyyppinen kuin tässä työssä esitetty, mutta siinä jarrutusenergia ohjataan suoraan verkkoon eli puhutaan verkkoon jarruttavasta taajuudenmuuttajasta. Se ohjaisi samaan tapaan oikosulkumoottoria. Verkkoon jarrutettaessa ei esiintyisi kapasiteetti ongelmaa, joka nyt oli ilmeinen.

13.2 Yhteinen välipiiri taajuudenmuuttajissa

Tässä menetelmässä kahdella taajuudenmuuttajalla on yhteinen DC-välipiiri, jolloin kun tahtireluktanssimoottori pyörii tahtinopeuttaan, pyritään oikosulkumoottorilla jarruttamaan tahtireluktanssimoottoria, jolloin oikosulkumoottori toimii generaattorina ja ohjaa jarrutettaessa syntyvän virran taajuusmuuttajien yhteiseen DC-välipiiriin. Välipiirin tarkoituksena taajuusmuuttajassa on toimia energiavarastona. Yleisin ratkaisu on jännitevälipiiri eli kondensaattoripatteri.

14 Loppusanat

Laboratoriomittaukset sekä niiden suunnittelu että toteutus tässä työssä olivat hyvin opettavaisia ja haastavia. Työskentely laboratoriossa sujui hyvin opetusta haittaamatta.

Lähteet

- 1 <http://www.kansallisbiografia.fi/kb/artikkeli/4351/> Luettu 1.2.2015
- 2 Aura L., Tonteri A., Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet
- 3 Hietalahti L., Säädetyt sähkömoottorikäytöt
- 4 Pyrhönen J., Sähkökäytöt, LTY Sähkötekniikka
- 5 Högfors R., Tahtireluktanssikoneiden lämpöajojen tehokas mittaaminen
- 6 Määttä K., Sähkökäyttöinen moottorikelkka
- 7 Suomela P., Synkronireluktanssimoottorin ja oikosulkukoneen vertailu
- 8 Jokinen K., Säädetyt sähkökäytöt
- 9 Kolehmainen J., Pyörivät Sähkökoneet SATE2050 Osa6:Tahtireluktanssikone.19.11.2012
- 10 Ojanperä 2000
- 11 Piironen M., Tuotannon tehostaminen ABB Oy:n System AC- tulosityksikön Durralinjalla
- 12 Taajuusmuuttaja 2008
- 13 Hakola T., Taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto
- 14 Sähkömoottorikäytöt, ABB TTT-käsikirja
- 15 Aura L., Tonteri A., Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet
- 16 http://www.lut.fi/documents/10633/333534/Moottoreiden+Hy%C3%B6tysuhteet_yleinen_Jarno_Kinnunen.pdf/1f7fb3af-2475-4b2d-98bf-af4d1580d4dc/ Luettu 1.2.2015
- 17 Malinen J., Induktiomoottorin hyötysuhdemittaukset verkko- ja taajuusmuuttajasyötössä, 2005
- 18 Kuusinen, K., Bovellan, K., Korkeahyötysuhteisen moottorin hankinta, 2004

http://www.motiva.fi/files/1666/Korkeahyotysuhteisten_sahkomoottorien_hankinta.pdf/

Luettu 1.2.2015

19 www.abb.com/product/fi/9aac172655.aspx/ Luettu 1.2.2015

20 <http://www.abb.fi/product/fi/9AAC169443.aspx?country=fi/> Luettu 1.2.2015

21 [http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisp-lay/142fdc609905c745c1257b9000274e2f/\\$file/FI_ACS880_single_drives_RevE.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisp-lay/142fdc609905c745c1257b9000274e2f/$file/FI_ACS880_single_drives_RevE.pdf) Luettu 9.3.2015 (sivu 23)

Low voltage Process performance motors according to EU MEPS

Uusi prosessimoottoreiden tuoteluettelon sivu 6 – koko luettelo [20]

Minimum efficiency values defined in IEC/EN 60034-30-1: 2014 (reference values at 50 Hz, based on test methods specified in IEC 60034-2-1 which has been updated to edition 2.0, 2014-06).

Output kW	IE1 Standard efficiency				IE2 High efficiency				IE3 Premium efficiency				IE4 Super Premium efficiency			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	30.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	63.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	36.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	38.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	39.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	43.8	73.8	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	68.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	44.6	74.6	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	47.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	76.9	66.2	50.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	52.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.9	79.8	74.1	54.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	56.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	58.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	86.8	86.6	84.6	81.9	60.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.0	86.0	83.8	62.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	86.3	64.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	86.0	89.4	89.8	88.7	86.9	65.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	66.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	67.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	68.2	92.7	92.0	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	69.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	70.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	71.4	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	72.1	94.3	94.6	94.1	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	73.1	94.7	95.0	94.6	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	74.1	95.0	95.2	94.9	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	75.1	95.4	95.4	95.1	96.0	96.3	96.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	76.1	95.6	95.6	95.4	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.9	94.9	94.8	93.0	76.6	95.8	95.8	95.6	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	77.1	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	77.6	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.5	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	78.1	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.8	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	78.6	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.8	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	79.1	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.8	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	79.6	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.8	95.4
500-1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	80.1	95.8	95.8	95.8	96.5	96.7	96.8	95.4

Mittaustulokset

Laboratoriotyön mittauspöytäkirja

Tahtireluktanssimoottorin hyötysuhdemittaukset															17. joulukuuta 2014				
Mittaus nro	rpm	R / Ω	C / μF	P / W	P _a / W	Q / var	Q _i / var	Q _a / var	I / A	U / V	cosφ	sinφ	S / VA	S _i / VA	S _a / VA				
1	1100	398	50	-304,80	-176,50	3582,90	1183,00	1172,30	5,60	206,95	94,73	0,988	3699,40	1222,00	1185,50				
	Tahtireluktanssimoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		50	-402,00	-345,10	4286,70	1417,00	742,10	7,22	208,19	95,91	0,906	4507,60	1419,00	818,40				
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
2	1200	398	50	-481,40	-288,50	4296,60	1420,20	2070,70	7,04	214,71	96,11	0,990	4533,40	1499,00	2090,70				
	Tahtireluktanssimoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		50	-1017,80	-790,10	6566,80	2170,80	1862,90	10,51	229,43	98,08	0,920	7237,20	2397,00	2023,50				
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
3	1300	398	50	-662,20	-394,70	5031,90	1659,50	3037,00	8,00	225,45	97,01	0,991	5412,90	1787,80	3062,50				
	Tahtireluktanssimoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		50	-1188,40	-918,30	9183,40			11,34	272,12	97,38		9259,90						
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
4	1400	398	50	-873,00	-510,60	5710,00	1886,00	4186,30	8,93	234,70	97,98	0,992	6287,00	2080,00	4217,30				
	Tahtireluktanssimoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		50	-1851,00	-1431,90	8532,00	2818,00	3938,00	13,82	245,91	100,47	0,939	10193,00	3376,00	4191,00				
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
5	1500	398	40	-889,00	-550,60	5625,00	1858,00	3920,00	8,71	238,58	98,20	0,989	6231,00	2062,00	3959,60				
	Tahtireluktanssimoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		40	-1649,00	-1187,00	11870,00			12,45	320,99	97,91		11982,00						
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		
Tahtireluktanssimoottori	128		40	-1918,00	-1522,20	8397,00	2774,00	3612,30	13,56	250,61	100,85	0,921	10192,00	3379,00	3919,90				
	Oikosulkumoottori																		
	Oikosulkumoottori																		