



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mikael Aromaa

OIKOSULKURENKAAN TASAPAINO-
TUSREIKIEN VAIKUTUS MOOTTORIN
SUORITUSKYKYYN

Tekniikka
2020

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Vaasan ammattikorkeakouluun sähköinsinöörin tutkintoa varten keväällä 2020. Työ ja siihen liittyvät testit tehtiin ABB Oy:n Moottorit ja generaattorit -yksikölle.

Päättötyön valvojina olivat Vaasan ammattikorkeakoulun puolesta lehtori Kari Jokinen ja ABB Oy Motors and Generators yksiköstä DI Tero Käsäkangas. Heille suuret kiitokset avusta ja tuesta, jota sain työni aikana.

Vaasassa 17.5.2020

Mikael Aromaa

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mikael Aromaa
Opinnäytetyön nimi	Oikosulkurenkkaan tasapainotusreikien vaikutus moottorin suorituskykyyn
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	46
Ohjaaja	Kari Jokinen

Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuustutkimuksena ABB Oy:n Moottorit ja generaattorit -yksikölle. Työssä tarkasteltiin moottorin ja erityisesti roottorin arvojen käyttäytymistä, kun roottorin muoto muuttuu tai siellä on vika. Työhön kerättiin teoreettista tietoa, simuloitiin adeptilla käyttäen FEMMiä ja luotiin testisuunnitelma.

Työn materiaaleina ja lähteinä toimivat Internet- artikkelit, ABBn omat lähteet sekä dokumentit, opinnäytetyöt sekä Vaasan ammattikorkeakoulun opetusmateriaalit.

Lopputuloksena voidaan pitää sijaiskytkennän, yhtälöiden sekä simuloinnissa havaittavat tulokset sekä teoriaosan antamat viittaukset vikatilanteisiin ja niiden vaikutukseen. Saadut tulokset ovat teoreettiset ja tarkat arvot oltaisiin saatu testeillä, jotka jäivät välii COVID-19 viruksen vuoksi.

ABSTRACT

Author	Mikael Aromaa
Title	Effects of Balancing Holes on End-ring to Motor Performance
Year	2020
Language	Finnish
Pages	46
Name of Supervisor	Kari Jokinen

The thesis was made as literature research for the motors and generators unit of ABB Oy. In the thesis the behavior of the motor and especially the rotor values were studied when the shape of the rotor changes or it has a fault. Theoretical data simulated with an adept using FEMM was collected and a test plan was created.

Internet articles, ABB's own sources, documents, theses and materials of Vaasa University of Applied Sciences were used as material and sources for the thesis.

As the end result can be considered results observed with the equivalent circuit, the equations and the simulation and also data obtained from the theory regarding fault situations and their effects. The results are theoretical and accurate values would have been obtained by tests that could not be conducted due to the COVID-19 virus.

SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO	6
KUVALUETTELO	7
KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT	8
1 JOHDANTO	12
2 ABB OY	13
2.1 ABB yrityksenä.....	13
2.2 Motors and Generators	13
3 OIKOSULKUMOOTTORI	15
3.1 Rakenne	15
3.2 Staattori ja roottori	16
3.2.1 Staattori- ja roottorilevyt.....	16
3.2.2 Staattorin ja roottorin käämitykset.....	16
3.3 Oikosulkumoottorin toimintaperiaate	17
3.4 Vuon kulku moottorissa	18
3.5 Oikosulkumoottorin sijaiskytkentä	19
4 ROOTTORI	24
4.1 Häkkikämmetty roottori	24
4.2 Roottorin tasapainotus.....	25
5 TASAPAINOTUSREIKIEN VAIKUTUKSET MOOTTORIN TOIMINTAAN.....	27
5.1 Muuttuvan roottoriresistanssin vaikutus moottorin ominaisuuksiin	33
5.1.1 Jättämä ja käynnistysmomentti.....	33
5.1.2 Käynnistysvirta.....	36
5.1.3 Lämpötila	37
5.1.4 Hyötysuhde.....	38
6 MOOTTORIN VALINTA JA SIMULOINTI.....	40

6.1	Moottorin valinta.....	40
6.2	ADEPT kokeilu.....	42
6.3	Testisuunnitelma.....	44
7	LOPPUPÄÄTELMÄT	45
	LÄHDELUETTELO.....	46

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.....	43
-----------------	----

KUVALUETTELO

Kuva 1. Moottorin poikkileikkaus /5/	15
Kuva 2. Magneettikentät /8/	17
Kuva 3. Eri vuon kulkureittejä /1/.....	18
Kuva 4. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä /1/.....	19
Kuva 5. Roottoripiiri, jossa jännite muuttuva /1/.....	22
Kuva 6. Roottoripiiri jännite vakioituna ja vastus jaettuna komponenteihin. /1/ ..	23
Kuva 7. Häkkikäämityn roottorin sauvat ja oikosulkurengaat	24
Kuva 8. Tasapainotusrenkas /7/	25
Kuva 9. Oikosulkurengaaseen porattu reikä /7/	26
Kuva 10. Häkkikäämityksen sijaiskytkentä (ehjä) /9/.....	28
Kuva 11. Rr matrix /9/.....	29
Kuva 12. Ehjän moottorin nopeuskäyrä/9/	29
Kuva 13. Ehjän moottorin staattorivirta/9/	30
Kuva 14. Ehjän moottorin roottorivirta/9/	30
Kuva 15. Häkkikäämityksen sijaiskytkentä (johdintanko rikki) /9/	31
Kuva 16. Häkkikäämityksen sijaiskytkentä (oikosulkurengas rikki) /9/.....	31
Kuva 17. Viallisen moottorin nopeuskäyrä/9/	32
Kuva 18. Viallisen moottorin staattorivirta /9/	32
Kuva 19. Viallisen moottorin roottorivirta/9/	32
Kuva 20. Roottoriresistanssin vaikutus momenttikäyrän muotoon/8/	34
Kuva 21. Ehjän moottorin käynnistysvirta ja verhokäyrä tyhjäkäynnissä /2/	36
Kuva 22. Viallisen moottorin käynnistysvirta ja verhokäyrä tyhjäkäynnissä/2/ ..	37
Kuva 23. Häviöt	38
Kuva 24. Valittu moottori.....	40
Kuva 25. Moottorin kilpi.....	41

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

U	Jännite
f	Taajuus
P	Teho
n	Pyörimisnopeus
I	Virta
Pf	Tehokerroin
$\cos\varphi$	Tehokerroin
IEC	Hyötysuhde
q	Vakoluku
Q	Uraluku
p	Napapariluku
m	Vaiheluku
aer	Vaihesiirto
Nr	Urien lukumäärä
Ir	Roottorin virta
Ie	Oikosulkurenkään virta
Ib	Johdintangossa kulkeva virta
Rr	Oikosulkurenkään resistanssi
Rb	Johdintangon resistanssi

l_r	Oikosulkurenkaan pituus
l_b	Johdintangon pituus
A_r	Oikosulkurenkaan pinta-ala
A_b	Johdintangon pinta-ala
ρ_r	Oikosulkurenkaan johdinmateriaalin resistiivisyys
ρ_b	Johdintangon johdinmateriaalin resistiivisyys
s	Jättämä
M	Momentti
ω	Vaihesiirto
L_m	Magnetointi induktanssi
R_m	Magnetointi resistanssi
X_δ	Hajavuon reaktanssi
L_δ	Hajavuon induktanssi
R_δ	Hajavuon resistanssi
X_σ	Hajareaktanssi
P_r	Rautahäviöiden häviöteho
$Q_{\sigma 1}$	Staattorin loisteho
$Q_{\sigma 2}$	Roottorin loisteho
Q_m	Magnetoinnin ottama loisteho
U_m	Magnetointijännite

V_{rk}	Silmukajännite
I_{rk}	Silmukavirta
P_1	Ottoteho
P_2	Antoteho
Ph	Kokonaishäviöt
P_{cu1}	Roottorin kuparihäviöt
P_{cu2}	Staattorin kuparihäviöt
P_{fe}	Raurahäviöt
P_l	Lisähäviöt
P_i	Ilmaväliteho
P_m	Mekaaninen teho
U_{v1}	Syöttöjännite
I_1	Staattorivirta
R_1	Staattoriesistanssi
$X_{\sigma 1}$	Staattorihajareaktanssi
I'_2	Roottorivirta
R'_2	Roottoriesistanssi
R'_{mek}	$(1-s)/s \cdot R'_2$
$X_{\sigma 20}$	Roottorihajareaktanssi
U_{mv}	Magnetointijännite

I_0	Tyhjäkäyntivirta
I_r	Rautahäviövirta
I_m	Magnetointivirta
X_m	Magnetointireaktanssi
P_{1v}	Verkosta otettu teho
P_{kv1}	Staattorin tehohäviö
$P_{\delta v}$	Ilmaväliteho
P_{kv2}	Roottorin tehohäviö
P_{vmek}	Mekaaninen teho

1 JOHDANTO

Työ tavoitteena oli saada kirjallista tietoa tasapainotusreikien vaikutuksista moottorin suorituskykyyn. Työ pitää sisällään teoriaa, ohjelmalla simulointia sekä testisuunnitelman. Saatuja tuloksia voitaisiin käyttää tulevaisuudessa moottoreiden suunnittelussa, kun tasapainotusreikien vaikutukset olisivat selvillä.

Ongelmana oli ettei oikosulkurenkaasta tai siihen poratujen reikien vaikutuksista löytynyt käytännössä lainkaan dokumentointia. Tämän takia reikien vaikutusta voidaan etukäteen arvioida tarkastelemalla moottorin ja roottorin sijaiskytkentää sekä tilanteita, joissa häkkikäimityksen johdintangossa tai oikosulkurenkaassa oleva vika tai johdinmateriaalia paikallisesti vaihtamalla saadaan aikaan kasvava resistanssi, joka simuloisi poratun reijän vaikutuksia.

2 ABB OY

2.1 ABB yrityksenä

ABB on teknologiajohtaja, joka edistää teollisuuden digitalisaatiota. ABB:llä on toiminta jatkunut yli 130 vuoden ajan. ABB:n toiminnan voi jakaa neljään eri liiketoimintaan: Electrification, Industrial Automation, Motion ja Robotics & Discrete Automation, joita tukee yhteinen, digitaalinen ABB Ability™ -alusta. ABB toimintaa on yli 100 maassa ja työllistää noin 147 000 henkilöä.

Suomessa ABB toimii noin 20 paikkakunnalla. Tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa, Porvoossa ja Haminassa. Suomessa ABB työllistää noin 5 400 henkilöä.

- Helsinki, Pitäjänmäki: moottorit, generaattorit, taajuusmuuttajat, CPM-energianhallintajärjestelmät ja paperikonekäyttöratkaisut
- Helsinki Vuosaari, Hamina: Azipod® -ruoripotkurijärjestelmät
- Vaasa: moottorit, muuntajat, sähköverkon ohjaus- ja suojauslaitteet, pienjännitustuotteet ja – järjestelmät, sähkön siirto- ja jakelujärjestelmät, voimantuotannon järjestelmät, prosessiteollisuuden kokonaisprojekointi
- Porvoo: sähköasennustuotteet /3/

2.2 Motors and Generators

ABB:n Motors and Generators -liiketoimintalinja Suomessa panostaa vahvasti korkean hyötysuhteen moottoreiden ja generaattoreiden tutkimukseen ja tuotekehitykseen. Motors and Generators Suomessa kehittää ja valmistaa moottoreita ja generaattoreita kaikille teollisuusaloille ja kaikkiin sovelluksiin maailmanlaajuisesti. Tehtaat sijaitsevat Helsingissä ja Vaasassa.

ABB on maailman johtava moottorivalmistaja. Vaasan-tehtaalla on maailmanlaajuinen vastuu yhtiön pienjännitemoottoreitten valmistuksesta ja tuotekehityksestä

vaativiin käyttöihin. Helsingin Pitäjänmäellä sijaitsevassa tehtaassa kehitetään ja valmistetaan muun muassa korkeajännitemoottoreita, dieselgeneraattoreita ja kestopagneettimoottoreita.

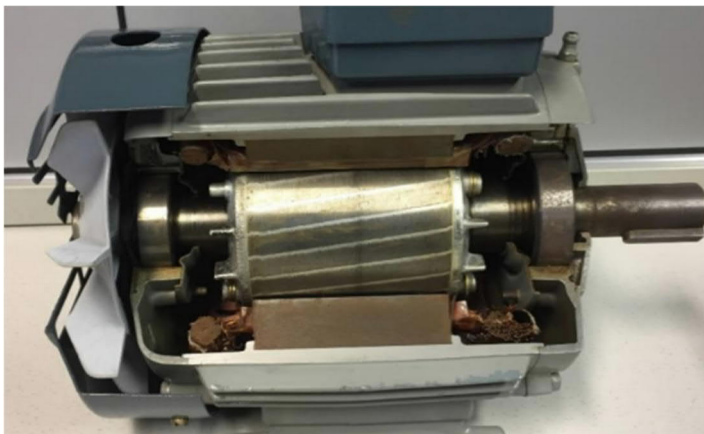
Maailmanlaajuisesti ABB:n moottori- ja generaattoriliiketoiminta työllistää 13 000 henkeä 31 tehtaassa 9 maassa. Suomessa liiketoiminta työllistää 1 520 henkilöä, joista Vaasassa 550 ja Helsingissä 900. /4/

3 OIKOSULKUMOOTTORI

Tässä opinnäytetyössä tarkastelemme oikosulkumoottoria. Oikosulkumoottori eli induktimoottori on epätahtikone, joka on yksi yleisimmistä käytetyistä sähkömoottoreista koko maailmassa. Verrattuna muihin yleisimpiin moottorityyppeihin, oikosulkumoottorissa ei ole erillisiä magnetointikäämityksiä, vaan ainoastaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikäämitykset.

3.1 Rakenne

Oikosulkumoottorin rakenne on yksinkertainen. Moottorin perusosia ovat rungon, akselin, laakerien ja kytkentäkotelon lisäksi staattori ja roottori. Kuvassa 1 keskelä on pyörivä roottori ja sen ympärillä seisoja eli staattori. Epätahtikoneessa aktiivisia osia ovat käämit ja magnetipiirit staattorissa sekä roottorissa, muut osat ovat ns. passiivisia osia. Sähköisessä tarkastelussa olennaisimmat osat ovat staattori ja roottori. Lisäksi vasemmalla kuvassa näkyy moottorin ilmajähdytyksen komponentteja ja oikealla akselin pää.



Kuva 1. Moottorin poikkileikkaus /5/

3.2 Staattori ja roottori

3.2.1 Staattori- ja roottorilevyt

Staattori ja roottori muodostuu uritetuista piiteräslaminaattilevyistä tehdystä rautasydäimestä, joka vähentää hystereesihäviöitä ja estää koneen kuumenemistä ja energiahäviöitä aiheuttavien pyörrevirtojen muodostumisen. Rautasydän toimii magneettipiirinä. Staattorin rautasydämen ympärille on tehty käämitys, johon johdetaan verkkovirtaa ja saa aikaiseksi pyörivän magneetikentän. Induktio- moottoreissa yleisesti käytetty roottorityyppi on häkkikämmitty roottori, jossa käämitys on korvattu sauvoilla sekä oikosulkurenkailla.

3.2.2 Staattorin ja roottorin käämitykset

Oikosulkumoottorin staattorissa on kolmivaihekäämitys, jossa vaiheiden väli on 120 astetta. Staattorissa käämit laitetaan omiin uriinsa. Staattoripaketissa voi olla esimerkiksi 32 uraa ja uraluku jakaantuu vaiheluvun mukaisesti jokaiselle vaiheelle tasaisesti. Vakoluku voidaan laskea kaavalla:

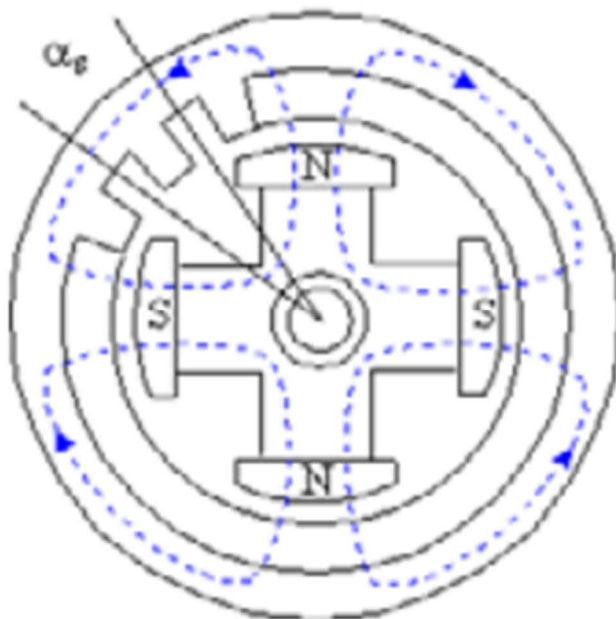
$$q = \frac{Q}{2pm} \quad (1)$$

Jakamalla uraluku Q napariluvulla p ja vaiheluvulla m saadaan vakoluku q . Vakoluvun avulla tiedetään montako uraa on vaihetta ja napaa kohden. Vakoluku on usein kokonaisluku, mutta murtovakokäämitys on mahdollinen ja silloin vakoluku on murtoluku. Staattorin käämit (vyyhdit) eristetään hartsaamalla, esimerkiksi polyesteri- tai epoksihartsilla.

Epätahtikoneessa on roottorikämmitys toteutettu yleensä alumiinisauvoilla, jotka tehdään painevaluna. Oikosulkurenkaat valetaan roottorin päihin yhdistämään sauvat toisiinsa. Joskus käytetään kuparisauvoja, jotka työnnetään roottorin uriin, joissakin tapauksissa myös normaali käämitys on mahdollinen. Roottorin häkkikämmitykseen ei syötetä erikseen jännitettä vaan se indusoituu siihen. /6/

3.3 Oikosulkumoottorin toimintaperiaate

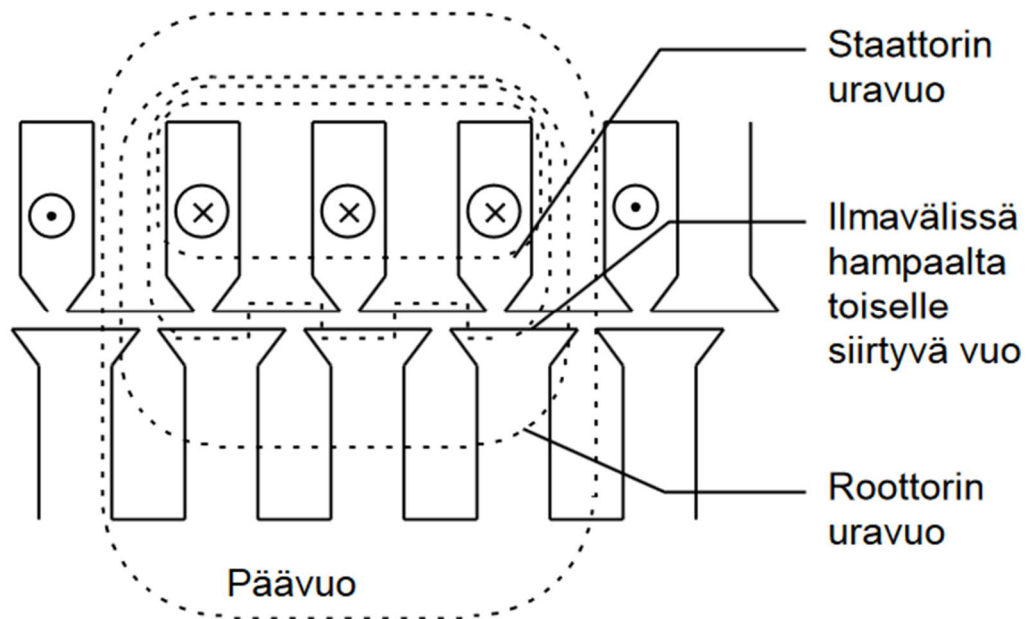
Oikosulkumoottorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään, joka syntyy ilman lisälaitteita, koska staattorissa kulkee symmetrinen kolmivaiheinen vaihtovirta. Paikalla olevan staattorin käämitykseen syötetään kolmivaiheista virtaa, joka luo ilmapäliin magneettivuon, joka leikkaa häkkikäämityksen sauvoja. Roottorin sauvat ovat oikosuljettu ja tämä saa aikaan indusoituneen jännitteen sauvoihin, joka saa aikaan roottorivirran I_r . Virran I_r ja pyörivän kentän välinen voimavaikutus saa roottorin pyörivään liikkeseen. Magnetoitunut roottori seuraa staattorin pyörivää magneettikenttää, jonka staattorin käämitykseen syötetty kolmivaiheinen virta on saanut aikaan. Roottorin pyörimisnopeus täytyy olla pienempi kuin staattorin magneettikentän pyörimisnopeus, jotta magneettivuot leikkaavat roottorin sauvoja ja saavat aikaan indusoituneen jännitteen, joka saa aikaan oikosulkurenkaan kautta sulkeutuvan virran, ja siten voimavaikutuksen ja roottoria vääntävän momentin. Kuvassa 2 siniset viivat esittävät magneettikenttää.



Kuva 2. Magneettikentät /8/

3.4 Vuon kulku moottorissa

Päävuo kiertää staattori- sekä roottorikäämin. Muut vuot kulkevat lyhyempiä reittejä pitkin kulmien urien poikki sekä hampaalta toiselle. Vyyhden päähän syntynyt vuo näkyy kuvassa 3.



Kuva 3. Eri vuon kulkureittejä /1/

Kaikki vuot synnyttävät omat reaktanssinsa. Vyyhden päissä oleva vuo synnyttää vyyhdenpääreaktanssin, uravuo aiheuttaa urareaktanssin ja ilmavälissä kulkeva vuo synnyttää ns. hammaspääreaktanssin. On olemassa myös ns. yliaaltoreaktanssi tai ilmavälireaktanssi, mitkä johtuvat yliaalloista.

Käämin vuo jakaantuu tasaisesti ilmaväliin, koska ilmaväli on ”tasainen” ja se muodostaa pääosan vuon magneettivastuksesta. Tällöin ilmaväli on dominoiva vuon jakaantumisessa. Vuon tasaista jakaantumista ilmaväliin muuttavat uraukot, sillä hampaiden kohdalla on suurempi vuo kuin ura-aukon kohdalla.

Päävuon magnetointireaktanssi saadaan kaavalla:

$$X_m = \omega L_m = \omega \frac{N_1^2}{R_m} \quad (2)$$

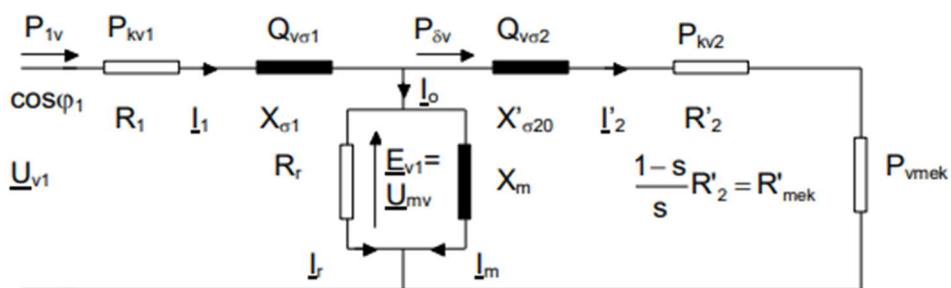
N_1 on kierrosmäärä ja R_m on magneettivastus, joka muodostuu päävuon kulkurei-
tillä staattorissa, ilmavälissä ja roottorissa. Esimerkiksi ensiön hajavuon reaktans-
siksi saadaan:

$$X_{\delta_1} = \omega L_{\delta_1} = \omega \frac{N_1^2}{R_{\delta_1}} \quad (3)$$

R_{δ_1} on ensiön hajavuon kohtaama magneettivastus. Päävuon ja hajavuon jako ta-
pahtuu normaalin virtajaon tapaan magneettivastusten määräämällä. /1/

3.5 Oikosulkumoottorin sijaiskytkentä

Sijaiskytkennän tarkoituksena on auttaa ymmärtämään moottorin sähköistä toi-
mintaa sekä laskemaan moottorin sähköisiä arvoja. Moottorin sähköiset arvot
redusoidaan vastaamaan yksivaiheista syöttöä.



Kuva 4. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä /1/

$U_{v1} =$ Syöttöjännite

$I_1 =$ Staattorivirta

$R_1 =$ Staattoriesistanssi

$X_{\sigma 1} =$ Staattorihajareaktanssi

$I'_2 =$ Roottorivirta

$R'_2 =$ Roottoriesistanssi

$R'_{mek} = (1-s)/s * R'_2$

$X_{\sigma 20} =$ Roottorihajareaktanssi

$U_{mv} =$ Magnetointijännite

$I_0 =$ Tyhjäkäyntivirta

$I_r =$ Rautahäviövirta

$I_m =$ Magnetointivirta

$R_r =$ Rautahäviöresistanssi

$X_m =$ Magnetointireaktanssi

$P_{1v} =$ Verkosta otettu teho

$P_{kv1} =$ Staattorin tehohäviö

$Q_{v\sigma 1} =$ Staattorin loisteho

$P_{\delta v} =$ Ilmaväliteho

$Q_{v\sigma 2} =$ Roottorin loisteho

$P_{kv2} =$ Roottorin tehohäviö

$P_{vmek} =$ Mekaaninen teho

Sijaiskytkennästä voidaan laskea kaikkien haarojen virrat, esimerkiksi

$$I_1 = I_0 + I'_2, \quad I_0 = I_r + I_m \quad (4)$$

Kun tunnetaan virrat, voidaan laskea jokaisen resistanssin ja reaktanssin jännitehäviö. Tällöin päästään esimerkiksi ensiön jännitehäviöön ja magnetointijännitteeseen:

$$U_{v1} = I_1(R_1 + jX_{\sigma 1}) + U_{mv} \quad (5)$$

eli ensiön jännitehäviö pienentää magnetointijännitettä moottorilla.

Sijaiskytkennästä voidaan saada seuraavat tehot:

Ilmaväliteho = roottoriin menevä teho

$$P_{\delta} = 3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s} \quad (6)$$

Staattorin tehohäviö

$$P_{k1} = 3 * I_1^2 * R_1 \quad (7)$$

Roottorin tehohäviö

$$P_{k2} = 3 * I_2'^2 * R_2' = s * P_{\delta} \quad (8)$$

Mekaaninen teho

$$P_{mek} = 3 \frac{1-s}{s} R_2' (I_2')^2 = (1-s) P_{\delta} \quad (9)$$

P_{mek} sisältää sekä hyödyksi saatavan tehon P_2 että mekaanisen häviötehon P_{μ} .

$$P_2 = P_{mek} - P_{\mu} \quad (10)$$

Sijaiskytkennässä ei mekaanista tehoa ja mekaanista häviötehoa voida erottaa toisistaan. Mekaaninen häviöteho on likimain vakio, kun pyörimisnopeus vaihtelee normaalilla toiminta-alueella ja tällöin se ei sovellu virrasta riippuvaksi komponentiksi. Mekaaniset häviöt otetaan usein huomioon erikseen.

$$\text{Rautahäviöiden häviöteho } P_r = 3 I_r^2 R_r = 3 U_{mv}^2 / R_r \quad (11)$$

$$\text{Verkosta otettu teho } P_1 = 3 U_{v1} I_1 \cos \phi_1. \quad (12)$$

$$\text{Staattorin loisteho } Q_{\sigma 1} = 3 * I_1^2 * X_{\sigma 1} \quad (13)$$

$$\text{Roottorin loisteho } Q_{\sigma 2} = 3 * I_2'^2 * X_{\sigma 20} \quad (14)$$

$$\text{Magnetoinnin ottama loisteho } Q_m = 3 * I_m^2 * X_m = 3 * U_{mv}^2 / X_m \quad (15)$$

Verkosta otetut pätötehot ja loistehot saadaan laskemalla osatehot yhteen.

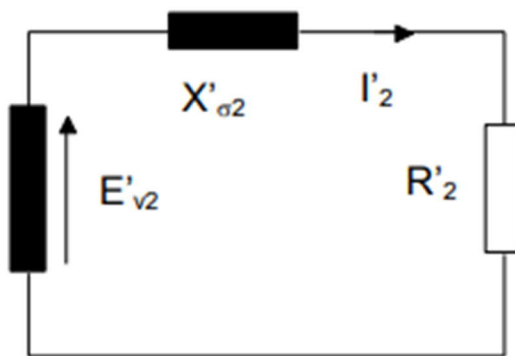
Moottorin tehokerroin saadaan edellisistä tehoista

$$\cos \varphi_1 = \frac{\Sigma P}{\sqrt{\Sigma P^2 + \Sigma Q^2}}, \text{ jossa} \quad (16)$$

ΣP = sijaiskytkennän pätötehot ja ΣQ = sijaiskytkennän loistehot.

Jotta staattori ja roottori voidaan yhdistää ”galvaanisesti” samaan piiriin, on laskennallisten jännitteiden oltava yhtä suuret tasoitusvirran välttämiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että roottoriin muuttuva jännite on vakioitava. Tällöin käytämme hyväksenne roottorin jännitettä, kun $n = 0$.

Oletetaan n mielivaltaiseksi.



Kuva 5. Roottoriin, jossa jännite muuttuva /1/

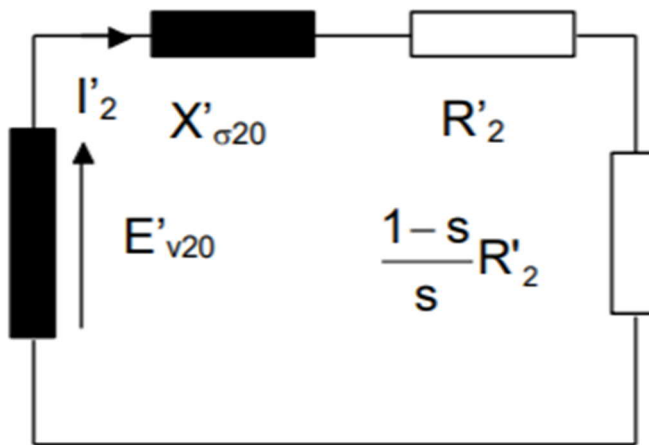
Jos merkitsemme roottorin smj:n käynnistyksen alkuarvon avulla, voimme kirjoittaa: $E'_{v2} = s * E'_{v20}$ ja $X'_{\sigma 2} = s * X'_{\sigma 20}$. Roottoriin virralle voidaan kirjoittaa lauseke:

$$I'_2 = \frac{E'_{v2}}{\sqrt{(R'_2)^2 + (X'_{\sigma 2})^2}} = \frac{sE'_{v20}}{\sqrt{(R'_2)^2 + (sX'_{\sigma 20})^2}} = \frac{E'_{v20}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_{\sigma 20})^2}} \quad (17)$$

Neliöjuurimerkin alla oleva vastus voidaan jakaa kahteen osaan:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + \frac{R'_2}{s} - R'_2 = R'_2 + \frac{R'_2 - sR'_2}{s} = R'_2 + \frac{1-s}{s} R'_2 \quad (18)$$

jossa R'_2 kuvaa lämpöhäviöitä aiheuttavaa resistanssia ja $\frac{1-s}{s} R'_2$ kuvaa mekaanisen tehon antavaa resistanssia

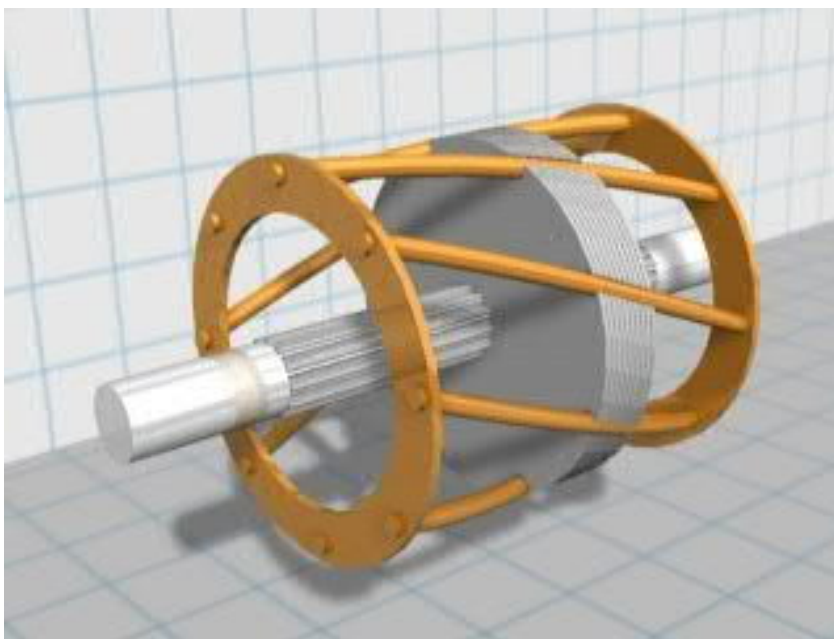


Kuva 6. Roottoriipiiri jännite vakioituna ja vastus jaettuna komponenteihin. /1/

4 ROOTTORI

4.1 Häkkikäämitty roottori

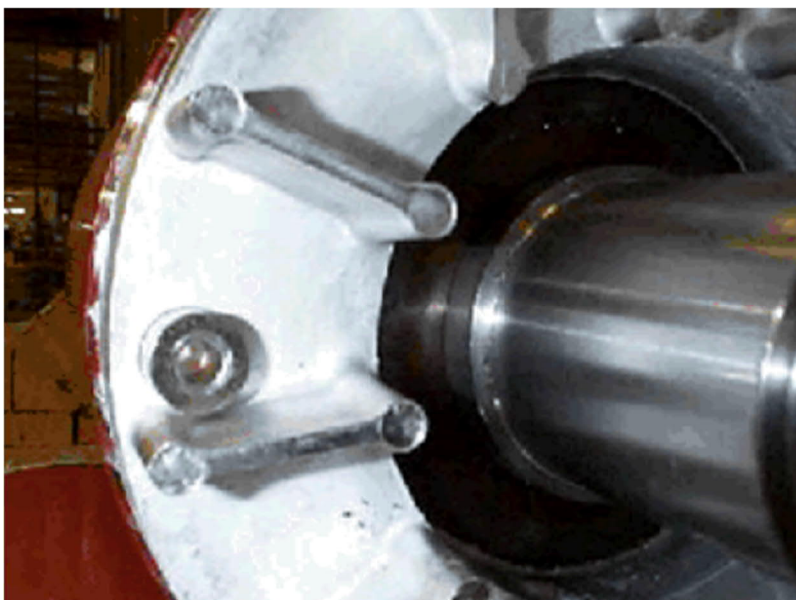
Oikosulkumoottoreissa yleisesti käytetty pyörivä osa on häkkikäämitty roottori. Nimitys tulee häkin muotoisesta käämityksestä, joka muistuttaa oravanpyörän häkkiä. Roottorin johteina toimii sauvat, jotka on oikosuljettu molemmista päistä oikosulkurenkaiden avulla. Sauvat kulkevat uritetuista rautalevyistä koostuvan rautasydämen urissa. Johteet käännetään yleisesti ei-suoraan linjaan, tällä vähennetään melua ja vääntömomentin vaihtelua. Oikosulkurenkaiden ansiosta roottoriin voi indunsoitua virtaa. Roottoripakettiin valetaan sulasta alumiinista oikosulkurenkaat ja sauvat korkeapainevalukoneella.



Kuva 7. Häkkikäämityn roottorin sauvat ja oikosulkurenkaat

4.2 Roottorin tasapainotus

Roottorin tasapainotuksella vähennetään sähkömoottorin mekaanisia värinöitä. Roottorin tasapainotuksessa yleisesti lisätään oikosulkurenkaaseen materiaalia, kuten tasapainotuslaattoja ja pienissä moottoreissa tasapainotusrenkaita, jotka oikealla sijoituksella tasapainottavat roottoria. Roottorit tasapainotetaan mahdollisimman suurella pyörimisnopeudella. Työkortin ohjeessa mainitaan, jos roottorit on lähetettävä tasapainotettavaksi sähkömoottorin nimellisa nopeudella.



Kuva 8. Tasapainotusrenkas /7/

Vaihtoehtoinen menetelmä on poistaa materiaalia. Materiaalia voidaan poistaa poraamalla reikiä oikosulkurenkaaseen. Tähän menetelmään haluamme tutustua tässä työssä paremmin ja luoda siitä dokumentointia.



Kuva 9. Oikosulkurenkaaseen porattu reikä /7/

5 TASAPAINOTUSREIKIEN VAIKUTUKSET MOOTTORIN TOIMINTAAN

Häkkikäämitys on virtapiiri, jonka muodostaa roottorisauvat ja oikosulkurenkaat. Kun oikosulkurenkaaseen porataan reikä se kasvattaa paikallisesti resistanssia. Reikien poraamista voisi verrata esim. sauvojen murtumiseen tai oikosulkurenkaan vaurioon. Se muodostaa virtapiiriin epäsymmetrisiä resistansseja, joka saa aikaan paikallista korkeampaa lämpenemistä, joka saattaa vaurioittaa rengasta.

Roottorin häkkikäämitys on täysin symmetrinen. Tämän vuoksi vierekkäisten virtojen välillä on oikosulkurenkaalla vaihesiirto, joka voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$a_{er} = \frac{2\pi p}{N_r} \quad (19)$$

Missä N_r on roottorissa olevien urien lukumäärä ja p on napapariluku.

Oikosulkurenkaan virta I_e voidaan tämän seurauksena laskea kaavalla

$$I_e = \frac{I_b}{2 \sin \frac{a_{er}}{2}} \quad (20)$$

Missä I_b on roottorin johdintangossa kulkevan virran suuruus.

Oikosulkurenkaan (R_e) resistanssin voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$R_e = \rho_r \frac{l_r}{A_r} \quad (21)$$

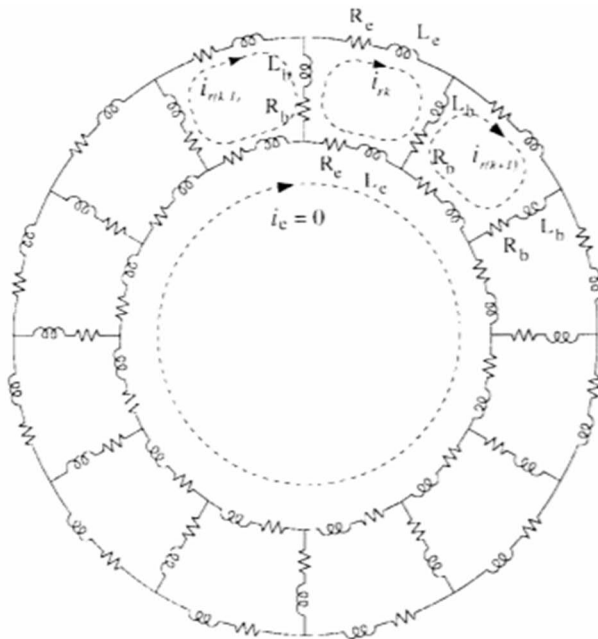
Missä ρ on johdinmateriaalin resistiivisyys, l on pituus ja A on pinta-ala.

Johdintangon resistanssin (R_b) voi laskea kaavoilla:

$$R_b = \rho_b \frac{l_b}{A_b} \quad R_b = \frac{l_b}{\sigma S} \quad (22)$$

Roottorin symmetrian vuoksi voidaan luoda sijaiskykentämalli identtisistä magneettisesti yhdistetyistä piireistä. Selvennykseksi oletimme, että jokainen silmukka on rajattu kahdella johdinsauvalla, joiden päät liitetty oikosulkurenkaiden osiin. /10/

Kuvat 10, 11 ja 12 esittävät häkkikäimityksen sijaiskytkentää, jossa kaikki sauvat ja renkaan osat on esitetty omina resistansseina ja induktansseina. Kuvassa 9 oleva piiri esittää ehjää häkkikäimitystä. Reikien poraus ei katkaise vaan lisää sen osan resistanssia, johon se on porattu eli roottoripiirin resistanssi nousee. R_e ja L_e ovat oikosulkurenkaan resistanssi ja induktanssi, R_b ja L_b ovat johdintangon resistanssi ja induktanssi, I_e ja I_{rk} ovat oikosulkurenkaan virta ja roottorikäimityksen silmukan virta.



Kuva 10. Häkkikäimityksen sijaiskytkentä (ehjä) /9/

Silmukan yhtälö roottoripiirissä:

$$V_{rk} = 0 = 2(R_b + R_e)I_{rk} - R_b I_{r(k-1)} - R_b (I_{r(k+1)}) - (R_e \cdot I_e) + \frac{d\phi_{rk}}{dt} \quad (23)$$

Jännitteen yhtälö oikosulkurenkaassa.

$$V_{re} = 0 = -R_e I_{r_2} - (R_e I_{r_2}) - \dots - R_e I_m + n R_e I_{r_e} + \frac{d\phi_{rk}}{dt} \quad (24)$$

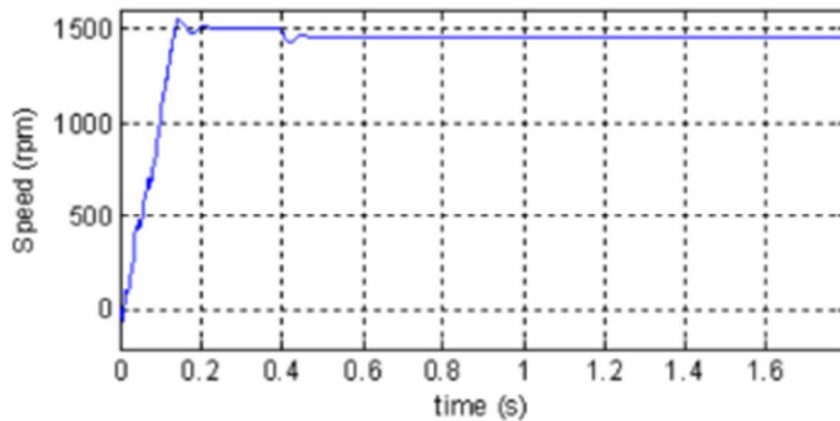
joissa R_b on johdintangon resistanssi ja R_e on oikosulkurenkkaan osan resistanssi. Kun jokainen silmukka oletetaan identtisiksi, silmukkayhtälö toteutuu kaikissa silmukoissa. Siksi resistanssi matrix $[R_r]$ on symmetrinen.

$$[R_r] =$$

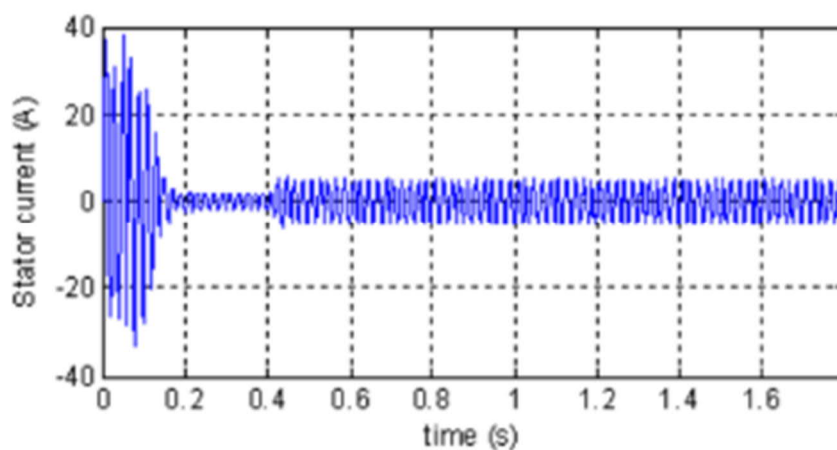
$$\begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \vdots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \vdots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \vdots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \vdots & -R_e & -R_e & nR_e \end{bmatrix}$$

Kuva 11. Rr matrix /9/

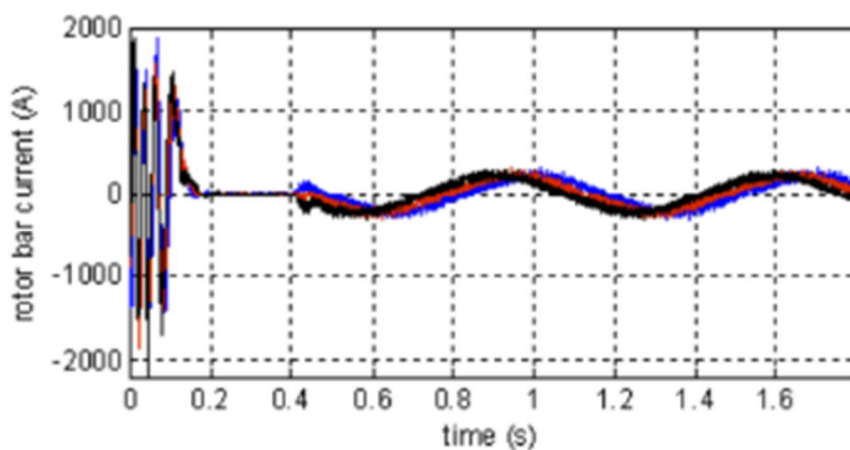
Kuvissa 12, 13 ja 14 on ehjän moottorin nopeus, staattori- ja roottorivirta käynnistyksen aikana.



Kuva 12. Ehjän moottorin nopeuskäyrä/9/

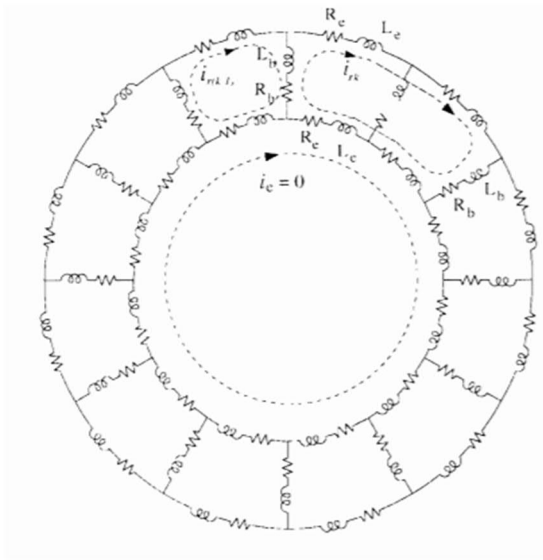


Kuva 13. Ehjän moottorin staattorivirta/9/



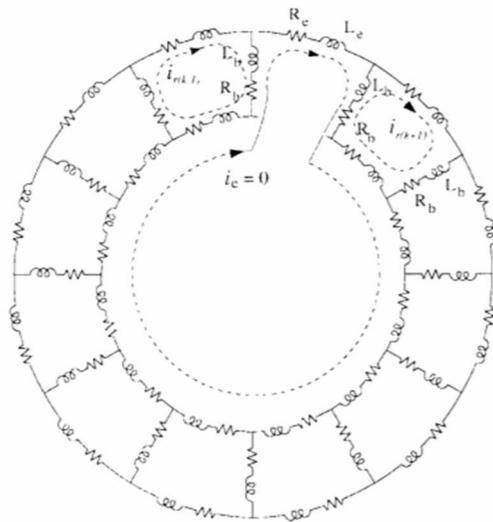
Kuva 14. Ehjän moottorin roottorivirta/9/

Kuvan 10 piiri esittää tilannetta, jossa käämityksen yksi sauva on poikki ja kaksi vierekkäistä silmukkaa yhdistyvät yhdeksi ja silloin silmukavirta virtaa pidemmän silmukan kautta. Tämä tilanne luo roottoriin epäsymmetriaa.



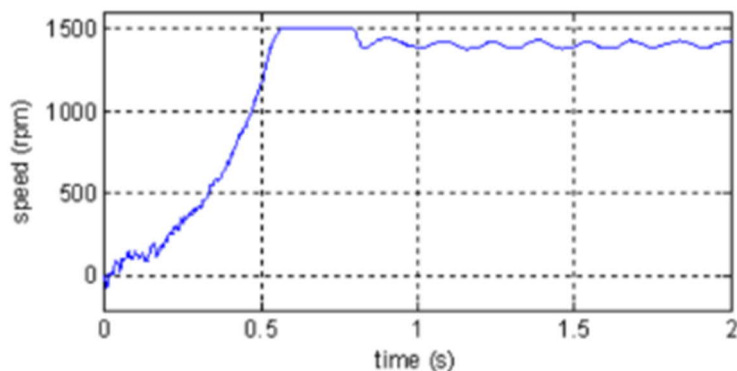
Kuva 15. Häkkikäätymyksen sijaiskytkentä (johdintanko rikki) /9/

Kuvan 11 piiri on häkkikäätymys, jossa toinen rengas on poikki eli sen osa puutuu. Silmukan, jonka oikosulkurenkkaan osa on poikki, silmukavirta on nolla. Tämä tilanne esiintyy kun $R_k = R_e$.

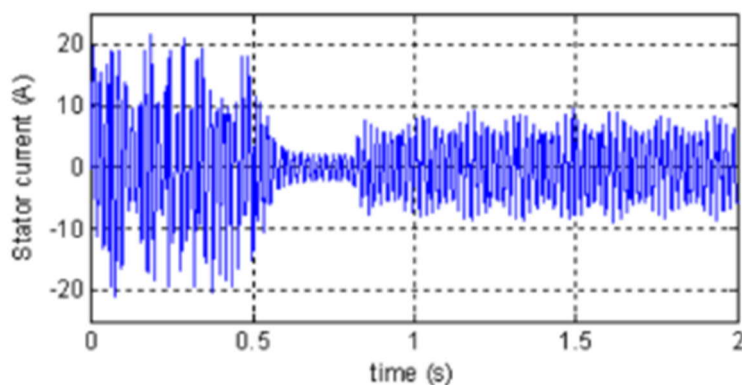


Kuva 16. Häkkikäätymyksen sijaiskytkentä (oikosulkurengas rikki) /9/

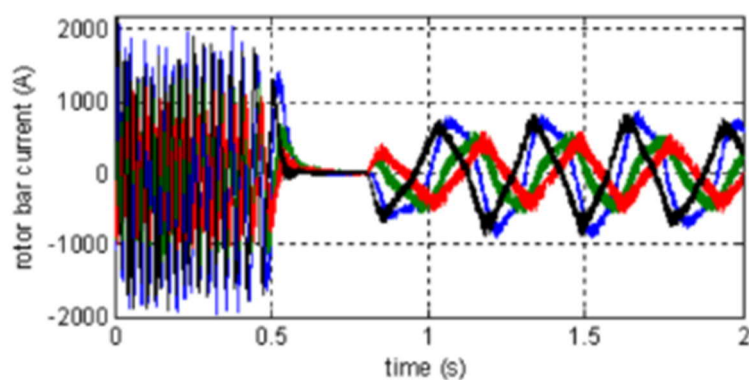
Kuvat 17, 18 ja 19 kuvaavat viallisen moottorin nopeutta, staattori- ja roottorivirtaa käynnistyksen aikana.



Kuva 17. Viallisen moottorin nopeuskäyrä/9/



Kuva 18. Viallisen moottorin staattorivirta /9/



Kuva 19. Viallisen moottorin roottorivirta/9/

Kuvien tilanteessa neljä johdinsauvaa ja yksi oikosulkurenkaan osa ovat rikki. Kuvista huomaamme, että neljän sauvan ja oikosulkurenkaan viallisuuden vaikutukset ovat suuret, kuten käynnistysaika, joka on pidempi kun roottori on epäsymmetrinen. /9/

5.1 Muuttuvan roottoriresistanssin vaikutus moottorin ominaisuuksiin

5.1.1 Jättämä ja käynnistysmomentti

Jättämä (s) tarkoittaa sitä kuinka paljon roottorin nopeus (n) on prosentuaalisesti jäljessä staattorin nopeutta eli tahtinopeutta (ns). Jättämää tarvitaan, jotta roottoriin syntyisi jännite ja virta.

Tahtinopeus lasketaan kaavalla:

$$n = \frac{f}{p} \quad (25)$$

Jossa f on syöttävän verkon taajuus ja p on napapariluku.

Jättämä lasketaan kaavalla:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (26)$$

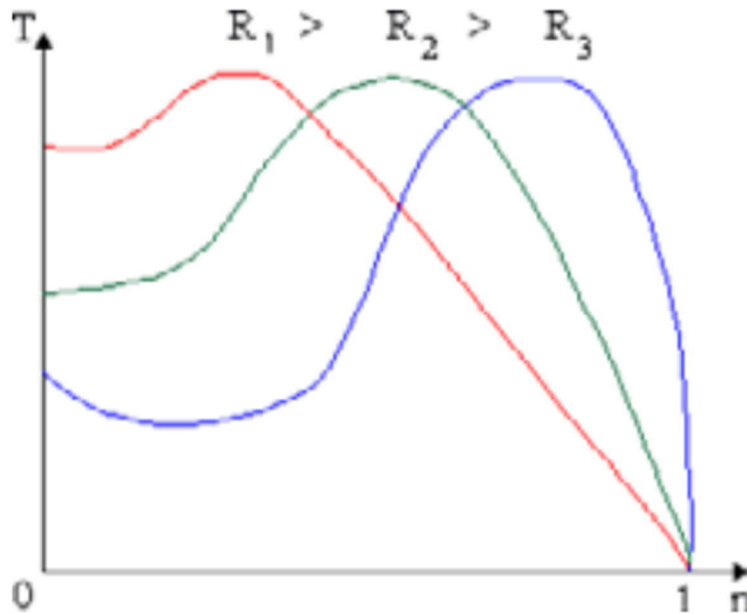
Jossa ns=synkroninopeus ja n=pyörimisnopeus /10/

Roottorin nopeuden lisääntyessä pienenee roottorisauvojen ja kentän välinen nopeusero, jolloin roottorijännite ja -virta pienenevät ja niiden taajuudet alenevat. Jos roottori pyörisi samalla nopeudella kuin kenttä, niin tällöin roottorisauvat eivät leikkaisi vuoviivoja ollenkaan, jolloin Er ja Ir olisivat nolla. Tällöin ei syntyisi myöskään pyörintää ylläpitävää momenttia. Roottori pyörii siis aina hitaammin kuin magneetikenttä, jolloin roottorin nopeus on aina pienempi kuin tahtinopeus.

Jättämän ollessa 1 ei roottori pyöri, jolloin koko ilmväliteho muuttuu roottorissa lämmöksi. Jättämän ollessa 0 (ideaalinen tyhjäkäynti) roottorissa ei synny häviöitä. Roottori on tällöin virraton, eikä myöskään kehitä momenttia.

Vääntömomenttikäyrän muoto riippuu koneen roottorin rakenteesta. Erityisesti käyrän muotoon vaikuttaa roottoripiirin resistanssi. Reikien aiheuttaman roottoripiirin resistanssin kasvu kasvattaa jättämää sekä käynnistysmomenttia. Moottori saavuttaa myös huippumomentin pienemmällä pyörimisnopeudella. Huippumo-

mentin suuruuteen roottori-resistanssi ei vaikuta. Kuvassa 20 on havainnollistettu roottori-resistanssin vaikutusta momenttikäyrän muotoon. /8/



Kuva 20. Roottori-resistanssin vaikutus momenttikäyrän muotoon/8/

Momentin yhtälöstä voimme päästä tutkimaan, mitkä tekijät vaikuttavat moottorin pyörimisnopeuden määräytymiseen. Keskitymme käytännön kannalta oleellisimpiin tekijöihin ja siksi likimääräistämme tilannetta. Aiemmin momentin yhtälöksi saimme:

$$M = \frac{3(U_{v1})^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_s \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_\delta + X_{\delta 20}^1)^2 \right)} = \frac{(U_{v1})^2}{\frac{R'_2}{s}} \quad (27)$$

Jotta viimeiseen verrannollisuusmuotoon päästiin, meidän tulee ottaa huomioon, että:

$$R_1 \ll \frac{R'_2}{s} \text{ normaalilla toiminta-alueella, sekä}$$

$$\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 \gg (X_{\delta_1} + X_{\delta_{20}}')^2, \text{ jolloin nimittäjässä dominoi } R_2'/s. \quad (28)$$

$$\text{Edellä olevan pohjalta voimme todeta: } s = \frac{MR_2'}{(U_1)^2} \quad (29)$$

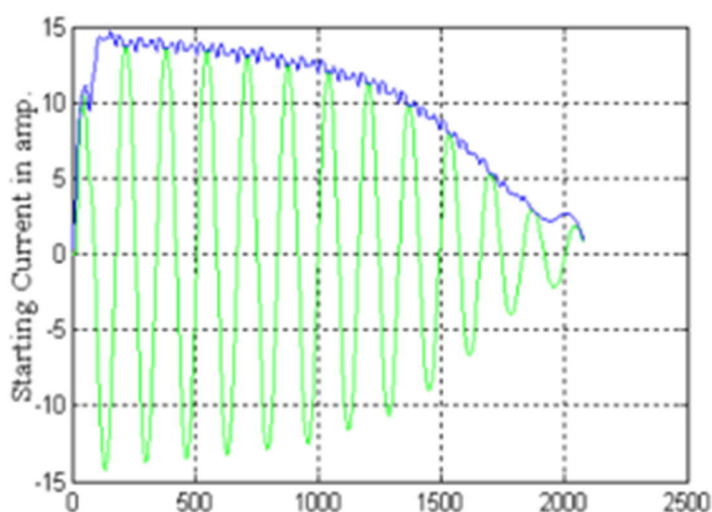
Jättämä on siis verrannollinen momenttiin, roottorivastukseen ja kääntäen verrannollinen jännitteen neliöön.

Jättämä vaikuttaa roottorivirran taajuuteen ja reaktanssiin sekä sitä kautta resistanssiin. /1/

5.1.2 Käynnistysvirta

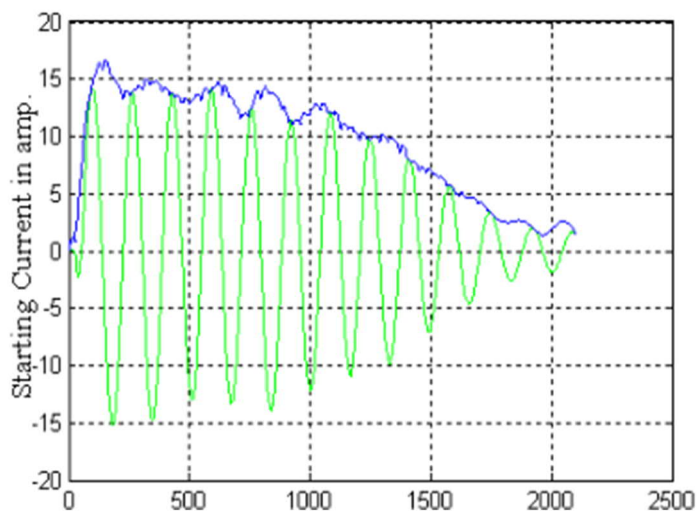
Käynnistysvirta on moottorin käynnistyksen aikana ottama virta. Sen suuruus on jokaiselle oikosulkumoottorille ominainen arvo, joka on työkonesta riippumaton. Se pienentyy verkkojännitteen alentuessa, jolloin vastaavasti moottorin kehittämä vääntömomentti pienenee ja käynnistysaika pitenee. Käynnistysvirta on tavallisesti 5...7 kertaa moottorin nimellisvirta. Vaihteleva käyntivirta luo vaihtuvan momentin, joka luo epätasaisen väännön. Käynnistysaika on pitempi, kun roottori on epäsymmetrinen. /11/

Kuvissa 21 on esitetty käynnistysvirta, kun roottori on ehjä. Virta pienenee tasaisesti kohti nimellistä.



Kuva 21. Ehjän moottorin käynnistysvirta ja verhoikäyrä tyhjäkäynnissä /2/

Kuva 22 esittää käynnistysvirtaa, kun johdintanko on viallinen. Huomataan, että virta ei pienene tasaisesti kohti nimellisvirtaa.



Kuva 22. Viallisen moottorin käynnistysvirta ja verhoikäyrä tyhjäkäynnissä/2/

5.1.3 Lämpötila

Lämpötilan vaikutus kämmiresistanssiin tulee ottaa huomioon. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että puhtaalle metallille 100 asteen lämpötilan muutos aiheuttaa 40 % muutoksen vastusarvoon. Tätä nyrkkisääntöä voidaan soveltaa esimerkiksi kuparitangoista tehtyyn roottoriin. Sitä vastoin alumiiniseoksesta valetun roottorin resistanssin lämpötilariippuvuus on kiinni seosaineesta.

Roottoriin porattavat reiät muuttavat roottorin muotoa niin, että oikosulkuvirran pinta-ala pienenee ja kasvattaa roottorin häviöitä, jotka nostavat roottorin lämpötilaa. Roottorin lämpötilan kasvu kasvattaa roottorin resistanssia.

5.1.4 Hyötysuhde

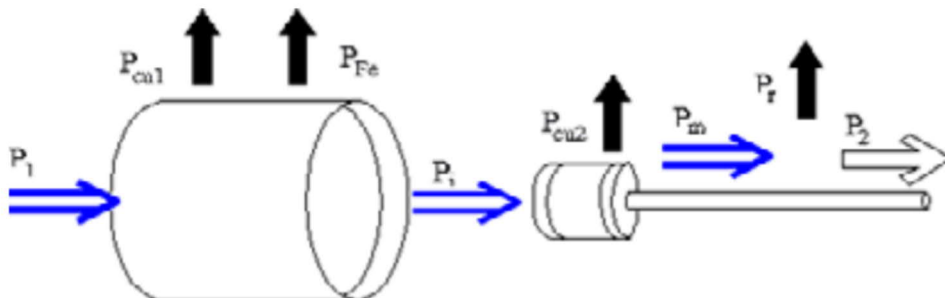
Hyötysuhde on fysikaalinen suure, joka kertoo suhdelukuna, kuinka suuri osa koneeseen syötetystä sähköenergiasta voidaan hyödyntää. Osa energiasta muuttuu häviöiden takia lämpöenergiaksi, joka on tarkoituksen kannalta hukkaan heitettyä energiaa. Roottoritankojen materiaali ja poikkipinta sekä oikosulkurenkaiden koko vaikuttavat häviöihin.

Moottorin hyötysuhde lasketaan kaavalla:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_h}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{cu1} + P_{fe} + P_l + P_{cu2} + P_r)}{P_1} \quad (30)$$

kaavassa P_2 on antoteho, P_1 = ottoteho, P_h = kokonaishäviöt, P_{fe} = rautahäviöt, P_l = lisähäviöt, P_r = mekaaniset häviöt, P_{k1} = staattorin resistanssihäviöt, P_{cu2} = roottorin resistanssihäviöt.

Porattujen tasapainotusreikien aiheuttama oikosulkurenkaan lämpötilan kasvu kasvattaa resistanssia. Tämän vuoksi roottorihäviöt kasvaa ja moottorin hyötysuhde putoaa.



Kuva 23. Häviöt

Osa verkosta otetusta tehosta P_1 muuttuu häviöiksi staattorissa ja roottorissa. Staattorissa tehoa kuluu rauta- P_{fe} ja kuparihäviöihin P_{Cu1} . Magneettikentän välityksellä roottoriin siirtyy ilmväliteho P_i . Roottorissa syntyy resistiivisiä häviöitä P_{Cu2} sekä kitka- ja tuuletushäviöitä P_r . Pienellä jättämällä roottorin rautahäviöt ovat pienet vuon pienen taajuuden vuoksi. Moottori kehittää mekaanisen tehon P_m johon sisältyvät häviöt P_r . Moottorin akselilta antama teho on siis $P_2 = P_m - P_r$.

Moottorin antama mekaaninen teho P_m voidaan laskea kaavalla:

$$P_m = \omega_r T \quad (31)$$

missä ω_r on roottorin kulmanopeus.

Ilmaväliteho eli pyörivän kentän teho on

$$P_i = \omega_s T \quad (32)$$

missä ω_s on kentän kulmanopeus

Moottorin antama mekaaninen teho on

$$P_m = (1 - s)P_i \quad (33)$$

Roottorissa syntyvät resistiiviset häviöt

$$P_{Cu2} = sP_i \quad (34)$$

Toisin sanoen, roottorissa syntyvät häviöt ovat suoraan verrannollisia jättämään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, ettei epätahtimoottoria kannata käyttää pitkiä aikoja suurella jättämällä. /8/

6 MOOTTORIN VALINTA JA SIMULOINTI

Testejä varten saatiin ABB:lta käyttöön moottori. Tasapainotusreikien vaikutuksista haluttiin konkreettisempaa tietoa testeillä. Ensin oli tarkoitus simuloida testi käyttämällä Adept-ohjelmaa ja itse fyysinen testaus suoritettaisiin ABB-motorsin koekentällä. COVID-19 virustilanteen vuoksi luovuttiin testeistä tämän työn suhteen, mutta mahdollisesti suoritetaan jatkotoimenpiteenä.

6.1 Moottorin valinta

Työhön etsittiin moottoria ABB:n tehtaalta. Aluksi mietittiin minkä kokoinen moottori olisi paras työtä varten ja päädyttiin, että ei haluta valita pientä moottoria sillä isommassa moottorissa muutokset näkyvät pientä moottoria selkeämmin. Valinnassa otettiin huomioon myös moottorin käsittely ja huomattiin, että liian suuren moottorin siirtäminen ja modifointi olisi paljon haastavampaa. Työhön päätettiin siis valita keskisuurimoottori, joka löytyi protojen joukosta.



Kuva 24. Valittu moottori

Moottoriksi valittiin M3BP 200MLB 6M, jossa

M3BP = moottorin koteloointi, rungon materiaali ja moottorityyppi

200MLB = runkokoko, rungon pituus ja paketin pituus

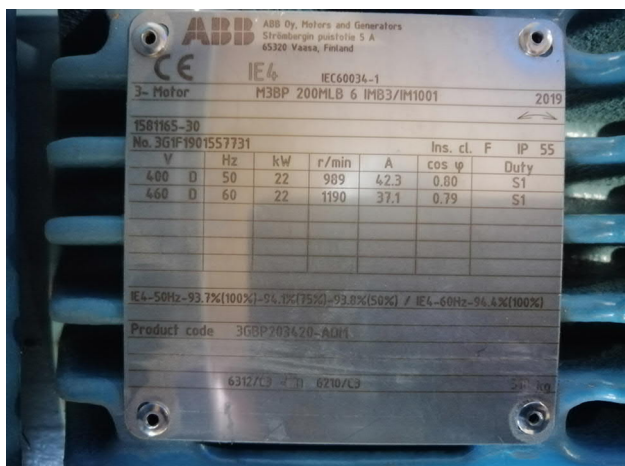
6M = napaluku ja sukupolvitunnus

Kaikkiin moottoreihin kiinnitetään arvokilpi, josta löytyy moottorin identifiointitiedot kuten moottorintyyppi ja tuotekoodi, jotka kertovat yllä mainitut tiedot sekä kaupanumero ja sarjanumero, jotka ovat kauppaja- ja moottorikohtaisia. Kilvessä on myös moottorin teknilliset tiedot, jännite, Y vai D-kytkentä, taajuus, teho, pyörimisnopeus, virta, tehokerroin sekä hyötysuhde.

Kilpiarvot:

U=400V, f=50Hz, P=22kW, n=989r/min, I=42,3A, Pf=0,80, IEC=IE4 93,7

U=460V, f=60Hz, P=22kW, n=1190r/min, I=37,1, Pf=0,79, IEC=IE4 94,4



Kuva 25. Moottorin kilpi

6.2 ADEPT kokeilu

ADEPT on ABB:n käyttämä ohjelma, jolla sähkömoottoreita mitoitetaan. Ohjelmasta saatuja arvoja voidaan käyttää vertailuarvoina, mutta suoriin tarkkoihin arvoihin harvemmin ohjelmalla päästään. Väärät laskematulokset perustuvat pääosin ADEPT-laskentaohjelman häviölaskentaan, jolla häviöt jäävät todellista pienemmiksi.

Laskentaprofiilina käytettiin FEMMiä. FEMM eli Finite Element Method Magnetics on yleisimmin käytetty menetelmä ratkaista ongelmia suunnittelussa ja matemaattisissa malleissa. Ongelmien ratkaisemiseksi FEMM jakaa suuren järjestelmän pienempiin, yksinkertaisempiin osiin, joita kutsutaan äärellisiksi elementeiksi. Tämä saavutetaan erillisillä tilan mitoituksilla, jotka on saatu aikaan kappaleen mesh-rakenteella: numeerinen alueellinen ratkaisu, jolla on äärellinen määrä pisteitä.

Ensin selvitettiin kyseisen moottorin laskentanumero (3GZF021020-647), jolla löydettiin adeptista laskelma moottorille. FEMMin avulla yritettiin vaihtaa roottorin yhden johdintangon materiaalia ja johtavuutta kuvaamaan tilannetta, jossa roottorissa on epäsymmetrisiä resistansseja. Simuloinnista hankalaa teki se, ettei se suoraan ilmoita resistanssia vaan pääteltiin, että roottorin kuparihäviöiden noustessa myös resistanssi nousee. Simuloinnin tuloksiksi saatiin taulukon 1 antamat arvot.

P_{2cu} = roottorin kuparihäviöt, I_1 =staattorivirta, \cos =tehokerroin,
 n =pyörimisnopeus, I_s/I_n =käynnistysvirta, T_s/T_n =käynnistysmomentti,
 $slip\%$ =jättämä, $Prh0$ =mekaaniset häviöt, P_{fe} =rautahäviöt, P_{1cu} =staattorin kuparihäviöt ja $Phrdst$ =staattoriin redusoidut häviöt

Taulukko 1

	Sim. 1	Sim. 2	Sim 3	Sim 4
P2cu	0,256	0,262	0,268	0,27
I1	39,4	40,1	39,7	39,7
cos	0,8466	0,8316	0,8408	0,8408
n	988,5	988,3	988	987,9
Is/In	8,59	8,39	8,26	8,22
Ts/Tn	3,04	3,11	2,99	2,94
Tm/Tn	3,42	3,29	3,26	3,26
Slip%	1,14906	1,17261	1,20153	1,20875
Prh0	0,045	0,045	0,045	0,045
Pfe	0,124	0,125	0,125	0,126
P1cu	0,667	0,693	0,678	0,679
Phrdst	0,93	0,961	0,95	0,953

Taulukosta 1 huomataan, että roottorin kuparihäviöiden noustessa myös moottorin arvot muuttuvat. Simuloinnissa ei suoraan nähty roottorin resistanssia vaan oletettiin sen kasvavan kun roottorin kuparihäviöt kasvavat. Arvojen muutokset ovat erittäin pieni yhden sauvan johtavuuden muuttuessa. Useamman muutoksen seurauksena arvot varmasti muuttuisivat enemmän.

6.3 Testisuunnitelma

Työssä oli tarkoitus suorittaa testejä testikentällä, mutta COVID-19 viruksen vuoksi moottorin modifointi, siirtäminen ja testien tekeminen olisivat olleet haasteellisia ja työ olisi venynyt liian pitkälle. Tästä huolimatta luotiin testisuunnitelma, jossa kerrotaan kuinka testaus oltaisiin suoritettu.

Moottori valinnan jälkeen moottorin oma alkuperäinen roottori haluttaan säilyttää, joten roottori irroitetaan ja säilötään protopajaan. Vanha moottori on tasapainotettu lisäämällä materiaalia eli ei olisi edes sopinut työhön.

Uusi roottori valmistettaisiin ABBn tehtaalla moottorityökortin avulla ja tasapainoitettaisiin poistamalla materiaalia eli poraamalla reikiä.

Uuden roottorin asennuksen sekä moottorin kokoamisen jälkeen tehtäisiin testi perustilanteessa, jossa vain tasapainotettu reikien avulla. Moottorille tehdään tyyppitesti.

Tämän jälkeen toistettisiin seuraavat vaiheet kunnes huomattaisiin testeissä liian suuria vaikutuksia moottorin toimintaan. Vaihe 1 roottorin irroitus, vaihe 2 reikien lisäys niin, että tasapaino pysyy, vaihe 3 roottorin asennus takaisin sekä moottorin kokoaminen, vaihe 4 testien teko koekentällä.

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Työn osalta oli haitallista ettei fyysisiä testejä päästy tekemään sillä niiden avulla oltaisiin saatu parhaat tiedot reikien vaikutuksesta moottorin toimintaan. Tuloksista oltaisiin nähty mitä pelkät perustasapainotusreijät tekevät ja kuinka paljon reikiä olisi mahdollista laittaa oikosulkurenkaaseen. Huomasimme kuitenkin sijaiskytkentöjen sekä kaavojen kautta, että roottorin muodon muuttaminen, kuten reikien lisäys, vaikuttavat roottorissa moneen arvoon; Roottorivirtaan, -resistanssiin, -reaktanssiin, jättämään, hyötysuhteeseen ja lämpenemään. Se kuinka paljon ne vaikuttavat olisi haastavaa arvioida ilman testejä, sillä simuloinnilla saatiin luotua todella pieni muutos roottorin häkkikäämitykseen ja arvojen vaihtelut olivat erittäin pieniä.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Verkkonen,V. Epätahtikoneet. Opintomoniste. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- /2/ Ahamed, S. Broken Rotor Bar Fault in Induction Motor. Fault Diagnosis of Three Phase Induction Motor. University of Calcutta
- /3/ www.new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/ viitattu 20.5.2020
- /4/ www.new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/motors-and-generators/ viitattu 20.5.2020
- /5/ Holttinen,V.Oikosulkumoottorin laskentamallin toimintaperiaate. kandidaatintyö. LUT School of Energy Systems
- /6/ Kuusisto,J. Ohje sähkömoottorin rutiinikoestusarvojen laskentaan. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- /7/ ABB. Roottorin tasapainotus. Ohjemateriaali.
- /8/ Korpinen,L. Sähkökoneet. Sähkövoimatekniikkaopus. TTKK
- /9/ AROUI,T. Magnetic Coupled Circuits Modeling of Induction Machines Oriented to Diagnostics. Reasearch Unity of Industrial Process Control. National Engineering School of Sfax.
- /10/ Siitari,J. Induktiomoottorin suunnittelu ja toteutus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- /11/ ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Sähkömoottorikäytöt.