



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jarkko Kuusisto

OHJE SÄHKÖMOOTTORIN
RUTIINIKOESTUSARVOJEN
LASKENTAAN

Tekniikka ja liikenne
2012

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun sähkötekniikan linjalle vuoden 2012 kevään aikana. Päättötyö on tehty ABB Oy Motors and Generators Vaasan tehtaan suunnitteluosastolle, jossa oli tarve rutiinikoestusohjeelle.

Päättötyön valvojina olivat Vaasan ammattikorkeakoulun puolesta lehtori Timo Männistö ja ABB Oy Motors and Generators yksiköstä Tuotehallintapäällikkö Jaakko Rantamäki ja DI Juha Taipale. Heille esitän suuret kiitokset työhöni saamasta tuesta ja opastuksesta.

Vaasassa 7.5.2012

Jarkko Kuusisto

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|--|
| Tekijä | Jarkko Kuusisto |
| Opinnäytetyön nimi | Ohje sähkömoottorin rutiinikoestusarvojen laskentaan |
| Vuosi | 2012 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 52 + 3 liitettä |
| Ohjaaja | Timo Männistö |

Työn lähtökohtana oli ABB Motors and Generators yksikössä ilmennyt tarve, että tarvitaan yhtenäinen käytäntö ja ohjeistus rutiinikoestusarvojen laskemisen ja ilmoittamiseen sähkösuunnittelijoille. Opinnäytetyön aiheena oli syventyä rutiinikoestukseen ja rutiinikoestusarvojen laskentaan. Ongelmana oli, että rutiinikoestuksessa moottorit eivät toisinaan läpäise testiä johtuen uusien laskelmien rutiinikoestus tarkistusarvojen epätarkkuuksista.

Rutiinikoestus tarkoittaa mittauksia ja testejä, jotka tehdään jokaiselle valmistuvalle moottorille valmistuksen loppupuolella. Tehtävänä oli löytää sähkösuunnittelijoille yleispätevä tapa ilmoittaa rutiinikoestusarvot ja tehdä ohjeistus, kuinka rutiinikoestusarvot lasketaan. Rutiinikoestukseen tutustuttiin harjoittelemalla ohjelmien käyttöä, tutustumalla IEC 60034-1 standardiin, käymällä tutustumassa linjalla rutiinikoestukseen ja haastattelemalla sähkösuunnittelijoita. Tästä saatiin johtopäätökset niistä asioista, mitkä asiat on hyvä ottaa huomioon suunniteltaessa rutiinikoestusarvoja.

Haastattelujen perusteella tehtiin päätös siitä, mitä laskentaohjelmaa tullaan käyttämään ohjeistuksessa. Työn aikana huomattiin, että käytettävistä laskentaohjelmista löytyi eroja. Lopullinen tavoite oli tehdä tiivistetty FIMOT ohje ABB Oy:n tietokantaan. Ohjeesta tehtiin tekstimuotoinen ja se sisältää tärkeimmät kaavat, joilla uuden laskelman arvot saadaan korjattua oikeammiksi.

SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | |
|---|----|
| ALKUSANAT | I |
| 1 JOHDANTO | 11 |
| 2 YLEISESITTELY | 12 |
| 2.1 ABB:n historia ja yleisesittely | 12 |
| 2.2 ABB Motors and Generators | 12 |
| 2.2.1 Tuotekehitys | 12 |
| 2.3 Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate | 12 |
| 2.3.1 Moottorin käämitys | 14 |
| 2.3.2 Staattori- ja roottorilevyt | 14 |
| 2.3.4 Käynnistys ja nopeudensäätö | 15 |
| 3 SÄHKÖMOOTTORIN RUTIINIKOESTUKSEN FYSIKAALINEN | |
| TEORIA | 18 |
| 4 RUTIINIKOESTUS | 21 |
| 4.1 IEC-Standardit | 21 |
| 4.2 Rutinikoestuksen teoriaa | 21 |
| 4.3 Rutinikoestusten suorittaminen | 23 |
| 4.3.1 Silmämääräinen tarkastus | 23 |
| 4.3.2 Käämien resistanssien mittaus | 24 |
| 4.3.3 Tyhjäkäyntihäviöiden ja virran mittaus | 24 |
| 4.3.4 Oikosulkukoe | 24 |
| 4.3.5 Eristysvastusmittaus | 25 |
| 4.3.6 Toistoaltokoe | 26 |
| 4.3.7 Tärinänmittaus | 27 |
| 4.3.8 Roottorin pyöritytesti | 27 |
| 4.4 Uuden laskelman teko | 28 |
| 4.5 Yleisimmät syyt, miksi moottori ei läpäise testiä | 30 |
| 4.5.1 Tyhjäkäyntivirta | 30 |
| 4.5.2 Resistanssi | 32 |

| | |
|--|----|
| | 5 |
| 4.5.3 Tyhjäkäyntiteho | 32 |
| 4.5.4 Oikosulkuvirta ja oikosulkuteho | 33 |
| 4.5.5 Mittaustulosten poikkeamien tutkinta kone avattuna | 33 |
| 5 OHJEEN LAADINTA | 34 |
| 5.1 Yleistä..... | 34 |
| 5.2 Laskenta sovellussuunnittelussa..... | 34 |
| 5.3 Leimausarvot | 34 |
| 5.3.1 Vertailulaskelman haku | 34 |
| 5.3.2 Hyötysuhde, kierrosluku ja tehokerroin, virta | 37 |
| 5.4 Rutiinikoestusarvot..... | 39 |
| 5.4.1 Häviötehot laskentaa varten | 40 |
| 5.4.2 Oikosulkuarvot..... | 43 |
| 5.4.2 Korjauskertoimet..... | 45 |
| 6 TIIVISTETTY OHJE LASKELMAN TEOSTA | 47 |
| 7 JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 50 |
| LÄHTEET..... | 52 |
| LIITTEET | |

TAULUKKO- JA KUVIOLUETTELO

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Taulukossa IEC Standardin 60034-1 vaatimat pakolliset rutiinikoestukset, jotka moottorille vähintään täytyy suorittaa. /4/..... | 21 |
| Taulukko 2. Taulukossa koestusjännitetasot, joilla pystytään koestamaan kullakin koestuspisteellä. /2/ | 32 |
| Kuvio 1. Moottorin rakenne | 13 |
| Kuvio 2. Oikosulkumoottorin käynnistysvirta- ja momenttikäyrä nopeuden funktiona | 15 |
| Kuvio 3. Moottorin kolmio- ja tähtikytkentä /12/ | 16 |
| Kuvio 4. Sähkömoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä | 18 |
| Kuvio 5. Toistoaaltokoe | 26 |
| Kuvio 6. Ehjän moottorin toistoaaltokokeen käyrä | 27 |
| Kuvio 7. Kaavio ohjelmista /11/ | 29 |
| Kuva 8. Esimerkkikuva AtemTest Browserista | 31 |
| Kuvio 9. Laskelman haku | 35 |
| Kuvio 10. Vuo ilmavälissä Adeptissa..... | 36 |
| Kuvio 11. Muutetun laskelman käämitystiedot- välilehti..... | 37 |
| Kuvio 12. Trinity ikkuna | 38 |
| Kuvio 13. Arvokilpi ELapp- ohjelmassa | 39 |
| Kuvio 14. FCSmek- laskentaprofiilin muokkaus | 40 |
| Kuvio 15. Hankaushäviöiden haku..... | 41 |
| Kuvio 16. Testatun moottorin arvot AtemTest Browserista..... | 42 |
| Kuvio 17. Tulokset laskennan jälkeen..... | 43 |
| Kuvio 18. Oikosulkutestausjännite Eamotlabissa | 44 |
| Kuvio 19. Oikosulkuarvojen asettelut | 44 |
| Kuvio 20. Trinity ikkuna | 46 |

LIITELUETTELO

LIITE 1. Sähkömoottori rutiinikoestuksen tyhjäkäyntikokeessa

LIITE 2. Sähkömoottori rutiinikoestuksen oikosulkukokeessa, ylempi AL15-linja, alempi AL35- linja

LIITE 3. Tärinänmittaustuenta AL15- linjalla.

KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|--------------|--|
| ABB | Asea Brown Boveri |
| Bd | Vuo ilmavälissä |
| $\cos\phi_0$ | Tyhjäkäyntitehoeroin |
| E_v | Sijaiskytkennässä keskihaaran yli vaikuttava jännite |
| f | Taajuus |
| FCSmek | Adeptissa oleva elementtimenetelmään perustuva laskentaohjelma |
| IEC | The International Electrotechnical Commission, Kansainvälinen sähköteknillinen komissio |
| ISO | Kansainvälinen standardisoimisjärjestö |
| I | Virta |
| IE | International efficiency, kansainvälinen hyötysuhde |
| I_0 | Tyhjäkäyntivirta |
| I_{0q} | Magnetointivirta |
| I_{0p} | Tyhjäkäyntivirran resistiivinen osuus |
| I_1 | Staattorivirta |
| I_2 | Roottorivirta |
| I_s | Käynnistysvirta |
| I_k | Oikosulkuvirta |
| I_{k2} | Roottorin vaihekäämin virta |

| | |
|------------|---|
| I_N | Nimellinen virta |
| $m, m1$ | Vaiheluku |
| n | Moottorin pyörimisnopeus |
| n_s | Tahtipyörimisnopeus |
| p | Napapariluku |
| P_{fw} | Tuuletin ja hankaustehohäviöt |
| P_1 | Moottorin verkosta ottama sähköteho |
| P_2 | Moottorin antama teho |
| P_h | Kokonaishäviöt |
| P_l | Lisähäviöt |
| P_0 | Tyhjäkäyntiteho |
| P_k | Oikosulkuteho |
| P_μ | Mekaaniset häviöt |
| Q | Staattorin uraluku |
| q | Staattorin vakoluku |
| R | Resistanssi |
| R_{min} | Staattorikäämien resistanssien keskiarvo |
| R_{max} | Staattorikäämien resistanssien suurin arvo |
| R_{kesk} | Staattorikäämien resistanssien pienin arvo |
| R_{lask} | Staattorikäämien laskettu resistanssi |
| R_{Fe} | Rauta- ja kitkahäviöitä kuvaava resistanssi |

| | |
|------------|--|
| rpm | Revolutions per minute, pyörimisnopeus |
| R_1 | Staattorikäätymiskyksen resistanssi |
| R'_2 | Roottorihäkin resistanssi |
| R_k | Oikosulkuresistanssi |
| s | jättämä |
| S113 | Adeptissa oleva laskentaohjelma |
| U_{km} | Redusoitu oikosulkutestausjännite |
| U_N | Moottorin nimellinen jännite |
| U_{1v} | Vaihejännite |
| V | Jännite |
| X_m | Magnetointia kuvaava pääreaktanssi |
| X_1 | Staattoripuolen reaktanssi |
| X'_2 | Roottoripuolen reaktanssi |
| X_k | Oikosulkureaktanssi |
| Z_k | Oikosulkuimpedanssi |
| ZN | Tehollinen kierrosluku staattoriurassa |
| Δn | Pyörimisnopeuden eronopeus |
| η | Hyötysuhde |
| ξ_1 | Staattorin käämikerroin |
| μ | Permeabiliteetti |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin ABB Oy:n Motors and Generators Vaasan yksikölle. Ongelmana on ollut, että joskus moottorit eivät mene rutiinikoestuksessa läpi. Esimerkiksi tyhjäkäyntivirta tai tyhjäkäyntiteho voi olla liian korkea. Tällaisissa tapauksissa moottori saattaa viivästyä aikataulusta, koska joudutaan selvittämään ongelma ja usein laskemaan uudet rutiinikoestusarvot moottorille, tai korjata joitain arvoja.

Tällä hetkellä ei ole selkeää yhtenäistä tapaa laskea rutiinikoestusarvoja ja kukin suunnittelija tekee ne omalla tavallaan. Arvojen lopputulos saattaa vaihdella eri laskentaohjelmien käytön perusteella tai siitä, millaiset alkuarvot laskennalle ottaa.

Työn tavoite on löytää yleispätevä tapa laskea rutiinikoestusarvot ja luoda niiden laskennasta ohje sähkösuunnittelijoille. Ohjeen on tarkoitus olla suunnittelijan apuna, että rutiinikoestusarvot lasketaan oikein uusissa laskelmissa. Työssä kerrotaan lisäksi oikosulkumoottorin teoriaa, ja esitellään tärkeitä kaavoja, jotka liittyvät sähkömoottorin arvojen laskentaan. Rutiinikoestusmittaukset ovat IEC-standardissa 60034-1 määritellyt pakolliset mittaukset, jotka uudelle moottorille tehtaalla tehdään.

2 YLEISESITTELY

2.1 ABB:n historia ja yleisesittely

ABB sai alkunsa, kun vuonna 1988 yhdistettiin ruotsalainen ASEA ja sveitsiläinen BBC Brown Boveri. ABB on johtava sähkö- ja automaatioteollisuuden alan konserni, jonka tuotteita ovat moottorit ja generaattorit, pien- keski- ja suurjännitetuotteet ja muuntajat. ABB:n toiminta on keskittynyt automaatiotekniikan ja sähkötekniikan alueille. ABB:n toimitusjohtajana vuodesta 2008 on toiminut Joseph Hogan. ABB:n liikevaihto on noin 32 mrd. USD. Henkilöstöä on noin 124 000. Suomessa toimivien ABB yksiköiden liikevaihto on 1,7 mrd. Euroa. Henkilöstöä on yli 7 000.

2.2 ABB Motors and Generators

Suomessa ABB Motors and Generators- yksiköllä on tuotantoa Helsingissä Pitäjänmäellä ja Vaasassa Strömberg Parkissa. Vaasan moottoritehdas on aloittanut tuotantonsa vuonna 1944. Vaasassa tehdään pääsääntöisesti pienet sähkömoottorit akselikokoon 450 asti ja Helsingissä suuremmat. Vaasan ABB Motors and generators- yksikön johdossa toimii Keimo Kalliosaari. Vaasassa työntekijöitä vuonna 2011 oli 536 ja moottoreita vuonna 2011 valmistui n. 36 140 kappaletta. Vaasan ABB Motors and Generators liikevaihto vuonna 2011 oli 218 M EUR /1/.

2.2.1 Tuotekehitys

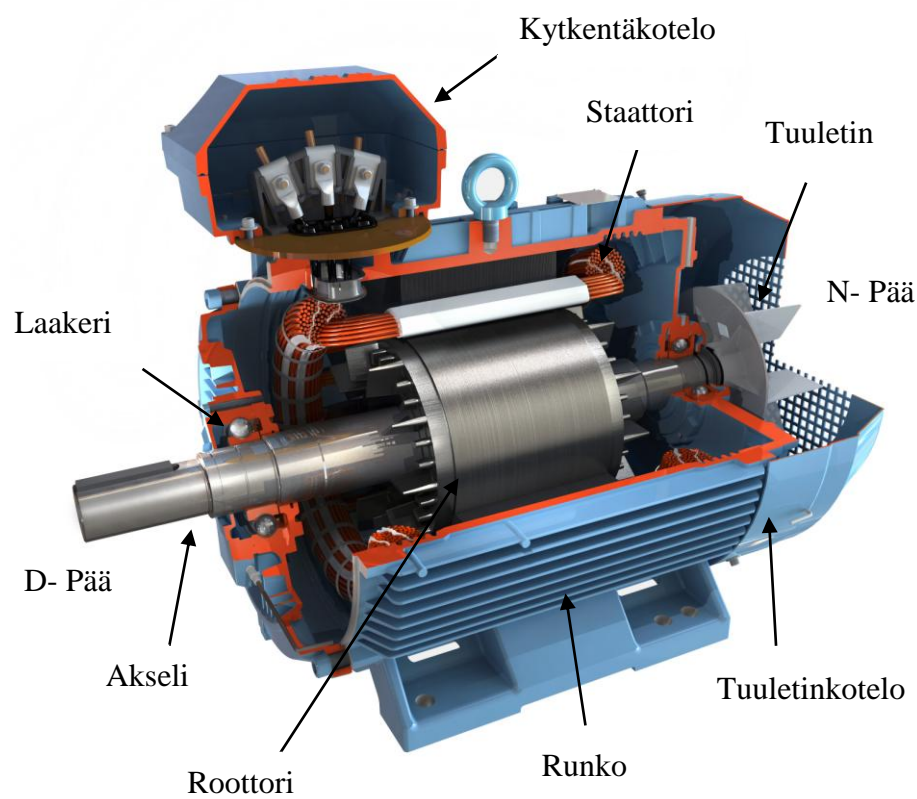
Tuotekehitysosasto on jaettu viiteen ryhmään, jotka ovat tuotekehitysprojektit, tuotteiden ylläpito, insinööri työkalujen ja systeemien ylläpito, maailmanlaajuinen tekninen ylläpito ja teknologiakehitys. Tuotekehitysosastoon kuuluu yhteensä noin 50 vakituista henkilöä.

2.3 Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate

Oikosulkumoottori on yleisimmin käytetty sähkömoottori, koska siinä on yksinkertainen rakenne. Moottorin perusosa on runko. Runko sisältää staattorin

(seisoja), joka puristetaan runkoon ja roottorin (pyörijä). Laakerikilvet tulevat rungolle molempiin päihin kannattelemaan roottoria. Moottorissa on yleensä myös kytkentäkotelo, jossa staattorin käämien päät ja ulkoa tulevat syöttökaapelit kytketään (**kuvio1.**).

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu roottorissa vaikuttavaan magneettiseen voimaan. Oikosulkumoottorissa magneettikenttä syntyy ilman lisälaitteita, johtuen siitä, että staattorissa kulkee symmetrinen kolmivaiheinen vaihtovirta $/3/$.



Kuvio 1. Moottorin rakenne

2.3.1 Moottorin käämitys

Staattorissa on yleensä kolmivaiheinen käämitys, koska kolmivaihekäämityksessä vaiheiden väli on 120 astetta. Staattorikäämit jaetaan omiin uriinsa. Staattoripaketissa voi olla esimerkiksi 32 uraa ja uraluku jakaantuu vaiheluvun mukaisesti jokaiselle vaiheelle tasaisesti. Vakoluku lasketaan kaavalla

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

Vakoluku q saadaan jakamalla uraluku Q napapariluvulla p ja vaiheluvulla m . Laskemalla vakoluku selviää montako uraa, vaihetta ja napaa kohden on. Yleensä vakoluku on kokonaisluku. On olemassa myös murtovakokäämitys ja tällöin vakoluku on murtoluku. Staattorin käämit (vyyhdit) eristetään hartsaamalla, esimerkiksi polyesteri- tai epoksihartsilla.

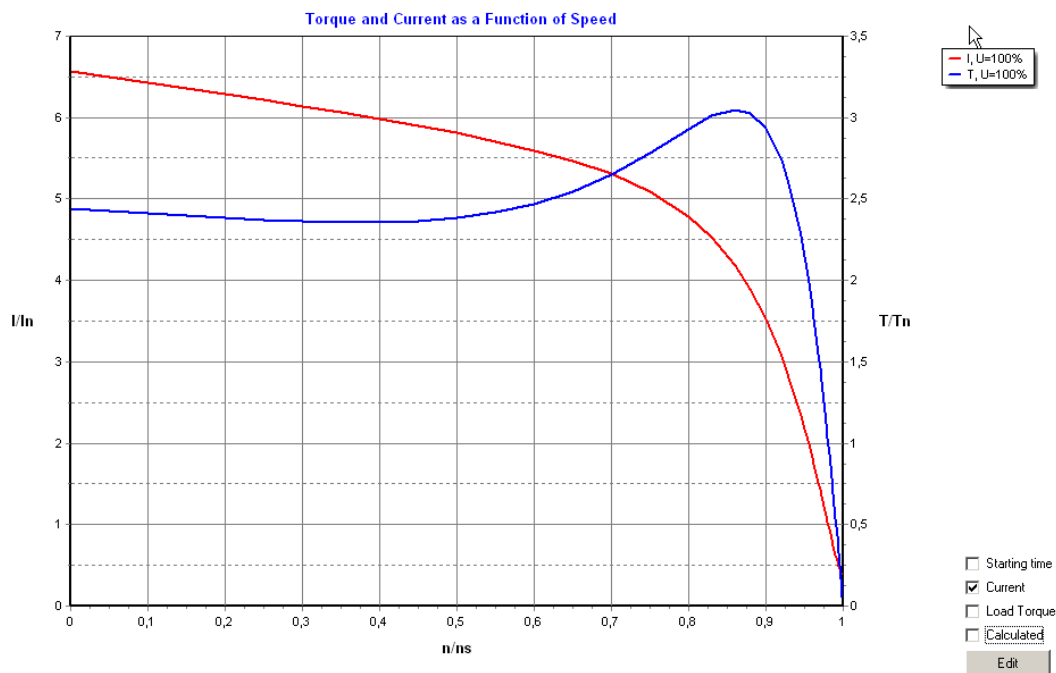
Roottorikäämitys epätahtikoneessa on yleensä toteutettu alumiinisauvoilla, jotka tehdään painevaluna. Roottorin päihin valetaan oikosulkurenkaat, jotka yhdistävät sauvat toisiinsa. Käytössä on myös kuparisauvoja, jotka työnnetään roottorin uriin, myös normaali käämitys on mahdollinen joissakin tapauksissa. Roottorissa on häkkikäämitys ja siihen ei syötetä erikseen jännitettä. /3/

2.3.2 Staattori- ja roottorilevyt

Staattori- ja roottoripaketit muodostuvat ohuista muotoon leikatuista levyistä joista on ladottu yhtenäinen paketti. Paketit kootaan mahdollisimman ohuista levyistä pyörrehäviöiden minimoimiseksi.

2.3.4 Käynnistys ja nopeudensäätö

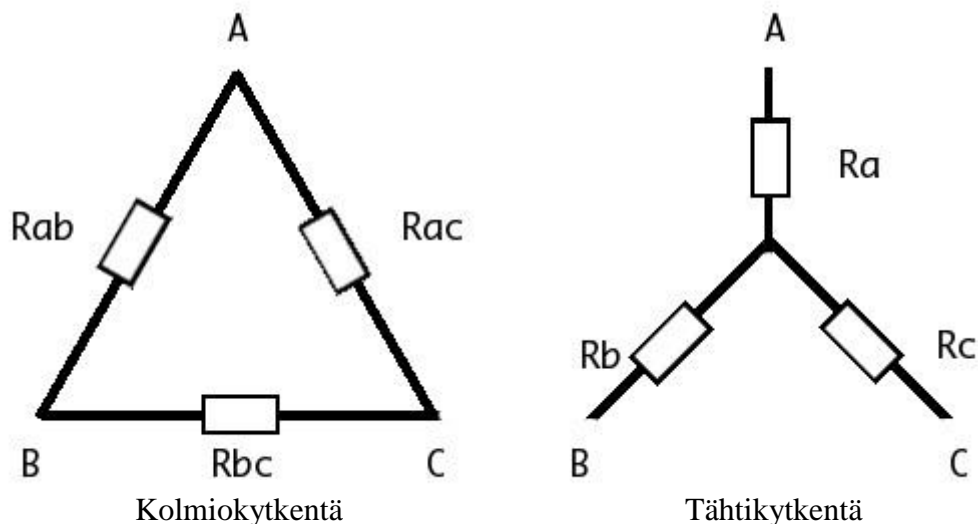
Käynnistyessään sähkömoottori ottaa moninkertaisen virran siihen verrattuna, mitä se normaalin käymisen aikana vie. Käynnistysvirta I_s on yleensä 5-10 kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Tämän vuoksi käynnistysvirtaa olisi hyvä rajoittaa jotenkin. Kuviossa 2 on esitettyä käynnistysvirta ja momenttikäyrä nopeuden suhteen.



Kuvio 2. Oikosulkumoottorin käynnistysvirta- ja momenttikäyrä nopeuden funktiona

Yksi tapa rajoittaa moottorin käynnistysvirtaa on varustaa se tähti – kolmiökäynnistimellä. Tähtikolmiökäynnistyksessä moottori, joka normaalisti on kytketty kolmioon, käynnistetään tähtikytkennällä, jolloin käynnistysvirta on vain kolmasosa siitä, mitä se olisi kolmiökäynnistyksessä. Virta pienenee, koska käynnistysmomentti tähtikytkennässä pienenee myös 25 % verrattaessa suoraan kolmiökäynnistykseen. Kun moottori käynnistetään tähtikytkennässä, on yhden vaiheen näkemä resistanssi suurempi ja moottori ottaa vähemmän virtaa. Moottorin mekaaninen ja magneettinen vastus kuormittaa verkkoa vähemmän. Kuviossa 3 on kolmiokytkentä vasemmalla puolen ja tähtikytkentä oikealla.

Kun moottori on saavuttanut täyden pyörimisnopeuden, se kytketään kolmiokytkentään. Kolmiossa jokaiseen staattorikäämiin johdetaan 1 vaihe ja käämin toinen pää yhdistyy aina toiseen vaiheeseen. Kolmiokytkenällä saadaan aikaan paljon suurempi teho kuin tähtikytkenällä, myös vääntömomentti ja virrankulutus ovat suurempia. /7/



Kuvio 3. Moottorin kolmio- ja tähtikytkentä /12/

Toinen käynnistystapa on kytkeä moottoriin pehmokäynnistin. Silloin jokaiseen vaiheeseen kytketään vastakkain tyristoripari. Kun näitä ohjataan oikein, voidaan verkosta otettua virtaa säätää.

Kolmas, ja nykyään suosituin tapa, on ohjata sähkömoottoria taajuusmuuttajan kautta. Taajuusmuuttajassa on paljon erilaisia ominaisuuksia ja näillä myös käynnistysvirran rajoitus onnistuu hyvin, koska käynnistysnopeutta pystytään säätämään.

Nopeudensäätö moottorissa onnistuu muuttamalla taajuutta f , napaparilukua p tai jättämää säätämällä. Jättämä tarkoittaa sitä, että kuinka paljon roottorin nopeus n on tahtinopeutta n_s pienempi. ”Jättämäenergiaa voidaan säätää esimerkiksi roottoriin resistanssia muuttamalla. Roottoriin resistanssia voidaan lisätä kytkemällä roottoriin liukurenkaiden avulla ulkoinen säädettävissä oleva vastus, jolloin jättämäteho kokonaisuudessaan muuttuu lämmöksi.

Jättämäenergian säädönhyötysuhde ja säätöominaisuudet ovat huonot. Jättämäenergian säädössä kuormituksen muutos vaikuttaa voimakkaasti pyörimisnopeuteen, eikä tällä säätötavalla voida säätää nopeutta kuin nimellinopeudesta alaspäin.” /13/

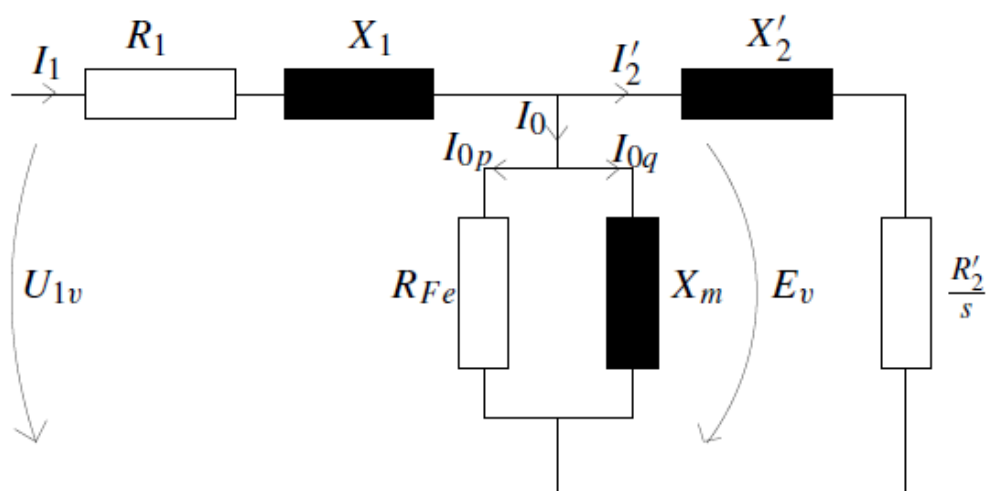
Pyörimisnopeutta voidaan muuttaa kytkemällä moottoriin vaihteisto. Yleisimmin nopeutta säädetään taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet ja kehittyneet nopeasti ja hintakaan ei ole kovin korkea, kun ottaa huomioon mitkä säästöt ja hyödyt taajuusmuuttajalla saa aikaan. Napapariluvun muuttaminen tehdään rakenteellisesti jo käämintätilanteessa. Napaparilukua ei pystytä vaihtamaan sen jälkeen kun staattori on käämitty ja valmis. Napapariluku p voi olla esimerkiksi 2, jolloin moottori pyörii 1500 rpm. Myös 1000- ja 3000 rpm. nopeutta pyöriviä moottoreita on, näissä napapariluvut ovat p=3 ja p=2. Napapariluku saadaan kaavasta.

$$n = 60 \frac{f(1-s)}{p} \quad (2)$$

s= jättämä, p= napapariluku, f= taajuus, n= pyörimisnopeus

3 SÄHKÖMOOTTORIN RUTIINIKOESTUKSEN FYSIKAALINEN TEORIA

Kuviossa 4 esitetään yksivaiheinen sijaiskytkentä kolmivaiheisesta oikosulku-sähkömoottorista. Moottorin pyöriessä tyhjäkäynnillä, virta kulkee pääsääntöisesti keskimmäisen haaran kautta ja ottaa verkosta vain magnetointivirran ja vastuksena on tuuletus ja hankaushäviöt. Oikosulussa olevassa moottorissa virta kulkee pääsääntöisesti viimeisen haaran kautta.



Kuvio 4. Sähkömoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä

U_{1v} = Vaihejännite

R_1 = Staattorikäämityksen resistanssi

X_1 = Staattoripuolen reaktanssi

X'_2 = Roottoripuolen reaktanssi

R'_2 = Roottorihäkin resistanssi

s = Jättämä

X_m = Magnetointia kuvaava pääreaktanssi

R_{Fe} = Rauta- ja kitkahäviöitä kuvaava resistanssi

E_v = Keskihaaran yli vaikuttava jännite

I_1 = Staattorivirta

I'_2 = Roottorivirta

I_0 = Tyhjäkäyntivirta

I_{0q} = Magnetointivirta

I_{0p} = Tyhjäkäyntivirran resistiivinen osuus

Oikosulkuvirta I_k tarkoittaa sitä virran tehollista arvoa, jonka moottori ottaa verkosta, kun moottori on kiinnilukittuna. Oikosulkutilanteen impedanssin resistiivinen osa tulee staattorikäänityksestä ja roottorihäkin resistanssista, joka muodostuu staattoripuolelle ja on vastaava kuin käynnistystilassa. /6/ Oikosulkuvirta saadaan kaavalla:

$$I_k = \frac{U_{V1}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{U_{V1}}{Z_k} = \frac{I_{k2}}{\mu} \quad (3)$$

Kaavassa U_{V1} tarkoittaa vaihejännitettä, R_k on oikosulkuresistanssi X_k oikosulkureaktanssi. Z_k on oikosulkuimpedanssi, μ on permeabiliteetti.

Tyhjäkäyntivirta I_0 tulee suurimmaksi osin magnetoinnista, eli ilmavälin ja levypaketien magnetoinnista. Magnetointivirran laskukaava:

$$I_{q0} = \frac{\pi * p * m_0}{\sqrt{2} * m_1 * 2N_{1t} * \xi_1} \quad (4)$$

kaavassa I_{q0} tarkoittaa magnetointivirtaa, p on napapariluku, m_0 = koko piirin magnetomotorinen voima, m_1 on vaiheluku ja ξ_1 on staattorin käänikerroin. $2N_{1t}$ tarkoittaa tehollista johdinlukua vaiheessa.

Tyhjäkäyntivirran reaktiivinen osuus tulee rauta- ja kitkahäviöistä. Kitkahäviöt arvioidaan yleensä mittauksien perusteella.

$$I_{p0} = \frac{P_{Fe} + P_{\rho}}{m_1 * U_{V1}} \quad (5)$$

Tyhjäkäyntivirran reaktiivisen osuuden I_{p0} kaavassa P_{Fe} tarkoittaa staattoripaketin rautahäviöitä P_{ρ} , m_1 on vaiheluku, U_{V1} on vaihejännite.

Lopullinen tyhjäkäyntivirta lasketaan näistä kahdesta edellisestä kaavasta saatujen arvojen perusteella.

$$I_0 = \sqrt{I_{q_0}^2 + I_{p_0}^2} \quad (6)$$

kaavassa I_{q_0} tarkoittaa magnetointivirtaa ja I_{p_0} tyhjäkäyntivirran reaktiivista osuutta.

Jättämä s tarkoittaa kuinka monta prosenttia on roottorin nopeus n pienempi verrattaessa tahtinopeuteen n_s . Kun roottori pyörii nopeudella n , se pyörii magneetikenttään nähden eronopeudella, jota kutsutaan jättämäksi. /3/

$$\Delta n = n_s - n$$

Yleensä jättämä määritetään suhteellisena jättämänä ja ilmoitetaan prosenttilukuna (kaava 7).

$$s = 100 \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s} \quad (7)$$

kaavassa n_s on synkroninen pyörimisnopeus ja n on moottorin nimellispyörimisnopeus.

Tyhjäkäyntitehoeroin saadaan seuraavalla kaavalla:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_0 * I_0} \quad (8)$$

Samasta kaavasta voidaan ratkaista tyhjäkäyntiteho. /3/

$$P_0 = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \varphi_0 \quad (9)$$

4 RUTIINIKOESTUS

4.1 IEC-Standardit

Kansainvälinen IEC- standardi, eli International Electrotechnical Commission Standard, määrittää tietyt mittaukset, jotka täytyy tehdä jokaiselle uudelle moottorille. Mittaukset tehdään siksi, että moottori täyttää laatuvaatimukset, on turvallinen käyttää ja toimiva. IEC tekee tiivistä yhteistyötä kansainvälisen standardisoimisjärjestön (ISO) kanssa. IEC 60034-1- standardissa on määritelty mitä pakollisia testejä rutiinikoestuksessa tulee tehdä. Taulukossa 1 on lueteltuna nämä testit.

Taulukko 1. Taulukossa IEC Standardin 60034-1 vaatimat pakolliset rutiinikoestukset, jotka moottorille vähintään täytyy suorittaa. /4/

| IEC Standardin 60034-1 mukaiset rutiinikoestukset | | | | |
|---|---|------------------|------------------|-------------|
| Numero | Testi | Induktiomoottori | Synkronimoottori | DC moottori |
| 1 | Käämien resistanssi (kylmä) | X | X | X |
| 2 | Tyhjäkäyntihäviöt ja virta | X | | |
| 3a | Tyhjäkäyntihäviöt yhtenäisellä tehokertoimella | | X | |
| 3b | Tyhjäkäynti magnetointivirta annetulla jännitteellä | | X | |
| 4 | Magnetointivirta | | | X |
| 5 | Virta paikoilleen lukitussa moottorissa | X | | |
| 6a | Pyörimissuunta | X | | X |
| 6b | Vaihejärjestys | | | |
| 7 | Eristyskoe | X | X | X |

4.2 Rutiinikoestuksen teoriaa

Rutiinikoestus on standardissa määrätty koestus, joka tehdään tehtaalla moottorin valmistumisen loppupäässä. Rutiinikoestuksessa tehdään moottorille tiettyjä mittauksia ja tarkistuksia, joilla tutkitaan täyttääkö se sille määrätty laatuvaatimukset ja standardit. Testauksen perustana on ABB:n oma laatujärjestelmä ja IEC-standardi 60034-1, jotka myös määrittelevät mitä testataan.

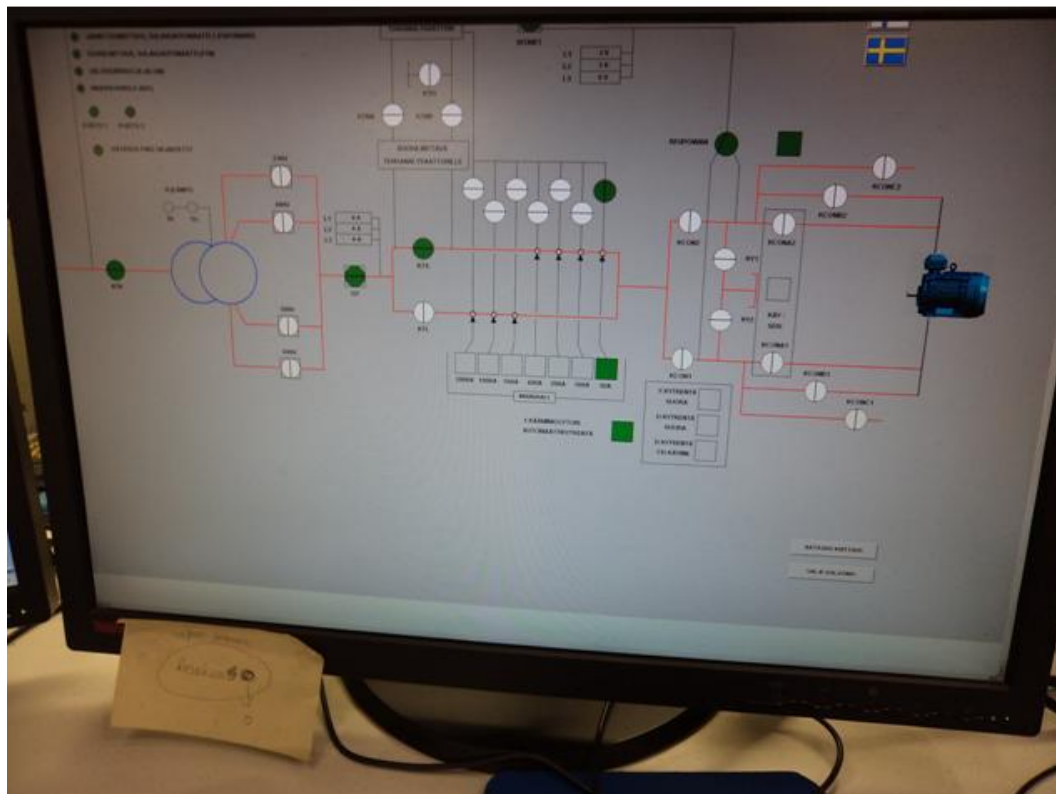
Asiakas voi myös halutessaan tilata moottorille lisää koestuksia, mutta ne koestukset tehdään testikentällä, ei linjalla rutiinikoestuksen yhteydessä. Rutiinikoestus standardin mukaan koneen ei tarvitse olla täysin koottuna. Osia jotka merkittävästi vaikuta testaustuloksiin, saa olla asentamatta. Rutiinikoestuksessa käytetään MotTest- testausohjelmaa, josta nähdään suunnittelijoiden laskemat tarkistusarvot rutiinikoestajille. Käyttöliittymästä saadaan ohjattua testauslaitteisto päälle kunkin mittauksen mukaisesti ja siihen kirjataan mittaustulokset. Tietyt mittaustulokset ohjelma myös tallentaa itse. Kuviossa 4 on käyttöliittymä tilassa, jossa ei anneta ohjausta vielä moottorille. MotTest- ohjelmalla saadaan tehtyä ainakin tyhjäkäyntitesti, oikosulkutesti, tärinätesti ja roottorin pyöritystesti.

Yhtenä laatuvaatimuksena on, että hyötysuhde on se mikä moottorille on suunniteltu. On olemassa IE1, IE2, IE3 ja IE4 hyötysuhteella olevia moottoreita. Hyötysuhde on laitteesta saadun tehon ja siihen tuodun tehon suhde. Hyötysuhde on aina alle yhden, laitteessa syntyvien tehohäviöiden vuoksi /2/.

Moottorin hyötysuhde lasketaan kaavalla:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_h}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{k1} + P_r + P_l + P_{k2} + P_\mu)}{P_1} \quad (10)$$

kaavassa P2 on antoteho, P1= ottoteho, P_h= kokonaishäviöt, P_r= rautahäviöt, P_l = lisähäviöt, P_μ= mekaaniset häviöt, P_{k1}= staattorin resistanssihäviöt, P_{k2}= roottorin resistanssihäviöt.



Kuvio 4. Rutiinitestin testausohjelma

4.3 Rutiinikoestusten suorittaminen

4.3.1 Silmämääräinen tarkastus

Silmämääräinen tarkastus on ensimmäinen asia, mitä moottoreiden tarkastuksessa tehdään. Toki silmämääräistä tarkastusta pitäisi olla koko moottorin valmistusprosessin ajan. ABB- ohjeen mukaan tarkistetaan aluksi silmämääräisesti seuraavat asiat:

- Tarkistetaan, että tuotekoodi vastaa moottorin rakennetta.
- Moottorin jalkojen ja laippakilven reikien kunto ja symmetrisyys
- Voiteluun kuuluvien osien tarkistaminen.
- Akselinpää täytyy olla naarmuton ja kolhiintumaton. Jos samassa tilauksessa on samanlaisia moottoreita, täytyy niiden olla identtisiä.
- Liitinmerkinnät pitää olla paikkaansa pitävät. Moottorin asennusmerkki täytyy olla sama kuin koneen rakenteessa on kirjattu.

4.3.2 Käämien resistanssin mittaaminen

Käämitysten resistanssit mitataan aina kylmästä moottorista. Mitatun resistanssin ero laskettuihin arvoihin saa olla enintään 6 %:a. Moottorin eri vaihekäämien resistanssien välisen eron suuruutta tarkastellaan kaavalla

$$\frac{R_{max}-R_{min}}{R_{kesk}} \leq 2\% \quad (11)$$

Kaavassa R_{max} on suurin vaiheen resistanssi moottorin kolmesta vaihevastuksesta, R_{min} taas pienin näistä. R_{kesk} on kolmen vaihevastuksen mitatuista arvoista laskettu keskiarvo. Resistanssin mittaaminen on pakollinen ja kuuluu IEC-standardiin IEC 60034-1.

4.3.3 Tyhjäkäyntihäviöiden ja virran mittaaminen

Tyhjäkäyntivirta mitataan moottorin käydessä vapaasti ilman kuormitusta. Tyhjäkäyntikokeella selvitetään moottorin häviöt, kuten rautahäviöt P_{fe} , mekaaniset häviöt P_{μ} ja virtalämpöhäviöt tyhjäkäynnissä P_{ko} . Tyhjäkäyntikokeessa oletetaan roottorivirran I_2 olevan ≈ 0 tämä siksi, että moottorin pyöriessä tyhjäkäynnissä, pyörimisnopeus on likimain synkroninen, jolloin roottoriin ei induoidu virtaa, ja roottorin häviöt ovat pieniä.

Tyhjäkäyntikokeen mittauksissa selvitetään syöttöjännite U_0 , virta I_0 ja teho P_0 . Kokeen aikana jännitettä säädetään välillä $0,2 \cdot U_n$ ja $1,2 \cdot U_n$. Napapariiluku lasketaan kaavalla (2). Tyhjäkäyntivirta saa vaihdella $\pm 10\%$ ja kahden vaiheen välinen ero tulee olla pienempi kuin 5 prosenttia. Tyhjäkäyntiteho saa vaihdella jopa $\pm 75\%$:a. Varsinkin pienillä moottoreilla tyhjäkäyntiteho voi aluksi poiketa paljonkin, mutta tällöin olisi syytä pyörittää moottoria jonkun aikaa, jotta ylimääräiset laakerien rasvat poistuvat ja nähdään laskeeko tyhjäkäyntiteho sallitulle tasolle.

4.3.4 Oikosulkukoe

Oikosulkukokeessa mitataan oikosulkuvirtaa. Mittauksen aikana ei syötetä täyttä nimellistä jännitettä, vaan osaa nimellisjännitteestä. Tämä siksi, että virta koestuksen aikana muuten nousisi liian isoksi. Jännitettä nostetaan kokeen aikana

siten, että oikosulkuvirta I_k nousee nimelliseen virtaan I_n . Muitakin virran arvoja voidaan toki käyttää, kuten $0,5 \dots 1,5 \cdot I_N$. Oikosulkukokeessa roottori lukitaan, jolloin mekaanisia häviöitä ei pääse syntymään. Oikosulkukokeesta saadaan oikosulkuteho P_k

I_{km} saa oikosulkukokeen aikana vaihdella $\pm 15\%$:a. I_{km} tarkoittaa siis alennetulla jännitteellä (U_{km}) tehdystä oikosulkukokeesta saatua virtaa, joka on redusoitu oikosulkuvirta.

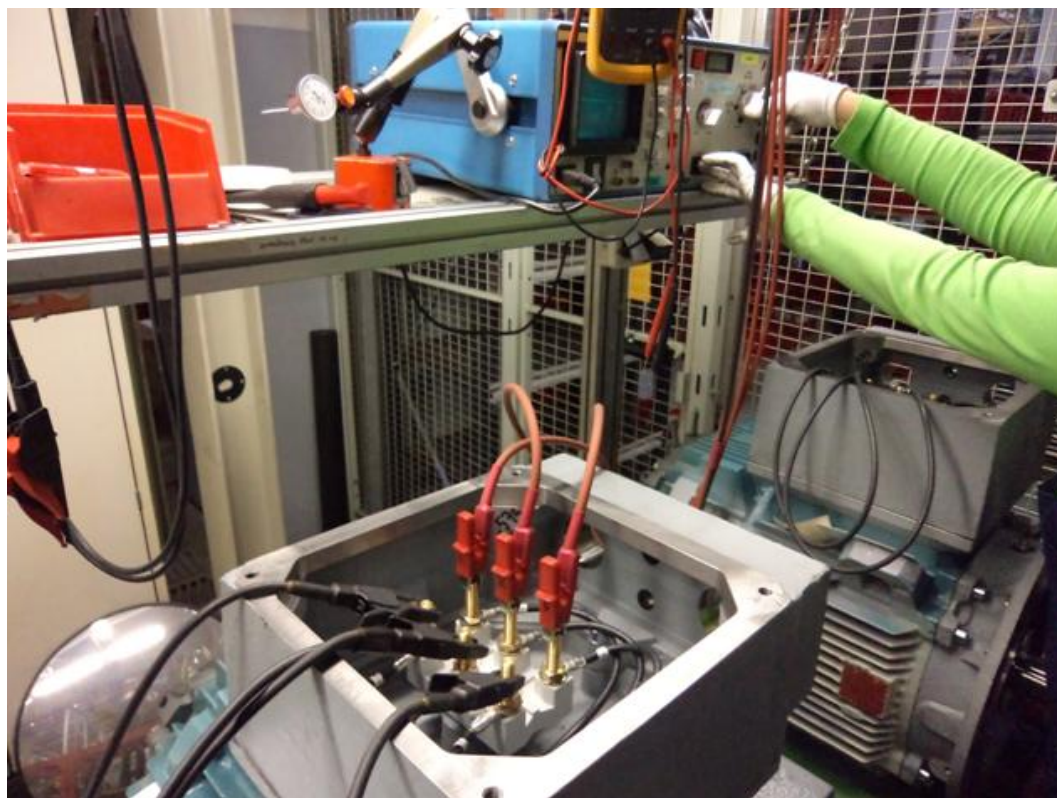
4.3.5 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittaus tehdään vain uusille ja valmiille moottoreille. Eristysvastus mitataan vaiheiden väliltä ja vaiheiden ja rungon väliltä. Testattavien eristettyjen osien välille luodaan jännite eristysvastusmittarilla, Esimerkiksi mittarin toinen johto asennetaan vaiheelle yksi ja toinen mittapää runkoon. Muut vaiheet ja lisälaitteet kytketään mittauksen ajaksi samaan potentiaaliin rungon kanssa (maapotentiaali). Tämä menettely toimii avoimin kytkennöin varustetuissa käämityksissä. Jos käämityksiä ei voida galvaanisesti erottaa, eristysresistanssi mitataan kaikkien vaiheiden ja rungon väliltä. Lisälaitteet ovat tässä mittauksessa kytketty samaan potentiaaliin rungon kanssa. Eristysvastusmittarilla syötetään jännitettä, joka lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$U = 2 * U_N + 1000 V \quad (12)$$

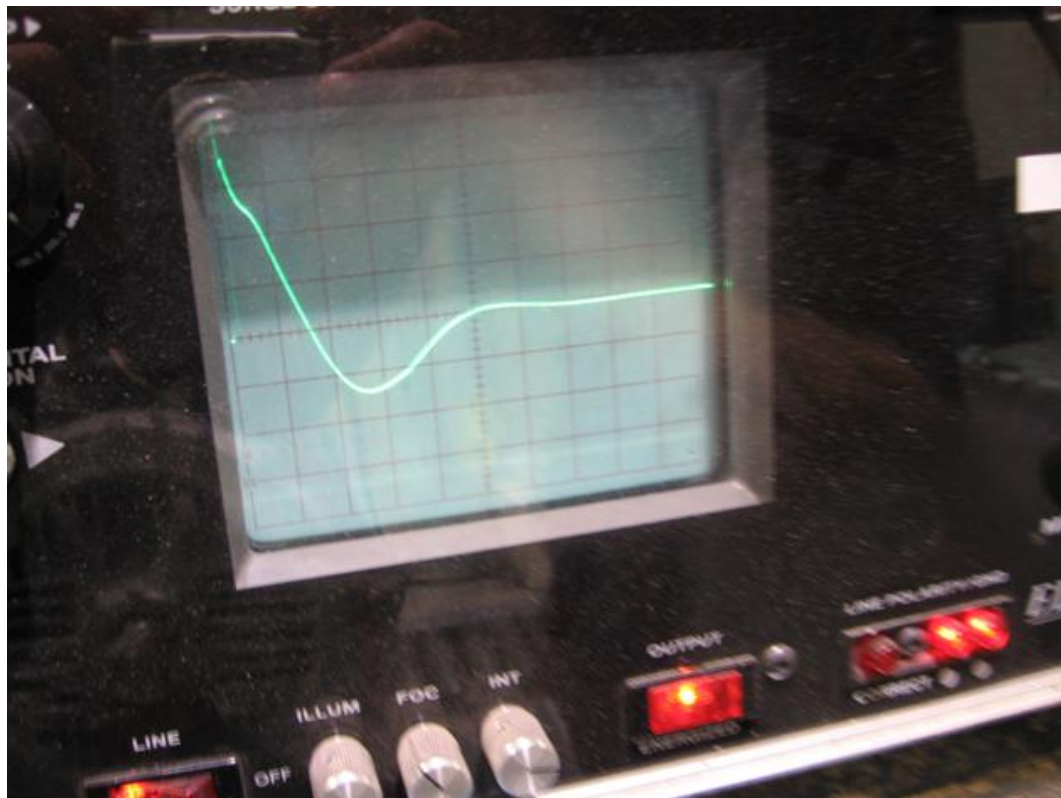
4.3.6 Toistoaaltokoe

Toistoaaltokoe tehdään siihen tarkoitetulla mittarilla. Käämitykseen lähetetään jännitepulssi ja mittarin näytöstä nähdään, kuinka pulssi heijastuu takaisin ja vaimenee. Vaihekäämien heijastuksia vertaillaan keskenään ja jos ne ovat samanlaiset, voidaan todeta käämien olevan kunnossa. Mittarin johdot kytketään yksi runkoon ja loput moottorin kahteen vaiheeseen, jotkut mittarit syöttävät vain yhteen vaiheeseen kerrallaan. Koestusjännite ABB:n käyttämissä mittareissa on 3000V ja jännitteensyöttö koestuksen aikana tapahtuu siten, että jännitettä nostetaan nolasta 3000 V:iin tasaisesti. Kuvassa 5 on menossa toistoaaltokoe testaus AL15 eli pienempien moottoreiden valmistuslinjalla.



Kuvio 5. Toistoaaltokoe

Jos vaihekäämissä on maasulku, mittariin tulee näkyviin vain suora tai lähes suora viiva. Vaihe-, kierros- ja vyyhtisulussa näkyy 2 erilaista käyrää. Vaihesulku on helppo erottaa, mutta kierrossulku ei paljon eroa normaalista toistoaaltokokeen käyrästä.



Kuvio 6. Ehjän moottorin toistoaltokokeen käyrä

4.3.7 Tärinänmittaus

IEC- standardin vaatimien mittausten lisäksi ABB:llä moottorista mitataan tärinä. Tärinämittauskoe tehdään tyhjäkäyntikokeen yhteydessä, ja AL35- linjalla moottori nostetaan mittauksen ajaksi nosturilla hivenen ylöspäin. AL15- linjalla moottori pidetään linjalla, mutta tuetaan

4.3.8 Roottorin pyöritystesti

Roottorin pyöritystesti tehdään oikosulkukokeen yhteydessä. Tällöin roottori on lukittuna ja siihen syötetään jännitettä, kuten oikosulkukokeessa. Roottoriakselia käännetään 180 astetta ja samalla tarkkaillaan virran vaihtelua. Virran vaihtelu nähdään koestuskeskuksen mittarista, tai koestuksessa käytetystä MotTest-ohjelmasta. Tämän mittauksen tarkoituksena on havaita, onko roottorin valu ehjä.

4.4 Uuden laskelman teko

Uusi laskelma tarkoittaa laskentaohjelmalla mitoitettuja sähkömoottorin arvoja. Uutta laskelmaa tehdessä arvot lasketaan pääsääntöisesti Adept-käyttöliittymällä, josta löytyy eri laskentaohjelmia. Esimerkkinä mainittakoon S113 ja FCSmek.

S113 on moottoreiden laskelmiin perustuva ohjelma ja se perustuu moottorin yksivaiheisen sijaiskytkennän ratkaisemiseen. Sijaiskytkentä on toki ratkaistavissa käsinlaskennalla, mutta siten laskenta olisi työlästä ja aikaavievää /2/. S113-ohjelmassa on neurotune toiminto, jolla voidaan hakea jo koestettuja arvoja, jotka ovat mahdollisimman olemassa olevien koestettujen moottorien arvoja. Näillä korjataan S113 arvoja oikeampaan suuntaan.

FCSmek perustuu siihen, että siinä on useita itsenäisiä ohjelmia, jotka perustuvat elementtimenetelmän ratkaisuun. Elementtimenetelmä tarkoittaa, että laskettava alue jaetaan osiin ja jokaisesta osasta tulee oma yhtälönsä. Nämä ratkaistaan kaikki samanaikaisesti. Ohjelman etuna on se, jos halutaan tarkempia tuloksia, niin voidaan elementtiverkkoa tihentää /9/.

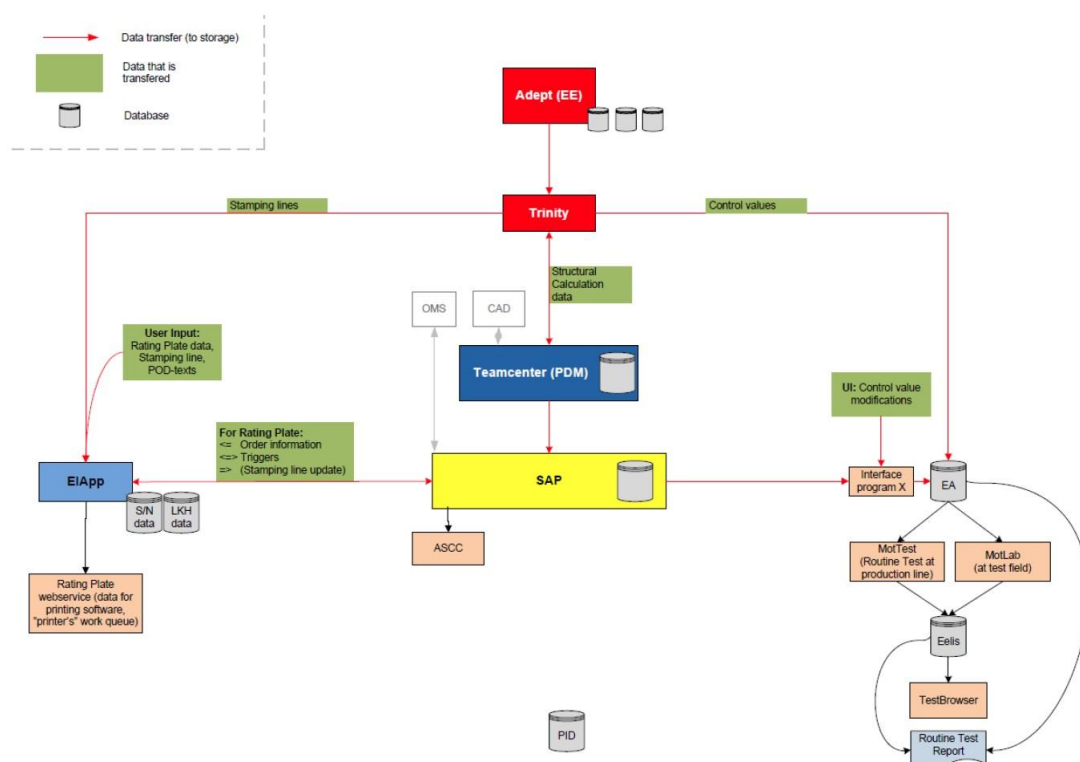
Trinity on sovellus, joka kerää Adeptissa lasketut arvot yhteen ja Trinityyn kautta arvot ohjataan eteenpäin. Tiedot voidaan siirtää Teamcenteriin, joka on tuotehallintasovellus, SAPIin, joka on työjono- ohjelma ELApp- arvokilpi ohjelmaan ja koestuksissa käytettäviin ohjelmiin MoTLab ja MotTest. Näistä ei kaikkia tarvitse valita, vaan tarpeen mukaan. Trinity-ohjelmasta löytyy 3moodia jotka ovat: uuden laskelman luonti, materiaalien haku ja leimausrivien lisäys valmiille laskelmille. /10/ SAPIin tiedot siirretään viimeisenä vielä Teamcenteristä. Kuviossa 7 on kaaviomuodossa esitetty, kuinka ohjelmat kommunikoivat keskenään.

ELApp on internet sovellus, jonka kautta hallitaan moottorin arvokilpien leimauksen työjonoa. ELApp:sta hallitaan myös esimerkiksi arvokilpipohjia ja leimausrivejä.

MotLab ja MotTest ovat ohjelmia joita käytetään tuotannossa koestuspaikoilla. Motlab- ohjelma on käytössä koestuskentällä ja MotTest- ohjelmaa käytetään rutiinikoestuspisteillä.

SAP- ohjelma on toiminnanohjausjärjestelmä. SAPissa on paljon sovelluksia ja ne yleensä räätälöidään jokaiselle yksikölle sopiviksi.

Teamcenter on tuotehallintasovellus joka on ns. varasto suunnittelutiedoille. Esimerkiksi Teamcenterillä voi hallita CAD- ohjelmien kuvia ja sähkösuunnittelutietoja Adeptista. /5/



Kuvio 7. Kaavio ohjelmista /11/

4.5 Yleisimmät syyt, miksi moottori ei läpäise testiä

4.5.1 Tyhjäkäyntivirta

Tyhjäkäyntivirran heitot ovat yksi syy siihen, että moottori ei läpäise testiä. Yleensä moottorin tyhjäkäyntivirta on suurempi kuin mitä suunnittelija on laskenut, tämä voi johtua esimerkiksi liian suuresta ilmavälistä. Tyhjäkäyntivirta voi olla liian suuri joko yhdessä vaiheessa verrattaessa sitä muihin vaiheisiin tai, että kaikkien vaiheiden tyhjäkäyntivirrat ovat liian suuret.

Yhden vaiheen tyhjäkäyntivirran poikkeamaa voidaan alkaa tutkia siten, että tutkitaan millaista jännitettä koestuspaikalla tulee, vaiheiden jännitteet eivät välttämättä ole symmetriset. Tietysti myös liitinjohdot tulee tutkia, eli onko kaikki liitetty oikein ja kunnolla.

Jos kaikissa vaiheissa heittoa on yhtä paljon ja arvot menevät yli sallittujen raja-arvojen, voidaan tutkia AtemTest Browserista millaiset arvot samalla laskelmalla on aikaisemmin ollut. Jos samalla laskelmalla ei ole vielä mitattuja arvoja AtemTest Browserissa, voidaan etsiä koneita, jotka ovat samantyyppisiä ja induktio olisi sama tai lähellä sama kuin rutiinikoestuksessa olevassa moottorissa. Jos Atemtest Browserista selviää, että saman laskelman tai samantyyppin koneissa on tyhjäkäyntivirran keskiarvo ollutkin enemmän samansuuntaisia kuin mitatussa koneessa, voidaan tyhjäkäyntivirran arvoja muuttaa.

| Type | Calculation | UN [V] | PN [kW] | UD calc [V] | UD [V] | I0 calc [A] | I0 [A] | P0 calc [W] | P0 [W] | cos I0 calc | os I0 meas | Ukm calc [V] | Ukm [V] | Ikm calc [A] | Ikm [A] | Pkm calc [W] | Pkm [W] | Pkm [W] | cos Ikm calc |
|---------------------------|--------------|--------|---------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|---------|--------------|
| M3KP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 400 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,6 | 504 | 528 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1954 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 380 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,3 | 504 | 502 | 0,072 | 0,121 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1942 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 380 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,2 | 504 | 535 | 0,072 | 0,132 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1921 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,4 | 504 | 568 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1930 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 398 | 10 | 10,4 | 504 | 601 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1922 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,3 | 504 | 599 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1924 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMV1/IM3011 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,2 | 504 | 565 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1963 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 345 | 8 | 400 | 398 | 10 | 10,6 | 504 | 618 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1938 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,4 | 504 | 568 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1927 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,3 | 504 | 619 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1918 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,3 | 504 | 628 | 0,072 | 0,000 | 70 | 73 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1928 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 690 | 6 | 400 | 400 | 10 | 10,1 | 504 | 577 | 0,072 | 0,000 | 70 | 75 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1928 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB5/IM3001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,2 | 504 | 622 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1893 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 415 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,0 | 504 | 573 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1901 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 415 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,2 | 504 | 584 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1917 | 0,530 |
| M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 415 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M3GP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,5 | 504 | 476 | 0,072 | 0,000 | 70 | 73 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 576 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,3 | 504 | 497 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1910 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,2 | 504 | 508 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1926 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMB3/IM2001 | 3G2F021013-1 | 480 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,2 | 504 | 508 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1926 | 0,530 |
| M3IP 132SMD 4 IMV1/IM3011 | 3G2F021013-1 | 400 | 6 | 400 | 399 | 10 | 10,3 | 504 | 497 | 0,072 | 0,120 | 70 | 76 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 2007 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV1/IM3011 | 3G2F021013-1 | 400 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,1 | 504 | 595 | 0,072 | 0,000 | 70 | 75 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1931 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV3/IM3031 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,1 | 504 | 595 | 0,072 | 0,000 | 70 | 75 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1923 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV3/IM3031 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,2 | 504 | 527 | 0,072 | 0,000 | 70 | 75 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1932 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV3/IM3031 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 399 | 10 | 10,0 | 504 | 527 | 0,072 | 0,000 | 70 | 75 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1927 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV3/IM3031 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,1 | 504 | 611 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1916 | 0,530 |
| M3GP 132SMD 4 IMV3/IM3031 | 3G2F021013-1 | 690 | 8 | 400 | 400 | 10 | 10,3 | 504 | 591 | 0,072 | 0,000 | 70 | 74 | 17 | 16,6 | 1067 | 1067 | 1941 | 0,530 |

Kuva 8. Esimerkkikuva AtemTest Browserista

Jos kone on pienitehoinen ja siinä on pieni induktio, ja jos tyhjäkäyntiteho ja tyhjäkäyntivirta kummatkin menevät yli sallittujen raja-arvojen, täytyisi konetta pyörittää pidemmän aikaa, noin puoli tuntia, ja mitata arvot uudestaan. Tällöin saadaan selville, ettei tyhjäkäyntiarvojen suuruus johdu vain koneen laakerien ylimääräisestä rasvasta.

ABB:n koestuspaikoilla pystyy moottoreita koestamaan vain tietyillä portaallisilla jännitearvoilla. Tämä täytyy ottaa suunnittelussa huomioon, kun koestusarvoja lasketaan. Taulukossa 2 on annettu nämä jännitearvot. Rutinikoestukseen tutustumisessa tehtaalla kävi ilmi, että joskus on annettu sellaisia koestusjännitteitä moottoreille, jotka eivät ole mahdollisia. Tällöin on täytynyt valita joko isompi tai pienempi jännite jolla pystyy koestamaan. Tällaisessa tapauksessa voi käydä niin, että koestusarvot menevät sallittujen rajojen yli, tai ovat lähellä raja-arvoja.

Taulukko 2. Taulukossa koestusjännitetasot, joilla pystytään koestamaan kullakin koestuspisteellä. /2/

| Tuotantolinjat | Tyhjäkäyntikoejännitteet: U0 | | | | Oikosulkukoejännitteet: Ukm | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----------------------------|----|----|-----|----|-----|-----|
| FIMOT | AL10 | - | 400 | 500 | 690 | - | - | - | - | - | - |
| | AL15 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL25 | - | 400 | 500 | 660 | 60 | 80 | 100 | - | - | - |
| | AL30 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL35 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL40 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL50 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | - | - | - |
| | AL55 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| PLMOT | PLL1 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | PLL2 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | PLL3 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |

4.5.2 Resistanssi

Resistanssi voi poiketa siten, että vaiheiden vastusarvot poikkeavat toisistaan liikaa. Tällainen poikkeama voi johtua esimerkiksi kääminnässä tehdystä virheestä. Poikkeama voi näkyä myös siten, että kaikkien vaiheiden vastus on liian suuri.

Jos yhden vaiheen vastus on liian suuri ja selviää, että staattorissa on väärä johdinkierrosmäärä tai vyyhdit olisi kytketty väärin, lisätutkintaa varten kone täytyy purkaa. Jos kaikkien vaiheiden vastus poikkeaa yhtä paljon ja poikkeama on yli sallitun rajan, olisi hyvä tutkia liittimien kunto.

4.5.3 Tyhjäkäyntiteho

Tyhjäkäyntiteho voi poiketa siten, että se on liian pieni, mutta tämä on harvinaista. Yleensä tyhjäkäyntiteho on liian suuri.

Kun tyhjäkäyntiteho poikkeaa, olisi hyvä ensin pyrkiä pyörittämään konetta pidemmän aikaa, kuten tyhjäkäyntivirran heiton yhteydessä voidaan tehdä. Tämä tulisi tehdä varsinkin, jos tyhjäkäyntiteho on liian korkea. Jos koneen pyörittäminen ja uusintamittaus ei auta, arvot voidaan tarkistaa AtemTest Browserista, kuten tyhjäkäyntivirran mittauksessa tehtiin.

4.5.4 Oikosulkuvirta ja oikosulkuteho

Oikosulkuvirran ja oikosulkutehon kohdalla voidaan tehdä samoin kuin aiemmin oikosulkuvirran kanssa, eli katsotaan AtemTest Browserista mitä arvoja on samalla laskelmalla tai samantyyppisellä koneella aiemmin mitattu. Jos on aihetta, arvoja voidaan muuttaa oikeampaan suuntaan.

4.5.5 Mittaustulosten poikkeamien tutkinta kone avattuna

Jos päädytään siihen, että vian selvittämiseksi täytyy kone avata, otetaan roottori ja staattori erilleen, joten tutkiminen on helpompaa.

Silmämääräisesti voidaan katsoa esimerkiksi ovatko roottori- ja staattoripaketit kohdakkain, jos eivät, se vaikuttaa paljon tyhjäkäyntiarvoihin ja vähän myös oikosulkukoearvoihin. Myös avatusta koneesta päästään näkemään, ettei siellä ole mitään sinne kuulumatonta tavaraa, sellainen voi aiheuttaa tyhjäkäyntipoikkeamaa tai tehdä kolhuja ja täten olla haitaksi. Tietysti täytyy tarkistaa myös, että koneen käämityksen napaluku on oikea. 2- nopeuskoneissa voi olla hankalampi selvittää asiaa.

Käämityksen täytyisi olla kolhiintumaton ja siinä ei saisi olla palamismisjälkiä, ne aiheuttavat heittoa tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeessa. Samaten myös roottorin täytyisi olla silmämääräisesti katsottuna kunnossa. Esimerkiksi kärventymisjälkiä, hankautumista tai kolhuja ei saa olla.

Silmämääräisten tutkimusten jälkeen, jos mitään vikaa ei ole löydetty, voidaan siirtyä mittaamaan, esimerkiksi onko roottorin laakereiden olakeväli sellainen, mitä pitäisi olla. Ilmarako voidaan mitata myös, nyt kun kone on avattuna. Väärä ilmarako vaikuttaa erityisesti tyhjäkäyntiarvoihin. /8/

5 OHJEEN LAADINTA

Tässä luvussa käydään läpi rutiinikoestusarvojen laskentaa. Ennen ohjeen kirjoitusvaihetta on kuultu 4 suunnittelijaa ja 2 nuorempaa suunnittelijaa. Haastattelujen pohjalta esitetään yhteenvetona tärkeimpiä asioita, jotka ovat tulleet esille. Tarkastelu käydään läpi mitoittamalla uudet moottorin arvot prototyypimoottoriin, johon haluttiin pienempi käynnistysvirta.

5.1 Yleistä

5.2 Laskenta sovellussuunnittelussa

Sovellussuunnittelussa suositetaan pääasiassa S113- ohjelmaa sen nopeuden vuoksi. Myös siksi, että S113 on työskentelyssä mukana koko ajan, jotenka ei tarvitse vaihtaa laskentaohjelmaa välillä. Myös S113:lla laskiessa käytetään vertailulaskentaa apuna, että saadaan korjauskertoimet koestusarvoihin. S113 ohjelmasta on tapana laittaa Neurotemp- aliohjelma päälle. Tällöin S113 käyttää Adeptin laskelmia laskemiseen ja myös testituloksia. Laskentaohjelmia vertaillessa huomattiin, että S113 laskee noin 10 % väärin kun lähtökohdaksi otetaan testattu laskelma johon uusia laskelmia verrataan.

5.3 Leimausarvot

5.3.1 Vertailulaskelman haku

Yleinen tapa uusia rutiinikoestusarvoja laskiessa on käyttää vanhaa koestettua laskelmaa apuna ja laskea sen avulla korjauskertoimet uudelle laskelmalle. Lopuksi tehdään vanhasta laskelmasta korjauskertoimien avulla uusi laskelma koestettavalle moottorille. Pohjana olevassa vanhassa laskelmassa jännite tulisi olla:

- 400VD 50Hz = jännitekoodi D
- 400VY 50Hz = jännitekoodi S
- 500VD 50Hz = jännitekoodi E

Tämä siksi, koska uudet laskelmat joita tehdään, perustuvat yleensä näihin vakiolaskelmiin. Jännitekoodit eroavat toisistaan jännitteen, kytkennän ja taajuuden perusteella. Vertailulaskelma olisi syytä olla sellainen, jossa tehollinen kierrosluku on mahdollisimman lähellä uutta laskelmaa. Olisi myös hyvä, että vertailulaskelmaa olisi koestettu mahdollisimman paljon /8/. Kun moottoria haetaan Adeptin hakemistosta staattorin tehollinen kierrosluku Z_{N1} , kytkentä ja jännite U_N nähdään helposti (**Kuvio 9.**).

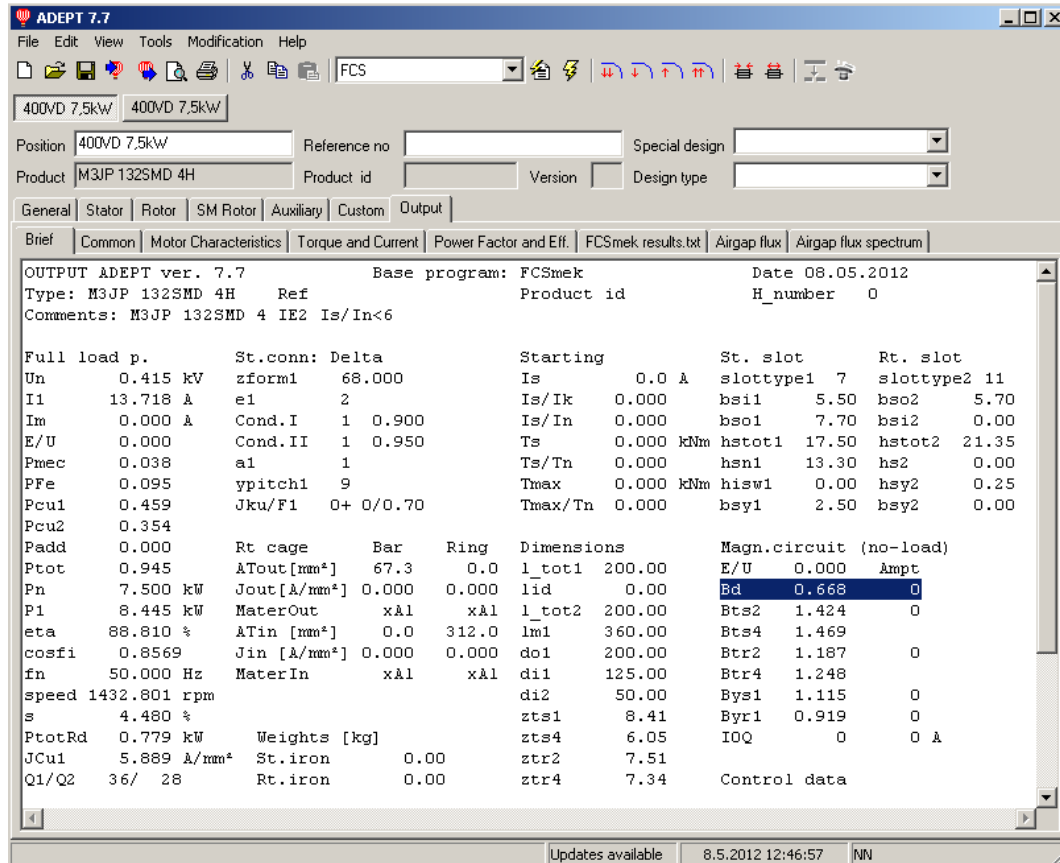
Induktio nähdään siten, että Adept- ohjelmasta lasketaan laskelma läpi ja Output+Brief välilehdeltä katsotaan mikä on magneettivuo ilmavälissä, eli Bd . Tämä siksi, että kun vuo on sama, silloin myös induktio on moottorissa sama. Kuviossa 10 on vuo Bd näkyvissä Adeptissa.

The screenshot shows the 'Load machine' software interface. The 'General' tab is active, displaying search criteria for a motor. The 'Product name' is set to 'M3_P%132SMD%4%'. Other fields include 'Stator core length', 'Shalt height', 'Frame code', 'Cooling method', 'Mounting', 'HXR core length', 'H-number', 'Calcid', and 'Unit system' (ABB51). A table at the bottom shows search results for three different motor configurations.

| Product id | Product name | CALCID | 2P | P_MV | UN | CONNEC | FN | PN | Q1 | YPITCI | ZN1 | NLAYE | COMMENTS |
|----------------|----------------|---------------|----|------|-----|--------|----|-------|----|--------|-----|-------|-------------------|
| M3JP 132SMD 4H | M3JP 132SMD 4H | 3GZF021013-19 | 4 | D | 0,4 | Delta | 50 | 7,500 | 36 | 9 | 27 | 1 | M3JP 132SMD 4 IE2 |
| M3JP 132SMD 4H | M3JP 132SMD 4H | 3GZF021013-25 | 4 | E | 0,5 | Delta | 50 | 7,500 | 36 | 9 | 34 | 1 | M3JP 132SMD 4 IE2 |
| M3JP 132SMD 4H | M3JP 132SMD 4H | 3GZF021013-26 | 4 | S | 0,4 | Star | 50 | 7,500 | 36 | 9 | 16 | 1 | M3JP 132SMD 4 IE2 |

3 machine(s) found. FIHEL-5-0000089.FI.ABB.COM\SQL01\FIMOT_Adept_Catalog

Kuvio 9. Laskelman haku



Kuvio 10. Vuo ilmavälissä Adeptissa

Tässä otettiin esimerkkitaupaukseksi kuvitteellinen tilanne, jossa asiakas haluaa 415VD nimellisjännitteellä 50Hz taajuudella ja pienellä starttivirralla olevan moottorin. Tällöin hyötysuhde laskee, koska staattoriin joudutaan käämimään lisää staattorin tehollisia kierroksia Z_{NI} starttivirran pienemiseksi. Pohjaksi otetussa moottorissa jännite muutettiin 400VD:stä 415VD moottorin laskelmassa 415 Volttiin. Myös toinen samanlainen vakiolaskelma avattiin Adeptissa, koska sitä tarvitaan myöhemmin apuna korjauskertoimilla leimausarvoja, tyhjäkäyntiarvoja ja oikosulkuarvoja laskiessa.

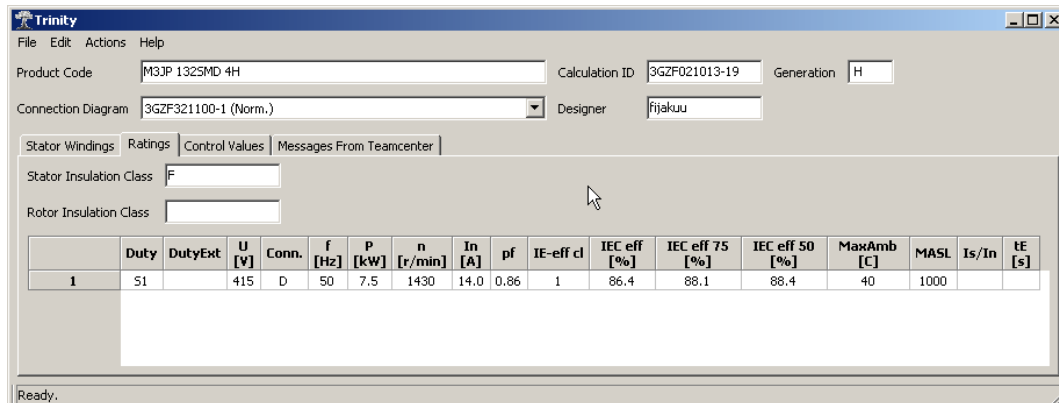
| | | | |
|---|----------------|--------------|--------------|
| Muutettu | | Vakio | |
| Position | Muutettu | Reference no | |
| Product | M3JP 132SMD 4H | Product id | |
| | | Version | |
| | | Design type | |
| General Stator Rotor SM Rotor Auxiliary Custom Output | | | |
| Core and slot Winding Cooling Special Connections | | | |
| COILTYPE1 | Random wound | A1 | 1 |
| CONNECT1 | Delta | ZN1 | 34 |
| METHOD1 | Automatic | UINS1 | 0 kV |
| MACU1 | Cu | UINS1_AIR | 0 kV |
| | | LM1 | 360 mm |
| | | LEW1 | 0,00048072 H |
| | | KEW1 | 0.36 |
| | | AEW1 | 0 mm |

Kuvio 11. Muutetun laskelman käämitystiedot- välilehti

5.3.2 Hyötysuhde, kierrosluku ja tehokerroin, virta

Vaihe 1. Kun vanhan pohjana olevan D/S/E- jännitekoodillisen laskelman (vakio) käämitys on muutettu siten, että käynnistysvirta I_s/I_n on laskenut halutulle tasolle, lasketaan muutettu laskelma läpi (**Kuvio 11.**) ja voidaan tämän jälkeen avata Trinity- ohjelman Ratings- välilehti tälle laskelmalle (**Kuvio 12.**). Korjauskertoimet, joita käytetään muutetussa laskelmassa leimausarvoja tehdessä, saadaan Adeptiin avatusta vakiolaskelmasta ja ElApp:in vanhoista leimausarvoista.

Nämä lasketaan, koska arvot ilmoitetaan tyyppikilvissä. Tässä aluksi leimausarvoja laskiessa suositetaan ottamaan S113 ja sieltä myös Neuro- ominaisuus käyttöön.



Kuvio 12. Trinity ikkuna

Vaihe 2. Nyt on hyvä avata ELAPP, eli tyyppikilpitietojen hallintaohjelma ja katsoa sieltä leimatut arvot, kuten esimerkiksi hyötysuhde korjauskerroinlaskua varten (**Kuvio 13.**).

Kun vaiheet 1 ja 2 on tehty, voidaan nämä arvot syöttää kaavaan 14. Kaavassa on esimerkkinä hyötysuhdelaskenta. Tällä korjauskerroinlaskulla saadaan Trinityyn oikeat arvot, jotka myös muutetaan sinne.

$$\frac{Eff_{leimattu}(elapp)}{Eff_{vakio}(s113/neuro)} * Eff_{muutettu}(adept/trinity) = uusi\ hyötysuhde \quad (13)$$

kaavassa 14 Eff tarkoittaa hyötysuhdetta.

Hyötysuhde osakuormilla, kierrosluku, tehokerroin ja virta lasketaan myös samalla tavalla. Eli tarvitaan ElApp:n arvo ja vakiolaskelman arvo Adeptista, tällä kertoimella kerrotaan muutettu laskelman eli Trinityn arvo ja vaihdetaan se Trinityyn.

Plate preview

| | | | | | | |
|---|----|------------|---------------------------|-----------------|-------|-------|
| ABB Oy, Motors Vaasa, Finland | | | | | | |
| CE 0081 | | IE2 | | Ex II 2G | | |
| 3 ~ Motor | | | M3KP 132SMD 4 IMB3/IM1001 | | | |
| Ex de II B T4 | | | | | | |
| 512465-3 | | 2011 | | No. 3GF11065040 | | |
| | | | | Ins.cl. F | | IP 55 |
| V | Hz | kW | r/min | A | cos φ | Duty |
| 690 Y | 50 | 7.5 | 1460 | 9.2 | 0.75 | S1 |
| 400 D | 50 | 7.5 | 1460 | 16.1 | 0.75 | S1 |
| 415 D | 50 | 7.5 | 1454 | 16 | 0.73 | S1 |
| H Gen. 0-serie. M530-50A electrical steel | | | | | | |
| IE2-89.1%(100%)-89.1%(75%)-87.6%(50%) | | | | | | |
| Prod. code 3GKP132240-ADH999 | | | | | | |
| Manual: 3GZF500730-47 | | | | Nmax | | r/min |
| 6208-2Z/C3 | | 6208-2Z/C3 | | 105 | | kg |
| | | ABB | | IEC 60034-1 | | |

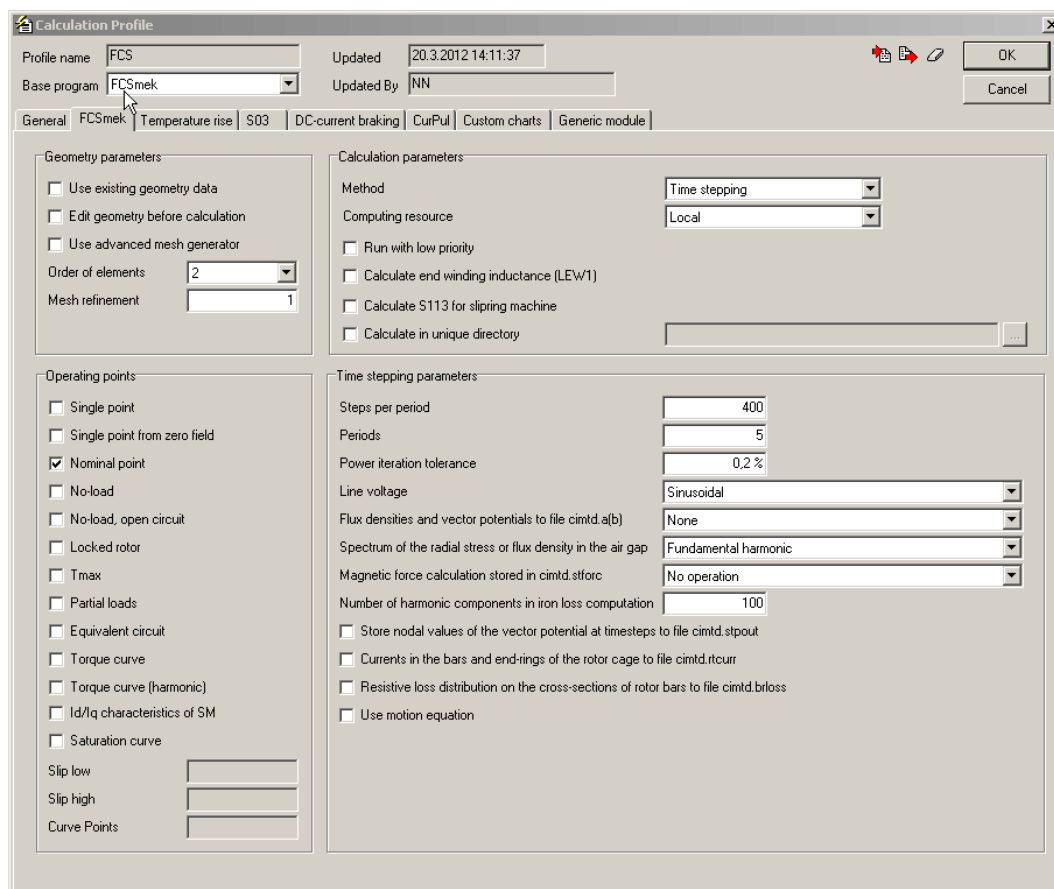
Kuvio 13. Arvokilpi ELapp- ohjelmassa

5.4 Rutiinikoestusarvot

Leimausarvojen laskemisen jälkeen voidaan alkaa laskemaan rutiinikoestusarvoja. Myös rutiinikoestusarvoja varten tarvitaan muutettu laskelma, joka aiemmin on jo käännetty ja laskettu, ja tämän muuttamaton vakiolaskelma. Eli nämä kaksi laskelmaa pidetään edelleen auki Adeptissa.

Lisäksi AtemTest Browseria käytetään apuna, sieltä löytyy vanhojen laskelmien tulokset, ja hankaushäviöt tyhjäkäyntiarvojen laskemista varten. Atemista nähdään myös millä jännitteellä moottoria on koestettu ja millä jännitteellä oikosulku-testit on tehty (**Kuvio 8.**), oikosulku-testiä ei tehdä täydellä jännitteellä. Rutiinikoestusarvot, joita tarvitaan näkyvät kuviossa 19. Laskentaohjelmat laskevat yleensä resistanssit oikein, joten niitä ei tarvitse muuttaa korjauskertoimien avulla.

Kuviossa 18 On FCSmek-laskentaohjelman laskentaprofiilin muokkaustila. Muokkaustilasta valitaan ensin tyhjäkäyntiarvojen laskentaa varten nominal point, eli nimellispiste ja Time stepping, eli aika-askel laskenta. Voidaan myös käyttää Harmonicia, eli aika-harmonista laskentaa samasta alavetovalikosta, koska Harmonic on nopeampi. Suurilla napaluvuilla tulisi käyttää Time stepping laskentaa. Jos päädytään laskemaan Time steppingillä täytyy sen parametreista valita montako pistettä jakson aikana lasketaan ja montako jaksoa laskussa on. Tätä toimintoa ei Harmonic laskennassa ole.

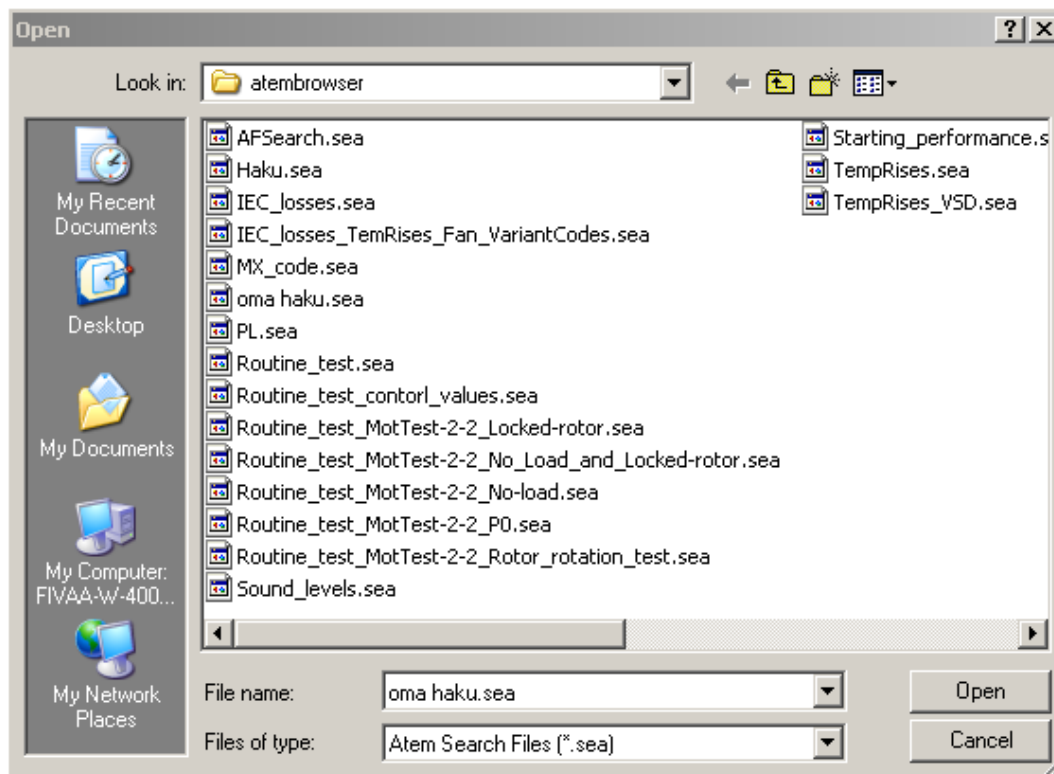


Kuvio 14. FCSmek- laskentaprofiilin muokkaus

5.4.1 Häviötehot laskentaa varten

Tyhjäkäyntiarvojen laskentaan tarvitaan Tuuletin ja hankaushäviötehot P_{fw} . Ne saadaan AtemTest Browserista. Ensin täytyy ottaa esimerkiksi sellainen haku

käyttöön kuin ”omahaku.sea” (**Kuvio 14**), se löytyy AtemTest Browserista open-valikon alta. Tällä haulla saadaan auki calculations, eli laskelmat välilehti, josta saadaan tuuletus- ja hankaushäviöt.



Kuvio 15. Hankaushäviöiden haku

Kuviossa 15 on avattuna ”omahaku.sea”- haun kautta laskelman Calculations välilehti. Laskelma on sama, jota käytetään tässä työssä koko esimerkkilaskennan ajan. Tässä tuuletus- ja hankaustehohäviöt ovat 54,93 W.

| Result | Stamping general | Customer notes | Factory notes | Temperature rise test note | Calculations | Torq. / Current | Temperature Test | T |
|---|------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|------------------|---|
| Motor Parameters | | | IEC 60034-2-1, Measured | | | IEC 60034-2-1: Sept. 2007 | | |
| I ₀ | 9,90 A | U ₁ | 400,35 V | U ₁ | 400,35 V | | | |
| cosφ ₀ | 0,0614 | I ₁ | 16,09 A | I ₁ | 16,17 A | | | |
| P ₀ | 420,77 W | I ₂ | 0,00 A | I ₂ | 0,00 A | | | |
| Z ₀ | 23,332 ohm | P _{fw} | 54,93 W | P _{fw} | 54,93 | | | |
| n ₀ | 1498,00 rpm | P _{fe} | 227,54 W | P _{fe} | 227,48 W | | | |
| I _k | 94,37 A | P _s | 375,08 W | P _s | 386,25 W | | | |
| cosφ _{ik} | 0,5075 | P _r | 197,68 W | P _r | 202,92 W | | | |
| Z _k | 2,4471 ohm | P _l | 49,40 W | P _l | 49,67 W | | | |
| R _k | 1,2420 ohm | P _t | 904,62 W | P _t | 921,25 W | | | |
| X _k | 2,1085 ohm | P _{out} | 7,44 kW | P _{out} | 7,50 kW | | | |
| P _k | 965 W | P _{in} | 8,34 kW | P _{in} | 8,42 kW | | | |
| R _{1v} (20C) | 410,15 mOhm | Eta | 89,15 % | Eta | 89,06 % | | | |
| Measured values for P _{out} , P _l and Eta | | | Cos | 0,747 | Cos | 0,752 | | |
| P _{out} ' | 0,00 kW | s | 2,55 % | s | 2,62 % | | | |
| P _l ' | | n | 1461,68 rpm | n | 1460,66 rpm | | | |
| Eta' | | Temperature Rises (IEC 60034-2-1) | | | | | | |

Kuvio 16. Testatun moottorin arvot AtemTest Browserista

Häviötehot syötetään Adeptiin vakiolaskelmaan ja tämän jälkeen valitaan laskentaohjelma. Tässä ohjeessa rutiinikoestusarvojen laskemiseen käytetään laskentaohjelmaa FCSmek, koska se on todettu S113- ohjelmaa tarkemmaksi. FCSmekin laskentaprofiilista (**Kuvio 13**) voidaan ottaa käyttöön ”Time stepping”, joka on haastattelujen perusteella tarkin laskentatapa. Time steppingin huono puoli on sen hitaus, jota joskus moititaan. Tämän vuoksi voidaan ottaa käyttöön ”Harmonic” eli aika-harmoninen laskenta, joka myös on tarkka ja tällä päästään tarpeeksi tarkkoihin arvoihin. Harmonic-laskenta on nopea ja menee läpi muutamassa sekunnissa.

Kun vakiolaskelma on ajettu läpi, FCSmekillä voidaan katsoa tällä laskennalla saatu tyhjäkäyntivirta I_0 ja $\cos \varphi_0$ Motor Characteristic-välilehdeltä. Samalla tavalla lasketaan toinen muokattu laskelma läpi (**Kuvio 16**).

| M3JP 132SMB 4H | | NO: | | 04.04.2012 | |
|----------------|------------|---------------|----------------------|------------------|----------|
| OUTPUT: | 0.1 kW | IE Class: | 0 | CURRENT (A) | 5.6 |
| VOLTAGE: | 400.0 V | LOAD (%) | EFF (%) | cosφ | 0.077 |
| FREQUENCY: | 50.0 Hz | 100 : | 30.93 | 0.0 | 0.000 |
| CONNECTION: | Delta | 75 : | 0.00 | 0.0 | 0.000 |
| CURRENT: | 5.6 A | 50 : | 0.00 | 0.0 | 0.000 |
| TORQUE: | 0.6 Nm | 25 : | 0.00 | 0.0 | 0.000 |
| SPEED: | 1499.0 rpm | 125 : | 0.00 | 0.0 | 0.000 |
| POLES: | 4 | 0 : | Temp rise class | 0.0 | 0.000 |
| | | Start : | B | 0.0 | 0.000 |
| | | INERTIA | | TEMPERATURE RISE | |
| | | Rotor | 0.0 kgm ² | Stator | 0.0 K |
| | | | | Rotor | 0.0 K |
| LOSSES | | TORQUE | | SPEED | |
| Friction | 0.04 kW | Tn | 1 Nm | 1499 rpm | SLIP (%) |
| Iron | 0.10 kW | Tmax | 0 Nm | 0 rpm | 0.06 |
| Stator | 0.07 kW | Ts | 0 Nm | | 0.00 |
| Rotor | 0.00 kW | | | | |
| Additional | 0.00 kW | NOISE (dB(A)) | | X/R RATIO | |
| Total | 0.21 kW | 0, tol ± 3 | | 0.00 | |
| | | | | PO | |
| | | | | 0.00 kW | |

Kuvio 17. Tulokset laskennan jälkeen

5.4.2 Oikosulkuarvot

Tyhjäkäyntiarvojen jälkeen lasketaan oikosulkuarvot vakiolaskelmasta ja muokatusta laskelmasta. Tässä tapauksessa saadaan redusoitu oikosulkuvirta I_{km} , koska laskennassa ei käytetä täyttä jännitettä. Tämä siksi, koska koekentällä ei oikosulku-testissä voida käyttää täyttä jännitettä.

Oikosulkuarvojen laskemista varten asetetaan jättämä (SLIPINI) 100 prosenttiin Adeptin pääsivulla (**Kuvio 18**), samaten laskentajännite asetetaan sellaiseksi, jolla koestuspaikoilla pystytään koestamaan, kuten taulukossa 2 nähdään oikosulkujännitteet- sarakkeen kohdalta. FCSmekin laskentaprofilista ”Operating points” kohdasta laitetaan vain kohta ”single point” valituksi (**Kuvio 14**).

Tämä testausjännite, eli U_{km} saadaan haettua AtemTest Browsersista koestetusta laskelmasta. Tällaisesta on hyvä katsoa millä jännitteellä samanlaista moottoria on aiemmin testattu. Myös Eamotlabista nähdään sama arvo (**Kuvio 17**). Tässä laskelmassa oikosulku-testausjännite U_{km} on 70 V.

Control values maintenance

File

Calculation number 3GZF021013-19

| Line no | Un | Connection | Fn | Poles | IO | COS0 | PO | Ik | Cosk | R1v | R16 | Ukm | Ik |
|---------|-----|------------|----|-------|------|-------|-----|----|------|-------|-------|-----|----|
| 1 | 400 | D | 50 | 4 | 10,2 | 0,072 | 504 | 95 | 0,53 | 0,407 | 1,221 | 70 | |

Close

Kuvio 18. Oikosulkutestausjännite Eamotlabissa

ADEPT 7.7

File Edit View Tools Modification Help

400VD 7,5kW 400VD 7,5kW

Position 400VD 7,5kW Reference no

Product M3JP 132SMD 4H Product id

General Stator Rotor SM Rotor Auxiliary Custom

Main and supply Speed and load Torque variation Sp

COMMENTS M3JP 132SMD 4 IE2

DESIGNER JUTA T_CLASS

MOT_GEN Motor T_CLASS2

PN 0,05493 kW AMB_TEMP

SN 11.13633115 kVA TRUN1

UN 0,07 kV TRUN2

FN 50 Hz TSTART1

STANDARD IEC TSTART2

SF 0 COOLWT

ALTITUDE 1000 m a.s.l. AIRFLOWCAT

OVERSPDPU 0 p.u. FAN

UN_UNDERV 0 % COOLAIRCIR

UN_VAR 0 % DUTY

FN_VAR 0 % IWAVE

COSFIN 0 MARINE_STD

COSFINU 0 NUMSTARTYEA

SLIPINI 100 % FAN_TYPE_M3

RANGLE 0 ° FAN_M3

Kuvio 19. Oikosulkuarvojen asettelut

5.4.2 Korjauskertoimet

Kun on saatu laskettua pohjana olevan muokatun laskelman ja vakio laskelman tyhjäkäynti- ja oikosulkuarvot FCSmekillä, päästään tärkeimpään kohtaan, eli korjauskertoimien laskemiseen. Kaikki haastateltavat pitivät tärkeänä, että lasketaan korjauskertoimilla uudet arvot, eikä suoraan laiteta niitä arvoja menemään eteenpäin mitä Trinity antaa laskelmasta (**kuvio 14**). Silloin on suuri todennäköisyys, että rutiinikoestuksessa arvot menevät yli sallittujen rajojen ja arvot täytyy tarkistaa uudelleen. Kaavassa 14 on esimerkkinä virran korjauskerroinlasku. $I_0, \cos\phi_0$, lasketaan samalla tavalla.

$$\frac{I_{\text{testattu Atem:sta}}}{I_{\text{vakio laskelma}}} * I_{\text{muokattu laskelma}} = \text{Uusi testausarvo} \quad (15)$$

Kun uudet arvot ollaan laskettu, korjauskertoimen avulla voidaan näistä arvoista laskea tyhjäkäynti ja oikosulkutehot.

$$P_0 = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \phi_0 \quad (16)$$

Tyhjäkäyntitehon P_0 kaavassa käytetään tyhjäkäyntitestauksessa käytettävää jännitettä U_0 , tässä tapauksessa 400V, koska laskelma on taulukon 2. mukaan sitä testausjännitettä lähinnä. I_0 tarkoittaa tyhjäkäyntivirtaa, joka on korjattu korjauskertoimien avulla kaavan 14. mukaan. Myös $\cos\phi_0$ on korjauskertoimien avulla saatu uusi koestusarvo.

$$P_k = \sqrt{3} * U_{km} * I_{km} * \cos \phi_k \quad (17)$$

Oikosulkuteho P_k lasketaan käyttäen redusoitua oikosulkujännitettä U_{km} ja redusoitua oikosulkuvirtaa I_{km} . U_{km} on syytä olla sama, kuin aiemmin testatussa samanlaisessa moottorissa, U_{km} voidaan katsoa AtemTest Browserista ja se tulisi olla sellainen millä taulukon 2. mukaan rutiinikoestuspisteellä pystytään oikosulkukokeessa testaamaan.

Saadusta redusoidusta oikosulkuvirrasta I_{km} voidaan laskea oikosulkuvirta I_k moottorin nimellisen jännitteen ja alennetun jännitteen U_{km} avulla (kaava 17).

$$I_k = \frac{U_N}{U_{km}} * I_{km} \quad (18)$$

U_N kaavassa tarkoittaa moottorin nimellistä jännitettä esimerkiksi 400 V ja U_{km} on rutiinikoestus testissä käytettävä alennettu jännite, esimerkiksi 70 V

Kun kaikki tarvittavat arvot on korjattu korjauskertoimilla, eli I_0 , I_{km} , $\cos\phi_0$, $\cos\phi_k$ ja U_{km} , ja näiden avulla laskettu vielä tehot P_0 ja P_k , ja virta I_k , arvot muutetaan Trinityn ”control values” ikkunaan (**Kuvio 20**), joka on jo aiemmin avattu uudelleen lasketusta laskelmasta, jonka käämitystä ja jännitettä muutettiin.

| | U [V] | Conn. | f [Hz] | 2p | I0 [A] | Cos0 | P0 [W] | Ik [A] | Cosk | R1v [mOhm] | R16 [mOhm] | Ukm [V] | Ikm [A] | Pk [W] | Ef [U] | R2v [mOhm] | Urt [V] | Internal conn. |
|---|-------|-------|--------|----|--------|-------|--------|--------|------|------------|------------|---------|---------|--------|--------|------------|---------|----------------|
| 1 | 400 | D | 50 | 4 | 10.2 | 0.072 | 504 | 95 | 0.53 | 407 | 1221 | 70 | 16.6 | 1067 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Kuvio 20. Trinity ikkuna

6 TIIVISTETTY OHJE LASKELMAN TEOSTA

1) Pohjaksi otetaan D, S, tai E- laskelma, Eli D = 400VD, S = 400VY, E= 500VD. Tai lähin testattu erikoislaskelma, jos löytyy. Laskennan avuksi avataan kaksi samanlaista laskelmaa Adeptilla.

- 400VD 50Hz = jännitekoodi D
- 400VY 50Hz = jännitekoodi S
- 500VD 50Hz = jännitekoodi E

Lähin tarkoittaa sitä, että vastaava tyyppi jolla on samat staattori ja roottoripakettiraudat. ZNI, Eli staattorin käämien kierroslukumäärä urassa tulisi olla lähellä samaa. Käämin olisi oltava lähellä myös niin, että induktio ei poikkea kovin paljoa. Induktio on silloin lähellä samaa kun vuo ilmavälissä eli *BD* on sama.

2) Kun toinen pohjana oleva laskelma on muutettu halutunlaiseksi, voidaan siitä avata Trinity- ikkuna ja sieltä ”Ratings” välilehti, johon muutetaan korjauskertoimien ensin tarvittavat leimausarvot, eli pyörimisnopeus, Virta, tehokerroin, hyötysuhde, hyötysuhde myös osakuormilla.

Leimausarvoja laskiessa tarvitaan korjauskertoimia varten saman pohjana olevan laskelman vanhat leimausarvot ElApp- ohjelmasta. Korjauskertoimia varten lasketaan myös Adeptissa avattu toinen vakiolaskelma läpi.

Esimerkkilaskuna hyötysuhteen korjauskerroinlaskenta

$$Uusi\ hyötysuhde = \frac{Eff_{leimattu(ElApp)}}{Eff_{laskettu(S113/neuro)}} * Eff_{uusilaskelma (Adept/Trinity)}$$

Leimausarvojen korjauskertoimet lasketaan kaikki samalla tavalla, eli pyörimisnopeus, nimellisvirta I_n , tehokerroin $\cos\phi$, ja hyötysuhteet (myös osakuormilla)

3) Kun leimausrivin arvot on laskettu ja korjattu korjauskertoimilla, lasketaan ja muutetaan rutiinikoestusarvot Trinity Control Values- ikkunaan. Adeptissa olevat laskelmat lasketaan nyt FCSmek:iä ja Harmonic toimintoa käyttäen, koska Harmonic toiminto on Time Stepping toimintoa nopeampi.

Tyhjäkäyntikokeen arvot voidaan laskea ensin, eli nyt avataan AtemTest Browser ja katsotaan sieltä samanlaisen vakiolaskelman tuuletin ja hankaushäviöt P_{fW} .

P_{fW} muutetaan Adeptin etusivulla, eli ”general + Main and supply”- välilehdellä olevaan P_N lokeroon. Jännite tulee tässä olla sama kuin mitä tyhjäkäyntikokeessa tulee olemaan, esimerkiksi 400V myöskään taajuutta ei tarvitse muuttaa. Läpilaskun jälkeen virta ja tehokerroin eli $\cos\phi$ nähdään Adeptin ”Output + Motor Characteristics”- välilehdeltä. FCSmekin laskentaprofilista ”Operating points” kohdasta laitetaan vain kohta ”Nominal point” valituksi.

Nyt näiden tyhjäkäyntiarvojen korjauskerroinlaskua varten tarvitaan adeptin ensimmäisen laskelman arvoja, eli Trinity ikkunan ”Control Values”- välilehdeltä. Tarvitaan myös myös vakiolaskelmaa jolla tyhjäkäyntiarvot laskettiin. Kolmantena tarvitaan AtemTest Browserista testattujen moottorien keskiarvo lukemia.

Esimerkkilaskuna tyhjäkäyntivirran korjauskerroinlaskenta

$$I_0 = \frac{I_0(\text{AtemTest Browserista testattu})}{I_0(\text{Adeptin vakiolaskelman tulos})} * I_0(\text{Muutetun laskelman tulos})$$

4) Tyhjäkäyntiarvojen jälkeen lasketaan oikosulkuarvot vakiolaskelmasta ja muokatusta laskelmasta. Tässä tapauksessa saadaan redusoitu oikosulkuvirta I_{km} , koska laskennassa ja testauksessa ei käytetä täyttä jännitettä.

Oikosulkuarvojen laskemista varten asetetaan Adeptin pääsivulla ”General + Main and supply” välilehdellä jättämä (SLIPINI) 100 prosenttiin. Samaten laskentajännite U_N asetetaan sellaiseksi, jolla koestuspaikoilla pystytään koestamaan oikosulku-testauksia. FCSmekin laskentaprofilista ”Operating points” kohdasta laitetaan vain kohta ”single point” valituksi.

$$P_0 = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \varphi_0$$

Kaavassa U_0 , I_0 ja $\cos \varphi_0$ ovat korjauskertoimilla korjatut uudet testausarvot

$$P_k = \sqrt{3} * U_{km} * I_{km} * \cos \varphi_k$$

Kaavassa U_{km} ja I_{km} ovat redusoituja arvoja oikosulkutestiin, $\cos \varphi_k$ on oikosulkutehokerroin

$$I_k = \frac{U_N}{U_{km}} * I_{km}$$

Kaavassa U_N on moottorin nimellinen jännite, esimerkiksi 400V ja U_{km} on redusoitu jännite oikosulkutestiin, esimerkiksi 70V.

5) Kun kaikki tarvittavat arvot on korjattu korjauskertoimilla, eli I_0 , I_{km} , $\cos \varphi_0$, $\cos \varphi_k$ ja U_{km} , ja näiden avulla laskettu vielä tehot P_0 ja P_k , ja virta I_k omilla kaavoillaan, arvot muutetaan Trinityyn ”control values” ikkunaan, joka on jo aiemmin avattu muutetusta laskelmasta, jonka käämitystä ja jännitettä muutettiin.

Taulukko 1. Taulukossa koestusjännitetasot, joilla pystytään koestamaan kullakin koestuspisteellä.

| Tuotantolinjat | | Tyhjäkäyntikoejännitteet: U_0 | | | | Oikosulkukoejännitteet: U_{km} | | | | | |
|----------------|------|---------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------------|----|-----|----|-----|-----|
| FIMOT | AL10 | - | 400 | 500 | 690 | - | - | - | - | - | - |
| | AL15 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL25 | - | 400 | 500 | 660 | 60 | 80 | 100 | - | - | - |
| | AL30 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL35 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL40 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | AL50 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | - | - | - |
| | AL55 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| PLMOT | PLL1 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | PLL2 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |
| | PLL3 | 230 | 400 | 500 | 690 | 55 | 66 | 82 | 95 | 114 | 141 |

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä rutiinikoestukseen ja rutiinikoestusarvojen laskentaan ja sitä kautta laatia yhteinen ohje rutiinikoestusarvojen laskemista varten. Rutiinikoestukseen perehtyminen aloitettiin lukemalla ABB:n rutiinikoestusohjeita ja katsomalla mitä IEC-standardissa vaaditaan rutiinikoestukseen. Rutiinikoestukseen tutustuttiin myös vieraillemalla kahdella eri kokoonpanolinjan rutiinikoestus pisteellä. Nämä linjat olivat nimeltään AL35 ja AL15, joista ensimmäinen oli suurempien moottoreiden ja jälkimmäinen pienempien moottoreiden linja.

Linjoilta saatiin tietoa, jos moottorin rutiinitestissä oli huomautettavaa ja syitä mistä asioista johtuu, jos moottori ei läpäise rutiinestettä tai jos siinä oli jotain huomautettavaa. Yleisimpiä asioita oli tyhjäkäyntivirta, oikosulkuvirta ja tyhjäkäyntiteho. Huomattiin myös, että aina ei ole aikaa käyttää moottoria tarpeeksi kauan esimerkiksi, että tyhjäkäyntiteho laskisi. Ongelmia oli enemmän pienempien, kuin suurempien moottoreiden linjalla.

Ilmeni myös sellainen asia, että linjalla testataan moottorit ilman tuuletinta, se varmasti vähän vaikuttaa esimerkiksi moottorin todelliseen tyhjäkäyntivirtaan tai tyhjäkäyntitehoon. Jos rutiinikoestusta kehitettäisiin, olisi varmasti hyvä muuttaa koestuspaikka sellaiseksi, että moottorissa voisi olla tuuletin kiinni, kun sitä rutiinikoestetaan

Jos ilmenee, että ongelma linjalla ei selviä muuten, kuin laskemalla arvoja uusiksi, niin silloin suunnittelija tarkastaa yleensä vain sen arvon, jossa on ongelmia. Esimerkiksi laskee tyhjäkäyntivirran arvot uudestaan.

Opinnäytetyön teko osoittautui siten haasteelliseksi, että itsellä ei ollut ennestään kokemusta rutiinikoestusarvojen laskennasta, vaikka osa ohjelmista oli ennestään tuttuja. Rutiinikoestusarvot oli myös mahdollista laskea monella eri tavalla. Myös laskennan ja hyväksi havaittujen asioiden läpi selostaminen ymmärrettävästi oli hankalaa. Kun ohjelman käyttö alkoi sujua hyvin, itse laskemisessa ei mene kauaa.

Opinnäytetyön tärkein saavutus oli, tehdä opinnäytetyön teon aikana opittujen asioiden perusteella rutiinikoestuslaskennasta FIMOT- ohje ABB Oy:n tietokantaan. Ohjeesta tehtiin tiivistelmä ja se sisältää tärkeimmät pääkohdat, joita rutiinikoestusarvoja laskettaessa täytyy huomioida.

ABB:llä samanaikaisesti opinnäytetyönä valmistuvaan Adept käyttöohjeen kanssa rutiinikoestusohje varmasti toimii hyvin. Rutiinikoestusohje käsittelee enimmäkseen vain rutiinikoestusarvojen laskennassa käytettäviä asioita. On silti hyvä olla perustana tietoa, kuinka laskentaohjelmaa käytetään.

LÄHTEET

- /1/ ABB motors and generators internet sivut. Viitattu 13.4.2012.
<http://fi.inside.abb.com/cawp/gad00195/7f3f0f93f68dcc97c22570050018e347.asp>
- /2/ ABB motors and generators sisäinen ohjetietokanta. Rutiinikoestusohjeet. Viitattu 7.3.2012
- /3/ Aura, L., Tonteri, A.J. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka. uud. painos. Helsinki. WSOY
- /4/ International Electrotechnical Commission (2010). IEC 60034-1 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance. 51 s.
- /5/ Kuusisto, T. 2012. Teamcenter basics. ABB Motors and Generators sisäinen ohje.
- /6/ Nyblin, H. 2002. ABB Oy, Electrical Machines LV Motors. Oikosulkumoottorin laskentaohje.
- /7/ Sähkökoneet osa 1. Viitattu 16.4.2012.
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf 7
- /8/ Piipponen, H. 2012. Tarkistusarvojen määrittely. Email Hannu.Piipponen@fi.abb.com 13.1.2012. Tulostettu 8.2.2012.
- /9/ Ryyppö, T. 2005. Diplomityö. Hajautetun laskentajärjestelmän soveltaminen epätahtikoneen roottorirakenteen optimointiin. Espoo.
- /10/ Talvitie, T. 2005. Diplomityö. FEM-ohjelmiston sopeuttaminen ja hyväksikäyttö nopeaan kestopagneettimoottorisuunnitteluun. Vaasa.
- /11/ Talvitie, T. Trinity ja laskelman luonti. ABB motors and generators sisäiset ohjeet. Vaasa.
- /12/ Tähti-kolmiomuunnos. Viitattu 24.4.2012.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/T%C3%A4hti-kolmiomuunnos>
- /13/ Oikosulkumoottorit. Viitattu 10.5.2012
<http://oikosulkumoottorit.wikispaces.com/J%C3%A4tt%C3%A4m%C3%A4,+v%C3%A4%C3%A4nt%C3%B6momentti+ja+py%C3%B6rimisnopeus>

