

Jouni Suni

Retardation-menetelmän käyttö tahtikoneiden koestuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
29.4.2011

Alkulause

Tämä insinöörityö on tehty ABB Oy Moottorit ja generaattorit -yksikön tahtikoneiden koestamolle Helsingin Pitäjänmäellä. Työssä tutkittiin IEC 60034-2 -sarjan standardien mukaista *Retardation*-menetelmää ja sen soveltuvuutta tahtikoneiden loppukoestuksessa.

Erityisesti haluan kiittää koestamon päällikköä, diplomi-insinööri Sami Karttusta tämän haasteellisen ja erittäin opettavaisen aiheen antamisesta minulle, työni ohjaajana toiminnutta koestusinsinööri Kari Pärssistä sekä työni valvojaa yliopettaja Ari Kohvakkaa. Kiitokset kuuluvat myös sekä ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaan, että ABB:n Ruotsin Västeråsin sähkökonetehtaan tahtikoneiden koestamon henkilökunnalle, joiden tekninen tuki mahdollistivat testikoestuksen ja koko työn toteuttamisen.

Helsingissä 29.4.2011

Jouni Suni

Tekijä(t) Otsikko	Jouni Suni Retardation-menetelmän käyttö tahtikoneiden koestuksessa
Sivumäärä Aika	44 sivua + 4 liitettä 29.4.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Ari Kohvakka Koestusinsinööri Kari Pärssinen
<p>Insinööriyössä tutkittiin IEC 60034-2 -sarjan standardissa määriteltyä <i>Retardation</i>-menetelmää ja sen käyttöä suurten tahtikoneiden häviöiden määrittämiseen. Lisäksi selvitettiin <i>Retardation</i>-menetelmän käyttömahdollisuuksia ja sen tuomia etuja mahdollisena uutena tahtikoneiden testausmenetelmänä ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaan tahtikoneiden lopputestauksessa. Työn tilaajana toimi ABB Oy Moottorit ja Generaattorit -yksikön tahtikoneiden koestamo.</p> <p><i>Retardation</i>-menetelmän tutkiminen aloitettiin perehtymällä menetelmään liittyviin standardeihin IEC 60034-2-1 ja IEC 60034-2-2. Standardeista saatiin kattavat tiedot menetelmästä ja siihen liittyvistä testeistä ja häviöiden laskemisesta.</p> <p>Seuraavaksi suoritettiin <i>Retardation</i>-menetelmällä testikoestus tahtimoottorille, jonka häviöt oli aikaisemmin laskettu nykyisen <i>Calibrated-machine test</i> -menetelmän avulla. Näiden kahden menetelmän avulla laskettuja tahtikoneen kokonaishäviöitä vertailtiin tuloksia analysoitaessa.</p> <p>Testikoestuksen ja laskettujen häviöiden perusteella <i>Retardation</i>-menetelmän todettiin soveltuvan hyvin tahtikoneiden häviöiden määrittämiseen. Menetelmän avulla saatiin luotettavasti laskettua testattavalle tahtikoneelle häviöt, ja todettiin niiden olevan vertailukelpoisia nykyisen menetelmän avulla laskettujen vastaavien häviöiden kanssa.</p> <p><i>Retardation</i>-menetelmän käyttöönotto ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaan tahtikoneiden lopputestauksessa ei kuitenkaan ole tarpeellista, sillä nykyisen koestuskapasiteetin todettiin olevan riittävä. Tämä insinööriyö toimii hyvänä perustana menetelmän käyttöönotolle tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat	<i>Retardation</i> -menetelmä, tahtikone, lopputestaus, häviöt

Author(s) Title	Jouni Suni Retardation method in synchronous machines final testing
Number of Pages Date	44 pages + 4 appendices 29 April 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electric Power Engineering
Instructor(s)	Ari Kohvakka, Senior Lecturer Kari Pärssinen, Testing Engineer
<p>This thesis concentrates on Retardation method, which is used for determining losses of large synchronous machines and is specified in IEC 60034-2 -series standards. The purpose of this thesis is to determine the possibilities of the use of Retardation method in synchronous machines final testing at ABB Motors and Generators Ltd in Helsinki Pitäjänmäki.</p> <p>Before the actual final testing of synchronous machine, it was important to study the standards related to Retardation method and clarify the theory and test methods for determining losses. Next the final testing of synchronous motor was performed using the present Calibrated-machine test method and the Retardation method. The total losses calculated with these methods was compared and used for analyzing the results.</p> <p>The calculated losses and the final testing performed on the synchronous machine verified that Retardation method is suitable for determining losses of synchronous machines and the calculated losses were comparable to the losses calculated with the present Calibrated-machine test method.</p> <p>The usage of the Retardation method in synchronous machines final testing at ABB Motors and Generators Ltd in Helsinki was discovered being unnecessary since the present testing capacity is sufficient. This thesis serves the potential usage of the method in the future.</p>	
Keywords	Retardation method, synchronous machine, final testing, losses

Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet, määritelmät ja symbolit

1	Johdanto	1
2	Standardista yleisesti	2
2.1	ISO-standardisoimisjärjestö	2
2.2	IEC-standardi	4
3	Kohdeyritys ABB Oy Moottorit ja generaattorit	5
3.1	Tahtikoneiden loppukoestamon kuvaus	6
3.2	Tahtikoneiden loppukoestusmahdollisuudet	6
3.3	Tahtikoestamon tehonlähteet	7
4	Tahtikoneen lopputestaus	8
4.1	Kappalekoestus	9
4.1.1	Silmämääräinen tarkastus	9
4.1.2	Ilmaväli ja laakerivälökset	9
4.1.3	Käämien ja elementtien resistanssimittaus	9
4.1.4	Eristysresistanssin mittaus (alkutarkastus)	10
4.1.5	Koneen ensipyörittäminen ja laakereiden tarkastus	10
4.1.6	Koneen pyörimissuunta ja vaihejärjestys	10
4.1.7	Tyhjäkäyntipisteen mittaus	10
4.1.8	Oikosulkupisteen mittaus	10
4.1.9	Ylinopeuskoe	11
4.1.10	Tärinätason mittaus	11
4.1.11	Eristyskoe	11

4.1.12	Eristysresistanssin mittaus (jälkitarkastus)	11
4.2	Lajikoestus	12
4.2.1	$\cos\varphi=0$ -mittaus	12
4.2.2	Tyhjäkäyntikäyrä	12
4.2.3	Oikosulkukäyrä	12
4.2.4	Lämpenemiskoe	13
4.2.5	Häviömittaukset	13
4.2.6	Hitausmomentti	13
4.3	Erikoiskoestukset	13
5	Tahtikoneiden lopputestausmenetelmät	14
5.1	<i>Calibrated-machine test</i> -menetelmä	14
5.2	<i>Retardation</i> -menetelmä	15
5.2.1	<i>Retardation</i> -menetelmän testivalmistelut	18
5.2.2	Testien suorittaminen tunnetulla hitausmomentilla	19
5.2.3	Testien suorittaminen tuntemattomalla hitausmomentilla	22
5.2.4	Hidastuvuuden ja hidastumisvakion määrittäminen	24
5.2.5	Häviöiden laskeminen tunnetulla hitausmomentilla	26
5.2.6	Häviöiden laskeminen tuntemattomalla hitausmomentilla	28
6	Tahtimoottorin testikoestus	29
6.1	Testattavan tahtikoneen esittely	29
6.2	Testikoestuksen koestusjärjestelyt	30
6.3	Testikoestuksessa käytetyt mittalaitteet	31
6.4	Testikoestuksen suorittaminen	32
6.5	Mittaustulokset ja tulosten analysointi	34
6.6	Tahtimoottorille lasketut häviöt ja tulosten analysointi	36
7	Johtopäätökset	39
7.1	<i>Retardation</i> -menetelmän edut ja haitat	40
7.2	<i>Retardation</i> -menetelmän käyttöönoton vaatimuksia	41
8	Yhteenveto	42
	Lähteet	44

Liitteet

Liite 1. Tahtimoottorin testikoestuksen mittauspöytäkirja

Liite 2. Tahtimoottorin hidastuvuudet eri kuormitusmenetelmillä

Liite 3. Tahtimoottorin häviöt ja hitausmomentti *Calibrated-machine test* -menetelmällä

Liite 4. Tahtimoottorin häviöiden laskenta *Retardation*-menetelmällä

Lyhenteet, määritelmät ja symbolit

Lyhenteet ja määritelmät

IEC International Electrotechnical Commission; kansainvälinen sähköalan standardoimisjärjestö

ISO International Organisation for Standardization; kansallisten standardoimisjärjestöjen liitto

Calibrated-machine test method menetelmä sähkökoneiden häviöiden määrittämiseksi

Retardation method / Retardation-menetelmä menetelmä sähkökoneiden häviöiden määrittämiseksi

rpm Revolutions Per Minute; kierrosnopeuden yksikkö, kierrosta minuutissa

Symbolit

C hidastumisvakio

$\cos\varphi$ tehokerroin

δ -arvo pyörimisnopeuden poikkeama yksikköä kohden

dn pyörimisnopeuden muutos

dt ajan muutos

f_N nimellinen taajuus

I_{1N} staattorin nimellinen virta

I_{rN}	roottorin nimellinen virta
J	hitausmomentti
n_N	nimellinen pyörimisnopeus
P_{fe}	rautahäviöt
P_{fw}	mekaaniset häviöt
P_k	kuormitushäviöt eli virtalämpöhäviöt
P_m	magnetoimishäviöt
t	aika tai lämpötila
U_{1N}	staattorin nimellinen pääjännite
V_{dc}	jännite; tasavirta

1 Johdanto

ABB Oy on yksi johtavista sähkökoneiden valmistajista maailmassa. Yrityksen palveluksessa on maailmanlaajuisesti yli 124 000 henkilöä. Suomessa ABB:n organisaatiossa työskentelee lähes 6 900 henkilöä. Helsingin Pitäjänmäellä toimii ABB Oy:n Moottorit ja generaattorit -yksikkö, jossa valmistetaan erilaisia sähkökoneita, kuten induktiomootto-reita sekä tahtimootto-reita ja -generaattoreita asiakkaiden tarpeiden mukaisesti sovel-luksiin.

ABB:n valmistamat sähkökoneet ovat maailmanlaajuisesti arvostettuja ja haluttuja nii-den korkean laadun ja kilpailukykyisten ominaisuuksien vuoksi, ja tämän takia on tär-keää, että koneiden jatkuvaan kysyntään voidaan vastata laadusta tinkimättä. Konei-den laatua valvotaan tuotannon aikana usean menetelmän avulla. Yksi tärkeimmistä laadunvalvontamenetelmistä ovat standardien sanelemat lopputestaukset, joiden avulla varmistetaan, että valmistetut sähkökoneet vastaavat ominaisuuksiltaan ja rakenteil-taan niitä arvoja, jotka jokaiselle koneelle on laskettu ja määritetty sekä arvoja, jotka asiakkaille on erikseen luvattu.

Tässä insinööriyössä keskitytään edellä mainituista sähkökoneista tahtikoneisiin ja nii-den lopputestaukseen. Työssä tutkitaan IEC 60034-2 -sarjan standardissa määriteltyä, suurten sähkökoneiden lopputestaukseen ja häviöiden määrittämiseen tarkoitettua *Retardation*-menetelmää ja sen käyttömahdollisuuksia uutena testausmenetelmänä tahtikoneiden lopputestauksessa ABB Oy:n Moottorit ja generaattorit -yksikön Helsingin sähkökonetehtaalla. Työssä selvitetään myös, millaisia etuja uuden menetelmän käyt-töönotto toisi rinnakkaisena lopputestausmenetelmänä nykyisen käytössä olevan *Calibrated-machine test* -menetelmän kanssa.

Työhön liittyy myös tahtimoottorille tehtävät testikoestukset, joiden avulla saadaan tärkeää tietoa *Retardation*-menetelmästä ja sen käytöstä tahtikoneiden lopputestauk-sessa. Testikoestukset suoritetaan osana moottorin normaalia kappalekoestusta.

2 Standardista yleisesti

Standardit ovat puolueettomien organisaatioiden esittämiä ja yhteisesti hyväksytyjä suosituksia ja ohjeita siitä, miten jokin asia tulisi tehdä. Tällä asialla yleensä tarkoitetaan jotakin laajempaa kokonaisuutta, esimerkiksi pyörivien sähkökoneiden häviöiden määrittämistä. Standardien päätarkoitus on hyödyttää koko yhteiskuntaa, sillä yhteisesti hyväksytyt käsitteet ja määrytykset nopeuttavat työn etenemistä, vähentävät väärinkäsityksiä ja auttavat saamaan entistä parempia tuloksia.

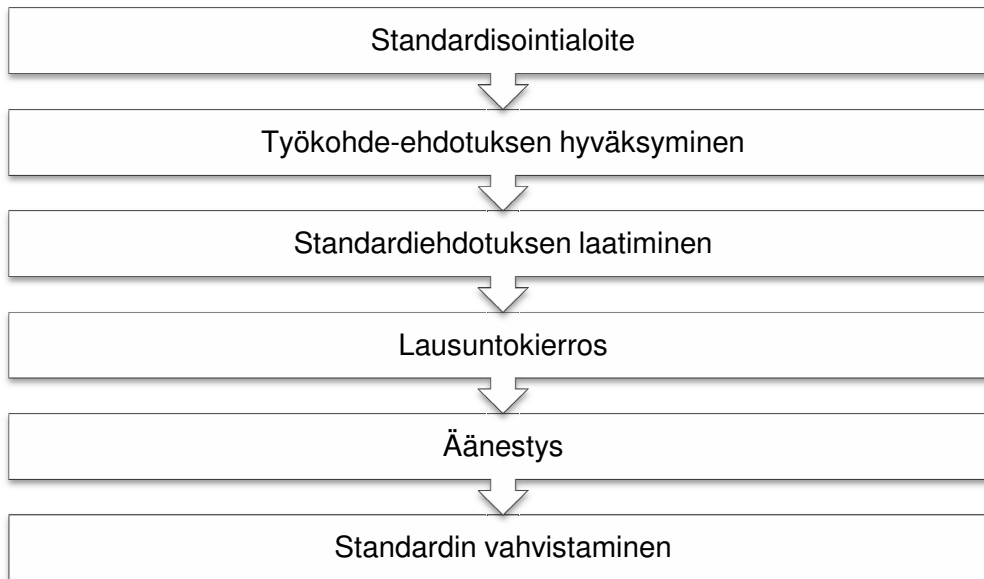
Maailmalla syntyy päivittäin uusia ideoita ja tuotteita sekä vanhojen ideoiden ja tuotteiden kehittämistarpeita. Tällöin ideoiden ja tuotteiden alkuperäisen käyttötarkoituksen ja toiminnan takaamiseksi, on standardien olemassaolo välttämätöntä. Standardit takaavat myös sen, että ideoiden ja tuotteiden käyttäjät ympäri maailmaa voivat mahdollisimman tehokkaasti hyödyntää niitä.

2.1 ISO-standardisoimisjärjestö

ISO (International Organization for Standardization) on maailman suurin standardisoimisjärjestö, joka kehittää ja julkaisee kansainvälisiä standardeja. Vuodesta 1947 lähtien ISO on julkaissut yli 18 000 kansainvälistä standardia. ISO:n jäsenistö koostuu kansallisista standardisoimisjärjestöistä, joita on mukana 163 eri maasta. ISO ei ole minnekään hallituksen alainen järjestö, ja se muodostaakin sillan julkisen ja yksityisen sektorin välille, tarkoituksenaan yhteisymmärryksen saavuttaminen ratkaisuihin, jotka vastaavat sekä liike-elämän että muun yhteiskunnan tarpeita. [1.]

Seuraavaksi esitettävät asiat perustuvat ISO:n Internet-sivuihin:

Päivittäin syntyvien innovaatioiden ja vanhojen keksintöjen parantamiseksi johdosta tarvitaan jatkuvasti joko uusia standardeja tai vanhojen päivittämistä. Jotta saadaan uudet standardit tai vanhojen päivitykset mahdollisimman nopeasti ja hyvin tehtyä, on standardien syntymenetelmänkin yhteisesti sovittu, ja standardit syntyvät aina saman menettelyn mukaisesti (kuvio 1, ks. seur. s.).



Kuvio 1. Standardin laadinta

Standardisointialoite

Standardisointialoite on prosessissa ensimmäisenä, jossa standardisointia tarvitseva tekee asianmukaiselle standardisointiliitolle aloitteen standardin laatimiseksi, muuttamiseksi tai korjaamiseksi.

Työkohde-ehdotuksen hyväksyminen

Työkohde-ehdotuksen hyväksyminen on vaihe, jossa standardisointiliitto määrittelee työn tavoitteet ja kiireellisyyden sekä päättää työn aloittamisesta. Kun standardi perustuu kansainväliseen työhön, selvitetään myös muiden maiden työkohde-ehdotukset ja sovitaan mahdollisesta yhteistyöstä.

Standardiehdotuksen laatiminen

Standardiehdotus syntyy siten, että standardisointiliitto ja sen lautakunta asettaa kansallisen komitean tai seurantaryhmän seuraamaan standardisointityötä. Tämän työryhmän jäsenet pyritään nimeämään siten, että he edustaisivat mahdollisimman laajalti alan asiantuntemusta. Työryhmä laatii standardiehdotuksen noudattamalla standardisointilautakunnan ohjeita.

Lausuntokierros

Lausuntokierros on vaihe, jossa valmis standardiehdotus lähetetään hyväksyttäväksi kaikille, joilla oletetaan olevan huomattavaa asiantuntemusta tai oleellinen etu valvottavanaan standardiehdotuksen suhteen, kuten muun muassa valmistajat, maahantuojat, kuluttajat, testauslaitokset ja viranomaiset.

Äänestys

Äänestys standardin hyväksymisestä tapahtuu standardisointiliiton ja/tai sen jäsenjärjestöjen sisällä, jos vähintään kaksi kolmasosaa äänestäneistä hyväksyy standardin.

Standardin vahvistaminen

Standardi vahvistetaan voimassaolevaksi standardiksi, kun se on läpäissyt hyväksytysti lausuntokierroksen sekä äänestyksen. [2.]

2.2 IEC-standardi

Seuraavaksi esitettävät asiat perustuvat IEC:n Internet-sivujen tietoihin:

IEC (International Electrotechnical Commission) on kansainvälinen sähköalan standardisointijärjestö, jonka jäseninä ovat kansalliset järjestöt. USA:ssa vuonna 1904 pidetyssä kansainvälisessä sähkötekniikan kongressissa tuotiin esille idea, että perustettaisiin kansainvälinen teknillinen komissio, jonka tarkoitus olisi turvata yhteistyö kaikkien maailman teknisten yhteisöjen välillä. Tämän seurauksena vuonna 1906 perustettiin IEC, maailman ensimmäinen sähkötekniikan komissio, jonka ensimmäisiä tuotoksia olivat esimerkiksi useat sähköfysiikan suureiden yksiköt, sähkölaitteiden termistöt ja sähkötekniikan kirjainsymbolit.

Nykyään IEC koostuu yli 120 teknillisestä komissiosta, joista jokaisella on oma erikoisosaamisalueensa liittyen sähkötekniikan tärkeimpiin keksintöihin, esimerkiksi komissio numero 1 vastaa sähköisestä terminologiasta, ja toisena on komissio, jonka vastuualueena ovat pyörivät sähkökoneet ja niiden standardisointi.

Yksi IEC:n tärkeimpiä tuotoksia on vuonna 1938 ilmestynyt kansainvälinen ja monikielinen sanakirja, josta löytyy miltei kaikki sähkötekniikan terminologiaan liittyvä. Nykyään sanakirja on sähköisenä versiona Internetissä, ja se kattaa yli 20 000 termiä ja määritelmää pääkielinä englanti ja ranska, mutta suurin osa on myös käännettynä 12 eri kielelle. IEC-standardit ovat numeroitu 60000 - 79999, ja niiden otsikot ovat esimerkiksi muotoa: *IEC 60034-1: Rotating electrical machines*.

Tämän insinööriyön kannalta oleellimmat IEC 60034-2 -sarjan standardit keskittyvät pyörivien sähkökoneiden häviöiden ja hyötysuhteen määrittämiseen. Sarjan standardit koostuvat seuraavasti:

- *IEC 60034-2-1 Rotating electrical machines: Standard methods for determining losses and efficiency from tests*
- *IEC 60034-2-2 Rotating electrical machines: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests.*

IEC 60034-2-1 -standardi, jonka versio 1.0 on vuoden 2007 syyskuussa hyväksytty, sisältää yleisimmät menetelmät pyörivien sähkökoneiden häviöiden ja hyötysuhteen määrittämiseksi. IEC 60034-2-2 -standardi, jonka versio 1.0 on vuoden 2010 maaliskuussa hyväksytty, täydentää standardia 60034-2-1 sisältäen täydennyksiä ja tarkennuksia varsinkin suurten pyörivien sähkökoneiden häviöiden ja hyötysuhteen määrittämiseksi. Näiden standardien perusteella suoritetaan myös ABB Oy:n sähkökonetehtaal-la tahtikoneiden lopputestaukseen liittyvät häviömittaukset. [3; 4; 5.]

3 Kohdeyritys ABB Oy Moottorit ja generaattorit

Tämän insinööriyön tilaajana oli ABB Oy Moottorit ja generaattorit -yksikön Helsingin Pitäjänmäen sähkökonetehtas ja tahtikoneiden loppukoestamo.

ABB on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka tuotteet, järjestelmät ja palvelut parantavat teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n palveluksessa on yli 124 000 henkilöä noin 100 maassa. ABB tarjoaa kattavan valikoiman luotettavia, korkean hyötysuhteen moottoreita ja generaattoreita kaikkiin sovelluksiin. [6.]

3.1 Tahtikoneiden loppukoestamon kuvaus

ABB Oy Moottorit ja generaattorit -yksikön tahtikoneiden loppukoestamossa suoritetaan tehtaalla valmistuneille tahtikoneille asianmukaiset lopputestaukset, joiden avulla varmistetaan, että koneiden laatuksiteerit täyttyvät, ja että koneet vastaavat ominaisuuksiltaan ja suorituskyvyiltään asiakkaan vaatimuksia sekä niitä arvoja, jotka jokaiselle koneelle on laskettu ja määritetty.

Tahtikoneiden loppukoestamo koostuu kuudesta erillisestä testisolusta SY1, SY2A, SY2B, SY3, GX1 sekä GX2. Neljässä ensimmäisessä, SY-merkityissä testisolussa suoritetaan akselikorkeudeltaan 710...2 500 mm tahtikoneille kappale-, laji- ja erikoiskoestuksia. Kahdessa viimeisessä, GX-merkityissä testisolussa suoritetaan suurimmaksi osaksi tahtigeneraattoreiden kappale- ja lajikoestuksia. Näissä kaikissa testisoluissa lopputestaukset suoritetaan käyttäen IEC 60034-2-1 -standardin *Calibrated-machine test* -menetelmää [4, s. 67; 5, s. 10 - 12], joka perustuu erillisen kalibroidun sähkökoneen käyttöön tahtikoneiden lopputestauksessa. Tahtikoneiden lopputestauksessa käytetään kalibroituina sähkökoneina tasavirtamoottoreita. [7.]

3.2 Tahtikoneiden loppukoestusmahdollisuudet

Tahtikoneiden loppukoestusmahdollisuuksilla tarkoitetaan niitä tekijöitä, jotka on otettava huomioon suunniteltaessa loppukoestusta tahtikoneelle. Rajoittavat tekijät määntyvät testattavan tahtikoneen ja siihen liittyvien lisälaitteiden teknisten ominaisuuksien sekä koneelle suoritettavan testiohjelman vaatimusten perusteella. Näitä rajoittavia tekijöitä koneen lopputestauksessa ovat muun muassa

- tahtikoneen fyysinen koko
- tahtikoneen nimellisjännite, -virta ja -teho
- tahtikoneen pyörimisnopeus ja taajuus
- tahtikoneen magnetointi
- laakerit ja voitelu
- jäähdytys
- lisälaitteiden ominaisuudet
- tarvittavat mittalaitteet
- tahtikoneen koestukseen varattu aika.

Edellä mainittujen tekijöiden perusteella valitaan testattavalle tahtikoneelle koestuksen suorittamiseen sopiva testisolu, tahtikoneen ominaisuuksia ja koestustarpeita vastaava tasavirtamoottori sekä varataan koestuksessa vaadittavat sähkönsyötöt ja mittalaitteistot.

3.3 Tahtikoestamon tehonlähteet

Tahtikoneiden koestamossa on säädettävänä tehonlähteinä mm. kolme suurta tahtigeneraattoria, joilla saadaan tarvittaessa testattaville tahtikoneille tehonsyötöt. Generaattoreilla on mahdollista syöttää testattavaa tahtikoneetta jokaisessa tahtikoestamon testisolussa. Tahtikoestamon SY-testisoluilla on yksi harjallisten tahtikoneiden magnetointiin soveltuva tasavirtamagnetointisilta, josta saadaan magnetointisyöttö jokaiselle SY-testisolulle. Erillisellä magnetointikoneella varustetuille harjattomille tahtikoneille saadaan jokaiseen testisoluun niin 1-vaiheinen, kuin 3-vaiheinenkin magnetointisyöttö.

Calibrated-machine test -menetelmässä käytettyjen tasavirtamoottoreiden tehonsyöttöön käytettäviä tasasuuntaussiltoja on tahtikoestamossa yhteensä neljä kappaletta, joista tahtikoestamon GX-testisoluissa on käytössä kaksi tasasuuntaussiltaa. Yksi näistä tasasuuntaussilloista toimii tehonlähteenä testisolussa GX1 olevalle tasavirtamoottorille ja toinen testisolussa GX2 olevalle tasavirtamoottorille. Tahtikoestamon testisolussa SY1, SY2A, SY2B ja SY3 on käytössä yhteensä kaksi tasavirtamoottoreiden tehonlähteinä toimivaa tasasuuntaussiltaa. Näistä tasasuuntaussilloista toinen on rakennettu testisolulle SY1 ja toinen yhteisenä testisoluille SY2A sekä SY2B.

Vuoden 2011 aikana uudelleenjärjestelyiden ja investoinnein tahtikoestamon SY-testisoluihin lisätään kaksi tasavirtamoottoreiden syöttöön käytettävää tasasuuntaussiltaa, joista toinen rakennetaan testisolulle SY3 ja toinen yhteisenä testisoluille SY1, SY2A ja SY2B. Lisäksi yksi harjallisten tahtikoneiden magnetointiin soveltuva magnetointisilta rakennetaan yhteisenä kaikille SY-testisoluille.

4 Tahtikoneen lopputestaus

Kaikille tahtikoneille, jotka valmistetaan ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaalla, tehdään asianmukaiset loppukoestukset ennen koneen luovuttamista asiakkaalle. Loppukoestuksilla varmistetaan, että testattavan koneen laatukriteerit täyttyvät, ja että koneet vastaavat ominaisuuksiltaan ja suorituskyvyiltään asiakkaan vaatimuksia sekä niitä arvoja, jotka jokaiselle koneelle on laskettu ja määritetty.

Tahtikoneiden loppukoestukset tehdään IEC 60034 -sarjan standardien ja sähkökonetehtaan omien hyväksytyjen testiohjelmien mukaisesti riippuen asiakkaan vaatimuksista. Testiohjelmat voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään:

1. kappalekoestus (rutiinikoestus)
2. lajikoestus
3. erikoiskoestukset.

Jokaiselle valmistuneelle tahtikoneelle suoritetaan aina kappalekoestus, joka sisältyy koneen toimitukseen. Kappalekoestus sisältää sarjan standardin ja sähkökonetehtaan omien vaatimusten mukaisia tarkastuksia ja mittauksia, joilla varmistetaan koneen toimivuus sen käyttökohteessaan.

Lajikoestus suoritetaan yleensä yhdelle saman sarjan valmistuneelle tahtikoneelle tai usealle koneelle asiakkaan vaatimusten perusteella. Lajikoestus sisältää kappalekoestuksen lisäksi useita standardin mukaisia tarkastuksia ja mittauksia, joiden avulla saadaan kattavampaa tietoa testattavan tahtikoneen ominaisuuksista.

Erikoiskoestukset ovat aina asiakkaiden ja/tai luokituslaitosten erikseen määrittelemiä ja vaatimia tarkastuksia ja mittauksia, joita suoritetaan yleensä erityisolosuhteissa ja -sovelluksissa toimiville tahtikoneille. Tällaisia ovat esimerkiksi Ex-luokitellut, räjähdysvaarallisissa olosuhteissa toimivat koneet.

Kappale-, laji- ja erikoiskoestuksien esittely perustuu ABB Oy:n sisäisiin P-ohjeistuksiin, joista ABB Oy:n henkilökunnalla on saatavissa tarkemmat ohjeet mittausten suorittamiseksi. [8.]

4.1 Kappalekoestus

Valmistuneelle tahtikoneelle tehtävä kappalekoestus sisältää sarjan tarkastuksia ja testejä, joiden avulla varmistetaan, että testattava kone vastaa ominaisuuksiltaan ja sähköisiltä arvoiltaan suunniteltuja ja asiakkaalle luvattuja ominaisuuksia sekä arvoja. Näiden testien avulla varmistetaan, että koneen toimivuus on taattu käyttökohteessaan.

4.1.1 Silmämääräinen tarkastus

Tahtikoneen silmämääräisellä tarkastuksella varmistetaan, että testattava kone on asennettu oikein, jolloin varsinainen lopputestaus voidaan aloittaa. Tarkastettavia kohteita ovat, muun muassa

- koneen sarjanumero, joka on leimattu koneeseen
- liitäntäkotelot, lisä- ja apulaitteet sekä tuulettimet tai puhaltimet
- liukulaakerikoneiden laakerit
- mahdollinen syöttövoitelukoneikko on asennettu
- liukurengaskoneiden harjalaitteiden kunto
- lämmönvaihtimen kunto sekä mahdolliset jäähdytysvesien liitännät.

4.1.2 Ilmaväli ja laakerivälilykset

Testattavan tahtikoneen staattorin ja roottorin välinen ilmaväli tarkistetaan, jotta se vastaa koneen suunnitteluarvoja, ja että kokoonpanolinja on sen mitannut ja merkinnyt tarkastuspöytäkirjaan. Koneen laakerivälilyksien arvot tulee myös tarkastaa.

4.1.3 Käämien ja elementtien resistanssimittaus

Resistanssimittausten tarkoituksena on saada selville käämitysten virheelliset kytkennät ja epäsymmetriat sekä lämpötila-antureiden toimivuus. Mittauksessa määritetään myös koneelle kylmävastusarvot sekä käämien lämpötila. Lisäksi tarkastetaan, että muut koneeseen asennetut lisälaitteet toimivat asianmukaisesti.

4.1.4 Eristysresistanssin mittaus (alkutarkastus)

Eristysresistanssin mittauksella selvitetään, että koneen käämitysten, liitäntöjen, harjalaitteiden ja muiden jännitteisten osien eristyksset ovat kunnossa. Mittaukset tehdään ennen ulkopuolisten kaapeleiden liittämistä koneeseen.

4.1.5 Koneen ensipyörytys ja laakereiden tarkastus

Testattavan koneen ensipyörytys suoritetaan nostamalla hitaasti koneen pyörimisnopeutta ja samalla tarkistetaan, ettei koneen pyöriessä kuulu mitään asiaankuulumattomia ääniä laakereista tai muualta koneesta. Tarkastetaan myös, että laakereiden öljynvoitelu toimii asianmukaisesti.

4.1.6 Koneen pyörimissuunta ja vaihejärjestys

Koneen pyörimissuunta ja vaihejärjestys tarkistetaan ennen koneen kuormitustestejä. Pyörimissuunnan tarkistuksella varmistetaan koneen akselin pyörimissuunta, joka on tärkeä tieto vaihejärjestyksen tarkistamista varten. Joidenkin koneiden akselille on myös kiinnitetty tuuletinsiivistö, joka on suunniteltu toimimaan vain akselin pyöriessä oikeaan suuntaan. Vaihejärjestyksen tarkistamisella varmistetaan, että koneen staattorin magneettikenttä pyörii oikeaan suuntaan konetta magnetoitaessa, jolloin staattorikämmitykset ovat oikein asennettu.

4.1.7 Tyhjäkäyntipisteen mittaus

Tyhjäkäyntipisteen mittauksessa tarkistetaan koneen staattorikämmityksen symmetrisyys ja selvitetään testattavan koneen tyhjäkäynnissä tarvitsema magnetointi. Mittauksessa tallennetaan yksi mittapiste koneen nimellisellä staattorijännitteellä ja verrataan mittapisteen magnetoinnin arvoa laskettuun arvoon.

4.1.8 Oikosulkupisteen mittaus

Oikosulkupisteen mittauksessa tarkistetaan testattavan koneen staattorikämmityksen symmetrisyys sekä selvitetään koneen oikosulkutilassa tarvitsema magnetointi.

Mittauksessa mitataan yksi mittapiste koneen nimellisellä staattorivirralla ja verrataan mittapisteen magnetoinnin arvoa laskettuun arvoon.

4.1.9 Ylinopeuskoe

Ylinopeuskokeen tarkoituksena on varmistaa, että testattava kone sekä laakerit mekaanisesti kestävät hetkellisen pyörimisnopeuden kasvamisen. Ylinopeuskoe suoritetaan koneen ollessa magnetoimattomana. Yleensä ylinopeuskoe suoritetaan nopeudella 1,2 kertaa koneen nimellisyörimisnopeus.

4.1.10 Tärinätason mittaus

Tärinätason mittauksella selvitetään, ettei testattavan koneen roottorissa esiinny liian suuria värähtelyvoimia akselin pyöriessä. Näitä voimia syntyy roottorin epätasapainoisuuden, staattorin ja roottorin välisten magneettisten voimien sekä käämitysten epäsymmetrioiden ja vaurioiden johdosta. Roottorin värähtelyt aiheuttavat myös värähtelyitä laakeripukissa, -pesässä tai -kilvessä, joten tärinätason määrittämiseksi mittaukset suoritetaan laakeripesien pinnalta kolmesta eri suunnasta.

Testattavaa konetta pyöritetään suurimman toimintapisteen nimellisyörimisnopeudella, ja magnetoidaan konetta tyhjäkäynnissä nimellistä staattorijännitettä vastaavalla magnetoinnilla. Tällöin mittauksiin saadaan mukaan myös sähkömagneettisen kentän aiheuttamat värähtelyt.

4.1.11 Eristyskoe

Eristyskokeen avulla tarkastetaan, ettei testattavan koneen tai sen apulaitteiden eristyksissä ole heikkoja kohtia. Eristyskoe suoritetaan käyttämällä 50 Hz:n vaihtojännitettä, ja yhden minuutin testausaikaa.

4.1.12 Eristysresistanssin mittaus (jälkitarkastus)

Eristysresistanssimittauksessa on tarkoituksena varmistaa, että testattavan koneen käämitysten, liitäntöjen, harjalaitteiden ja muiden jännitteisten osien eristykset ovat

edelleen kunnossa, kun kaikki muut testit ovat suoritettu. (Tarkastuksen suorituksesta, ks. 4.1.3.)

4.2 Lajikoestus

Lajikoestus sisältää kappalekoestuksen tarkastusten ja mittausten lisäksi erilaisia tarkastuksia ja testejä, joiden avulla saadaan kattavampaa tietoa testattavan tahtimoottorin ominaisuuksista ja toimivuudesta käyttökohteessaan.

4.2.1 $\cos\varphi=0$ -mittaus

$\cos\varphi=0$ -mittauksen avulla selvitetään testattavan tahtikoneen nimellisen roottorivirran arvo, jota käytetään koneen magnetointihäviöiden laskennassa. Mittaus suoritetaan ajamalla testattavaa tahtikonetta ylimagnetoituna moottorina nimellisillä staattorijännitteiden ja -virran arvoilla. Nimellispisteen roottorivirta määritetään $\cos\varphi=0$ -mittauksen avulla saadun Potier-reaktanssin sekä tyhjäkäynti- ja oikosulkumittauksen avulla.

4.2.2 Tyhjäkäyntikäyrä

Tyhjäkäyntikäyrän mittauksessa tarkistetaan koneen staattorikämmityksen symmetrisyys ja selvitetään testattavan koneen tyhjäkäynnissä tarvitsema magnetointi. Lisäksi mittauksesta saadaan koneen ilmajälsuora, joka kuvaa kyllästymättömän koneen ominaisuuksia. Mittauksessa tallennetaan mittapisteitä staattorijännitteiden arvoilla 0...135 %, jolloin saadaan piirrettyä tyhjäkäyntikäyrä. Yhden mittapisteistä tulee olla staattorin nimellisjännitteellä, jonka magnetoinnin arvoa verrataan laskettuun arvoon.

4.2.3 Oikosulkukäyrä

Oikosulkukäyrän mittauksessa tarkistetaan testattavan koneen staattorikämmityksen symmetrisyys sekä selvitetään koneen oikosulkutilassa tarvitsema magnetointi. Oikosulkukäyrän sekä tyhjäkäyntikäyrän perusteella saadaan määritettyä koneen tahtireaktanssi sekä oikosulkuvakio, jotka kuvaavat koneen eri ominaisuuksia. Mittauksessa tallennetaan mittapisteitä staattorivirran arvoilla 0...150 %, jolloin saadaan piirrettyä

oikosulkukäyrä. Yhden mittapisteistä tulee olla staattorin nimellisvirralla, jonka magnetoinnin arvoa verrataan laskettuun arvoon.

4.2.4 Lämpenemiskoe

Lämpenemiskokeella selvitetään testattavan tahtikoneen käämitysten, laakereiden sekä muiden osien lämpeneminen, kun konetta kuormitetaan nimellisarvolla. Lämpenemiskoe suoritetaan yleensä ajamalla testattavaa konetta ylimagnetoituna moottorina koneen nimellisvirralla, joka standardin mukaan on riittävän lähellä koneen todellista toimintalämpenemää. Lämpenemiskoe voidaan vaihtoehtoisesti suorittaa myös superpositiomenetelmällä, joka sisältää lämpenemäkokeet tyhjäkäynnissä staattorin nimellisjännitteellä, oikosulussa staattorin nimellisvirralla sekä magnetoimattomalla koneella.

4.2.5 Häviömittaukset

Häviömittausten perusteella saadaan selville, kuinka paljon häviöitä syntyy käytettäessä testattavaa konetta eri kuormituksilla. Häviöiden perusteella saadaan myös määritettyä koneelle hyötysuhteet eri kuormitusten arvoille. Häviömittaukset sisältyvät tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrän mittauksiin, joiden tuloksista saadaan häviöiden laskemiseen tarvittavat tiedot. Häviöiden laskemiseksi on myös mitattava roottorivirran arvo.

4.2.6 Hitausmomentti

Testattavan koneen hitausmomentti antaa tietoa koneen käyttäytymisestä voima- tai työkoneseen kytkettynä. Mittaus suoritetaan konetta magnetoimatta ja mittaukset tehdään yleensä mahdollisen lämpenemäkokeen sekä oikosulkukäyrämittauksen jälkeen, jotta testattava kone on lämmin ja lämpötilat tasaantuneet, jolloin myös mekaaniset häviöt ovat mahdollisimman tasaiset.

4.3 Erikoiskoestukset

Erikoiskoestukset ovat asiakkaan ja/tai luokituslaitoksen vaatimuksesta tehtäviä tarkastuksia ja mittauksia, joiden avulla saadaan lisätietoa testattavan tahtimoottorin ominaisuuksista ja toiminnasta käyttökohteessaan. Tällaisia tarkastuskohteita ovat esimerkiksi

moottorin melutason mittaukset, akselijännitteen mittaus, käynnistysvirran mittaus ja koneen kaasuhuhtelulaitteiston toiminnan tarkistus.

5 Tahtikoneiden lopputestausmenetelmät

Suurille tahtikoneille on IEC 60034-2-1 sekä IEC 60034-2-2 -standardeissa määritelty häviöiden määrittämiseen kolme eri testausmenetelmää. Näitä testausmenetelmiä voidaan käyttää testattavan koneen kuormitusarvojen tai fyysisen koon vuoksi, jolloin muiden testausmenetelmien käyttö ei olisi taloudellista. Nämä kolme testausmenetelmää ovat

1. Calibrated-machine test
2. Retardation method
3. Calorimetric method.

Nämä kolme testausmenetelmää soveltuvat hyvin suurten tahtikoneiden häviöiden määrittämiseen, sillä menetelmien avulla määritetyt tulokset ovat tarkkoja ja luotettavia. Vaikka kalorimetrinen menetelmä onkin tarkka testausmenetelmä, se on vaikeasti järjestettävissä, joten näistä kolmesta testausmenetelmästä yleisimpinä käytetään kahta ensimmäistä. Tässä työssä keskitytään myös kahteen ensimmäiseen testausmenetelmään, joista *Calibrated-machine test* -menetelmä on käytössä esimerkiksi ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaalla ja *Retardation* -menetelmä ABB:n Ruotsin Västeråsin sähkökonetehtaalla. [4, s. 67 - 75; 5, s. 9 - 25.]

5.1 *Calibrated-machine test* -menetelmä

Calibrated-machine test -menetelmä on IEC 60034-2-1 -standardin liitteessä D [4, s. 67] sekä IEC 60034-2-2 -standardissa [5, s. 10 - 12] määritelty tahtikoneiden lopputestausmenetelmä, joka perustuu erillisen kalibroidun sähkökoneen käyttöön testattavana olevan tahtikoneen häviöiden määrittämiseksi. ABB:n Helsingin sähkökonetehtaalla käytetään kalibroituina koneina tasasähkömoottoreita, joiden tehonlähteenä käytetään tasasuuntaussiltoja ja joiden häviötehot on testattavan tahtikoneen häviölaskentaa varten mahdollisimman tarkasti ennalta määritetty asianmukaisten menetelmien avulla.

Käytettävissä olevia tasasähkömoottoreita on useita erilaisia, joiden tekniset ominaisuudet eroavat moottorin tehon, nopeusalueen, magnetoinnin tarpeen ja fyysisen koon perusteella. Näistä tasavirtamoottoreista valitaan testattavan koneen lopputestaustarpeisiin sopivin moottori.

Menetelmä perustuu siihen, että kalibroitu moottori kytketään mekaanisesti testattavan tahtikoneen akseliin, jolloin kalibroidun tasavirtamoottorin akselitehon ja ennalta määritettyjen häviötehojen perusteella voidaan suoraan laskea testattavan koneen häviöt eri kuormitusmenetelmillä. Kuormitusmenetelmiä on kolme:

1. testattava tahtikone magnetoimattomana
2. tahtikone magnetoituna tyhjäkäynnissä
3. tahtikone magnetoituna oikosulussa.

Näiden kuormitusmenetelmien ja niissä vaadittujen mittauksien perusteella saadaan jaettua tehohäviöt eri kategorioihin ja laskettua testattavalle koneelle kokonaishäviöt. Häviöitä laskettaessa on otettava huomioon sekä kalibroidun koneen hitausmomentin, että kalibroidun koneen mekaanisten häviöiden vaikutukset tuloksiin. [4, s. 67.]

5.2 *Retardation*-menetelmä

Retardation-menetelmä on IEC 60034-2-1 -standardin liitteessä D [4, s. 68 - 75] määritelty ja IEC 60034-2-2 -standardissa [5, s. 12 - 17] täydennetty menetelmä, jota käytetään pyörivien sähkökoneiden häviöiden ja niiden kautta hyötysuhteen määrittämiseen koneen lopputestauksessa. Menetelmä soveltuu parhaiten suurten tahtikoneiden häviöiden määrittämiseksi, sillä näillä koneilla on huomattavan suuri hitausmomentti, joka tekee mittauksista helpompia ja tuloksista tarkempia. Menetelmää voidaan soveltaa myös suurten tasavirta- ja induktiokoneiden häviöiden määrittämiseen.

Menetelmä perustuu testattavan tahtikoneen häviöiden vaikutukseen koneen hidastuvuudessa, sillä koneessa esiintyvät mekaaniset sekä sähköiset häviötehot vastustavat koneen pyörimisliikettä. Mitä enemmän häviöitä esiintyy, sitä suurempi energia vastustaa koneen pyörimisliikettä, ja sitä nopeammin kone hidastuu, jos koneen pyörimisliikkeen ylläpitämiseen ei käytetä ulkoista energiaa.

Häviöiden suuruus ja koneen hidastuvuus riippuvat koneen kuormitusmenetelmästä, joten eri kuormitusmenetelmien avulla saadaan määritettyä testattavalle tahtikoneelle sen kokonaishäviöt P_{tot} . Nämä kolme kuormitusmenetelmää ovat

1. testattava tahtikone magnetoimattomana
2. tahtikone magnetoituna tyhjäkäynnissä
3. tahtikone magnetoituna staattorikämit oikosuljettuna.

Näiden kuormitusmenetelmien ja niissä vaadittujen mittausten avulla saadaan laskettua testattavalle tahtikoneelle kokonaishäviöt ja eriteltyä häviöt seuraavasti:

- mekaaniset häviöt
- rautahäviöt
- kuormitushäviöt
- magnetoimishäviöt.

Mekaaniset häviöt P_{fw}

Mekaanisilla häviöillä tarkoitetaan niitä pyörivissä sähkökoneissa esiintyviä tehohäviöitä, jotka syntyvät sähkökoneen pyörimisliikkeen aiheuttamista hankauksista laakereissa ja harjalaitteissa, pyörimisliikkeestä johtuvan il-mavirran vastuksen aiheuttamista häviöistä sekä tuuletushäviöistä, jos koneen akselilla on oma tuuletin.

Rautahäviöt P_{fe}

Tyhjäkäynti- eli rautahäviöillä tarkoitetaan niitä pyörivissä sähkökoneissa esiintyviä tehohäviöitä, jotka syntyvät staattoriraudassa magneettivuon vaikutuksesta. Tyhjäkäyntihäviöt ovat sähkökoneen jännitteestä riippuvaisia häviöitä.

Kuormitushäviöt P_k

Kuormitus- eli virtalämpöhäviöillä tarkoitetaan niitä pyörivissä sähkökoneissa esiintyviä tehohäviöitä, jotka aiheutuvat sähkökoneen staattorin kuparikämeissä virran vaikutuksesta.

Magnetoimishäviöt P_m

Magnetoimishäviöillä tarkoitetaan niitä pyörivissä sähkökoneissa esiintyviä tehohäviöitä, jotka aiheutuvat sähkökoneen roottorikäänissä magnetoimisvirran seurauksena. Magnetoimishäviöihin kuuluvat myös harjallisissa sähkökoneissa esiintyvät harjahäviöt. [9.]

Retardation-menetelmän testit ja mittaukset voidaan suorittaa eri menetelmillä riippuen siitä, tunnetaanko testattavan tahtikoneen hitausmomentin arvo. Jos hitausmomentin arvo tunnetaan joko laskennallisesti tai erillisten mittausten avulla, voidaan mittaukset suorittaa suoraan IEC 60034-2-1- ja IEC 60034-2-2 -standardin ohjeiden mukaisesti.

Jos hitausmomentin arvo on tuntematon, voidaan testit ja mittaukset suorittaa kahdella eri menetelmällä IEC 60034-2-1- ja IEC 60034-2-2 -standardien ohjeiden mukaisesti. Suoritusmenetelmä valitaan sen perusteella, voidaanko testattavaa tahtikonetta ajaa tyhjäkäyväna moottorina oikeilla jännitteen ja taajuuden arvoilla ja onko tehon mittaukseen käytettävissä tarkkaa ja luotettavaa mittausmenetelmää. Jos testattavaa konetta ei ole mahdollista ajaa tyhjäkäyväna moottorina, mittaukset suoritetaan kuten tunnetun hitausmomentin mittauksissa, ja sen lisäksi suoritetaan standardissa määriteltyjä lisämittauksia häviöiden määrittämiseksi.

Jos testattavaa tahtikonetta voidaan ajaa tyhjäkäyväna moottorina ja luotettava tehonmittausmenetelmä on saatavilla, testit ja mittaukset voidaan suorittaa kalibrointimittauksen avulla, joka on IEC 60034-2-1- ja IEC 60034-2-2 -standardeissa määritelty mittaus testattavan koneen häviöiden määrittämiseksi. Kalibrointimittauksen onnistumiseksi tarvitaan tarkkaa ja luotettavaa tehonmittausmenetelmää. Kalibrointimittaus on esimerkiksi ABB Oy:n Ruotsin Västeråsin sähkökonetehtaan sähkökoneiden koestamossa käytössä oleva mittausmenetelmä häviöiden määrittämiseksi. Tässä työssä perehdytään kalibrointimittauksen käyttöön *Retardation*-menetelmän testeissä ja mittauksissa, kun koneen hitausmomentti on tuntematon. [4, s. 70 - 72; 5, s. 13, 15 - 16; 10; 11.]

5.2.1 *Retardation*-menetelmän testivalmistelut

Retardation-menetelmässä testattava tahtikone asennetaan testikentälle sen normaalin käytön mukaisesti. Tahtikoneen akseliin tulee välttää sellaisten osien ja laitteiden asentamista, joilla on merkittävää vaikutusta testattavan koneen hitausmomenttiin ja sitä kautta hidastuvuuteen ja mekaanisiin häviöihin. Jos kuitenkin on tarpeellista käyttää tällaisia osia tai laitteita, niiden vaikutukset testattavan koneen hidastuvuuteen ja mekaanisiin häviöihin on huomioitava laskennallisesti tai testien avulla.

Retardation-menetelmän testeissä testattavaa tahtikonetta ajetaan moottorina käyttäen erillistä säädettävää tehonlähdettä, kuten tahtigeneraattoria, jonka teho sekä taajuusalue ovat testattavan koneen suoritusarvoihin sopivia. Kun testattavan tahtikone on harjallinen, tulee koneen magnetointi ottaa erillisestä tehonlähteestä, jonka jännitteensäätö on nopea ja tarkka. Kun testattava kone on harjaton, jolloin koneen akselille on fyysisesti asennettu magnetointikone, on käytettävä myös nopeaa ja tarkkaa tehonsyöttöä magnetoimiseen. Magnetoimishäviöitä laskettaessa tulee ottaa huomioon, onko testattava kone ollut harjaton vai harjallinen, sillä molemmilla menetelmillä magnetoimishäviöt lasketaan eri tavalla.

Ennen varsinaisten testien suorittamista valitaan mittauksissa käytettävä δ -arvo, joka on pyörimisnopeuden poikkeama yksikköä kohden testattavan koneen nimellispyörimisnopeudesta [5, s. 13]. δ -arvon avulla määritetään mittauksiin se pyörimisnopeuden muutosväli, josta koneen hidastumisaika luetaan. δ -arvoksi on suositettavaa valita arvo, joka on alle $0,1:n$, sillä suuremman arvon valitseminen aiheuttaa yleensä turhan pitkän hidastumisajan mittauksissa. Jokainen testattava tahtikone on yksilöllinen, joten δ -arvon valinnassa on suositeltavaa lähteä arvosta $0,05$ ja tarpeen mukaan pienennettävä tai kasvatettava arvoa.

Eryteisesti huomioon otettavia tekijöitä δ -arvon valitsemisessa ovat

- testattavan tahtikoneen roottorin massa ja hitausmomentti
- tahtikoneen akselin laakerointi ja laakereiden voitelu
- tahtikoneen magnetointi
- tahtikoneen nimellinen staattorivirta oikosulussa.

Testattavan tahtikoneen roottorin suuri massa, hyvä laakerointi sekä mahdollinen laakereiden nostovoitelu kasvattavat koneen hidastumisaikaa kaikilla kuormitusmenetelmillä, mutta varsinkin koneen ollessa magnetoimattomana. Tahtikoneen kuormittaminen magnetoimalla taas lyhentää hidastumisaikaa huomattavasti. Varsinkin oikosulkumittauksessa jossa kuormitus on suuri, tulee ottaa huomioon koneen nopea hidastuminen. Oikosulkumittauksessa hidastumisaika voi olla jopa 80 % pienempi kuin hidastuvuusmittauksessa, jossa testattava kone on magnetoimattomana.

Testattavan tahtikoneen magnetoimisessa on käytettävä mahdollisimman nopeaa, mutta silti tarkkaa ja vakaata säätöä mittausten onnistumiseksi. Varsinkin oikosulkumittauksessa tarvitaan erittäin nopeaa magnetoinnin katkaisemista ja takaisin kytkemistä hidastumisajan ollessa pieni.

Retardation-menetelmän testit tulee suorittaa mahdollisuuksien mukaan sarjassa ilman keskeytyksiä mekaanisten häviöiden muuttumattomuuden säilyttämiseksi. Testit on suositeltavaa suorittaa vähintään kahdesti keskiarvojen saamiseksi ja sitä kautta tulosten luotettavuuden ja tarkkuuden maksimoimiseksi. Ennen varsinaisten testien suorittamista tulee testattavaa tahtikonetta ajaa nimellisellä jännitteellä ja taajuudella koneen laakerilämpötilojen tasaantumiseksi, jolloin myös tahtikoneen mekaaniset häviöt ovat mahdollisimman vakaat testien aikana. Jos mahdollista, häviömittaukset tulisi suorittaa heti lämpenemäkokeen jälkeen, jolloin testattavan koneen lämpötilat ovat tasaantuneet ja häviöt vastaisivat lämpötilan puolesta tahtikoneen häviöitä käyttötilanteessa. [4, s. 68 - 75; 5, s. 12 - 17.]

5.2.2 Testien suorittaminen tunnetulla hitausmomentilla

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomentti tunnetaan, ja se on määritetty joko aikaisempien mittausten avulla tai laskennallisesti, voidaan *Retardation*-menetelmän testit suorittaa suoraan IEC 60034-2-1- ja IEC 60034-2-2 -standardin ohjeiden mukaisesti. Testien ja mittausten perusteella saadaan määritettyä testattavalle tahtikoneelle hidastumisvakion arvo, jota käytetään avuksi koneen häviöitä laskettaessa.

Testeihin kuuluu kolme mittausta, joiden avulla määritetään testattavan tahtikoneen häviöt:

1. testattava tahtikone magnetoimattomana
2. tahtikone magnetoituna tyhjäkäynnissä, staattorin jännite $U_1=U_{1N}$
3. tahtikone magnetoituna oikosulussa, staattorin virta $I_1=I_{1N}$.

Testit on suositeltavaa aloittaa ensimmäisestä mittauksesta, jolloin testattava tahtikone on magnetoimattomana ja määritetään koneen mekaaniset häviöt. Jälkimmäisten mitausten suorittamisjärjestyksellä ei ole tulosten kannalta oleellista merkitystä.

Ensimmäisessä magnetoimattoman koneen mittauksessa testattavaa tahtikonetta ajetaan tyhjäkäynnissä sen pyöriessään tahtinopeudella n_N tahdistettuna syöttävään generaattoriin. Generaattorin taajuutta säätämällä nostetaan tahtikoneen pyörimisnopeus yli nopeuden $n_N(1+\delta)$. Pyörimisnopeuden tulee olla noin 10 % yli nopeuden $n_N(1+\delta)$, jotta katkaisijan avaamisesta johtuvat sähkömagneettiset transientti-ilmiöt ehtivät vaimentua.

Tahtikoneen syöttökatkaisija avataan generaattorilta ja aloitetaan mittaukset. Kun tahtikone on magnetoimattomana, tallennetaan hidastumiseen kuluva aika t_{fw} , kun koneen pyörimisnopeus laskee nopeudesta $n_N(1+\delta)$ nopeuteen $n_N(1-\delta)$. Nopeuden mittaamiseksi on käytettävä tarkkaa mittaussuunnitelmaa.

Ennen magnetoidun tyhjäkäynnin koneen mittausta, on selvitettävä tyhjäkäyntipisteen mittauksella testattavan tahtikoneen nimellistä tyhjäkäyntipistettä vastaava magnetoinnin arvo. Kun magnetoinnin arvo on selvitetty, testattavaa tahtikonetta ajetaan tyhjäkäynnissä kyseisellä magnetoinnilla sen pyöriessään tahtinopeudella n_N tahdistettuna syöttävään generaattoriin. Muuttamatta testattavan koneen magnetointia, generaattorin taajuutta säätämällä nostetaan tahtikoneen pyörimisnopeus yli nopeuden $n_N(1+\delta)$. Pyörimisnopeuden tulee olla noin 10 % yli nopeuden $n_N(1+\delta)$, jotta katkaisijan avaamisesta johtuvat sähkömagneettiset transientti-ilmiöt ehtivät vaimentua.

Tahtikoneen syöttökatkaisija avataan generaattorilta ja aloitetaan mittaukset. Kun tahtikone on magnetoituna tyhjäkäynnissä, tallennetaan hidastumiseen kuluva aika t_{fe} , kun koneen pyörimisnopeus laskee nopeudesta $n_N(1+\delta)$ nopeuteen $n_N(1-\delta)$. Nopeuden

mittaamiseksi on käytettävä tarkkaa mittaussuomenetelmää. Tallennetaan myös staattorin lämpötila, tahtikoneen staattorin pääjännitteen arvo sekä magnetointivirran arvo, kun pyörimisnopeus ohittaa nimellinopeuden n_N . Nimellispisteessä tallennettu mittapiste saa poiketa enintään $\pm 2\%$ koneen nimellinpyörimisnopeudesta.

Tyhjäkäyntikäyrän saamiseksi, mittaukset suoritetaan usealla eri staattorijännitteen arvolla. Staattorijännitteen arvot valitaan tarpeiden mukaan, mutta yleensä käytetään arvoja 0...135 % staattorin nimellinjännitteestä.

Ennen magnetoidun oikosuljetun koneen mittausta, on selvitettävä oikosulkupisteen mittauksella testattavan tahtikoneen nimellistä oikosulkupistettä vastaava magnetoinnin arvo. Kun magnetoinnin arvo on selvitetty, testattavaa tahtikonetta ajetaan tyhjäkäynnissä kyseisellä magnetoinnilla sen pyöriessään tahtinopeudella n_N tahdistettuna syöttävään generaattoriin. Tällöin testattavan tahtikoneen staattorin jännite on nimellisarvoaan suurempi, sillä nimellisen oikosulkupisteen magnetointivirta on suurempi kuin nimellisen tyhjäkäyntipisteen magnetointivirta. Muuttamatta testattavan koneen magnetointia, generaattorin taajuutta säätämällä nostetaan tahtikoneen pyörimisnopeus yli nopeuden $n_N(1+\delta)$. Pyörimisnopeuden tulee olla noin 10 % yli nopeuden $n_N(1+\delta)$, jotta katkaisijan avaamisesta johtuvat sähkömagneettiset transientti-ilmiöt ehtivät vaimentua ja on riittävästi aikaa koneen staattorikämmien oikosulkemiseksi.

Tahtikoneen syöttökatkaisija avataan generaattorilta, katkaistaan koneen magnetointi säätämättä sitä, oikosuljetaan staattorikämmet, kytketään magnetointi takaisin ja aloitetaan mittaukset. Kun tahtikone on magnetoituna oikosulussa, tallennetaan hidastumiseen kuluva aika t_{kr} , kun koneen pyörimisnopeus laskee nopeudesta $n_N(1+\delta)$ nopeuteen $n_N(1-\delta)$. Nopeuden mittaamiseksi on käytettävä tarkkaa mittaussuomenetelmää. Tallennetaan myös staattorin lämpötila, tahtikoneen staattorin virran arvo sekä magnetointivirran arvo, kun pyörimisnopeus ohittaa nimellinopeuden n_N . Nimellispisteessä tallennettu mittapiste saa poiketa enintään $\pm 2\%$ koneen nimellinpyörimisnopeudesta.

Vaihtoehtoisesti voidaan oikosulkumittaus suorittaa myös nostamatta testattavan tahtikoneen jännitettä nimellisarvonsa yli. Tällöin testattavaa tahtikonetta ajetaan tyhjäkäynnissä esimerkiksi nimellinjännitteellä ja nostetaan tyhjäkäynnin tahtikoneen pyörimisnopeus yli nopeuden $n_N(1+\delta)$ ja avataan syöttökatkaisija. Katkaisijan avaamisen

jälkeen oikosuljetaan staattorikäämit ja vasta silloin haetaan konetta magnetoimalla nimellinen staattorivirran arvo. Tällöin on mahdollista, että koneen pyörimisnopeus on nostettava yli 10 % nopeudesta $n_N(1+\delta)$, jotta ehditään hakea oikea staattorivirran arvo.

Oikosulkukäyrän saamiseksi, mittaukset suoritetaan usealla eri staattorivirran arvolla. Staattorivirran arvot valitaan tarpeiden mukaan, mutta yleensä käytetään arvoja 0...150 % staattorin nimellisvirrasta. [4, s. 68 - 75; 5, s. 13 - 14.]

5.2.3 Testien suorittaminen tuntemattomalla hitausmomentilla

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomenttia ei tunneta, voidaan *Retardation-*menetelmän testit suorittaa suoraan luvussa 5.2 (ks. s. 17) esiteltyjen IEC 60034-2 -sarjan standardeissa määriteltyjen testausmenetelmien avulla. Tässä työssä käytetään kalibrointimittausta testattavan koneen häviöiden määrittämiseksi.

Kalibrointimittaus on IEC 60034-2 -sarjan standardeissa määritelty mittausmenetelmä testattavan tahtikoneen häviöiden määrittämiseksi. Menetelmällä saadaan määritettyä testattavalle tahtikoneelle häviöt testien ja mittausten, sekä hidastumisvakion ja häviöiden laskentaan käytettyjen yhtälöiden avulla. Kalibrointimittaus perustuu testattavan tahtikoneen 3-vaiheisen tehon mittaukseen sekä hidastumisajan määrittämiseen, jolloin tehon mittauksessa on käytettävä tarkkaa ja luotettavaa mittausmenetelmää.

Tässä työssä on lainattu Ruotsin ABB:n Västeråsin koestamon käyttämää, standardien mukaisesta hidastumisvakion yhtälöstä ja häviöiden määrittämiseen käytettävästä yhtälöstä johdettua yhtälöä, jonka perusteella saadaan laskettua suoraan testattavan tahtikoneen häviöt suhteuttamalla testattavan koneen hidastumisaika suoraan mitattuun tehoon. Kalibrointimittauksen yhtälö on johdettu siten, että hidastumisvakion C laskemiseen käytettävä yhtälö

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N \frac{dn}{dt} |_t} = \frac{P_1}{n_N \frac{dn}{dt} |_1} \quad (1)$$

jossa P_1 on kalibrointimittauksessa mitattu teho, n_N on testattavan koneen nimellinen pyörimisnopeus ja $\frac{dn}{dt}$ 1 on koneen hidastuvuus kalibrointimittauksessa, yhdistetään suoraan häviöiden P_t laskemiseen käytettävään yhtälöön

$$P_t = C * n_N \frac{dn}{dt} | t \quad (2)$$

jossa t viittaa käytettyyn kuormitusmenetelmään, jolloin häviötehot saadaan määritettyä suoraan yhtälöllä 3 suhteuttamalla testeissä mitattu teho hidastumisaikoihin:

$$P_t = P_1 \frac{t_1}{t_t} | t \quad (3)$$

Tämän suhteen perusteella saadaan määritettyä testattavan koneen häviöt eri kuormitusmenetelmillä. Kalibrointimittauksen ja laskettujen mekaanisten häviöiden avulla saadaan määritettyä myös koneelle hitausmomentin arvo. Testeihin kuuluu neljä mittausta eri kuormitusmenetelmillä:

1. kalibrointimittaus
2. testattava tahtikone magnetoimattomana
3. tahtikone magnetoituna tyhjäkäynnissä, staattorin jännite $U_1=U_{1N}$
4. tahtikone magnetoituna oikosulussa, staattorin virta $I_1=I_{1N}$.

Kalibrointimittauksessa testattavaa tahtikonetta ajetaan kuormittamattomana moottorina nimellisellä staattorijännitteellä ja taajuudella siten, että magnetoinnin avulla säädetään tehokertoimen $\cos\phi$ arvoksi 1. Toisin sanoen haetaan magnetointia säätämällä se piste, jolloin staattorivirta on pienimmillään, kun staattorin jännite on nimellisarvoon. Tallennetaan tarkkaa mittalaitetta käyttäen testattavan tahtikoneen syöttävältä generaattorilta ottama teho P_1 joka suuruudeltaan vastaa tyhjäkäyntihäviöiden ja mekaanisten häviöiden summaa. Pienen staattorivirran aiheuttamat kuormitushäviöt jätetään huomioimatta.

Muuttamatta testattavan koneen magnetointia, generaattorin taajuutta säätämällä nostetaan tahtikoneen pyörimisnopeus yli nopeuden $n_N(1+\delta)$. Pyörimisnopeuden tulee olla

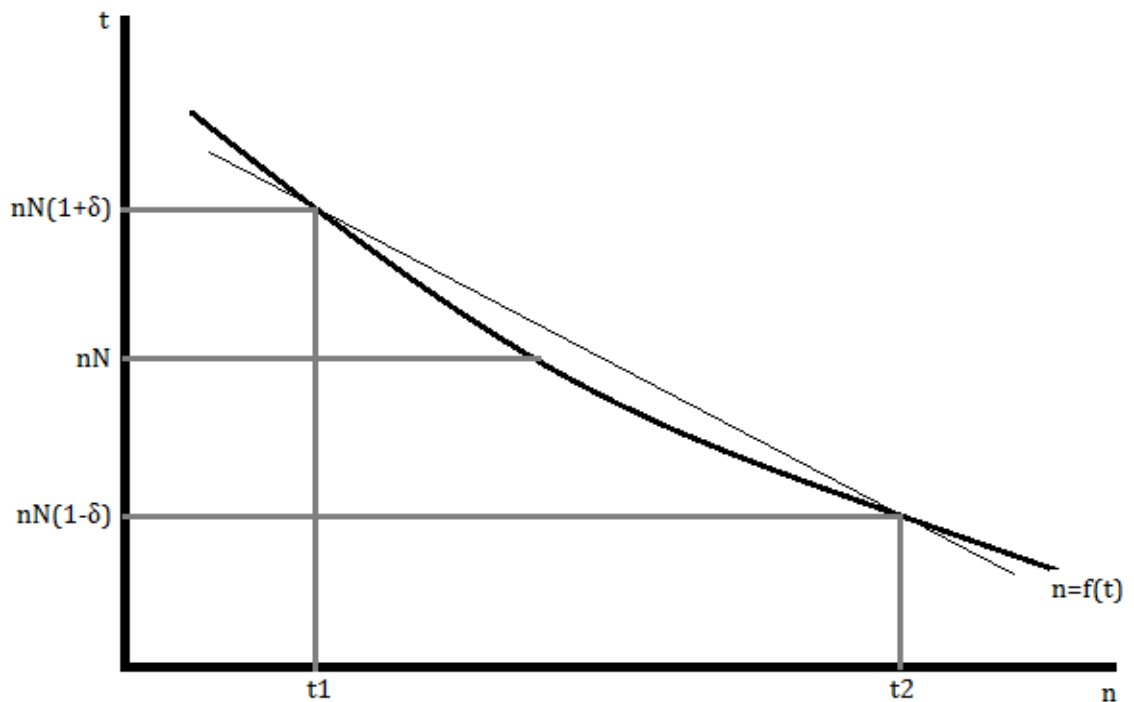
noin 10 % yli nopeuden $n_N(1+\delta)$, jotta katkaisijan avaamisesta johtuvat sähkömagneettiset transientti-ilmiöt ehtivät vaimentua.

Avataan tahtikoneen syöttökatkaisija generaattorilta ja aloitetaan mittaukset. Kun tahtikone on magnetoituna tyhjäkäynnissä, tallennetaan hidastumiseen kuluva aika t_1 , kun koneen pyörimisnopeus laskee nopeudesta $n_N(1+\delta)$ nopeuteen $n_N(1-\delta)$. Nopeuden mittaamiseksi on käytettävä tarkkaa mittaussuunnitelmaa. Tallennetaan myös staattorin lämpötila, tahtikoneen staattorin pääjännitteen arvo sekä magnetointivirran arvo, kun pyörimisnopeus ohittaa nimellisnopeuden n_N . Nimellispisteessä tallennettu mittapiste saa poiketa enintään ± 2 % koneen nimellispyörimisnopeudesta.

Toinen mittaus, jossa testattava tahtikone on magnetoimattomana, suoritetaan kuten luvun 5.2.2 vastaava mittaus (ks. s. 20). Kolmas mittaus, jossa testattava tahtikone on magnetoituna tyhjäkäynnissä, suoritetaan kuten luvun 5.2.2 vastaava tyhjäkäyntimittaus (ks. s. 20 - 21). Neljäs mittaus, jossa testattava tahtikone on magnetoituna oikosulussa, suoritetaan kuten luvun 5.2.2 vastaava oikosulkumittaus (ks. s. 21). [4, s. 68 - 75; 5, s. 15 - 16; 10; 11.]

5.2.4 Hidastuvuuden ja hidastumisvakion määrittäminen

Mittausten aikana testattavan tahtikoneen todellinen pyörimisnopeuden muutos ei ole täysin lineaarista, mutta kuvion 2 ja yhtälön 4 perusteella voidaan kuitenkin todeta muutoksen olevan niin lähellä lineaarista, että testattavan koneen hidastuvuus nimellispyörimisnopeudessa n_N voidaan määrittää suoraan valitun δ -arvon perusteella määntyvän pyörimisnopeuden muutoksen dn ja sitä vastaavan hidastumisajan dt perusteella (ks. seur. s.):



Kuvio 2. Tahtikoneen hidastuvuuden määrittäminen

$$\frac{n_N 2\delta}{t_2 - t_1} \approx - \frac{dn}{dt} \Big|_{n = n_N} \quad (4)$$

$2\delta n_N$ on tahtikoneen pyörimisnopeuden todellinen muutos aikavälillä $t_1 - t_2$

t_1 on aika, jolloin tahtikoneen nopeus ohittaa pisteen $n_N(1+\delta)$

t_2 on aika, jolloin tahtikoneen nopeus ohittaa pisteen $n_N(1-\delta)$

dn/dt on tahtikoneen hidastuvuus lineaarisena

Koska testattavan tahtikoneen hidastuvuus nimellipyörimisnopeudessa todetaan olevan riittävän lähellä lineaarista, voidaan koneen hidastuvuus tallentaa mittauksissa suoraan muodossa:

$$\frac{dn}{dt} \Big|_t$$

missä t on lukujen 5.2.2 (ks. s. 19 - 21) ja 5.2.3 (ks. s. 21 - 24) testejä vastaava numero, jotta hidastuvuudet erotettaisiin toisistaan. Esimerkiksi tunnetun hitausmomentin tyhjäkäyntimittauksessa t saisi arvon 2, koska tyhjäkäyntimittaus suoritetaan toisena mittauksena.

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomentti tunnetaan ja *Retardation*-menetelmän testit suoritetaan luvun 5.2.2 mukaisesti, on häviöiden laskemiseksi määritettävä hidastumisvakio C , johon jokaisen mittauksen hidastumisaika suhteutetaan. Hidastumisvakio lasketaan yhtälöllä

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2} \approx 10,97 * 10^{-3} J \quad (5)$$

jossa J on testattavan tahtikoneen hitausmomentti yksikkönä kgm^2 .

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomentti on tuntematon ja *Retardation*-menetelmän testit suoritetaan luvun 5.2.3 kalibrointimittauksen mukaisesti, on häviöiden laskemiseksi määritettävä hidastumisvakio C , johon jokaisen mittauksen hidastumisaika suhteutetaan. Hidastumisvakio lasketaan luvussa 5.2.3 aikaisemmin esitellyllä yhtälöllä 1:

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N \frac{dn}{dt} |_2} = \frac{P_1}{n_N \frac{dn}{dt} |_1} \quad (1)$$

P_1 on kalibrointimittauksessa mitattu teho

n_N on testattavan koneen nimellinen pyörimisnopeus

$\frac{dn}{dt} |_1$ on koneen hidastuvuus kalibrointimittauksessa. [4, s. 68 - 71; 5, s. 14 - 16.]

5.2.5 Häviöiden laskeminen tunnetulla hitausmomentilla

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomentti tunnetaan ja käytetään suoraan standardissa määriteltyä mittausmenetelmää (mittausten suorittamisesta, ks. 5.2.2), lasketaan koneen mekaaniset häviöt, rautahäviöt sekä kuormitushäviöt mitattujen hidastumisaikojen ja lasketun hidastumisvakion perusteella käyttäen luvussa 5.2.3 aikaisemmin esiteltyä yhtälöä 2 [4, s. 70; 5, s. 16, 17.]:

$$P_t = C * n_N \frac{dn}{dt} |_t \quad (2)$$

P_t on laskettava häviöteho

C on hidastumisvakio laskettuna kohdan 5.2.4 mukaisesti

n_N on testattavan tahtikoneen nimellinen pyörimisnopeus

$\frac{dn}{dt}|_t$ on tahtikoneen hidastuvuus määritettynä kohdan 5.2.4 mukaisesti.

Mekaaniset häviöt P_{fw} lasketaan yhtälöllä 6, luvussa 5.2.4 lasketun hidastumisvakion ja luvussa 5.2.2 määritetyn magnetoimattoman koneen hidastuvuuden arvoilla:

$$P_{fw} = C * n_N \frac{dn}{dt} |1 \quad (6)$$

Rautahäviöt P_{fe} lasketaan yhtälöllä 7, luvussa 5.2.4 lasketun hidastumisvakion ja luvussa 5.2.2 määritetyn magnetoidun tyhjäkäynnissä olevan koneen hidastuvuuden arvoilla ja vähentämällä lopputuloksesta mekaaniset häviöt:

$$P_{fe} = C * n_N \frac{dn}{dt} |2 - P_{fw} \quad (7)$$

Kuormitushäviöt P_k lasketaan kaavalla 8, luvussa 5.2.4 lasketun hidastumisvakion ja luvussa 5.2.2 määritetyn magnetoidun oikosuljetun koneen hidastuvuuden arvoilla ja vähentämällä lopputuloksesta mekaaniset häviöt:

$$P_k = C * n_N \frac{dn}{dt} |3 - P_{fw} \quad (8)$$

Magnetoimishäviöt P_m lasketaan harjalliselle tahtikoneelle yhtälöllä 9:

$$P_m = k * I_{rl}^2 R_r + 2 V * I_{rl} \quad (9)$$

k on resistanssien korjauskerroin

I_{rl} on laskettu tahtikoneen kuormitusta vastaava roottorin virta

R_r on tahtikoneen roottorin resistanssi.

5.2.6 Häviöiden laskeminen tuntemattomalla hitausmomentilla

Kun testattavan tahtikoneen hitausmomentti on tuntematon ja käytetään kalibrintimitausta (mittausten suorittamisesta, ks. 5.2.3), lasketaan koneen mekaaniset häviöt, rautahäviöt sekä kuormitushäviöt mitatuilla kuormituksilla kalibrintimitauksessa esitellyn yhtälön 3 periaatteella [4, s. 70 - 71; 5, s. 16 - 17; 10; 11.]:

$$P_t = P_1 \frac{t_1}{t_t} | t \quad (3)$$

Mekaaniset häviöt P_{fw} lasketaan yhtälöllä 10, luvussa 5.2.3 mitatun kalibrintimitauksen tehon P_1 ja tehoa vastaavan hidastumisajan t_1 , sekä magnetoimattoman koneen hidastumisajan t_{fw} arvoilla:

$$P_{fw} = P_1 \frac{t_1}{t_{fw}} | 2 \quad (10)$$

Tyhjäkäyntihäviöt P_{fe} lasketaan yhtälöllä 11, luvussa 5.2.3 mitatun kalibrintimitauksen tehon P_1 ja tehoa vastaavan hidastumisajan t_1 , sekä magnetoidun tyhjäkäynnissä olevan koneen hidastumisajan t_{fe} arvoilla ja vähentämällä lopputuloksesta mekaaniset häviöt:

$$P_{fe} = P_1 \frac{t_1}{t_{fe}} | 3 - P_{fw} \quad (11)$$

Kuormitushäviöt P_k lasketaan yhtälöllä 12, luvussa 5.2.3 mitatun kalibrintimitauksen tehon P_1 ja tehoa vastaavan hidastumisajan t_1 , sekä magnetoidun oikosuljetun koneen hidastumisajan t_k arvoilla ja vähentämällä lopputuloksesta mekaaniset häviöt:

$$P_k = P_1 \frac{t_1}{t_k} | 4 - P_{fw} \quad (12)$$

Magnetoimishäviöt P_m lasketaan luvussa 5.2.5 esitetyllä yhtälöllä 9 (ks. s. 27), kun testattava kone on harjallinen tahtikone.

Häviölaskujen jälkeen testattavalle tahtikoneelle saadaan laskettua myös hitausmomentin J -arvo laskettujen mekaanisten häviöiden P_{fw} , sekä magnetoimattoman koneen hidastuvuuden perusteella. Hitausmomentti lasketaan yhtälöllä 13 [10; 11]:

$$J = \frac{P_{fw}}{n_N} * \frac{60^2}{4\pi^2} * 10^3 * \frac{1}{dn/t_{fw}} \quad (13)$$

P_{fw} on tahtikoneen lasketut mekaaniset häviöt yksikkönä kW

n_N on tahtikoneen nimellispyörimisnopeus yksikkönä rpm

dn/t_{fw} on tahtikoneen hidastuvuus magnetoimattoman koneen hidastuvuusmittauksessa.

6 Tahtimoottorin testikoestus

Yhtenä insinööriyön osana oli kappalekoestuksen suorittaminen ja häviöiden laskeminen 100 %:n kuormalla yhdelle tahtikoneelle käyttämällä sekä *Calibrated-machine test*-menetelmää että *Retardation*-menetelmää. Testikoestuksen tarkoituksena on selvittää testausmenetelmien hyviä ja huonoja puolia sekä vertailla näiden kahden eri menetelmän avulla saatujen mittaustulosten yhdenmukaisuutta, jonka arvioimiseksi vertaillaan mittausten perusteella laskettuja häviöitä.

Testikoestukset suoritettiin osana tahtikoneen normaalia kappalekoestusta, mutta ajan säästämiseksi häviöiden laskemiseen vaadittavat testit suoritettiin vain tahtikoneen toimiessa 100 %:n kuormituksella. Testikoestukseen valittiin tahtikone, jolle koestuskataulun perusteella oli mahdollista tehdä ylimääräisiä koestuksia. Tahtikoneen haluttiin myös olevan harjallisesti magnetoitava, jolloin magnetoimishäviöiden laskeminen on helpompaa, ja sitä kautta myös tulosten vertailu on helpompaa.

6.1 Testattavan tahtikoneen esittely

Testattavana tahtikoneena oli akselikorkeudeltaan 1 600 mm harjallinen tahtimoottori. Moottori on suunniteltu ja rakennettu käytettäväksi pystymallisena, jolloin moottorin akseli on asennettu erillisten tukilaakereiden varaan. Roottori on 16-napainen, jolloin

tahtimoottorin pyörimisnopeus n on 375 rpm, kun moottorin syöttöjännitteen taajuus f on 50 Hz. Testattavan tahtimoottorin akseliteho nimelliskuormituksella on 13,75 MW, jolloin pääjännite staattorin käämeissä on 11 000 V ja virta 771 A.

Tämän työn ja mittauksien kannalta oleelliset, testattavalle tahtimoottorille lasketut suoritusarvot ja ominaisuudet nähdään taulukosta 1:

Taulukko 1. Testattavan tahtimoottorin suoritusarvot

P_N	13 750 kW	f_N	50 Hz
U_{1N}	11 000 V	n_N	375 rpm
I_{1N}	771 A	J_{calc}	13 800 kgm ²
I_{rN}	320 A	$\cos\varphi$	0,95

P_N on moottorin akseliteho nimelliskuormituksella

U_{1N} on staattorin nimellisjännite

I_{1N} on staattorin nimellisvirta

f_N on moottorin nimellistaajuus

n_N on moottorin nimellistaajuutta vastaava pyörimisnopeus

I_{rN} on roottorin nimellisvirta

J_{calc} on roottorin laskettu hitausmomentti

$\cos\varphi$ on moottorin tehokerroin.

6.2 Testikoestuksen koestusjärjestelyt

Tahtimoottorin testauksessa käytettiin tahtikoestamon testisolua SY2A, jota käytetään pystymallisten suurten tahtikoneiden lopputestauksissa *Calibrated-machine test*-menetelmällä. Testisolussa on tällaisia koestuksia varten rakennettu syvennys, johon on asennettu pystyasentoon, tukilaakeroitu ja kalibroitu tasavirtamoottori. Testattava tahtimoottori asennettiin asianmukaisella tavalla sen normaalikäyttöä varten.

Retardation-menetelmän testeissä kalibroitu tasavirtamoottori oli edelleen mekaanisesti kytkettyä testattavaan tahtimoottoriin ajan säästämiseksi ja testien helpottamiseksi.

Tasavirtamoottorin aiheuttamat häviöt on kuitenkin otettu huomioon laskettaessa tahtimoottorin häviöitä.

Koestusta varten varattiin myös testattavan moottorin tehonsyöttöön soveltuva generaattori, jonka avulla suoritettiin kalibroitimittauksen testit. Generaattorin taajuusalueen tuli ylittää noin 60 Hz:iin asti. Tällöin saatiin kalibroitimittauksessa generaattorin avulla nostettua testattavan tahtimoottorin pyörimisnopeus noin 10 % yli nopeuden $n_N(1+\delta)$.

6.3 Testikoestuksessa käytetyt mittalaitteet

Retardation-menetelmän testeihin valittiin parhaiten soveltuvat ja helppokäyttöisimmät mittalaitteet. Laitteiden valinnassa otettiin huomioon mitattavien suureiden vaatimukset mittauksissa sekä mittaustulosten tarkkuusvaatimukset. Mittalaitteiksi valittiin samat laitteet kuin *Calibrated-machine test* -menetelmällä aikaisemmin tehdyssä kappalekoestuksessa, jolloin mittalaitteiden tarkkuudet ovat samat kaikissa testeissä. Mitattavia suureita varsinaisissa *Retardation*-menetelmän testeissä olivat

- testattavan tahtimoottorin pyörimisnopeus n
- tahtimoottorin staattorin pääjännite U_1
- tahtimoottorin staattorin virta I_1
- tahtimoottorin roottorin virta I_r
- tahtimoottorin syöttöverkosta ottama teho P_0
- staattorin lämpötila t_{U_1} .

Tahtimoottorin pyörimisnopeuden mittaamiseen käytettiin optista nopeusanturia, jolla luettiin moottorin nopeus akselille tasaisin välein asetettujen heijastinnauhojen avulla. Nopeusanturin asettelut valittiin siten, että tahtimoottorin pyörimisnopeuden arvoilla 350...450 rpm anturin ulostulo oli vastaavasti 0...1 Vdc. Tahtimoottorin staattorin pääjännite mitattiin tehoanalysaattorilla ja jännitemuuntajan avulla, jonka muuntosuhde oli 12 000 V/100 V. Staattorin virta mitattiin tehoanalysaattorilla ja virtashuntin avulla, jonka muuntosuhde oli 1 500 A/500 mV. Roottorin virta mitattiin digitaalisella mittarilla ja virtashuntilla, jonka muuntosuhde oli 750 A/50 mV.

Kalibrintimittauksessa tahtimoottorin verkosta ottama pätöteho mitattiin tehoanalysointilaakkeilla kaksivattimittauksena, joka soveltuu 3-vaiheisen pätötehon mittaukseen silloin, kun kuormitus on symmetrinen. Kuormituksen symmetrisyys varmistettiin tyhjäkäynti- ja oikosulkumittausten perusteella.

Kaikki mitatut suureet tahtimoottorin tehoa ja staattorin käämien lämpötilaa lukuun ottamatta tallennettiin monikanavaisella digitaalisella piirturilla. Mittauksissa tahtimoottorin hidastumisaika laskettiin piirturin näytteenottotaajuuden ja tallennettujen mittausten lukumäärän perusteella.

6.4 Testikoestuksen suorittaminen

Ennen *Retardation*-menetelmän testejä, testattavalle tahtimoottorille suoritettiin kappalekoestus käyttäen *Calibrated-machine test* -menetelmää. Kappalekoestukseen sisältyi myös tyhjäkäynti- sekä oikosulkukäyrien mittaukset ja lisäksi häviömittaukset 100 %:n kuormalle. *Calibrated-machine test* -menetelmällä tehdyt mittaukset suoritettiin eri päivinä kuin *Retardation*-menetelmän mittaukset. Tämä johtaa siihen, että *Calibrated-machine test* -menetelmän mittauksista lasketut mekaaniset häviöt ja kuormitushäviöt eivät välttämättä ole yhtä suuret kuin *Retardation*-menetelmän mittauksista lasketut, sillä kyseiset häviöt ovat lämpötilariippuvaisia. Koska mittaukset on suoritettu eri päivinä, on tämä huomioitu tuloksia analysoitaessa, mutta ei suoraan lasketuissa häviöissä.

Retardation-menetelmän testeissä kalibrintimittausta lukuun ottamatta, testattavan tahtimoottorin pyörittämiseen käytettiin samaa kalibrointia tasavirtamoottoria kuin *Calibrated-machine test* -menetelmällä tehdyissä mittauksissa. Tasavirtamoottoria käytettiin, koska tämän avulla testattavan tahtimoottorin pyörimisnopeus on helposti hallittavissa ja mittaukset olivat helppo suorittaa. Erillisen tasavirtamoottorin käyttö testattavan tahtimoottorin pyörittämisessä ei kuitenkaan ole suositeltavaa *Retardation*-menetelmässä, sillä tasavirtamoottorin hitausmomentti ja moottorin mekaaniset häviöt on huomioitava testattavan tahtimoottorin häviöitä laskettaessa.

Testikoestuksessa kalibroidun tasavirtamoottorin käyttö oli kuitenkin välttämätöntä testien suorittamiseksi, joten tasavirtamoottorin mekaaniset häviöt P_{dc0} on huomioitu

häviölaskuissa vähentämällä tasavirtamoottorin mekaaniset häviöt lasketuista häviöistä. Myös tasavirtamoottorin hitausmomentti on lisätty testattavan tahtimoottorin hitausmomentin arvoon, kun laskettiin hidastumisvakiota C .

Testattavan tahtimoottorin nimellipyörimisnopeuden 375 rpm perusteella valittiin testeissä käytettäväksi δ -arvoksi 0,05, jolloin nopeuden muutos $n_N(1+\delta) - n_N(1-\delta)$ on 393,75 rpm - 356,25 rpm. Valitulla δ -arvolla tehtiin myös muutama hidastuvuustesti ennen varsinaisia mittauksia, jotta varmistuttiin siitä, että valitulla nopeuden muutosvä-
lillä testattavan tahtimoottorin pyörimisnopeus ei hidastuisi liian nopeasti. Hidastuvuus-
testien perusteella tahtimoottori hidastui noin 15 - 80 sekunnissa riippuen kuormitus-
menetelmästä, jolloin todettiin valitun δ -arvon soveltuvan hyvin varsinaisten testien suorittamiseen.

Testit aloitettiin kalibrintimitauksella, joka suoritettiin luvun 5.2.3 (ks. s. 21 - 23) oh-
jeiden perusteella käyttäen koestukseen valittua tahtigeneraattoria. $\cos\varphi=1$
-mittauksessa testattava tahtikone tahdistettiin generaattoriin, magnetoimalla haettiin
tahtimoottorin $\cos\varphi$ arvoksi 1 ja suoritettiin hidastuvuusmittaus. Tehoanalysaattorilla
tallennettiin testattavan tahtimoottorin syöttöverkosta ottaman pätötehon P_1 arvo ja
moottorin hidastuminen tallennettiin digitaalisella piirturilla, jonka avulla laskettiin te-
hoa P_1 vastaava hidastumisaika t_1 . Testattavan tahtimoottorin staattorikämin lämpöti-
la t_{U1} luettiin mittalaitteelta ja kirjattiin ylös. Mittaukset suoritettiin standardien ohjei-
den mukaisesti kaksi kertaa, jolloin saatiin laskettua mittaustuloksille keskiarvo.

Tämän jälkeen kalibroidun tasavirtamoottorin avulla suoritettiin testattavalle tahtimoot-
torille magnetoimattoman koneen hidastuvuusmittaus. Mittauksessa tasavirtamoottoril-
la ajettiin magnetoimatonta testattavaa tahtimoottoria nimellisellä pyörimisnopeudella
ja suoritettiin hidastuvuusmittaus. Tahtimoottorin nopeus tallennettiin digitaalisella
piirturilla, jonka avulla laskettiin hidastumisaika t_{fw} . Testattavan tahtimoottorin staatto-
rikämin lämpötila t_{U1} luettiin mittalaitteelta ja kirjattiin ylös. Mittaukset suoritettiin
kaksi kertaa.

Seuraavaksi suoritettiin kalibroidun tasavirtamoottorin avulla magnetoidun tahtimootto-
rin hidastuvuusmittaus tyhjäkäynnissä. Mittauksessa tasavirtamoottorilla ajettiin tyhjä-
käynnissä olevaa testattavaa tahtimoottoria nimellisellä pyörimisnopeudella.

Tahtimoottorin staattorin pääjännite nostettiin nimellisarvoonsa 11 000 V magnetoimalla tahtimoottoria, ja samalla magnetoinnilla suoritettiin hidastuvuusmittaus. Tahtimoottorin nopeus, staattorin pääjännite ja roottorin virta tallennettiin digitaalisella piirturilla, jonka avulla laskettiin hidastumisaika t_{fe} . Testattavan tahtimoottorin staattorikäämin lämpötila t_{U1} luettiin mittalaitteelta ja kirjattiin ylös. Mittaukset suoritettiin kaksi kertaa.

Viimeisenä suoritettiin kalibroidun tasavirtamoottorin avulla magnetoidun tahtimoottorin hidastuvuusmittaus staattorikäämit oikosuljettuna. Mittauksessa tasavirtamoottorilla ajettiin oikosulussa olevaa testattavaa tahtimoottoria nimellisellä pyörimisnopeudella. Tahtimoottorin staattorin virta nostettiin nimellisarvoonsa 771 A magnetoimalla tahtimoottoria, ja samalla magnetoinnilla suoritettiin hidastuvuusmittaus. Tahtimoottorin nopeus, staattorin virta ja roottorin virta tallennettiin digitaalisella piirturilla, jonka avulla laskettiin hidastumisaika t_k . Testattavan tahtimoottorin staattorikäämin lämpötila t_{U1} luettiin mittalaitteelta ja kirjattiin ylös. Mittaukset suoritettiin kaksi kertaa.

6.5 Mittaustulokset ja tulosten analysointi

Retardation-menetelmän testien suorittamisen jälkeen piirturilla tallennetut mittaustulokset purettiin edelleen käsiteltäviksi ja varsinaisten testitulosten saamiseksi. Testitulosten perusteella piirrettiin hidastuvuuskuvaajat (liite 2, kuvaajat 1 - 8) eri kuormitusmenetelmillä. Hidastumisajan saamiseksi kuvaajista on jätetty pois stabilointiajat, ja kuvaajat on leikattu alkavaksi hetkestä, jolloin tahtimoottorin pyörimisnopeus ohittaa pisteen $n_N(1+\delta)$, eli 393,75 rpm, ja katkaistu päättyväksi hetkeen, jolloin koneen pyörimisnopeus ohittaa pisteen $n_N(1-\delta)$, eli 365,25 rpm.

Tahtimoottorin mittauspöytäkirjasta (liite 1) ja hidastuvuuskuvaajista 1 ja 2 nähdään kalibrintimittauksen hidastuvuuden testitulokset. Kuvaajista voidaan lukea moottorin hidastumisajan lisäksi moottorin syöttöverkosta ottama pätöteho, staattorin pääjännite, staattorin virta sekä roottorin virta nimellisellä pyörimisnopeudella. Kalibrintimittauksessa kahden mittauksen perusteella hidastumisajan keskiarvoksi saatiin 22,11 s. Tahtimoottorin syöttöverkosta ottaman pätötehon P_1 keskiarvoksi saatiin 101,1 kW ja staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 50 °C.

Tahtimoottorin mittauspöytäkirjasta ja hidastuvuuskuvaajista 3 ja 4 nähdään magne-toimattoman tahtimoottorin hidastuvuuden testitulokset. Kuvaajista voidaan lukea moottorin hidastumisaika. Magnetoimattoman moottorin kahden mittauksen hidastu-misajan keskiarvoksi saatiin 78,05 s ja staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 53,5 °C.

Tahtimoottorin mittauspöytäkirjasta ja hidastuvuuskuvaajista 5 ja 6 nähdään tyhjä-käynnissä olevan magnetoidun tahtimoottorin hidastuvuuden testitulokset. Kuvaajista voidaan lukea moottorin hidastumisajan lisäksi staattorin pääjännite sekä pääjännitettä vastaava roottorin virta nimellisellä pyörimisnopeudella. Tyhjäkäynnissä olevan mootto-rin kahden mittauksen hidastumisajan keskiarvoksi saatiin 22,34 s. Tahtimoottorin staattorin pääjännitteen keskiarvoksi saatiin 11 028 V ja staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 53,5 °C.

Tahtimoottorin mittauspöytäkirjasta ja hidastuvuuskuvaajista 7 ja 8 nähdään oikosulus-sa olevan magnetoidun tahtimoottorin hidastuvuuden testitulokset. Kuvaajista voidaan lukea moottorin hidastumisajan lisäksi staattorin virta sekä virtaa vastaava roottorin virta nimellisellä pyörimisnopeudella. Oikosulussa olevan moottorin kahden mittauksen hidastumisajan keskiarvoksi saatiin 15,52 s. Tahtimoottorin staattorin virran keskiar-voksi saatiin 774 A ja staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 56,5 °C.

Kalibrointimittauksessa kahden $\cos\phi=1$ -mittauksen perusteella tahtimoottorin verkosta ottamat pätötehot erosivat toisistaan 0,4 %, ja vastaavat hidastumisajat 1,21 %. Mag-netoimattoman tahtimoottorin mittauksessa kahden mittauksen hidastumisajat erosivat toisistaan 0,78 %. Kahden tyhjäkäyntimittauksen perusteella tahtimoottorin staattorin pääjännitteiden arvot nimellispöörimisnopeudessa erosivat toisistaan 0,52 %, ja vas-taavat hidastumisajat 0,09 %. Kahden oikosulkumittauksen perusteella tahtimoottorin staattorin virtojen arvot nimellispöörimisnopeudessa erosivat toisistaan 0,03 %, ja vas-taavat hidastumisajat 0,39 %.

Mittauksissa syntyvät erot jäivät todella pieniksi, suurimman eron ollessa 1,21 %, joten häviölaskennassa ei ole tarpeellista huomioida kahden mittaustuloksen välisiä eroja, vaan voidaan käyttää laskennassa kahden mittauksen keskiarvoja. Vaikka erot olivatkin pienet, huomataan kuinka tärkeää on usean mittauksen suorittaminen, jotta saadaan mittaustuloksista luotettava keskiarvo häviöiden laskemiseksi.

6.6 Tahtimoottorille lasketut häviöt ja tulosten analysointi

Calibrated-machine test -menetelmällä suoritettujen testien perusteella lasketut häviöt tahtimoottorin 100 %:n kuormalle saatiin suoraan testattavan tahtimoottorin loppuraportin häviölaskelmasta (liite 3). Testatun tahtimoottorin mekaanisten häviöiden P_{fw} arvoksi saatiin 22,4 kW, rautahäviöiksi P_{fe} 68,6 kW ja kuormitushäviöiksi P_k 112,6 kW. Tyhjäkäyntimittauksessa staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 50,6 °C ja oikosulkumittauksessa 54,6 °C. Magnetoimishäviöiksi P_m saatiin 58,6 kW, jota käytetään testattavan tahtimoottorin kokonaishäviöiden laskemiseen kaikilla testausmenetelmillä. Tahtimoottorin kokonaishäviöiden P_{TOT} arvoksi saatiin 262,2 kW.

Retardation-menetelmällä suoritettujen testien tuloksista laskettiin häviöt tahtimoottorin 100 %:n kuormalle lukujen 5.2.5 sekä 5.2.6 mukaisesti (liite 4). Kun häviöt laskettiin tunnetun hitausmomentin avulla ja laskennassa käytettiin testattavan tahtimoottorin hitausmomentin J arvona moottorille laskettua suunnitteluarvoa 13 800 kgm², saatiin mekaanisten häviöiden P_{fw} arvoksi 23,5 kW, tyhjäkäyntihäviöiksi P_{fe} 69,2 kW ja kuormitushäviöiksi P_k 111,7 kW. Tyhjäkäyntimittauksessa staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 53,5 °C ja oikosulkumittauksessa 56,5 °C. Tahtimoottorin kokonaishäviöiksi P_{TOT} saatiin 263,0 kW.

Kun käytettiin kalibrintimittausta häviöiden laskemiseksi, saatiin mekaanisten häviöiden P_{fw} arvoksi 24,4 kW, tyhjäkäyntihäviöiksi P_{fe} 71,5 kW ja kuormitushäviöiksi P_k 115,4 kW. Tyhjäkäyntimittauksessa staattorikäämien lämpötila t_{U1} oli 53,5 °C ja oikosulkumittauksessa 56,5 °C. Tahtimoottorin kokonaishäviöiksi P_{TOT} saatiin 269,9 kW.

Tulokset sijoitettiin taulukkoon 2, josta nähdään eri menetelmillä laskettujen mekaanisten häviöiden, rautahäviöiden, kuormitushäviöiden, magnetointihäviöiden ja kokonaishäviöiden arvot (ks. seur. s.):

Taulukko 2. Tahtimoottorille lasketut häviöt 100 %:n kuormalle, hitausmomentin arvona moottorille laskettu suunnitteluarvo 13 800 kgm²

Häviöt	<i>Calibrated-machine test</i>	<i>Retardation</i> tunnettu <i>J</i>	<i>Retardation</i> kalibrointi
P_{fw}	22,4 kW	23,5 kW	24,4 kW
P_{fe}	68,6 kW	69,2 kW	71,5 kW
P_k	112,6 kW	111,7 kW	115,4 kW
P_m	58,6 kW	58,6 kW	58,6 kW
P_{TOT}	262,2 kW	263,0 kW	269,9 kW

Retardation-menetelmällä tunnetun hitausmomentin mittaustulosten mukaisesti lasketut kokonaishäviöt poikkeavat *Calibrated-machine test* -menetelmän avulla lasketuista häviöistä 0,3 % ja *Retardation*-menetelmällä kalibrointimittauksen mukaisesti lasketut kokonaishäviöt poikkeavat *Calibrated-machine test* -menetelmän avulla lasketuista häviöistä 2,9 %. *Retardation*-menetelmän testien mukaisesti lasketut kokonaishäviöt poikkeavat toisistaan 2,6 %. Lasketut kokonaishäviöt eroavat toisistaan keskimäärin noin 1,9 %, jolloin häviöihin tulee heittoa muutaman kilowatin edestä. Erot ovat hyvin pienet, jolloin tulosten voidaan todeta olevan yhdenmukaiset.

Koska *Calibrated-machine test* -menetelmällä laskettujen häviöiden mittaukset on suoritettu eri päivänä, kuin *Retardation*-menetelmän mittaukset, syntyy helposti eroja näiden kahden eri menetelmän välille. Yksi suurimmista huomioon otettavista ja häviöiden suuruuteen vaikuttavista tekijöistä *Retardation*-menetelmän tunnetun hitausmomentin avulla lasketuissa häviöissä on käytetty hitausmomentin arvo.

Taulukossa 2 laskennassa käytettiin testattavalle tahtimoottorille laskettua suunnitteluarvoa 13 800 kgm², mutta jos käytetään esimerkiksi testattavan tahtimoottorin *Calibrated-machine test* -menetelmällä laskettua arvoa 13 050 kgm², muuttuu laskettu kokonaishäviö huomattavasti.

Taulukkoon 3 on laskettu häviöt *Retardation*-menetelmän tunnetun hitausmomentin avulla käyttäen hitausmomentin arvoa 13 050 kgm²:

Taulukko 3. Tahtimoottorille lasketut häviöt 100 %:n kuormalle, hitausmomentin arvona *Calibrated-machine test* mittauksessa moottorille laskettu arvo 13 050 kgm²

Häviöt	<i>Calibrated-machine test</i>	<i>Retardation</i> tunnettu <i>J</i>	<i>Retardation</i> kalibrointi
P_{fw}	22,4 kW	22,0 kW	24,4 kW
P_{fe}	68,6 kW	65,5 kW	71,5 kW
P_k	112,6 kW	105,8 kW	115,4 kW
P_m	58,6 kW	58,6 kW	58,6 kW
P_{TOT}	262,2 kW	251,9 kW	269,9 kW

Taulukoista 2 ja 3 nähdään, kuinka suuri vaikutus häviöiden laskennassa käytetyllä hitausmomentilla on, kun häviöt lasketaan *Retardation*-menetelmän tunnetun hitausmomentin laskennan mukaisesti. Ero on kasvanut *Calibrated-machine test* -menetelmällä laskettuihin häviöihin verrattaessa aikaisemmasta 0,3 %:sta 3,9 %:iin. *Retardation*-menetelmän kalibrointimittauksella laskettuihin häviöihin verrattaessa, ero on kasvanut 2,6 %:sta 7,1 %:iin.

Koska aikaisemmin todettiin, että mekaaniset häviöt sekä kuormitushäviöt ovat lämpötilariippuvaisia, voidaan *Calibrated-machine test* -menetelmän sekä *Retardation*-menetelmän testeissä olettaa testattavan koneen olleen hieman eri lämpöisiä ja luultavasti toisen menetelmän testeissä lämpötilat olivat myös paremmin tasaantuneet. Lämpötilat ja niiden tasaisuudet vaikuttavat jokaiseen menetelmään, joten tällä voidaan osin myös selittää eri menetelmillä laskettujen häviöiden eroja.

Huomioon on otettava myös se, että *Calibrated-machine test* -menetelmän magnetoimattoman koneen hidastumistestissä tahtimoottorin hidastumisaika nopeudesta $n_N(1+\delta)$ nopeuteen $n_N(1-\delta)$ oli 77 sekuntia otettuna sekuntikellolla, kun vastaava aika *Retardation*-menetelmän testeissä oli 78,05 sekuntia laskettuna piirturilta. Tämä viittaisi siihen, että *Calibrated-machine test* -menetelmän testeissä moottorin mekaaniset häviöt olisivat olleet hieman suuremmat. *Calibrated-machine test* -menetelmän testissä

sekuntikellolla otettu aika tuo myös melko paljon mittavirhettä mukaan tulokseen, joten ero voi olla vieläkin suurempi.

Kalibrintimittauksen todettiin olevan riippuvainen testattavan tahtimoottorin pätötehon mittauksesta, jolloin myös laskettujen häviöiden tarkkuus on riippuvainen tehonmittauksen tarkkuudesta. Epätarkkuutta mittaukseen tuo mittalaitteiden tarkkuuden lisäksi esimerkiksi testattavan tahtimoottorin magnetointisyöttö, jonka pienikin epästabiilisuus saattaa aiheuttaa magnetointijännitteen muuttumisen. Tämän seurauksena muuttuisi myös tahtimoottorin staattorivirta ja sitä kautta myös moottorin pätöteho, kun suoritetaan $\cos\varphi=0$ -mittausta. Yhden kilowatin pätötehon muutos kalibrintimittauksessa aiheuttaisi kahden kilowatin muutoksen koneelle laskettuihin kokonaishäviöihin.

7 Johtopäätökset

Tutkimusten ja testikoestuksen perusteella *Retardation*-menetelmä vastaa hyvin standardin asettamia vaatimuksia menetelmän soveltuvuudesta suurten tahtikoneiden häviöiden määrittämiseen. Vaikka menetelmä ja sen käyttö tuokin mukanaan paljon haasteita ja pohdintaa koestusten onnistumiseksi, on se vakavasti otettava vaihtoehto suurten tahtikoneiden koestuksessa ja häviöiden määrittämisessä.

Tämän työn testikoestuksen olosuhteet eivät olleet aivan niin suotuisat kuin olisi ollut toivottavaa, sillä esimerkiksi kalibroidun tasavirtamoottorin käyttö ei ole suositeltavaa *Retardation*-menetelmän testeissä. Kuitenkin sen käyttö oli välttämätöntä työn testikoestuksessa ja sen onnistumisessa, joten käytön vaikutukset on yritetty huomioida kaikin mahdollisin keinoin. Myös osa testikoestuksessa käytetyistä mittalaitteista ja -menetelmistä eivät olleet omiaan tarkkojen mittaustulosten saamiseksi *Retardation*-menetelmän testien vaatimuksia ajatellen. Esimerkiksi nopeuden mittaukseen käytetty optinen nopeusanturi ei sellaisenaan ollut täysin soveltuva mittauksiin. Lisäksi oli todella hankalaa laskea hidastumisajat suoritetuissa testeissä piirturin näytteenottotaajuuden perusteella, sillä mittapisteitä oli useita tuhansia ja tällaisen tietomäärän käsittely on erittäin hidasta ja vaikeaa.

Retardation-menetelmässä vaadittujen mittausten avulla saatiin kuitenkin tarkasti laskettua ja eriteltyä testattavalle koneelle häviöt ja niiden todettiin olevan vertailukelpoisia *Calibrated-machine test* -menetelmän avulla laskettujen häviöiden kanssa. Tähän on huomioitava se tosiasia, että ABB:n sähkökonetehtaalla kalibroidun koneen käytöllä tahtikoneiden koestuksessa ja häviöiden määrittämisessä on usean vuoden kokemus ja asiantuntemus sekä taustalla usean tuhannen tahtikoneen onnistuneet koestukset. Tämä jo itsessään nostaa *Retardation*-menetelmän avulla saatujen tulosten luotettavuuden korkealle, sillä vertailutulokset ovat oletettavasti luotettavat.

7.1 *Retardation*-menetelmän edut ja haitat

Retardation-menetelmän eduista ensimmäisenä nousee esille sen käytön helppous suurten tahtikoneiden koestuksessa. Se korostuu varsinkin kappalekoestuksissa, jolloin testattavan tahtikoneen koestus voidaan suorittaa erittäin nopeasti, mutta silti luotettavasti. Myös lajikoestuksessa *Retardation*-menetelmää käyttämällä voidaan lämpenemäkoee suorittaa aina reaktiivisella kuormalla, jolloin koneen lämpenemä saadaan selvitettyä yhden testin avulla.

Kun vertaillaan *Retardation*-menetelmää *Calibrated-machine test* -menetelmään, suurimpana erona on kalibroidun koneen puuttuminen. Tämän seurauksena säästetään paljon tilaa testikentällä ja päästään eroon kalibroidun koneen ja testattavan tahtikoneen akselien toisiinsa kytkemisestä ja tästä johtuvasta linjaamistyöstä. Tämä johtaa myös siihen, että testattavan koneen värinätason mahdollinen nousu ei enää voisi johtua koneen huonosta linjaamisesta, jolloin värinän aiheuttajaa olisi helpompi etsiä. *Retardation*-menetelmän etuna *Calibrated-machine test*-menetelmään on myös tehonsyöttöjärjestelmän yksinkertaisempi rakenne, sillä *Retardation*-menetelmää käytettäessä ei tarvita suuria tasasuuntaussiltoja tehonsyöttöön.

Haittapuolina ovat sekä syöttöverkon, että mittalaitteiden ja -menetelmien vaatimukset. *Retardation*-menetelmässä testattavan tahtikoneen tehonsyöttöön vaaditaan syöttöverkko, joka on mahdollisimman laaja sekä monipuolinen, sillä verkon on vastattava usean ominaisuuksiltaan erilaisen tahtikoneen ominaisuuksia sekä vaatimuksia. Syöttöjärjestelmältä vaaditaan suurta käyttövarmuutta, esimerkiksi syöttökatkaisijoiden tulee soveltua jatkuvaan kuorman pois/päälle-kytkemiseen, varsinkin tyhjäkäynti- ja

oikosulkukäyrien mittauksissa. Myös testattavan tahtikoneen tahdistuksen syöttöverkkoon tulisi onnistua vaivattomasti. Yhtenä haittapuolena voidaan myös pitää mittamenetelmistä nopeuden mittaamista ja sen vaatimuksia. Nopeuden mittausta on luotettavien tulosten kannalta yksi tärkeimmistä, jolloin vaaditaan tähän tarkoitukseen täysin soveltuva mittalaitteisto.

7.2 *Retardation*-menetelmän käyttöönoton vaatimuksia

Retardation-menetelmän käyttöönotto vaatisi useita muutoksia ja uudistuksia nykyiseen järjestelmään, niin testattavan koneen tehonsyötön kuin mittalaitteiden ja menetelmien osalta. Luotettavan, mutta mahdollisimman helpon nopeudenmittausmenetelmän löytäminen olisi ehdottoman tärkeää *Retardation*-menetelmän testien suorittamiseksi. Esimerkiksi testattavan koneen akselille asennetun hammaspyörän ja optisen- tai magneettisen nopeusanturin käyttö kasvattaisi mittatarkkuutta huomattavasti, jos verrataan tämän työn mittauksissa käytettyyn menetelmään.

Hidastumisajan määrittäminen olisi hyvä tehdä luotettavan tietokonepohjaisen ohjelman avulla, jolloin tulosten virhemarginaali saataisiin mahdollisimman pieneksi. Esimerkiksi nykyisen koestuksessa käytettävän LabView-ohjelman muokkaus *Retardation*-menetelmän mittausten vaatimuksiin sopivaksi olisi yksi varteen otettava vaihtoehto.

Testattavan tahtikoneen tehonsyöttöön käytettävän syöttöjärjestelmän tulisi olla mahdollisimman helppokäyttöinen ja varsinkin syöttökatkaisijoiden tulisi olla sellaiset, jotka kestävät koneen jatkuvaa syöttöverkkoon kytkemistä ja verkosta pois kytkemistä. Myös testattavan tahtikoneen tahdistuksen syöttöverkkoon tulisi olla mahdollisimman helppoa ja nopeaa. Edellä mainitut vaatimukset korostuvat varsinkin lajikoestuksessa tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrien mittauksessa, jolloin testattavalle koneelle tehdään useampi hidastuvuusmittaus usean mittapisteen seurauksena. Jos mittaukset suoritetaan vielä useaan kertaan, joudutaan testattava kone tahdistamaan verkkoon lajikoestuksen aikana kymmeniä kertoja. Kappalekoestuksessa tätä ongelmaa ei yleensä ole, sillä tyhjäkäynti- ja oikosulkumittauksissa suoritetaan mittaukset ainoastaan 100 %:n kuormalle.

Kun käytetään kalibroitimittausta *Retardation*-menetelmän testeissä, on tehonmittaukseen käytettävä parasta mahdollista saatavilla olevaa mittalaitteistoa ja -menetelmää

kolmivaiheisen symmetrisen pätötehon mittauksessa. Symmetrisen pätötehon mittamiseen soveltuu hyvin kaksiwattimittaus. Lisäksi mitattu teho on saatava tallennettua luotettavalla menetelmällä.

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin IEC 60034-2-1- ja IEC 60034-2-2 -standardien mukaista *Retardation*-menetelmää suurten tahtikoneiden koestuksessa ja selvitettiin sen käyttömahdollisuuksia uutena tahtikoneiden testausmenetelmänä ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaan tahtikoneiden koestamossa. Lisäksi selvitettiin *Retardation*-menetelmän tuomia mahdollisia etuja uutena testausmenetelmänä nykyisin käytössä olevan *Calibrated-machine test*-menetelmän rinnalle.

Tutkimusten ja testikoestusten perusteella *Retardation*-menetelmä soveltuu hyvin suurten tahtikoneiden loppukoestukseen, ja sen avulla saadaan laskettua luotettavasti tahtikoneen häviöt. Kuitenkin on huomioitava, että menetelmän luotettavuutta on arvioitu yhden testikoestuksen perusteella, jolloin ei voida puhua täysin luotettavasta menetelmästä, vaan luotettavasta testikoestuksesta. Menetelmän luotettavuuden ja tarkkuuden vahvistamiseksi on tehtävä lisää testikoestuksia mahdollisimman laajalle valikoimalle erilaisia tahtikoneita. On silti hyvä muistaa, että Ruotsin ABB:n sähkökonetehtaalla *Retardation*-menetelmän avulla suoritetaan kaikki tahtikoneiden koestukset, joten voidaan olettaa menetelmän olevan täysin luotettava.

Vaikka *Retardation*-menetelmä soveltuukin hyvin tahtikoneiden häviöiden määrittämiseksi, ei sen käyttöönottoon ole tarvetta ABB Oy:n Helsingin sähkökonetehtaalla. Tämä perustuu siihen, että nykyisen *Calibrated-machine test*-menetelmän avulla saadaan suoritettua asianmukaiset lopputestaukset kaikille valmistuneille tahtikoneille. Lisäksi *Calibrated-machine test*-menetelmään vaadittavien kalibroitujuen moottoreiden ja niiden tehonsyöttöön tarvittavien tasasuuntaussiltojen, sekä testattavien tahtikoneiden magnetointisyöttöjen määrä kasvaa lähitulevaisuudessa. Näiden seurauksena myös tahtikoneiden koestuskapasiteetti lisääntyy, jolloin saadaan koestettua kaikki valmistuvat tahtikoneet, jos tilausten määrä pysyy ennallaan.

Tulevaisuudessa saattaa kuitenkin tulla vastaan erilaisia tilanteita, jolloin on mietittävä tahtikoneiden lopputestausmenetelmän ja siihen liittyvän laitteiston päivittämistä tai jopa uusimista. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi koestuskapasiteetin lisäämisen tarve, nykyisen testausmenetelmän kalibroituja koneiden uusiminen tai korjaamistarve ja mahdollisesti myös sellaisen uuden tahtikonetyypin valmistuminen, joka ominaisuuksiltaan estäisi kalibroidun moottorin käytön tahtikoneen lopputestauksessa. Tällöin *Retardation*-menetelmä on varteen otettava vaihtoehto tahtikoneiden koestuksessa ja tämä insinööriyö luo hyvän pohjan *Retardation*-menetelmän käyttöönoton suunnittelulle.

Lähteet

- 1 About ISO. 2011. Verkkodokumentti. International Organization of Standardization. <<http://www.iso.org/iso/about.htm>>. Viitattu 18.1.2011.
- 2 How ISO develops standards. 2011. Verkkodokumentti. International Organization of Standardization]. <http://www.iso.org/iso/about/how_iso_develops_standards.htm>. Viitattu 20.1.2011
- 3 About the IEC. 2011. Verkkodokumentti. International Electrotechnical Commission. <<http://www.iec.ch/about/>>. Viitattu 20.1.2011
- 4 IEC 60034-2-1. Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). Edition 1.0, 2007. Geneva, Switzerland: IEC.
- 5 IEC 60034-2-2. Rotating electrical machines - Part 2-2: Specific methods for determining separate losses for large machines from tests - Supplement to IEC 60034-2-1. Edition 1.0, 2010. Geneva, Switzerland: IEC.
- 6 ABB Oy:n Internet-sivut. 2010. Verkkodokumentti. <<http://www.abb.fi>>. Viitattu 1.2.2011.
- 7 Koestamon toimintakuvaus. 2010. ABB Oy Moottorit ja generaattorit, Helsingin sähkökonetehtaan tahtikoneiden koekentän sisäinen ohjeistus. Viitattu 14.2.2011.
- 8 Tahtikoneiden kappale-, laji- ja erikoiskoestukset. 2010. ABB Oy Moottorit ja generaattorit, Helsingin sähkökonetehtaan tahtikoneiden koekentän sisäinen ohjeistus. Viitattu 20.2.2011.
- 9 Aura ym. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 10 No-load tests and short-circuit tests. 2002. ABB Oy, Motors & Generators, Machines, Ruotsin Västeråsın sähkökonetehtaan koestamon testiohjeet. Viitattu 18.02.2010.
- 11 Hans Klavus, koekentän päällikkö, ABB Oy, Motors & Generators, Machines, Västerås, Ruotsi. Haastattelu 20.12.2010.

Mittauspöytäkirja

Retardation-menetelmän testikoestukset

10.2.2011

Testattava tahtimoottori: AMZ 1600DS16

U_{1N} :	11 000	V	δ :	0,05
I_{1N} :	771	A	d_n :	393,75 -
f_N :	50	Hz		356,25 rpm
n_N :	375	rpm		

Mittaus 1, Kalibrointimittaus, hidastuvuus $\cos\phi=1$

	P1 [kW]	U1 [V]	I1 [A]	Ur [V]	Ir [A]	tU1 [°C]
1. mittaus	101,3	10 981	10,8	80,53	152,83	48
2. mittaus	100,9	10 983	10,5	80,35	152,75	52
keskiarvo	101,1	10981,8	10,65	80,44	152,79	50

	dt [s]	d_n [rpm]	d_n/dt
1. mittaus	21,97	37,5	1,707
2. mittaus	22,24	37,5	1,686
keskiarvo	22,11	37,5	1,697

Mittaus 2, hidastuvuus ilman magnetointia

	dt [s]	d_n [rpm]	d_n/dt	tU1 [°C]
1. mittaus	77,74	37,5	0,482	54
2. mittaus	78,35	37,5	0,479	53
keskiarvo	78,05	37,5	0,480	53,5

Mittaus 3, hidastuvuus magnetoituna tyhjäkäynnissä

	U1 [V]	Ir [A]	dt [s]	d_n [rpm]	d_n/dt	tU1 [°C]
1. mittaus	11 030	150	22,33	37,5	1,679	53
2. mittaus	11 025	150,6	22,35	37,5	1,678	54
keskiarvo	11 028	150,3	22,34	37,5	1,679	53,5

Mittaus 4, hidastuvuus magnetoituna oikosulussa

	I1 [A]	I _r [A]	dt [s]	dn [rpm]	dn/dt	tU1 [°C]
1. mittaus	774	180,6	15,55	37,5	2,412	56
2. mittaus	774	181,9	15,49	37,5	2,421	57
keskiarvo	774	181,3	15,52	37,5	2,416	56,5

Mittalaitteet ja -menetelmät

P1 : NORMA 5255 tehoanalysaattori, kaksiwattimittaus

U1 : NORMA 5255 tehoanalysaattori, jännitemuuntaja 12000 V/100 V

I1 : NORMA 5255 tehoanalysaattori, virtashuntti 1500 A/500 mV

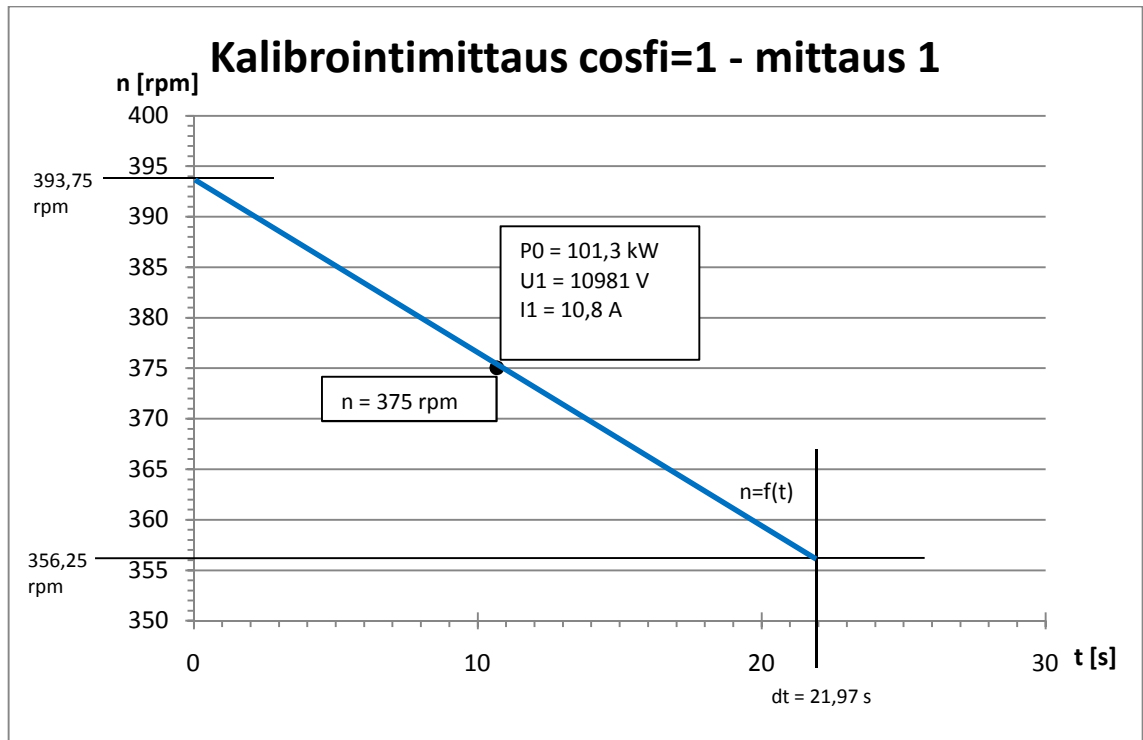
U_r : KEITHLEY digitaalinen mittari, suora mittaus 300 V/300 V

I_r : KEITHLEY digitaalinen mittari, virtashuntti 750 A/50 mV

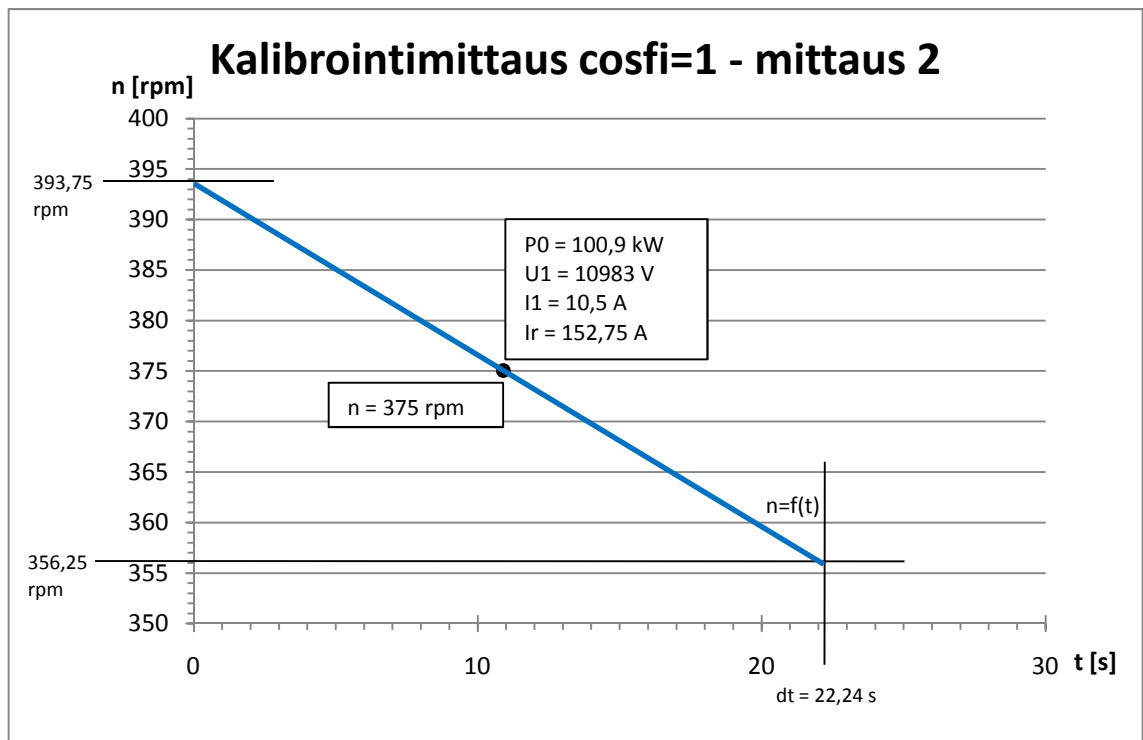
n : optinen nopeussensori, 350 rpm...450 rpm = 0...1 Vdc

t : KEITHLEY, Pt-100 lämpötilamittaus

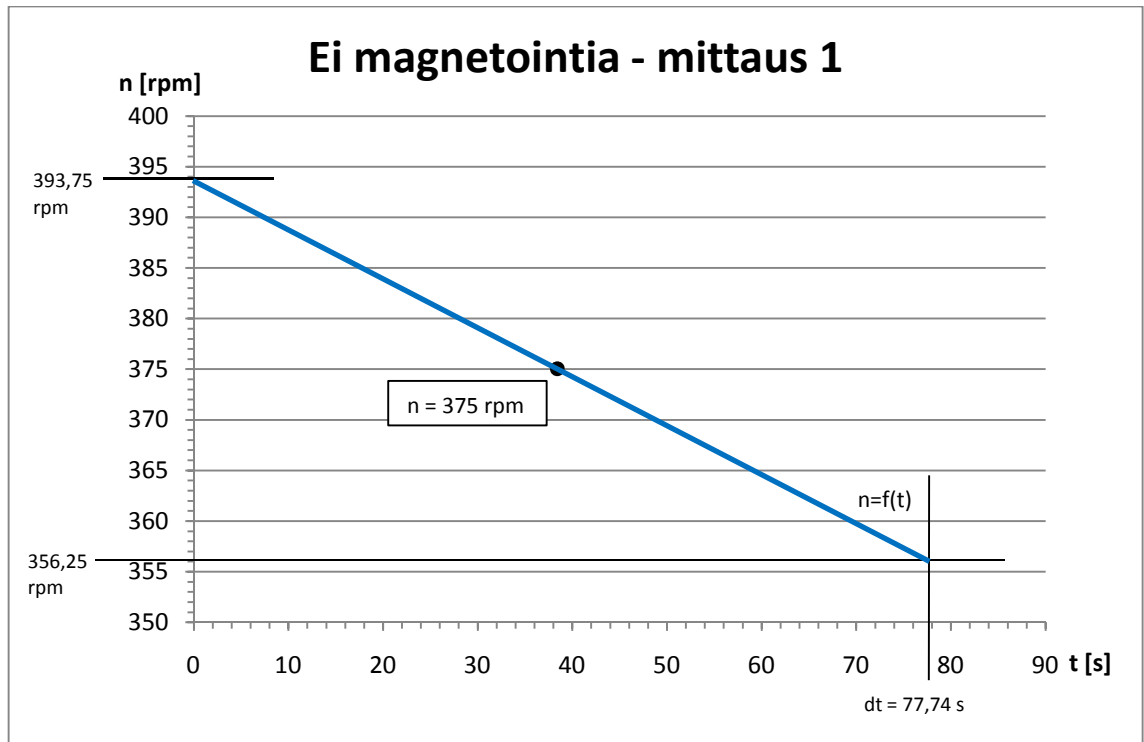
U1,I1,I_r,n: YOKOGAWA digitaalinen piirturi



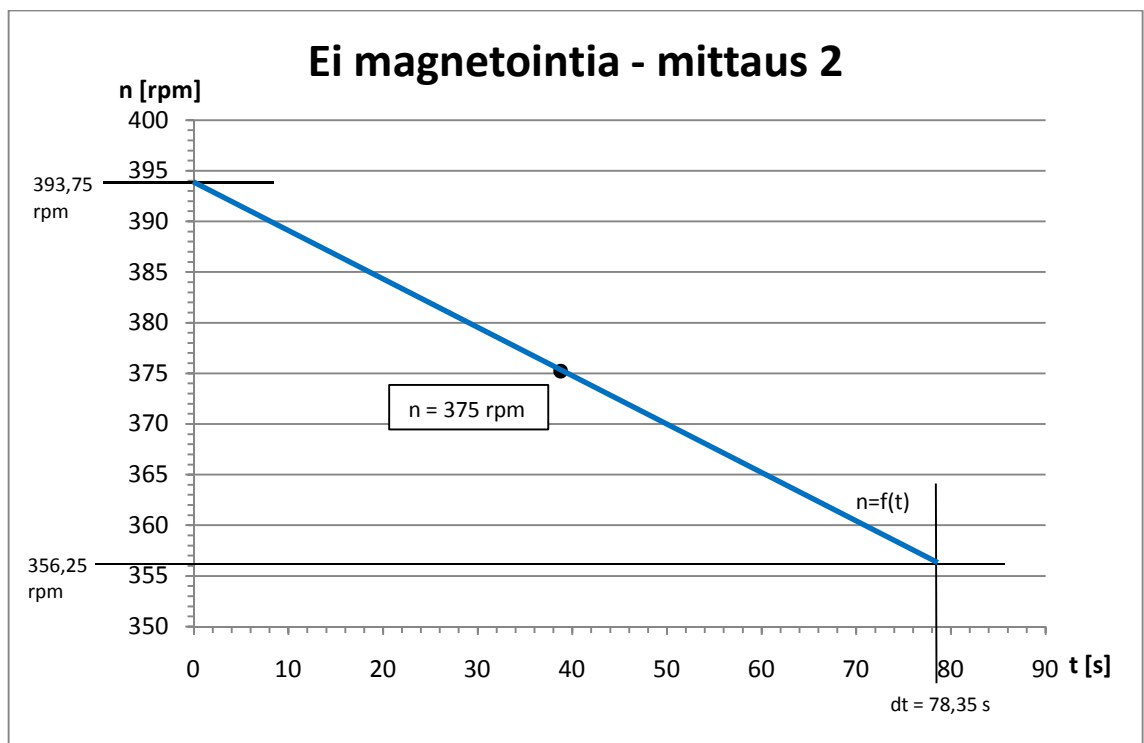
Kuvaaja 1. Tahtimoottorin hidastuvuus kalibrointimittauksessa, 1. mittaus



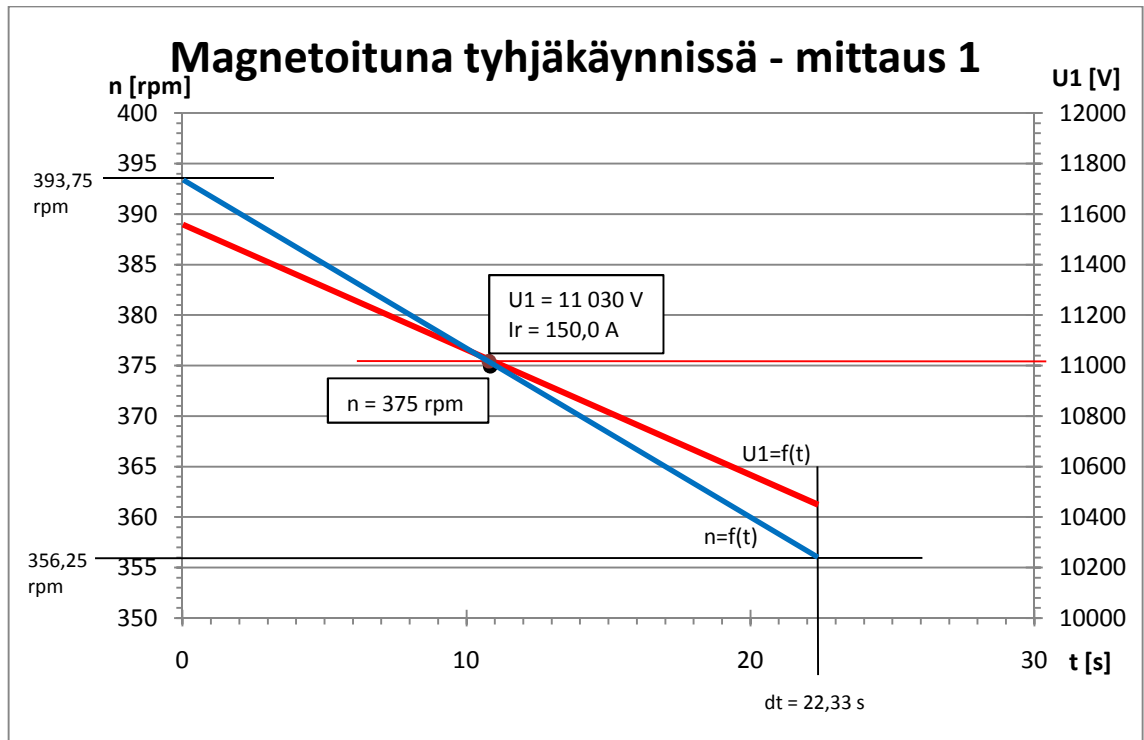
Kuvaaja 2. Tahtimoottorin hidastuvuus kalibrointimittauksessa, 2. mittaus



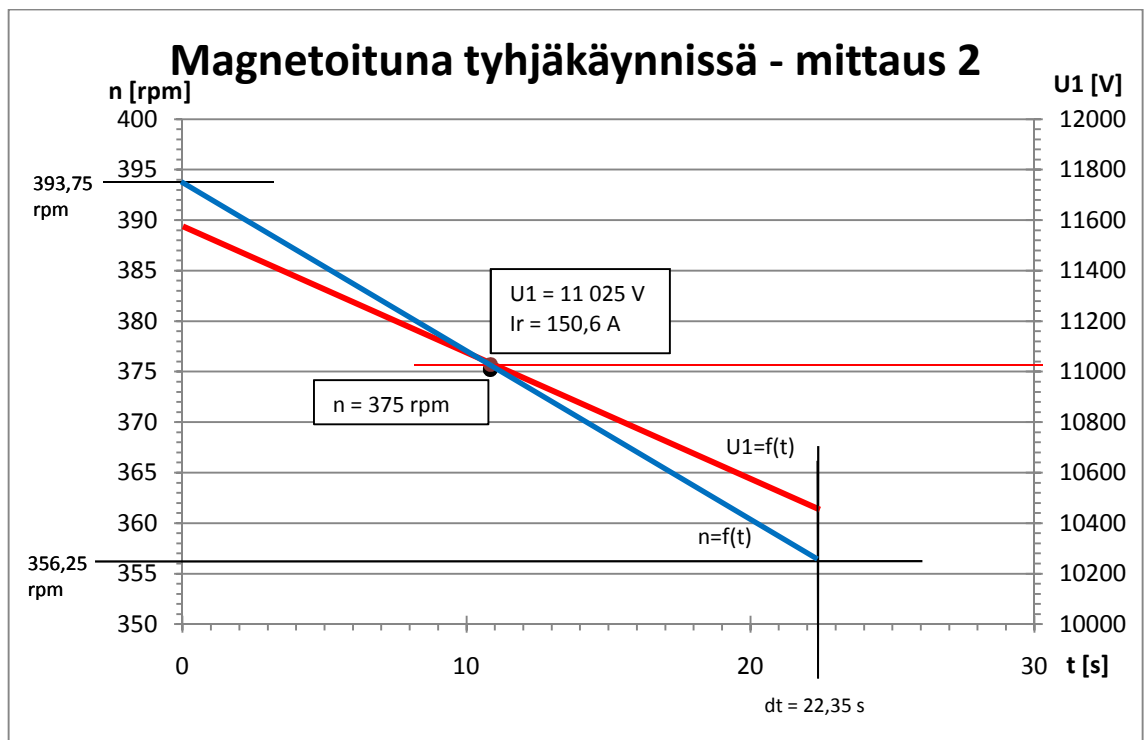
Kuvaaja 3. Tahtimoottorin hidastuvuus magneitoimattomana, 1. mittaus



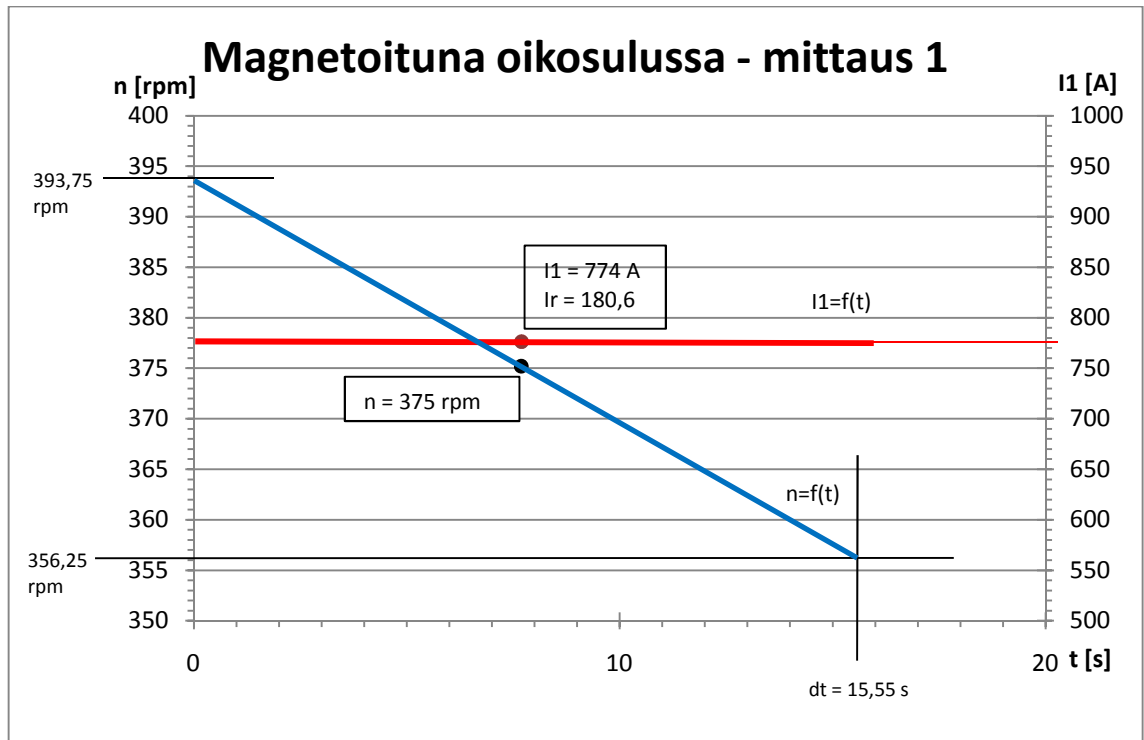
Kuvaaja 4. Tahtimoottorin hidastuvuus magneitoimattomana, 2. mittaus



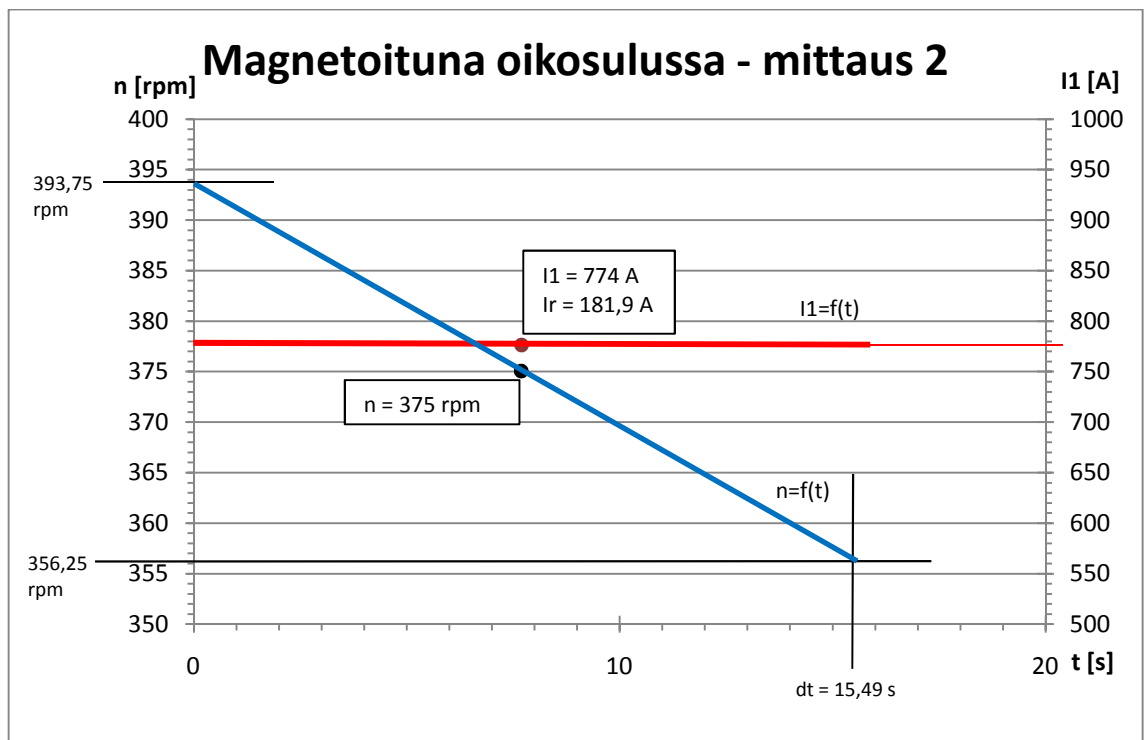
Kuvaaja 5. Tahtimoottorin hidastuvuus magnetoituna tyhjäkäynnissä, 1. mittaus



Kuvaaja 6. Tahtimoottorin hidastuvuus magnetoituna tyhjäkäynnissä, 2. mittaus



Kuvaaja 7. Tahtimoottorin hidastuvuus magnetoituna oikosulussa, 1. mittaus



Kuvaaja 8. Tahtimoottorin hidastuvuus magnetoituna oikosulussa, 2. mittaus



Customer	Machine	Page
Order reference	Work nr: Serial nr	Revision
Project	Approved	Report rev:

1) Losses and efficiency

Ratings

Connection **Y**

$P_n = 13750 \text{ kW}$

$U_n = 11000 \text{ V}$

$I_n = 771 \text{ A}$

$f_n = 50.00 \text{ Hz}$

Reference temperature, $T = 95 \text{ °C}$

Power factor **0.95**

Losses [kW]	100 %
<i>Friction losses</i>	22.4
<i>Iron losses</i>	68.6
<i>Load losses</i>	112.6
<i>Excitation losses</i>	58.6
<i>Total losses</i>	262.2
<i>Output power</i>	13750.0
<i>Input power</i>	14012.2
<i>Efficiency</i>	98.1

2) Moment of inertia

$J = 13050 \text{ kgm}^2$

Häviöiden laskenta *Retardation*-menetelmällä

Testattavan koneen hitausmomentti J_{calc} :	13 800 kgm ²
Kalibroidun koneen hitausmomentti J_{DC} :	235 kgm ²
Kalibroidun koneen mekaaniset häviöt P_{DC0} :	4,20 kW
Kalibrointimittauksen $\cos\varphi=1$ teho P_0 :	101,1 kW
Kalibrointimittauksen $\cos\varphi=1$, hidastumisaika dt:	22,11 s
Magnetoimattoman koneen dt:	78,05 s
Tyhjäkäynnissä magnetoidun koneen dt:	22,34 s
Oikosulussa magnetoidun koneen dt:	15,52 s

Hidastumisvakio tunnetulla hitausmomentilla laskettaessa (ks. s. 24):
(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin hitausmomentti)

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2} \approx 10,97 * 10^{-3} J$$

$$C = \frac{4\pi^2 (J + J_{\text{DC}})}{60^2} = \frac{4\pi^2 (13\,800 \text{ kgm}^2 + 235 \text{ kgm}^2)}{60^2} = \mathbf{153,911}$$

Mekaaniset häviöt tunnetulla hitausmomentilla (ks. s. 25):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_{fw} = C n_N \frac{dn}{dt} |1$$

$$P_{fw} = C n_N \frac{dn}{dt} |1 = 153,911 * 375 \text{ rpm} * \frac{37,5 \text{ rpm}}{78,05 \text{ s}} = 27,730 \text{ kW}$$

$$P_{fw} = 27,730 \text{ kW} - P_{\text{DC0}} = 27,730 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{23,5 \text{ kW}}$$

Rautahäviöt tunnetulla hitausmomentilla (ks. s. 25):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_{fe} = C n_N \frac{dn}{dt} |2 - P_{fw}$$

$$P_{fe} = C n_N \frac{dn}{dt} |2 - P_{fw} = 153,911 * 375 \text{ rpm} * \frac{37,5 \text{ rpm}}{22,34 \text{ s}} - 23,53 \text{ kW} = 73,35 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 73,35 \text{ kW} - P_{\text{DC0}} = 73,35 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{69,2 \text{ kW}}$$

Kuormitushäviöt tunnetulla hitausmomentilla (ks. s. 25):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_k = C n_N \frac{dn}{dt} |3 - P_{fw}$$

$$P_k = C n_N \frac{dn}{dt} |3 - P_{fw} = 153,911 * 375 \text{ rpm} * \frac{37,5 \text{ rpm}}{15,52 \text{ s}} - 23,53 \text{ kW} = 115,93 \text{ kW}$$

$$P_k = 115,93 \text{ kW} - P_{DC0} = 115,93 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{111,7 \text{ kW}}$$

Mekaaniset häviöt kalibrintimittauksen avulla (ks. s. 26):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_{fw} = P_1 \frac{t_1}{t_{fw}}$$

$$P_{fw} = P_1 \frac{t_1}{t_{fw}} = 101,1 \text{ kW} \frac{22,11 \text{ s}}{78,05 \text{ s}} = 28,64 \text{ kW}$$

$$P_{fw} = 28,64 \text{ kW} - P_{DC0} = 28,64 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{24,4 \text{ kW}}$$

Rautahäviöt kalibrintimittauksen avulla (ks. s. 26):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_{fe} = P_1 \frac{t_1}{t_{fe}} - P_{fw}$$

$$P_{fe} = P_1 \frac{t_1}{t_{fe}} - P_{fw} = 101,1 \text{ kW} \frac{22,11 \text{ s}}{22,34 \text{ s}} - 24,4 \text{ kW} = 75,66 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 75,66 \text{ kW} - P_{DC0} = 75,66 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{71,5 \text{ kW}}$$

Kuormitushäviöt kalibrintimittauksen avulla (ks. s. 26):

(Laskennassa huomioitu kalibroidun moottorin mekaaniset häviöt)

$$P_k = P_1 \frac{t_1}{t_k} - P_{fw}$$

$$P_k = P_1 \frac{t_1}{t_k} - P_{fw} = 101,1 \text{ kW} \frac{22,11 \text{ s}}{15,52 \text{ s}} - 24,4 \text{ kW} = 119,63 \text{ kW}$$

$$P_k = 119,63 \text{ kW} - P_{DC0} = 119,63 \text{ kW} - 4,20 \text{ kW} = \mathbf{115,4 \text{ kW}}$$