

Jari Kauppi

# Oikosulkumoottoreiden huolto ja mittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Sähkötekniikka  
Insinöörityö  
9.10.2012

Tekijä Otsikko	Jari Kauppi Oikosulkumoottoreiden huolto ja mittaukset
Sivumäärä Aika	47 sivua + 5 liitettä 9.10.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Jari Ijäs toimitusjohtaja Sakari Alila
<p>Insinöörityössä tutkittiin oikosulkumoottorien huoltoa sähkökonekorjaamon ympäristössä. Työssä käytettiin käyttöältään vanhahkoa esimerkkimoottoria. Kyseessä oli liukurengaskone. Erityisesti kiinnitettiin huomiota koneen mittauksiin ennen ja jälkeen huollon. Huollon yhteydessä uusittin koneen staattorikäänitys.</p> <p>Työssä oli tavoitteena laatia opas sähkökonekorjaamon uusien työntekijöiden perehdyttämiseen. Työ sisältää kuvasarjan oikosulkumoottorin huollosta ja mittauksista. Työssä huomioitiin huoltoon liittyviä näkökohtia ja tekniikoita. Työssä tuotiin esille kannattavuuteen ja tuottavuuteen liittyviä seikkoja.</p> <p>Esimerkkikoneen laajennettu mittaussarja tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähkökonelaboratoriossa. Tärkein mittalaite laboratoriossa oli tehoanalysointilaite. Mittaustuloksista tehtävät havainnot olivat hyötysuhteen osalta se, että erot ennen ja jälkeen huollon olivat erittäin pieniä. Häviökomponenteista rautahäviöt olivat hieman pienempiä huollon jälkeen. Mekaaniset häviöt nousivat huomattavasti jälkeen. Staattorin lämpöhäviöt olivat pienempiä. Tehokerroin <math>\cos \phi</math> oli hieman suurempi. Moottorin kilpiarvot olivat standardin mukaisissa toleransseissa.</p> <p>Oletamus, että käyttöältään vanhahkon esimerkkikoneen ominaisuuksissa olisi merkittäviä muutoksia huollon jälkeen, ei juurikaan pitänyt paikkaansa.</p>	
Avainsanat	oikosulkumoottori, huolto, käänitys, laakeri, staattori, roottori

Author Title	Jari Kauppi Cage Induction Motor Maintenance and Measurement
Number of Pages Date	47 pages + 5 appendices 9 October 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Jari Ijäs, Senior Lecturer Sakari Alila, Managing Director
<p>This thesis explores cage induction motor maintenance and measurement. The work was done for a repair shop Sähkö-Alila in Kotka. An old example motor was used in this study. The type of this motor was induction machine. Special attention was given to measurements before and after service. New stator windings were made at the repair shop.</p> <p>The aim of this thesis was make a guide for new employees in the repair shop. A picture series of maintenance and measurement is included in the study. Special considerations and techniques were found for the service and profitability and productivity is taken into consideration.</p> <p>An extended series of measurements were made and these were carried out at the Metropolia University of Applied Sciences laboratory of electrical motors. The main measure instrument was power analyzer. The results of the measurements concerning the efficiency showed that differences before and after service were extremely small. As regards the iron losses, these were smaller after the service. Mechanical losses were bigger. Stator thermal losses were smaller afterwards. Power factor <math>\cos \phi</math> was bigger after the service. The tolerances of rated value correspond to the standard.</p> <p>The assumption that an old example motor has significant differences in the features after service appears to be mainly untrue.</p>	
Keywords	cage induction motor, maintenance, winding, bearing, stator, rotor

## Sisällys

### Tiivistelmä

### Abstract

### Sisällys

### Lyhenteet

<b>1 Johdanto</b>	1
<b>2 Sähkömoottorit</b>	2
2.1 Teollisen tuotannon historia	2
2.2 Erilaisia sähkömoottoreita	3
2.3 Sähkönjakelun ja -käytön kehittyminen	4
2.4 Oikosulkumoottorin rakenne	4
2.5 Oikosulkumoottorin toiminta	5
2.6 Oikosulkumoottorin asennus	6
2.7 Oikosulkumoottorin liittäminen verkkoon	7
<b>3 Oikosulkumoottorin huolto</b>	10
3.1 Oikosulkumoottorin huoltotoimenpiteet	10
3.2 Oikosulkumoottorin purkaminen	12
3.3 Huoltotoimenpiteet purkamisen jälkeen	16
3.4 Staattorin käämintä	17
3.5 Oikosulkumoottorin kokoaminen	20
<b>4 Oikosulkumoottorien huoltoon liittyvät mittaukset</b>	26
4.1 Mittaukset ennen huoltoa	26
4.2 Tyhjäkäyntimittaukset huollon jälkeen	29
<b>5 Huollon vaikutukset esimerkkimoottorin ominaisuuksiin</b>	30
5.1 Ennen ja jälkeen huollon tehdyt mittaukset	30
5.2 Käämien resistanssit ja roottoriipiirin kunto	32
5.3 Eristysvastusmittaus	34

5.4	Tyhjäkäyntimittaus	35
5.5	Lukitus- eli oikosulkumittaus	38
5.6	Kuormituskoe ja lämpenemä	39
5.7	Jäähtymiskäyrä	42
5.8	Häviökomponenttien ja hyötysuhteen määrittäminen	44
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>46</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>47</b>
	<b>Liitteet</b>	
	Liite 1. Sähkökonekorjaamon työvaiheet ja työkortti	
	Liite 2. Mittaukset ennen huoltoa	
	Liite 3. Laskelmat ennen huoltoa	
	Liite 4. Mittaukset huollon jälkeen	
	Liite 5. Laskelmat huollon jälkeen	

## Lyhenteet

D	kolmiokytkentä
D-pää	moottorin akselipää
f	taajuus Hz
F <sub>1</sub>	yhteisen tyhjäkäyntikokeen aikana vaakaan vaikuttava voima kilopondi, yhden kilogramman massaan kohdistuva painovoima
I <sub>N</sub>	nimellisvirta
IP	International Protection; kotelointiluokka
n	pyörimisnopeus, revolutions per minute rpm, kierrosta minuutissa 1/min tai r/min
N-pää	moottorin vapaa pää
p	napapariluku
R <sub>ISO</sub>	eristysvastus Ω
s	slip; jättämä
U <sub>N</sub>	nimellisjännite
Y	tähtikytkentä

## 1 Johdanto

Työn varsinainen käytännön osuus toteutettiin Sähkö-Alila Ky (Kotka) tiloissa keväällä 2012. Työn tuloksia on tarkoitus hyödyntää sähkökonekorjaamon kehittämisessä, ja sitä on tarkoitus käyttää esimerkiksi uusien työntekijöiden perehdyttämisessä sähkökonekorjaamon toimintaan ja työtapoihin.

Tämä insinööri työ käsittelee sähkömoottoreita. Aluksi kerrotaan lyhyesti teollisen tuotannon historiasta. Työssä käsitellään myös kestäväää kehitystä. Lisäksi kerrotaan, millaisia sähkömoottoreita on olemassa. Pääsisältönä ovat oikosulkumoottorit, joista esitellään niiden rakennetta, toimintaa, asennusta, liittämistä verkkoon ja huoltoa. Kokeellisesti tutkittiin Metropolia Ammattikorkeakoulun omistamaa epätahtimoottoria. Liukurengaskone huollettiin ja käämittiin uudelleen sähkökonekorjaamossa.

Moottori otettiin tutkittavaksi, koska se on käyttöikältään jo vanhahko. Esimerkiksi eristykset heikkenevät ajan kuluessa. Oletetaan, että uusilla käämityksillä ja huolloilla olisi merkittävää vaikutusta mitattuihin ja laskettuihin ominaisuuksiin. Tutkittiin myös, onko moottorin uudelleen kääminnällä vaikutusta häviöihin tai suoritusarvoihin. Suoritusarvot ilmenivät esimerkiksi rutiinitesteissä ja erillishäviömittauksissa. Nämä mittaukset tehtiin siis ennen ja jälkeen huollon.

Työssä käsitellään oikosulkumoottorin huoltoa ja mittausta yleisesti. Seuraavaksi tarkastellaan esimerkkimoottoria, jolle tehtiin huolto ja uudelleen käämitys, sekä selvitettiin häviöt ja suoritusarvot ennen ja jälkeen näiden toimenpiteiden.

## 2 Sähkömoottorit

### 2.1 Teollisen tuotannon historia

Jo pelkästään elääkseen fyysisesti ihmisen on ollut pakko tehdä työtä eli muuttaa ympärillään olevan maailman aineellista järjestystä vastaamaan paremmin ihmisen tarpeita. Työ ei yleensä ole sattumanvaraista vaan ajattelun ohjaamaa tietoista toimintaa ympärillä olevan ainejärjestelmän hyötyarvon lisäämiseksi periaatteessa pysyvällä tavalla.

Kun välineet kehittyivät, ihmiselle jäi aikaa muuhunkin kuin perustarpeittensa tyydyttämiseen. Perustarpeisiin kulutettiin energiaa vähemmän kuin olisi mahdollista sitä tuottaa. Yhteisön tehtäviä voitiin jakaa ja valita, kun muodostui ylijäämää. Myös esimerkiksi käsityöläiset, jotka vain välillisesti palvelevat ihmisen fyysistä hyvinvointia, ja papit, filosofit, taiteilijat ja poppamiehet, jotka edustavat aineetonta henkistä kulttuuria, voivat toimia mitä moninaisimmissa tehtävissä, kun heidät päästetään toimimaan vapaasti. Tältä pohjalta ovat päässeet kehittymään erilaiset kulttuurit. Keskiaikana tavoiteltiin täydellisyyttä, mikä lisäsi aineellista hyvinvointia, mutta hyöty- laatu- tai talousajattelua ei tunnettu.

Runsaasti yli tuhat vuotta on tuuli- ja vesimyllyjä käytetty veden nostamiseen ja viljan jauhatukseen. Nämä keinot ovat lähtöisin Itämailta, kun taas vesivoima teollinen käyttö esinetuotantoon alkoi vasta 1770-luvun Englannissa. Tällöin mahdollistui koneellinen tuotantoprosessi, mutta teollinen vallankumous ei voinut perustua vesivoimaan. Sen sijaan höyrykone, joka oli jo 1800-luvun alussa toimiva teollisuuden voimakone, aloitti höyryvoiman vuosisadan, eli teollisessa tuotannossa päästiin tuottamaan energiaa selvästi tehokkaammin kuin vesivoiman aikana. Kehitys ei kuitenkaan pysähtynyt tähän, vaan sähkömoottori aloitti uuden ajan sivuuttaen höyrykoneen 1920-luvulla.

Sytä, miksi sähkömoottorit ovat olleet tärkein käyttövoima teollisuudessa nykyaikaan asti, on monia: sähköverkko toimiva energianjakelussa, sähköteho on nopeasti aseteltavissa, sähkömoottorit ovat hyvin ohjattavissa, ne ovat ympäristöystävällisiä, ja elektronisen sähkökäytön hallinnassa ovat ylivoimaisen hyviä ominaisuuksia verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Sähkömoottoreita käytetään nykyään monenlaisten työkoneiden käyttövoimana. [1, s. 10.]



Kestävän kehityksen perusehtona on biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien toimivuuden säilyttäminen sekä ihmisen taloudellisen ja aineellisen toiminnan sopeuttaminen pitkällä aikavälillä luonnon kestokykyyn. Sähkömoottorien käyttö on hyväksi kestäväälle kehitykselle. Sähkömoottorit ovat erittäin pitkäikäisiä, ja oikein huollettuna niiden käyttöikä jatkuu kauas tulevaisuuteen. Sähkömoottoreilla ei ole ympäristöä vahingoittavia päästöjä. Ainoat ympäristövaikutukset aiheutuvat moottorin valmistuksesta ja huollosta. Myös se, millä tavoin moottorin kuluttama sähkö tuotetaan, vaikuttaa kestävään kehitykseen. [2.]

## 2.2 Erilaisia sähkömoottoreita

Sähkömoottori on kone, joka muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin toiminta perustuu magneettikentän ja virrallisen johtimen väliseen vuorovaikutukseen. Koneen magneettikenttä synnytetään sähkömagneettisesti ns. magnetointikämmityksen avulla. On myös moottoreita, joissa käytetään kestmagneetteja. Kestomagneetikoneet ovat yleensä tahtikoneita. Nämä kestmagneettisovellukset ovat usein suhteellisen pienitehoisia. Näitä sovelluksia ovat esimerkiksi sähköautot.

Sähkömoottoreita ovat tasasähkö- ja vaihtosähkömoottorit. Tasasähkömoottorit jaetaan kytkentänsä perusteella seuraavasti: vierasherätteinen moottori, sivuvirtamoottori, sarjamoottori ja kompondimoottori. Vierasherätteiset ja sivuvirtamoottorit soveltuvat mm. työstökoneisiin ja hisseihin. Sarjamoottori soveltuu mm. käyttömoottoriksi ajoneuvoihin (raitiovaunu) ja nostureihin. Tasasähkömoottoreiden kierroslukua voidaan säätää ankkurijännitettä tai magneettikentän voimakkuutta muuttamalla.

Yksivaiheisista vaihtosähkömoottoreista tärkein on ns. yleismoottori, jota käytetään mm. kotitalouskoneissa ja sähkötyökaluissa. Myös pienitehoisia yksivaiheisia epätahti- ja tahtimoottoreita käytetään. Kolmivaiheisia epätahti- eli asynkronimoottoreita ovat liukurengasmoottori ja oikosulkumoottori. Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa, varmakäyttöisyytensä ja halpuutensa vuoksi yleisin sähkömoottori. Kolmivaiheisia tahti- eli synkronimoottoreita käytetään suuritehoisissa teollisuuskäytöissä, joissa vaaditaan moottorilta vakionopeutta ja suurta vääntömomenttia. [3, s. 194.]

### 2.3 Sähkönjakelun ja -käytön kehittyminen

Sähkomoottoreiden kehitys on kulkenut rinnan generaattoreiden kehityksen kanssa. Vaihtosähkön käytön ja suurten sähköverkkojen yleistyessä on sähkomoottorista tullut tärkein teollisuuden ja kotitalouden voimakone.

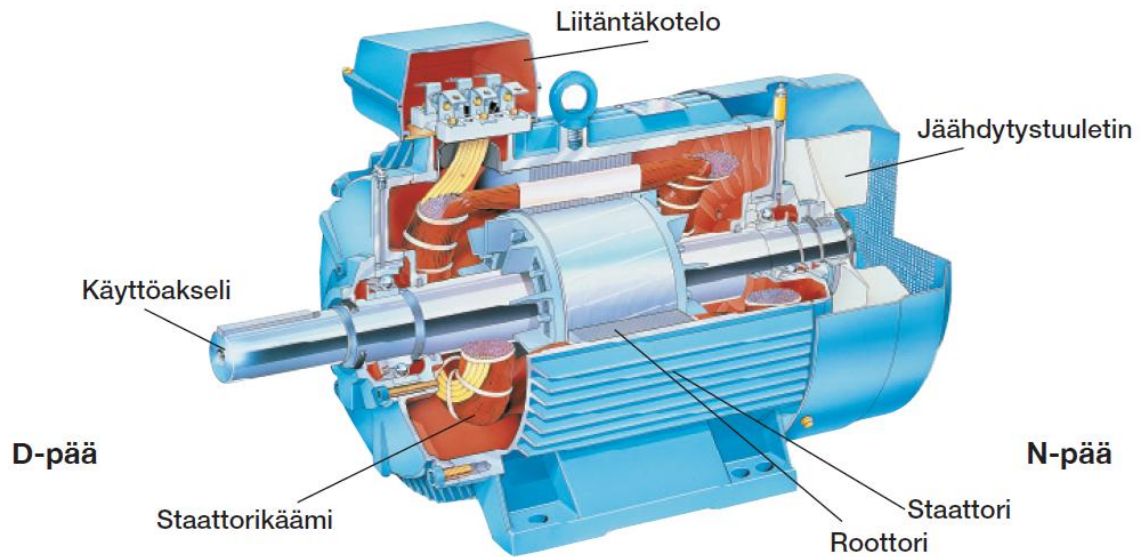
Sähkomoottoreiden yhteydessä nousee esiin usein myös sähkökäytöt. Niiden avulla voidaan ohjata moottorin toimintaa tarkasti ja taloudellisesti. Ne voivat ohjata oikosulkumoottoreiden kierroslukua ja vääntömomenttia. Säädettävä sähkökäyttö on yleensä toteutettu taajuusmuuttajalla.

Taajuudenmuuttajalla voidaan siis ohjata moottorin kierroslukua ja vääntömomenttia muuttamalla syöttöverkon kiinteä taajuus ja jännite portaattomasti muuttuviin arvoihin. Toiminta perustuu siihen, että syöttöverkko on liitetty tasasuuntaajaan, joka muuttaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Tasajännite on helpompi säätää halutunlaiseksi. Se suodatetaan siksi välipiirissä, ennen kuin vaihtosuuntaaja muuttaa tasajännitteen uudeksi vaihtojännitteeksi, jonka taajuus vaihtelee.

Yksinkertaisempi tapa on käyttää suoraa sähkökäyttöä, jossa syöttöjännite vain kytetään tai katkaistaan. Kuormituspiste määräytyy kuorman mukaisesti. Varsinaista ohjausta ei ole.

### 2.4 Oikosulkumoottorin rakenne

Kuvassa 1 (ks. seur. s.) esitellään oikosulkumoottorin rakenne ja tärkeimmät osat. Poikkileikkauksessa voidaan nähdä moottorin D-pää eli akselipää sekä N-pää eli vapaa pää. Tuuletin on yleensä asennettu N-päähän, mutta se voi olla myös D-päässä. Kuvassa on pyörivä käyttöakseli, johon myös roottori häkkikäälämityksineen ja oikosulkenkaineen kuuluu. Laakerit ovat kiinni kilvissä, jotka ovat moottorin kummassakin päissä.



**Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakennekuva**

Moottorin rungon sisäpuolella on staattoripaketti, jonka urissa on kolmivaiheinen staattorikäänitys. Käämien päät on tuotu liitinkotelon liitinruuveihin. Roottorissa on häkkikäänitys, joka muodostuu uriin sijoitetuista kupari- tai alumiinitangoista ja roottorin päissä niitä yhdistävistä oikosulkurenkaista. Rungon päissä ovat laakerikilvet. Suurimmissa moottoreissa laakerikilvissä on voitelukanavat ja laakereiden suojana erilliset laakerikannet. Pienten moottoreiden (noin 10 kW) runko on kevytmetallia (silumiini) ja suurten valurautaa. Moottorin jäähdyttämiseksi on akselille kiinnitetty muovinen tai kevytmetallinen tuuletin, joka imee ilman tuuletinkotelon säleikön kautta ja työntää sen moottorin pituussuunnassa olevien jäähdytysripojen väliin.

## 2.5 Oikosulkumoottorin toiminta

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu luonnonlakiin: magneettikentässä olevaan virraliseen johtimeen kohdistuu voimavaikutus. Staattorikäänityksen kolmivaiheinen vaihtovirta synnyttää staattoriin pyörivän magneettikentän, jonka pyörimisnopeus  $f = 50$  Hz:n verkossa on 3 000/min. Tämä silloin, kun moottorityypille ominainen napapariluku  $p=1$ , sekä kun kyseessä on tahtimoottori. Nopeus muuttuu napalukujen mukaan. Moottorin pyörimisnopeus noudattaa kaavaa

$$n = f / p = (50 / 1) * 60 = 3\ 000 \text{ rpm} \quad (1)$$

Magneettikentälle ominaista on tahtinopeus, joka voidaan laskea myös kaavalla 1 (ks. ed. s.). Tahtimoottorissa akselin pyörimisnopeus on sama kuin sähköverkon kentän taajuuden määräämä pyörimisnopeus.

Epätahtimoottorissa on ns. *jättämä*. Moottorin pyörintänopeuteen vaikuttaa jättämä, joka määräytyy kuormituksen mukaan. Magnetointi pyörii sähköverkon taajuuden määräämällä nopeudella. Moottorin akseli pyörii jättämän verran hitaammin, kuin magnetointi (sähköverkon taajuus) määräisi.

Pyörivän magneettikentän leikatessa roottorisauvoja niihin syntyy jännite, joka aiheuttaa roottorisauvoihin suuren virran. Roottorisauvojen magneettikentät ja pyörivä magneettikenttä kohdistavat roottorisauvoihin voimat, jotka pyörittävät roottoria magneettikentän pyörimissuuntaan.

## 2.6 Oikosulkumoottorin asennus

Nykyään sähkömoottorit ovat kansainvälisten suositusten mukaisia, ja näin ollen eri moottorivalmistajien valmistamat moottorit ovat keskenään vaihtokelpoisia. Asennusmitat on kansainvälisesti standardisoitu. Standardit käsittävät sarjan akselinkorkeuksia, jalkamittoja, akselimittoja, laippamittoja ja tehosarjan. Koneen arvokilpeen on leimattu kokomerkitä. Jotta moottorit voidaan asentaa erilaisiin käytettäviin koneisiin, varustetaan ne joko kiinnitysaloilla (tassuilla) tai laipoilla. Sähkömoottorin asennusasento ja rakennemuoto, eli sovitelmä, ilmaistaan tunnuksella. Näin voidaan varmistaa esimerkiksi se, että moottori tulee asentoon, jossa se toimii häiriöttä. Häiriöt vältetään esimerkiksi siten, että vedenvuotoreiät ja rasvanpoistoaukko tulevat alaspäin.

Asennuksessa huomattavaa on myös se, että moottorin kotelointiluokka (IP) on oltava sopiva. Pienten standardimoottorien suojausluokka on tavallisesti IP 54. Toinen käytössä oleva suojausluokka on IP 23, joka tarkoittaa kosketussuojattua ja vesipirskettä vastaan suojattua rakennetta. Suurten moottoreiden suojaustavat on valittava käyttöpäikällä vallitsevien olosuhteiden mukaan. Pölyisissä ja kosteissa ympäristöissä sekä ulkona olisi aina käytettävä täysin suljettuja moottoreita, mutta muissakin paikoissa ne ovat suositeltavia, koska ne ovat vähemmän alttiita mekaaniselle vahingoittumiselle kuin avoimet moottorit. Moottorin yhteyteen kuuluvien kojeiden, kuten tähtikolmiokytkimien

moottorinsuojajakytkimien ja moottorien liitântäkoteloiden koteloinnin, tulee noudattaa samoja sääntöjä kuin moottoreiden koteloinnin.

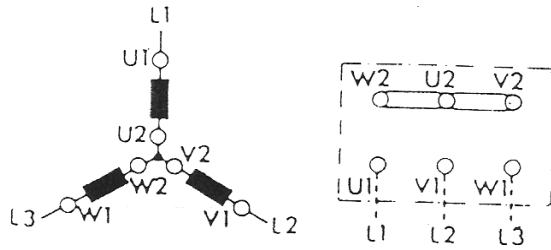
Oikosulkumoottorin asennuksessa on hyvä ottaa huomioon seuraavat asiat: uusi moottori tarkistetaan pakkauksesta purkamisen jälkeen, ja roottorin täytyy pyöriä helposti ja äänettömästi, kun sitä pyöritetään akselin päästä. Jos moottori on joutunut olemaan kosteissa olosuhteissa käyttämättömänä pitkän aikaa, moottorin käämitys on saattanut kostua siinä määrin, että sen eristysvastus on laskenut liian alhaiseksi. Tämän vuoksi kostea kone tulee kuivata ennen käyttöönottoa. Sähkökonekorjaamon kannattavuuteen vaikuttaa oleellisesti varastohyllyissä seisovien moottorien määrät ja koot. Pienet moottorit eivät vanhene hyllyssä. Nimellisteholtaan yli 37 kW moottoreiden laakerointi kärsii seisottamisesta. Toinen kannattavuuteen vaikuttava asia on vaihteleva kuparin hinta.

Akselinpää puhdistetaan ennen voimansiirtolaitteen (hihnapyörä, akselikytkin, hammaspyörä) asennusta akselille. Työn aikana ei saa vaurioittaa moottorin laakereita. Suorassa kytkennässä moottorin ja työkoneen akseleiden keskiviivan on oltava tarkasti samalla suoralla. Mitä tarkemmin kytkimen puoliskojen asennus on tehty, sitä tasaisemmin moottori käy, ja sitä hitaammin laakerit kuluvat.

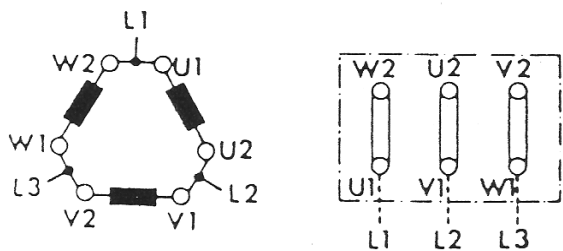
Hihnavälityksessä (latta- tai kiilahihna) akselit on asennettava yhdensuuntaisiksi ja hihnapyörät samalle suoralle linjalle (tarkistus esimerkiksi teräsviivaimella tai langalla). Hihna on kiristettävä oikealle kireydelle. Hammaspyörävälityksessä pyörät on asennettava niin, että hampaiden kosketuskohtana on jakoympyröiden sivuamispiste.

## 2.7 Oikosulkumoottorin liittäminen verkkoon

Oikosulkumoottorin liitântäkotelo on sijoitettu moottorin päälle. Koteloa voidaan yleensä kääntää niin, että liittäminen on mahdollista moottorin kummaltakin puolelta. Laippakoneen ollessa kyseessä voi kotelo olla myös sivulla tai alla. Kotelossa on tiivisteholkit tai laippa kaapelin päättämisosien kiinnittämistä varten. Oikosulkumoottori voidaan yleensä kytkeä kahdelle jännitteelle. Tämä johtuu siitä, että staattorikäämit voidaan kytkeä kahdella tavalla: tähtikytkentä (Y) kuva 2 ja kolmiokytkentä (D) kuva 3 (ks. seur. s.).



Kuva 2. Y-kytkentä



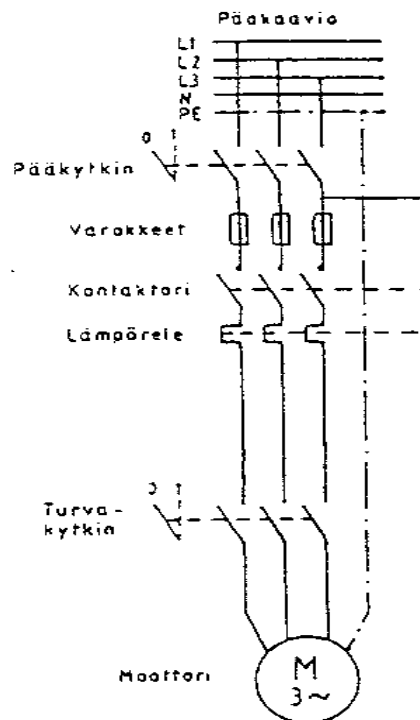
Kuva 3. D-kytkentä

Oikosulkumoottorin liittämiseksi verkkoon on tarkasteltava moottorin arvokilpeä. Siitä käy ilmi esimerkiksi seuraavat tiedot: antoteho (akseliteho), ottoteho (laskemalla), tehokerroin, pyörimisnopeus, tähti- ja kolmiokytkennän jännitteet/virrat, taajuus, hyötysuhde (laskemalla), sarjanumero + laakerien nro, jättämä, kotelointiluokka (IP), eristysluokka ja valmistajan nimi. Arvokilvestä on tarkistettava, että käyttöjännite ja taajuus vastaavat sähköverkon jännitettä ja taajuutta. Johtimia kytkettäessä on varmistettava, että staattorikämmityksen kytkentä vastaa sähköverkon jännitettä (tähti- vai kolmiokytkentä). Tarkistetaan myös, että moottorin liitänäkoteloon tulee myös suojajohdin (kelta-vihreä), ja että kaikki liittimet on kiristetty. Nollajohdinta (N) ei käytetä, koska kuormitus on symmetrinen.

Oikosulkumoottorin sisäinen kytkentä on tehty siten, että kun verkon vaiheet L1, L2, L3 kytketään tässä järjestyksessä moottorin liittimiin U1, V1, W1, niin akselin pyörimissuunta on myötäpäivään katsottuna D -päästä. Tätä sääntöä noudatetaan myös silloin, kun moottori rakenteellisista syistä (esim. tuulettimen vuoksi) voi pyöriä vain toiseen suuntaan. Jos moottorille voidaan sallia vain toinen pyörimissuunta, niin tämä käy ilmi arvokilvestä. Asennuksen yhteydessä tarkistetaan, että moottorin pyörimissuunta on

haluttu (käytettävän laitteen kannalta). Jos se on väärä, vaihdetaan liitinkotelossa kahden syöttöjohtimen (kahden eri vaiheen) paikkaa keskenään.

Oikosulkumoottorin kytkentä tarvitsee toimiakseen tarkoituksenmukaisesti lisäksi myös erilaisia kojeita. Niin sanottua ohjausvirtapiiriä, joka on tärkeä moottorin ohjauksessa, ei käsitellä. Päävirtapiiri sen sijaan sisältää muutamia huomioarvoisia seikkoja.



Kuva 4. Oikosulkumoottorin suora kytkentä verkkoon

Kuvassa 4 on esitetty oikosulkumoottorin suora kytkentä. Tässä kyseisessä päävirtapiirissä kontaktori ohjaa moottorin käyntiä, ja lämpörele suojaa ylikuormitukselta. Pääkytkimellä saadaan kaikki virtapiirit jännitteettömiksi. Päävirtapiiriin kuuluvat myös kiskot ja turvakytkin.

Turvakytkintä voidaan kutsua myös erotuskytkimeksi. Erotuskytkin on moottorin läheisyydessä. Kytkin tarvitaan tapauksessa, jolloin käytön ohjauspaikalta ei ole esteetöntä näköyhteyttä moottoriin ja sen työkoneelle. Erotuskytkin estää näin vahinkokäynnistyksen.

Virtapiirissä on myös varakkeet. Kontaktori valitaan moottorin tehon ja virran perusteella, lämpörele valitaan moottorin nimellisvirran mukaan ja sulakkeet moottorin

tyypin perusteella. Päävirtapiirissä voidaan käyttää myös moottorinsuojakytkintä, joka korvaa varokkeet, kontaktorin ja lämpöreleen.

Yksinkertaisin tapa käynnistää oikosulkumoottori on siis kytkeä verkkojännite suoraan staattorin liitännänapoihin moottorikytkimen avulla. Käynnistysvirta nousee kuitenkin suureksi suorassa käynnistyksessä, joten tällä käynnistystavalla on omat rajoituksensa.

Jos moottorin käynnistysvirta suorassa käynnistyksessä nousee suuremmaksi kuin verkko sallii, on olemassa muutama menetelmä käynnistysvirran rajoittamiseksi. Voidaan käyttää joko Y/D-käynnistintä tai käynnistysmuuntajaa. Tähtikolmiokäynnistyksellä moottori käynnistetään käämien ollessa tähteen kytkettynä, ja kun nimellinen pyörimisnopeus saavutetaan, vaihdetaan kytkentä kolmioon. Käynnistysvirta tähtikytkennässä on noin 30 % vastaavasta virrasta kolmiokytkennässä. Y/D-käynnistystä voidaan käyttää vain silloin, kun moottorin käyttöjännite D-kytkennässä on verkkojännitteen suuruinen. Y/D-käynnistimen käyttöä voidaan perustella sen edullisella hinnalla verrattuna taajuusmuuttajan hintaan.

Käynnistysmuuntaja on jäämässä pois käytöstä. Nykyään käytetään yleisemmin pehmokäynnistimiä ja taajuusmuuttajia.

### **3 Oikosulkumoottorin huolto**

#### **3.1 Oikosulkumoottorin huoltotoimenpiteet**

Oikosulkumoottori vaatii yksinkertaisen rakenteensa ansiosta vain vähän huoltoa. Valvonta kohdistuu pääasiassa laakereiden toimintaan ja voiteluun. Myös aistinvarainen arvio voi johtaa jatkotoimenpiteisiin. Valvonta, jossa laakereita kuunnellaan ja mitataan, voidaan tehdä myös käyttöpaikalla. Moottoreiden huolto tehdään yhä enenevässä määrin sähkökonekorjaamoissa. (Ks. Sähkökonekorjaamon työvaiheet ja Työkortti, liite 1.)

Yleisimmät syyt, miksi koneet tuodaan huoltoon, ovat moottorien ikääntyminen ja se, että halutaan varmistaa esimerkiksi tehtaissa tuotantoprosessin keskeytyksetön toiminta. Tehtaiden kesäseisokit ovatkin kiireistä aikaa sähkökonekorjaamoissa.



Laakereiden kunto voidaan todeta kuuntelemalla laakerin käyttöäntä stetoskoopilla tai tärinämittari sauvalla (kuva 5). Sauvan mittaamat suureet ovat mm/s ja gE. Kun laakeri on kunnossa, kuuluu tasaista surinaa. Jos laakeriääni on kitisevää (voitelu puutteellista) tai epätasaista (laakerissa likaa), laakeri on vaihdettava. Vioittunut laakeri kuumenee, ja laakerin ulkokehä voi lähteä pyörimään laakerikilven pesässä. Vaurio korjataan vaihtamalla laakeri ja laakerikilpi. Pienissä moottoreissa käytetään *kertakäyttöisiä* tiivistelevyisiä laakereita. Suuremmissa moottoreissa on voitelunipat, joiden kautta voiteluaine puristetaan laakereihin. Laakereita ovat kuulalaakerit ja rullalaakerit. On myös laakereita, jotka sopivat paremmin tapauksiin, joissa esiintyy ns. laakerivirtoja.



**Kuva 5. Tärinämittari sauva**

Tärinä, korkeat ja vaihtelevat lämpötilat, kosteus, syövyttävät kaasut, tiheät käynnistykset ja vastaavat rasitukset voivat aiheuttaa moottoriin myös sähköisiä vikoja. Varsinaisesti sähkövicioista aiheutuneiden vikojen havaitsemisen jälkeen voitaisiinkin puhua korjauksesta. Tyypillisiä vikoja ovat eristyksen peittämisestä aiheutuvat käämisulut ja runkokuodot sekä virtapiirikatkokset. Staattorikämin käämisulut (sisäiset oikosulut) ja runkokuodot aiheuttavat paikallista kuumentumista, joka voi johtaa käämityksen

palamiseen. Myös mekaanisia sähkökoneongelmia, joissa tarvitaan esimerkiksi kaasutai sähköhitsausta ja mahdollisesti metallisorvausta, voidaan kutsua korjaustapauksiksi.

Laakerinvaihdon yhteydessä moottori puretaan (haalataan), käämitykset tarkistetaan ja kaikki osat puhdistetaan. Moottorin likaisuudesta riippuen puhdistus tehdään kuivapuhdistuksena (harjaus tai paineilmapuhallus) tai liuotinpesuna. Pesun jälkeen moottorin käämitykset kuivataan, ja mitataan niiden eristysten kunto. Moottorit kootaan ja koekäytetään. Lopuksi maalipinnaltaan huonot moottorit ruisku maalataan.

### 3.2 Oikosulkumoottorin purkaminen

Jotta huolto tai korjaus olisi mahdollinen, on moottori purettava eli haalattava. Purkamisen jälkeen päästään tekemään esimerkiksi laakerien vaihto ja staattoriin liittyvät toimenpiteet. Käsitellään ensin laakerien vaihto.

Kuvasta 1 (ks. s. 5) nähdään, että D-pää tarkoittaa moottorin päätä, johon työkone kiinnitetään. D-päässä on esimerkkikoneessa laippakiinnitys. N-pää tarkoittaa päätä, jossa on tuuletin.

D-pään laakerin ulkorengas on tiukalla sovitteella laakerikilvessä. N-pään laakerin sovitte laakerikilpeen on löysä. Laakeripesässä on aksiaalinen liikkumavara, johon on asetettu aaltojousi poistamaan laakerien omat välykset.

Kuvasta 6 (ks. seur. s.) nähdään, miten moottorista poistetaan ensimmäisenä N-pää, joka on löysempi. Tuuletin ja sen kotelo poistetaan. Seuraavaksi irrotetaan kilven ruuvit. Kilpeen merkitään merkki, jolla saadaan koottaessa kilpi samaan asentoon runkoon nähden. Tämä siksi, että vältetään kaikenlaiset jännitykset ja resonanssit. Asento, jossa kilpi on ollut mahdollisesti vuosikausia, on paras. Merkki voidaan tehdä tussilla, mutta pesussa merkki saattaa hävitä. Suositeltavampaa olisikin tehdä kuparituurnalla ja vasaralla pieni pistemerkki runkoon ja kilpeen kohdakkain.



**Kuva 6. Kilven ruuvien irrotus**

N-kilpi irrotetaan vasaralla ja ruuvitaltalla tai puukolla vääntämällä (kuva 7). Tässä täytyy varoa vahingoittamasta laakeria. Lisäksi varotaan särkemästä kiinnityskorvaketta. Se voi särkyä, jos ruuvitaltalla tai puukolla vääntämisen sijaan yritetään irrottamista esimerkiksi vasaralla kiinnityskorvaketta lyöden.



**Kuva 7. Kilven irrotus**

D-kilpi irrotetaan ruuvitaltalla avaten (kuva 8). Laipan sisäkehällä on kaksi talttapää ruuvia, jotka pitää avata (työvaihe 1). Nämä talttapääruuvit ovat käytössä vain silloin, kun kyseessä on laippakiinnitteinen moottori. Lisäksi kilpi merkitään (tuurnalla, ks. 3.2, s. 12), jotta se saadaan koottaessa samaan asentoon runkoon nähden.



**Kuva 8. Kilven irrotus ruuvitaltalla**

D-kilpi irrotetaan räikkävaimella laipan läpi avaten (kuva 9). Huomataan, että talttapääruuvien lisäksi laipan ulkokehällä on räikällä avattavat pultit. Työvaihe 2 pitää tehdä D-kilven irrottamiseksi.



**Kuva 9. Kilven irrotus räikkävaimella**

Nyt voidaan irrottaa roottori varovasti käämejä vahingoittamatta hallin siltanosturia apuna käyttäen. Siltanosturin käyttö riippuu koneen koosta. Kun kyseessä on pienet koneet, roottori voidaan poistaa myös nostamalla käsin.

Kuvissa 10 ja 11 (ks. seur. s.) voidaan havaita, miten laakerit poistetaan roottorista. Ennen kuluneiden laakereiden poistoa merkitään laakereiden paikat akseliin, jotta uudet laakerit tulevat oikeisiin paikkoihin. Laakerit poistetaan käyttämällä ulosvedintä, jolla laakerit voidaan poistaa vahingoittamatta. Laakerit poistetaan aina roottorista, ei koskaan kilvestä. Ulosvedin voi olla joko mekaaninen kierrettävä (kuva 10) tai isohko hydraulinen ulosvedin (kuva 11, ks. seur. s.).



**Kuva 10. Laakerien ulosveto mekaanisesti kiertämällä**





**Kuva 11. Laakerien ulosveto hydraulisesti**

### 3.3 Huoltotoimenpiteet purkamisen jälkeen

Moottorista irrotetaan roottoriakseli, ja pestään pelkkä staattorirunko kilpien kanssa tai ilman. Jos pestään runko kilpien kanssa, aukot ja reiät tukitaan, jotta pesuvesi ei pääse staattorikäämitykseen. Liuotinaine suihkutetaan, ja sen annetaan vaikuttaa hetken aikaa. Pesu tapahtuu painepesurilla. Jos pestään pelkkä staattorirunko ilman kilpiä, käytetään painepesuria, tai puhallusilmaa.

Puhdistus tapahtuu pesukoneessa osakohtaisesti (pienikokoiset rungot, kilvet ym.), jos moottori on purettu. Staattorirunkoa käämitysten kanssa ei yleensä laiteta pesukoneeseen.

Jossain tapauksessa voidaan myös pestä kokonainen moottori painepesurilla. Tämä tehdään sillä tavalla, että kilpiä ei ole irrotettu, ja liitäntäkotelo on tukittu pesuveden sisään tunkeutumiselta.

Kunnossa oleva staattorikäänitys ei saa kostua kovin paljon. Käänitys voidaan kuivattaa uunissa.

#### Käämien kunnon tutkiminen

Käämien kuntoa tutkitaan tekemällä staattorikäänitykselle käämiresistanssimittaus, eristysvastusmittaus ja toistoaltokoestus. Jos käänitys todetaan olevan kunnossa mittauksin, voidaan siirtyä oikosulkumoottorin kokoamiseen (ks. 3.5). Jos käänitys ei ole kunnossa, eikä sitä voi korjata, puretaan entinen käänitys ja tehdään uusi (ks. 3.4).

#### 3.4 Staattorin käänintä

Uusi käänitys tehdään silloin, kun vanha käänitys on huonokuntoinen, eikä sitä voida enää korjata. Ensimmäinen käänityksen purkutapa on polttouunia käyttäen. Polttouunissa kuparikäämit heikkenevät, ja ne voidaan poistaa helpommin. Toinen tapa on vasaraa ja talttaa käyttäen katkaista staattorirungon toisesta päästä kaikki staattoriurista ulostulevat kuparivyyhdet eli käänityksen otsa kuvan 12 mukaisesti. Seuraavaksi erityisellä hydraulisella kääminirrotuskoneella vedetään käämit irti toisesta päästä kuvan 13 (ks. seur. s.) tapaan. Näin kuparikäämit lähtevät pois staattorin urista.



**Kuva 12. Käänityksen otsa on katkaistu**



**Kuva 13. Käämit vedetään irti urista**

Vanhan käämityksen poistamisen jälkeen staattorin urat puhdistetaan huolellisesti harjaamalla, kaapimalla ja paineilmalla.

Vyyhdeissä olevat lankakierrokset lasketaan. Uudet vyyhdet tehdään vyyhtikoneessa, johon on syötetty kierrosten lukumäärät ja muita kyseisestä koneesta tarvittavia tietoja kuten koko. Vyyhtikoneessa käämit kelataan koneellisesti oikeisiin kierrosmittoihin.

Staattorin uriin asennetaan ensin eristeet. Näitä ovat uraeristys, joka on suljettu sulku-liuskalla. Käämivyyhdet asennetaan staattorin uriin.





**Kuva 14. Käämivyvyhdet, uraeristys (sininen paperi) ja taustalla vyyhtikone**

Vyyhtien asentamisen jälkeen tehdään staattorin kytkentäpään kytkennät. Staattorin vastakkaisella puolella (kuvassa 15 pöytää vasten) ei ole kytkettäviä liitoksia. Kytkennät tehdään hitsaamalla fosforikuparilla. Laitetaan eristesuojat liitoskohtaan.



**Kuva 15. Kytkennät hitsataan ja eristetään**

Seuraavaksi tehdään mittaus, jolla varmistetaan että käämitys on kunnossa. Mittaukseen tehdään käämiresistanssi-, eristysvastus- ja syöksyaaltomittaus.

Käämitys sidotaan nauhalla. Sidontaan käytetään polyesterinauhaa, jolloin käämitys pysyy paikallaan. Lisäksi tehdään uusintamittaus.



**Kuva 16. Nauhan sitominen**

Seuraava vaihe on lakkaus. Lakka laitetaan valumaan käämitykseen. Käämeistä annetaan valua ylimääräinen lakka pois. Sen jälkeen lakka kuivatetaan kuivatusuunissa.

### 3.5 Oikosulkumoottorin kokoaminen

Oikosulkumoottori kootaan puhdistetuista, huolletuista ja korjatuista osista. Sen jälkeen uudet laakerit ja puhdistetut kilvet asennetaan paikalleen.

Ensin kuvassa 17 (ks. seur. s.) nähdään, miten roottori asetetaan valmiin rungon sisään käyttäen apuna siltanosturia. Roottori asennetaan rungon sisään ennen laakerien asennusta. Näin roottori pysyy paikallaan eikä pääse pyörimään pöydällä.



**Kuva 17. Roottori asetetaan rungon sisään**

Jotta laakerit voidaan asentaa, ne on ensin lämmitettävä, jos sovitus on tiukka. Uudet laakerit lämmitetään uunissa, öljykylvyssä, kuumailmapistoolilla tai induktiokuumentimella n. 110 asteeseen. Kuvassa 18 nähdään laakerien lämmitys induktiokuumentimella. Koska laakerin sisäkehä laajenee lämmön vaikutuksesta, laakerit voidaan asettaa akselille suojalevy moottoriin päin. Lisäksi uudet laakerit tulee voidella ennen moottorin kokoamista. Voitelu tehdään laakerin asennuksen jälkeen.



**Kuva 18. Laakerin lämmitys induktiokuumentimella**

Kuvassa 19 nähdään lämmin laakeri jo asennettuna N-pään akselille. N-pään laakerin ja akselin välinen sovitus on tiukka.



**Kuva 19. Lämmin laakeri sopii akselille**

Kuvassa 20 asennetaan D-pään laakeri paikoilleen. Sovitus on löysä D-pään laakerin ja akselin välillä, jolloin ei tarvita lämmittämistä. Sitten laakeri voidellaan.



**Kuva 20. D-pään laakeri asetetaan ilman lämmittämistä**



Seuraavaksi N-pään laakerikilpi lämmitetään, jotta se saadaan jo akselille asennetun laakerin päälle. Sopiva laakerikilven asennuslämpötila on 70 - 90 astetta. Tässä käytetään liekkiä. Liekki suunnataan kuvan 21 mukaisesti. N-pään kilven ja N-pään laakerin välillä on siis tiukka sovitus.



**Kuva 21. Kilven lämmitys liekillä**

Seuraavaksi kuumennettu kilpi asennetaan. Kilpi menee jo akselille asennetun laakerin päälle, koska kilpi on lämmitetty. Tämän jälkeen N-pään kilpi kiinnitetään ruuveilla runkoon räikkävaimella kuvan 22 mukaisesti.



**Kuva 22. N-pään kilven ja ruuvien asettaminen paikalleen**

Seuraavaksi D-pään kilpi kiinnitetään. Kuvassa 23 nähdään D-pään kilven asennus. Tämä voidaan tehdä painamalla kilpi laakeriin. Laakeri on siis asennettu akselille jo aikaisemmin. Sovitus on löysä laakerin ja kilven välillä. D-pään ruuvit kiinnitetään seuraavaksi.



**Kuva 23. D-pään kilpi kiinnitetään**

Laakerikilpien asentamisen jälkeen niitä naputellaan kevyesti muovivasaralla kuvan 24 mukaisesti. Roottoria pyöritetään samanaikaisesti. Tämä tehdään jännityksien poistamiseksi. Akselia ei saa lyödä, koska laakerit voivat vaurioitua.



**Kuva 24. Naputellaan vasaralla jännityksien poistamiseksi**

Moottorin tuuletin asennetaan. Tämä tapahtuu D-pää akselista tuettuna seinää vasten, ja tuuletin painetaan paikoilleen N-pään akselille. Seuraavaksi asetetaan tuulettimen lukkorengas paikoilleen. Jos tuuletin on metallia, kuten alumiinia, voidaan sitä lämmitellä liekillä, jolloin sen reikä laajenee, ja se menee akselille helpommin kuvan 25 mukaisesti.



**Kuva 25. Asetetaan tuuletin paikoilleen N-päähän**

Lopuksi tehdään laakerikilpien ruuvien tarkistus (kirstys), asennetaan tuuletinkoppa ja tehdään koekäyttö eli moottori liitetään jännitteeseen.



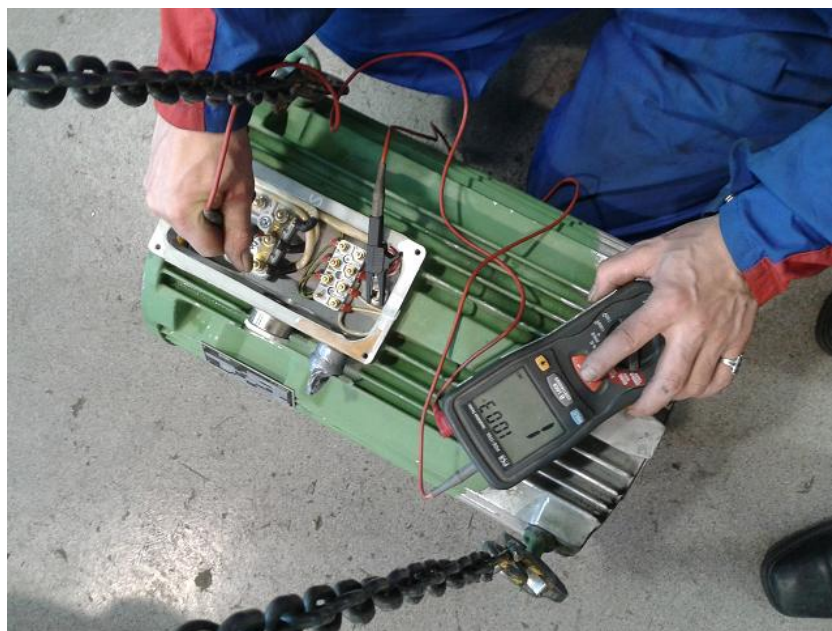
**Kuva 26. Valmis sähkökone koekäyttöä varten**

## 4 Oikosulkumoottorien huoltoon liittyvät mittaukset

### 4.1 Mittaukset ennen huoltoa

Tärkein mittaus on aistinvarainen arvio, kun harkitaan moottorin huoltoa. Tällöin on kuunneltava käyntiääntä, joka yleensä paljastaa laakerivauriot. Apuna voidaan käyttää värinämittaussauvaa. Kun laakeri- tai jokin muu vaurio on paikallistettu, yleensä moottori haalataan eli avataan, ja roottori irrotetaan. Roottorissa on erittäin harvoin sähköisiä vaurioita. Jos näitä vaurioita on, ne havaitaan yleensä roottorista jo silmämääräisesti.

Kun roottori on irti, voidaan paremmin tutkia pelkkää runkoa ja staattoria. Ensimmäinen mittaus on eristysvastusmittaus. Eristysvastusmittauksella selvitetään eristeiden kunto. Esimerkiksi jos käämitys on kostunut, vuotovirta käämityksen ja rungon välillä on haitallisen suuri. Testausjännitteenä käytettiin tässä 1 000 V, joka on standardin PSK 7704 mukaan sopiva, kun moottorin nimellisjännite  $U_N < 1\ 000\ V$ . Mittari kytkettiin moottorin liittäntäkotelon liittimiin. Mittauspäistä, joita on kaksi, kytkettiin ensimmäinen PE-liitimeen ja toinen moottorin tähtipisteeseen (kuva 27).



Kuva 27. Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksessa tulokseksi saatiin  $>1\ M\Omega$ . Tämä on yleisesti hyväksyttävä arvo, joka esiintyy myös tuntemassani kirjallisuudessa [standardi PSK 7704]



(>1,0 M $\Omega$ ). Koska tämä mittauskytkentä ottaa huomioon kaikki vaiheet, ei eri vaiheita tarvitse mitata erikseen. Jos mittaustulos olisi pienempi kuin 1,0 M $\Omega$ , kyseessä on todennäköisesti maasulku. Tällöin vuotovirta on liian suuri. Näin ollen ei olisi turvallista liittää moottoria verkkojännitteeseen. Tässä tapauksessa mittaustulos on kuitenkin hyväksyttävä >1 M $\Omega$ , ja moottori on tältä osin kunnossa.

Toinen pelkästään rungolle tehtävä mittaus on toistoaltokoestus. Tämän mittauksen toinen nimitys on syöksyaaltotestaus. Tarkoituksena on kierroseristyksien koestaminen. Käämivauriot alkavat usein johdinkierrosten välisinä kierrosoikosulkuina. Tästä johtuen vikapaikka, ja vikaan osallistuvat johdinkierrokset, lämpenevät voimakkaasti. Vika voi näin laajentua käämin ja koneen rungon väliseksi maasuluksi, tai kahden vaiheen väliseksi vaihesuluksi. Syöksyaaltotestauksella tutkitaan myös sähkömagneettista symmetrisyyttä ja virtapiirikatkoksia. Lisäksi voidaan tutkia eri vaiheiden mahdollisia eroja, ja vaikuttaako lopputulokseen esimerkiksi vyyhtien pituuksien erot.

Koestusjännite säädetään 0 - 3,5 kV jokaiselle moottorille yksilöllisesti. Kytkentä esitetään kuvassa 28 (ks. alla). Johtimia ovat 3 vaihejohdinta sekä kevi.



Kuva 28. Toistoaltokoestus mittauskytkentä

Jännite valitaan standardin PSK 7706:n perusteella. Koetuksessa käytettävä jännitetaso tai toistoallon maksimiampplitudi määräytyy koestettavan käämityksen nimellisjännitteen, rakenteen, iän ja kunnon perusteella. Tyypillisesti yli kolme vuotta, mutta alle kymmenen vuotta vanhan käämityksen toistoallon maksimiampplitudi on alle 2 000 V, kun moottorin nimellisjännite  $U_N$  on alle 1 000 V. Mittausjännite on tässä 2 120 V huipusta huippuun (*peak to peak*).

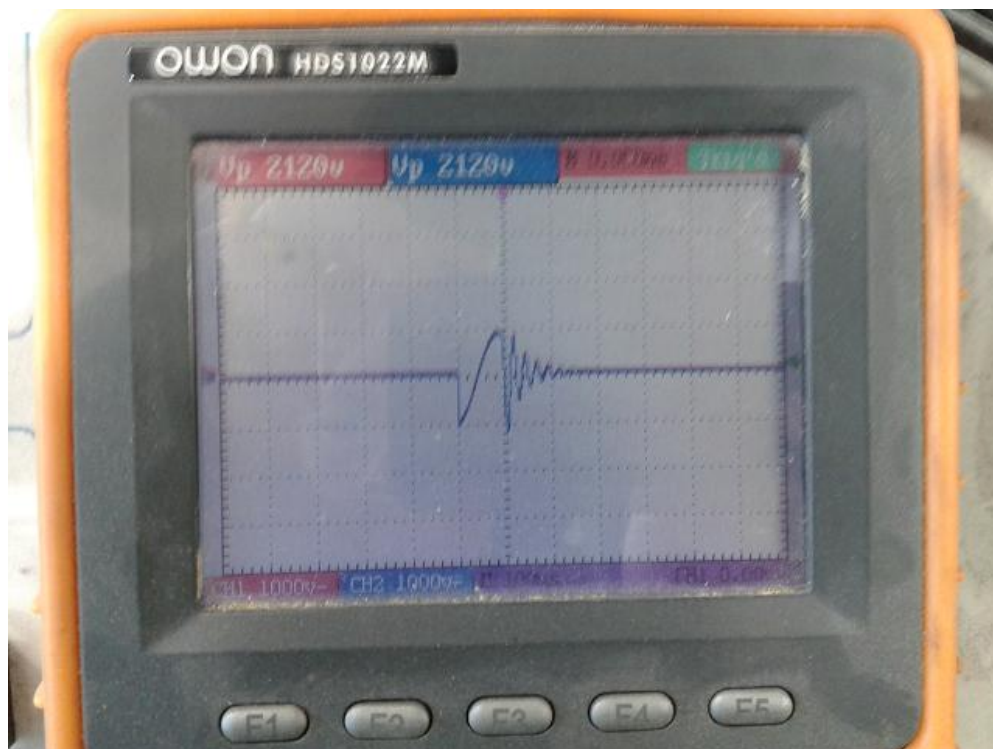
Mittaukset tehdään kaikkien vaiheiden välillä. Nämä kaikki yhdistelmät ovat

U - V

U - W

V - W.

Digitaalisen näytön piirtämä kuva esitetään kuvassa 29:



Kuva 29. Toistoaltokoestus

Kunnossa olevan moottorin käämielementtien värähtelyvasteet ovat yhteneviä, jolloin ne ovat mittalaitteen näytöllä päällekkäin. Tässä esimerkkikoneessa tämä toteutuu. Käyrämuoto on hyvä, kun värähtely vaimenee nopeasti oikealle. Vaimennus on nopea, kun se on yhden vaakaruudun sisällä. Vaakaruudun leveys on 100  $\mu$ s.

Näistä mittauksista päätellään, että staattori on esimerkkikoneessa todennäköisesti hyvässä kunnossa. Kun eristysvastusmittaus antoi hyväksyttävän tuloksen, staattori-käämit eivät todennäköisesti ole kostuneet. Esimerkkikoneessa moottorin runko ja staattori ovat näin ollen hyvässä kunnossa. Tällöin voidaan laittaa roottori uusine laakereineen rungon sisälle ja jatkaa huoltoa.

#### 4.2 Tyhjäkäyntimittaukset huollon jälkeen

Huollon jälkeen tehdään tyhjäkäyntikoe (kuva 30). Tyhjäkäyntikokeessa mitataan pih-tiampeerimittarilla kaikkien vaiheiden virrat. Niiden tulisi olla yhtä suuria. Kuvassa 30 esitetään tyhjäkäyntikoe nimellisjännitteellä. Sähkökonekorjaamossa käytetty nimellis-jännite on 400 V - 690 V. Suojakotelo asennetaan moottorin akselin ympärille. Akselin irrotettava kiila kiinnitetään nippusiteillä. Nämä toimet tehdään turvallisuussyistä.



Kuva 30. Tyhjäkäyntikoe

## 5 Huollon vaikutukset esimerkkimoottorin ominaisuuksiin

### 5.1 Ennen ja jälkeen huollon tehdyt mittaukset

Tutkittavaksi moottoriksi päätettiin ottaa Metropolia Ammattikorkeakoulun omistama, vanhahko epätahtimoottori Strömberg K 2132/K (kuva 31). Moottori on kolmivaiheinen, ja kytkentä voidaan tehdä joko tähteen tai kolmioon. Kyseessä on liukurengaskone. Liukurenkaat ovat omassa kotelossaan. Kone on 4-napainen, ja sen eristysluokka on F. Arvokilpi kertoo tietoa moottorin ominaisuuksista. (Ks. kuva 32 seur. s.)

Moottorin iäksi arvioitiin 30 - 40 vuotta. Moottori päätettiin ottaa tutkittavaksi juuri pitkän käyttöajan vuoksi. Esimerkiksi eristykset heikkenevät ajan kuluessa. Oletettiin, että uusilla käämityksillä ja huolloilla olisi merkittävää vaikutusta mitattuihin ja laskettuihin ominaisuuksiin.

Moottorin uudelleenkääminnän vaikutusta tutkittiin häviöihin tai suoritusarvoihin. Suoritusarvot ilmenevät esimerkiksi rutiinitesteissä ja erillishäviömittauksissa. Lisäksi tehtiin laajennettu mittaussarja. Nämä mittaukset tehtiin siis ennen ja jälkeen huollon. (Ks. mittaukset, liitteet 2 ja 4.).

Kyseisestä moottorista tutkittiin käämien resistanssit ja roottoriin kunto, eristysvastusmittaus, tyhjäkäyntimittaus, lukitus- eli oikosulkumittaus, kuormituskoee ja lämpenemä, jäähtymiskäyrä sekä häviökomponenttien ja hyötysuhteen määrittäminen.



Kuva 31. Moottori Strömberg K 2132/K

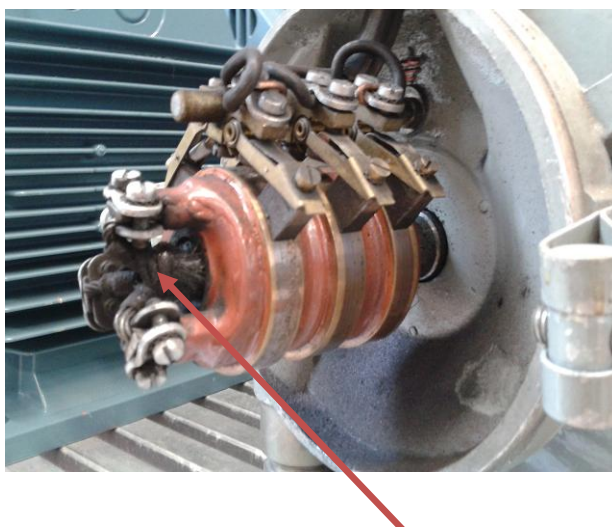




**Kuva 32. Arvokilpi**

Moottori on varustettu liukurenkain. Roottorista tuleva virta kulkee liukurenkaiden kautta napoihin u (ruskea), v (musta) ja w (harmaa). Roottorissa on ainoastaan tähtikytkentä. Tähtipiste on akselin päässä. Tähtipiste ei ole käytettävissä vaihejännitteelle, ja näin saadaan käyttöön vain pääjännite 149 V. Pääjännite on roottorinapojen kahden vaiheen välinen jännite. Kolmiokytkentä roottoripiirissä ei ole mahdollinen.

Käytön aikana roottorissa ei ole tähti- eikä kolmiokytkentää, vaan käämit ovat molemmista päistään oikosuljettuja. Toisen pään oikosulku on koneen sisällä ja käämitysten vapaat päät on tuotu kytkentänapoihin liukurenkaiden kautta. Kytkentänavoilla tehdään oikosulku joko suoraan, kun käytetään oikosulkumoottoria tai ulkopuolisella vastuksella, jolloin voidaan säätää momenttia ja käynnistysvirtaa roottoriresistanssia säätämällä.



**Kuva 33. Liukurenkaat, hiilet ja tähtipiste(punainen nuoli)**

Uusintamittaukset tehtiin. Koneen huollossa uusittiin staattorikäänitys. Vanha käänitys oli silmämääräisesti hyvässä kunnossa. Laakereita ei uusittu, koska entiset olivat hyvässä kunnossa. Entiset laakerit voideltiin. Oletettiin että vanhan käänityksen ja eristeiden pitkän iän vuoksi olisi odotettavissa eroja mittauksiin ja arvoihin huollon jälkeen.

## 5.2 Käämien resistanssit ja roottoripiirin kunto

Staattorin käänityksen kunto on tärkeätä selvittää. Milliohmimittaria käyttäen mitataan kaikkien käämien päiden välinen resistanssi. Tällöin käytetään nelijohdinmittausta. Mittaus tehtiin kullekin käämille noin minuutin ajan. Tämä mittaus tehdään virheen pienentämiseksi. Mittaus ennen huoltoa tehtiin huoneen lämpötilassa 21,0 °C. Mittaus huollon jälkeen tehtiin huoneen lämpötilassa 21,1 °C. Näin saadaan seuraavat mittaus-tulokset:

Taulukko 1. Käämien resistanssit kylmänä

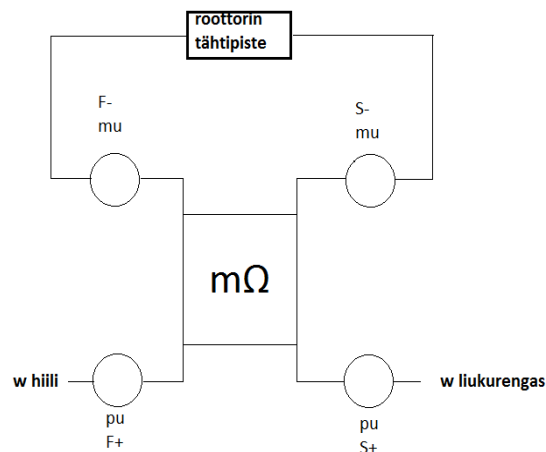
	ennen	jälkeen
U – X	1,2072 Ω	1,1402 Ω
V – Y	1,2061 Ω	1,1361 Ω
Z – W	1,2060 Ω	1,1373 Ω

Mittaustulosten perusteella kaikki kolme staattorikäänimiä ovat todennäköisesti ehjiä.

### Roottoripiirin kunto

Mitataan seuraavaksi roottoripiirin kunto. Käytetään milliohmimittaria. Kyseessä on nelijohdinmittaus. Mitataan roottorin tähtipisteen ja liukurenkaiden väliset resistanssit. Mittarin syöttämä mittausvirta kulkee harjalta liukurenkaalle. Virheitä ei tule, koska virransyötölle ylimääräisestä ylimenovastuksesta ei ole haittaa.

Hiilen ja liukurenkaan välillä on ylimenovastus, jonka vaikutus on näin eliminoitu. Näin koska toinen punainen mittajohdin on liukurenkaassa ja toinen hiilessä. Kuvassa 34 mu tarkoittaa mittalaitteen mustaa johdinta, pu tarkoittaa punaista johdinta. F-, F+, S- ja S+ ovat mittalaitteen mittausjohtimien liitinnavat.



**Kuva 34. Roottoripiirin mittaus**

Saadaan mittaustulokset roottorin tähtipisteen ja vaihenapojen välisestä resistanssista. Vaihekäämien resistansseiksi saadaan:

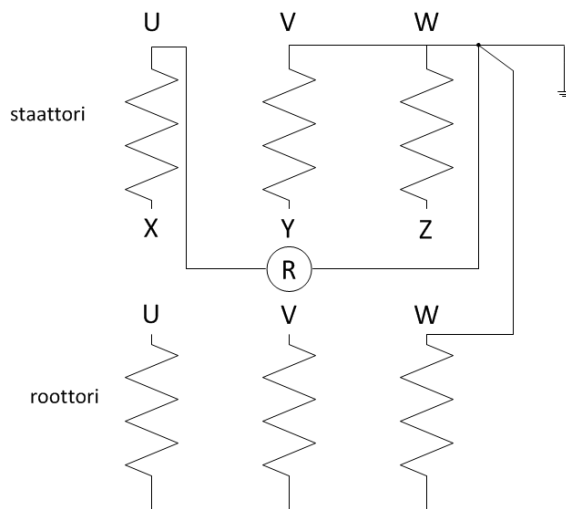
Taulukko 2. Roottorin vaihekäämien resistanssit

0 - U	0,314 $\Omega$
0 - V	0,310 $\Omega$
0 - W	0,315 $\Omega$

Roottori on kunnossa ennen huoltoa. Mittausta ei uusittu huollon jälkeen koska roottoriin ei tehty huoltotoimenpiteitä. Oletettiin myös, että huollossa ei tehty vaurioita roottoriin.

### 5.3 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittaus on tärkeä vuotovirtojen paikallistamiseksi. Käytetään seuraavaa kytkentää:



**Kuva 35. Eristysvastusmittaus kytkentä**

Mitataan moottorin jokaisen staattorikäimityksen eristysvastus muihin vaihekäimityksiin, moottorin runkoon ja roottoriin. Mittausjännitteenä oli 500 V. Tarkistettiin vielä, että mittari on kunnossa, eikä johdinkatkoksia ole.

**Taulukko 3. Eristysvastus  $R_{ISO}$**

	ennen	jälkeen
U	>500 M $\Omega$	>500 M $\Omega$
V	>500 M $\Omega$	>500 M $\Omega$
W	>500 M $\Omega$	>500 M $\Omega$



Eristysvastus on riittävän suuri, ja moottori on tältä osin kunnossa. Kirjallisuudessa esiintyvä [standardi PSK 7704] hyväksyttävä arvo on  $>1,0 \text{ M}\Omega$ .

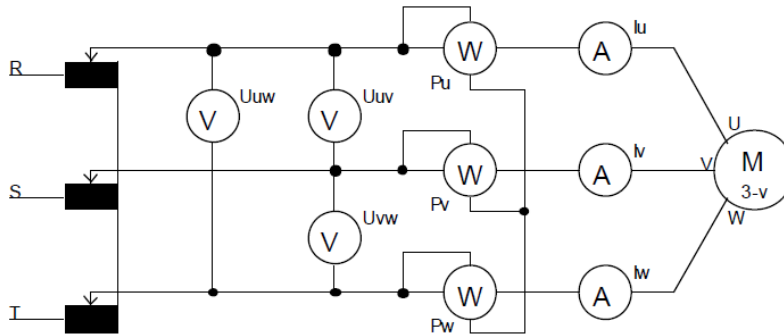
#### 5.4 Tyhjäkäyntimittaus

Tyhjäkäyntimittauksessa moottori on kytketty verkkoon tehoanalysaattorin välityksellä. Moottorin akseli pääsee vapaasti pyörimään, eli kuormitusta ei ole. Tyhjäkäyntimittauksessa tutkitaan moottorin verkosta ottamaa tehoa ja virtaa. Tehoanalysaattorilta nähdään myös syöttöjännitteet, tehokertoimet ja roottorivirrat. Moottorin pyörimisnopeus mitattiin takometrillä. Lisäksi mitattiin käämien resistanssit kokeen jälkeen. Mittaukset tehtiin ennen ja jälkeen huollon. Käämiresistanssit ovat pudonneet hieman huollon jälkeen taulukon 4 mukaisesti:

Taulukko 4. Käämiresistanssit tyhjäkäyntikokeen päättyessä

	ennen	jälkeen
R U-X	1,3134 $\Omega$	1,1776 $\Omega$
R V-Y	1,3077 $\Omega$	1,1729 $\Omega$
R Z-W	1,3116 $\Omega$	1,1745 $\Omega$

Tyhjäkäyntimittauksella määritetään tyhjäkäyntihäviöt. Tyhjäkäyntihäviöt tarvitaan epäsuoran hyötysuhteen laskentaan. Hyötysuhteen laskemiseen liittyvät myös koneen rauta- ja mekaaniset häviöt. Tyhjäkäyntitehoa nimellisjännitteellä käytetään kuormituksen laskennassa kuormituskokeessa.



Kuva 36. Tyhjäkäyntimittaus kytkentä

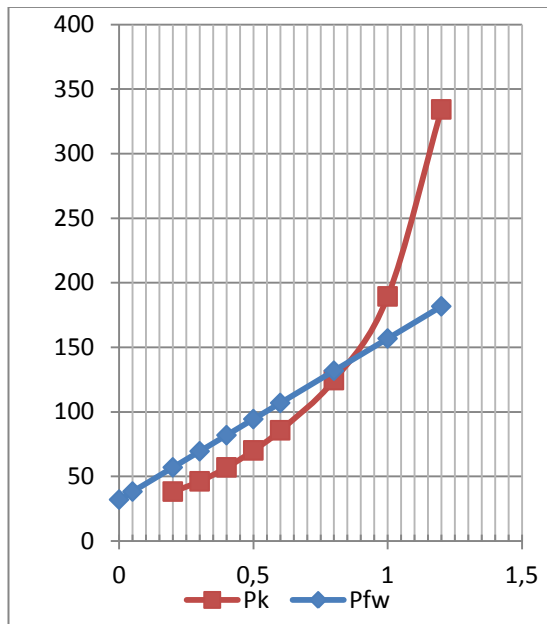
Mittauksen alussa käynnistetään lämpötilapiirturi. Seuraavaksi moottoria käytetään nimellijännitteellä niin kauan, että teho on tasainen ja lämpötila on vakaa. Piirturin käyrästä nähdään, että tyhjäkäynnissä lämmöt ovat vakaita ja tasaantuneet mittausten aikana. Lämpötilan muutos on verrannollinen käämien resistanssiin. Lisäksi käämien resistanssi vaikuttaa virtalämpöhäviöiden määrään. Resistanssi ei muutu eri jännitteillä eikä eri virroilla tehtyjen mittausten aikana. Mittauksessa tarkkuus pienenee, jos virtalämpöhäviöiden muutoksia tapahtuu. Eri jännitteet mittauksessa aiheuttavat virtalämpöhäviöiden muutoksia.

Mittaukset suoritetaan kuvan 36 kytkentää käyttäen. Tyhjäkäyntikoe suoritetaan 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0 ja 1,2 -kertaisella nimellijännitteellä  $U_N$ .  $U_N = 380$  V. Järjestys suuremmasta pienempään. Lämpötilan muutokset ja niiden virheet tuloksiin ovat näin pienempiä. Koneen rautahäviöt  $P_{Fe}$  ja mekaaniset häviöt  $P_{fw}$  saadaan standardin 60034-2 esittämällä tavalla. Nämä saadaan tyhjäkäynnin tehokäyrän avulla laskemalla.

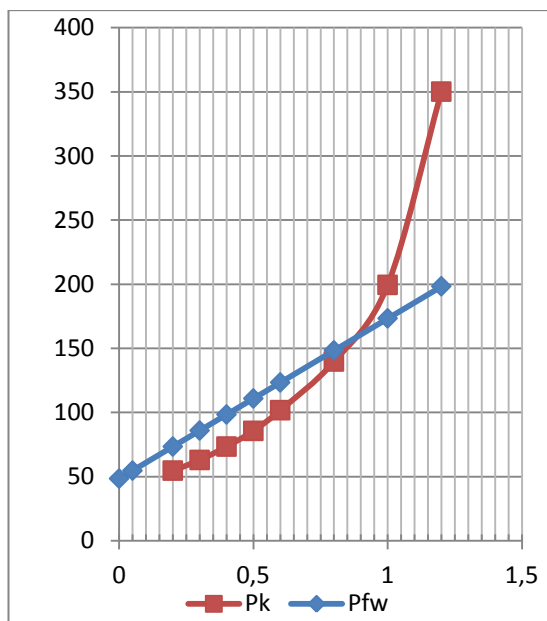
Nimellijännitteellä suoritetusta tyhjäkäyntikokeesta mitataan tyhjäkäyntiteho  $P_0$ , jota käytetään kuormituskokeen vaa'an lukeman määrittämiseksi. (Ks. tyhjäkäyntikokeen taulukot, liitteet 2, s.1 ja 4, s.1.)

Erot ennen ja jälkeen huollon ovat melko pieniä. Nimellijännitteellä  $U_N = 380$  V:n sähköverkosta otettu teho on 244,0 W ennen huoltoa. Huollon jälkeen tämä arvo on 246,6 W. Sähköverkosta otettu teho on noin 1 % suurempi huollon jälkeen nimellijännitteellä. Tehokerroin  $\cos \phi$  nousee hieman jälkeen huollon. Nimellijännitteellä on  $\cos \phi$  noussut 3,6 % huollon jälkeen. 0,2 -kertaisella nimellijännitteellä (76 V)  $\cos \phi$  on noussut 21 % huollon jälkeen. Pyörimisnopeudet eivät ole juurikaan muuttuneet.

Pk indikoi vakiohäviöitä. Pfw indikoi mekaanisia häviöitä, kitkaa ja tuuletusta. Pfe tarkoittaa rautahäviöitä. Pk muodostuu Pfw:stä ja Pfe:stä. Pfw on yksi arvo suoran ja y-akselin leikkauspisteessä. Tämä on kuvitteellinen tilanne, jossa kone käy ilman jännitettä ja ottaa tehon mekaanisiin häviöihin. Sähköverkosta otetun tehon  $P_0$  avulla laskettu Pk on noussut huollon jälkeen. Mekaaniset häviöt Pfw ovat nousseet huomattavasti eli noin 50 % huollon jälkeen. Pk ja Pfw käyrät ovat esitetty kuvissa 37 ja 38.



Kuva 37. Pk ja Pfw -käyrät ennen huoltoa



Kuva 38. Pk ja Pfw -käyrät jälkeen huollon

Taulukko 5. Tyhjäkäyntitehot ja tehokertoimet ennen ja jälkeen huollon

U0 syöttö jännite(V)	P0 ennen teho (W)	P0 jälkeen teho (W)	cos fii ennen tehokerroin	cos fii jälkeen tehokerroin
456	542,7	531,8	0,0943	0,0943
380	244,0	246,6	0,0994	0,1031
304	144,5	157,0	0,1213	0,1349
228	94,6	109,7	0,1576	0,1836
190	75,9	90,7	0,1888	0,2307
152	60,6	76,7	0,2367	0,3000
114	48,3	65,0	0,3310	0,4243
76	39,5	56,1	0,5110	0,6501

Vakiohäviöt Pk lasketaan kaavalla (2). (Ks. Liite 2. s. 14 ja 4. s. 14)

$$P_k = P_0 - 3 * R_{av} * I_{0123}^2 \quad (2)$$

Ennen huoltoa 1,2 -kertaisella nimellisjännitteellä:

$$P_k = 542,7 - 3 * 1,3109 * 7,2810^2 \text{ W} = 334,2 \text{ W}$$

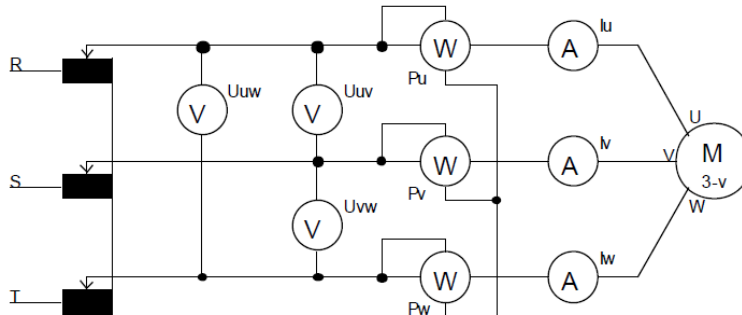
Huollon jälkeen 1,2 -kertaisella nimellisjännitteellä:

$$P_k = 531,8 - 3 * 1,175 * 7,1800^2 \text{ W} = 350,1 \text{ W}$$

### 5.5 Lukitus- eli oikosulkumittaus

Oikosulkumittauksessa moottorin roottori ei pääse pyörimään. Roottori pidetään paikallaan rautakangen ja osittain lihasvoiman avulla. Roottorin ollessa paikallaan säädetään syöttöjännite arvoon, että nimellisvirta  $I_N$  otetaan verkosta. Etsitään kolme eri roottorin asentoa, jotka löydetään tehoarvoille minimi-, keski- ja maksimi. Kirjataan tehot,

jännitteet ja virrat. Toistetaan koe kertoimilla  $1,5 * I_N$ ,  $1,0 * I_N$ ,  $0,8 * I_N$  ja  $0,5 * I_N$ , joissa  $I_N = 5,8$  A. Oikosulkumittauksella määritetään virtalämpöhäviöt. Ex eli räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäville moottoreille tehdään lukitus- eli oikosulkumittaus.



Kuva 39. Oikosulkukoe jossa moottori jarrutettuna paikalleen

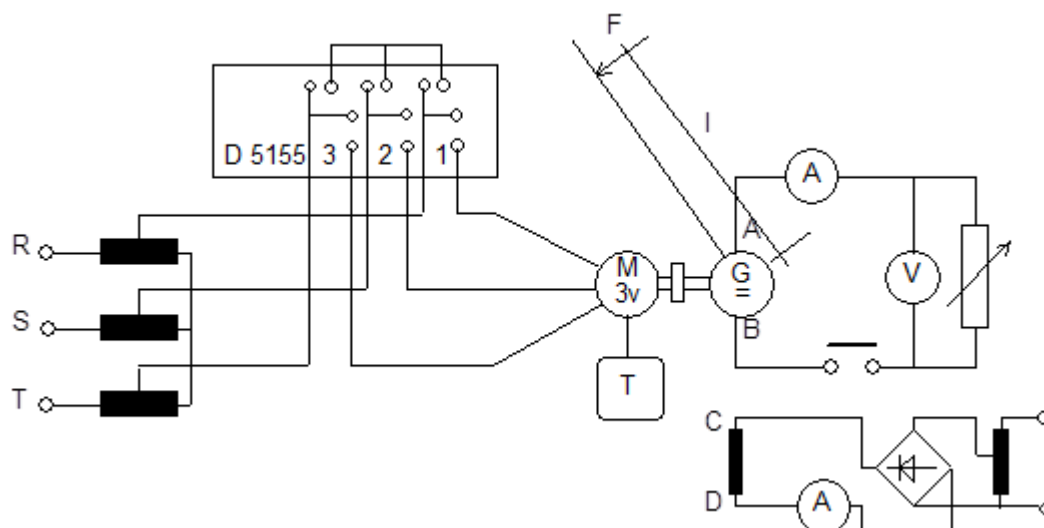
Taulukko 6. Lukitusmittauksen syöttötehot nimellisvirralla ennen ja jälkeen huollon

P123	ennen (W)	jälkeen (W)	muutos (%)
minimi	385,7	407,7	+5,4
keskiarvo	390,7	454,2	+14,0
maksimi	432,2	495,8	+12,8

## 5.6 Kuormituskoe ja lämpenemä

Kuormituskokeella voidaan vahvistaa kuormitetun koneen erillishäviöt, lämpenemä nimelliskuormalla ja määrittää jäähtymiskäyrä. KytKentä on kuvan 40 (ks. seur. s.) mukainen.

Mittaamalla ja standardien avulla määritetään, pitävätkö moottorin valmistajan ilmoittamat kilpiarvot paikkansa. Tutkitaan myös, onko koneen lämpenemä valmistusnormien ja eristysluokan sallimissa rajoissa. Lämpenemä ja eristemateriaalille asetetut rajat on eritelty standardissa IEC 60034-1. Mittausten avulla määritetään koneen hyötysuhde epäsuoralla ja suoralla menetelmällä. Selvitetään myös häviöiden jakaantuminen.



**Kuva 40. Kuormituskoeytkentä vipuvarrella**

Koelaitteisto muodostui kyseisestä epätahtikoneesta ja kuormittavasta vaakakoneesta. Vaakakoneena käytetään säätövastuksella kuormitettavaa DC-generaattoria. DC-generaattori pääsee pyörimään akselimomenttia mittaavan varren sallimissa rajoissa, koska koneen runko ei ole kiinni alustassa. Varren pituus  $l = 1,018$  m.

DC-generaattorin rungossa kiinni oleva vipuvarsi painaa generaattorin momenttia vastaavalla voimalla vaakaa, joka näyttää siten tutkittavan moottorin akselimomenttia. Asetellaan kuormitus siten, että moottorin akselimomentti on nimellistehoa vastaavassa arvossa. Tämä tehdään vaak'an näyttämän avulla. Moottorin suora hyötysuhde voidaan laskea verkosta otetun tehon ja akselimomentin sekä moottorin nopeuden avulla.

Ympäristöolosuhteet pidetään mittauksien aikana mahdollisimman vakaina. Näin tulokset ovat luotettavampia. Ilmavirtauksia kyseisessä tilassa vältetään. Suora auringon valo laitteistoon voi myös vaikuttaa haitallisesti mittaustuloksiin.

Lämpötila-antureita (yhteensä 6 kpl) sijoitetaan kaksi tutkittavan koneen selkään, molempiin laakerikilpiin. Yksi anturi oli sijoitettu (kuvassa 41 vasemmalla, ks. seur. s.) lähelle laakeria vasemman puoleiseen kilpeen. Staattorikäimityksen vyyhtien päätyihin ei asennettu anturia, koska kilpi olisi pitänyt avata ja porata reikä johtimelle. Tähän ei ryhdytty suuren työmäärän vuoksi. Lisäksi yhdellä lämpömittarilla valvotaan ympäristön lämpötilaa. Kaikki lämpötilat rekisteröidään piirturin avulla. Piirturista saatiin paperitulostus lämpötiloista ajan funktiona.



**Kuva 41. Lämpötila-anturien sijoittelu kilpiin ja selkään**

Lämpenemää tutkittiin osakuormalla, nimelliskuormituksessa ja ylikuormituksessa. Komponenttien lämpenemisestä johtuen moottorin jännitettä, DC-koneen magnetointivirtaa ja kuormitusvastusta säädetään useita kertoja. Koetta jatketaan niin kauan, että piirturilla seurattava moottorin selän lämpötilan (anturi 3) muutos 1 tunnin aikana on enintään 2 °C. Lämpenemä ilmaisee lämpötilan nousun ympäröivän ilman lämpötilaan nähden.

Kuormituskokeen aikana luetaan mittarit 15 min:n välein. (Ks. mittaustulokset, ks. liite 2, s. 4 ja 4, s. 4.) Laskelmat löytyvät Tulosten käsittely/Keskimääräinen lämpenemä. (ks. liite 3, s. 4 ja 5, s. 4) Keskimääräinen lämpenemä esitetään taulukossa 7 (Ks. seur. s.).

Lämpenemät ovat koneen eristysluokan F standardin IEC 60034-1 mukaiset.

Taulukko 7. Keskimääräinen lämpenemä

	ennen	jälkeen
Osakuormitus	25,49 °C	27,46 °C
Nimellinen kuormitus	45,81 °C	44,89 °C
Ylikuormitus	58,20 °C	58,04 °C

### 5.7 Jäähtymiskäyrä

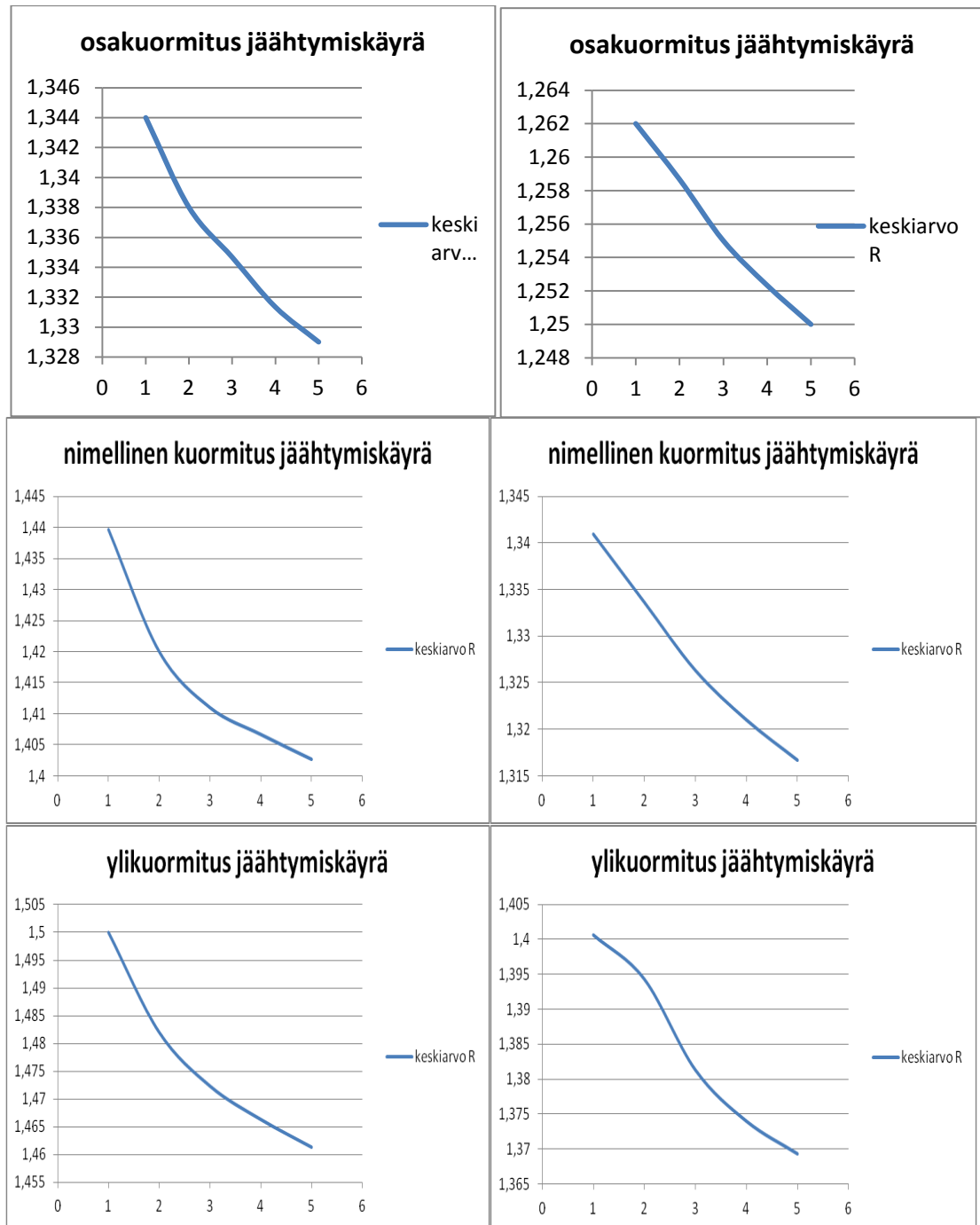
Kuormituskokeiden (osakuormitus, nimellinen kuormitus, ylikuormitus) päätyttyä mitataan käämitysten resistanssit samalla menetelmällä kuin kylmät vastusarvot (ks. 5.2). Vastusarvot mitataan useita kertoja peräkkäin moottorin jäähtymiskäyrän määrittämiseksi. Jäähtymiskäyrästä voidaan lukea moottorin jäähtymisaikavakio, jota voidaan käyttää esimerkiksi arvioitaessa moottorin ylikuormittavuutta lyhytaikaisessa ja/tai jaksottaisessa käytössä. (Kuva 42, ks. seur. s.)

Jäähtymiskäyrän mittaus aloitetaan välittömästi (alle 30 s) kuormituskokeen päätyttyä. Seuraavat mittaukset tehdään 1,0 minuutin välein 5 minuuttiin asti.

Koneen resistanssin loppulämpötilaa vastaava arvo on ensimmäisen mittauksen arvo (30 s:n kuluessa syötön katkaisusta).

Käämien lämpötilan noustessa välittömästi pysäytyksen jälkeen rauta on ollut kuumempaa kuin kupari. Näin ei kuitenkaan tapahtunut.





Kuva 42. Jäähdytyskäyrä ennen ja jälkeen huollon

## 5.8 Häviökomponenttien ja hyötysuhteen määrittäminen

Tutkittavan moottorin häviökomponentit määritetään. Lisäksi määritetään hyötysuhteet eri menetelmillä. Häviökomponentit eli kuormitetun koneen erillishäviöt tutkitaan kuormituskokeen avulla. (Ks. Häviökomponentit ja hyötysuhteet, liitteet 3 ja 5.)

Häviökomponenteista määritetään staattorikämmityksen lämpöhäviöt tyhjäkäyntiko-  
keessa  $P_s$ , staattorikämmityksen virtalämpöhäviöt  $P_{s,r}$ , mekaaniset häviöt (kitka ja tuule-  
tus)  $P_{fw}$ , rautahäviöt  $P_{fe}$ , ilmaväliteho  $P_{\delta}$ , roottorin virtalämpöhäviöt  $P_r$  ja lisähäviöt  $P_L$ .

Taulukko 8. Häviökomponentit

	ennen	jälkeen
staattorikämmityksen lämpöhäviöt tyhjäkäynnissä $P_s$	50,3 W	45,7 W
staattorikämmityksen virtalämpöhäviöt $P_{s,r}$	141,1 W	128,2 W
mekaaniset häviöt (kitka ja tuuletus) $P_{fw}$	32,0 W	48,4 W
rautahäviöt $P_{fe}$	161,7 W	152,5 W
ilmaväliteho $P_{\delta}$	2 409,1 W	2 399,4 W
roottorin virtalämpöhäviöt $P_r$	129,1 W	130,7 W
lisähäviöt $P_L$	13,3 W	13,0 W

Hyötysuhteista määritettiin kilpiarvojen mukainen hyötysuhde. Tämä kilpiarvoista las-  
kettu hyötysuhde on 80,0 %. Tähän verrataan laskennallisesti määritettyä suoraa hyö-  
tysuhdetta ja epäsuoraa hyötysuhdetta. Verrataan toleransseja standardin IEC 60034-1  
mukaisiin toleransseihin koskien hyötysuhdetta  $\eta$ . Standardin mukainen toleranssi hyö-  
tysuhteelle -15 % lukemasta  $(1 - \eta)$ . Tässä  $(1 - 0,8) * 15 = 3 \%$

Taulukko 9. Hyötysuhteet

	ennen	jälkeen
suora hyötysuhde	81,6 %	81,8 %
epäsuora hyötysuhde	82,4 %	82,4 %

Kaikki lasketut hyötysuhteet ovat standardin toleranssin 3 %:n sisällä.

Määritettiin jättämä s kilpiarvoista ja laskemalla. Tämä kilpiarvoista laskettu jättämä on  $(1\ 500 - 1\ 410) = 90$ . Standardin mukainen toleranssi jättämälle  $\pm 20\ %$

Taulukko 10. Jättämä

kilpiarvosta laskettu	ennen huoltoa laskettu	huollon jälkeen laskettu
90	80,4	81,7

Lasketut jättämät ovat standardin toleranssin  $\pm 20\ %$ :n sisällä.

## 6 Johtopäätökset

Tämä insinööriytyö on ollut mielenkiintoinen ja opettavainen projekti. Erityisen hyödyllistä oli nähdä sähkökonekorjaamossa käytännössä, miten tapahtuu sähkökoneen huolto ja etenkin käämityksen teko. Mielenkiintoista oli myös nähdä, miten paljon sähkökoneeseen liittyviä mitattavia ja laskettavia ominaisuuksia on saatavilla. Myös epätahtikoneen, jota tässä tutkittiin, teoriaosuus on tuhti paketti.

Työssä oli tavoitteena tehdä opas sähkökonekorjaamon uusien työntekijöiden perehdyttämiseen. Tässä onnistuttiin hyvin. Kuvasarja oikosulkumoottorin huollosta ja mittauksista on kattava. Lisäksi mukana on paljon käytännön kokemukseen liittyvää tietoa ja vinkkejä sähkökoneen huoltoon ja mittauksiin. Sähkökonekorjaamon työtapoihin liittyy paljon ns. hiljaista tietoa, joka siirtyy suullisesti vanhoilta työntekijöiltä uusille työntekijöille. Tätä hiljaisen tiedon teoreettista pohjaa on myös perusteltu tässä työssä.

Esimerkkikoneen laajennettu mittaussarja tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähkökonelaboratoriossa. Nämä mittaukset tehtiin ennen ja jälkeen huollon. Tärkein mitta-laitte laboratorioissa oli tehoanalyyttori. Laboratorioissa ei ollut syösyaaltoimittaus mahdollisuutta, joka taas sähkökonekorjaamossa oli.

Tärkeimmät mittaustuloksista tehtävät havainnot olivat hyötysuhteen osalta se, että erot ennen ja jälkeen huollon olivat erittäin pieniä. Hyötysuhteet olivat hieman parempia huollon jälkeen. Tärkein eli epäsuorahyötysuhde oli täsmälleen sama ennen ja jälkeen huollon. Kilpiarvojen toleranssit hyötysuhteelle ovat standardin mukaiset.

Häviökomponenteista osa oli pienempiä ja osa suurempia huollon jälkeen. Rautahäviöt olivat hieman pienempiä huollon jälkeen. Mekaaniset häviöt nousivat huomattavasti. Staattorin lämpöhäviöt olivat pienempiä huollon jälkeen. Esimerkkikoneen staattorirunkoa ei laitettu kääminirrotus- eli polttouuniin. Näin ollen polttouunin vaikutusta ei nähty rautahäviöissä. Tehokerroin  $\cos \varphi$  oli hieman suurempi huollon jälkeen riippuen syöttöjännitteestä. Lukitusmittauksen syöttötehot nousivat hieman huollon jälkeen.

Tämän työn johdannossa esitetty oletamus, että käyttäiltään vanhahkon esimerkkikoneen ominaisuuksissa olisi merkittäviä muutoksia huollon jälkeen, ei juurikaan pitänyt paikkaansa.

## Lähteet

- 1 Mård, Matti. 1992. Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka. Espoo: Otatieto.
- 2 Kestävä kehitys. 2012. Verkkodokumentti. <[www.ymparisto.fi](http://www.ymparisto.fi)> Luettu 7.7.2012.
- 3 Ahoranta, Jukka & Mattila, Pekka. 1993. Sähköasennustekniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 4 Ahoranta, Jukka. 1998. Sähkötekniikka. Porvoo: WSOY.
- 5 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
- 6 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 7 Suomen Sähköurakoitsijaliitto ry:n julkaisu. 1987. Moottori- ja muuntajakäämitykset. Espoo.
- 8 Ijäs, Jari. 2012. Lehtori, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki. Keskustelut (helmikuu 2012-syyskuu 2012).
- 9 Sirkiä, Esko. 2012. Laboratorioinsinööri, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki. Keskustelut (helmikuu 2012-kesäkuu 2012).
- 10 Nyström, Kirsi. 2012. Käämijä, Sähkö-Alila, Kotka. Keskustelut (maaliskuu 2012-heinäkuu 2012).
- 11 PSK-käsikirja 5. Kunnanvalvonnan Sähköiset Menetelmät. 2007. Pyörivät epätahtikoneet. Helsinki: PSK Standardisointi.



**Sähkö-Allila Ky**

**TYÖKORTTI 20075**

Sivu 1

Päivämäärä 7.6.2012

Asiakasnumero: 4431 Puh: 0400 553810

Toimitusosoite

**SÄHKÖ-ALILA KY**  
**OMAT TYÖT**

**OPPILASTYÖ JARI KAUPPI**

MARTTILANKATU 2  
PL99, 48601 KOTKA

Vuitteemme: STAATTORIN KÄÄMINTÄ  
Tilauspvm: 7.6.2012  
Tilauksenne: JARI KAUPPI  
Myyjä: SAKARI ALILA

Toimitusehto: VAP. VAR  
Toimitustapa:  
Toimituspvm/vko: 6.2012 / 23

Valmistaja:

Konelaji

Tyyppi

Merkki

Teho kW / /

Jännite /

Kytkentä /

Kierr/min / /

Virta A /

Huom

Vika: — Oikosulku

— Maasulku

— Mekaaninen

Muu

Työt: — Käämintä

— Huolto

— Muu

Loppu-  
koestus

L1 — Ω — A

Jännite — kV

L2 — Ω — A

Eristysvas. — MΩ

L3 — Ω — A

Suorittaja: \_\_\_\_\_

Kpl	Tarvike	a-hinta alv 0%	%	Yht.
LIUKURENGASMOOTTORIN STAATTORIN KÄÄMINTÄ				

Toimituspvm: / /

Sähkökonekorjaamoyhdistyksen jäsen

Sähkö-Allila Ky	Puhelin: (05) 260 6901	Kotipaikka Kotka	Nordea 202418-6823
	Telefax: (05) 260 6902	Y-tunnus 0477848-5	IBAN: FI3420241800006823
Marttilankatu 2	eMail: etunimi.sukunimi@sahko-allila.fi	VAT: FI04778485	SWIFT: NDEAFIHH
48600 KOTKA	www.sahko-allila.fi		OP 517202-275403

Kuva 44. Työkortti

**Mittaukset ennen huoltoa** Hioki 3193 D 0026 Power Hi tester tehoanalysaattori

**moottori K 2132/K**

Tyhjäkäynti mit-  
taus

pelkälle moottorille

käämiresistanssit kokeen jälk.

$1,2 * U_n - 0,2 * U_n$

$U_n = 380 V$

R U-X	1,3134
R V-Y	1,3077
R Z-W	1,3116

jän	U1	U2	U3	U123	I01	I02	I03	I0123
456	262,21	262,43	265,72	263,45	7,1950	7,1470	7,5020	7,2810
380	217,86	219,38	221,14	219,46	3,6280	3,6830	3,8700	3,7270
304	175,83	175,27	178,15	176,42	2,2360	2,1613	2,3541	2,2505
228	132,24	132,43	134,09	132,92	1,4778	1,4600	1,5775	1,5051
190	110,36	109,76	111,14	110,42	1,2255	1,1715	1,2436	1,2135
152	87,97	87,76	89,57	88,43	0,9531	0,9098	1,0319	0,9649
114	66,13	65,43	66,52	66,03	0,7484	0,6972	0,7635	0,7364
76	45,31	44,79	45,52	45,21	0,5700	0,5448	0,5956	0,5701

jän	P01	P02	P03	P0123	U0/U0N		cos fii0	n0/ rpm
456	0,1225k	0,2218k	0,1984k	0,5427k	1,2		0,0943	1498
380	0,0542k	0,1115k	0,0783k	0,2440k	1,0		0,0994	1498
304	0,0275k	0,0583k	0,0587k	0,1445k	0,8		0,1213	1495
228	0,0215k	0,0384k	0,0347k	0,0946k	0,6		0,1576	1493
190	0,0207k	0,0258k	0,0294k	0,0759k	0,5		0,1888	1491
152	0,0137k	0,0231k	0,0238k	0,0606k	0,4		0,2367	1488
114	0,0139k	0,0160k	0,0184k	0,0483k	0,3		0,3310	1482
76	0,0120k	0,0132k	0,0143k	0,0395k	0,2		0,5110	1467

roottori virran mittaus

jän	I4	I5	I6	I456
456	1,0045	0,6008	0,7911	0,7911
380	0,7360	0,9455	1,1046	0,9287
304	0,8263	0,5988	0,5092	0,6448
228	0,6909	0,5714	0,5539	0,6054
190	0,5674	0,5588	0,6431	0,5898
152	0,6034	0,5165	0,5849	0,5683
114	0,6256	0,5703	0,6138	0,6032
76	0,6940	0,6501	0,7097	0,6846

lämpötila huoneessa

21,4



Nimellisjännitteellä tehdystä tyhjäkäyntikokeesta tarvitaan tyhjäkäyntiteho P0 kuormituskokeen vaa'an näyttämän määrittämiseksi

Moottorin ja vaakakoneen yhteinen tyhjäkäyntikoe

Vaakakoneessa sellainen magnetointi, minkä vaakakoneen magnetointikäämi kestää ja/ tai vaakageneraattorin navoissa sellainen jännite, jonka vaakakoneen ankkurikäätymys ja/tai kuormitusvastus kestävät. Nimellisjännitteellä  $U_n=380\text{ V}$  roottori virran mitt.

	P0'1	P0'2	P0'3	P0'123	I4	I5	I6
yht. P0'	0,1109k	0,1713k	0,1327k	0,4149k	1,092	1,079	1,184
vaa'an F1/ kg	0,094						
DC mg Im/ A	0,74						
							I456
							1,118

Oikosulkukoe pelkälle moottorille  $I_n = 5,8\text{ A}$

Jarrutetaan roottori paikalleen ja säädetään jännite sellaiseen arvoon,

että kone ottaa verkosta nimellisvirtansa  $I_n$ . Mittaukset 1,5  $I_n$ , 1,0  $I_n$ , 0,8  $I_n$ , 0,5  $I_n$

Mittaus suoritetaan 3:ssa eri roottorin asennossa.

**$I_n = 5,8 * 1,5 = 8,7\text{ A}$**

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,2523k	0,2549k	0,2589k	0,7661k	70,490	70,430	72,050	70,990
kesk	0,2585k	0,2621k	0,2676k	0,7882k	70,220	70,310	71,750	70,760
max	0,2917k	0,2982k	0,3009k	0,8908k	69,540	69,630	70,940	70,040

roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	8,189	8,155	8,248	8,197	19,630	19,890	19,534	19,685
kesk	8,350	8,298	8,412	8,353	19,898	20,070	20,154	20,041
max	8,857	8,844	8,958	8,886	21,649	21,498	21,387	21,511

**$I_n = 5,8 * 1,0 = 5,8\text{ A}$**

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,1296k	0,1260k	0,1301k	0,3857k	51,15	50,56	51,08	50,93
kesk	0,1323k	0,1284k	0,1300k	0,3907k	50,88	50,43	50,78	50,70
max	0,1456k	0,1420k	0,1446k	0,4322k	50,77	50,26	50,68	50,57

roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	5,800	5,731	5,781	5,771	13,791	13,884	13,947	13,874
kesk	5,842	5,805	5,819	5,822	13,933	14,117	13,942	13,997
max	6,166	6,105	6,150	6,140	14,736	14,967	14,883	14,862

$$I_n = 5,8 * 0,8 = 4,64 \text{ A}$$

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,0772k	0,0749k	0,0763k	0,2284k	40,800	40,320	40,500	40,540
kesk	0,0833k	0,0811k	0,0830k	0,2474k	40,690	40,170	40,460	40,440
max	0,0908k	0,0880k	0,0906k	0,2694k	40,510	39,880	40,290	40,230

## roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	4,445	4,399	4,407	4,417	10,623	10,605	10,665	10,631
kesk	4,653	4,596	4,627	4,625	11,190	11,117	11,060	11,122
max	4,862	4,810	4,837	4,836	11,615	11,767	11,746	11,709

$$I_n = 5,8 * 0,5 \text{ A} = 2,9 \text{ A}$$

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,0362k	0,0355k	0,0378k	0,1095k	28,36	27,80	28,72	28,29
kesk	0,03914k	0,03863k	0,04122k	0,11899k	28,304	27,755	28,788	28,282
max	0,0425k	0,0416k	0,0441k	0,1282k	28,17	27,51	28,48	28,05

## roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	3,044	3,007	3,058	3,036	7,238	7,301	7,365	7,301
kesk	3,1934	3,1588	3,2149	3,1890	7,613	7,637	7,716	7,655
max	3,313	3,287	3,333	3,311	8,018	8,053	7,907	7,993



syöttöteho	P1	P2	P3	P123
0 min	0,4571k	0,4972k	0,4501k	1,4044k
15 min	0,4480k	0,4993k	0,4550k	1,4023k
30 min	0,4515K	0,4991K	0,4591K	1,4097K
45 min	0,4491k	0,4972k	0,4599k	1,4062k
1 h	0,4409k	0,4908k	0,4736k	1,4053k
1 h 15 min				
1 h 30 min				
1 h 45 min				
2 h				

pyörimisnop	rpm
0 min	1465
15 min	1465
30 min	1467
45 min	1465
1 h	1463
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

vaa'an lukema	kg
0 min	0,708
15 min	0,712
30 min	0,710
45 min	0,710
1 h	0,711
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

lopullinen

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	0,74
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

kuorm.vas. jännite V	
0 min	145
15 min	145
30 min	145
45 min	145
1 h	145
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

kuorm.vas. virta A	
0 min	8,0
15 min	8,0
30 min	8,0
45 min	8,0
1 h	8,0
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

Jäähdytyskäyrän mittaus

24,7	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä	
------	---	--

aika/ min	R U-X	R V-Y	R Z-W	keskiarvo R
1	1,343	1,343	1,346	1,3440
2	1,338	1,337	1,339	1,3380
3	1,333	1,336	1,335	1,3347
4	1,331	1,331	1,332	1,3313
5	1,329	1,328	1,330	1,3290





syöttöteho	P1	P2	P3	P123	P123(W)
0 min	0,8748k	0,9294k	0,8761k	2,6803k	2680,3
15 min	0,8876k	0,9311k	0,8852k	2,7039k	2703,9
30 min	0,8822k	0,9293k	0,9109k	2,7224k	2722,4
45 min	0,8929k	0,9223k	0,9028k	2,7180k	2718,0
1 h	0,8892k	0,9214k	0,9111k	2,7217k	2721,7
1 h 15 min	0,8928k	0,9320k	0,9001k	2,7249k	2724,9
1 h 30 min				keskiarvo	2711,9

pyörimisnop	rpm
0 min	1422
15 min	1422
30 min	1420
45 min	1420
1 h	1418
1 h 15 min	1415
1 h 30 min	
1 h 45 min	
keskiarvo	1419,5

vaa'an luke- ma	kg
0 min	1,462
15 min	1,469
30 min	1,473
45 min	1,473
1 h	1,474
1 h 15 min	1,474
1 h 30 min	
1 h 45 min	
keskiarvo	1,4708

pidettävä vakiona

lopullinen

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	0,74
1 h 15 min	0,74
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

kuorm.vas. jänni- te V	
0 min	135
15 min	135
30 min	135
45 min	135
1 h	135
1 h 15 min	135
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

kuorm.vas. virta A	
0 min	15
15 min	15
30 min	15
45 min	15
1 h	15
1 h 15 min	15
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	



Jäähtymiskäyrän mittaus

24,7	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä	
------	---	--

aika/ min	R U-X	R V-Y	R Z- W	keskiarvo R	Mittari Hioki 3224 B5041
1	1,444	1,442	1,433	1,4397	
2	1,421	1,418	1,421	1,4200	
3	1,411	1,410	1,412	1,4110	
4	1,406	1,406	1,408	1,4067	
5	1,403	1,402	1,403	1,4027	





syöttöteho	P1	P2	P3	P123
0 min	1,0736k	1,1043k	1,1024k	3,2803k
15 min	1,0659k	1,0927k	1,1098k	3,2684k
30 min	1,0721k	1,1060k	1,0938k	3,2719k
45 min	1,0628k	1,1005k	1,0981k	3,2614k
1 h				
1 h 15 min				
1 h 30 min				
1 h 45 min				

pyörimisnop	rpm
0 min	1397
15 min	1394
30 min	1387
45 min	1388
1 h	
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	

vaa'an lu- kema	kg
0 min	1,797
15 min	1,790
30 min	1,790
45 min	1,791
1 h	
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	

pidettävä vakiona

lopullinen

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

kuorm.vas. jännite V	
0 min	130
15 min	130
30 min	130
45 min	130
1 h	
1 h 15 min	

kuorm.vas. virta A	
0 min	18,0
15 min	18,0
30 min	18,0
45 min	18,0
1 h	
1 h 15 min	

Jäähdytyskäyrän mittaus

25,1	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä	
------	---	--

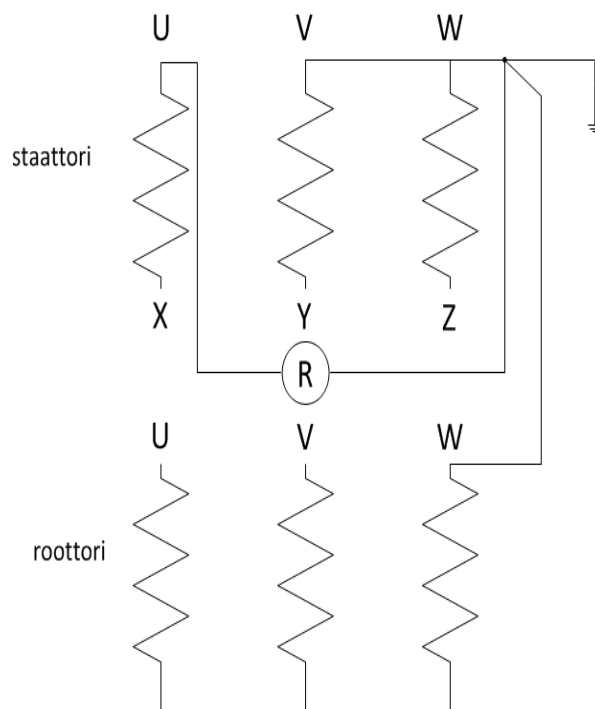
aika/ min	R U-X	R V-Y	R Z-W	keskiarvo R
1	1,500	1,500	1,500	1,5000
2	1,482	1,481	1,483	1,4820
3	1,473	1,472	1,472	1,4723
4	1,466	1,466	1,467	1,4663
5	1,461	1,461	1,462	1,4613



**Käämiresistanssit kylmänä 21,0 astetta C**

R U-X	1,2072
R V-Y	1,2061
R Z-W	1,2060
keskiarvo	1,2064

**Eristysvastusmittaus**



Mitataan staattorin U vaihe vastaan runko.

Lisäksi roottori ja toiset staattorin vaiheet V ja W vastaan runko.

Muutetaan kytkentää siten että mitataan staattorin V vaihe vastaan runko.

Otetaan roottori ja toiset staattorin vaiheet U ja W vastaan runko.

Viimeiseksi mitataan staattorin W vaihe vastaan runko.

Otetaan roottori ja toiset staattorin vaiheet U ja V vastaan runko.

Mittausjännitteenä oli 500 V. Mittarina oli Fluke 1653 B2212 multifunction tester.

Tarkistettiin vielä että mittari on kunnossa ja ei ole johdinkatkoksia.

eristysvastus R

U	>500 MΩ
V	>500 MΩ
W	>500 MΩ

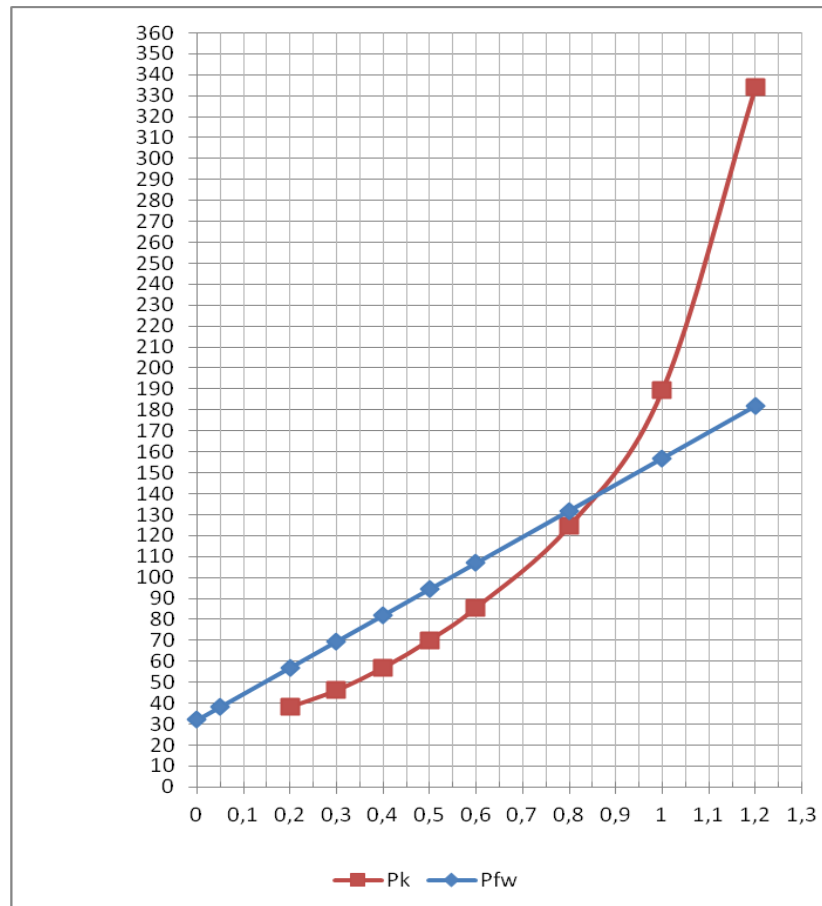
Mekaanisten häviöiden määrittäminen tyhjäkäyntikäyrän avulla

Rav 1,3109

käämiresistanssit kokeen jälk.

R U-X	1,3134
R V-Y	1,3077
R Z-W	1,3116

u0	P0	Pk	Pfw
1,2	0,5427	334,2159	181,7166
1	0,244	189,3727	156,761
0,8	0,1445	124,5819	131,8054
0,6	0,0946	85,69115	106,8498
0,5	0,0759	70,10878	94,37196
0,4	0,0606	56,93853	81,89415
0,3	0,0483	46,16736	69,41634
0,2	0,0395	38,22182	56,93853
0,05			38,22182
0			31,98291



### Tulosten käsittely ennen huoltoa

Käämiresistansseiksi kylmänä (21,0 °C) mitattiin ( $\Omega$ )

$$R_{U-X} = 1,2072$$

$$R_{V-Y} = 1,2061$$

$$R_{Z-W} = 1,2060$$

lasketaan keskimääräinen käämiresistanssi

$$R_1 = \frac{R_U + R_V + R_W}{3} = \frac{1,2072 + 1,2061 + 1,2060}{3} \Omega = 1,2064 \Omega$$

Kilpiarvot

$$U_n = 380 \text{ V}, I_n = 5,8 \text{ A}, \cos \phi = 0,72, P_N = 2,2 \text{ kW}, f = 50 \text{ Hz}$$

lasketaan pätöteho

$$P = \sqrt{3} UI \cos \phi = \sqrt{3} * 380 \text{ V} * 5,8 \text{ A} * 0,72 = 2,7486 \text{ kW}$$

nimellistoimintapisteessä syöttöverkosta otettu pätöteho

$$\eta = \frac{2,2 \text{ kW}}{2,7486 \text{ kW}} = 0,800 \approx 80 \%$$

moottorin tyhjäkäyntiteho nimellisjännitteellä

$$P_0 = 0,2440 \text{ kW}$$

Käämiresistansseiksi kokeen jälkeen mitattiin ( $\Omega$ )

$$R_{U-X} = 1,3134$$

$$R_{V-Y} = 1,3077$$

$$R_{Z-W} = 1,3116$$

käämiresistanssien keskiarvo kokeen jälkeen

$$R_0 = \frac{R_U + R_V + R_W}{3} = \frac{1,3134 + 1,3077 + 1,3116}{3} \Omega = 1,3109 \Omega$$

Nimellisjännitteellä tehdystä tyhjäkäyntikokeesta tarvitaan tyhjäkäyntiteho  $P_0$  kuormituskokeen vaa'an näyttämän määrittämiseksi.



DC-koneen tyhjäkäyntihäviöt voidaan laskea vähentämällä koko järjestelmän yhteisestä tyhjäkäyntitehosta pelkän kuormittamattoman epätahtimoottorin nimellisjännitteellä mitattu tyhjäkäyntiteho.

$$P_0' = 0,4149 \text{ kW}$$

$$P_0 = 0,2440 \text{ kW}$$

$$\text{DC-koneen tyhjäkäyntihäviöt } P = 0,4149 \text{ kW} - 0,2440 \text{ kW} = 0,1709 \text{ kW}$$

DC-generaattoria kuormituksena käytettäessä tehdään tutkittavan koneen ja vaakakoneen yhteinen tyhjäkäyntikoe, jolloin vaakakoneessa on sellainen magnetointi, minkä vaakakoneen magnetointikäämi kestää ja/ tai vaakageneraattorin navoissa sellainen jännite, jonka vaakakoneen ankkurikäänitys ja/ tai kuormitusvastus kestävät.

$$P_0' = 0,4149 \text{ kW}$$

$$F_1 = 0,094 \text{ kg}$$

$$I_m = 0,74 \text{ A}$$

Vaa'an lukema moottorin nimelliskuormalla

Lasketaan vaa'an näyttämä epätahtikoneen käydessä nimelliskuormalla

$$F_2 = F_1 + \frac{974}{n l} (P_N - P_0' + P_0)$$

$n$  = tutkittavan koneen nimellisyörimisnopeus rpm (kierroksia minuutissa) tyyppikilvestä.

$l$  = vaakakoneen vipuvarren pituus (metreinä). Tarkka pituus on merkitty vipuvarteen.

$P_N$  = tutkittavan epätahtikoneen nimellisteho arvokilvestä (kilowatteina).

$F_1$  = koneiston yhteisen tyhjäkäyntikokeen aikana vaakaan vaikuttava voima kilopondeina (kp). Numeroarvo on yh-

tä suuri kuin vaa'an lukema kilogrammoina. Yhden kilogramman massa kohdistuva maan vetovoima on yhden kilopondin suuruinen.

$P_0' =$  koneiston yhteinen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

$P_0 =$  tutkittavan epätahtikoneen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

Lukemaan  $F_1$  lisättävä arvo vastaa momenttia, joka saadaan aikaan DC-generaattorin kuormaksi lisättävällä säätövastuksella. Lukema  $F_2$  puolestaan vastaa moottoria kuormittavaa akselimomenttia.

### **nimellinen kuormitus 100%**

$$F_2 = F_1 + \frac{974}{n l} (PN - P_0' + P_0)$$

$$= 0,094 + \frac{974}{1410 * 1,018} (2,2 \text{ kW} - 0,4149 \text{ kW} + 0,2440 \text{ kW}) = 1,4708 \approx 1,471 \text{ kg}$$

Saatua vaakalukemaa  $F_2$  voidaan arvioida vertaamalla sitä koneen kilpiarvosta laskettavaan nimellismomenttiin. Määritetään moottorin nimellistehoa vastaava momentti nimellisellä pyörimisnopeudella  $n_N$ .

$$M_N = \frac{PN}{2\pi n_N} = \frac{2,2 \text{ kW}}{2\pi 1410} * 60 \frac{s}{min} = 14,8996 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin  $l$ -pituisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l * 9,81} = \frac{14,8996}{1,018 * 9,81} = 1,492 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### **osakuormitus 50%**

$$F_2 = 0,094 + \frac{974}{1462 * 1,018} (1,1 \text{ kW} - 0,4149 \text{ kW} + 0,2440 \text{ kW}) = 0,702 \text{ kg}$$

$$M_N = \frac{PN}{2\pi nN} = \frac{1,1 \text{ kW}}{2\pi 1462} * 60 \frac{s}{min} = 7,185 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin l-pituuisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l*9,81} = \frac{7,185}{1,018*9,81} = 0,7194 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### ylikuormitus 120%

$$F_2 = 0,094 + \frac{974}{1388*1,018} (2,64 \text{ kW} - 0,4149 \text{ kW} + 0,2440 \text{ kW}) = 1,796$$

kg

$$M_N = \frac{PN}{2\pi nN} = \frac{2,64 \text{ kW}}{2\pi 1388} * 60 \frac{s}{min} = 18,163 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin l-pituuisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l*9,81} = \frac{18,163}{1,018*9,81} = 1,819 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### Keskimääräinen lämpenemä

$$\theta = \Theta_2 - \Theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + \Theta_1) + (\Theta_1 - \Theta_a)$$

$R_2$  = vaihekäämien resistanssien keskiarvo kuormituskokeen päättyessä

$R_1$  = vaihekäämien resistanssien keskiarvo kylmänä ennen koetta lämpötilassa  $T_1$

- $k$  = käämitysmateriaalin ominaisresistanssin lämpötilakerroin  
 lämpötilassa 0 °C  
 - Kuparille  $k=235$
- $\Theta_a$  = jäähdytteen (tässä tapauksessa ympäröivän ilman) lämpötila kuormituskokeen päättyessä.
- $\Theta_1$  = käämityksen alkulämpötila, eli kylmän moottorin käämityksen lämpötila juuri ennen käynnistystä
- $\Theta_2$  = käämityksen loppulämpötila kuormituskokeen loppuhetkellä piirturin käyrältä

### osakuormitus

$$\theta = 42 - 24,7 = 17,3$$

$$= \frac{1,3440 - 1,2064}{1,2064} (235 + 21,0) + (21,0 - 24,7) = 25,49$$

### nimellinen kuormitus

$$\theta = 54 - 24,7 = 29,3$$

$$= \frac{1,4397 - 1,2064}{1,2064} (235 + 21,0) + (21,0 - 24,7) = 45,81$$

### ylikuormitus

$$\theta = 62 - 25,1 = 36,9$$

$$= \frac{1,5000 - 1,2064}{1,2064} (235 + 21,0) + (21,0 - 25,1) = 58,20$$

### kokonaishyötysuhde

$$\eta = \frac{P_{Rdc}}{P_1} = \frac{U_{DC} I_{dc}}{P_1}$$

- $U_{DC}$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen kuormitusvastuksesta mitattujen jännitteiden keskiarvo
- $I_{DC}$  = kuormitusvastuksesta mitattujen virtojen keskiarvo
- $P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo

Testauslaitteiston hyötysuhde ei ole sama asia kuin moottorin hyötysuhde, koska koko laitteiston hyötysuhteessa ovat mukana myös DC-generaattorin häviöt.

nimellinen kuormitus

$$\eta = \frac{135V \cdot 15A}{2711,9W} = 0,747 = 75 \%$$

## suora hyötysuhteen määrittäminen

Määritetään tarkka moottorin ulostuloteho yhtälöstä käyttäen muuten samoja arvoja kuin voiman määrittämisessä, mutta pyörimisnopeudeksi otetaan mittauksista saatu keskiarvo.

$$P_2 = (P_0' - P_0) + \frac{nl(F_2 - F_1)}{974}$$

$P_0'$  = koneiston yhteinen tyhjäkäyntiteho kilowatteina

$P_0$  = tutkittavan epätahtikoneen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

$n$  = kuormituskokeen aikana mitattujen pyörimisnopeuksien keskiarvo (kierroksia minuutissa).

$l$  = vaakakoneen vipuvarren pituus (metreinä). Tarkka pituus on merkitty vipuvarteeseen.

$F_2$  = kuormituskokeen aikana vaakaan kohdistuvien tasa-aikavälein luettujen voimien keskiarvo kilopondeina (kp).

$F_1$  = koneiston yhteisen tyhjäkäyntikokeen aikana vaakaan vaikuttava voima kilopondeina (kp).

$$P_2 = (0,4149 - 0,244) + \frac{1419,5 \cdot 1,018(1,4708 - 0,094)}{974} = 2,2139 \text{ kW}$$

Lasketaan suora hyötysuhde:

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_1}$$

$P_2$  = edellisestä yhtälöstä saatu arvo

$P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo

$$\eta_S = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2,2139 \text{ kW}}{2,7119 \text{ kW}} = 0,816 \approx 82 \%$$

## epäsuora hyötysuhteen määrittäminen

Epäsuora hyötysuhteen määrittäminen perustuu yhtälöön

$$\eta_E = \frac{P_1 - P_T}{P_1}$$

$P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo = 2,7119 kW

$P_T$  = moottorin kokonaishäviöt, jotka määritetään erillishäviöistä

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}$$

Eritellään mittaustuloksista saatavat häviöt ja lasketaan hyötysuhde.

Vakiohäviöt  $P_k$  (constant losses)

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}$$

$$P_s = 3 R_0 I_0^2$$

$$P_s = 3 R_0 I_0^2 = 3 * 1,2064 * 3,7270^2 = 50,273 \text{ W}$$

$$P_k = P_0 - P_s = 244 \text{ W} - 50,27 \text{ W} = 193,73 \text{ W}$$

$$P_{fe} = P_k - P_{fw} = 193,73 \text{ W} - 31,98291 \text{ W} = 161,74 \text{ W}$$

$P_0$  = tyhjäkäyntikokeessa mitattu moottorin ottaman pätötehon arvo (no-load losses)

$$P_0 = 244 \text{ W}$$

$P_s$  = staattorikämmityksen lämpöhäviöt tyhjäkäyntikokeessa (no-load winding losses)

$R_0$  = kylmän koneen keskimääräinen kämmiresistanssi = 1,2064  $\Omega$

$I_0$  = tyhjäkäyntikokeessa mitattu tyhjäkäyntivirran arvo = 3,7270 A

$P_{fw}$  = mekaaniset häviöt, kitka ja tuuletus (friction and windage losses)

$P_{fe}$  = rautahäviöt (iron losses)

Moottorin nimellisjännitettä vastaavat rautahäviöt  $P_{fe}$  saadaan vähentämällä nimellisjännitettä vastaavasta tyhjäkäyntitehosta  $P_0$  nimellisjännitettä vastaavat tyhjäkäynnin virtalämpöhäviöt ja mekaaniset häviöt:

$$P_{fe} = P_0 - P_s - P_{fw}, \text{ jossa } P_s = 3R_0I_0^2$$

$$P_{fe} = 244 \text{ W} - 50,273 \text{ W} - 31,983 = 161,744 \text{ W}$$

$R_0$  = moottorin todellinen tai ekvivalenttisen tähtikytkennän vaiheresistanssi tyhjäkäynnissä.

Staattorikäimityksen virtalämpöhäviöt (stator winding losses) lasketaan yhtälöstä

$$P_s = 3R_2I_s^2$$

$$P_s = 3 * 1,4397 * 5,7148^2 \text{ W} = 141,057 \text{ W}$$

$R_2$  = mitattu kuumen koneen resistanssiarvo (ensimmäisen jäähtymiskäyrän mittauksen vaiheresistanssien keskiarvo)=1,4397  $\Omega$

$I_s$  = kuormituskokeen aikana mitatun staattorivirran keskiarvo =5,7148 A

Roottorin virtalämpöhäviöt lasketaan ilmvälitehosta  $P_\delta$ .

$$P_\delta = P_1 - P_s - P_{fe}$$

$$P_\delta = 2711,9 \text{ W} - 141,057 - 161,747 \text{ W} = 2409,096 \text{ W} \approx 2409,1 \text{ W}$$

Roottorin virtalämpöhäviöt (rotor winding losses) saadaan nyt ilmvälitehon ja jättämän tulona yhtälöstä

$$P_r = sP_\delta$$

$s$  = jättämä (slip), joka lasketaan kokeen aikana mitattujen nopeuksien keskiarvon ja verkkotaajuuden avulla

$$s = 1 - \frac{pn}{f \times 60 \frac{s}{\text{min}}} = 1 - \frac{2 \cdot 1419,5}{50 \cdot 60} = 0,0536$$

$p$  = moottorin napapariiluku, joka voidaan päätellä nimellisuopeudesta

$$P_r = 0,0536 \cdot 2409,096 \text{ W} = 129,13 \text{ W} \approx 129,1 \text{ W}$$

$$s = 0,0536 \cdot 1500 = 80,4$$

Lisähäviöt  $P_{LL}$  (additional losses), joilla korvataan joukko vähäisiä erillishäviöitä, lasketaan IEC 60034-2 mukaisesti kuormituskäyrän avulla laskettujen jäännöshäviöiden (residual losses) käyrästä saatavan regressiosuoran  $P_{Lr} = f(M^2)$  kulmakertoimen ja momentin avulla.

Koska standardin mukainen lisähäviöiden määrittäminen on hieman hankalaa, käytetään tässä työssä standardin vanhemman version hieman epätarkempaa määrittämistapaa: Lisähäviöt ovat 0,5 % nimellisestä pätötehosta ja verrannolliset kuormitusvirran neliöön.

$$P_L = \frac{0,5}{100} \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 \sqrt{3} I_N U_N \cos \varphi$$

$$P_L = \frac{0,5}{100} * \left( \frac{5,7148}{5,8} \right)^2 * \sqrt{3} * 5,8 * 380 * 0,72 = 13,342 \text{ W}$$

Kun näin on määritetty kaikki erillishäviöt IEC 60034-2 mukaisesti, voidaan laskea epäsuora hyötysuhde:

$$\eta_E = \frac{P_1 - (P_s + P_r + P_{fe} + P_{fw} + P_L)}{P_1}$$

$$\eta = \frac{2711,9 - (141,057 + 129,13 + 161,747 + 31,98291 + 13,342)}{2711,9} = 0,8240 \approx 82,4 \%$$



**Mittaukset huollon jälkeen**  
**moottori K 2132/K**

Tyhjäkäynti mittaus

$$1,2 * U_n - 0,2 * U_n$$

$$U_n = 380 \text{ V}$$

Hioki 3193 D 0026 Power Hi tester tehoanalysaattori

pelkälle moottorille

käämiresistanssit kokeen jälk.

R U-X	1,1776
R V-Y	1,1729
R Z-W	1,1745

Hioki 3224 B5041

jän	U1	U2	U3	U123	I01	I02	I03	I0123
456	261,92	261,03	262,47	261,81	7,1910	7,0780	7,2710	7,1800
380	217,28	218,09	218,25	217,87	3,6050	3,6460	3,7260	3,6590
304	174,78	174,14	176,09	175,00	2,2240	2,1530	2,2730	2,2170
228	132,20	131,63	133,24	132,36	1,5020	1,4380	1,5720	1,5040
190	109,13	108,21	109,49	108,94	1,2070	1,1710	1,2310	1,2030
152	88,29	87,41	87,86	87,85	0,9930	0,9400	0,9770	0,9700
114	66,60	65,70	66,79	66,36	0,7780	0,7310	0,7990	0,7690
76	44,76	44,61	44,89	44,75	0,6330	0,6380	0,6570	0,6430

jän	P01	P02	P03	P0123	U0/U0N	cos fii0	n0/ rpm
456	0,1480k	0,1824k	0,2014k	0,5318k	1,2	0,0943	1498
380	0,0708k	0,0961k	0,0797k	0,2466k	1,0	0,1031	1497
304	0,0394k	0,0561k	0,0615k	0,1570k	0,8	0,1349	1495
228	0,0263k	0,0401k	0,0433k	0,1097k	0,6	0,1836	1492
190	0,0260k	0,0310k	0,0337k	0,0907k	0,5	0,2307	1491
152	0,0242k	0,0241k	0,0284k	0,0767k	0,4	0,3000	1487
114	0,0193k	0,0214k	0,0243k	0,0650k	0,3	0,4243	1481
76	0,0179k	0,0192k	0,0190k	0,0561k	0,2	0,6501	1464

roottori virran mittaus

jän	I4	I5	I6	I456
456	0,9130	0,5110	1,1060	0,8430
380	0,4750	0,8160	0,3230	0,5380
304	0,3960	0,6630	0,3990	0,4860
228	0,5280	0,6480	0,5400	0,5720
190	0,5930	0,6350	0,5730	0,6000
152	0,7300	0,6860	0,6610	0,6920
114	0,6510	0,7190	0,6430	0,6710
76	0,9300	0,8860	0,9260	0,9140

lämpötila

24,1	koneen vieressä
21,3	huone

Nimellisjännitteellä tehdystä tyhjäkäyntikokeesta tarvitaan tyhjäkäyntiteho P0 kuormituskokeen vaa'an näyttämän määrittämiseksi

Moottorin ja vaakakoneen yhteinen tyhjäkäyntikoe

Vaakakoneessa sellainen magnetointi, minkä vaakakoneen magnetointikäämi kestää ja/ tai vaakageneraattorin navoissa sellainen jännite, jonka vaakakoneen ankkurikäämitys ja/tai kuormitusvastus kestävät. Nimellisjännitteellä  $U_n=380\text{ V}$

roottori virran  
mitt.

	P0'1	P0'2	P0'3	P0'123	I4	I5	I6	
yht. P0'	0,1250k	0,1525k	0,1516k	0,4291k	1,165	1,160	1,140	
vaa'an F1/ kg	0,101							
DC mg lm/ A	0,74							
								I456
								1,155

Oikosulkukoe pelkälle moottorille  $I_n = 5,8\text{ A}$

Jarrutetaan roottori paikalleen ja säädetään jännite sellaiseen arvoon,

että kone ottaa verkosta nimellisvirtansa  $I_n$ .

Mittaukset 1,5  $I_n$ , 1,0  $I_n$ , 0,8  $I_n$ , 0,5  $I_n$

Mittaus suoritetaan 3:ssa eri roottorin asennossa.

**$I_n = 5,8 * 1,5 = 8,7\text{ A}$**

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,2458k	0,2418k	0,2547k	0,7423k	69,300	68,880	70,270	69,480
kesk	0,2874k	0,2833k	0,2984k	0,8691k	68,710	68,150	69,630	68,830
max	0,3080k	0,3047k	0,3203k	0,9330k	68,690	68,180	69,610	68,830

roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	7,863	7,737	7,837	7,812	18,742	18,956	18,734	18,811
kesk	8,170	8,021	8,151	8,114	19,345	19,629	19,481	19,485
max	8,472	8,334	8,479	8,428	20,373	20,589	20,623	20,528

**$I_n = 5,8 * 1,0 = 5,8\text{ A}$**

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,1350k	0,1326k	0,1401k	0,4077k	52,13	51,52	52,52	52,06
kesk	0,1517k	0,1476k	0,1549k	0,4542k	52,01	51,31	52,37	51,90
max	0,1643k	0,1610k	0,1705k	0,4958k	51,69	51,08	52,11	51,63

roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	5,553	5,467	5,523	5,514	13,265	13,404	13,22	13,296
kesk	5,837	5,759	5,818	5,805	14,117	13,977	13,817	13,970
max	6,166	6,057	6,159	6,127	14,779	14,954	14,971	14,901

$$I_n = 5,8 * 0,8 = 4,64 \text{ A}$$

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,0883k	0,0843k	0,0879k	0,2605k	42,550	41,790	41,950	42,100
kesk	0,0970k	0,0937k	0,0968k	0,2875k	42,350	41,620	41,740	41,900
max	0,1093k	0,1039k	0,1077k	0,3209k	42,210	41,410	41,650	41,760

## roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	4,407	4,328	4,353	4,363	10,444	10,584	10,528	10,519
kesk	4,646	4,577	4,616	4,613	11,089	11,035	11,186	11,103
max	4,897	4,819	4,834	4,85	11,796	11,875	11,659	11,777

$$I_n = 5,8 * 0,5 \text{ A} = 2,9 \text{ A}$$

	P1	P2	P3	P123	U1	U2	U3	U123
min	0,0391k	0,0382k	0,0411k	0,1184k	28,57	27,58	28,53	28,23
kesk	0,0417k	0,0403k	0,0437k	0,1257k	28,46	27,54	28,49	28,16
max	0,0465k	0,0452k	0,0484k	0,1401k	28,39	27,46	28,36	28,07

## roottori virran mittaus

	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6	I456
min	2,958	2,903	2,962	2,941	7,071	7,031	7,178	7,093
kesk	3,072	3,009	3,067	3,0490	7,346	7,428	7,239	7,338
max	3,217	3,17	3,228	3,205	7,804	7,652	7,813	7,756



4,614
4,620
4,585

syöttöteho	P1	P2	P3	P123
0 min	0,4488k	0,4861k	0,4601k	1,3950k
15 min	0,4530k	0,4780k	0,4632k	1,3942k
30 min	0,4433k	0,4809k	0,4618k	1,3860k
45 min	0,4575k	0,4760k	0,4643k	1,3978k
1 h	0,4577k	0,4787k	0,4690k	1,4054k
1 h 15 min	0,4582k	0,4759k	0,4699k	1,4040k
1 h 30 min				
1 h 45 min				
2 h				

pyörimisnop	rpm
0 min	1465
15 min	1464
30 min	1463
45 min	1463
1 h	1462
1 h 15 min	1462
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

vaa'an lukema	kg
0 min	0,700
15 min	0,700
30 min	0,702
45 min	0,702
1 h	0,701
1 h 15 min	0,700
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	0,74
1 h 15 min	0,74
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

anturi 3 lämpötilat

12:09	37,0
12:20	37,6
12:35	39,3
12:50	40,2
13:05	40,9
13:20	41,3

kuorm.vas. jännite V	
0 min	145
15 min	145
30 min	145
45 min	145
1 h	145
1 h 15 min	145
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

kuorm.vas. virta A	
0 min	8,0
15 min	8,0
30 min	8,0
45 min	8,0
1 h	8,0
1 h 15 min	8,0
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

### Jäähdytyskäyrän mittaus

25,4	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä
------	---

Mittari Hioki 3224 B5041 40 s sammuttamisesta				
aika/ min	R U-X	R V-Y	R Z-W	keskiarvo R
1	1,265	1,260	1,261	1,2620
2	1,261	1,257	1,258	1,2587
3	1,256	1,253	1,256	1,2550
4	1,255	1,250	1,252	1,2523
5	1,252	1,247	1,251	1,2500
6	1,250	1,245	1,247	1,2473





syöttöteho	P1	P2	P3	P123	P123(W)
0 min	0,8901k	0,8960k	0,9032k	2,6893k	2689,3
15 min	0,8839k	0,8881k	0,8959k	2,6679k	2667,9
30 min	0,8937k	0,9042k	0,8934k	2,6913k	2691,3
45 min	0,8922k	0,8854k	0,8986k	2,6762k	2676,2
1 h	0,8957k	0,8889k	0,8810k	2,6656k	2665,6
1 h 15 min	0,8927k	0,9010k	0,8965k	2,6902k	2690,2
1 h 30 min				keskiarvo	2680,1

pyörimisnop	rpm
0 min	1421
15 min	1419
30 min	1416
45 min	1416
1 h	1419
1 h 15 min	1419
1 h 30 min	
1 h 45 min	
keskiarvo	1418,3

vaa'an lukema	kg
0 min	1,456
15 min	1,458
30 min	1,461
45 min	1,457
1 h	1,452
1 h 15 min	1,457
1 h 30 min	
1 h 45 min	
keskiarvo	1,457

pidettävä vakiona

lopullinen

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	0,74
1 h 15 min	0,74
1 h 30 min	

pidettävä vakiona

anturi 3 lämpötilat

13:47	43,6
14:02	47,0
14:17	48,9
14:32	50,2
14:47	51,0
15:02	51,3

kuorm.vas. jännite V	
0 min	135
15 min	135
30 min	135
45 min	135
1 h	135
1 h 15 min	135

kuorm.vas. virta A	
0 min	16,3
15 min	16,3
30 min	16,3
45 min	16,3
1 h	16,3
1 h 15 min	16,3

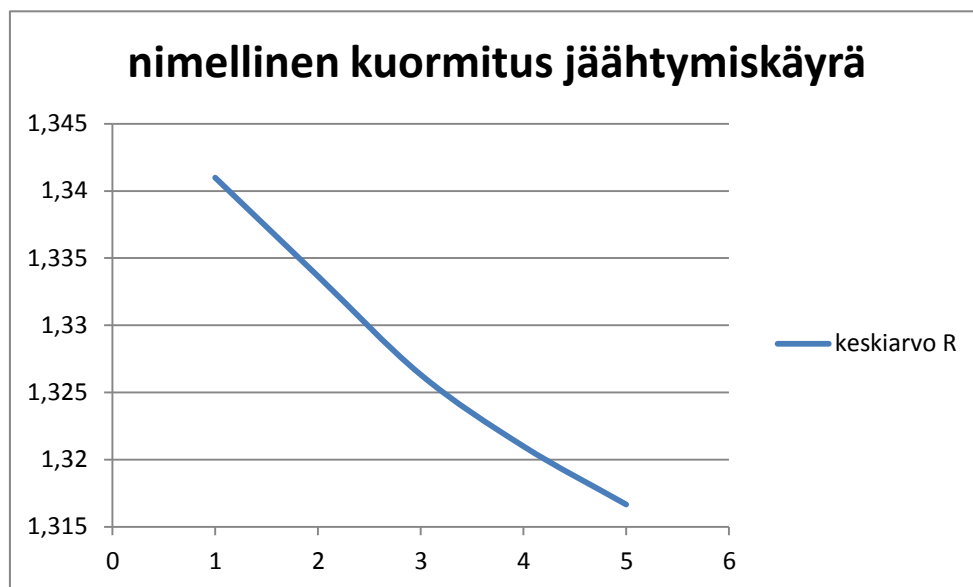


## Jäähymiskäyrän mittaus

	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä
25,7	

## Mittari Hioki 3224 B5041

21 s sammuttamisesta	R U-X	R V-Y	R Z-W	keskiarvo R
1	1,345	1,340	1,338	1,3410
2	1,338	1,331	1,332	1,3337
3	1,329	1,324	1,326	1,3263
4	1,324	1,319	1,320	1,3210
5	1,320	1,314	1,316	1,3167
6	1,317	1,312	1,314	1,3143



**YLIKUORMITUS**

syöttöjännite	U1	U2	U3	U123
0 min	218,67	219,05	219,06	218,93
15 min	220,54	221,60	221,07	221,07
30 min	220,21	220,93	220,47	220,54
45 min	220,29	220,83	220,53	220,55
1 h	219,82	220,46	220,68	220,32
1 h 15 min				
1 h 30 min				
1 h 45 min				
2 h				

pidetään nimellisenä

roottori virran mittaus

syöttövirta	I1	I2	I3	I123	I4	I5	I6
0 min	6,423	6,384	6,401	6,403	11,725	11,796	11,804
15 min	6,438	6,468	6,417	6,441	11,659	11,757	11,765
30 min	6,434	6,399	6,403	6,412	11,599	11,729	11,748
45 min	6,425	6,388	6,416	6,410	11,656	11,810	11,668
1 h	6,410	6,397	6,397	6,401	11,656	11,793	11,652
1 h 15 min							
1 h 30 min							
1 h 45 min							
2 h							

I456

11,775

11,727

11,692

11,711

11,700

syöttöteho	P1	P2	P3	P123
0 min	1,0824k	1,0751k	1,0832k	3,2407k
15 min	1,0903k	1,0921k	1,0812k	3,2636k
30 min	1,0864k	1,0786k	1,0822k	3,2472k
45 min	1,0850k	1,0789k	1,0864k	3,2503k
1 h	1,0812k	1,0801k	1,0830k	3,2443k
1 h 15 min				
1 h 30 min				
1 h 45 min				

pyörimisnop	rpm
0 min	1394
15 min	1393
30 min	1392
45 min	1393
1 h	1392
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

vaa'an lukema	kg
0 min	1,787
15 min	1,803
30 min	1,788
45 min	1,790
1 h	1,789
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

pidettävä vakiona

lopullinen

pidettävä vakiona

vaa'an lmg	A
0 min	0,74
15 min	0,74
30 min	0,74
45 min	0,74
1 h	0,74
1 h 15 min	
1 h 30 min	
1 h 45 min	
2 h	

anturi 3 lämpötilat

15:32	53,5
15:47	55,7
16:02	57,3
16:17	58,4
16:32	58,7

kuorm.vas. jännite V	
0 min	130
15 min	130
30 min	130
45 min	130
1 h	130

kuorm.vas. virta A	
0 min	20,10
15 min	20,10
30 min	20,00
45 min	19,95
1 h	20,00



Jäähtymiskäyrän mittaus

25,9	Ympäristön lämpötila Ty kuormituksen päättyessä
------	---

Mittari Hioki 3224 B5041 17 s sammuttamisesta

aika/ min	R U-X	R V-Y	R Z-W	keskiarvo R
1	1,406		1,398	1,4007
2	1,396		1,388	1,3943
3	1,386		1,378	1,3813
4	1,378		1,371	1,3740
5	1,373		1,366	1,3693
6	1,369		1,362	1,3653

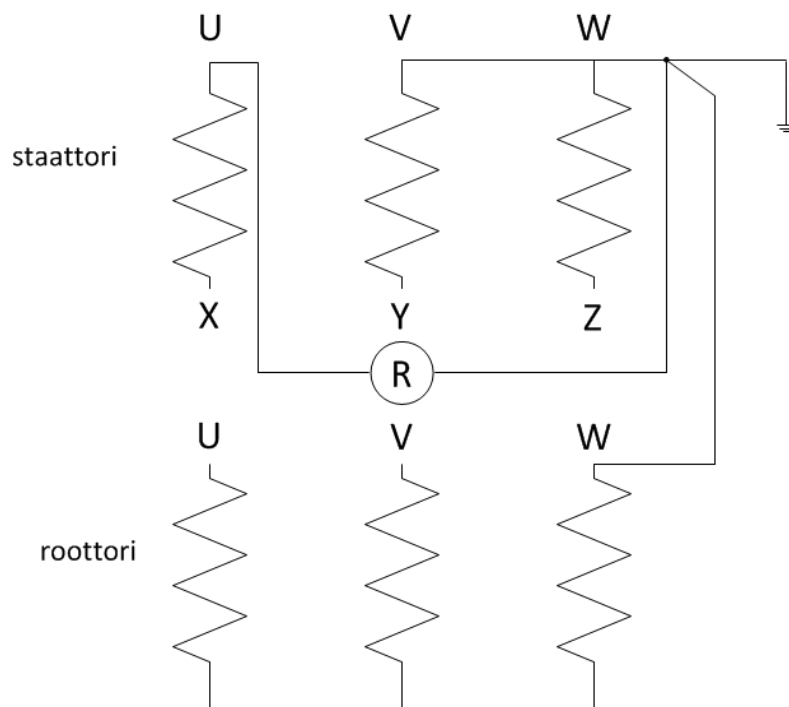


**Käämiresistanssit kylmänä 21,1 astetta C**

R U-X	1,1402
R V-Y	1,1361
R Z-W	1,1373
keskiarvo	1,1379

Hioki 3224 B5041

**Eristysvastusmittaus**



Mitataan staattorin U vaihe vastaan runko.

Lisäksi roottori ja toiset staattorin vaiheet V ja W vastaan runko.

Muutetaan kytkentää siten että mitataan staattorin V vaihe vastaan runko.

Otetaan roottori ja toiset staattorin vaiheet U ja W vastaan runko.

Viimeiseksi mitataan staattorin W vaihe vastaan runko.

Otetaan roottori ja toiset staattorin vaiheet U ja V vastaan runko.

Mittausjännitteenä oli 500 V. Mittarina oli Fluke 1653 B2212 multifunction tester.

Tarkistettiin vielä että mittari on kunnossa ja ei ole johdinkatkoksia.

eristysvastus Riso MΩ

U	>500
V	>500
W	>500

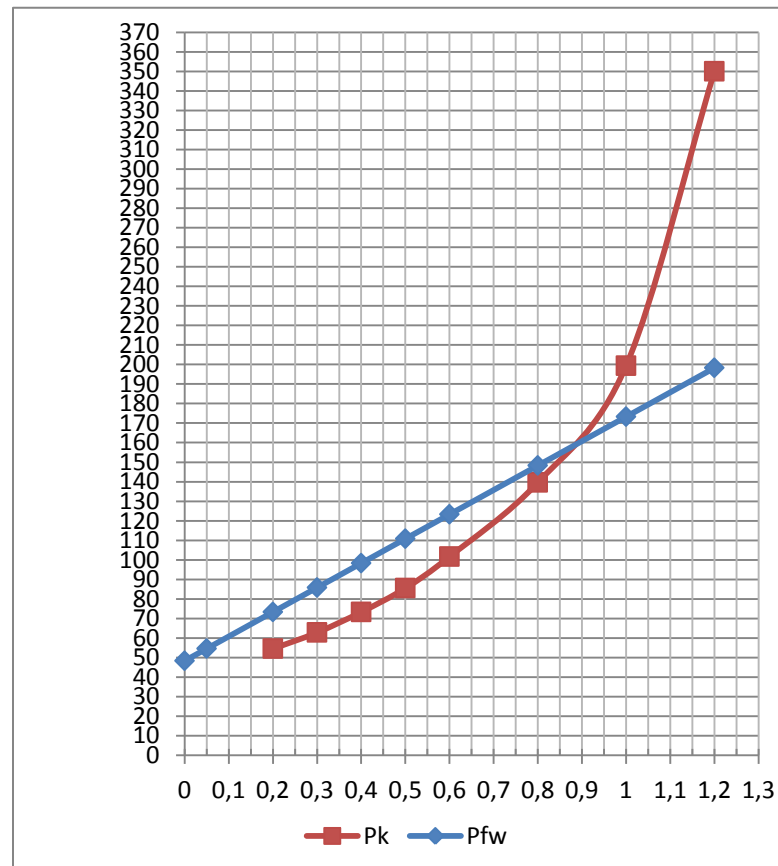
Mekaanisten häviöiden määrittäminen tyhjäkäyntikäyrän avulla

Rav 1,175

käämiresistanssit kokeen jälk.

R U-X	1,1776
R V-Y	1,1729
R Z-W	1,1745

u0	P0	Pk	Pfw
1,2	0,5318	350,0778	198,3216
1	0,2466	199,4063	173,3339
0,8	0,1570	139,6743	148,3463
0,6	0,1097	101,7264	123,3586
0,5	0,0907	85,59859	110,8648
0,4	0,0767	73,38333	98,37097
0,3	0,0650	62,91545	85,87715
0,2	0,0561	54,64259	73,38333
0,05			54,64259
0			48,39568



## Tulosten käsittely huollon jälkeen

Käämiresistansseiksi kylmänä (21,1 °C) mitattiin ( $\Omega$ )

$$R_{U-X} = 1,1402$$

$$R_{V-Y} = 1,1361$$

$$R_{Z-W} = 1,1373$$

lasketaan keskimääräinen käämiresistanssi

$$R_1 = \frac{R_{U-X} + R_{V-Y} + R_{Z-W}}{3} = \frac{1,1402 + 1,1361 + 1,1373}{3} \Omega = 1,1379 \Omega$$

Kilpiarvot

$$U_n = 380 \text{ V}, I_n = 5,8 \text{ A}, \cos \phi = 0,72, P_N = 2,2 \text{ kW}, f = 50 \text{ Hz}$$

lasketaan pätöteho

$$P = \sqrt{3} UI \cos \phi = \sqrt{3} * 380 \text{ V} * 5,8 \text{ A} * 0,72 = 2,7486 \text{ kW}$$

nimellistoimintapisteessä syöttöverkosta otettu pätöteho

$$\eta = \frac{2,2 \text{ kW}}{2,7486 \text{ kW}} = 0,800 \approx 80 \%$$

moottorin tyhjäkäyntiteho nimellisjännitteellä

$$P_0 = 0,2466 \text{ kW}$$

Käämiresistansseiksi kokeen jälkeen mitattiin ( $\Omega$ )

$$R_{U-X} = 1,1776$$

$$R_{V-Y} = 1,1729$$

$$R_{Z-W} = 1,1745$$

käämiresistanssien keskiarvo kokeen jälkeen

$$R_0 = \frac{R_{U-X} + R_{V-Y} + R_{Z-W}}{3} = \frac{1,1776 + 1,1729 + 1,1745}{3} \Omega = 1,175 \Omega$$

Nimellisjännitteellä tehdystä tyhjäkäyntikokeesta tarvitaan tyhjäkäyntiteho  $P_0$  kuormituskokeen vaa'an näyttämän määrittämiseksi.

DC-koneen tyhjäkäyntihäviöt voidaan laskea vähentämällä koko järjestelmän yhteisestä tyhjäkäyntitehosta pelkän kuormittamattoman epätahtimoottorin nimellisjännitteellä mitattu tyhjäkäyntiteho.

$$P_0' = 0,4291 \text{ kW}$$

$$P_0 = 0,2466 \text{ kW}$$

$$\text{DC-koneen tyhjäkäyntihäviöt } P = 0,4291 \text{ kW} - 0,2466 \text{ kW} = 0,1825 \text{ kW}$$

DC-generaattoria kuormituksena käytettäessä tehdään tutkittavan koneen ja vaakakoneen yhteinen tyhjäkäyntikoe, jolloin vaakakoneessa on sellainen magnetointi, minkä vaakakoneen magnetointikäämi kestää ja/ tai vaakageneraattorin navoissa sellainen jännite, jonka vaakakoneen ankkurikäänitys ja/ tai kuormitusvastus kestävät.

$$P_0' = 0,4291 \text{ kW}$$

$$F_1 = 0,101 \text{ kg}$$

$$I_m = 0,74 \text{ A}$$

Vaa'an lukema moottorin nimelliskuormalla

Lasketaan vaa'an näyttämä epätahtikoneen käydessä nimelliskuormalla

$$F_2 = F_1 + \frac{974}{n l} (P_N - P_0' + P_0)$$

$n$  = tutkittavan koneen nimellisyörimisnopeus rpm (kierroksia minuutissa) tyyppikilvestä.

$l$  = vaakakoneen vipuvarren pituus (metreinä). Tarkka pituus on merkitty vipuvarteeseen.

$P_N$  = tutkittavan epätahtikoneen nimellisteho arvokilvestä (kilowatteina)

$F_1$  = koneiston yhteisen tyhjäkäyntikokeen aikana vaakaan vaikuttava voima kilopondeina (kp). Numeroarvo on yh-



tä suuri kuin vaa'an lukema kilogrammoina. Yhden kilogramman massa kohdistuva maan vetovoima on yhden kilopondin suuruinen.

$P_0'$  = koneiston yhteinen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

$P_0$  = tutkittavan epätahtikoneen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

Lukemaan  $F_1$  lisättävä arvo vastaa momenttia, joka saadaan aikaan DC-generaattorin kuormaksi lisättävällä säätövastuksella. Lukema  $F_2$  puolestaan vastaa moottoria kuormittavaa akselimomenttia.

### **nimellinen kuormitus 100%**

$$F_2 = F_1 + \frac{974}{n l} (PN - P_0' + P_0)$$

$$= 0,101 + \frac{974}{1410 \cdot 1,018} (2,2 \text{ kW} - 0,4291 \text{ kW} + 0,2466 \text{ kW}) = 1,470 \approx 1,47 \text{ kg}$$

$$n = 1423 \text{ todellinen} \Rightarrow F_2 = 1,458 \approx 1,46$$

Saatua vaakalukemaa  $F_2$  voidaan arvioida vertaamalla sitä koneen kilpiarvosta laskettavaan nimellismomenttiin. Määritetään moottorin nimellistehoa vastaava momentti nimellisellä pyörimisnopeudella  $n_N$ .

$$M_N = \frac{PN}{2\pi n N} = \frac{2,2 \text{ kW}}{2\pi 1410} * 60 \frac{s}{min} = 14,8996 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin  $l$ -pituisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l \cdot 9,81} = \frac{14,8996}{1,018 \cdot 9,81} = 1,492 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### **osakuormitus 50%**

$$F_2 = 0,101 + \frac{974}{1462 \cdot 1,018} (1,1 \text{ kW} - 0,4291 \text{ kW} + 0,2466 \text{ kW}) = 0,701 \text{ kg}$$

$$n = 1465 \text{ todellinen} \Rightarrow F_2 = 0,700$$

$$M_N = \frac{PN}{2\pi nN} = \frac{1,1 \text{ kW}}{2\pi 1462} * 60 \frac{s}{min} = 7,185 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin l-pituuisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l*9,81} = \frac{7,185}{1,018*9,81} = 0,7194 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### ylikuormitus 120 %

$$F_2 = 0,101 + \frac{974}{1388*1,018} (2,64 \text{ kW} - 0,4291 \text{ kW} + 0,2466 \text{ kW}) = 1,795$$

kg

$$n = 1395 \text{ todellinen} \Rightarrow F_2 = 1,787 \approx 1,79 \text{ kg}$$

$$M_N = \frac{PN}{2\pi nN} = \frac{2,64 \text{ kW}}{2\pi 1388} * 60 \frac{s}{min} = 18,163 \text{ Nm}$$

Kyseisen momentin l-pituuisella varrella aiheuttama painolukema vaa'alla on

$$F_N = \frac{MN}{l*9,81} = \frac{18,163}{1,018*9,81} = 1,8187 \approx 1,82 \text{ kg}$$

$F_2$  ja  $F_N$  ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

### Keskimääräinen lämpenemä

$$\theta = \Theta_2 - \Theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + \Theta_1) + (\Theta_1 - \Theta_a)$$

$R_2$  = vaihekäämien resistanssien keskiarvo kuormituskokeen päättyessä

$R_1$  = vaihekäämien resistanssien keskiarvo kylmänä ennen koetta lämpötilassa  $T_1$

- $k$  = käämitysmateriaalin ominaisresistanssin lämpötilakerroin  
lämpötilassa 0 °C  
- Kuparille  $k=235$
- $\Theta_a$  = jäähtytteen (tässä tapauksessa ympäröivän ilman) lämpötila kuormituskokeen päättyessä.
- $\Theta_1$  = käämityksen alkulämpötila, eli kylmän moottorin käämityksen lämpötila juuri ennen käynnistystä
- $\Theta_2$  = käämityksen loppulämpötila kuormituskokeen loppuhetkellä piirturin käyrältä

### osakuormitus

$$\theta = 41,3 - 25,4 = 15,9$$

$$= \frac{1,2620 - 1,1379}{1,1379} (235 + 21,1) + (21,1 - 25,4) = 27,46$$

### nimellinen kuormitus

$$\theta = 51,3 - 25,7 = 25,6$$

$$= \frac{1,3410 - 1,1379}{1,1379} (235 + 21,1) + (21,1 - 25,7) = 44,89$$

### ylikuormitus

$$\theta = 58,7 - 25,9 = 32,8$$

$$= \frac{1,4007 - 1,1379}{1,1379} (235 + 21,1) + (21,1 - 25,9) = 58,04$$

### kokonaishyötysuhde

$$\eta = \frac{P_{Rdc}}{P_1} = \frac{U_{DC} I_{dc}}{P_1}$$

- $U_{DC}$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen kuormitusvastuksesta mitattujen jännitteiden keskiarvo
- $I_{DC}$  = kuormitusvastuksesta mitattujen virtojen keskiarvo
- $P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo

Testauslaitteiston hyötysuhde ei ole sama asia kuin moottorin hyötysuhde, koska koko laitteiston hyötysuhteessa ovat mukana myös DC-generaattorin häviöt.

nimellinen kuormitus

$$\eta = \frac{135V * 16,3A}{2680,1W} = 0,821 = 82 \%$$

## suora hyötysuhteen määrittäminen

Määritetään tarkka moottorin ulostuloteho käyttäen muuten samoja arvoja kuin voiman määrittämisessä, mutta pyörimisnopeudeksi otetaan mittauksista saatu keskiarvo.

$$P_2 = (P_0' - P_0) + \frac{nl(F_2 - F_1)}{974}$$

$P_0'$  = koneiston yhteinen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

$P_0$  = tutkittavan epätahtikoneen tyhjäkäyntiteho kilowatteina.

$n$  = kuormituskokeen aikana mitattujen pyörimisnopeuksien keskiarvo (kierroksia minuutissa).

$l$  = vaakakoneen vipuvarren pituus (metreinä). Tarkka pituus on merkitty vipuvarteen.

$F_2$  = kuormituskokeen aikana vaakaan kohdistuvien tasa-aikavälein luettujen voimien keskiarvo kilopondeina (kp).

$F_1$  = koneiston yhteisen tyhjäkäyntikokeen aikana vaakaan vaikuttava voima kilopondeina (kp).

$$P_2 = (0,4291 - 0,2466) + \frac{1418,3 * 1,018(1,457 - 0,101)}{974} = 2,1926 \text{ kW}$$

Lasketaan suora hyötysuhde:

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_1}$$

$P_2$  = edellisestä yhtälöstä saatu arvo

$P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo

$$\eta_S = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2,1926 \text{ kW}}{2,6801 \text{ kW}} = 0,8181 \approx 82 \%$$

## epäsuora hyötysuhteen määrittäminen

Epäsuora hyötysuhteen määrittäminen perustuu yhtälöön

$$\eta_E = \frac{P_1 - P_T}{P_1}$$

$P_1$  = kuormituskokeen aikana tasa-aikavälein mitattujen sisäänmenotehojen keskiarvo = 2,6801 kW

$P_T$  = moottorin kokonaishäviöt, jotka määritetään erillishäviöistä

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}$$

Eritellään mittaustuloksista saatavat häviöt ja lasketaan hyötysuhde.

Vakiohäviöt  $P_k$  (constant losses)

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}$$

$$P_s = 3 R_0 I_0^2$$

$$P_s = 3 R_0 I_0^2 = 3 * 1,1379 * 3,6590^2 = 45,704 \text{ W}$$

$$P_k = P_0 - P_s = 246,6 - 45,704 = 200,89 \text{ W} \approx 200,9 \text{ W}$$

$$P_{fe} = P_k - P_{fw} = 200,89 - 48,396 = 152,494 \text{ W} \approx 152,5 \text{ W}$$

$P_0$  = tyhjäkäyntikokeessa mitattu moottorin ottaman pätötehon arvo (no-load losses)

$$P_0 = 246,6 \text{ W}$$

$P_s$  = staattorikäimityksen lämpöhäviöt tyhjäkäyntikokeessa (no-load winding losses)

$R_0$  = kylmän koneen keskimääräinen kämmiresistanssi = 1,1379  $\Omega$

$I_0$  = tyhjäkäyntikokeessa mitattu tyhjäkäyntivirran arvo = 3,6590 A

$P_{fw}$  = mekaaniset häviöt, kitka ja tuuletus (friction and windage losses)

$P_{fe}$  = rautahäviöt (iron losses)

Moottorin nimellisjännitettä vastaavat rautahäviöt  $P_{fe}$  saadaan vähentämällä nimellisjännitettä vastaavasta tyhjäkäyntitehosta  $P_0$  nimellisjännitettä vastaavat tyhjäkäynnin virtalämpöhäviöt ja mekaaniset häviöt:

$$P_{fe} = P_0 - P_s - P_{fw}, \text{ jossa } P_s = 3R_0 I_0^2$$

$$P_{fe} = 246,6 \text{ W} - 45,704 \text{ W} - 48,396 \text{ W} = 152,50 \text{ W} \approx 152,5 \text{ W}$$

$R_0$  = moottorin todellinen tai ekvivalenttisen tähtikytkennän vaiheresistanssi tyhjäkäynnissä.

Staattorikäimityksen virtalämpöhäviöt (stator winding losses) lasketaan yhtälöstä

$$P_s = 3R_2 I_s^2$$

$$P_s = 3 * 1,3410 * 5,6455^2 \text{ W} = 128,22 \text{ W}$$

$R_2$  = mitattu kuumen koneen resistanssiarvo (ensimmäisen jäähtymiskäyrän mittauksen vaiheresistanssien keskiarvo)=1,3410  $\Omega$

$I_s$  = kuormituskokeen aikana mitatun staattorivirran keskiarvo =5,6455 A

Roottorin virtalämpöhäviöt lasketaan ilmavälitehosta  $P_\delta$ .

$$P_\delta = P_1 - P_s - P_{fe}$$

$$P_\delta = 2680,1 \text{ W} - 128,22 \text{ W} - 152,50 = 2399,38 \text{ W} \approx 2399,4 \text{ W}$$

$$P_{fe} = P_0 - P_s - P_{fw} = 246,6 - 45,704 - 48,396 = 152,50 \text{ W} \approx 152,5 \text{ W}$$

Roottorin virtalämpöhäviöt (rotor winding losses) saadaan nyt ilmavälitehon ja jättämän tulona yhtälöstä

$$P_r = sP_\delta$$

$s$  = jättämä (slip), joka lasketaan kokeen aikana mitattujen nopeuksien keskiarvon ja verkkotaajuuden avulla

$$s = 1 - \frac{pn}{f \times 60 \frac{s}{\text{min}}} = 1 - \frac{2 \cdot 1418,3}{50 \cdot 60} = 0,05447$$

$p$  = moottorin napapariiluku, joka voidaan päätellä nimellisuudesta

$$P_r = 0,05447 \cdot 2399,38 \text{ W} = 130,69 \text{ W}$$

$$s = 0,05447 \cdot 1500 = 81,7$$

Lisähäviöt  $P_{LL}$  (additional losses), joilla korvataan joukko vähäisiä erillishäviöitä, lasketaan IEC 60034-2 mukaisesti kuormituskäyrän avulla laskettujen jäännöshäviöiden (residual losses) käyrästä saatavan regressiosuoran  $P_{Lr} = f(M^2)$  kulmakertoimen ja momentin avulla.

Koska standardin mukainen lisähäviöiden määrittäminen on hieman hankalaa, käytetään tässä työssä standardin vanhemman version hieman epätarkempaa määrittämistapaa: Lisähäviöt ovat 0,5 % nimellisestä pätötehosta ja verrannolliset kuormitusvirran neliöön.

$$P_L = \frac{0,5}{100} \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 \sqrt{3} I_N U_N \cos \varphi$$

$$P_L = \frac{0,5}{100} * \left( \frac{5,6455}{5,8} \right)^2 * \sqrt{3} * 5,8 * 380 * 0,72 = 13,020 \text{ W}$$

$$P_{fw} = 48,39568 \text{ W}$$

Kun näin on määritetty kaikki erillishäviöt IEC 60034-2 mukaisesti, voidaan laskea epäsuora hyötysuhde:

$$\eta_E = \frac{P_1 - (P_s + P_r + P_{fe} + P_{fw} + P_L)}{P_1}$$

$$\eta = \frac{2680,1 - (128,22 + 130,69 + 152,50 + 48,39568 + 13,020)}{2680,1} = 0,8236 \approx 82,4 \%$$