



**TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**TASASÄHKÖKESTOMAGNEETTIGENERAATTORIN TESTAUS JA MITTAUS**

**Työn tekijä: Matti Pennanen  
Työn ohjaaja ja valvoja:  
TkL Jarno Varteva**

**Työ hyväksytty: 20.11.2008**

**Jarno Varteva  
Lehtori**

## INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Matti Pennanen	
<b>Työn nimi:</b> Tasasähkökestomagneettigeneraattorin testaus ja mittaus	
<b>Päivämäärä:</b> 20.11.2008	<b>Sivumäärä:</b> 32 s. + 3 liitettä
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn ohjaaja ja valvoja:</b> TkL Jarno Varteva	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia ammattikorkeakoululle. Työssä selvitettiin testaamalla ja mittaamalla suunnittelijan rakentaman tasasähkökestomagneettigeneraattorin ominaisuuksia. Mittauksissa oli päätarkoituksena selvittää tasasähkökestomagneettigeneraattorin 14 V:n kierrosnopeus, lähtömomentti, teho ja hyötysuhde. Tasasähkökestomagneettigeneraattorin käyttöolosuhteen tulisi toimia tuuligeneraattorina. Mittaustulokset antavat tärkeää tietoa suunnittelijalle tasasähkökestomagneettikoneen ominaisuuksista toimia tuulivoimakäytössä.</p> <p>Mittaukset aloitettiin ammattikorkeakoulun sähkökonelaboratorioiden tiloissa. Aluksi rakennettiin kytkentäalusta tasasähkökestomagneettigeneraattorin mittauksia varten. Tämän jälkeen laboratorion sivuvirtakone laitettiin toimimaan voimakoneena laturin hihnan välityksellä. Jännitemittarilla tarkastettiin tasasähkökestomagneettigeneraattorin jännitteen olevan n. 14 V:n suuruinen, jolloin mitattiin generaattorin pyörimisnopeus takometrillä. Lähtömomentti mitattiin mekaanisesti tarkkuusvaakaa käyttäen. Teho ja tuotto mitattiin samalla kertaa käyttäen yleismittareita sekä tehoanalysointia.</p> <p>Tasasähkökestomagneettigeneraattorin kierrosnopeudeksi mitattiin 815 kierrosta minuutissa ja lähtömomentin arvoksi 1,4 Nm. Tasasähkökestomagneettigeneraattoria kuormitettiin ja siitä saatiin enimmillään tehoa ja virtaa 91,5 W:n ja 6,48 A:n edestä. Hyötysuhteen arvoiksi mitattiin eri kuormitusvirroilla 0,14; 0,24; 0,31; 0,33 ja 0,34.</p> <p>Tuloksia verrattiin Windstream Powerin tasasähkögeneraattoriin 443540 ja auton laturiin. Näistä vertailuista voitiin tehdä päätelmiä, joiden mukaan suunnittelijan rakentama tasasähkökestomagneettigeneraattori ei ole järkevä vaihtoehto tuottamaan tuulivoimalla sähköä.</p>	
<b>Avainsanat:</b> tasasähkökestomagneettigeneraattori, teho, hyötysuhde	

## ABSTRACT

**Name:** Matti Pennanen

**Title:** : Testing and Measuring of Permanent Magnet DC Generator

**Date:** 20 November 2008

**Number of pages:** 32 + 3 attachments

**Department:** Electrical engineering

**Study Programme:** Power Systems

**Instructor and supervisor:** Licentiate in technology Jarmo Varteva

This thesis was carried out for the Polytechnic Metropolia. The purpose of the work was to observe the properties of a permanent magnet dc generator created by a designer. This work is based on testing and measuring the device. The main objective was to determine the revolution per minute, breakaway torque, power and efficiency at 14 V. This information was important as the designer needed to know if the device could function as a wind generator.

In order to perform the measurements, a mounting for the connection of the permanent magnet dc generator had to be built. After that the laboratory's shunt-excited dc machine was used as a power source for the permanent magnet dc generator through the battery charge's conveyer. The voltage was checked by multimeter along with the generator's revolution per minute using a tachometer. Breakaway torque was measured in a mechanical way by using scales. Power and efficiency was also measured by using multimeters and power analyzer.

The tests provided the following results: revolution per minute was 815 revolution per minute and breakaway torque 1,4 Nm. The permanent magnet dc generator was loaded at various speeds and the biggest power and current obtained were 91,5 W and 6,48 A. Efficiency values measured 0,14; 0,24; 0,31; 0,33 and 0,34 at different current loads.

These results were compared to Windstream Power's 443540 permanent magnet dc generator and a car's battery charger. The results and the comparison clearly indicate that the permanent magnet dc generator built by the designer is not a good solution for operating like a wind generator.

**Keywords:** permanent magnet dc generator, power, efficiency

## SISÄLLYS

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INSINÖÖRITYÖN TAVOITTEET</b>	<b>2</b>
2.1	Suunnittelijan tavoitteet	2
2.2	Mittaajan tavoitteet	2
<b>3</b>	<b>TASASÄHKÖGENERAATTORIT</b>	<b>3</b>
3.1	Tasasähkögeneraattorin toimintaperiaate ja vakavuus	3
3.2	Sarjageneraattori	4
3.3	Vierasmagnetoitu generaattori	5
3.4	Kompoundigeneraattori	6
3.5	Sivuvirtageneraattori	6
<b>4</b>	<b>MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA</b>	<b>7</b>
4.1	Tasavirtakoneen häviöt ja hyötysuhde	7
4.2	Generaattorin teho	8
4.3	Momentti	9
4.4	Tasasähkön sykkeisyys	10
<b>5</b>	<b>MITTAUKSET</b>	<b>10</b>
5.1	Mitattava tasasähkögeneraattori	10
5.2	Mittausten valmistelu	11
5.3	Alustava mittaus	13
5.4	Generaattorin kierrosnopeuden määrittäminen	13
5.4.1	<i>Kierrosnopeuden määrittämisen mittalaitteet</i>	13
5.4.2	<i>Kierrosnopeuden mittauksen kytkentä</i>	14
5.4.3	<i>Kierrosnopeuden mittausten suoritus</i>	15
5.4.4	<i>Kierrosnopeuden mittaamisen tulokset</i>	15

<b>5.5</b>	<b>Tehon ja tuoton mittaus</b>	<b>16</b>
5.5.1	<i>Tehon ja tuoton määrittämisessä käytetyt mittalaitteet</i>	16
5.5.2	<i>Tehon ja tuoton kytkentä</i>	16
5.5.3	<i>Tehon ja tuoton mittausten suoritus</i>	17
5.5.4	<i>Tehon mittauksen tulokset</i>	17
5.5.5	<i>Sivuvirtakoneen ankkuriresistanssin mittauksen tulokset</i>	18
5.5.6	<i>Tuoton mittauksen tulokset</i>	18
<b>5.6</b>	<b>Lähtömomentin määrittäminen</b>	<b>19</b>
5.6.1	<i>Lähtötilanne</i>	19
5.6.2	<i>Lähtömomentin mittausten tulokset</i>	20
<b>5.7</b>	<b>Tasasähkön sykkeisyys</b>	<b>21</b>
5.7.1	<i>Sykkeisyyden mittausten kytkentä</i>	21
5.7.2	<i>Sykkeisyyden tulokset</i>	22
<b>6</b>	<b>PÄÄTELMÄT</b>	<b>23</b>
<b>6.1</b>	<b>Kierrosnopeuden määrittämisen johtopäätökset</b>	<b>23</b>
6.1.1	<i>Kierrosnopeuden mittaamisen suoritus</i>	23
6.1.2	<i>Kierrosnopeuden tulosten analysointi</i>	23
<b>6.2</b>	<b>Lähtömomentin määrittämisen päätelmät</b>	<b>25</b>
6.2.1	<i>Lähtömomentin mittauksen suorittamisen analysointi</i>	25
6.2.2	<i>Lähtömomentin tulosten analysointi</i>	25
<b>6.3</b>	<b>Tehon ja tuoton määrittämisen päätelmät</b>	<b>25</b>
6.3.1	<i>Tehon ja tuoton mittausten suoritus</i>	25
6.3.2	<i>Tulosten analysointi tehon mukaan</i>	25
6.3.3	<i>Tulosten analysointi tuoton mukaan</i>	28
<b>6.4</b>	<b>Tasasähkön sykkeisyyden analysointi</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>30</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>32</b>
	<b>LIITTEET</b>	
	<b>Liite 1.</b> Alustavan mittauksen mittauspöytäkirja	
	<b>Liite 2.</b> Mittauksen mittauspöytäkirja	
	<b>Liite 3.</b> Tasasähkön sykkeisyyden oskilloskooppikuvat	

## 1 JOHDANTO

Kestomagneettikoneet ovat vielä varsin harvinaisia johtuen siitä, että niihin liittyviä patenteja ei ole vielä täysin vapautettu. Tämä on merkittävästi hidastanut kestomagneettikoneteknologian kehittymistä. Patentit ovat kuitenkin kohta raukeamassa, ja nykyään kestomagneettikoneita halutaan tutkia ja kehittää paljon niiden hyvän hyötysuhteen vuoksi. Vääntömomentti on myös parempi, säädöt tarkempia ja huollon tarve minimaallinen [1]. Tämän takia kestomagneettikoneet ovat tulevaisuutta ja saavat varmasti vähitellen lisää markkinaosuutta sähkökonemarkkinoilta.

Kestomagneettikoneet sopivat teoriassa hyvin hitaasti pyöriviin tuulivoimakäyttöihin. Tuulivoiman ennustetaan lisääntyvän merkittävästi uusiutuvista energiamuodoista. Tämä johtaa siihen, että kestomagneettikoneita halutaan paljon tutkia mittauksilla tuulivoimakäytössä.

Insinööriö sisältää auton laturista muunnetun tuulivoimakäyttöön tarkoitettua tasasähkökestomagneettikoneen mittauksia ja niiden perusteella päätelmien tekemistä. Alussa esitetään insinööriön keskeiset tavoitteet suunnittelijan ja mittaajan näkökulmasta, minkä jälkeen kerrotaan hieman tasasähkögeneraattorien teorioita, jotka antavat yleisen käsityksen niiden toimintaperiaatteesta ja eri tasasähkögeneraattorityypeistä. Seuraavaksi perehdytään varsinaisiin mittauksiin valmistavaan teoriaan tasavirtakoneen häviöistä ja hyötysuhteesta, generaattorin tehosta, momentista yleisesti ja sähkön sykkeisyydestä.

Lisäksi kerrotaan eri mittauksien tekotavat, suoritukset ja niiden tulokset. Tuloksien avulla tehdään kestomagneettigeneraattorin ominaisuuksista päätelmiä, jotka eritellään seuraavaksi. Päätelmien avulla esitetään loppuun yhteenveto, jossa koostetaan insinööriön keskeisten tavoitteiden onnistuneisuus ja analysoidaan mitattavan tasasähkökestomagneettigeneraattorin arvo sen käyttöolosuhteisiin nähden.

## 2 INSINÖÖRITYÖN TAVOITTEET

### 2.1 Suunnittelijan tavoitteet

Työsuunnitelma asetti insinööriyölle selvät tavoitteet. Tasasähkögeneraattorista piti selvittää seuraavat asiat:

- kierrosnopeus, jolla generaattori antaa 14 V
- generaattorin lähtömomentti
- generaattorin kuormitettavuus
- generaattorin hyötysuhde.

Mittaukset olisivat erittäin tärkeitä selvitettäessä, olisiko generaattori kyseisillä kestomagneeteilla ja asetuksilla järkevä vaihtoehto tuottamaan sähköä.  
[2.]

### 2.2 Mittaajan tavoitteet

Kestomagneetikoneen käytöstä generaattorina ei löydy paljoakaan tietoa, joten on järkevää verrata mitattavaa kestomagneettigeneraattoria toiseen samantyyppiseen sähkökoneeseen ja myös muihin generaattorityyppeihin. Tällöin mittaustuloksia pystyttäisiin analysoimaan monipuolisemmin ja niiden tutkinnollinen arvo kasvaisi.

Käytännön mittaukset asettavat myös työlle omat haasteensa, sillä mitään valmista kytkentää varten ei ole olemassa, jolloin mittaukset pitää suunnitella ja rakentaa täysin alusta. Tällaisia haasteita voisivat olla mm. seuraavat asiat:

- Mikä toimii generaattorin voimanlähteenä?
- Miten generaattorin saa mittauksien aikana tukevasti kiinni?
- Miten käytännössä saadaan mitattua generaattorista sähkösuureet?
- Onko lähtömomentin järkevä mittaaminen mahdollista käytettävissä olevilla laitteilla?

Päätavoitteena voidaankin pitää, että tarvittavat lähtökohdat mittauksille saadaan rakennetuksi, jotta päästään luotettaviin mittaustuloksiin. Työn mittaukset samalla mahdollistavat tutkia tasasähkön sykkeisyyttä. Tämä otettiin yhdeksi tavoitteeksi. Generaattori syöttää tässä tapauksessa passiivisena kuormana toimivaa akkua, joten generaattorin tutkiminen kapasitiivisella, tai

induktiivisella kuormalla ei ole oleellista työn kannalta. Mielenkiintoista on myös tutkia, pystyykö sähkökoneiden harrastaja rakentamaan kohtuulliseen hintaan teholtaan ja hyötysuhteeltaan kilpailukykyinen generaattori verrattuna markkinoiden vastaaviin tuotteisiin.

### 3 TASASÄHKÖGENERAATTORIT

#### 3.1 Tasasähkögeneraattorin toimintaperiaate ja vakavuus

Tasasähkögeneraattorit muuttavat mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Niiden toiminta perustuu generaattorin roottorin eli ankkurin pyörimiseen magnetoimiskäämitysten synnyttämässä magneettikentässä, johon tarvittavan energian se saa voimakoneelta. Tällöin ankkurikäämityksiin indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite, jonka lopuksi kommutaattori tasasuuntaa.

Tasasähkögeneraattorin rakenne on sama kuin tasasähkömoottorissakin ja tästä johtuen niitä voidaan käyttää myös moottoreina. Generaattorin jännitteen maksimiarvolle rajat luo rautaosien magneettinen kyllästyminen. Tasasähkökone saadaan magnetoiduksi päänavoille asennettujen magnetoimiskäämitysten avulla. Tasasähkögeneraattorit yleensä lajitellaankin niiden magnetoimisen perusteella neljään ryhmään seuraavalla tavalla:

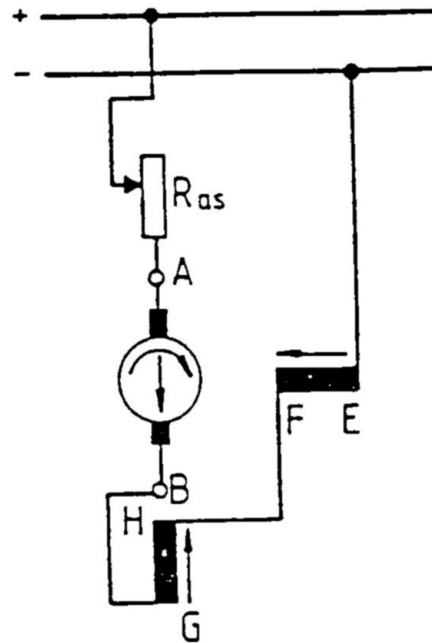
1. sarjageneraattorit
2. sivuvirtageneraattorit
3. vierasmagnetoidut generaattorit
4. kompondigeneraattorit. [3, s. 291.]

Generaattorin vakavuus tulee ottaa huomioon, jos generaattorilla syötetään aktiivista kuormaa. Tällainen kuorma voi olla esim. jäykkä tasasähköverkko, jolloin generaattorin toimintapiste voi siirtyä ja seurauksena on generaattorin pyörimisnopeuden kasvaminen. Tämä aiheuttaa epävakaan generaattorin käynnin, mikä voi aiheuttaa generaattorin vahingoittumisen. Jos generaattorin ulkoinen ominaiskäyrä on luonteeltaan laskeva, niin silloin generaattori voidaan kytkeä huoletta jäykkään tasasähköverkkoon eli rinnakkain toisten generaattoreiden kanssa. Passiivisella kuormalla esim. akulla generaattorin käynti on vakaata, jolloin sen kytkeminen verkkoon ei aiheuta ongelmia. [3, s. 289 - 290.]



### 3.2 Sarjageneraattori

Sarjageneraattorissa (kuva 1) magnetointi tapahtuu sarjakäämityksen avulla. Kyseinen sarjakäämitys on sijoitettu päänavoille. Tässä generaattorityypissä kuorman läpi kulkeva virta on myös magnetoimis- ja ankkurivirta.



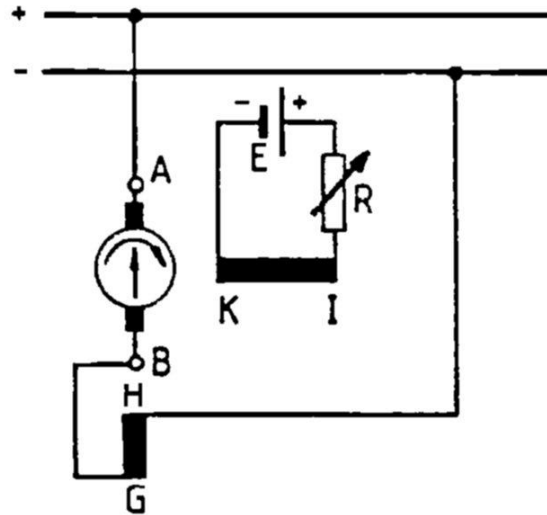
Kuva 1. Sarjageneraattorin toimintaperiaate [4, s. 9-14.]

Tyhjäkäynnissä sarjageneraattori ei kehitä käytännössä katsoen jännitettä, koska tällöin remanenssijännite ei synnytä pientä magnetoimisvirtaa, jota sarjakäämit tarvitsevat koneen magnetoimiseen. Tyhjäkäynti voi olla kohtalokas sarjageneraattorille, koska se alkaa ryntäämään eli sen pyörimisnopeus kasvaa vaarallisen suureksi. Tämä vaikuttaa myös sarjakoneen käyttämiseen moottorina, jolloin sarjamoottori vaatii säädettävän jännitelähteen tai sarjavastuksen kytkemisen.

Magnetoimisvirran ollessa kuormitusvirtana on selvää, että generaattorin antama jännite riippuu todella paljon kuormituksen suuruudesta. Generaattorityypinä sarjageneraattoria ei yleensä käytetä, koska siinä esiintyy suuria jännitevaihteluita ja siksi, että se pystyy kehittämään jännitettä vain määrättyä minikuormitusvirtaa suuremmilla kuormitusvirroilla. [3, s. 296 - 297.]

### 3.3 Vierasmagnetoitu generaattori

Vierasmagnetoidussa generaattorissa (kuva 2) koneen magnetointi tapahtuu vierasmagnetointikäämityksen kautta. Se kytketään vieraaseen tasasähkölähteeseen, josta saadaan magnetoimisvirta.



Kuva 2. Vierasmagnetoidun generaattorin toimintaperiaate [4, s. 9-13.]

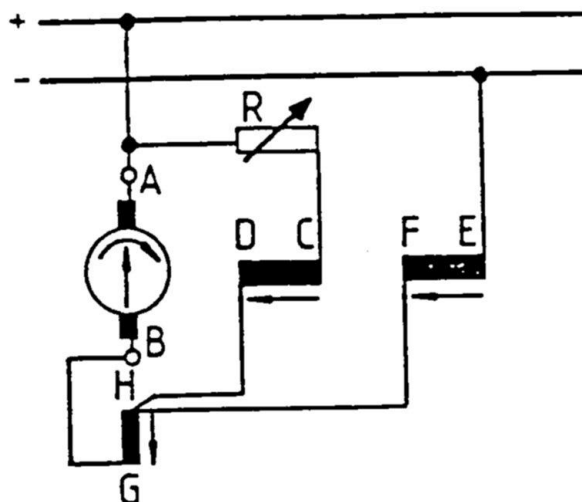
Generaattorin ollessa kuormittamaton ankkurivirta on nolla ja tällöin ankkuri-  
piirissä ei esiinny resistiivisiä jännitehäviöitä. Generaattorin ankkuria pyöritet-  
täessä vakionopeudella on sen ankkurikäämitykseen indusoituva sähkömo-  
torinen jännite verrannollinen pyörimisnopeuteen.

Magnetointi ottaa tehoa kuormitusvirrasta ainoastaan ankkurireaktion kautta,  
joten vierasmagnetoidussa generaattorissa oikosulkuvirta on todella suuri.  
Liitinjännitteen pienenemiseen kuormituksen kasvaessa vaikuttaa seuraavat  
asiat: ankkuripiirin häviöt, ankkurireaktio ja kommutaattorin harjojen jännite  
 $U_H$ .

Metalliharjoilla  $U_H = 0,6 \text{ V}$ , kun taas grafiittiharjoilla se on  $2 \text{ V}$ . Tähän asi-  
aan ei vaikuta ankkurivirran suuruus. Jos vierasmagnetoidussa generaatto-  
rissa liitinjännite ja pyörimisnopeus halutaan pitää vakiona kuormituksen  
muuttuessa, on myös magnetoimisvirtaa muutettava. [3, s. 291 - 294.]

### 3.4 Kompoundigeneraattori

Käytännössä kompoundigeneraattorit yleensä ovat vierasmagnetoituja yhdysvirtageneraattoreita. Koneissa on päämagneettinavoilla sarja- ja vierasmagnetointikäänitys (kuva 3).



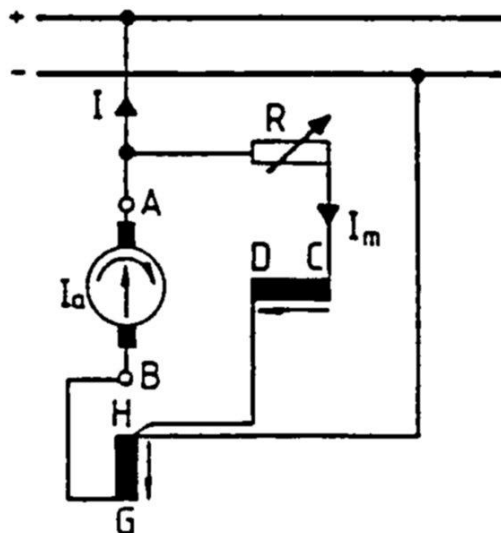
Kuva 3. Kompoundigeneraattorin toimintaperiaate

Sarjakäämityksen tarkoituksena on vahvistaa tai heikentää sivuvirtamagnetoimiskäämityksen muodostamaa kenttää. Magnetoimiskäämitykset vahvistavat toisiaan, kun virta kulkee eri käänityksissä numerjärjestyksessä liitinmerkintöjen viimeisten numeroiden mukaan. Muissa tapauksissa magnetointikäänitykset heikentävät toisiaan. [3, s. 287 - 288.]

### 3.5 Sivuvirtageneraattori

Magnetointi tapahtuu sivuvirtageneraattorissa päänavoille sijoitetun sivuvirtakäämityksen kautta (kuva 4). Kyseinen käänitys kytketään ankkuripiiriin kanssa rinnakkain, joten tällöin magnetoimisjännitteenä toimii generaattorin oma liitinjännite. Tästä johtuen generaattori on aluksi saatava niin sanotusti heräämään.

Sivuvirtageneraattori muistuttaa paljon vierasmagnetoitua moottoria. Niiden erona on se, että sivuvirtageneraattori ottaa magnetoitiin tarvittavan tehon ja ankkuritehon samasta sähkölähteestä, kun taas vierasmagnetoidulla moottorilla tehonlähteet ovat erillään toisistaan (ks. kuva 2).



Kuva 4. Sivuvirtageneraattorin toimintaperiaate [4, s. 9-13.]

Ns. herääminen voidaan saada aikaan generaattoriin edellisen käytön jälkeä jääneellä remanenssivuolla. Tästä johtuen ankkurikäymykseen kehittyy pieni remanenssinen sähkömagneettimotorinen jännite, joka alkaa syöttämään magnetoimisvirtaa koneen suljettuun magnetoimispiiriin.

Ns. heräämisen kannalta on oleellista, että magnetoimisvirran ja magnetoimiskäymän muodostama magneettivuo ei vaikuta toiseen suuntaan kuin remanenssivuo, koska tällöin kone ei antaisi jännitettä, eikä siis heräisi. Magnetoimisvirtaa säädetään säätöresistanssin avulla ja kyseinen resistanssi on oltava riittävän pieni, jotta kone heräisi.

Kun generaattori on tyhjäkäynnissä, pyörittää voimakone generaattorin ankkuria vakionopeudella. Tällöin liitinjännite on hieman sitä vastaavaa lähdejännitettä pienempi, koska magnetoimisvirta aiheuttaa koneen ankkuriin resistanssissa pienen jännitehäviön. [3, s. 294 - 296.]

## 4 MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA

### 4.1 Tasavirtakoneen häviöt ja hyötysuhde

Tehohäviöiden suuruus ja sitä kautta tasavirtageneraattorin hyötysuhde riippuvat paljolti generaattorityypistä. Seuraavassa on esitetty tasasähkögeneraattorin häviötyypit: tyhjäkäyntihäviöt  $P_o$ , magnetoimishäviöt  $P_m$ , kuormitushäviöt  $P_k$ , harjahäviöt  $P_{ha}$  ja lisähäviöt  $P_{lisä}$ .

Tyhjäkäyntihäviöt koostuvat erilaisista hankaushäviöistä, jotka muodostuvat harjojen, laakereiden ja tuuletuksen aiheuttamista häviöistä. Nämä häviöt riippuvat pyörimisnopeudesta. Roottorin rautahäviöihin vaikuttaa taas pyörimisnopeus  $n$  ja sähkömotorinen jännite  $E$ , joka on generaattorilla seuraavanlainen:

$$E = U + I_a R_a \quad (1)$$

Nämä häviöt saadaan selville ns. tyhjäkäyntimittauksella.

Magnetoimishäviöt sisältävät koneen säätövastuksen häviöt, ja kuormitushäviöt syntyvät taas päävirtapiirin resistanssihäviöistä sekä harjojen ylimenohäviöistä. Kuormitushäviöt saadaan lasketuksi, kun tiedetään ankkuripiirin virta  $I_a$  ja resistanssi  $R_a$  alapuolella olevalla kaavalla 2.

$$P_k = I_a^2 R_a \quad (2)$$

Kun esitellään mikä tahansa lämpötila insinööriyön yhteydessä, sillä tarkoitetaan lämpötilaa Celsius-asteissa. Ankkuripiirin resistanssin arvo redusoidaan +75 asteeseen, ellei jatkuvan käytön aikaista lämpötilaa tiedetä. Harjahäviöiksi oletetaan yleensä 1 V/harja, joten harjahäviöt pitää kertoa kahdella harjojen aiheuttamien kokonaishäviöiden selvittämiseksi. Lisähäviöiksi yleisesti arvioidaan 1 % koneen nimellistehosta kompensoimattomille koneille. Niiden oletetaan muuttuvan suhteessa ankkurivirran neliöön. [4, s. 9-24]

Hyötysuhde  $\mu$  kuvaa koneen anto- ja ottotehon suhdetta. Hyötysuhde paranee generaattorin fyysisen koon kasvaessa. Tahtikoneen hyötysuhde saadaan lasketuksi kaavalla 3.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3)$$

missä  $P_2$  on teho, jonka generaattori on muuttanut sähkötehoiksi ja  $P_1$  on voimakoneen tuoma mekaaninen teho.

#### 4.2 Generaattorin teho

Monesti erilaisilla tasasähkögeneraattoreilla nimellisteho saadaan selville laskemalla sen tyyppikilvessä olevista merkinnöistä. Tällainen merkintä voi olla esim. 14V23/55, missä 14 V on nimellisjännite, 23 nimellisvirta

ampeereina pyörimisnopeudella 1 500 kierrosta minuutissa ja 55 on nimellivirta pyörimisnopeudella 6 000 kierrosta minuutissa [5, s. 196]. Kun nämä tiedot sijoitetaan tehon kaavaan 4, saadaan generaattorin nimellistehot eri kierrosnopeuksilla.

$$P = U * I \quad (4)$$

Nyt tehot eri generaattorin pyörimisnopeuksilla saadaan lasketuksi edellä mainituilla tiedoilla seuraavasti:

$$P_n(1\,500\text{ rpm}) = 14\text{ V} * 23\text{ A} = 322\text{ W}$$

$$P_n(6\,000\text{ rpm}) = 14\text{ V} * 55\text{ A} = 770\text{ W}$$

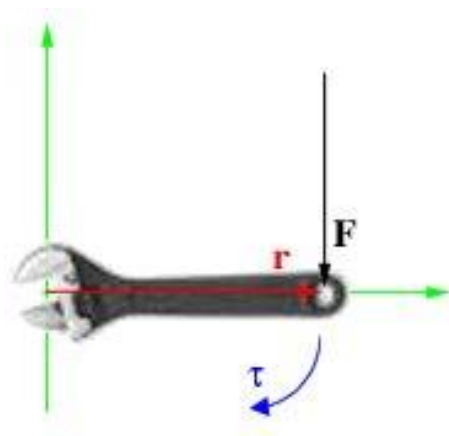
Nämä lasketut nimelliset tehot ovat varsin tyypillisiä arvoja 14:sta V:n tasasähkögeneraattoreille, joten ne antavat hyvää vertailupohjaa tehon mittaamiselle tasasähkökestomagneettigeneraattorista.

### 4.3 Momentti

Momentti  $T$  kuvaa systeemiin kohdistuvaa vääntövaikutusta (kuva 5). Sen yksikkö on Nm ja se saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$T = F \times r \quad (5)$$

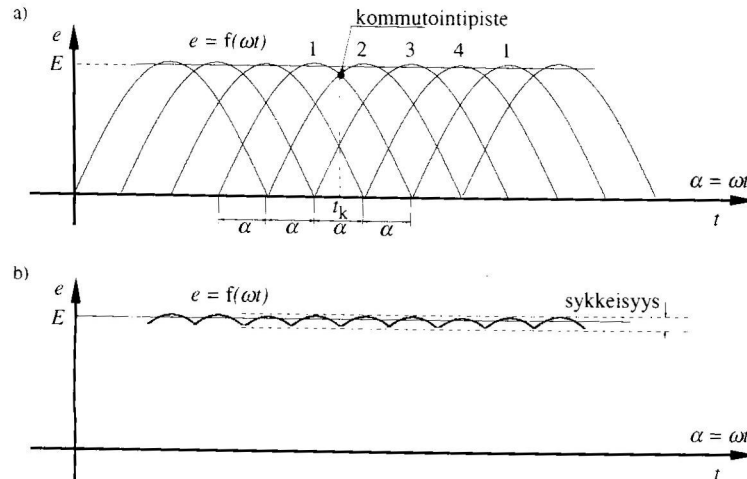
missä  $F$  (N) on vääntävä voima Newtonissa ja  $r$  on vipuvarren pituus metreissä. Kun voima vaikuttaa kohtisuorasti vipuvarteeseen, niin silloin voiman ja vipuvarren välinen ristitulo muuttuu tavalliseksi kertolaskuksi.



Kuva 5. Vääntömomentin havainnollistaminen [6]

#### 4.4 Tasasähkön sykkeisyys

Tasasähkön sykkeisyys tulee merkittävänä tekijä esille, kun puhutaan tasasähkön laadusta. Sykkeisyys kuvaa sitä jännite-eroa, joka on tasasuuntaajien määrittämän kommutointipisteen ja lähdejännitteen huippuarvon välillä (kuva 6).



Kuva 6. Tasasähkön sykkeisyys [3, s. 272.]

Tasasuuntaajan antaman tasasähkön sykkeisyys tulisi olla mahdollisimman pieni, koska se mm. vahingoittaa akkuja. Sykkeisyys on sitä pienempi mitä enemmän ankkurissa on tasaisin välein silmukoita, jotka ovat yhdistettyinä omiin lamelleihinsa. Sykkeisyyttä saadaan pienennettyä kelan kytkemisellä sarjaan kuorman kanssa tai kondensaattorin kytkemisellä rinnan. Sinimuotoisen tasasähkön sykkeisyys saa olla enintään 10 % tasajännitteen tehollisarvosta, jotta voidaan puhua sykkeettömästä tasajännitejärjestelmästä [7].

## 5 MITTAUKSET

### 5.1 Mitattava tasasähkögeneraattori

Mitattavan tasasähkökestomagneettigeneraattorin ulkoinen rakenne muistuttaa paljon auton laturia (kuva 7). Kuitenkin sen sisäinen rakenne poikkeaa merkittävästi autolaturin vastaavasta. Kyseisen generaattorin halkaisija on 11,8 cm.



*Kuva 7. Mitattava tasasähkögeneraattori*

Tasasähkögeneraattorille on tehty seuraavat asiat:

- hiilet ja kommutaattori poistettu
- sähkömagneetin käämi poistettu
- 12 kpl uria koneistettiin 12 kestopagneetille
- roottorin ulkohalkaisija hiottiin 82 mm:stä 80 mm:iin.

Tasasuuntaussilta ja muut sähköisesti tärkeät asiat ovat jätetty ennalleen [2]. Roottorin ulkohalkaisija hiottiin pienemmäksi, jotta saataisiin suurennettua ilmarakoa staattorin ja roottorin välille, koska tällöin mahdollinen laakereiden toleranssista johtuva niin sanottu jumittaminen saataisiin pienemmäksi. Se tarkoittaa staattorin ja roottorin hankaamista toisiinsa, mikä on mahdollista, jos ilmarako niiden välillä on pieni. Ilmaraon suurentaminen kuitenkin huonontaa oleellisesti hyötysuhdetta, koska ilman magneettinen johtavuus on paljon pienempi kuin raudan. Generaattoriin on asennettu abiko-liittimet ja niihin banaaniliittimet (kuva 7), jotta mittaukset voitaisiin suorittaa koulun mittalaitteilla.

## 5.2 Mittauksien valmistelu

Mittauksissa voimakoneena toimi tasasähkökäyttöinen sivuvirtakone. Sitä syötettiin kahdella 12 V:n sarjaan kytketyllä akulla, koska kyseinen



sivuvirtakone vaatii 24 V toimiakseen hyvin. Kuvassa 8 on kyseinen tasasähkökoneen kytkentäkuva, josta huomataan sen olevan sivuvirtakone (kuva 4).



*Kuva 8. Voimakoneena toimivan tasasähkökoneen sisäinen kytkentä*

Sivuvirtakone yhdistettiin generaattoriin tavallisella auton laturin hihnalla. Hihna säädettiin sopivan kireälle ja sähkökoneet pultattiin kiinni kytkentäalustaan. Tärkeää oli, että sähkökoneiden hihnapyörät olivat yhdensuuntaisia ja linjassa keskenään, sillä se vaikuttaa mekaanisiin häviöihin ja sitä kautta hyötysuhteeseen. Generaattoriin asennettiin myös metallinen tuki, jotta se pysyisi paikallaan mittausten aikana. Tämän jälkeen kytkentäalusta mittausta varten oli valmis (kuva 9).



*Kuva 9. Kytkentäalusta valmiina mittauksia varten*

### 5.3 Alustava mittaus

Tässä mittauksessa tutkittiin jännitemittarilla, mikä tasasähkökestomagneettigeneraattorin napa antaa jännitettä maata vasten, kun kierrosnopeutta kasvatettiin. Jännitettä löytyi navoista N-E, jolloin kyseistä jännitettä luultiin generaattorin antamaksi jännitteeksi. Tämä tieto osoittautui kuitenkin vääräksi, kun mittauksien jälkeen käytiin keskustelua suunnittelijan kanssa [2].

Generaattorin antaman jännitteen mittaus olisi pitänyt tehdä kierretapin ja rungon väliltä, joten sähkömittauksen antamat tulokset eivät anna haluttuja tuloksia. Lähtömomentin mittaus taas onnistui, koska se tehtiin mekaanisesti käsin. Kyseistä mittausta ei tästä johtuen toistettu seuraavalla mittauskerralla. (Ks. mittauspöytäkirja, liite 1.)

### 5.4 Generaattorin kierrosnopeuden määrittäminen

#### 5.4.1 Kierrosnopeuden määrittämisen mittalaitteet

Tässä mittauksessa generaattorilla ei ollut kuormaa. Kiinnostavaa ainoastaan oli generaattorin pyörimisnopeuden määrittäminen, kun sen napajännite olisi 14 V ja se olisi tyhjäkäynnissä. Jännitteen määrittämiseen käytettiin digitaalista tehollisarvomittaria (kuva 10).



Kuva 10. Mittauksessa käytetty digitaalinen tehollisarvomittari

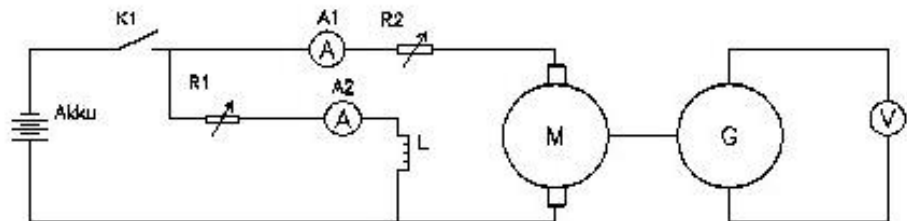
Pyörimisnopeuden määrittämiseen käytettiin takometriä (kuva 11). Kyseisen mittalaitteen akseli laitettiin mitattavan tasasähkökestomagneettigeneraattorin hihnapyörään kiinni aina mittaushetkellä.



Kuva 11. Mittauksessa käytetty takometri

#### 5.4.2 Kierrosnopeuden mittauksen kytkentä

Kuvassa 12 on esitettyä mittauksesta kytkentä. Viiva moottorin ja generaattorin välillä kuvaa niiden mekaanista yhdistämistä laturin hihnalla.



Kuva 12. 14 V:n kierrosnopeuden määrittämisen kytkentäkaavio

Kytin K1 laitettiin mittaukseen vaan niin sanotuksi päälle-pois-kytkimeksi. Virtamittarit laitettiin kytkentään, jotta pystyttäisiin seuraamaan voimakoneen kuormitettavuutta. Virtamittari A1 mittasi sivuvirtamoottorin ankkurivirran suuruutta, kun taas virtamittari A2 mittasi sivuvirtakäämityksen virran arvoa. Säädettävät vastukset R1 (100  $\Omega$ ) ja R2 (10  $\Omega$ ) laitettiin näihin rinnakkain oleviin virtapiireihin, jotta virtoja voitaisiin säätää. Jännitemittari V mittasi generaattorin napajännitteen eri pyörimisnopeuksien arvoilla.

### 5.4.3 Kierrosnopeuden mittausten suoritus

Mittaus aloitettiin jännitemittaria seuraamalla ja vastuksien arvoja säätämällä asetettiin generaattorin napajännite 14:sta V:iin sekä samalla takometrillä mitattiin generaattorin pyörimisnopeus. Seuraavaksi annettiin lähdejännitteen pudota 12:sta V:iin ja sitten taas lähdettiin nostamaan jännitettä ylöspäin kahden V:n välein aina 24:ään V:iin saakka, minkä jälkeen hypättiin jo n. 30:een V:iin. Tämän jälkeen palattiin 12:sta V:iin, jolloin jännitettä nostettiin taas ylöspäin taulukon 1 mukaan. Tarkoituksena oli saada tarpeeksi monta mittauspistettä tyhjäkäyntikäyrän määrittämistä varten ja mitattua tarpeeksi monta n. 14 V:n pyörimisnopeutta, joista voitaisiin laskea keskiarvo.

### 5.4.4 Kierrosnopeuden mittaamisen tulokset

Taulukossa 1 on vasempaan sarakkeeseen kirjattu jännitemittarilla mitattu generaattorin napajännite Voltteina ja oikeanpuoleiseen sarakkeeseen generaattorin pyörimisnopeus takometrillä mitattuna (liite 2).

*Taulukko 1. Mitattavan kestoplaneettigenaattorin napajännite ja sitä vastaava kierrosnopeus*

U/V	n/rpm
14,00	757
12,09	670
14,05	772
16,04	880
18,09	987
20,03	1,092
22,03	1,255
24,04	1,364
29,94	1,693
12,00	703
14,00	815
16,00	922
20,13	1,148
14,01	815

Keskiarvoa laskettaessa 14 V:n kierrosnopeudelle pitää ottaa huomioon generaattorin käyntilämpötila. Aluksi generaattori antoi 14 V jo 757 kierroksella minuutissa. Seuraavaksi se antoi 772 kierrosta minuutissa n. parin minuutin käyntiajan jälkeen. Kahdella viimeisellä kerralla kierrosnopeus oli 815 minuutissa. Tällöin generaattoria oli kuormitettu yli 10 minuuttia ja generaattorin käämitys oli lämmennyt käyntilämpötilaansa. Tästä johtuen nämä kaksi viimeistä mittauspistettä ovat luotettavimpia, kun lasketaan kierrosnopeuden

keskiarvoa 14 V:lla. Keskiarvo 14 V:n kierrosnopeudella saadaan siis seuraavasti:

$$n(14V) = \frac{815 \text{ rpm} + 815 \text{ rpm}}{2} = 815 \text{ rpm}$$

missä ensimmäinen kierrosnopeuden arvo tuli jännitettä nostamalla ja toinen laskemalla.

## 5.5 Tehon ja tuoton mittaus

### 5.5.1 Tehon ja tuoton määrittämisessä käytetyt mittalaitteet

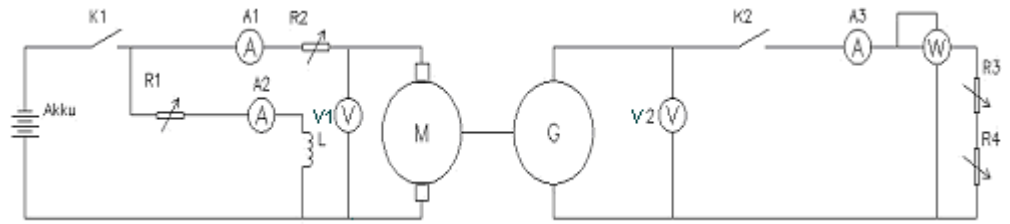
Tässä mittauksessa käytettiin samoja mittalaitteita kuin edellisessä mittauksessa. Kuitenkin muutama lisälaittekin oli kytkentään laitettava. Näistä tärkeimpänä asennettiin tehoanalysaattori (kuva 12), joka mittasi jännitettä, virtaa ja tehoa.



Kuva 12. Mittauksessa virtaa, jännitettä ja tehoa mitannut Hameqin tehoanalysaattori

### 5.5.2 Tehon ja tuoton kytkentä

Mittauksessa käytettiin kytkentäkaaviota (kuva 13). Tuoton määrittämistä varten mitattiin epäsuorasti sivuvirtakoneen teho käyttäen apuna yleismittareita.



Kuva 13. Tehon ja tuoton mittauksen kytkentäkaavio

Virtamittari A1 mittasi sivuvirtamoottorin ankkurivirran, ja jännitemittari V1 sen jännitteen. Tehoanalysaattori kuvaa kytkentäkaavion jännitemittaria V2, ampeerimittaria A3 ja tehomittaria W. Generaattorin kuormaksi asetettiin kahden säätövastuksen R3 (5  $\Omega$ ) ja R4 (100  $\Omega$ ) sarjakuormitus. Kytкин K2 laitettiin kytkentään, jotta kuormitus saataisiin tarvittaessa irrotettua generaattorista.

### 5.5.3 Tehon ja tuoton mittausten suoritus

Generaattoria ruvettiin kuormittamaan mittauksessa varovasti ja samalla seurattiin sen kuumuutta kädellä kokeilemalla. Tarkoituksena oli saada generaattori normaaliin käyntilämpötilaansa pienellä kuormalla ja sitten lisätä tehoa säätämällä vastusten arvoja pienemmiksi, kunnes generaattorin metallinen kuori rupeaisi olemaan polttavan kuuma. Generaattoria kuormitettiin viidellä eri vastuksen arvolla ja jokaisessa mittauspisteessä otettiin takometrillä talteen generaattorin pyörimisnopeus. Kuormitusmittaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman nopeasti, jottei lämpenemä vahingoittaisi generaattorin käämityksiä.

Jotta tuotto voitaisiin määrittää, niin piti mitata myös sivuvirtakoneen ankkuri-resistanssi, koska tämä aiheuttaa tehohäviöitä ja vaikuttaa siten laskevasti hyötysuhteeseen. Tämä tehtiin heti kuormituksen loputtuna, jotta saataisiin resistanssin arvo mahdollisimman lähellä käämityksen käyntilämpötilaa. Mittaus toteutettiin niin sanotulla nelijohdin menetelmällä, missä jännite ja virta mitataan erikseen, jolloin resistanssin arvoksi saadaan tarkempia tuloksia. Mittaus suoritettiin kolmeen kertaa, jotta saataisiin lasketuksi sivuvirtakoneen ankkuriresistanssin keskiarvo.

### 5.5.4 Tehon mittauksen tulokset

Mittauksen tulokset on kirjattu taulukkoon 2. Kahdessa ensimmäisessä sarakkeessa on voimakoneena toimineen sivuvirtakoneen ankkuri- jännitteen ja virran arvot tietyllä kuormitusvirran arvolla. Kolmannessa sarakkeessa on

taas generaattorin pyörimisnopeus kierroksissa minuutissa ja kolmessa viimeisessä sarakkeessa on sen jännite, virta ja teho (liite 2).

*Taulukko 2. Voimakoneena olleen sivuvirtakoneen virta ja jännite, sekä mitattavan kestopagneettigeneraattorin pyörimisnopeus, jännite, virta ja teho*

U(V1)/V	I(A1)/A	n/rpm	U(V2)/V	I(A3)/A	P(W3)/W
22,86	6,6	905	13,95	1,14	15,9
22,60	8,8	936	14,00	2,70	38,0
22,10	12,5	1,004	13,90	4,68	65,4
21,70	15,5	1,050	13,96	5,68	80,2
21,30	19,2	1,081	14,00	6,48	91,5

### 5.5.5 Sivuvirtakoneen ankkuriesistanssin mittauksen tulokset

Ankkuriesistanssimittauksien tulokset mitattiin heti kuormituskokeen jälkeen. Tästä johtuen resistanssin arvoja ei tarvitse redusoida (ks. 4.1 Tasavirtakoneen häviöt ja hyötysuhde) käämin käyntilämpötilaan laskettaessa tuottoa. Taulukossa 3 on kolmen ankkuriesistanssimittauksen tulokset ja niistä laskettu keskiarvo.

*Taulukko 3. Sivuvirtakoneen ankkuriesistanssin mittauksen tulokset ja niistä laskettu keskiarvo*

R <sub>1</sub> /Ω	R <sub>2</sub> /Ω	R <sub>3</sub> /Ω	R <sub>a</sub> /Ω
0,255	0,263	0,256	0,258

### 5.5.6 Tuoton mittauksen tulokset

Tuotolla tarkoitetaan generaattorin hyötysuhdetta, jolla tarkoitetaan generaattoriin menevän mekaanisen tehon ja siitä ulostulevan tehon suhdetta toisiinsa. Jotta tuotto voitaisiin laskea, niin aluksi pitää määrittää mittauksessa syntyneet häviöt. Näitä häviöitä ovat voimakoneena toimineen sivuvirta-generaattorin magnetoimishäviöt ja mekaaniset häviöt, mitkä syntyvät mm. laakereista ja laturin hihnasta.

Mekaaniset häviöt on arvioitu n. 10 %:n suuruiseksi [8]. Voimakoneen magnetoimishäviöt ovat käytännössä ankkurihäviöt, jotka voidaan laskea kaavalla 2, kun tiedetään sivuvirtakoneen ankkuriesistanssin suuruus. Lasketaan taulukon 2 ensimmäisen mittauspisteen (13,95 V; 1,14 A ja 15,9 W) voimankoneen teho kaavalla 4 seuraavasti:

$$P_{\text{voimakone}} = 22,86 \text{ V} * 6,6 \text{ A} = 150,88 \text{ W}$$

Ankkuriresistanssin häviöt saadaan kaavan 2 avulla lasketuksi.

$$P_a = 0,258 \frac{V}{A} * 6,6 A \approx 11,24 W$$

Mekaaniset häviöt pitää ottaa vielä huomioon, joten voimakoneen tuomaksi tehoksi  $P_1$  saadaan:

$$P_1 = 0,9 * 150,88 W - 11,24 W \approx 114,14 W$$

Nyt voidaan määrittää ensimmäisen mittauspisteen hyötysuhde kaavalla 3, kun poimitaan tehoanalysaattorilla mitattu generaattorin teho  $P_2$  taulukosta 2.

$$\eta = \frac{15,9 W}{114,14 W} \approx 0,14$$

Tällä tavalla saadaan lasketuksi myös muut mittauspisteet. Taulukossa 4 on merkittynä mittauksen tulokset.

*Taulukko 4. Voimakoneen ankkurihäviöt ja sen teho, sekä kestromagneettigeneraattorille otto- ja antoteho, joiden perusteella on laskettu hyötysuhde*

$P_a/W$	$P_v/W$	$P_1$	$P_2$	$\mu$
11,24	150,88	124,55	15,9	0,14
19,98	198,88	159,01	38,0	0,24
40,31	276,25	208,31	65,4	0,31
61,98	336,35	240,73	80,2	0,33
95,11	408,96	272,95	91,5	0,34

## 5.6 Lähtömomentin määrittäminen

### 5.6.1 Lähtötilanne

Generaattorin lähtömomentin määrittäminen oli todella hankalaa ammattikorkeakoulun laboratoriossa, koska generaattoriin ei pystynyt asettamaan minkäänlaista vastamomenttia, joten mittaus piti suorittaa käsin. Tämä tehtiin puhaltimen siiven keskipisteeseen asennetulla, ennalta mitatulta metallin palalla ja tarkkuusvaa'alla (kuva 14).





Kuva 14. Mittauksessa käytetty vaaka

Suora metalli asetettiin puristimella puhaltimen keskipisteeseen ja vaaka laitettiin metallipalasen toiseen päähän ja sitä nostettiin ylös, kunnes puhaltimen siipi lähti liikkeelle (kuva 15). Metallin palanen mitattiin puhaltimen akselin keskipisteen ja metallin palasen tukipisteen väliltä.



Kuva 15. Mittauksen suorittaminen

### 5.6.2 Lähtömomentin mittausten tulokset

Puhaltimen siipi lähti liikkeelle, kun vaaka näytti n. 0,58 kg. Taulukossa 5 on kirjattu vaa'an näyttämä arvo  $x$  kilogrammoina, vipuvarren pituus  $r$  metreinä,

Helsingin putoamiskiihtyvyys  $g$  ja näiden tietojen perusteella lasketut voiman  $F$  ja momentin  $M$  arvot.

*Taulukko 5. Vaa'an lukema, vipuvarren pituus, Helsingin putoamiskiihtyvyys ja näiden mitattujen arvojen perusteella on laskettu voima ja momentti*

x/kg	r/m	$g/m/s^2$	F/N	M/Nm
0,58	0,246	9,81	5,69	1,4

## 5.7 Tasasähkön sykkeisyys

### 5.7.1 Sykkeisyyden mittausten kytkentä

Kytkenässä käytettiin aiemmin esitetyn kuvan 11 mittauskytkentää. Siihen jännitemittarin paikalle asennettiin digitaalinen oskilloskooppi (kuva 16), jotta voitaisiin tutkia tasasähkön sykkeisyyttä. Kyseisen oskilloskoopin valinta oli tärkeää, koska sillä pystyttiin käyttämään kursoreita. Tämä mahdollisti tasasähkökestomagneettigeneraattorin napajännitteen tasa- ja vaihtokomponenttien luotettavan mittaamisen.



*Kuva 16. Mittauksissa käytetty oskilloskooppi*

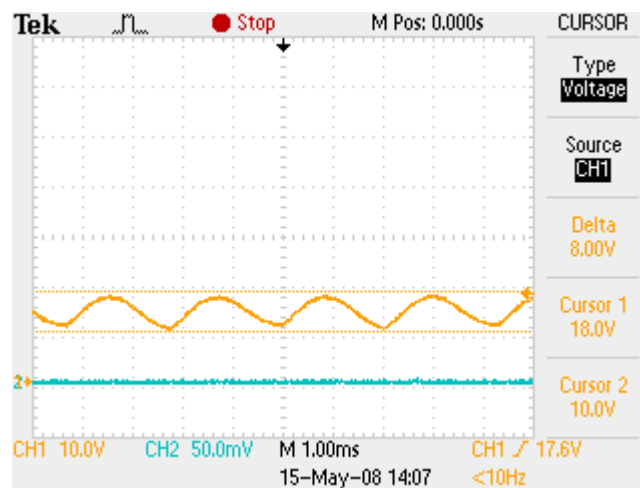
Oskilloskoopin kanssa käytettiin galvaanista erotinta (kuva 17). Tämä aiheutti jännitesignaalin kymmenkertaisen heikennysvaikutuksen ja se jouduttiin ottamaan huomioon oskilloskoopin asetuksissa.



Kuva 17. Mittauksissa käytetty galvaaninen erotin

### 5.7.2 Sykkeisyyden tulokset

Oskilloskooppi kuvia on paljon, joten ensimmäinen on vain kuvattuna kuvassa 18. Loput ovat laitettu loppuun liitteeksi (liite 3). Kuvassa sinertävä poikki- viiva on kanavalla 2 ja se kuvaa jännitteen nollatasoa. Kanavassa 1 on taas varsinainen generaattorin antama jännite. Kursorit ovat laitettu kuvaan niin, että ne mittaavat jännitteen minimi- ja huippuarvon väliltä eli jännitteen vaihtokomponenttia. Jännite nolasta jännitteen minimikohtaan saakka on tasasähkön tasakomponentti.



Kuva 18. Oskilloskoopilla mitattu sähkön sykkeisyys

## 6 PÄÄTELMÄT

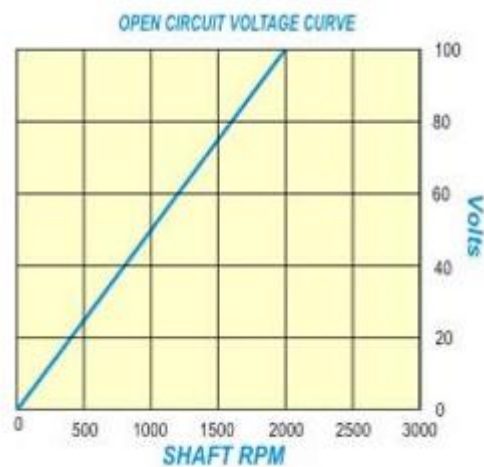
### 6.1 Kierrosnopeuden määrittämisen johtopäätökset

#### 6.1.1 Kierrosnopeuden mittaamisen suoritus

Mittausten suorittaminen onnistui hyvin, sillä generaattorille saatiin rakennettua hyvä ja tukeva kytkentäalusta, sekä sähköiset liitännät pystyttiin muuttamaan sopiviksi koulun laboratoriotiloihin. Nämä tekijät mahdollistivat generaattorin jännitteen ja pyörimisnopeuden mittaamisen luotettavasti. Mittaustulokset (taulukko 1) ovat siis luotettavia, minkä perusteella voidaan tehdä päätelmiä.

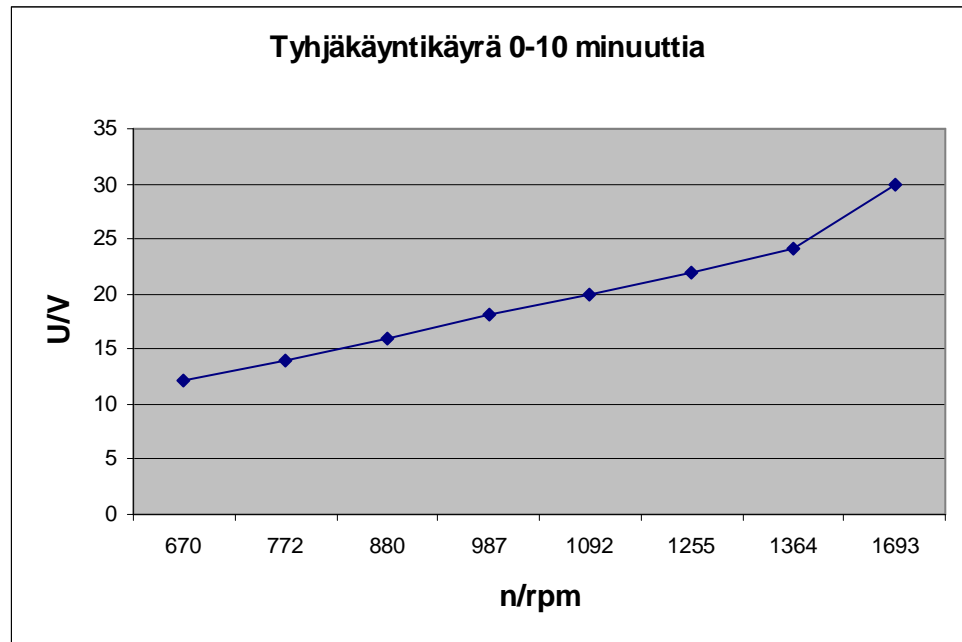
#### 6.1.2 Kierrosnopeuden tulosten analysointi

Jotta tuloksia voitaisiin verrata, tarvitaan joku vertailukohde. Tällaiseksi voidaan hyvin ottaa Windstream Powerin tasasähkökestomagneettigeneraattori tyyppiä 443540 Permanent Magnet DC Generator. Kuvassa 19 on sen tyhjäkäyntikäyrä, jossa x-akselilla on sen pyörimisnopeus minuutissa ja y-akselilla generaattorin antama napajännite.



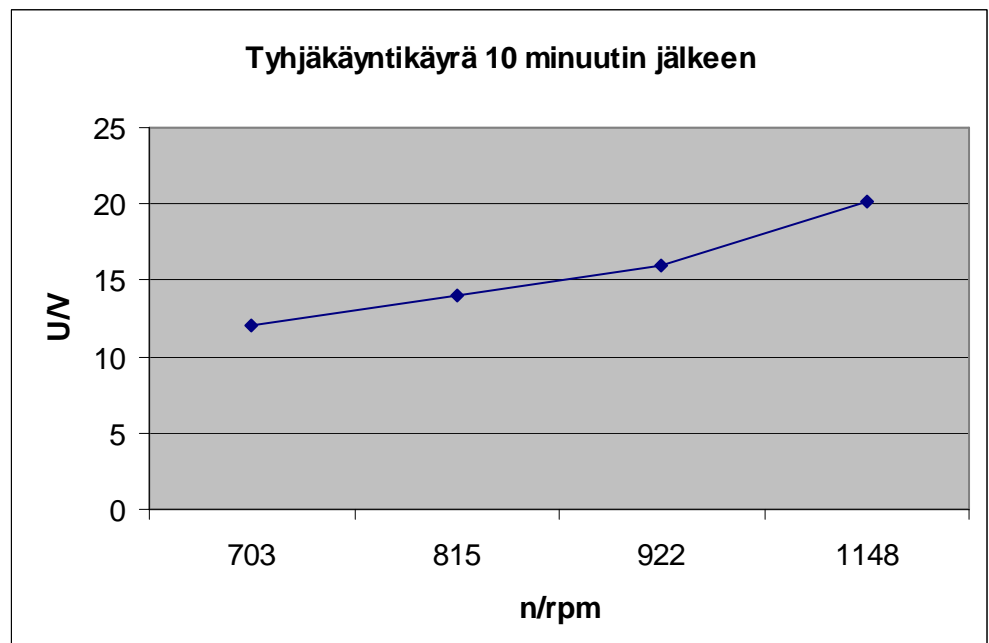
Kuva 19. Windstream Powerin kestomagneettigeneraattorin 443540:n tyhjäkäyntikäyrä [9]

Mitattavana ollut tasasähkökestomagneettigeneraattori antoi ensimmäisen 10 minuutin aikana kuvan 20 näyttämän tyhjäkäyntikäyrän. Kyseinen tyhjäkäyntikäyrä on melko lineaarinen, joten mittaukset onnistuivat varsin hyvin.



*Kuva 20. Mitattavan generaattorin tyhjäkäyntikäyrän ensimmäiset 10 minuuttia*

Kuvassa 21 generaattori on jo lämmennyt lopulliseen käyntilämpötilaansa, joten sen antamat mittauspisteet ovat luotettavampia kuin kuvan 20. Tästä johtuen vertailut tehdään kuvien 19 ja 21 välillä.



*Kuva 21. Mitattavan generaattorin tyhjäkäyntikäyrä 10 minuutin jälkeen*

Kun verrataan Winstream Powerin kestopagneettigeneraattoria ja mitattua kestopagneettigeneraattoria, pystytään kuvista 19 ja 21 päättämään, että

Winstream Powerin generaattori antaa samoilla generaattorin kierrosluvuilla enemmän jännitettä kuin mitattavana ollut tasasähkökestomagneetti-generaattori. Kuvasta 19 huomaa, että Winstream Powerin generaattori antaa 1 000 kierroksella n. 50 V, ja mitattavana ollut generaattori antoi vain reilut 20 V kierrosnopeudella 1 148 kierrosta minuutissa.

## 6.2 Lähtömomentin määrittämisen päätelmät

### 6.2.1 *Lähtömomentin mittauksen suorittamisen analysointi*

Mittausten suorittaminen oli todella hankalaa, sillä mitattavalle generaattorille ei saatu vastamomenttia käytännön syistä. Metallisella vipuvarrella ja vaa'alla mittaaminen aiheuttaa suuren menetelmävirheen. On lähes mahdotonta analysoida, nostettiin vaaka täysin kohtisuorassa ja osattiin vaa'an lukema lukea juuri sillä hetkellä, kun puhaltimen siipi lähti liikkeelle. Mittauksen menetelmävirheeksi arvioitiin 10 % [8]. Tarkkuus on riittävä, jotta voidaan sanoa mittauksen onnistuneen hyvin ottaen huomioon mittauksen haasteellisuuden.

### 6.2.2 *Lähtömomentin tulosten analysointi*

Vaa'an lukeman perusteella ja kaavalla 5 lasketusta lähtömomentti arvosta 1,4 Nm voi päätellä, että se on varsin pieni, vaikka kyseessä on pieni kestopagneettigeneraattori. Ominaisuutena pieni lähtömomentti on hyvä asia, sillä mitä pienempi se on, niin sen pienemmällä vääntömomentin arvolla se alkaa tuottaa sähköä.

## 6.3 Tehon ja tuoton määrittämisen päätelmät

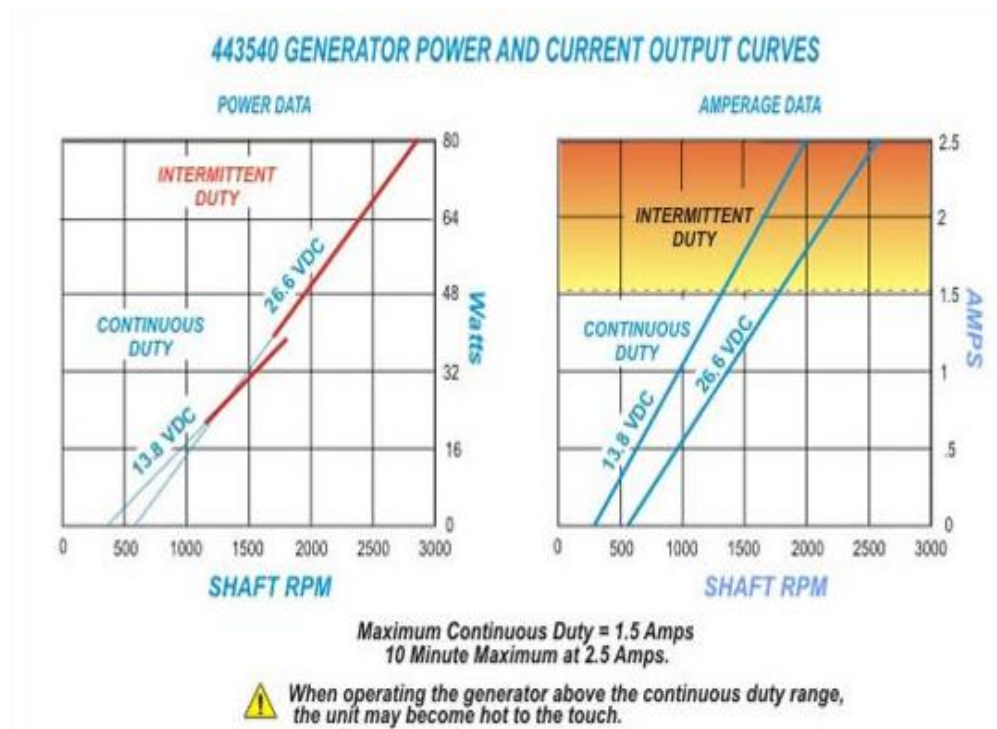
### 6.3.1 *Tehon ja tuoton mittausten suoritus*

Mittaukset onnistuivat varsin hyvin, sillä oli mahdollista mitata samalla kertaa generaattorin teho ja tuotto. Tämä tapahtui mittaamalla tehoanalysaattorilla generaattorin teho ja epäsuorasti jännite- ja virtamittareilla voimakokeena olleen sivuvirtakoneen teho. Saimme otettua generaattorista tehoa 91,5 W, minkä jälkeen generaattori rupesi olemaan jo polttavan kuuma ja sen kuormaa pienennettiin.

### 6.3.2 *Tulosten analysointi tehon mukaan*

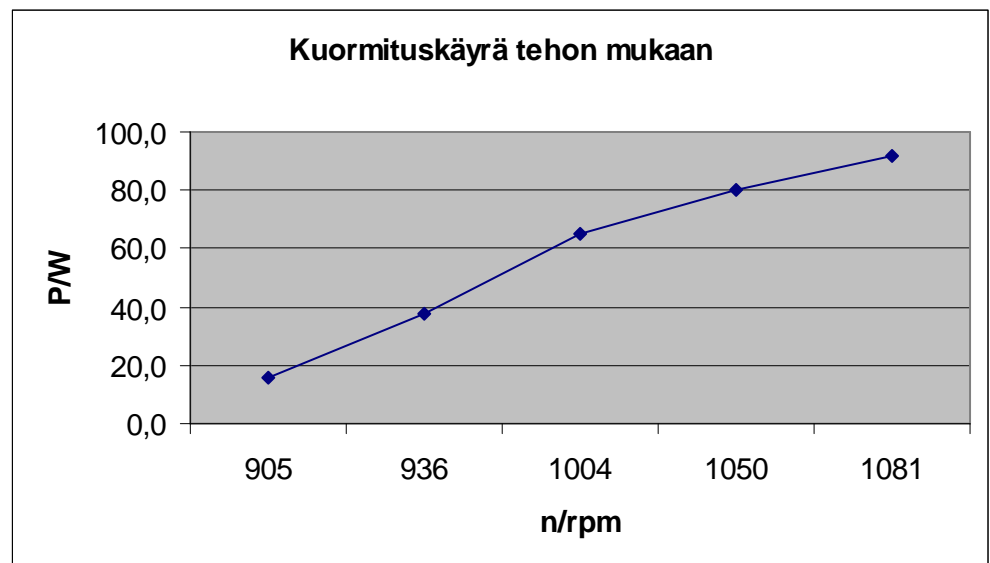
Mitattavasta generaattorista saatava huipputeho on varsin hyvä, kun verrataan sitä jo aiemmin esillä olleeseen Windstream Powerin 443540

tasasähkökestomagneettigeneraattoriin, josta on kuvassa 22 kuormituskäyrät tehon ja virran mukaan.

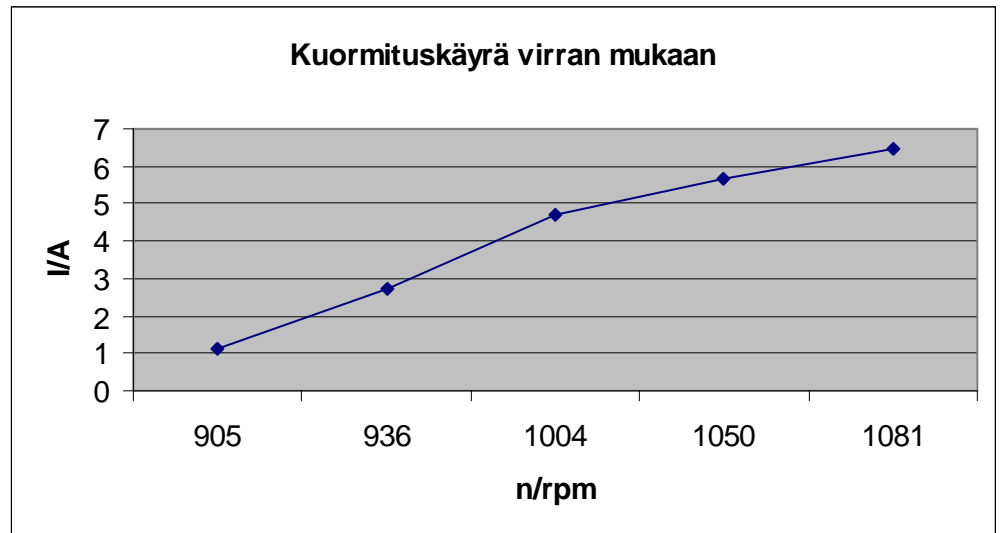


Kuva 22. Windstream Powerin kestomagneettigeneraattorin 443540 kuormituskäyrät tehon ja virran mukaan [9]

Kuvissa 23 ja 24 on piirrettyä mitatun tasasähkökestomagneettigeneraattorin kuormituskäyrät tehon ja virran mukaan. Mittauspisteiden arvot ovat otettu taulukosta 2.



Kuva 23. Mitattavan generaattorin kuormituskäyrä tehon mukaan



*Kuva 24 Mitattavan generaattorin kuormituskäyrä virran mukaan*

Kun verrataan kuvia 22, 23 ja 24 voidaan huomata, että mitattavan generaattorin tehokäyrien kulmakertoimet ovat suhteessa suurempia. Oletetaan käyrät lineaarisiksi, vaikka tehohäviöt kasvavat pyörimisnopeuden kasvaessa. Otetaan esimerkiksi piste, missä mitatun tasasähkökestomagneettigeneraattorin kierrosnopeus on 1 004 kierrosta minuutissa. Mitattavana ollut generaattori antoi tällöin 65,4 W ja 4,68 A, kun taas vertailukoneena olleen generaattorin vastaavat arvot kuvasta 22 luettuina ovat n. 19 W ja 1,1 A. Ero on todella valtava, joten voidaankin sanoa, että mitatusta generaattorista saadaan huomattavasti enemmän tehoa irti kuin Windstream Powerin tasasähkökestomagneettigeneraattorista.

Kuitenkin mitattavana ollut tasasähkökestomagneettigeneraattori on kooltaan isompi ja siinä on 12 kestomagneettia Windstream Powerin kahden sijaan. Tämä antaa selvän vertailuedun mitatulle tasasähkökestomagneettigeneraattorille. Tämän vuoksi on hyvä ottaa toiseksi vertailukohteeksi samankokoinen auton laturi.

Vertaamalla mitattua tasasähkökestomagneettigeneraattoria tavalliseen auton laturiin, pystytään huomaamaan, että mitattava tasasähkökestomagneettigeneraattori saavuttaa nimellisen pyörimisnopeuden selvästi nopeammin. Tämän takia se antaa tehoa vähemmän kuin normaalille laturille laskettu teho 322 W kierrosnopeudella 1 500 kierrosta minuutissa [5, s. 196].



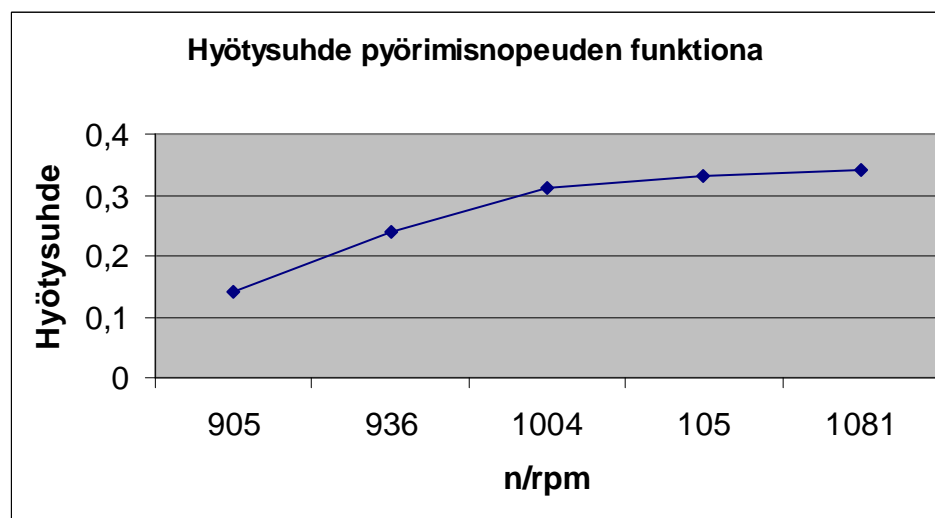
Oletetaan tavallisen auton laturin teho täysin lineaariseksi ja katsotaan mikä tehon se antaisi n. 1 000 kierroksella minuutissa.

$$P(1\,000\text{ rpm}) = \frac{322\text{ W}}{1\,500\text{ r/min}} * 1\,000\text{ r/min} \approx 215\text{ W}$$

Tämä teho olisi todella paljon suurempi kuin mitattavan generaattorin antama. Pelkän tehon mukaan ei kuitenkaan voi tehdä päätelmiä tasasähkökestomagneettigeneraattorin käyttökelpoisuudesta, vaan pitää tarkastella myös hyötysuhdetta.

### 6.3.3 Tulosten analysointi tuoton mukaan

Tuotto eli hyötysuhde on mitatulla tasasähkökestomagneettigeneraattorilla todella huono. Kestomagneettigeneraattorilla pitäisi teoriassa olla varsin hyvä hyötysuhde, koska se ei tarvitse ulkoista magnetointia. Tosin mitattu tasasähkökestomagneettigeneraattori on varsin pieni, sen halkaisija on 11,7 cm ja pienemmillä sähkökoneilla on suhteessa huonompi hyötysuhde isompiin verrattuna. Hyötysuhde tavallisesti samankokoisella kestomagneetikoneella on hieman yli 50 % [10]. Kuvassa 24 on esitettyä mitattavana olleen tasasähkökestomagneettigeneraattorin pyörimisnopeus hyötysuhteen funktiona.



Kuva 25. Mitattavana olleen kestomagneettigeneraattorin hyötysuhde pyörimisnopeuden funktiona

Kuvasta 25 voi päätellä mitatun tasasähkökestomagneettigeneraattorin kylästyksen, kun hyötysuhde rupeaa menemään yli 0,3:n. Windstream

Powerin kestopagneettikoneen 443540:n kuormituskäyristä voi huomata niiden olevan lineaarisia, jolloin tehohäviöt suuremmillakaan kierroksilla eivät ole merkittäviä. Mitatun tasasähkökestopagneettigeneraattorin teho rupeaa selvästi muuttumaan kierrosnopeuden kasvaessa (kuva 23). Tämän takia hyötysuhde ei kasva lineaarisesti vaan pienenee selvästi, koska kone alkaa hiljalleen kyllästyä, ja kuormitushäviöt ovat verrannollisia virran neliöön.

*Nimellinen pyörintänopeus* mitatulla tasasähkökestopagneettigeneraattorilla voisi olla jatkuvalla käytöllä n. kolmannen mittauspisteen (1 000 rpm/min) kohdalla, koska generaattorin magneettinen kyllästyminen alkaa suunnilleen siitä. Tämä arvio perustuu mittauksen antamaan tietoon, että tasasähkökestopagneettigeneraattoria kuormitettiin kyseisessä pisteessä 10 minuuttia. Tällöin generaattori ei lämmennyt vielä polttavan kuumaksi, kun seuraavassa mittauspisteessä se oli tulikuuma jo parin minuutin ajon jälkeen.

#### 6.4 Tasasähkön sykkeisyyden analysointi

Tasasähkön sykkeisyys on todella suuri mitatulla tasasähkökestopagneettigeneraattorilla (ks. kuva 18). Siitä voidaan huomata, että tasakomponentti on n. 10 V ja vaihtokomponentti n. 8 V. Näiden avulla voidaan laskea jännitteen tehollisarvo ja sitten verrata vaihtokomponenttia siihen. Tehollisarvo saadaan laskettua seuraavasti:

$$U = \sqrt{U_{DC}^2 + U_{AC}^2} \quad (6)$$

missä  $U_{DC}$  on jännitteen tasakomponentti ja  $U_{AC}$  vaihtokomponentti.

Lasketaan käyttämällä kaavaa 6 mitatun tasasähkökestopagneettigeneraattorin tehollisarvo.

$$U = \sqrt{(10V)^2 + (8V)^2} \approx 12,8V$$

Verrataan jännitteen vaihtokomponenttiosaa sen tehollisarvoon.

$$100\% * \frac{U_{AC}}{U} = \frac{8V}{12,8V} \approx 62,5\%$$

Tasasähkön sykkeisyys on liian suuri, jotta voidaan puhua sykkeettömästä tasasähköstä [7].

## 7 YHTEENVETO

Pienistä tasasähkökestomagneettikoneista on vielä vähän julkaistua tietoa ja mittaustuloksia saatavilla verrattuna muihin sähkökoneisiin. Tämä johtuu siitä, että niiden markkina-asema on ollut pieni ja tutkimustyöhön ei ole käytetty paljon resursseja. Tämä asia on kuitenkin muuttumassa ja muun muassa ABB on alkanut panostamaan kestomagneettikoneisiin entistä enemmän.

Tämän työn tarkoituksena oli testata ja mitata pientä (halkaisija 11,7 cm) tasasähkökestomagneettigeneraattoria sekä saada siitä selville koneen toiminnan ja käytön kannalta tärkeitä mittaustuloksia. Näiksi keskeisiksi mittaustuloksiksi saatiin seuraavat tulokset:

- Tasasähkökestomagneettikoneen 14 V:n kierrosnopeudeksi mitattiin 815 rpm/min.
- Tasasähkökestomagneettikoneen lähtömomentin arvoksi mitattiin 1,4 Nm.
- Tasasähkökestomagneettikonetta saatiin kuormitettua enimmillään 6,48 A:n ja 91,5 W:n edestä.
- Hyötysuhteeksi saatiin 0,31 arvioidussa nimellisessä tasasähkökestomagneettikoneen kuormituspisteessä.

Mitattavana ollut tasasähkökestomagneettigeneraattorin mittaukset onnistuivat hyvin, sillä suunnittelija sai tarvitsemansa tiedot, mikä oli työn päätavoitteena (ks. 2.1 Suunnittelijan tavoitteet). Ainoastaan generaattorin lähtömomentin mittaaminen mekaanisesti tuotti melkoisen menetelmävirheen, mutta tulos kuitenkin antaa sen suuruusluokan ja tällöin se luo vertailupohjan päätelmien tekemisille. Sähkön sykkeisyyden mittaukset (ks. 2.2 Mittaajan tavoitteet) onnistuivat myös hyvin, koska oskilloskoopilla saatiin selvät kuvat (liite 3), joissa kursorit ovat laitettu mittaamaan tasasähkön vaihtokomponentin arvoa. Päätelmien tekeminen osoittautui haasteelliseksi, sillä tietoa pienistä tasasähkökestomagneettigeneraattoreista löytyi hyvin vähän.

Vertailukohteeksi otettu Windstream Powerin 443540 tasasähkökestomagneettigeneraattori sopii hyvin vertailukohteeksi, sillä siitä löytyi tyhjäkäynti- ja kuormituskäyrät [7]. Näin ollen vertailun perusteena voidaan käyttää teknisiä arvoja, jolloin tulosten analysointi on luotettavaa. Mittaustuloksista pystyy päättämään mitattavan tasasähkökestomagneettigeneraattorin antavan selvästi vähemmän jännitettä samoilla kierrosnopeuksilla kuin Windstream

Powerin tasasähkökestomagneetikone (ks. Kuvat 19 ja 21). Lähtömomentin arvo mitattavalla koneella oli varsin pieni, kun verrataan sitä muihin samankokoisiin sähkökoneisiin [8]. Tehoa mitattavasta tasasähkökestomagneetikoneesta saatiin huomattavasti enemmän kuin Windsteam Powerin vastaavasta, mikä kuitenkin on selvästi kooltaan pienempi. Tästä johtuen tehon suhteen toiseksi vertailtavaksi tasasähkögeneraattoriksi on valittu tavallinen auton laturi [5, s.196].

Kyseisestä auton laturista on laskettu sen teho 14 V:lla ja 1 500 kierroksella minuutissa. Oletuksena tehtiin, että laturin tehon käyrä  $P(n)$  olisi lineaarinen. Tällöin voitaisiin laskea auton laturin teho lähellä mitatun tasasähkögeneraattorin arvioitua nimellistä kierrosnopeutta (ks. 6.3.2 Tulosten analysointi tehon mukaan; 6.3.3 otsikko: Nimellinen pyörimisnopeus). Vaikka tehokäyrä ei ole täysin lineaarinen, niin tämä vertailu antaa kuitenkin suunnan päätelmille, joiden mukaan tavallisesta auton laturista saa selvästi enemmän tehoa.

Mitatun tasasähkökestomagneettigeneraattorin hyötysuhde on todella huono, sillä samankokoisen kestomagneetikoneen hyötysuhteen pitäisi olla n. 0,5 [10] ja mitatulla tasasähkökestomagneettigeneraattorilla se on arvioidussa nimellisessä kuormitusasteessa n. 0,31. Tasasähkön sykkeisyys on myös mitatulla kestomagneettigeneraattorilla todella suuri ja se ylittää sykkeettömän tasajännitteen määritelmän [7]. Suuri tasasähkön sykkeisyys rasittaa turhaan ladattavaa akkua ja on näin ollen selvä negatiivinen tieto mitatusta tasasähkökestomagneettigeneraattorista.

Edellä mainituista tuloksista ja niiden perusteella tehtyihin päätelmiin perustuen, mitattu tasasähkökestomagneettigeneraattori ei ole järkevä vaihtoehto tuottamaan tuulivoimalla sähköä. Suurimpana ongelmana on todella pieni hyötysuhteen arvo. Jos kyseiselle tasasähkökestomagneettigeneraattorille kuitenkin halutaan saada parempi hyötysuhteen arvo, niin roottorin ulkohalkaisijaa voitaisiin suurentaa. Tällöin kuitenkin ongelmaksi voisi tulla staattorin ja roottorin hankaaminen toisiinsa. Ainoana vähänkään järkevänä vaihtoehtona voidaan pitää koko käämitysten uusimista. Tällöin mitatulle tasasähkökestomagneettigeneraattorille pitäisi tehdä kokonaan uudet mittaukset, jotka voisivat olla uuden insinööriyön aihe.

**LÄHTEET**

- [1] ABB:n teknologiapäällikön Juhani Mantereen antama haastattelu Tekniikka ja talous lehdelle. 27.1.2005. [verkkodokumentti, viitattu 10.11.2008]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article25452.ece>
- [2] Suunnittelijana toimineen koneinsinööriopiskelija Timo Alkion kanssa käydyt keskustelut [toukokuu 2008 - lokakuu 2008].
- [3] Aura, Lauri - Tonteri, Antti *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. Helsinki: WSOY. 1996.
- [4] Partanen, Jarmo *Sähköenergiatekniikan perusteet*. Lappeenranta: LTKK. 1997.
- [5] Nieminen, Simo *Auton sähkötekniikka*. 5-7 painos. WSOY. 2005.
- [6] Wikipedia: *Vääntömomentti*. [verkkodokumentti, viitattu 30.10.2008]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/vääntömomentti>
- [7] Salonen, Pasi Diplomityö *Tasasähkön hyödyntämismahdollisuudet sähkönjakelussa* [verkkodokumentti, viitattu 11.11.2008]. Saatavissa: [http://www.lut.fi/fi/technology/electrical\\_engineering/research/electricitymarkets/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Diplomityo\\_Pasi\\_Salonen.pdf](http://www.lut.fi/fi/technology/electrical_engineering/research/electricitymarkets/publications/Documents/Diplomity%C3%B6t/Diplomityo_Pasi_Salonen.pdf)
- [8] Laboratorioinsinööri Esko Sirkiän kanssa käydyt keskustelut [huhtikuu 2008 - lokakuu 2008]
- [9] Winstream Powerin kotisivut. [verkkodokumentti, viitattu 27.10.2008]. Saatavissa: [www.windstreampower.com/443540\\_PMDCG.php](http://www.windstreampower.com/443540_PMDCG.php)
- [10] Yliopettaja Ari Kohvakan haastattelu. 3.11.2008. Ammattikorkeakoulu Metropolia.

## **Liitteet**

**Liite 1.** Alustavan mittauksen mittauspöytäkirja

**Liite 2.** Mittauksen mittauspöytäkirja

**Liite 3.** Tasasähkön sykkeisyyden oskilloskooppikuvat

## Alku koemittauksia

JÄNNITE U MITATTU LIITTIMIEN N-E NAVOISTA

U/V	n/rpm
8,83	910
12,01	1215
14,03	1414
17,09	1705
19,01	1897

n. 1 V/100rpm

## Varsinaiset mittaukset

U/V	n/rpm	dc-kompo	ac-kompo
14,01	1491	13	5,16
12,04	1288	11,2	4,46
13,01	1394	12,11	4,81
14,01	1494	13	5,17
14,48	1542	13,4	5,35
15,02	1604	13,93	5,55
14	1493	112,99	5,17

KÄYTETTY TEHOLLISARVOMITTARIA

## Vääntömomentin mittaus

x/kg	r/m	$g/m/s^2$
0,58	0,246	9,81

## Tehon ja tuoton mittaus kuormana resistanssi

U/V	I/A	n/rpm	P/W	U/V	I/A
22,5	15,7	1495	52	12,38	4,28
22,37	16,6	1492	58,1	12,08	4,95
23,17	10,2	1495	15,08	13,37	1,19
23,06	11	1498	23,8	13,18	1,83
22,81	13	1497	40	12,61	3,22

**Kierrosnopeuden määrittäminen (14 V)**

JÄNNITE U MITATTU LIITTIMIEN N-E NAVOISTA

U/V	n/rpm
14	757
12,09	670
14,05	772
16,04	880
18,09	987
20,03	1092
22,03	1255
24,04	1364
29,94	1693
12	703
14	815
16	922
20,13	1148
14,01	815

**Tehon ja tuoton mittaus kuormana resistanssi**

Voimakone Voimakone

U <sub>v</sub> /V	I <sub>v</sub> /A	n/rpm	<u>U/V</u>	I/A	P/W
22,86	6,6	905	13,95	1,14	15,9
22,60	8,8	936	14,00	2,70	38,0
22,10	12,5	1004	13,90	4,68	65,4
21,70	15,5	1050	13,96	5,68	80,2
21,30	19,2	1081	14,00	6,48	91,5

**Sivuvirtakoneen ankkuriresistanssin mittaus**

R/Ω
0,255
0,263
0,256



