

課題名：「低速風車用新型発電機の開発」

1. 研究機関名 工学院大学
責任者名 横山 修一

2. 試験実施の概要

2.1 試験実施の状況

本試験研究の主要な要求事項は、低速回転でコギングが小さく小型高出力の交流同期発電機の開発である。この要求事項を満たすために、永久磁石のデュアルハルバッハ配列を用いて新たな交流発電機の設計をした。

設計にあたって、必要な発電機の仕様を下記のように決定した。

相数：3相

結線：Y結線

回転数：300RPM

電圧：DC 40V（無負荷）

電流：DC 5A 定格

直流出力 200w

直径：230mm以下

上記条件に基づき永久磁石配列および理論の裏付けと設計を同時に進めた。

2.2 試験対象特許

活用特許1

特許の名称 組立型風車

出願番号 特願2003-189496

出願日 2003年7月1日

特許番号 特願第4488697

活用特許2

特許の名称 風車

出願番号 特願2003-181720

出願日 2003年6月25日

特許番号 特願第4570851

3. 試験実施期間 2011年4月1日～2011年12月31日

4. 試験実施場所 工学院大学

5. 試験実施の結果（目標に対する具体的数値で示してください。）

5.1 試験項目

（1） 設計仕样に基づいて同期発電機を制作した。

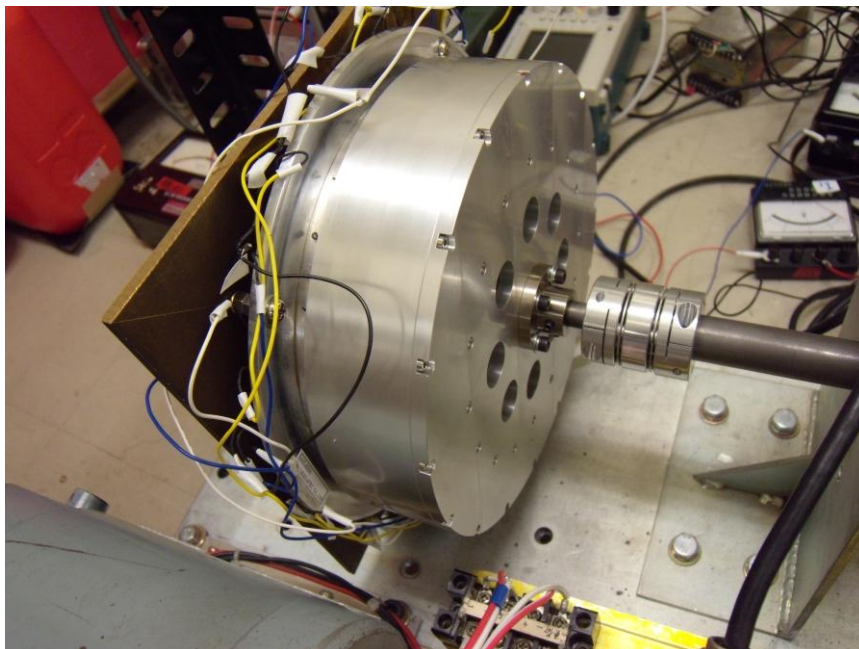


図1 完成した発電機

- (2) 設計仕様に基づく発電機の設計図面と永久磁石の形状および発電機用コイルについては、図2の通りである。

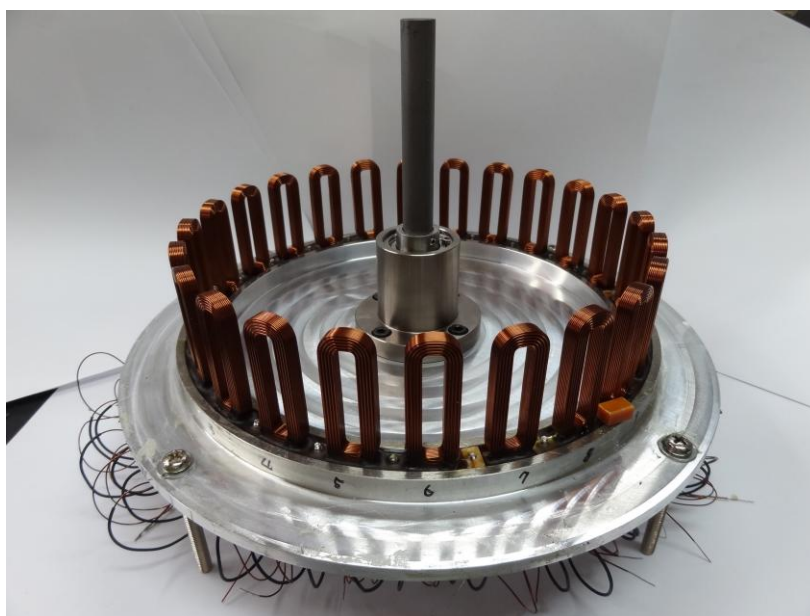


図2 固定子のコイルの実際

5.2 試験の結果

試験項目 (1)

5.2.1 設計仕様を満たす磁石の形状の検討。

図3、図4のように磁石およびのコイル配列を決定した。この形状にした理由は、小型で高出力を取り出すことができる構造と設計のし易いことを考慮しているためである。コイルを固定子にし、磁石を回転子にした理由は、コイルから取り出す発生電圧をスリップリングに使用せずに取り出すことができるためである。コイルを固定子にすることにより構造的にも機械的にも損失が少なくできる。

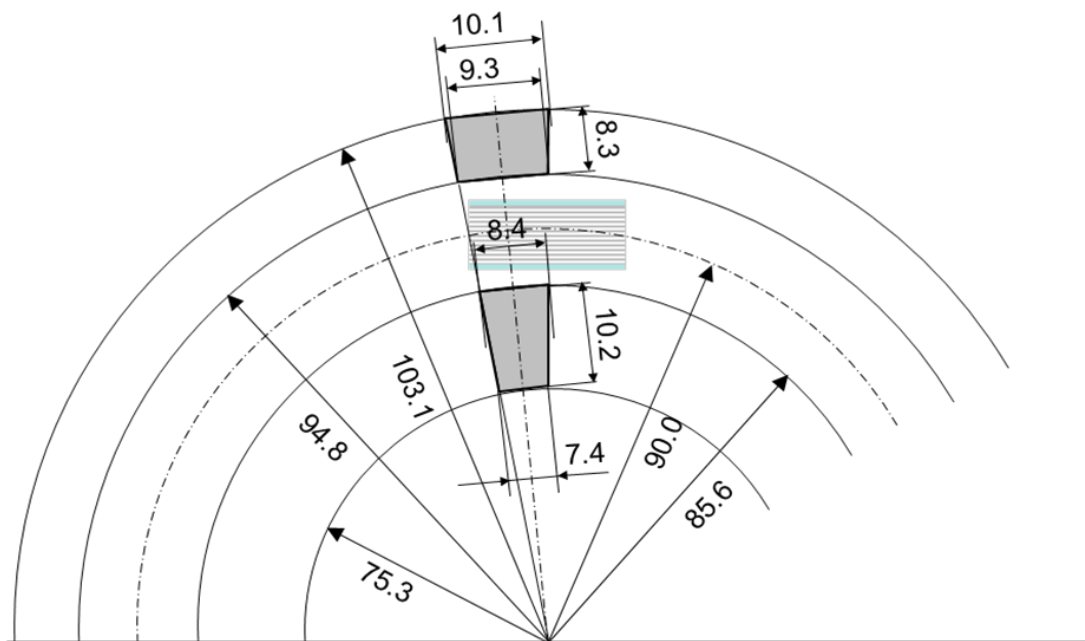


図3 磁石の設計値

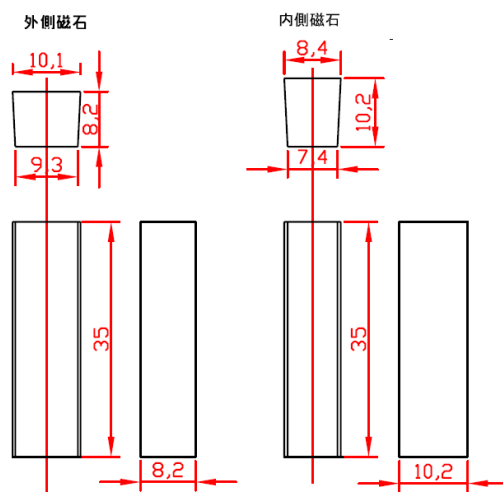


図4 コイル寸法を考慮した磁石の作製寸法



図5 磁石の配置と回転子の全体像



図6 回転子磁石の配置の実際（拡大図）

5.2.2.2 磁石の磁束密度の検討

次に、磁石の材質による磁束密度が設計値と500ガウス減少していることが判明した。

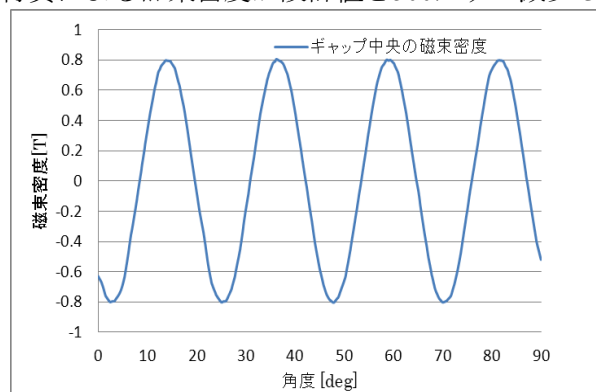


図7 磁石のギャップ中央の磁束密度（設計値）

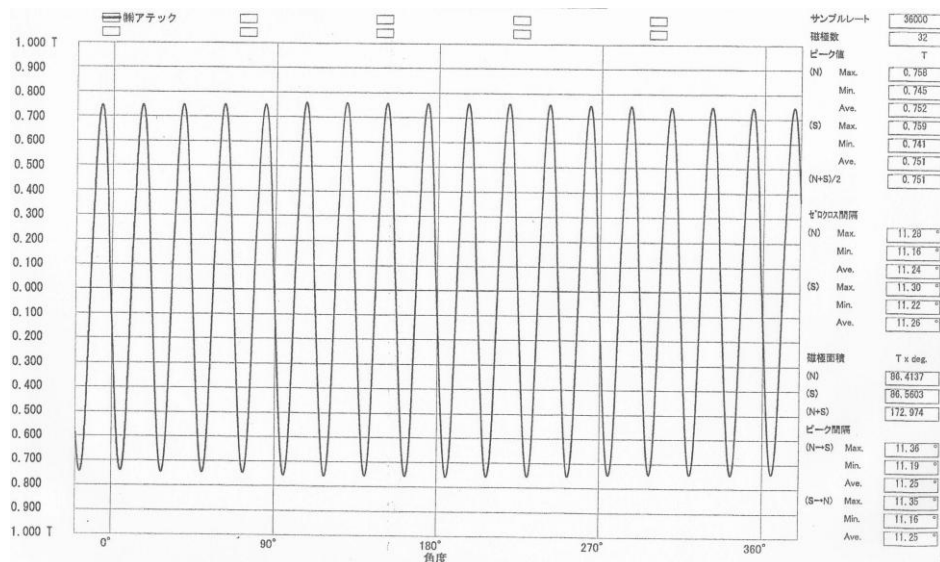


図8 制作された磁磁石のギャップ中央の磁束密度（実測値）

設計値は、0.8テスラであったが、制作時の実測値は平均値0.75テスラであり、0.05テスラ磁束密度が減少している。ネオ・ジムの磁石着磁による誤差と考えられる。この磁束密度の減少は、発生起電力に直接影響するものである。コイルと磁石間のギャップについての考察と発生電圧については、後述する。

5.2-1-3 コイルの制作と発生電圧

図8より、磁束密度分布の半周期は最低でも内側磁石の上部8.4[mm]の2倍あるので、16.8[mm]である。設計ではギャップの中心で見ていたので、17.7[mm]となっている。しかし、コイルの幅は図9に示す幅（15.2mm）である。このコイル幅と内側磁石の上部のサイズの違いが鎖交磁束の減少につながったと考えられる。この結果、当初の設計電圧と比較して発生する電圧が減少した。

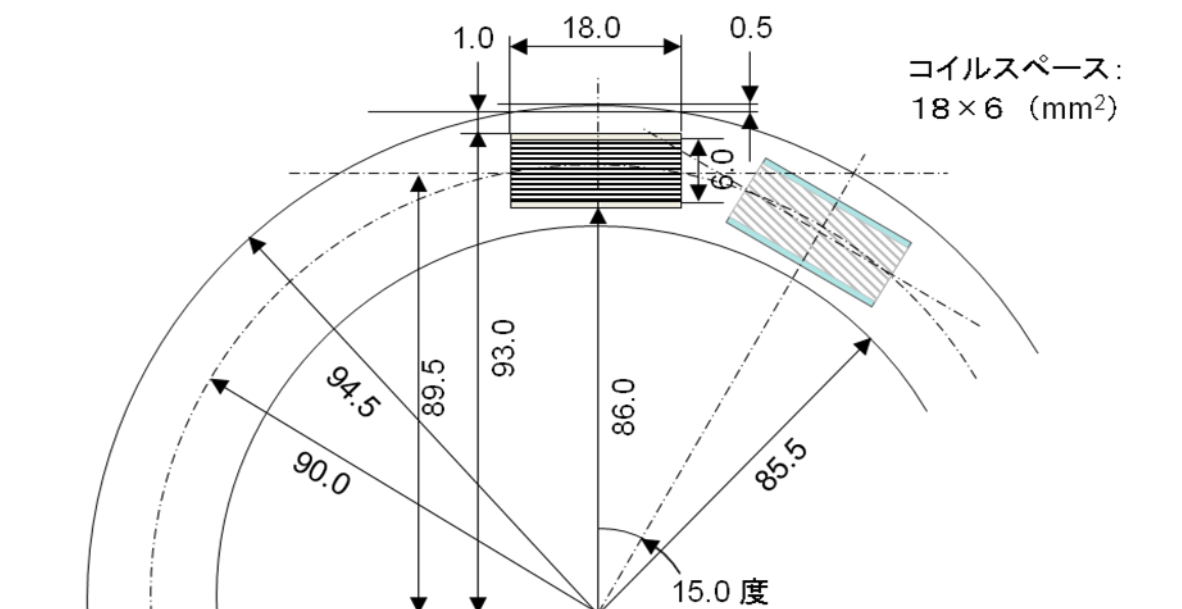


図9 コイル寸法（設計値）

導線の寸法が0.6mmから0.5mmに変更したため、コイルスペース全体の寸法が18mm×6mmから15.2mm×5.7mmとなった。

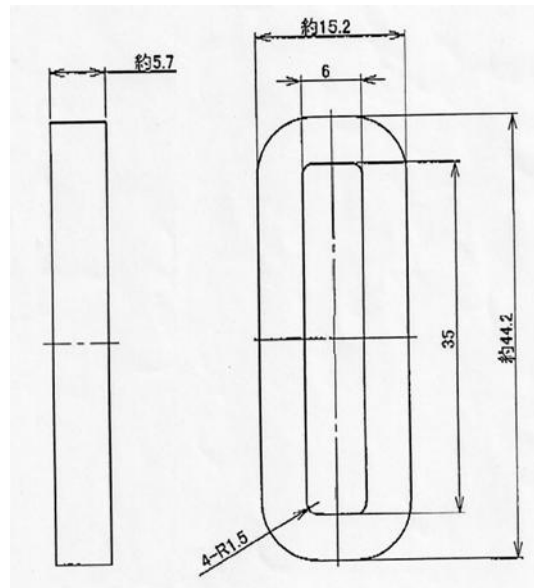


図10 実際に作製したコイル寸法



図11 作製されたコイル

作製したコイルと設計値の違いは、コイル導線の太さを設計値どうりにするとコイルと磁石とのギャップが小さくなり、組み立て時に固定子コイルがこすれる可能性があり、導線の太さを設計値の0.6mmから0.5mmとした。

この変更による影響は、発生電圧に影響した。

設計値の変更による発生電圧を再計算すると次のようになる。ただし、磁束の最大値は、0.8テスラを利用した。また制作時の磁束密度の最大値は、0.75テスラであり、磁束密度の低下による電圧の減少については、磁束密度に比例するとした。

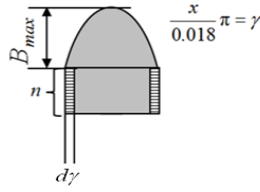


図12 外側コイル鎖交磁束

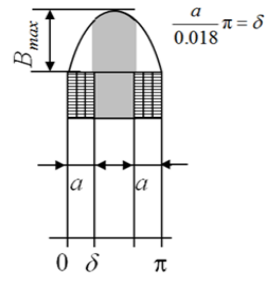


図13 内側コイル鎖交磁束

発生電圧の波高値 $e_{\max}$ は、

$$e_{\max} = \frac{2}{\pi} \omega p B_{\max} h D \frac{N}{\delta} \sin \delta \quad (1)$$

であったが、磁石の窓面積とコイルの幅が合わないため、

$$\Phi = h D B_{\max} \frac{2}{\pi} \int_{\delta_0}^{\delta} \cos \alpha \frac{N}{(\delta - \delta_0)} d\alpha \sin \omega t = \frac{2}{\pi} B_{\max} h D \frac{N}{(\delta - \delta_0)} (\sin \delta - \sin \delta_0) \sin \omega t \quad (2)$$

$$e_{\max} = \frac{2}{\pi} \omega p B_{\max} h D \frac{N}{(\delta - \delta_0)} (\sin \delta - \sin \delta_0) \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{\pi n}{30} = 10\pi \quad (\text{回転数 } n[\text{rpm}])$$

$$p = 16$$

$$B_{\max} = 0.8$$

$$h = 0.035$$

$$D = 0.0177$$

$$N = 90$$

$$\delta = \frac{D - 0.006}{2D} \times \pi = \frac{0.0117}{0.0354} \times \pi = 1.038$$

$$\delta_0 = \frac{D - 0.0152}{2D} \times \pi = \frac{0.0025}{0.0354} \times \pi = 0.222$$

三相Y結線での三相全波整流後の直流の平均値 E は、

$$E = 1.654 e_{\max} \quad (4)$$

$$E = 1.654 \times \frac{2}{\pi} \times 10\pi \times 16 \times 0.8 \times 0.035 \times 0.0177 \times 90 \div 0.816 \times (\sin 1.038 - \sin 0.222)$$

$$E = 18.55 \quad (5)$$

さらに、コイルが2直列になるので、直流の出力電圧 V_{out} は、

$$V_{out} = 14.59 \times 2 = 37.1 \quad (6)$$

となる。

したがって、磁束密度の減少による直流の出力電圧は、次のようになる。

$$V_{out} \times \left(\frac{0.751}{0.800} \right) = 34.8$$

コイルのインピーダンスは、実測と設計値は表(1) となりほぼ設計一致している。

表 1 コイルの設計値と実測値に比較

	作製時の値		実験室の実測値	
	インピーダンス μH	抵抗 Ω	インピーダンス μH	抵抗 Ω
平均	227	0.82	240	0.90
最大	228	0.83	270	0.95
最小	226	0.82	219	0.88

値の違いは、測定装置の違いによるものと感られる。実験室では、測定するために半田付けおよび測定するためのリード線を使用しているために多少の違いがあり、作成時の値より大きめになっていることは止むを得ないとする。

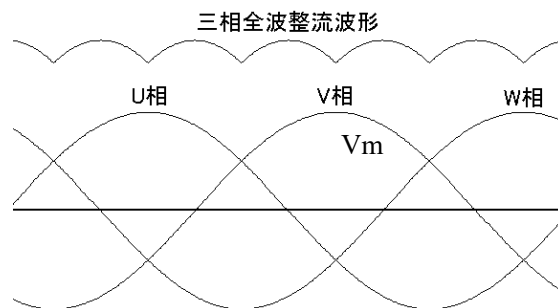


図14

直流電圧を得るための装置は、作成した三相同期発電機の電圧を全波整流する必要があり、実際の交流波形と整流波形を図14に示す。

(1) 交流発電電圧

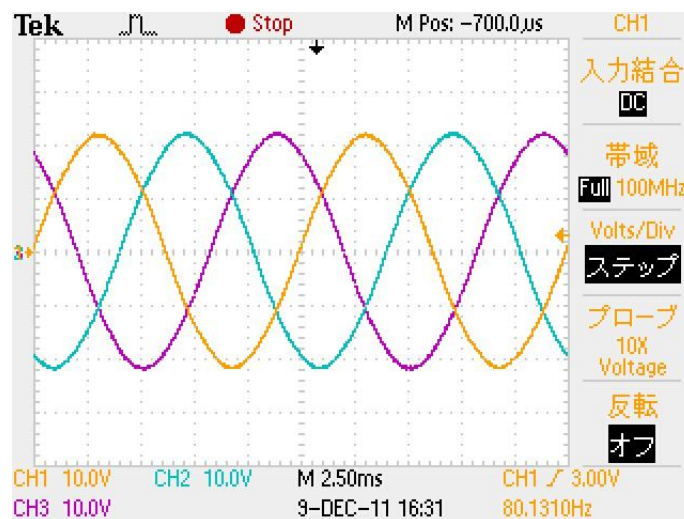


図15 交流波形

(2) 整流後の直流電圧

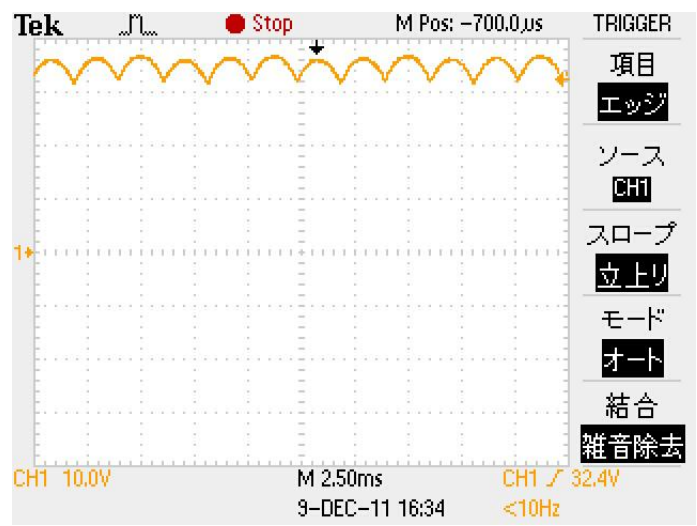


図16 実測した直流電圧

回転数 N[rpm]	線間電 圧 V[V]	電圧(整 流後) E[V]
50	4.5	5.17
100	8.8	10.67
150	13.1	16.68
200	17.5	22.34
250	22.0	28.18
300	26.2	33.89

表 2 実測値

発電機の回転数に関する無負荷特性は、図 () のようになる。制作された設計値は、回転数300rpmにおいて直流値で34.8vである。整流器の電圧降下分1.2vを考慮すると実測値の33.8vは理論値と一致しており、今回開発した低速風車用発電機の無負荷特性としては満足できるものである。コイルのインピーダンスは、実測と設計値は表 5 となりほぼ設計一致している。

表 3 コイルの設計値と実測値に比較

	作製時の値			実験室の実測値	
	インピーダンス μH	抵抗 Ω		インピーダンス μH	抵抗 Ω
平均	227	0.82		240	0.90
最大	228	0.83		270	0.95
最小	226	0.82		219	0.88

実験室では、測定するために半田付けおよび測定するためのリード線を使用しているために多少の違いがあり、作成時の値より大きめになっていることは止むを得ないとする。

5.2. 3 実負荷試験結果

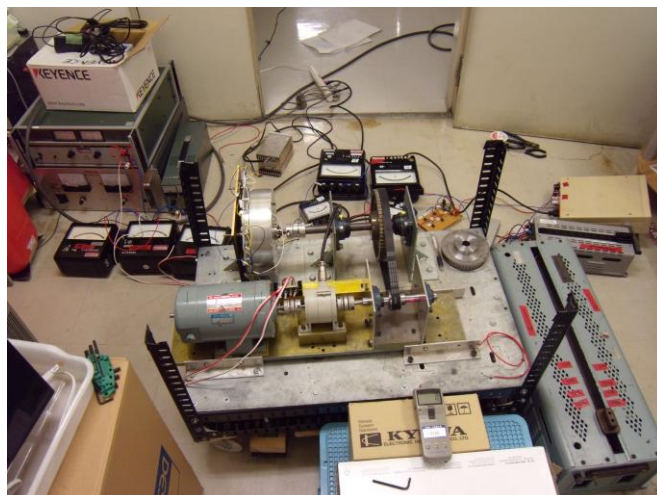


図17 実負荷試験の実験の様子

表 4 実負荷試験
回転数300[rpm]一定 固定損7.85[W]
電機子抵抗1Ω(コイル2直列4並列)

直 流 電 圧 Vd [V]	直流電流 Id [A]	直 流 電 力 Pd [W]	銅損 Pc [W]	損失+出力 [W]	効率 η [%]
33.89	0.00	0.0	0.00	7.85	0.0
32.42	0.59	19.2	0.35	27.40	70.1
31.72	1.19	37.9	1.42	47.17	80.4
31.00	1.83	56.7	3.35	67.90	83.5
30.47	2.41	73.3	5.81	86.96	84.3
29.37	3.20	94.0	10.24	112.09	83.9
28.72	3.87	111.7	14.98	134.53	83.0
27.94	4.64	129.8	21.53	159.18	81.5
27.50	5.00	137.5	25.00	170.35	80.7
27.00	5.44	146.9	29.59	184.34	79.7
25.82	6.39	164.9	40.83	213.58	77.2
24.73	7.39	181.9	54.61	244.36	74.4

実際に制作した発電機の実負荷試験を実施した結果、機械損は、約7.85wであった。また銅損は、コイルの接続を図18のように設計（2直列、4並列）したので、電流の二乗に比例する結果である。発生電圧の二乗に比例することもデータから読み取れる。当初予定していた電圧と比較して発生電圧が低下したのでその影響が出力の低下となっている。

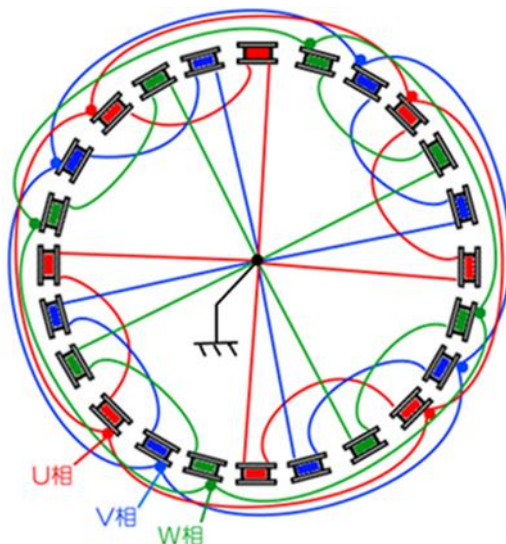


図18 コイルの接続状態

実負荷試験の結果、設計値の電流 5 A の直流出力で137.5wを取り出すことができ、当初予定した200wの出力に対68.75%となっている。この出力低下については、磁束密度の低下（当初の93.8%）、コイル枠の減少（当初の約80%）であり、総合低下率は、 $0.93 \times 0.8 = 0.744$ となる。したがって、電力の低下は、当初予定の200wに対し、 $200w \times 0.744$ で148.8wとなっている。実験値は、146wの近傍であり、設計値をよく表している。

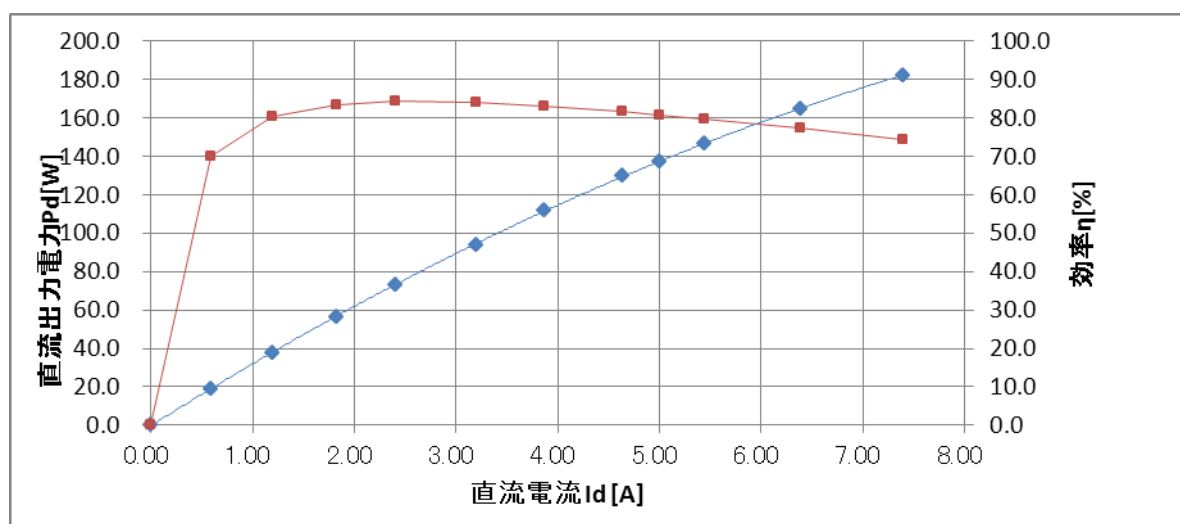


図19 実負荷試験による出力と効率

5.2.3 考察及び課題

ハルバツハ発電機は無負荷時において、定格回転数で運転したときに線間電圧の波高値で直流出力電圧が 40[V]になるように設計している。表 () の発電機の実験の結果を見ると発電機の定格回転数 300rpm で 33.8v となり、当初予定の減少率は 0.845 である。その結果、電圧が設定値より低い値となって出力電力の低下となっている。また、コイルの抵抗は、設計値（コイル直径 0.6 mm） 0.57Ω に対し制作時のコイル直径は、0.5 mm であり、抵抗は 0.83Ω となって抵抗損（銅損）の増加となっている。その結果、設計値の 200w に対し、137.5w となっている。

図 19 の 3 相の出力波形は無負荷なので電機子反作用の影響は当然無く、きれいな 3 相波形である。図 20 の波形を見ると整流回路の転流による影響はあるものの、3 相の波形がゆがまずに出力されている。これは発電機に鉄心を使用していないので、磁束集中によるコギングの発生がなく、風車などでの低風速下における起動特性が改善できると考えられる。

6. 結言

現在市販されている低速回転用でも定格出力を得るには600～ 800rpm程度まで回転数をあげる必要があり、発電可能なカットイン風速も約2.5m/S程度必要である。又コストも高いので用途が制限されているのが現状である。

本テーマで取り組む発電機としての要求事項を以下にまとめて示す。

- 1)微風でも発電可能な、低速回転、高出力の発電機であること。
- 2)コギングが小さく小型であること。
- 3)低価格であること。

1) に関する実験結果

実験室の傘を利用した風力発電装置の風速対回転数は表（ ）となっている。表（ ）から風車のカットイン風速1.5m/sで毎秒28rpmであり、今回開発した発電機では、28rpmで2.52vの電圧を発生することが実証できた。



図20 傘型サボニウス風力発電装置

風速	回転数
V [m/s]	N [rpm]
1.5	28
1.8	45.5
2.2	63.5
2.6	96
3.2	118.5
3.4	138
3.7	160
4.1	181.5
4.4	209
4.8	232.5
5.2	255
5.6	281
5.8	308.5
6.3	331.5
6.9	355
7	379.5
7.6	400.5
7.9	424
8.2	448.5

表 5 風速と回転数

2) コギングを小さく小型にすることができる。

図7 の磁束分布の波形（正弦波）と図15における発生電圧（正弦波）が波形の歪みが無いことからコギングは発生していない、またコギングの発生原因である鉄心がコイル（図11 空心コイル）に使われていないことが根本的なことである。

3) 低価格であること。

現状では磁石そのものが、国際的な資源の高騰により残念ながら価格が高騰し低価格で入手することが困難になっている。

永久磁石としてネオジム系高耐熱タイプのN42SHを決定し、設計図に基づいて作製したが、本驗研究の目標である小型高出力の発電機の製作はできたが、低価格にすることはできなかった。

7. 成果（予定を含む）

現在の発電機の電圧発生用コイルの設計は単層である。コイルの設置形態を直径方向に多層に積層すると高い電圧を発生でき、並列回路数も多くできるので、同一の形状で高出力の発電機が設計できるものと期待できる。また、ネオジム系の磁石でなく、低価格で磁束密度の高い磁石を利用してデュアルハルバツハ配列を利用すると磁束密度はシングルハルバツハに比べて2倍程度に高めることは実証できたのでこれらの技術を活用して小型・高出力の発電機を開発できることが実証できたと考えられる。

また、大型の発電装置（1000kw以上）の可能性についても従来型の発電装置と比較しても技術的に可能であることが出てきたと考えている。

7.1 知的財産権（新権利）

2011年9月14日に特許を出願し下記の特許を取得した。。

電磁誘導装置 特許第6415029号

デュアルハルバツハ配列を多層型に利用した電磁装置として特許として取得した。

7.2 論文発表等

(1) 奥山 涼太、横山 修一、森下 明平, 風力発電向け低回転発電機の開発, 2011年（第29回）電気設備学会全国大会, 2011年9月15日

(2) 「サボニウス型風力発電の特性改善とハルバツハ型 3 相同期発電機の開発」を(社)日本電気計測器工業会主催の「計測展 2011 TOKYO」に出展した。

この計測展で、「先進システム開発賞」を受賞し、副賞としてテクトロニクス社製オシロスコープ 1 台が授与された。

(3) 森下 明平、横山 修一、奥山 涼太 デュアルハルバツハ配列界磁の磁束密度分布簡易計算法 2012 年 1 月 23 日電気学会論文誌掲載

以上