

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：53302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560348

研究課題名(和文) 巻線界磁に永久磁石を内蔵した高効率発電機の開発と評価

研究課題名(英文) Development and Evaluation of Wound Excitation Synchronous Generator with PM Excitation

研究代表者

直江 伸至 (NAOE, NOBUYUKI)

金沢工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号：00249781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：安定したエネルギー供給は重要な課題である。この研究は発電機の効率を向上することで、エネルギー供給課題の一部を解決することを目的としている。研究対象の発電機は回転子に巻線界磁と永久磁石界磁の両方を有することで損失の低減を目指している。研究対象の発電機は試作機による実験と3次元有限要素法で特性を検討した。3次元有限要素法で解析された値は実測値と比較され、よく一致した。以上の結果より、研究対象の発電機は通常の発電機と同等以上の効率をもつことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Stable energy supply is necessary. A purpose of this study is to improve generator efficiency. The generator of this study has both permanent magnet and wound rotors. The generator was analyzed by a 3D finite element method. The analyzed value was compared with the measured value and was in agreement. It was revealed that the generator was similar to a same class with more efficiency.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：同期発電機 発電 回転機

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策の一環として、風力、太陽光などの分散型電源に適した発電方式の開発が進められている。たとえば、風力発電は、再生可能エネルギーのなかでも発電コストが安価で設備利用率が大きいという優位性があり、多くの国・地域で建設されている。風力発電の導入のための技術開発として大きく分けて、ブレードと変換装置になる。その変換装置の中でも発電装置は重要な位置を占める。また中小水力発電においても高効率な発電機が開発が求められている。本研究は高効率発電機を孤立電源として、小中容量電源として利用できる発電機を開発することにある。

2. 研究の目的

エネルギー供給源としての発電機の効率向上は、エネルギー問題を解決するために追及する重要要素であり、従来の発電機の構成および構造を変更することで実現できる。ここでは励磁に巻線界磁と永久磁石界磁の両方をもつ発電機について開発することが目的である。

効率を向上するために巻線界磁に永久磁石を挿入し、励磁を補助する発電機がある。このような発電機では、回転子鉄心に永久磁石をそのまま挿入することが考えられる。永久磁石をそのまま挿入すると、永久磁石がエアギャップとして動作し、結果として大きな界磁起磁力を必要とする。本研究ではこの問題の一つの解決方法として回転子を軸方向で分割し、巻線界磁鉄心と永久磁石鉄心を持つ発電機を提案した。(図1) この同期発電機は、界磁巻線による磁束と永久磁石による磁束を回転子の軸方向で合成して励磁を得ることで高効率な発電機を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究は次の方法で実施した。

(1) 試作機2台の実寸値および材料値を用いて3次元有限要素法によって解析を実施するための解析モデルを構築する。

(2) 解析モデルを利用して磁束の通路や損失を解析する。解析は磁束密度ベクトル、磁束密度、鉄損、永久磁石表面損失を評価する。

巻線界磁に永久磁石をそのまま挿入すると、永久磁石がエアギャップとして動作し、大きな界磁起磁力が必要になる



回転子を分割し、異なった鉄心に永久磁石を配置する方法も開発した

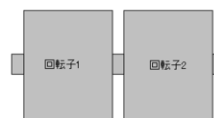


図1 回転子軸方向の分割方法

(3) 実験装置を製作し、端子電圧、電流、界磁電流、損失を測定し、実測値と解析値を比較検証する。

(4) 解析および試作機による効率を算出する。

(5) 熱ストレスも重要な要素なるので、サーモグラフィを用いて熱分布状態を測定する。

4. 研究成果

(1) 試作機構造

構造は汎用機の固定子鉄心と同様な形状でよく、電機子巻線は集中巻または分布巻のいずれでもよい。回転子は巻線界磁鉄心と永久磁石界磁鉄心を軸方向で分割する。界磁鉄心の配置方法には特に制限はないので自由に選んでよい。界磁鉄心の形状は突極形とし、永久磁石の配置は表面張り付け型または内部埋込型のいずれでもよい。界磁巻線は両界磁をくるむように巻く。

試作機は3相、2極、90Lフレームを使用した。図2に示すように回転子は、巻線鉄心・永久磁石鉄心・巻線鉄心の順に3分割した。図(a)および図(c)ではそれぞれ巻線界磁の半径方向から見たもの、および永久磁石界磁を半径方向から見たものを示す。図(b)は回転子を横方向から見た断面図である。試作機では制動巻線を設けず、永久磁石界磁鉄心と巻線界磁鉄心の割合を、1対2とした。

(2) 解析モデルとその効率計算

図3は有限要素解析で利用する回転子の3次元解析モデルである。同図の外側は固定子鉄心で内側には回転子鉄心と回転軸を示す。有限要素法で利用する解析モデルは回転子中央で2分割した1/2モデルを使用した。解析条件は回転子を3600min⁻¹で回転させ、界磁巻線に0.6Aを流した。固定子には電機子抵抗および負荷抵抗を合わせて33Ωを接続した回路とした。解析では機械角3度、120ステップで計算を行った。図4は回転子横断面の磁束密度ベクトルを示す。永久磁石

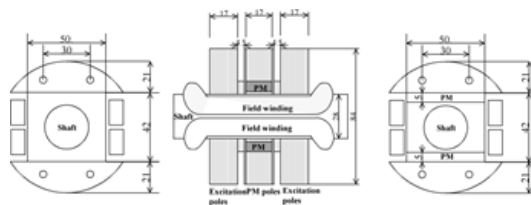


図2 試作機の回転子断面図

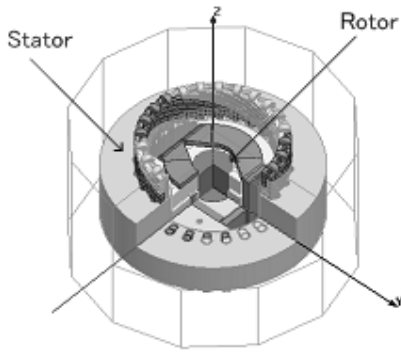


図3 解析モデル

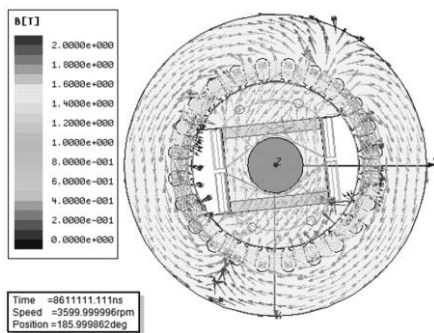
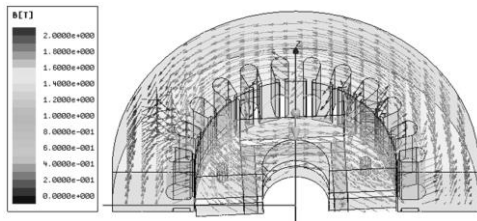
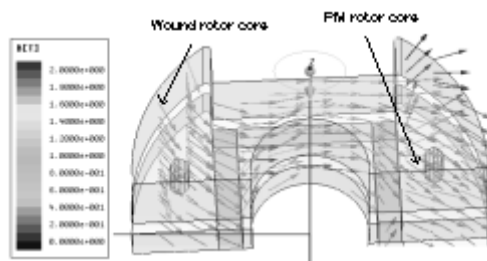


図4 磁束ベクトルの例

鉄心と巻線界磁鉄心の間にはギャップがあるため、両鉄心間では独立回路を形成していると考えられる。効率は有限要素解析で得られる軸トルクの平均値および各相の電力の合計したものから計算した。機械損を除いた理論的な効率は96.7%であった。

(3) 実験

実験装置は供試機とトルク検出器 (Onosokki TH-5100) および駆動機 (Hitachi 3.7kWPM モータ) がカップリングを通して直結されている。表1および表2に供試機および回転子磁石の諸元を示す。固定子の内径および外径はそれぞれ85mm, 157mmで、回転子の外径は84mmである。電機子巻線は5/6短節巻, 2層重ね巻である。永久磁石はSmCo磁石 (TS-24H) を使用した。回転子の界磁巻線は集中巻1000ターンである。実験では、軸上にブラシとスリップリングを設け、巻線界磁に給電した。

図5は界磁電流 I_f を0.6A一定としたとき、電機子電流のU相電流に対する効率および出力の関係を示したものである。無負荷時における $V_{uv}=141V$ であり、出力464W時では端子電圧108V, 効率83%であった。小容量発電機は機械損の占める割合が中・大容量に比べて大きくなる傾向があるが、小容量試作発電機の効率としては十分な値である。有限要素解析結果と実測の機械損を用いて効率を算出した値は81%であり、ほぼ実測効率と一致する。

図6は有限要素解析による端子電圧波形と供試機による端子電圧波形を示す。解析および実測の波形を比較すると、リップルは含むがよく一致していることがわかる。

図7はサーモグラフィにおける発電機表面の温度分布を示す。同図より巻線界磁の永久磁石界磁を挿入して大きく発熱する部分はないことが判る。

表1 試作機の諸元

Stator		Rotor	
Number of phases	3	Number of phases	1
Number of poles	2	Number of poles	2
Inner diameter	85 mm	Air gap mm	0.5
Number of slots	24	Outer diameter mm	84
Length of stator	60 mm	Length of rotor mm	60
Series number	240	Series number	1000
Winding type	10/12 two layer	Winding type	Concentrated winding
Connection	Y		

表2 回転子磁石の諸元

Permanent Magnet	
PM material	Sm-Co
Residual flux density, Br T	0.94 - 1.02
Coercivity, bHc kA/m	597 - 756
BH max kJ/m ³	159 - 199

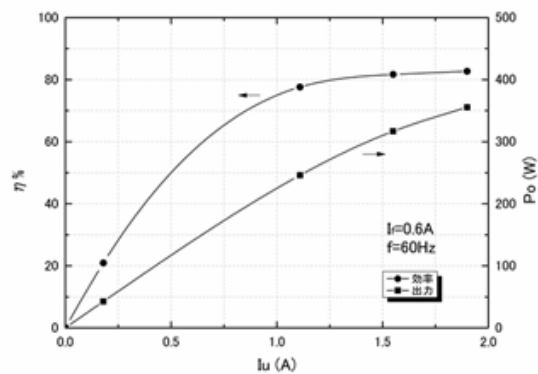


図5 効率と出力の特性

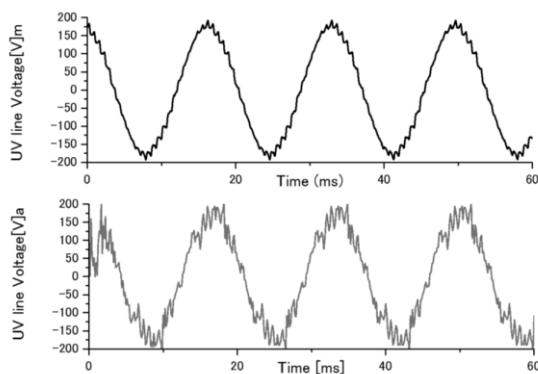


図6 解析波形と実測波形の比較



図7 発電機表面の温度分布

5. まとめ

3次元有限要素解析と試作機により回転子3分割型永久磁石内蔵の発電機の検討した結果は以下の通りである。

(1) 試作機2台の実寸値および材料値を用いて3次元有限要素解析モデルを構築した。

(2) モデルを利用して磁束密度ベクトル、磁束密度、鉄損、永久磁石表面損失を解析した。

(3) 実験装置を製作し端子電圧、電流、界磁電流、銅損、鉄損、効率などを測定し、解析結果の妥当性を検証した。

(4) 解析および試作機による効率を算出した結果、解析で得られた効率値と実測効率はほぼ一致し、解析の妥当性が明らかになった。

(5) 熱ストレスも重要な要素なるので、サーモグラフィを用いて熱分布状態を測定し、表面温度分布を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

(1) 直江伸至, 「巻線界磁に永久磁石を内蔵した発電機の開発」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 平成 24 年 9 月 13 日, 北海道

(2) 直江伸至, 「巻線界磁に永久磁石を内蔵した発電機の効率特性」2013 年電気設備学会全国大会, 平成 25 年 9 月 4 日, 大府

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況(計 0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

直江伸至 (NAOE NOBUYUKI)
金沢工業高等専門学校 電気電子工学科
教授

研究者番号：00249781

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：