

## 小規模水力発電に向けた表面磁石形パーニア発電機の開発

## - 試作機の出力特性 -

片岡康浩<sup>1</sup>, 須知成光<sup>2</sup>, 藤本善宣<sup>3</sup>, 佐々木真吾<sup>3</sup><sup>1</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科<sup>2</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科<sup>3</sup> 矢島小林工業株式会社

風力発電システムや水力発電システムには、高いエネルギー変換効率を有する発電装置が求められる。動力源となる風車や水車は低速で回転するが発電機は低速回転において発電効率が低下するため、従来の発電システムでは増速機を使用して発電機を高速回転させている。しかし、増速機を使用することにより機械損による発電効率の低下やメンテナンス性の低下、装置の体積や重量の増加という問題が発生する。パーニア発電機には磁気変調構造が内蔵されるため、回転子の速度に対して電機子巻線に鎖交する磁束の変化は増速され、容易に高速回転する回転磁界を得ることができる。本研究では、小規模水力発電での使用を想定して小形の表面磁石形パーニア発電機を開発した。発電機的设计目標は、回転数  $200\text{min}^{-1}$  において出力  $20\text{W}$  が得られることとした。実際に外径  $120\text{mm}$ 、全長  $172\text{mm}$  となる表面磁石形パーニア発電機を試作して、外部より駆動用モータを用いて発電機を回転させて出力を評価した。その結果、試作機が同期発電機として機能すること、回転数  $200\text{min}^{-1}$  の低速回転において最大出力は  $31.1\text{W}$  となり設計目標を十分に達成できることが確認された。

**キーワード:** パーニア発電機, 小規模水力発電, 低速回転, 出力

近年、再生可能エネルギーを利用した風力発電や水力発電が着目されている。大形の設備を使用した風力発電や水力発電は大きな電力を発電できるが、設置場所が制限されることや環境に与える影響が大きいなどの問題がある。これに対して、小規模な風力発電や水力発電は、電力消費地の近くに容易に設置できることや独立電源や非常用電源のような様々な用途に対応できるなどの利点がある。最近ではエネルギー源の多様化に対応するため、小形風力発電や小規模水力発電に関連する商品の開発が加速している。

小規模な風力発電や水力発電で使用される発電システムには、高いエネルギー変換効率が求められる。一般的な発電システムでは、風や水が有する力学的エネルギーを回転運動エネルギーに変換する風車や

水車、回転運動エネルギーを電力に変換するための発電機、電力変換装置などにより構成される。これらの中で、発電機は機械エネルギーを電気エネルギーに変換する主要な構成要素であり、高い発電効率が求められる。しかし、従来の発電機は低速回転において発電効率が低下するという問題があり、これを解消するために動力源である風車、水車と発電機の間には機械式増速機が設置されている。しかし、増速機では機械的な損失が発生するため発電効率が低下することやメンテナンス性の低下、装置の大形化、総重量の増加、騒音などの問題が発生する。このため、増速機を介することなく動力源と発電機を連結するダイレクトドライブ方式が開発され、低速回転で高い変換効率が得られる多極発電機が開発されているが、発電機の生産コストが高いなどの欠点

がある。

一方で、電機子の極数を増やすことなく低速回転で大トルクを得ることができる表面磁石形パーニアモータの研究がなされている。本研究では、表面磁石形パーニアモータを発電機として活用する。本発電機には磁気変調構造が内蔵され、回転子の回転速度に対して電機子に鎖交する磁束の変化が増速され、高速回転する回転磁界を容易に得ることができる。本研究では、小規模水力発電システムにおいてダイレクトドライブ方式を使用することを想定し、小形の表面磁石形パーニア発電機を開発する。目標とする発電機の仕様は、回転数  $200\text{min}^{-1}$  の低速回転において出力  $20\text{W}$  以上が得られることとする。本紙では、パーニア発電機を試作して、その出力を測定した結果を報告する。

### パーニア発電機の構成

#### 基本構成

図1にパーニア発電機の基本構成を示す。本発電機の固定子には全節巻の三相巻線が施されている。回転子には径方向に着磁された永久磁石が交互に施されている。固定子のスロット数を  $S$ 、回転子の極数を  $R$ 、電機子巻線の極数を  $P$  とすると、 $S$ 、 $R$ 、 $P$  の関係は、式(1)で表される。

$$S = \frac{R \pm P}{2} \dots\dots\dots(1)$$

永久磁石の起磁力は固定子の歯とスロットによるギャップパーミアンス脈動により変調され、電機子

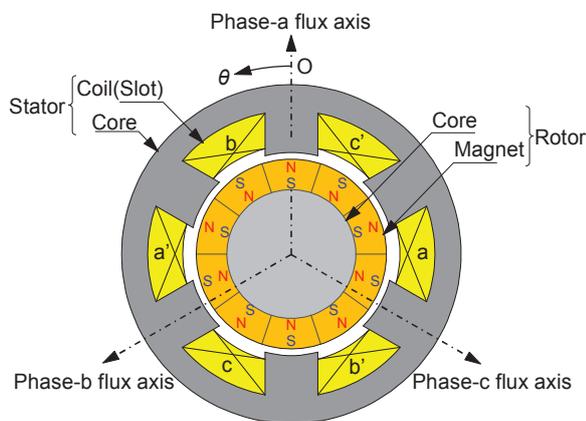


図1 パーニア発電機の基本構成(2極モデル)

巻線に鎖交する磁束、すなわち基本波成分が得られる。  $P$  極の発電機における同期速度  $N \text{ min}^{-1}$  は、出力の周波数を  $f$  としたとき式(2)で表される。同期速度  $N$  に対して出力の周波数  $f \text{ Hz}$  は  $R$  倍される。

$$N = \frac{120f}{P} \cdot \frac{P}{R} = \frac{120f}{R} \dots\dots\dots(2)$$

#### 試作機の仕様

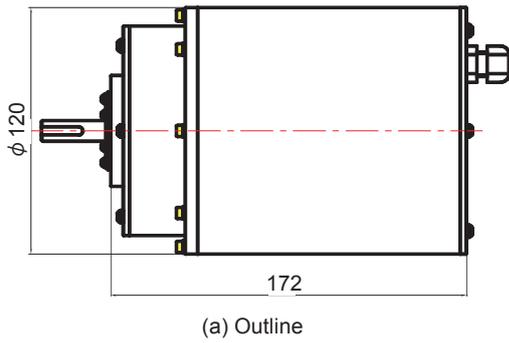
表1に試作機の仕様を、図2に外観を示す。本試作機において、固定子のスロット数  $S$  は18、回転子の永久磁石の極数  $R$  は30極、電機子巻線の極数  $P$  は6極とする。電機子巻線は全節巻の三相巻線とし、1相あたりの巻数は、288巻とする。永久磁石にはNdFeB磁石を使用する。発電機の外形は、アルミケースや前後のカバーを含め、外径  $\phi 120\text{mm}$ 、全長  $172\text{mm}$  である。

#### 評価方法

図3に評価装置の外観を、図4に発電機の測定ブロックを示す。パーニア発電機は、駆動用モータを用いて外部より回転させる。駆動用モータとパーニア発電機の間にはトルク測定器と回転計が設置されている。これにより、発電機に入力される運動エネルギーが測定される。パーニア発電機の出力は整流器に接続され、直流に変換される。本報告では、整流後の端子電圧と電流を測定して発電機の出力を測定する。

表1 試作機の仕様

Item		Spec.	
Number of slots	$S$	-	18
Number of rotor poles	$R$	-	30
Number of poles	$P$	-	6
Core	Length	$l_a$	mm 90
	Material	-	50A290
Armature winding	Turn per phase	$n$	Turn 288
	Resistance (75deg)	$r_a$	$\Omega$ 5.36
Magnet	Coercive force	$H_c$	kA/m 927
	Residual induction	$B_r$	T 1.44



(a) Outline



(b) Exterior

図2 試作機の外観

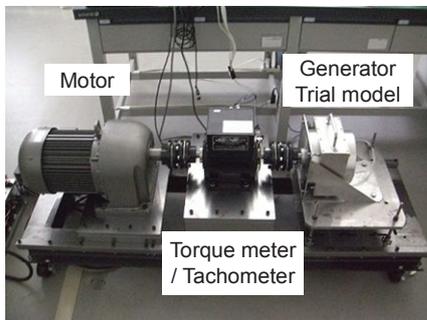


図3 評価装置の外観

評価結果

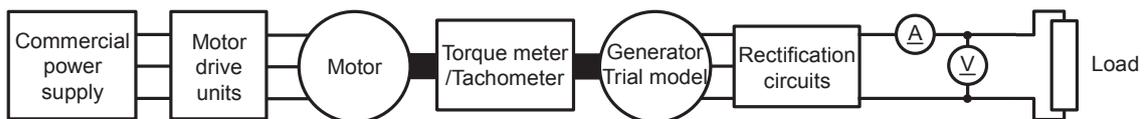


図4 測定ブロック

図5に回転数に対する無負荷時の端子電圧を示す。回転数 $200\text{min}^{-1}$ のとき, 無負荷時の端子電圧は $42.0\text{V}$ となる。次に, 発電機の回転数を $200\text{min}^{-1}$ で一定に保ちながら, 外部負荷を接続して発電機の出力を評価する。外部負荷は, 抵抗負荷とする。図6に外部負荷に対する発電機出力を示す。負荷抵抗が $10\Omega$ のとき, 最大出力 $31.1\text{W}$ が得られる。目標とする出力である $20\text{W}$ より大きな出力が得られている。図7に効率を示す。軽負荷時の効率は最大で $69.2\%$ が得

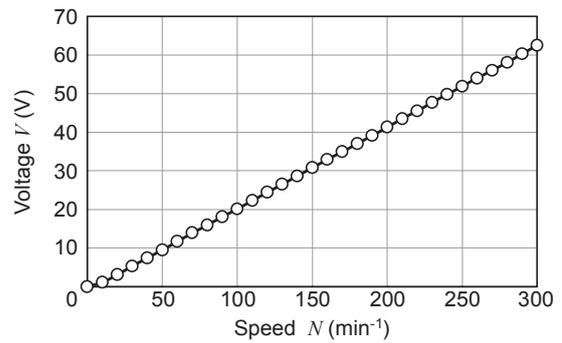


図5 回転数に対する無負荷時の端子電圧

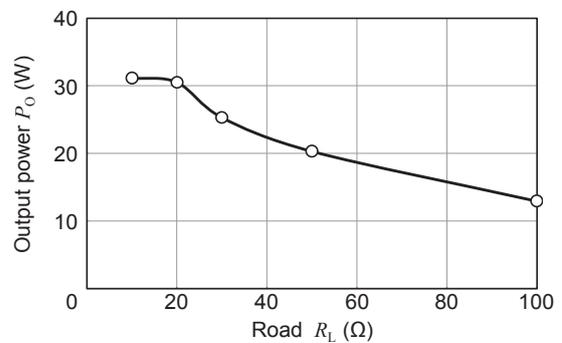


図6 外部負荷に対する出力(回転数:  $200\text{min}^{-1}$ )

られるが、最大出力時の効率は 46.5%に低下することが分かる。図 8 に外部負荷特性を示す。負荷抵抗を小さくすると端子電圧は低下し、電流は大きくなる。最大出力時の端子電圧は 18V、電流は 1.7A であり、12V 系の蓄電システムへの充電が可能である。

### まとめと今後の課題

本報告では、小形のバーニア発電機を試作して、出力を測定した。結果、回転数  $200\text{min}^{-1}$  の低速回転において最大出力 31.1W が得られ、目標仕様を十分に満足できること確認した。軽負荷時の発電機の効率は最大で 69.2%が得られるが、最大出力時の効率は 46.5%に低下するため、改良が必要である。

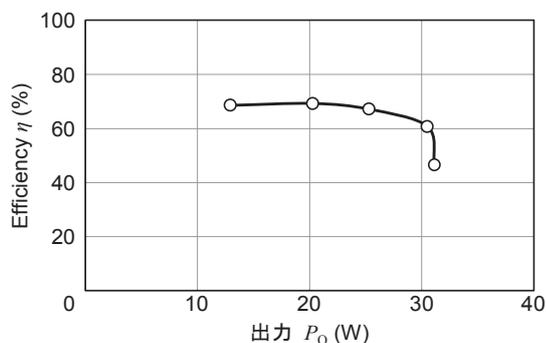


図 7 発電機効率(回転数:  $200\text{min}^{-1}$ )

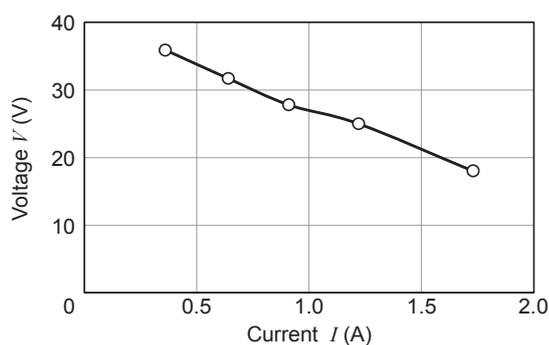


図 8 外部負荷特性(回転数:  $200\text{min}^{-1}$ )

本試作機は機能試作を目的としたものであり、最適設計になっていない。今後の課題は、固定子鉄心の形状の最適化および電機子巻線の占積率の向上などにより銅損を低減し、発電効率をさらに向上させることや発電機の小形化、生産性を考慮した設計などがある。

### 謝辞

本研究は、秋田県立大学 平成 26 年度産学連携共同研究の助成を受けたものです。本研究を進めるにあたり、秋田県立大学 地域連携・研究推進センター 石川直人氏、元矢島小林工業株式会社 畑澤忠好氏、本荘由利産学共同研究センター 今野忠重氏より、ご意見いただいています。ご協力に謝意を表します。

### 文献

- 高田康宏 (2012). 「小形風力発電機, 普及に向けた取り組みと市場動向」『日本風力エネルギー学会誌』36 (3) 342-346.
- 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編 (2014). 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 8 章 中小水力発電」第 2 版, 23-35.
- 西光優人 (2012). 「小水力発電の現状と課題」『日本電気設備学会誌』32 (4) 245-248.
- 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編 (2014). 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 3 章 風力発電」第 2 版, 48-50.
- 松島由太郎, 穴澤義久, 伊藤雄三, 磯崎弘毅 (1994). 「PM 形バーニアモータの一解析法」『電気学会論文誌D』114 (9) 925-926.

〔平成 28 年 7 月 20 日受付〕  
〔平成 28 年 7 月 31 日受理〕

## Development of Surface Permanent Magnet-type Vernier Generator for Small Hydroelectric Generation Systems

### Output Characteristics of Trial Model

Yasuhiro Kataoka<sup>1</sup>, Shigemitsu Shuchi<sup>2</sup>, Yoshinobu Fujimoto<sup>3</sup>, Shingo Sasaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Department of Electronics and Information System, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

<sup>2</sup> *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

<sup>3</sup> *Yashima Kobayashi Industry Co., Ltd.*

Highly efficient energy-conversion systems are required in wind-power and hydroelectric generation systems. A mechanical speed-increasing gear is installed in these common generation systems to avoid a decrease in generator efficiency at low speeds when the wind turbine or water turbine slowly rotate. However, the mechanical speed-increasing gear has problems, including friction losses, frequent maintenance, and a large system volume and weight. A vernier generator includes a magnetic modulation structure and can generate a magnetic field that rotates faster than the speed of the rotor. In this study, a small surface permanent magnet-type vernier generator for a small hydroelectric generation system was developed. The design objectives included a maximum output power of at least 20 W at a low speed of 200 min<sup>-1</sup>. A trial model with a diameter of 120 mm and length of 172 mm was fabricated, and its output was measured. The results show that the trial model works very well and that a maximum output power of 31.3 W can be obtained at a low speed of 200 min<sup>-1</sup>.

**Keywords:** vernier generator, small hydroelectric generation, low speed, output power