環境発電用エネルギー貯蔵・非接触給電システムの設計

Design of Energy Storage and Wireless Power Transmission System for Energy Harvesting

田代 晋久^{*1}(正員), 脇若 弘之^{*1}(正員), 丸野 将太郎^{*1}(学生員)

Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.), Shotaro MARUNO (Stu. Mem.)

This paper presents an energy storage and wireless power transmission system for energy harvesting. This system consists of sabonius windmill, rotating module and magnetic energy harvesting module. The sabonius windmill converts the wind energy to rotation energy of both the windmill and rotating module. The rotating module also can provide the power to the magnetic energy harvesting module with magnetic energy. From experimental results, the storage energy of the system, provided power to the load and energy losses in the system are considered. Compared with a DC generator, advantages of the system are discussed.

Keywords: energy storage device, energy harvesting, rotating module, magnetic energy harvesting module, constant loss.

1 緒言

我々の身の回りに存在する再生可能エネルギーを回収・利用する環境発電は、環境の変化によって発電量が大きく変動する特徴がある。また、太陽光発電など発電量が大きいものを除いて、得られる電力が $\mu\text{W} \sim \text{mW}$ となることも欠点として挙げられる。そのため、電力変動に対応したエネルギー貯蔵技術や、発電した電力を有効利用する周辺技術が重要である。風力・水力等の再生可能エネルギーは、運動（回転）エネルギーに変換し、発電機を直結することで磁気を介して電気エネルギーに変換される。同様に、エネルギー貯蔵技術には電気、磁気、運動エネルギーを用いる方法が良く知られている。代表的な実現例としてキャパシタ、SMES、フライホイールが挙げられる[1]。一方、環境発電用のエネルギー貯蔵技術には電気エネルギーとしてキャパシタに蓄える手法以外例を見ない。

著者らは環境発電用のエネルギー貯蔵技術の代替案として、エネルギー貯蔵と給電をシステムと考えた安価な装置の提案を行っている[2]。Fig. 1 にその概念図を示す[3]。エネルギー貯蔵には回転エネルギーを用いるが、高回転・大重量のフライホイールとは異なり kW 以上の電力をターゲットとしない。給電は磁気を介して電気に変換する発電機と同じだが、必要に応じて非接触で電気エネルギーに変換する。回転を磁気エネルギー

に変換する回転モジュール（発電機のロータ部）は円形磁石 2 個と歯車形状の磁性体のみで構成でき、回転軸としても利用できる。磁気を電気エネルギーに変換する磁界発電モジュール（発電機のステータ部）はコイルと磁束収束コアで構成する。両モジュールの距離を変えることで、供給する電力を調整できる。

発電機のロータは N 極 S 極交互の磁極により径方向磁界の大きな変動を発生する。一方、本装置の回転モジュールはそのどちらかの磁極の強弱による径方向磁界の比較的小さな変動を発生する [4]。磁界発電モジュールで得られる電力は磁束密度の変化量の 2 乗に比例するため、本システムで給電される電力も mW 程度を想定している。つまり、変動を含む再生可能エネルギーを、環境発電向けの応用に合わせた電力として安定に供給することを特徴の一つとしている。

本報告では、これまで行っていなかった再生可能エネルギーの回収・貯蔵・給電までをシステムとして初めて構築した例を示し、評価を通じてその優位性を示すことを目的とした。今回は風力を対象とし、サボニウス型風車を試作した。前報までに試作検討を行った回転モジュールを回転軸に接続し、磁界発電モジュールを用いて給電を行うシステムとした。比較対象として、DC モータを発電機としてサボニウス型風車軸に直結した場合の実験も行った。風速に対する回転数特性、回収（給電）電力特性の実測を通じ、本システムの優位性を考察した。また、サボニウス型風車を含むシステムとしての貯蔵エネルギーと損失エネルギーの推定を試みたので報告する。

連絡先: 田代 晋久, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電気電子工学科,
e-mail:tashiro@shinshu-u.ac.jp

^{*1} 信州大学

2 環境発電用エネルギー貯蔵装置の構成

Fig. 2 に製作した環境発電用エネルギー貯蔵装置の外観を示す。本装置はサボニウス型風車、回転モジュール、磁界発電モジュールの3つで構成した。

サボニウス型風車は、風力を回転エネルギーに変換する役割を担う。直径 230 mm、長さ 300 mm のサボニウス型風車を製作した。半円筒形の亚克力を2つ用いてバケットを構成した。パワー係数を高め、作動周速比の領域を拡大するため、バケット端板を上下に設けた[5]。回転モジュールと共通の回転軸となるように構成した。

回転モジュールは、回転エネルギーを磁気エネルギーに変換する役割を担う。回転モジュールは発電機における界磁であり、後述の磁界発電モジュールを近づけない限りエネルギー変換は行われない。Fig. 3 に今回製作した回転モジュールの外観図を示す。アクリルブロックに穴を開け、回転モジュールと磁界発電モジュールの位置決めを容易にした。回転モジュールの中心軸と磁界発電モジュールとの距離により給電電力の調整を行う。本報告では 0.1 mW オーダの給電を確認できた距離 25 mm を採用した[3]。Fig. 4 に使用した回転モジュールの形状を示す。表面磁束密度 460 mT のネオジム磁石2個を同極同士対向させる。S45C の歯車形状磁性材料を間に挟むことで、磁石の反発力が吸着力に変わる。歯車形状磁性材料の周囲には、径方向に磁界の強弱が生まれる。今回の形状では、中心軸から距離 25 mm における磁界の強弱の変動は、10 mT 程度となることを報告している[4]。

磁界発電モジュールは、磁気エネルギーを電気エネルギーに変換し、給電を行う役割を担う。Fig. 5 に使用した磁束収束コアの外観を示す。磁性巻心中央の長さ 5 mm、深さ 5 mm の狭窄部にコイルを巻いた。コイル寸法は長さ 5 mm、内径 10 mm、外径 20 mm、巻数 450 turn の Brooks コイル形状である[3]。実測されたインダクタンスは 21.42 mH、コイル抵抗は 12.57 Ω であった。コイルのリアクタンス成分が十分無視できる場合、最大電力供給の定理よりコイル抵抗 R (Ω) と同程度の負荷抵抗 R_L (Ω) に対し最大の電力 W (W) を供給できる。

$$W = V_{\text{out}}^2 / R_L = V_{\text{in}}^2 / 4R \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Fig. 1 Concept of energy storage device for energy harvesting.

Fig. 2 Appearance of energy storage device for energy harvesting (Unit:(mm)).

Fig. 3 Appearance of the jig to insert magnetic energy harvesting module (Unit:(mm)).

ここで、 V_{out} (V)は負荷抵抗の両端電圧、 V_{in} (V)はコイル両端の開放電圧として計測できる。

3 貯蔵・損失エネルギーの算出

3.1 貯蔵エネルギー

前報[6]と同様に、次式で示すフライホイールの貯蔵エネルギーの計算式[1]を用いて、エネルギー貯蔵装置の貯蔵エネルギー $P_{s(Calculated)}$ (J)を推定した。

$$P_{s(Calculated)} = 0.5J\omega^2 \quad (J) \quad (2)$$

ここで、 J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)はサボニウス型風車と回転モジュールを合わせた慣性モーメント、 ω (rad/s)は回転角速度である。 J を推定できれば任意の回転角速度 ω に対して $P_{s(Calculated)}$ を算出できる。

Fig. 6 に示す風速に対する回転数特性の概略図を用いて J の推定方法を説明する。一定の風速 v_a (m/s) により、回転角速度 ω_a (rad/s)で P_a (J)のエネルギー貯蔵が行えている平衡状態を考える。この状態から、 W (W)の一定電力をエネルギー貯蔵装置から外部へ供給する。その結果、回転角速度 ω_b (rad/s)で P_b (J)のエネルギー貯蔵が行える平衡状態に移行したと仮定する。貯蔵エネルギーの減少分 ΔP (J)は式(2)を用いて次式で定義できる。

$$\Delta P = P_a - P_b = 0.5J(\omega_a^2 - \omega_b^2) \quad (J) \quad (3)$$

回転数 r_a (rpm)、 r_b (rpm)を用いて変形すると次式を得る。

$$\Delta P = 0.5J \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \cdot (r_a^2 - r_b^2) \quad (J) \quad (4)$$

上式を変形すると、 J は次式で記述できる。

$$J = \Delta P / \left\{ 0.5 \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \cdot (r_a^2 - r_b^2) \right\} \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (5)$$

貯蔵エネルギーの減少分 ΔP (J)は1秒当たりの供給電力 W (W)から算出できる。例えば、内部抵抗 R の発電機に負荷抵抗 R_L を接続することで一定電力を取り出せる。エネルギー貯蔵装置から供給される電力 W の大部分は R と R_L で消費されると仮定できる。 W は R_L の両端電圧実測により算出できる。これより、1秒当たりの消費電力量、すなわち貯蔵エネルギーの減少分

Fig. 4 Size of rotating module (Unit:(mm)).

Fig. 5 Magnetic flux concentration core (Unit:(mm)).

Fig. 6 Relationship between number of rotations, wind velocity and energy loss.

ΔP (J)は $W \times 1$ (J)として算出できる。負荷抵抗接続の有無による回転数が r_a 、 r_b に対応し、実測できる。式(5)の右辺が求まるため、 J を算出できる。

3.2 損失エネルギー

磁界発電モジュールや発電機に負荷を接続しない場合、内部のコイルに電流は流れない。一方、磁性材料に磁界が鎖交すると、磁性体内部に発生する渦電流損や鉄損により損失エネルギーが発生する。磁界発電モジュールと発電機の有無による回転数変化の実測値

より、貯蔵エネルギーに対する損失エネルギーの割合 ε (%) を次式で定義し、評価を行った。

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{P_b}{P_a}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{\omega_b^2}{\omega_a^2}\right) \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

4 実験方法

4.1 風速に対する回転数特性

Fig. 7 に環境発電用エネルギー貯蔵装置による実験概略図を示す。風洞装置から風を発生させ、サボニウス型風車の回転数 r (rpm) をタコメータ (HIOKI, FT3405) で測定した。風速 v (m/s) は 5.2, 5.8, 6.1 m/s の 3 種類で行った。本装置の比較対象として、DC モータ (Portescap, 22V28213E201) を発電機として回転軸に直結した実験も行った。磁界発電素子あるいは発電機における負荷抵抗の有無、および両者が無い無負荷の 5 通りをパラメータとし、実験を行った。発電機の内部抵抗実測値は 11.9Ω であり、磁界回収モジュールのコイル抵抗と同程度であった。そのため、両者とも 12Ω の負荷を接続した。

4.2 風速に対する回収電力特性

前項と同じく、磁界発電モジュールあるいは発電機に接続した 12Ω の負荷 R_L に対する給電特性を測定した。風速 v (m/s) は 5.2, 5.8, 6.1 m/s の 3 種類で行った。磁界発電モジュールの負荷両端電圧 V_{out} は FFT アナライザ (小野測器, CF-930) で対応する周波数の電圧を測定した。発電機両端の負荷両端電圧 V_{out} はテスタ (FLUKE 187, および YOKOGAWA 73202) を用い、直流電圧を測定した。式(1)より回収電力 W を算出した。

4.3 貯蔵・損失エネルギーの算出

発電機を直結し、 12Ω の負荷 R_L の有無による回転数 r_a , r_b をタコメータで測定した。負荷両端電圧 V_{out} をテスタを用いて測定し、 ΔP を算出した。式(5)を用いて J を算出し、式(2)を用いて $P_{s(\text{Calculated})}$ を推定した。同様に、磁界発電モジュールと発電機の有無による回転数 r_a , r_b をタコメータで測定した。式(6)を用いて貯蔵エネルギーに対する損失エネルギーの割合 ε (%) を算出した。同様に、式(4)を用いて磁界発電モジュールと発電機の有無による 1 秒当たりの損失エネルギー ΔP (J) の算出を行った。

Fig. 7 Experimental setup.

Fig. 8 Measured number of rotations as a function of wind velocity.

5 実験結果

5.1 風速に対する回転数特性

Fig. 8 に風速に対する回転数特性の実測値を示す。丸、三角、四角のプロットはそれぞれ発電機 (DC motor), 磁界発電モジュール (Module), および両者を設置しない無負荷時 (No load) の実測値を示す。なお、負荷抵抗接続時は中抜きのマーカー、端子開放時は塗りつぶしのマーカーで記載した。回転数の実測値は 5 回測定した平均値を採用した。なお無負荷時における平均値を基準とした偏差の最大値を算出したところ、どの風速においても 0.27 % 以下となった。

発電機を回転軸に直結することで、負荷抵抗接続の有無によらず、無負荷時の回転数に対して顕著な回転数低下を確認した。端子開放時では 32.4 rpm、負荷接続時では 50.6 rpm の最大となる回転数低下が見られた。対応する風速はいずれも 6.1 m/s であった。

磁界発電モジュールを配置した場合、無負荷時と比較しても顕著な回転数低下は見られなかった。回転数低下の最大値は、端子開放時では 3.0 rpm、負荷抵抗接続時では 6.6 rpm の回転数低下にとどまった。対応する風速は 6.1 m/s と 5.2 m/s であった。電力供給を行わない場合でも、発電機では顕著な貯蔵エネルギーの減少につながる回転数低下となった。一方、磁界発電モジュールではその 1/10 以下となる回転数低下に収まった。

5.2 風速に対する回収電力特性

Fig. 9 に風速に対する回収電力特性を示す。回収電力の実測値は 5 回測定した平均値を採用した。今回検討した風速の範囲では、発電機において最大 20 mW の回収電力が得られた。一方、磁気エネルギー回収モジュールでは 0.1 mW 程度の安定した回収電力が得られた。どちらの場合でも、環境発電における再生可能エネルギーの変動に伴う供給電力の低減を緩和する、電力調整回路の役割を担えることを確認した。

発電機で給電電力を変更する場合、機械的損失を含むギアによる回転数変換を行う必要がある。一方、磁界発電モジュールの場合、中心軸からの距離を変更することで対応できる。参考として、距離が 16, 20, 35 mm の時の実測を行った所、風速によらず 0.7, 0.2, 0.01 mW 程度の回収電力が得られた。16 mm の距離に磁界発電モジュールを配置した場合、開放時でも 10 rpm 程度の回転数低下を確認した。距離を縮めると、磁界発電モジュールの磁束収束コアに鎖交する磁束が増加する。発電機の場合、ロータとステータ間の距離は可能な限り狭く設計されている。つまり、負荷抵抗を接続しない場合でも、磁束が磁性体に鎖交することで、1 秒当たりの損失エネルギー $\Delta P(J)$ つまり電力損失 $W_{Loss}(W)$ が発生していると考察した。

5.3 貯蔵・損失エネルギーの算出

一例として、風速 5.2 m/s 時の条件を用いて J を算出した。これまでの実験結果を用いて式(5)の右辺に代入すると、算出された J は $2.34 \times 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$ とな

Fig. 9 Harvested power as a function of wind velocity.

Fig. 10 Ratio of constant loss energy to storage energy as a function of wind velocity.

Fig. 11 Constant loss as a function of wind velocity.

った。風速 5.2, 5.8, 6.1 m/s に対する無負荷時の回転数の平均値は, 548, 588, 621 rpm であった。式(2)より, 対応する貯蔵エネルギー $P_{s(\text{Calculated})}$ は 0.38, 0.44, 0.49 J と算出された。

Fig. 10 に貯蔵エネルギーに対する損失エネルギーの割合 ε (%) を算出した結果を示す。発電機を直結するだけで, 貯蔵エネルギーの 10 % 程度が失われることを確認した。一方, 磁界発電モジュールを配置すると, 貯蔵エネルギーの 1 % 程度の損失であることが判明した。

Fig. 11 に端子開放時の磁界発電モジュールと発電機の有無による 1 秒当たりの損失エネルギー ΔP (J) の算出を行った。この値は, 前節の考察より磁束収束コア (磁性体) による電力損失 W_{Loss} (W) とも考えることができる。それぞれ 1 秒あたり損失エネルギーは最大で 5 mJ, 50 mJ, つまり 5 mW, 50 mW の電力損失に相当した。発電機と比較し, 磁界発電モジュールの損失は 1/10 以下であり, 環境発電用途への優位性を確認した。

6 結言

本報告では, 風力エネルギーの回収・貯蔵・給電までをシステムとして初めて構築した例を示し, 評価を通じて環境磁界発電用エネルギー貯蔵装置の優位性を示した。以下に得られた成果をまとめる。

- (1) 風速 5.2, 5.8, 6.1 m/s に対し, 548, 588, 621 rpm の回転数が得られた。対応する貯蔵エネルギーは 0.38, 0.44, 0.49 J と推定した。
- (2) 0.1 mW の電力を安定に給電できることが分かった。また, 回転モジュールとの距離により給電可能電力を調整できることも確認した。ギアによる回転数変換を必要とする発電機に比べ優位性があると結論付けた。
- (3) 発電機を直結した場合, 給電を行わない場合でも顕著な回転数低下を確認した。つまり微弱な風力が存在するのに, 風車が回らない状況を生み出す。本システムでは, 微弱な風力でも磁界発電モジュールの距離を調整することで, 見合ったエネルギー回収・貯蔵・給電を行う利用形態を提案できる。
- (4) 磁界発電モジュールに変動磁界が鎖交することによる損失エネルギーは, 貯蔵エネルギーに対して 1 % 程度, 発電機と比較し 1/10 以下の値であった。貯蔵エネルギーの有効利用の点で優位性を示した。

本システムの応用例の一つとして, 風力等の再生可能エネルギーの存在の有無を情報として把握するための無線センサネットワークが挙げられる。XBee 子機であれば 1 回の通信あたり 1.53 mJ であり [7], 本システムの貯蔵エネルギーで十分賄える。1 F のキャパシタを例に比較すると, 0.5 J のエネルギーに必要な電圧は 1 V 程度である。体積当たりのエネルギー密度では, 市販のキャパシタに現時点で遠く及ばない。一方, 発電機等で電力変換を行い, キャパシタへ蓄電し利用するような形態と比較すると, 本システムは回収可能なエネルギーを無駄なく利用できる点において優位性があると考えられる。

謝辞

本研究の一部は一般社団法人信州大学工学部若里会の補助を受けて行われた。風洞実験は, 信州大学工学部環境機能工学科飯尾昭一郎准教授の所有する装置を利用させていただいた。ここに感謝の意を表する。

(2014 年 3 月 14 日受付, 2014 年 9 月 25 日再受付)

参考文献

- [1] 吉田隆, エネルギーの貯蔵・輸送, エヌ・ティー・エス, p.73, 2008.
- [2] 田代晋久, エネルギー貯蔵装置, 特願 2011-236368.
- [3] 田代晋久, 脇若弘之, 丸野将太郎, 対向配置磁石型非接触エネルギー伝送装置の試作, 日本 AEM 学会誌, Vol.21, No.2, pp.203-208, 2013.
- [4] 丸野将太郎, 田代晋久, 脇若弘之, 対向配置磁石を用いた交流磁界発生装置用磁性材料形状の最適化, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-12-84, pp.17-20, 2012.
- [5] 牛山泉, 長井浩, 篠田仁吉, サボニウス風車の最適設計形状に関する研究, 日本機械学会論文集(B 編), 52 巻, 480 号, pp.2973-2982, 1986.
- [6] 丸野将太郎, 田代晋久, 脇若弘之, 環境発電用回転モジュールの貯蔵エネルギーの推定, マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-13-36/LD-13-40, pp.47-52, 2013.
- [7] 池上梓, 服部玄也, 島田翔一郎, 小嶋宏明, 田代晋久, 脇若弘之, 環境磁界発電を用いた XBee による無線通信の検討, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演概要集, 21Bp10, pp. 120-123, 2014.