

磁歪式振動発電スイッチを用いた電池フリーリモコンの実用化に関する研究

Study on Battery Free Remote Controller Using Magnetostrictive-Vibrational Power Generation Switch

八田 茂之^{*1}, 上野 敏幸^{*2} (正員), 山田 外史^{*2} (正員)

Shigeyuki HATTA, Toshiyuki UENO (Mem.), Sotoshi YAMADA (Mem.)

This research aims at realization of a battery free remote controller by switch type magnetostrictive-power generator using an iron-gallium alloy (Galfenol). The principle of power generation is based on parallel beam structure of Galfenol plate and yoke, by which input mechanical energy by pushing button is converted to electrical energy via free vibration. Our proposing controller consists of the generator, power conversion circuit (rectifier and capacitor), DC-DC converter and wireless module. In order to maximize the energy at the capacitor, the conversion circuit should be designed by considering equivalent model of the generator, coupling of mechanical and electrical circuit. We identified the parameters of the model by measurements of displacement and vibration, which the parameters were used to design the conversion circuit by LTSPICE, conventional circuit simulator. The combinations of capacitors in rectifier circuit providing the maximum energy at simulation and experiment were coincident, which verifies the validity of our design method. The operating condition of converter and module was investigated and twice of switch operation of combined system could send wireless sensor signal.

Keywords: Vibrational power generation switch, Iron-gallium alloy, Inverse magnetostrictive effect, Remote controller.

1 緒言

我々の身のまわりには、リモコンで操作する機器が多く存在する。リモコンは電池で動作し、電池は消耗するたびに交換しなければならない。以上の背景から、ボタンを押す動作で発電し、これを電源とした電池フリーリモコンの実用化が期待されている。我々は、磁歪材料 ($\text{Fe}_{81.4}\text{Ga}_{18.6}$, Galfenol[1,2]) を用いた振動発電技術を研究している[3]。この技術により電池フリーリモコンを実現させるのが本研究の目的である。このリモコンは、ボタンを押す動作で発電を行う発電スイッチと、発生した電力を整流、コンデンサに蓄電する電力変換回路、および信号を送信する無線モジュールで構成される。信号送信のためモジュールは、おおよそ 0.15 mJ の電気エネルギーを必要とする。1回の操作でこれを行うには、発電スイッチの高出力化、および変換回路の高効率化が必要で、このため以下の研究を行った。まずスイッチの変換効率の向上を図った。次にスイッチの等価回路を考慮した整流・蓄電回路において最適なコンデンサの組み合わせを導出した。最後に、無線モジュールが動作する条件を調べ、システムを構成、信号送信の可否を検証した。本論文では、これらの結果について報告する。

2 発電スイッチ

Fig. 1 に発電スイッチの構造を示す。スイッチは、発電部と操作部で構成される。発電部は、コイルを巻いた板状の磁歪素子 (Galfenol) とヨークの平行梁で、その両端に可動部と固定部が付いた構造である。操作部は片持ち梁で、先端には発電部に吸脱着する永久磁石 (脱着用磁石)、またボタンがついており、ボタンに鉛直方向に力が作用する。スイッチは、これを 2 組平行に並べ、その間に素子にバイアス磁束を付与する永久磁石 (バイアス磁石) を挟み、スペーサ (Al) と連結板を介し接着することで完成する。

発電の原理を説明する。バイアス磁石により、磁歪素子には予め適度な磁束が通っている。また Fig. 2(a) のように、発電部は脱着用磁石の吸引力で操作部に吸着している。ここでボタンを押すと、発電部は操作部と共に湾曲する。力を更に増加し、これと発電部の復元力の合力が吸着力を越えると、Fig. 2(b) のよう操作部が脱着し、外力が過渡的に零になることで発電部は自由振動する。この振動時、平行梁の効果で、素子には軸方向に圧縮と引張りの力が交番状に作用し、逆磁歪効果により磁束が変化する。この磁束の時間変化に比例しコイルに起電力が発生する。

試作したスイッチの評価結果を述べる。サイズは、既存のリモコンに搭載することを考慮し $6 \times 13.7 \times 80 \text{ mm}^3$ と小型にした。磁歪素子の寸法は $2 \times 0.5 \times 22 \text{ mm}^3$

連絡先: 上野 敏幸, 〒920-1192 石川県金沢市角間町
e-mail: ueno@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

^{*1} 北陸電気工事株式会社 ^{*2} 金沢大学

で、コイルは線径 0.05 mm, 1872 巻, 層厚 0.5 mm (113 Ω), ヨークの材質は SUS430, バイアス磁石には 3×2×2 mm³ のネオジウム磁石 8 個を用いた。Fig.3 にスイッチの開放電圧と発電部先端の変位の時間応答を示す。この時の押し込み力は 3 N, ストロークは 1.1 mm で、最大電圧 10 V, およそ 0.12 s 振動が持続し、変換効率 (= 整合抵抗でのジュール損の時間積分 / {力×ストローク/2}) は 24.5 %であった。従来のスイッチ[4,5]においては、発電部のヨーク, 操作部, 固定部が別々の部品で、これらを接着剤やボルトで組み上げていたのに対し、これらを一体の部品で形成したことで、機械損が減少、振動が持続する。また共振周波数を高めるため可動部をテーパ状にするなどで変換効率を向上させている。

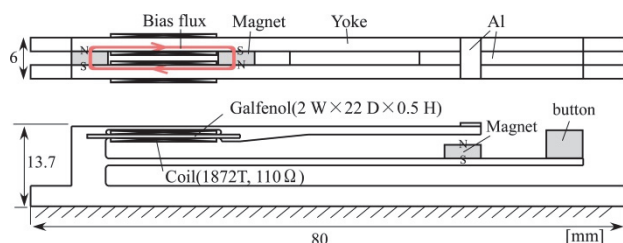


Fig. 1 Configuration of switch type power generator.

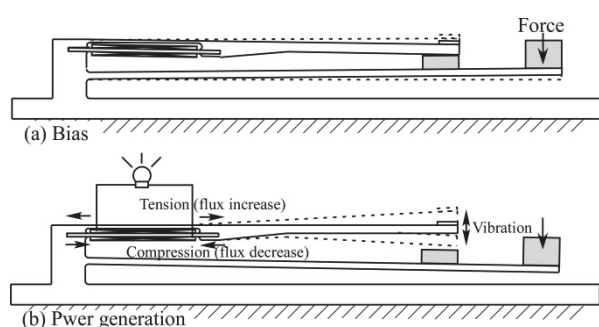


Fig.2 Principle, bias (a) and power generation (b).

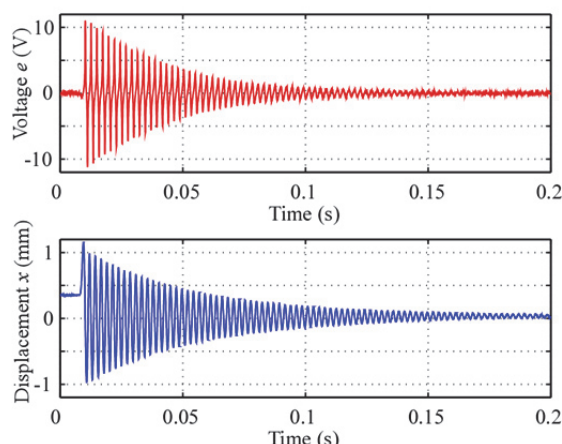


Fig. 3 Time response of open voltage (top), displacement of tip of switch (bottom).

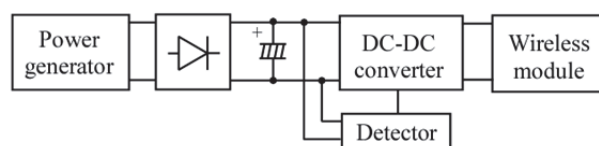


Fig. 4 Configuration of battery free remote control.

3 整流・蓄電回路

3.1 発電スイッチの等価回路

電池フリーリモコンの構成は Fig. 4 のようになる。スイッチで発生した交流電力を整流し、コンデンサに蓄電する。これから DC-DC コンバータを介し、一定電圧を無線モジュールに供給することで電波が送信される。以上の回路設計や動作の把握においては、スイッチの等価回路が必要になる。

スイッチの等価回路は機械系と電気系が変換部を介し結合した Fig. 5 の形で表される。振動発電の場合、機械系に加振力 F が作用することで振動速度 V が発生する。同時に変換部を介し電気系に αV の起電力が発生する。 α は力係数である。この起電力で回路に電流 I が流れると変換部を介し、機械系に制動力 αI が作用する。逆に、電気系に電圧 E を印加すると I が流れ、機械系には力 αI が作用し、 V が発生する。以上の連成した動作は、式(1), (2)で表される[6]。

$$F = -\alpha I + Z_M V \quad (1)$$

$$E = Z_E I + \alpha V \quad (2)$$

Z_M と Z_E は、それぞれ機械インピーダンスと電気インピーダンスである。自由振動においては、主に一次の共振周波数 ω の振動が励振されるため、機械系は 1 自由度のバネ-質量-減衰系と仮定し、 Z_M は次式で与えられる。

$$Z_M = c + j\omega m + \frac{k}{j\omega} \quad (3)$$

ここで k はバネ定数, m は等価質量, c は減衰係数である。一方、電気インピーダンス Z_E は巻線抵抗 R とインダクタンス L で次式のように表される。

$$Z_E = R + j\omega L \quad (4)$$

以上、回路設計においては、 m, k, c, L, R, α のパラメータの同定が必要である。この同定には、発電スイッチの振動・変位を計測する方法とインピーダンスを計測する方法[7]があるが、本論文では前者の方法について述べる。式(1)の外力 $F=0$ とし、 V を式(2)に代入、消去することで、式(5)が得られる。

$$E = \left(Z_E + \frac{\alpha^2}{Z_M} \right) I \quad (5)$$

これは Fig. 6 の回路になり、 L, R は機械系を拘束した (変位を零) ときの制動インピーダンスを測定することで求められる。また k は、発電部先端に外力を加え、その点の変位 x を測定することでフックの法則 ($F=kx$) で求められる。 m と c は、電気系を開放し、自由振動の変位の時間応答にて求められる。具体的には、 m は共振周波数の式より逆算し、減衰 c は減衰波形の振幅比から算出する。 α は、式(1)において $V=0$ とすると、式(6)になり、つまりコイルに電流 I を流し x を測定し、 x/I に k を乗ずることで算出できる。

$$\alpha = \frac{F}{I} = k \frac{x}{I} \quad (6)$$

測定結果について述べる。バイスで発電部の変形を拘束 ($V=0$) し、LCR メータ (ZM2372, NF 回路) を用い 1~1000 Hz の周波数範囲でのインピーダンスを測定し R, L を同定した。また機械系のパラメータにおいては、スイッチを押し、自由振動させたときの x の時間応答 (Fig. 3) より共振周波数 f と c を算出した。また k については、Fig. 7 の装置にて、脱着用磁石の影響が小さくなるよう操作部を発電部から離し、ロードセル (LVS-A1KA, 共和電業) で先端を押し、その力 F とレーザ変位計 (LC2440, キーエンス) による変位 x の測定から求めた。そして f, k から m を逆算した。 α については、発振器 (WF1943, NF 回路) と電流アンプ (BWS120-2.5, 高砂製作所) でコイルにゆっくりとした正弦波電流 I を流し、 x を測定することで、式(6)で算出した。

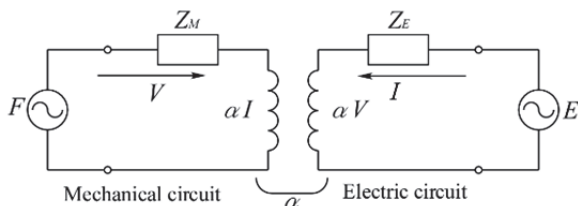


Fig. 5 Equivalent circuit of transducer.

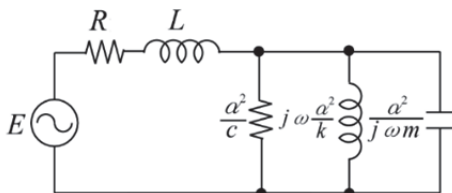


Fig. 6 Equivalent circuit of generator in case of $F=0$.

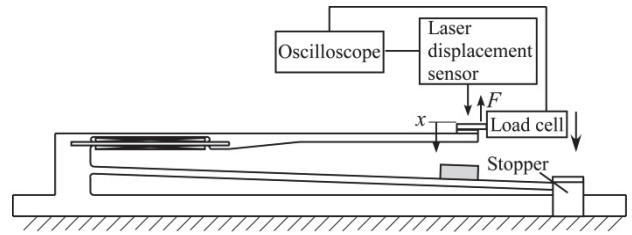


Fig. 7 Measurement apparatus of spring constant.

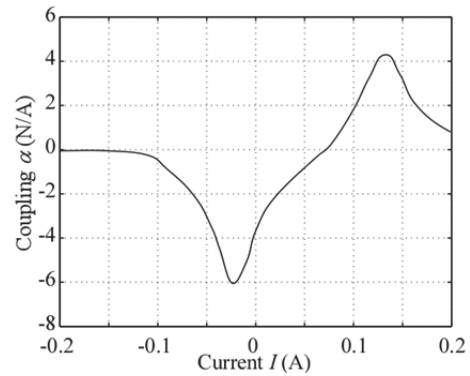


Fig. 8 Relationship between I and α .

Table 1 Result of parameter.

f_0 [Hz]	R [Ω]	L [mH]	m [kg]	k [N/m]	c [Ns/m]	α [N/A]
422	224	29.1	0.62×10^{-3}	4370	0.029	3.7

ここで α の測定結果を Fig. 8 に示す。 α は I に依存し変化するが、発電時の電流は ± 15 mA と小さく、よって α を一定と見なし、0 A 近傍の値を採用した。以上、同定した R, L, c, m, k, α の値を Table 1 に示す。

シミュレーションと実験の開放電圧の波形を比較した。回路シミュレータは LTspice (フリーソフト、リニアテクノロジー社) を使用した。Fig. 9 に回路図を示す。左側が機械系、右側が電気系の等価回路で、中央が変換部である。計算においては、実測した $F=4.8$ N のステップ入力を与えた。Fig. 10 に時間応答比較結果を示す。実験波形の逆算で求めたので当然ではあるが、実験値とシミュレーションの振幅、周波数、減衰は同じとなった。ただし実験の波形はひずみ波で、計算の正弦波と異なる。ひずみ波になる主な理由は、逆磁歪効果の上限、つまり磁束変化の飽和と、 α の非線形性が原因である。

3.2 整流・蓄電回路の設計

等価回路と合わせ整流・蓄電回路の設計を行った。整流回路においては Fig. 11 に示す半波倍電圧整流回

路を用いた。これは交流電圧 E_{in} が負の場合に、コンデンサ C_1 に蓄電される。そして E_{in} が正の場合に、コンデンサ C_2 においては、 C_1 の電圧が加わることで、 E_{in} の 2 倍の電圧 E_o を取り出すことができる。微小な電力を扱う場合、ダイオードの順方向電圧降下 (V_f 損失) が無視できない。一般的な全波整流回路でなく、倍電圧回路を用いた理由は、同じ出力電圧に対するダイオードの V_f 損失の割合を小さくできる点で有利と考えたからである。

コンデンサの容量 C_1 , C_2 をパラメータとした C_2 の蓄電エネルギーをシミュレーションにより計算した。これを実験と比較することで等価回路を考慮した回路設計とそのシミュレーションの妥当性を検証した。ダイオードはショットキーダイオード (1S4), C_1 は両極性の電圧に対応できるセラミックコンデンサ (村田製作所製), C_2 は電解コンデンサ (ルビコン製) を使用した。 C_1 の容量は、スイッチの L と共振現象が発生することで効率が高くなると考え、 $0.1 \sim 10 \mu\text{F}$ の範囲を探索した。また C_2 は無線送信に必要なエネルギーを 0.5 mJ と設定し、 $1 \sim 470 \mu\text{F}$ の範囲で設定した。エネルギーは $(1/2)C_2E_o^2 [\text{J}]$ で算出した。

シミュレーションと実験の結果を、それぞれ Fig. 12 と 13 に示す。容量によるエネルギーの傾向はほぼ同様に、 C_2 が $10 \mu\text{F}$ 付近で最大となり、これは共振条件に関係していると思われる。最大値は、実験では $C_1 = 1 \mu\text{F}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$ の組み合わせで 0.26 mJ , シミュレーションでは $C_1 = 2 \mu\text{F}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$ で 0.3 mJ であった。 C_1 について、大小関係は異なるが C_1 が $1 \sim 4.7 \mu\text{F}$ においてエネルギーの差は 0.02 mJ ほどしかなく、つまり変換効率への影響は小さい。以上、スイッチの等価回路を考慮したシミュレーションが、実験を模擬でき、つまり、これを含めた回路設計が有効で、最大エネルギーを取り出すスイッチの仕様や回路素子の組み合わせなどが計算で探索できる。シミュレーション精度の向上には、先に述べた α の非線形や磁束飽和の考慮が必要である。

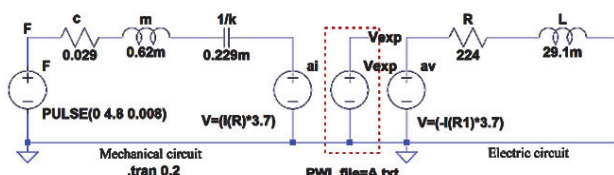


Fig. 9 Circuit model of simulator.

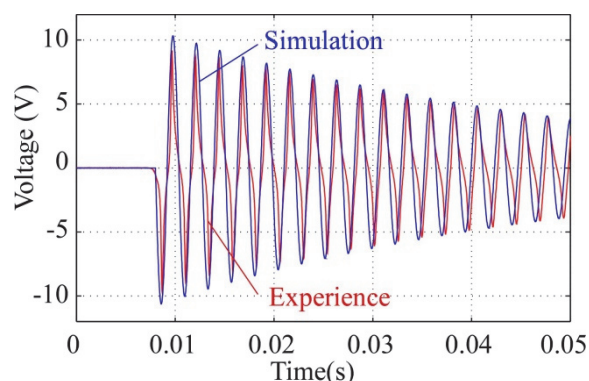


Fig. 10 Comparison of time response open voltage.

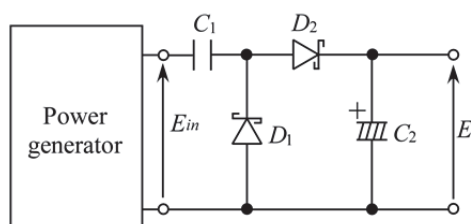


Fig. 11 Half-wave voltage doubler.

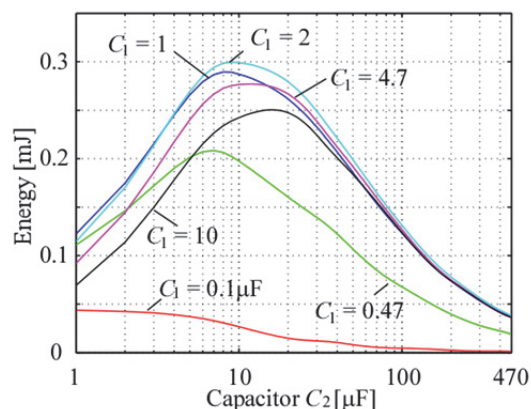


Fig. 12 Relation between C_1 , C_2 and energy (Sim.).

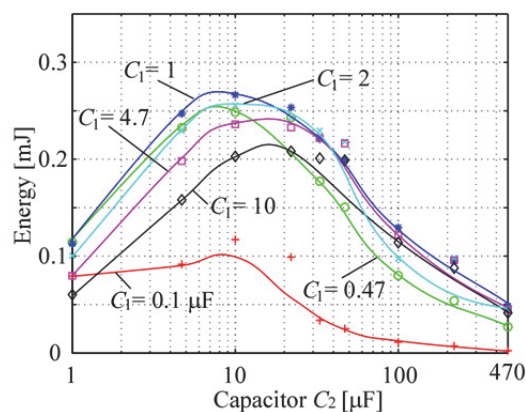


Fig. 13 Relation between C_1 , C_2 and energy (Exp.).

4 リモコンの動作検証

4.1 無線システム

無線システムについて説明する。これは Fig. 14 に示すように DC-DC コンバータと無線送信モジュールで構成される。コンデンサの蓄電エネルギーのみで動作させるため、消費電力の低い IC とモジュールを選定した。コンバータについては、昇降圧 DC-DC コンバータ (TPS63000, テキサス・インスツルメンツ製) を用いた。入力電圧は 1.8~5.5 V, 出力電圧は 3.3 V である。またモジュールには TESSERA 社の製品を用いた。このモジュールの入力電圧は 2.2~3.3 V, 温度と 3 軸加速度センサが搭載されており、一回のセンサ信号の送信に約 0.15 mJ のエネルギーが必要である。この信号の受信の様子はパソコンにてモニターできる。

電池フリーリモコンにおいては、コンバータおよびモジュールの起動電力も、スイッチの発電ひいてはコンデンサの蓄電エネルギーで賄う。これらを組み合わせる前に、必要な条件を把握するため、Fig. 14, 15 に示すコンデンサの蓄電エネルギーによる無線システムの動作実験を行った。このため直流電源 (PMC18-1A, 菊水電子) で、コンデンサ C を充電し、その後、トグルスイッチ S をコンバータ側に入れ、システムに電力を供給した。このときの C の電圧 V_{in} とコンバータ出力の V_{out} を測定し、また送信の可否を受信側のパソコンで確認した。 C を 4.7, 10, 22, 33, 47 μF とし、 V_{in} をコンバータの入力上限値 5.5 V から 0.1 V ずつ下げていき、同様の測定を行うことで、システムの最低動作条件を求めた。

V_{in} と V_{out} の応答について、送信ができなかった $C = 10 \mu\text{F}$, $V_{in} = 5.5 \text{ V}$ の場合を Fig. 16 に、送信ができた $C = 47 \mu\text{F}$, $V_{in} = 4.6 \text{ V}$ の場合を Fig. 17 に示す。 $C = 10 \mu\text{F}$ では、コンデンサの蓄電エネルギーが小さく、コンバータは起動するが、無線モジュールに電力が供給されないことで送信が行えなかった。一方、 $C = 47 \mu\text{F}$ においては、エネルギーが十分で、コンバータからモジュールの動作に必要な 2.2~3.3 V の電圧が 5 ms 以上供給されることで信号送信が行えた。なお、この条件以下でも送信できる場合があったが、再現性に乏しかった。以上の結果、安定な動作のためには、コンデンサの容量が 47 μF , 電圧が 4.6 V, 約 0.5 mJ の蓄電エネルギーが必要であるとわかった。

4.2 電池フリーリモコンの動作検証

最後に Fig. 18 に示す発電スイッチ, 整流・蓄電回路,

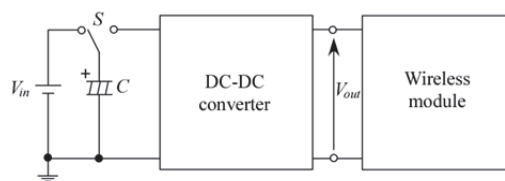


Fig. 14 Circuit to test operation of wireless transmitter.

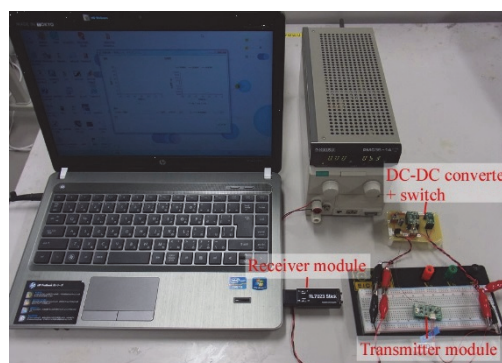


Fig. 15 Picture of experimental apparatus.

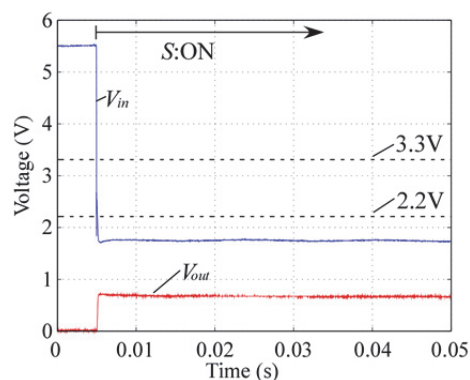


Fig. 16 Time response of V_{in} and V_{out} ($V_{in}=5.5\text{V}$, $C=10\mu\text{F}$).

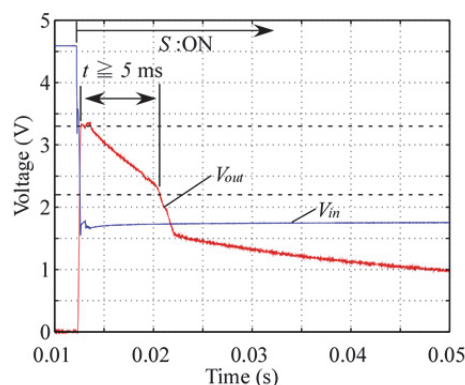


Fig. 17 Time response of V_{in} and V_{out} ($V_{in}=4.6\text{V}$, $C=47\mu\text{F}$).

無線システムを一体とした電池フリーリモコンの動作検証を行った。ここでは回路にトグルスイッチ S を配置し、発電スイッチの動作が完了した後に回路を切り替えシステムに電力を供給した (将来的にこれは自動

になる)。先の動作条件 $C_2=47\ \mu\text{F}$, $C_1=1\ \mu\text{F}$ では、スイッチ 1 回の操作で蓄電電圧は $3.6\ \text{V}$ で、最低条件の $4.6\ \text{V}$ を満たさなかった。そこで、スイッチを 2 度操作してからスイッチ S を ON にした。この一連の動作、2 度操作時の V_c 、およびスイッチ ON 後の V_c と V_{out} の時間応答をそれぞれ Fig. 19 と 20 に示す。2 度の操作で約 $5.5\ \text{V}$ ($0.7\ \text{mJ}$) 蓄電でき、その電力でコンバータが起動、 $3.3\ \text{V}$ を無線モジュールに供給できることで信号送信が行えた。現状、動作には 2 度の操作が必要で、発電スイッチの更なる高出力化、および整流・蓄電回路の高効率化が求められる。

5 結論

本論文では磁歪式発電スイッチを利用した電池フリーリモコンにおいて、スイッチ、整流・蓄電回路、無線システムの組み合わせによる動作検証を行った。

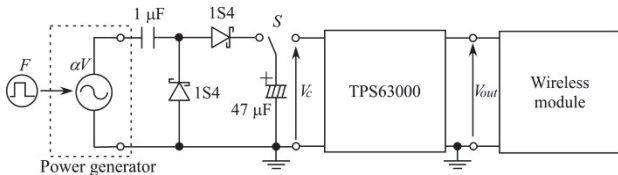


Fig. 18 Circuit of battery free remote control.

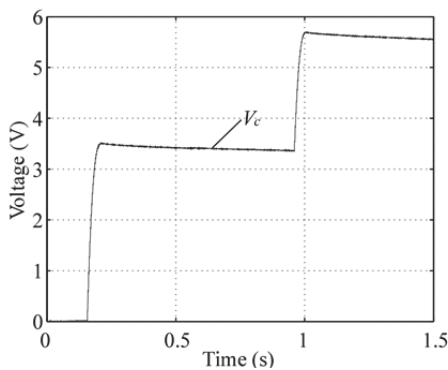


Fig. 19 Time response of V_c by twice operation.

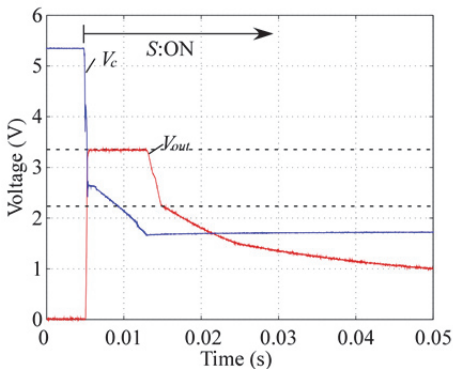


Fig. 20 Time response of V_c and V_{out} after switch S on.

現状、動作には 2 度の操作が必要で、このためスイッチにおいては発電部の構造や磁気回路の改良より高効率化を図る。これには汎用デバイスの開発で得られた知見[8]を活用する。実機への搭載においては、更なる小型化も必要であるが、デバイスの幅を広くすることで出力を確保する。また今回、スイッチの等価回路を考慮した回路設計の有効性を示した。今後はシミュレータも活用し、動作検証と最適な回路素子の選定を行う。コンバータにおいては入力電圧が高い降圧型も有用と思われ、高電圧が発生するようスイッチのコイルの仕様（巻き数、インピーダンス）を調整する。以上の改良により 1 度の動作による信号送信を実現し、電池のいらぬリモコンを実用化を目指す予定である。

謝辞

本研究は、平成 25 年度文部科学省科学研究費補助金基盤 B の研究補助を受けて行われた。

(2014 年 3 月 15 日受付, 2014 年 10 月 18 日再受付)

参考文献

- [1] A.E.Clark, M.Wun-Fogle, J.b.Restorff, “Magnetostrictive Properties of Body-Centered Cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al Alloy”, *IEEE, Trans.Mag.*, Vol.37, pp.3238-3240, 2000.
- [2] A.E.Clark, M.Wun-Fogle, J.b.Restorff, “Magnetostrictive Properties of Galfenol alloys under compressive stress”, *Materials Transaction*, Vol.43, pp.881-886, 2002.
- [3] 上野敏幸, 山田外史, 磁歪材料を用いた小型振動発電素子の特性評価, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, 1, pp. 168-173, 2012.
- [4] 上野敏幸, 山田外史, 無線スイッチのための磁歪式振動発電素子の性能改善, 第 23 回 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp. 381-384, 2011.
- [5] 八田茂之, 上野敏幸, 山田外史, 電池フリーリモコンのための磁歪振動発電機の高出力化, 第 21 回 MAGDA コンファレンス in 仙台 講演論文集, pp.461-464, 2012.
- [6] 北翔太, 上野敏幸, 山田外史, 磁歪式振動発電の電気機械結合係数および発電効率の向上, 電気学会研究会資料 MAG-13-085~094, pp.51-56, 2013.
- [7] 八田茂之, 上野敏幸, 山田外史, 磁歪式振動発電機の等価回路のモデル化とその応用, 電気関係学会北陸支部連合大会予稿集, CD-ROM, 2013.
- [8] 上野敏幸, 磁歪式振動発電技術の実用化に向けたデバイス改良, 第 26 回 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014.