

振動発電における循環電流制御回路を用いた電流補償の提案

正員 南 政孝* 学生員 近藤 小春*
正員 茂木 進一* 非会員 道平 雅一*

Current Compensation with Circulating Current Control Circuit in Vibration Generator

Masataka Minami*, Member, Koharu Kondo*, Student Member, Shin-ichi Motegi*, Member,
Masakazu Michihira*, Non-member

(2019年1月19日受付, 2019年3月26日再受付)

Energy harvesting methods such as vibration generators have attracted considerable attention. For proper utilization of the generated power, its performance needs to be improved. This study investigates a current compensation method with a circulating current control circuit for improving the output characteristics. As a result, the output power increases compared to that of conventional circuit due to current compensation. The validity of the proposed circuit is experimentally verified in this report.

キーワード: エナジーハーベスティング, 振動発電, 循環電流制御回路, 電流補償

Keywords: energy harvesting, vibration generator, circulating current control circuit, current compensation

1. はじめに

近年, 振動・光・熱などの身の回りに存在するエネルギーを電気エネルギーに変換するエナジーハーベスティングが注目を集めている⁽¹⁾。その中で本研究では, 圧電素子を用いて振動エネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電について注目している。振動発電は出力電力が小さいという欠点がある。そこで著者らは, LC共振を用いて出力電力を改善した⁽²⁾。しかしながら, 先行研究⁽²⁾に用いたインダクタの大きさや周波数変動に対する問題があった。そこで, インダクタをアクティブ素子により模擬する回路⁽³⁾を参考にし, 先行研究⁽²⁾のLC共振時に流れる循環電流を補償する回路を提案する。

本レターは, 文献(4)の続報であり, 提案する循環電流制御回路(以下, C3回路と略)によって振動発電に対する電流補償が可能であることを実機により実証する。さらにその結果, 出力電力が改善することを示す。また, 使用するインダクタの大きさが先行研究⁽²⁾と比較して, 約1/80倍に小型化可能であることを明らかにする。

2. 対象回路と提案手法

Fig. 1に対象とする回路を示す。Fig. 1(a)は従来回路であり, 振動発電に使用する圧電素子をダイオードブリッジ整流器を介して負荷に接続している。Fig. 1(a)の破線で囲んだ領

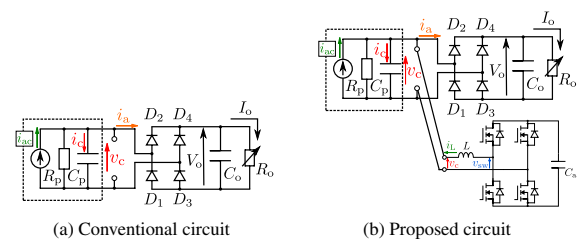


Fig. 1. Vibration generator system with proposed circuit.

域は圧電素子の等価回路であり, 交流電流源 $i_{ac} = \sqrt{2}I_p \sin \omega t$ および内部抵抗 R_p と内部容量 C_p により構成されている。先行研究において, 圧電素子に並列にインダクタを挿入し, 内部容量 C_p を等価的に減少させることにより出力電力が改善することを明らかにした⁽²⁾。詳細は割愛するが, 並列インダクタが内部容量 C_p と共振することで, 並列インダクタと内部容量 C_p を循環する電流が発生して, 内部容量 C_p を等価的に減少させることに起因した効果である。そこで本レターでは, Fig. 1(b)のように従来回路にC3回路を接続することを提案し, 圧電素子の内部容量 C_p とこの回路で電流を循環させて電流補償を実現することを目的とし, 圧電素子と並列に接続する。

次に, 提案手法について説明する。Fig. 1(b)のC3回路は電圧形インバータにインダクタが直列接続されている構成である。そして, Fig. 1(b)の出力電流(インダクタ電流 i_L)が内部容量 C_p に流れる電流 i_c となるように v_{sw} の指令値を定めるため, デッドビート制御⁽⁵⁾に基づく駆動を提

* 神戸市立工業高等専門学校 電気工学科
〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3
Kobe City College of Technology
8-3, Gakuenhigashi, Nishi-ku, Kobe, Hyogo 651-2194, Japan

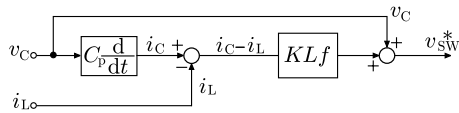


Fig. 2. Control block diagram.

Table 1. Parameters of Fig. 1 and control.

$I_p = 7.0 \text{ mA}$	$\omega = 2\pi \times 120 \text{ rad/s}$	$C_p = 1.06 \mu\text{F}$	$R_p = 2.8 \text{ k}\Omega$	$L = 10 \text{ mH}$
$C_0 = 22 \mu\text{F}$	$R_0 \text{ variability}$	$C_a = 10 \mu\text{F}$	$f = 100 \text{ kHz}$	$K = 0.5$

案する。インダクタ両端の電圧 (v_C と v_{SW}) とインダクタ電流 i_L に注目し、電流指令値が i_C のデッドビート制御を適用すると $i_C = i_L + (1/Lf)(v_{SW}^* - v_C)$ となる。ここで、 f はスイッチング周波数、 v_{SW}^* は電圧指令値とする。この式を v_{SW}^* について解くとともに、観測できない i_C を電圧値から $C_p dv_C/dt$ と置き換える。さらに、安定化ゲイン K を乗じることでシステムの安定性を向上できることが知られている⁽⁶⁾。そのため、本レターでは安定化ゲイン K を乗じる。値は文献(6)を参考にして、0.5 とする。Fig. 2 に $v_{SW}^* = KLf(C_p(dv_C/dt) - i_L) + v_C$ を基にした制御ブロック線図を示す。また、Table 1 にパラメータを示す。

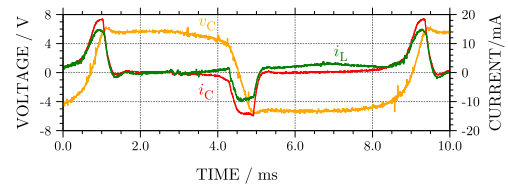
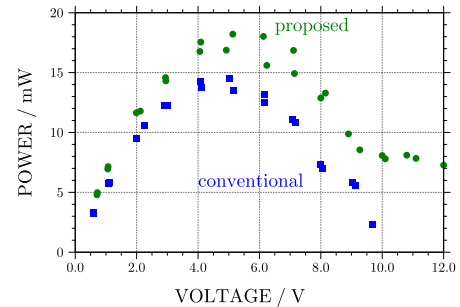
3. 実験結果

本章では、Fig. 1 の回路と Fig. 2 の制御を試作機により実現し、出力抵抗 R_0 を可変とした場合の電流補償と出力電力特性について調べる。

実験条件を述べる。振動発電に用いる圧電素子は、先行研究⁽²⁾と同じとする。整流器のダイオードは SBD 1SS108 (耐圧 30 V, 電流 15 mA) を使用する。提案する C3 回路を構成するスイッチング素子は、Si MOSFET (2SK4017 (Q), 耐圧 60 V, 電流 5 A), また、本レターではセンサ回路、制御回路、スイッチング素子の駆動回路などで消費される電力は考慮していない。そのため、本試作機ではこれらの損失電力が改善電力を上回っているが、パラメータ設計の最適化や応用先に合わせた規模に設定することで、全体の電力改善を見込んでいる。発電電力をこれらの回路駆動に含め、全体の電力改善は今後の課題である。

Fig. 3 に Fig. 1(a) に Fig. 1(b) の C3 回路を接続した試作機における内部容量電圧 v_C 、内部容量電流 $i_C = C_p dv_C/dt$ 、C3 回路からの電流 i_L を示す。なお負荷抵抗 R_0 は 1 k Ω である。圧電素子の内部容量電圧 v_C が正負に急峻に変化する際、内部容量電流 i_C が流れている。この電流 i_C を C3 回路からの電流 i_L が補償するために、 $0.5 < t < 1.0$ と $4.5 < t < 5.0$ 付近で同程度の電流が流れていることが確認できる。このことから、C3 回路の電流 i_L が圧電素子の内部容量に流れる電流 i_C を補償する回路動作が実験的に検証された。

次に、出力電力について検討する。Fig. 4 に従来回路および提案回路の P - V グラフを示す。全領域において、従来回路より提案回路の方が出力電力が僅かながら大きくなっている。この結果から、循環電流により電流を補償することで、内部容量が等価的に小さくなり出力電力が改善することが明らかになった。さらに先行研究⁽²⁾で使用した共振用

Fig. 3. Voltage and current waveforms in proposed circuit at $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$.Fig. 4. P - V characteristics in conventional and proposed circuits.

の並列インダクタは 816.3 mH であったことに対し、本実験では 10 mH を使用している[†]。そのため、約 1/80 倍まで小さくすることが可能である。以上より、提案する C3 回路が有効であると考えられる。

4. おわりに

本レターでは、C3 回路を用いて振動発電に使用する圧電素子の内部容量に電流を補償することを提案し、試作機により、実機検証を実施した。その結果、提案回路により電流補償を確認するとともに、出力電力が改善されることを明らかにした。さらに、 LC 共振により出力電力を改善する先行研究⁽²⁾と比較するとインダクタの値を大幅に小さくすることができた。

今後は、C3 回路を駆動する電力を含めた提案回路の有用性および実用化を検討する予定である。さらに、本提案の機能を含めたアクティブ整流器を今後提案する。

文 献

- (1) P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu: "Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications", 1st ed. Pan Stanford, ch. 1 (2015)
- (2) M. Minami, et al.: "Improvement in Output Power of Vibration Generators based on Piezoelectric Elements using Passive Devices", *IEEE IA*, Vol.137, No.12, pp.918-923 (2017) (in Japanese)
- (3) H. Funato and A. Kawamura: "Active-Passive Power Circuit", *IEEE IA*, Vol.113, No.5, pp.601-610 (1993) (in Japanese)
- (4) 阪部智城・南 政孝, 他: 「循環電流制御回路を用いた振動発電における出力電力改善に関する数値的検討」, 平 30 電全大, 4-161 (2018)
- (5) K.P. Gokhale, A. Kawamura, and R.G. Hof: "Dead Beat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal OutputWaveform Synthesis", *IEEE Trans. IE*, Vol.1A-23, No.5, pp.901-910 (1987)
- (6) T. Shibuya, J. Haruna, and J. Itoh: "An Evaluation of Stability for High Response Current Control Regarding Grid Connected Systems", SPC-11-013 (2011) (in Japanese)

[†] エネルギー蓄積要素としては、インダクタだけではなく C3 回路内のキャパシタも含まれる。このキャパシタは既に小型のフィルムキャパシタを使用しているため、体積および質量で支配的なインダクタのみを比較対象としている。