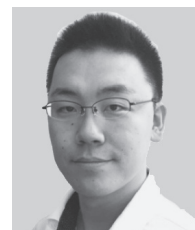


# エネルギーハーベスティング向け 電力変換回路

Power Conversion Circuits for Energy Harvesting



みなみ まさ たか  
南 政 孝\*

キーワード：微弱電力，低電圧，整流器，昇圧回路，降圧回路

## 1. はじめに

著者がエネルギーハーベスティングに興味をもったのは大学院生(2010年頃)のときである。当時、ダイエットも兼ねて、万歩計で毎日の歩数を記録していた(図-1)ことに加え、2006年と2008年にJR東日本東京駅八重洲北改札口で実証実験された発電床<sup>1)</sup>や2010年ノエビアスタジアム神戸での床発電<sup>2)</sup>を見聞きしたことがあいまって、エネルギーハーベスティング、特に、振動発電に興味をもった。そして、現所属(神戸市立工業高等専門学校)にて、機械工学科の教員から「ロボットに搭載しているバッテリーをなく(小さく)したいので、エネルギー回収(回生)ができないか?」と依頼を受け、そのロボットに搭載されている駆動力であるガソリンエンジンの振動に注目した振動発電に取り組んでいる<sup>3)~6)</sup>。

本稿では、著者が専門とするパワーエレクトロニクス(電力変換回路)の観点から、エネルギーハーベスティング向けの回路やICに関する内容をまとめる。エネルギーハーベスティング技術を実用化するための共通の課題として、「発電量を増大させる」「変換効率を上げる」が挙げられる。発電量を増大させるためには、エネルギーハーベスティング素子自体の開発や改良が求められる。また、変換効率には微弱エネルギーを様々な発電方式(物理現象)により電気エネルギーに変換する効率のほかに、得

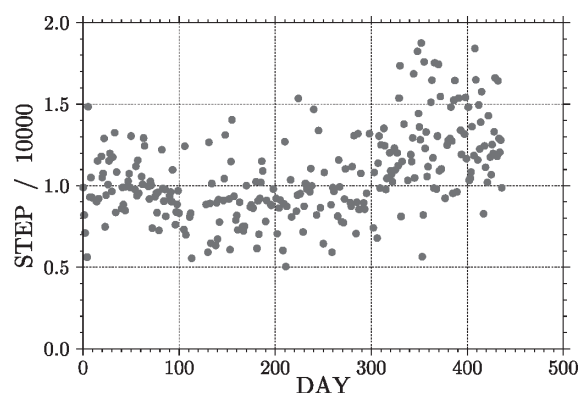


図-1 著者の歩数(2010年度)

られた電気エネルギーを応用先に必要な電圧値に変換する効率がある。本稿では、後者の微弱な電気エネルギー(微弱電力)を応用先に必要な電圧値に変換する電力変換回路について紹介する。

## 2. 電力変換回路の必要性和種類

エネルギーハーベスティング素子により発電した微弱電力を、応用先(例えば、センサ駆動、通信、照明などの駆動)に用いるためには、応用先に合わせた直流の一定な電圧値(例えば、1.8V, 3.3V, 5Vなど)に調整することが必要である。一方で、エネルギーハーベスティング素子により発電した微弱電力は、発電原理に伴って、交流微弱電力と直流微弱電力に大別される。

図-2にエネルギーハーベスティング素子から応用先までの回路構成をまとめた。微弱発電電力が交流の場合、整流器を介して直流に変換し、昇圧回路、降圧回路又は昇降圧回路により所望の直流電圧値に変換する必要がある。微弱発電電力が直流の場合は、昇圧回路、降圧回路又は昇降圧回路により所望の直流電圧値に変換する必要がある。次項では、それぞれの電力変換回路に対して、

\* 神戸市立工業高等専門学校電気工学科

1985年11月生まれ，大阪府出身。2013年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了，同年神戸市立工業高等専門学校電気工学科助教，2014年同校講師，2017年同校准教授，現在に至る。博士(工学)。主にパワーエレクトロニクスに関する研究・教育に従事。2017年電気学会産業応用部門優秀論文発表賞，パワーアカデミー萌芽研究優秀賞。

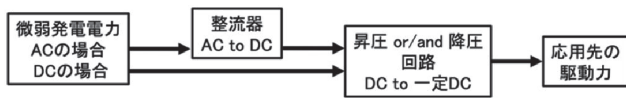


図-2 電力変換とその回路構成

3. (1)項 整流器, 3. (2)項 整流器と昇圧又は降圧回路, そして3. (3)項 昇圧回路に分けて紹介していく。

### 3. 種々の電力変換回路

#### (1) 様々な整流器

振動や流動などによる上下(又は左右)運動や風力などによる回転運動によって発電される微弱電力は、交流である。そのため、前述の図-2で示したとおり、整流器が必要不可欠である。エネルギーハーベスティング素子により得られる電力は微弱であるため、整流器自体を駆動する電力が不要なパッシブ素子(インダクタ, キャパシタ, ダイオードなど)のみで構成されることが多い<sup>3), 4), 7), 8)</sup>。一方で、例として図-3に示すLC共振による発電電力増強<sup>3), 4), 8)</sup>やアクティブ素子を用いた共振器を有する整流器など<sup>5), 6), 9)~12)</sup>も提案されている。

図-3の回路は、振動発電に適用するLC共振器付きのパッシブ整流器である。対象とする振動発電には圧電素子を想定しており、その等価回路は図-3左部に描写されたとおり、交流電流源 $i_p$ ・内部抵抗 $R_p$ ・内部容量 $C_p$ で構成される。この内部容量 $C_p$ を共振により相殺するために、圧電素子と並列にインダクタ $L_A$ と共振周波数調整用の補助キャパシタ $C_A$ を接続している。さらに、パッシブ整流器には一般的な全波整流器(ダイオードブリッジ)と倍電圧整流器(ダイオード二つとキャパシタ二つのブリッジ)を組み合わせた、電流波形改善型倍電圧整流器<sup>13)</sup>を適用している。LC共振とパッシブ整流器により圧電素子から最大50mWまでの電力を回収することに成功している<sup>4)</sup>。

次に、アクティブ素子を用いた研究開発を紹介する。Kwon氏らは、二つのアクティブ素子とインダクタ及び二つのダイオードで構成された整流器を提案<sup>9)</sup>し、Ramadass氏らは、インダクタを使ったBias-Flip整流器を開発した<sup>10)</sup>。Peters氏らは、パッシブ部とアクティブ部(アクティブダイオード)による2段階電力変換回路を提案している<sup>11)</sup>。さらに同期整流機能とLC共振を同時に達成したSSHI(Synchronized Switch Harvesting on Inductor)<sup>12)</sup>に関する研究開発も多く進められている<sup>14), 15)</sup>。LC共振を実現させるため、アクティブ素子により等価的に大きなインダクタに見せ

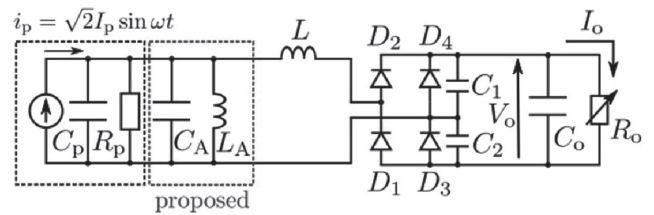


図-3 LC共振器とパッシブ整流器の回路構成<sup>4)</sup>

る回路を著者らは提案している<sup>5)</sup>。エネルギーハーベスティング素子(この場合は圧電素子)の端子間電圧をセンシングして、素子の内部容量に流れる電流を算出する。そして、その電流を生成するような制御系を組むことで、内部容量と回路とを循環する電流を流すことで擬似的にLC共振を実現させている。さらに、LC共振を実現させる回路と微弱電力を回収する整流器を一体化させた回路開発にも成功している<sup>6)</sup>。このアクティブ整流器により従来よりも多くの電力を回収している。しかしながら、アクティブ素子を用いる回路共通の課題としては、そのアクティブ素子自体のドライブに関わる電力やセンシングとコントローラ部分の電力を自給自足できなければならない。その課題に対して、3. (2)項と3. (3)項では、発電された微弱電力を回路駆動に賄う機構を備えた回路ICの例を幾つか紹介する。

#### (2) 整流器を介した昇圧又は降圧回路

3. (1)項では交流微小電力が得られるエネルギーハーベスティング素子に必要な整流器の取組みについて紹介した。ここでは、それらの整流器を介した後の昇圧、降圧又は昇降圧回路について述べるとともに、整流器と降圧回路が内蔵されたICに対して、一例を用いて詳細に紹介する。

整流器の後段に昇圧、降圧又は昇降圧回路を適用させている研究例を紹介する。Ottman氏らは、振動発電に整流器を介してその後に降圧回路を用いて最大電力追従制御を実現させ<sup>16)</sup>、更にこの回路に用いるセンサやドライブ回路の電力を振動発電にて得られた微弱電力を利用するシステム設計を実施している<sup>17)</sup>。Kong氏らは、後段の降圧回路に抵抗成分のインピーダンス整合を実現させる制御を搭載させている<sup>18)</sup>。Romani氏らは整流器と降圧回路をエネルギーハーベスティング素子と一対一対応をさせる回路トポロジーを提案している<sup>19)</sup>。

次に、図-4を用いて、整流器と降圧回路が内蔵されたICについて説明する。図-4はLinear Technology社が販売しているLTC3588-1のデータシート<sup>20)</sup>に記載されたブロック図に著者が外部素子を含めて説明用

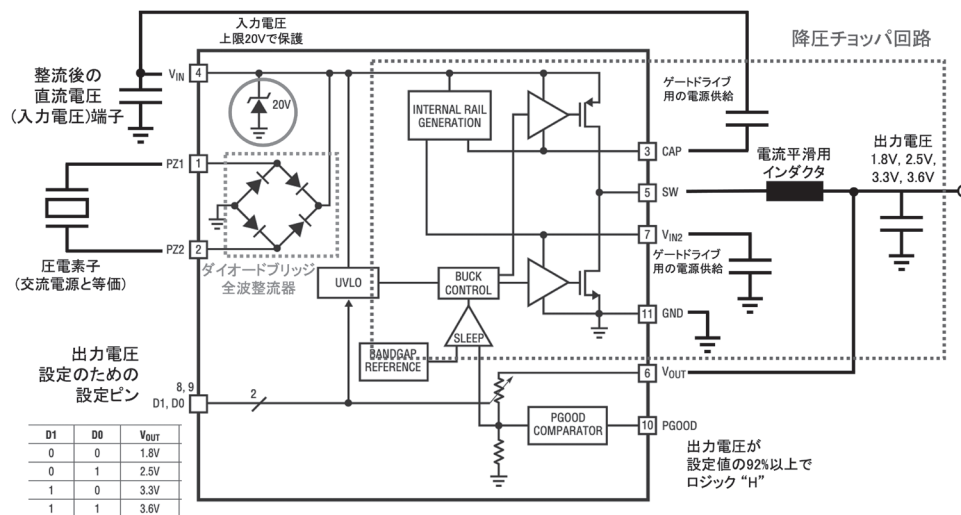


図-4 Linear Technology 社 LTC3588-1 のブロック図<sup>20)</sup>に著者が外部素子を含めて説明用に加筆

に加筆したものである。LTC3588-1 は 2010 年に発売され<sup>21)</sup>、現在でも圧電素子による振動発電用の電源 IC として代表されるものである。同年代(2010 年頃)には、国際的な企業である Linear Technology 社、Texas Instruments 社、STMicroelectronics 社、Analog Devices 社、Spansion 社などから続々と発売が開始されている<sup>22)</sup>。

図-4 の電力変換回路としての主回路は、ダイオードブリッジ全波整流器と(Buck converter と呼ばれる)降圧チョップパ回路である。降圧チョップパ回路の主要パッシブ素子(インダクタやキャパシタ)は外付けで、図中右側のインダクタとキャパシタが対応している。制御や保護回路部分としては、ツェナーダイオードによる入力電圧の制限・降圧チョップパ回路の定電圧制御・出力電圧の設定値確認ロジック出力が搭載されている。回路駆動の電力を自給自足するために、整流器出力後の電圧を直接利用する部分とアクティブ素子のゲートを駆動する電力用に利用する部分に分かれて構成されている。

電源回路 IC 単体だけではなく、電源回路 IC 搭載のモジュールも発売されている(例えば、digi-key<sup>23)</sup>など)ため、比較的容易に使用可能な電源回路 IC である。そのため、エネルギーハーベスティング導入には打って付けである。

### (3) 昇圧回路 IC

本項では、図-2 におけるエネルギーハーベスティング素子からの発電が直流であり、かつ、微小電圧の際に必要な昇圧回路について説明する。研究開発の動向や発売されている電源 IC などを紹介していく。

研究開発の動向を紹介する。著者が調査したところ、電子情報通信学会での研究発表が多く、その 2 例を紹介

する。更田氏らは、変換効率を 33% と高い状態で、かつ、最低入力電圧 100mV で駆動可能な昇圧電源回路を開発した<sup>24)</sup>。橋本氏らは、熱電発電素子(数十 mV 程度の出力)に対して、昇圧回路(Boost converter)に更にチャージポンプを利用した回路を提案している<sup>25)</sup>。

次にエネルギーハーベスティング向けの昇圧回路 IC を紹介する。リコー電子デバイス(株)が発売する R1810 シリーズは光発電素子に特化した蓄電用の昇圧回路 IC であり、最低入力電圧 0.2V であるため、種々の太陽光発電素子に適用可能である<sup>26)</sup>。旭化成エレクトロニクス(株)が発売する AP4470 は、最低入力電圧 0.2V、最低入力電力 1 $\mu$ W から起動可能な昇圧回路 IC であり、低電圧低電力で使用可能とするために入力インピーダンスを高く設計している<sup>27)</sup>。さらに、Texas Instruments 社が発売する BQ25504 は、起動時に最低 0.6V が必要であるが、起動後は最低入力電圧 0.13V で継続可能な昇圧回路 IC である<sup>28)</sup>。誌面の都合で紹介しきれないが、各社様々なエネルギーハーベスティング用の昇圧回路 IC を開発及び販売している。

## 4. おわりに

本稿では、エネルギーハーベスティング向けに必要な電力変換回路について、必要性、回路構成の種類、研究動向、(発売されている) IC の例などを紹介した。本特集で掲載されているように、エネルギーハーベスティングは多種多様に存在するため、微弱電力回収機構である電力変換回路もその種類や特徴に応じて選択及び設計する必要がある。本稿の内容がそれらの一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) [https://www.japanfs.org/sp/ja/news/archives/news\\_id030388.html](https://www.japanfs.org/sp/ja/news/archives/news_id030388.html)
- 2) <https://www.jreast.co.jp/development/theme/pdf/yukahatsuden.pdf>
- 3) 南 政孝, 阪部智城, 茂木進一, 道平雅一:「パッシブ素子を用いた圧電素子による振動発電の出力電力向上に関する提案」, 電気学会論文誌D, Vol.137, No.12, pp.918-923, (2017).
- 4) M.Minami, "Improvement in Output Characteristics by Resonator and Passive Rectifiers in Vibration Generators", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.8, pp.7184-7191, (2019).
- 5) 南 政孝, 近藤小春, 茂木進一, 道平雅一:「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」, 電気学会論文誌D, Vol.139, No.9, pp.822-823, (2019).
- 6) M.Minami, A.Nakagaki, and G.Hase, "A Proposal of Internal Capacitor Cancel Control Rectifier for Improving Output Power of Vibration Generator," Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020), DG2L-5, pp.463-466, Hamamatsu, Japan, November 24, 2020.
- 7) 田中 孔, 青沼智也, 名取賢二, 佐藤之彦:「ピエゾ素子を用いた振動発電におけるエネルギー回収量増加のための整流方式の検討」, 電気学会論文誌D, Vol.136, No.5, pp.346-354, (2016).
- 8) L.Costanzo, A.Lo Schiavo, and M.Vitelli, "Power maximization from resonant electromagnetic vibration harvesters feeding bridge rectifiers," International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol.47, No.1, pp.87-102, (2019).
- 9) D.Kwon and G.A.Rincon-Mora, "A rectifier-free piezoelectric energy harvester circuit," 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS 2009) pp.1085-1088., (2009).
- 10) Y.K.Ramadass and A.P.Chandrakasan, "An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.45, No.1, pp.189-204, (2010).
- 11) C.Peters, J.Handwerker, D.Maurath, and Y.Manoli, "A sub-500 mv highly efficient active rectifier for energy harvesting applications," IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers, Vol.58, No.7, pp.1542-1550, (2011).
- 12) D.Guyomar, A.Badel, E.Lefeuvre, and C.Richard, "Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.52, No.4, pp.584-595, (2005).
- 13) K.Fujiwara and H.Nomura, "Improvement of current waveform for 200 V input single-phase rectifiers using modified voltage-doubler circuit," Proceedings of Power Conversion Conference (PCC '97), Vol.2, pp.897-900, (1997).
- 14) L.Wu, X.-D.Do, S.-G.Lee, and D.S.Ha, "A self-powered and optimal SSHI circuit integrated with an active rectifier for piezoelectric energy harvesting," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol.64, No.3, pp.537-549(2017).
- 15) S.Du, Y.Jia, and A.A.Seshia, "An Efficient Inductorless Dynamically Configured Interface Circuit for Piezoelectric Vibration Energy Harvesting", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.32, No.5, pp.3595-3609, (2017).
- 16) G.K.Ottman, H.F.Hofmann, A.C.Bhatt, and G.A.Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.17, No.5, pp.669-676, (2002).
- 17) G.K.Ottman, H.F.Hofmann, and G.A.Lesieutre, "Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.18, No.2, pp.696-703, (2003).
- 18) N.Kong, D.S.Ha, A.Erturk, and D.J.Inman, "Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.21, No.13, pp.1293-1302, (2010).
- 19) A.Romani, M.Filippi, and M.Tartagni, "Micropower design of a fully autonomous energy harvesting circuit for arrays of piezoelectric transducers," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.29, No.2, pp.729-739, (2014).
- 20) L T C 3588-1 データシート <https://www.analog.com/jp/products/ltc3588-1.html>
- 21) Linear Technology 社 ニュースリリース <https://www.analog.com/media/jp/news-marketing-collateral/press-releases/ltc3588-1%20final%20rel%2001-07-10jf2.pdf>
- 22) 堀越 智, 竹内敬治, 篠原真毅:「エネルギーハーベスティング:身の周りの微小エネルギーから電気を創る“環境発電”」, (日刊工業新聞社, 2014), 第8章
- 23) <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/sparkfun-electronics/BOB-09946/5140803>
- 24) 更田裕司, 大内真一, 松川 貴:「エネルギーハーベスティング向け完全集積可能な最低入力電圧 100mV の昇圧電源回路」, 電子情報通信学会技術研究報告 信学技報, Vol.116, No.334, pp.57-62, (2016).
- 25) 橋本 哲, 吉村 勉, 木原崇雄:「チャージポンプを用いた環境発電向け昇圧回路の性能向上に関する研究」, 電子情報通信学会技術研究報告 信学技報, Vol.117, No.315, pp.7-12, (2017).
- 26) ニュースリリース <https://www.nisshinbo-microdevices.co.jp/ja/about/info/20210601.html>
- 27) 旭化成エレクトロニクス株式会社製品情報 <https://www.akm.com/jp/ja/products/energy-harvesting/>
- 28) Texas instruments 製品情報 <https://www.ti.com/product/ja-jp/BQ25504>