

Development of a DC Power-supply Circuit for Low Power Rectenna¹

Yong Huang, Naoki Shinohara and Tomohiko Mitani

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, JAPAN

Abstract

Nowadays, wireless power transmission (WPT) is being actively researched and developed. WPT transfers power to electrical load without wire. WPT is useful in cases where interconnecting wires are inconvenient, hazardous, or impossible. WPT can be utilized to charge the batteries in the equipment without the need for a wire connection. However, the output of receiving side of WPT is not directly suited to a power supply for circuits because of variations in power and voltage over the load resistance, and a power management circuit is usually required. This power management unit should be able to adapt its input to the receiving side of WPT and its output to the load. Therefore, in order to obtain the necessary DC voltage and high conversion efficiency, a DC-DC converter is commonly used for impedance matching in WPT system.

In the present study, we proposed a maximum power point tracking (MPPT) method for a low-power milliwatt-level RF -DC rectenna using a DC-DC converter. We proposed an RF-DC-DC circuit that consists of an RF-DC rectifier circuit and a DC-DC converter. First, we designed a rectifying circuit and obtained a maximum RF-to-DC conversion efficiency of 79% at the optimal load of 160 Ω with a 2.45 GHz microwave power of 82 mW. Second, we designed a buck-boost converter, the input impedance of which can match the optimal load of the rectifying circuit that can track the maximum efficiency of the rectifying circuit. As expected, the measured input impedance of the buck-boost converter is approximately 133 Ω , despite the load resistance and input power. Moreover, the efficiency of the converter exceeds 80% for a wide range of load or a wide range of input power. Third, we measured the RF-to-DC conversion efficiency of the RF-DC-DC circuit. The RF-to-DC efficiency of rectifier is approximately steady at 75%, despite the load resistance changing from 100 Ω to 5000 Ω when a buck-boost converter is used to track the maximum efficiency of the rectenna. The overall efficiency of the RF-DC-DC circuit is still over 60%, even though the load resistance varied over a very wide range from 100 Ω to 5000 Ω and the input power changed from 40 mW to 100 mW.

¹Presented at the Sixteenth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

弱電レクテナに適用した電源回路の開発²

黄 勇, 篠原 真毅, 三谷 友彦

京大生生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer : WPT) は、非接触給電、無線電力伝送等とも呼ばれるが、21世紀に入りその技術が注目され、これまでワイヤレスで送れるものは情報だけであったものが、エネルギーもワイヤレスで送れるという期待感により、現在世界中で様々な研究開発や商品化が行われるようになってきている。ワイヤレス電力伝送は、磁場を用いた短距離の電磁誘導方式や共鳴送電方式と、電磁波、主にマイクロ波を用いた長短距離のマイクロ波無線電力伝送等の方式がある[1]。マイクロ波無線電力伝送では、送電アンテナからマイクロ波を発射し、レクテナを用いて、マイクロ波を受信して、RF-DC 変換を行い、直流電力を得る方式である。レクテナのRF-DC 変換効率は入力電力と出力に接続した負荷に依存する[2]。つまり、レクテナには最大変換効率を得られる最適な出力負荷が存在する。しかし、センサーノードなどは負荷が動作状態により変化するため、負荷変動によるレクテナの変換効率の低下が問題となっている。本研究では負荷が変動するユーザーに安定な電力を供給するための弱電レクテナ用のDC 電源回路の開発を行う。図1は提案したRF-DC-DC 回路のブロック図である。レクテナと負荷の間にDC-DC コンバータを接続することにより、負荷が変化しても、DC-DC コンバータの入力インピーダンスがレクテナの最適負荷となるように制御することで、レクテナは接続した負荷に依存せず、広い負荷範囲で最大電力を出力できる。

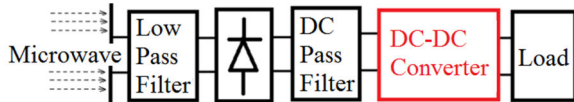


図1 RF-DC-DC 回路のブロック図

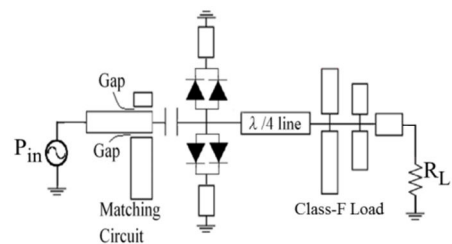
2. 整流回路

レクテナはアンテナと整流回路で構成され、マイクロ波電力を受け取って、直流に変換するための非常に重要な素子である。アンテナはマイクロ波を受信する装置で、整流回路はアンテナに受信したマイクロ波電力を直流電力に変換するものである。今回はレクテナの整流回路部の設計、試作と実測を行った。

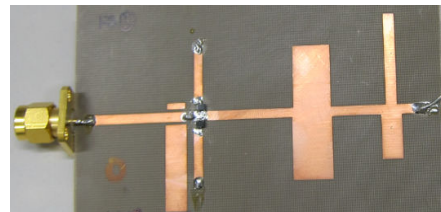
整流回路はマイクロ波を高効率で整流するために、ダイオード一つを回路に並列に挿入し、出力側に $\lambda/4$ 線路と

キャパシタを組み合わせた「シングルシャント整流回路」がよく用いられる[3]。これはF級の半導体増幅器のように高調波合成を用いて全波整流するもので、理論効率は100%である。しかし、この理論効率はダイオードがゼロ抵抗の完璧なスイッチとして動作すると仮定した場合の理論であり、実際のダイオードには様々な物性があるため効率が低下する。また、出力端にキャパシタを使うので、キャパシタの直列抵抗も効率が低下する原因の一つとなる。そのために、本研究室では最初に「F級負荷」と呼ばれる整流回路を提案した[4]-[6]。F級負荷整流回路はシングルシャント整流回路と違い、出力端がキャパシタを使わず、 $\lambda/4$ 線路と数個高周波終端スタブで構成される。実際に作成したところ、F級負荷整流回路はシングルシャント整流回路より、高い効率を得られた[4]。

本研究でも整流回路として、F級負荷整流回路を用いた。設計した回路は図2に示すように、マッチング回路、整流ダイオード、 $\lambda/4$ 線路と4つ高周波終端スタブで構成される。ショットキーダイオードはAgilent社の高周波ダイオードHSMS286Fを2つ並列に回路に挿入した。HSMS286Fは2つのHSMS2860ダイオードが並列に配置されたパッケージである。3節で説明する昇降圧コンバータは出力電圧と入力電圧の極性が逆になるので、プラスの出力電圧を得るためにはマイナスの入力電圧を与える必要がある。そのため、図2(a)に示す整流回路はマイナスの出力電圧を得るために、通常の整流回路と違い、ダイオードを順方向で回路に接続している。



(a) 整流回路の構成



(b) 整流回路の写真

図2 試作した整流回路

この整流回路についてAgilent社のADS2011を用いて、入力電力が 2.45 GHz マイクロ波をとって、シミュレーションを行った。そして、回路を作成して、実測を行った。図3は設計した整流回路のシミュレーションと実測の効率-負荷特性

²注 第16回SPSシンポジウム、静岡大学にて
2013年10月3,4日開催

である。効率(Sim.1)の実線は最大効率が得られた時のシミュレーション結果で、入力電力が69 mW、最適負荷が135 Ω とき、最大効率が82.5%となった。このシミュレーション回路を実際に作って測ると、効率(Exp.)の点線で示すように、入力電力が82 mW、負荷が160 Ω とき、最大効率79.2%になった。また、シミュレーションで、入力電力を82mWとしたときの結果が効率(Sim.2)の実線で表されており、負荷が110 Ω とき、最大効率が81.8%となった。

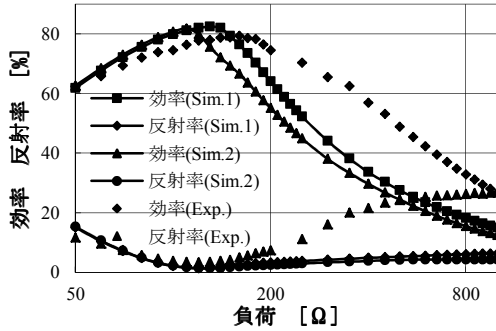


図3 シミュレーションと実測の効率

表1 シミュレーションと実測の最大効率

Sim./Exp.	入力電力 (mW)	最大効率	反射率	最適負荷 (Ω)
Sim.1	69	82.5%	1.6%	135
Exp.	82	79.2%	4.9%	160
Sim.2	82	81.8%	3.4%	110

表1は図3に示す三つの結果の入力電力、最大効率、反射率、最適負荷をリストしている。いずれの結果も最適負荷を超えると、効率が急に下がってしまうことが分かる。これは普通のレクテナに共通している効率-負荷特性である。そして、実験の結果より、負荷が50 Ω から1000 Ω まで変化するとき、効率の差は最大で53ポイント高くなることが分かった。

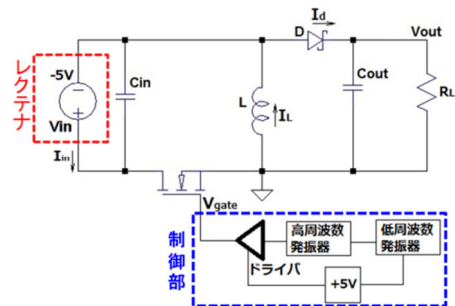
3. 昇降圧コンバータ

DC-DC コンバータは DC 電源回路に使われる、電圧を変換するための電子デバイスである。入出力電圧の関係により、昇圧、降圧、昇降圧コンバータがある。一般に DC-DC コンバータはインダクタ、スイッチング素子、ダイオードとキャパシタで構成される。MOSFET は低オン抵抗とゼロゲート電流の特性を持つので、よくスイッチング素子として使われる。MOSFET のゲートをオンするとき、電流がドレインからソースに流れて、電圧がほぼかからない。ゲートをオフするとき、ドレインとソースの間に電圧がかかって、電流がほぼ流れない特性がある。そのため、理想的な MOSFET は電力を消費しない。実際に、DC-DC コンバータは 80%–95% の効率が得られる[7]。

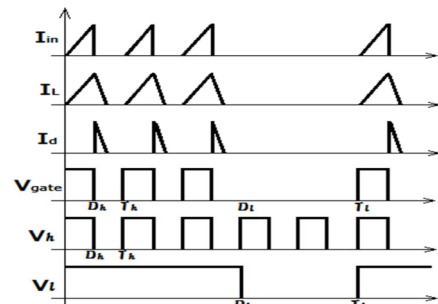
DC-DC コンバータは出力電圧を安定するために使われる場合が多い。本研究に使われる DC-DC コンバータは、

負荷が変化しても、入力インピーダンスが常に整流回路の最適負荷に近づけるような条件を満たすことを目的とする。つまり、インピーダンスをマッチングするために、コンバータのインピーダンス変換の特性を使う。電磁界共振結合方式を用いたワイヤレス電力伝送にも DC-DC コンバータを用いてインピーダンスマッチングを用いた例もある[8]。参考文献[8]に電流連続モード(CCM)の三種類のコンバータのインピーダンス変換特性を示されており、この結果より、CCM のコンバータでは、インピーダンスの変換は一定の範囲に制限されると考えられる。そのため、本研究は電流非連続モード(DCM)の昇降圧コンバータを採用し、より広い負荷範囲でのインピーダンスの変換をこととした。

図 4(a) は今回設計した昇降圧コンバータ回路のブロック図で、インダクタ、MOSFET、ダイオードと制御部から構成される。制御部は図に示すように、低周波数発振器と高周波数発振器を組み合わせ、制御パルスを合成し、ドライバを通して、MOSFET ゲートのオン、オフを制御できる。ゲートがオンのとき、電流が MOSFET、インダクタに流れる。ゲートがオフのとき、電流がインダクタ、ダイオード、負荷に流れる。ここに、もし入力端の正極がプラス電位、負極がゼロ電位となれば、MOSFET のゲートをオンにすると、入力端の正極が接地されてしまい、インダクタの両端に電圧をかからなくなり、昇降圧コンバータは正常に動作できない。そのために、入力端は正極がゼロ電位で、負極がマイナス電位となるマイナス入力電圧を使う。これは、2 節に述べたように整流回路の出力電圧がマイナスとするように設計した理由である。



(a) 回路



(b) 動作波形

図4 昇降圧コンバータ

図 4(b) はこのコンバータの動作波形を示す。 I_{in} , I_d , I_L はそれぞれ入力電流、ダイオードとインダクタに流れた電流

である。 V_{gate}, V_h, V_l はそれぞれ制御パルス、高周波数パルス、低周波数パルスである。 D_h, T_h は高周波数発振器のデューティ比と周期であり、 D_l, T_l が低周波数発振器のデューティ比と周期である。

コンバータの入力インピーダンス R_{in} はインダクタンスを L とすると、式(1)で表せる。

$$R_{in} = \frac{2L}{D_h^2 D_l T_h} \quad (1)$$

ここで、 D_h を0.5とし、高周波発振器の周波数を f_h とすれば、式(1)より

$$R_{in} = \frac{8Lf_h}{D_l} \quad (2)$$

が得られる。式(2)より、コンバータの入力インピーダンスは入力電力や接続した負荷に関係がなく、インダクタンスと高周波数発振器の周波数と低周波数発振器のデューティ比によって決まることが分かる。式(2)において、 L を1mH、 f_h を10kHz、 D_l を0.6とすると、入力インピーダンス R_{in} は133Ωになる。

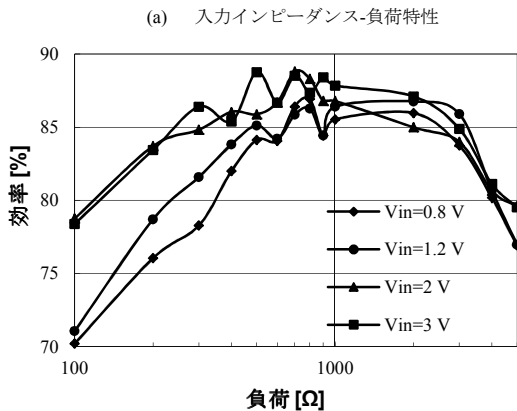
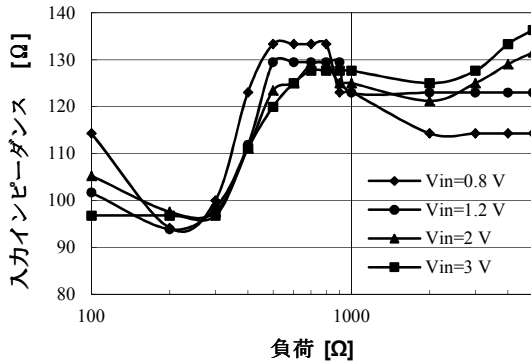


図5 昇降圧コンバータの実測結果

図5は設計した昇降圧コンバータの実測結果を示す。図5(a)は入力電圧が0.8Vから3V、接続した負荷が100Ωから5000Ωまで変化する場合のコンバータの入力インピーダンスの変化を示している。そのとき、入力電圧が0.8Vから3Vまで変化すると、入力電力は7mWから70mWまで変化する。図5(a)より、入力電力が変動しても、入力インピーダンス R_{in} はほぼ変わらないことが分かる。負荷が500Ω

以下のとき、入力電流は連続モードになるので、入力インピーダンス R_{in} が計算値より小さくなるが、負荷が500Ω以上のとき、 R_{in} がほぼ計算値と一致していることが分かる。図5(b)にコンバータの効率-負荷特性を示す。広い負荷範囲で効率が80%以上になることが分かる。

4. RF-DC-DC回路

RF-DC-DC回路はレクテナ(または整流回路)の後にDC-DCコンバータを接続することによって構成される。1節で述べたように、DC-DCコンバータの入力インピーダンスはレクテナの最適負荷になるように制御すれば、レクテナを負荷変動に関係なく、常に最大効率で動作させることができる。今節は前節で設計した整流回路と昇降圧コンバータを接続してRF-DC-DC回路を構成して実験を行った。

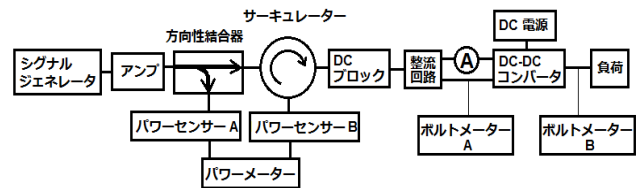


図6 RF-DC-DC回路の実験回路図

表2. 実験で測ったパラメータ

パワーセンサーA	パワーセンサーB	ボルトメーターA	ボルトメーターB	電流計
整流回路入力電力	反射電力	レクテナ出力電圧	コンバータ出力電圧	コンバータ入力電流

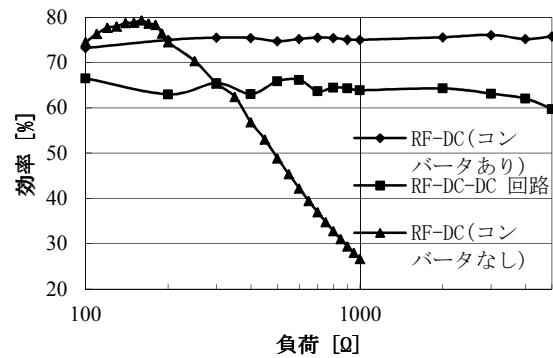


図7 コンバータを接続する前、後に整流回路の効率の比較

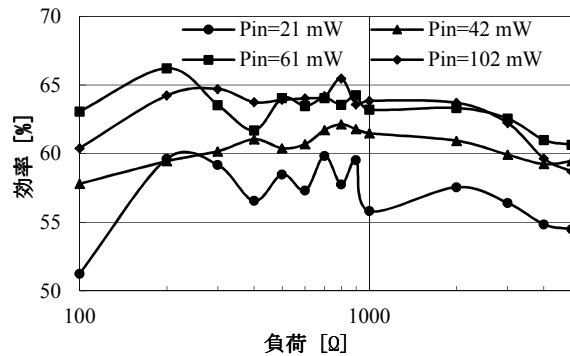


図8 入力電力によるRF-DC-DC回路の効率-負荷特性

図6にはRF-DC-DC回路の実験回路図を示している。シグナルジェネレータからマイクロ波を発生し、アンプで増幅して、方向性結合器、サーキュレーター、DCブロックを経て、整流回路、コンバータで整流して、負荷端に直流を出力される。各装置が測定したパラメータは表2に示している。このとき、周波数2.45 GHzのマイクロ波を入力し、RF-DC-DC回路の効率を測定した。図7は入力電力を82 mWとした場合のRF-DC-DC回路全体の効率、コンバータを接続していない場合の整流回路の効率、RF-DC-DC回路における整流回路単体での効率の比較を示している。2節でも説明した通り、コンバータを接続していない場合の整流回路の効率は負荷により大幅に変動して、負荷が160 Ωのとき、効率が79.2%となるが、負荷が1000 Ωのとき、効率がわずか26%となる。しかし、コンバータを接続した場合の整流回路単体での効率は負荷による変動がなく、負荷が100 Ωから5000 Ωまで変化しても、効率が常に73%以上となることが分かった。そして、RF-DC-DC回路全体の効率は100 Ωから5000 Ω広い負荷範囲で60%以上となった。図8は入力電力を21 mW、42 mW、61 mW、102 mWとしたときの負荷によりRF-DC-DC回路全体の効率特性を示している。3節では昇降圧コンバータの入力インピーダンスは入力電力により変わらないと述べたが、整流回路の最適負荷は入力電力により変化するため、RF-DC-DC回路全体の効率も変化していることが分かる。

5. まとめ

今回はレクテナ整流回路と昇降圧コンバータの設計と製作を行った。製作した回路を測定したところ、レクテナ整流回路の最大変換効率は79.2%になり、昇降圧コンバータは広い負荷範囲で入力インピーダンスが一定に維持でき、80%以上の効率となった。また、これらの回路を接続し、RF-DC-DC回路を構成したところ、100 Ωから5000 Ωの広い負荷範囲で整流回路のRF-DC変換効率が73%以上に達成した。そして、RF-DC-DC回路全体的の効率は60%以上となった。しかし、本研究で用いた昇降圧コンバータは制御部に電力を提供する必要があるために、別の外部DC電源が必要になる。今後は、外部DC電源としてもう一つ弱電レクテナを用いて、昇降圧コンバータの制御部に電力を提供することを検討する。

参考文献

- 1) WiPoT Homepage: <http://www.wipot.jp/>
- 2) T.W. Yoo and K. Chang, "Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 40, no. 6, pp.1259-1266, Jun. 1992.
- 3) R.J.Gutmman, and J.M.Borrego, "Power Combining in an Array of Microwave Power Rectifiers," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. MTT-27, no. 12, pp.958-968, Dec. 1979.
- 4) K. Hatano, N. Shinohara, T. Mitani, K. Nishikawa, T.Seki, and K.Hiraga, "Development of Class-F Load Rectennas," in *Proc. IMWS-IWPT2011*, Uji, Kyoto, May 2011, pp. 251-254.
- 5) K. Hatano, N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, M.Kawashima, "Development of Improved 24GHz-band Class-F Load Rectennas," in *Proc. IMWS-IWPT2012*, Kyoto, May 2012, pp. 163-166.
- 6) 波多野 健, 篠原 真毅, 三谷 友彦, "24GHz帯整流回路のMMIC化," 第16回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会, WPT2012-50, 京都, Mar. 15-16, 2013, pp.51-54.
- 7) Robert W. Erickson, *DC-DC Power Converters*, Article in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Published Online, Jun. 2007, pp.1-5.
- 8) 森脇 悠介, 居村 岳広, 堀 洋一, "磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送のDC/DCコンバータを用いた負荷変動時の反射電力抑制に関する検討," 平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Sep. 6, 2011, pp.403-406.