

磁界共振結合ワイヤレス電力伝送における 二次側電力変換回路を用いた最大効率制御の実験検証

Experimental Validation of Maximum Efficiency Control using Power Conversion Circuits on Secondary Side
for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling

畑 勝裕¹ 居村 岳広¹ 堀 洋一¹
Katsuhiko Hata Takehiro Imura Yoichi Hori

東京大学 新領域創成科学研究科¹
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

1 はじめに

磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送 [1] は数 m までの距離において高効率かつ位置ずれに強い特徴を持つ。電力伝送効率は送受電コイルの結合状態や負荷抵抗値などによって決まり、二次側に電力変換回路を用いて負荷抵抗値を変換する手法が提案されている [2]。このとき、送受電コイルの結合状態に応じて二次側電圧を制御することで電力伝送効率を最大化でき [3]、著者らは DC-DC コンバータを用いた最大効率制御を提案している [4]。文献 [5] では AC-DC コンバータを用いた二次側電圧制御を提案しており、最大効率制御に適用可能である。

本稿では二次側に電力変換回路を用いた最大効率制御手法について述べ、シミュレーションによる検証を行う。

2 磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送

2.1 共振周波数における電力伝送特性

SS 方式のワイヤレス電力伝送システムの等価回路を Fig. 1 に示す。\$L_1\$、\$L_2\$ は送受電コイルの自己インダクタンス、\$R_1\$、\$R_2\$ は送受電器の内部抵抗、\$C_1\$、\$C_2\$ は各共振コンデンサの静電容量であり、\$L_m\$ は送受電コイルの相互インダクタンスを表している。電源の角周波数を \$\omega_0\$ とするとき、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

を満たすように送受電器を設計する。二次側の電力変換回路を含む等価的な負荷抵抗値を \$R_{ac}\$ とするとき、電力伝送効率 \$\eta\$ は

$$\eta = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_{ac}}{(R_2 + R_{ac}) \{ R_1 R_2 + R_1 R_{ac} + (\omega_0 L_m)^2 \}} \quad (2)$$

で表される。送受電器のパラメータが Table 1 で与えられるとき、Fig. 2 のようになる。電力伝送効率が最大となる負荷抵抗値 \$R_{ac\eta\max}\$ は

$$R_{ac\eta\max} = \sqrt{R_2 \left\{ \frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2 \right\}} \quad (3)$$

で与えられ、このときの二次側電圧 \$V_{2\eta\max}\$ は

$$V_{2\eta\max} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \frac{\omega_0 L_m}{\sqrt{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2 + \sqrt{R_1 R_2}}} V_1 \quad (4)$$

となる [3]。ここで \$V_1\$ は一次側電圧の実効値である。

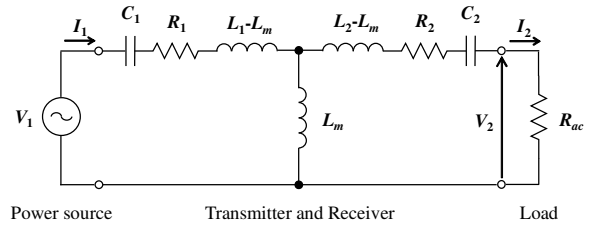


Fig. 1 T-type equivalent circuit of wireless power transfer via magnetic resonance coupling.

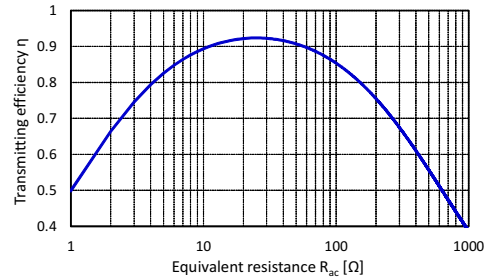


Fig. 2 Equivalent resistance vs. transmitting efficiency.

Table 1 Parameters of transmitter and receiver coils.

	Primary side	Secondary side
Resistance \$R_1, R_2\$	1 \$\Omega\$	1 \$\Omega\$
Inductance \$L_1, L_2\$	500 \$\mu\$H	500 \$\mu\$H
Capacitance \$C_1, C_2\$	5070 pF	5070 pF
Resonance frequency	100 kHz	100 kHz
Mutual inductance \$L_m\$	40.0 \$\mu\$H	

2.2 二次側電圧制御による最大効率制御

ワイヤレス電力伝送の最大効率制御に用いる回路構成を Fig. 3 に示す。二次側の AC-DC コンバータあるいは DC-DC コンバータにより、二次側電圧が (4) 式を満たすように制御すれば最大効率制御を実現できる。DC-DC コンバータを用いた最大効率制御はすでに検証されているため [4]、本稿では AC-DC コンバータを用いた最大効率制御について述べる。

ヒステリシスコンパレータを用いた DC リンク電圧の制御 [5] では、AC-DC コンバータは整流動作とショート動作を繰り返す。整流動作では (4) 式を満たすため最大効率での電力伝送が可能である。ショート動作では給電電力を遮断するが、等価負荷抵抗 \$R_{ac}\$ が極めて小さくなるため給電電力が低下し、全体での損失が抑えられる。

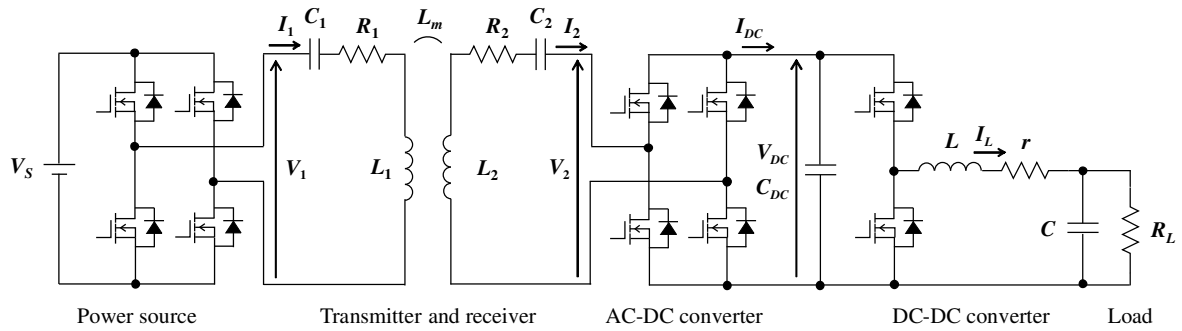


Fig. 3 Circuit diagram of the wireless power transfer system.

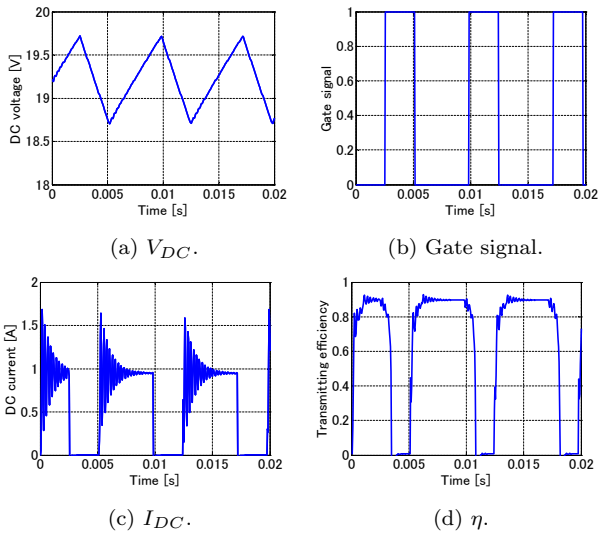


Fig. 4 Simulation results.

3 シミュレーション

AC-DC コンバータを用いた最大効率制御の有効性について検証するため、シミュレーションを行った。ここでは DC-DC コンバータによる制御は行わないため、Fig. 3 に示す DC-DC コンバータを省略した回路構成とした。一次側の電源電圧 V_S は 20 V、電源周波数は 100 kHz とし、送受電器のパラメータは Table 1 に示す通りである。DC リンクのコンデンサ容量 C_{DC} は 1000 μF とし、負荷抵抗 R_L は 50 Ω とした。DC リンク電圧 V_{DC} の目標値は (4) 式より算出し、ヒステリシス幅を 0.5 V とした。

シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) より V_{DC} は目標値付近に制御されていることが確認できる。Fig. 4(b) は AC-DC コンバータの下アームのゲート信号であり、0 のときは整流動作、1 のときはショート動作となる。Fig. 4(c) より整流動作では I_{DC} が流入しており、 V_{DC} を増加させる。ショート動作では I_{DC} が 0 となるため給電電力が遮断され、 V_{DC} は減少する。Fig. 4(d) は一次側の直流電源から二次側の DC リンクまでの効率を示している。ここでは過渡応答や位相差の影響を減らすため、1 ms あたりの平均値として表示している。制御しない場合の効率は約 87.2 % であったが、制御時の定常状態における効率は約 90.0 % と改善されている。 R_L がさらに大きい場合、効率改善の割合は増加するため、最大効率制御はより有効となる。

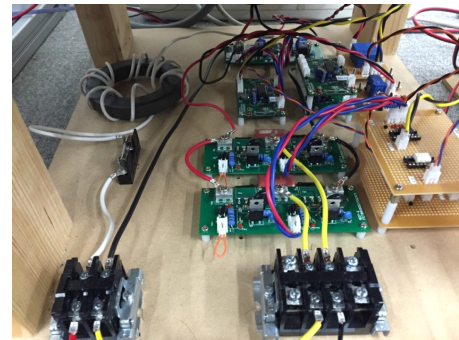


Fig. 5 Power conversion circuits.

4 まとめ

SS 方式の磁界共振結合ワイヤレス電力伝送の二次側電力変換回路を用いた最大効率制御について述べ、AC-DC コンバータを用いた最大効率制御の有効性を確認した。本稿ではシミュレーションのみを示したが、講演では Fig. 5 に示す電力変換回路を用いた実演を行う。

参考文献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance," *Science Express on 7 June 2007*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [2] K. Takuzaki and N. Hoshi, "Consideration of operating condition of secondary-side converter of inductive power transfer system for obtaining high resonant circuit efficiency," *IEE Japan Transactions on Industry Applications*, vol. 132, no. 10, pp. 966–975, 2012. (in Japanese)
- [3] M. Kato, T. Imura, and Y. Hori, "Study on maximize efficiency by secondary side control using DC-DC converter in wireless power transfer via magnetic resonant coupling," in *Proc. The 27th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 2013, pp. 1–5.
- [4] K. Hata, T. Imura, and Y. Hori, "Maximum efficiency control of wireless power transfer considering dynamics of DC-DC converter for moving electric vehicles," in *Proc. 30th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2015, pp. 3301–3306.
- [5] D. Gunji, M. Sato, T. Imura, and H. Fujimoto, "Experimental validation of load voltage control method using secondary converter for wireless power transfer by magnetic resonance coupling," in *Proc. IEICE Society Conference 2014*, 2014, pp. 61–62. (in Japanese).