

地上設備を簡単化する走行中ワイヤレス給電のための基礎検討 ～ 二次側情報のみに基づく一次側電圧推定 ～

畑 勝裕[†] 居村 岳広[†] 堀 洋一[†]

[†] 東京大学新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

E-mail: †hata@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, imura@hori.k.u-toyko.ac.jp, hori@k.u-tokyo.ac.jp

あらまし 走行中ワイヤレス給電における地上設備は長距離かつ劣悪な環境に設置されるため、できる限り簡単かつ低コストでなければならない。そのため、一次側と二次側で通信を行わず、二次側のみで制御する手法が好ましい。一次側電圧が一定である場合、電気自動車の走行に応じて二次側電圧を制御することにより、電力伝送効率の最大化あるいは所望の給電電力を実現できるが、一次側電圧を厳密に制御しなければならない。本研究では二次側電圧と二次側電流に基づく一次側電圧の推定手法を提案し、一次側電圧が変動した場合でも最大効率制御および給電電力制御を可能にする。これにより、一次側電圧は送配電系統と同様にある適正な範囲内に制御すればよく、公称電圧を厳密に維持しなくてもよいため、地上設備をより簡単化できる。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 磁界共振結合, 走行中ワイヤレス給電, 一次側電圧推定

Fundamental Study on Dynamic Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle to Simplify Ground Facilities – Primary Voltage Estimation Based on Secondary side Information –

Katsuhiko HATA[†], Takehiro IMURA[†], and Yoichi HORI[†]

[†] Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo,
Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561, Japan

E-mail: †hata@hflab.k.u-tokyo.ac.jp, imura@hori.k.u-toyko.ac.jp, hori@k.u-tokyo.ac.jp

Abstract A dynamic wireless power transfer system for electric vehicles can extend their cruising range and reduce the size of their energy storage system. However, when being applied to rugged roadways over long distances, it is important to simplify ground facilities as much as possible. To implement a suitable control system for maximizing transmitting efficiency or determining charging power, this paper proposes an estimation method for primary voltage using secondary side information. The estimation equation is verified by experiments. These results suggest that the proposed method can simplify ground facilities, therefore eliminating the need for its precise regulation.

Key words Wireless power transfer, Magnetic resonant coupling, Dynamic charging, Primary voltage estimation

1. はじめに

電気自動車は一充電当たりの航続距離が短く、頻繁な充電作業やストレージ装置の大型化が問題となっている。ワイヤレス電力伝送は煩雑な充電作業を簡略化でき、電気自動車への適用が期待されている。近年、走行中ワイヤレス給電に関する研究も多く報告されており [1]–[3], 電気自動車は電力インフラから直接エネルギーを受給できるようになり、ストレージ装置の小型化が可能となる。

走行中ワイヤレス給電では主に地中に設置した送電コイルか

ら車両側の受電コイルに電力伝送を行う [4]。道路の維持管理を考慮した場合、地表近くに送電コイルを設置することは難しく、0.6 m 程度の長距離伝送が必要となる [5]。2007 年に発表された磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送は、数 m までの距離を高効率で電力伝送でき、かつ送受電コイルの位置ずれに強い特徴を持つ [6][7]。この方式による電力伝送効率および給電電力は送受電コイルの結合状態と負荷の状態によって変化し [8], 走行中ワイヤレス給電では走行に応じた制御が不可欠である。

一方で、走行中ワイヤレス給電における地上設備は長距離かつ劣悪な環境に設置されることが想定されるため、地上設備の

簡単化が必要である。従って、一次側と二次側の通信は行わず、二次側のみで制御できることが好ましい。先行研究では一次側電圧が一定であると仮定し、車両側に DC-DC コンバータを用いて二次側電圧を制御することにより電力伝送効率の最大化 [9][10]、あるいは所望の給電電力を実現している [11]。

本研究では二次側電圧と二次側電流に基づく一次側電圧の推定式を導出し、二次側情報のみを用いた一次側電圧の推定手法を提案する。これにより、一次側電圧を厳密に制御しない場合においても二次側での最大効率制御および給電電力制御を可能にし、地上設備における定電圧制御の要求を緩和する。

2. 磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送

2.1 磁界共振結合の入出力特性

本研究では、送受電コイルと共振コンデンサをそれぞれ直列に接続した SS 方式のワイヤレス電力伝送システムを構成する。一次側に電圧源 V_1 、二次側に負荷抵抗 R_L を接続した等価回路を Fig. 1 に示す [12]。ここで 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を表し、送受電コイルの相互インダクタンスを L_m で表している。電源の角周波数 ω_0 において (1) 式が成り立つとき、一次側と二次側の電圧比 A_V および電力伝送効率 η は (2)、(3) 式で与えられる [8]。

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

$$A_V = j \frac{\omega_0 L_m R_L}{R_1 R_2 + R_1 R_L + (\omega_0 L_m)^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_L}{(R_2 + R_L) \{R_1 R_2 + R_1 R_L + (\omega_0 L_m)^2\}} \quad (3)$$

2.2 二次側 DC-DC コンバータを用いた制御

走行中ワイヤレス給電では、送受電コイルの結合状態および負荷の状態は走行速度や加減速等に応じて変動する。電力伝送効率の最大化あるいは所望の給電電力を実現するためには、走行に応じた制御が必要である。本稿では、地上設備の簡単化を目的とするため、一次側と二次側の通信は行わず、二次側のみで制御する手法に着目する。Fig. 2 に示すシステム構成では、二次側の DC-DC コンバータを用いて受電コイルから見た等価的な負荷抵抗値を制御できる [13][14]。

送受電コイルの相互インダクタンスがある値をとる時、電力伝送効率を最大化する負荷抵抗値 $R_{L\eta_{max}}$ は、

$$R_{L\eta_{max}} = \sqrt{R_2 \left\{ \frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2 \right\}} \quad (4)$$

で与えられる [8]。また (2)、(4) 式より、電力伝送効率を最大化する二次側電圧 $V_{2\eta_{max}}$ は、

$$V_{2\eta_{max}} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \frac{\omega_0 L_m}{\sqrt{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} + \sqrt{R_1 R_2}} V_1 \quad (5)$$

と求められる [9]。従って、(5) 式を満たす二次側電圧制御系を構築すればワイヤレス電力伝送における最大効率制御が実現できる [10]。

また、負荷抵抗に給電される電力 P_L は、

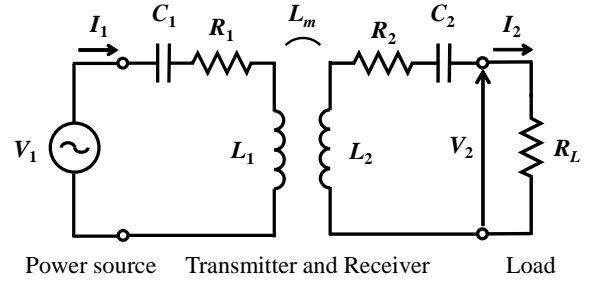


図 1 ワイヤレス電力伝送システムの等価回路

Fig. 1 Equivalent circuit of wireless power transfer system.

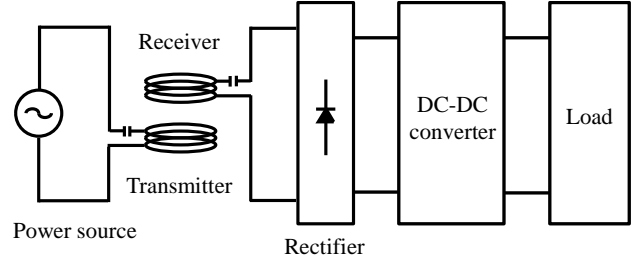


図 2 二次側 DC-DC コンバータを用いたシステム構成

Fig. 2 System configuration using DC-DC converter on secondary side.

$$P_L = \frac{A_V^2}{R_L} V_1^2 = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_L}{\{R_1 R_2 + R_1 R_L + (\omega_0 L_m)^2\}^2} V_1^2 \quad (6)$$

で与えられるため、一次側電圧および負荷抵抗値によって変化する。一次側電圧がある値をとる時、所望の給電電力を与える負荷抵抗および二次側電圧は (6) 式より解析的に求められる [11]。従って、最大効率制御と同様に二次側電圧制御により給電電力制御を実現できる。

ワイヤレス電力伝送における回路パラメータの推定手法は示されているが [15][16]、最大効率制御および給電電力制御では一次側電圧の情報も必要となる。地上設備を簡単化する場合、一次側電圧は送配電システムと同様にある範囲を持った値となり、厳密に公称電圧を維持できないため、通信を用いずに二次側を制御するためには二次側からの一次側電圧推定が必要となる。

3. 一次側電圧推定

3.1 整流回路と二次側電圧制御による影響

二次側電圧制御を適用した場合のワイヤレス電力伝送システムを Fig. 3 に示す。整流後の二次側電圧 V_{dc} が十分制御されている場合、整流回路から見た負荷は定電圧負荷としてみなせる。また、SS 方式を用いたワイヤレス電力伝送において整流回路に流入する電流はほぼ正弦波となる。二次側電流による電圧変動と整流回路における電圧降下を無視すると、整流前の二次側電圧波形は二次側電流の向きに応じた矩形波と近似でき、その振幅は V_{dc} と等しくなる。

次に、共振周波数における各電圧電流の位相について述べる。

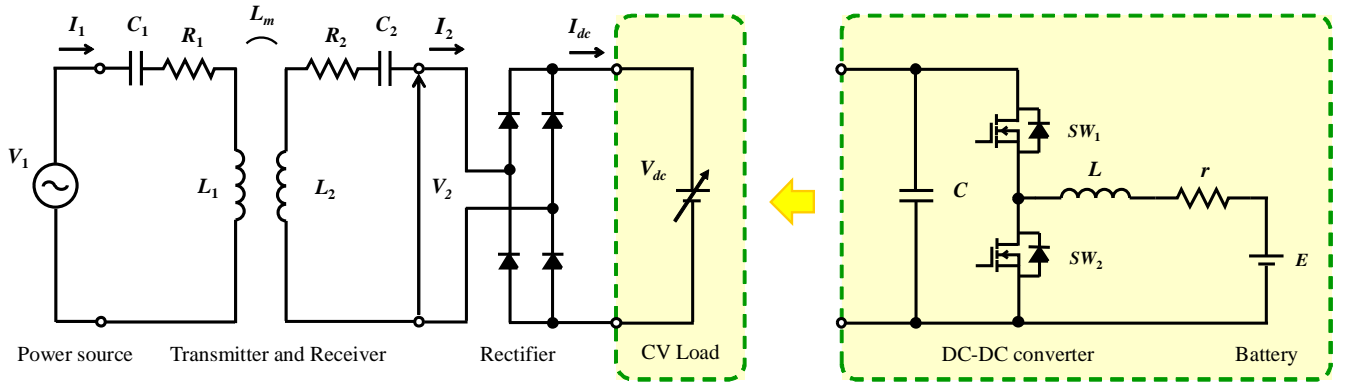


図3 二次側電圧制御を用いたワイヤレス電力伝送システム

Fig. 3 Wireless power transfer system using voltage control on secondary side.

一次側電圧 V_1 を基準とした場合、一次側電流 I_1 は同位相となり、二次側電流 I_2 の位相は 90 度進む [17]。二次側電圧の基本波成分 V_2 は整流回路によって I_2 と同じく位相が 90 度進み、

$$V_2 = j \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \quad (7)$$

と表せる。ここで、 V_{dc} は直流電圧であるため位相を持たない。

従って、 V_1 、 I_1 は同相の正弦波、 V_2 、 I_2 は V_1 から位相が 90 度進んだ正弦波となるため、二次側に整流回路と定電圧負荷を接続したワイヤレス電力伝送システムは Fig. 1 に示す負荷抵抗 R_L を接続した等価回路と同様な回路で表せる。

3.2 推定式の導出

Fig. 1 の回路において (1) 式を満たすとき、インピーダンス行列の定義より V_2 を用いて表すと、

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ j \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & j\omega_0 L_m \\ j\omega_0 L_m & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

が得られる。従って、 I_1 および I_2 は、

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ j \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

より、

$$I_1 = \frac{R_2 V_1 + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \omega_0 L_m V_{dc}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} \quad (10)$$

$$I_2 = j \frac{\omega_0 L_m V_1 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{dc}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} \quad (11)$$

と求められる。(12) 式より、整流後の電流平均値 I_{dc} は、

$$I_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega_0 L_m V_1 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{dc}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} \quad (12)$$

で表される。従って、 V_1 は V_{dc} 、 I_{dc} を用いて、

$$V_1 = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{dc} + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2\} I_{dc}}{\omega_0 L_m} \quad (13)$$

より推定できる。

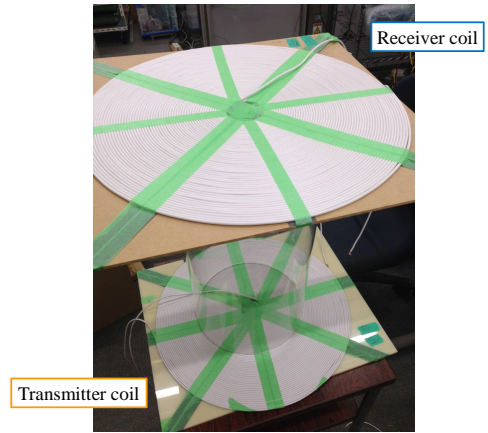


図4 送受電コイル

Fig. 4 Transmitter and receiver coils.

表1 送受電コイルの特性値

Table 1 Specification of transmitter and receiver coils.

	Primary coil	Secondary coil
Resistance R_1, R_2	1.36 Ω	1.44 Ω
Inductance L_1, L_2	638 μH	643 μH
Capacitance C_1, C_2	4051 pF	4011 pF
Resonant frequency f_1, f_2	99.0 kHz	99.1 kHz
Outer Diameter	448 mm	
Number of turns	56 turns	

表2 各伝送距離における送受電コイルの相互インダクタンス

Table 2 Mutual inductance between transmitter and receiver coils in each transmitting distance.

Transmitting distance d [mm]	Mutual inductance L_m [μH]
100	201.0
200	84.3
300	41.5

4. 実験

4.1 実験装置

Fig. 3 に示すシステムを構成し、Fig. 4 に示す送受電コ

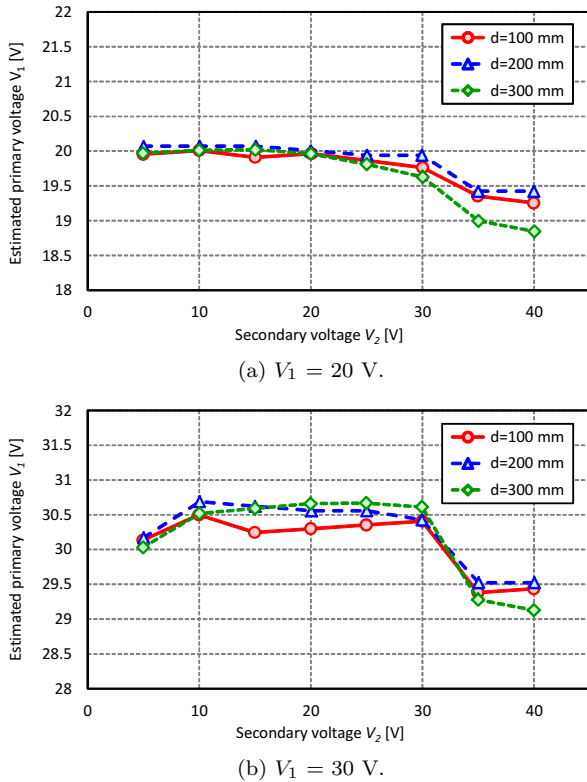


図5 実験結果

Fig. 5 Experimental Results.

イルを用いて電力伝送実験を行う。送受電コイルの特性値を Table 1 に示す。一次側はファンクションジェネレータ (Tektronix AFG3021B) により 99.0 kHz の正弦波電圧を出力し、高速バイポーラ電源 (エヌエフ回路設計ブロック HSA4014) を用いて増幅する。二次側は整流回路を通して電子負荷 (菊水電子工業 PLZ1004W) に接続し、定電圧モードで動作させる。伝送距離は 100 mm, 200 mm, 300 mm の 3 通りとし、各伝送距離における送受電コイルの相互インダクタンスを Table 2 に示す。

4.2 実験結果

一次側電圧 V_1 を 20 V および 30 V として二次側電圧と二次側電流を測定し、一次側電圧の推定を行った。実験結果を Fig. 5 に示す。一次側電圧の推定値は真値とほぼ一致しており、推定式の妥当性が確認できる。二次側電圧が大きくなるにつれて推定値が小さくなる傾向が見られるが、整流回路による電圧降下の影響が考えられる。また、二次側電圧の上昇に伴い給電電力が増加しており、二次側電流が理論式と一致しなくなっていることも原因といえる。

5. ま と め

本研究では走行中ワイヤレス給電における地上設備の簡単化を目的として、二次側情報のみに基づく一次側電圧の推定手法を提案した。二次側電圧制御を適用した場合の整流回路による影響を考慮し、回路解析に基づいて一次側電圧の推定式を導出し、実験により検証した。

今後の課題として、一次側電圧の推定値を用いた最大効率制御ならびに給電電力制御の実現が挙げられる。

- [1] M. Yilmaz, V. T. Buyukdegirmenci, P. T. Krein: "General Design Requirements and Analysis of Roadbed Inductive Power Transfer System for Dynamic Electric Vehicle Charging," in *IEEE 2012 Transportation Electrification Conference and Expo*, pp. 1–6, 2012.
- [2] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S. Jeon and D. Cho: "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Trans. IE*, Vol. 61, No. 3, pp. 1179–1192, 2014.
- [3] K. Lee, Z. Pantic, S. M. Lukic: "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Trans. IE*, Vol. 29, No. 9, pp. 4592–4602, 2014.
- [4] S. Li, C. C. Mi: "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [5] 小原 弘志, 横地 克謙: "電気自動車への走行中非接触給電," 国土技術政策総合研究所, 国総研レポート 2013, ISSN 1347-3387, pp. 108, 2013
- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Jonnopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Expression on 7 June 2007*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [7] 居村 岳広, 岡部 浩之, 内田 利之, 堀 洋一: "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送," 電気学会論文誌 D, Vol. 130, No. 1, pp. 76–83, 2010
- [8] M. Kato, T. Imura, and Y. Hori: "New Characteristics Analysis Considering Transmission Distance and Load Variation in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," in *IEEE 34th International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1–5, 2012.
- [9] M. Kato, T. Imura, Y. Hori: "Study on Maximize Efficiency by Secondary Side Control Using DC-DC Converter in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," in *The 27th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, pp. 1–5, 2013.
- [10] 畑 勝裕, 居村 岳広, 堀 洋一, "長距離伝送における走行中ワイヤレス給電を目指した二次側 DC-DC コンバータによる最大効率制御," 電子情報通信学会技術研究報告, WPT2014-33, pp. 51–56, 2014.
- [11] 平松 敏幸, 黄 孝亮, 加藤 昌樹, 居村 岳広, 堀 洋一: "受電側電圧制御によるワイヤレス給電電力制御におけるフィードフォワード制御器の実験的検証," 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, No. 2-13, pp. II-131-II-14, 2011.
- [12] 居村 岳広, 岡部 浩之, 内田 利之, 堀 洋一: "等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究 – 共振時の電磁界結合を利用したワイヤレス電力伝送 –," 電気学会論文誌 D, Vol. 130, No. 1, pp. 84–92, 2010.
- [13] 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, Vol. 2, pp. II-403-II-406, 2011.
- [14] 宅崎 恒司, 星 伸一: "非接触給電装置の共振回路高効率化のための受電側降圧コンバータの動作条件の検討," 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 10, pp. 966–975, 2012.
- [15] 丸山 貴史, 清水 達也, 秋元 守: "無線電力伝送における等価回路パラメータの推定," 2011 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-5, pp. 5, 2011.
- [16] 三澤 崇弘, 佐藤 忠邦, 田倉 哲也, 佐藤 文博, 松木 英敏: "ワイヤレス給電用コイルのパラメータ推定に関する基礎的検討," 2012 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-2, pp. 2, 2012.
- [17] 郡司 大輔, 居村 岳広, 藤本 博志: "磁界共振結合によるワイヤレスインホイールモータの電力変換回路の構成とその制御に関する基礎研究," 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-071/MEC-14-59, pp. 91–96, 2014.