

走行中ワイヤレス給電における速度推定を用いた 送電回路切り替え制御システム

学生員 岡崎 晃大 正員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一 (東京理科大学)

Transmission Circuit Switching Control System Using Speed Estimation for Dynamic Wireless Power Transfer

Akihiro Okazaki, Student Member, Takehiro Imura, Member,
Yoichi Hori, Fellow (Tokyo University of Science)

In recent years, research on electric vehicles has been active due to environmental issues, and among these, dynamic wireless power transfer has attracted attention because of its ability to contribute to battery miniaturization. However, since the vehicle passes over the transmission circuit continuously and for a short period of time, the control method is important in terms of safety and efficiency. In this paper, we propose a method to achieve a system that can activate the transmission circuit only when a vehicle approaches, by estimating the vehicle speed without using additional detection components or wireless communication. The effectiveness of the proposed system is also verified through experiments.

キーワード : ワイヤレス給電, 走行中ワイヤレス給電, 待機損失, 漏洩磁界

Keywords : wireless power transfer, dynamic wireless power transfer, waiting loss, leakage magnetic field

1. 序論

近年、環境問題の影響から、電気自動車(Electric Vehicle : EV)の研究が盛んになっている。そこで注目されているのが、ワイヤレス給電を利用した、バッテリーの給電技術である⁽¹⁾。これを応用した EV の課題を解決するための手法として、走行中ワイヤレス給電(Dynamic Wireless Power Transfer : DWPT)が挙げられる。これは、走行中の自動車に道路に設置された給電用コイルから、自動車の受電コイルに向けてワイヤレスで給電しバッテリーを充電するというものである。DWPT が実用化されれば、航続距離の延長、バッテリーの小型化による車体の軽量化、低価格化が期待できるが、課題が多く残されている。その中でも、送電コイル上を短時間で通過する DWPT では、効率や安全性を担保できる送電回路の切り替え制御が重要な課題となっている。先行研究では、送電コイルに常に電流が流れている状態となっている前提で待機損失を考慮した研究⁽²⁾や、送電セクションごとの切り替えシステム⁽³⁾があるが、最も効率の良い手法が提案されているとはいえない。また、コイルの単体の切り替えについては、検出用のコイルを用いた手法⁽⁴⁾や、無線通信を用いた手法も検討されているが、これらは追加の部品やエラー、通信遅延の影響があるという欠点もある⁽⁵⁾。本研究では、DWPT の送電システムにおいて、待機損失の低減によるシステム全体

の効率の向上や待機時の漏洩磁界抑制を行うために、速度推定を用いて送電コイル単体を切り替える手法を提案し、実験によりその有用性及び実現性を検証する。

2. 電気自動車に向けた DWPT

本研究で想定している DWPT システムの概要図を Fig.1 に示す。このシステムには磁界共振結合方式が広く利用されており、いくつかの回路構成が提案されている⁽¹⁾が、本研究では LCC-LCC 方式を採用する。Fig.2 に示されるこの回路構成は、電源の角周波数を ω_0 として式(1)のような共振条件を満たす。また、電源から流れる電流の実効値 I_{in} に関して解くと、結合係数 k を用いて式(2)のように表せる⁽³⁾。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_{1p}}} = \sqrt{\frac{C_{1p} + C_{1s}}{L_1 C_{1p} C_{1s}}} = \frac{1}{\sqrt{L'_0 C_{2p}}} = \sqrt{\frac{C_{2p} + C_{2s}}{L_2 C_{2p} C_{2s}}} \quad (1)$$

$$I_{in} = \omega_0^3 C_{1p} C_{2p} k \sqrt{L_1 L_2} V_2 \quad (2)$$

式(2)より、LCC-LCC 方式において、 I_{in} は k に依存する値であるため、送受電コイル間の結合係数が低い状況でも送電側回路に過大な電流が流れない。つまり、回路の誤作動が起きた際の安全面において、実用的な回路構成だと言える。

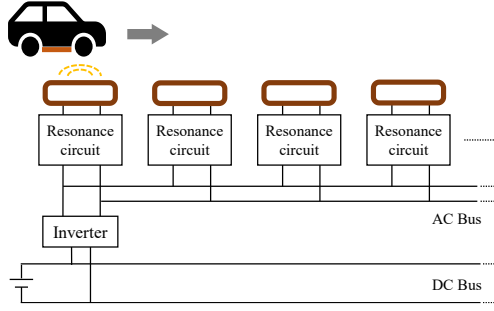


Fig.1 想定する DWPT システム

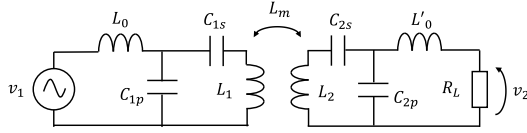


Fig.2 LCC-LCC 回路

3. 速度推定を用いた切り替え制御

〈3・1〉 速度推定法 I_{in} が k に依存する形であると示したが、これは、車両の位置に対して I_{in} が変化するとはいえる。提案する速度推定法は、車両の位置によって変動する I_{in} の特性を利用する。複数の送電コイル上に車両が通過するとき、 I_{in} は k に対して Fig.3 のように変動する。

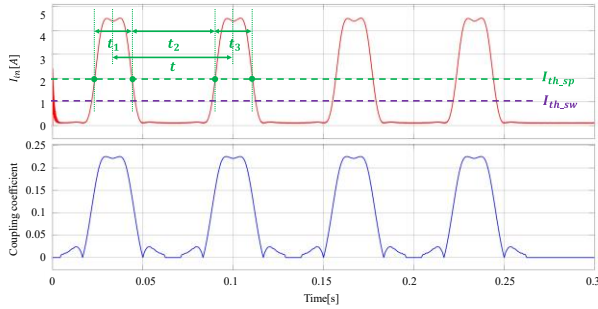


Fig.3 結合係数と I_{in} , I_{th_sp} , I_{th_sw} の関係

Fig.3 より、 k の値に合わせて I_{in} が変動しているのが分かる。この電流波形において、速度推定用電流閾値 I_{th_sp} を設け、緑字の区間で示した時間 t を送電側で計測し、コイル間の距離と合わせることで速度を推定する。なお、 I_{in} の値を取得するために電流センサを用いているが、ノイズが乗る可能性等を考慮し I_{th_sp} には一定の幅を持たせている。また、 t_1 , t_3 を速度推定用の電流閾値 I_{th_sp} を超えた時間、 t_2 を下回った時間、コイル間距離を L とすると、 t は(3)式、推定速度 v_{est} は(4)式で表される。

$$t = \frac{t_1}{2} + \frac{t_3}{2} + t_2 \quad (3)$$

$$v_{est} = \frac{L}{t} \quad (4)$$

この手法は、無線通信や追加のセンサコイル等を利用することなく電流センサのみで速度の推定を行うことができる。また、提案する速度推定法は、送電コイルから給電され

るたびに速度を再計算し更新することができるため、直前のコイルで計算した速度と現在のコイルで計算した速度を比較することで、車両に加速度が生じているかどうかを算出することもできる。

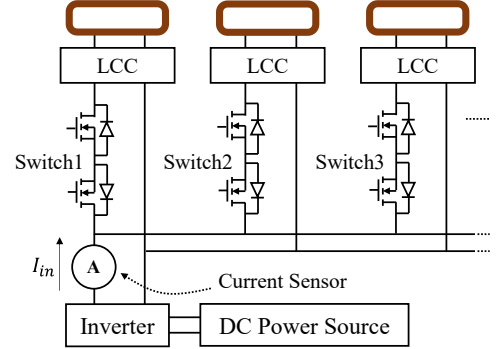


Fig.4 送電側回路の構成

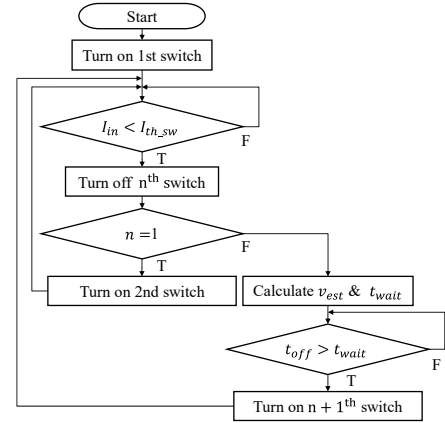


Fig.5 切り替え制御のフローチャート

〈3・2〉 切り替え制御 各送電回路は 1 台のインバータに接続し、スイッチでの切り替えを行っている。スイッチには MOSFET のソースを共通にして向かい合わせにしたものを利用している。この MOSFET に切り替え信号を入力することで、回路のオン、オフ動作を行う。送電側回路の構成は Fig.4 のようになっている。前述した速度推定法によって求めた速度から、車両が次の送電コイルの上に何秒後に到達するかを求めることができる。これをコイルの切り替え制御に利用することで、送電に適した位置に車両が接近したときのみに、送電回路を駆動するシステムを構築することができる。切り替えのタイミングを決める基準には Fig.3 に示すような、速度推定と同様に I_{in} の値を利用しており、 I_{in} が回路切り替えの閾値 I_{th_sw} を下回ったタイミングでスイッチをオフにする。スイッチをオンにするタイミングは、 I_{th_sw} を超える電流が流れる位置に車両が来るまでのスイッチオフ時間 t_{wait} を計算して決定する。具体的には、 t_{wait} の計算終了時にスイッチオフ時間 t_{off} の計測を開始し、 t_{off} が t_{wait} を超えたら次の回路のスイッチをオンにする。また本研究は、速度推定による切り替え制御の基礎的検討であるため、 I_{th_sw} の値に明確な基準は設けていない。なお、提案する速度推定を行うためには、少なくとも隣接する 2 つの回路に

流れる電流情報を取得する必要があるため、2 番目までの回路に限り、速度推定による切り替えができない。提案システムでは、1 番目の送電回路はオン状態で待機させ、2 番目の回路は 1 番目がオフになったタイミングで起動させる切り替え方法をとる。以上の切り替え制御をフローチャートにまとめると Fig.5 のようになる。このように、提案システムは送電側の情報のみで車両の速度を推定できる簡単な構成をしている。また、Fig.4 のようにインバータ 1 台に対して複数の送電回路を接続し、各回路にスイッチをとりつけることで、最小限の構成で切り替えの動作を行っている。

4. 実験

〈4・1〉 切り替え実験 提案した速度推定法を用いた切り替えシステムを、送電コイル 3 個(Tx1, 2, 3)を用いて検証する。送電コイルのサイズはすべて 500 mm×250 mm であり、受電コイル(Rx)は 250 mm×250 mm である。送電コイルの中心から中心の距離は 1000 mm、送受電コイル間のエアギャップは 80 mm とした。Table 1 に実験条件と実験に用いた回路のパラメータを示す。また、実験装置の構成は Fig.6 に、実際の外観は Fig.7 に示す。受電コイルの速度 v は 500 mm/s, 1000 mm/s, 2000 mm/s の Case1~3 で送電コイルの上を通過させた。速度推定の結果は、実験に使用した Myway プラス株式会社製の統合開発環境「PE-View9」に搭載されている、プログラム内の変数をリアルタイムに表示できる Inspector の機能を利用して確認した。速度推定結果を Table 2 に、インバータの出力電圧と各回路に流れる電流波形をそれぞれの速度において Fig.8(a)~Fig.8(c)に示す。

Table 1 共振回路のパラメータ

		Tx1	Tx2	Tx3	Rx
Input voltage	V_{dc} [V]	10	10	10	—
Load resistance	R_L [Ω]	—	—	—	200
Operation frequency	f [kHz]	85	85	85	—
Compensated inductance	L_0, L_0' [μ H]	53.054	49.788	49.550	48.821
Compensated coil resistance	r_0, r_0' [m Ω]	112.54	109.13	97.759	122.36
Transmitter / Receiver inductance	L_1, L_2 [μ H]	205.21	205.587	205.622	111.782
Transmitter / Receiver resistance	R_1, R_2 [m Ω]	110.25	102.44	104.53	57.78
Compensated capacitor	C_{1p}, C_{2p} [nF]	65.241	70.323	70.762	70.721
Resonant capacitor	C_{1s}, C_{2s} [nF]	22.599	22.485	22.493	55.785

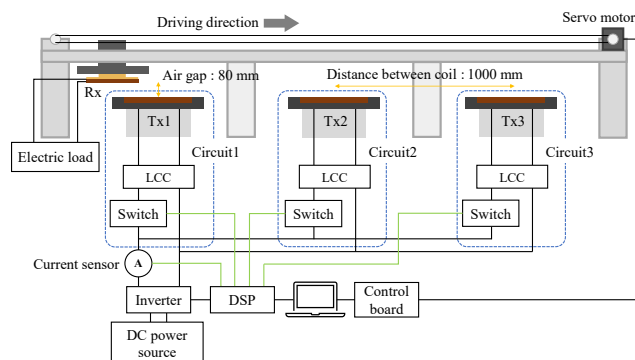


Fig.6 実験装置の構成

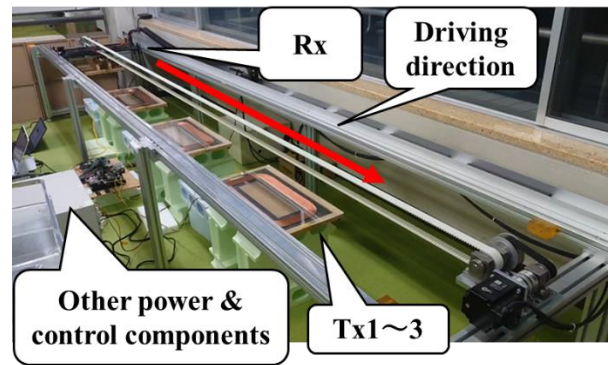
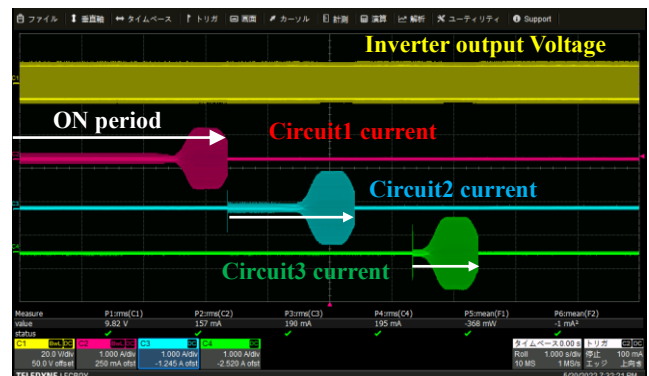
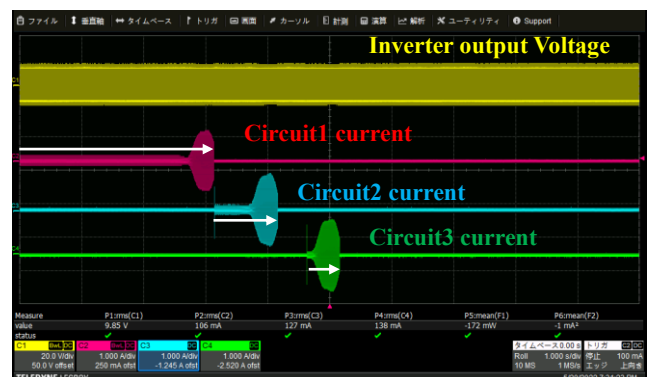


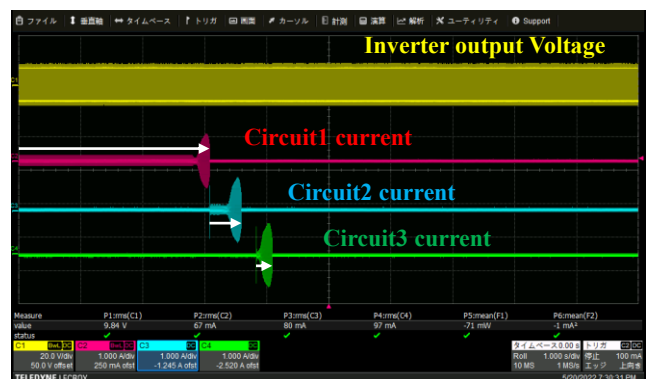
Fig.7 実験装置の外観



(a) $v = 500$ mm/s



(b) $v = 1000$ mm/s



(c) $v = 2000$ mm/s

Fig.8 3つの異なる速度での実験結果

Table 2 速度推定に関する結果

	Case1	Case2	Case3
Driving speed : v [mm/s]	500.00	1000.00	2000.00
Estimated speed : v_{est} [mm/s]	499.26	997.45	1989.15
Estimation error : ε [%]	0.148	0.255	0.543

Table 3 コイルの個数に応じた電力量と効率

Number of coils	E_{in_stand} [Ws]	E_{out_stand} [Ws]	η_{stand}	E_{in_prop} [Ws]	E_{out_prop} [Ws]	η_{prop}
3	7.129	5.464	0.766	6.989	5.316	0.761
4	9.925	7.429	0.749	9.487	7.296	0.769
5	13.110	9.393	0.716	11.986	9.275	0.774
6	16.778	11.358	0.677	14.485	11.255	0.777
7	21.020	13.323	0.634	16.983	13.235	0.779
8	25.929	15.287	0.590	19.482	15.214	0.781
9	31.597	17.252	0.546	21.981	17.194	0.782
10	38.118	19.216	0.504	24.479	19.174	0.783

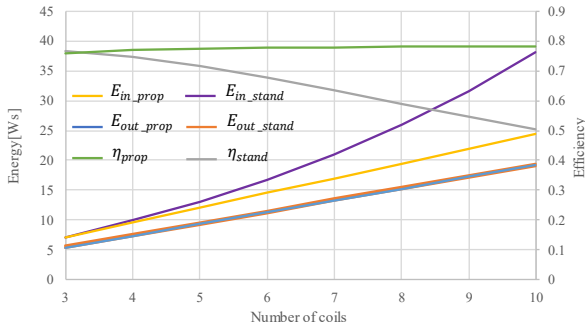


Fig.9 コイルの個数に応じた電力量と効率の比較

Table 2 より速度推定の誤差はどの速度域でも 0.6 %以内に収まり提案した速度推定法の正確性が示されている。Fig.8において、電流波形の近くの白い矢印で示された箇所は、各回路中のスイッチがオンになっている期間である。Circuit1では、初めは待機状態からスタートし、電流閾値 I_{th_sw} を下回るタイミングでオフとなっている。Circuit2では、Circuit1のオフと同時にオンとなり、 I_{th_sw} を下回るタイミングでオフとなっている。Circuit3は、オフで待機し、受電コイルが送電コイルに差し掛かるタイミングでオンとなっていることが分かる。この結果からも、速度推定が正確に行われており、切り替えタイミングが適切に制御できていることが分かる。また、回路切り替えのタイミングで、過渡的な電流が流れているのが分かる。この過渡電流は制御に影響を与えてしまうため、制御に利用する I_{in} は、センサで 100 回取得した値の平均値としており、過渡電流の影響が出ないようにしている。しかし、この手法は一時的な回避策に過ぎず、今後はこの過渡電流自体を抑制する必要がある。この抑制手法には、回路切り替え時にインバータを位相シフト制御し、インバータの出力電圧を徐々に上げるというような手法が考えられる。

〈4・2〉 待機損失と漏洩磁界の低減効果 提案システムは、1 台の車両に対してオンにする回路を常に 1 つとすることができるため、車両が送電コイル上にないときの待機損失の低減効果が期待できる。そこで、コイルをすべて待機させたときと提案システムの送受電の総電力量と区間内の DC 間効率において、3 個のコイルで行った実験結果を換算する形で、コイル 3～10 個が実験と同じ間隔で存在する場

合の比較を行った。また、待機システムの送電側 DC の総送電電力量を E_{in_stand} 、受電側 DC の総受電電力量を E_{out_stand} とし、同様に提案システムの結果を E_{in_prop} 、 E_{out_prop} とする。さらに待機システムの DC 間効率を η_{stand} 、提案システムを η_{prop} として、換算結果を Table 3 に、グラフを Fig.9 に示す。Table 3, Fig.9 より、提案システムは、待機期間中に発生する無駄な電力を削減することができており、その効果はコイルの個数が増えるごとに現れることが分かる。提案システムはコイルが増えた場合でも 78%程度の効率を達成しており、待機損失の影響をほとんど受けていない。なお受電コイルが 1 個のコイル上を通過したときの効率は約 80%である。受電電力量も待機システムとほとんど変わらず、十分に給電を行えていることが分かる。また、回路のスイッチをオフにすることで、送電コイルに流れる電流も遮断できるため、待機時に送電コイルから発生する漏洩磁界を抑制する効果も期待できる。

5. まとめ

本稿では、近くに車両がない場合に送電回路をオフにできる送電回路切り替えシステムを提案した。提案手法は送電側の情報のみで達成できる簡単な構成で誤差 0.6 %以内の速度推定を行い、車両が近づくタイミングを予測して回路を切り替えることが可能である。さらに、待機損失の低減により、コイルの数が増えても全体の効率を落とすことなく十分な給電ができています。結果として、コイルが 10 個ある場合に約 28%の効率差が生じた。また、待機時の送電コイルから発生する漏洩磁界についても抑制効果が期待できる。

今後の課題としては、回路の切り替え時に発生する過度電流の抑制やコイル上の通過時間がさらに短い場合、車両が加速あるいは減速を行いながら送電区間に侵入する場合等の検討が必要である。また、本研究では、DWPT を模擬したベンチでの検証にとどまっているため、実車での検証も行い、車両の影響やエアギャップが異なる車両間での互換性についても検証していく。

文 献

- (1) 武田広大, 古閑隆章: 「磁界結合型非接触給電システムの送受電回路の分離解析に基づく伝送電力性能の可視化」 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.4, pp.330-338 (2021)
- (2) 武田広大, 古閑隆章, 「複数送電コイル並列接続走行中非接触給電における待機損失を考慮した伝送効率最大化と出力電力特性の設計」, 2017 IEICE technical report, vol.117, No.85, pp. 23-28, (2017)
- (3) K. Sasaki and T. Imura, "Combination of Sensorless Energized Section Switching System and Double-LCC for DWPT," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 62-67, (2020)
- (4) D. Patil, J. M. Miller, B. Fahimi, P. T. Balsara and V. Galigekere, "A Coil Detection System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, no. 4, pp. 988-1003, Dec. 2019
- (5) A. C. Bagchi, A. Kamineni, R. Zane and R. B. Carlson, "Comparative Analysis of DWPT Topologies and Regulation Schemes for Improved Controllability," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020, pp. 5199-5206