

大型車向け走行中ワイヤレス給電における 直流電流値を用いたクロスカップリングの影響を受けない 複数対複数の同期整流の提案

学生員 阿部 隼人 正 員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一（東京理科大学）

Proposal for Multiple-to-Multiple Synchronous Rectification Independent of Cross-Coupling Using DC Current Values for Dynamic Wireless Power Transfer for Large Vehicles

Hayato Abe, Student Member, Takehiro Imura, Member, Yoichi Hori, Fellow (Tokyo University of Science)

In recent years, dynamic wireless power transfer (DWPT) research has attracted a great deal of attention. Cross-coupling, especially in DWPT systems for large vehicles, reduces both the power received and efficiency, and should be addressed. In this study, we propose a control method that can ignore the effect of cross-coupling in both transmission and reception, and confirm its usefulness by simulation.

キーワード：走行中ワイヤレス給電，大型車，クロスカップリング，同期整流

Keywords：dynamic wireless power transfer, large vehicles, Cross-coupling, Synchronous Rectification

1. 序論

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて電気自動車 (Electric Vehicle：EV) を普及させるために様々な研究が行われている。しかし、EV はバッテリー容量の技術的制約から内燃機関車より航続距離が短く、EV 普及の大きな課題の一つである。そこで、走行中に無線で電力を供給する走行中ワイヤレス給電 (Dynamic wireless power transfer：DWPT) が研究されている⁽¹⁾⁽²⁾。大型商用車の DWPT システムについては既に大電力を伝送する研究が存在するが⁽³⁾、必要な電力の異なる乗用車と同じ給電路を共用したほうが既存研究の活用ができ、経済的にも合理的であると言える。したがって、大型商用車には乗用車向けの受電コイルを複数用いた受電システムの構築が求められている⁽⁴⁾。

DWPT システムでは 1 つの大きな送電コイルによって複数の受電コイルに対して電力伝送を行う手法が提案されている⁽⁵⁾。しかし、このシステムでは車両の存在しない区間での漏洩磁界を発生させてしまうため、安全性に欠ける。したがって、受電コイルの 2~3 倍程度の大きさの送電コイルを給電路にいくつも並べる手法が主流である。複数入力複数出力 (MIMO) の DWPT システムの場合、送電同士、受電同士の意図しない結合であるクロスカップリングが発生する。このクロスカップリングは受電電力、伝送効率とも

に低下させることが知られており⁽⁶⁾、数学モデルを用いて、クロスカップリングを保証する設計手法などが提案されている⁽⁷⁾。しかし、リアクタンスを保証するため追加素子が必要になるという欠点がある。

そこで本研究では、素子を追加することなく、送電側、受電側クロスカップリングの影響を受けない、受電電力、効率を向上させる同期整流を提案する。また、提案システムについてシミュレーションによって検証を行う。

2. 原理

〈2・1〉 システム構成 本研究では、Fig.1 のような送電コイルおよび受電コイルがともに複数あるシステムについて考える。また、共振回路については Double-LCC 回路を採用している。Double-LCC 回路は Fig.2(a) に示される回路構成であり、電源の角周波数を ω_0 とすると共振条件は (1) 式のように表される。Fig.2(b) のように回路図を変換した場合、 L_{T0} と C_{Tp} 、 L_{R0} と C_{Tp} で構成されるジャイレータ回路は両端子対の定電圧特性と定電流特性を入れ替え、位相を 90° 進めるという特性を持つ。また、送電コイル、受電コイルに現れる誘導起電圧を V_{MT} 、 V_{MR} とすると、入力電流、出力電流は (2) 式のように表される。 V_{MT} 、 V_{MR} はコイル間の結合係数に比例するため、入力電流、出力電流も結合係数に比例することがわかる。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{T0}C_{Tp}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{Tp}+C_{Ts}}{L_T C_{Tp} C_{Ts}}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{R0}C_{Rp}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{Rp}+C_{Rs}}{L_R C_{Rp} C_{Rs}}}} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{in} = \frac{V_{MT}}{\omega L_{T0}} = \frac{jMI_R}{L_{T0}}, \quad I_{out} = \frac{V_{MR}}{\omega L_{R0}} = \frac{jMI_T}{L_{R0}} \dots\dots\dots (2)$$

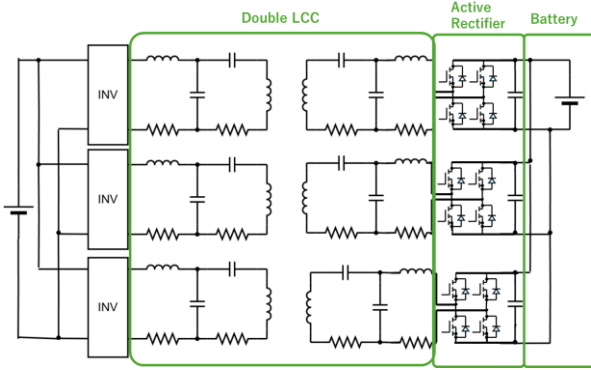
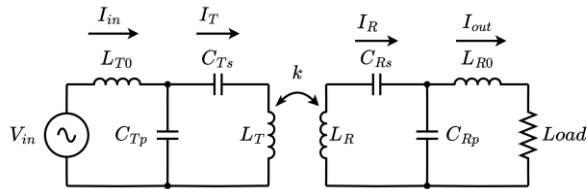
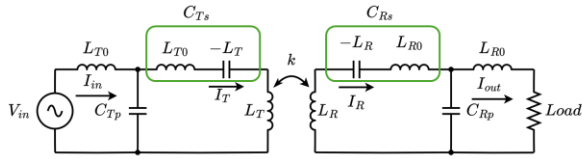


Fig. 1. 複数対複数 WPT システム



(a)回路図



(b)ジャイレータ分解図

Fig. 2. Double-LCC 回路

〈2・2〉 クロスカップリングの影響 Fig.3 のような、送電側・受電側のクロスカップリングを考慮する最小限の回路構成である送電コイル 2 個、受電コイル 2 個のシステムで考える。この時、 k_{T12}, k_{R12} の 2 つの結合は送電同士、受電同士のクロスカップリングを表しており、電力伝送に寄与しない結合となっている。

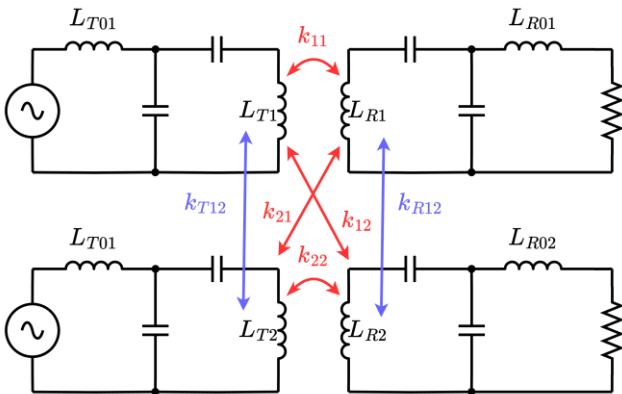


Fig.3. 複数送受電システムの結合

ここでまず送電側のクロスカップリングの影響について 1 つ目の送電コイル L_{T1} を用いて考える。 L_{T1} と受電コイルが結合している k_{11}, k_{12} によって発生する起電力をまとめて V_{MT} 、送電間クロスカップリングによって発生する起電力を V_{MTcc} とすると、送電側回路は Fig.4 のように 2 種類の起電力が発生する。しかし、送電側 LCC のジャイレータ特性によって、送電コイルに流れる電流値は一定である。そのため、送電同士の結合が発生しても、受電側コイルに発生する誘導起電力に変化はない。したがって、送電同士の結合は受電する電力に影響を及ぼさないことが分かる。

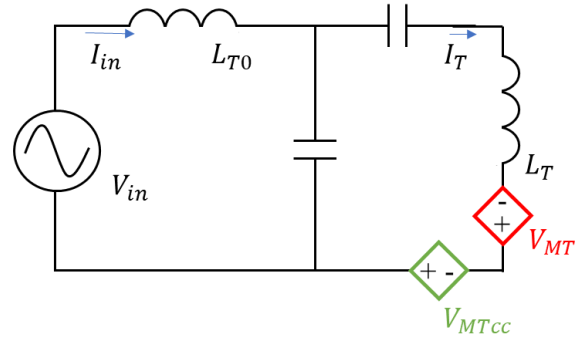


Fig.4. 送電側クロスカップリングの影響

次に、受電側について 1 つ目の受電コイル L_{R1} を用いて考える。 L_{R1} と送電コイルが結合している k_{11}, k_{21} によって発生する起電力をまとめて V_{MR} 、受電間クロスカップリングによって発生する起電力を V_{MRcc} とすると、受電側も送電側と同様 2 種類の起電力が発生する (Fig.5)。この時、負荷側に流れる電流はそれぞれの起電力によって発生する 2 種類の電流が重なって流れることになる。この 2 つのうち V_{MR} によって流れる電流は電力伝送に寄与する電流だが、 V_{MRcc} によって流れる電流は電力伝送に寄与しない。そのため、 V_{MR} によって流れる電流位相に合わせて受電側同期整流器を駆動させることが望ましい。ここで、 V_{MRcc} によって流れる電流の位相を推定することは難しい。一方で、 V_{MR} によって流れる電流は、Double-LCC 回路に含まれる 3 段のジャイレータの影響を考慮すると、 V_{in} の位相から 90° 遅れの位相を持つ電流であることがわかる。したがって、受電側同期整流器を V_{in} の位相から 90° 遅れで駆動することにより受電側クロスカップリングの影響を受けずに電力を受電することが可能である。

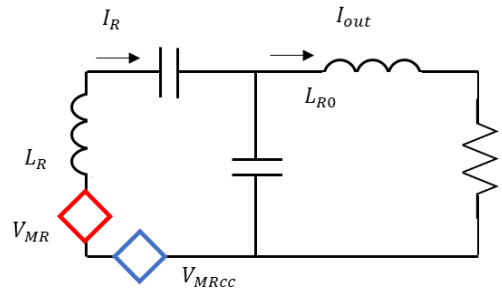


Fig. 5. 受電側クロスカップリングの影響

3. 制御手法

〈3・1〉制御に必要な条件

2章でクロスカップリングを無視するために必要な条件を述べた。実際に制御するために必要な条件は以下の2つである。

- ① 複数ある送電コイルに流れる電流位相を統一させる
 - ② 受電側同期整流器を V_{in} の位相から 90° 遅れて駆動
- ①の条件は、容易に達成することができる。②の条件は、受電側で送電側の位相の情報を取得する必要があるということであり、送電コイルの上を高速で通過するDWPTにおいては送受電間で通信を行うことが難しく、受電側の情報のみで同期整流器の位相を決定しなければならない。受電側の情報のみで同期整流器の位相を決定する研究は多く、その1つに共振コンデンサの電圧や電流のゼロクロス検出を用いる研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾があるが、高周波用センサが高価である点やセンサの伝達遅延などの問題がある。したがって、直流センサのみで位相を決定する手法が望ましい。

〈3・2〉制御概要

直流センサのみを用いて同期整流器の位相を決定する手法として、バッテリーに流れ込む電流値を最大化するように同期整流器の位相を変化させていく研究⁽¹⁰⁾がある。同期整流が達成された時に受電電力が最大になることを利用し、最大電力点を追従させることによって同期整流を達成している。この研究はS-S回路の出力電流が定電流になる特性を活用して制御を行っている。そのため、出力電流が定電流特性を持つDouble-LCC回路でも適応することが可能である。そこで本研究では、バッテリーに流れ込む、3つの受電電流の和が最大になるように同期整流器の位相を変化させていく制御を行う。この時、それぞれの同期整流器の位相はすべて同一である。提案する制御のフローチャートをFig.7に示す。この制御では、電流の変化する勾配を利用して同期整流器の位相 θ を決定している。

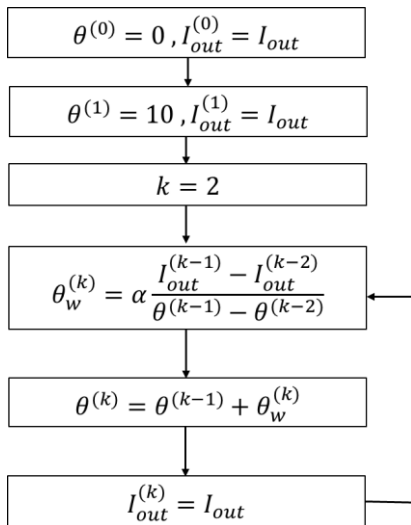


Fig.7. 制御フローチャート

4. シミュレーション

〈4・1〉シミュレーション概要

送電コイル5個、受電コイル3個のDWPTシステムを数値計算ソフトMATLAB上で構築し、シミュレーションを行った。シミュレーションは同期整流器で提案制御を行った場合と、ダイオード整流器を用いて制御を行わなかった場合の2種類を行い結果を比較した。また、Table.1、2に各パラメータ、Fig.8に今回シミュレーションで使った送電コイル5個、受電コイル3個の結合係数を示す。

Table 1. Double-LCC パラメータ

	Tx	Rx
L_T, L_R [μH]	205.8	51.5
r_T, r_R [mΩ]	150	65
L_{OT}, L_{OR} [μH]	49.3	26.4
r_{OT}, r_{OR} [mΩ]	127	134
C_{PT}, C_{PR} [nF]	71.1	132.6
C_{ST}, C_{SR} [nF]	22.4	139.8
Q	732.4	422.9

Table 2. システムのパラメータ

Symbol	Value
V_{DC}, V_{BAT}	200 V, 200 V
Tx coil size	500×200 mm
Rx coil size	200×200 mm
Gap Tx to Rx	100 mm
Speed	20 km/h

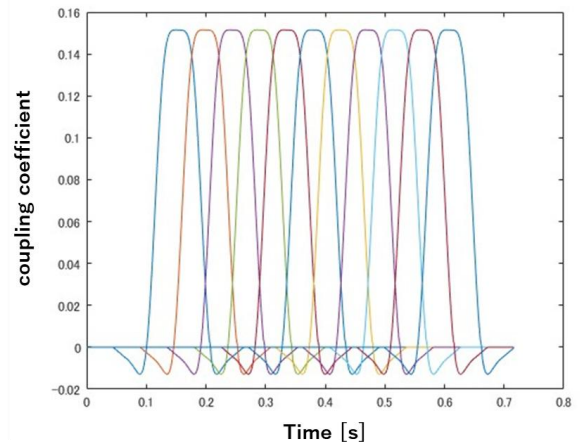


Fig.8. 結合係数

〈4・2〉シミュレーション結果

受電電力、効率の比較をFig.9, Fig.10に、提案制御の同期整流器の駆動する位相角をFig.11に示す。この位相角は、送電側入力電圧からどのくらい遅れているかを示している。Table.3に平均電力と平均効率を示す。平均電力および平均効率は、制御なしの条件において電力伝送が行われている区間である0.07~0.62[s]で平均をとっている。提案制御

を行うことにより、受電電力、効率ともに向上していることが確認でき、平均電力は 54.9%、平均効率は 7.4%の上昇がみられた。Fig.11 より、同期整流器の位相は送電側から 90° 遅れの位相に制御できていることがわかる。90° からの誤差が大きい点について、同期整流器の位相の計算式は、位相を変化させたことによる電流変化のみを用いて位相を決定するが、ここに結合係数が変化したことによる電流変化が含まれ誤差が大きくなったと考えられる。

Table 3. シミュレーション結果比較

	平均電力 [W]	平均効率 [%]
提案制御	1273.1	81.0
制御なし	822.1	73.6

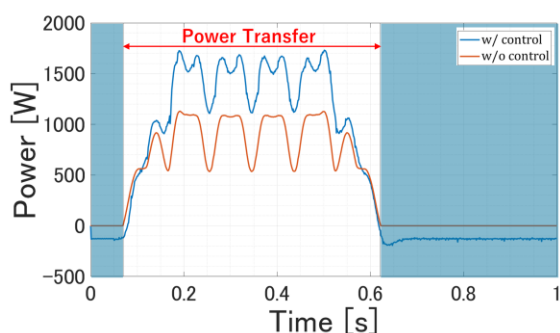


Fig.9. 受電電力比較

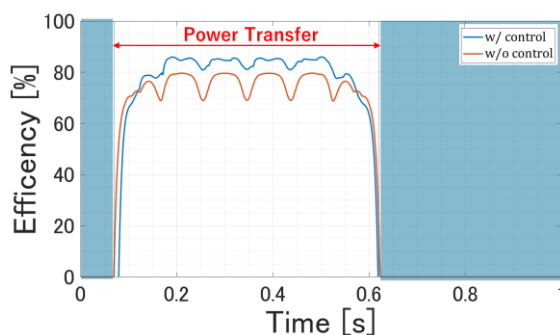


Fig.10. 効率比較

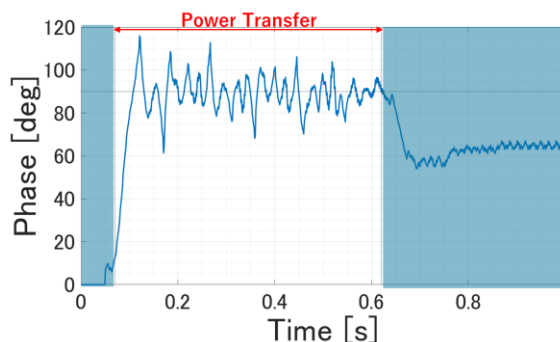


Fig.11. 同期整流器位相角

5. 結論

本研究では、複数送受電システムにおけるクロスカップリングの影響を受けない制御手法を提案し、シミュレーションによってその有用性を検証した。シミュレーションを行った結果、同期整流器の駆動角を送電側から 90° 遅れで駆動させることに成功し、平均受電電力は 54.9%、平均効率は 7.4%向上することを確認した。

今後の展望として、実機実験による検証、速度を上げていった場合に制御が適用できるかの検証を行っていく。

文 献

- (1) C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi and C. T. Rim, "Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles", IEEE Transaction Industrial Electronics, vol. 63, no. 10, pp. 6533-6545, 2016.
- (2) Y. Yamada, S. Hasegawa, T. Imura, Y. Hori, "Coil Design Method Considering Power, Efficiency, and Magnetic Field Strength of Coreless Coils Using Numerical Analysis in Wireless Power Transfer" IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.8 Issue 8, pp.1360-1370 (2023)
- (3) G. Guidi and J. Are Sul, "High power and power density inductive charging system for busses and heavy-duty vehicles," 2023.
- (4) B. J. Varghese et al., "Multi-Pad Receivers for High Power Dynamic Wireless Power Transfer," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020,
- (5) B. Vardani and N. Reddy Tummuru, "A Single Stage Bidirectional Wireless Power Transfer for Multiple Vehicle Charging Application," in 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), Cochin, India, 2020, pp. 1-6.
- (6) T. Kawakami, T. Imura, Y. Hori, "Verification of the Effects of Cross-Coupling on Dynamic Wireless Power Transfer for Heavy-Duty Vehicles Using Double-LCC Circuits", 6th International Electric Vehicle Technology Conference (EVTec2023), Yokohama Japan, May. 2023.
- (7) Fei Yang, Qi Wang, Yu Zhang, "Research on Cross-coupling Compensation Method Based on Multi-transmitter WPT System" in 2023 IEEE 6th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), pp.1041-1045, 21-24 July 2023
- (8) D. Zhang, M. Chen, B. Li, X. Wang, X. Sun and F. Jiang, "Synchronization Strategy Based on Resonant Current Detection for Bidirectional Wireless Charging System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 9, pp. 11436-11449, Sept. 2022.
- (9) T. Fujita, S. Nagai, O. Shimizu, H. Fujimoto and Y. Ohmori, "Resonant Capacitor Voltage Based 85-kHz 3-kW Synchronous Rectification on Wireless Power Transfer System," 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 634-639.
- (10) D. Shirasaki, T. Fujita and H. Fujimoto, "Novel Synchronous Rectification and Receiving Power Compensation Method for WPT Only by DC Current Sensor," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 3, no. 4, pp. 1159-1167, Oct. 2022.