一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report

Double-LCC 補償方式を適用した 3 送電 3 受電走行中ワイヤレス給電システムにおける電流検出型車両検知および位相差切替制御に関する回路シミュレーション検討－3 種類の電流検出方式に関する比較検討－

李 睿昱† 宮入 健 †† 羅煒森††† 居村 岳広††††

†東京理科大学大学院 創域理工学研究科 電気電子情報工学専攻 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641
E-mail: †7325625@ed.tus.ac.jp, ††7325611@ed.tus.ac.jp, †††luo.weisen@rs.tus.ac.jp,††††imura.takehiro@rs.tus.ac.jp

あらまし： EV バスの普及には，航続距離の確保と充電時間の短縮が重要な課題である。走行中ワイヤレス給電では，車両位置に応じた送電区間の迅速かつ安定な切替が求められる。本研究では，Double-LCC 補償回路と N-Legged Inverter を用いた三送電・三受電システムを対象に，3 種類の電流検出方式による車両検知および位相切替制御を検討した。シミュレーション結果より、車両検出および位相切替制御が正常に行われることを確認した。また、3 種類の検出方式における DC-DC 電力伝送効率は、それぞれ 88.9%、89.7%、90.4%となった。いずれの検出方式においても、提案した切替制御が有効性を確認した。

キーワード 走行中ワイヤレス給電，Double-LCC 補償回路，N-Legged Converter，車両検知，位相切替制御，電力伝送効率

Vehicle Detection and Phase-Shift Control for a Multi-Transmitter, Multi-Receiver Dynamic Wireless Power Transfer System Using Double-LCC Compensation and an N-Legged Converter

－Comparison of Three Current-Detection Methods－

Ruiyu LI†, Takeru MIYAIRI††,Weisen LUO†††and Takehiro IMURA††††

†Department of Electrical Engineering, Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510 Japan
E-mail: †7325625@ed.tus.ac.jp, ††7325611@ed.tus.ac.jp, †††luo.weisen@rs.tus.ac.jp,††††imura.takehiro@rs.tus.ac.jp

Abstract: **The widespread adoption of electric buses requires extended driving range and reduced charging time. Dynamic wireless power transfer requires rapid, stable switching of segmented transmitter coils based on vehicle position. This study investigates vehicle detection and phase-shift control for a three-transmitter, three-receiver system employing Double-LCC compensation and an N-Legged Inverter. Simulation results confirm successful vehicle detection and stable phase switching. The DC–DC power transfer efficiencies obtained using the three current-based detection methods were 88.9%, 89.7%, and 90.4%, respectively. These results demonstrate the effectiveness of the proposed switching control for all three detection methods.**

Keywords: **Dynamic wireless power transfer, Double-LCC compensation, N-legged converter, vehicle detection, phase-shift control, power transfer efficiency**

1. 序論

1.1 研究背景

近年，公共交通機関の電動化に伴い，電動バスの充電時間短縮と稼働率向上が求められている。走行中ワイヤレス電力伝送（DWPT）は，道路側送電コイルから車載受電コイルへ非接触で給電することで，充電待機時間や搭載蓄電池容量の低減が期待できる[1]。一方，多送電・多受電構成では，車両移動や位置ずれに伴う結合変動および交差結合により，伝送電力の変動や切替時の不連続が生じる。また，各送電コイルを個

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©20●● by IEICE

別のインバータで駆動すると，装置規模とコストが増大する[2]。そこで本研究では，Double-LCC 補償回路と N-Legged Converter を用い，電流検出に基づく車両検知および位相差切替制御により，変換器数を抑制しつつ安定かつ高効率な電力伝送を実現する。

1.2 研究テーマ

本研究では，電動バス向け DWPT を対象に，多コイル構成における選択励磁制御を検討する。車両移動や横ずれに伴う結合変動，ならびに複数 Tx・複数 Rx 間の交差結合により，伝送電力の変動や切替時の不連続が生じる。そこで，Double-LCC 補償回路を用い，車両位置および結合状態に応じて必要な送電コイルのみを励磁する。これにより，インバータ数の増加を抑制しつつ，待機損失と漏えい磁界を低減し，電力供給の連続性，総伝送電力の安定化および高効率化を図る。

1.3 目標地点

本研究の最終的な目標は N-Legged-Converter を用いた車両検出と切り替えのシステムを用いて以上の課題を解決することが可能なシステム構成において待機損失と漏洩磁界の問題を解決した車両検出と切り替えのシステムの提案を行うことを本研究の目的とする

2. 先行研究

走行中ワイヤレス電力伝送（DWPT）の車両検知に関して，小林は，送電コイルへの電圧パルス印加時に生じる送電側電流応答の変化を利用したセンサレス検知手法を提案した[3]。羽田らは実車走行試験により，車両移動時にも同手法が有効であることを示した[4] Tokita は，電流過渡応答の包絡線モデルを用いて検知閾値の設計法を提案し，検知精度の向上を図った[5]。また，佐々木は Double-LCC 補償回路とセンサレス区間切替を組み合わせ，車両存在区間のみを選択的に励磁する構成を提案した[6]。さらに，小林は N-Legged Converter の位相差制御により，各送電コイルの電圧制御と待機損失低減を実現した[7]。しかし，従来研究は主として車両検知および給電区間の切替を対象としており，複数 Tx・複数 Rx の同時結合時における電力配分の平滑化と総伝送電力の安定化については，十分な検討がなされていない。

3. 原理

3.1 WPT の分類

無線電力伝送（WPT）は，近傍界を利用する結合型と，電磁波または光を利用する放射型に大別される。結合型には磁界結合方式および電界結合方式があり，それぞれ非共振方式と共振方式に分類される。一方，放射型は長距離伝送に適するものの，伝送効率，安全性および設備コストの観点から，地上交通インフラへの適用には課題がある。

電動車両向け DWPT では，伝送距離，位置ずれ耐性および大電力伝送への適合性から，磁界共鳴結合方式が有力である[8]。送受電側に補償コンデンサを設け，所定周波数で共振させることにより，空隙や結合係数の変動が存在する条件でも高効率な電力伝送が期待できる。ただし，金属異物による渦電流損失や発熱の可能性があるため，磁気構造，検知機構および制御系を含めた安全設計が必要である。

3.2 S-S、S-P、P-S、P-P、Double-LCL、Double-LCC 方式

磁界共鳴結合方式には S-S，S-P，P-S，P-P などの補償トポロジがある。S-S 方式は構成が簡単で定電流特性を得やすい一方，弱結合・無車状態では入力電流が増大する可能性がある。これに対し，Double-LCL および Double-LCC 方式は送電側電流の安定化に有効である。特に Double-LCC 方式は，Double-LCL 方式より補償インダクタンスを低減でき，良好な共振特性と高効率を両立できるため，大電力 DWPT への適用に適している[9]。

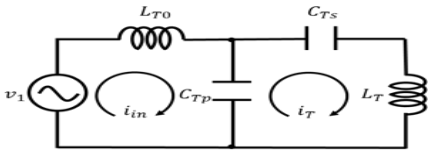


図 1Double-LCC 方式の送電側等価回路 (***k***=0)

$$Z_{in,SS,k=0} = j\omega L_T - j\frac{1}{\omega C_T} \tag{1.1}$$

$$L_m = k\sqrt{L_T}L_R \tag{1.2}$$

$$Z_{in,LCC} = \frac{1}{L_m^2}\frac{L_{R0}}{\omega^2 C_{Tp} C_{Rp} R_L}\left(L_T - \frac{1}{\omega^2 C_{Ts}}\right)$$

$$= \frac{1}{k^2}\frac{L_{R0}}{\omega^2 L_T L_R C_{Tp} C_{Rp} R_L}\left(L_T - \frac{1}{\omega^2 C_{Ts}}\right) \tag{1.3}$$

$$i_{in} = \frac{v_1}{Z_{in,Lcc}} = \frac{v_1 k^2 \omega^2 L_T L_R C_{Tp} C_{Rp} R_L}{L_{R0}\left(L_T - \frac{1}{\omega^2 C_{Ts}}\right)} \tag{1.4}$$

3･3 NLC(N-Legged-Converter)

多数の送電コイルを個別に制御するため，N-Legged Converter（NLC）を導入する。NLC は複数のインバータレグが直流母線を共有し，隣接レグ間の位相差により各送電コイルの端子電圧を調整する構成である。これにより，インバータ数の増加を抑制しつつ，各給電区間の柔軟な電圧制御が可能となり，分割区間給電および車両検知制御の基盤を構成する。

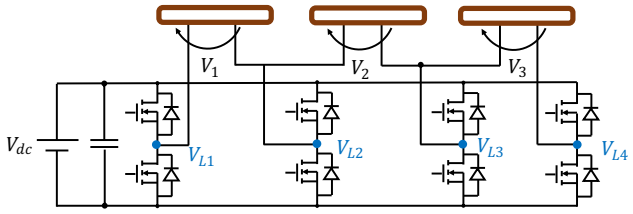


図 2 N-Legged Converter (NLC)

3.4 3 送電･3 受電 DWPT システム

本研究では，3 組の送電コイルと 3 組の受電コイルから構成される 3 送電・3 受電 DWPT システムを対象とする[10]。受電コイルは 800×600 mm，送電コイルは 1300×600 mm とし，受電コイル間隔を 400 mm，送受電間ギャップを 195 mm に設定した。各送受電部には Double-LCC 補償回路を適用し，直流電圧 500 V，動作周波数 85 kHz の条件で，N-Legged Converter による各送電コイルの協調制御を行う。

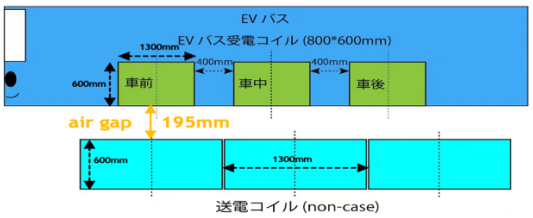


図 3. 3 送電・3 受電 DWPT システムにおける送受電コイルの配置および寸法

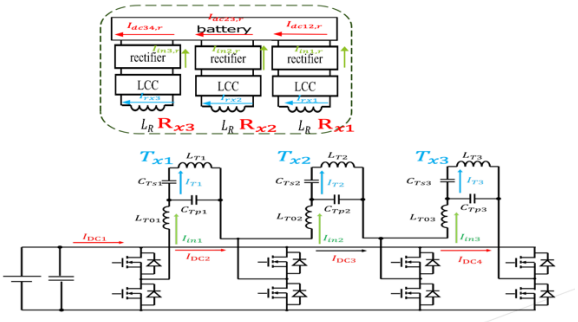


図 4 システム全体構成図

4. EV バス検知を用いた切り替え手法

4･1 車両検知手法

走行中無線電力伝送（DWPT）では，道路上に分割配置された送電コイルに対し，車両の進入検知，対象区間の判定，および給電状態の切替を短時間で完了する必要がある。一方，全区間の常時励磁は待機損失や漏えい磁界の増大を招く。Double-LCC 補償回路は弱結合時の過電流抑制に有効であるが，実機では寄生抵抗や共振ずれに起因する損失が不可避であり，完全な待機損失の排除は困難である。したがって，待機損失と不要磁界の低減には，車両検知に基づく高精度かつ高速な区間切替制御が不可欠である。

4･2 従来の検知／切替方式とその限界

既存の受電検知および送電切替手法は，(1)追加検知コイル，(2)探索パルス，(3)意図的デチューン，(4)インバータ単位切替の 4 種に大別される。しかし，これらは検知確実性と低損失・低漏えい磁界化の間に明確なトレードオフが存在し，構成素子増によるハードウェアコストの増大，あるいは待機通電に伴う電力損失や電磁ノイズの残存が共通の課題となる。

本稿ではこの課題に対し，Double-LCC 補償の電流特性に基づくセンサレス電流監視検知と，N-Legged Converter（NLC）の位相制御を融合させた新たな切替フレームワークを提案する。本方式は，ハードウェアの複雑化を抑えつつ「低電圧待機による高信頼な車両検知」と「判定直後の瞬時昇圧伝送」を両立し，待機損失および不要磁界の極小化を実現する。

4･3 電流I_{in}，I_{DC}による車両検知

原理で述べたように、Double-LCC 回路において、インバータから WPT 回路への入力電流I_{in}は(1.5)のようになる。

$$I_{in} = {\omega_0}^3 C_{Tp} C_{Rp} k \sqrt{L_T L_R} V_2$$

I_{in}が結合係数kに比例することから、Double-LCC 方式において、電流値をモニタリングすることで、車両の検知が可能となる。

4･4 電流I_Tによる車両検知

もう一つの判定指標は，特定動作状態における Double-LCC の等価回路に基づく。例えば整流器後段が「開放等価」とみなせる場合，回路の等価化といわゆる「ジャイレータ特性」の観点から，系全体を条件付きで S–S 系に近い構造として捉えることができる。これにより，「結合が増大すると，逆に片側の電流が減少する」という検知傾向が導かれる。すなわち，結合が大きい領域では電流が小さくなるため，この電流変化を車両が目標区間に進入したか否

4･5 切替方法：低電圧待機検知＋検知後 180°位相切替による昇圧伝送（NLC）

本研究では，電流監視によるセンサレス車両検知と N-Legged Converter（NLC）の位相制御を統合した給電切替方式を提案する．待機時には隣接 Leg 間の位相差を縮小し，送電コイルの端子電圧を低減することで，待機損失および漏えい磁界を抑制する．同時に，この低電圧待機状態における入力電流の変動から車両進入を検知する．車両を検知した後は，位相差を 180°に即時切り替え，送電電圧を最大化して速やかに通常給電へ移行する．本方式は，追加の検知回路を要さず，かつ同一変換器内で制御が完結するため，システム構成が簡素であり，DWPT における高速な区間切替要求に適合する。

5. 実験結果

5･1 待機位相差に対する損失特性の評価

Simulink 内にて待機時の NLC の位相差を 180°、60°、30° 10° の 4 パターンで位相シフトし、車両検知を行った際の送電側の損失を Fig.4 に示す。Fig.4 の結果から、待機時 180° で 7.5W、60° で 3.6W、30° で 1.4W、10° で 0.1W であることから、制御時に位相シフトを行い、位相差が小さくなるほど、待機損失が低減できることが確認できた。また、DCDC 電力から待機時 180° で 1.4W、60° で 1.5W、30° で 6.4W、10° で 8W であることから、位相差が小さくなりすぎると、インバータのハードスイッチングにより DC 損失が大きくなることがわかる。以上より、本研究では、待機時の位相差は 60° のパターンとした。

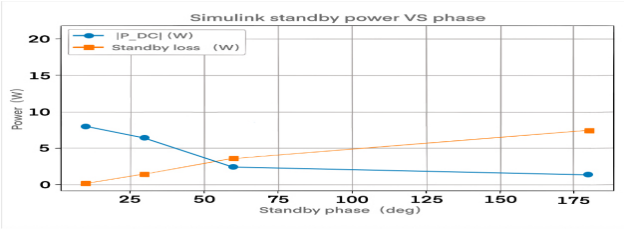


図 5 待機位相差と直流側スイッチング損失・待機損失の関係

5･2 I_{DC}を監視する 3 対 3 のシミュレーション

3 送電・3 受電 DWPT システムに対し，送電側直流電流I_{DC}を監視量とした車両検知および位相差切替制御を適用した。直流母線電圧を 500 V とし，I_{DC} >0.32 A で位相差を 60°から 180°へ切り替え，I_{DC} <0.26 A で 180°から 60°へ復帰制御を導入した。シミュレーション結果より，各送電区間において車両位置に応じたI_{DC}の変化を検出し，対応する位相差が安定に切り替わることを確認した。また，受電側電流も車両移動に伴って連続的に変化し，送電側直流入力電力約 900 W に対して受電側直流出力電力約 800 W が得られ，DC-DC 電力伝送効率は 88.88％となった。

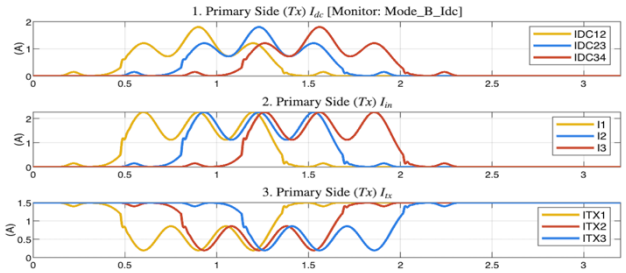


図 6 I_{DC}監視時における送電側各部電流波形

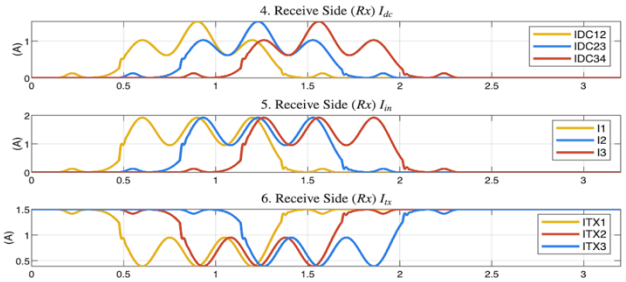


図 7 I_{in}監視時における受電側各部電流波形

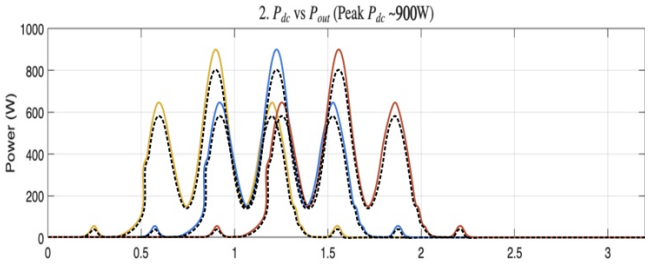


図 8 I_{DC}監視時における入出力電力波形

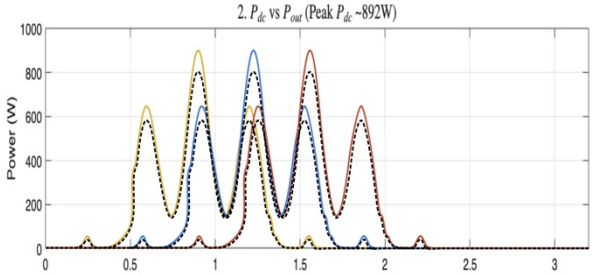


図 11 I_{in}監視時における入出力電力波形

5･3 I_{in}を監視する 3 対 3 のシミュレーション

3 対 3 DWPT システムにおいて，送電側入力電流I_{in}を監視する制御フローの動作検証をシミュレーションにより行った。直流母線電圧 500 V の下，車両進入検知I_{in}> 0.45A に伴い NLC の位相差を60˚から180˚へ切替えて瞬時伝送を開始し，退出検知I_{in}< 0.37A により低電圧待機状態へ自動復帰することを確認した。車両の走行に伴い給電区間が順次正確に切替わり，受電側へ安定した電力が伝送された。送電入力電力 892 W に対し受電出力電力 800 W が得られ，最大 DC-DC 伝送効率 89.69%を達成した

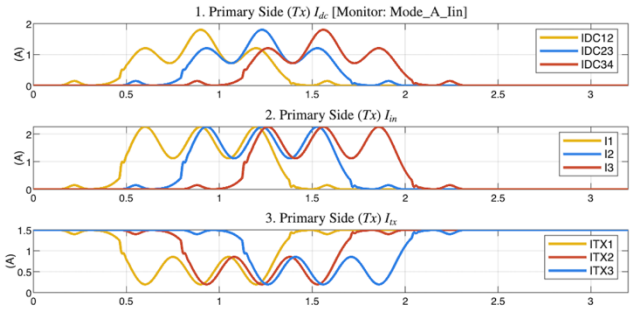


図 9 I_{in}監視時における送電側各部電流波形

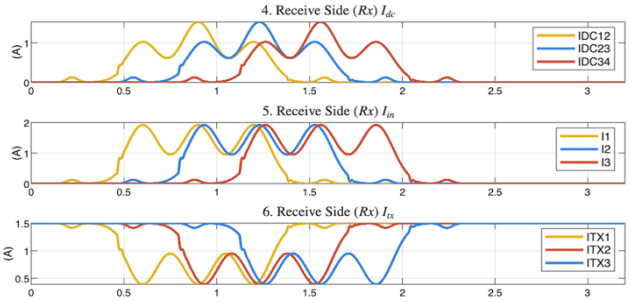


図 10 I_{in}監視時における受電側各部電流波形

5･4 I_{Tx}を監視する 3 対 3 のシミュレーション

3 対 3 DWPT システムにおいて，送電コイル電流I_{Tx}を監視指標とする制御切替フローのシミュレーション検証を行った。直流母線電圧 500 V の下，車両進入に伴いI_{Tx}が閾値 1.15 A 未満に低下した際，NLC の位相差$\Delta\theta$を60˚から180˚へ即時切替えて昇圧伝送へ移行する。一方，車両離脱によりI_{Tx}が 1.22 A を超過した際は，$\Delta\theta$を60˚へ復帰させて低電圧待機状態を維持する。本制御により順次給電切替が安定して追従し，受電側へ連続的な電力を供給できた。送電入力電力 885 W に対し受電出力電力 800 W を得て，最大 DC-DC 効率 90.40%を達成しした。

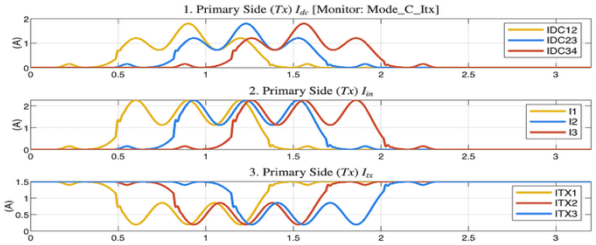


図 12 I_{Tx}監視時における送電側各部電流波形

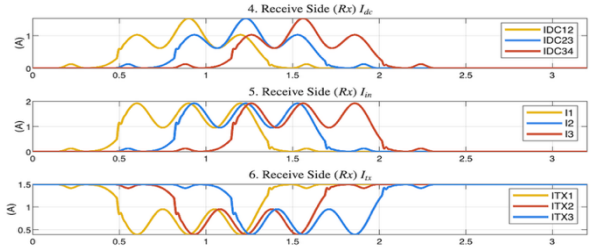


図 13 I_{Tx}監視時における受電側各部電流波形

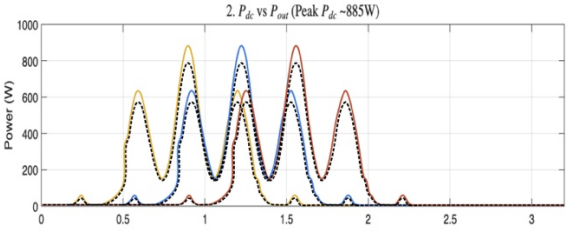


図 14 I_{Tx}監視時における入出力電力波形

5･5 送電側インピーダンス変動に対する制御安定性の検証

実機におけるパラメータばらつきに対する制御の堅牢性を検証するため，送電側インピーダンスを定格値から±5%および±10%変動させた際の動作特性を評価した。進入閾値 0.32 A，退出閾値 0.26 A の固定条件の下，いずれの変動下においても，全相において NLC の位相差切替が誤動作なく安定して追従した。車両位置に応じた正確な給電開始・停止動作が維持されたことから，提案する電流監視型の位相制御フレームワークが，送電側の回路パラメータ偏差に対して優れた堅牢性と実用性を有することを実証した。

6 むすび

本研究では，Double-LCC 補償および N-Legged Converter を適用した 3 送電 3 受電 DWPT システムにおいて，電流監視型車両検知と NLC 位相差切替制御を提案した。回路シミュレーションによる評価の結果，監視指標（I_{DC},I_{in},I_{Tx}）を問わず高精度な車両検知とスムーズな区間切替動作が実現され，88.9%～90.4%の良好な DC-DC 伝送効率を得た。さらに，送電側インピーダンスの±5%および±10%変動下でも誤動作なく安定動作を維持し，高いロバスト性を確認した。以上より，本方式が待機損失および漏えい磁界を最小化しつつ，安定な走行中給電を実現する有効な手法であることを実証した。

文　献

[1] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, “Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol.63, no.10, pp.6533–6545, Oct. 2016.

[2] S. Zhou, C. Zhu, S. Cui, Z. Wang, S. Zhou, and C. C. Chan, “Dynamic wireless power transfer system for electric vehicles employing multiplexing LCC modules with individual.

[3] D. Kobayashi, K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, and Y. Hori, “Sensorless vehicle detection using voltage pulses in dynamic wireless power transfer system,” Proc. 29th Int. Electric Vehicle Symp. (EVS29), Montreal, Canada, June 2016. transmitters,” IEEE Access, vol.6, pp.62514–62527, 2018.

[4] K. Hata, K. Hanajiri, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori, M. Sato, and D. Gunji, “Driving test evaluation of sensorless vehicle detection method for in-motion wireless power transfer,” Proc. 2018 Int. Power Electron. Conf. (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), pp.663–668, Niigata, Japan, May 2018.

[5] K. Tokita, K. Hata, H. Fujimoto, and Y. Hori, “Sensorless vehicle detection using voltage pulses with envelope model for in-motion wireless power transfer system,” Proc. 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON 2019), pp.4329–4334, Lisbon, Portugal, Oct. 2019.

[6] K. Sasaki and T. Imura, “Double-LCC を用いた走行中ワイヤレス電力伝送におけるセンサレス送電区間切替システム,” 電気学会研究会資料, PE-20-024-034/PSE-20-029-039/SPC-20-078-088, pp.13–18, March 2020.

[7] K. Kobayashi, T. Imura, and Y. Hori, “A method for reducing standby losses by vehicle detection and switching control in a system configuration for multiple vehicles in dynamic wireless power transfer,” Proc. 2023 IEEE Wireless Power Technology Conf. and Expo (WPTCE 2023), pp.201–206, San Diego, USA, June 2023.

[8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” Science, vol.317, no.5834, pp.83–86, July 2007.

[9] K. Ikeda, T. Imura, and Y. Hori, “Maximum efficiency control in dynamic wireless power transfer with Double-LCC topology,” 信学技報, vol.122, no.68, WPT2022-14, pp.2–7, June 2022.

[10] N. Sakata, T. Imura, and Y. Hori, “Circuit configuration on receiver side for wireless power transfer to heavy duty vehicles in motion using Double-LCC system,” 信学技報, vol.124, no.427, WPT2024-42, pp.20–25, March 2025.