

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

佐々木 寛太* 居村 岳広 (東京理科大学)

Sensorless Transmission Section Switching System
for Dynamic Wireless Power Transfer Using Double-LCC
Kanta Sasaki*, Takehiro Imura, (Tokyo University of Science)

Abstract

Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) systems can improve cruising range and reduce capacity of battery of electric vehicles. DWPT system is required to achieve high efficiency of power transmission without complex circuit or control. In this study, a new DWPT system which can transmit safely by using Double-LCC topology and efficiently by using power transmission section switching system with sensorless vehicle detection method is proposed. The effectiveness of the proposed systems was verified by experiments.

キーワード: ワイヤレス電力伝送, 磁界共振結合, 走行中ワイヤレス電力伝送, double-LCC回路

(Wireless power transfer, Magnetic resonance coupling, Dynamic wireless power transfer, double-LCC topology,)

1. はじめに

近年, 磁界共振結合を用いた, 無線電力伝送(Wireless Power Transfer: WPT)技術への注目が高まっている. 磁界共振結合方式は, 従来の共振を用いない電磁誘導方式による電力伝送と比べて送受電機器間の距離を広く取っても高い効率で送電できるため, 無線電力伝送の可能性を高める技術として盛んに研究されている⁽¹⁾. スマートフォンなどの家庭用デバイスから人工心臓などの医療用機器まで, 広い分野の様々なデバイスへの応用が検討されているが, 特に電気自動車への走行中ワイヤレス給電は電気自動車の普及を促進する一つの手段として高い関心を集めている. この技術が実用化されると, 電気自動車に搭載するバッテリーの容量を最小限にすることができ, 車両重量や価格の低減だけでなく, 充電のために要する停車時間がなくなるために利便性も格段に上がる. 本稿では, 走行中給電の実現に必要な不可欠な地上側システムからの車両の検知及びインバータのON/OFF制御を, 安全かつ簡易に行う手法を提案し, 実験により有用性および実現可能性を検証する.

2. 電気自動車への走行中ワイヤレス給電

〈2・1〉 磁界共振結合を用いたワイヤレス給電 電動歯ブラシ等の小型家電へのワイヤレス給電はすでに製品化されて久しく, 一般家庭に広く普及している. 従来広く用い

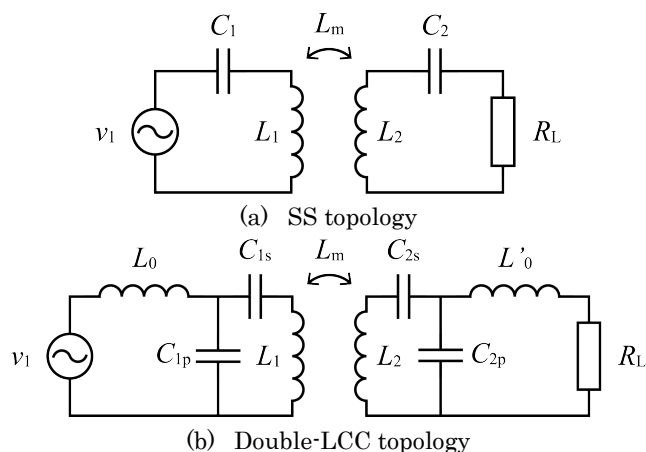


図 1 WPT システムの等価回路

Fig.1 Equivalent circuits of WPT systems.

られてきた磁界結合による電力伝送は, 電磁誘導方式と呼ばれるものである. この技術を用いた給電システムは, 送受電機器間で電氣的な接点はないものの, 効率よく給電するために機器間のギャップを数 mm から数 cm の小さいものにすることがあり, ワイヤレスではあるものの, 機器同士は物理的にほぼ接触した状態で用いられてきた. しかし, 2007 年にマサチューセッツ工科大学の研究者らが発表した磁界共振結合(磁界共鳴)を用いた無線電力伝送⁽²⁾では, コイルの直径と同程度かそれ以上の距離で高効率な送電を可能

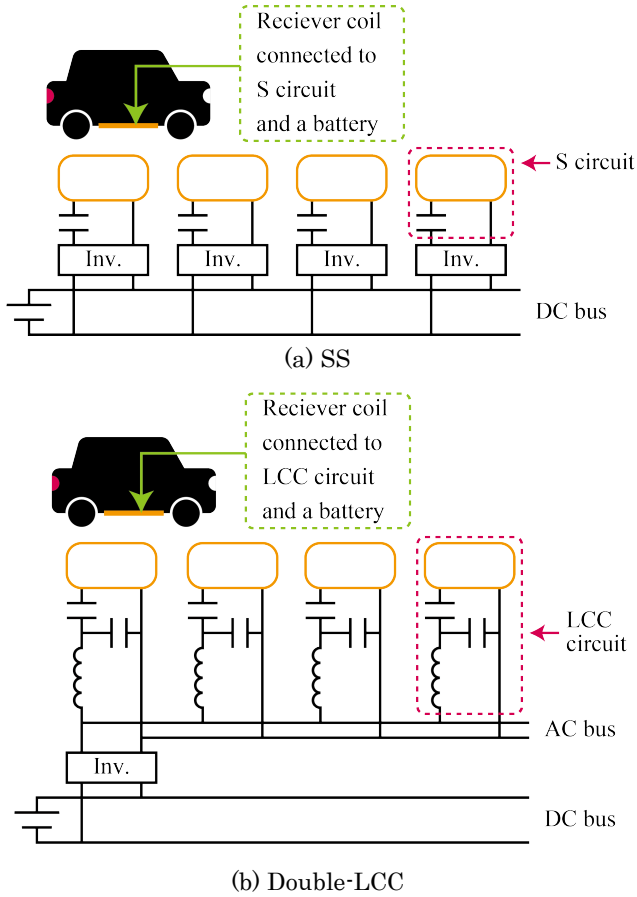


図 2 DWPT システムの概要

Fig.2 Illustrations of two systems of DWPT.

とした．この方式はコイル面と平行な方向の位置ずれが大きい場合においても高い効率で電力伝送を行うことが可能であるため，移動体へのワイヤレス給電に適した方法であると言える．

〈2・2〉 システム構成 走行中ワイヤレス給電はコイルの敷設方法と回路方式によって大別される．コイルの敷設方式に関しては，KAIST が研究をしている⁽³⁾自動車の進行方向に沿って非常に長いコイルを敷設して給電する **Single Coil Design** や，東京大学などが研究している⁽⁴⁾車と同程度かそれ以下の大きさのコイルを路面に多く敷設する **Segmented Coil Design** 等が検討されている．走行中給電路に対しては，できる限り損失を低く抑えることに加えて周囲への漏洩磁界を抑制したいという要求が存在するため，後者が有利であると考えられる．

また，回路方式に関しては，Fig.1(a)に示すような，送電コイルに対して直列にコンデンサを接続する **SS(Series-Series)**方式や，Fig.1(b)のような，ジャイレータ特性を持つ **LCL** フィルタを応用した **Double-LCC** 方式を用いたものなどが提案されている．SS 回路上のインダクタンス及びキャパシタンスは電源の周波数を f_0 として，次式の共振条件を満たすように設計される．

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

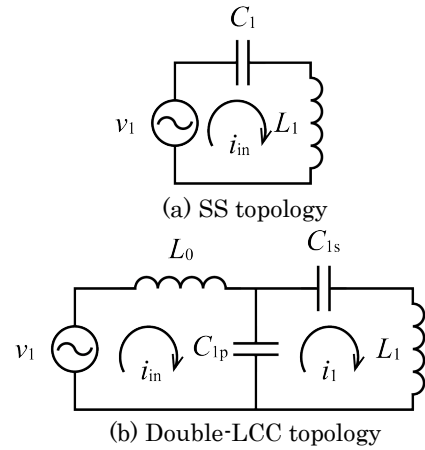


図 3 結合係数 0 での一次側等価回路

Fig.3 Equivalent circuits of primary circuits when coupling coefficient is 0.

SS 方式は後述する **Double-LCC** 方式と比較して素子点数を減らすことができ，素子による損失を抑えられるという特徴を持つ．**Double-LCC** 方式は各閉路で LC 共振を起こすように設計され，インダクタンスとキャパシタンスは次式の共振条件を満たす．

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_{1p}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{1p} + C_{1s}}{L_1 C_{1p} C_{1s}}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_0 C_{2p}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{2p} + C_{2s}}{L_2 C_{2p} C_{2s}}} \end{aligned} \quad (2)$$

電圧源が接続された **Double-LCC** 回路は送電コイルから電源側を見込むと，**LCC** 回路のジャイレータ特性により電流源が接続された状態となるため，一つのインバータで複数のコイルを同時に駆動することができるという特徴を持つ．両者はともに走行中給電に適した方式とされ，SS 方式，**Double-LCC** 方式を用いた走行中給電システムはそれぞれ Fig.2(a),(b)のように構成される．

SS 方式と **Double-LCC** 方式を結合係数が 0 の時の特性に注目して比較する．結合係数が 0 の時の SS 方式，**Double-LCC** 方式の一次側等価回路をそれぞれ Fig.3(a),(b)に示す．Fig.3(a)は共振回路に電圧源をつないだだけの状態である．従って，電源から見た回路のインピーダンスは 0 であり，交流短絡状態となる．そのため，SS 方式は車両が乗っていないコイルにつながれた電源は必ず **OFF** にする必要がある．一方で，Fig.3(b)の **Double-LCC** は送電コイル L_1 を含む閉ループが反共振状態となるため，電源からは電流が流れ込まない．そのため，インバータの出力電流は自動車の往来に伴って受動的に切り替わり，外部からの制御なしに運用することができる．実際には電源容量などの制約により，一つのインバータに接続できるコイルの数は限られるが，いずれにしても **Double-LCC** 方式は SS 方式のように交流短絡状態に至るリスクがないため比較的安全に運用することができると言える．社会インフラとして機能することになる走行中ワイヤレス給電システムには極めて高い安全性が

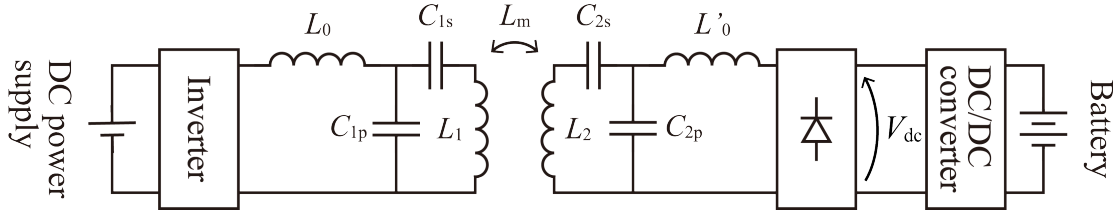


図 4 バッテリーに接続された Double-LCC 回路

Fig.4 Double-LCC topology connected to a battery.

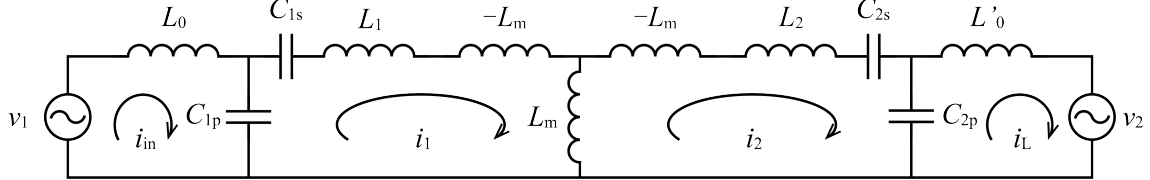


図 5 バッテリーに接続された Double-LCC 回路の T 型等価回路

Fig.5 Analysis model of Double-LCC topology connected to a battery.

要求されることになるため、回路方式としては Double-LCC が適していると考えられる。

〈2・3〉 送電区間切り替え Double-LCC 方式を用いた走行中給電システムにおいて、一つのインバータに接続された送電コイル群は一括で駆動される。このコイル群で形成される区間を本稿では送電区間と呼ぶ。Double-LCC 方式の特性上、すべての送電区間につながれた電源を常に ON 状態にしても運用可能であるが、コイルの内部抵抗による待機損失が生じるため、自動車が走行中の送電区間のみ ON することが望ましい。これを実現するためには、地上側システムが自動車の存在を検知し、適切なタイミングで送電区間の ON/OFF 切り替えを行う必要がある。自動車の検知を行う方法は大きく分けて 2 種類提案されている。一つは磁気センサなどの付加的なセンサを用いる方法⁽⁵⁾、もう一つは送電コイルそのものをセンサとして用いる方法⁽⁴⁾である。装置故障のリスクやシステムのコスト低減の観点から、後者が適していると考えられる。送電コイルそのものをセンサとして用いる方法は、送電コイルに車両検知用の信号を入力して、電流の応答を確認するものである。検知用の信号としては、位相シフトによってデューティ比を落としたものを間欠的に入力するもの⁽⁴⁾や、マルチレベルインバータを用いて波高を落とした矩形波を入力し続けるものが提案されている。両者はともに自動車が送電コイル上に乗る前から検知用信号を入力し続け、自動車が送電コイル上に進入したのちに送電を開始するものである。従って、車両進入前に送電コイルから磁界によるノイズが発生することや、車両が進入してから送電が開始されるまでにラグが生じることが欠点になる。これらの欠点を解消するようなシステムは未だ提案されていない。そこで本稿では、自動車が進入していない区間のコイルには一切の電圧を印加せず、進入から送電開始までのラグも生じない、新しい送電区間切り替えシステムを提案する。

3. 定電圧負荷を接続した Double-LCC 回路

ワイヤレス給電の回路は負荷として純抵抗を想定して解析を行うことが多い。しかし、走行中給電において想定されるのは Fig.4 のように、充電時に定電圧負荷として振る舞うバッテリーを接続した回路である。Fig.4 において入力電圧が十分に高いとき、整流器を含む負荷部は振幅が整流器後の直流部電圧と等しく、周波数が電源の動作周波数と等しい矩形波を出力する電圧源であると近似できる。更に、Double-LCC 回路はバンドパスフィルタ特性を有するため、基本波のみに注目すればよい。以上より、Fig.4 の回路は T 型等価回路を用いて Fig.5 のように単純化して解析を行うことができる。なお、ここでは簡単のため、電源は正弦波駆動の電圧源であるとする。Fig.5 の閉路方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \\ 0 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & 0 \\ 0 & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ 0 & 0 & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、インピーダンス行列内の各項は以下の通りである。

$$Z_{11} = j\omega L_0 - j \frac{1}{\omega C_{1p}} \quad (4)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = j \frac{1}{\omega C_{1p}} \quad (5)$$

$$Z_{22} = -j \frac{1}{\omega C_{1p}} - j \frac{1}{\omega C_{1s}} + j\omega L_1 \quad (6)$$

$$Z_{23} = Z_{32} = -j\omega L_m \quad (7)$$

$$Z_{33} = j\omega L_2 - j \frac{1}{\omega C_{2s}} - j \frac{1}{\omega C_{2p}} \quad (8)$$

$$Z_{34} = Z_{43} = j \frac{1}{\omega C_{2p}} \quad (9)$$

$$Z_{44} = -j \frac{1}{\omega C_{2p}} + j\omega L'_0 \quad (10)$$

共振条件である(2)を代入すると、(11)になる。更に変形し i_{in} について解くと(12)のように求まる。ここで、Double-LCC の回路特性により、 v_2 は v_1 に対して 90 deg 進んでいるため、 i_1 の実効値 I_1 は v_2 の実効値 V_2 を用いて(13)のように表せる。

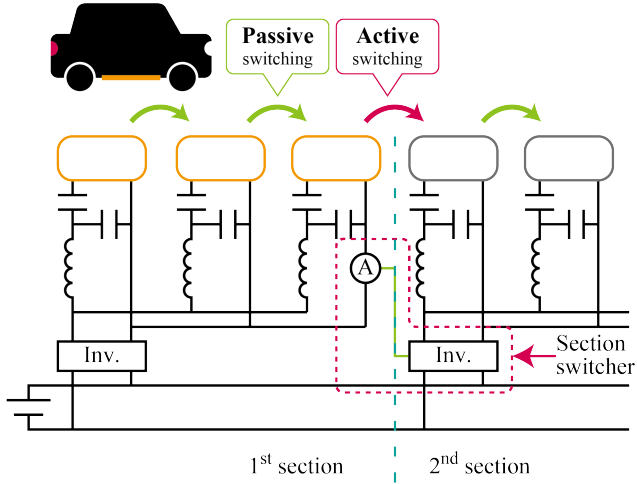


図 6 送電区間切り替えシステムの概略図

Fig. 6 Illustration of transmission section switching system.

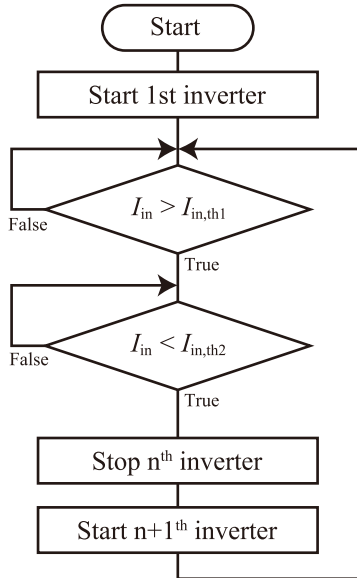


図 7 送電区間切り替えのフローチャート

Fig. 7 Flowchart of transmission section switching.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ 0 \\ 0 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j\frac{1}{\omega C_{1p}} & 0 & 0 \\ j\frac{1}{\omega C_{1p}} & 0 & -j\omega L_m & 0 \\ 0 & -j\omega L_m & 0 & j\frac{1}{\omega C_{2p}} \\ 0 & 0 & j\frac{1}{\omega C_{2p}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$i_{in} = -j\omega^3 C_{1p} C_{2p} L_m v_2 \quad (12)$$

$$I_{in} = \omega^3 C_{1p} C_{2p} L_m V_2 \quad (13)$$

V_2 は前述した矩形波の基本波の実効値であるため、(14)のように表せる。また、相互インダクタンス L_m は結合係数 k を用いて(15)で表せる。これらを(13)に代入すると(16)が求まる。

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4V_{dc}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \quad (14)$$

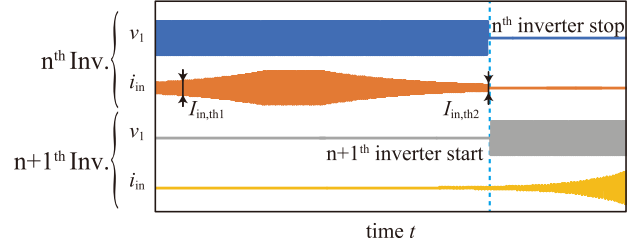


図 8 送電区間切り替えの概念図

Fig. 8 Concept of transmission section switching.

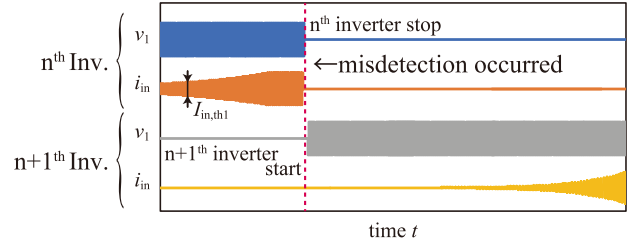


図 9 誤検知発生時の動作の概念図

Fig. 9 Concept of transmission section switching when malfunction occurred.

$$L_m = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (15)$$

$$I_{in} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \omega^3 C_{1p} C_{2p} k\sqrt{L_1 L_2} V_{dc} \quad (16)$$

式(16)から、回路上の各受動素子の定数及び V_{dc} が一定であるとき、入力電流 I_{in} から結合係数が推定できるとわかる。本論文における車両検知の基本的なコンセプトはこの結合係数推定によって車両の位置を検出するものである。

4. センサレス送電区間切り替えシステム

〈4・1〉 切り替えのフロー 前述のように、Double-LCC 方式では結合係数が 0 の時においても過大な電流が流れることはないため、インバータを駆動したまま待機することができる。この特性と前述した車両検知システムを組み合わせることで送電区間の切り替えを実現することができる。Fig. 6 に以上のことを利用した送電区間切り替えシステムの概略を示す。前節で述べた結合係数推定用の電流センサを送電区間の最後方に接続された送電回路へ接続し、結合係数を推定する。この電流センサに流れる電流が一度待機時よりも大きい閾値 $i_{in,th1}$ を超えると車両が n 番目のインバータにつながれた最後方のコイル上へ進入したと判断する。次に電流が再び待機時の電流に近い閾値 $i_{in,th2}$ と車両がコイル上を通過し、Fig. 6 の水色の点線で示す切り替え区間に進入したと判断する。この時に n 番目のインバータの駆動を停止し、地上側の通信により $n+1$ 番目のインバータの駆動を開始して待機することで送電区間の切り替えを行う。以上の動作をフローチャートにまとめると Fig. 7 のようになる。また、概念図を Fig. 8 に示す。Fig. 7 からわかるように、提案法は極めて単純な制御によって実現することができる。また、送電区間切り替え時の 2 次側に求められるのは直流部の電圧を維持することのみである。

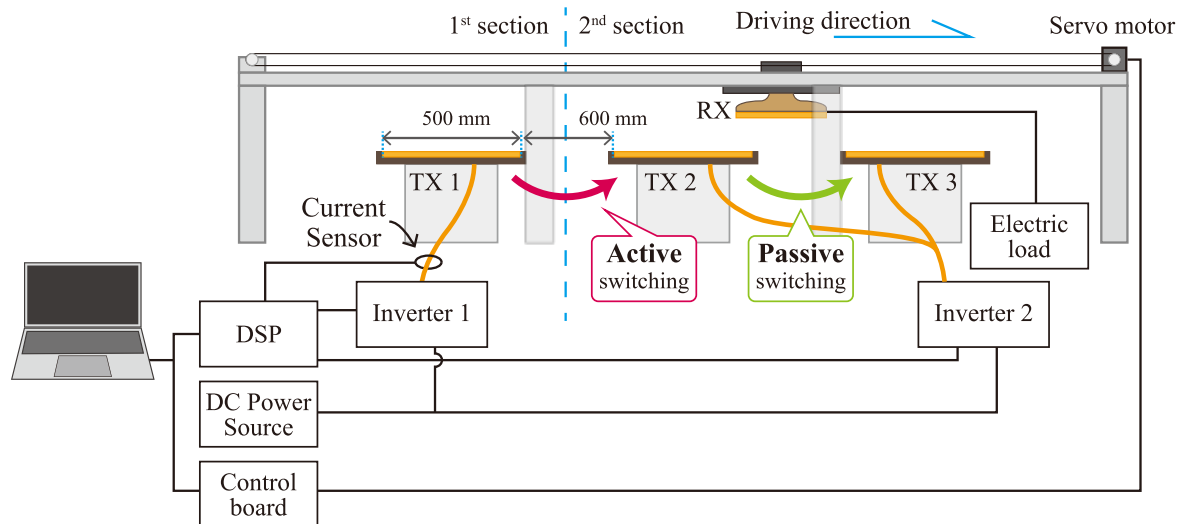


図 10 実験構成

Fig. 10 Configuration of experiment.

表 1 実験装置のパラメータ

Table 1 Experimental parameters.

		TX 1	TX 2	TX 3	RX
Input voltage	V_{in}	5 V_{rms} (Square wave)	5 V_{rms} (Square wave)	5 V_{rms} (Square wave)	—
Load voltage	V_{dc}	—	—	—	2 V
Operation frequency	f	85 kHz	85 kHz	85 kHz	—
Transmitter size		500 × 250 mm	500 × 250 mm	500 × 250 mm	—
Receiver size		—	—	—	250 × 250 mm
Compensated inductance	L_0, L'_0	20.671 μH	20.811 μH	21.094 μH	12.003 μH
Compensated coil resistance	r_0, r'_0	30.669 m Ω	29.517 m Ω	41.698 m Ω	19.127 m Ω
Compensated capacitor	C_{1p}, C_{2p}	164.97 nF	164.97 nF	164.97 nF	289.55 nF
Resonant capacitor	C_{1s}, C_{2s}	18.823 nF	18.823 nF	18.823 nF	35.367 nF
Transmitter / Receiver inductance	L_1, L_2	206.88 μH	206.68 μH	206.43 μH	111.44 μH
Transmitter / Receiver resistance	r_1, r_2	148.78 m Ω	125.40 m Ω	129.93 m Ω	79.459 m Ω

〈4・2〉 車両を誤検知した場合 電流センサや信号を処理するプロセッサのエラー等で車両を誤検知し、インバータを誤って起動する可能性がある。SS方式を用いたシステムでは、車両の誤検知をするとコイルに過大な電流が流れた。本論文で提案するシステムでは、Double-LCCの特性により誤検知が起こっても破壊に至るような現象は発生せず、Fig. 9に示すように、インバータが早めに起動されるだけであるため、特別な操作を行うことなく、通常の給電に復帰することができる。従って、このシステムを用いた場合、誤検知への特別な対策は必要ない。

5. 実験

提案したシステムを、送電コイル3台(TX 1, 2, 3)を用いて検証する。TX 1, 2間の切り替えはセンサレス車両検知システムによる能動的な切り替え、TX 2, 3間の切り替えはDouble-LCCの特性による受動的な切り替えの検証に用いる。実験装置の構成をFig. 10に、外観をFig. 11に示す。また、Table 1に実験で用いた回路のパラメータを示す。

す。なお、送受電コイル間のギャップは82 mm、送電コイル同士の間隔は600 mmとした。Fig. 10のシステムを用いて受電コイルを12 km/hで走行させながら実際にシステムを動作させた際のInverter 1, 2の出力電圧及び出力電流波形をFig. 12(a)に、切り替え前後を拡大したものをFig. 12(b)に示す。黄破線で囲まれた部分においてインバータの出力電流が絞られていることから、Double-LCCの回路特性により送電コイルが受動的に切り替わることを確認することができる。また、赤破線で囲まれた部分においてInv. 1の出力電流が減少したのち、Inv. 1の出力が停止し、Inv. 2の出力が開始されている。更に、切り替え動作後のInv. 2の出力電流は送電コイルからの給電が行われているときより小さく抑えられている。従って、電流センサによる送電区間の切り替えが正しく行われていることが確認できる。以上から、提案法により実際に受電コイルの移動に伴ってTX1, 2, 3それぞれの切り替えを行えていることがわかる。

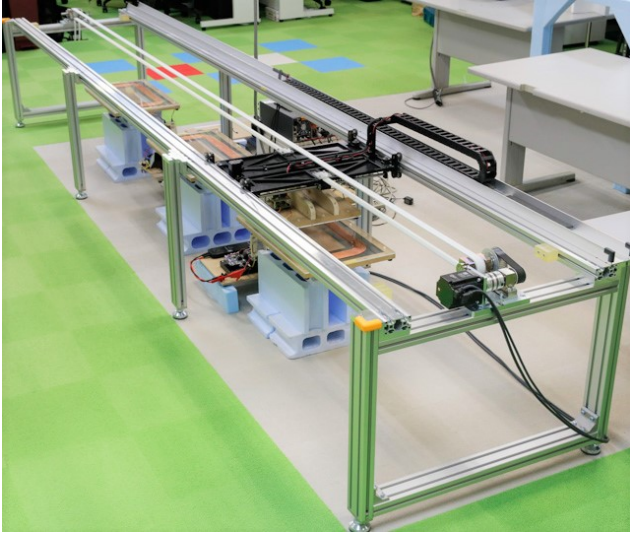
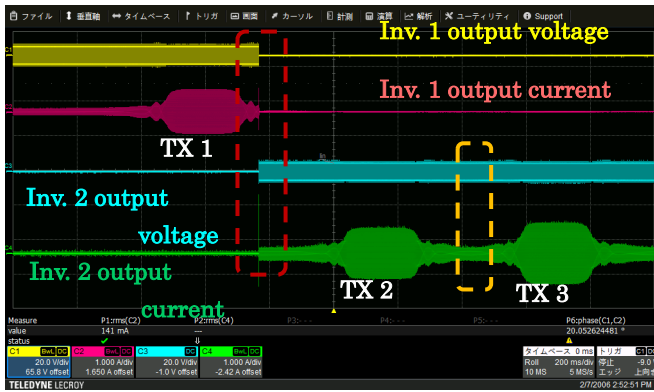
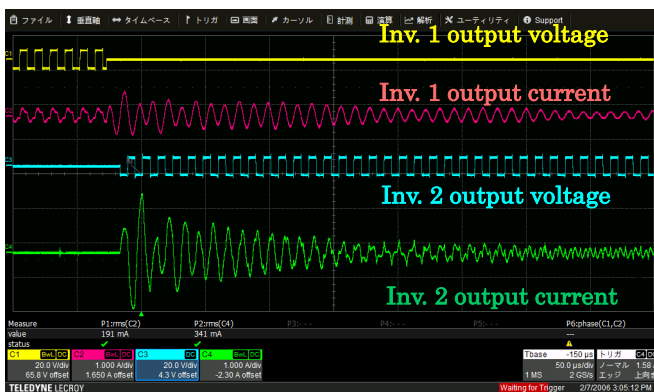


図 11 実験システム外観

Fig. 11 Experimental equipment.



(a) Overall view



(b) Enlarged view

図 12 送電区間切り替え時のインバータ出力波形

Fig. 12 Outputs of inverters when switching system is running.

6. まとめ

本稿では、自動車が進入していない区間のコイルには一切の電圧を印加せず、進入から送電開始までのラグも生じない、新しい送電区間切り替えシステムを提案した。提案手

法は一次側電流のみをセンシングすればよく、簡易な処理装置で実装することが可能である。また、磁気センサなどの付加的なセンサを用いないため、送電装置を比較的単純な回路で製作することができ、故障のリスクも低減される。従って、提案法は長期間にわたり地面に埋設される送電装置に適したシステムであると言える。模擬装置を用いた実験により、受電コイルの移動に追従して送電コイルが切り替わることを確認し、走行中においてシステムが動作可能であることが示された。

今後の課題として、切り替え動作時の過渡現象の解析、1つの送電区間に含む送電コイルの数を最適化することによる待機損失の低減や、送電区間の途中から進入した車への対応方法の検討があげられる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費（若手研究 A 課題番号:17H04915）および内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の助成を受けたものです。

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) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos and Peter Fisher, Marin Soljačić : "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol.317, No.5834 pp.83-86 (2007)
- (3) Su Y. Choi, Beom W. Gu, Seog Y. Jeong, Chun T. Rim : "Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles.", IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol.3, No.1 pp.18-36 (2014)
- (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." 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), pp.663-668 (2018)
- (5) K. Song, C. Zhu, K. E. Koh, D. Kobayashi, T. Imura, and Y. Hori : "Modeling and design of dynamic wireless power transfer system for EV applications." IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, pp.005229-005234 (2015)