

# 電気自動車への走行中ワイヤレス給電における センサレス送電 ON/OFF 切り替えシステムの提案

小林 大太<sup>\*1</sup> 居村 岳広<sup>\*1</sup> 堀 洋一<sup>\*1</sup>

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<sup>\*1</sup>

磁界共振結合方式を用いた走行中ワイヤレス給電における大きな課題の一つとして、車両が送電コイル上に存在しないときに送電を行うと電源の出力インピーダンスが極端に小さいために、交流短絡状態となり大電流が流れてしまうことが挙げられる。従来提案されているシステムでは、付加的なセンサを用いて車両を検出する方法等によりインバータの ON/OFF を切り替え、上記の問題を回避している。しかし、この手法では余分な設置の手間や誤動作の原因を増やしてしまう。そこで、本研究では SS 方式のシンプルな回路トポロジーを用い、送電コイル自体を車両検出センサとして用いることで付加的なセンサを用いない手法を提案する。

## Sensorless Transmitting ON/OFF Switching System in Dynamic Wireless Power Transfer for Electric Vehicles

Daita Kobayashi<sup>\*1</sup> Takehiro Imura<sup>\*1</sup> Yoichi Hori<sup>\*1</sup>

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Kashiwanoha 5-1-5, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561, Japan<sup>\*1</sup>

**Abstract** A large amount of power loss due to power transmission while a receiving coil is not near a transmitter can be a main issue in dynamic wireless power transfer system for electric vehicles. In conventional researches, additional vehicle detection system using loop coils or other sensors has been a solution for the problem by detecting the approach of vehicles. However, additional sensors can increase troubles of installation and malfunction of the system. Therefore, a new vehicle detection method which uses a transmitting coil itself as a sensor is proposed. The effectiveness of the proposed system was verified by theoretical considerations and experiments.

**Keyword:** *Wireless power transfer, Magnetic resonance coupling, Sensorless, Primary side*

### 1. はじめに

近年、磁界共振結合方式を用いたワイヤレス電力伝送技術が注目を集めている。現在、そのアプリケーションは多岐にわたり、家電製品、医療用機器、移動ロボット等、様々な分野で活躍が期待されている技術である。その中でも、電気自動車へのワイヤレス給電に関する研究は最も注目されている技術の一つである<sup>1)</sup>。電気自動車へのワイヤレス給電の主なコンセプトとしては、路面に敷設した送電コイルから磁界を介して各車両の底面に設置された受電コイルへの給電を行うというものである<sup>2)</sup>。電気自動車へのワイヤレス給電が実現することにより、インフラから電力を受け取りながら走

行することが可能となる為、従来の問題点であった航続距離を延長することが出来る。また、従来のように大量にバッテリーを積む必要性が無くなるため、車両価格の低減にもつながる。研究対象としては、コイル形状<sup>3)</sup>、回路トポロジー、電力変換器の制御法<sup>4)</sup>等が挙げられ、これらを最適化することにより大電力をより効率よく走行中に給電出来るようなシステムが追及されている。

本稿では、まず電気自動車への走行中ワイヤレス給電を実現する為の要件を考慮したうえで、有力だと考える送電側の回路トポロジーと制御方式を紹介する。次に、従来より問題とされていた車両の検出システムに

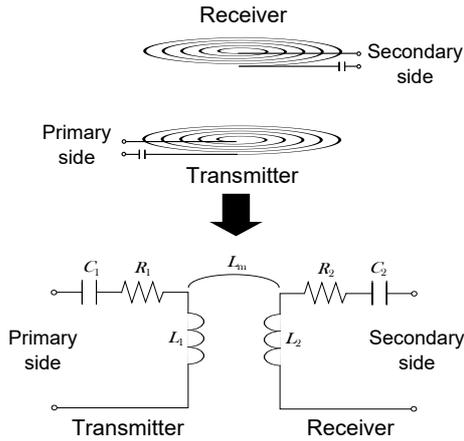


Fig.1 Equivalent circuit of magnetic resonance coupling

において、付加的なセンサを用いず、送電コイル自体をセンサとして用いる手法を提案し、実験によってその実現可能性、有効性を検証する。

## 2. 電気自動車への走行中ワイヤレス給電

### 2.1 磁界共振結合方式を用いたワイヤレス給電

従来より電磁誘導を用いた技術は数多く開発され、数 cm の電力伝送は可能であったが、その伝送距離の短さから応用の幅が限られていた。しかし、2007 年に Massachusetts Institute of Technology (MIT) の Martin Soljacic らが磁界共振結合方式を用いた電力伝送技術を発表した<sup>5)</sup>。この技術は、従来の電磁誘導に各コイルの LC 共振を組み合わせることで、より高効率でより長距離の電力伝送を可能にしている。この技術の特徴として、m 単位での高効率での電力伝送が可能、電磁誘導方式と比較して横方向の位置ずれがあっても高効率で伝送が可能等がある<sup>6)</sup>。地面から車両への送電を考えたとき、送電コイルと受電コイルの位置ずれは大いに考えられるので、位置ずれに強いこの方式は電気自動車へのワイヤレス電力伝送に適しているといえる。磁界共振結合方式の等価回路を Fig.1 に示す。

### 2.2 送電側システムの構成

走行中ワイヤレス給電システムにおいて、送電側の構成は最も重要な検討事項であり、これまで様々な研究機関が多くの送電側システム構成を提案してきた<sup>7)</sup>。送電コイルの形状としては、送電コイルが受電コイルや車体と比較して進行方向にかなり長く、一つの送電コイルから長時間給電を行う“Single coil design”と呼ばれる方式と、車体とほぼ同程度の大きさである送電コイルが連続して配置され、次々と給電するコイルが替わる“Segmented coil design”に大きく分けられる<sup>8)</sup>。本稿では、高速道路などに一定区間配置される一般ユーザー向けの走行中給電回路を想定している。この場合、ランニングコストを抑えるために伝送効率を極力大きくし、なるべく漏洩電磁波を小さく抑えたいという要求があるので、後者が有力であると考えられる。また先

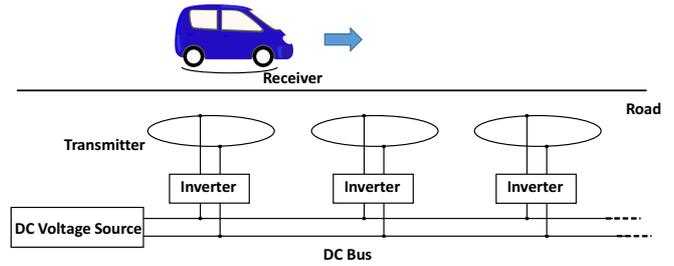


Fig.2 Transmitting side(DC bus system)

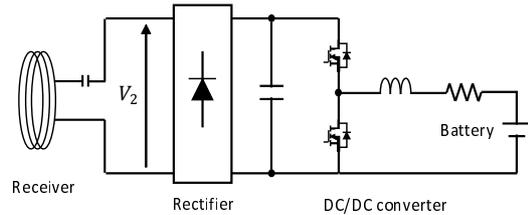


Fig.3 Receiving side

述の通り、かなり長い区間に走行中給電システムを設置する必要がある為、システム自体は設置やメンテナンスの手間、コストを考えると極力シンプルにするべきである。Fig.2 に提案する送電側の回路構成 (DC バスシステム) を示す。システムより作り出した直流のバスにインバータが多数並列接続され、それぞれのインバータには送電コイルが接続されている。各インバータは矩形波駆動をすることで送電コイルには定電圧が印加される。このシステムの利点としては、まずトポロジーとインバータ制御方式がシンプルであること、更に根本に大きなインバータを設置して AC バスを用いた場合と比較して一つのインバータが担う電力を減らすことが出来ること、AC バスに比べて EMI を抑制することが出来ること等が挙げられる。

### 2.3 受電側システムの構成

Fig.3 に提案するワイヤレス給電システムの受電側構成を示す。受電側は受電コイルによって受け取った電力を整流器で整流し、DC/DC コンバータを介してバッテリー若しくはスーパーキャパシタを充電する。この DC/DC コンバータは受電側電圧  $V_2$  を任意に制御できるように設置してあり、伝送効率や伝送電力を制御することができる<sup>9)</sup>。

## 3. 走行中ワイヤレス給電システムの問題点

走行中ワイヤレス給電においては停車中給電と異なり、給電中に受電コイルが移動する。よって、送電コイル上に車両 (受電コイル) が存在しない状態が頻繁に発生する。送電側インバータの定電圧制御を行った場合、送電コイル上に車両が存在しないときに送電を行うと、インバータ出力インピーダンスが極端に小さい為に交流短絡状態となり、大電流が流れてしまうという問題が生じる。従来ではインバータの定電流制御を行なうか<sup>10)</sup>、LCL 回路を用いることで<sup>4)</sup> 電圧源を電流源に

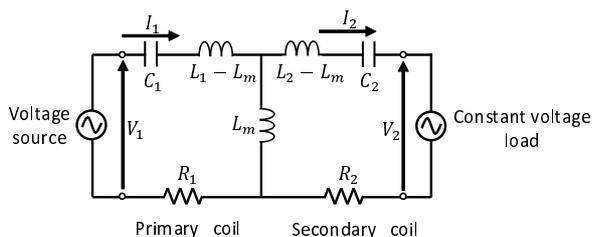


Fig.4 Simplified equivalent circuit

変換させて送電コイルに定電流を流し、この問題を解決する手法が見られたが、送電側システムの制御方式をシンプルにしたいという要望や、出来る限り無駄な消費電力を減らしたいという要望から、インバータは定電圧制御を行い、車両が送電コイル上に来たときのみインバータを駆動することでこの問題を解決することを考える。他の研究機関でもそのような機構は導入されており、車両の接近を何らかのセンサなどで検知するシステムを利用している<sup>11)</sup>。しかし、共振回路や磁気センサ等の付加的なセンサを用いると送電側システムの複雑化を招き、故障の可能性やメンテナンスの手間が増大してしまう。

そこで、本稿では送電コイル自体をセンサとして用いて車両の検出及び送電開始、停止を自動で行うシステムの提案を行う。

#### 4. センサレス送電 ON/OFF 切り替えシステム

Fig.3 に表されているような定電圧負荷を持つ磁界共振結合方式の回路は整流器以降を定電圧源として置き換えた Fig.4 のような等価回路モデルで表すことができる<sup>12)</sup>。このとき、二次側に励起される電流  $I_2$  は一次側電流  $I_1$  より位相が  $90^\circ$  遅れるため、その電流によるダイオード導通に伴って生じる二次側電圧  $V_2$  も同様に位相が  $90^\circ$  遅れる。このことをふまえて Fig.4 における電圧方程式を以下のように書き表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ jV_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & -j\omega_0 k \sqrt{L_1 L_2} \\ j\omega_0 k \sqrt{L_1 L_2} & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ jI_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\omega_0$  は共振角周波数を表し、 $L_m$  はコイル間の相互インダクタンス、 $k (= L_m / \sqrt{L_1 L_2})$  は結合係数を表す。式 (1) より、 $I_1$  は以下のように導かれる。

$$I_1 = \frac{R_2 V_1 + \omega_0 k \sqrt{L_1 L_2} V_2}{R_1 R_2 + \omega_0^2 k^2 L_1 L_2} \quad (2)$$

式 (2) より、一次側電流の実効値  $I_1$  は結合係数  $k$  に依存し、 $k$  が小さいほど  $I_1$  が大きくなる事が分かる。一次側コイルを用いた送電 ON/OFF システムの基本的なアイデアは、サーチ用電圧印加時の一次側電流の変化を見ながら車両の有無を検知するというものである。

##### 4.1 パルス電圧を用いた検出方法

式 (2) は共振周波数成分の電流電圧に対してのみ成り立つので、共振周波数で電圧を印加する必要がある。

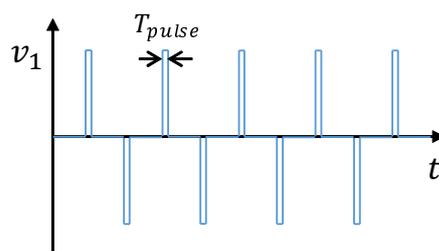


Fig.5 Search pulse(at resonant frequency)

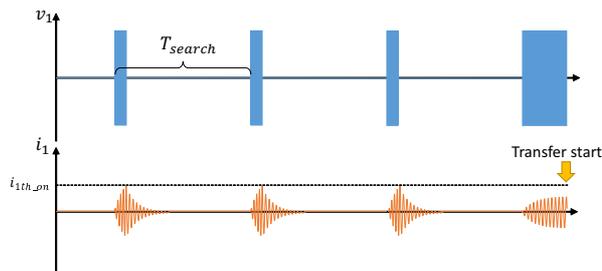


Fig.6 Searching pulse and primary current

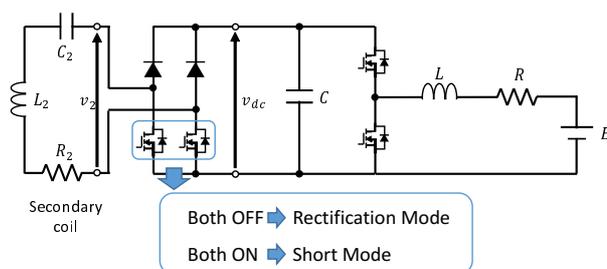


Fig.7 Receiving circuit with HAR

しかし、送電時と同様に矩形波電圧を印加してしまうと消費電力が大きくなってしまいますので、インバータの位相シフト等を用いて細いパルス状の電圧を共振周波数の周期で印加することを考える。サーチパルス電圧の概念図を Fig.5 に示す。また、常にサーチパルスを印加する必要はない為、車両の検出に必要な分だけの間隔をあけて間欠的にサーチパルスの束を印加する。このときの間隔を  $T_{search}$  とする。

一次側サーチモードの動作をまとめると、以下となる。

1.  $T_{search}$  の間隔でサーチパルスの束を印加開始する
2. 一次側電流の包絡線  $i_1$  があらかじめ定めた電流閾値  $i_{1th,on}$  を超えた場合、車両が近くにいると判断しサーチ電圧の印加を停止し、次のサーチパルス印加時間まで待機する
3. 電圧を印加しても一定時間  $i_1$  が  $i_{1th,on}$  を超えない場合、車両が近く不存在すると判断し、送電を開始する

この車両検出方法の概念図を Fig.6 に示す。

##### 4.2 ショートモードを用いた二次側待機

式 (2) を見ると、一次側電流  $I_1$  は結合係数  $k$  だけでなく二次側電圧によっても変化してしまう事が分か

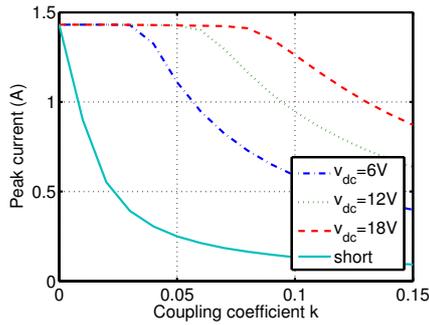


Fig.8 Comparison of primary current peak value

る。これは、車両側のバッテリー電圧によって  $i_1$  の値が変化してしまい、統一的な閾値  $i_{1th\_on}$  を設定できないことを意味している。そこで、二次側回路の整流器の下アームをスイッチング素子で置き換えることで受電側ショート状態を実現出来るようにし、二次側が電力を受電していないときは下アームを両側 ON(ショートモード)して待機することで、どのようなバッテリー電圧を持った車両に対しても統一的な電流閾値  $i_{1th\_on}$  を設定できるようにする。この整流回路を Half Active Rectifier(HAR) と呼ぶ。Fig.7 に HAR を用いた二次側回路を示す。

ここで、Fig.7 に示す二次側回路を用いて、常時整流モードで DC リンク電圧  $v_{dc}$  を変化させたとき、ショートモードで待機したときのそれぞれの場合においてパルス電圧を印加し続けたときの  $i_1$  のピーク値の変化を横軸を結合係数  $k$  にとり、Fig.8 に示す。このときのパルス電圧は 18 V でデューティ比は 0.1 とした。図より、二次側に通常の整流器を用いた場合、同じ  $k$  のときも DC リンク電圧によって一次側電流  $i_1$  のピーク値が変化してしまうことが分かる。また、 $k$  が小さい範囲では  $i_1$  のピーク値が一定となっていることが分かる。これは整流器以降が一定電圧を持つため、ある程度の  $k$  に満たない範囲では受電電流が整流器を越えられず、二次側コイルに電流が流れないことが原因だと考えられる。一方、ショートモードを用いた場合、 $i_1$  のピーク値が一定となる区間は存在せず、DC リンク電圧に関わらず一定の値を示すことが分かる。以上から二次側回路の動作をまとめると、以下となる。

1. 二次側コイル部に電流センサを設置し、電流値がある閾値以上であれば整流モードに切り替える、閾値以下であればショートモードで待機

#### 4.3 送電停止時の検出方法

前節では送電開始時の検出方法について説明したが、送電停止時も同様に電流閾値を用いて判断を行う。具体的には、送電時には共振周波数の矩形波電圧を印加しているので、一次側回路には同周波数の正弦波電流  $I_1$  が流れる。ここで、式 (2) より  $k$  が小さくなると  $i_1$  のピーク値が大きくなるので、新たな電流閾値  $i_{1th\_off}$  を設けて  $i_1$  がこの電流より大きくなれば受電コイルが充分離れたと判断し、送電を停止して

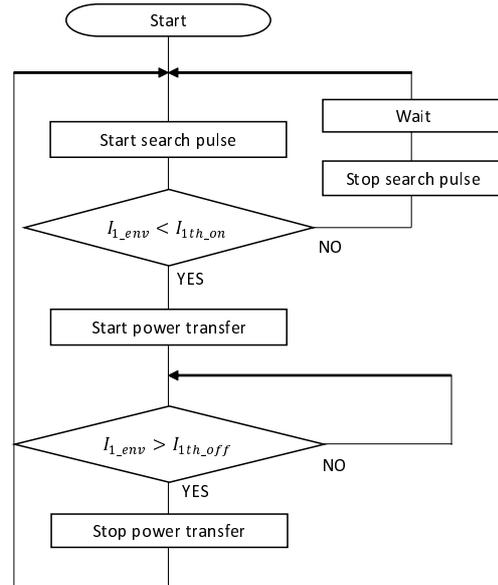


Fig.9 Flowchart of primary inverter control

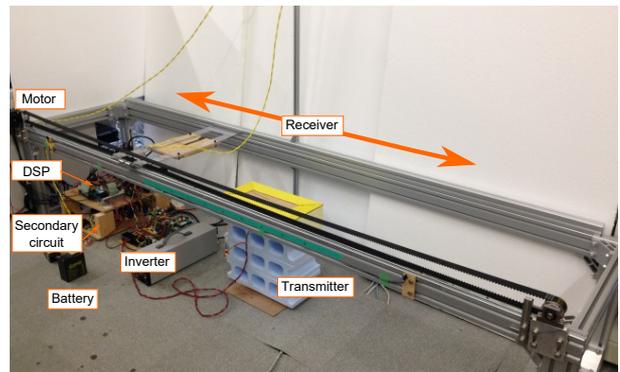


Fig.10 Experimental setup

再びサーチモードに移行する。ここで、上述のアルゴリズムをまとめたフローチャートを Fig.9 に示す。また、 $I_{1\_env}$  は一次側電流の包絡線を表す。

#### 4.4 実験

実際に前述のアルゴリズムを一次側インバータ制御器に実装し、一次側電流、二次側電流の包絡線検波回路を実験装置に付加して実験を行った。実験装置の全体図を Fig.10 に、回路図を Fig.11 に示す。実験装置は車両と見立てた受電コイルを任意の速度でベルト駆動させることが出来る。送電コイルには  $20 \times 40$  cm、受電コイルには  $20 \times 20$  cm のものを用い、送受電コイル間のギャップは 10 cm とした。実験装置のパラメータは Table 1 に示す。

実験結果を以下に示す。まず、サーチモードでの一次側電流電圧波形を Fig.12 に示す。図において黄線は一次側電流  $i_1$ 、水色線は一次側電圧  $v_1$  を表す。Fig.12(a) より、 $v_1$  の東が間欠的に印加されていることが分かる。また、 $i_1$  が  $i_{1th\_on}$  に達すると  $v_1$  のパルス印加が停止していることも分かる。Fig.12(b) より、サーチモード

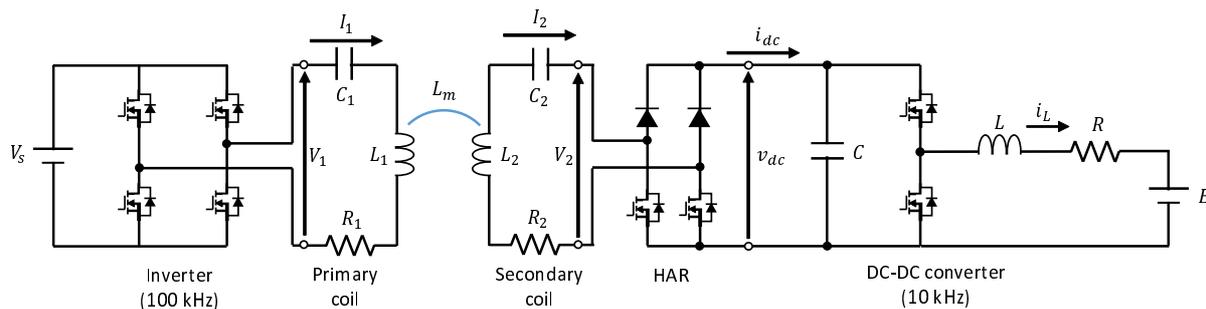
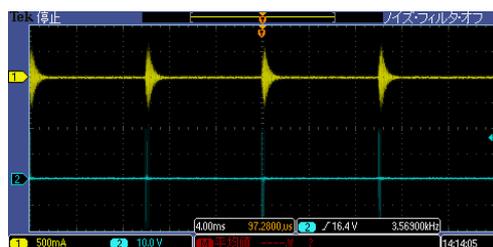


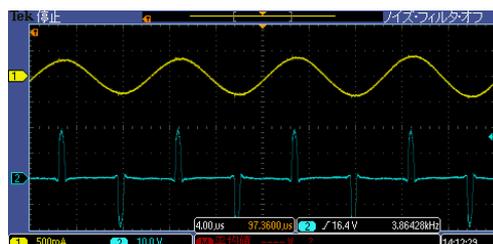
Fig.11 Whole configuration of the experimental setup

Table 1 Parameters of the experimental setup

Parameter	Meaning	Value
$f_0$	Operating frequency	100 kHz
$V_s$	AC voltage source amplitude	18 V
$L_1$	Transmitter inductance	417.1 $\mu$ H
$C_1$	Transmitter capacitance	6.03 nF
$R_1$	Transmitter resistance	1.83 $\Omega$
$L_2$	Receiver inductance	208.5 $\mu$ H
$C_2$	Receiver capacitance	12.15 nF
$R_2$	Receiver resistance	1.28 $\Omega$
$L$	DC-DC converter inductance	1000 $\mu$ H
$C$	DC-DC converter capacitance	1000 $\mu$ F
$R$	DC-DC converter resistance	0.2 $\Omega$
$f_s$	DC-DC converter frequency	10 kHz
$E$	Battery voltage	6 V
$T_{search}$	Searching period	10 ms
$T_{pulse}$	Pulse width	0.5 $\mu$ s
$i_{ith\_on}$	ON threshold current	300 mA
$i_{ith\_off}$	OFF threshold current	2.5 A



(a) Overall view



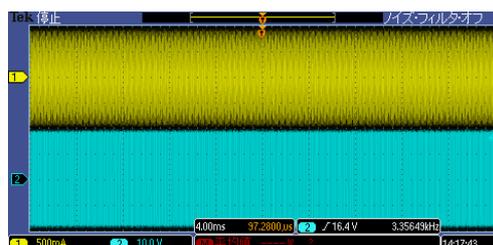
(b) Enlarged view

Fig.12 Primary voltage and current in search mode

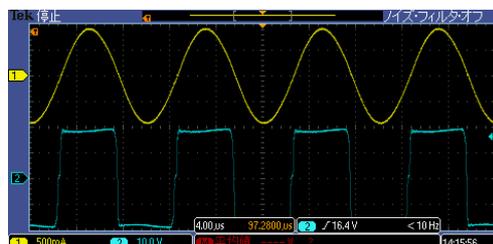
では電圧パルス幅が矩形波の 1/10 程度に絞られていることが分かる. 次に, 送電モードでの一次側電流電圧波形を Fig.13 に示す. 図より, 送電モードでは常に矩形波電圧が印加され, 正常に送電が行われていることが分かる.

次に, 10 km/h で受電コイルを走行させながら一次側で提案制御を行った時の一次側電流電圧波形を Fig.14 に示す. Fig.14(a) より, 10 km/h での走行時にも自動的に送電の ON/OFF が切り替わっていることが分かる. また, 一次側電流にも特に大きなオーバーシュート等は見られない. Fig.14(b) はサーチモードから送電モードに切り替わる部分の拡大波形を表しており, 各範囲での動作は以下のようなものである.

- ① パルス電圧を印加してすぐに  $i_{1\_env} \geq i_{1th\_on}$  を満たし, パルス印加終了
- ② パルス電圧を印加しても  $i_{1\_env} \geq i_{1th\_on}$  を満たさないのでパルス印加継続
- ③ 一定時間経過したので一次側が送電モードに突入
- ④ 二次側が受電を感知しショートモードを解除, 受電開始

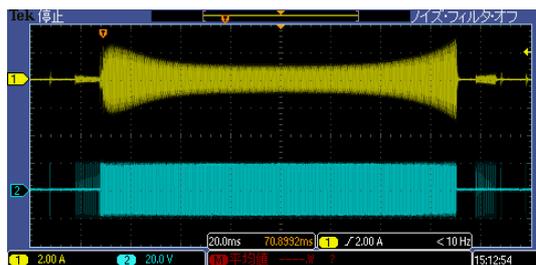


(a) Overall view

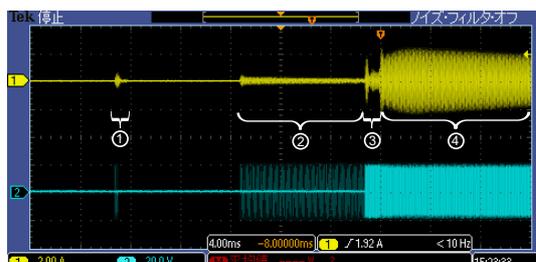


(b) Enlarged view

Fig.13 Primary voltage and current in transfer mode



(a) Overall view



(b) Enlarged view

Fig.14 Waveform while running at 10 km/h

以上の様に、10 km/hでの走行時にも問題なくフローチャート通りに動作していることが分かる。

#### 4.5 サーチモードにおける待機電力

提案した車両検知システムにおけるサーチモードでの消費電力(待機電力)は、7.228 mWであった。これに対し、車両が送電コイルの真上にいるときの送電電力(最大効率制御時)は10.02 Wであったので、提案システムは1/1000以下の待機電力で動作することが分かる。これは十分実用的な範囲であるといえる。また、走行中給電レーンでは常にすべてのインバータがサーチ状態である必要はなく、自分の一つ前のインバータが送電を終了してからサーチを開始するなどの手法を取ればより待機電力は減らすことが可能である。

更に、提案サーチ法は家電等のワイヤレス給電用途でも十分応用可能であり、家電などに用いる際には $T_{search}$ はより大きくても問題がないと考えられるので(1 s程度)、更に待機電力は小さくすると考えられる。

### 5. まとめ

本稿では、電気自動車への走行中ワイヤレス給電システムにおける送電側(一次側)の構成に関してコストや実現可能性を検討し、提案を行った。更に、走行中ワイヤレス給電システムにおける送電側による車両検知システムの必要性を述べ、従来の付加的なセンサを用いた手法に代わる、センサレス自動送電 ON/OFF 切り替えシステムの提案を行った。提案手法は一次側電流の包絡線のみをセンシングすればよく、非常に簡単なアルゴリズムで実現可能である。また、受電側(車両側)に Half Active Rectifier 回路を導入することで統一的な閾値設定を行うことが出来、ロバストな車両検出が可能であるといえる。更に実験装置を用いた実験に

より、提案システムは受電側コイルが移動中であっても十分動作可能であることが示された。

今後の課題としては、今回提案したセンサレス送電側システムの更なる消費電力低減や、更に速い車両速度に対するロバスト性など、より詳細な解析を行う予定である。

### 参考文献

- 1) J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S. J. Jeon, D. H. Cho, "Design and Implementation of Shaped Magnetic -Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, no.3, pp.1179-1192, 2014.
- 2) S. Li, C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, pp.4-17, 2015.
- 3) S. Raabe, G. A. Covic, "Practical Design Considerations for Contactless Power Transfer Quadrature Pick-Ups," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, no.1, pp.400-409, 2013.
- 4) H. Hao, G. A. Covic, J. T. Boys, "An Approximate Dynamic Model of LCL-T-Based Inductive Power Transfer Power Supplies," *IEEE transactions on Power Electronics*, Vol. 29, no. 10, 2014.
- 5) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, Vol. 317, no. 5834, pp.83-86, 2007.
- 6) 居村 岳広, 堀 洋一, "電磁界共振結合による 伝送技術", 電学誌, 129 巻 7 号, 2009.
- 7) L. Chen, G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, "Double-Coupled Systems for IPT Roadway Applications," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, pp.37-49, 2015.
- 8) K. Lee, Z. Pantic, S. M. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, no.9, pp.4592-4602, 2014.
- 9) K. Hata, T. Imura, Y. Hori, "Dynamic Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle to Simplify Ground Facilities - Power Control Based on Vehicle-side Information -," *EVS28*, 2015.
- 10) Young Dae Ko, Young Jae Jang: "The Optimal System Design of the Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 3, pp.1255-1265, 2013.
- 11) G. R. Nagendra, L. Chen, G. A. Covic, K. T. Boys, "Detection of EVs on IPT Highways," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, VOL. 2, No. 3, pp.584-597, 2014.
- 12) 郡司 大輔, 居村 岳広, 藤本 博志, "無線電力伝送の回路解析とワイヤレスインホイールモータの制御への応用", 自動車技術会 2015 年春季大会, S160, pp.846-851, 2015.