

走行中ワイヤレス給電における送電設備とEVシステムの制御実装および実験検証

畑 勝裕¹⁾ 居村 岳広²⁾ 堀 洋一³⁾

Implementation and Experimental Validation of Control System for Ground Facilities and Electric Vehicles in Dynamic Wireless Power Transfer

Katsuhiko Hata Takehiro Imura Yoichi Hori

Dynamic wireless power transfer for electric vehicles (EVs) should be recognized not as extended technologies of static wireless charging but as a novel technology based on requirements of transportation systems. In this paper, a cooperative control system for vehicle detection and power transfer is presented considering a unique set of challenges for dynamic charging of EVs. The control strategy is expressed by a flowchart and implemented without signal communication between ground facilities and EVs. Additionally, the state transition from vehicle detection to power transfer is demonstrated by the experiments.

KEY WORDS: EV and HV systems, energy control system, Dynamic wireless power transfer (A3)

1. 序 論

電気自動車 (Electric Vehicle : EV) は優れた環境性能から大きな注目を集めているが、車載バッテリーの容量に起因する一充電あたりの航続距離が短いことが課題となっている。近年、ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer : WPT) は充電作業における利便性や安全性を向上できるため、電気機器や家電製品だけでなく、産業分野や運輸分野などの幅広い分野において注目されている^{(1)~(3)}。2007年にMITから発表された磁界共振結合⁽⁴⁾によるWPTは数十cm~数mの距離においても高効率かつ位置ずれに強いいため、EVの停車中ワイヤレス給電だけでなく、走行中ワイヤレス給電への応用も期待されている^{(5)~(6)}。しかし、走行中ワイヤレス給電は実用化の兆しが見えてきている停車中ワイヤレス給電とはまったく異なる技術が必要であり、延長線上にある技術でないことを認識しなければならない。

本稿では走行中ワイヤレス給電における特有の課題について検討し、従来の停車中ワイヤレス給電とは異なる前提条件や必要となる制御技術について示す。このとき、走行中ワイヤレス給電における送電設備とEVシステムの間で通信を用いることなく、車両検知から電力伝送までを協調しながら制御できるシステムを構築し、その制御実装について示す。また、走行中ワイヤレス給電の模擬装置を用いて、実装した制御システムの実験検証を行う。

2. 走行中ワイヤレス給電の課題

本章では走行中ワイヤレス給電における特有の課題について取り上げる。序論で述べたように、停車中のワイヤレス給電とは前提条件や必要となる技術が大きく異なるため、これらの課題に応じて適切にシステムを設計しなければならない。

まず、地上側の送電設備はできる限り簡単化しなければならない。Fig. 1に走行中ワイヤレス給電のシステム構成例を示

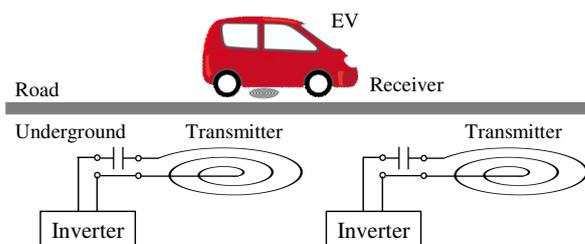


Fig. 1 System structure of dynamic charging for electric vehicles.

す。EVはインフラからエネルギーを受給するために受電器と制御回路を搭載し、送電側はインバータによって駆動される送電器が地中または路面に設置される。ここで、送電設備は道路の電化区間全てにわたって設置されるため、高コストなシステムは許容できない。また、高効率な電力伝送と安定した電力供給が求められるが、下記の点に注意して設計されるべきである。

- 1) 通信やセンサによる車両検知ができない場合、設置した給電区間を有効に利用できない
- 2) 道路では不特定多数のクルマが走行するため、送電設備と各車両が制御信号のやりとりをすることは難しい
- 3) 道路上を走行しているEVは送電器上で受電できる時間が限られており、瞬時の電力伝送が必要である

本章では上記の課題について図示するとともに、走行中ワイヤレス給電に必要な技術について説明する。

2.1. 通信やセンサによる信頼性の低下

車両検知に通信や付加的なセンサを用いた送電設備の構成をFig. 2に示す。走行中ワイヤレス給電では大電力をワイヤレスで伝送するため、インバータ自身もノイズ源であるとともに他の機器からのノイズや混信によって、車両からの信号を正常に取得できない可能性がある。また、付加的なセンサを用いるとコスト増になるだけでなく、センサの動作不良や通信エラーな

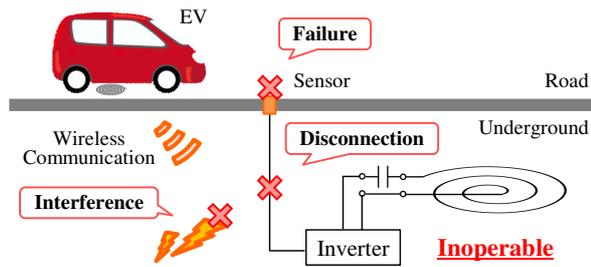


Fig. 2 Vehicle detection problems with communication and additional sensors.

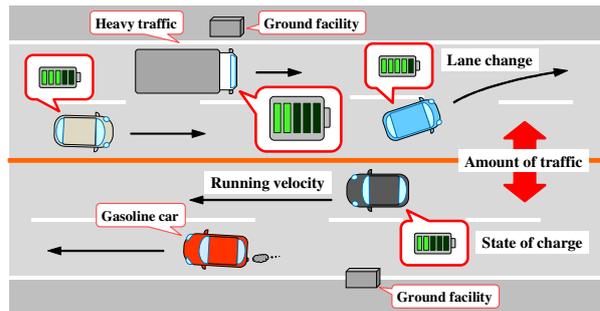


Fig. 3 Many and unspecified vehicles on the road.

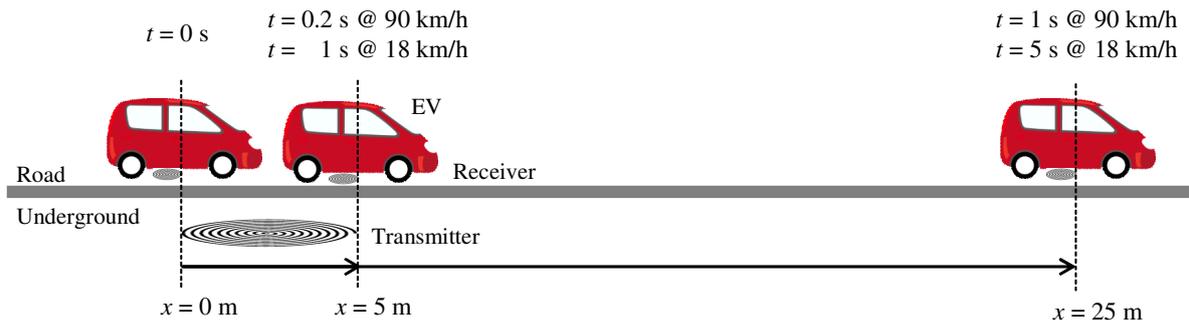


Fig. 4 Charging time for dynamic wireless power transfer considering vehicle velocity.

どによって車両を検知できない恐れがある。

これらの要因によって車両検知ができなかった場合、その給電区間は電化されていない区間と同様に EV はインフラからエネルギーを受け取れないため、車両検知の信頼性を確保することは重要である。そのため、インバータや送電器といった走行中ワイヤレス給電に必要な送電設備の機能を利用して車両を検知できることが好ましい。

2.2. 不特定多数のクルマ

Fig. 3 に走行中ワイヤレス給電設備が設置された道路の交通状況の一例を示す。一般道に送電設備を設置したとすれば、不特定多数のクルマが行き交い、その車種や走行速度、充電量などの違いがあり、それぞれのクルマと送電設備が高速な制御信号を無線通信などでやりとりすることは非現実的である。

また、全てのクルマが電化されるまでは EV だけでなくガソリン車も走行するため、単に車両を検知するのではなく、走行中ワイヤレス給電に対応した受電器を搭載する EV のみを検出しなければならない。さらに、車線変更や満充電時などに EV 側で充電の可否を選択できるシステムが必要である。

2.3. 短い充電時間

Fig. 4 に EV の走行速度と送電器上で受電できる充電時間を示す。ここでは、送電器の長さを 5 m として検討している。EV に搭載した受電器が送電器上に入し、通過するまでの時間は比較的到低速 (18 km/h) の場合でも約 1 秒間とさきわめて短い。高速道路などにおいて 90 km/h で走行している場合はたったの 0.2 秒間しか受電できない。

従って、車両検知から電力伝送までに数秒もかかるシステムでは全ての区間において給電できないため、高速かつ正確な車両検知と瞬時の電力伝送が必要である。また、EV 側において

制御実装をするためには数 ms オーダでの追従が可能な高応答な制御系設計が不可欠となる。

3. 走行中ワイヤレス給電システム

本章ではこれまでの検討事項から、送電設備と EV 間での通信を行わない走行中ワイヤレス給電システムと実験検証に用いる実験装置を示す。

3.1. 回路構成

本研究で用いる走行中ワイヤレス給電システムの回路構成を Fig. 5 に示す。送電側は系統電源を整流した DC バスにインバータを接続し、送電器に電力を供給する。また、本研究では Series-Series(S-S) 方式の磁界共振結合による WPT を採用し、送受電器のパラメータは

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

を満たすように設計する。ここで、 ω_0 は送電側インバータの動作角周波数である。

EV 側は受電器で受け取った電力を AC-DC コンバータで整流して車載バッテリーを充電するが、本研究では車両検知を実現するためにハーフアクティブ整流器 (Half Active Rectifier : HAR) を採用している。HAR の動作および車両検知手法については次章で後述する。

また、本研究では EV 側の DC-DC コンバータを用いて WPT の電力伝送効率が最大となるように DC リンク電圧 V_{dc} を制御している。このとき、EV の走行に伴って変化する送受電器の結合係数 k を瞬時に推定するとともに、高速に応答可能な制御系を設計しているが、その詳細については文献 (5) を参照されたい。

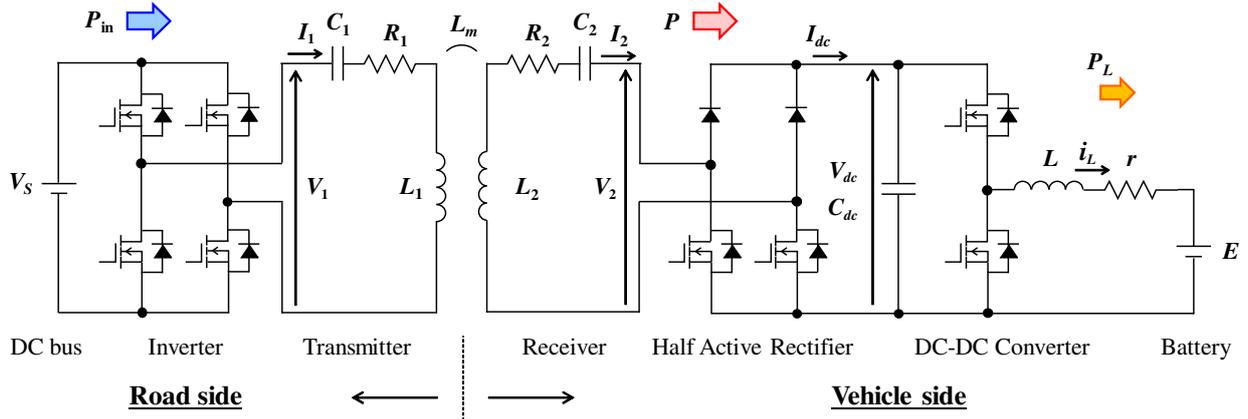
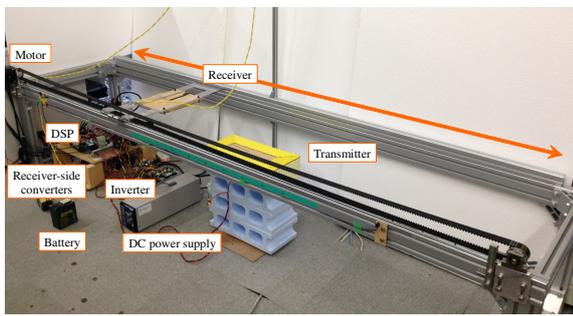
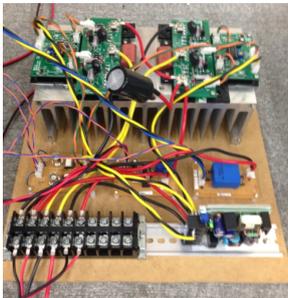


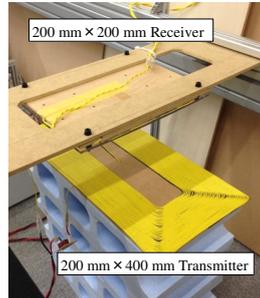
Fig. 5 Circuit diagram of the dynamic wireless power transfer system.



(a) Overview.



(b) Inverter.



(c) Coils.

Fig. 6 Experimental setup.

3.2. 実験装置

実験検証に用いた実験装置を Fig. 6 に示す。EV の走行を模擬するため、モータを用いて受電器をベルト駆動させ、送電器の 100 mm 上を通過させた。実験装置のパラメータは Table 1 に示す通りであり、後述する車両検知システムは Fig. 6(b) のインバータおよび DSP (PE-PRO/F28335A, Myway) を用いて実装した。

4. 車両検知と送電制御⁽⁷⁾

本研究では前述した通り、送電設備と EV 間の通信や付加的なセンサを用いずに送電側インバータを用いて車両検知システムを実装する。

4.1. 入力インピーダンスに着目した車両検知

本研究では送電側から見た入力インピーダンスに着目して車両検知を実現する。磁界共振結合方式の WPT において、受電

Table 1 Parameters of the experimental setup

Parameter	Value
DC voltage source amplitude V_S	18 V
Operating frequency f_0	100 kHz
Transmitter inductance L_1	417.1 μ H
Transmitter capacitance C_1	6.03 nF
Transmitter resistance R_1	1.83 Ω
Receiver inductance L_2	208.5 μ H
Receiver capacitance C_2	12.15 nF
Receiver resistance R_2	1.28 Ω
DC-DC converter inductance L	1000 μ H
DC-DC converter capacitance C	1000 μ F
DC-DC converter resistance r	0.2 Ω
Battery voltage E	6 V
Searching period T_{search}	10 ms
Search pulse width T_{pulse}	0.5 μ s
ON threshold current I_{1th_on}	300 mA
OFF threshold current I_{2th_off}	2.5 A
OFF threshold differential current I_{1th_diff}	-4000 A/s

側 AC-DC コンバータの基本波力率が 1 で損失が無視できるとき、AC-DC コンバータを含む負荷全体は純抵抗負荷として見なせる⁽⁸⁾。このとき、磁界共振結合による WPT を T 型等価回路で記述し⁽⁹⁾、送電側インバータから見た入力インピーダンス Z_{in} を Fig. 7 に示す。

送電側インバータの動作角周波数 ω_0 と送受電器の共振角周波数が (1) 式を満たすとき、送電側インバータから見た入力インピーダンス Z_{in} は合成インピーダンスの計算から

$$Z_{in} = R_1 + \frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_2 + R_L} \quad (2)$$

と求められる。ここで、 Z_{in} は送受電器の相互インダクタンス L_m によって変化するが、等価的な負荷抵抗値 R_L はすべての EV で一定ではないため、(2) 式だけを用いて車両検知を行うことは難しい。

4.2. HAR による短絡動作 (待機モード)

本研究では EV 側の HAR を用いて車両検知時と充電時の動作モードを区別する。Fig. 8 に HAR の各動作モードを示す。充電時には下アームの半導体スイッチを OFF 状態として、従

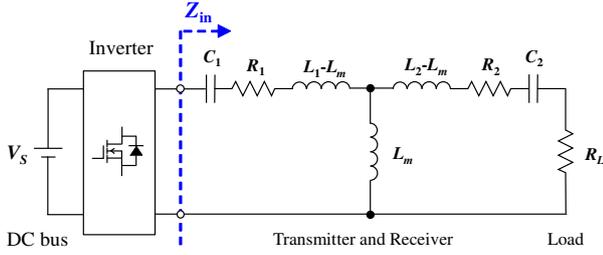


Fig. 7 Input impedance of the dynamic wireless power transfer system.

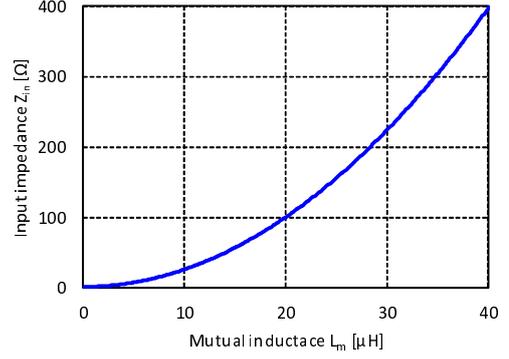


Fig. 9 Mutual inductance L_m vs. input impedance Z_{in} during short mode of HAR.

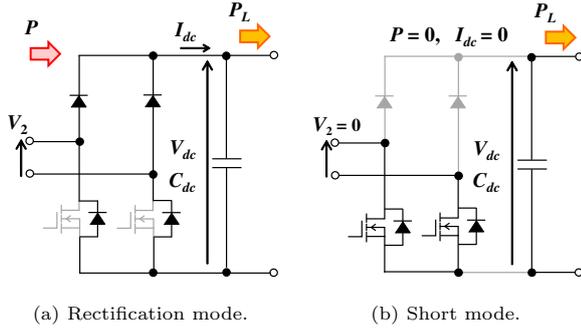


Fig. 8 Operation modes of Half Active Rectifier.

来のダイオード整流回路と同様に動作させ、インフラからエネルギーを受電する。一方で、送電器上へ進入するまでは半導体スイッチを ON 状態として受電器を短絡して待機する。このとき、等価的な負荷抵抗値 $R_L = 0$ となるため、すべての EV に対して車両検知が可能になる。

HAR を Short mode としたときの L_m に対する Z_{in} を Fig. 9 に示す。送電器上へ受電器が接近することで L_m が増加するとき、 Z_{in} が大きくなるのが分かる。(2) 式より、 Z_{in} は実数で表されるため、送電側インバータから電圧実効値 V_1 を与えれば、送電側電流実効値 I_1 を測定することで Z_{in} の変化を検出できる。

4.3. サーチパルスの導入

本研究では車両検出時に Fig. 10 に示すサーチパルスを導入し、印加する電圧レベルをできる限り小さくすることで待機電力を低減する。ここで、サーチパルスは送受電器の共振周波数 f_0 と同じ周波数を持つ 3 レベルの電圧波形として出力する。

また、Fig. 11 に示すように EV の走行速度を考慮してサーチ周期 T_{search} を定める。受電器が送電器に接近していない場合、 Z_{in} が小さいためにサーチパルスを印加してもすぐに I_1 があるしきい値 I_{1th_on} まで上昇してしまう。このとき、サーチモードを終了して、次の周期まで待機する。

受電器の接近によって Z_{in} が大きくなると、 I_1 は一定時間が経過しても I_{1th_on} に達しなくなり、送電設備は EV を検知して、送電モードに移行する。

4.4. フローチャート

車両検知から送電開始までのフローチャートを Fig. 12 に示す。送電側はサーチモードと送電モード、EV 側は待機モードと充電モードに分類している。

まず、EV 側は給電区間へ進入して電力を受給するまで、HAR

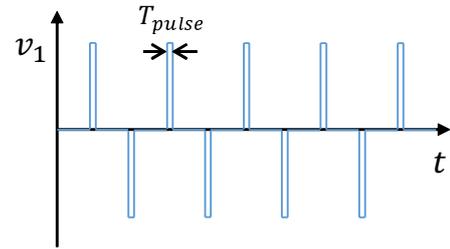


Fig. 10 Search pulse at resonance frequency.

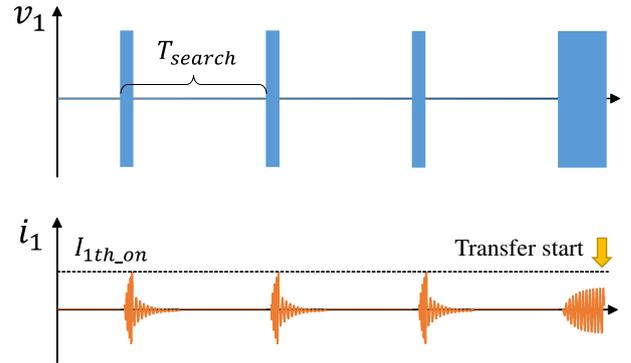


Fig. 11 Search pulse and road-side current.

を Short mode として待機し、送電側から車両検知できるようにしておく。送電側は T_{search} 毎にサーチパルスを印加し、 I_1 が I_{1th_on} を越える場合には次の周期まで待機し、一定時間経過しても I_{1th_on} に達しない場合には送電モードに移行する。このとき、EV 側は送電設備から電力を受給していることを検知して、HAR を Rectification mode として充電モードに移行し、電力伝送を開始する。

次に、EV が送電器上から離脱し、電力伝送を終了する流れを示す。本研究では EV 側において受電側電流 I_2 から結合係数 k を推定しているため⁽⁵⁾、 k があるしきい値 k_{th_off} に達する受電側電流のしきい値 I_{2th_off} を設計しておき、 I_2 がこれを上回る場合に HAR を Short mode として待機モードに移行する。このとき、送電側では HAR の動作モードの変化を I_1 の微分値で検出しており、あるしきい値 I_{1th_diff} を下回ったときに EV が送電器上を離脱したとしてサーチモードに移行し、電力伝送を終了する。

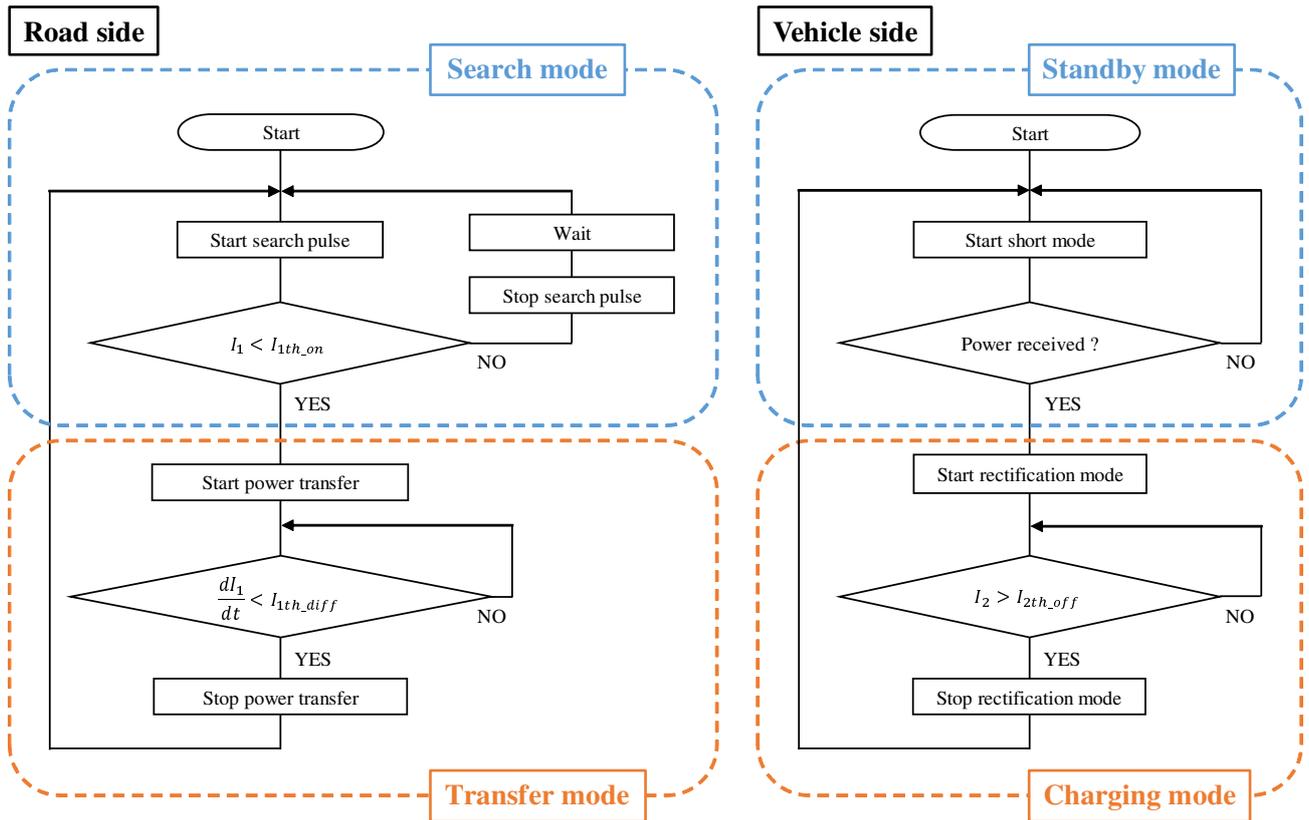
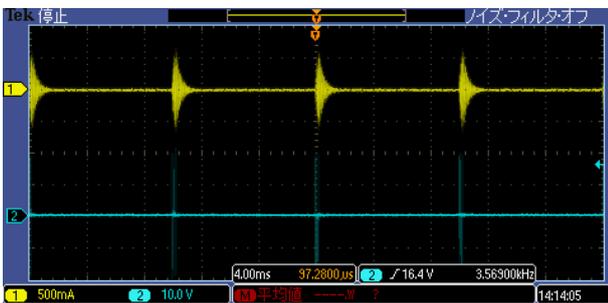
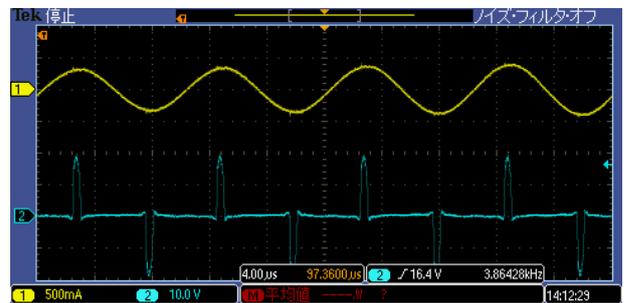


Fig. 12 Flowchart of road-side and vehicle-side systems.

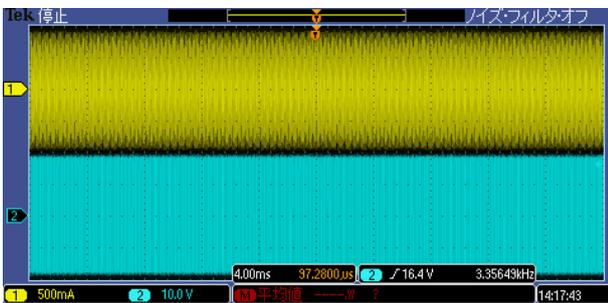


(a) Overall view



(b) Enlarged view

Fig. 13 Road-side voltage and current in search mode



(a) Overall view



(b) Enlarged view

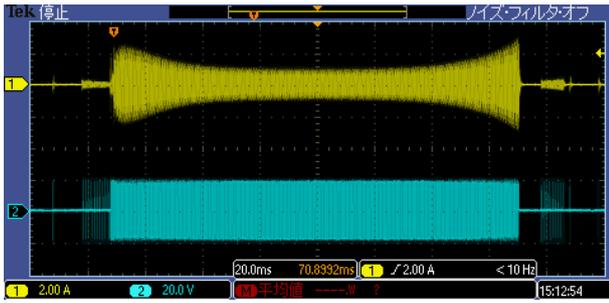
Fig. 14 Road-side voltage and current in transfer mode

5. 実験

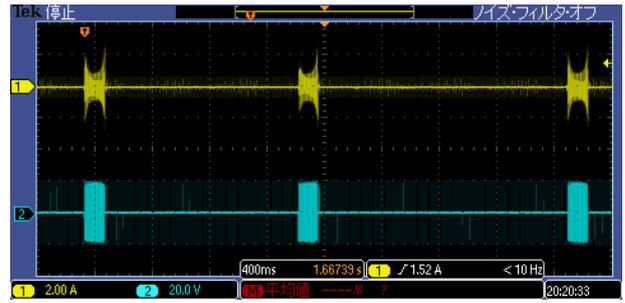
本章では送電側におけるサーチモードと送電モードの動作確認と受電器が送電器上を通過するまでの状態遷移を示す。

5.1. サーチモードと送電モード

Fig. 13 にサーチモードにおける送電側電圧 V_1 と送電側電流 I_1 の波形を示す。黄色が送電側電流 I_1 、水色が送電側電圧



(a) Overall view



(b) Multiple times

Fig. 15 Waveforms while running at 10 km/h

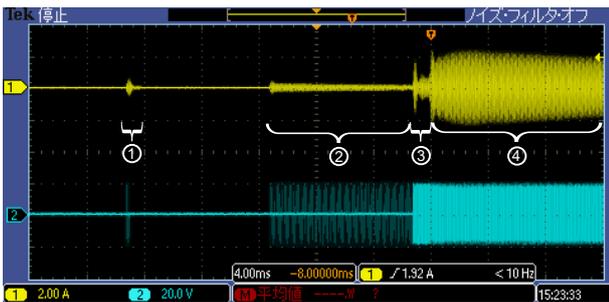


Fig. 16 State transition from vehicle detection to power transfer.

V_1 を示している。Fig. 13(a) に示すようにサーチパルスを印加後、 I_1 はすぐにしきい値 I_{1th_on} まで達しており、次の周期まで待機して再度サーチモードを行っていることが確認できる。また、Fig. 13(a) からサーチパルスは電圧実効値の小さい 3 レベル波形となっている。

Fig. 14 に送電モードにおける V_1 と I_1 を示す。Fig. 14(a) より、連続した電力伝送が実現できている。また、Fig. 14(b) が示すように送電側電圧は矩形波出力として動作できている。

受電器が送電器の真上にあるとき、送電電力は 10.02 W であるのに対して、サーチモードにおける消費電力は 7.228 mW と送電時の 1/1000 以下まで待機電力を削減できており、所望の動作が実現できている。

5.2. 受電器が送電器上を通過するまでの状態遷移

受電器を 10 km/h で送電器上を通過させたときの送電側電圧 V_1 と送電側電流 I_1 の波形を Fig. 15 に示す。Fig. 15(a) の電力伝送が開始される直前において、 V_1 がサーチパルスとして出力されており、適切に車両検知を行った後に送電モードに移行できていることが確認できる。

また、受電器の離脱時にも送電モードからサーチモードに移行できている。電力伝送終了後に車両検知を開始できている。Fig. 15(b) に示すように、受電器が複数回にわたって送電器上を通過しても、遅れることなく適切に状態遷移できている。車両検知システムの有効性を確認できる。

Fig. 15(a) において受電器が送電器に進入したときの拡大図を Fig. 16 に示す。1) の区間ではサーチパルスを印加してもすぐにしきい値 I_{1th_on} に達してしまってサーチモードを続けているが、2) の区間ではある一定期間（ここでは T_{search} ）が経ってもしきい値 I_{1th_on} 以下のため、送電側がサーチモード

から送電モードに切り替えている。このとき、3) の区間で EV 側が電力を受給していることを判断して HAR を Short mode から Rectification mode として、待機モードから充電モードに切り替えている。これによって、4) の区間で適切に電力伝送を実現できている。従って、送電側および EV 側は Fig. 12 に示したフローチャートに沿って車両検知から電力伝送までを制御できている。有効性が確認できる。

6. まとめ

本稿では走行中ワイヤレス給電における特有の課題について検討し、送電設備と EV システムの間で通信を用いることなく、車両検知から電力伝送までを協調しながら制御できるシステムを示した。また、フローチャートに基づいて制御実装を行い、実験検証によって有効性を確認した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 25709020, 15H02232, 16J06942 の助成を受けて行われたことを付記する。

参考文献

- (1) G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern trends in inductive power transfer for transportation application," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 1, no.1, pp. 28–41, Mar. 2013.
- (2) S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE J. of Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no.1, pp. 4–17, Mar. 2015.
- (3) 庄木裕樹:「ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み」, 信学技法, WPT2010-07, 2010, pp. 19–24.
- (4) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance," *Science Express on 7 June 2007*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jun. 2007.
- (5) 小林大太・居村岳広・堀洋一:「走行中ワイヤレス給電システムにおけるリアルタイム最大効率制御」, 電学論 D, vol. 136 no. 6, pp. 425–432, 2016.
- (6) 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.
- (7) D. Kobayashi, K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, and Y. Hori: "Sensorless vehicle detection using voltage pulses in dynamic wireless power transfer system," in *Proc. EVS29*, 2016.
- (8) 宅崎恒司・星伸一:「非接触給電装置の共振回路高効率化のための受電側降圧コンバータの動作条件の検討」, 電学論 D, vol. 132 no. 10, pp. 966–975, 2012.
- (9) 居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一:「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究」, 電学論 D, vol. 130, no. 1, pp. 84–92, 2010.