

電化道路電動カート EVER 用高効率整流回路

杉浦 貴光 鈴木 良輝 坂井 尚貴 ウリントヤ 大平 孝

豊橋技術科学大学 工学研究科 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: sugiura@comm.ee.tut.ac.jp

あらまし 電動カートによる電化道路電気自動車 EVER (Electric Vehicle on Electrified Roadway) 実験のための高効率 RF 整流回路及びインピーダンス整合回路を設計、試作した。整流回路と整合回路の総合電力伝送効率を測定した結果、最大 95 % 達成した。整流回路を EVER システムに組み込み、電動カートが動作することを確認した。

キーワード 電力伝送, 整流回路, 電気自動車, V-WPT

High Efficiency RF Rectifier for Via-Wheel Power Transfer to Mobility Scooter on Electrified Roadway

Takamitsu SUGIURA, Yoshiki SUZUKI, Naoki SAKAI, Toya WUREN, and Takashi OHIRA

Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi,
441-8580 Japan

E-mail: sugiura@comm.ee.tut.ac.jp

Abstract We designed and prototyped RF rectifier with matching circuit for V-WPT(via-wheel power transfer) system to mobility scooter on Electrified Roadway. Total power transmission efficiency of prototyped rectifier and matching circuit was maximum 95 %. We verified that mobility scooter was moved by V-WPT system with prototyped rectifier.

Key words Power transfer, Rectifier, Electric vehicle, V-WPT

1. まえがき

環境問題, エネルギー問題への関心の高まりから, 電気自動車が目ざされている。電気自動車には 1 回充電当たりの航続距離が短い, 充電時間が長いというバッテリーに起因する問題点が存在する。解決方法として, 走行中の電気自動車へ無線で電力を供給するワイヤレス給電システムが研究されている [1]- [4]。走行中車両へのワイヤレス給電にはマイクロ波方式 [2], [3], 電磁誘導方式 [4] などの電力伝送方式が提案されている。しかし, 送受信機の位置ずれによる伝送効率の低下や, システムの材料コスト, 埋設コストが高いというデメリットがある。

これらのデメリットがないワイヤレス給電として, 路面下に埋設された金属板からタイヤを通して走行中の電気自動車へ電力伝送を行う V-WPT (Via-Wheel Power Transfer) 方式 [5] を用いた電化道路電気自動車 EVER (Electric Vehicle Electrified Roadway) [6] が提案された。V-WPT 方式は自動車が金属板上を走行する間, 常に一定の誘電結合が形成され続けるため, 位置ずれに強い。また, 金属板は鉄やアルミニウムなど, 金属であれば材質の制限を受けず, 道路補強の建材として用いられる鉄の金網も利用できるため, 材料コストの低減が期待できる。

我々は EVER システムの有効性を確認するため, 自動車のスケールモデルである電動カートを用いた EVER システムを製作している。EVER システムの一要素である整流回路には, 7 MHz 帯, 数十 W の RF 電力を高効率で DC に変換することが求められる。しかし, 上記の性能を持つ高効率 RF 整流回路の報告はない。本稿では高効率 RF 整流回路とインピーダンス整合回路の設計, 試作し, 電力伝送効率の測定結果と電動カートの動作実験結果について報告する。

2. 電化道路電気自動車 (EVER)

EVER システムの概要を図 1 に, 等価回路モデルを図 2 に示す。EVER は RF インバータ, V-WPT, RF 整流回路の 3 つの要素から成るワイヤレス給電システムである。V-WPT 系では, 路面下の金属板とタイヤ内スチールベルト, アスファルトとタイヤのゴムで誘電結合 (コンデンサ) を形成する。コンデンサは RF を通すので, 電力伝送が可能である。V-WPT 系へ RF 電力を送電するために DC-RF 変換を行うインバータがある。DC モータを駆動させるため, V-WPT 系の後段に RF-DC 変換を行う整流回路がある。RF インバータと V-WPT 間, V-WPT と RF 整流回路間にインピーダンス整合回路を挿

入し、各系の出力、入力インピーダンスを 50Ω に統一することで、各系が独立して設計できる。

3. 電化道路電動カートモデル

図3に示す、自動車の1/4スケールモデルである電動カート
を EVER システムの実験に用いる。V-WPT 系から RF 整流
回路への入力電力を最大 35 W とした。実験は、後輪タイヤを
浮かせて無負荷状態とした上で、電動カートが動作すること
を確認する。そのため、後輪タイヤ空回転時における電動カート
のモータ+制御回路の消費電力と負荷抵抗の関係を求める。

電動カートの入力電圧を 25 V と固定する。速度を時速 $1 \sim 6$
 km の変数としたときの静止時、加速時、定速走行時における
電流量を測定する。電流量の測定結果と測定結果から求めた消
費電力と負荷抵抗の値を表1に示す。RF 整流回路への入力電
力が最大 35 W であることから、消費電力が 24.6 W 以下で電動
カートが動作可能な時速 3 km/h で電動カートの動作実験を行
う。このとき、消費電力、負荷抵抗にはそれぞれ約5倍の変動
がある。この変動によってV-WPT系と整流回路間にインピー
ダンスの不整合が生じると、電力伝送効率は低下する。設計す
る整流回路には、消費電力、負荷抵抗の変動に対して電力伝送
効率が大きく低下せず、常に高効率であることが要求される。

表 1 電動カートの負荷抵抗・消費電力

		速度		
		1 km/h	3 km/h	6 km/h
電流 I	静止時	0.2 A	0.2 A	0.2 A
	加速時			
	定速走行時	0.7 A	0.98 A	13 Ω
負荷抵抗 Z_L	静止時	125 Ω	125 Ω	125 Ω
	加速時			
	定速走行時	35.7 Ω	25.4 Ω	13 Ω
消費電力 P	静止時	5 W	5 W	5 W
	加速時			
	定速走行時	17.5 W	24.6 W	48 W

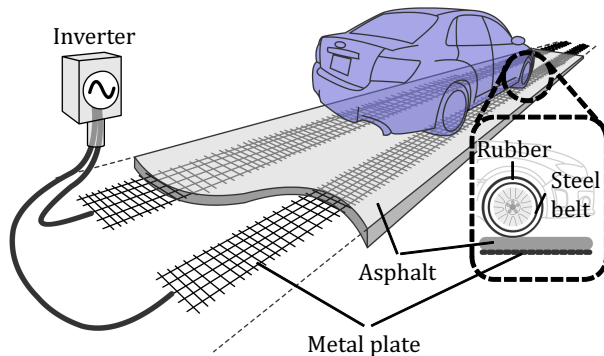


図 1 EVER システムの概要

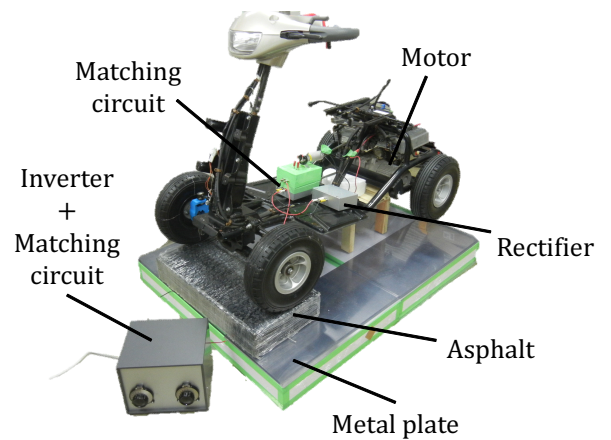


図 3 電動カート

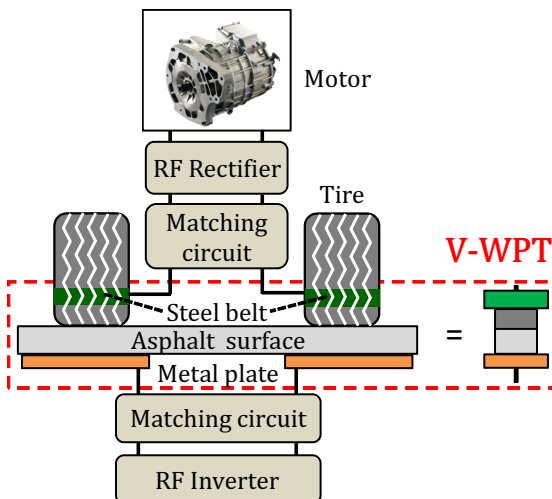


図 2 EVER システムの等価回路モデル

4. 整流, 整合回路設計・試作

設計, 試作した整流回路を図4に示す. V-WPT系の出力インピーダンスは $50\ \Omega$ であることから, V-WPT系と整流回路間で反射電力が発生する. 対策として整流回路の前段に整合回路を挿入し, インピーダンス整合を行う.

インピーダンス整合に要求される仕様を表2に示す. 入力信号周波数はV-WPT系の電力効率が最大となる $7.05\ \text{MHz}$ とする. 負荷抵抗は時速 $3\ \text{km}$ で定速走行時の値と同じ $25.4\ \Omega$ とする. このときの消費電力は $24.6\ \text{W}$ であるが, 設計誤差等によって整流回路の出力電力が消費電力を下回ることを防ぐため, 余裕を持って出力電力を $26.6\ \text{W}$ とする. インピーダンス整合は以下の手順に沿って行う.

- 1 整流回路の入力インピーダンス Z_{in} を測定し, Smith Chart 上にプロット
- 2 $\text{Re}\{Z_{in}\}$ を $50\ \Omega$ に変換
- 3 $\text{Im}\{Z_{in}\}$ を $0\ \Omega$ に変換

手順1として, ソースプル法を用いて Z_{in} を測定した結果, Z_{in} の値は式(1)であった.

$$Z_{in} = 90.4 - j47.3 \quad (1)$$

この値を図5のSmith Chart上にプロットする. 手順2として, Z_{in} を Admittance Chart に沿って, Smith Chart の $50\ \Omega$ 定 SWR 円と交差するまで移動する. この動作は整流回路の前段へ並列に $120\ \text{pF}$ のコンデンサを挿入することと等価である. コンデンサを挿入した結果, Z_{in} の値は式(2)となった.

$$Z_{in} = 50 - j47.3 \quad (2)$$

手順3として, Z_{in} を Smith Chart の $50\ \Omega$ 定 SWR 円に沿って中心まで移動する. この動作は整流回路の前段へ直列に $1.29\ \mu\text{H}$ のインダクタを挿入することと等価である. インダクタを挿入した結果, Z_{in} の値は式(3)となった.

$$Z_{in} = 50 \quad (3)$$

V-WPT系の出力インピーダンスとRF整流回路の入力インピーダンスは共に $50\ \Omega$ となり, インピーダンス整合を行うことが出来た. 整合回路を接続した整流回路を図6に示す. 設計した整流回路をシミュレーションと実験で解析, 評価する.

表2 整流回路の入力インピーダンス整合における仕様

負荷抵抗 Z_L	$25.4\ \Omega$
出力電力 P_{out}	$26.6\ \text{W}$
入力信号周波数 f_{in}	$7.05\ \text{MHz}$



図4 設計, 試作した整流回路

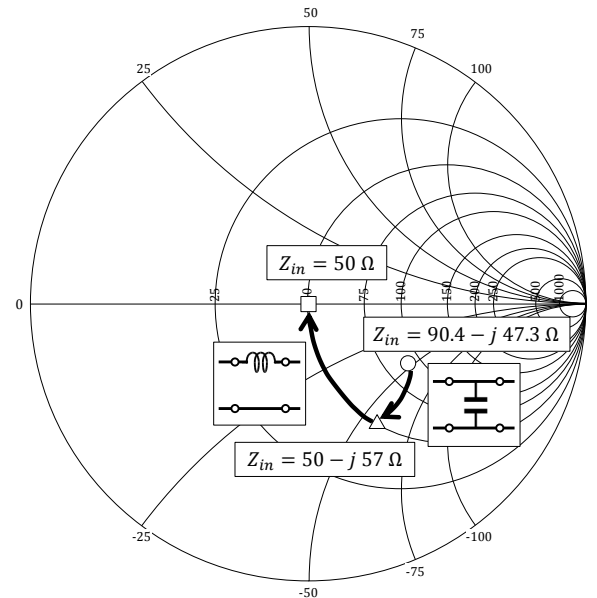


図5 Smith Chart を用いた整流回路の入力インピーダンス整合

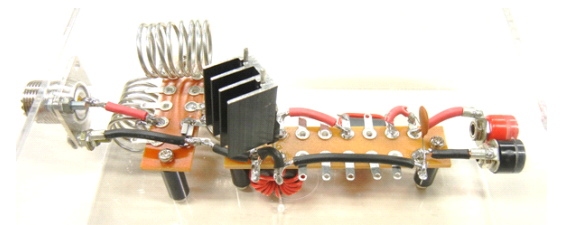


図6 整合回路を接続した整流回路

5. 電力伝送効率

整流回路の性能評価指標として、電力伝送効率を用いる。電力伝送効率の定義を図7を用いて説明する。内部インピーダンス 50Ω の交流電源に整合回路、整流回路、 $Z_L [\Omega]$ の負荷抵抗が接続されている。交流電源から $P_{in} [W]$ の電力が回路に入力されたとき、負荷の出力電力は $P_{out} [W]$ から整流回路の不整合による反射損失 $P_{ref} [W]$ と RF-DC 変換時に発生する変換損失 $P_{cl} [W]$ を引いた $P_{out} [W]$ となる。これらの電力損失を考慮した性能評価指標として、電力伝送効率 η_{trans} を式(4)と定義する。

$$\eta_{trans} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

6. 整合、整流回路の解析および評価

6.1 電力伝送効率

製作した図6の整流回路の電力伝送効率 η_{trans} をシミュレーションと実験で求め、結果を比較する。シミュレーション、実験諸元を表3に、 η_{trans} のシミュレーション結果、実験結果をそれぞれ図8、9に示す。実験において負荷抵抗 $Z_L=25.4 \Omega$ 、入力電力 $P_{in}=17.8\sim 28.8 W$ のとき、 η_{trans} は最大95%を達成した。シミュレーション結果と実験結果を比較すると、 η_{trans} はほとんど一致しており、実験が正しく行えたと判断出来る。また、入力電力、負荷抵抗が大きくなるにつれて、 η_{trans} が大きく低下している。これはダイオードでの電力損失が原因である。ダイオードの尖頭逆電圧が定格値を超えているために大きな電力損失が発生している。本実験で使用している5~26.6 Wの出力電力範囲において、電力損失は発生していないため問題は無いが、今後更に大きな電力を扱う際は回路トポロジの工夫が必要であると言える。

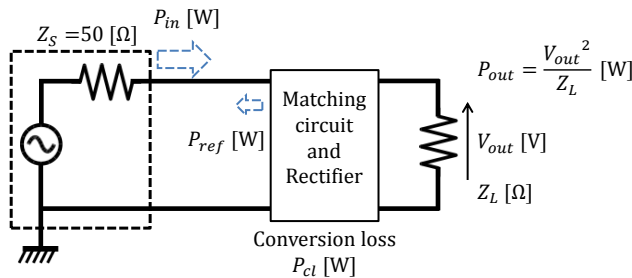


図7 電力伝送効率の定義

表3 η_{trans} のシミュレーションおよび実験諸元

入力信号周波数 f_{in}	7.05 MHz	
入力電力 P_{in}	4.5 ~ 50 W	
負荷抵抗 Z_L	アイドリング時	125 Ω
	加速時	40, 60, 80, 100 Ω
	定速走行時	25.4 Ω

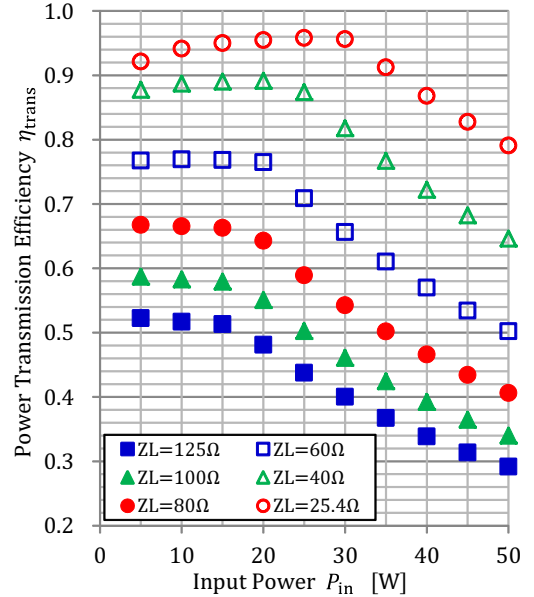


図8 η_{trans} の入力電力特性シミュレーション

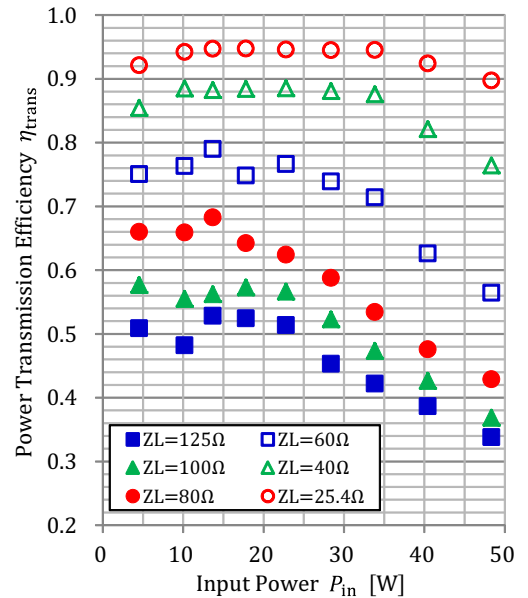


図9 η_{trans} の入力電力特性実験

6.2 電動カートの動作実験

整流回路の出力電力と電動カートの消費電力を比較し、電動カートが動作可能であるかを調べる。実験諸元を表 4 に、比較結果を図 10 に示す。入力電力 28.4 W のとき、すべての状態において整流回路の出力電力が電動カートの消費電力を上回っている。この結果から、入力電力が 28.4 W 以上あれば電動カートが動作可能であると判断できる。

図 6 の整流回路を EVER システムに組み込み、電動カートの動作実験を行った。実験の結果、電動カートが動作し、EVER システムの有効性が確認出来た。

7. むすび

EVER システムの有効性を確認するため、電動カート用の RF 整流回路を設計、試作した。V-WPT 系と RF 整流回路間の反射電力を低減させるため、Smith Chart を用いてインピーダンス整合回路を設計、試作した。試作した整合・整流回路の電力伝送効率 η_{trans} は最大 95 % を達成した。EVER システムに組み込んだ結果、電動カートが動作し、EVER システムの有効性を確認した。今後の課題として、更に大きな電力を扱うことが挙げられる。

文 献

- [1] 西川和廣, “電気自動車 (EV) 普及が拓げる道路インフラの可能性への期待,” 土木学会誌, 94(4), 43, April 2011.
- [2] 篠原真毅, 松本紘, “マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究,” 信学論 C, Vol. J87-C, No. 5, pp. 433-443, May 2004.
- [3] 加々美友宏, 松下隼人, 岩堀大希, 桑原義彦, “走行中の模型電気自動車へのワイヤレス送電デモシステム,” 信学技報, WPT2010-20, pp. 37-42, Jan. 2011.
- [4] Sungwoo Lee, Jin Huh, Changbyung Park, Nam-Sup Choi, Gyu-Hyeong Cho, Chun-Taek Rim, “On-Line Electric Vehicle using Inductive Power Transfer System,” IEEE ECCE2010, pp. 1598-1601, Atlanta, Sept. 2010.
- [5] M.Hanazawa and T.Ohira, “Power Transfer for a Running Automobile,” IEEE MTT-S, IMWS-IWPT2011, pp. 77-80, Kyoto, May 2011.
- [6] Y.Suzuki, T.Sugiura, N.Sakai, M.Hanazawa, T.Ohira, “Dielectric Coupling from Electrified Roadway to Steel-Belt Tires Characterized for Miniature Model Car Running Demonstration,” IEEE MTT-S, IMWS-IWPT2012, pp. 35-38, Kyoto, May 2012.

表 4 整流回路出力電力と電動カート消費電力の比較における諸元

入力信号周波数 f_{in}	7.05 MHz
入力電力 P_{in}	22.8, 28.4 W
負荷インピーダンス Z_L	125 ~ 25.4 Ω

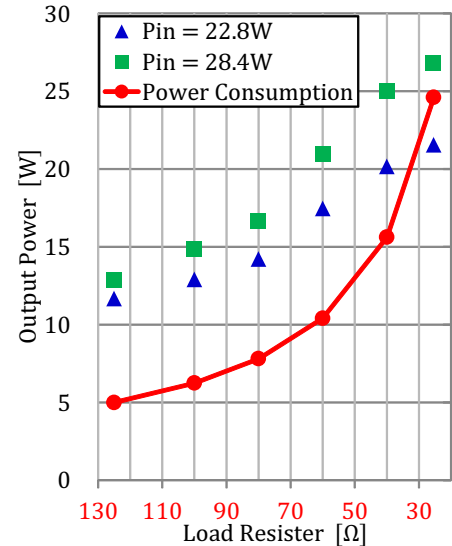


図 10 整流回路出力電力と電動カート消費電力の比較