

## 261-20105612 非接触充電システム (第2報) \*

保田 富夫<sup>1)</sup> 井田 和彦<sup>2)</sup> 阿部 茂<sup>3)</sup> 金子 裕良<sup>4)</sup> 鈴木 明<sup>5)</sup> 山之内 良一<sup>6)</sup>

## Contactless Charging System (Second Report)

Tomio Yasuda Kazuhiko Ida Shigeru Abe Yasuyoshi Kaneko Akira Suzuki Ryoichi Yamanouchi

A contactless power transfer system is desirable for recharging of electric vehicles (EVs). A contactless power transfer system for EVs must have high efficiency, a large air gap, good tolerance to misalignment and be compact and lightweight. A novel transformer was developed using series and parallel capacitors with rectangular cores and double-sided windings to satisfy these criteria. An output power of 1.5 kW and efficiency of 95% was achieved in the normal position. The characteristics of the system when a charge control circuit and lead acid batteries are connected to the secondary winding are also presented.

Key Words: EV and HV systems, onboard charging system, system technology / Contactless power transfer (A3)

## 1. はじめに

地球温暖化等の環境問題や原油価格の高騰により、プラグインハイブリッド自動車や電気自動車が現実のものとなってきた。現在は電源ケーブルとプラグで車に充電する方式が一部で実用化されているが、利便性や安全性等の問題から今後は非接触充電方式が有望である<sup>(1)</sup>。

非接触で電力を送る方式には、マイクロ波送電方式、電磁誘導方式や電磁共鳴方式などがある。マイクロ波送電方式は長距離の電力伝送が可能であるが効率が低い。電磁共鳴方式は電磁誘導方式に比較して長距離の電力伝送が可能であるが、周波数が数十 MHz という高周波を利用するためスイッチングデバイスへの負担が大きく効率も低下し、数 kW の電力を送る大電力用には適していない。図 1 に示す電磁誘導方式はスイッチング周波数が数十 kHz と他方式に比較して低く、給電トランス構造の工夫により十数センチ程度の距離でも電力伝送可能<sup>(2)</sup>であり、総合的な効率を高くすることが可能である。

筆者らは、漏れリアクタンスを補償するコンデンサを一次直列二次並列に接続し、これらコンデンサ容量を特定の値に選ぶと巻線抵抗を無視した場合、電源周波数において両コンデンサを含むトランスの等価回路が理想変圧器と等価になることを示した<sup>(3)</sup>。また、給電トランス構造としては、従来採用されてきた円形コア片側巻方式に比較して、角型コア両側巻方式の方が小型軽量化に有利であることを明らかにしてきた<sup>(2)(4)(5)</sup>。

本研究では、角形両側巻給電トランスと一次直列二次並列共振コンデンサで構成される非接触充電システムを対象に、大きな位置ずれ発生時の給電効率、電池充電時の効率評価を中心に行った。

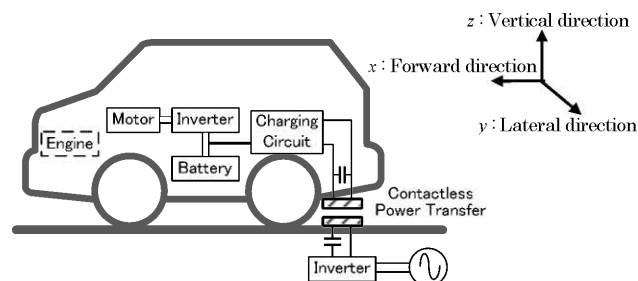


Fig. 1 Contactless Charging System for electric vehicle

## 2. 非接触給電システム

## 2.1 非接触給電システム

一次直列二次並列コンデンサ方式の非接触給電システムの構成を図 2 に示す。商用電源をフルブリッジインバータで  $f_0=20\text{kHz}$  の高周波に変換し給電トランスの一次側に入力する。トランスのコアはフェライト、巻線はリッツ線を用いている。

## 2.2 等価回路

給電トランスを T 型等価回路で表し、直列及び並列共振コンデンサ  $C_s$ ,  $C_p$  と抵抗負荷  $R_L$  を加えた詳細等価回路を図 3 に示す。なお、巻数比を  $a=N_1/N_2$  とし、一次側諸量は二次側に換算し (ダッシュ) をつけて表す。実際の給電トランスでは、フェライトコアとリッツ線を用いると鉄損を表す  $r_0$  と巻線抵抗  $r_1$ ,  $r_2$  は電源周波数においてトランスのリアクタンス  $x_0$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  に比べて十分小さい。従って巻線抵抗  $r_1$ ,  $r_2$  と鉄損  $r_0$  を省略し、図 4 (a) の簡略等価回路で解析を進める。

\*2010年10月1日 自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・2) 榎テクノバ(100-0001 東京都千代田区内幸町1-1-1)

3)・4) 埼玉大学(338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

5)・6) アイソ・エイ・ダブリュ(株)(444-1192 安城市藤井町高根10)

### 2.3 直列および並列共振コンデンサ

まず二次側並列コンデンサ  $C_p$  の値を、電源周波数  $f_0$  において二次巻線の自己リアクタンス  $L_2$  に共振するように(1)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = x_p = x'_0 + x_2 = \omega_0 L_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

次に一次側直列コンデンサの値を(2)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C'_s} = x'_s = \frac{x'_0 x_2}{x'_0 + x_2} + x'_1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

### 2.4 理想変圧器特性

ここで、 $V_{IN}$  と  $V_L$ 、 $I_{IN}$  と  $I_L$  の関係を求めると

$$V'_{IN} = b V_L, \quad I'_{IN} = I_L / b, \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となり、図 4 (a) の回路は図 4 (b) の巻数比  $b$  の理想変圧器と等価であることがわかる。トランスの最大効率  $\eta_{max}$  とそのときの負荷抵抗  $R_{Lmax}$  は(4)式となる。

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1}} \quad R_{Lmax} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1} \quad \dots\dots\dots(4)$$

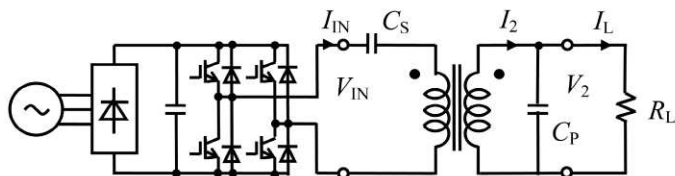


Fig.2 Contactless power transfer system.

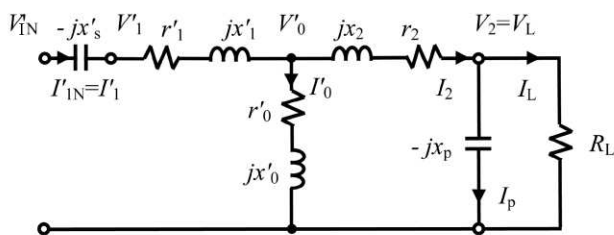
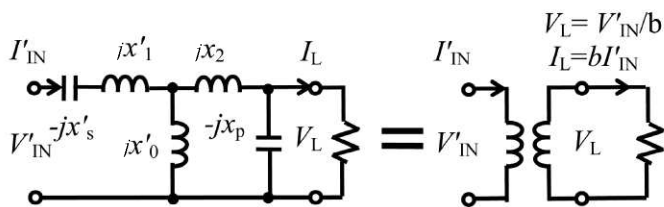


Fig.3 Detailed equivalent circuit.



(a) Simplified equivalent circuit. (b) Ideal transformer.

Fig.4 Simplified equivalent circuit and Ideal transformer.

### 2.5 給電トランスの基本特性

給電トランスは、位置ずれに強く小型化可能な角形平板型コアの両側に巻線を巻く構造を採用した。この角形両側巻給電トランスの仕様を表 1 に、外形写真を図 5 に示す。

Table1 Specification of transformer

Rated power	1.5kW	
Gap length	70±20mm	
Core	FDK 6H40	
Litz wire	0.25f × 24 × 16	
Tolerance to Misalignment	Forward direction x	±45mm
	Lateral direction y	±125mm
Size (x×y)	240mm×300mm	
Weight of the secondary transformer	4.6kg	



Fig.5 Transformer

ギャップ長 70mm で位置ずれがない状態を標準状態とし、ギャップ長変動は±20mm、位置ずれは進行方向(x 方向)±45mm、左右方向(y 方向)±125mm の範囲で給電実験を行った。給電実験は交流電源電圧  $V_{AC}=100V$ 、インバータ周波数  $f_0=20kHz$ 、標準状態における共振コンデンサ  $C_s$  と  $C_p$  の値を一定とし、給電トランス二次側には全波整流器と抵抗負荷  $R_L$  を接続した。

ギャップ長が大きくなると結合係数  $k$  が減少し理想変圧器の巻数比  $b$  も低下するため、二次電圧  $V_2$  は(3)式に示すように増大し、給電効率  $\eta$  は標準状態で 95.3%、ギャップ長 90mm で 93.4%であった<sup>(2)(4)</sup>。

位置ずれが生じるとギャップ長変動時と同様に電圧比 ( $V_{IN}/V_2$ ) が変化し、入力電圧  $V_{IN}$  と負荷抵抗  $R_L$  が一定の場合は、ずれが大きくなると二次電圧  $V_2$  が上がり給電電力  $P_{OUT}$  も大きくなる。左右方向(y 方向)の位置ずれ 125mm 発生時の給電効率  $\eta$  は 91%以上であった<sup>(2)(4)</sup>。

### 2.6 給電トランスの長ギャップ特性

通常車両における車両と地面までの距離は 150mm 程度あることから、非接触充電システムの実用化に向けては長ギャップでの給電特性が重要となる。表 1 に示した標準ギャップ 70mm で設計した角形コア両側巻トランスの長ギャップでの給電効率の理論値及び実験結果を図 6 に示す。実験値はギャップ長 100mm、125mm で最適な  $C_s$ 、 $C_p$  を用いて実験した結果を示す。長ギャップ時のトランス定数実測値から算出した理論給電効率と実験結果は良く一致した。最大給電効率はギャップ 150mm でも 92%以上と高効率であった。

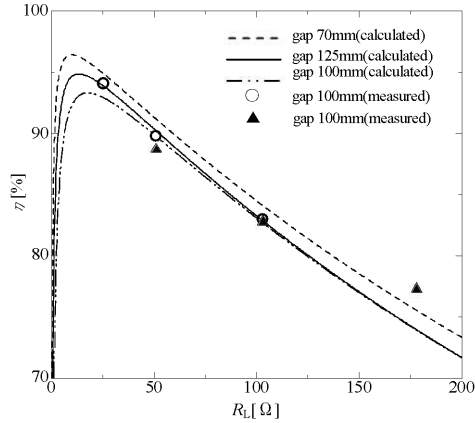


Fig.6 Characteristics of transfer efficiency with air gap change

### 2.7 給電トランスの位置ずれ特性

運転者の技量により大きく変化する車両左右方向の位置ずれ発生時の給電特性も実用化に向けての重要な特性となる。図 7 は大学構内及びスーパーの駐車場において各 100 台の車両の位置ずれ量を測定した結果である。両駐車場とも 95%以上の車両が 150mm 以下であった。また、図 8 に示すパーキングシステムの仕様から、最大位置ずれ量として ±240mm を想定しておけば良いことがわかった。

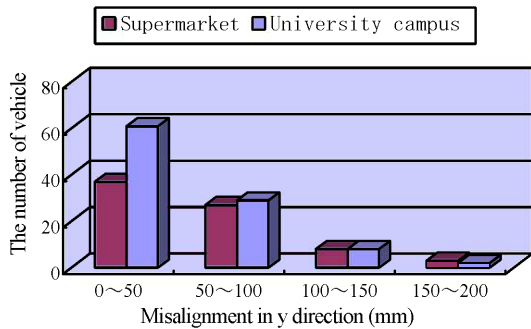


Fig.7 Actual measurement value of misalignment

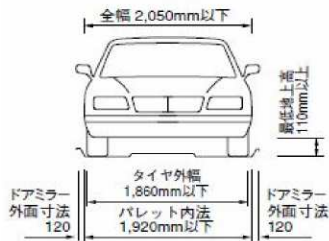
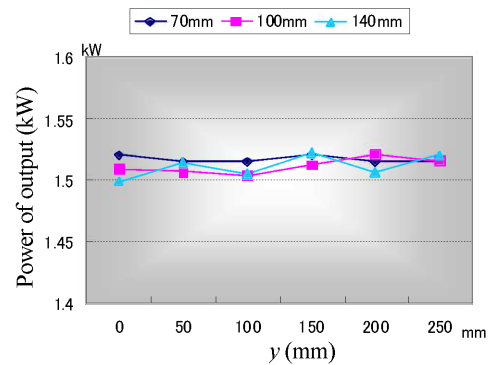


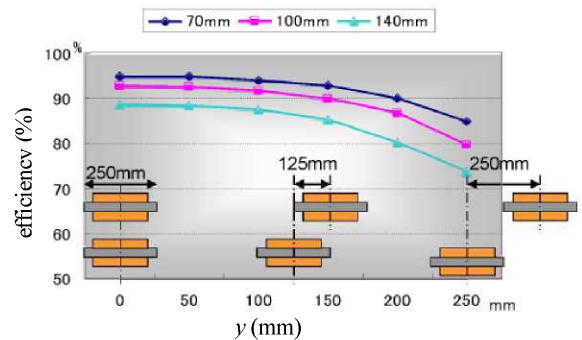
Fig.8 Parking system specification<sup>(6)</sup>

ギャップ長 70mm、100mm 及び 140mm で左右位置ずれがない標準状態における共振コンデンサ  $C_s$  と  $C_p$  の値を一定とし、給電トランス二次側には全波整流器と抵抗負荷  $R_L$  を接続して車両左右方向(x 方向)±250mm の範囲で給電実験を行った。実験結果は図 9(a)、(b)に示すように、標準ギャップ長の 2 倍であるギャップ 140mm、給電トランスサイズ

相当 250mm の大きな位置ずれが発生しても定格出力を安定的に給電出来ている。角形コア両側巻方式の優れた長ギャップ特性及び位置ずれ特性が確認された。



(a) Characteristics of the transfer output power



(b) Characteristics of the transfer efficiency

Fig.9 Characteristics of the transfer with misalignment

## 3. 非接触充電システム

### 3.1 非接触充電システム構成

非接触充電システムは図 10 に示すように、給電トランスの二次側に整流器、降圧チョップ及び制御回路等で構成される充電回路が接続された構成になっている<sup>(2)</sup>。制御回路はマイコン、電圧及び電流フィードバック部に接続したローパスフィルター等で構成されている。充電初期は定電流充電し、充電電圧が目標電圧に達すると定電圧で充電する定電流定電圧充電方式を採用している。

### 3.2 充電実験結果

超小型電気自動車用電池の充電を想定し、12V32Ah の自動車用鉛蓄電池を 6 直列接続した二次電池を用い充電電流 4A、定電圧制御移行電圧 87V、充電時間 7 時間の条件で充電実験を行った。鉛蓄電池は満充電から 20Ah 放電し、開放端子電圧 72V の状態で実験を開始した。

実験結果は図 11 に示すように充電電流は目標値に対して誤差 5%程度、充電電圧は誤差 1%未満と良好な充電制御を実現出来ていることを確認した。

図 12 は充電中の給電トランスの効率特性で実線は理論値、プロットは図 11 中の (i)~(iv)のタイミングでの実験値を示

している。定電流動作時は高効率動作しているが、定電圧動作時は負荷抵抗  $R_L$  が大きくなるため効率が低下している。充電中のタイミング(i)~(iv)での負荷抵抗  $R_L$  は、二次側整流器出力電圧  $V_c$  と充電電力  $P_{out}$  から  $R_L = V_c^2 / P_{out}$  として算出した。理論値と実験値は良く一致しており、充電動作時も理想変圧器特性が成立していることがわかる。なお、タイミング(i)~(iii)での理論値と実験値の差異は、整流回路及びチョッパ回路の効率を100%と取り扱ったことに起因している。

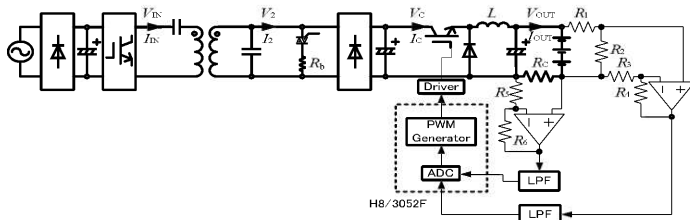


Fig. 10 Contactless charging system

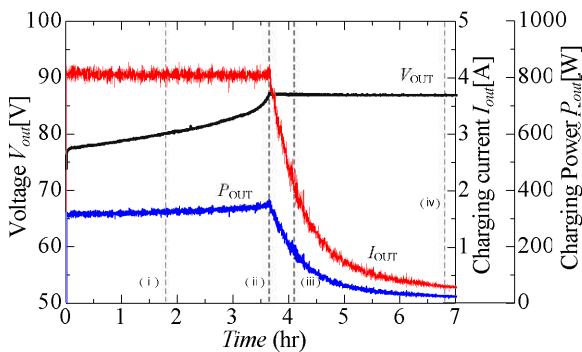


Fig. 11 Characteristics of charging system

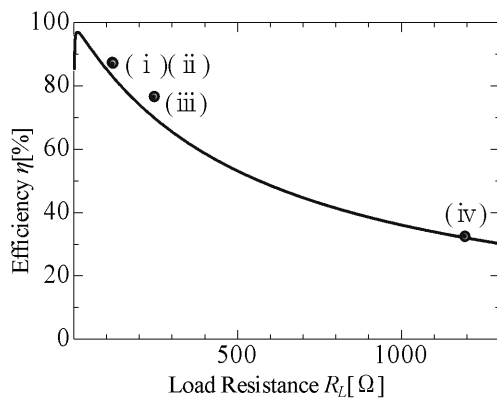


Fig. 12 Characteristics of transfer efficiency with charging

### 3.3 車両搭載実験結果

一人乗り用超小型電気自動車に更に改良した給電トランス二次側及び充電回路を搭載し、充電実験及び走行・駐車実験を行った。充電実験では、給電トランス二次側は車両の図13に示すように底面に装着し、給電トランス一次側はギャップを変化させての実験が出来るようにギャップ調整台の上に設置した。

充電実験は充電電流 7.5A、定電圧充電移行電圧 87V で行った。ボデー等の影響もなく充電出来ることを確認した。

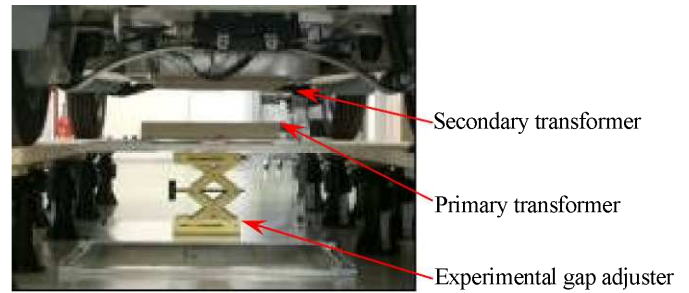


Fig. 13 In-Electric vehicle experiment situation

## 4. むすび

本研究では、標準ギャップ 70mm で設計した角形コア両側巻トランスに一次直列二次並列共振コンデンサを接続した非接触給電トランスの長ギャップ、大きな位置ずれ時の給電特性を明らかにした。標準ギャップ長の2倍であるギャップ 140mm、給電トランスサイズ相当 250mm の大きな位置ずれが発生しても定格出力を安定的に給電出来ることを明らかにした。

また、給電トランスの二次側に充電回路を接続した非接触充電システムの充電実験を行い、良好な充電制御が実現出来ていることを確認するとともに充電動作時の給電トランスの効率特性を明らかにした。

本研究は、新エネルギー・産業技術開発機構「省エネルギー革新技術開発事業」の支援を受け実施したものであり、関係各位に深く感謝致します。また、本研究の遂行に多大の協力を頂いた、埼玉大学大学院の長塚裕一氏、野口真伍氏に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 紙屋雄史・大聖泰弘・松木英敏, “電動車両用非接触給電システム”電気学会誌, Vol. 128, No. 12, pp. 804-807, 2008.
- (2) 保田富夫・井田和彦・阿部 茂・金子裕良: 「電気自動車用非接触充電システム」自動車技術会春季学術講演会 251-20105120(2010)
- (3) 藤田敏博・金子裕良・阿部 茂: 「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電学論D, Vol. 127, No. 2, pp. 174-180 (2007)
- (4) 江夏夏樹・長塚裕一・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・井田 和彦: 「電気自動車用小型角形非接触給電トランス」, 平 21 電気学会産業応用部門大会, R2-4-1 (2009)
- (5) 保田富夫・井田和彦・阿部 茂・金子裕良: 「電気自動車用小型非接触給電技術」, 自動車技術会秋季学術講演会 216-20095781(2009)
- (6) IHI 運搬機械㈱: 「タワーパーキング」技術資料, 4-3