

## 216-20095781 電気自動車用非接触給電技術\*

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>

## Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicle

Tomio Yasuda Kazuhiko Ida Shigeru Abe Yasuyoshi Kaneko

This paper describes comparison of characteristics between double-sided winding and single-sided winding of contactless power transfer systems for electric vehicles. There is an issue that a self-inductance changes by electric current with a fixed gap length in single-sided winding. However, the issue is resolved by controlling secondary voltage constant. As for double-sided winding, a transformer can be miniaturized in comparison with single-sided winding. However, coupling factor is small, and a countermeasure for back leakage flux becomes necessary, too. Leakage flux is shielded by putting an aluminum board on the back. In addition coupling factor becomes larger.

Key Words: Electric Vehicle(EV),Battery, Contactless power transfer, electromagnetic induction, efficiency ⑩

## 1. はじめに

地球環境問題や石油価格の高騰により、家庭やスタンドでバッテリーに充電するプラグインハイブリッド自動車(PHV)や電気自動車(EV)が現実のものとなってきた。現在は電気コードとプラグで車に給電する方式であるが、コードレス化による利便性、プラグの抜き忘れ、急速充電による大電力化を考えると、将来は図1に示す非接触給電方式<sup>(1)(4)(5)</sup>が有望である。

非接触給電は接点の不良、磨耗、火花が無く、クリーンルームなどの工場の搬送車や家電品で実用化されている。基本はギャップ長の大きなトランスで、漏れリアクタンスが大きく、結合係数が0.5~0.1と小さい。このため電源周波数を10kHz以上にとり二次誘起電圧を上げ、漏れリアクタンスの補償のため共振コンデンサを用いる<sup>(1)~(5)</sup>。従来は一次側二次側共に並列コンデンサを用いる方式<sup>(1)(2)</sup>が多かった。筆者らは一次側を直列コンデンサとし一次と二次のコンデンサの値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>。

この理想変圧器特性を用いると、(1) 抵抗負荷であれば電源効率1とゼロ電圧スイッチングが可能で電源の小型化と高効率化ができる、(2) コンデンサの値は負荷の値(給電電力)に依らず一定でよい、(3) 電源を定電圧/定電流制御すれば負荷が変化しても負荷も定電圧/定電流になる、

\*2009年10月9日 自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・2) 榊テクノバ(100-0001 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)

(4) 効率の理論式<sup>(4)</sup>を用いれば給電トランスの最適設計や最大効率運転が可能である、などの利点がある。

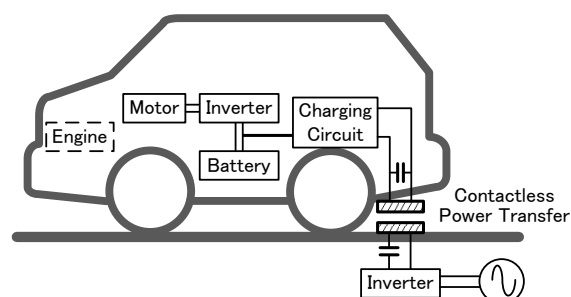
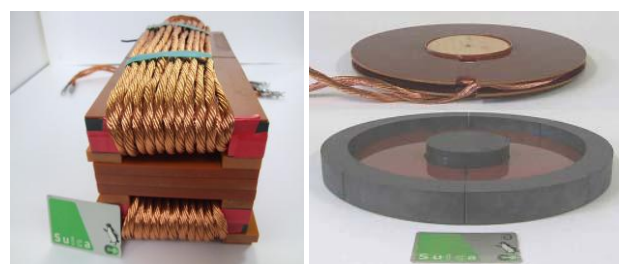


Fig. 1. Contactless Power Transfer System for electric vehicle.

本研究では、一次直列二次並列共振コンデンサを用いた自動車用非接触給電システムにおいて、給電トランスの巻線方式について比較検討を行う。非接触給電トランスでは図2(a)に示すコアの両側にコイルを巻く両側巻トランス、図2(b)に示すコアの片側に巻く片側巻トランスの2種類が考えられる。給電実験と回路計算により、両者の特性を比較する。



(a) Double-sided winding (b) Single-sided winding (Primary)

Fig. 2. Transformer

よりトランスを小型化できる可能性が高いことが分かる。

## 2. 電気自動車用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3に示す。高周波電源にはフルブリッジインバータを用い、給電トランスのコアにはフェライトを巻線にはリッツ線を用いる。

### 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4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5 (a) の簡略等価回路で解析を進める。

### 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  $f_0$  において励磁リアクタンス  $x'_0$  と漏れリアクタンス  $x_2$  との和 (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。

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

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5 (a) の回路は図5 (b) の巻数比  $b$  の理想変圧器と等価であることが分かる。

### 2.5 自動車用非接触給電の特徴

電気自動車用では更に次の特徴があり、これらの性能が重要となる。

- (1) ギャップ長が大きい
- (2) 位置ずれが大きい
- (3) トランスは小型軽量が望ましい

### 2.6 両側巻トランスと片側巻トランス

非接触給電トランスで結合係数を  $k=0.2$  以上にするには、ギャップ長と同程度以上のコイル幅が必要である。トランスのコア幅は、片側巻では (コイル幅+磁極幅) の2倍程度必要なのに対し、両側巻ではその半分で済む可能性がある。左右の許容位置ずれ幅は磁極の形状で決まるため、円形で中心磁極のある片側巻よりは、長方形で中心磁極のない両側巻が有利である。以上より、両側巻のほうが片側巻

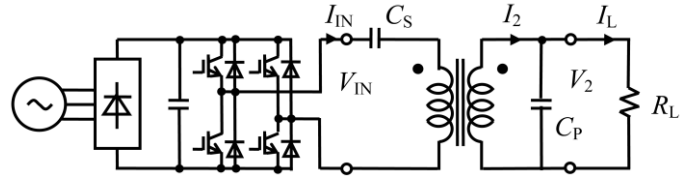


Fig.3. Contactless power transfer system.

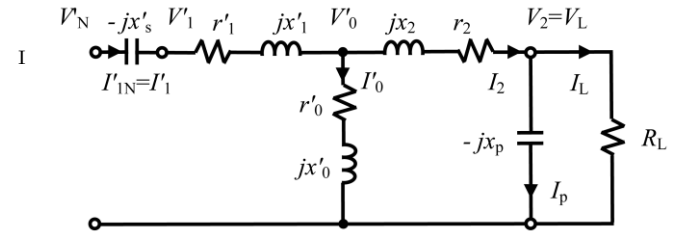
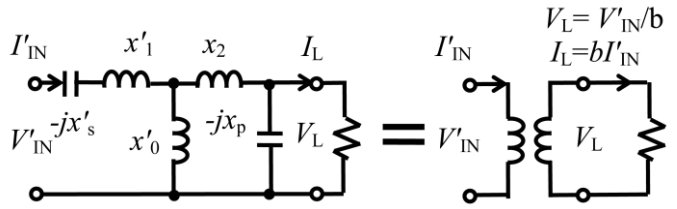


Fig.4. Detailed equivalent circuit.



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

Fig.5. Simplified equivalent circuit and Ideal transformer.

これに対し片側巻には背面に磁束が存在せず、結合係数が大きい特長がある。両側巻は背面に磁束遮蔽のためアルミ板を設置する必要があるが、これには結合係数を高める効果もある<sup>(5)</sup>。

本研究で用いた両側巻トランスと片側巻トランスの写真を図2に、仕様を表1に示す。両トランスとも巻数比  $a=N_1/N_2=2$  とし、主磁束がほぼ同じになるように設計した。両側巻トランスは、 $x$  方向を電気自動車の進行 (前後) 方向に一致させ、磁極の長い方 ( $y$  方向: 300mm) が車幅 (左右) 方向となるように設置する。

Table1. Specification of transformer.

	Double-sided winding	Single-sided winding
Weight	6.9kg×2	11.6kg×2
Core	FDK 6H40 $B_s=0.53T, \mu_i=2400$ (at 0.1MHz)	
Primary	1p×22T	1p×20T
Secondary	2p×11T	2p×10T
Litz wire	0.25φ×24×16	$I_{max}=38A$

### 3. トランス巻線方式による特性比較

電気自動車では二次電池に充電する際に給電電力 (負荷) の変動、駐車時にギャップ長変動や位置ずれが避けられない。両側巻トランスと片側巻トランスで、負荷変動・位置ずれ・ギャップ長変動の特性を比較する。

#### 3.1 負荷変動特性

ギャップ長(50mm)と負荷電圧  $V_L$  を一定にして、抵抗負荷  $R_L$  の値を 7, 10, 20Ω と変えた場合の波形と給電特性を

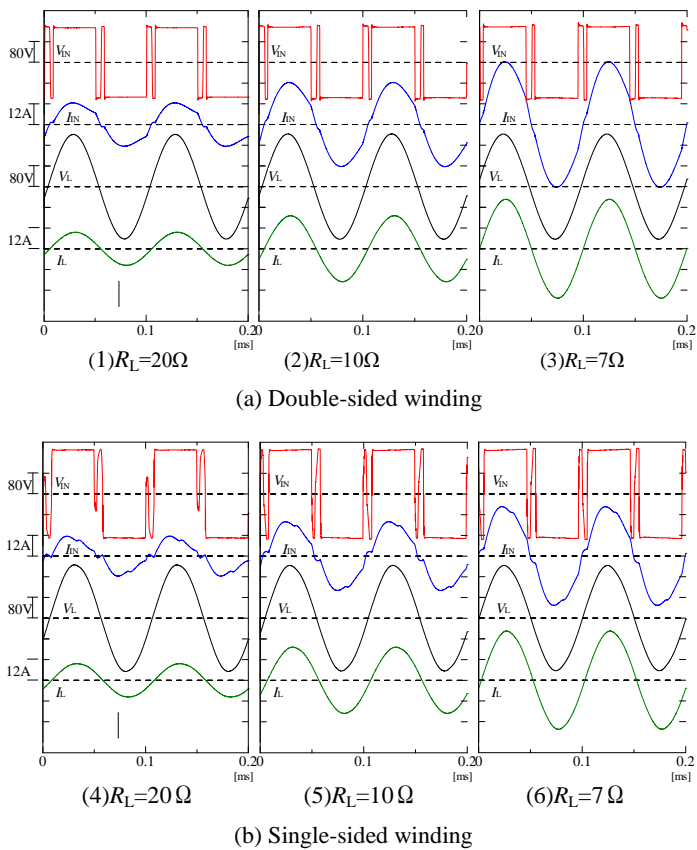


Fig. 6. Characteristics with resistance-load.

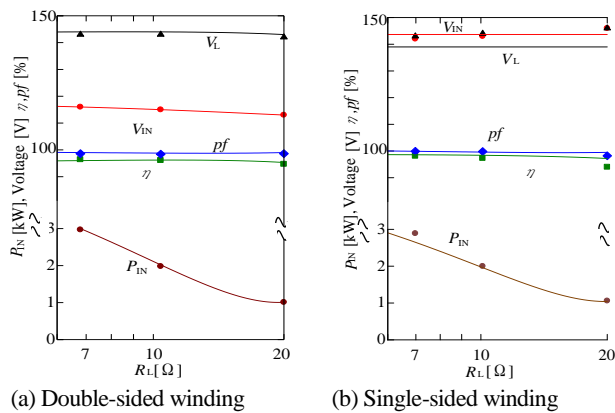


Fig. 7. Characteristics with resistance-load change.

図6と図7に示す。図6を見ると、電源電圧  $V_{IN}$  は方形波であるが負荷電圧  $V_L$  と電流  $I_L$  は正弦波であるため、実験値と計算値の比較は基本波成分で行った。

抵抗負荷  $R_L$  の値を変化させた場合は図6、図7に示すように、両トランスとも電源電圧  $V_{IN}$  一定で負荷電圧  $V_L$  も一定となり、理論通り定電圧特性を示すことが分かる。また給電効率  $\eta$  もともに95%以上である。片側巻トランスでは負荷抵抗  $R_L$  を変えて負荷電流  $I_L$  が変化しても、自己インダクタンス  $L_2$  の電流依存性の影響が見られず、入力、負荷の電圧、電流の位相がほぼ一致しており、力率  $pf$  もほぼ1である。これは二次並列共振コンデンサ  $C_p$  に流れる電流  $I_p$  が負荷電流  $I_L$  に比べて十分大きく、負荷抵抗  $R_L$  が変化して

も二次側のコイルに流れる電流  $I_2$  がほとんど変化しないためと考えられる。このため、片側巻トランスでは  $I_p$  が一定となるように負荷電圧  $V_L$  一定で給電することが重要となる。

### 3.2 ギャップ長変動・位置ずれによる特性

ギャップ長や位置が変化すると最適な  $C_p$ 、 $C_s$  の値は変化するが、実際の装置では変更は不可能なため、ギャップ長50mmのときの  $C_p$ 、 $C_s$  値を用いる。

ギャップ長を50mmから30mm、70mmと変えた場合の給電特性を図8に示す。ギャップ長が変化しても給電効率は95%以上となっている。片側巻トランスはギャップ長30mm時の力率の低下が大きい。これは自己インダクタンス  $L_2$  の変動が大きく、 $C_p$  の値が共振条件とかなり異なることが原因と考えられる。

次に、各巻線方式の位置ずれによる給電特性を図9に示す。車の前後方向を  $x$  方向、車幅方向を  $y$  方向とした。両トランスとも位置がずれると結合係数  $k$  が減少し、理想変圧器の巻数比  $b$  も減少するため、入力電圧/負荷電圧  $V_{IN}/V_L$  が変化する。実験結果より位置ずれが大きくなると給電効率および力率も低下する。しかし、両側巻トランスの前後方向 ( $x$  方向) の全長150mmに対し40mm以下、左右方向 ( $y$  方向) の全長300mmに対し130mm以下、片側巻トランスの直径340mmに対し70mm以下の位置ずれでは、給電効率95%以上となっており、位置ずれが生じても共振コンデンサ  $C_p$ 、 $C_s$  の値は一定で十分給電可能であることがわかる。

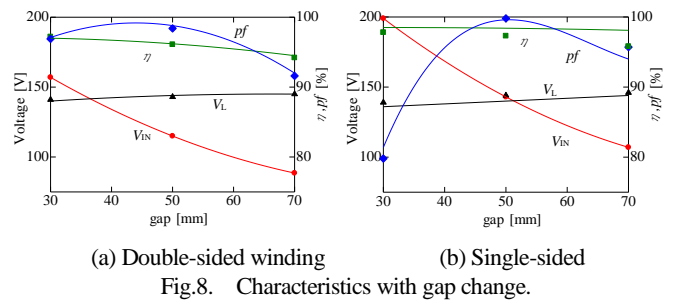


Fig. 8. Characteristics with gap change.

### 3.3 巻線方式によるトランスの特性比較

自動車では前後方向の位置ずれ量はタイヤ止め等で小さくできるが、左右方向は±150mm程度の位置ずれを許容する必要がある。図10はこの点を考慮した、左右方向の磁極幅の大きな両側巻トランス(図10(a))と片側巻トランス(図10(b))との寸法比較図である。フェライトコアの磁極の横幅を  $a$ 、縦幅を  $b$ 、厚さを  $d$  とし、コイル厚を  $e$  とする。ギャップ長、位置ずれ特性がほぼ同等になるトランスの寸法はおよそ表2の寸法となる。片側巻は両側巻に比べて前後 ( $x$  方向) 寸法が約2倍になり、片側巻トランスは小型化に限界がある。従って設置スペースに制約がある乗用車用では両側巻が有利である。また、片側巻トランスは電流による自己インダクタンス  $L$  の変化に注意する必要がある。

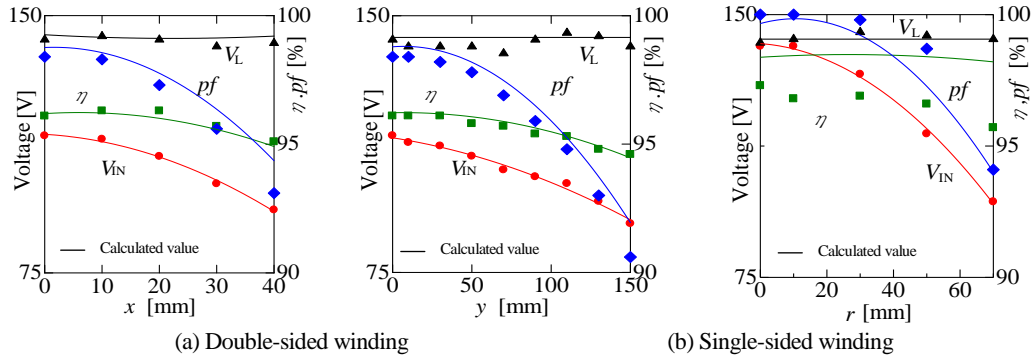


Fig.9. Characteristics with horizontal position change.

Fig.11. Lightweight transformer.

5. むすび

本研究では自動車用非接触給電装置において、一次直列二次並列共振コンデンサ方式による両側巻トランスと片側巻トランスとの特性比較を行った。

両側巻トランスは負荷変動，位置ずれ，ギャップ長変動特性に優れ，給電効率は95%以上と良好であった。両側巻トランスの低結合係数も背面にアルミ板設置することで容易に改善でき，両側巻トランスが小型化において特に有利であることが明らかになった。

また，給電トランスのフェライトコアを間引いた新型両側巻構造宮殿トランスにより，ギャップ長変動や位置ずれに対する性能を維持しながら40%の軽量化が図れることを明らかにした。

本研究の一部は，新エネルギー・産業技術開発機構「省エネルギー革新技术開発事業」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。

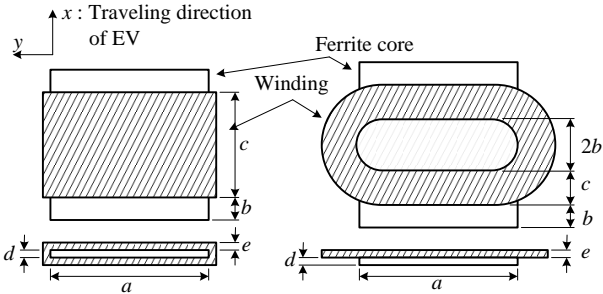
参考文献

- (1)Chwei-Sen Wang, Oskar H. Stielau, and Grant A. Covic:“Design consideration for a contactless electric vehicle jattery charger”, IEEE Trans. , Vol.52, No. 5, pp.1308-1314 (2005)
- (2)J.T.Boys, G.A.Covic and A.W.Green : “Stability and control of inductively coupled power transfer systems”, *Proc. IEE - Elect. Power Applicat.*, Vol.147, No.1, pp.37-43 (2000)
- (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) 岩田卓也・江原夏樹・金子裕良・阿部 茂・保田富夫 : 「直列及び並列共振コンデンサを用いた電気自動車用非接触給電装置」, 電気学会自動車研究会資料, VT-07-11, pp7-12(2007)
- (5) 江原夏樹・岩田卓也・辻 俊明・金子裕良・阿部 茂・保田富夫 : 「漏れ磁束遮蔽アルミ板付き非接触給電の特性」, 平20電学全大, No.4-196 (2008)
- (6) 江原夏樹・長塚裕一・辻 俊明・金子裕良・阿部 茂・保田富夫 : 「電気自動車用小型非接触給電トランス」, 平21電気学

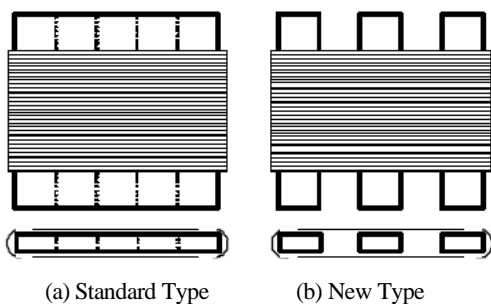
(a) Double-sided winding (b) Single-sided winding

Fig.10. Measure comparison with winding configuration.

Table2. Characteristics comparison with winding configuration.



	4. 給電トランスの軽量化 Double-sided winding	Single-sided winding
ギャップ長変動や位置ずれに対する給電トランスの性能を維持しながら、給電トランスの軽量化を図るため、図11(b)に示すようにフェライトコアを間引いた新型両側巻構造のトランスを製作・評価を実施した。図11(b)は図11(a)と比較しフェライトコアを40%軽量化でき、ギャップ長変動や位置ずれが発生しても図11(a)と同等の性能を発揮できることが確認している。	☆☆☆☆ (2b+c)	☆☆☆☆ (4b+2c)
Size in direction of x	☆☆☆☆ (a+2e)	☆☆☆☆ (a+2c)
Size in direction of y	☆☆☆☆ (d+2e)	☆☆☆☆ (d+e)
Thickness	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Coupling factor	☆☆☆☆	☆☆☆☆
L change according	☆☆☆☆	☆☆☆☆



会産業応用部門大会,R2-4-1 (2009)