

251-20105120 電気自動車用非接触充電システム*

保田 富夫¹⁾ 井田 和彦²⁾ 阿部 茂³⁾ 金子 裕良⁴⁾

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給電する方式であるが、コードレス化による利便性や安全性の向上、プラグ抜き忘れ対策、急速充電による大電力化を考えると、図1に示す非接触充電方式が有望である⁽¹⁾。

自動車用の非接触充電方式では(1)一次二次間のギャップ長が大きい、(2)一次二次間の位置ずれが発生する、(3)小型軽量化が必要であり、これら要求項目を満たした非接触給電トランス開発が重要となる。

非接触給電トランス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⁽¹⁾⁽²⁾。従来は一次側二次側に共に並列コンデンサを用いる方式⁽²⁾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⁽³⁾。

また、従来の給電トランス構造としては、コアが円形、巻線が片側巻のものが用いられてきたが^{(4)~(6)}、上記要求項目に対しては角型コア両側巻トランスの方が有利であることを明らかにしてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。

本研究では、角型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給電システムの車載時想定条件での給電特性を評価するとともに、非接触給電システムに充電制御回路及び二次電池を接続した非接触充電システムとしての性能評価を行った。

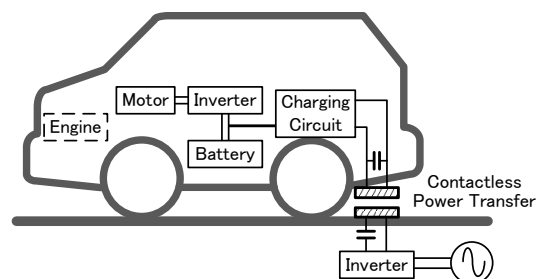


Fig.1 Contactless Charging System for electric vehicle.

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

*2010年5月20日 自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2) ㈱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)

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 4 (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 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分かる。トランスの最大効率 η_{max} とそのときの負荷抵抗 R_{Lmax} は(4)式となる。

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

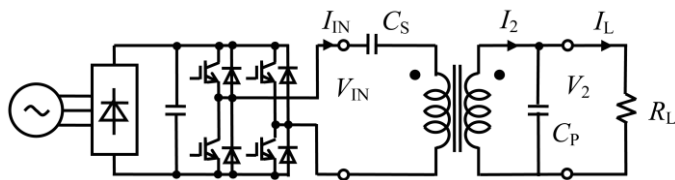


Fig.2 Contactless power transfer system.

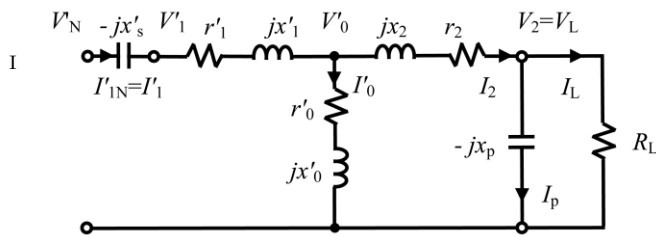


Fig.3 Detailed equivalent circuit.

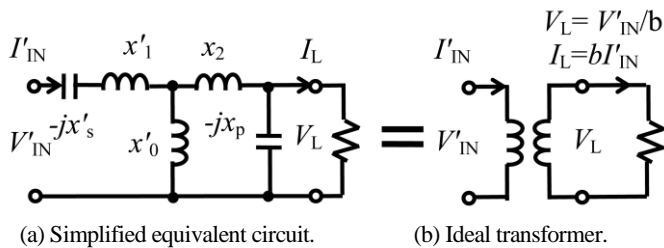


Fig.4 Simplified equivalent circuit and Ideal transformer.

2.4 給電トランスの基本特性

給電トランスは巻線に小型化に有利な両側巻方式、平板型のコアを採用した角型コア両巻給電トランスの開発仕様を表 1 に、外形写真を図 5 に示す。

Table1 Specification of transformer

給電電力	1.5kW	
ギャップ長	70±20mm	
位置ずれ許容範囲	車両進行方向	±125mm
	車両左右方向	±45mm
サイズ	240mm×300mm 以下	
重量	4kg 以下	



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(y 方向)±45mm、左右方向(x 方向)±125mm の範囲で定数測定と給電実験を行った。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。

ギャップ長変動および位置ずれが生じたときのトランス定数を図 6 に、給電実験結果を図 7 に示す。結合係数 k は磁界解析結果を $k(JMAG)$ 、LCR メータでの測定値を $k(LCR)$ として図 6 に示した。ギャップ長または位置ずれが大きくなると主磁束が通る磁路の磁気抵抗が大きくなり、相互インダクタンス I_0 と結合係数 k は低下する。しかし二次巻線の自己インダクタンス L_2 はほぼ一定であり、(1)式で決まる C_p の値も一定で良いことがわかる。

図 7 において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(2)式に示すように増大し、給電効率 η は標準状態で 95.3%、ギャップ長が最大の 90mm でも 93.4%であった。

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。図 7 においていずれの場合も給電効率 η は 91%以上である。このことから平板型コアを使用した角型コア両巻きトランスは位置ずれに強いことがわかる。

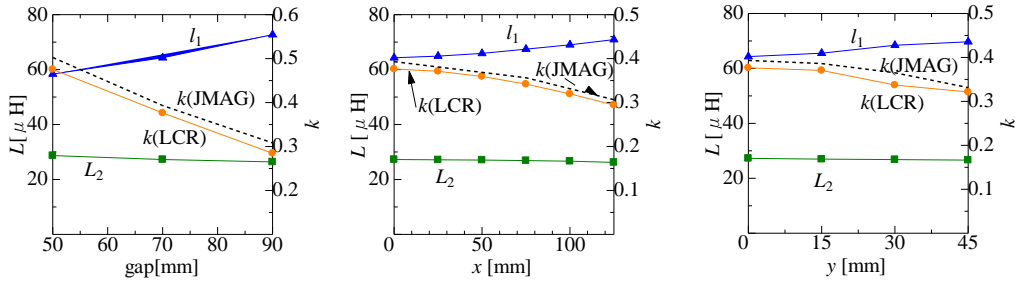


Fig.6 Characteristics of transformer constants

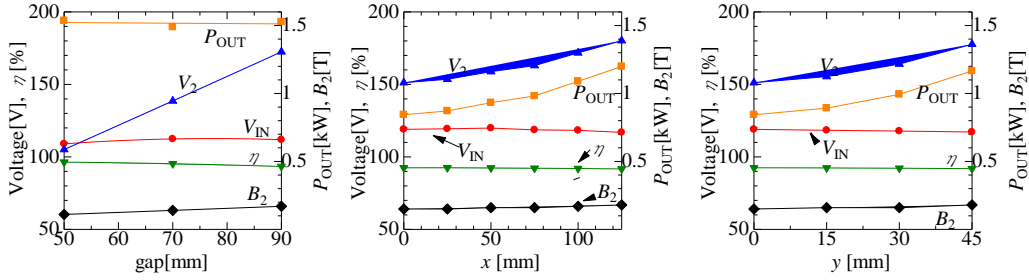


Fig.7 Characteristics of position change

2.5 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 で設計した角型コア両巻トランスの長ギャップでの最大給電効率及び実験結果について示す。

長ギャップの最大給電効率は表 1 に示したトランスの長ギャップ時のトランス定数を実測し、(4)式より最大給電効率を算出した。長ギャップ時の最大給電効率は表 2 に示すように、ギャップ 150mm でも 92%以上と高効率で給電出来る特性を有していることがわかる。負荷特性は図 8 に示すように、実験結果と解析結果は長ギャップにおいても良く一致することを確認している。

Table2 Characteristics of wide gap

	ギャップ (mm)				
	70	75	100	125	150
結合係数 k	0.37	0.35	0.26	0.19	0.14
最大給電効率(%)	96.7	96.4	95.3	94.0	92.3

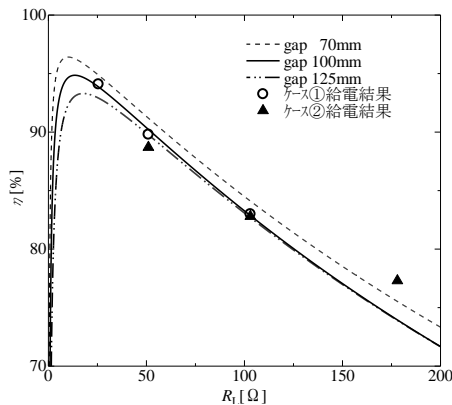


Fig. 8 Characteristics with resistance-load change

2.6 給電トランスの位置ずれ特性

非接触充電システム実用化に向けた給電トランスの大きな技術課題が大きな車両左右方向位置ずれに対する給電性能である。

ギャップ長 70mm で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) ± 250 mm の範囲で給電実験を行った。実験結果は図 9 に示すように、250mm ずれても 82%以上の効率で定格給電電力である 1.5kW を安定的に供給できる特性であることが明らかになった。パーキングシステム等で想定している車両位置ずれ許容範囲は約 240mm 程度であり、大型商業施設等で調査した位置ずれ量は 200mm 以下であることから、巻線として両巻方式を採用した給電トランスは実用上十分な位置ずれ特性を有していることが明らかになった。

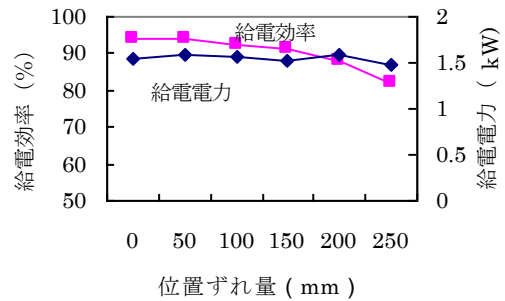


Fig.9 Characteristics with horizontal change

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 のように、給電トランスの二

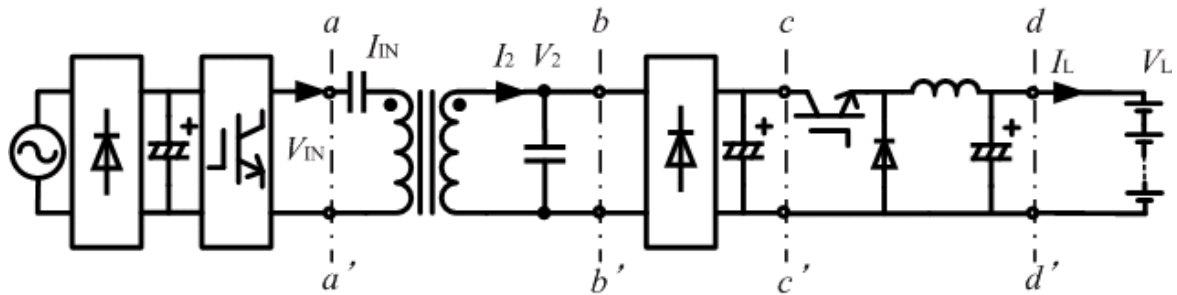


Fig. 10 Contactless charging system

次側に整流器、降圧チョップ等で構成される充電制御部が接続された構成になっている。充電制御部は充電初期は定電流で充電し、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

実験では、超小型電気自動車用電池への充電を想定し、二次電池として自動車用鉛蓄電池 12V32Ah を 6 直列に接続したものをを用いた。充電電流は 4A、定電圧制御移行電圧 87V、充電時間は 7 時間との条件で実験を行った。鉛蓄電池は満充電から 20Ah を放電し、開放状態で端子電圧が 72V の状態で実験を開始した。

図 11 に示す実験結果より、充電電流はノイズが生じているものの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となっている。また、測定した電流積算量から、充電量は 18Ah と推定され電池をほぼ満充電されたことになる。

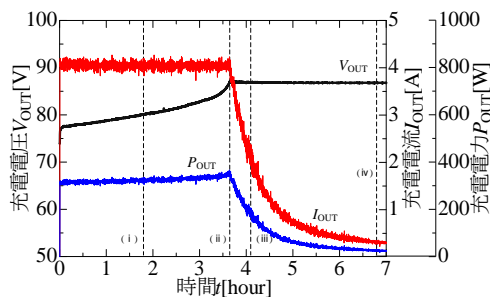


Fig. 11 Characteristics of charging system

図 11 の (i)~(iv) における電圧電流値を図 12 に示す。充電中給電電力が変化しても給電トランス一時電圧 V_{IN} 、二次電圧 V_2 、二次整流出力電流 I_c は一定であり、給電トランス一時電圧 V_{IN} 、電流 I_{IN} は抵抗負荷と同様に同相となっている。

以上より非接触充電システムのトランスにおいても理想変圧器特性が成り立つことが確認できる。

5. む す び

本研究では、小型化に有利である角型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システムが実車時に発生する長ギャップや大きな位置ずれ発生時にも高効率で、安定的に給電可能な実用的な給電

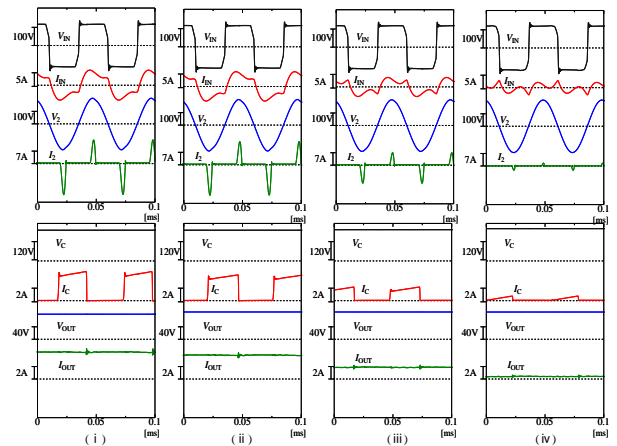


Fig. 12 Waveforms of charge system

トランスである事を明らかにした。また、給電トランスの二次側に充電制御部を接続した充電制御動作特性から、非接触充電システムにおいても角型コア両側巻トランスが理想変圧器特性を成立することを明らかにした。

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、本研究の遂行にあたり、埼玉大学大学院の江原夏樹氏、岡本堯氏にご協力をいただきましたことに対し謝意を表します。

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) M. Budhia and G.A. Covic and J.T. Boys “Design and Optimisation of Magnetic Structures for Lu-mped Inductive Power Transfer Systems”, IEEE ECCE 2009 pp.2081-2088, 2009.
- (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)