

146-20115323 非接触充電システム (第3報) *

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

Contactless Charging System (Third Report)

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

Two technologies that greatly accelerated the practical use of the contactless charge system developed. The contactless power transformer achieved on the miniaturization and the robustness inclination by improving the core architecture. The charging controller achieved making to highly effective and low noise with new DC/DC converter. Concretely, the new DC/DC converter is able to operate back-boost and soft-switching. The contactless charging system composed of these new technologies confirmed it charged the gap change and misalignment with stability with bench test and PHEV test.

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⁽¹⁾。

非接触で電力を伝送する方式には、マイクロ波送電方式、電磁誘導方式や磁気共鳴方式などがある。スイッチング周波数が数十 kHz と低く、十数センチ程度の距離でも高効率で電力伝送可能な電磁誘導方式の非接触充電システムを開発している (図 1)。

電気自動車用非接触給電トランスは、ギャップ長および左右方向の位置ずれ許容範囲を大きく、小型軽量で高効率にする必要がある。トランス構造として円形コア片側巻構造が多く採用されてきたが^{(1)~(2)}、筆者等は左右方向の位置ずれ許容範囲を大きくし小型軽量にするには、角形コア両側巻構造の方が優れていることを発表してきた^{(3)~(5)}。

電磁誘導方式の非接触給電で著名な Auckland 大の Boys 氏等も、電気自動車用として円形コア片側巻構造が位置ずれに弱いことを 2009 年秋に発表し、2010 年秋にはこの問題を解決する両側巻の Flux pipe 構造を発表した⁽⁶⁾。今後、自動車用は両側巻構造が主流になると思われる。

本論文では従来の角形コア両側巻トランスを改良し、小型軽量化、高効率化、位置ずれ許容範囲等で性能向上をめざした新コア構造トランス及び効率改善を図った新方式の充電回路の紹介、これら開発品で構成される非接触充電システムの各種実験結果について述べる。

*2011年5月18日 自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2) 株式会社(株)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) アイシ・エイ・ダブリュ(株)(444-1192 安城市藤井町高根10)

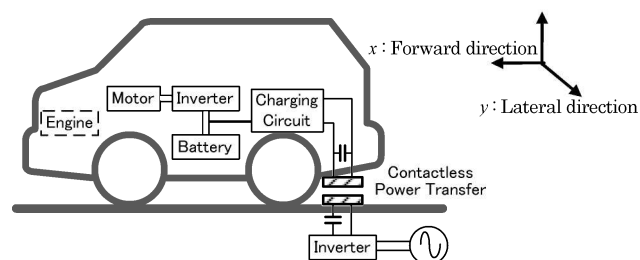


Fig.1 Contactless Charging System for electric vehicle.

2. 非接触充電システム

2.1 非接触充電システム

一次直列二次並列コンデンサ共振方式の非接触給電部、充電部で構成される非接触充電システムの構成を図 2 に示す。高周波電源にはフルブリッジインバータを用い、二次側整流回路は効率向上のため倍電圧整流回路、充電制御回路は効率向上やノイズ低減のため臨界モードフライバック・インターリーブ DC/DC コンバータ方式を採用した。

2.2 非接触給電部の等価回路

給電トランス二次側の負荷を等価抵抗 R_L とし、直列及び並列共振コンデンサ C_s , C_p 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 を省略した回路で解析を進める。また、整流回路と平滑コンデンサを省略し、 C_p に並列に抵抗負荷 R_L だけを接続した回路で考える。

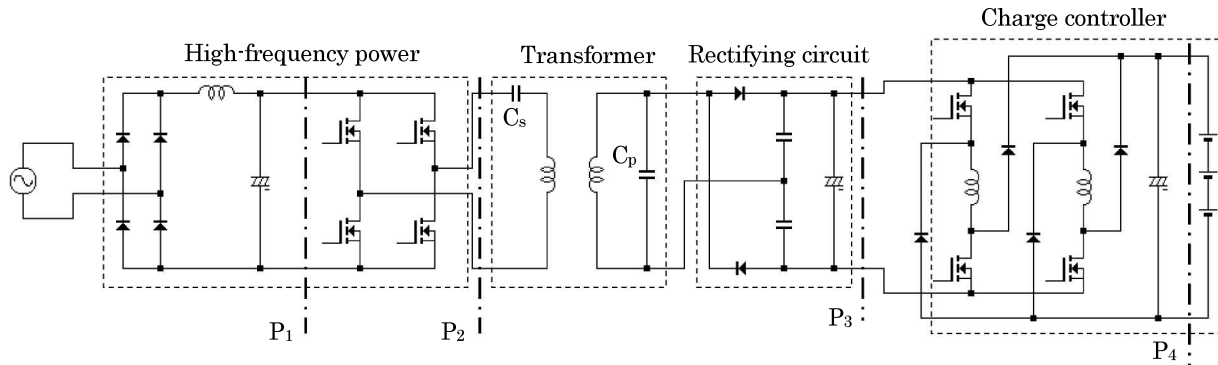


Fig.2 Contactless Charging System Configuration.

2.3 直列および並列共振コンデンサ

二次側並列コンデンサ C_p 、一次側直列コンデンサ C_s は (1)、(2)式から算出する。

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

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、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 η_{max} とそのときの負荷抵抗 R_{Lmax} は(4)式となる。

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

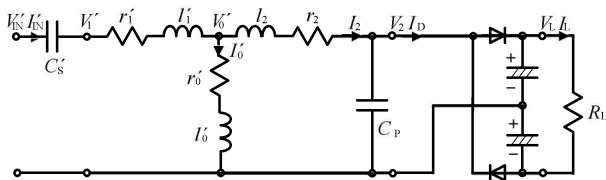


Fig.3 Detailed equivalent circuit of Contactless power systems.

3. 新コア構造給電トランス

3.1 平板型トランスとH型トランス

筆者等は、電気自動車用には、位置ずれに強く小型軽量化が可能な角形コア両側巻構造が最適と考え、図 4(a)に示す平板型トランスやそのこ型トランスを製作し、これらの特性について発表してきた⁽⁵⁾。ギャップ長や位置ずれ特性は磁極形状（長さ、幅）とコイル幅で決まり、コイルは幅さえあれば起磁力を提供するだけである。従ってコアを図

4(b)に示す新コア構造（H型コア）に変えることにより、以下のような改善を狙いとして開発した。

- ①巻線長短縮とフェライト削減による軽量化
- ②巻線長短縮（巻線抵抗低減）による高効率化
- ③磁極長延長による左右位置ずれ許容範囲の拡大
- ④電源周波数の最適化による高効率化

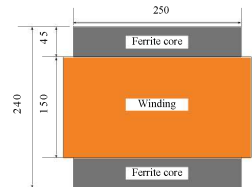
H型トランスの設計目標を表 1、H型トランスと平板型トランスの仕様比較を表 2 に、写真と寸法を図 4 に示す。表 2 よりH型トランスの車載側重量は 3.9kg で、平板型の 4.6kg より軽量化できている。巻線重量は 2.9kg から 2.0kg に減少した。

Table 1. Design goal.

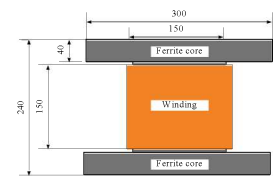
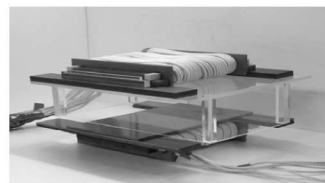
Rated power	1.5kW	
Weight	4.0kg	
Gap length	70±30mm	
Tolerance to Misalignment	x	±45mm
	y	±150mm

Table 2. Specification of transformer

Type	Rectangular core	H-shaped core
Core	FDK6H20	FDK6H20,TDKPC40
Litz wire	φ 0.25mm×384	φ 0.1mm×800
Weight of the secondary	4.6kg	3.9kg
Size	240×250×40mm	240×300×40mm
Winding	Primary	18T×1P
	Secondary	9T×2P
Aluminum sheet	400×600×1mm	



(a)Transformer with rectangular core.



(b)Transformer with H-shaped core.

Fig.4 Transformer's outline and it's dimension

3.2 標準状態の特性

機械的ギャップ長 70mm で位置ずれがない状態を標準状態とし、標準状態における給電実験の結果を表 3 に示す。給電実験は電源にフルブリッジインバータを用い、二次側には倍電圧整流回路と抵抗負荷を接続した回路で実施した。

Table3. Experimental result of standard position.

Type	Rectangular core			H-shaped core		
f_0 (kHz)	20			30		
Gap(mm)	60			70		
x (mm)	0	45	0	0	45	0
y (mm)	0	0	150	0	0	150
P_{out} (W)	1489	1166	1528	1507	1503	1506
η (%)	95.3	91.9	93.1	94.9	93.7	93.0
C_s/C_p (μF)	0.696/2.30			0.189/1.91		

3.3 ギャップ長変動、位置ずれ特性

ギャップ長変動および位置ずれがあるときの給電実験結果を図 5 に示す。位置ずれの x 方向は車両前後方向、 y 方向は車両左右方向に相当する。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 L_0 と結合係数 k が低下する。しかし二次巻線の自己インダクタンス L_2 はほぼ一定であるため、 C_p の値を一定としても(1)式の共振条件からずれない。実験では共振コンデンサ C_s と C_p の値は一定で行った。トランス効率 η はギャップ長が 40mm, 70mm, 100mm と増すにつれ 95.2%, 94.9%, 93.1% と減少した。

ギャップ長は 70mm 一定、前後方向ずれ x を 45mm まで、左右方向ずれ y を 150mm まで段階的にずらして給電実験を行った。 y 方向位置ずれによる効率低下は、平板型の 2.2% に対し H 型は 1.9% であった。H 型は磁極を長くしたため、少し位置ずれに強くなった。

3.4 長ギャップ特性

非接触給電トランスの特性はギャップ長によって大きく変化する。今回は標準ギャップ長 70mm を設計目標としたが、標準ギャップ長を 100mm とした給電実験を行った。

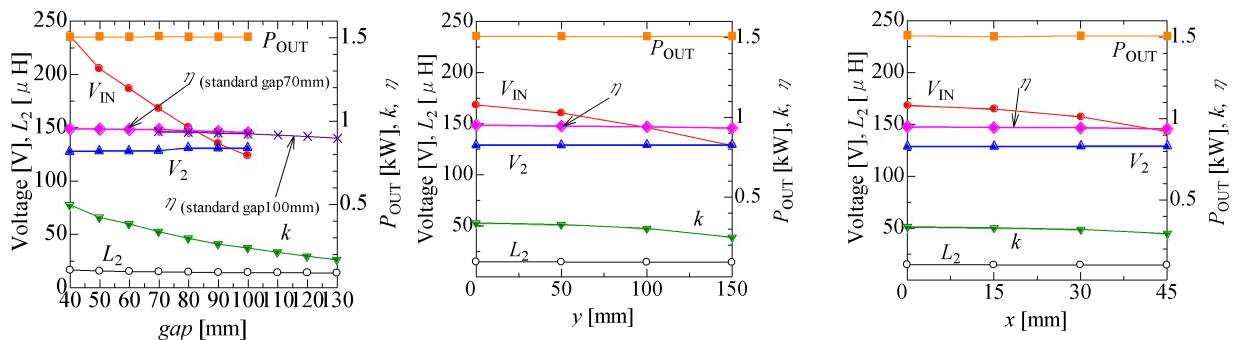


Fig.5 Experimental result of misalignment.

共振コンデンサ C_s と C_p の値は、ギャップ長 100mm で最適な値を(1), (2)式を用いて再調整した。ギャップ長 100mm では結合係数 k はギャップ長 70mm の 0.33 から 0.24 と大きく減少した。トランス効率 η はギャップ長が 70mm, 100mm, 130mm と増すにつれ、93.5%, 92.1%, 89.7% と減少した。標準ギャップ長 100 ± 30 mm のトランス部の平均効率は 91.9% で、標準ギャップ長 70 ± 30 mm での平均効率 94.5% に比べ、2.5% 低下した。二次側の平均磁束密度 B_2 は 0.24 T (飽和磁束密度 0.51T) であり、効率は低下するがギャップ長 $100\text{mm} \pm 30\text{mm}$ でも 1.5kW 給電に支障はなかった。

3.5 温度上昇試験

電気自動車への充電は長時間になるため、コアと巻線の温度上昇が問題となる。H型トランスは従来の円形コア片側巻構造より小型にできる分、温度上昇はより重要になる。AC100V での 1.5kW 普通充電は充電時間がプラグインハイブリッド自動車で約 4 時間、電気自動車で 10 時間以上と想定される。

H型トランスを長時間連続運転し温度上昇試験を行った。温度測定点は一次側のコアと巻線、二次側のコアと巻線、二次側アルミ板である。給電実験結果を図 6 に示す。温度が最も高いのは二次側のコアと巻線で、給電開始から 3 時間で熱平衡に達し、温度上昇が止まった。室温 20°C で、温度上昇が一番大きな二次側のコアと巻線の温度は共に 60°C 程度であり、8 時間以上の給電に問題のないことが確認できた。

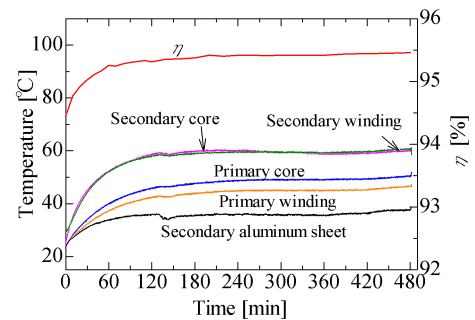


Fig.6 Temperature rise test.

3.6 3kW 給電特性

電気自動車の普通充電には、AC100Vでの充電とAC200Vでの倍速充電があり、倍速充電は充電時間が半分で済むため一般の駐車場で採用が多い。H型トランスの巻線電流密度やコア磁束密度に余裕があるため3kW給電実験を行った。ギャップ長70mm、位置ずれ $x=y=0$ の標準状態での給電実験の結果、トランス効率 η は1.5kW時と同程度で3kW給電も可能であることが確認できた。

4. 充電制御回路

4.1 充電制御回路

給電トランスは(3)式で示したようにギャップ変動等により二次電圧は変動する給電トランス特有の電圧変動特性に対応する必要がある。このため、充電制御回路は図2に示すように昇降圧機能を有する高効率化や低ノイズ化が期待できる臨界モードフライバック・インターリーブDC/DCコンバータを採用した。今回開発した充電制御回路の仕様を表4、回路基板の写真を図7に示す。開発した充電制御回路の定格出力(1.5kW)時の効率 η (図2の P_4/P_3)は、入力電圧200~400Vに対して97%以上という高効率を実現している。

Table 4. Specification of Charging controller.

Rated power	1.5kW
Input voltage	DC200~400V
Output voltage	DC200~250V
Rated current	7.5A
Control	Constant current Constant voltage



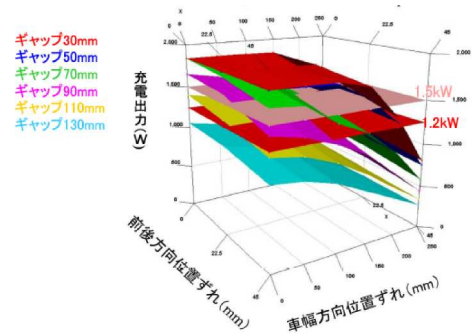
Fig.7 Charging controller.

4.2 充電実験結果

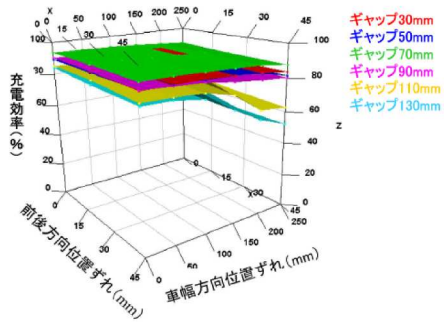
市販HEVを改造したPHEVに搭載されているニッケル水素電池仕様(201V,30Ah)を考慮し、自動車用鉛電池(12V,35Ah)を17直列した電池への充電実験を行った。実験はギャップ変動30~130mm、車両前後方向 x 位置ずれ量 ± 45 mm、車両左右方向 y 位置ずれ量 ± 250 mmの範囲で、同時に変化させて充電実験を行った。充電出力特性を図8(a)、充電効率(図2の P_4/P_1)を図8(b)に示す。図8よりギャップ70mmであれば、車両前後方向位置ずれ45mm、車両左右方向位置ずれ150mmが同時に発生しても定格出力での充電可能であり、この時の充電効率は概ね90%であった。

4. むすび

本論文では新コア構造(H型コア)の両側巻給電トランス



(a) Output Power.



(b) Efficiency.

Fig.8 Characteristics of Contactless Charging System.

を提案し、従来の角形コアに比べ小型軽量化と位置ずれ性能の向上が可能であることを示した。また、昇降圧機能付臨界モードフライバック・インターリーブDC/DCコンバータを開発し、ギャップ変動や位置ずれに対して安定に高効率で充電出来ることを示した。システムを搭載したPHEVでも本論文で示した特性を確認している。これら技術は非接触充電システム実用化を加速するものとする。

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、千明将人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” 電学誌, Vol.128, No.12, pp.804-807, 2008.
- (2) M. Budhia, G.A. Covic and J.T. Boys: “Design and Optimisation of Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems”, IEEE ECCE, pp. 2081-2088 (2009)
- (3) 保田富夫・井田和彦・阿部 茂・金子裕良・鈴木 明、山之内良一: 「非接触充電システム(第2報)」自動車技術会秋季学術講演会 261-20105612(2010)
- (4) 江原夏樹・岩田卓也・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・井田 和彦: “電気自動車用非接触給電トランス巻線方式による特性比較”, 電学誌, D130, No.6, pp734-741, 2010.
- (5) Y. Nagatsuka, S. Noguchi, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, K. Ida, A. Suzuki, and R. Yamanouchi: “Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charger”, EVS-25 shenzhen China, (2010)
- (6) G.A. Covic, J.T. Boys, M. Budhia and C.-Y. Huang: “Electric Vehicles-Personal transportation for the future”, EVS-25 shenzhen China, (2010)