

電気自動車用空心非接触給電トランスの基本特性

学生員 仲達 崇一郎*, 学生員 遠井 敬大,

正員 金子 裕良, 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

Coreless Transformer for Contactless Power Transfer System of Electric Vehicle

Soichiro Nakadachi, Takahiro Tohi, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

A coreless transformer of contactless power transfer system is lightweight and has no iron loss. However, the coreless transformer for electric vehicle has some problems like the electromagnetic shielding in the back of the transformer etc. In this paper, a new coreless transformer with aluminum sheet is proposed. An efficiency of 94.7% was achieved across 70mm air gap with experimental coreless transformer.

キーワード: 電気自動車, 非接触給電, 空心トランス, 鉄損

Keywords: Electric vehicle, Contactless power transfer system, Coreless transformer, Iron loss

1. はじめに

近年, 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カー (PHV) や電気自動車 (EV) が普及し始めた。これらの給電には現在は電気ケーブルとコネクタを用いる方式が採用されている。しかし利便性, 安全性, 保守容易性を考慮すると非接触給電方式が望ましく, 研究開発が行われている。

自動車用非接触給電装置はフェライトコアを用いる電磁誘導方式が一般的である。コア損失 (鉄損) を無視したモデル解析では給電効率 η は, 結合係数 k とコイルの Q で決まる。また鉄損は銅損と同程度になることが知られている。

トランスの高効率化を考えた場合, 空心トランスは鉄損がない利点があるが, コアがないため主磁束の磁路整形が難しく結合係数 k が低下する欠点がある。しかし周波数を上げると Q が上がり, 効率がコアを有するトランスに近づく可能性がある。また空心トランスは軽量化にも有利である。

今回空心トランスの可能性を調べるため, 高効率化を目的に電磁遮蔽にアルミ板を用いた空心トランスを設計製作した。給電実験の結果, ギャップ 70mm で 1.5kW を 94.7% の効率で給電することができた。

本稿では製作した空心トランスの特性とコア有トランスとの特性比較について紹介する。

2. 非接触給電システム

〈2・1〉 一次直列二次並列コンデンサ方式 一次直列二次並列コンデンサ方式⁽¹⁾の非接触給電システムの構成を

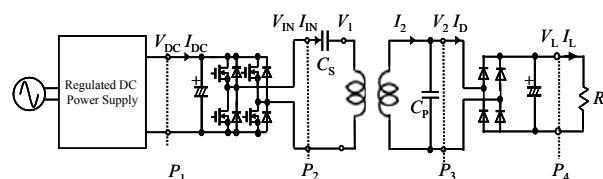


図1 非接触給電システム

Fig.1. Contactless power transfer system

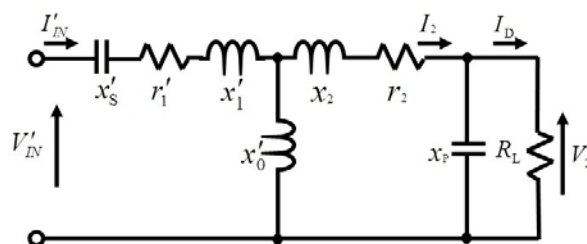


図2 T型詳細等価回路

Fig.2. Detailed equivalent circuit.

図1に示す。高周波電源にはフルブリッジインバータを用い, 二次側整流回路には全波整流器を用いた。直列及び並列共振コンデンサ C_S , C_P と整流器と平滑化コンデンサを含む抵抗負荷 R_L を加えた詳細等価回路を図2に示す。給電トランスの巻数比を $a=N_1/N_2$ 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, 電源周波数において, r'_1 , r_2 の値が x'_0 , x'_1 , x_2 の値に比べて十分小さくなる。したがって r'_1 , r_2 を省略した簡易等価回路で解析を進める⁽²⁾。

まず二次側並列共振コンデンサ C_p の値を電源周波数 f_0 ($\omega_0=2\pi f_0$) において励磁リアクタンス x'_0 ($=\omega_0 l'_0$) と漏れリアクタンス x_2 ($\omega_0 l_2$) との和 (二次巻線の自己リアクタンス $\omega_0 L_2$) に共振するように(1)式の値に定める。

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

次に一次側直列コンデンサ C_s の値を(2)式の値に決める。

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

このとき V'_{IN} と V_L , I'_{IN} と I_L の関係を求めると、

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

となり、非接触給電装置は巻数比 b の理想変圧器と等価となり、 b の値は結合係数 k とほぼ等しい値をとることが知られている⁽³⁾。また、このようにコンデンサを接続すると共振周波数で入力側から見たインピーダンス Z は、

$$Z = \left(\frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \right)^2 R_L \dots\dots\dots(4)$$

となり力率は R_L の値によらず 1 となる。

図 2 でトランス部の最大効率 η_{max} とその時の抵抗負荷 R_{Lmax} は (5)式で表される結合係数 k とコイルの Q を用いて、(6)式のように表せる⁽⁴⁾。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad Q_1 = \frac{\omega L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{r_2} \dots\dots\dots(5)$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}}, \quad R_{Lmax} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \dots\dots\dots(6)$$

〈2・2〉 空心トランスの特徴と課題 空心トランスの特徴として、(1) コアを用いないために軽量化かつ製造コストの削減が可能である、(2) 鉄損が生じない、(3) 主磁束の磁路整形が難しい、ことがあげられる。

特に(3)によってコア有トランスと比べると k が大きく低下してしまう。従って空心トランスは、(6)式より効率が低下するため、周波数を高く選びコイルの Q を大きくすることで、 k の低下に伴う効率低下を補う。

(3) の磁路整形に関しては電磁遮蔽のアルミ板の設置位置を工夫した。詳しくは次章で述べる。

3. 電磁遮蔽用アルミ板付き空心トランスの特性

〈3・1〉 空心トランスの仕様 図 3 に試作した空心トランスを示し、仕様と定数を表 1, 2 に示す。

空心トランスでは、コアにより主磁束の磁路を整形できないので、両側巻トランス構造は採用困難である。本研究では片側巻トランス構造を採用した⁽⁵⁾。

また、電気自動車用非接触給電トランスは、給電時に車体底面の誘導加熱を防ぐため、車載トランス背面側の磁束を遮蔽す

る必要がある。そこで空心トランスの背面に電磁遮蔽を目的とし

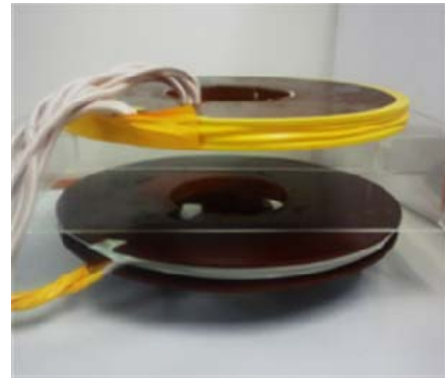


図 3 空心トランス

Fig.3. Coreless transformer.

表 1 空心トランスの仕様

Table 1. Specification of Coreless transformer.

		Weight	2.31kg
		Winding	Primary Secondary
		Lits wire	φ0.1mm×1200
		Al sheet	500×500×2mm

表 2 空心トランス定数

Table 2. Parameters of Coreless transformer.

f_0 [kHz]	100		
gap[mm]	70		
r_1 [mΩ]	213	Q_1	312
r_2 [mΩ]	10.5	Q_2	256
l_0 [μH]	16.2	k	0.156
l_1 [μH]	88.4	R_{Lmax} [Ω]	15
l_2 [μH]	3.60	η_{max} [%]	95.5
L_1 [μH]	105	C_s [μF]	0.032
L_2 [μH]	4.24	C_p [μF]	0.615

たアルミ板(500×500×2mm)を設置した。

〈3・2〉 アルミ板付き空心トランスの k と Q トランス背面にアルミ板を設置するとトランスとアルミ板間の距離によって k と Q が大幅に変化することが分かった。トランスとアルミ板間の距離を h とし h が 0~150mm の範囲で変化した時の k と Q の変化を図 4 に示す。なお、 k は各 h においてトランスの定数を測定し計算で求めた。また、アルミ板がない状態を $h=\infty$ として k , Q_1 , Q_2 を破線で示した。

図 4 から k は h の増加に対して上昇し 100mm を越すと値が飽和傾向となる。アルミ板とトランスの距離が近い時は、図 5 のようにアルミ板が主磁束の経路を遮蔽してしまうた

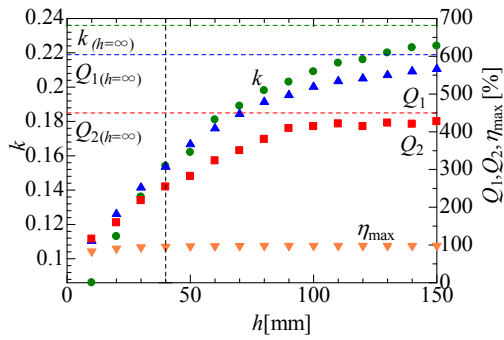


図4 トランス-アルミ板間距離と k , Q_1 , Q_2
Fig.4. Distance between transformer and aluminum sheet.

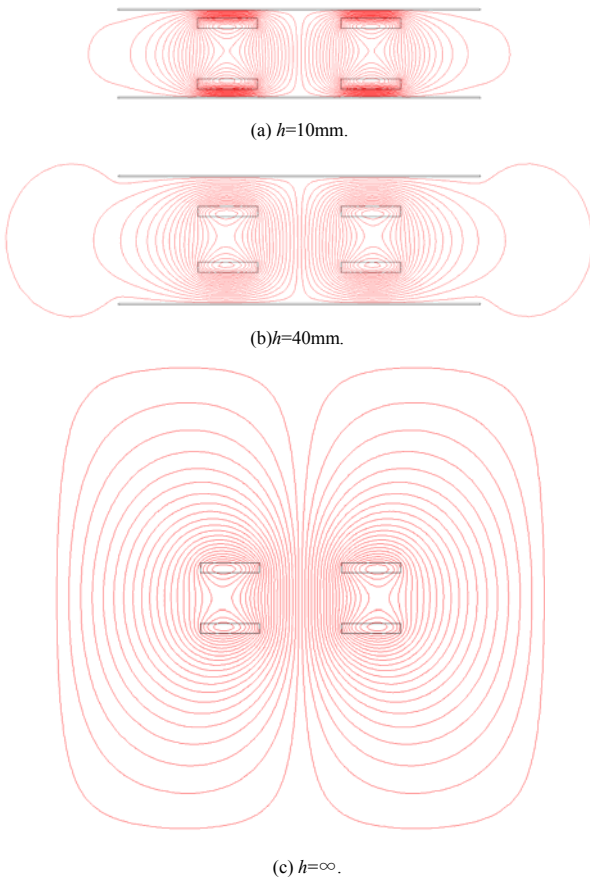


図5 アルミ板による主磁束の遮蔽

Fig.5. Shielded main flux by aluminum sheet.

め k が低下する。

また Q_1 , Q_2 も k と同様の傾向を示した。アルミ板とコイルの距離 h が小さいとコイルの自己インダクタンス L_1 , L_2 が低下し、アルミ板の渦電流により r_1 , r_2 が増加する⁽⁶⁾。

このため(5)式より Q_1 , Q_2 が低下する。試作した空心トランスでは効率と装置の厚みを考慮し $h=40\text{mm}$ に選定した。

〈3・3〉 その他の課題 空心トランスは k が小さく周波数が高いため、以下のようにコア有トランスに比べ、一次側コイルの端子間電圧 V_1 が高くなる。

一次巻線端子間電圧 V_1 は(7)式で表される。

表3 給電実験結果

Table 3. Experimental result

f_0 [kHz]	100		
gap [mm]	70		
P_4 [kW]	1.5		
η [%]	94.7		
R_{T1} [Ω]	30		
V_{DC} [V]	153	I_{DC} [A]	10.8
V_{IN} [V]	146	I_{IN} [A]	13.1
V_1 [V]	860	I_b [A]	12.4
V_2 [V]	169	I_t [A]	7.09
V_t [V]	211.8		

$$V_1 = \omega L_1 I_{IN} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、抵抗負荷に R_{Lmax} を接続した場合、 I_{IN} は(3), (6)式より(8)式のように表される。

$$I_{IN} = \frac{I_L}{ab} = \frac{1}{ab} \sqrt{\frac{P_3}{R_{Lmax}}} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{P_3}{kr_2 Q_2}} \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} \dots\dots\dots (8)$$

($\because b \cong k$)

ここで、非接触給電では一次側と二次側に同じ形状のコイルを用いる場合、 Q_1 , Q_2 と L_1 , L_2 がほぼ等しい値となるため、(8)式を(7)式に代入すると V_1 は(9)式で表される。

$$V_1 = \omega L_1 I_{IN} = \sqrt{\frac{\omega L_1 P_3}{k}} \dots\dots\dots (9)$$

($\because a^2 L_2 \cong L_1$)

(9)式より、 k が低く、 f_0 が高い空心トランスでは V_1 が上昇してしまうことがわかる。したがって k が低く、共振周波数の高い空心トランスでは V_1 の値に注意する必要がある。
 V_1 の上昇に対する対策としては、一次巻数 N_1 の低減や、 V_1 の値を約 $1/n$ に出来る一次巻線の n 分割⁽⁷⁾が有効である。

4. 給電実験と考察

〈4・1〉 給電実験結果 図1の回路を用いてギャップ長70mm、電源周波数100kHzで給電実験を行った。結果を表3に示す。

結果として空心トランスを用いて1.5kWの給電を94.7%の高効率で行うことを確認できた。また、 V_1 が高いため給電電力は1.5kWに制約された。巻線分割を行えばさらに給電電力を大きくできるであろう。

〈4・2〉 H型コア有トランスとの特性比較 試作した空心トランスと過去に試作したH型コア有トランスの特性を比較した。H型コア有トランスの仕様を表4、定数を表5に示す。

表1,2,4,5より、空心トランスはコア有トランスに比べ、トランス重量を2.3kgと約半分に削減できること、 k が0.156と約半分に低下すること、および高周波化によってコイルの Q が約300と1.7倍大きいことが確認できる。

ここで、電気自動車では駐車時に前後左右の位置のずれが避けられないため、一次側トランスと二次側トランスの位置ずれによる特性変化を検証した。図6にギャップ長を

表4 H型コア有トランスの仕様

Table 4. Specification of transformer with H type's ferrite core.

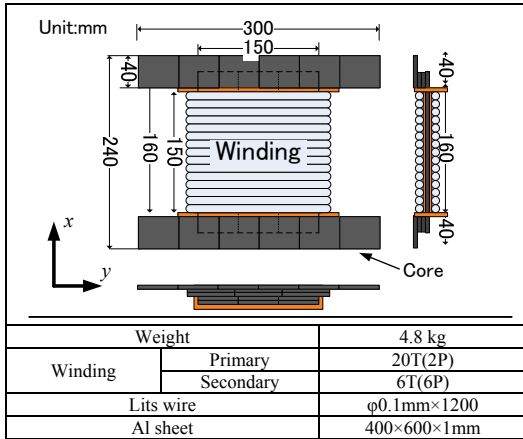
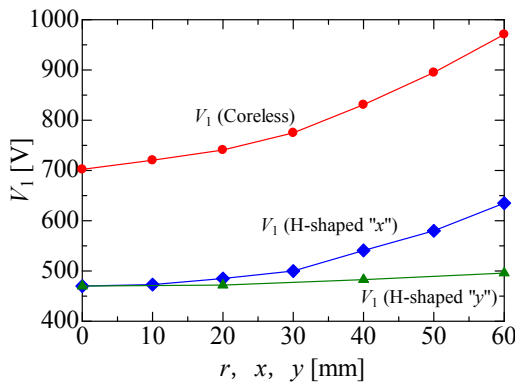


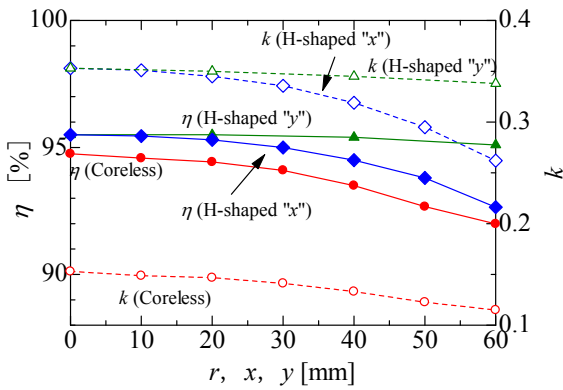
表5 H型コア有トランスの定数

Table 5. Parameters of transformer with H type's ferrite core.

f_0 [kHz]	30		
gap[mm]	70		
r_1 [mΩ]	171	Q_1	186
r_2 [mΩ]	18.1	Q_2	157
l_0 [μH]	58.7	k	0.349
l_1 [μH]	110	$R_{L,max}$ [Ω]	7.5
l_2 [μH]	9.83	η_{max} [%]	96.8
L_1 [μH]	186	C_S [μF]	0.190
L_2 [μH]	15.1	C_P [μF]	1.861



(a) Increase in V_1 .



(b) Efficiency and k .

図6 位置ずれ特性

Fig.6. Characteristic in position change.

70mmとして空心トランスとH型コア有トランスを用いて位置ずれ r が0~60mmまで変化させたときの効率と k 、及び V_1 の変化を示す。H型コア有トランスでは位置ずれの方向によって特性が異なり左右方向(y 方向)の位置ずれに強いことが分かっている⁽⁸⁾。

3章で述べたように空心トランスは V_1 が高い電圧になるが、位置ずれが生じることでさらに k が低下し、 V_1 が上昇する。その結果、 V_1 によっても位置ずれ許容範囲が制限される。試作したトランスでは、位置ずれが60mmより大きくなると一次巻線の端子電圧 V_1 が過大になるため実験は行わなかった。一方H型コア有トランスでは k の値が高く、周波数も低いため V_1 は空心トランスほど高電圧にはならない。その結果H型コア有トランスは空心トランスと比べ位置ずれ許容範囲も広がる。また空心トランスは円形トランスとなるため元来位置ずれに対する k の低下が大きく⁽⁷⁾、効率の低下も大きい。このように空心トランスは位置ずれに対して弱くなることは避けられない。

5. まとめ

電気自動車用の非接触給電に用いる空心トランスを試作し給電実験を行った。空心トランスは円形コイルとなるため、背面に電磁遮蔽のアルミ板が必要であるが、コイルとアルミ板の距離が特性に大きな影響を与えることが分かった。また結合係数 k が小さく周波数が高いためトランスの一次巻線端子電圧が高くなりやすく、一次巻線の巻数を下げる等の対策が必要である。1.5kW給電実験ではコア有トランスに近い94.7%の効率が得られた。

空心トランスは軽量で安価が求められ、大きな位置ずれが生じず、トランスの厚さも許容できる用途に適していると言える。

文献

- (1) 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, pp174-180(2007)
- (2) 阿部 茂・金子裕良:「非接触給電技術」, 学会誌 Vol.128, No.12 pp.796-799 (2008)
- (3) Mickel Budhia, Grant A. covic, John T Boys and Chang-Yu Huang: “Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging”, IEEE, pp614-621(2011)
- (4) 遠井敬大・金子裕良・阿部 茂:「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電学論 D, Vol.132(2012), No.1, pp123-124
- (5) 岩田卓也・江原夏樹・金子裕良・阿部 茂:「電気自動車用非接触給電装置のトランス巻線方式による特性比較」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-09-39, pp.109-114(2009.3)
- (6) 江原夏樹・岩田卓也・辻俊明・金子裕良・阿部 茂:「漏れ磁束遮蔽アルミ板付き非接触給電の特性」平成20年電気学会全国大会講演論文集, vol.4, pp.323-324(2008)
- (7) 山中智裕・野口真伍・金子裕良・阿部 茂:「電気自動車の急速充電用非接触給電システム」, JIASC2011, 2-11, pp407-412
- (8) 千明将人・長塚裕一・金子裕良・阿部 茂:「新コア構造による電気自動車用非接触給電トランスの小型軽量化」 SPC-11-048, pp.139-144, 2011