

電気自動車ワイレス給電用車載トランスの小型化

学生員 渡邊 海斗* 学生員 清水 良太郎

正員 金子 裕良 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

Miniaturization of H-shaped core Receivers of a Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle

Kaito Watanabe*, Student Member, Ryotaro Shimizu, Student Member, Yasuyoshi Kaneko, Member, Shigeru Abe, Member (Saitama University)

A wireless power transfer system for electric vehicles with high convenience, safety, and serviceability are promising. And this wireless power transfer system is required to be compact. In addition, the efficiency is determined by the coupling factor and Q factor. Therefore, we have designed two H-shaped core solenoid type's transmitters suitable for a compact receiver in consideration of relationship among length of magnetic pole and width of coil part, coupling factor, efficiency.

キーワード：非接触給電, 結合係数, Q

Keywords : wireless power transfer system, coupling factor, Q factor

1. はじめに

近年、環境問題や原油価格の高騰等から電気自動車(EV)やプラグインハイブリッド車(PHV)等への関心が高まっている。現在、これらの充電方法は電気ケーブルとコネクタを用いたコンダクティブ方式であるが、利便性、安全性、保守容易性が向上するとして、非接触給電方式の研究が進められている。電気自動車用の非接触給電トランスは、小型軽量、大きな位置ずれ許容量、高効率であることが要求される。特にトランスの小型化について、地上に設置する地上(一次)トランスに対し、車載スペースに制約のある車載(二次)トランスがより重要である。しかし、車載トランスを小型化する上で、トランス効率の低下が懸念される。

これに対し、トランスの結合係数 k とトランス巻線の Q に着目して地上トランスサイズを拡大することで、車載トランスを小型化する方法がいくつか提案されているが⁽¹⁾⁽²⁾、実用トランスでの効率等の検討データが十分になく、トランス寸法と効率の関係等を明らかにする必要がある。

本論文では、小型で位置ずれ許容範囲が広い H 型コア両側巻(ソレノイド)トランスについて、車載トランスの小型化と、効率低下防止のための地上トランス形状とサイズの検討を行った。標準ギャップ長 150mm の 3kW 給電で 94% 以上のトランス効率を持つ車載側と地上側のサイズ (320mm×300mm) が同一の従来トランスを参考に⁽³⁾、車載ト

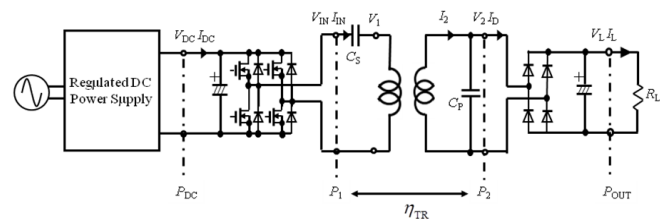


図1 非接触給電システム

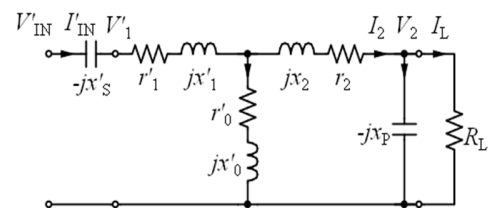


図2 等価回路

ランスの磁極長を短縮し、地上トランスのサイズまたは磁極長を拡大したトランスを試作した。標準状態および位置ずれ時の 3kW 給電実験を行いその効率を比較した。

2. 非接触給電システム

本研究で用いた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を図 1 に示す。一次側には高周波電源とし

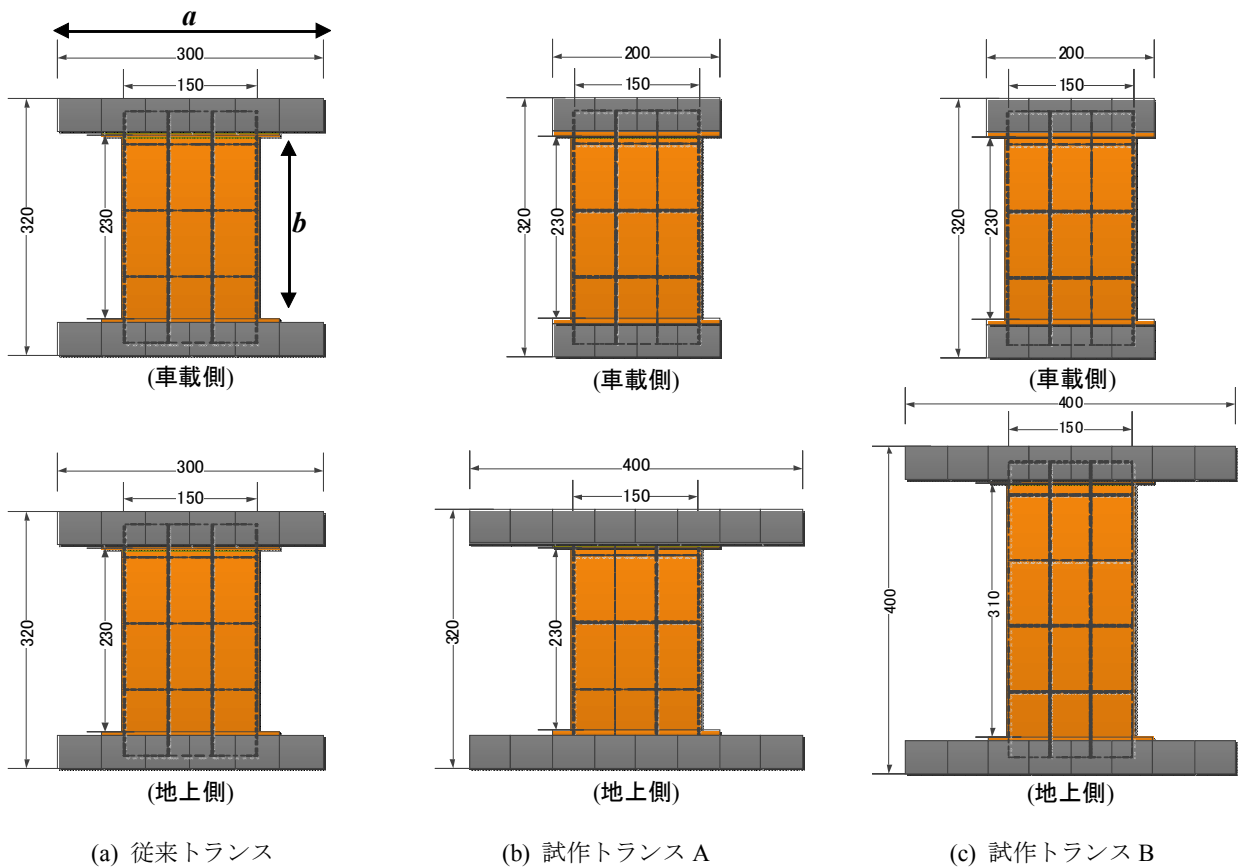


図3 各トランスの寸法

てフルブリッジインバータ、二次側には全波整流器を接続している。トランスのコアと磁極にはフェライト、巻線と配線にはリッツ線、また電磁遮蔽・結合係数 k の向上からトランスの背面にはアルミ板を用いる。非接触給電システムの等価回路を図 2 に示す。一次側・二次側の巻線抵抗を r_1, r_2 、漏れインダクタンスを x_1, x_2 とし、そこに直列及び並列共振コンデンサ C_s, C_p 、抵抗負荷 R_L を接続したものとなっている。なお、巻数比 $a=N_1/N_2$ とし、一次側諸量は二次側に換算して(ダッシュ)をつけて表す。

二次側の C_p の値は、電源周波数 $f_0 (= \omega_0 / 2\pi)$ において二次自己インダクタンス L_2 と共振するように、一次側の C_s の値は一次側電源力率が 1 となるように、(1)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = \omega_0 L_2 = x_p = x'_0 + x_2, \quad \frac{1}{\omega_0 C'_s} = x'_s = \frac{x'_0 x_2}{x'_0 + x_2} + x'_1 \dots (1)$$

フェライトコアとリッツ線を用いると鉄損を表わす r'_0 と巻線抵抗 r'_1, r_2 は、電源周波数 f_0 においてトランスのリアクタンス $x_0 (= \omega_0 M/a)$, x'_1, x_2 に比べ十分小さい。従って r'_0 と r'_1, r_2 を省略した簡易等価回路で解析を進める。なお M は相互インダクタンス、 $L_l = a^2(x'_1 + x'_0) / \omega_0$ である。

ここで、 V_{IN} と V_2 , I_{IN} と I_L の関係を求めると、(2)式が成り立ち巻数比 b の理想変圧器と等価となる。

$$V'_{IN} = V_{IN} / a = b V_2, \quad I'_{IN} = I_L / b, \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \dots (2)$$

また、巻数比 b は結合係数 k とほぼ等しい⁽⁴⁾。鉄損を無視し、銅損のみを考慮するとトランス効率 η は、

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r'_1 I_1^2 + r_2 I_2^2} \dots (3)$$

となり、トランス効率の最大値 η_{maxSP} とそのときの抵抗負荷の値 R_{LmaxSP} を求めると(4)式となる⁽⁵⁾。

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

コイルの Q を(5)式で定義すると、最大効率は(6)式のように k と Q のみで表すことができる。

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2}, \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \dots (5)$$

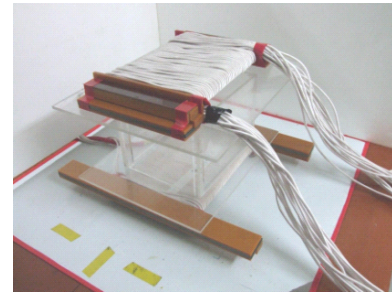
$$R_{LmaxSP} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}, \quad \eta_{maxSP} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}}} \left(\because \frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1 \right) \dots (6)$$

3. 小型車載トランスの設計

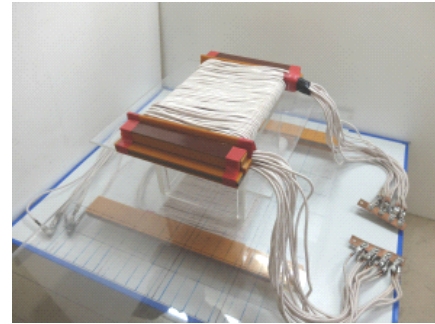
現在、世界最小クラスの車載トランスとして、寸法 320×210mm の車載側非接触給電トランスが提案されている⁽²⁾。そこで、図 3(a)に示した従来トランス(320mm×300mm)を参考に車載トランスのサイズ目標を 320×200mm とした。

車載トランスを小型化することで、トランス効率が低下することは明確である。トランスの最大理論効率は(6)式より k と Q が大きいほど高くなる。本研究では k に着目したトランス設計を行う。車載トランスを小型化する際、車の前後方向(x 方向)のコイル幅 b を短縮すると結合係数 k が下がる⁽⁴⁾。このため、 y 方向の磁極長 a を 300mm から 200mm に短縮した。左右方向の位置ずれは y 方向の磁極長で決まるため、車載トランスの磁極短縮分 100mm だけ、地上トランスの磁極長を拡大した試作トランス A(図 3(b))を製作した。

試作トランスは従来トランスのコイルを用いることで巻線抵抗 r は従来トランスとほぼ同程度と考えられるため、トランスの効率は k と L で求めることができる。試作トランス A では、車載トランスの磁極長の短縮により地上側との磁極の重なる面積が減少し、 k が低下することが考えられる。そこで、 k 低下の対策として地上トランスのコイル幅 b に着目し、電磁界解析ソフトウェア JMAG を用いて従来と同等程度の結合係数を持つトランスを検討し、コイル幅 b を 80mm 拡大した試作トランス B(図 3(c))を製作した。なお、各トランスの背面には 600mm×600mm のアルミ板を設置する。試作トランス A の外形を図 4 に示す。



(a) 試作トランスA



(b) 試作トランスB

図 4 試作トランスの外形

4. 実験結果

〈4・1〉定数測定 標準ギャップ長 150mm における従来トランスと試作トランス A、B のトランス仕様と定数を表 1 に示す。試作トランス A、B とも η_{\max} は従来トランスとほぼ同等であるが、 k は従来トランスに比べ試作トランス A で 7%、試作トランス B で 3.6%低下している。試作トランス A の Q_2 も 6%程度減少している。

位置ずれ時（前後 x 方向： ± 100 mm、左右 y 方向： ± 200 mm）の結合係数 k の変化を図 5 に示す。図 5 より、試作トランス A、B の k は、従来トランスと同様に位置ずれが大きくなると減少した。しかも、試作トランス A は x 、 y 方向とも従来に比べ平均 5%程度減少している。一方、試作トランス B は、 x 方向で平均 0.8%、 y 方向で平均 1.2%の減少に止まっている。さらに $x \geq 75$ mm の位置ずれにおいて従来トランスの k を上回ることから、コイル幅拡大による k の改善が確認できた。

〈4・2〉給電実験 図 1 の回路を用い、電源周波数 85kHz、ギャップ長 150mm、抵抗負荷 30Ω とし、出力 3kW の給電実験を行った。上記と同じ位置ずれ範囲でのトランス効率の変化を図 6 に示す。試作トランス A の効率は、位置ずれなしで従来と比較して 0.56%低下した。 x 方向では 60mm のときが最大で 0.57%の減少となったが、60mm より大きい位置ずれでは効率の差が小さくなった。 y 方向では 200mm のときが最大で 1.24%の減少となり、左右方向の位置ずれに考慮して設計したため、位置ずれ量に対する効率の低下傾向は従来トランスと同じとなった。試作トランス B の効率も、位置ずれなしで従来と比較して 0.49%低下した。 x 方向

表 1 各トランスの仕様と定数

Transformer	従来トランス	試作トランス A (磁極長)	試作トランス B (コイル幅)
Primary[T]	14 (4 並列)		14 (5 並列)
Secondary[T]	4 (15 並列)		
Al sheet[mm]	600×600×1		
gap[mm]	150		
f_0 [kHz]	85		
r_1 [m Ω]	78.9	90.7	85.7
r_2 [m Ω]	7.26	6.35	6.11
l_0 [μ H]	14.2	13.0	13.1
l_1 [μ H]	57.0	70.8	66.2
l_2 [μ H]	4.89	3.91	3.88
L_1 [μ H]	71.3	83.8	79.2
L_2 [μ H]	6.05	4.97	4.95
k	0.196	0.182	0.189
$R_{L\max}$ [Ω]	30	30	30
Q_1	482	494	494
Q_2	445	418	433
η_{\max} [%]	97.8	97.6	97.7

では平均 0.2%の低下で、75mm 以上の位置ずれでは効率の上昇がみられた。 y 方向でも効率は従来トランスより低いままであったが、試作トランス A に比べて若干の改善がみられた。

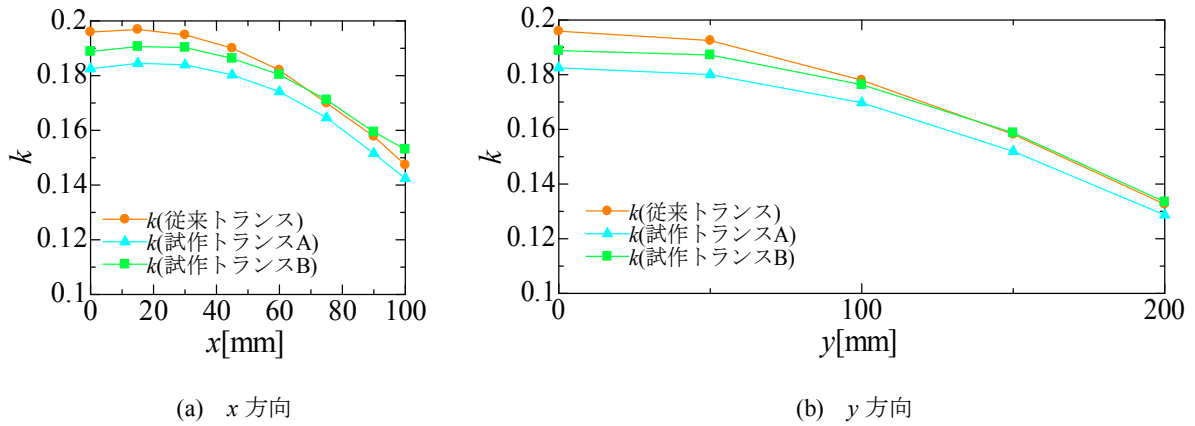


図 5 結合係数の位置ずれ特性(ギャップ 150mm)

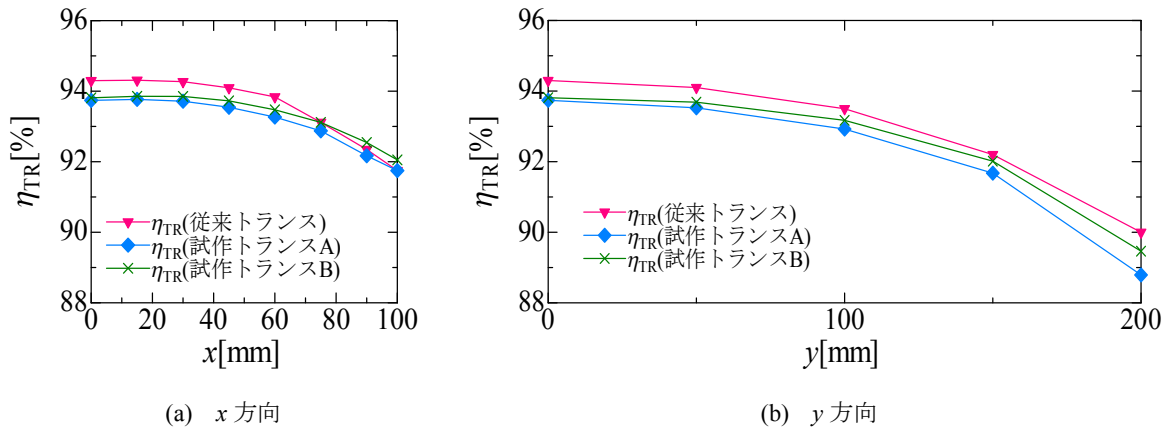


図 6 3kW 給電実験(ギャップ 150mm のときの位置ずれ効率特性)

5. まとめ

位置ずれ時にも高い効率が維持できる小型車載トランスを実現するため、 k と Q 、磁極長、コイル幅に着目して非接触給電トランスを設計した。標準ギャップ長 150mm の 320mm×300mm の H 型コア両側巻トランスを参考に 2 種類のトランスを試作した。試作トランスの車載側は磁極長を短くしたサイズ(320mm×200mm)とし、地上側は磁極長のみ拡大した試作トランス A と、コイル幅も拡大した試作トランス B について、位置ずれ時の結合係数および効率の比較を行った。両トランスともに、従来のトランスと比較して位置ずれなしの結合係数および 3kW 給電実験時の効率は低下したが、位置ずれ時の特性は若干の低下か、逆に位置ずれの大きな範囲では改善がみられた。特に磁極長とコイル幅の両方を拡大した試作トランス B においては、その傾向は顕著であった。今後効率を上げる方法として、一次側磁極幅の拡大が考えられる。

文 献

- (1) 田倉哲也, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏 : 矩形ソレノイドコイルを用いた非接触給電システムにおける位置ずれ許容度に関する研究, IEEE Japan, SPC-13-145 (2013)
- (2) G. Ombach : “Wireless EV Charging, optimum operating frequency selection for power range 3.3 and 6.6kW” , IEEE ECCE2013 (2013)
- (3) H. Takanashi, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda : “A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles” , IEEE ECCE2012, pp.269-274 (2012)
- (4) 千明将人, 長塚 裕一, 金子裕良, 阿部 茂, 保田富夫, 鈴木 明 : 電気自動車用非接触給電トランスの新コア構造と鉄損のモデル化, 電気学会論文誌 D Vol.132, No.1, pp.9-16 (2012)
- (5) 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, 半導体電力変換研究会, SPC-11-179 (2011)