

電気自動車用非接触給電トランス 2 台化による漏洩磁界低減法

学生員 濱田 尚平* 学生員 徐 将希 正員 金子 裕良 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

Methods for Reducing Magnetic Field Using Two Wireless Power Transformers for Electric Vehicles

Shohei Hamada*, Student Member, Masaki Jo, Student Member, Yasuyoshi Kaneko, Member, Shigeru Abe, Member
(Saitama University)

A wireless power transfer system for electric vehicles improves convenience, safety and maintainability. Therefore its usefulness is expected. A point at issue of wireless power transfer systems is the leakage electromagnetic field that effects on the human body and other electronic devices. It is difficult to shield the leakage electromagnetic field around the transformers because of the air gap. In this paper, an approximate calculation method for the leakage electromagnetic field of the solenoid type's transformers is proposed. And we propose a new method to reduce the leakage magnetic field by using two wireless power transformers.

キーワード：電気自動車，非接触給電，漏洩磁界

Keywords : electric vehicle, wireless power transfer system, leakage magnetic field

1. はじめに

近年環境問題や石油価格の高騰により，プラグインハイブリッド自動車(PHV)や電気自動車(EV)の普及が進んでいる。現在これらの自動車の給電方式はケーブルとプラグを用いるコンダクティブ方式が一般的であるが，安全性，利便性，保守性などの面から，今後は非接触給電方式が有望である。

現在自動車用非接触給電で問題となっているのが電子機器や人体への影響が懸念される漏洩電磁界である。電気自動車用の非接触給電装置は地上の送電トランスと車載の受電トランス間の空隙のために周りを電磁遮蔽することができない。さらに送電トランスと受電トランス間のギャップ長が大きく給電電力も大きいため，漏洩電磁界も大きくなることが予想される。また，本研究で用いる両側巻(ソレノイド)構造の非接触給電トランスは小型・軽量・位置ずれに強いなどといった利点がある一方で，漏洩電磁界が無視できないとの報告もある⁽¹⁾。以上の理由から地上側や車載側に漏洩電磁界を低減するための対策を施す必要があり，近年様々な研究がなされている⁽²⁾⁽³⁾。

本論文では漏洩磁界に着目して両側巻構造の非接触給電トランスの漏洩磁界低減に効果的な手法を提案し，その低減効果を検証した。また，単一ソレノイドコイルでの近似

計算でトランスの漏洩磁界のモデル化を行った。

今回提案する漏洩磁界低減法は非接触給電トランスを 2 台用いて給電することで，漏洩磁界が相殺され，遠方での磁界強度を下げるのが可能となる。両側巻構造の非接触給電トランスを複数台用いる給電方法は従来研究で発表されているが，電力の大きな給電に対応しようとするもので，漏洩磁界の低減までは言及されていない⁽⁴⁾。よって非接触給電装置複数台による漏洩磁界低減法の有用性を検証するために，トランス 1 台と 2 台の 1.5kW 給電において，ソレノイドコイル近似による磁界計算，有限要素法磁界解析ソフトウェア JMAG (JSOL 社製)を用いたシミュレーション，給電実験中の漏洩磁界測定の方法で漏洩磁界強度の評価を行った。ただし本研究で比較を行ったのは全て基本波の漏洩磁界のみである。近似計算，磁界解析シミュレーション，給電実験のいずれの結果においてもトランス 2 台化による漏洩磁界の低減効果が確認できた。低減出来た磁界強度は車の前後方向で 8dB 左右方向で 5.2dB であった。また，漏洩磁界低減法を考える際に今回提案した近似計算法が利用可能であることも確認できた。

2. トランス 2 台による漏洩磁界低減法

(2・1) 原理 トランス 2 台化の給電とは同じ構造を有する 2 組の非接触給電トランスを並べて同時に駆動させ

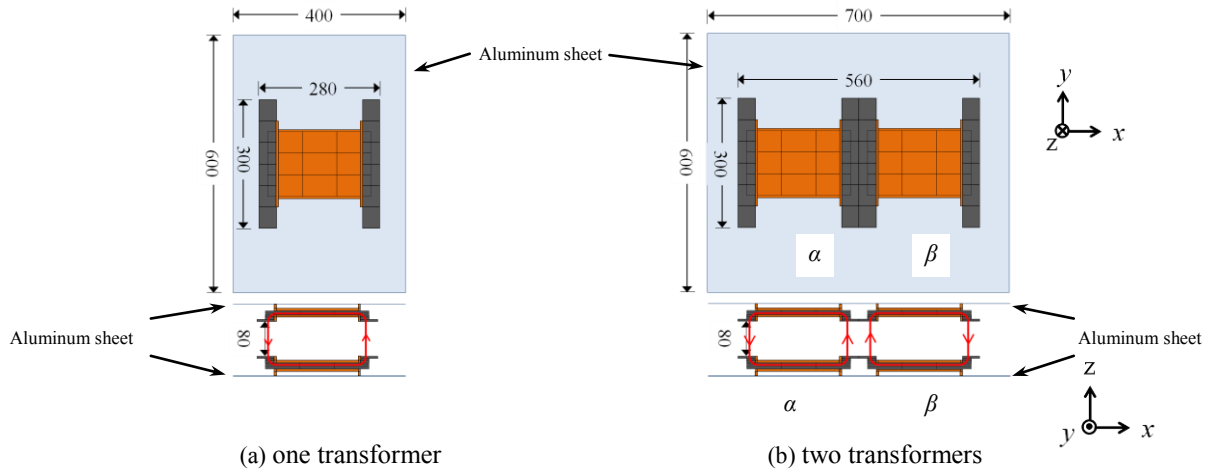


図 1 トランス配置と磁界形状

Fig.1. Design of transformer and magnetic flux.

表 1 トランス仕様

Table 1. Parameters of transformers.

巻数	一次側	20T(4p)
	二次側	6T(12p)
トランス本体の寸法	280×300×45mm	
遮蔽用アルミ板	1 台	600×400×1mm
	2 台	600×700×1mm

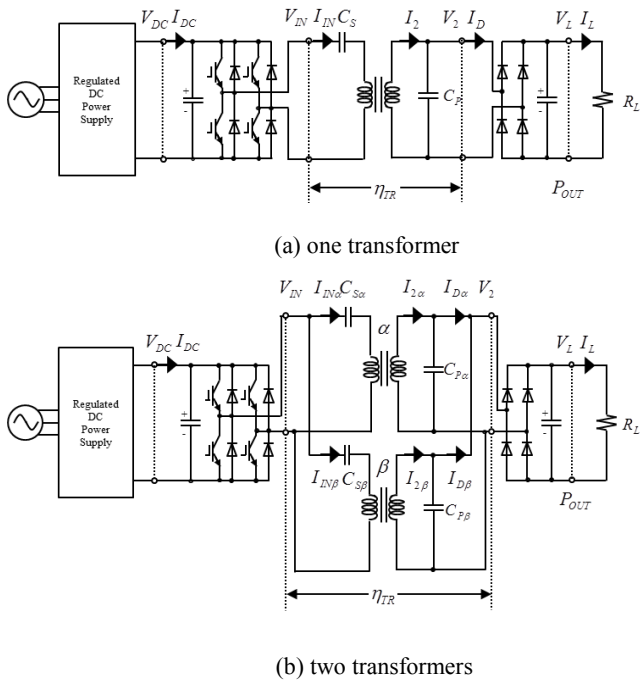


図 2 給電回路

Fig.2. Experimental circuit.

給電するというものである。そのため従来のトランス 1 台による給電とは異なる磁界形状を持つ。図 1 に給電実験で用いたトランス 1 台と 2 台の場合のトランス配置と磁界形状を示す。トランス 2 台を用いた場合、それぞれのトランスを α , β とする。 xz 断面で主磁束のループを見ると、トランス 1 台による給電時はループが 1 つなのに対して、トランス 2 台による給電時はループが 2 つとなる。トランス 2 台の場合、2 つのループの磁束の方向が逆になる x 方向については、トランスから十分離れた遠方において漏洩磁界が相殺し、磁界強度が下がると考えられる。しかし y 方向は主磁束が弱めあう方向ではないので、磁界強度を確認する必要がある。また、トランス 2 台で図 1(b) のような磁界形状をとると結合係数とトランス効率が上昇することも報告されている⁽⁴⁾。

表 1 に給電実験で使用したトランス 1 台の仕様を示す。トランス 2 台のときは 1 台のときに使用した同じトランスを 2 台並べた。ただし電流の方向は 2 台のトランスで逆向きとし、図 1(b) に示される磁界構造となるようにした。トランス 1 台と 2 台の回路図を図 2 に示す。トランス 2 台での給電時は一次側、二次側共にトランスを並列に接続した。

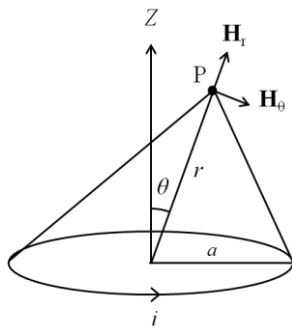


図 3 円電流の周辺磁界強度

Fig.3. The magnetic field by a circular current.

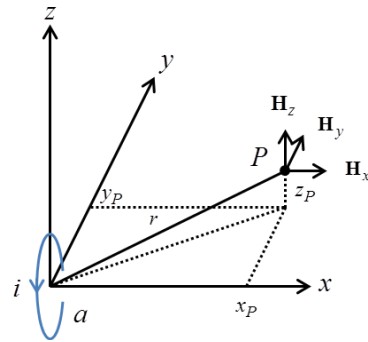


図 4 ソレノイドコイルの周辺磁界強度

Fig.4. The magnetic field by a solenoid coil.

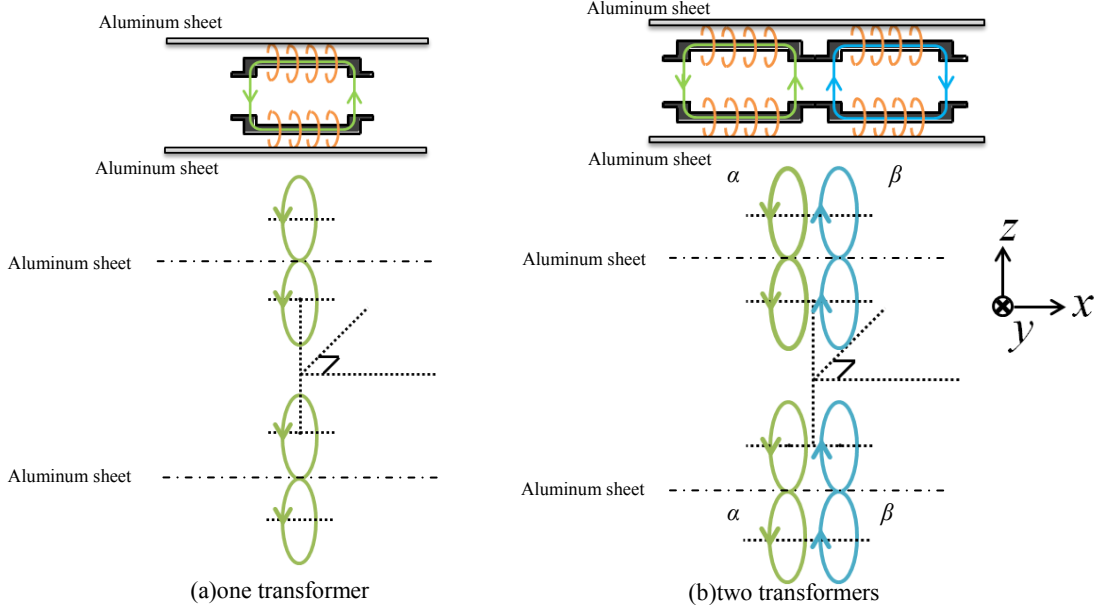


図 5 近似計算時のトランスモデル

Fig.5. Model of approximate calculation.

3. ソレノイドコイル近似による磁界計算法

〈3・1〉 円電流の周辺磁界強度 図 3 に電流 i が流れる半径 a のコイルモデルを示す。距離 r と角度 θ を用いて任意の点における磁界強度は(1)式で表される⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} H_r &= -\frac{\partial U}{\partial r} \\ H_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \end{aligned} \quad U = \frac{i\pi a^2 \cos\theta}{4\pi^2} \dots\dots\dots (1)$$

これにターン数 N を乗算し、図 4 のように直交座標系に直すと点 $P(x_p, y_p, z_p)$ での成分別磁界強度 H_x, H_y, H_z は(2)式で表わされる。

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{Nia^2}{4r^5} (2x_p^2 - y_p^2 - z_p^2) \\ H_y &= \frac{3Nia^2}{4r^5} x_p y_p \\ H_z &= \frac{3Nia^2}{4r^5} x_p z_p \end{aligned} \quad r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2} \quad (2)$$

また、点 P での磁界強度 H は(3)式で計算できる。

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \dots\dots\dots (3)$$

〈3・2〉 非接触給電トランスのモデル化 非接触給電トランスの周辺磁界強度を 〈3・1〉 で述べたソレノイドコイル近

表 2 近似計算のパラメータ

Table 2. Parameter of approximate calculation.

トランス 1 台		トランス 2 台	
i_1 [A]	$20e^{j\omega t}$	$i_{1\alpha}$ [A]	$10e^{j\omega t}$
		$i_{1\beta}$ [A]	$-10e^{j\omega t}$
i_2 [A]	$70e^{j(\omega t-1.05)}$	$i_{2\alpha}$ [A]	$50e^{j(\omega t-0.873)}$
		$i_{2\beta}$ [A]	$-50e^{j(\omega t-0.873)}$
a_1 [m]	0.03	$a_{1\alpha}, a_{1\beta}$ [m]	0.03
a_2 [m]	0.02	$a_{2\alpha}, a_{2\beta}$ [m]	0.02
N_1 [Turn]	20	$N_{1\alpha}, N_{1\beta}$ [Turn]	20
N_2 [Turn]	6	$N_{2\alpha}, N_{2\beta}$ [Turn]	6

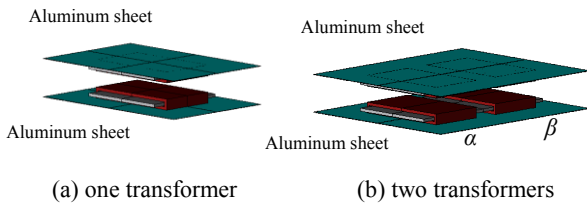


図 6 磁界解析時のモデル

Fig.6. Model of magnetic field analysis.

表 3 実験条件

Table 3. The conditions of the experiments.

周波数	30kHz
ギャップ長	70mm
給電電力	1.5kW



(a) one transformer



(b) two transformers

図 7 給電実験の様子

Fig.7. The conditions of an experiment.

似による計算方法で計算する際のトランスモデルを図 5 に示す。図 4 のモデルをトランスのそれぞれの巻線の中央に配置し、トランス背面への漏洩磁界を低減するために各トランス背面に設置したアルミ板の磁界に対する鏡面効果を考慮して、アルミ板で対称となる位置に同じコイルを配置した。それぞれのソレノイドコイルの磁界強度を計算する際に代入したパラメータを表 2 に示す。ソレノイドコイルの円の面積は巻線の断面積に等しく設定し、電流の値は回路シミュレーションソフト PSIM を用いたシミュレーション結果に近い値を代入した。それぞれのソレノイドコイルから発生する磁界に対してベクトルの足し合わせを行い、求める点の磁界強度とした。

4. 有限要素法磁界解析

非接触給電トランスの 2 台化による漏洩磁界低減法の効果を磁界解析ソフト(JMAG-Designer Ver.12.1)を用いた有限

要素法磁界解析によって調べた。解析する際のモデルを図 6 に示す。トランスモデルはコアを実際のトランスの磁極の大きさに合わせて作成した。

このモデルで実験と同条件のギャップ長 70mm, 給電電力 1.5kW, 周波数 30kHz で解析を行った。

5. 給電実験

表 3 に実験条件を示す。トランス 1 台, 2 台共にギャップ長 70mm で 1.5kW 給電を行い、電源には 30kHz インバータを用いた。漏洩磁界強度の測定は全無響電波暗室で直径 60cm のループアンテナを用いて行った。また、測定距離はトランス中央から水平に 3m とし、ループアンテナ面を x, y, z の 3 方向に向け測定した。磁界測定の様子を図 7 に示す。測定点での磁界強度 H は(3)式で計算した。給電実験での各部の電流電圧を表 4 に示す。

表 4 給電結果
Table 4. Experimental result.

トランス	トランス 1 台		トランス 2 台	
	α		α	β
$R_L[\Omega]$	5		15	
$V_{DC}[V]$	159		114	
$I_{DC}[A]$	10.1		14.9	
$V_{IN}[V]$	156		115	115
$I_{IN}[A]$	12.6		9.07	11.1
$V_2[V]$	121		76.7	76.7
$I_2[A]$	39.7		28.8	28.8
$I_D[A]$	17.1		12.7	13.4
$V_L[V]$	152		87.5	
$I_L[A]$	9.86		17.1	
$P_{out}[W]$	1500		1500	
$\eta_{TR}[\%]$	96.2		96.4	

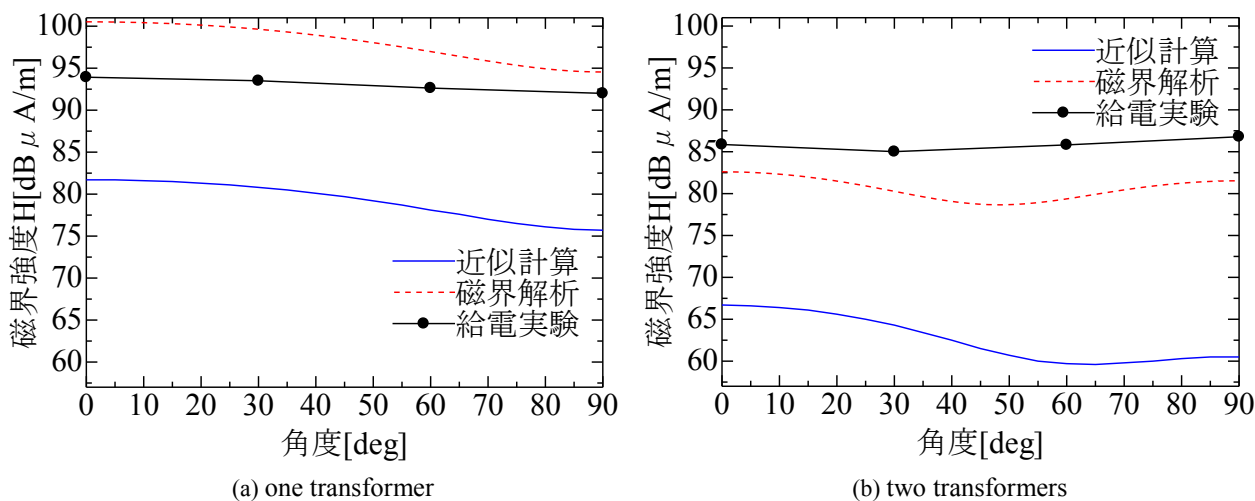


図 8 漏洩磁界強度

Fig.8. Leakage magnetic field.

表 5 漏洩磁界強度 (単位: dB μ A/m)

Table 5. Leakage magnetic field.

角度[deg]	近似計算		磁界解析		給電実験	
	1 台	2 台	1 台	2 台	1 台	2 台
0	81.7	66.7	101	82.6	93.9	85.9
30	80.8	64.3	99.6	80.3	93.5	85.0
60	78.1	59.7	97.0	79.4	92.6	85.8
90	75.7	60.5	94.5	81.5	92.0	86.8

6. 漏洩磁界強度結果

ソレノイドコイル近似による磁界計算法, 有限要素法磁界解析, 給電実験のそれぞれの実験結果の比較を行ったグラフを図 8, 数値データを表 5 に示す。計算・測定した位置はトランス中央から水平に 3m で 0° (x 方向) から 90° (y

方向) までの磁界強度である。

トランス 1 台のとき磁界強度はすべての検討結果で, 0° (x 方向) から 90° (y 方向) になるにつれて一様に減少した。磁界強度は 0° (x 方向) よりも 90° (y 方向) の方が, 近似計算, 有限要素法磁界解析, 給電実験でそれぞれ 6.00dB, 5.97dB, 1.90dB 低くなった。

トランス 2 台のときの磁界強度は近似計算では 0 から 65° まで一様に減少し、65° から 90° (y 方向) までは増加していった。ただし磁界強度が最も高かったのは 0° (x 方向) の 66.7dB μ A/m で磁界強度が最も低かったのは 65° の 59.6dB μ A/m であった。

有限要素法磁界解析では 45° で磁界強度が 78.7dB μ A/m と最も低く、0° (x 方向) で磁界強度が 82.6dB μ A/m と最も高くなった。

給電実験では 30° で磁界強度が 85.0dB μ A/m と最も低くなり、90° (y 方向) で磁界強度が 86.8dB μ A/m と最も高くなった。

3つの検討結果から、トランス 2 台化によりどの角度においても磁界強度の低減が可能であることを確認できた。特に磁界強度を低減できると予想された 0° (x 方向) については給電実験で 8dB 低減でき、磁界強度を低減できるか不明であった 90° (y 方向) では 5.2dB 低減できた

ソレノイドコイル近似による磁界計算法が実際の給電実験結果より 10dB~20dB 程度低くなっているのは、フェライトコア、トランス長さなどを考慮していないことが原因であると考えられる。今後これらを考慮したモデルにすることで実験との誤差を改善できると思われる。

7. まとめ

トランス 2 台化による漏洩磁界低減法を提案しトランス 1 台のときの基本波の漏洩磁界の比較を行った。トランスを 2 台化することで、漏洩磁界が車の前後方向で 8dB、左右方向で 5.2dB 低減でき、間の角度においても低減可能であることが確認できた。この結果から非接触給電トランス 2 台化による漏洩磁界低減法が有効であることを確認した。

非接触給電トランスの漏洩磁界のモデル化を行い、傾向を見る上での有用性を確認できた。今後は今回使用したトランスモデルにフェライトコア、コイルの長さ等を考慮してモデル化することにより漏洩磁界測定結果に近い値を得ることができると考えられる。

文 献

- (1) 清水良太郎・金子裕良・阿部 茂:「円形トランス及び H 型トランスと給電可能な新 Hc 型非接触給電トランス」, 平成 25 年電気学会研究会資料, VT-13-13 (2013.2.22)
- (2) 毎川研吾・今井邦夫・皆川祐介・有満捺・岩野浩:「電気自動車用非接触給電システムの周辺磁場低減技術」自動車技術会, 学術講演会前刷集 No.110-13(2013)
- (3) 佐藤亨耶・徐将希・金子裕良・阿部 茂:「電気自動車用非接触給電の漏洩電解の高調波成分の低減法」半導体電力変換モータードライブ合同研究会, SPC-14-16, MD-14-16(2014.1.24)
- (4) 藤田到・阿部茂:「電気自動車用非接触給電トランスの複数モジュール構成による大容量化」電気学会産業応用部門大会論文集, No. 4-9, pp.1V111-IV114 (2012.8.23)
- (5) 山口昌一郎, 基礎電磁気学, 電気学会(1986.1.20)