

電気自動車用非接触給電装置の サーチコイルを用いた給電可能位置判定法

菅野 勇一* 三田 祐輔 金子 裕良 阿部 茂 (埼玉大学)

保田 富夫 ((株)テクノバ) 鈴木 明 (アイシン・エイ・ダブリュ(株))

Parking Misalignment Judgment using Search-coil for Contactless Power Transfer System of Electric Vehicle

Yuichi Kanno*, Yusuke Mita, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

Tomio Yasuda (Technova Inc), Akira Suzuki(AISIN AW CO., LTD.)

Abstract

A contactless power transfer system is desirable for the charging of electric vehicles (EVs). However, the change of the air gap length and misalignment of transformers cause the decrease in efficiency and the influence increase of the leakage flux. This paper presents positional judgment method of transformers to transmit power highly effective. Ratio b of the primary voltage and the secondary voltage in the transformers and some voltages of search-coil set up in ferrites are used for positional judgment. The proposed system can detect the direction of misalignment at a low cost. The transfer experiments of 100W were performed, and the validity of the proposed method was verified.

キーワード：電気自動車，非接触給電，電磁誘導，サーチコイル

(Electric vehicle, Contactless power transfer, Electromagnetic induction, Search-coil)

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自動車（PHV）や電気自動車（EV）の普及が進んでいる。現在は電気ケーブルとコネクタで車両に給電するコンダクティブ方式であるが，安全性や利便性を考えると，将来は非接触給電方式が有望である。

電気自動車用の電磁誘導方式非接触給電装置は，地上の送電トランスと車載の受電トランス間の，ギャップ長変動と前後左右の位置ずれが避けられない。ギャップ長の変動や位置ずれが起こると，(1) 給電効率の低下，(2) 漏れ磁束による車体外板の加熱や人への影響，(3) 一次二次電圧比の拡大による電源容量の増大などの問題が生じる。このため駐車してからの給電を想定すると，送電トランスの位置に対して受電トランスが給電可能位置にあるか判定する手段が必要である。

現在位置ずれ対策として，(A) コンクリートブロック等を用いて車両の前後左右を位置合わせするタイヤガイド方式，(B) 送受電トランスに通信用コイルを設置し，通信用コイルの通信感度により給電の可否を判定する通信センサ方式⁽¹⁾，(C) バックモニタとカーナビを利用し目的位置に駐車する自動駐車方式が提案されている。これらの欠点として (A) ではタイヤの損傷や，車幅の異なる車両に適用が難しいこと，(B) では通信用コイルの性能で範囲が決まっ

てしまうことと位置ずれの方向が検知できないこと，(C) では自動駐車装置が高価になることが挙げられる。これらの課題を解決するには，トランスの位置ずれ許容性能に合った，位置ずれ方向の検知も可能で，安価な，新しい給電可能位置判定手段が必要である。

我々はEV用非接触給電装置として，位置ずれ許容範囲の広い，H型コア両側巻トランスを用いた一次直列二次並列コンデンサ方式を提案してきた⁽²⁾⁽³⁾。本稿ではこのトランスに適した，送電（一次）トランスと受電（二次）トランスの電圧比 b とトランスの磁極に巻いた複数のサーチコイルの電圧値をもとに，給電可能位置にトランスが位置しているかどうかを判定する手法を提案する。

b は結合係数 k とほぼ等しい。このため b を測定すれば給電効率から見た給電可能な範囲がわかるが，前後左右方向の位置ずれまでは判定できない。そこでトランスの位置ずれ時に生じる磁界分布のアンバランスを複数のサーチコイルで検知し，前後左右の給電可能範囲の判定を行う。

一次二次電圧比 b とサーチコイル電圧に基づく提案手法はトランスに固有な特性を利用しているため，トランスの容量や寸法が変わっても適用可能であり，大きな位置ずれ許容範囲を判定するのに適した方法である。以下，2章で対象とする非接触給電システムの特性，3章で提案する給電可能範囲判定法の詳細，4章で実験結果について述べる。

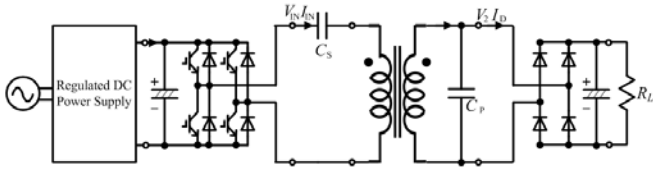


図1 非接触給電システム
Fig. 1. Contactless power transfer system.

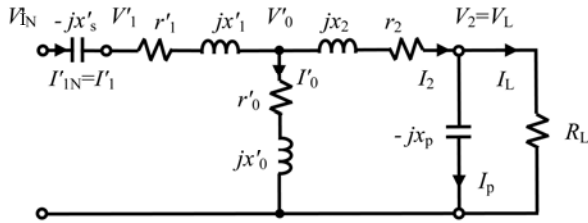


図2 詳細等価回路
Fig.2. Detailed equivalent circuit.

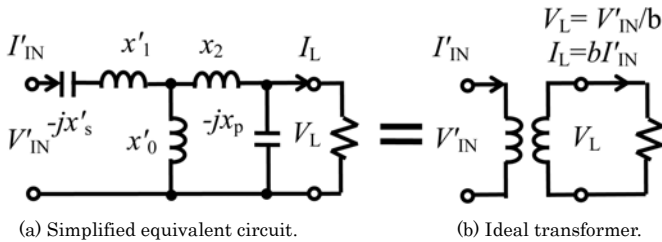


図3 簡略等価回路と理想変圧器特性
Fig.3. Simplified equivalent circuit and Ideal transformer.

2. 自動車用非接触給電システム

〈2・1〉 非接触給電装置の構成 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、給電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形等価回路で表し、直列およ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2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 に比べて十分小さい。従って巻線抵抗 r_1 、 r_2 と鉄損の r_0 を省略し、図3(a)の簡略等価回路で解析を進める。

〈2・3〉 理想変圧器特性 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。

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

次に一次側直列コンデンサの値を(2)式の値に決める。

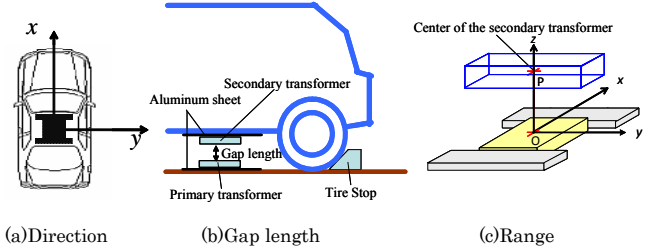


図4 位置ずれ方向とギャップ長
Fig.4. Direction and gap length .

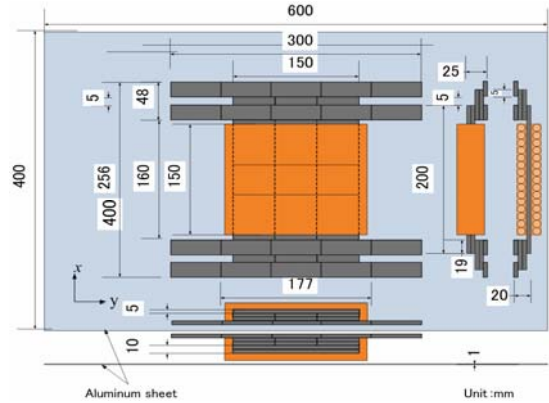


図5 H型コア両側巻トランス
Fig.5. Transformer's dimension.

表1 トランスの仕様と給電可能範囲

Table 1. Transformer specifications and range of possible to transfer power.

Rated power	1.5kW
Turn ratio $a(N_1:N_2)$	20:6
Normal position (x, y, z) [mm]	(0,0,70)
Tolerance of misalignment forward direction x [mm]	±60
Tolerance of misalignment lateral direction y [mm]	±150
Tolerance of change gap length z [mm]	±30

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

ここで、 V'_{IN} と V_2 、 I'_{IN} と I_L の関係を求めると、

$$V'_{IN} = b V_2, \quad I'_{IN} = \frac{I_L}{b}, \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \dots\dots\dots(3)$$

となり、図3(a)の回路は図3(b)の巻数比 b の理想変圧器と等価であることが分かる。 b は結合係数 k にほぼ等しく、(3)式より一次二次の電圧比から容易に測定可能である。

以上をまとめると、一次側に(2)式で決まる直列コンデンサを、二次側に(1)式で決まる並列コンデンサを付加すれば、巻線抵抗と鉄損を無視した場合、電源周波数において、

- (1) 給電トランス部の等価回路は理想トランスとなる。
- (2) 抵抗負荷であれば、電源は出力効率1となりソフトス

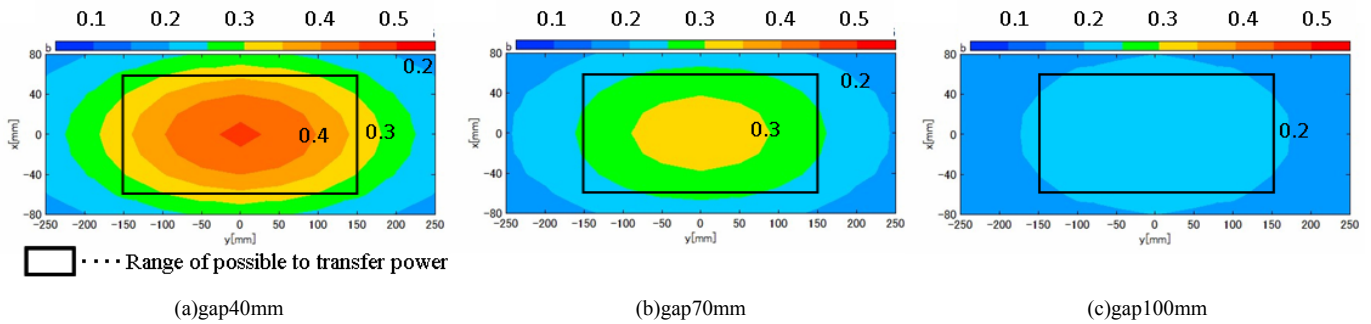


図6 ギャップ長別 b 特性
Fig.6. b characteristics.

イッチングが可能で、小型化と効率向上を実現できる。

(3) 直列および並列コンデンサの値はトランスのリアクタンス値 x_0, x_1, x_2 と巻数比 a だけで決まり負荷に依らない。

(4) 電源を定電圧（あるいは定電流）制御すれば負荷が変化しても、負荷も定電圧（定電流）になる。

〈2・4〉 H型コア両側巻トランスと給電可能範囲

我々が開発したH型コア両側巻トランス⁽³⁾を図4(a)(b)のように車に設置するものとする。図4(c)では受電トランスの中心位置点Pの許容範囲を直方体で示している。トランスの形状を図5に示す。

磁極はサーチコイルを巻くためにコアを前後(x)方向に分割し、位置ずれによる磁界の偏りをより正確に計測できる構造とした。

トランスの仕様と給電可能範囲を表1に示す。H型コア両側巻トランスは磁極長手(y)方向の位置ずれに強いため、図4(a)(b)のように車の底面外部に設置し、

(1) 誰でも駐車しやすいように、左右(y)方向の位置ずれ許容範囲を±150mmと大きくした。

(2) 前後(x)方向は図4(b)のようにタイヤ止めの利用を想定し、±60mmの許容範囲で問題ないようにしている。

前後左右の位置ずれが大きいと、送電トランスの漏れ磁束が車体外板を加熱する恐れがあるため、図5のように(1)(2)の範囲を考慮した寸法のアルミ板で遮蔽している。

標準ギャップ長は70mmとし、許容範囲は車載重量の変化等を考慮し±30mmとした。

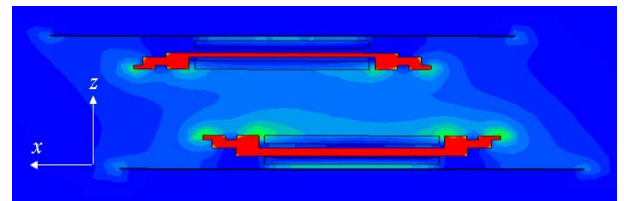
後で述べるようにギャップ長により結合係数 k が変化し、

(3) ギャップ長が小さすぎると、 k ($\approx b$) が大きくなりインバータの出力電圧 V_{IN} を大きくする必要がある。

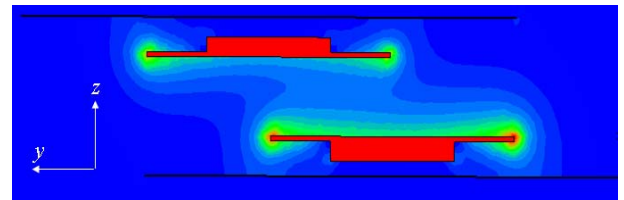
(4) ギャップ長が大きすぎると、 k ($\approx b$) が小さくなり出力電圧 V_L が大きくなるとともに、給電効率が低下する問題も生じる。

3. 給電可能位置判定法

本章では給電トランスの一次二次の電圧比から求まる b の特性と磁極に設置したサーチコイルの電圧特性を用いた給電可能位置の判定法について述べる。 b はギャップ長変動と位置ずれに、サーチコイル電圧は位置ずれに対して感度が高いという特性を利用し、これらのパラメータを個別、または組み合わせて給電可能範囲の判定を行う。



(a) x-z section



(b) y-z section

図7 位置ずれによる磁界の偏り

Fig.7. Bias of magnetic flux by misalignment.

〈3・1〉 b による給電可能位置判定 給電トランスのギャップ長が変化したり位置ずれが生じると、 b が変化する。 b は V_{IN} と V_2 より(4)式で求めることができる。

$$b = \frac{V_{IN}}{aV_2} \dots\dots\dots(4)$$

図5のH型コア両側巻トランスの各ギャップ長における位置ずれによる b の変化を図6に示す。図中央部の四角枠は給電可能範囲を示している。図6より、

- (1) b はギャップ長により値が大きく変化する。
- (2) xy 平面内の b は、ギャップ長が小さい場合は変化が大きく、ギャップ長が大きい場合は変化が小さい。
- (3) 等 b 面は3次元空間では左右(y)方向に長く、上下(z)方向に凸な長球面となる。

以上より b ではギャップ長と前後左右の位置ずれの正確な判定は行えないが、一定の結合係数が得られる範囲を判別する事が出来る。そこで提案手法では b を次の判定に用いる。

- (a) ギャップ長許容範囲の判定
 - (b) 図6(a)のように b の変化が大きな短ギャップ位置でのサーチコイル電圧と組み合わせたギャップ長判定
- b だけでは前後(x)方向、左右(y)方向の給電可能範囲の判定

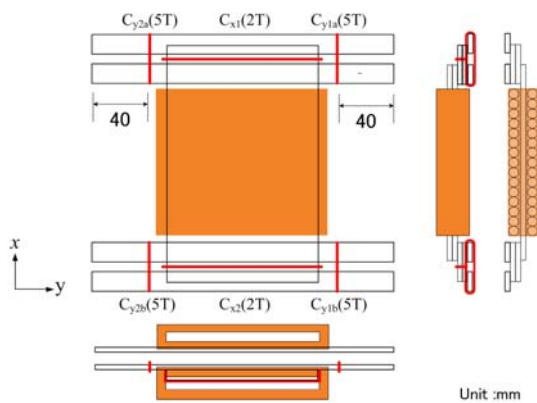


図 8 サーチコイルの設置場所

Fig. 8. Detailed installation location of search-coil.

ができないため、前後左右の位置ずれにはサーチコイル電圧を用いる。

〈3・2〉 サーチコイル電圧による給電可能位置判定

図7は車載トランスが地上トランスに対して(a)前後方向、(b)左右方向に位置ずれしたときの磁界分布を計算した結果である。図7より地上トランスの上の空間の磁界は車載トランスがずれた方向に偏り、磁界分布にアンバランスが生じる。その磁界分布のアンバランスを地上トランスに設置した複数のサーチコイルで検出できれば、前後左右の位置ずれを知ることができる。

このため地上(一次)トランスの磁極に図8のように6つのサーチコイルを設置した。今回は地上トランスに設置したがサーチコイルは車載トランスに設置しても良い。サーチコイルの巻数は電圧測定に適した巻数とした。図9にサーチコイルの電圧波形を示す。電圧波形には高調波成分が多く含まれているので測定精度向上のため、DFT処理で基本波実効値を計算しサーチコイル電圧とした。

前後(x)方向検知用のサーチコイル C_{x1} , C_{x2} は前後(x)方向に分割した磁極間のコアに巻き、最前方および最後方の分割磁極を通る主磁束量を測定することで、x方向の位置ずれには高感度で、y方向の位置ずれには影響を受けにくいようにした。x方向サーチコイル電圧はそれぞれ V_{x1} , V_{x2} として取り扱う。

左右(y)方向検知用サーチコイル $C_{y1a} \sim C_{y2b}$ は磁極の左右両端より 40mm の位置にそれぞれ四か所設置し、y方向の位置ずれには高感度で、x方向位置ずれには影響を受けにくいようにした。y方向サーチコイル電圧は(5)式で計算した前後方向2つのコイル電圧の平均値を V_{y1} , V_{y2} として取り扱う。

$$V_{y1} = \frac{V_{y1a} + V_{y1b}}{2} \quad V_{y2} = \frac{V_{y2a} + V_{y2b}}{2} \dots\dots\dots (5)$$

判定処理に用いる、 V_{x1} , V_{x2} , V_{y1} , V_{y2} の4つのサーチコイル電圧の各ギャップにおける電圧特性を図10, 11に示す。給電可能位置判定は小電力で行う方が安全であるため、給電電力 100W で行うこととした。

図10と図11から次のサーチコイルの電圧特性が分かる。

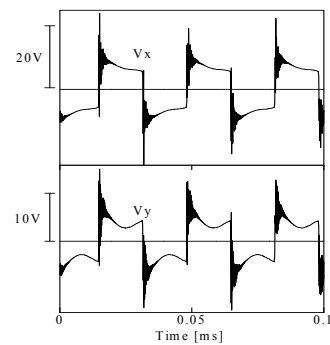


図 9 標準位置時サーチコイル電圧波形

Fig. 9. Search-coil voltage waveform.

- (1) 設計通り x 方向 (y 方向) のサーチコイルは x 方向 (y 方向) の位置ずれに高感度で、特に、 $V_{x1}(V_{y1})$ は y 方向 (x 方向) の位置ずれの影響は十分小さく、値の変動が小さい。
- (2) 位置ずれ方向側のサーチコイル電圧 V_{x1} , V_{y1} (実線) は反対側のサーチコイル電圧 V_{x2} , V_{y2} (点線) に比べ、感度 (傾き)、直線性の点で位置ずれ量の判定に適している。
- (3) V_{x1} (V_{y1}) はギャップ長 40mm~100mm では、x 方向(y 方向)位置ずれに対してほぼ同じ出力電圧で、特に給電可能限界である $x=60\text{mm}$ ($y=150\text{mm}$) までは出力電圧が 12.6V (8.8V) 以下になっている。

以上より、x 方向(y 方向)の給電可能限界の判定には、サーチコイル電圧 V_{x1} , V_{x2} (V_{y1} , V_{y2}) の高い方を選択し、電圧閾値 $V_{xth}=12.6\text{V}$ ($V_{yth}=8.8\text{V}$) を用いればよいことが分かる。また、(2)の電圧特性から位置ずれ方向を検知して運転者に知らせることも可能である。

〈3・3〉 b とサーチコイル電圧を組み合わせた判定

<3.1>の b と<3.2>のサーチコイルの判定法を用いれば、図13のように表1の目標とする給電可能範囲に対して、前後左右方向はほぼ正確に給電可能範囲内か否かを判定できると予想できる。しかし上下(z)方向に関しては等 b 面が長球面となるため、 $\pm 30\text{mm}$ を判定できない。

しかし、給電可能最小ギャップ $z_{min}=40\text{mm}$ 未満 ($=70\text{mm} - 30\text{mm}$) の判定に関しては、図6(a)に示すように前後左右の位置ずれで b が大きく変化するため、b とサーチコイル電圧 V_{x1} , V_{x2} , V_{y1} , V_{y2} を組み合わせればギャップ長が z_{min} より大きいかな否か (給電可能範囲内かな否か) を判定することができる。実験に用いた具体的な演算式は次節に示す。

〈3・4〉 給電可能位置判定法のアルゴリズム

前節までに述べた b とサーチコイル電圧による給電可能位置判定法を、手順も含めてフローチャートを図12に、図12の各判定に対応した給電可能範囲の判定領域を図13に示す。図13では目標とする給電可能範囲を点線で示した。給電可能範囲判定の流れをフローチャートに沿って詳細に説明する。

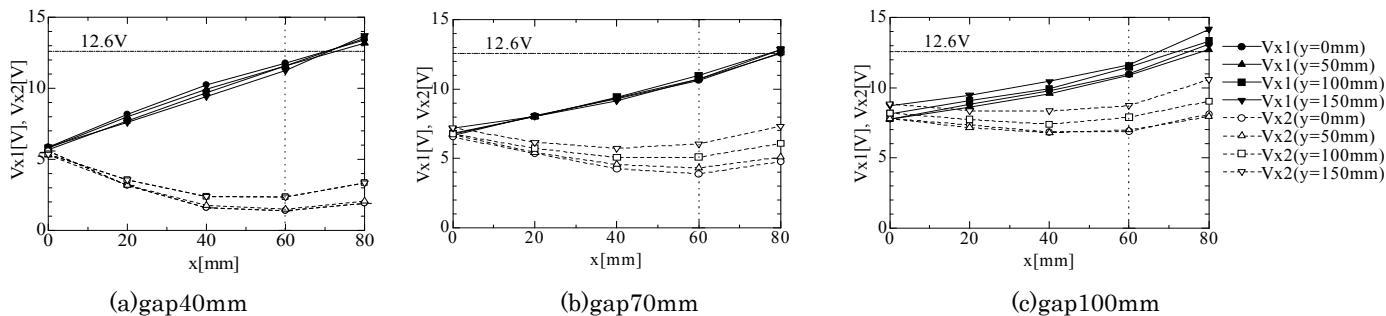


図 10 サーチコイル電圧特性(x方向)

Fig.10. Search-coil voltage characteristics (x direction).

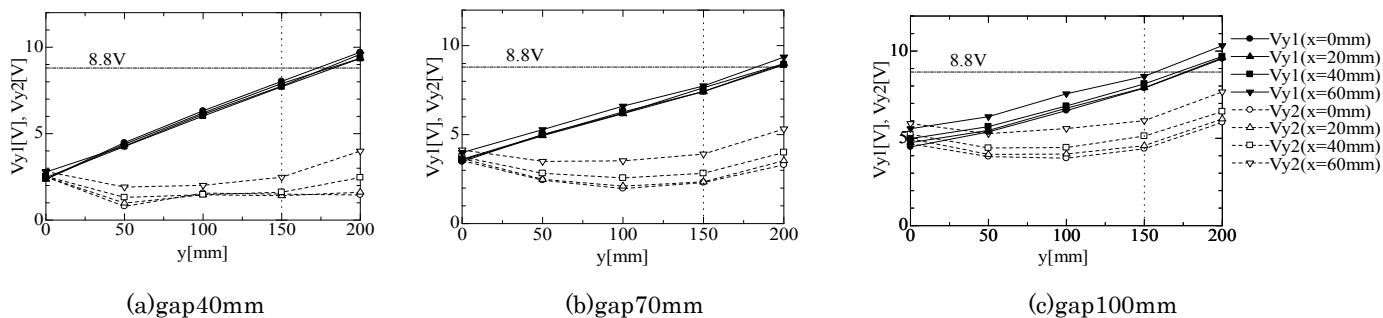


図 11 サーチコイル電圧特性(y方向)

Fig.11. Search-coil voltage characteristics (y direction).

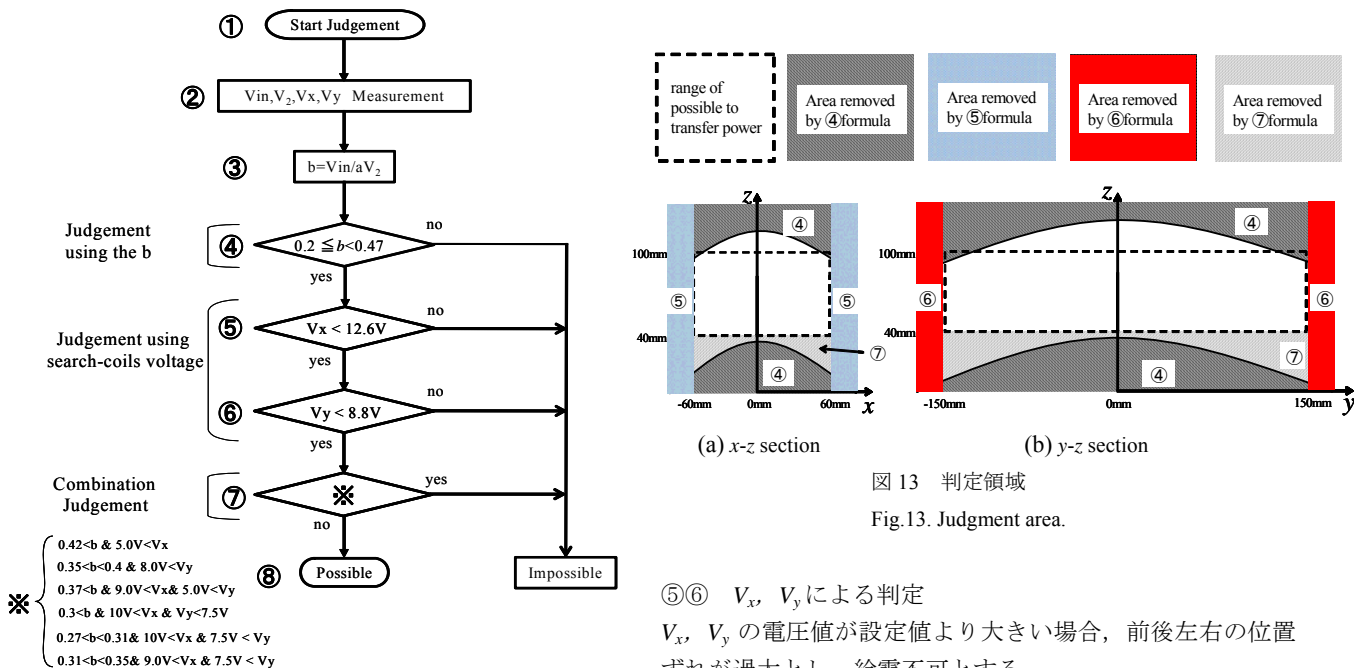


図 12 判定フローチャート

Fig.12. Judgment flowchart.

- ① 100W 給電 - 判定開始
- ②③ V_{IN} , V_2 , V_x , V_y を測定, 計算
 V_{x1} , V_{x2} (V_{y1} , V_{y2})を比較し, 高い電圧値を V_x (V_y)とする。(4)式より V_{IN} , V_2 から b を算出
- ④ b による判定
測定した b が設定値の範囲外の場合, ギャップ長が過小・過大, または位置ずれが過大とし給電不可とする。

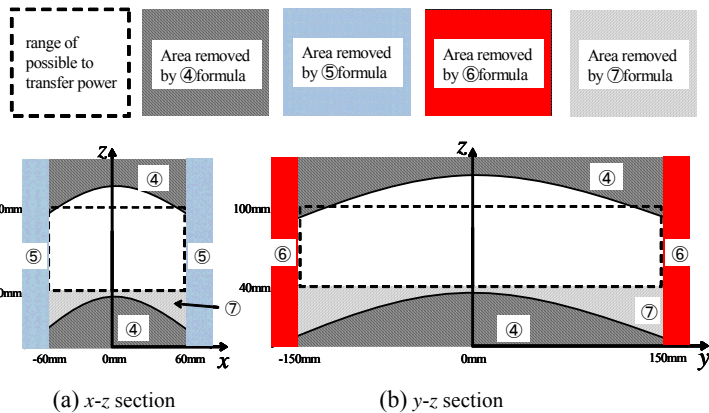


図 13 判定領域

Fig.13. Judgment area.

- ⑤⑥ V_x , V_y による判定
 V_x , V_y の電圧値が設定値より大きい場合, 前後左右の位置ずれが過大とし, 給電不可とする。
- ⑦ 組み合わせ判定
各判定パラメータが設定値の範囲内の場合, ギャップ長過小とし, 給電不可とする。
- ⑧ 給電可能判定
判定の全行程で給電不可と判定されなかった場合, 給電可能と判定し, 給電開始へと移行する。

以上のような流れで判定を行う。次章に本アルゴリズムを用いた検証実験とその結果について述べる。

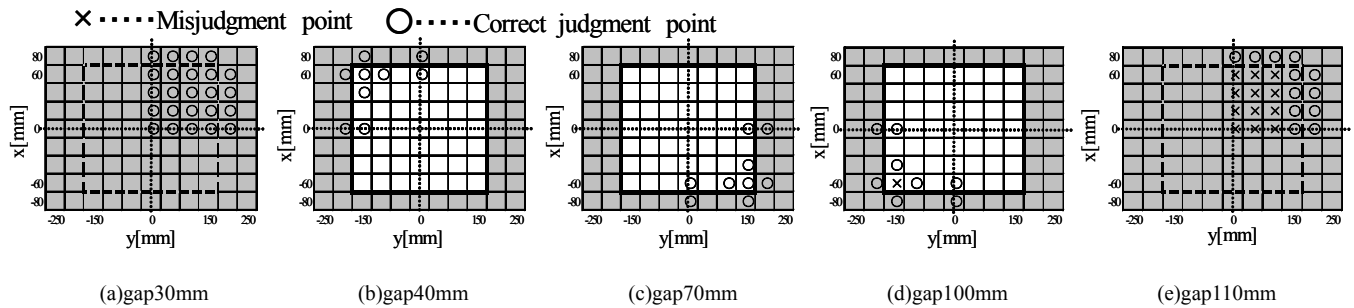


図 14 検証実験判定結果

Fig.14. Experimental results.

4. 検証実験

〈4.1〉 検証実験 3章で提案したアルゴリズムを用いて検証実験を行った。図1の回路で、二次側整流器を除き負荷抵抗 160Ω を接続し、3章と同じ $100W$ 給電で給電可能位置の判定を行った。検証実験結果を図14に示す。

図14(a)~(e)のようにギャップ長を変え、受電トランスの中心位置(図4(c)のP点)を送電トランスに対して xy 方向に図14の (x, y) の値だけずらした時に給電可能か否かを判定した。アルゴリズムが正しく判定した測定点 (x, y) には O を、誤判定した測定点には X を記入した。背景が白色の所は給電可能位置を、灰色の所は給電可能範囲外を示す。位置ずれ特性は中心 $(x, y) = (0, 0)$ に対し、 x 軸、 y 軸で対称性があるため、測定点は第1象限を中心に、ギャップ長を変える毎に象限も変えて測定した。

図14(a)のギャップ長 $30mm$ と図14(e)のギャップ長 $110mm$ の場合は第1象限で $(x, y) = (60mm, 150mm)$ より内側の全点とその外周の点で測定を行った。

図14の結果より、ギャップ長 $100mm$ 時の $(x, y) = (-60mm, -150mm)$ とギャップ長 $110mm$ 時の $(x, y) = (60mm, 150mm)$ より内側を除いてほぼ正しく判定できていることが分かる。

〈4.2〉 長ギャップ時の誤判定への対応 前節で述べたギャップ長 $110mm$ 時の $(x, y) = (\pm 60mm, \pm 150mm)$ より内側で誤判定となる問題に関しては、等 b 面がギャップ長方向 (z 方向) に凸な長球面のため、図13で既に予想された結果である。しかし、ギャップ長 $110mm$ の場合も前後左右方向の位置ずれ過大時(点線枠の外)に対しては正しく判定できた。

従って1章で述べた漏れ磁束による車体外板の加熱の問題は生じない。しかし、 b が小さい時に給電すると(1)給電効率の低下、(3)一次二次電圧比の拡大による電源容量の増大を招く。

提案アルゴリズムでは④で $b \geq 0.2$ としたが、実用的には $b \geq 0.25$ 程度に制限することにより給電効率の低下や電源容量増大の課題も回避できる。

5. まとめ

本稿では一次直列二次並列コンデンサ方式の電磁誘導方式非接触給電システムとH型コア両側巻トランスを用いて、一次二次電圧比 b と送電コイルに設置したサーチコイ

ル電圧に閾値を設定し、それらを組み合わせて行う給電可能位置判定法を提案した。また、検証実験により、判定法の有効性を示した。ギャップ長過大時の問題に対しては、給電効率や電源容量も考慮して、給電可能範囲を一部分制限することで解決可能と考えている。

文 献

- (1) 松本英敏:「非接触電力伝送技術の最前線」, エレクトロニクスシリーズ, p.90 (2009)
- (2) 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)
- (3) 千明将人・長塚裕一・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・鈴木 明:「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」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-11-048 (2011)