

# 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

学生員 藤田 到\* 学生員 山中 智裕 正員 金子 裕良 正員 阿部 茂 (埼玉大学)  
正員 保田 富夫 ((株)テクノバ) 非会員 鈴木 明 (アイシン・エイ・ダブリュ(株))

Large Capacity Contactless Power Transformer for Electric Vehicle  
Using Multiple Module Configuration  
Itaru Fujita\* , Tomohiro Yamanaka , Yasuyoshi Kaneko , Shigeru Abe (Saitama University)  
Tomio Yasuda (Technova Inc), Akira Suzuki (AISIN AW CO.,LTD.)

A contactless power transfer system for electric vehicles needs to have a large air gap, good tolerance to misalignment. Larger capacity's transformers without the saturation of ferrites and the overvoltage are required for the rapid charge. In this paper, a new contactless power transfer system of the module configuration is proposed to expand capacity easily and to divide power per unit transformer. An efficiency of 96% was achieved across 70mm mechanical gap at 25kW.

キーワード：電気自動車, 非接触給電, 変圧器, 急速充電, モジュール, 大容量

**Keywords** : electric vehicle, contactless power transfer system, transformer, fast charge, module, large capacity

## 1. はじめに

現在、電気自動車の充電方式は電気ケーブルとコネクタを用いるコンダクティブ方式であるが、利便性、安全性、保守容易性を考えると非接触給電方式が有望である。

電気自動車用の非接触給電トランスは小型軽量で、ギャップ長や位置ずれ許容範囲が広く、高効率であることが求められる。我々は片側巻円形コア構造<sup>(1)</sup>と比べて、これらの点で有利である両側巻H型コア構造のトランス<sup>(2)(3)</sup>を発表してきた。2011年に同コア構造かつ小型軽量で10kWの給電が可能な大容量トランスを発表した<sup>(3)</sup>。しかし、急速充電や大型電気自動車を対象とした場合、より大容量のトランスが求められてきた。大容量化にあたっては、単一のトランスを大容量化する方法の他に、一台の小容量トランスを基本モジュールとみなし複数モジュール構成で大容量化を図る方法がある。一般にモジュール構成方式は、開発期間短縮や開発コスト低減の面で有利であるが、複数モジュールを組み合わせ上での課題を解決する必要がある。本論文では非接触給電トランスのモジュール構成について検討したので、その概要と特性について述べる。

モジュール構成では基本モジュールとなるトランスの台数を変えるだけで所望の容量を実現できる。本論文では12.5kWトランスを二台使用し、合計25kWの給電が可能になることを示す。

非接触給電トランスはギャップ長変動や位置ずれが生じるため、商用トランスの並列運転とは異なり、トランス間の電氣的接

続だけでなく平面レイアウトも重要になる。本論文では車載側での拡張性を考慮しトランスを自動車の前後方向に並べる配置にした。この配置では二台の前後方向の磁界分布は(NS)(SN)の順序とし、磁極隣接部では磁力線の方向を一致させた。なお、モジュール構成のトランスの特性解析では、複数のトランスをまとめて一台のトランスとみなして解析を行った。

大容量トランスの場合、駆動電源の最大出力電圧や最大出力電流を考慮した設計が必要になる。複数のトランスは直列または並列接続が可能であるが、一般の商用トランスと同様に高い電圧を避け、一次側、二次側共に並列接続することにした。しかし、非接触給電トランスでは、並列接続で位置ずれが起きた場合の電流や電力のアンバランスが懸念された。

給電実験では、機械的ギャップ長70mmにおいて25kWの電力を96%のトランス効率で給電できることを確認した。また、ギャップ長変動や位置ずれが生じても平均95%以上の効率で給電できた。位置ずれによる電力アンバランスは、ギャップ長変動と左右方向の位置ずれではほとんど生じることなく、前後方向の位置ずれで最大約±14%の電力アンバランスが生じたが、実用上問題のないレベルであった。

## 2. 自動車用非接触給電システム

〈2・1〉 非接触給電システム 一次直列二次並列コンデンサ方式<sup>(4)</sup>の非接触給電システムの構成を図1に示す。高周波電源には周波数 $f_0=30\text{kHz}$ のフルブリッジインバータを

用い、二次側整流器には全波整流器を用いた。

〈2・2〉 等価回路 給電トランスを T 型等価回路で表し、トランスの一次側に直列コンデンサ  $C_S$  を、二次側に並列コンデンサ  $C_P$  を設置し、整流器と抵抗負荷を等価抵抗で置き換えた  $R_L$  を接続し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) を付けて表す。トランスはフェライトコアとリッツ線を用いると鉄損  $r_0'$  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  $x_0', x_1', x_2$  に比べて十分小さくなるため  $r_0'$  と  $r_1', r_2$  を省略した回路で解析を進める。

〈2・3〉 直列及び並列コンデンサ 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  $\omega_0 L_2$ ) に共振するように(1)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_P} = x_p = x_0' + x_2' \dots\dots\dots (1)$$

次に一次直列コンデンサの値を(2)式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_S} = x_s' = x_1' + \frac{x_0' x_2'}{x_0' + x_2'} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $V_{IN}'$  と  $V_2$ 、 $I_{IN}'$  と  $I_D$  の関係を求めると、

$$V_{IN}' = bV_2, I_{IN}' = I_D / b, b = \frac{x_0'}{x_0' + x_2'} \dots\dots\dots (3)$$

となり巻数比  $b$  の理想変圧器と等価であることが分かる<sup>(6)</sup>。

〈2・4〉 給電効率 (3)式より鉄損  $r_0'$  を無視した場合のトランスの最大効率  $\eta_{max}$  とその時の抵抗負荷の値  $R_{Lmax}$  は(4)式で表される<sup>(6)(7)</sup>。

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1}} \quad R_{Lmax} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1} \dots\dots\dots (4)$$

コイルの  $Q$  を(5)式で定義し、(6)式を用いると、(4)式は(7)式のように変形できる。

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

$$\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{Lmax} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \quad \eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \dots\dots\dots (7)$$

非接触給電では  $Q_1$  と  $Q_2$  は一般に数 100 程度でほぼ値が等しく、 $k$  も小さいので (6)式が成り立つ。(7)式より最大効率は  $k$  と  $Q$  だけで表され、効率を上げるには  $k$  と  $Q$  を大きくするだけでよいことが知られている<sup>(8)</sup>。

〈2・5〉 モジュール構成による大容量化 急速充電やバス、トラックなどの大型電気自動車に対し大容量のトランスが求められている。本論文では、一台の小容量トランス

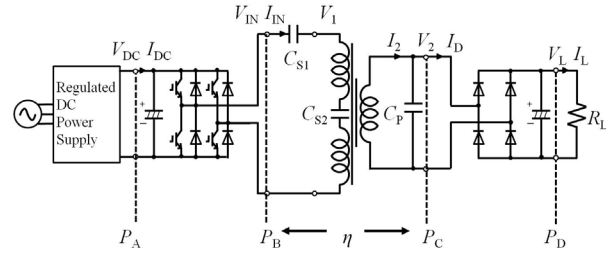


図 1 非接触給電システム

Fig.1. Contactless power transfer system.

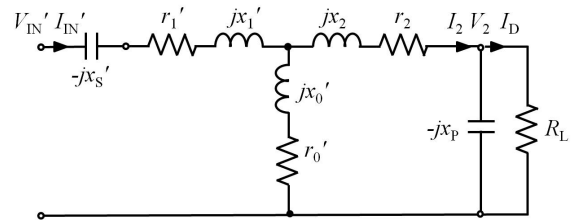


図 2 詳細等価回路

Fig.2. Detailed equivalent circuit.

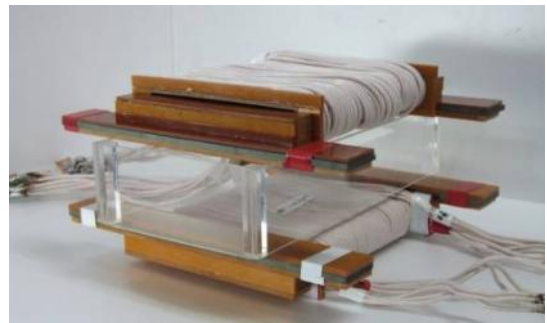


図 3 基本トランス

Fig.3. Basic transformer.

スを基本モジュールとみなし複数モジュール構成で大容量化を図る方法を採用した。

モジュール構成では基本トランス(図 3)を複数台並べ、電力を等分担して給電する。そのため、台数を変化させるだけで所望の容量を実現できる。また、隣接部では磁力線の方法を一致させることで、各トランスの磁界分布は単体構成(モジュールに用いたトランス一台だけの構成)の場合と大きく変わることはない。

### 3. モジュール構成の給電方法

〈3・1〉 モジュール構成の課題 モジュール構成はモジュールの単位となる基本トランスと適正な電源を用意することで様々な容量に対応できる。給電を行うためには (i)トランスの平面レイアウト, (ii)磁界の形状, (iii)トランス間の電氣的接続方法(直列・並列)を検討する必要がある。また、給電時にギャップ長変動や位置ずれが生じた場合には各トランスの給電電力に偏りが生じる可能性が

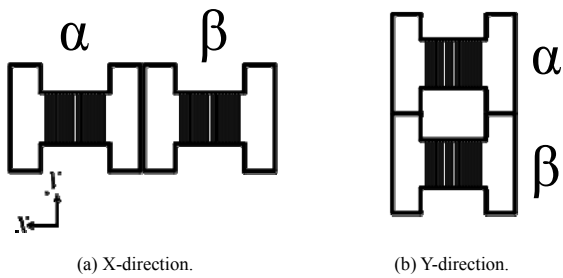


図4 二台トランスレイアウト  
Fig.4. Layout of transformer's module.

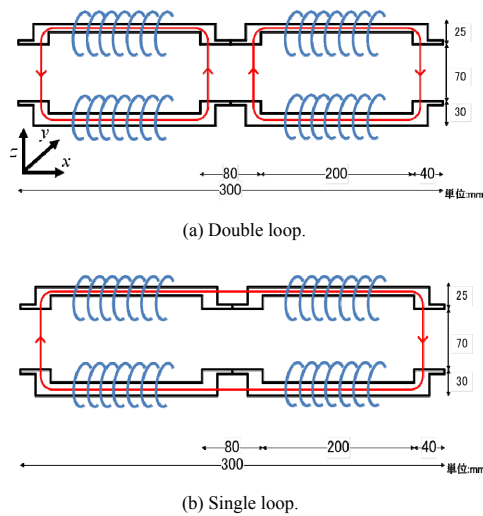


図5 磁界の形状  
Fig.5. Outline of magnetic field.

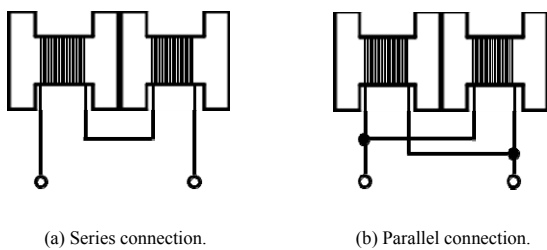


図6 巻線接続方法  
Fig.6. Connection method of winding.

ある。本論文では1台あたり12.5kWの電力を給電できるトランスを二台( $\alpha$ と $\beta$ )用いた場合について検討した。

**(3・2) レイアウト** トランスのレイアウトとしては、駐車時の位置ずれを考慮すると、図4に示すようにx方向(車両前後方向)またはy方向(車両左右方向)に対称的に配置することが望ましい。トランスは車体に取り付けられるためトランス台数の拡張性や、隣接するトランスとの結合の影響を考慮して、図4(a)のx方向の配置を採用した。

**(3・3) 磁界の形状** x方向配置の場合、コアを通る磁束の向きを変化させることでDouble-loopとSingle-loopの2

表1 トランス定数

Table 1. Parameters.

configuration	module ( $\alpha, \beta$ )				Simple	
	S/S	S/P	P/S	P/P	$\alpha$	$\beta$
Transformer						
$r_1$ [m $\Omega$ ]	153.2	157.1	37.7	37.7	96.7	92.5
$r_2$ [m $\Omega$ ]	19.81	4.93	19.08	5.03	9.61	8.71
$l_0$ [ $\mu$ H]	110.8	110.7	27.7	27.9	57.4	55.3
$l_1$ [ $\mu$ H]	155.1	155.0	38.7	38.7	110.6	112.1
$l_2$ [ $\mu$ H]	14.25	3.63	14.28	3.64	9.75	9.39
$C_s$ [ $\mu$ F]	0.128	0.128	0.512	0.510	0.190	0.190
$C_p$ [ $\mu$ F]	1.16	4.59	1.16	4.58	1.89	1.96
$k$	0.414	0.412	0.414	0.413	0.344	0.338
$b$	0.412	0.407	0.411	0.408	0.346	0.346
$R_{Lmax}$ [ $\Omega$ ]	10.3	2.7	10.4	2.6	8.2	8.1
$\eta_{max}$ [%]	98.1	98.1	98.1	98.1	98.0	98.1

表2 シミュレーション結果

Table 2. Simulation results.

primary/secondary	$V_{in}$ [V]	$I_N$ [A]	$V_2$ [V]	$I_D$ [A]
S/S	790	36.6	508	49.3
S/P	794	36.5	258	96.9
P/S	397	73.0	511	49.1
P/P	394	73.7	256	98.2

パターン(図5)の磁界を生成することができる。Single-loopでは、複数台にしても給電電力を増やすことができないため大容量化には適さない。一方、Double-loopは、磁界分布は単体構成の場合と大きく変わることはなく、台数に比例した大容量化が可能である。このため、本論文ではDouble-loopを採用した。

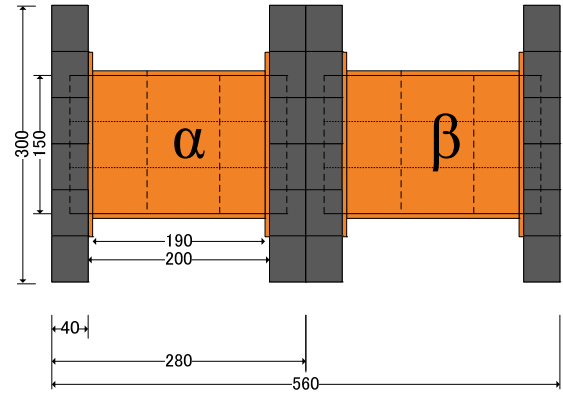
**(3・4) トランス間の接続方法** モジュール構成では、トランスを直列(S)または並列(P)に接続でき<sup>(5)</sup>、一次側と二次側を考慮すると4つのパターンが考えられる(図6)。モジュール構成では個々にトランス定数を測定しても、モジュール構成全体のトランス定数を求めることが難しい。このため、各接続パターンで結線後のトランスを一台のトランスとみなし、定数測定を行った。

表1にモジュール構成と単体構成のトランス定数を示す。モジュール構成においては、結合係数 $k$ と理論最大効率 $\eta_{max}$ はどの結線方式でも変わらないが、最大効率となる抵抗負荷の値 $R_{Lmax}$ が変化する。このため給電電力が同じでも結線方式で一次二次の電圧・電流が変わる。表2に25kW給電時の入出力電圧、電流のシミュレーション(PSIMver9.0)結果を示す。一次二次共に電圧は直列接続は並列接続の約2倍になる。電源や負荷もトランス台数により電圧が上昇するよりは電流が増える方が対処しやすいため、一次側、二次側共に並列接続(P/P)とした。

**(3・5) モジュールの仕様** トランス二台によるモジュール構成の外形と寸法を図7、仕様を表3に示す。背面磁束の遮蔽には600×700×2mmのアルミ板を用いた。



(a) Photograph of module configuration transformer.



(b) Dimension of module configuration transformer.

図7 トランスの外形と寸法

Fig.7. Transformer's outline and its dimension.

表3 トランス仕様

Table 3. Specification.

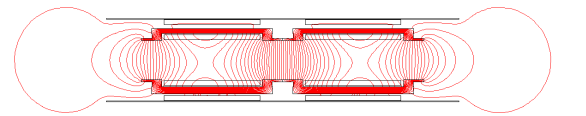
Transformer	$\alpha$	$\beta$
Ferrite Core	FDK 6H45 BS=0.53T, TDK PC40 Bs=0.50T	
Litz wire	0.1mm $\phi$ ×800	
Coil turns	Primary	4p×20T
	Secondary	12p×6T
Weight	Primary	6.40kg
	Secondary	5.72kg
Aluminum sheet	600×700×2mm	

#### 4. 磁界解析による磁力線分布

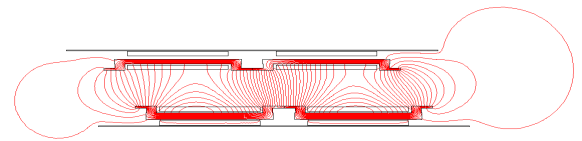
磁界解析ソフト(JMAG-Designer Ver.11.0)を用い、二次元モデルで磁力線の分布を調べた。図 8(a), (b)にモジュール構成における標準状態(位置ずれのない状態)と前後方向に60mm 位置ずれした場合の解析結果を示す。また、図 8(c)に単体構成の標準状態における解析結果を示す。モジュール構成の標準状態は図 8(a)のように左右対称な磁界分布であるが、位置がずれることで図 8(b)のような $\alpha$ と $\beta$ で磁界が異なる形状をとる。このため、位置がずれた状態で給電した場合、各トランスの結合が変化することで電力にアンバランスが生じる可能性がある。

#### 5. 給電特性

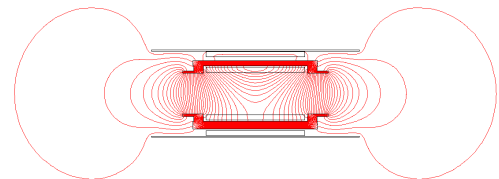
〈5・1〉 25kW 給電特性 機械的ギャップ長=70mm, 標準状態で全波整流器と  $R_L=5.0\Omega$  を接続し  $f_0=30\text{kHz}$ , モジュール構成で25kW 給電実験を行った(図9)。モジュール構成での25kW 給電結果と単体構成での12.5kW 給電結果を表4示す。モジュール構成は効率96.4%と単体構成に比べて約1%高効率で給電できた。この理由は表1より結合係数が上昇したためと考えられる<sup>(8)</sup>。 $\alpha$ トランスを基準としてトランス間の電力(電流)アンバランスを求めると一次側では1%



(a) Module configuration (normal position).



(b) Module configuration ( $x=60\text{mm}$ ).



(c) Simple configuration (normal position).

図8 磁力線

Fig.8. Magnetic flux lines.

(1%)以下、二次側は2%(1%)以下とほぼ電力と電流のアンバランスがなく、給電に支障がないことがわかる。

〈5・2〉 12.5kW 位置ずれ・ギャップ長変動給電特性 標準状態と同様の構成でギャップ長40~90mm, 前後方向(x方向) $\pm 60\text{mm}$ , 左右方向(y方向) $\pm 150\text{mm}$ の範囲で変動させた。このとき出力電力が一定となるように入力電圧  $V_{IN}$  を調整し、また電源の制限を避けて測定範囲を広くとるために

表 4 25kW 給電結果

Table 4. Experimental results of 25kW.

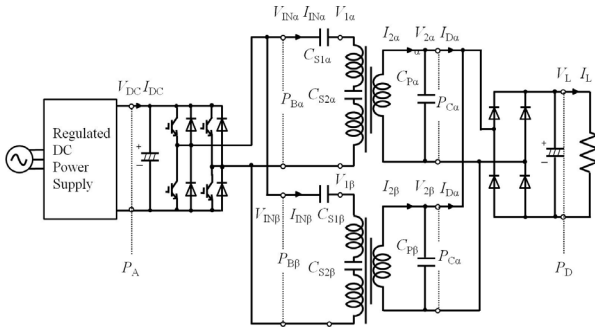


図 9 給電回路 (モジュール構成)

Fig.9. Experimental circuit (module configuration).

Rated power	25kW		12.5kW	
Transformer	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
gap[mm]	70			
$f_0$ [kHz]	30			
$R_L$ [ $\Omega$ ]	5.0		15	
$V_{DC}$ [V]	542		449	473
$I_{DC}$ [A]	54.6		33.6	32.0
$V_{IN}$ [V]	508	508	428	452
$I_{IN}$ [A]	34.8	35.0	35.5	34.1
$V_2$ [V]	315	315	337	338
$I_D$ [A]	53.8	53.4	51.3	51.2
$V_L$ [V]	354		433	433
$I_L$ [A]	71.5		28.9	28.9
$P_B$ [W]	13515	13511	13352	13330
$P_C$ [W]	12893	13157	12763	12697
$\eta$ [%]	96.4		95.6	95.3

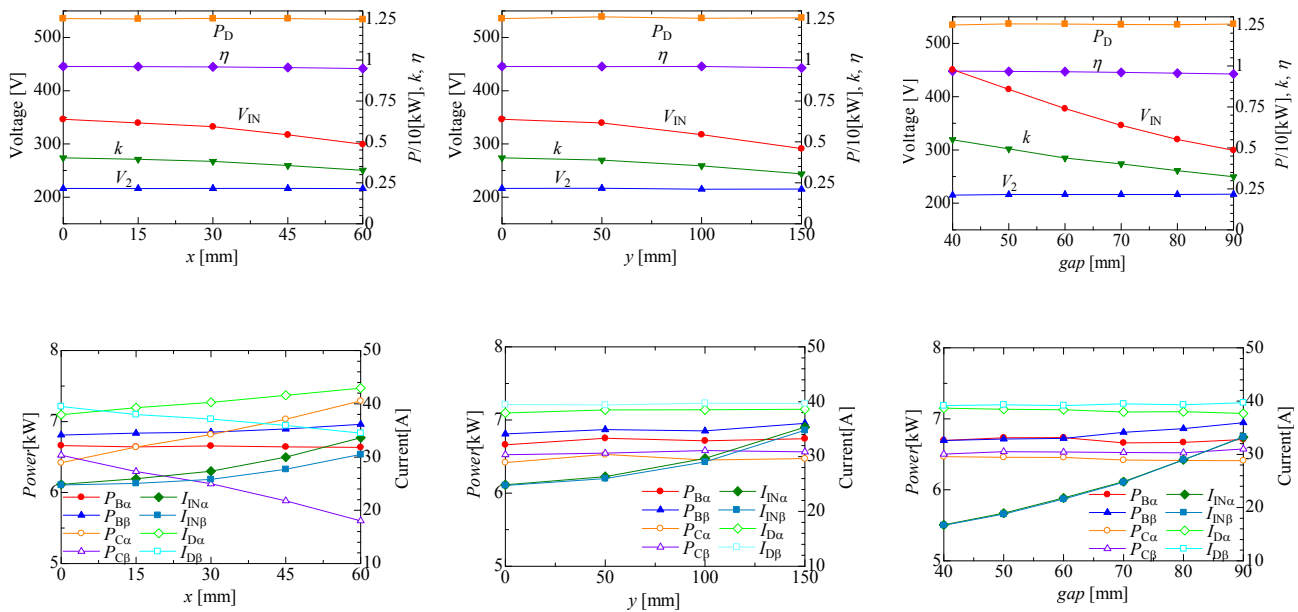


図 10 位置ずれ・ギャップ長変動給電結果

Fig.10. Experimental results.

出力電力を 12.5kW に下げた結果を図 10 に示す。モジュール構成では位置ずれ・ギャップ長変動での電力のアンバランスが懸念される。図 10 より標準状態における各トランスの電力を基準に取り、位置ずれ・ギャップ長変動が起きた場合にどの程度変化するか求めた。ギャップ長変動と左右方向の位置ずれでは電力のアンバランスは±3%以下であり、前後方向の位置ずれの場合、位置ずれが大きくなると電力の偏りが二次側で顕著になるが、 $x=60\text{mm}$  ずれた場合でも位置ずれのない場合に比べ±14%程度であり、給電に支障

はないことが確かめられた。

また、モジュール構成においても単体構成と同様に位置ずれ、ギャップ長変動が大きくなると相互インダクタンス  $l_0$  と結合係数  $k$  が減少し、理想変圧器の巻数比  $b$  が低下するため、(3)式より電圧比 ( $V_2/V_{IN}$ ) が増大することが確認された。

すべての場合において平均効率は 95% を超え、また位置ずれ、ギャップ長変動が最大となっても  $x=60\text{mm}$  では 94.8%、 $y=150\text{mm}$  では 95.2%、ギャップ長=90mm では 95.1% と位置ずれに強いことが分かる。

## 6. まとめ

本論文では非接触給電トランス容量の大容量化の手法としてモジュール構成を提案し、二台用いた場合の駆動方法、給電特性を調べた。

トランスレイアウトは前後方向に並べ磁極隣接部では磁力線の方向を一致させ、巻線接続は一次二次とも並列接続とする方式を採用した。12.5kW トランス 2 台で 25kW の給電実験を行い、給電効率が 1 台の場合より少し高くなること、前後方向位置ずれ時の電力のアンバランスも実用上問題のない±14%程度であることを確認した。

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の研究はあまり例がなく、本論文が役立つことを期待したい。

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。

## 文 献

- (1) 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)
- (2) 千明将人・長塚裕一・金子裕良・阿部茂・保田富夫・鈴木明 : 「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)
- (3) 山中智裕・野口真伍・金子裕良・阿部茂・保田富夫・鈴木明 : 「電気自動車の急速充電用非接触給電システム」平成 23 年電気学会産業応用部門大会, JIASC2011, 2-11, pp II 407- II 412(2011.9.6)
- (4) 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)
- (5) 小林大樹・長塚裕一・金子裕良・阿部茂 : 「電気自動車用モジュール型非接触給電トランス」 電気学会全国大会講演論文集, 4-192 (2010)
- (6) 金子裕良, 松下真也, 及川康史, 阿部 茂 : 「直列および並列共振コンデンサを用いた移動型非接触給電と給電効率」, 電学論 D, Vol.128, No.7, pp.919-925 (2008)
- (7) 金子裕良・阿部茂 : 「非接触給電技術」, 電学誌, Vol.128, No.12, pp.796-799 (2008)
- (8) 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, No.1, pp.123-124 (2012)