

電気自動車用大電力 H 型非接触給電トランスの放熱方法

山中 智裕* 藤田 到 金子 裕良 阿部 茂 (埼玉大学)

保田 富夫 ((株)テクノバ)

A Heat Dissipation Method of H-shaped Large Capacity Contactless Power Transformers for Electric Vehicles

Tomohiro Yamanaka*, Itaru Fujita, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

Tomio Yasuda (Technova Inc)

Contactless power transfer systems for charging electric vehicles require a high efficiency, a large air gap, and a good tolerance to lateral misalignment and needs to be compact and lightweight. Contactless power transformers have two types structure, one is a single-sided transformer with circle core, another is a double-sided transformer with rectangular core. Past studies showed H-shaped rectangular core transformers are more suitable for vehicles than circle core transformers.

However, cooling problem of cores located between two magnetic poles is a major challenge for double-sided transformers. In particular this problem is serious for large capacity transformers like fast chargers because loss density is higher than normal charge transformers. If radiator interrupts magnetic fluxes not only eddy current losses are created but also a coupling is prevented.

This paper proposes a novel cooling structure based on H-shaped core transformers. In the novel structure, radiator metal bars are inserted parallel to main magnetic fluxes. As a result, cooling performance is improved without compromising efficiency.

キーワード：電気自動車, 非接触給電, 急速充電, 電磁誘導, 温度上昇, 放熱,

Keywords : Electric Vehicle, Contactless power transfer system, Fast charge, Inductive, Temperature raise, Heat dissipation,

1. はじめに

プラグインハイブリッド自動車 (PHVs) や電気自動車 (EVs) の充電には, 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が, 利便性や安全性の向上のために, ケーブル接続が不要な非接触給電方式が世界中で研究されている⁽¹⁾。自動車用の非接触給電トランスでは特に, 大きなギャップ長, 大きな位置ずれ許容量 (左右方向), 高い給電効率が求められ, さらに車載トランスは小型軽量にする必要がある。我々は従来の円形コア片側巻構造よりも, 角型コア両側巻構造がこれらの点において優れていることを発表し, より小型軽量化を図った H 型コア構造の両側巻非接触給電トランスを開発してきた⁽²⁾。

小型のトランスでは, 連続運転の際にトランス自身の発熱による温度上昇が問題となる。小容量の両側巻構造のトランスでは, ケースの一部をアルミ化し, 巻線の熱をケースのアルミを通じてトランス背面の漏れ磁束遮蔽用アルミ板に逃がす構造を取ることで, 巻線の冷却が可能となる。著者らはこの放熱対策を施した H 型構造のトランスで, 自然空冷下において 3kW の連続運転が可能となることを発表している⁽³⁾。

しかし, 10kW 以上の大容量の H 型トランスでは発熱量が大きく, 連続運転するにはより強力な放熱対策が必要であった。特に巻線の内部に位置し発熱するフェライトコアの冷却方法が大きな課題であった。フェライトコアに接してヒートシンク等の金属からなる冷却装置を配置する場合, 磁束が冷却装置に鎖交し渦電流が流れてはいけない。冷却装置自身が発熱し, 望んだ冷却性能が得られないだけでなく, 給電効率が低下するからである。コアの量を増やし磁束密度を下げ, コアの発熱を抑える方法も, 体積増と重量増の点で好ましくない。

本論文では, 3 章で従来の 10kW 用 H 型トランスの自然空冷下での温度上昇試験結果を示し, 更なる放熱対策がないと連続運転できないことを示す。4 章で提案する新放熱構造を紹介する。フェライトコアの放熱方法として, 巻線内部ではコアを貫く主磁束と同方向に冷却用のアルミ棒を挿入し, 巻線外部ではアルミブロックを介して遮蔽用アルミ板に熱を逃がす構造である。磁束はアルミ棒やアルミブロックと鎖交しないため, 給電効率の低下はほとんどなくトランス定数の変化も小さい。最後に新放熱構造を採用した H 型トランスの給電実験で, 10kW の連続運転が可能であることを確認する。

2. 自動車用非接触給電システム

〈2・1〉 回路方式 一次直列二次並列コンデンサ方式⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾の大電力用非接触給電システムを図1に示す。商用電源入力フルブリッジインバータで $f_0=30\text{kHz}$ の高周波交流を発生し、給電トランスの一次側に給電する。

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。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。高周波なので、小型化のためにコアにはフェライト、巻線には近接効果による抵抗の増加を抑えるためにリッツ線をそれぞれ用いると、鉄損 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' 、 x_1' 、 x_2 に比べて十分小さくなる。従って r_0' と r_1' 、 r_2 を省略した回路で解析を進めることができる。

二次側並列コンデンサ C_p の値を並列共振するように決定する。次に、一次側直列コンデンサ C_s の値を電源から見た力率が1になるようにする。そのときの各コンデンサの値は(1)となる。

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = x_p = x_0' + x_2, \quad \frac{1}{\omega_0 C_s} = x_s' = \frac{x_0' x_2}{x_0' + x_2} + x_1' \dots (1)$$

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

$$V_{IN} = ab V_2, \quad I_{IN} = I_D / (ab), \quad b = \frac{x_0'}{x_0' + x_2} \dots (2)$$

が成り立ち、巻数比 ab の理想変圧器と等価となる。鉄損を無視し銅損だけを考慮した場合の、トランス部の最大効率 η_{\max} とそのときの抵抗負荷 $R_{L\max}$ は(3)式となる。

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1}} \quad R_{L\max} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r_1'}{r_2} + 1} \dots (3)$$

コイルの性能を表す Q を、一次側コイルは Q_1 二次側コイルは Q_2 として(4)式で定義する。⁽⁷⁾

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1} \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2} \dots (4)$$

非接触給電では周波数が高く、一般に Q_1 と Q_2 は数100程度でほぼ値は等しくなるので、 k が0.3程度、またはそれ以下であれば(5)式が成り立つ。

$$\frac{1}{k^2} \frac{Q_1}{Q_2} \gg 1 \dots (5)$$

(5)式を用いると、(3)式は(6)式に変形できる。

$$\eta \cong \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{L_1 L_2}}} \quad R_{L\max} \cong \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} \dots (6)$$

(6)式より最大効率は k と Q だけで表されるため、効率を

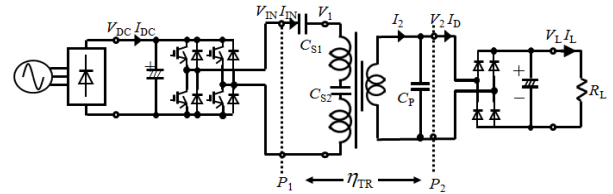


Fig. 1. Large capacity contactless power transfer system.

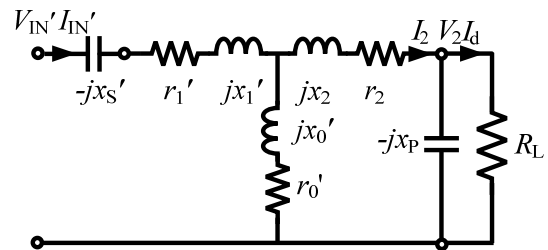


Fig. 2. Detailed equivalent circuit.

上げるには k と Q を大きくするだけでよい。

〈2・2〉 両側巻構造非接触給電トランス 非接触給電トランスの構造としては、円形コア片側巻構造⁽⁸⁾⁽⁹⁾と角形コア両側巻構造⁽²⁾⁽³⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に大別できる。両側巻構造は背面にアルミ板を設置すれば磁束遮蔽が可能で結合係数 k を片側巻構造と同程度に高めることができる。またコア幅は片側巻構造では(コイル幅+磁極幅)の2倍程度必要なのに対し、両側巻構造ではその半分で済むため、両側巻構造を用いると大幅に小型軽量化できコストも抑えることができる。また、片側巻構造では40%程度の位置ずれが生じると主磁束が相殺され結合係数がゼロになる⁽⁹⁾。両側巻構造では磁極の長手方向はこの問題が生じないため、この方向を車の左右方向に合わせることで、左右の位置ずれ許容量の大きなトランスが実現できる⁽²⁾。

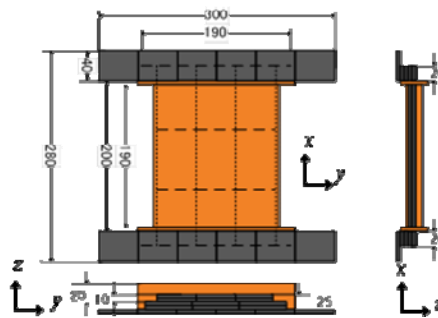
放熱に関しては、片側巻構造は有利である。コアの背面に直接放熱装置を設置可能で、寸法が大きい放熱面積や熱容量も大きいからである。一方、両側巻構造では巻線に覆われる部分のコアの放熱が大きな問題であった。

〈2・3〉 10kW 非接触給電トランス 急速充電を想定した大容量トランスを搭載した自動車は、急速充電だけでなく普通充電も可能であることが望ましい⁽¹²⁾。両側巻構造のトランスでは、一次側コイルと二次側コイルの巻数を同じにし、磁極間距離をほぼ等しくすれば、インダクタンスと結合係数が等しくなるため、容量の異なるトランス間での給電が可能となる。しかし大容量トランスは小容量トランスとほぼ同じ寸法になるため、放熱は厳しくなる。

また、一次側コイルの巻数を変更せずに電力を増加させると、一次側入力電流 I_{IN} の増大に伴って一次側の直列コンデンサ後の電圧 V_1 が大きくなり、絶縁破壊やコンデンサの耐圧の問題が生じる。この対策としては、図1の回路の一次側に示したように巻線とコンデンサを分割し、交互に直列接続して電圧を下げる方法が有効である。



(a) A photograph of transformer.



(b) Measurements.

Fig. 3 A double-sided contactless power transformer for 10kW.

Table 1 Specifications.

給電電力	10kW	
リッツ線	0.1mmφ×800	
巻数	一次側	4p×20T
	二次側	12p×6T
車両側トランス重量	5.74kg	
トランス寸法	280×300×45mm	
漏れ磁束遮蔽 アルミ板	600×400×2mm (0.6kg)	
標準位置効率 (ギャップ 70mm)	95.4%	

3. 非接触給電トランスと温度上昇

(3-1) 損失と温度上昇 図3に両側巻の10kW用非接触給電トランスを示し、表1にその仕様と性能を示す。車両の進行方向を x 方向、左右方向を y 方向、高さ方向を z 方向と定義する。理論効率 η_{max} は図2に示すトランス定数を LCR メーターで測定し、式(3)より求めたものであり、銅損のみを考慮した場合の効率である。一方、実験結果の効率 η には鉄損が含まれる。機械的ギャップ 70mm で位置ずれがない状態でのトランスの実験効率は 95.4% である。

自動車用の非接触給電装置では、自動車の駐車位置によって位置ずれが生じ、車載量によって空隙距離が変化しますが、図3に示したトランスでは x 方向に 60mm、 y 方向に 150mm 位置ずれが生じた場合やギャップ長が拡大して 100mm になった場合でも給電が可能であり効率低下は 2% 程度に収まる。進行方向の位置ずれ許容量は小さいがタイヤ止めを用いれば実用上問題はない。位置合わせが難しい左右方向の位置ずれ許容量が大きいことが両側巻構造の特徴である。

10kW 給電では、3kW トランスと効率と同じ場合でも、損失による発熱量が 3kW トランスに比べて大幅に増大する。しかし、トランスの体積はほぼ等しいため、損失密度が増加し温度上昇が大きくなる。両側巻構造の場合、トランスケースの背面をアルミにし、コイルと絶縁させた上で接触させることで、コイルの銅損による熱は背面の遮蔽用アルミ板に逃すことができる。

コアに用いているフェライトの熱伝導率は $5W/(m \cdot K)$ と、アルミニウムの $237W/(m \cdot K)$ (300K) や銅の $401 W/(m \cdot K)$ (300K) に比べて大幅に小さいため、コアの鉄損による熱を外部に逃すことが重要な課題である。両側巻構造ではコアはコイルに覆われており、また、コアの放熱を行う際に、主磁束を金属が遮るように放熱装置を取り付けてしまうと、放熱装置自身に渦電流が生じてしまい効率が低下するだけでなく、一次二次間の結合を妨げるといった問題が生じる。

二次側トランスは車載するため、より小型軽量であることが望まれる。そのため温度上昇は一次側トランスよりも二次側トランスの方が問題となる。従って本論文では以降、二次側トランスを中心に議論を進める。

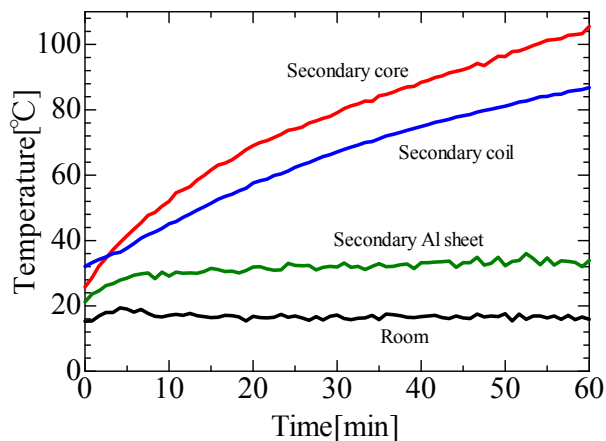


Fig. 4 Experimental results of 10kW temperature rise.

(3-2) 10kW 連続運転試験 図3の10kW用H型両側巻トランスを用いて、図1の回路で給電実験を行った。一次側のインバータ周波数は $f_0 = 30kHz$ とし、二次側には全波整流器とバッテリーを模擬した抵抗負荷 $R_L = 15\Omega$ を接続した。機械的ギャップ 70mm で 10kW の連続運転を行った場合の二次側のコア、コイル、遮蔽用アルミ板の温度上昇の結果を図4に示す。温度の測定は熱電対を取り付け、各部の中心の表面温度を測定した。室温 20°C で一定とし、給電開始後 60 分で二次側コアの温度が 100°C まで二次側コイルの温度が 85°C までそれぞれ増加するが、温度はまだ上昇傾向を示している。実際に自動車に搭載させた場合や巻線に用いているリッツ線の絶縁皮膜の耐熱などを考慮すると温度上昇を抑える対策が必要である。

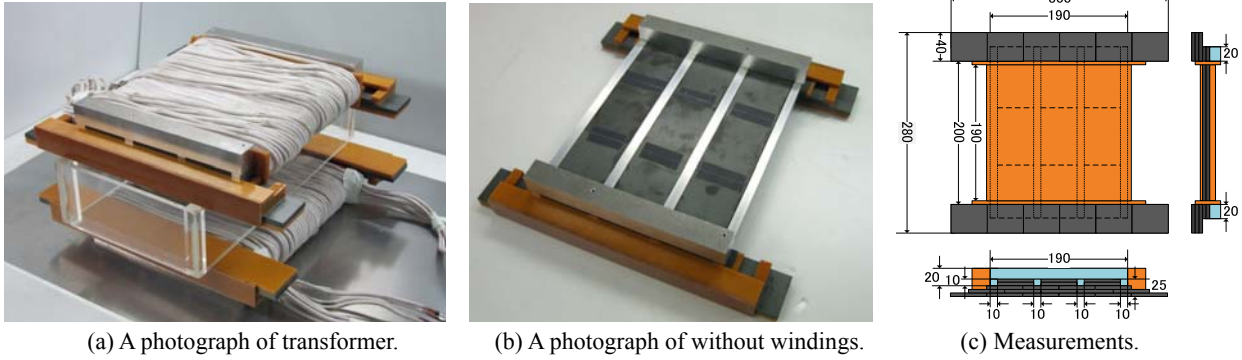


Fig. 5 A new structure which takes account of heat dissipation.

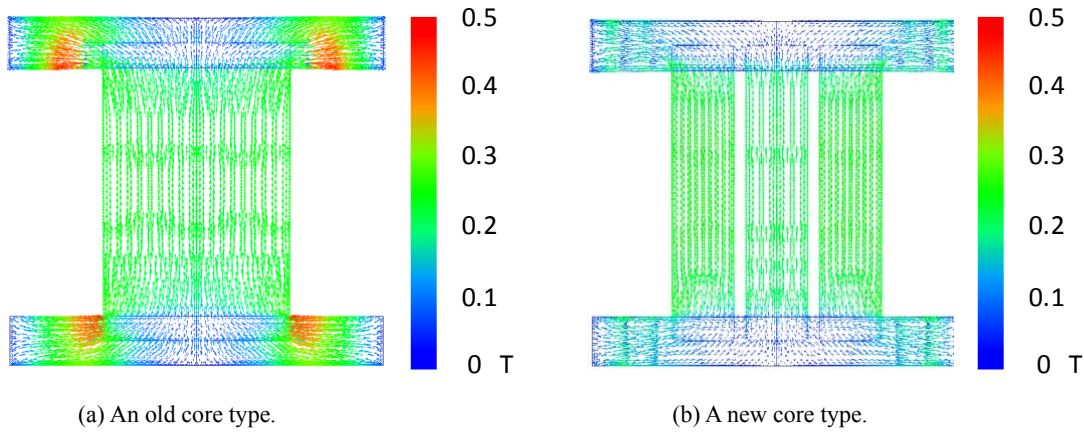


Fig. 6 Paths of main magnetic fluxes internal of cores.

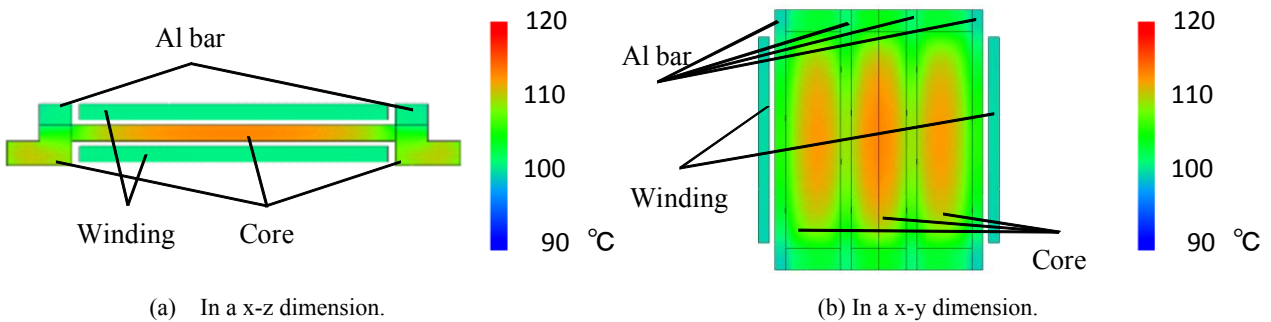


Fig. 7 Temperatures distribution of center.

4. フェライトコアの放熱方法

〈4・1〉アルミ放熱棒挿入による放熱方法 コアの放熱対策を施した新コア構造の非接触給電トランスを図 5 に示す。コアの巻線で覆われている部分を、巻線と垂直方向に分割する。分割されたコアに沿うように放熱用のアルミの角棒を四本挿入する。磁極部の裏側にもアルミを密着させ、角棒と漏れ磁束遮蔽用アルミ板に接合させる。

放熱対策としてのアルミ棒を、挿入させる前後における主磁束の経路のシミュレーションを、磁界解析ソフト JMAG を用いて行った。結果を図 6 に示す。アルミ棒の有無に関わらず、主磁束はコア内を巻線と垂直の方向に流れるため、アルミ棒は主磁束を殆ど遮っておらずアルミ棒の渦電流による損失は殆ど生じない。また磁極部分を階段状にして磁極の磁束密度を低減させている。

図 7 に x-z 平面と x-y 平面における中央の断面図の温度分布をそれぞれ示す。アルミニウムはフェライトよりも熱伝導率が遥かに大きいので、コアの鉄損で発生した熱がアルミ棒を通じて流れる様子が良くわかる。今回はコアを三列に分割し幅 10mm のアルミの角棒を四本挿入したが、アルミの体積は電力や効率によって変更でき、ヒートパイプ等を挿入することによって更に冷却性能を向上させることも可能である。これらの放熱材は主磁束だけでなく、漏れ磁束も遮らないように注意する必要がある。

図 5(a)は、アルミ放熱棒を挿入した後の外形図である。機械的ギャップ 70mm で位置ずれがない状態のトランス定数を表 2 に示す。トランスの給電効率を表 3 に示す。アルミ棒の挿入により、若干抵抗値が増加するが、インダクタンスには影響がなく給電効率も変わらないため、アルミ放熱棒の挿入によって給電に支障は生じないことがいえる。

Table 2 Specifications of a novel structure.

	10kW 用	10kW 用 <i>al</i> 有
r_1 [mΩ]	106.9	121.1
r_2 [mΩ]	9.1	8.9
l_0 [μH]	58.4	60.5
l_1 [μH]	109.9	110.3
l_2 [μH]	9.8	9.9
C_s [μF]	0.190	0.188
C_p [μF]	1.86	1.83
k	0.347	0.354
b	0.348	0.354
R_{Lmax}	8.9	9.5
η_{max}	0.980	0.980
$Q1$	194	177
$Q2$	205	200

〈4・2〉磁界解析による放熱検証 アルミ棒を挿入する前後のトランスについて、磁界解析による 10kW 給電のシミュレーションを行った。電力や損失の内訳の結果を表 4 に示す。アルミ棒を挿入する前のトランス（10kW 用）では、銅損（コイル+遮蔽用アルミ板の損失）のみを考慮した効率は 98.3%となり、実際の理論効率 98.0%とほぼ一致する。鉄損も考慮した効率は 96.7%と、実験結果の効率 95.4%よりも高いが、アルミ棒を挿入する前後においての同一の傾向を示しており、磁界解析シミュレーションによる検証は妥当である。

アルミ棒を挿入した後（10kW 用 *al* 有）のアルミ棒による損失は、一次側と二次側合わせて 14.6W と損失全体の 0.1% に収まっているため、シミュレーション結果からもアルミ棒による影響は殆ど生じないことがいえる。

コア、巻線、遮蔽用アルミ板、アルミ放熱棒は、表 4 の損失の値で一樣に発熱すると仮定して熱伝導のシミュレーションを行った。アルミ棒挿入前後における給電開始から三時間までの、コアの平均温度の推移を図 8 に示す。アルミ挿入前のコアの温度に対して挿入後は大幅に温度が低下した。熱平衡となる三時間後の温度も 30℃以上低下しており、アルミ棒の挿入によって冷却性能が向上していることがわかる。

〈4・3〉連続運転試験による放熱検証 図 5 の新コア構造のトランスを用いて、3.2 項と同条件で給電実験を行った。二次側コアと二次側放熱用アルミ板の温度上昇の結果を図 9 に示す。実線で新構造トランスの結果を示し、破線で旧トランスの結果を示す。二次側コアの温度は給電開始から 60 分で 80℃、三時間で 95℃まで上昇し熱平衡となる。この結果はシミュレーションとほぼ一致しており、新コア構造がコアの放熱方法として有効であることが確認できる。また、目的の温度まで下げるために必要な放熱装置は、トランスの各部が一樣に発熱すると仮定した場合の熱伝導シミュレーションでも容易に検討することができる。

Table 3 Experimental results of a novel structure.

	10kW 用	10kW 用 <i>al</i> 有
V_{IN} [V]	397.2	454
I_{IN} [A]	30.4	26.3
V_2 [V]	308	305
I_d [A]	45.2	55.5
P_{IN} [W]	10936	10878
P_{OUT} [W]	10436	10361
η_{TR} [%]	95.4	95.2

Table 4 Simulation results of power and loss.

			10kW 用	10kW 用 <i>al</i> 有
銅損[W]	一次側	コイル	33.7	32.8
		遮蔽板	51.0	50.4
		放熱棒	-	8.0
	二次側	コイル	36.8	36.6
		遮蔽板	51.7	52.8
		放熱棒	-	6.6
鉄損[W]	一次側	コア	74.1	55.6
	二次側	コア	93.6	77.0
受電電力[W]			10084	10124
効率[%]			96.7	96.9

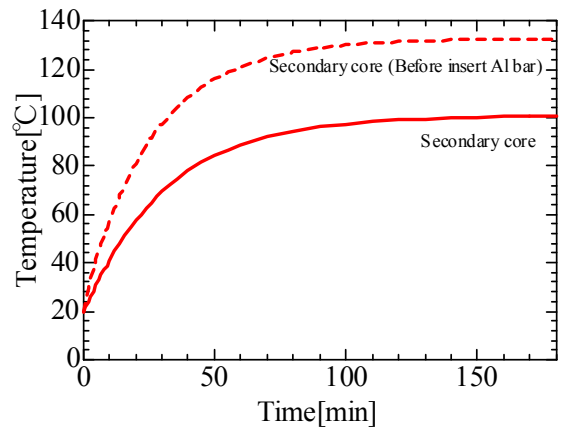


Fig. 8 Simulation results of temperature rise of ferrite cores.

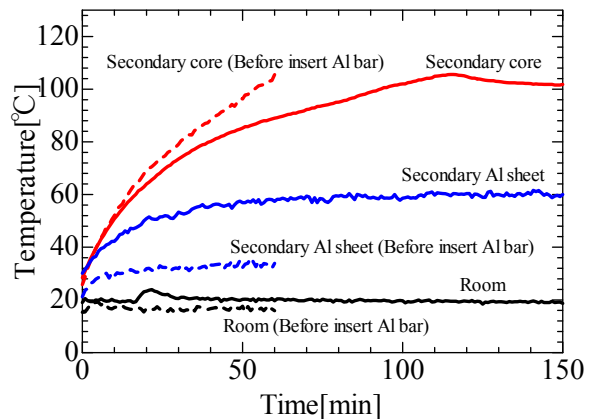


Fig. 9 Experimental results of temperature rise.

5. まとめ

本論文では電気自動車用 10kW 両側巻非接触給電トランスの連続運転で問題となる放熱問題を解決するため、コアの放熱方法として、コアを貫く主磁束と同方向に分割したコアに接して放熱用のアルミの角棒を挿入する新放熱構造を提案した。この構造により、従来のトランスよりも 40°C 程度コアの温度を低下させることに成功し、10kW での連続運転が可能になることを示した。アルミの角棒の挿入による効率等の特性劣化も見られなかった。提案の放熱方法を用いれば、コアの放熱が難しかった両側巻構造においてもコアの冷却が可能になり、小型軽量を維持したまま大電力を送ることが可能になる。

また、トランス各部が一様に発熱すると仮定をおいたシミュレーションの結果と実験結果はほぼ一致するため、必要な放熱装置の検討は磁界解析ソフトの熱伝導シミュレーションで実施可能であることも示した。

本論文では放熱装置としてアルミの角材を用いたが、ヒートパイプなどより冷却性能の高い放熱装置を採用することで、さらに大容量の非接触給電装置が実用化されることを期待したい。

文 献

- (1) 「電池システム技術」第4章,電気学会・移動体用エネルギーシステム技術調査専門委員会, pp.236-267
- (2) 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装置トランスの小型軽量化」, 電学半導体電力変換研究会資料,SPC-11-48,pp.139-144 (2011)
- (3) 高梨浩也・山中智裕・千明将人・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・鈴木 明:「倍速充電可能な電気自動車用小型非接触給電トランス」, JIASC2011, 2-12, pp II 413- II 416 (2011)
- (4) 阿部 茂・金子裕良:「非接触給電技術」,電学誌,Vol.128,No.12, pp.796-799 (2008)
- (5) 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)
- (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) 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)
- (8) C.-S.Wang, O.H.Stielau, and G.A.Covic: “Design consideration for a contactless electric vehicle battery charger”, IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol.52, No.5, pp.1308-1314 (2005)
- (9) 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)
- (10) Y.Nagatsuka, N.Ehara, Y.Kaneko, S.Abe and T.Yasuda: “Compact Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles”, Proc. of 2010 International Power Electronics Conference (IPEC2010-Sapporo), IEE Japan, pp.807-813 (2010)
- (11) M.Budhia, G.A.Covic, and J.T.Boys: “A New Magnetic Coupler for Inductive Power Transfer Electric Vehicle Charging Systems”, IEEE IECON 2010, pp. 2481-2486 (2010)
- (12) 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」, JIASC2011, 2-11, pp II 407- II 412 (2011)