

電気自動車用大容量非接触給電トランスの 熱等価回路を用いた放熱能力向上法

学生員 今野 純也* 学生員 藤田 到

正員 金子 裕良 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

A Method of Improving Heat Dissipation of Large Capacity Contactless Power Transformers for Electric Vehicle Using the Heat Equivalent Circuit

Junya Konno*, Student Member, Itaru Fujita, Student Member

Yasusoshi Kaneko, member, Shigeru Abe, Member (Saitama University)

Cooling the core is a problem in the large capacity contactless power transformers. It is necessary to effective heat dissipation in order to send more power. Thermal analysis using thermal equivalent circuit is effective to resolve them.

Cooling the aluminum sheet made possible improving the heat dissipation of the core.

キーワード：熱解析, 電気自動車, 非接触給電, トランス, 大容量, 急速充電

Keywords : Thermal Analysis, Electric Vehicle, Contactless Power Transfer, Transformer, High Capacity, Fast Charge

1. はじめに

プラグインハイブリッド自動車(PHV)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が期待されることから、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。従来の研究では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が発表されており、より小型軽量化を図った H 型コア両側巻構造の非接触給電トランスが開発されてきた⁽²⁾。

また、電気自動車用のバッテリーは価格が高く、その容量が小さいことから一充電当たりの航続距離が短い。そのため長距離移動の際には補充電を繰り返しながら走行を継続することが想定される。そこでは大容量の急速充電によって充電時間を短くすることが望まれる。

埼玉大学では H 型コア両側巻構造の急速充電を想定した大容量トランスを製作したが⁽³⁾、温度上昇が大きく連続運転は困難であった。大容量の H 型コア両側巻構造トランスを連続運転するには放熱対策が必要である。巻線の熱は熱伝導性のよい樹脂などで接合することで漏れ磁束遮蔽用アルミ板に逃すことが可能である⁽⁴⁾が、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。その放熱方法として、巻線内部ではコアを貫く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を考案し、10kW の連続運転が可能な非接触給電トランスを発表した⁽⁵⁾。

本稿ではさらなる大容量化を図るため、放熱能力の向上法を検討した。熱等価回路網法を用いて、どの部分が放熱のネックになっているかを検討した。その結果、遮蔽用アルミ板の放熱能力の向上が効果的であることが分かった。この部分の放熱能力を高めた場合、現在の放熱構造のままでもどの程度給電電力を上げられるかを明らかにする。

以下、第 3 章で熱等価回路網法を用いた非接触給電トランスのモデル化の方法、第 4 章でその妥当性を温度上昇試験および磁界解析シミュレーションソフトウェアの結果との比較によって確認する。また 5 章では熱等価回路を用いた解析からアルミ板の冷却が放熱能力の向上に効果的であることを示す。

2. 大容量 H 型コア両側巻きトランスの熱問題

非接触給電トランスはフェライトコアの鉄損、巻線での銅損、漏れ磁束遮蔽用アルミ板の渦電流による銅損の 3 つの損失から温度上昇は避けられない。また巻線の絶縁皮膜の耐熱性やフェライトコアの磁気飽和による効率低下を考慮すると、それらの温度は 110℃程度が限界温度である。図 1 は放熱対策前後の大容量トランス(図 2, 3)を用いて温度上昇

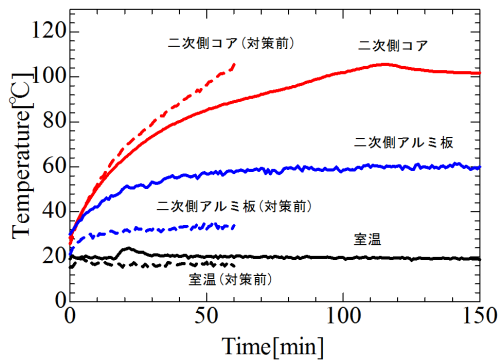
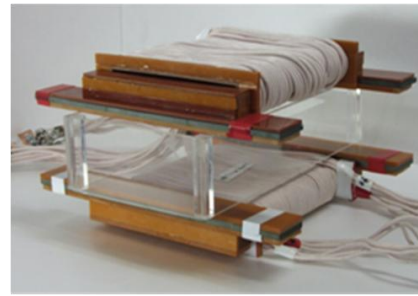
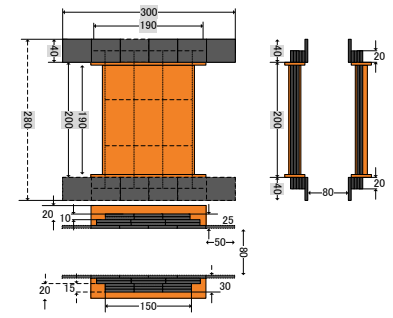


図 1 温度上昇試験結果

Fig. 1. Experimental results of temperature rise



(a) 外形図(二次側アルミ板なし)



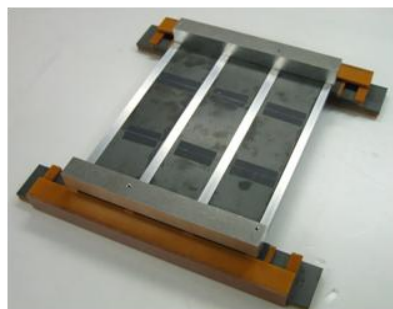
(b) 寸法

図 2 放熱対策前の大容量トランス

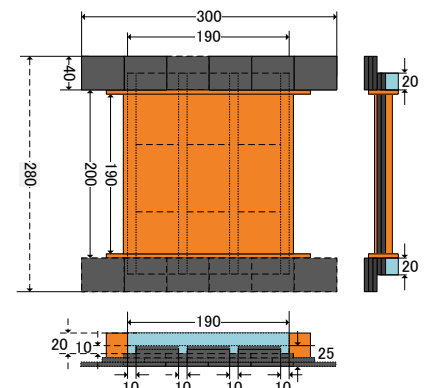
Fig. 2. A double-sided contactless power transformer for 10kW



(a) 外形図(二次側アルミ板なし)



(b) 外形図(二次側, 巻線・アルミ板なし)



(c) 寸法(2次側)

図 3 放熱対策後の大容量トランス

Fig. 3. A new structure which takes account of heat dissipation

試験を行った結果である。温度上昇試験の結果から放熱対策前の大容量トランスでは 10kW の連続運転は困難である。またコアにアルミを挿入することで放熱対策を施した大容量トランスを用いても、10kW 以上での連続運転は困難であると考えられる。また温度上昇試験の条件は標準ギャップにおいて位置ずれがなく周囲温度も 20°C 程度と極めて理想的なものであり、現実的な運用の際には 10kW での連続運転も困難となるおそれがある。より大電力で連続運転可能なトランスを作成するためには放熱用アルミのみならず放熱能力を向上させる手段が必要となる。その際、より効果的な対策を講じるためには十分な熱解析を行うことが重要である。

熱解析シミュレーションソフトウェアにおいては CAD 等を用いてモデルを作成しそれに基づいて有限要素法などを用いた解析が行われる。モデルや条件設定が正しく行われていれば高精度の結果が期待できる反面、一回の解析に多くの時間を要する場合が多い。しかし効果的な対策を模索する場合においては放熱の際にどの部分の伝熱が障害となっているかを見極められることが肝要である。それゆえ対策の方針検討には、高精度ではないが解析モデルの変更が容易かつ解析時間が短い熱等価回路網法を用い、高精度な温度が必要な場合に有限要素法を用いことにした。

3. 熱等価回路とトランスのモデル化

〈3・1〉熱等価回路網法 熱の移動は温度差のある所で生じ、その移動形態には熱伝導・対流熱伝達・熱放射の 3 つが存在し、それぞれ熱の伝わり易さが異なる。伝熱量は熱の伝わり易さを係数として温度勾配に比例する。すなわち伝熱量は温度差と熱の伝わり易さとの積によって求められ、伝熱量を電流、温度差を電圧、熱の伝わり易さをコンダクタンスとみなすとその関係はオームの法則に一致する。これを用いて熱系を電気系に置き換えて熱解析を行う手法を熱等価回路網法という。熱等価回路網法では解析対象をいくつかの多面体のエリアに分割し、熱コンダクタンスの逆数から求められる熱抵抗によってそれぞれのエリア間の伝熱を表現した伝熱モデルを作成する。熱抵抗の具体的な値は熱伝導についてはフーリエの法則、対流熱伝達についてはニュートンの冷却の法則に従い決定される。発熱は電流源、固定温度は電圧源によって表現される。

熱等価回路網法を用いて飽和温度の解析を行う場合、用いられる素子が直流電源と抵抗のみとなるため非常に短時間での解析が可能である。また解析対象の寸法や損失が変化した際も抵抗値や電源の大きさを変えるだけでよく、解析が容易である。

〈3・2〉 損失の推定 図 2, 3 は放熱対策前後の大容量トランスの外形図であり, 図 4 はその損失を磁界解析シミュレーションによって求めたものである。トランス効率は放熱対策前が 96.7%, 放熱対策後が 96.9% でほぼ等しい。放熱用アルミでの損失は一次側と二次側を合わせても全損失中の 5% と少なく, 放熱用アルミの損失をフェライトコアでの損失とまとめて考えると大容量トランスの損失内訳は放熱対策前後においておよそ一致する。したがって温度上昇以外を考慮したトランスを考え, それを用いた磁界解析シミュレーションによって損失を算出し熱解析を行えばよい。また文献(3)(5)からフェライトコアの損失によって各部が一樣に発熱すると仮定した場合でも飽和温度の見積りは十分に可能である。それゆえ熱等価回路上で発熱を表す電流源の電流値は, 損失を各エリアの体積比で割り振ることによって決定した。

〈3・3〉 解析モデルの単純化 トランスの構造に対称性がある場合は飽和温度の分布も同様の対称性を持つ。熱の移動は温度差のあるところで生じるという原理に従えば対称性の境界をまたぐ熱の移動はなく, 仮想的に断熱面とみなすことができる。したがって対称性のある 1 片についてのみ解析を行えばよい。本稿では以後, 放熱対策トランス(図 3)について図 5 に示すような 1/4 モデルを用いて解析を行う。なお, 発熱や放熱装置の取り付けスペースといった問題は車載される二次側トランスでより深刻となるため, 二次側トランスについてのみ解析を行う。

H 型コア両側巻きトランスの温度上昇試験結果ではフェライトコアの飽和温度は巻線よりも高いがその温度差は小さい。さらにフェライトコアと巻線との間にはボビンが存在しその材料であるベークライト(熱伝導率 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)の熱伝導率は低い。そのため巻線とフェライトコアとの間の熱伝導は無視する。これにより巻線及びその損失を解析モデルに含む必要がなくなり, より簡素なモデルとすることができる。

4. シミュレーションによる熱解析

〈4・1〉 磁界解析ソフトウェアを用いた熱解析 図 3 のトランスを給電電力 10kW で連続運転した際の飽和温度を磁界解析シミュレーションソフトウェア「JMAG」を用いたシミュレーションによって求めた。シミュレーションの結果, 飽和温度は二次側コア中心で 110°C となり図 1 の温度上昇試験結果と近い値が求められた。

〈4・2〉 熱等価回路を用いた熱解析 図 6 は放熱対策トランスを本稿第 2 章の手法によってモデル化した熱等価回路図である。トランス出力 10kW, トランス効率 95% 対流熱伝達率 $15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 周囲温度 20°C と仮定した。各部の熱抵抗は寸法, 熱伝導率, 対流熱伝達率を用いて算出した。また本稿第 3 章 2 節に従い, 図 4 の内側のグラフに基づき, 全トランス損失中の 27%, 15% がそれぞれ二次側のフェライトコア, アルミ板での損失であると仮定した。

図 6 の熱等価回路網を用いてシミュレーションを行った

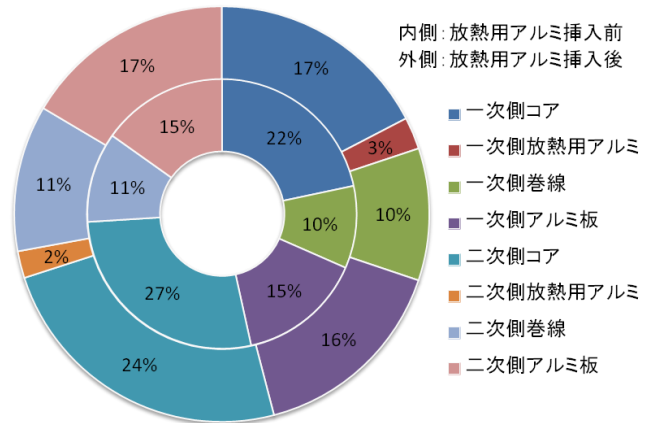


図 4 トランス損失のシミュレーション

Fig. 4. Simulation results of loss

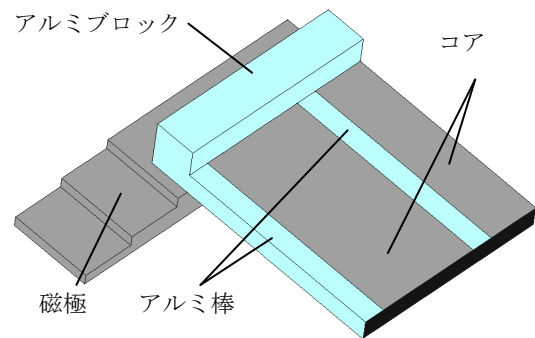


図 5 1/4 モデル図(巻線, アルミ板なし)

Fig. 5. Quarter model of the transformer

ところ飽和温度は二次側コア中心で 111°C となり, 表 1 の結果と概ね一致しモデル化は妥当と考えられる。また前節の結果とも一致しており, 解析モデル作成の容易性や解析時間の短さから本手法での解析が有用であるといえよう。

5. アルミ板の冷却による放熱能力の向上

さらなる大電力化の際には放熱対策をより強力なものとする必要がある。図 3 の放熱対策トランスにおいては巻線内部に挿入したアルミ棒によってコアの熱をアルミ板へと導いている。挿入するアルミ棒の寸法を大きくする, あるいはその本数を増やすといった方法は, 渦電流や巻線長の増加に伴う損失の増加が懸念されるために望ましくない。前章の解析において, アルミ板と放熱用アルミの接合部の温度は 73.4°C であった。熱伝導において伝熱量は温度差に比例するため, コア中心からより多くの熱を外部へと導くためには放熱用アルミの外部端すなわちアルミ板との接合部の温度を低くする必要がある。アルミ板の冷却は比較的容易であるためアルミ板に十分な放熱能力があると仮定し, その温度を低いものに固定した場合のコア中心部飽和温度の変化について熱等価回路を用いたシミュレーションを行う。

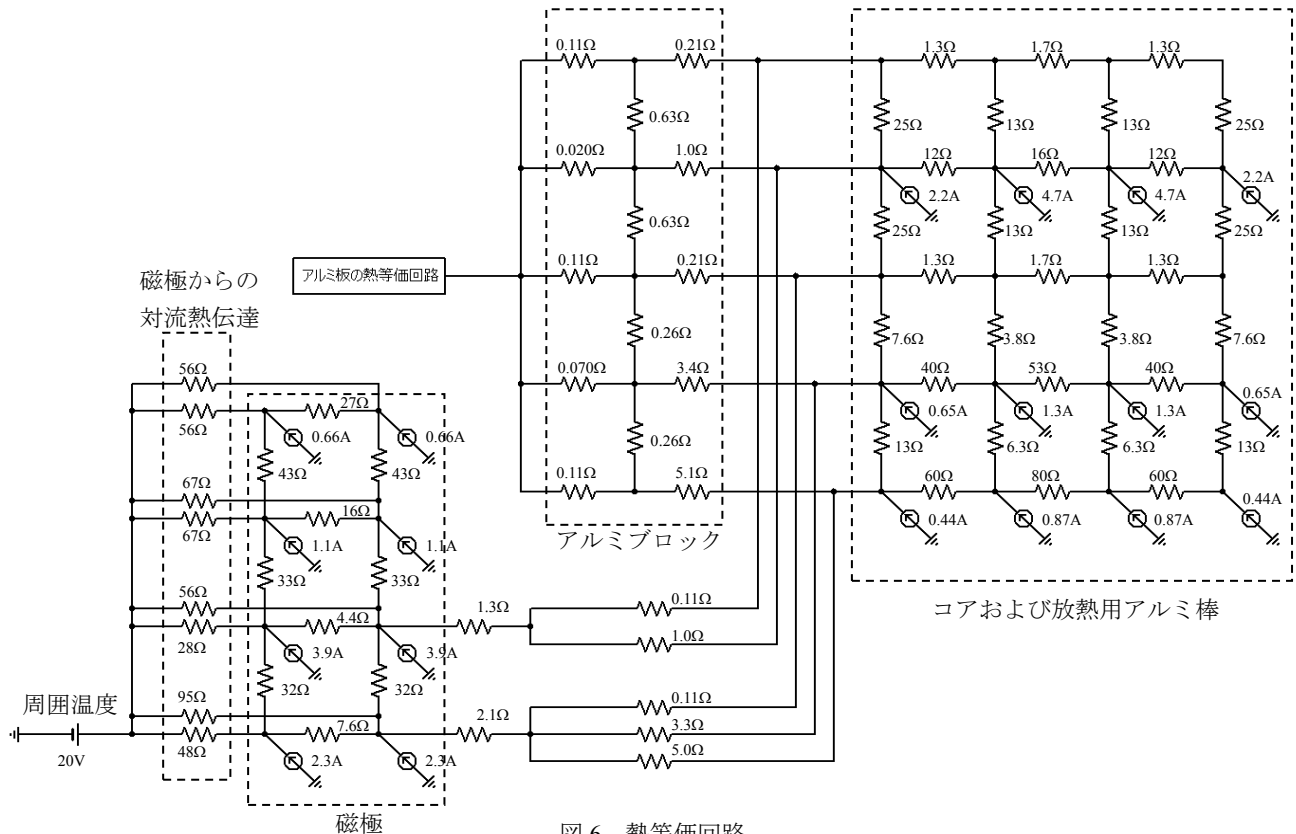


図 6 熱等価回路

Fig. 6. Heat equivalent circuit

アルミ板の温度を 50℃に固定した場合についてシミュレーションを行った。熱等価回路上では図 6 のアルミ板の熱等価回路と示した部分に電圧源を接続することで固定温度を用いた解析が可能である。シミュレーションの結果、コア中心の飽和温度は 87.9℃となり温度が大きく低下した。またアルミ板の温度を 50℃に保つことが可能で、かつコアの損失が出力電力に比例すると仮定した場合、給電電力を 15kW に拡大した場合でも二次側コア中心の飽和温度は 107℃であり、大電力化が可能であると考えられる。

さらに同手法ではアルミ板を固定温度とした場合のアルミ板への伝熱量も同時に求められるため、それを用いてアルミ板の放熱設計を独立に行うことが可能である。

6. まとめ

熱等価回路を用いた熱解析を行うためのモデル化の方法を示し、温度上昇試験や解析シミュレーションソフトウェアとの比較によってその妥当性が確認できた。熱等価回路による解析は解析時間の短さや解析対象・条件の変化への対応しやすさといった点で優位であるだけでなく、熱的なボトルネックの見極めの際に有効な手法となる。

熱等価回路を用いた熱解析によって遮蔽用アルミ板の冷却が効果的であることが確認できた。アルミ板の温度を無対策時の 73.4℃から 50℃まで下げた時、コア中心の飽和温度は 111℃から 87.9℃まで低下することがシミュレーションによって求められた。またアルミ板の温度を 50℃に維持で

きる時、出力電力を 15kW とした場合でも同トランスで給電可能であるというシミュレーション結果が得られた。アルミ板への放熱対策は非接触給電トランスの大容量化を図る上で有効な対策である。

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ストレージ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・保田富男・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) 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) 高梨浩也・山中智裕・千明将人・金子裕良・阿部 茂・保田富男・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)
- (5) 山中智裕・藤田 到・金子裕良・阿部 茂・保田富夫：「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」、平成 25 年電気学会自動車研究会資料、VT-13-006、pp.31-36 (2013-1)