

補助事業番号 2020M-153

補助事業名 2020年度 寄生要領を考慮した冷却体付き低背MHz大電流出カトランスの高電力密度化設計法の確立と実機検証 補助事業

補助事業者名 北海道大学 大学院情報科学研究院 電気エネルギー変換研究室

1 研究の概要

本研究テーマでは車載用充電器の絶縁形DC-DCコンバータに使用される低背トランスに関して、電圧制御や損失に与える寄生容量の影響を考慮しつつ放熱性を高めることで、車載用充電器の高電力密度化を実現することが目的である。そこで、低損失でかつ低寄生容量を実現するトランス構造を検討し、その上でヒートシンクをトランスに実装しトランスの冷却性能を高めることとした。

まず、電磁界解析により低背トランスの巻線構造には巻線電流がバランスする一次巻線と二次巻線を交互に積層するインターリーブ方式を採用することとした。実験の結果、当初の目標の1kWでの実験は実現できなかったものの、トランスの漏れインダクタンスを用いてGaNインバータのソフトスイッチングを実現しつつ、ヒートシンクをコアに実装することでトランスを冷却可能であることを確認できた。研究終了期間までにコンバータ全体の具体的な高電力密度化のための設計フローチャートを議論するには至らなかつたが、今後の課題として、熱等価回路の精度向上、巻線損失の低減、巻線から熱抵抗の高いコアを介さずに放熱することが必要であることを種々の実験によって確認することができた。

2 研究の目的と背景

ハイブリッド電気自動車および電気自動車における車載用充電器においてメイン(高電圧)バッテリーとサブ(補器用)バッテリー間の電力変換を行うMHz大電流出力絶縁形DC-DCコンバータの高電力密度化が要求されている。そのためには、体積および損失において大きな割合を占めるトランス(磁性材料と巻線で構成される、電圧を変換する機能を有する部品)の高電力密度化を実現する必要がある。これまでに、動作周波数がkHzオーダーでのトランスについては取り扱う電力が大きく損失も大きかったためトランスの冷却が検討されてきたが、MHzにおけるトランスにおいてはkHzで動作するトランスと比べて取り扱う電力が小さく損失も相対的に小さいため、これまであまりトランスの冷却については検討されてこなかった。しかし、近年のMHzで動作する絶縁形電力変換器において動作周波数の高周波化によるトランスの損失密度の増大による発熱が問題となっている。

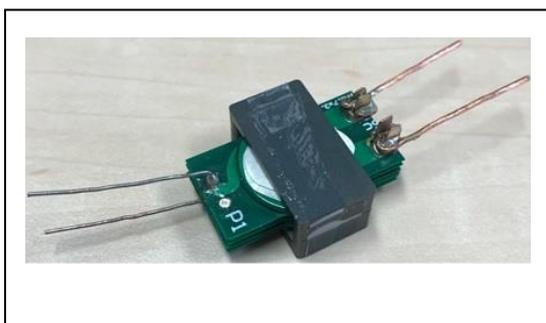
本研究テーマの目標は、放熱性能を高めるための冷却体を実装した低背MHz大電流出カトランスを対象に高電力密度化を実現する上で重要となる1)放熱構造、2)高密度に部品を実装する上で課題となる寄生容量(部品そのものが一種の電極となり、部品間にできる想定しないコンデンサ成分)を考慮したトランス設計法を明らかにすることである。そして、同じ仕様(電圧、電流、動作周波数)で冷却体を実装しない低背MHz大電流出カトランスを用いた電力変換器と比較して高電力密度であることを確認することである。

3 研究内容

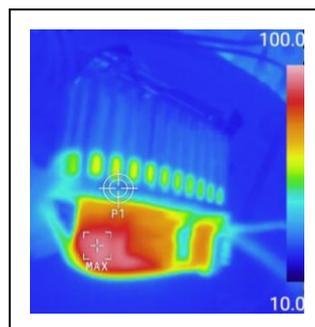
(1) 冷却体付き低背MHz級大電流出カトランスの第一試作機の製作・評価

(<https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/eec/member/orikawa-study.html>)

低背トランスの巻線はプリント基板を用いることでパラメータの高い再現性や任意の形状を実現することができる。そのため本研究においても巻線構造にプリント基板を採用した。一次巻線には典型的な螺旋構造を採用し、二次巻線は巻数比が小さく大電流が流れるため1ターン構造とした。電磁界解析の結果、並列に接続された各二次側巻線電流を均等に流すことが可能で発熱の集中が発生しにくいインターリーブ構造(一次巻線と二次巻線を交互に積層する構造)を採用することにした。実験の結果、当初の目標の1kWでの実験は実現できなかったものの、トランスの漏れインダクタンスを用いてGaNインバータのソフトスイッチングを実現しつつ、ヒートシンクをコアに実装することでトランスの温度を冷却可能であることを確認できた。研究終了期間までにコンバータ全体の具体的な高電力密度化のための設計フローチャートを議論するには至らなかったが、今後の課題として、熱等価回路の精度向上、巻線損失の低減、巻線から熱抵抗の高いコアを介さずに放熱することが必要であることを種々の実験によって確認することができた。



低背 MHz トランスの第 1 試作機



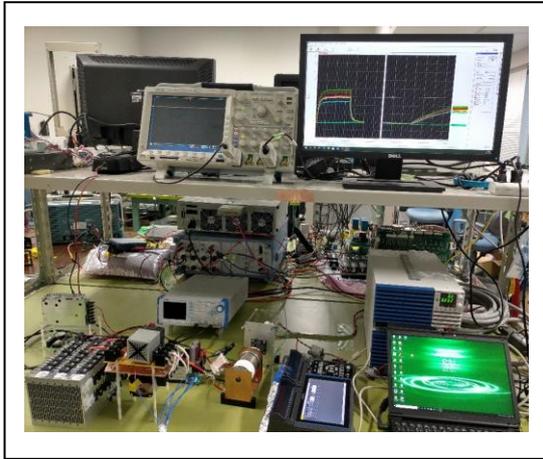
ヒートシンクを実装した状態における温度試験

(2) 冷却体付き低背MHz級大電流出カトランスの第二試作機の製作・評価

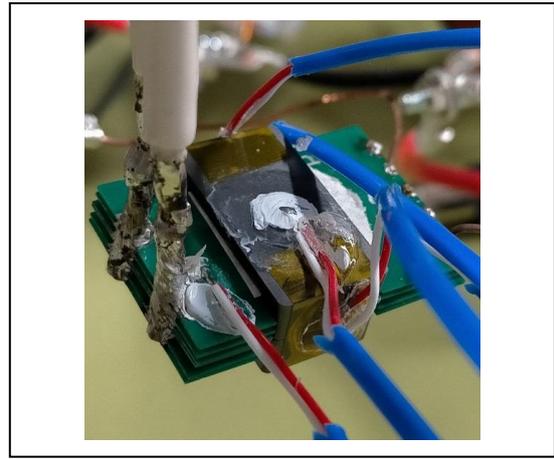
(<https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/eec/member/orikawa-study.html>)

第一試作による実験の結果、巻線がコアの窓のほとんどを占有していることとコアの熱抵抗が大きいことから、巻線からの発熱が逃げにくくヒートシンクによる冷却の効果が期待できないことが分かった。したがって、電流が大きい二次巻線抵抗の低減を検討した。すでに二次巻線は1ターンのプリント基板が並列接続されており、その1ターンの巻線をさらに巻線の横幅方向に分割することで二次巻線抵抗を低減することができる。本研究期間終了時までに実験による発熱の抑制の検証には至らなかったが、研究期間終了後も引き続き実験準備に取り掛かっている。

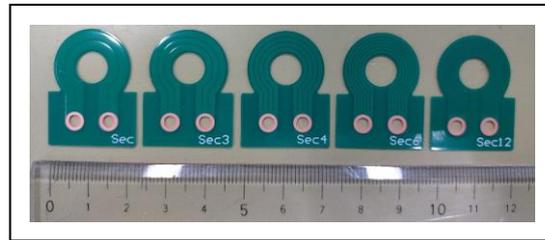
また、これまで赤外線サーモグラフィによる温度測定を行ってきたが、熱電対による温度測定環境を整備した。この結果、コアの下面も含むトランス各部の温度を同時に把握できるようになり、対称構造であるにも関わらずコアの上面と下面で温度に差異があることやヒートシンクの固定の仕方によってはコアの左右の脚の温度に差異が生じるなど、トランスの放熱構造に関する新たな知見が得られた。



熱電対を用いた温度測定実験の環境



熱電対を貼りつけた低背トランス



巻線を分割した二次巻線

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

温暖化ガス排出を実質ゼロにするカーボンゼロ(カーボンニュートラル)の政策により、電気自動車の開発競争が激しさを増している。自動車としての快適性を損なわず、限られたバッテリー容量で低燃費に走行することが強く求められている。その中で、バッテリーや他の部品と同様に車載バッテリーの充電回路も小型化と高効率化が求められている。回路の動作周波数の高周波化による小型化は損失密度の増大による発熱が課題となっている。部品の発熱はその部品のみならず周辺部品の寿命と信頼性に大きく影響するため、冷却が重要である。しかし、冷却のためのヒートシンクのために新たに実装スペースを確保するのは回路の動作周波数の高周波化による小型化と矛盾する。本研究ではデッドスペースを冷却に有効利用することで充電器全体の外形寸法を大きくすることなく低背トランスの放熱性を高めることができるため、ヒートシンクという部品が増えても、自動車としての快適性になんら影響することはない。むしろ、動作周波数をさらに高周波化して充電器を軽量化できる可能性があるため、燃費向上に寄与することも考えることができる。

また、本研究は車載用バッテリーの充電回路をアプリケーションに研究を行ってきたが、実装スペースや重要が強く制限される航空機用電力変換器への応用も期待される。もし低背トランスの上部にデッドスペースがある場合でも、航空機の場合はヒートシンクの追加は重量制限により厳しく制限される可能性がある。その場合には、ヒートシンクによる冷却ではなく液体冷却の方が現実的である可能性があるが、本研究で検討した巻線構造や熱等価回路は応用可能である。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでに自動車部品メーカーとの共同研究を行ったことがある。具体的には、電気自動車に搭載されるバッテリーの車載充電器向け絶縁形DC-DCコンバータ(直流-直流変換装置)の高効率化、小型化に関する研究を行ってきた。その中で我々の研究グループは電氣的絶縁を担う変圧器(トランス)を担当してきた。トランスは電氣的絶縁だけでなく電圧の大きさの変換、絶縁形DC-DCコンバータの効率に大きく影響するため、適切な設計が重要な部品である。車の限られたスペースに絶縁形DC-DCコンバータを実装する必要があるため、トランスにも小型化が要求される。そのため、放熱性や小型化に優れたプリント基板による巻線を用いた低背トランスに着目して研究を行ってきた。その過程で、実際に電気自動車に搭載されている絶縁形DC-DCコンバータを見る機会があり、トランスは低背にも関わらず周辺のコンデンサなどの部品は背が高いため、トランス上部に無駄なスペース(デッドスペース)が存在することを知った。しかし、低背トランス以外の背が高い全ての部品を低背化することは私の研究の範疇ではないと考え、デッドスペースを有効利用することを考えた。このような経緯により、本研究に着想に至っている。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ・2020年度北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科電気制御システムコース卒業論文
「2MHz低電圧大電流トランスの高電力密度化に関する研究」

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：北海道大学 大学院情報科学研究院

(ホッカイドウダイガク ダイガクインジヨウホウカガクケンキュウイン)

住 所：〒060-0814

札幌市北区北14条西9丁目 情報科学研究院棟3階 3-18室

担 当 者：助教 折川幸司 (オリカワ コウジ)

担 当 部 署：システム情報科学部門 電気エネルギー変換研究室

E - m a i l: orikawa@ist.hokudai.ac.jp

U R L: <https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/eec/index.html>

(本研究内容については、上記のURLから、メンバー→折川幸司の個人ページ
→競争的資金等の研究課題のページはこちら→2020年度公益財団法人
JKA2020年度機械振興補助事業(研究補助 若手研究)にお進ください)