

博士論文審査の結果の要旨

氏名	志村 和大
学位名	博士 (工学)
学位番号	甲 第 824 号
論文題目	高周波 DC-DC コンバータ用インダクタ・トランスの銅損低減のための磁束経路制御に関する研究
論文審査委員	主査 水野 勉 佐藤 敏郎 宮地 幸祐 佐藤 光秀 舟木 剛 (大阪大学)

(博士論文審査の結果の要旨)

電源回路のひとつである DC-DC コンバータは電圧の昇圧、降圧を担い電気機器に適した直流電力を供給するために用いられ、小型化、高効率化の強い要求がある。

DC-DC コンバータは主に、スイッチングを行うパワーデバイス、磁気エネルギーの蓄積、放出を行うインダクタ・トランスなどの磁気部品、静電エネルギーの充電、放電を行うコンデンサの3つの素子で構成されている。それらの素子のなかで、磁気部品は体積が大きく、DC-DC コンバータの小型化のボトルネックとなっている。磁気部品の小型化のためには駆動周波数の高周波化が有効である。ケイ素(Si)パワーデバイスと比較して、優れたスイッチング特性とオン抵抗特性を有する炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)パワーデバイスを活用することで駆動周波数の高周波化による磁気部品の小型化が可能となる。しかし、駆動周波数の高周波化に伴い、磁気部品で生ずる損失が増加するために、小型化と高効率化はトレードオフの関係にある。このトレードオフ解消のためには、高周波化に伴い増加する磁気部品の損失低減が必要である。

本論文では高周波磁気部品の銅損低減手法として、損失を引き起こす磁束を補助磁性体に誘導し、損失を低減する磁束経路制御(MPC : Magnetic flux path control)を提案している。磁気部品の損失は、その構造と駆動周波数に大きく依存するために、各々の磁気部品に適した磁束経路制御を適用する必要がある。そこで、昇圧チョップコンバータ用トロイダルインダクタ、プレーナインダクタおよび Below-1 MHz LLC 共振形コンバータ用トランス、Beyond-1 MHz LLC 共振形コンバータ用トランスをターゲットとし、各々の構造、駆動周波数に適した MPC 手法および MPC の損失低減効果を明らかにするために、磁束経路制御を適用した磁気部品の試作およびコンバータへの実装を検討している。

2章では、DC-DC コンバータに用いるインダクタ・トランスで生ずる磁束の振る舞いを図解し、インダクタやトランスの構造の違いによる磁束の変化、各々の構造に適した MPC 手法の提案および MPC による銅損低減原理を示している。

トロイダルインダクタ等の内鉄形のインダクタの銅損低減に有効な MPC 手法は磁性テープである。素線に1以上の比透磁率を有する磁性テープを巻きつけることで、素線を貫き損失を引き起こす磁束を磁性テープに誘導し、銅損を低減する。また、磁性テープを適用することで、磁路長の短い磁気回路が形成され、インダクタンスが増加、インダクタに流れるリップル電流が減少し、銅損が低減する。

プレーナインダクタ等の外鉄形のインダクタの銅損低減に有効な MPC 手法は磁気封止技術である。アスペクト比(幅/厚さ)の大きいプレーナインダクタにおいて幅方向と磁気抵抗と厚さ方向の磁気抵抗の差により、磁束が厚さ方向に短絡し、巻線を貫き損失を引き起こす。そのため、巻線を磁性体でモールドする(磁気封止技術)ことで、巻線を貫く磁束が磁性体に誘導され、銅損が低減する。また、磁性体で巻線をモールドするために、インダクタンスが増加、インダクタに流れるリップル電流が減少し、銅損が低減する。

外鉄形の Below-1 MHz トランスの銅損低減には MPC(Coat + Plate)が有効である。1 MHz 以下のトランスには一般的に Mn-Zn フェライトコアが用いられる。そのため主磁路であるコアの比透磁率が高いために、一次巻線と二次巻線の間に磁性体を装荷(Plate)および、素線を磁性体で覆うこと(Coat)で、漏れ磁束の誘導による銅損低減および結合係数のコントロールが可能となる。

結合係数をコントロールすることで、高周波駆動による励磁電流の低減が可能となり損失が低減する。外鉄形の Beyond-10 MHz トランスの銅損低減には MPC(Cap)が有効である。10 MHz 以上で駆動するトランスのコアに利用可能な磁性体は、Ni-Zn フェライトや磁性コンポジット材などの低透磁率材料に限られる。そのため、主磁路であるコアの比透磁率が低いために、素線断面の両端部のみに磁性体を装荷する(Cap)ことで、励磁インダクタンスの低下を抑制しつつ、漏れ磁束の誘導による損失低減が可能となる。

3章では、インダクタにおける MPC の損失低減効果確認のために、磁性テープを適用したトロイダルインダクタおよび磁気封止技術を適用したプレーナインダクタを試作し、駆動周波数 1 MHz の昇圧チョップコンバータに実装した。トロイダルインダクタに磁性テープを適用することで、抵抗が減少、インダクタンスが増加し、性能指標 Q が 6 %増加した。また、コンバータ駆動時のインダクタ温度上昇が 16.8 °C 低下し、トロイダルインダクタにおける損失低減効果を実証した。プレーナインダクタに磁気封止技術を適用することで、抵抗が減少、インダクタンスが増加し、性能指標 Q が 99 %増加した。また、コンバータ駆動時のインダクタ温度上昇が 60.0 °C 低下し、プレーナインダクタにおける損失低減効果を実証した。

4章では、トランスにおける MPC の損失低減効果確認のため、磁束経路制御を適用した Below-1 MHz トランスを用いた駆動周波数 1 MHz の LLC 共振形コンバータおよび磁束経路制御を適用した Beyond-10 MHz トランスを用いた駆動周波数 15 MHz の LLC 共振形コンバータを試作した。Below-1 MHz トランスに磁束経路制御を適用することで抵抗が 33%、結合係数が 12%減少、コンバータ効率が 3.6 pt 増加し、高透磁率コアトランスにおける損失低減効果を実証した。さらに、Beyond-10 MHz トランスに磁束経路制御を適用することで抵抗が 27%減少、コンバータ効率が 4.0 pt 増加し、Beyond-10 MHz トランスにおける損失低減効果を実証した。

5章では本論文を総括し、結論を述べている。

以上の検討により、昇圧チョップコンバータ用インダクタ/LLC 共振形コンバータ用トランスの構造ごとに有効な磁束経路制御手法を明らかにし、その損失低減効果を実証した。MPC は、インダクタ・トランスの構造、駆動周波数に適した形で適用することで、磁気部品の発熱抑制やコンバータ効率の向上が可能であることを示している。

本学位論文は査読付き原著論文 4 編に基づいて記述されており、学術的に十分高い評価を得ている。また、今後のパワーエレクトロニクスへの貢献が期待される。したがって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値がある、と審査委員会全会一致で判断した。

(公表主要論文名)

1. [Kazuhiro Shimura](#), Shigeki Kobayashi, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno: Application of Magnetic Composite Materials in Windings to Reduce Alternating Current Resistance in Leakage Transformers, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 59, No. 11, Art No. 8401806, Nov. 2023.
2. [Kazuhiro Shimura](#), Takanori Kanaya, Shigeki Kobayashi, Mitsuhide Sato, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Tsutomu Mizuno: Reduction of Alternating-Current Resistance and Heat Generation of Spiral Inductors with Magnetic Sealing Technique, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.18, Issue 9, Sept. 2023.
3. [Kazuhiro Shimura](#), Takanori Kanaya, Syuichi Hoshina, Shigeki Kobayashi, Mitsuhide Sato, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Tsutomu Mizuno: Reducing heat generation in a boost inductor using a magnetic tape, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 71, no. S1, pp. S85-S94, Apr. 2023.
4. [Kazuhiro Shimura](#), Shigeki Kobayashi, Mitsuhide Sato, Tsutomu Mizuno: Improving Efficiency of Beyond-10 MHz LLC Resonant DC- DC Converters Using Spiral Transformers With Magnetic Flux Path Control Technology, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 57, No. 11, Art. No. 8402109, Nov. 2021.