

氏名	山本達也
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第710号
学位授与の日付	平成31年3月20日
学位授与の要件	信州大学学位規程第5条第1項該当
学位論文題目	高周波駆動共振形コンバータの効率向上のための トランスの銅損低減技術に関する研究
論文審査委員	主査 教授 水野 勉 教授 佐藤 敏郎 教授 舟木 剛 (大阪大学) 准教授 曾根原 誠 准教授 宮地 幸祐 准教授 卜 穎剛

## 論文内容の要旨

スイッチング電源は安定した直流電力を供給するために用いられ、小形化、高効率化の強い要求がある。スイッチング電源にはトランスやインダクタなどの磁気部品が用いられており、他の部品と比較して体積が大きく、小型化のボトルネックとなっている。磁気部品の小型化要素技術として、駆動周波数の高周波化があげられる。しかし、高周波化に伴い、インバータのパワー半導体での回路損失、トランスの鉄心での鉄損、巻線で生ずる銅損による効率の低下や発熱が問題となる。小型化と高効率化を両立させるためには高周波での回路損失、トランスの鉄損、銅損を低減する技術が必要である。回路損失の低減技術として、SiC, GaN を用いたパワー半導体やソフトスイッチングによるスイッチング損失が挙げられる。これらの新材料パワー半導体は Si を用いた半導体と比較して物性値が優れており、高周波駆動と回路損失低減の両立が可能である。また、ソフトスイッチングは LLC 共振駆動方式などにより ZVS, ZCS を行うことで回路損失を低減する技術である。トランスの鉄心で生ずる鉄損の低減技術として磁性コンポジットコアが挙げられる。磁性コンポジット材は  $\mu\text{m}$  級の磁性体の粉末とエポキシなどのバインダを混合し、焼き固めて製作されるコアであり、高周波である MHz 帯での損失が非常に低く、高周波で生ずる鉄損の低減が可能である。

銅損はトランスの巻線抵抗による損失である。高周波での銅損は表皮効果と近接効果に起因する交流抵抗が主であり、巻線に鎖交した磁束による渦電流が要因である。また、巻線の種類は断面が丸形の単線やリッツ線、断面が矩形の平角線などが一般的である。これらの導線で生じる物理現象は線種ごとに異なっており、銅損の低減技術は使用する線種によって適切なものを選定する必要がある。一般的な銅損の低減技術はリッツ線の使用や、磁束を打ち消すようなコイル構造にすることが挙げられる。しかし、コイルの占積率が低下し、トランスの小型化に不利である。

本論文では高周波で生ずる銅損を低減する技術として新たに磁束経路制御技術を提案している。磁束経路制御とは巻線の周囲に磁性体を配置し、巻線に磁束が鎖交しないように磁束の流れを制御する技術であり、この技術をトランスに適用した例はない。磁束経路制御技術をトランスに適用するため、トランス内で生ずる物理現象を明確にし、線種ごとに磁性体を配置した巻線を提案した。また、磁束経路制御が高周波駆動電源の銅損低減技術として有用であることを明らかにするため、MHz 帯で駆動する LLC 共振形コンバータに実装するトランスに磁束経路制御を適用し、トランスの交流抵抗低減、回路の効率向上を検討した。

2章では回路の駆動方式とトランスに用いる導線内に生ずる物理現象を示した。LLC共振駆動方式は漏れインダクタンスを用いた駆動方式であり、ZVSによりスイッチング損失を低減する。トランス内では漏れ磁束が発生するため、巻線に鎖交する磁束が増加する。丸形断面をもつ導線の銅損低減技術として磁性めっき線と磁性塗布線を提案した。この導線は周囲に鉄薄膜や微細な磁性粉を用いた磁性層を設けることで導線内を通過する磁束の低減が可能である。また、矩形断面をもつ導線の銅損低減技術として磁性キャップ、磁性プレートを用いたトランスを提案した。平角線で磁束が集中する角部に磁性体を配置することで鎖交する磁束の経路を制御し、平角線の交流抵抗を低減することが可能である。これらの銅損低減技術を適用したトランスを試作し、交流抵抗の低減効果を実証した。

3章では丸形断面導線を用いたトランスの銅損低減技術を検討するため、磁性めっきリッツ線を用いた駆動周波数1MHzのフルブリッジ型LLC共振形コンバータと、磁性塗布線を用いた駆動周波数4MHzのハーフブリッジ型LLC共振形コンバータを試作した。磁性めっきリッツ線を用いたトランスでは一次側抵抗を18.5%低減し、交流抵抗を抑制した。また、コンバータの電力損失を4.7%低減した。磁性塗布線を用いたトランスでは一次側抵抗を16.4%低減し、交流抵抗を抑制した。また、コンバータの効率を測定したところ、最大で2.3%向上し、丸形断面導線を用いたトランスの銅損低減技術の有用性を実証した。

4章では矩形断面導線を用いたトランスの銅損低減技術を検討するため、有限要素法解析による平面トランスの設計と、磁束経路制御を適用した平面トランスを実装した駆動周波数5MHzのハーフブリッジ型LLC共振形コンバータを試作した。平面トランスの設計では平角線の周囲に配置する磁性体について、有限要素法解析によって銅損低減に有効な寸法を明らかにした。磁束経路制御を適用した平面トランスでは一次側抵抗を最大で13.4%低減した。また、コンバータの効率を測定したところ最大で0.3%向上し、矩形断面導線を用いたトランスの銅損低減技術の有用性を実証した。

上記の結果より、線種ごとの磁束経路制御法を明確にし、銅損低減効果を実証した。