

氏名	佐藤 紘介
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲 第 685 号
学位授与の日付	平成30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	スイッチング電源のデジタル制御化と 低透磁率低鉄損トランスを用いた 擬似共振型フライバック DC-DC コンバータに関する研究
論文審査委員	主査 教授 佐藤 敏郎 教授 水野 勉 准教授 曾根原 誠 准教授 宮地 幸祐 教授 舟木 剛 (大阪大学)

## 論文内容の要旨

本論文はスイッチング電源の高性能化について、2つのアプローチから検討したものである。スイッチング電源は、パワーエレクトロニクス技術を利用した高効率な電力変換装置であり、電子機器等の電源として広く用いられている。

パワーエレクトロニクス技術は、電気エネルギーの効率的な利用のため様々な用途に広く普及しており、パワー半導体デバイス、回路トポロジー、受動部品、制御器等の様々な技術によって成り立っている。近年では、次世代パワー半導体デバイスとして、GaN/SiCパワー半導体が実用化され、他の技術分野の研究開発に大きな影響を与えており、低オン抵抗やMHzスイッチング動作可能といった特長を活かすための様々な研究が行われている。本論文では特に、制御器のデジタル制御化時の過渡応答特性改善法および新磁心材料適用による磁気デバイスの高周波化・低損失化およびスイッチング電源評価による実証について取り組んだ結果について述べたものである。

スイッチング電源の制御器のデジタル制御化は、負荷状態に応じて動作状態を変えろといった制御が可能となるため、高効率化に有効であるとされる。一方で、A/D変換や制御演算に時間がかかるため制御遅れが生じ、過渡応答特性に課題があるとされる。スイッチング電源において、出力電流(出力電力)や入力電圧が急変した際に大きな出力電圧変動が生じると機器の誤動作や破損の原因となるため、出力電圧変動量を小さく、また収束時間の短縮が求められている。近年の電子機器においては、CPUなどの電源電圧は低下する傾向にある一方で、動作時の消費電力は増大傾向にある。そのため、電子機器は低消費電力化のためCPUなどの動作状態・停止状態を頻繁に変更しながら動作しており、過渡応答特性が非常に重要である。そこで本論文では、フィードフォワード補償の適用による過渡応答特性改善法を提案した。フィードフォワード補償器の設計を、DC-DCコンバータの定常状態における関係式からとDC-DCコンバータの状態方程式からの2方式について行い、それぞれについて定常特性および過渡応答特性を評価した。その結果、状態方程式から設計したフィードフォワード補償器を適用することで、負荷急変時および入力急変時の出力電圧変動量を従来法の50%以下に抑制でき、過渡応答特性を大きく改善できることを示した。

磁気デバイスについては、新磁心材料適用による高周波化・低損失化に取り組んだ。前述のとおりGaN/SiCパワー半導体デバイスの実用化により、スイッチング電源のスイッチング周波数は数MHz~数十MHzに高周波化できるとされるが、MHz帯で使用できる磁心材料の開発が遅れている状況である。本論文では、磁性微粒子とエポキシ樹脂からなる表面酸化カルボニル鉄粉メタルコンポジット材料に着目し、フライバックコンバータ用トランスの開発及び特性を評価した。フライバックコンバータは、比較的小容量で用いられる絶縁

型スイッチング電源の回路方式であり、回路構造が簡素、部品点数が少ないといった特長から広く用いられている。一方、メタルコンポジット材料は、MHz 帯において低鉄損、高飽和磁束密度、恒透磁率性に優れ良好な直流重畳特性を示す、といった特長を有する。非絶縁型 DC-DC コンバータ用インダクタ磁心として適用して評価され、現状多用されている Mn-Zn フェライトよりも良好な特性を示すことが報告されている。しかしながら、比透磁率が約 6 と低いと、巻線間の磁気結合を強めて結合係数を上げることが難しく、トランス磁心材料としての適用は困難であった。前述のメタルコンポジット材料が有する特長はフライバックコンバータ用トランス磁心に求められる特性にマッチしており、巻線間の結合係数を高められればフライバックコンバータ用トランスとして応用できる可能性がある。そこで本論文では、低透磁率磁心材料であってもトランス構造および巻線レイアウトにより巻線間の結合係数を高める方法を検討し、高い電力効率を有するフライバックコンバータ用トランスの開発を目標とした。巻線導体には、テープ状の銅張ポリイミドシートを用いた。これをロール状に巻くことで空心巻線を作製し、メタルコンポジット磁心中に配置する構造とした。さらに、1 次巻線と 2 次巻線が交互に配置される構造を基本とする 3 種類の巻線レイアウトについて、シミュレーションと実験により最適な巻線レイアウトを検討した。このトランス構造により、結合係数は 0.99 以上が得られることが明らかとなった。また、実際にトランスを試作し、60 W 出力の擬似共振型フライバックコンバータに適用して評価したところ、スイッチング周波数は最高で 2 MHz、電力変換効率は最大 92.5%、定格負荷時 90%以上が得られた。これにより、低透磁率磁心材料であっても、トランス構造および巻線レイアウトによって磁気結合を高めることができ、またフライバックコンバータ用トランスとして応用できることを示した。

以上、本論文の要旨を述べた。