

学位論文の審査結果の要旨

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、電子機器用電源として広く用いられている。本論文は、スイッチング電源の高性能化について、以下に示す内容でまとめられている。

(1) 本論文の第1章では、次世代パワーエレクトロニクスの動向と課題を文献調査にもとづいて整理し、スイッチング電源回路の制御方式の課題、SiCやGaNなどのワイドバンドギャップパワー半導体の特徴を活かして高周波スイッチング電源を実現する際のボトルネックである磁心材料の課題に焦点を当て、本研究のテーマを設定したことを述べている。

(2) 本論文の第2章はスイッチング電源のデジタル制御についてまとめている。アナログPID制御では難しい様々な制御方式の導入が可能となるデジタル制御スイッチング電源の開発が活発化しているが、A/D変換のデータサンプリング周波数や制御演算を司るDSPのクロック周波数によってスイッチング電源の過渡応答特性が大きく左右される課題がある。第2章では、出力電圧フィードバック制御に加え、フィードフォワード補償器の導入によって負荷急変や入力電圧変動に対する過渡応答特性を改善するデジタル制御法を提案し、制御系の設計とともに実機の試作・評価によってその有効性を実証している。具体的には、

- ・電源回路のトポロジーの変更を伴わずに、DSPの制御アルゴリズムによって過渡応答特性を改善するフィードフォワード補償器の設計法を検討し、制御対象である電源回路の状態空間方程式にもとづいてフィードフォワード制御アルゴリズムを構築した。本手法は、指数関数演算を必要とする先行研究に対して四則演算のみで補償量を高速演算でき、負荷変動と入力電圧変動に対する過渡応答特性の改善に寄与することを示した。

- ・入力電圧5～20V、出力電圧3V、定格出力電力2Wのスイッチング周波数100kHzのデジタル制御同期整流降圧チョップパDC-DCコンバータを試作し、クロック周波数12.5MHzのDSPを用いたフィードフォワード補償器を構成して過渡応答特性の改善効果を検証した。負荷急変時（70mA ⇔ 630mA）の出力電圧オーバー／アンダーシュートを30%/50%に低減できること、入力電圧急変時（7V ⇔ 17V）の出力電圧オーバー／アンダーシュートを8%/46%に低減できることを実証した。

これらの成果はIEEE Power Electronics Society主催の通信用電源技術国際会議INTELEC2015およびINTELEC2017の審査付プロシーディング2件として公表された。

(3) ワイドバンドギャップパワー半導体を用いた高周波スイッチングコンバータの開発競争が世界的に激化しているが、トランスやインダクタなどの磁気部品がコンバータの高性能化のボトルネックとなっている。高周波磁心材料のベンチマークであるフェライト系材料を凌駕すると期待される鉄系メタルコンポジット材料は高周波低鉄損であるという大きな特徴を有するものの、透磁率が低い欠点を有し、励磁電流が大きく、大きな漏れ磁束によって巻線間結合係数が低下するためトランス用磁心には適さないのが一般的な見解である。本論文の第3章では、低透磁率・低鉄損の特徴を有する表面熱酸化カルボニル鉄粉/エポキシメタルコンポジット磁心材料を用いてフライバックコンバータ用トランスを構成する場合の巻線間結合係数を高くするための設計法の検討、ならびにトランスの試作と評価、さらには、実際にフライバックコンバータに適用してその有用性を実証している。具体的には、

- ・低透磁率磁心でも大きなインダクタンス係数が得られる磁気回路構造を有限要素法解析によって検討し、巻線埋込み磁気回路（外鉄）構造がトランスに適することを示した。

- ・巻線埋込み磁気回路（外鉄）構造トランスにおいて巻線間結合係数を高くするための1次-2次巻線導体配置に関する検討を行い、電磁界シミュレーションと試作トランスによる実験的手法を併用し、1次導体起磁力と2次導体起磁力が空間的に相殺し易い交互導体配置によって0.99以上の結合係数を実現する1次-2次巻線導体配置法を提案した。

- ・比透磁率6の表面熱酸化カルボニル鉄粉/エポキシメタルコンポジット磁心材料を用いて巻線埋込型のプレーナトランスを試作し、励磁インダクタンス、巻線間結合係数、効率を定量的に評価するとともに、48V入力-12V出力のPFM制御疑似共振型フライバックDC-DCコンバータに適用し、10~65Wの広い出力電力範囲で90%以上の電源効率（最高92.5%@28W）が得られることを実証した。

これらの研究成果は日本磁気学会の査読付き論文2件（内1件は英文誌に掲載）として公表され、英文誌（Journal of Magnetism Society of Japan）に投稿した審査付論文がMSJ論文奨励賞を受賞した。

以上から、佐藤紘介氏から提出された論文は次世代パワーエレクトロニクスの基盤技術として半導体電力変換工学ならびに高周波パワーマグネティックスの発展に大きな貢献を果たしているものと認められ、学位論文審査委員会委員の全員一致で博士学位論文としてふさわしいと判断された。

公表主要論文名

- K. Sato, T. Sato, M. Sonehara and H. Takeuchi, “Low permeability composite magnetic core transformer with high coupling coefficient and its application to PFM controlled quasi-resonant mode flyback-type DC-DC converter”, Journal of Magnetics Society of Japan, Vol.41, No.6, pp. 132-139 (2017).
- Kosuke Sato, Toshiro Sato and Makoto Sonehara, “Transient Response Improvement of Digitally Controlled DC-DC Converter with Feedforward Compensation”, Proceedings of the IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2017), IEEE Power Electronics Society, pp. 609-614 (2017).
- 佐藤 紘介, 杉村佳奈子, 佐藤敏郎, 曾根原誠, 竹内英樹, “表面酸化カルボニル鉄粉メタルコンポジット磁心トランスの試作とフライバックコンバータへの応用”, 日本磁気学会論文特集号, Vol.1, No.1, pp.44-52 (2017) .
- Kosuke Sato, Toshiro Sato and Makoto Sonehara, “Transient Response Improvement of Digitally Controlled Buck-Type DC-DC Converter with Feedforward Compensator”, Proceedings of the IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2015), IEEE Power Electronics Society, pp.1153-1157 (2015).