

氏名	木村 翔太
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博甲第127号
学位授与年月日	平成30年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第623号
専攻名	総合理工学専攻
学位論文題目	磁気結合インダクタを応用した高電力密度コンバータの実現へ向けた研究 (A Study on Realization of High Power Density Converters using Coupled Inductors)
論文審査委員	主査 島根大学教授 吉田 和信 島根大学教授 神宮寺 要 島根大学教授 増田 浩次 名古屋大学教授 山本 真義

## 論文内容の要旨

電力変換機を高電力密度化するために有効な手段として、磁気結合インダクタ方式マルチフェーズコンバータが挙げられる。その中で主に3つの磁気結合インダクタ方式（LCI方式、CCI方式、IWCI方式）があり、それぞれ磁気構造も異なるため、特長や性能も様々である。一方、これらを特定のアプリケーションに応用する場合、その求められる仕様に依りて適切な方式を選択する必要がある。そこで本研究では磁気結合インダクタを応用したマルチフェーズコンバータにおいて高電力密度化を実現するための理論的評価モデルの構築及び小型化性能指標の明確化を目的とする。

第1章では、省エネルギー化や温室効果ガス削減が求められる社会情勢においてパワーエレクトロニクス技術の重要性について述べ、電力変換器の高電力密度化の必要性を示した。また、電力変換器の高電力密度化の手法として、マルチフェーズ技術に磁気結合インダクタを適用する方法を取り上げ、本研究の目的について述べる。

第2章では、一般的な電力変換器の高電力密度化の手法を3つ提示し、それら技術動向を交えながら説明する。特に、その中でマルチフェーズ技術の有用性について言及する。マルチフェーズ技術はコストを抑えつつ簡単な回路構成で、高電力密度化を達成する手法として、回路を多相並列化させ、各相のスイッチの信号を位相シフトさせて動作させる。この技術によって、電流分利化によるパワー半導体デバイスの発熱ストレス低減およびリップル電流の高周波化による入出力キャパシタの小型化が可能となるが、一方でその相数に対してインダクタの個数も増加してしまうことから、インダクタの小型化に対しては不向きである。

第3章では、マルチフェーズコンバータにおいて高電力密度化を達成する結合インダクタ方式、密結合インダクタ方式、結合巻線結合インダクタ方式に関して、それらの回路構成と磁気構造について説明する。さらに詳細な解析により設計に必要な電磁気特性を明らかにする。また解析においては、インダクタ電流を各相に流れる共通の電流成分と各相間を還流する電流成分に分離させることにより、磁気結合インダクタの特性とインダクタンスとの関係性を示している。加えて、電流と磁束との関わりについても共通成分と還流成分に分離した考え方にに基づき明らかにする。

第4章では、最大許容電力の観点から小型化性能を評価する数式モデルを提案する。前章での解析結果を用いて、それぞれの最大許容電力についての数式モデルを構築し比較検討を行う。PFC等に適用する場合を考え、得られた結果から動作モードに対する小型化性能指標を示す。また実験によりそのモデルの妥当性について検証する。

第5章では、前章とは別のアプローチから、コアモデルを用いた小型化性能評価方法を提案している。コアモデルはエアアプロダクト法に基づいた体積計算可能なモデルであり、実験及び電磁界シミュレータによりその妥当性を検証する。またそれぞれのコアモデルを用いたデューティ比に対する小型化性能指標を示す。最後にコアモデルを用いて堆積比較を行い、実際に作製したプロトタイプにて効率比較を通してその有効性について議論する。

第6章では、本研究成果をもとめ、総括する。

## 論文審査結果の要旨

電力変換器の高電力密度化を達成するために、マルチフェーズコンバータに磁気結合インダクタを応用した技術が注目されている。この技術により電力変換器の中で大きな体積を占めるキャパシタ及びインダクタを同時に小型化することができ、結果として電力変換器の小型化が可能となる。磁気結合インダクタの方式として主に疎結合インダクタ (LCI) 方式、密結合インダクタ (CCI) 方式、統合巻線結合インダクタ (IWCI) 方式と、3つのトポロジーがあるが、それぞれ磁気構造も異なるため、特長や性能も様々である。一方で、これらを特定のアプリケーションに応用する場合、さらなるコンバータの高電力密度化を達成するために、その求められる仕様を満足する条件で小型化性能の高い適切なトポロジーを選択し設計する必要がある。従来の方法ではコンバータの仕様を入力し一つのトポロジーに対してシミュレーションを用いて設計を行い実機にて評価していた。この方法では複数のトポロジーと比較する際にはそのトポロジーの数だけ同様の設計プロセスが必要であったり、幾つかのパラメータで検討する際にもそれぞれで設計し評価することが必要となり、最終的にそれらの中から小型化性能の高いトポロジーを判断し選択するまでに多くの作業と時間を要してしまう。

本論文では複数のトポロジーの小型化性能を同時に評価できる手法として2つの別のアプローチから以下の通り提案し、同時に小型化性能指標も提示している。1) 最大許容電力の数式モデルを用いた評価法、2) コアモデルを用いた評価法 提案する2つの評価法はPFCコンバータとDC-DCコンバータへの適用時にそれぞれ使い分けることができる。これらを利用することで複数のトポロジーの小型化性能を同時に評価することが可能となり、適切なトポロジーを判断・選択するまでの評価プロセスを単純化できるようになる。また、これらの評価法の妥当性は実験的に実証しているため様々な仕様のアプリケーションにも応用することができる。

結果として、提案する2つの評価法の有用性を確認することができた。さらに、各磁気結合インダクタ方式の小型化性能指標も提示し、最大許容電力の数式モデルを用いた評価法では動作モードに着目し LCI 方式と IWCI 方式は電流連続モード (CCM) で、CCI 方式は電流臨界モード

(CRM) で小型化性能が高いことを明らかにした。一方で、コアモデルを用いた評価法ではデューティ比に着目し、デューティ比が 50%に近い領域では CCI 方式が、高いデューティ比の領域では IWCI 方式が、小型化性能が高くなるという指標を得た。

以上のように、本論文では電力変換器の高電力密度化の要求に対して効果的な 3 種類の磁気結合インダクタ方式マルチフェーズコンバータにおいて、それらの小型化性能を同時にかつ容易に評価するために有用な手法を 2 つ提案し、またその指標についても明らかにした。本研究は、磁気結合インダクタ方式マルチフェーズコンバータをさらに産業界へ導入し普及させていくための一助になると考えている。また、本研究成果の一部は、米国電気学会論文誌の一つである IEEE Transaction on Industry Applications へ 1 件、電気学会英文論文誌である IEEJ Journal of Industry Applications へ 1 件掲載済みである。

以上より、学術的知見の開拓、ならびに本学の規定を満たす学術論文数等の活発な学術活動を鑑み、本論文は博士（工学）のための学位授与のための論文として合格と判断した。