

氏名	今岡 淳
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	総博甲第103号
学位授与年月日	平成27年9月24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546号
専攻名	電子機能システム工学専攻
学位論文題目	磁気結合を利用した電力変換器の高電力密度化とその応用に関する研究 (A study on high power density power converter utilizing magnetic integration and its application)
論文審査委員	主査 島根大学准教授 山本 真義 島根大学教授 神宮寺 要 島根大学教授 増田 浩次 島根大学教授 横田 正幸

論文内容の要旨

近年、環境問題の改善を目的とした輸送機器(ハイブリットカー、電気自動車、燃料電池車など)の開発が推し進められている。また、MPU(Micro-Processing Unit)やFPGA(Field-Programmable Gate Array)をはじめとする電子演算器の飛躍的な性能向上により、スマートフォン、携帯音楽プレーヤー、パーソナルコンピュータが急速に普及し、電子機器のユビキタス化は日を迫うごとに加速している。こうした、蓄電池を内蔵した輸送機器、電子機器の電力変換回路は高出力を維持したうえで小型軽量化、すなわち高電力密度化が強く求められる。

これら機器に搭載される電力変換回路は蓄電池自体が直流であるため、後段に接続される電力変換回路には、回路構成の簡素さから非絶縁 DC-DC コンバータが多く活用される。この蓄電池を内蔵した電力変換器の特徴としては低電圧・大電流化の傾向が強く、この変換器を高電力密度化する方策としては回路方式の改良から変換器を多相並列化し、各相のスイッチ信号の位相をシフトさせて駆動させるマルチフェーズ方式が注目を浴びている。

本方式の利点は、大電流を変換器の並列化により分流化できることに加えて位相シフト駆動により交互に出力側に電力が伝送できるので平滑コンデンサの小型軽量化が可能である。しかしながら、この問題点としては変換器の多相並列化すると、コンデンサと対を成すもう一つの受動素子インダクタの数が増加してしまい、この点において重量とサイズの増大が懸念される。

このインダクタをはじめとする磁性部品には、レアメタルやベースメタルが多く使用されており、今後の OECD 加盟諸国の経済発展、さらに BRICS 諸国、NEXT11 をはじめとする新興国の経済成長を考慮すると、2050 年頃にはこれら金属資源のニーズが現有埋蔵量を大幅に上回る予測もある。従って、価格高騰による技術発展の妨げを回避するためにも磁性部品

の小型軽量化に向けた検討は重要である。

本研究では、このマルチフェーズ方式を適用した非絶縁 DC-DC コンバータのインダクタを小型軽量化するため、従来独立していた各相のインダクタを単一の磁性体コアに巻線を集約させ、磁氣的に結合させた結合インダクタを提案し、その設計方法と高性能化に向けた検討を実施する。

第 1 章ではパワーエレクトロニクス分野における包括的な動向や社会的な意義について述べる。さらに、輸送機器や持ち運び使用する電子機器の電力変換システムの一例を示し、材料的資源の有限性、燃費向上や可搬性向上の視点から電力変換器の小型軽量化の必要性について述べている。また、電力変換器の小型軽量化に向けた手法について展開し、本研究の目的や立ち位置について掲示している。

第 2 章では、本研究で使用する磁気回路モデルを用いたインダクタ設計手法について述べる。磁気回路モデルを用いたインダクタ設計方法の有効性は任意形状の磁性体コアや巻線構造においても自由度が高く設計できることが利点として挙げられる。この磁気回路を用いたインダクタ設計の具体的な例として、シングルフェーズ方式昇圧チョップ回路内の直流用インダクタの設計方法を掲示する。

第 3 章では、車載用モータ駆動用電力変換システム内の昇圧チョップ回路を小型軽量化することが可能な結合インダクタを用いた 2 相マルチフェーズ昇圧チョップ回路を提案する。まず、インダクタ部分に関しては、各相独立していたインダクタを三脚の磁性体コアの外側脚に各相の巻線を巻く構造としている。この構造形態を有するインダクタの特性解析、設計手法の確立、実機による実証的評価によりその有効性について述べている。また、結合インダクタがマルチフェーズ方式の利点である“コンデンサの小型軽量化”に対して性能劣化の要因とならないか確認をする。さらに、シングルフェーズ方式とマルチフェーズ方式を比較して、どの程度出力側平滑コンデンサの静電容量が削減できるか、平滑コンデンサの小型軽量化の度合いについても評価する。

第 4 章では、第 3 章で提案した 2 相結合インダクタを 3 相へ展開させ、3 相化に適した結合インダクタのコア構造を提案し、その有効性について議論する。この評価に際しては、インダクタコアサイズと磁束密度を規定した際のインダクタに許容できる電力容量の算出法を提案し 3 つの非結合インダクタを用いる従来方式と比較してインダクタの小型軽量化の効果について議論している。

第 5 章では、結合インダクタの磁気コア構造に着目した性能向上手法について提案する。結合インダクタは、高い結合係数を有している場合において小型軽量化が実現できるが、従来の三脚コア構造では結合係数が飽和することが存在していた。加えて、従来のコア構造は設計試作の際にエアギャップ長が設計値と一致しないケースが多く、磁気設計が複雑化していた。これに対して、これらの問題を解決可能な新規磁気コア構造の有する結合インダクタを提案し、理論解析と実機評価を踏まえ、その有効性について展開している。

第 6 章では、巻線構造の改良から結合インダクタの性能向上手法について検討する。この方式は、単一磁性体コア内で 3 つの巻線を活用し構成される結合インダクタである。これに対して他の巻線構造を有する方式と比較する形で電磁的特性の比較を実施する。また、当該インダクタに対する設計方法の確立、実機による妥当性まで検証している。また、実機評価により妥当性を確認された設計方法に基づいて仮想的なコア設計を通して、従来の結合イン

ダクタとサイズ比較を実施し、その高電力密度な性能について確認する。

第7章では、MPUやFPGAに対する電力変換システムで活用されるPOL(Point of Load)コンバータ用積層結合チップインダクタについて提案している。インダクタの磁性材料としてはダストコアを適用しており、このダストコアはフェライトと比べて、電流増加に伴ってインダクタンスが大きく変化する特性を有する(直流重畳特性)。そこで、電磁界シミュレータを用いた積層結合チップインダクタの直流重畳特性を調査し、その有効性について確認する。また、低損失・高速スイッチング特性を有するGaN FETを適用し、1MHzの高周波駆動状態において当該インダクタを実機評価する。

第8章ではそれぞれの成果を統括し、本論文の結論を述べる。

論文審査結果の要旨

近年、蓄電池を内蔵した輸送機器、電子機器における電力変換回路は、高出力を維持したうえで小型軽量化、すなわち高電力密度化が強く求められる。これら機器に搭載される電力変換回路は蓄電池自体が直流であるため、後段の電力変換回路には、非絶縁 DC-DC コンバータが多く活用される。この蓄電池を内蔵した電力変換器の動向としては低電圧・大電流化の傾向が強く、この変換器を小型軽量化する方策としては回路方式の改良から変換器を多相並列化し各相のスイッチ信号の位相をシフトさせて駆動させるマルチフェーズ方式が注目を浴びている。本方式の利点は、大電流を変換器の並列化により分流化できることに加えて位相シフト駆動により交互に出力側に電力が伝送できるので平滑コンデンサの小型軽量化が可能である。本研究では、このマルチフェーズ方式を適用した非絶縁 DC-DC コンバータのインダクタを小型軽量化するため、従来独立していた各相のインダクタを単一の磁性体コアに巻線を集約させ、磁氣的に結合させた“結合インダクタ”を提案し、その設計方法と高性能化に向けた検討を実施している。

第1章ではパワーエレクトロニクス分野における包括的な動向や社会的な意義について述べている。第2章では、本研究で使用する磁気回路モデルを用いたインダクタ設計手法について述べた。磁気回路を用いたインダクタ設計の具体的な例として、シングルフェーズ方式昇圧チョップ回路内の直流用インダクタの設計方法を提示した。第3章では、車載用モータ駆動用電力変換システム内の昇圧チョップ回路を小型軽量化することが可能な結合インダクタを用いた2相マルチフェーズ昇圧チョップ回路を提案している。まず、インダクタ部分に関しては、各相独立していたインダクタを三脚の磁性体コアの外側脚に各相の巻線を巻く構造としている。この構造形態を有するインダクタの特性解析、設計手法の確立、実機による実証的評価によりその有効性について述べている。第4章では、2相結合インダクタを3相へ展開させ、3相化に適した結合インダクタのコア構造を提案し、その有効性について議論する。インダクタコアサイズと磁束密度を規定した際のインダクタに許容できる電力容量の算出法を提案し、3つの非結合インダクタを用いる従来方式と比較してインダクタの小型軽量化の度合いについて議論している。第5章では、結合インダクタの磁気コア構造に着目した性能向上手法について提案する。結合インダクタは、高い結合係数を有している場合において小型軽量化が実現できるが、従来の三脚コア構造では結合係数が飽和することがあった。加えて、従来のコア構造は設計試作の際にエアギャップ長が設計値と一致しないケースが多く、磁気設計が複雑化していた。これに対して、これらの問題を解決可能な新規磁気コア構造の有する結合インダクタを提案し、実機評価を踏まえてその有効性について議論した。第6章では、巻線構造の改良から結合インダクタの性能向上手法について検討した。この方式は、単一磁性体コア内で3つの巻線を活用し構成される結合インダクタである。これに対して他の巻線構造を有する磁気結合方式と比較する形で電磁的特性の比較を行った。第7章では、MPUやFPGAに対する電力変換システムで活用されるPOL(Point of Load)コンバータ用積層結合チップインダクタについて提案している。電磁界シミュレータを用いた積層結合チップインダクタの直流重畳特性を調査し、その有効性について確認する。また、1MHzの高周波駆動状態において当該インダクタを実機評価した。

ユニバーサリタスが進む移動体における電源の小型化への要求に対し、磁気部品の最適設計法を掲示することで産業界に大きな影響を与えている。国内外の受賞が4件（うち、IEEEが2件）、国際特許4件、国内特許1件の成果に加え、博士論文を構築する基盤となる学術論文数も5件（電気学会英語論文誌4件、パワーエレクトロニクス学会1件）と多く、質、量共に、本学の学位授与の規定を十分に満たしていると判断し、本論文を博士授与のための論文として合格とした。