

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18059

研究課題名（和文）放熱性能を高めた統合磁気デバイスの高性能化とその実装技術

研究課題名（英文）Development of high performance integrated magnetic device with improved heat dissipation and its mounting technology

研究代表者

今岡 淳（Imaoka, Jun）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：60772019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、車載用電力変換器の一つである昇圧コンバータの受動素子の小型軽量化を実現することである。まず、回路方式の位置づけから出力コンデンサの小型軽量化が可能なインターリーブ方式マルチフェーズ昇圧コンバータに焦点を当てて検討をした。さらに、本研究ではこの回路方式内のインダクタ部の小型軽量化を実現する磁気設計手法を確立した。具体的な研究成果は下記の分類される。(1) 電流アンバランス時においても高い信頼性を有する結合インダクタの設計手法確立・高効率化と小型軽量化を両立できる磁気設計手法の確立(2) ダストコアの材料モデリングに基づいた応用設計手法とシミュレーション手法の確立である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CO2排出抑制を目的に今後更に電動化車両が益々推進されていくものと考えられる。この電動化車両に搭載される電力変換器は走行性能向上や車両のデザイン自由度向上のため、高電力密度化が求められている。特に電力変換回路内においてインダクタなどの磁気部品は、回路内においても主要な体積を占める。これに対して本研究ではインダクタ設計技術の立ち位置からインダクタの小型軽量化・高信頼性化・高効率化に関わる新しい設計技術を確立した。インダクタなどは高価な金属資源も一部用いて作成されるが、この技術は単一電源システムあたりでの金属資源の省資源化・省エネルギー化にも寄与し、持続可能な社会の実現に寄与すると考える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to realize downsizing the passive components in the boost converter used in the automotive power train system. First of all, from the circuit topology perspective, interleaved multi-phase boost converters capable of downsizing the output capacitor was selected. In addition, in order to downsizing inductors used in the converters, the advanced magnetic design methods were proposed in this research. The main research results are categorized as follows. (1) Magnetic design methods for coupled inductors with high reliability under current imbalance conditions and magnetic design method that can achieve both high efficiency and downsizing were proposed (2) Applied design and simulation methods based on material modeling methods for dust cores were proposed.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：結合インダクタ率 構造設計 統合磁気デバイス 高信頼性 直流偏磁 ダストコア 直流重畳特性 非線形比透磁

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

温暖化の原因であるCO₂、人体に有害な排出ガス削減と有限な化石エネルギー資源の有効利用は、国際的にも重要な取り組みとして位置づけられている。そのため、これらの発生・消費対象となっている自動車業界に対しての燃費規制は、年を追うごとに厳しい基準が制定され自動車の電動化に向けた取り組みの重要性は時々刻々と増している。車をはじめとする移動体に搭載される電力変換器の理想は、車内空間拡大や重量低減による連続航続距離向上のため、高電力密度であることや高効率な性能を有することである。この車載用電力変換システムは、モータ駆動用と補機類用の電力変換回路がそれぞれ必要となり、これらは図1に示すPCU (Power Control Unit) に搭載される。特に、このPCUの中で主要な体積・重量物であるのが、昇圧コンバータ内でのインダクタ、キャパシタなどの受動素子であり、これらのデバイスの小型軽量化は喫緊の課題である。

一方、材料資源の面からも磁気部品の小型軽量化は重要である。電力変換器のインダクタやトランスに活用される磁性材料はベースメタル(Fe, Cu など)およびレアメタル(Mn など)を用いて構成される。しかしながら、これらの金属資源はOECD加盟諸国の経済状態の維持・発展に加えてBRICs, NEXT11など経済大国となる高い潜在性をもった国々の今後の経済成長を考慮すると、これら金属資源のニーズは2050年までには現有埋蔵量を大きく超えてしまう可能性が指摘されている。

こうした背景に対して、電力変換器の高電力密度化へ向けた国内外の研究動向としては大きく分けて2つの方策がある。1つ目はGaNやSiCと呼ばれるワイドバンドギャップ半導体を活用した高周波駆動化であり、2つ目は回路方式の視点から回路構造を多相並列化させ、位相シフト駆動させるマルチフェーズ方式の適用に大別される。この2つ目の方策は、1つ目のGaNやSiCなどの新材料パワー半導体デバイスを用いた高周波駆動とは別の路線からのアプローチとなるため、それぞれの利点を後に重ね合わせることができるため普遍的にその有効性が残る。

しかしながら、2つ目のマルチフェーズ方式のみの適用ではキャパシタの小型軽量化・高出力化を実現する上では効果的であるものの、従属的にインダクタの部品点数が増加してしまうため、この点で小型軽量化に対して効果的ではない。この問題に対して、本研究では電力変換器の各相のインダクタを単一の磁心に統合させた磁気デバイス(統合磁気デバイス)を用いてインダクタの小型軽量化並びに実用化に向けた設計検討を実施するものである。

研究代表者はこれまで磁気部品の小型化に効果的な“統合磁気デバイス”に関する研究を実施してきた。ただし、実用化に際してはいくつか課題が残っている。(1)実用性を考慮して電流アンバランス時における信頼性を向上させる設計手法の確立と実機での実証評価(2)放熱性能が高い統合磁気デバイスの確立に向けた材料モデリング・構造検討にあたっての基盤となる技術を確立することである。特に、小型軽量化が進むとインダクタ自身の放熱面積が少なくなるため、インダクタ構造の視点から放熱性能を高める検討を実施する。

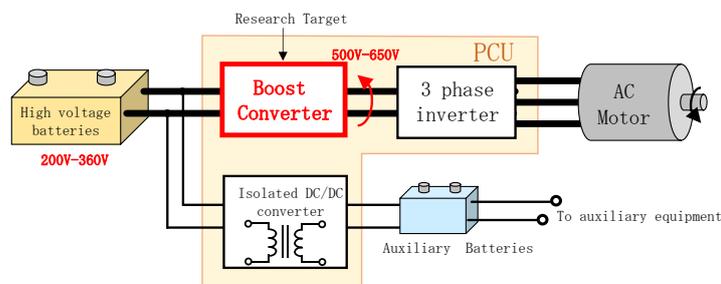


図1 電動化車両のシステム構成図

2. 研究の目的

本研究の目的は車載用をはじめとするモータ駆動用電力変換システム内のDC/DCコンバータを高電力密度化・高効率化を図ることである。その方法としては、多相並列化させたコンバータ内において、複数必要となる磁気デバイス(インダクタ・トランス)の小型軽量化に有効な“統合磁気デバイス”を実装まで含めて高性能化させることである。具体的な課題は以下のように分類される。

(1) 実用性を考慮して電流アンバランス時における信頼性を向上させる設計手法の確立と実機での実証評価：まず、図2に対象回路である結合インダクタを用いた2相マルチフェーズ昇圧コンバータを示す。また、統合磁気デバイス(以後、結合インダクタと呼称する)の磁気構造を図3に示す。この図2に示す回路は通常、各相の寄生抵抗・デューティ比のバラつきにより、各相の電流 i_{L1} 、 i_{L2} がバランスするように電流平衡制御が適用される。しかしながら、電流センサで各相電流を検出し、当該制御を適用する場合であっても、電流センサのゲイン誤差(個体差)によって、各相インダクタ電流は不平衡となる。この場合、図3に示すように結合インダクタのトランス部にはインダクタ平均電流の差によって過剰な直流磁束が発生し、直流偏磁を引き起こす。従って、インダクタコアは磁化飽和を引き起こし回路内で過剰な電流が流れてしまうため、回路・磁気部品の信頼性が低くなってしまふ恐れがある。一方で、従来の独立したイ

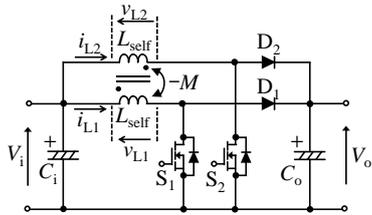


図2 2相マルチフェーズ昇圧コンバータ

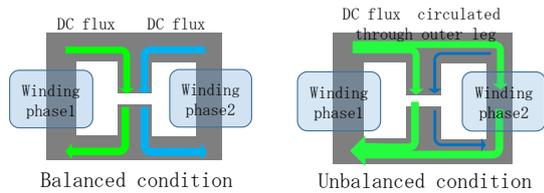


図3 電流アンバランス時の直流偏磁

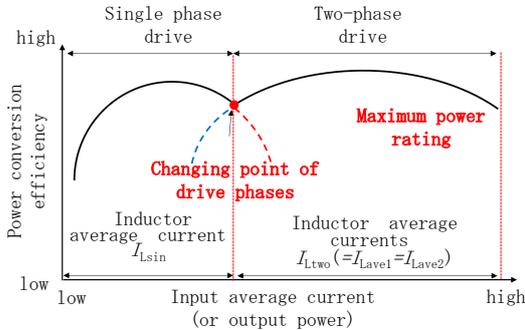


図4 駆動相数切り替え時の効率特性

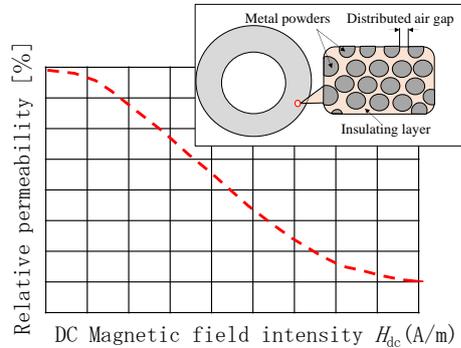


図5 ダスト系コアの比透磁率の非線形性

ンダクタの場合であると電流不平衡に対する磁気部品の堅牢性は高いが、小型化効果はなくなってしまふ。そこで本研究では、電流不平衡に対しても高い信頼性を持った結合インダクタの設計手法を確立することを目的とする。また、自動車などの電力変換器では、一充電での連続航続距離の向上のため、軽負荷から重負荷にかけて幅広い範囲で高効率化が求められる。これに対して本研究では、図4に示すように負荷領域に応じて駆動相数を切り替える制御 (Phase shedding control や Phase drive control などと呼ばれる) 搭載を想定した結合インダクタの設計方法確立を実施する。

(2) 放熱性能が高い統合磁気デバイスの確立に向けた材料モデリング・構造設計手法の開発と実機評価：自動車用途であると、磁性材料側の視点から、小型軽量化を目的にダスト系コア材が使用されることが多い。図5にダストコアの模式図を示す。ダストコアは鉄系の軟磁性金属粉末の表面を電氣的に絶縁処理し、プレス成形して構成される磁性体コアである。このダスト系コア材は飽和磁束密度が高く、小型なコアで高い電流時においても飽和しにくい特性を有する。また、構造自由度も高く、構造設計を検討する上でも有益な磁性材料の一つである。しかしながら、ダストコアは図5に示すように直流磁界の大きさによって非線形に比透磁率が変化する特性を有する。これに対して、本研究ではダストコアを用いた結合インダクタの設計手法の確立を目的に、数式による比透磁率のモデリング、直流重畳特性を考慮した設計手法、シミュレーション手法の確立と実機での評価を包括的に行うことを目的とする。また、発熱の抑制のため、異なる磁性特性を有するダスト系コア材を組み合わせた設計手法や構造についても検討を実施する。

3. 研究の方法

第2章で述べた研究の目的は下記の方法で検討を進める。

- (1) 実用性を考慮して信頼性を向上させる統合磁気デバイスの設計手法の確立と実機評価
 - ① 2相または3相化したマルチフェーズ方式昇圧コンバータ用結合インダクタにおいて等価磁気回路モデルを活用した高信頼磁気設計手法の確立:まず、結合インダクタはEEコア(3相化は4脚の立体型コア)を用いる場合を想定して、等価磁気回路モデルを構築し、電流不平衡率 δ (定義:完全平衡時と比較した時の誤差率で電流センサの個体差等を考慮して決定されるもの)を与えた状態で磁気回路モデルによる解析を実施する。その際に、電流不平衡率 δ を与えた状態において、直流偏磁を防止し従来の非結合インダクタと比較してもっとも小型化できる最適な結合係数を導出し、設計方法を確立する。具体的には、結合インダクタのトランス部(図3に示すEEコアの外側脚)にわずかなエアギャップを挿入し、直流偏磁による磁気飽和を防止する。また、実機での実証評価を実施する。
 - ② 広い負荷範囲での高効率化を実現するための駆動相数切り替え制御(phase shedding control)適用時における結合インダクタの設計手法の確立:駆動相数切り替え制御を適用すると片相駆動のため強いインダクタ電流不平衡状態となる。この場合においては、単相駆動時、2相駆動時それぞれの駆動条件において電氣的条件とコア内磁束密度条件を同時に満たすことができる磁気設計手法を確立とその実証評価を実施する。
- (2) 放熱性能が高い統合磁気デバイスの確立に向けた材料モデリング・構造の開発と実機評価
 - ① ダスト系コア材の非線形比透磁率モデリング手法と結合インダクタの直流重畳特性(漏れインダクタンス/相互インダクタンス)の測定方法の確立:ダスト系コア材は図5で示

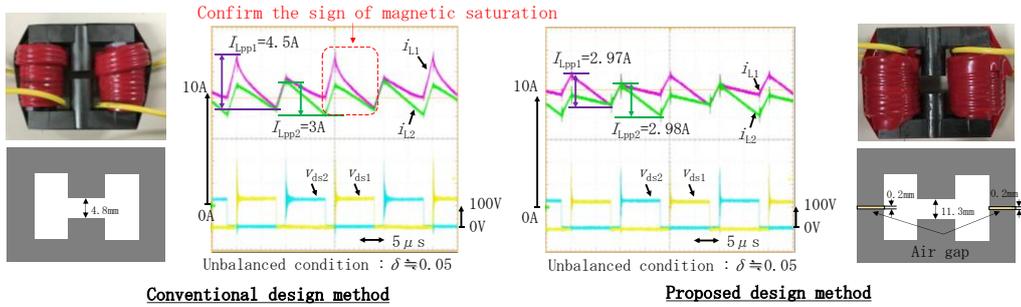


図6 実機動作波形の比較(左: 偏磁対策なし, 右: 偏磁対策あり(提案手法))

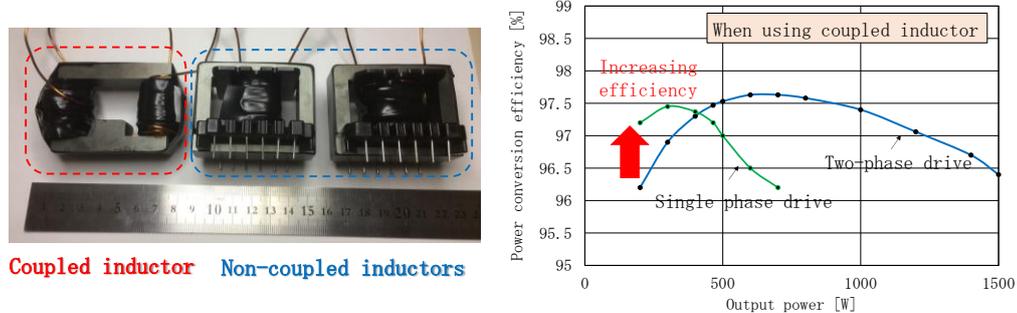


図7 負荷領域に応じて駆動相数変更を実施した場合のサイズ比較と効率

したように、直流磁界の大きさに応じて非線形に比透磁率が変化します。これに対してトロイダルコアに巻線を巻き付けて電流値を変化させながら、比透磁率を測定し、この測定した比透磁率を後々設計式にも活用できるように数式によるモデリング手法の確立を検討する。また、電源全体のフロントローディング設計ができるように、電気回路と磁気回路が連成可能なシミュレーションへの実装方法も併せて検討する。また、結合インダクタとした場合においても、直流重畳特性が実測できるような測定手法を構築する。

- ② ダスト系コア材を用いた「結合インダクタ」と「異なるダストコア材料を組み合わせたインダクタ」の設計手法とシミュレーション手法の確立：非線形な磁気抵抗を有する磁気回路用いた「結合インダクタ」と「広い負荷範囲で高効率化ができるインダクタ」の設計手法の確立を実施する。また、これらのシミュレーション手法の確立・実機での実証評価も実施する。また、放熱性能の高い磁気構造について検討する。

4. 研究成果

第3章で述べた研究方法と対応させる形で得られた研究成果について述べる。

- (1) 実用性を考慮して信頼性を向上させる統合磁気デバイスの設計手法の確立と実機評価

①については、2相と3相マルチフェーズ昇圧コンバータでの電流不平衡時に生じる直流偏磁への設計手法について検討を実施した。研究成果としては、結合インダクタに電流不平衡率 δ を与えた条件において、非結合インダクタと比較してもっとも小型化できる結合係数の導出に成功している。導出された結合係数を用いれば、直流偏磁に対する信頼性を高めながら結合インダクタの小型化性能を概ね最大にすることができる。図6に実験結果を示す。従来手法は直流偏磁の影響を全く考慮していない結合インダクタであり、各相電流に不平衡を与えた条件($\delta = 0.05$)では、磁気飽和の前兆現象が観測されているが、提案設計手法の場合、同条件でこの磁気飽和現象は見られず安定して動作していることが確認できる。また、導出した結合係数で設計すると、従来の非結合インダクタと比較しても十分な小型化性能を有していることが確認された。これらの内容については理論検証と実機検証の双方から妥当性を示している。この内容の詳細については、当該研究領域における有力ジャーナルに掲載されている。

②についても同様に、2相マルチフェーズ昇圧コンバータを例に、駆動相数変更時における磁気部品設計手法の検討を実施した。この場合での課題は、単相駆動時における偏磁防止と単相駆動時における循環電流の防止を目的に、結合インダクタの設計手法確立を実施した。得られた成果について従来の非結合インダクタと提案設計手法に基づいた結合インダクタのサイズ比較と結合インダクタの駆動相数変更時における効率特性を図7に示す。図7に示す通り、結合インダクタは従来の2つ用いるインダクタの手法と比較して小型化できていることが確認でき、実機面においても磁気飽和特有のひずんだ波形ではなく安定動作していることも確認できた。また、図7に示す通り、結合インダクタの効率測定を実施したところ、軽負荷時において片相駆動とすることで効率向上が確認でき、駆動相数を変更することの有効性についても確認することができた。

- (2) 放熱性能が高い統合磁気デバイスの確立に向けた材料モデリング・構造の開発と実機評価

①については、様々なダストコアを用いて磁界変化時における比透磁率の測定手法と数式による非線形比透磁率のモデル式の確立に成功した。数式による提案モデル式 ($\mu_r=1+(p/(1+(H/q)^r))$) は実測した比透磁率の測定値にモデル式の係数 (p, q, r) をフィッティングさせ、各係数を求めることで活用できる。実際に 5 種類のダストコアに適用した場合、この数式モデルは良好にフィッティングできており、インダクタ電流変化に応じて比透磁率が非線形に変化する場合でも、所望のインダクタンスを満たす設計が数値解析によって容易に実施することができる。また、シミュレーションへ反映させた場合でも、実機による電流波形と概ね一致しており、その妥当性についても確認することができた。この内容は当該研究領域における有力ジャーナルに掲載が決定している。また、結合インダクタは漏れインダクタンスと相互インダクタンスからなる磁気部品であるが、結合インダクタに関して直流電流重畳時における漏れインダクタンスと相互インダクタンスの測定方法についても確立した。

②については、(2)①で確立したモデリング手法を応用展開する形で、「結合インダクタ」と「高負荷範囲で高効率化が実現できる磁性特性の異なる複数のダストコア」に関して設計並びにシミュレーションへの実装手法を実施した。まず、ダストコアの結合インダクタについては、①で確立した磁性材料の比透磁率のモデル式を用いつつ、電磁界シミュレータによる磁気回路方程式の推定を実施した。これらを材料と構造から決定される磁気回路方程式をうまく組み合わせることによって、直流電流重畳時におけるダストコアを用いた結合インダクタの設計手法を確立することができた。

また、ダスト系コア材は様々な種類があり高磁界条件でも高い比透磁率を維持するコア（銅損低減に効果的で重負荷時の効率改善に寄与）や低鉄損性能のコア（軽負荷時の効率改善に寄与）をなどがあるが、これらを両方兼ね備えた磁性材料は研究代表者が知る限り、あまりない。これに対して、2 つ異なるダストコア（トロイダル形状で上記 2 種類のコアを併用するコア）を単一巻線で構成したインダクタについて提案・設計手法の確立・シミュレーション手法・実験評価まで実施した。これにより、提案インダクタは広い負荷範囲まで高効率化を実現することができ、材料の組み合わせによって広い負荷範囲で高効率化できることを確認した。

この研究期間内では、最終的に磁気構造を変えることによる放熱性能を高めた結合インダクタの“構造設計手法”の実証評価まではできなかったが、当該研究で得られた知見は材料モデリングに始まり、最終的にはフロントローディングデザインを実現するための基盤技術である。今後の展望として、確立したこれら基盤技術をベースに放熱性能を高めた磁気構造設計の実機評価を実施することである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) [Jun Imaoka](#), Kenkichiro Okamoto, Masahito Shoyama, Yuki Ishikura, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto, “Modeling, Magnetic Design, Simulation Methods, and Experimental Evaluation of Various Powder Cores Used in Power Converters Considering Their DC Superimposition Characteristics,” IEEE Transactions on Power Electronics, (Accepted for Publication). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2886044 (査読有)
- (2) [Jun Imaoka](#), Kenkichiro Okamoto, Shota Kimura, Mostafa Noah, Wilmar Martinez, Masayoshi Yamamoto, Masahito Shoyama, “A Magnetic Design Method Considering DC-Biased Magnetization for Integrated Magnetic Components Used in Multiphase Boost Converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, Iss. 4, pp. 3346-3362, DOI: 10.1109/TPEL.2017.2707385, Apr. 2018. (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

- (1) 青木 達也, [今岡 淳](#), 山本 真義, “圧粉磁心を用いた磁気結合リアクトルのモデル化,” 平成 31 年度電気学会全国大会, 平成 31 年 3 月 12 日, pp. 66. 北海道科学大学 (査読なし)
- (2) 伊藤 広一郎, 青木 達也, [今岡 淳](#), 石倉 祐樹, 山本 真義, “異なる磁性特性を有するパウダーコアを複合化させたインダクタの直流重畳特性シミュレーション評価,” 平成 31 年度電気学会全国大会, 平成 31 年 3 月 12 日, pp. 67. 北海道科学大学 (査読無)
- (3) 伊藤 広一郎, 青木 達也, [今岡 淳](#), 石倉 祐樹, 山本 真義, “異なる磁気特性を有するパウダーコアの複合化による DC/DC コンバータ用インダクタの性能向上に関する研究,” 平成 30 年電気学会産業応用部門大会, 平成 30 年 8 月 29 日, pp. 133-136, 横浜国立大学 (査読無)
- (4) [Jun Imaoka](#), Kenkichiro Okamoto, Masahito Shoyama, Yuki Ishikura, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto, “Modeling, Magnetic Design, and Simulation Methods Considering DC Superimposition Characteristic of Powder Cores Used in Power Converters,” in Proc. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018), 22th May. 2018, pp. 1095-1102, Niigata, Japan (査読有)
- (5) 岡本 賢吉朗, [今岡 淳](#), 庄山 正仁, “マルチフェーズ DC/DC コンバータ用統合磁気デバ

イスの直流重畳特性の測定手法について,” 電子情報通信学会 電子通信エネルギー技術研究会(EE), 平成 30 年 1 月 22 日, Vol. 117, No. 424, EE2017-66, pp. 139-144, サテライトキャンパスおおいた (査読無)

- (6) Jun Imaoka, Kenkichihiro Okamoto, Masahito Shoyama, Mostafa Noah, Shota Kimura, Masayoshi Yamamoto, “A High-Reliable Magnetic Design Method for Three-Phase Coupled Inductor Used in Interleaved Multi-Phase Boost Converters,” in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2017), 2th Oct. 2017, pp. 873-880, Cincinnati, OH, USA (査読有)
- (7) 岡本 賢吉朗, 今岡 淳, 庄山 正仁, “ダストコアを用いたマルチフェーズ DC/DC コンバータ用統合磁気デバイスの設計手法について,” 平成 29 年度電気・情報関連学会九州支部連合大会, 平成 29 年 9 月 28 日, 論文番号: 02-2P-10, 琉球大学 (査読なし)
- (8) 岡本 賢吉朗, 今岡 淳, 庄山 正仁, “EE 形状のダストコアを用いたインダクタのモデリングと実証的評価,” 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 平成 29 年 8 月 29 日, pp. 609-610, 函館アリーナ (査読無)
- (9) Jun Imaoka, Kenkichihiro Okamoto, Masahito Shoyama, Daigoro Ebisumoto, Shota Kimura, Mostafa Noah, Masayoshi Yamamoto, “Magnetic Design and Experimental Evaluation of Integrated Magnetic Components Used in Interleaved Multi-phase DC/DC Converter with Phase Drive Control,” in Proc. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017), 6th Jun. 2017, pp. 2192-2197, Kaohsiung, Taiwan. (査読有)
- (10) 岡本 賢吉朗, 今岡 淳, 庄山 正仁, “ダスト系コア材における直流重畳特性のモデリングと設計手法の実証的評価,” 電子情報通信学会 電子通信エネルギー技術研究会(EE), 平成 29 年 1 月 19 日, Vol. 116, No. 429, EE2016-54, pp. 33-38, 長崎大学 (査読無)
- (11) Jun Imaoka, Kenkichihiro Okamoto, Daigoro Ebisumoto, Shota Kimura, Masayoshi Yamamoto, Masahito Shoyama, “A Novel Design Method of Integrated Magnetic Components Used in Two-phase Interleaved Converter with Phase Drive Control,” in Proc. of The 3rd Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC), 14th Oct. 2016, pp. 52-53, Nagaoka, Japan. (査読有)
- (12) 今岡 淳, 岡本 賢吉朗, 庄山 正仁, 木村 翔太, 山本 真義, “高電力密度マルチフェーズ DC/DC コンバータ用統合磁気デバイスの直流偏磁を補償する設計手法とその実証的評価,” 平成 28 年度電気学会産業応用部門大会, 平成 28 年 8 月 30 日, pp. 67-70. 群馬大学 (査読無)

[図書] (計 1 件)

- (1) 今岡 淳, 他 66 名, 出版社: 技術情報協会, 2018 年 3 月 “磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術,” 担当箇所: 第 10 章第 4 節 (pp. 437-445), 書籍全体のページ数 pp. 1-572.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

名古屋大学パワーエレクトロニクス研究室ホームページ,

URL: <http://pelab.imass.nagoya-u.ac.jp/>

名古屋大学研究者検索(今岡 淳)

URL: http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100010131_ja.html

九州大学庄山研究室ホームページ, URL: <http://ckt.ees.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 岡本 賢吉朗, 伊藤 広一郎

ローマ字氏名: (OKAMOTO Kenkichihiro), (ITO koichiro)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。