

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14635

研究課題名(和文) 13.56MHz出力スイッチング高周波電源を実現する周波数逓倍技術に関する研究

研究課題名(英文) Frequency Multiplying Technique realizes 13.56 MHz High-Frequency Output Power Supply using Switching Method

研究代表者

折川 幸司 (ORIKAWA, Koji)

北海道大学・情報科学研究院・助教

研究者番号：50781324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はISMバンドである13.56MHzの高周波電力が出力可能な小型・高効率のスイッチング高周波電源を実現することである。提案するマルチコアトランスを用いた高周波出力電源は従来回路の絶縁トランスやインピーダンス整合回路に適用が困難とされていた高透磁率・高飽和磁束密度の磁性材料が適用可能であり、磁性材料の動作周波数の限界を超える周波数を出力可能である。本研究の成果は(1)高帯域なトランスを実現するための二次側巻線構造、(2)出力周波数成分が鉄損に与える影響と周波数逓倍回路の連続運転、(3)一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整可能な巻線ガイド、の実機検証である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力変換回路に無くてはならない半導体素子の開発は今後更なる加速が求められる重要な産業であり、本研究の成果が半導体素子開発に必要な高周波出力電源の高効率化に寄与し、半導体素子の開発コスト低減や革新的半導体素子開発の一助になることが期待される。また、電力変換回路は磁性材料の動作周波数の限界によってその性能やアプリケーションが限定されてしまうことが多い。それに対して、本研究による成果によって磁性材料の動作周波数の限界に依らない電力変換回路の一例を示した点は学術的に大きな価値がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize a small-size and high-efficiency 13.56 MHz high-frequency output power supply using a switching method. The proposed circuit using a multi-core transformer can adopt magnetic materials whose permeability and saturation magnetic flux density are high, which are difficult to be applied to an isolation transformer and an impedance matching circuit in conventional high-frequency output power supplies. The research results are as follows: (1) A secondary winding structure realizes a high-bandwidth transformer was developed, (2) The influence of the output frequency to the iron loss and continuous operation of the proposed circuit was experimentally confirmed, and (3) A wire guide which can adjust a leakage inductance while a coupling capacitance between a primary winding and a secondary winding is managed, was developed.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：周波数逓倍 高周波出力 トランス 鉄損 巻線ガイド 寄生容量 結合容量 漏れインダクタンス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーの省エネ技術として高効率な電力変換技術が盛んに研究されている。特に近年、電力変換器を構成する半導体スイッチの高速スイッチング化、低損失化の開発が急速に推し進められている。半導体を製造するためには 13.56 MHz を代表とする ISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドのプラズマが使用されている。そのため、図 1 に示すような ISM バンドの周波数を出力する電源が必要であり、従来は半導体スイッチの線形領域を用いた線形増幅回路による高周波出力電源が使用されてきた。しかしながら、線形増幅回路は低ひずみな正弦波を出力できる一方で、理論的な電力変換効率が低く、電気料金のランニングコストが大きいこと、そして大型な冷却システムによる大規模な設置面積や大重量が問題であった。

一方、高周波出力電源とプラズマ負荷の間にはトランスやリアクトルなどの磁性材料とコンデンサを用いたインピーダンス整合回路が挿入される。高周波においては特に磁性材料による鉄損が大きく、磁性材料を冷却するための冷却システムが大型化する問題がある。また、13.56 MHz に対して低損失な磁性材料と言われる Ni-Zn は鉄損密度の観点から実用的な最大磁束密度は低く、プラズマ電源のような大電力用途に適した材料とは言えない。さらには、半導体スイッチの低損失化と比較して磁性材料の低鉄損化に関してはまだ研究レベルの段階が多く、実用の観点からは低鉄損材料の登場にはまだまだ時間が必要であると言わざるを得ない。

以上の背景に対して、半導体スイッチの高速化や低損失化を実現するゲートドライブ回路技術が発展してきており、高周波スイッチングにおいても比較的低損失な電力変換回路が実用化されてきている。また、インピーダンス整合回路の鉄損を抑制するために、磁性材料に頼らず空芯トランスや空芯リアクトルを適用する例がある。しかし、巻線量の増加による銅損の増加や漏洩磁界の課題があり、必ずしも磁性材料を用いないインピーダンス整合回路が効率の点で有利であるとは断言できない。この問題に対して、本研究は出力周波数に対して磁性材料の動作周波数を低減することで、インピーダンス整合回路に使用するトランスの鉄損を抑制可能な周波数通倍回路の実証を行う。研究代表者はこれまでに周波数通倍回路の基本的な原理を確認しているが、(1) 高帯域のトランスを実現するための二次側巻線構造、(2) 出力周波数成分が鉄損に与える影響と周波数通倍回路の連続運転、(3) トランス一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整する方法、については未検討であった。

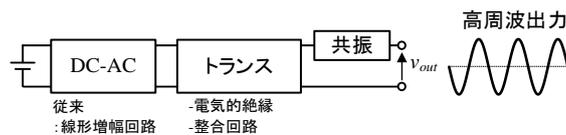


図 1 研究対象とする高周波出力電源の構成

2. 研究の目的

本研究の目的は ISM バンドである 13.56MHz の高周波電力が出力可能な小型・高効率のスイッチング高周波電源を実現することである。図 2 に提案する高周波出力電源の回路構成、図 3 に Mn-Zn 系コアの透磁率の周波数特性を示す。位相シフト制御を適用した多相インバータに複数のコアを用いたマルチコアトランスを用いることにより、磁性材料の鉄損の原因となる磁性材料の動作周波数を出力周波数に対してインバータの相数分の 1 に低減することができる。この結果、Ni-Zn よりも低い動作周波数で高透磁率かつ低鉄損な Mn-Zn を使用することができる。したがって、提案する高周波出力電源は従来回路の絶縁トランスやインピーダンス整合回路に適用が困難とされていた高透磁率・高飽和磁束密度の磁性材料が適用可能であり、磁性材料の動作周波数の限界を超える周波数を出力可能である。以下に課題を示す。

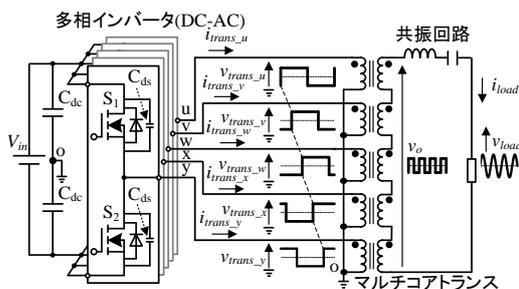


図 2 提案する周波数通倍回路

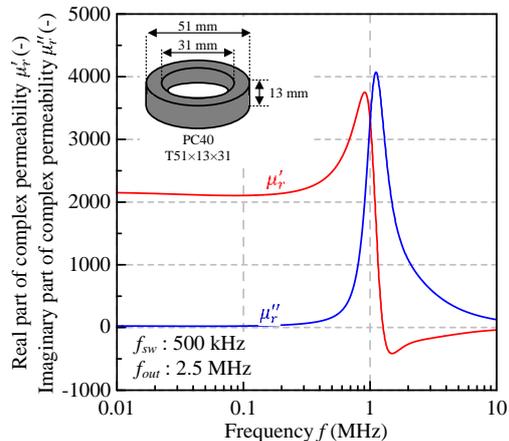


図 3 Mn-Zn 系コアの透磁率の周波数特性

(1) 高帯域なマルチコアトランスを実現するための二次側巻線構造の開発

提案回路によって磁性材料の動作周波数を低減できるものの、マルチコアトランス二次側にはその動作周波数を超える周波数が発生するため、マルチコアトランスには高帯域までトランスとして動作する周波数特性が求められる。しかし、マルチコアトランスの二次側端子間に発生する寄生容量と二次側換算の漏れインダクタンスによってマルチコアトランスの周波数特性が決定される。以上の課題に対して、本研究では高帯域なマルチコアトランスを実現するための二次側巻線構造を提案する。

(2) 出力周波数成分が鉄損に与える影響と周波数通倍回路の連続運転の検討

提案回路によって出力周波数に対してトランスの励磁周波数を小さくできる。しかし、トランス二次側に流れる出力周波数成分によってコアに誘起される出力周波数成分の磁束を打ち消すために、インバータにはトランスの励磁電流に加えて出力周波数成分の電流も流れる。したがって、トランス一次側の巻線抵抗や漏れインダクタンスに出力周波数成分の電圧降下が生じ、励磁電圧にはインバータのスイッチング周波数成分に加えて出力周波数成分が重畳する。そこで本研究では、励磁電圧に重畳する出力周波数成分がトランスの鉄損に与える影響を評価し、実用的な周波数通倍回路のトランスの設計方針を示す。また、その設計方針に基づいたトランスを用いて出力周波数成分の鉄損を抑制した周波数通倍回路が連続運転可能であることを確認する。

(3) トランス一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整可能な巻線ガイドの開発

MHz で動作するトランスにおいては一次巻線-二次巻線間の結合容量のインピーダンスが小さくなり、その結合容量を流れる高周波電流がインバータの出力電流や負荷電流に重畳し、プラズマの品質低下、余分な銅損増加やフィルタ回路の追加を引き起こす。それに加えて、共振回路の設計の複雑化を招く。そこで本研究では、一次巻線-二次巻線間の結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整可能な巻線ガイドを用いたトランスを提案する。

3. 研究の方法

第2章で述べた研究目的は以下の方法によって達成した。

(1) 高帯域なマルチコアトランスを実現するための二次側巻線構造の開発

図4にトランス二次側巻線を1ターン毎に貫通して各コアに巻く方式(低結合マルチコアトランス)と全ターン数を巻いた後に各トランスの二次側を接続する方式(高結合マルチコアトランス)を示す。両者のマルチコアトランスの二次巻線間の等価寄生容量と二次側換算の漏れインダクタンスによって決まるトランスの周波数特性を実測する。

(2) 出力周波数成分が鉄損に与える影響と周波数通倍回路の連続運転の検討

図5に示す周波数通倍回路を簡易的に模擬した単相の高次共振回路を用いた鉄損測定の実験を行う。これにより、出力周波数がマルチコアトランスのヒステリシス損失に与える影響を明らかにし、トランスの設計方針を検討する。

また、提案回路の連続動作試験を行い、マルチコアトランスの発熱を観測し、出力周波数成分による大きな鉄損の発生が無いことを確認する。

(3) トランス一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整可能な巻線ガイドの開発

図6に提案する巻線ガイド付きトランスのモデル図を示す。トロイダルコアの内側と外側に一次巻線と二次巻線を固定するための巻線ガイドを実装する。本研究においては巻線ガイドの厚みを調整することで、トランス一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整できることを確認する。巻線ガイドは3Dプリンターで製作する。

4. 研究成果

第3章に示した方法を用いて以下の研究成果を得た。

(1) 高帯域なマルチコアトランスを実現するための二次側巻線構造の開発

図7に試作したマルチコアトランスの写真を示す。測定結果より、高結合マルチコアトランスにおいてトランス二次側換算の寄生容量はやや増加するものの、トランス二次側換

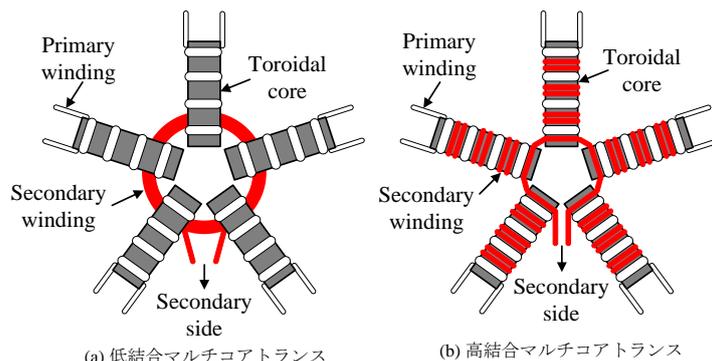


図4 トランス構造の比較

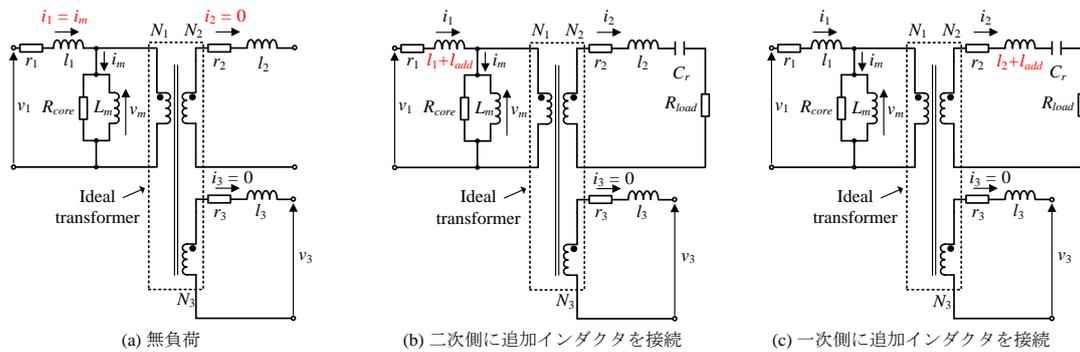


図5 周波数通倍回路を簡易的に模擬した高次共振回路を用いた鉄損測定回路

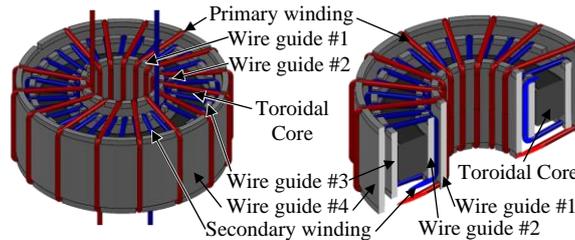


図6 巻線ガイド付きトランスのモデル図

算の漏れインダクタンスが増加することから高帯域までインピーダンスが誘導性であり、周波数通倍回路のトランスとして動作可能であることを確認した。また、各トランスの二次側は直列接続になることから、トランス二次側に一括で共振インダクタンスを集約でき、部品点数の観点から好都合であることが新たな知見であった。また、高結合なマルチコアトランスにおいて二次側寄生容量の増加が予想より小さかったことは、マルチコアトランスの二次側寄生容量によってインバータの出力電流に進み位相成分が重畳し、ゼロ電圧スイッチングが不十分となる懸念は軽減されていると言える。なお、本研究成果については査読付国際会議にて発表している。

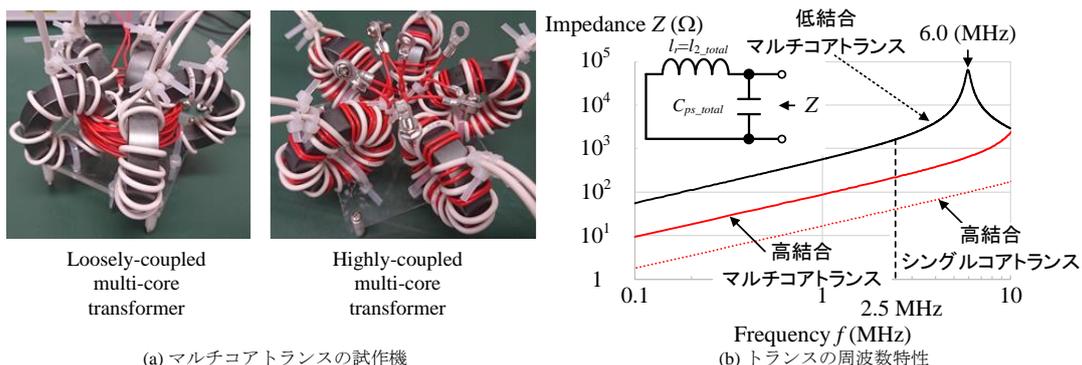
(2) 出力周波数成分が鉄損に与える影響と周波数通倍回路の連続運転の検討

図8に測定した励磁電圧と励磁電流、図9にB-Hカーブと鉄損の測定結果を示す。この結果、トランス二次側で主に共振インダクタンスを実現することで出力周波数成分が鉄損に与える影響を低減できることを実証した。また、図10に2.5 MHz出力における周波数通倍回路の動作波形、図11に試作機のマルチコアトランスの温度上昇を示す。283V入力で360W出力を90分間、磁性材料が極端に発熱することなく連続運転することを確認した。なお、鉄損の評価については査読付国際会議にてダイジェストが採択されている。また、連続運転動作については査読付和文雑誌論文に現在投稿中である。

(3) トランス一次巻線-二次巻線間結合容量を管理しつつ漏れインダクタンスを調整可能な巻線ガイドの開発

図12に試作した巻線ガイド付きトランスの写真、図13にその一次巻線-二次巻線間の結合容量と漏れインダクタンスの測定結果を示す。実験結果より、ガイドの厚みを調整するだけで一次巻線-二次巻線間の結合容量をほぼ一定に保ちつつ、漏れインダクタンスのみを変化させられることを確認した。

今回の研究期間内では提案する巻線ガイドを適用したマルチコアトランスを用いた



(a) マルチコアトランスの試作機

(b) トランスの周波数特性

図7 マルチコアトランスの試作機とそのインピーダンスの周波数特性

13.56 MHz 出力の実証実験までには至らなかったが、本研究で得られた研究成果は MHz で動作するインピーダンス整合回路としてのトランスの結合容量と漏れインダクタンスを適切に管理・調整する技術の一例を実証したことである。今後は、巻線ガイドを適用した適切にパラメータを管理したマルチコアトランスを用いて 13.56 MHz 出力を実機検証する。

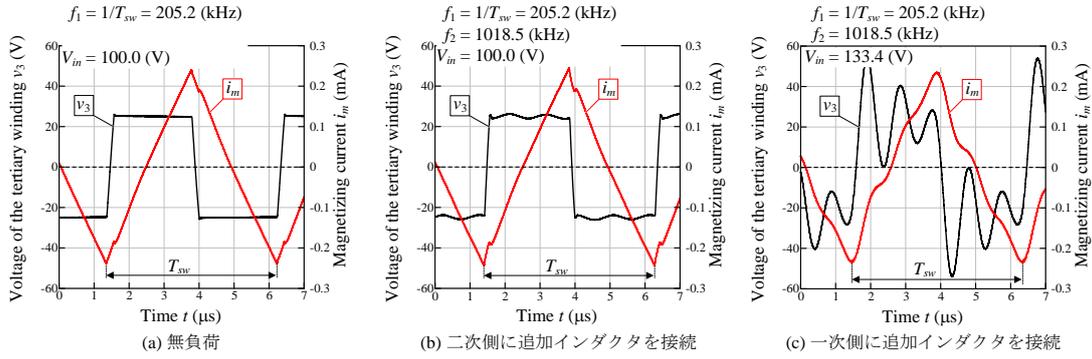


図 8 周波数適倍回路を簡易的に模擬した鉄損測定法による励磁電圧と励磁電流の測定結果

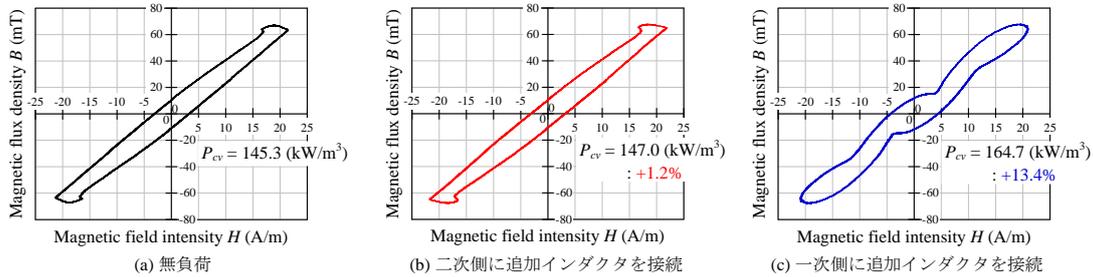


図 9 ヒステリシスループと鉄損

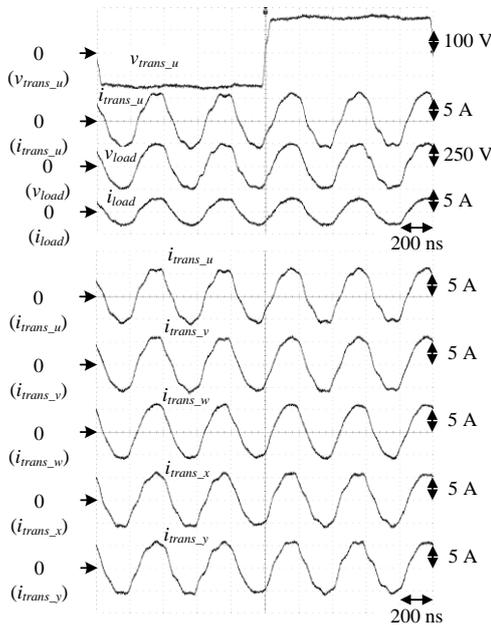


図 10 連続運転動作波形

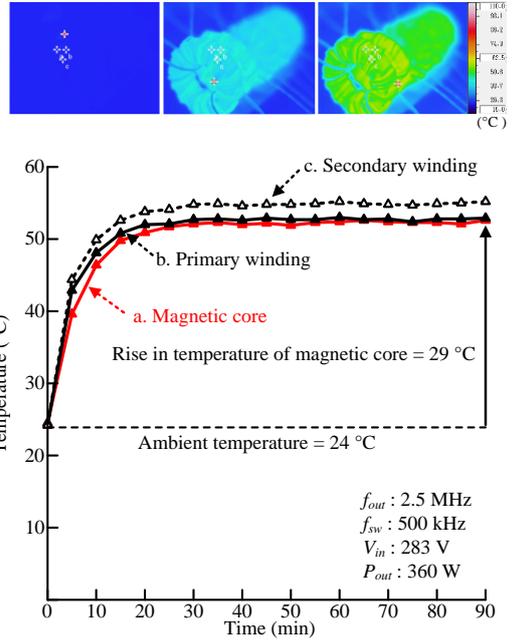


図 11 試作機のマルチコアトランスの温度上昇

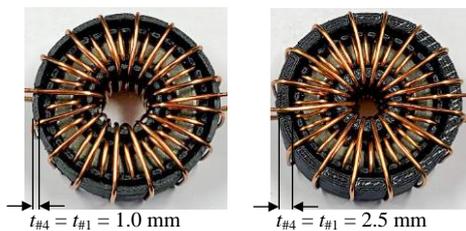


図 12 試作した巻線ガイド付きトランス

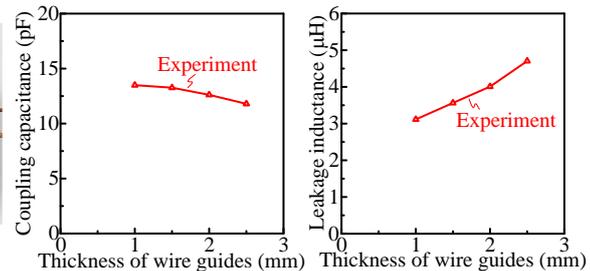


図 13 結合容量と漏れインダクタンス

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shogo Nishikawa, Koji Orikiawa, Satoshi Ogasawara and Masatsugu Takemoto
2. 発表標題 Verification of Iron Loss Affected by Secondary Frequency in Multi-core Transformer for Frequency Multiplying Circuit
3. 学会等名 The 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koji Orikiawa, Satoshi Ogasawara, Masatsugu Takemoto and Jun-ichi Itoh
2. 発表標題 A Frequency Multiplying Circuit Containing a High-frequency Output Inverter and an Impedance Matching Transformer
3. 学会等名 IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折川幸司, 小笠原悟司, 竹本真紹, 伊東淳一
2. 発表標題 周波数逡倍回路を用いた高周波出力インバータの損失の検討
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折川幸司, 小笠原悟司, 竹本真紹, 伊東淳一
2. 発表標題 周波数逡倍 MHz 出力インバータにおけるマルチコアトランスの二次巻線電圧に関する検討
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Orikawa, Satoshi Ogasawara, Masatsugu Takemoto and Jun-ichi Itoh
2. 発表標題 Investigation of Secondary Winding Structure in Multi-Core Transformer in MHz Inverter using Frequency Multiplying
3. 学会等名 The 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>北海道大学電気エネルギー変換研究室ホームページ https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/eec/index.html 北海道大学研究者総覧(折川 幸司) https://researchers.general.hokudai.ac.jp/profile/ja.7ad3b54b4f05ce35520e17560c007669.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小笠原 悟司 (OGASAWARA Satoshi)		
研究協力者	竹本 真紹 (TAKEMOTO Masatsugu)		
研究協力者	伊東 淳一 (ITOH Jun-ichi)		