

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：52601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04456

研究課題名（和文）電力変換装置用リアクトルの高周波数適用に向けた空間的巻線実装技術の研究

研究課題名（英文）Research on Spatial Winding Technique of Reactors for High Frequency Power Converter Systems

研究代表者

綾野 秀樹 (Ayano, Hideki)

東京工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：50614525

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）：本研究では、電力変換装置に使用するリアクトルを対象にメガヘルツ帯の高周波数で使用できるリアクトルに関する実装技術を確立した。シミュレーションと実測により詳細な評価を実施し、次の成果を得た。(1)巻線部分の特性を評価するために、空芯コイルに対して評価を実施した結果、巻線間寄生容量は巻数を増加させてもほぼ一定になることを明らかにした。(2)分割巻きリアクトル構造に対して、3Dプリンタで作成したコアカバーを使用して巻線-コア間の寄生容量の影響を小さくする方法を提案した。(3)提案リアクトルを実測評価した結果、従来よりも寄生容量を約1/4にでき、リアクトル特性を有する周波数範囲を2倍に増加できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電力変換装置において高周波数で使用できるリアクトルを提案した。提案リアクトルにより電力変換装置の駆動周波数の限界点を高くできるため、装置内で比較的占有容積の大きいリアクトルに対して小型軽量化を実現できる。また、この研究では、コアカバーを使用してリアクトル巻線の空間的な実装形態を工夫し、リアクトルの寄生容量成分を低減させている。これにより、リアクトルの高周波特性を向上できることについて理論的・実験的に実証した点は学術的独自性がある。さらに、本研究は、電力変換装置技術の発展(次世代半導体素子の潜在的な能力の有効利用、産業製品に適用した場合の環境負荷軽減)に寄与できる点で工学的に意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, I have established a technique for creating reactors that can be used at high frequencies in the megahertz band in power converter systems. The following results have been obtained through detailed evaluations by simulation and experiment. (1) In order to evaluate the characteristics of coil windings, I first evaluated air core inductors. As a result, it was found that the parasitic capacitance between windings became almost constant even when the number of turns was increased. (2) A method was proposed to reduce the adverse effects of parasitic capacitances between the windings and core with a core cover made by 3D printer for a separate winding method. (3) The proposed reactor was evaluated experimentally. As a result, the parasitic capacitance could be reduced to about 1/4 of that of a conventional reactor, and the frequency range over which the reactor can operate can be doubled.

研究分野：工学

キーワード：リアクトル 寄生容量 高周波 シミュレーション 電力変換器 コアカバー

1. 研究開始当初の背景

(1)電力変換装置に使用する半導体素子として、次世代パワー半導体と呼ばれる炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を用いる素子が実用化され始めていた。製品例としてもキャリア周波数5MHzの装置が販売された。次世代パワー半導体を使用することにより低損失で高周波数の駆動が実現できることから、大幅な機器の小型軽量化や高効率化が期待されていた。

(2)リアクトルは、理論上は周波数に比例してインピーダンスが増加し電力変換装置に流れる電流に重畳する電流リップルなどを小さくできる。これは、リップル幅を一定にする場合には、駆動周波数が高いほどインダクタンス値を小さくできることと等価である。リアクトルは容積・重量とも大きな部品であるため、その小型軽量化はシステム全体の小型軽量化に直結する。しかし、実際には、駆動周波数を増加する場合は寄生容量の影響を受け、リアクトルのインピーダンス特性が劣化する。このため、駆動周波数の高周波数化には限界があった。

(3)研究代表者らは、トロイダルコアの内穴部分に装着するガイドを用いた電力変換装置向けの高周波リアクトルを提案していた。これにより、内穴部分の空間を利用して巻線間や巻線-コア間の寄生容量を低減させる点が特徴である。

2. 研究の目的

(1)数十Wから数十kWの電力変換装置に用いるリアクトルを対象に巻線に対する実装形態を最適化し、寄生容量を低減することで高周波特性を向上できることを理論的・実験的に実証する。

(2)まず、空芯コイルを対象に巻線形態についてシミュレーションにより検討する。空芯コイルは、鉄心コアの磁気特性に依存しないため、巻線実装のみの考察による高周波数適用の原理解明の見通しも高まる。

(3)空芯リアクトルの巻線形態の知見を活かし、トロイダルリアクトルについて、コアカバーを使用したリアクトルの巻線に対する空間的な実装形態を検討する。さらに、寄生容量成分を低減して高周波特性を向上できるリアクトルを提案し、試作することでその効果を検証する。

3. 研究の方法

(1)電磁界シミュレータ JMAG を使用して空芯コイルの巻線形態に対する特性を評価する。この評価により、リアクトルに存在する巻線間の寄生容量と巻線-コア間の寄生容量のうち、前者に着目した評価に相当する。この結果から、先に報告されている分割巻き構造による寄生容量低減のメカニズムを解明する。

(2)巻線と磁性体の間に空気ギャップを設けるために、コアカバーを装着したトロイダルリアクトルを製作し、評価を実施する。コアカバーは3Dプリンタを用いて作成する。これにより、巻線間の寄生容量に着目した評価が可能になる。実測評価により、分割巻き構造の寄生容量低減メカニズムについて検証する。

(3)上記の知見を活かし、3次元的な巻線構造の観点からより寄生容量の低減に向けたリアクトルの巻線構造に対する考察を実施する。

4. 研究成果

(1)空芯リアクトルによる巻線間規制容量の評価

シミュレーションモデル

図1に、一般的に用いられるリアクトルの高周波等価回路を示す。ここで、 C_{tt} 、 C_{tc} は、それぞれ、巻線間、および、巻線-コア間の寄生容量である。これらの寄生容量は、極めて小さいため、商用周波数程度の周波数ではインピーダンスは大きく無視できる。しかし、高周波数ではインピーダンスが小さくなり無視できなくなる。

図2に、リアクトルにおける実際の寄生容量のイメージ図を示す。特に、巻線間隔が狭いリアクトルでは、隣り合う巻線間だけでなく、その隣の巻線間の寄生容量も影響する。また、巻線-コア間の寄生容量も複雑に構成されることになる。本研究では、分割巻きの定量的評価をするために、巻線間の寄生容量と巻線-コア間の寄生容量を分離して考え、まず、前者に着目してシミュレーション評価を実施する。

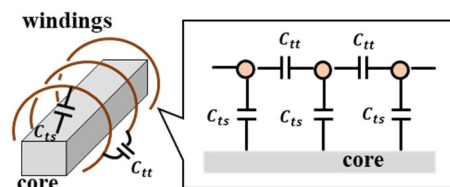


図1 一般的に用いられるリアクトルの高周波等価回路

巻線数をパラメータとした寄生容量の特性

本評価では、電磁界解析ソフト JMAG を使用し、有限要素法により巻線間の寄生容量を導出する。

特に、巻線間の寄生容量のみに着目するため、シミュレーションモデルも空芯リアクトルとして考える。この場合、図1の従来のリアクトルの高周波等価回路では、巻線間の寄生容量 C_{tt} のみを考慮することになり C_{tt} の直列接続の形態になる。このため、巻数を n とする場合には、合成容量 C_s は C_{tt}/n となり、巻数増加に伴って減少することになる。なお、後述するトロイダルリアクトルの断面形状は四角形であるが、本シミュレーションでは図3のように1ターン辺りの巻線長(101.2 mm)が等しくなるようなソレノイドコイル(コイル径 $D = 32.2$ mm) に近似して評価する。また、導線半径 r は 0.3 mm とし、巻線間隔 p が 1.0 mm, 1.2 mm, 2.4 mm の場合について評価する。

図4にコイル巻線の巻数をパラメータとした場合の寄生容量の特性を示す。いずれの p においても、巻数を増加しても寄生容量は大きく変化せず 0.7 pF 程度であることが判る。この結果は、図1のモデルから C_{tt} の直列接続と考えると得られる結果と異なる。これは、実際のリアクトルでは、図2に示すように、寄生容量は複数の巻線間に複雑に影響することによる。この影響は、巻線間隔が小さいほど大きいと考えられ、図1の従来の等価回路では表現することが難しいことが判る。

コイルの分割構造に関する考察

図4のシミュレーション結果に基づいて分割構造を考察する。図5に、連続巻き、分割巻きリアクトルの概略図を示す。ここで、図5(a)の連続巻きリアクトルの巻数および合成容量を、それぞれ、 n_a 、 C_s とする。この場合、図5(b)の分割巻きリアクトルでは、2分割した分割部分の巻数は、それぞれ、 $n_a/2$ となる。図4の結果より、寄生容量は巻数を増加させてもほとんど変化しないことから、図5(b)の分割巻きリアクトルの各分割部分の合成容量は C_s と考えることができる。さらに分割部分は容量的に切り離されていると考え、それぞれの分割部分の合成容量 C_s が直列接続しているのみならずことができ、全体の合成容量は $C_s/2$ となる。このため、分割巻きリアクトルは連続巻きリアクトルよりも寄生容量を半減できると考える。

(2)寄生容量を低減可能なリアクトルの提案

コアカバーの概要

図6に、評価に使用するトロイダルコア(東邦亜鉛製ダストコア HK 36D)の写真とサイズを示す。本研究では、巻線間の寄生容量と巻線-コア間の寄生容量を分離するために図6のトロイダルコアにカバーを装着し、巻線-コア間の距離を十分設ける形態とする。

図7、コアカバーの外形図を示す。コアカバーは、3Dプリンタを使用して紫外線硬化樹脂により作成する。内穴部と側面部の厚さは 2 mm としており、上面部と底面部は支柱部分を除いて空洞の構造である。また、内穴部の内側には導線中心間の距離を均一(1.2 mm)に保てるように溝を設けている。(トロイダルコアの中心から6度毎に溝を掘っているため、内側面1周で60個の溝がある。)

図8に、コアカバーを装着した場合の写真を示す。トロイダルコアは東邦亜鉛製ダストコア(HK-36D)を用いている。コアカバーを装着することでトロイダルコアの周囲に対して 5 mm の空隙(上面部と底面部では空気ギャップ 5 mm, 側面部と内穴部では紫外線硬化樹脂 2 mm + 空気ギャップ 3 mm)を設けることができる。この空隙は巻線間隔に対して十分に大きいため、巻線-コア間の寄生容量を極めて小さくでき、その影響を小さくできる。これにより、巻線間の寄生容量のみに焦点を絞って評価できる。なお、コアカバーを装着することで漏れ磁束の増加が懸念されるが、トロイダルコアの比透磁率は十分に大きいため、漏れ磁束の影響は小さいと考える。

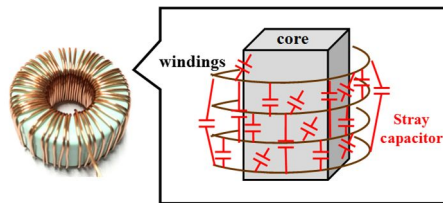


図2 リアクトルにおける実際の寄生容量のイメージ

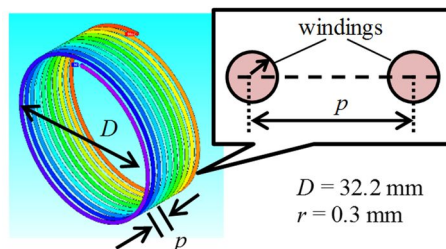


図3 シミュレーションの概要図

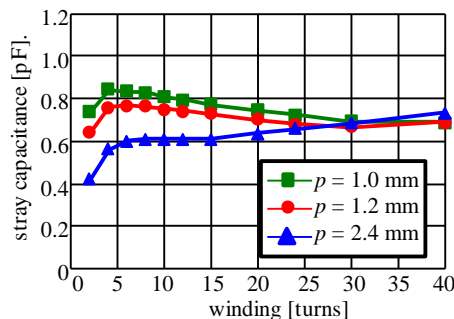
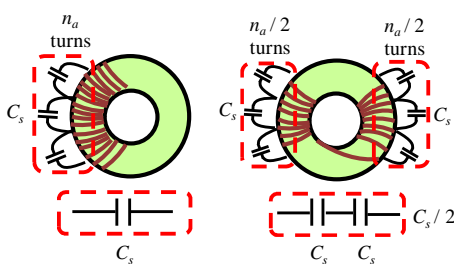


図4 コイル巻線の巻数をパラメータとした場合の寄生容量特性



(a)連続巻き (b)分割巻き

図5 連続巻き、分割巻きリアクトルの概略図

巻線数をパラメータとした寄生容量の特性

コアに直接巻線を施したリアクトルとコアカバーにより空気ギャップを設けたリアクトルについて、巻線数を変化させた場合の寄生容量特性を評価する。寄生容量は、インピーダンスアナライザ (ZA57630: NF 回路設計ブロック製) で得られた各リアクトルのインピーダンスの周波数特性から導出する。なお、対照評価として、(i) 図 8 のコアカバー部分において空気ギャップを設けず樹脂材で巻線-コア間の距離 5 mm を確保したリアクトル、(ii) コアカバーを設けず、巻線を巻いたリアクトルについても評価を実施する。

図 9 に、巻数を変化させた場合の各リアクトルの寄生容量特性を示す。空気ギャップを設けたリアクトルでは、巻数を増加させた場合でも寄生容量は大きく変化せず、0.7 pF 程度となる。この結果は、図 4 のシミュレーションの結果ともよく一致する。すなわち、巻線間隔が狭い実際のリアクトルでは寄生容量は複数の巻線間に複雑に影響するため、図 1 の従来同等回路では表現することが難しいことが判る。また、電界解析により、寄生容量の特性を定量的に評価できることも確認できる。樹脂材でギャップを設けた連続巻きリアクトル、および、直接巻線を施した連続巻きリアクトルでは、巻数が増加すると寄生容量が増加する。これは、巻数が増加する程、巻線-コア間の寄生容量が増加しているためである。特に、直接巻線を施した連続巻きリアクトルの場合は、巻数増加に対する巻線-コア間の寄生容量の増加率が高く、寄生容量に与える影響が大きいことが判る。

提案リアクトルにおける寄生容量の特性

空気ギャップを設けたリアクトル、直接巻線を施したリアクトルを使用し、それぞれ、連続巻き、分割巻きにおいて巻数を 30 巻きとした場合の寄生容量の周波数特性を評価する。図 10 に、空気ギャップを設けた連続巻きおよび分割巻きリアクトルの寄生容量の周波数特性を示す。100 kHz のインピーダンスをインダクタンスによるものと見なした場合、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、141 μ H、132 μ H となり、ほぼ等しくなる。一方で、共振周波数は、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、15.7 MHz、22 MHz となり、分割巻きの方が 1.4 倍程度大きくなる。(分割巻きの場合は第 2 共振点、第 3 共振点の影響でさらに高い周波数に共振点があるように見えるが、位相特性を見ると約 22MHz (第一共振点) で一旦位相が低下している。) また、連続巻きおよび分割巻きの場合の寄生容量は、それぞれ、0.72 pF、0.39 pF となり、分割巻きリアクトルでは半減する。この結果は、前節で示した考察の結果とよく一致している。つまり、巻線間の寄生容量 C_{tt} に着目し、電界解析で寄生容量を見積もることで分割巻きの効果を定量的に説明できる。また、分割巻きで共振点が高周波数側に移動することにより、リアクトルがインダクタンスと見なせる領域が広がることから、電力変換器の高周波数化に効果があることも確認できる。

図 11 に、樹脂材でギャップを設けた連続巻きおよび分割巻きリアクトルの寄生容量の周波数特性を示す。100 kHz のインピーダンスをインダクタンスによるものと見なした場合、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、140 μ H、132 μ H となり、空気ギャップを設けたリアクトルの場合とほぼ等しくなる。一方で、共振周波数は、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、11.2 MHz、12.4 MHz となり、寄生容量は、それぞれ、1.44 pF、1.24 pF となる。このため、分割巻きリアクトルの方が寄生容量低減には効果があるが、そ

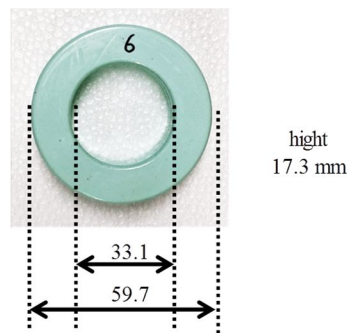


図 6 評価に使用するトロイダルコア

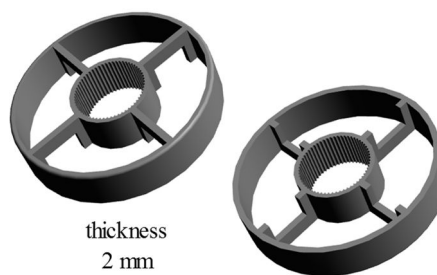


図 7 コアカバーの外形図

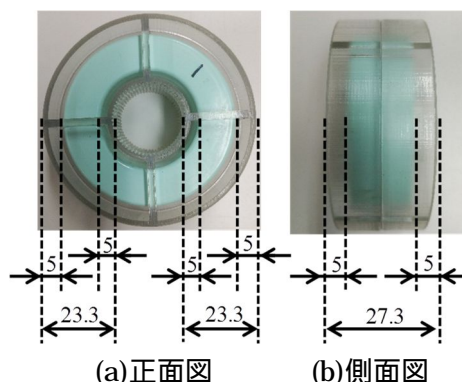


図 8 コアカバーを装着した場合の写真

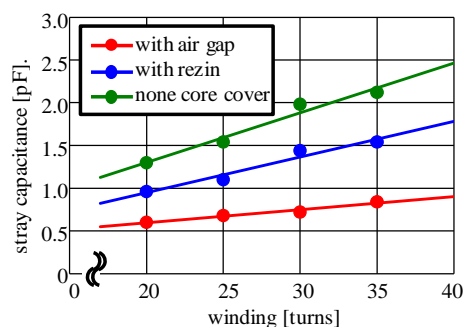


図 9 コアカバーを装着した場合の写真

の効果は空気ギャップを設けたリアクトルよりも小さくなる。この要因は、樹脂材でギャップを設けたリアクトルでは巻線-コア間の寄生容量が増加するため、分割巻きの効果が小さくなることによるものである。

図 12 に、直接巻線を施した連続巻きおよび分割巻きリアクトルの寄生容量の周波数特性を示す。100 kHz のインピーダンスをインダクタンスによるものと見なした場合、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、144 μH 、132 μH となり、空気ギャップを設けたリアクトルの場合とほぼ等しくなる。つまり、コアカバーによる漏れ磁束の影響は極めて小さいと言える。一方で、共振周波数は、連続巻きおよび分割巻きで、それぞれ、9.41 MHz、10.4 MHz となり、寄生容量は、それぞれ、1.98 pF、1.77 pF となる。このため、直接巻線を施したリアクトルの場合も分割巻きリアクトルの方が寄生容量低減には効果があるが、その効果は空気ギャップを設けたリアクトルよりも小さくなる。巻線-コア間の寄生容量が増加するため、分割巻きの効果が小さくなることによるものである。したがって、分割巻き構造の効果を十分に発揮するためには、空気ギャップを設けて巻線-コア間の寄生容量の影響を低減することが重要であることが判る。

(3) 寄生容量低減に向けたリアクトル巻線に対する考察

巻線-鉄芯間の寄生容量に着目して考察する。コアに直接巻線を施したリアクトルと図 6 のコアカバーを設けたリアクトルを使用し、内径部分の巻線間隔 p を一定間隔(0.6mm と 1.8mm)とした場合について寄生容量を評価する。巻線間の寄生容量は、図 4、9 の結果より、0.7pF 程度となる。

図 13 に、巻線間隔をパラメータとした場合の空気ギャップを設けたリアクトルと直接巻線を施したリアクトルの寄生容量の測定結果を示す。図 12 より、寄生容量は巻数に比例して増加する。特に、コアに直接巻線を施す場合は巻線-鉄芯間の寄生容量が大きくなるため、コアカバーを設ける場合よりも増加率が大きくなる。また、前者の場合は巻線間よりも巻線-鉄芯間の寄生容量が支配的になる。

空芯のソレノイドコイルにおいて巻線間隔 p を増加させる場合、一般的には巻線間の寄生容量は小さくなる。一方、図 12 では $p = 1.8\text{mm}$ の方が寄生容量は大きくなる。これは、 p が大きい場合は巻線と鉄芯の間の実効的な接触面積が広がり、巻線-鉄芯間の寄生容量が大きくなるためと考える。したがって、寄生容量を低減させるためには、巻線-鉄芯間の空間を設け、かつ、巻線間を密に巻くことが重要である。

< 引用文献 >

山崎 徹, 綾野 秀樹, 松井 義弘, 電力変換器の高周波数駆動に適したリアクトル構造に関する検討, 電気学会研究会資料, EMC-21-029, SPC-21-149, pp.1-6 (2021)

吉岡 七海, 山崎 徹, 綾野 秀樹, 松井 義弘, トロイダルリアクトルにおける寄生容量の検討, 2022 年電気学会産業応用部門大会, Y7 (2022)

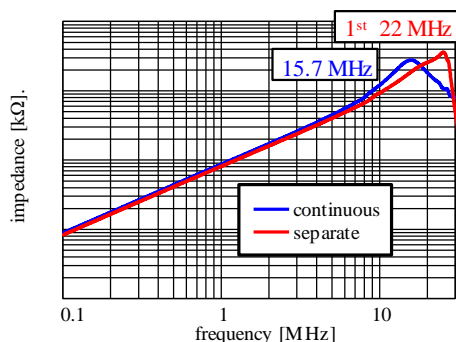


図 10 空気ギャップを設けたリアクトルにおける寄生容量の周波数特性

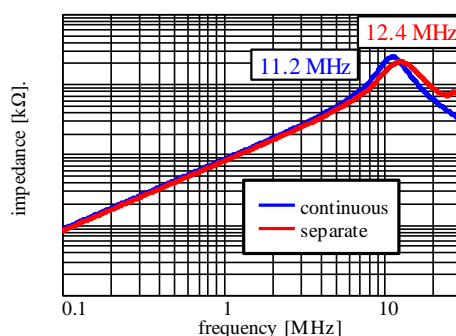


図 11 樹脂材でギャップを設けたリアクトルにおける寄生容量の周波数特性

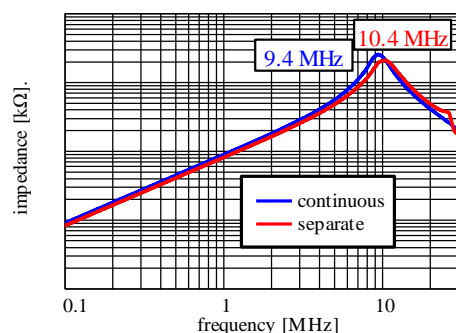


図 12 直接巻線を施したリアクトルにおける寄生容量の周波数特性

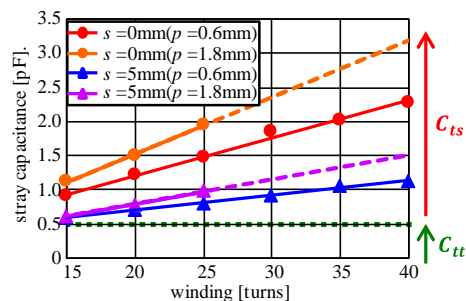


図 13 巻線間隔をパラメータとした場合の寄生容量の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 綾野 秀樹, 山崎 徹	4. 巻 52
2. 論文標題 高周波数用リアクトルの作成に向けたシミュレーションモデルの開発と評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東京工業高等専門学校研究報告書	6. 最初と最後の頁 37-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ayano Hideki, Nakagaki Takumi, Iguchi Yuki, Matsui Yoshihiro, Itoh Jun-ichi	4. 巻 38
2. 論文標題 Theoretical Study of Rampwise DPWM Technique to Reduce Motor Acoustic Noise	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 8102-8114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPEL.2023.3260772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中垣拓海, 綾野 秀樹, 松井 義弘
2. 発表標題 ランプ状二相変調法におけるキャリア周波数と指令周波数の関係
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎徹, 綾野秀樹, 松井義弘
2. 発表標題 電力変換器の高周波数駆動に適したリアクトル構造に関する検討
3. 学会等名 電気学会電磁環境/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Ayano, Masayoshi Kitada, Yuki Iguchi, Yoshihiro Matsui, Jun-ichi Itoh
2. 発表標題 Reduction of Motor Acoustic Noise with Rampwise DPWM
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020 Hamamatsu, Web Remote Conference) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎 徹, 綾野秀樹, 松井義弘
2. 発表標題 高周波数駆動用の電力変換器に適した空芯リアクトルの提案
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会 2021年3月11日
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡 七海, 山崎 徹, 綾野 秀樹, 松井 義弘
2. 発表標題 トロイダルリアクトルにおける寄生容量の検討
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊直樹, 中垣拓海, 綾野秀樹, 松井義弘
2. 発表標題 モータ電磁音低減法のキャリア高調波と側帯波の評価
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	松井 義弘 (Matsui Yoshihiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------