

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：32629

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14145

研究課題名（和文）寄生インピーダンス推定技術に基づく電力変換器用ノイズフィルタの最小体積設計の実現

研究課題名（英文）Realization of Minimum Volume Design of Noise Filter for Power Converters Based on Parasitic Impedance Estimation Techniques

研究代表者

高橋 翔太郎（Takahashi, Shotaro）

成蹊大学・理工学部・助教

研究者番号：00896566

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、寄生インピーダンス推定法に基づく周波数特性を考慮した電力変換器用ノイズフィルタの最小体積設計法の確立を目指した。まず、トロイダルインダクタを対象とした浮遊容量推定法を提案した。次に、浮遊容量推定法を二巻線コモンモードインダクタへと拡張した。また、三相PWMインバータの出力側に接続するコモンモードインダクタの最小体積設計について検討をおこなった。検討の結果、PWMインバータのスイッチング周波数を低く設定した条件では、コアの内部磁束密度が、高く設定した条件ではコアの透磁率がコモンモードインダクタの小型化の制約要因であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ノイズフィルタの体積と周波数特性の関係を理論的に明確にすることで、ノイズフィルタ設計に新たな知見をもたらし、フィルタの試作・設計期間の大幅な短縮を目指した。また近年、電力変換器のスイッチング周波数を数MHz以上に設定し、受動素子の体積を削減した報告事例が増加している。インダクタは高周波領域で浮遊容量と自己共振を引き起こし、容量性インピーダンスとしてふるまう。本研究で確立した浮遊容量推定法により、設計段階でインダクタの自己共振周波数を把握できる。すなわち、本研究成果は、高電力密度化が進む電力変換器に用いる受動素子の設計へ応用が可能であり、産業界への大きな波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study has investigated a minimum volume design procedure for EMI filters with considering wideband frequency characteristics of filter components based on a parasitic impedance estimation method. First, a stray capacitance estimation method for toroidal inductors has been proposed. Next, the stray capacitance estimation method was extended to two-winding common-mode inductors. Furthermore, the minimum volume design of common-mode inductors connected to a three-phase PWM inverter's output side has also been studied. As a result, it was clarified that the core's magnetic flux density limits the common-mode inductors' volume for the low switching frequency, and the core's relative permeability limits the common-mode inductors' volume for the high switching frequency.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：EMI コモンモードインダクタ 複素透磁率 浮遊容量 インピーダンス EMIフィルタ

1. 研究開始当初の背景

電力変換器用ノイズフィルタは、インダクタとキャパシタなどの受動素子から構成される。これらの素子は、寄生インピーダンスに起因する自己共振が生じるため、数 MHz 以上の高周波領域においてノイズ抑制性能が低下する。従来のノイズフィルタ設計は、体積の最小化を目的とし、素子は寄生インピーダンスを有さない理想部品として扱う。その結果、試作したフィルタが数 MHz 以上の帯域で要求される減衰量を満たせず、試作・設計回数の増加やノイズ対策部品の追加(フィルタ体積・コストの大幅な増加)を招いている。

キャパシタに対し、大きな設計自由度を有するインダクタは、磁性材料の周波数特性や浮遊容量に起因する複雑な周波数依存性を有し、ノイズフィルタの高周波特性を決定する素子である。すなわち、フィルタインダクタの寄生インピーダンス(浮遊容量)を推定できれば、フィルタの周波数特性を設計段階で把握できる。

インダクタの浮遊容量について、先行する研究で提案された推定手法では、巻線間の間隔を考慮していない。そのため、これらの手法を、単純にトロイダルコアを用いたインダクタへ適用すると、浮遊容量を過大に推定してしまう。

研究代表者は本研究開始以前の段階で、トロイダルインダクタが生じる浮遊容量の推定法を提案している。この手法では、NiZn フェライトなどの高周波磁性材料を用いたインダクタを対象としている。これらの材料の抵抗率は非常に高い($\approx 10^7 \Omega \cdot \text{m}$)ため、巻線間に生じる浮遊容量のみを計算することで、高精度にインダクタの浮遊容量を推定できる。しかし、フィルタインダクタの磁性コアとして広く採用される MnZn フェライトやナノクリスタルなどの磁性材料は抵抗率が低い($\approx 4 \Omega \cdot \text{m}$)。そのため、これらの磁性材料を用いたインダクタが生じる浮遊容量の推定には、巻線間だけでなく、巻線とコア間の浮遊容量も計算が必要である。すなわち、フィルタインダクタが生じる浮遊容量の推定手法が確立されていないため、設計段階においてノイズフィルタの周波数特性が把握できなかつた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、周波数特性を考慮したノイズフィルタの最小体積設計法の確立である。

インダクタに生じる寄生インピーダンス推定技術を確立し、それに基づくフィルタの周波数特性評価手法を開発する。この手法を、フィルタの最小体積設計法に組み込むことで、ノイズ規制帯域(150 k~30 MHz)に渡り、要求減衰量を満たす最小体積のノイズフィルタを得る設計法を確立する。本研究成果により、フィルタ試作・設計期間の大幅な短縮を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、周波数特性を考慮したノイズフィルタの最小体積設計法の確立によるフィルタ試作・設計期間の大幅な短縮を実現する。まず、寄生インピーダンス推定技術に基づくフィルタの周波数特性評価手法を開発する。次に、ノイズ規制周波数帯域(150 k~30 MHz)で要求減衰特性を満たす最小体積のフィルタを得る設計法を確立する。ノイズフィルタの周波数特性評価手法と最小体積設計法を組み合わせることで、ノイズ規制帯域において所望の減衰特性を有する最小のノイズフィルタを得る設計法の確立を目指す。DC 給電のモータドライブシステムを対象とし、本研究で確立した設計法の妥当性を適宜実験によって実証する。

4. 研究成果

(1) コモンモードインダクタに生じる浮遊容量の推定法

はじめに、最も基本的なフィルタ用磁気部品として、トロイダルインダクタを検討対象とし、巻線とコア間の絶縁体を考慮した浮遊容量推定法を考案した。推定した浮遊容量をインダクタの解析モデルに代入することで、インダクタの周波数特性を 50 MHz までの帯域で再現できる。推定法の妥当性は、ナノクリスタル、カルボニル鉄ダスト、アモルファスなどを用いて製作したインダクタの測定結果との比較により示した。さらに、考案した推定法を、2巻線を同極性にコアに施すことで製作する単相コモンモードインダクタに適用が可能な方式へと修正した。修正した浮遊容量の推定法と、磁性材料が有する複素透磁率の周波数依存性に基づき、コモンモードインダクタの小信号に対する周波数特性を再現できる解析モデルを考案した。モデルが 1 kHz から 50 MHz までの広帯域に渡りコモンモードインダクタのコモンモードに対する周波数特性を精度よく再現できることを、MnZn フェライト、ナノクリスタルを用いて製作したコモンモードインダクタの測定結果と比較することで実証した(図 1)。これらの成果は、2編の査読付き学術論文として電気学会産業応用部門誌にそれぞれ掲載された。

(2) MnZn フェライトを用いたコモンモードインダクタの周波数特性改善

高周波特性・低損失・低コストなどの観点から、MnZn フェライトはフィルタインダクタ用磁気部品として広く採用されている。一方で、材料が有する高透磁率・高誘電率によって、コア内部に電磁波の定在波が生じる。このため、MnZn フェライトの透磁率は、1 MHz 程度の高周波領

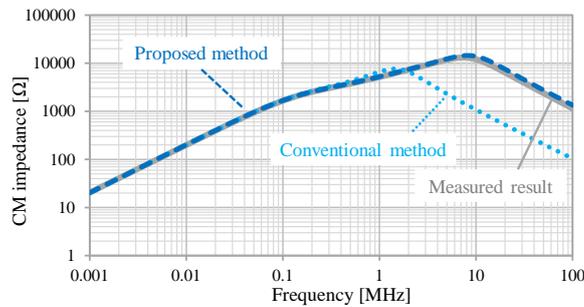


図 1: 浮遊容量推定法に基づくコモンモードインダクタのインピーダンス計算結果と測定結果の比較

域において、磁気共鳴を引き起こし、急峻に減少する。この現象は、コアの寸法が大きくなるとともに、低周波領域において発生し、寸法共鳴として知られている。本研究では、寸法共鳴がコモンモードインダクタの高周波領域における減衰特性劣化要因のひとつであることに着目し、減衰特性改善に向けた検討をおこなった。

まず、寸法の異なる 3 通りの MnZn フェライトコア(トロイダル形状)を用いて、等しいインダクタンスを有するコモンモードインダクタを製作した。製作したインダクタのインピーダンスの周波数特性を測定し、比較をおこなった。その結果、コア寸法が大きくなるに伴い、コモンモードインダクタのインピーダンスが低下を始める周波数が低域にシフトすることを確認した。この結果は、寸法共鳴によって、コアの複素透磁率が高周波領域において急峻に減少することに起因する。

そこで、本研究では、トロイダルコアを磁路に水平な方向に分割し積層したコアをコモンモードインダクタの磁心として使用した。積層により、コアの実効的な断面積が小さくなり、実質的に寸法の小さなコアを使用していることと等価になる。積層コアを用いることで、コモンモードインダクタのインピーダンスを高周波領域で増加できることを測定結果に基づき確認した。また、製作したコモンモードインダクタをモータドライブシステムに接続し、積層コアを用いることで、入力側コモンモード電流に対する減衰量を、2.3 MHz において最大 8.5 dB 増加できることを実証した(図 2)。この結果は、コモンモードインダクタの高周波特性は、浮遊容量以外の要因によっても劣化することを明らかにし、コモンモードインダクタの設計において、コアの積層数という新たな設計指標を与えることを示唆している。上記の成果は、オープンアクセスジャーナル IEEE Access に採択・掲載された。

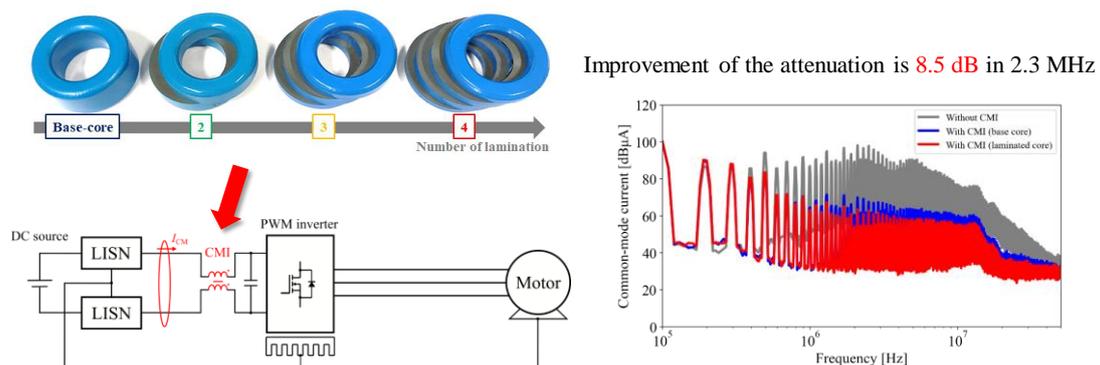


図 2: 積層コアの採用によるコモンモードインダクタのコモンモード電流減衰性能向上

(3) コモンモードインダクタの最小体積設計

三相 PWM インバータ駆動のモータドライブシステムを構築し、インバータ出力側コモンモード電流を抑制対象としたコモンモードインダクタの最小体積設計について検討をおこなった。まず、システム各部のインピーダンスを測定し、周波数領域におけるシミュレーションモデルを汎用回路シミュレータ LTspice 上に構築した。検討対象システムのモデルに、コモンモードインダクタのモデルを組み込み、シミュレーションにおいてフィルタ減衰量を再現できるモデルを構築した。モデルに基づき、減衰対象の周波数において、要求減衰量を満たす、最小の体積を有するコモンモードインダクタの設計フローを確立した。設計フローにおいては、コアの内部磁束密度と、必要ターン数を施すことが可能なコア窓面積を考慮した。インバータのスイッチング周

波数を 10 kHz から 100 kHz の範囲で変化させ、それぞれに対し、ナノクリスタルを用いたコモンモードインダクタの設計をおこなった。その結果、スイッチング周波数を低く設定した条件では、磁性材料の飽和磁束密度が、高く設定した条件では、コアの透磁率の大きさがコモンモードインダクタの小型化に対する制約条件であることが明らかになった(図 3)。

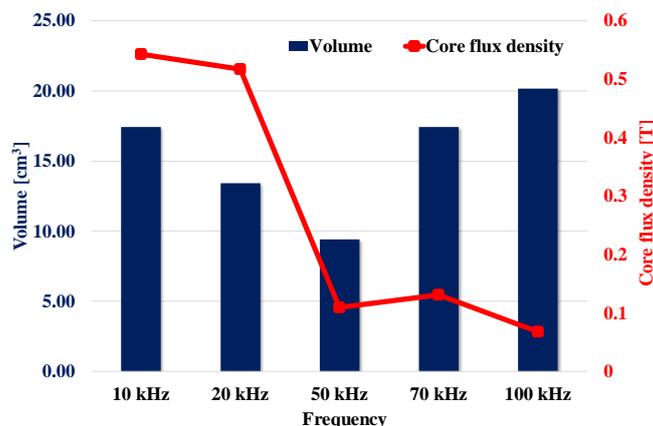


図 3: PWM インバータのスイッチング周波数とコモンモードインダクタの体積の関係

(4) 応用展開

高電力密度化に対する要求から、電力変換器全体の体積の 3 割以上を占めるノイズフィルタの体積削減を目的とした研究が、国内外で盛んに行われている。一方で寄生インピーダンスを考慮し、フィルタ素子の周波数特性に着目したフィルタ設計に関する研究は非常に少ない。

本研究では、ノイズフィルタの体積と周波数特性の関係を理論的に明確にすることで、ノイズフィルタ設計に新たな知見をもたらし、フィルタの試作・設計期間の大幅な短縮を目指した。また近年、炭化ケイ素や窒化ガリウムを基にした次世代パワー半導体デバイスの実用化が進んでいる。これらのデバイスは、従来のシリコンパワー半導体デバイスに対し、10 倍以上の速度でスイッチングができる。そのため、電力変換器のスイッチング周波数を数 MHz 以上に設定し、受動素子の体積を削減した報告事例が増加している。インダクタは高周波領域で浮遊容量と自己共振を引き起こし、共振周波数以上で容量性インピーダンスとしてふるまう。そのため、設計段階でインダクタが生じる浮遊容量を推定し、インダクタの自己共振周波数を把握することが重要となる。すなわち、本研究で得られた知見は、高電力密度化・高周波駆動化が進む電力変換器に用いる受動素子の設計へ応用が可能であり、産業界への大きな波及効果が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 高橋翔太郎, 和田圭二	4. 巻 142
2. 論文標題 巻線とコア間の絶縁体を考慮したトロイダルインダクタに生じる浮遊容量の簡易推定法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門論文誌	6. 最初と最後の頁 33-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.33	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 -

1. 著者名 Shotaro Takahashi, Sari Maekawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Wideband Small-Signal Model of Common-Mode Inductors Based on Stray Capacitance Estimation Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 514-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21010626	査読の有無 有
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 Shotaro Takahashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Experimental Investigation of the Dimensional Effect on Small-Signal Characteristics of Common-Mode Inductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 123068 ~ 123079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3223436	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋翔太郎, 前川佐理
2. 発表標題 浮遊容量推定法に基づくコモンモードインダクタのモデリング
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木陸矢, 高橋翔太郎, 前川佐理
2. 発表標題 巻線構造に基づくコモンモードインダクタの性能比較
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------