

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：34504

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14248

研究課題名（和文）感度解析を用いた電力変換器用ノイズフィルタにおけるノイズ伝搬経路の可視化

研究課題名（英文）Visualization of Noise Propagation Paths for Noise Filter in Power Converter Using Sensitivity Analysis

研究代表者

野村 勝也（Nomura, Katsuya）

関西学院大学・工学部・専任講師

研究者番号：30581425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電力変換器用ノイズフィルタを対象に、透磁率や誘電率といった物性値がSパラメータに与える影響をあらわす感度を用いて、ノイズ伝搬経路を可視化する技術を構築した。これにより、従来では検出が困難であった電界結合や磁界結合によるノイズ伝搬を容易に把握できるようになったとともに、コイル内の寄生容量や導体パターンの寄生インダクタンスといったノイズ性能に悪影響を与える要因とその場所を特定することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは電磁界シミュレーションによって、対象構造における任意の場所での電界や磁界の大きさを把握することはできたが、最終的な性能に影響を与える要因や領域を把握することは困難であった。本研究成果によって、性能に対して支配的な影響をもつ領域や要因を直接的に可視化できるようになったため、新たなノイズ解析手法を確立したという学術的意義を有するとともに、製品設計を円滑に進められるという社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, a technique has been developed that visualizes noise propagation paths in noise filters for power converters using sensitivity, which reflects the impact of physical properties like magnetic permeability and dielectric permittivity on S-parameter. This technique enables straightforward identification of previously hard-to-detect noise propagation due to electric and magnetic field coupling. It also allows for pinpointing factors and their locations that negatively impact noise performance, such as the parasitic capacitance in coils and the parasitic inductance of conductor patterns.

研究分野：環境電磁工学、パワーエレクトロニクス

キーワード：感度解析 ノイズフィルタ 可視化 寄生成分 電界結合 磁界結合

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

全ての電子機器には電磁ノイズに関する上限値が規格で定められており、ノイズレベルを規格値以下に収めないと機器を販売することができない。電力変換器も例外ではなく、150kHz以上30MHz以下における雑音端子電圧に関する規格など、多数の規格が設けられている。電力変換器では、原理的に、パワー半導体デバイスのスイッチング動作に起因する電磁ノイズが発生する。

近年、パワー半導体デバイス動作の高速・高周波化によるノイズレベルの増加や、機器の小型化によるノイズ伝搬経路の複雑化により、電磁ノイズを規格値以下に抑えることがさらに困難になっている。よって規格を満たすために、電磁ノイズを定量的に評価して有効な対策を施す研究の重要性はさらに高まっている。

電磁ノイズの定量評価にはシミュレーションが有効である。特に電磁ノイズの量を予測する際には、回路シミュレーションでは精度が不十分であることが多く、電磁界シミュレーションが広く活用されている。これは直流や50/60Hzといった低周波では無視できる、導体パターンに存在する微小なインダクタンスや容量成分といった、構造に起因する意図しない回路成分が、MHz帯を含む高周波の電磁ノイズ性能には大きく影響するためである。

しかし電磁界シミュレーションにより構造から性能を評価したとしても、有効な対策が直ちに分かる訳ではない。またノイズ性能に影響する支配的な寄生成分は事例ごとに異なる。そのため現状ではノイズ量が規格値以下となるように試行錯誤的に対策を行う必要がある。よってノイズ性能を悪化させる要因を把握できる技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、電力変換器用ノイズフィルタを対象に、感度解析を用いてノイズ伝搬経路を可視化することを目的とする。ここで感度とは物性値に対する性能の変化量であり、電磁界シミュレーションの場合では物性値は誘電率・透磁率・導電率となる。ノイズ伝搬のメカニズムには電界結合や磁界結合があるが、前者が支配的な場合には誘電率に対する感度が大きく、後者が支配的な場合には透磁率の感度が大きくなるため、感度の大きさから寄生的な結合経路を把握できる。またこの可視化結果からノイズ性能を悪化させる寄生成分を特定でき、有効な対策や設計の方針を得ることができると期待できる。

3. 研究の方法

ノイズフィルタの性能指標であるSパラメータの感度を感度解析で求める。具体的には、入力ポート1から出力ポート2までの透過特性を表す S_{21} の絶対値に対し、対象となる物性値(透磁率、誘電率、導電率のいずれか)を微小に変化させたときの偏微分係数を求める。数値解析法には有限要素法を使用し、解析領域を四面体要素でメッシュ化した上で、各四面体要素での感度を求める。この場合、差分感度を計算するには要素数に相当する電磁界解析が必要となるが、随伴変数法を用いることで1回の電磁界解析と1回の随伴解析により感度を求めることができる。なお随伴解析の計算量は電磁界解析よりも少ないため、提案方法は計算量の観点でも優れている。

以上の感度解析方法を用いて、以下の順で研究を実施した。

- (1) ノイズ経路が既知の問題での検討
- (2) ノイズ経路が未知の問題での検討
- (3) 可視化結果に基づく設計・対策法の体系化

4. 研究成果

- (1) ノイズ経路が既知の問題での検討

コンデンサ

図1に示す平行平板コンデンサ1個で構成される2ポート回路を対象に検討を実施した。この回路では平行平板コンデンサにおいて電界結合によりノイズが伝搬しており、この結合を誘電率の感度により可視化できるという仮説を検証した。その結果、図1に示すように、平行平板コンデンサ内の領域で誘電率の感度が大きいという想定通りの結果を得たため、提案方法によって電界結合を可視化できることを確認した。

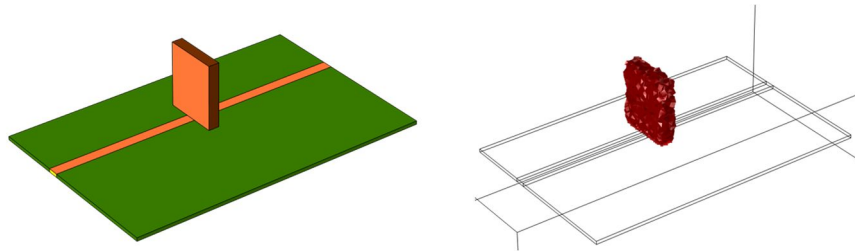


図 1 平行平板コンデンサをもつ 2 ポート回路と 100kHz での誘電率感度
ループペア

図 2 に示す対向するループペアを対象に検討した。この回路ではループ間の磁界結合によりノイズが伝搬しており、この結合が透磁率の感度により可視化できるという仮説を検証した。その結果、図 2 に示すように、ループ間の領域で透磁率の感度が大きいという想定通りの結果を得たため、提案方法によって磁界結合を可視化できることを確認した。

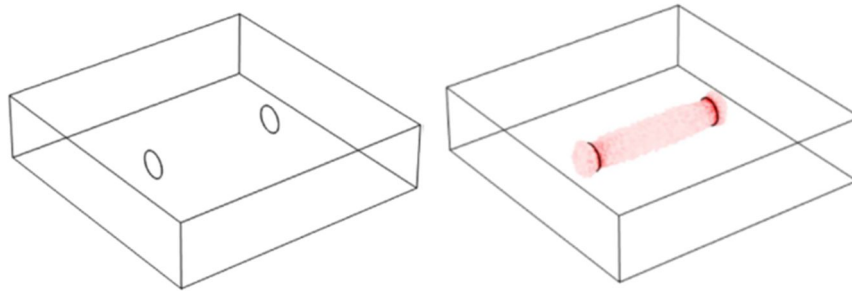


図 2 対向するループペアと 10MHz での透磁率感度

CLCLC 型ノイズフィルタ

図 3 に示す CLCLC 型のノイズフィルタを対象に検討した。コンデンサとインダクタはともに 2 次元状のシートとして簡易的にモデル化した。この回路ではコンデンサとインダクタの定数に応じて伝搬する支配的なノイズが切り替わり、表の設定 1 では伝導ノイズが、設定 2 では磁界結合によるノイズが、それぞれ支配的なものとなる。透磁率に対する感度解析結果を見ると、伝導ノイズが支配的な場合には、図 3 に示すようにバイパス経路での感度が大きくなった。これはバイパス経路で透磁率を増やすとインピーダンスが高まりバイパス効果が低減するため S パラメータが増加することを示唆している。また入出力ポート間を直接接続する導体上では感度が負となったが、これはこの経路では透磁率を高めることでチョーク効果が高まり S パラメータが減少することを示唆している。よって伝導ノイズの経路に対応した感度が得られているといえる。一方で磁界結合によるノイズが支配的な場合には、入出力ループ間の領域で大きい感度を確認した。これはこの領域で透磁率を増加すると、磁界結合が強まって S パラメータが増加することを示唆しており、磁界結合に寄与する領域を直接的に可視化した結果であるといえる。以上より、伝導ノイズと磁界結合によるノイズのそれぞれに応じた感度分布が得られ、その可視化結果から支配的なノイズを把握できることを確認できた。

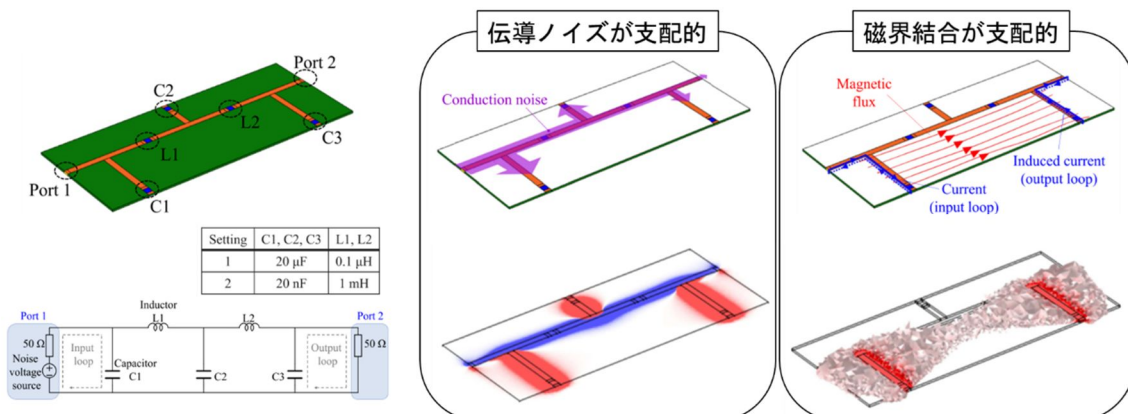


図 3 CLCLC 型ノイズフィルタの支配的なノイズ伝搬経路と 10MHz での感度解析結果

(2) ノイズ経路が未知の問題での検討

図4に示す実製品のフィルタを用いて検討した。このフィルタは1個のコモンモードチョークコイルと1対のYコンデンサを備えた1段のLCフィルタである。Sパラメータのうちコモンモードに対する性能である S_{cc21} を目的関数として感度解析を実施した。その結果、高周波において、コイル巻線付近の誘電率感度と、バイパス経路付近の透磁率感度を確認した。これはともにコイルの等価並列容量(EPC: Equivalent Parallel Capacitance)によるチョーク効果低減と、バイパス経路の等価直列抵抗(ESL: Equivalent Series Inductance)によるバイパス効果低減を、それぞれ示唆している。よって、高周波において性能を悪化させる要因の物理的根拠を把握することができた。

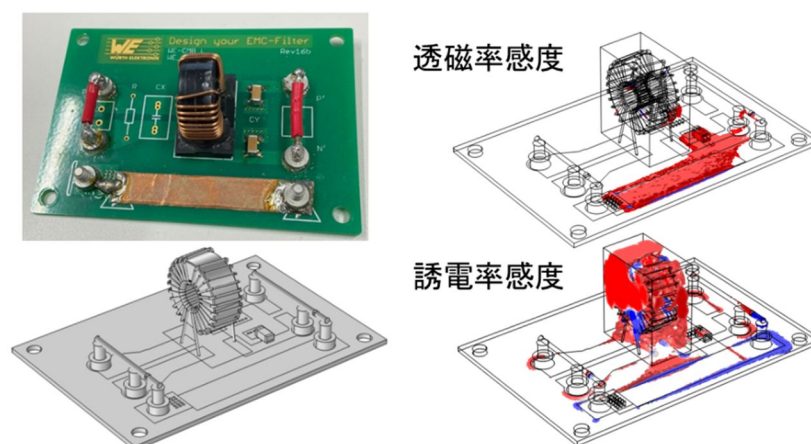


図4 実製品の1段フィルタ構造と透磁率感度と誘電率感度

(3) 可視化結果に基づく設計・対策法の体系化

以上の検討結果より、コンデンサ内の電界結合、ループペア間の磁界結合、コイルにおけるEPCによるチョーク効果低減、バイパス経路のESLによるバイパス効果低減を、誘電率と透磁率の感度によって可視化できた。

電界結合が支配的な場合には、結合している導体同士の距離を離す、面積を低くする、誘電体の比誘電率を低くする、シールドを設けるといった対策が考えられる。また磁界結合が支配的な場合には、ループ面積を小さくする、ループ同士の距離を離す、実効的に直交関係にする、シールドを設けるといった対策が考えられる。

一方でコイルのEPCが支配的な場合には、巻線間の結合を低減するために巻線を疎にすることが重要である。また導体パターンのESLが支配的な場合には、その経路を太く短くすることが重要となる。

以上の検討結果を総合すると、当初の目標であった感度解析結果をもとにしたノイズ伝搬経路の可視化は成功裏に終わることができた。本研究では電力変換器用ノイズフィルタを主な検討対象としたが、それ以外の対象でも同様の可視化は可能であるため、電力変換器自体をも含む広い製品を対象とした検討が今後の研究課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Nomura Katsuya	4. 巻 66
2. 論文標題 Magnetic Coupling Visualization Using Sensitivity to Magnetic Permeability	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility	6. 最初と最後の頁 324 ~ 327
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TEMC.2023.3344887	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0件

〔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
---------	---------