

研究成果報告書

トポロジー最適化を用いた電力変換器用ノイズフィルタ製品の性能向上

関西学院大学 工学部 専任講師 野村 勝也

1 背景と目的

全ての電子機器には電磁ノイズに関する規格があり、これを超えると製品の販売ができない。電力変換器も例外ではなく、特に 150 kHz 以上 30 MHz 以下の雑音端子電圧に関する多数の規格が設けられている。電力変換器はスイッチング動作に起因する電磁ノイズを発生させるが、近年のパワー半導体デバイス的高速・高周波化と機器の小型化により、このノイズを規格値以下に抑えることがより困難になっている。

この問題に対処するため、ノイズフィルタが広く用いられている。ノイズフィルタはコンデンサとインダクタから構成され、これらはプリント基板上に実装される。しかし、高周波においてはプリント基板の導体パターンがノイズ特性に影響するため、フィルタの性能には導体パターンの設計が重要である。従来の設計手法では試行錯誤が必要であり、電磁界シミュレーションを用いても、要求される性能を満たす設計には依然として試行錯誤が求められる。

こうした状況を改善するために、トポロジー最適化技術を用いた導体パターン設計の研究に取り組んできた。トポロジー最適化は、設計領域を細かく区切って材料の状態を調整し、性能向上に寄与する材料の分布を最適化する方法である。この方法を用いてノイズフィルタの導体パターン設計を行うと、支配的なノイズに応じた構造変化が起こり、斬新な導体パターンが得られることをこれまで示してきた。さらに実際に最適化計算で得られたフィルタ基板を製作し、性能向上を実測でも確認し、トポロジー最適化によるノイズフィルタ設計の有効性を示してきた。

しかし以上の検討は小信号用途の小さいフィルタでのものであった。一方で、実際の電力変換器の製品においては、より大型のコンデンサやインダクタが用いられる。このような実際のフィルタ製品においてもトポロジー最適化を用いた設計方法が有効であることは、これまで示せていなかった。

そこで本研究では、製品として販売されているノイズフィルタを対象にトポロジー最適化による導体パターン設計を行い、性能向上を確認することを目的に検討を行った。その成果を報告する。

2 研究内容と成果

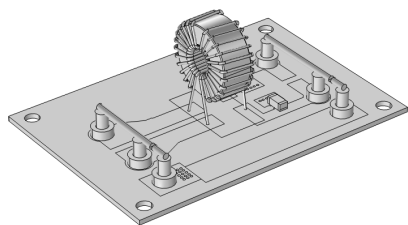
2.1 対象フィルタと電磁界シミュレーション

解析対象のフィルタを図 1(a) に示す。このフィルタは Würth Elektronik 社が販売しているノイズフィルタ製作キットのものであり、コモンモードチョークコイル 1 個、X コンデンサ 1 個、Y コンデンサ 1 個などから構成される 1 段 LC フィルタである。ノイズには大別してノーマルモードノイズとコモンモードノイズがあるが、本研究では、意図せずに発生してなおかつ放射効率が高いために問題を引き起こしやすいコモンモードノイズを対象に検討を行った。そのため、入力側と出力側の PN 端子をそれぞれ導線でショートし、コモンモード特性のみを評価できるようにした。また部品としてはコモンモード特性に影響の大きいコモンモードチョークコイルと Y コンデンサのみを基板に実装し、影響のない放電抵抗や X コンデンサは実装せずに検討した。

このフィルタの 3D CAD モデルを図 1(b) に示すように作成した。まず基板からガーバーデータを起こし、そのデータを 3D CAD に取り込んで厚みを設定することで、導体パターンを含む基板モデルを作成した。続いてコモンモードチョークコイルや Y コンデンサなどの部品をモデル化し、それらを基板モデルとアセンブリすることでフィルタ全体をモデル化した。



(a) 実物



(b) シミュレーション用モデル

図 1: ノイズフィルタ

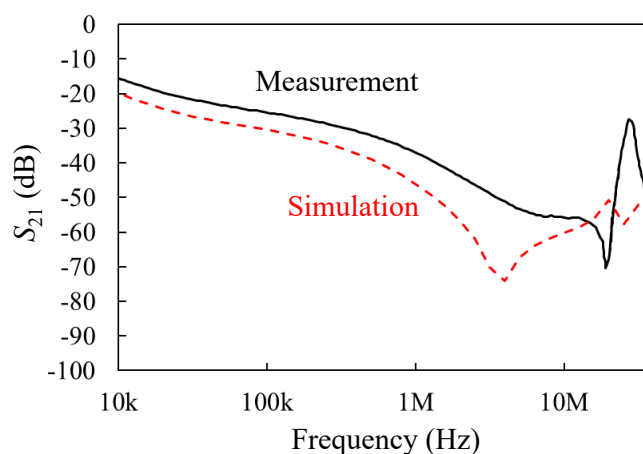


図 2: ノイズフィルタの S パラメータ特性

このモデルを用いて電磁界シミュレーションを行った。具体的には導体パターンの導電率、コイル磁性体の透磁率、コンデンサの誘電率といった物性値を設定し、さらに入力側と出力側にポートを設定して、2ポート間の電力伝達特性を表すSパラメータ S_{21} のデシベル値を計算した。電磁界シミュレーション用のソフトウェアにはCOMSOL Multiphysicsを使用した。また計算精度を確認するためにSパラメータの測定も実施した。測定には周波数応答分析器 (Omicron Lab, Bode 100) を使用した。比較結果を図2に示す。およそ1MHzまでは誤差10dB以下の精度で計算できているが、それ以上の周波数では誤差が増加しており、また10MHz付近では誤差が減少する結果となった。この結果をふまえ、以下では誤差が比較的小さい10MHzを対象に最適化の検討を行うこととした。

2.2 導体パターンのトポロジー最適化

フィルタの導体パターンのトポロジー最適化を実施した。本フィルタは両面基板であるが、表面のパターンを含めて最適化すると、後述するグレースケールの影響によって計算精度が大幅に悪化したことから、今回は裏面のパターンのみを対象にトポロジー最適化を実施した。トポロジー最適化の方法としては密度法を使用し、10MHzのSパラメータ S_{21} のデシベル値を最小とするように最適化を行った。

図3に示すように、最適化前の初期構造では裏面の導体パターンはL字型の形状である。密度法に基づくトポロジー最適化では、このパターンを導電率の分布として表現し、その分布を最適化することでより優れた性能を示す導体パターンを導出する。より具体的には、導体を密度1の状態、非導体を密度0の状態と対応付け、この密度分布を最適化する。その際に最適化に必要な感度（密度変化に対する性能への影響を示す偏微分値）を計算するために、0から1の間の密度をとるグレースケールを導入することとなる。最適化を行った結果、図3の右下のように、導体領域が湾曲しながら複雑に存在しているような分布が得られた。濃い赤褐色の領域が密度1、白い領域が密度0に対応しており、黄色の領域はグレースケールをあらわす。

図4に最適化によるSパラメータの推移を示す。反復回数176回で収束し、最適化によってSパラメータが8.5dB減少した。また図5に最適化によるSパラメータへの影響を示す。10MHz付近の広帯域で特性が改善しており、フィルタ性能の向上がシミュレーション結果において確認できた。

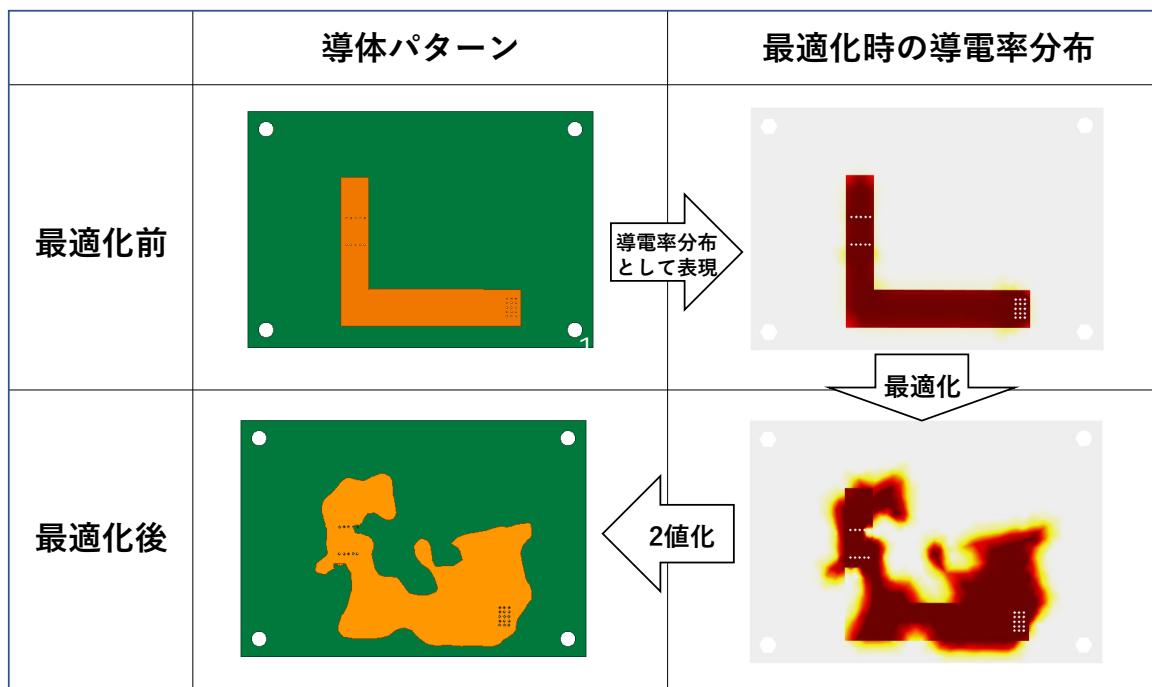


図 3: トポロジー最適化前後の導体パターンと導電率分布

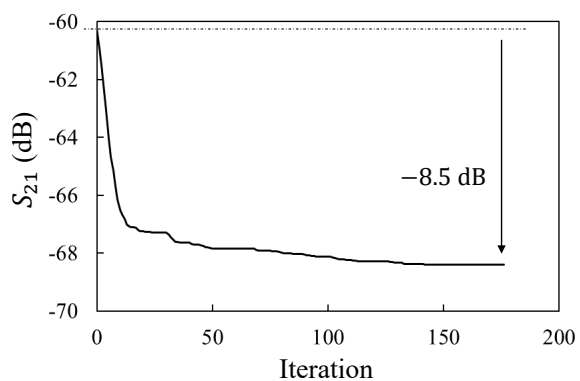


図 4: 最適化による S パラメータの推移

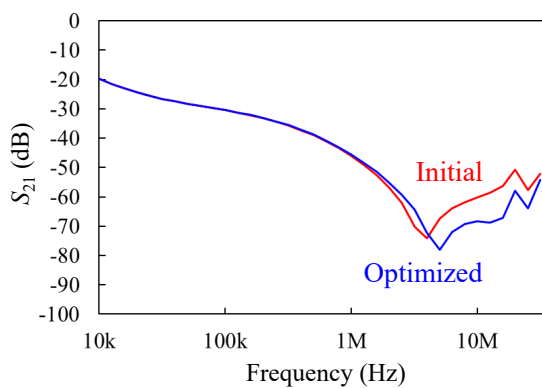


図 5: 最適化による S パラメータへの影響

3 まとめと今後の課題

実製品のフィルタ構造を対象に、自動的に優れた導体パターン構造を導出できるトポロジー最適化を行い、性能向上をシミュレーションで確認した。まずコモンモードノイズ低減を目的とした1段LCフィルタを作製してその特性を測定するとともに、フィルタの3D CADモデルを作成して電磁界シミュレーションを実施し、広帯域でのSパラメータ特性の比較を行った。次に比較的誤差の小さかった10 MHzにおいてSパラメータの最小化を目的としたトポロジー最適化を行い、対象周波数における8.5 dBの減少と対象周波数を含む帯域での性能向上をシミュレーションで確認した。

本研究の課題としてはまずシミュレーション精度の改善が挙げられる。またトポロジー最適化によって性能が向上した理由は解明できておらず、その検証が必要である。さらに表面の導体パターンも含めて最適化を行うには、最適化時のグレースケール導入が計算精度に与える影響を抑制する必要もある。加えて当初は、最適化で導出した構造を試作検証することを計画していたが、検討が間に合わなかった。今後の研究でこれらの課題の解決に取り組む予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご支援を頂きました公益財団法人 川西記念新明和教育財団および関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

成果発表

- [1] Katsuya Nomura, Density-based Topology Optimization for Conductor Design of EMI filters with Improved Impedance Boundary Condition, EMC Europe 2022, pp. 377-382.
- [2] 下本悠月、野村勝也, 電力変換器用ノイズフィルタの電磁界シミュレーション, 電気学会産業応用部門大会, 2023.
- [3] 下本悠月、野村勝也, 透磁率の周波数依存性を考慮した電力変換器用ノイズフィルタの電磁界シミュレーション, 令和5年電気関係学会関西連合大会, 2023.