

電力変換システムの電磁ノイズ低減技術

春名延是* 夏野一成**
 高橋慶多* Luc Rambaud***
 長澤 忍*

Electromagnetic Interference Reduction Technologies for Power Conversion Systems

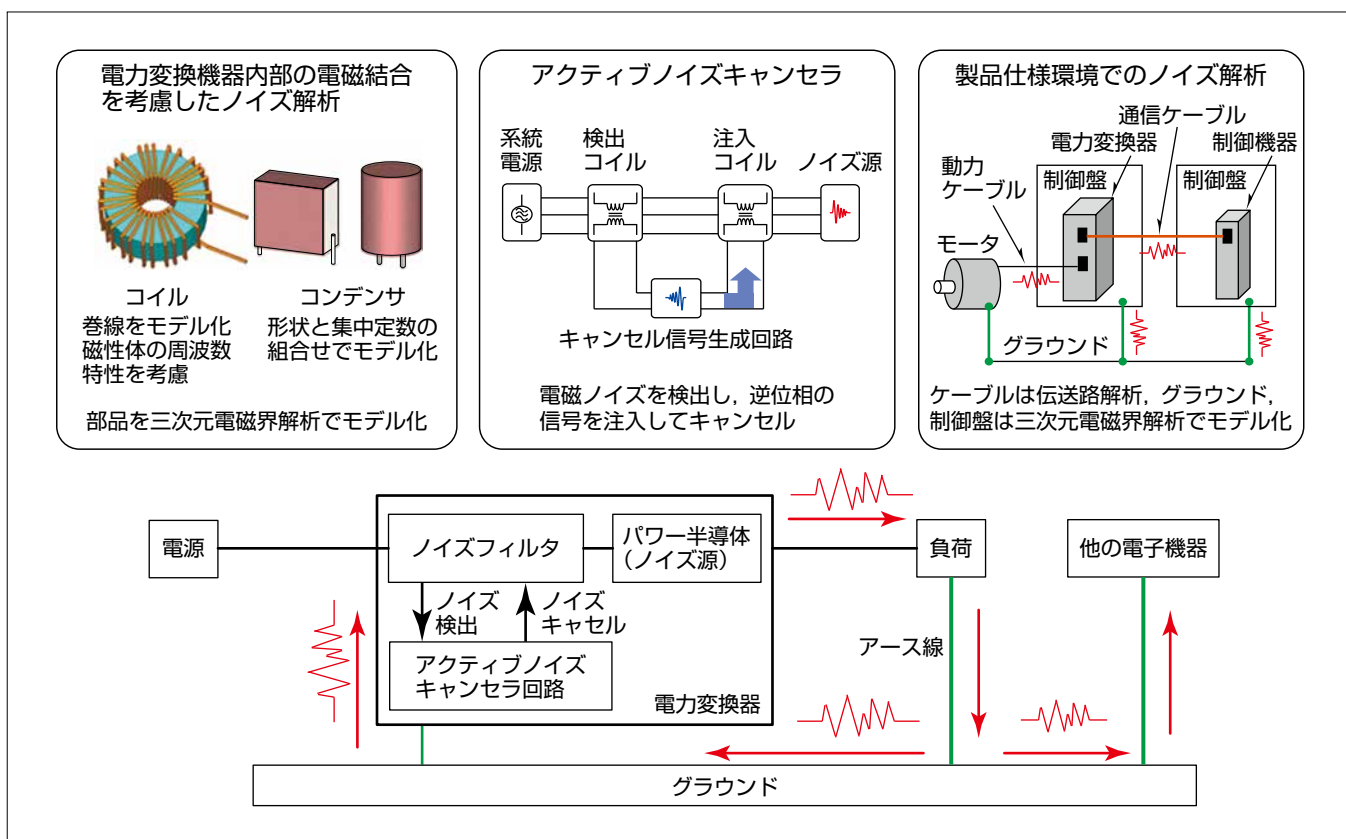
Nobuyuki Haruna, Keita Takahashi, Shinobu Nagasawa, Kazushige Natsumo, Luc Rambaud

要旨

電力変換器は環境問題やエネルギー問題の解決を目的として自動車、FA機器、空調機、鉄道、電力等の多くの分野で利用が拡大している。電力変換器を構成する主要部品の一つであるパワー半導体はスイッチング動作時に電磁ノイズを発生させることが知られており、発生した電磁ノイズが他の電子機器を誤動作させないように機器外部に伝搬する電磁ノイズ量を低減する対策が行われている。近年では、電力変換器の小型・高効率化に伴ってノイズフィルタの小型化や機器内部のスペースを効率的に利用した高密度な実装も望まれている。さらに、電磁ノイズの影響を受けやすいIoT(Internet of Things)機器が急速に普及しつつあり^①、製品使用環境で周囲の機器を含むシステム全体の

電磁ノイズ対策も望まれている。

これらの要求に対し、三菱電機では①電力変換器内外を伝搬する電磁ノイズ量を高精度に予測するノイズ解析技術と②ノイズフィルタの小型化技術の開発を進めている。①では電力変換器内部にノイズフィルタを実装する際に課題となる電気部品間の電磁結合を考慮可能なノイズ解析技術と製品使用環境での機器外部へのノイズ伝搬量を予測するノイズ解析技術を、②ではノイズフィルタの性能を維持しつつ、小型化を実現するためのアクティブノイズキャンセラの開発技術を開発した。今後、これらの開発技術の高度化と製品適用を進め、低ノイズな電力変換システムの構築に貢献していく。



電力変換器から発生する電磁ノイズの伝搬経路と開発技術の位置付け

パワー半導体のスイッチング動作によって発生した電磁ノイズは電力変換器内部の電気部品、ケーブル、負荷、アース線や機器の金属筐体(きょうたい)へと伝搬していく。これらの要素を全て考慮した解析モデルを構築することでノイズフィルタの高密度なレイアウト設計と他の機器への影響評価が可能になる。一方で電磁ノイズを検出し、逆位相のキャンセル信号を注入するアクティブノイズキャンセラ回路を追加することでノイズフィルタ性能を高めて小型化することも可能である。

*三菱電機(株) 先端技術総合研究所 **三菱電機エンジニアリング(株)
 ***Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

1. ま え が き

電力変換器の小型化を実現するためには、電力変換器から発生した電磁ノイズの伝搬量を高精度に予測するためのノイズ解析技術とノイズフィルタを小型化するためのアクティブノイズキャンセラの実現が必須である。

本稿では2章で、電力変換器内での電気部品間の電磁結合を全て考慮できる電磁界解析を用いたノイズ解析技術について、また、3章では電力変換システム内の他の機器への電磁ノイズの伝搬量を予測するノイズ解析技術について述べる。最後に4章でノイズフィルタの磁性体コアにノイズキャンセル回路を付加することで、性能を維持しつつ、ノイズフィルタの小型化を実現するアクティブノイズキャンセラの設計技術について述べる。

2. 電力変換器内部の電磁結合を考慮したノイズ解析技術

近年、パワー半導体の適用拡大に伴い電力変換器の高電力密度化に伴う小型化が急速に進んでいるが、パワーモジュール、コイル、コンデンサ、バスバー、プリント基板などの多くの電気部品が従来よりも密接して実装されるため、これら電気部品同士の電磁結合に起因した空間を伝搬する電磁ノイズが無視できなくなりつつある。そのため、電力変換器内でノイズフィルタを実装する際、配線を伝搬するノイズをノイズフィルタで抑制するだけでなく、電磁シールドによる電磁結合の抑制設計や、電磁結合が起きにくいような電気部品のレイアウト設計が新たに必要となる。

このような電磁結合の抑制を試作後のトライアンドエラーで行おうとすると対策期間が長期化してしまうため、試作前にあらかじめノイズ伝搬量を予測し、設計上流段階で対策を施すことが重要である。従来は電力変換器内部の各電気部品の高周波インピーダンスを反映した回路モデルを作成し、各回路モデルを組み合わせた全体回路モデルを使用して回路解析を行うことでノイズ伝搬量を予測していたが、電気部品同士の電磁結合を網羅的に回路モデルに追加する工程が必要であり、モデル作成に膨大な時間を要することが課題であった。この課題を受け、三次元電磁界解析を適用することで従来の回路モデル化を不要とする新たなノイズ解析技術を開発した⁽²⁾⁽³⁾。

電力変換器の内部構造及び電気部品を全て三次元モデル化して三次元電磁界解析を行うことで、電気部品間の電磁結合を網羅的に考慮することが可能になった。三次元モデルは三次元CADデータを元に作成可能である。コイル部品、コンデンサ部品の三次元モデルの一例を図1に示す。コイルは巻線1ターンずつ正確にモデル化し、磁性体モデルは透磁率の周波数特性を反映した。コンデンサの内部電極構造は微細であるため解析時間削減のためコンデンサ容量は

集中定数モデルを適用することで考慮した。コンデンサの寄生インダクタンスや抵抗成分は集中定数モデルを用いず、リードやコンデンサ形状を導体としてモデル化することで考慮している。このモデルによる部品単体のインピーダンスの解析値と実測値の比較を図2に示す。実測値と解析値がよく一致しており、部品ごとに高精度なモデルを構築することに成功した。

図1の部品モデルと、バスバー、プリント基板、筐体などを組み合わせた電力変換器内部の全体モデルを作成し、電磁結合が生じない場合(結合なし)と、電磁結合が生じる場合(結合あり)とで、電力変換器内部から発生する電磁ノイズの伝搬量の解析を行って実測値と比較した。結果を図3に示す。電磁結合が生じることで3MHz以上で最大20dB程度ノイズが増加するが、解析でもノイズ増加のふるまいを予測できていることが分かる。実測値と解析値はおおむね10dB以内の精度で一致しており、製品設計に十分適用可能であると判断した。今後、開発したノイズ解析技術を製品設計に適用し、電力変換器の小型化と低ノイズ化の両立に貢献する。

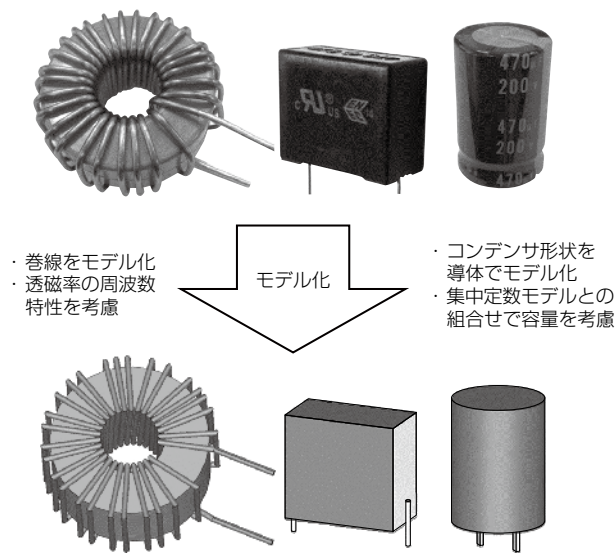


図1. コイル部品とコンデンサ部品の三次元モデル

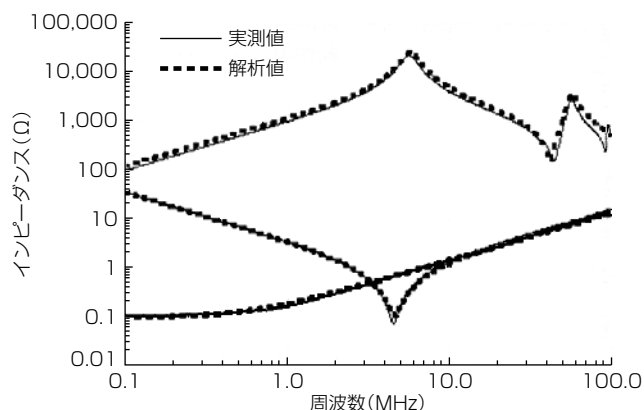


図2. コイル部品とコンデンサ部品のインピーダンス

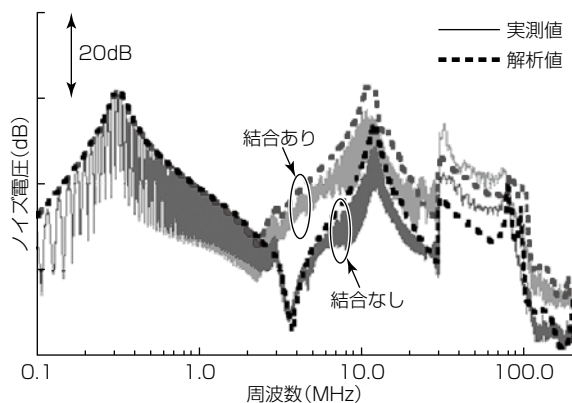


図3. 電磁結合有無でのノイズ電圧の解析値と実測値の比較

3. 製品使用環境を想定したノイズ解析技術

三菱電機では、FA製品のシステム構築時で電力変換器から発生する電磁ノイズを他の制御機器に干渉させないための制御盤内での電力変換器と制御機器の設置方法、配線方法、ノイズ対策部材の実装方法をガイドラインとして公開している⁽⁴⁾。今後は電磁ノイズの影響を受けやすいIoT機器の普及が想定されるため、更なる精度の高い電磁ノイズ対策設計実現のために、製品使用環境でのシステムレベルでの電磁ノイズの伝搬量を予測する解析技術を開発した。

図4に今回、解析モデルを構築したモータ駆動システムを示す。モータ駆動システムを想定した場合、電力変換器であるインバータから発生した電磁ノイズはインバータに接続される動力ケーブル、モータ、アース線、アース線が接続されるグラウンドや制御盤を伝搬し、例えば、制御機器とインバータ間の通信ケーブルにも伝搬する。このような製品使用環境での電磁ノイズの伝搬量を予測する方法として、ケーブル、アース線、制御盤、グラウンドのインピーダンスを等価回路化して回路解析を行う方法があるが、特に制御盤やグラウンドは電磁ノイズの分布が複雑であるため、等価回路モデルの作成に必要な工数が膨大になる。今回、制御盤とグラウンドは三次元電磁界解析で、ケーブルは伝送線路解析を用いたハイブリッド解析を行うことで、製品使用環境でインバータから通信線に伝搬するノイズ電流を予測できる解析モデルを構築した。この例では動力ケーブルから通信ケーブルに伝搬する電磁ノイズ量の予測を目的とし、ノイズ源にはインバータの代わりに信号発生器を使用した。また、動力ケーブルは非シールド、通信ケーブルはシールドケーブルである。

図5に動力ケーブルと通信ケーブルを伝搬するノイズ電流の解析値と実測値の比較を示している。通信ケーブルに伝搬するノイズ電流は動力ケーブルに比べては10~15dB程度小さくなる。これは信号発生器から発生した電磁ノイズが主に動力ケーブル、モータ、アース線、グラウンド、アース線、制御盤Aを伝搬しているが、一部、グラウ

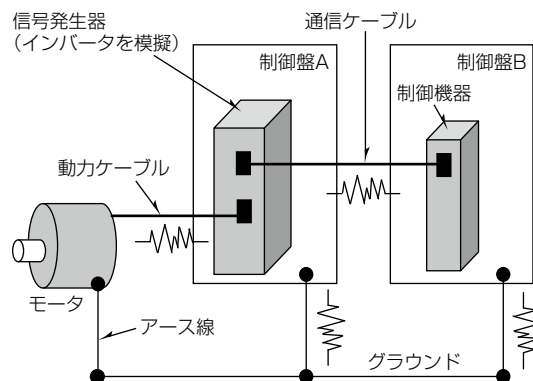


図4. 解析対象のモータ駆動システム

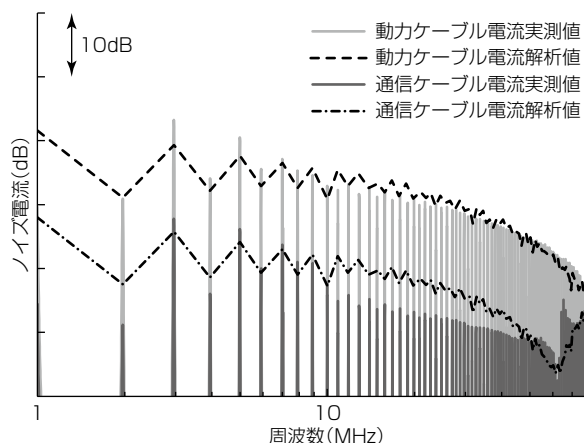


図5. ケーブルを伝搬するノイズ電流の解析値と実測値の比較

ンドで分流して制御盤B、通信ケーブルへと伝搬するためである。解析は、動力ケーブル、通信ケーブルの両電流を10dB以下の精度で再現できることを確認した。この解析モデルは2章で述べた電力変換器内部の電磁結合を考慮したモデルと組み合わせることで電力変換器から発生した後に周囲の通信ケーブルまで伝搬するノイズ電流の絶対値を予測することも可能になる。

4. アクティブノイズキャンセラの設計技術

電力変換器の小型化を実現するためには、2章で述べたように部品間の電磁結合の影響を抑制する配置やシールド対策をするとともに、ノイズフィルタの性能を維持しつつ、小型化することも必要となる。一般的にノイズフィルタの性能と小型化はトレードオフの関係にある。今回、ノイズフィルタの性能と小型化を両立させる方法としてノイズフィルタの磁性体コアにノイズキャンセル回路を付加することでノイズフィルタを構成するコイルの性能を維持しつつ、小型化を実現するアクティブノイズキャンセラの設計技術を開発した⁽⁵⁾。

図6にアクティブノイズキャンセラ回路を示す。アクティブノイズキャンセラは、①パワー半導体から発生した電磁ノイズを検出するための検出コイル、②検出した電磁

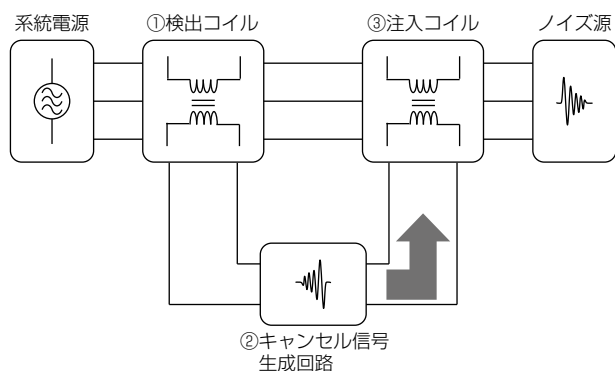


図6. アクティブノイズキャンセラ回路

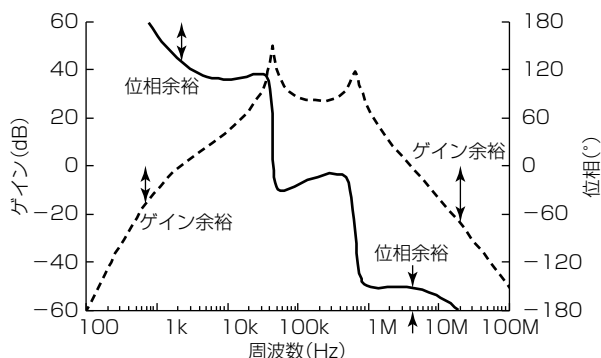


図7. 試作したアクティブノイズキャンセラの一巡伝達関数の実測結果

ノイズに対して逆位相となるキャンセル信号を生成するためのキャンセル信号生成回路、③生成したキャンセル信号を注入して電磁ノイズを低減させるための注入コイルから構成される。アクティブノイズキャンセラの設計手法として、①検出コイル→②キャンセル信号生成回路→③注入コイルの一巡伝達関数を評価し、ゲイン余裕と位相余裕を確保しながら、所望の帯域のゲインを増加させることで、負帰還安定度とノイズキャンセル効果の両立が可能になる。

図7に設計・試作したアクティブノイズキャンセラ一巡伝達関数の実測結果を示す。この例では150kHz～1MHzをノイズ低減のターゲット周波数として設計した。ターゲット周波数外の低周波帯域、高周波帯域共に十分なゲイン余裕と位相余裕を確保できており、安定な制御系を設計できたことが確認できる。アクティブノイズキャンセラをモータ駆動機器に適用した際のノイズ電流の実測結果を図8に示す。アクティブノイズキャンセラ回路を動作させることで、150kHzでコモンモードノイズ電流を40dB以上低減できることを確認できた。また、開発したアクティブノイズキャンセラは従来のノイズフィルタと比較して性能同等の場合に体積を1/5に低減できることを確認した。

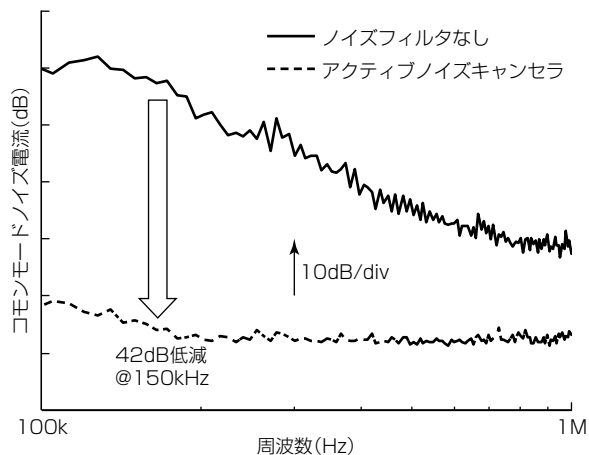


図8. アクティブノイズキャンセラ適用時のノイズ電流の実測結果

5. む す び

電力変換器から発生する電磁ノイズの伝搬量を予測するための技術として、電力変換器内部の電気部品の三次元モデル化によって、部品間の電磁結合の影響を考慮できるノイズ解析技術と機器に接続されるケーブル、負荷、制御盤等の製品使用環境の影響を考慮できるノイズ解析技術を開発した。また、電磁ノイズを検出してキャンセル信号を生成・注入することでノイズフィルタの性能と小型化を両立するアクティブノイズキャンセラの設計技術も開発した。今後、これらの技術の高度化と製品適用を進めて低ノイズな電力変換システムの構築に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 総務省：平成30年度版情報通信白書
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/
- (2) Takahashi, K., et al.: Mechanism of near-field coupling between noise source and EMI filter in power electronic converter and its required shielding, IEEE Trans. Electromagn. Compat. (2018)
- (3) Takahashi, K., et al.: Frequency domain simulation of conducted EMI in power electronic converters considering internal near field couplings by FEM, Proc. 2017 Int. Symp. Electromagn. Compat. (2017)
- (4) 三菱電機技術資料集「FA製品のシステム構築時におけるEMC設計ガイドライン」BQN-P0E100083
- (5) Mollov, S., et al.: A Fully-Isolated Robust Common-Mode Hybrid Filter, Proc. of the 10th Conference on Integrated Power Systems(CIPS) (2018)