

称号及び氏名 博士（工学） 東 聖

学位授与の日付 2020年3月31日

論文名 「パッシブおよびアクティブなフィルタによる
電力変換装置のノイズ低減手法に関する研究」

論文審査委員 主査 森本 茂雄
副査 石亀 篤司
副査 小西 啓治

論文要旨

近年の電力用半導体素子のさらなる高速化に伴い、スイッチング周波数の高周波化が進み、インバータが発生する **EMI(Electro-magnetic Interference)** ノイズは大きな問題となっている。**EMI** ノイズは電線を伝わる伝導ノイズや空中を伝わる放射ノイズに代表され、これらの発生量に対して国際的な法規制が発効されている。

鉄道車両においても、電気車用駆動システムとして **VVVF** インバータ搭載機器が一般的となり、インバータが発生する電磁ノイズによる障害がないよう設計が求められている。例として、電気車駆動のための負荷電流に重畳し、架線と軌道に伝導して流れる帰線電流ノイズが所定のレベルを超えると、軌道信号回路の軌道リレーなどに影響を及ぼすことが指摘されている。また、ノイズとして問題となる周波数や許容レベルは信号回路により多様であり、電気車が発生する帰線電流ノイズに対して評価上注意を要する信号が複数存在する。

このように、鉄道車両において多様な信号が存在するなか、高周波を扱う信号の例として、一部の在来交流線に設置されている速度照査用の **ATS (Automatic Train Stop)** ループ (**105 kHz**) があり、ループコイルの誘起電圧が **11 mV** を超えないレベルであることが評価される。すなわち電気車が発生する当該周波数のノイズが評価対象となる。また交流線であることから、電気車では主変圧器を介して 1 次側の高電圧を 2 次側に降圧してコンバータ回路が接続されるため、コンバータ及びインバータが発生するノイズ電流は主変圧器を介してレールに流出する。一方、主変圧器は巻線間浮遊容量の影響により高周波において複雑なインピーダンス特性をもつ。主変圧器のインピーダンス特性の例として、**100 kHz** 帯にも共振点が存在し、当該共振点が **105 kHz** に一致する場合には大きな共振電流が発生するという課題がある。

さらに、他の障害の例として **AM** ラジオノイズがあり、当該ノイズの低減は、車内におけ

る乗客の AM ラジオ聴講を良好にするという旅客サービスの一環としても重要視される。しかしながら、AM ラジオ帯域を含む 500 k ~ 1.5 MHz に着目したノイズ対策手法、並びにラジオノイズに起因する電流を対象とした回路シミュレーション手法に関する報告はこれまで無い。したがって、上記ノイズ対策手法ならびに回路シミュレーション手法の確立が課題である。

また、数 10Hz 等比較的低周波の帰線電流ノイズの発生要因として、インバータやセンサが完全に理想状態と成り得ず誤差を発生する点が挙げられ、このような外乱によりインバータ基本周波数成分のパワーリップルが発生し、フィルタコンデンサとフィルタリアクトルを介して帰線電流ノイズが現れる。直流架線で電力供給される電気車において帰線電流ノイズを低減するには、一般にフィルタにより帰線電流ノイズに対する減衰を強化する方式がとられる。しかし減衰対象とする帰線電流ノイズが 25 Hz 等の低周波軌道回路に適用されるような帯域の場合、フィルタ定数を充分大きくする必要があり、電気車装置が大型化するという課題がある。

さて、鉄道車両に限らず一般論として、EMI ノイズを低減する手法としてはパッシブフィルタを接続することが挙げられるが、インバータシステム全体の体積及びコストのアップは避けられない。また、パッシブフィルタを構成するリアクトルとコンデンサの共振や、リアクトルの鉄芯における磁気飽和の問題があり、多様なインバータの運転モードを考慮した設計が求められる。パッシブフィルタ以外による対策としては、能動素子を適用した「アクティブコモンノイズキャンセラ」や「アクティブ EMI フィルタ」が提案されている。アクティブコモンノイズキャンセラはインバータが発生するコモンモード電圧をトランジスタとコモンモードトランスにより除去し、モータ等の負荷を介して流れるコモンモード電流（漏れ電流）を抑制する。しかしながらコモンモードトランスによりコモンモード電圧を注入する必要があり、インバータの定格が比較的大きな機種に適用する場合、コモンモードトランスの体積・重量が課題となる。一方、アクティブ EMI フィルタはインバータの入力となる系統側のコモンモード電流を検出して当該電流をゼロとするようにトランジスタが動作する。コモンモード電流検出用のトランスも比較的小さなものでよいが、トランジスタは少なくともインバータの母線電圧以上の耐圧を必要とし、トランジスタにおける損失が課題となる。さらに、欧州 EN 規格が低減を要求する伝導ノイズは擬似電源回路網（LISN）により測定されるが、ノーマルモードとコモンモードの両者のノイズを同時に測定する。従来提案されている方式ではコモンモード電流のみの低減を目的とするため、ノーマルモードによる伝導ノイズが残留し、対策が不十分となる課題がある。

以上に述べた課題を鑑み、本論文では、はじめに鉄道車両向け電気車に搭載されるインバータ等の電力変換装置が発生する 3 つのノイズ種類を対象に、それぞれ低減手法を提案し、具体的な設計例を提示するとともに、提案するノイズ低減手法の有効性を実証することを目的とする。次に、鉄道車両に限らずファン・ポンプ駆動を例とした一般産業に用いられる汎用インバータなどへの適用を目指し、150 kHz 以上の伝導ノイズの低減を実現する「アクティブノイズフィルタ」を提案し、その具体的な設計例を提示するとともに、ノイズ低減手法の有効性を実証することを目的とする。

第 2 章では、105kHz の帰線電流ノイズをパッシブフィルタで効果的に対策可能とする二重直列共振フィルタを提案した。本フィルタは主変圧器とコンバータの間に接続され、コンバータが発生する 105kHz のノイズ電流をバイパスし、主変圧器に流出しないように動作する。またリアクトルとコンデンサからなる並列回路の作用により、バイパスしたい周波数でのフィルタインピーダンスを下げるると共に、フィルタの反共振でのダンピング特性を併せ持ち、不要な電流流出を抑制する。本フィルタの回路構成を示し、コンバータ発生電圧に対する伝達特性について述べた。次に試作した二重直列共振フィルタ単体を対象に伝達特性の測定結果を示し、所望の減衰特性が得られることを示した。更にコンバータ実動作でのフィルタ減衰量を確認するために、AC 20 kV 受電の検証システムにて帰線電流ノイズを測定し、

フィルタ接続により約 **5 dB** の低減効果が得られることを確認した。最後に当該帰線電流ノイズにより発生する **ATS** ループコイル出力電圧を無限長電流近似により求め、測定した帰線電流ノイズが規制値に対してクリアできることを確認した。

第 3 章では、電気車に搭載する **VVVF** インバータシステムを対象に、インバータが発生する **AM** ラジオノイズ、及びこのノイズに起因する電流に着目し、具体的な低減対策方式を提案した。はじめに **VVVF** インバータを冷却するフィンの接地線の接続先変更による特定共振周波数の対策について提案した。次にモータ接地経路を含むコモンモード電流を低減するために、モータ接地線の接続先変更による妨害波低減方法について提案した。これらの対策による効果を **VVVF** インバータシステム単体で確認すると共に、車両に **VVVF** インバータを搭載し、現車にて機械式ブレーキをかけながら極低いトルクでインバータを起動する試験、並びに走行試験により上記対策の効果を確認した。本対策においては別途新規のコモンモードコアを用いずに既設のコモンモードコアを流用することから、簡便で効果的な対策が実現できた。最後に **AM** ラジオ帯の妨害波に起因する電流を対象としたシミュレーションモデルについて提案した。**AM** ラジオ帯を対象に **VVVF** インバータや周辺機器の浮遊インピーダンス、各部品の端子間インピーダンスを反映させた回路モデルとした。当該シミュレーションモデルを用いて上記各対策を模擬して得られた電流波形は、電流ピークの共振周波数が概ね一致すること、並びにその電流ピーク値が **6 dB**（実測値の半分）の誤差範囲内で一致するなど、実測結果と同様の傾向が得られた。

第 4 章では、ベクトル制御においてトルク電流指令の補正を行い、モータ瞬時パワーを用いてフィルタコンデンサのエネルギーの交流ノイズ成分、ひいては帰線電流ノイズを低減するエネルギー補償形アクティブ制御を提案した。はじめにフィルタコンデンサエネルギーとモータ瞬時パワーの関係について述べた。次に本制御方式の制御構成及びゲイン設計について示し、開ループボード線図による制御安定性の評価方法を示した。また実機試験により帰線電流ノイズの低減効果を検証し、制御ゲインを **0.25** に設定した例において帰線電流ノイズの **25 Hz** 成分が約 **10 dB** 低減することを確認した。更に制御系の安定限界ゲインを実機検証し、開ループボード線図による制御設計の有効性を述べた。

第 5 章では、伝導ノイズの原因となるコモンモード及びノーマルモードいずれも低減可能で、コモンモードトランスを必要とせず、トランジスタの耐圧を低減することを特長とするアクティブノイズフィルタを提案した。始めに動作原理を述べ、具体的な回路構成と制御設計手法を示した。次に試作回路をインバータに接続して誘導電動機を運転したときの、**LISN** に流れ込むノーマルモード電流及びコモンモード電流の抑制効果を示した。また、**LISN** で測定される伝導ノイズの抑制効果を実験により示し、**1 MHz** 以下の帯域にて最大 **20 dB** の抑制効果が得られることを確認した。

最後に、第 6 章では、結論として本論文についての総括をしている。

審査結果の要旨

本論文は、電力変換装置が発生するノイズをパッシブフィルタおよびアクティブフィルタにより低減する手法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 一部の在来交流線に設置されている速度照査用の ATS ループ (105 kHz) に影響を及ぼす電気車に搭載された電力変換装置が発生する 105kHz の帰線電流ノイズをパッシブフィルタで効果的に対策できる二重直列共振フィルタを提案した。試作した二重直列共振フィルタ単体の伝達特性の測定結果より所望のノイズ減衰特性が得られることを示すとともに、検証システムにて帰線電流ノイズの低減効果を確認し、帰線電流ノイズが規制値以下にできることを確認した。
- (2) 電気車に搭載する VVVF インバータシステムを対象に、インバータが発生する AM ラジオノイズ及びこのノイズに起因する電流に着目し、具体的な低減対策方式を提案した。VVVF インバータを冷却するフィンの接地線の接続先変更、VVVF インバータを冷却するフィンの接地線の接続先変更による簡便で効果的な対策法であり、各種試験により効果を確認した。また、AM ラジオ帯の妨害波に起因する電流を対象としたシミュレーションモデルを提案し、シミュレーションにより実測結果と同様の傾向が得られることを確認した。
- (3) 誘導電動機のベクトル制御においてトルク電流指令の補正を行い、モータ瞬時パワーを用いて帰線電流ノイズを低減するエネルギー補償形アクティブ制御法を提案した。提案制御方式の制御構成及びゲイン設計法について示し、実機試験により帰線電流ノイズの低減効果を確認した。
- (4) 伝導ノイズの原因となるコモンモード及びノーマルモードいずれも低減可能で、コモンモードトランスを必要とせず、トランジスタの耐圧を低減することを特長とするアクティブノイズフィルタを提案した。具体的な回路構成と制御設計手法を示し、実機試験によりノーマルモード電流及びコモンモード電流の抑制効果、伝導ノイズの抑制効果を確認した。

以上の諸成果は、電力変換装置の高効率化を目的にスイッチング素子はますます高速化されてノイズ低減が重要視されている中で、本論文で提案した各種ノイズ低減手法により、各種電力変換装置のノイズが低減され、かつ小型・軽量・低コストを同時に実現できるとともに高効率な電力変換装置の適用領域の拡大に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。