

## 学位論文題名

PWMインバータ給電モータ駆動システムのスイッチング  
に起因する障害に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年、パワー半導体デバイスが飛躍的に進歩し、高速・低損失なデバイスが安価に使用できるようになった。それに伴い、アプリケーションごとに電力を自在に変換できるパワーエレクトロニクス機器が一般家庭から産業、自動車業界にまで広く普及し、地球環境保全のための省エネルギー化に貢献している。

一方で、パワーエレクトロニクス機器の普及に伴い、EMI(Electromagnetic Interference:電磁障害)問題も無視できなくなっている。パワーエレクトロニクス機器は、パワー半導体デバイスを高速にスイッチングすることで任意の電圧・周波数を出力することが可能である。パワーエレクトロニクス機器として具体的にインバータ給電モータ駆動システムを考える。AC200 V 給電の場合、インバータは DC300 V 程度の直流電圧をスイッチングするため、モータ端子はスイッチングの度に大きく変動する。さらに、パワー半導体デバイスのスイッチングには損失を伴うため、スイッチオンからオフ、オフからオンの過渡状態を極力短くしようと高速化が図られてきた。実際には、数 10 ns オーダーの間に数 100 V の電位変動が発生する。このような急峻な変動により、モータ端子とモータフレーム（一般的に接地されている）間の浮遊静電容量を介して、高周波電流が接地系に流出する。この高周波漏れ電流は、電源に接続されている他機器に流れ込み誤作動を引き起こす伝導性 EMI、電源からインバータへ戻ることで大きなループを形成することにより空中に電磁波を放出する放射性 EMI の原因となる。さらに、接地端子間のインピーダンスにより、接地端子間に接地電位差を発生させ、新たな伝導性 EMI の原因にもなる。また、インバータ出力電圧の急峻な変動は、モータシャフトとフレーム間に電位差（軸電圧）、ベアリング電流を発生させ、ベアリングの寿命を低下させる。今後、ますますパワー半導体デバイスが進歩してゆくことで、パワーエレクトロニクス機器のスイッチングに起因する障害はさらに重大な問題となってゆくと想定される。

本研究では、PWM インバータ給電モータ駆動システムにおいて、スイッチングに起因する障害の解析を行う。まず伝導性 EMI の解析として、高周波電流が接地系に流出することで発生する高周波接地電位差を開発した専用プローブにより実測する。接地電位差はモータ駆動システムの電力線を配置した格子状グラウンドプレーンの各格子点において、高周波接地電位の測定を行い、接地系におけるノイズ伝搬の検討を行う。さらに測定データを再構成して接地電位分布を合成し、接地系におけるノイズ伝搬の可視化を試みる。

一方で、先に挙げた伝導性・放射性 EMI の発生原理やベアリング電流については、一般的な構成としてはメカニズムが明らかとなっている。しかし、未だ発生原理が不明確な現象も存在する。そこで、インバータ給電モータ駆動システムにおける障害について、従来のメカニズムでは説明がつかない事例についての解析を行う。

1 例目は、非接地モータの軸電圧とベアリング電流について、実験とシミュレーションにより検討を行う。軸電圧の実測より、従来起こりにくいと考えられてきた非接地モータにおいても軸電圧・ベアリング電流が発生し、また、従来の発生メカニズムでは説明できないスイッチング時刻以外で

発生するベアリング電流が存在することを実験的に示す。次に、非接地モータの軸電圧とベアリング電流の発生メカニズムを解明するためにシミュレーションモデルを構築する。その結果、非接地モータの軸電圧・ベアリング電流は三相モータ巻線のインダクタンスや浮遊静電容量の非対称性ならびに、共振現象に起因して発生していることを明らかにする。

2 例目は、サーボドライブの位置決め整定時モータ位置変動について、発生観測とメカニズムの解明、さらに抑制手法の提案を行う。位置制御された AC サーボモータの位置決め時にモータの位置変動を観測することにより、電源周波数に依存した電源周波数の 2 倍周波数 (50Hz 電源ならば 100Hz) の位置変動が生じること、従来は考えられていなかった低周波のモータ位置変動がインバータスイッチングによる高周波現象に関係することを示す。次に、モータ位置変動の発生メカニズムを解析するため、インバータ駆動サーボシステムの高周波等価回路、位置制御モデルをそれぞれ、回路シミュレータである OrCAD 社 PSpice、数値解析ソフトウェアである MathWorks 社 MATLAB/Simulink により構築する。構築したモデルを連成解析することにより、モータ位置決め整定時の電源周波数に依存したモータ位置変動を模擬する。解析により、モータ位置決め時の位置変動発生は高周波漏れ電流と、インバータ電流不連続により発生することを示す。さらに、発生メカニズムからモータ位置変動抑制法を 2 件提案し、有効性を実験的に示す。

本研究により、これまで見ることが出来なかった接地系を伝搬するノイズの可視化が可能となる。また、従来のメカニズムでは説明ができない非接地モータの軸電圧・ベアリング電流の発生メカニズムを明らかとなる。さらに、サーボシステムにおける位置決め整定時のモータ位置変動について発生メカニズムを明らかとし、位置変動抑制手法を提案、有効性を実証する。本研究で得られた知見は、今後ますます重要視されるインバータスイッチングに起因する障害の理解、ならびに対策の一助となる。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 小笠原 悟 司 |
| 副 査 | 教 授 | 五十嵐 一   |
| 副 査 | 准教授 | 竹 本 真 紹 |

## 学 位 論 文 題 名

# PWMインバータ給電モータ駆動システムのスイッチング に起因する障害に関する研究

近年の IGBT やパワー MOSFET などのパワー半導体デバイスの進歩に伴い、PWM インバータ給電モータ駆動システムなどのパワーエレクトロニクス機器が一般産業や自動車分野のみならず家電品にまで広く普及し、省エネルギーに大きく貢献している。これらのパワーエレクトロニクス機器は、パワー半導体デバイスのスイッチング動作により高効率の電力変換を実現しているが、このスイッチング時には電圧・電流の急峻な変化を伴うために、様々な障害を引き起こす可能性がある。その代表例のひとつが EMI(Electromagnetic Interference:電磁障害)である。このような急峻な変動により、モータ・フレーム間などの浮遊静電容量を介して、高周波電流が接地系に流出する。この高周波漏れ電流は、電源に接続されている他機器に流れ込み誤作動を引き起こす伝導性 EMI、電源からインバータへ戻る大きなループを形成することにより空中に電磁波を放出する放射性 EMI の原因となる。本論文では、PWM インバータ給電モータ駆動システムにおいて、これまで解明されていなかったスイッチングに起因する様々な障害のメカニズム解明とその防止法の開発を行っている。本論文で取り扱っている三種類のスイッチングに起因する障害は、この分野の研究者・技術者に認識はされてきたがその発生メカニズムも解明されていなかった重要な問題であり、この観点からも本研究は独創的・実用的な優れた研究であると言える。

第 3 章では、PWM インバータ給電モータ駆動システムにおいて、スイッチングに起因して接地系に発生する接地電位変動の測定ならびに接地電位変動の伝搬の可視化を行っている。これまでこのような測定のできる測定器はなかったため、高周波接地電位差測定プローブを新たに開発している。これを用いて、モータ駆動システムの電力線を配置した格子状グラウンドプレーンの各格子点において、高周波接地電位の測定を行い、さらに測定データを再構成して接地電位分布を合成し、接地系における接地電位の伝搬の可視化をはじめて実現している。

第 4 章では、非接地モータの軸電圧とベアリング電流について、実験とシミュレーションにより検討を行っている。従来は発生しないと考えられてきた非接地モータの軸電圧・ベアリング電流の問題が、実際には発生することを軸電圧の測定により示している。また、従来の発生メカニズムでは説明できないスイッチング時刻以外で発生するベアリング電流が存在することを実験的に示している。次に、非接地モータにおいてこの発生メカニズムを解明するためにシミュレーションモデルを構築し、非接地モータの軸電圧・ベアリング電流が三相モータ巻線のインダクタンスや浮遊静電容量の非対称性ならびに、モータ巻線内部の共振現象に起因して発生していることを明らかにしている。

第 5 章では、サーボドライブ位置決め整定時のモータ位置変動について、発生メカニズムの解明

と抑制手法の提案を行っている。位置制御された AC サーボモータの位置決め時にモータの位置変動を観測し、電源周波数の 2 倍周波数 (50 Hz 電源ならば 100 Hz) の位置変動が生じることを実験により示している。さらにこの低周波のモータ位置変動が、これまでは関係ないと考えられてきたインバータのスイッチングによる高周波現象に関係することを実験的に示している。次に、インバータ駆動サーボシステムの高周波等価回路と位置制御モデルを、回路シミュレータ PSpice と数値解析ソフトウェア MATLAB/Simulink によりそれぞれ構築し、両者を連成解析することにより、モータ位置決め整定時の電源周波数に依存したモータ位置変動を模擬できることを示している。詳細な検討により、モータ位置決め時の位置変動発生は、高周波漏れ電流とインバータ電流不連続により発生することをはじめて明らかにしている。さらに、発生メカニズムからモータ位置変動抑制法を 2 件提案し、その有効性を実験的に示している。

これを要するに、著者は、これまで未解明のスイッチングに伴い発生する障害への検討、すなわち接地系を伝搬する電位変動の可視化、非接地モータの軸電圧・ベアリング電流の発生メカニズムの解明、サーボシステム位置決め整定時のモータ位置変動の発生メカニズムの解明と位置変動抑制手法の提案について新しい知見を得たものであり、電気工学ならびにパワーエレクトロニクス分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。