

報告番号	甲 第 14697 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 直流ブラシモータにおけるアーク放電を考慮したサージおよび電磁ノイズのモデリングに関する研究
(A Study on Surge and Conducted EMI Modeling for a DC Brush Motor Considering Arc Discharges)

氏 名 片桐 高大

論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、自動車をはじめとする様々な機器・システムで使用される、直流ブラシモータとパワーエレクトロニクス機器を組み合わせたシステムについて、シミュレーションを活用した電磁ノイズ対策のフロントローディング設計を実現するためのモデリング技術開発について論じる。

第 1 章では、研究の背景、研究の目的と対象範囲について述べ、研究方針と論文の全体構成を示す。研究の背景では、CASE, MaaS をはじめとするモビリティ未来社会の安心・安全で快適な実現には、電磁ノイズ技術が密接に関係していることを取り上げ、シミュレーションを活用した電磁ノイズ対策のフロントローディング設計の実現には、そのモデリング技術開発が重要であることを述べる。研究の目的では、自動車における代表的な電磁ノイズ発生源として、パワーエレクトロニクス機器と直流ブラシモータが挙げられることを示す。パワーエレクトロニクス機器単体の電磁ノイズ解析技術が確立されつつあることから、本研究の対象範囲として (1) 直流ブラシモータ、(2) 直流ブラシモータとパワーエレクトロニクス機器である DC-DC コンバータを組み合わせたシステムに焦点を当てる。研究方針では、直流ブラシモータのモデリングには、電氣的・機械的な技術領域を横断した「電磁ノイズ」「アーク放電」「ブラシモータ」の分野を組み合わせた技術開発が必要であることを述べる。

第 2 章ではまず、直流ブラシモータの基本的な動作原理である整流のプロセスについて

解説する。次に、直流ブラシモータのサージと伝導ノイズ解析に関する先行研究とそのアプローチを俯瞰・分析する。サージに関しては波形が発生毎に変動するため、その最大条件は不明確であり、これらを解析で定量的に再現する検討はほとんどなされていないことを示す。伝導ノイズについては、ノイズ伝搬経路とノイズ源のモデリング手法の観点から 3 つの手法に大別できることを述べる。そのなかで本研究は、物理現象に基づきサージや伝導ノイズを定量的に再現するために、「モータ等価回路モデルにブラシー整流子片間モデルを組み合わせる手法」に着目し、ノイズ伝搬経路であるモータ等価回路モデル、ノイズ源であるブラシー整流子片間モデルについて、本研究におけるアプローチを定め、本研究の立ち位置とモデリングの位置づけを明確にする。また、本研究で評価対象とするモータの構成についても解説する。

第 3 章ではサージ波形の分析と分類を行う。まず、直流電流とセグメント対地間電圧に重畳するサージ波形の測定条件と手法について述べる。続いて、実測したサージ波形が単発アーク（ブラシー整流子片間の微小ギャップにおいて、極めて短時間ではあるが連続的に発生しているアーク）とアーク再発弧の有無により、4 種類に分類できることを示す。さらに、それらの詳細なメカニズムを分析し、サージ波高値が最大となる条件を特定した。開離時に単発アークやアーク再発弧が生じない場合は、機械的な開離と電気的な開離が同時に発生する。この場合、整流後においてコイルに残留するエネルギーが大きく、サージ電圧の波高値が最大となる。開離時に単発アークを伴う場合、機械的な開離が起こってもアーク放電によって接点間の電気的な接続状態が維持される。このときサージ電圧には、接点材料に依存する一定の電圧を維持する挙動が新たに生じる。アーク放電の継続時間には様々な要因でバラつきが生じており、サージ電圧の波高値はアーク継続時間が長いほど小さくなる傾向にあることを示し、そのメカニズムを分析する。アークの再発弧が発生する場合、電流にも顕著なサージが重畳する。アークの再発弧は連続的に発生する場合（間欠アーク）があり、間欠アークが発生する場合は数百 kHz 程度の不定周期で多数のサージが観測される。

第 4 章では、ノイズ伝搬経路である等価回路のモデリング手法を示す。まず、直流ブラシモータの等価回路モデリング手法に関して、単スロットとフルスロットの両視点から述べ、インピーダンス特性の測定条件と手法について解説する。続いて、単スロットの巻線間インピーダンスについて、回転角依存性が生じることと、そのメカニズムを解明する。さらに、内蔵されたノイズ対策部品であるリングバリスタの特性も考慮し、インピーダンス特性を精度良く再現できる単スロットの等価回路構築手法を述べる。また、回転角依存性に加え、スロット間の磁気結合と接続配線等の寄生インダクタンスを考慮することで、単スロットの組み合わせでフルスロットのインピーダンス特性を表現できるブラシモータの等価回路を構築し、伝搬経路である等価回路のモデリング手法を確立した。

第 5 章では、ノイズ源であるブラシー整流子片間のモデリング手法を示す。まず、回路解析モデルの構成要素と概要について述べる。続いて、アーク放電を伴わない場合、単発

アーク、間欠アークを含めたアーク再発弧をそれぞれ考慮したブラシー整流子片間のモデリング手法を解説するとともに、サージ波高値の解析精度を検証する。開離時にアーク放電を伴わない場合におけるブラシー整流子片間の挙動は、開放と短絡を周期的に繰り返す可変抵抗でモデル化できる。その結果、波高値やリング周期など、サージの挙動を再現でき、提案する回路解析モデルの妥当性を示す。さらに、開離時に単発アークやアーク再発弧を伴う場合、サージ波形には、アーク電圧やアーク柱の内部抵抗、ブラシー整流子片間の浮遊容量、アーク放電の継続時間や繰り返し等の影響が含まれることを解説する。アーク放電を伴わない場合のモデルを発展させ、単発アークとアーク再発弧を考慮したブラシー整流子片間モデルを構築することで、アーク放電を伴う場合においても、サージ波高値の定量的な再現を可能とするモデリング手法を確立した。

第 6 章では、直流ブラシモータ単体における伝導ノイズの解析手法を示す。まず、CISPR25 に準拠した伝導ノイズの測定条件と手法について述べる。続いて、第 5 章で解説する 4 種類のブラシー整流子片間モデルそれぞれで伝導ノイズ解析を行い、複数のアーク放電の挙動が伝導ノイズに及ぼす影響を考察する。その結果、間欠アークが発生する場合が伝導ノイズの最大条件であることを解明した。提案するモデリング手法により、直流ブラシモータ単体動作時の伝導ノイズを 9 dB 以内の精度で再現できるだけでなく、単発アークやアークの再発弧が伝導ノイズに及ぼす影響を推定することが可能である。従って、本手法は伝導ノイズの再現だけでなく、メカニズム分析や物理現象の理解にも役立てることができる。これは従来のモデリング手法に対する大きな新規性であり、サージだけでなく伝導ノイズについても解析での定量的な再現を可能とする直流ブラシモータのモデリング手法を確立した。

第 7 章は、直流ブラシモータとパワエレ機器の組み合わせシステムにおける伝導ノイズ解析手法を示す。まず、パワエレ機器として試作した降圧 DC-DC コンバータについて、構成部品のインピーダンス特性と半導体素子のスイッチング特性を考慮した回路解析モデルを構築し、0.1 ~ 108 MHz で 6 dB 以内の精度で伝導ノイズを再現できるモデリング手法について述べる。続いて、組み合わせシステムでは直流ブラシモータのノイズが機器外部へ伝搬しやすくなる特有の要因として、以下 2 つの影響が支配的であることを見出した。

- (1) 降圧 DC-DC コンバータの入出力の閉回路ループ間に生じる磁界結合
- (2) ケーブルとシールドボックス間の浮遊容量と、伝搬経路のインピーダンス不平衡に起因する電磁ノイズのモード変換

これらの影響を考慮することで、直流ブラシモータ単体のみならず、降圧 DC-DC コンバータと組み合わせたシステムにおいても、伝導ノイズを定量的に解析できることを述べる。

第 8 章では、本研究の成果と開発したモデリング手法の展望について総括する。