

報告番号	甲 第 11456 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 インバータ駆動モータにおける部分放電メカニズムと絶縁性能向上に関する研究

氏 名 脇本 亨

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、CO<sub>2</sub>の排出削減や低燃費による経済性から、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)などの電気車両が注目されている。これら電気車両の性能向上に向け、駆動電圧の上昇や新たなパワー素子(SiC等)、新たなモータ巻き線構造(平角線等)の採用によるインバータ・モータの小型・高効率化が進められている。しかし、これらの新技術を適用する際、モータ内コイル線間のサージ電圧上昇によって発生する部分放電が問題となることから、これを抑制するモータの絶縁技術が重要となる。モータの絶縁を確保するためには、モータに発生するサージ電圧を抑制し、モータの皮膜厚を適切に確保することが必要になるが、このためには、モータの絶縁設計においてサージ電圧を推定し抑制するための手法や、絶縁設計・工場での品質検査において皮膜厚を評価するための線間の部分放電開始電圧(PDIV)の正確な計測手法が求められる。

以上の観点から、本研究では電気車両用モータの絶縁設計や工場検査の合理化・最適化を目的に、サージ電圧の推定手法構築を通じた抑制手法の提案、および平角線モータにおけるコイル間の PDIV 変動メカニズム解明を通じた低ばらつきなモータステータの PDIV 測定手法の提案を目標に解析・検証を行った。

本論文は、全7章により構成されている。以下に本論文の各章の概要を示し、学術的および工学的意義について述べ、最後に今後の展望を示す。

#### 第2章 周波数応答解析によるモータサージ電圧の推定

本章では、電気車両の駆動用モータにおいて、インバータ出力端からモータ入力端の電圧波形を簡易に計算する手法について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) インバータ出力端における電圧波形の周波数成分とケーブルの電圧周波数応答関数との周波数演算から、モータ入力端における電圧波形の計算が可能である。
- (2) ケーブル周波数応答関数の増幅域を高周波側に移し、ゲインピークを下げることで、スイッチングの高速化やモータ入力端電圧の低減が可能になる。

本手法は、任意のインバータ出力波形からモータ入力端のサージ電圧を推定する際に有効であることを示した。

### 第3章 モータサージ電圧の抑制

本章では、電気車両の駆動用モータにおいて、モータ入力端のサージ電圧を抑制する手法について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) インバータ出力端の立ち上がり時間を短くしていくと、モータ入力端の電圧は、スイッチング波形の周波数成分がケーブル周波数応答関数の増幅域にかかる条件で急激に上昇する。スイッチングの高速化とサージ電圧の抑制を両立するためには、インバータ出力端の立ち上がり時間をこの増幅域に調整することが効果的である。
- (2) プレスイッチングによりモータ入力端のリングングをキャンセルし、最大電圧を抑制できる。

### 第4章 平角線間の部分放電特性

本章では、平角線のテストピースにおいて、線間に発生したプレ放電が PDIV 測定毎のばらつきや過渡的な PDIV 変化(推移)に与える影響を明らかにするため、環境湿度、測定周波数を変えて調査を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) プレ放電に対する PDIV の過渡特性は湿度環境によって大きく異なる。
- (2) 低湿度環境(20 %RH)において、プレ放電(1 kHz)を行った際の 50 Hz における PDIV は、平均値は大きく変わらないものの、プレ放電初期に測定毎のばらつきが発生するのに対し、プレ放電を行うことでそのばらつきは徐々に低下する。
- (3) 高湿度環境下(95 %RH)において、プレ放電(1 kHz)を行った際の 50 Hz における PDIV は、プレ放電初期に PDIV が一時的に低下しその後上昇する過渡特性を示す。
- (4) PDIV のばらつきは、PDIV の測定周波数が低いほど大きくなる。

これらの現象は、形状が異なる 2 種類の平角線で同じ特性を示すことに加え、PD の発生個所は PDIV の推移特性と同期して変化する。以上の評価から、今回明らかにした湿度環境とプレ放電による PDIV のばらつきや推移は、再現性のある現象であると共に、放電メカニズムの推移に起因することが示唆される。

### 第5章 プレ放電による PDIV 変動メカニズム

本章では、乾燥下、高湿下において PDIV がプレ放電によってばらつきや過渡変化が発生するメカニズムを明らかにすることを目的に解析を行い、以下を明らかにした。

- (1) 低湿度環境下では、プレ放電初期に皮膜表面への帯電によって局所的な電位差や電界強度の上昇が起り、PDIV にばらつきが発生する。
- (2) 高湿度環境下では、プレ放電後における皮膜表面への部分的な水分付着によって表面導電率が局所的に上昇し、ギャップ電界が変化することで PDIV が変動する。水分が対向する平角線の接触点を含まずに部分的に付着した場合は、ギャップ電界を強めるため PDIV が低下し、水分が接触点を含んで付着する場合は逆にギャップ電界を弱めるため PDIV が上昇する。
- (3) 高湿度環境下における PDIV の推移は、水分の付着部分が過渡的に変化し、ギャップ電界が過渡的に変化することで生じる。
- (4) 高湿度環境下におけるプレ放電後のギャップ電界強度の変化量は、測定周波数が高いほど小さくなるため、PDIV の変動量も小さくなる。

## 第 6 章 モータステータにおける低ばらつきな PDIV 測定手法

本章では、実際の平角線モータを用い、プレ放電がステータコイル間の PDIV に与える影響について調査し、第 5 章にて明らかにしたテストピースによる解析から、以下に示す PDIV 変動のメカニズムおよび低ばらつきな PDIV の測定手法を提案した。

- (1) 乾燥下におけるモータステータのコイル間 PDIV は、テストピース同様に帯電の影響によりプレ放電初期にばらつきが発生するのに対し、高湿下では、個体によってプレ放電による PDIV のばらつき・推移が異なる。
- (2) モータステータにおける高湿下の PDIV 変動は、平角線間の接触パターンに影響を受け、モータ内に線間距離 100  $\mu\text{m}$  程度の非接触箇所が 1 つでも存在する場合、プレ放電によるこの箇所の電界強度変化が小さく PD が発生し続けるため、PDIV は過渡的に上昇しない。
- (3) モータステータにおいて PDIV を安定的に測定する手法として、湿度管理(50 %RH)、プレ放電(20 %RH, 30 s 程度)、測定周波数の上昇(90 %RH, 1 kHz 程度)が有効であることを検証した。

## 第 7 章 総括

本章では、本研究の総括を行った。

### 本研究の学術的および工学的意義

本研究では、インバータ駆動モータにおいて、モータコイル間に発生するサージ電圧の簡易な推定手法を構築し、コイル間のサージ電圧を低減する手法を示した。また、平角線モータを対象に、正弦波電圧におけるコイル間の PDIV 変動メカニズムを解明することで低ばらつきとなる測定法を示した。サージ電圧の推定手法については、従来から電圧の反射モデルが提唱されてきたものの、電気車両のようなケーブル長の短いシステムでは実用上の適用が難しかったのに対し、本手法は FFT 演算を適用した計算を行うことで、実際の

モータの駆動電圧波形とよく一致する簡易な手法を示した。また、この手法を用いることで、インバータの任意の出力波形に対して、モータの入力部だけでなく複雑に変化するモータ内の電圧挙動を解析することができる。

一方、コイル間の PDIV 特性においては、環境湿度と繰り返し測定を想定したプレ放電に対する PDIV の過渡変動に与える影響を調査し、乾燥環境下ではプレ放電による帯電によってその特性が変化するのに対し、高温下ではプレ放電に起因した皮膜表面の局所的導電率の変化によって PDIV が過渡的に推移することを見出した。そして、ステータにおける測定では、平角線間の接触パターンで PDIV 推移が異なるため、測定する個体によって PDIV 変動が変わることを示し、一連の解析からステータにおける低ばらつきな PDIV の測定方法を提案した。

本研究で得られた成果は、インバータ駆動モータシステムにおけるモータコイル間のサージ電圧の推定・抑制手法の開発、およびモータステータにおけるコイル間の PDIV メカニズムの解明と低ばらつきな PDIV 測定手法の提案である。これらの成果は、今回対象とした電気車両の分野に留まらず、産業用モータや電力分野など、サージ現象や部分放電現象の解析に関わる幅広い分野に貢献する工学的意義を有するものと考えられる。

#### 今後の展望

進化し続ける電気車両システムに対し、今後も電気駆動システムの性能向上が続けられる。そのためには、絶縁品質に対してもこれまでの製品単体からバッテリー・インバータ・モータの電気システム全体を見据えた合理的・最適な絶縁設計がますます重要になる。その中で、本研究で得られたインバータ出力部からモータ入力部の電圧波形を推定し抑制する技術は、今回評価対象としたモータ入力部のサージ電圧だけでなく、モータ内部の複雑な電圧挙動の解析など、あらゆる箇所への適用が可能となる。従来、コイル内の分担電圧は、実際に測定するかモータ内の詳細なモデルを構築することで解析が進められてきたが、本研究によって構築した電圧の推定手法はこの様な複雑な電圧現象を理解し対策を進める上で有用であり、今後のシステム開発において貢献するものと考えられる。

また、本研究で示した皮膜表面導電率に着目した部分放電現象の考え方や解析手法は、今回提案したモータの絶縁設計や工場検査における低ばらつきな PDIV 測定手法として応用できるだけでなく、皮膜を含めた新たな絶縁材料の開発や新たな絶縁設計思想の開発にヒントを与える貴重な知見であると考えられる。

この様に、今後も本研究で得られた知見をベースに、さらにモータシステム全体の最適な絶縁設計や他分野への応用に向け、測定・解析・設計手法を発展させていくことが重要である。