

報告番号	甲 第 13134 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目    **インバータ駆動モータ巻線の部分放電開始電圧に及ぼす環境要因の影響に関する研究  
(Effects of Environmental Factors on Partial Discharge Inception Voltage of Magnet Wires for Inverter-fed Motors)**

氏 名    梶 武文

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、世界各国で排ガス規制が強化されており、自動車の電動化が検討されている。このような電動化自動車で用いられる高電圧モータは、低電圧で駆動するモータと比べて高出力かつ高効率であることから、重要な電動化のためのコンポーネントとなっている。しかし、インバータとケーブルおよびモータのインピーダンス不整合によって電圧反射が発生することなどが原因で、モータ内部に高電圧のインバータサージが発生するため、そのためモータ間の部分放電に対する絶縁信頼性確保が重要である。しかし、冗長な絶縁設計では、限られた搭載環境においてモータ性能を満足できないため、合理的な絶縁設計が必要となっている。

さらに近年の周辺技術開発の動向として、スイッチング素子に対して SiC や GaN などのパワー半導体の適用が、性能向上のため車載インバータへの適用が検討されている。これにより、従来と比較して、駆動電圧の向上や高速スイッチングに伴うサージ電圧の増加、またモータ使用環境の変化に伴って、絶縁を確保する要件は今後も厳しくなることが予想されている。

これまで、広く用いられてきた絶縁の考え方として、環境や材料など各要因が正弦波電圧下の PDIV に与える影響を考慮して、モータの絶縁信頼性が確保されてきた。しかし、今後の技術動向を考えた場合には、より製品に則した条件を考慮することによる絶縁の合理

化が求められている。そこで本研究では、高電圧モータにおける絶縁設計の合理化を目的として、正弦波電圧下の PDIV に環境および材料が与える複合的影響、およびサージ電圧下の PDIV に環境要因が与える影響を研究した。

以下に、本論文は全 5 章により構成されるものであり、以下の各章での概要と本研究で得られた成果を総括する。

## 第 1 章 緒言

### 第 2 章 正弦波電圧下の部分放電開始電圧に環境および材料が与える影響

実際の車載用モータの場合には、ユーザの使用条件や天候によって環境要因(温度, 気圧)および材料要因(皮膜水分量, 熱劣化)が変化し、部分放電絶縁に対して複合的な影響を与える可能性がある。そこで、モータの絶縁信頼性を向上させることを目的として PDIV 影響因子の複合的影響を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 環境因子(温度, 気圧)が PDIV に与える影響は、空気密度を考慮したパッシェンカーブと、空気の分担電圧から解析的に求めることが可能である。

(2) 皮膜水分量の増加は絶縁皮膜の比誘電率を増加させ、空気の分担電圧を増加させることで PDIV を低下させると考えられる。皮膜水分量による比誘電率の変化は、Lichteneker の対数式を用いて計算可能である。

(3) 絶縁皮膜の熱劣化は、比誘電率の上昇および皮膜厚の低下が原因となり、PDIV を変化させる。そのため、この 2 つの要因を考慮することで、実験値とより良く一致する解析が可能である。

(4) PAI の絶縁皮膜において、複合的な影響(温度および気圧, 熱劣化)を考慮し PDIV 解析した結果、実験値と最大で 6%以内の解析が可能である。また、他樹脂の絶縁皮膜においても、実験値に対して 10%以内で解析可能である。

### 第 3 章 サージ電圧下の部分放電開始電圧に及ぼす環境要因(湿度, 温度, 気圧)の影響

実際のモータの運転条件を考えた場合、モータの急激な出力上昇による温度の上昇や、天候に左右された湿度変化によって、急激に環境が変化する可能性があるため、環境変化の過渡現象である PDIV ヒステリシスも、モータの絶縁信頼性を確保するうえで重要となる。そこで、PDIV ヒステリシスを含めて環境要因(湿度, 温度, 気圧)が PDIV に与える影響について検討した。その結果を以下にまとめる。

(1) サージ電圧下の PDIV は、温度と湿度および気圧と湿度の複合的影響を受けて変化す

る。そのため、湿度無制御下においては、低温域(25°C~100°C)や低圧領域(60kPa~20kPa)で、環境変化(温度上昇、気圧低下)に伴う相対湿度低下の影響を受けて、PDIV が上昇する。一方、湿度制御下においては、温度上昇や気圧低下に対して PDIV は単調に低下し、その PDIV は湿度が低いほど高い。

(2) サージ電圧下の PDIV は、環境要因に加えて皮膜水分量の影響を受ける。同じ環境であった場合には、皮膜水分量が多いほど PDIV が低下するため、皮膜水分量の異なる湿度無制御時の昇温・降温および減圧・増圧では、過渡的な現象として PDIV ヒステリシスが生じる。皮膜水分量が初期電子発生確率に影響するメカニズムは、皮膜から水分が放出され空気ギャップが高湿度化し、気体からの初期電子発生確率が上昇すること、また、皮膜の第一イオン化エネルギーが低下し皮膜からの初期電子発生確率が上昇することが原因と考えられる。

#### 第 4 章 環境要因の相互作用を考慮した部分放電開始電圧の重回帰分析

サージ電圧下の PDIV に与える環境要因の影響度を明確化するため、第 3 章で取得したデータを用いて重回帰分析を行い、相互作用を考慮したサージ電圧の PDIV に与える環境要因の物理的影響メカニズムを、環境要因が負イオン密度に与える影響から考察した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 一次重回帰分析から、温度上昇および気圧低下による PDIV 低下および湿度上昇による PDIV 低下の挙動を定量化可能であり、その結果、湿度上昇が PDIV 低下に及ぼす影響が最も強いことが明らかとなった。

(2) 各環境要因の 3 次項と環境相互作用項の 11 項を考慮した高次重回帰分析によって、回帰式による実験値解析精度は 4.6%まで向上するが、明確な影響要因が不明確となることから、この解析はオーバーフィッティングであると考察した。

(3) 高次重回帰分析を考えられる組み合わせの全 54 通りを実施し、計算値と実験値の平均 PDIV 差を導出し、式の項数と平均 PDIV 差の分布を求めることでサージ電圧下の PDIV に与える環境要因の影響を考察した。その結果、湿度が 3 次関数で影響すること、相互作用（特に気圧と湿度の相互作用）の影響が強いことを示した。

(4) 湿度上昇は、気体負イオン密度を 3 次関数として増加させる。これが、湿度がサージ電圧下の PDIV に対して 3 次関数で影響した原因であり、この変化は気体平衡論の考え方から影響を考察可能である。

(5) 気体負イオン密度には、温度と湿度および気圧と湿度の相互作用が存在し、これがサージ電圧下の PDIV に対して環境相互作用が存在した理由である。湿度が増加するほどに

負イオン密度は増加するが、具体的な負イオン密度の値や負イオン密度の状態は、温度と気圧の影響を複合的に受けて決定される。

## 第5章 結言

### 本研究の意義および今後の展望

本研究で得られた成果は、車載モータの高信頼性・合理的な絶縁設計に向けて、実際の絶縁性能(PDIV)に環境や材料が複合的に影響するメカニズムを解明するものである。今後、インバータ駆動モータの使用領域が拡大することによって、具体的な環境や電圧波形が本研究と異なることが予想されるが、結論を導くまでの過程や物理は不変の原理である。そのため、本研究成果が車載用モータに留まらず産業製品や電力機器分野など各分野に適用されることを期待する。

本研究を活用するためには、実際の環境・材料や電圧波形を用いて、具体的な PDIV を取得する必要がある。今後、本研究成果をさらに各種産業に活用するためには、PDIV 解析手法を高精度化する必要があると考える。そのための具体的な手法の1つとして、Volume-Time 理論が挙げられる。現状の Volume-Time 理論では、繰返しサージ電圧下の PDIV を推定することが可能になりつつあるが<sup>[1]</sup>、環境要因や絶縁劣化現象を考慮するには至っていない。本研究成果と Volume-Time 理論を結びつけることにより、PDIV に主体的な役割を果たす初期電子発生源とその寄与を明らかにするとともに、PDIV の解析精度が向上できる可能性がある。また学術的には、サージ電圧下における巻線の部分放電現象は、初期電子発生源や環境によって変化する初期電子発生確率など、物理的メカニズムにおいても検討する余地がある。今後は、実験的・解析的な多面的な検証によって、物理的なメカニズムを明らかにし、技術開発を推進する必要がある。