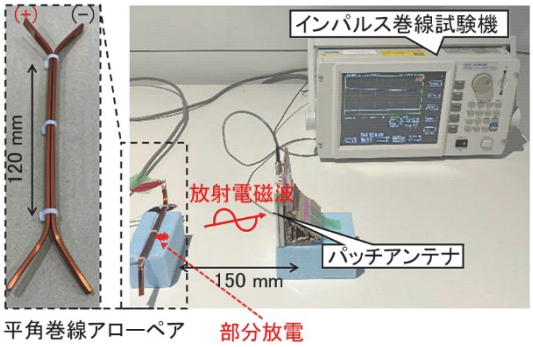
電動化の信頼性を根幹から支える電気絶縁技術

Electrical Insulation Technology that Supports the Reliability of Electrification



柳田 憲史*1 Norihito Yanagita
今井 岳彦*1 Takehiko Imai
原 侑吾*2 Yugo Hara
小迫 雅裕*3 Masahiro Kozako

カーボンニュートラルの実現に向けた機械システムの電動化では，モータの高性能化と電気絶縁信頼性の両立が重要である。特に，ワイドバンドギャップ半導体の適用拡大に伴い，急峻なインバータサージ電圧下での部分放電開始電圧を設計段階で予測する技術が求められている。三菱重工グループは九州工業大学との共同研究により，電界の空間分布，電圧印加時間及び初期電子発生確率を考慮した Volume-time 理論による予測技術を開発し，実機モータの絶縁構成及び使用環境を考慮した設計評価への適用を推進している。

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて，三菱重工業株式会社（以下，当社）では，機械システムの電動化を推進している。この電動化においてキーコンポーネントとなるのが，バッテリー・インバータ・モータから構成される“モータドライブシステム”である。このうちモータは，高電圧化・高速化といった性能向上と，多様化する使用環境下での劣化を防ぎ長期寿命を実現する信頼性向上との両立が要求されている。

インバータ駆動モータの劣化と寿命を決めるのは，主に熱・機械・環境・電気といった 4 つの要因が考えられ，これらの要因が複合的に関わってくる。中でも近年は，SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体の適用拡大に伴い，インバータサージ電圧がモータ巻線に印加され地絡や焼損に至る，いわゆる“絶縁破壊”という電気要因の故障が顕在化している。

絶縁破壊を未然に防止するためには，その前駆現象となる部分放電を発生させないことが肝要となる。部分放電とは，図 1 に示すように電位が異なる巻線同士が形成する電界によって，巻線外部空間中の電子が加速・電離を繰り返して放電に至る現象である。部分放電に伴って発生する荷電粒子の衝突，局所的な発熱，紫外線及び化学活性種などにより，巻線の絶縁皮膜や相間絶縁紙が徐々に侵食・劣化する。部分放電自体は局所的な放電で直ぐに短絡を起こさないが，これが繰り返されると絶縁性能が低下し，最終的には導体間又は導体－鉄心間の絶縁破壊に至る。部分放電を防止するには，絶縁材料の厚肉化等で巻線やステーターコアを離隔することが望ましい。しかし部品の離隔は，巻線の占積率低減や放熱性の悪化などに繋がり，モータ性能を低下させるトレードオフの関係にある。また，焼損などの故障はモータの部品交換や復旧が困難で稼働率への影響が大きい。

以上の背景から，インバータ駆動モータにおいては，設計段階で部分放電発生リスクを未然防止すること，具体的には部分放電開始電圧（Partial Discharge Inception Voltage 以下．PDIV）の

*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部 主席研究員
*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 パワーエレクトロニクス研究部
*3 九州工業大学 大学院 工学研究院 教授 工学博士

高精度予測技術が望まれている。当社も，電動化の信頼性を支える基盤技術の一環として，国立大学法人九州工業大学（以下，九工大）との共同研究にて最新の PDIV 予測技術開発に取り組んでいる。

本報では，Volume-time 理論を用いて，平角巻線の PDIV に及ぼす湿度の影響を予測するとともに，相間絶縁紙を含む巻線構成へ計算モデルを拡張した結果を示す。特に，相間絶縁紙表面を新たな初期電子供給源として導入し，絶縁紙厚さが PDIV に及ぼす影響を実測値と比較検証した点に特徴がある。

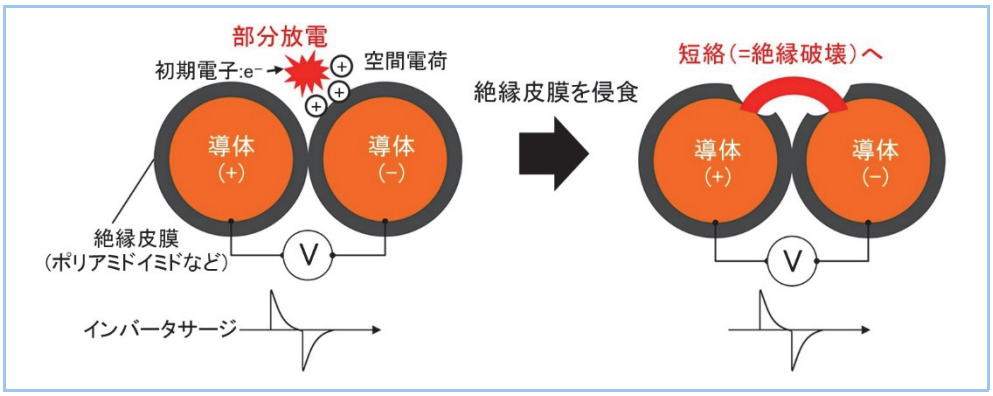


図1　部分放電の繰返しによる巻線絶縁の劣化過程

2. PDIV 予測技術

モータ巻線の PDIV を高精度に予測するためには，放電理論に基づいて計算することが重要である。商用周波数の交流電圧下では，巻線周辺の電界解析結果とパッシェン則を組み合わせることにより，PDIV を比較的良好に推定できる。一方，立ち上がり時間が短く，印加時間が有限であるインバータサージ電圧下では，初期電子の出現確率や放電形成時間の影響が無視できず，従来手法では実測値との乖離が生じる場合がある。

そこで，インバータサージ波形に対応した PDIV 予測技術として Volume-time 理論（V-t 理論）が活用されてきている。V-t 理論は，巻線周辺空間電界の空間項・時間項を考慮した計算手法であり，モータ巻線に限らず様々な高速・高電圧機器への適用が期待できる汎用性の高いメリットを有する。パッシェン則と V-t 理論との計算方法の比較を図 2 に示す。また，インパルス波形電圧を印加した場合の，パッシェン則と V-t 理論の PDIV 計算結果例を図 3 に示す。温湿度条件にもよるが，パッシェン則では誤差が約 50%だったのに対し，V-t 理論では約 15%に改善される場合がある。当社は 2024 年から九工大と，V-t 理論を用いた PDIV 予測技術開発を開始した。当社はインパルス電源を用いたモータ巻線間の PDIV 試験を担当し，九工大は試験条件をベースに PDIV 予測計算を担当している。3 章では，環境条件の主要因となる湿度依存性や，実機構成を想定しモータ巻線の間に相間絶縁紙を挿入した形状における PDIV の実測値と予測値との比較検証結果を紹介する。

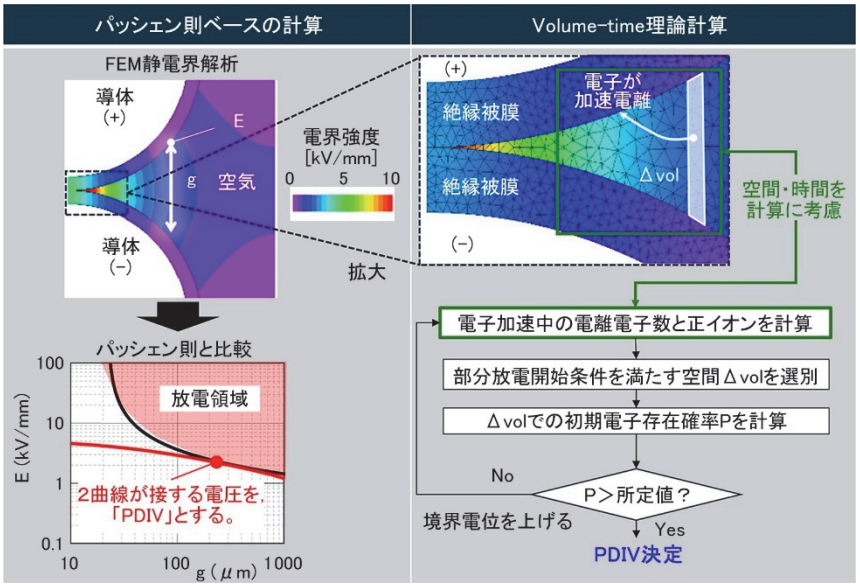


図2 パッシェン則に基づく PDIV 計算方法と Volume-time 理論の比較

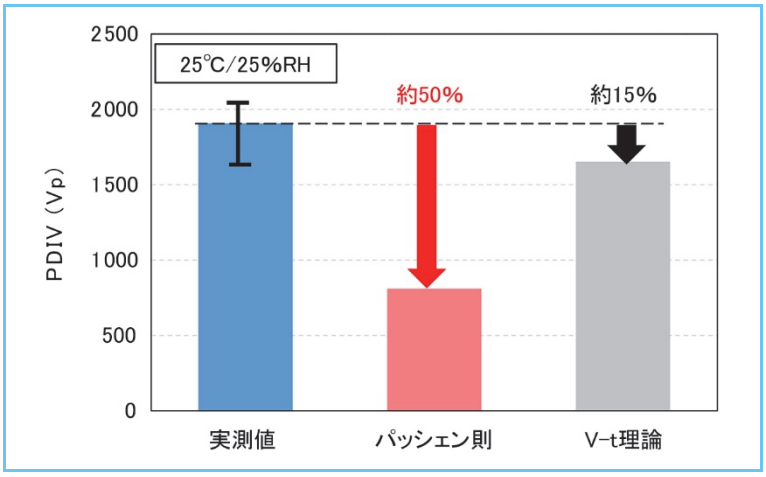


図3 インパルス波形に対するパッシェン則と V-t 理論の PDIV 計算結果例

3. V-t 理論予測計算の検証

(1) 湿度依存性の検証

PDIV の実測方法を図 4 に示す。インパルス電源と部分放電検出用パッチアンテナが一体化したインパルス部分放電巻線試験機（電子制御国際 DWX-05PD）に，平角巻線 2 本 1 セットとしたアローペア試料を作成した。測定環境は温度 25℃，湿度 25%RH・55%RH・80%RH の 3 条件とし，低・中・高湿度下で PDIV をそれぞれ測定した。具体的には，各湿度条件について 3 組の試料を用いた。各電圧ステップでインパルス電圧（立ち上がり時間 tr＝0.25 μs，パルス幅 tw＝400 μs）を 10 回印加し，10 回以内に部分放電が少なくとも 1 回検出された最小印加電圧を PDIV とした。この測定を各試料について 10 回実施した。

Volume-time 理論をモータ巻線に適用した場合，部分放電の初期電子発生源は，空気中の負イオンからの電子脱離と，巻線皮膜表面からの電子放出の 2 通りある。初期電子発生確率 P は式(1)で表され，このうち電子脱離からの期待値は式(2)，電子放出からは式(3)で表される。

$$P = 1 - \exp\left[-\int_t (V_w + S_w)dt\right] \quad \cdots\cdots (1)$$

$$V_w = \int_{V_{cr}} \frac{dn_e}{dt}\left(\frac{\alpha-\eta}{\alpha}\right) dV \quad \cdots\cdots (2)$$

$$S_w = \int_{S_{cr}} \frac{dn_i}{dt} dS \quad \cdots\cdots (3)$$

ここで，式(1)の Vw は気体中における初期電子発生率を放電可能体積について積分した体積項，Sw は絶縁材料表面からの初期電子放出率を放電可能表面について積分した表面項，P は印加時間内に少なくとも一つの有効初期電子が発生する確率である。式(2)における dn_e/dt は，空気中の負イオンから脱離する初期電子数の期待値，式(3)における dn_h/dt は絶縁皮膜表面から放出される電子数の期待値をそれぞれ示している。α は電離係数，η は電子付着係数である。

本研究では湿度依存性を PDIV 計算に取り入れるため，既往研究で得られた知見である“空気中の負イオンとクラスターイオン密度”と“絶縁皮膜の第一イオン化エネルギー”を湿度の関数として理論式に組み込み，PDIV を予測計算した。温度 25℃一定で，湿度を 25%RH・55%RH・80%RH に変化させた場合の PDIV 実測値と V-t 理論計算値を図 5 に示す。いずれの湿度条件でも計算値は実測値のばらつき範囲内にあり，湿度上昇に伴う PDIV 低下傾向を再現した。

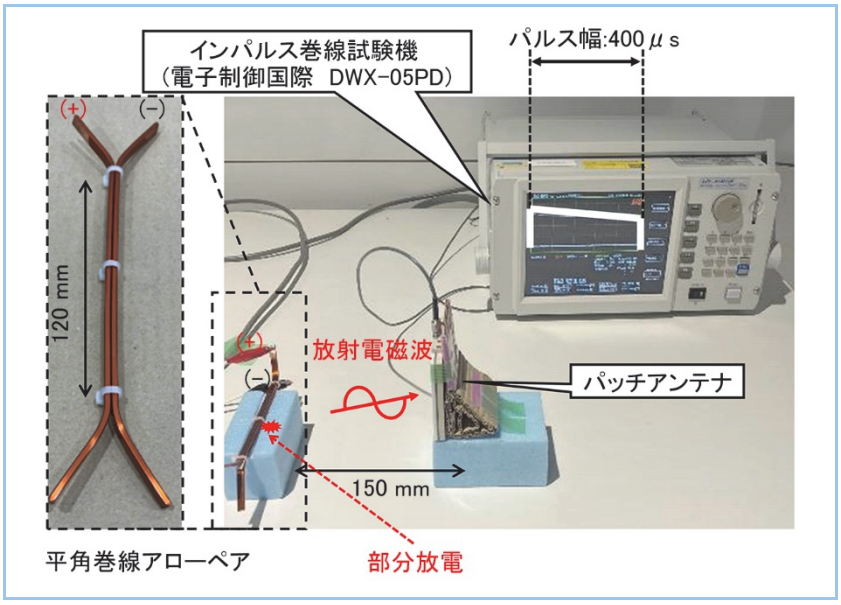


図4 インパルス電圧下における平角巻線の PDIV 測定方法

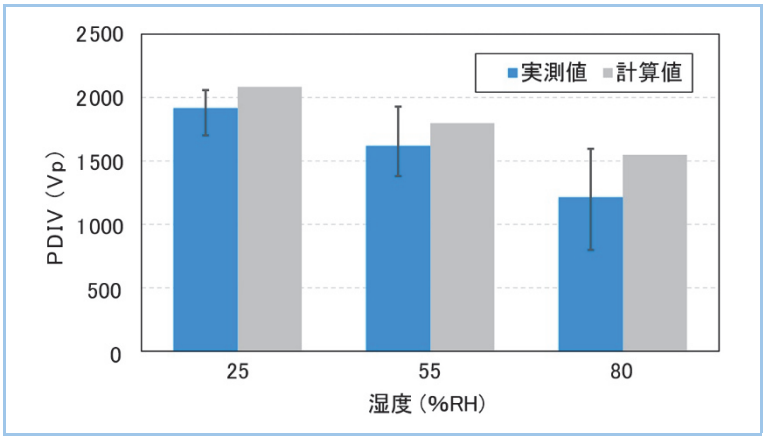


図5 PDIV の実測値と理論計算値（湿度依存性）

(2) 相間絶縁紙厚さ依存性の検証

モータ内部では，U 相/V 相/W 相の異相間巻線に大きな電圧が印加される可能性があるため，アラミド等を主成分とする相間絶縁紙を巻線間に挿入して絶縁を確保するが，巻線と絶縁紙との境界にある楔状の空間も部分放電発生源となるため，この部位における PDIV 予測も不可欠である。相間絶縁紙の有無による巻線周辺の電界分布の違いを図 6 に示す。絶縁紙を挿入しない場合は，巻線間が近接し周囲空間中の電界強度が高くなる。一方絶縁紙がある場合は，巻線同士が離隔されて電界強度が低くなるものの，電界が集中する楔部分が 2 カ所とな

る。これは部分放電が発生するリスク部位が増えることを意味する。従来の巻線間モデルでは，気体中からの電子脱離及び絶縁皮膜表面からの電子放出を初期電子供給源として扱っていた。本研究では，相間絶縁紙を含む実機構成に適用するため，絶縁皮膜とは異なる材料表面として相間絶縁紙表面を新たな初期電子供給境界に設定し，巻線・絶縁紙間に形成される 2 カ所の楔状ギャップを同時に評価できるよう計算モデルを拡張した。相間絶縁紙の厚さを変化させた場合の PDIV 実測値と V-t 理論計算値を図 7 に示す。図 7 より，相間絶縁紙厚さの増加に伴って PDIV が上昇する傾向は，実測及び計算の双方で確認され，本研究が提案した相間絶縁紙厚さに対する PDIV の変化傾向を再現できることを確認した。一方，130μm 及び 250μm では実測平均値との差が認められた。これは，絶縁紙と巻線との接触状態，紙表面の吸湿状態，材料固有の電子放出特性等が計算に十分反映されていない可能性を示している。

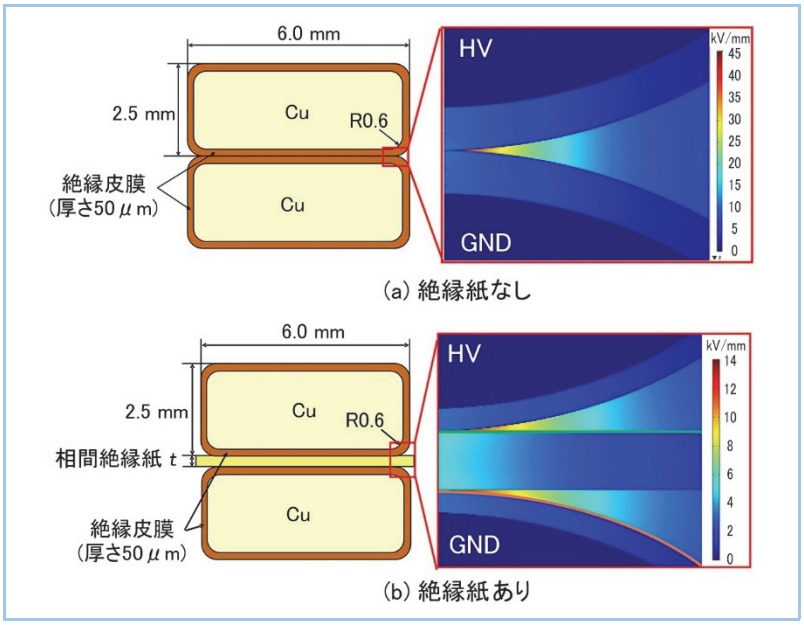


図6 相間絶縁紙の有無による巻線周辺の電界分布の違い

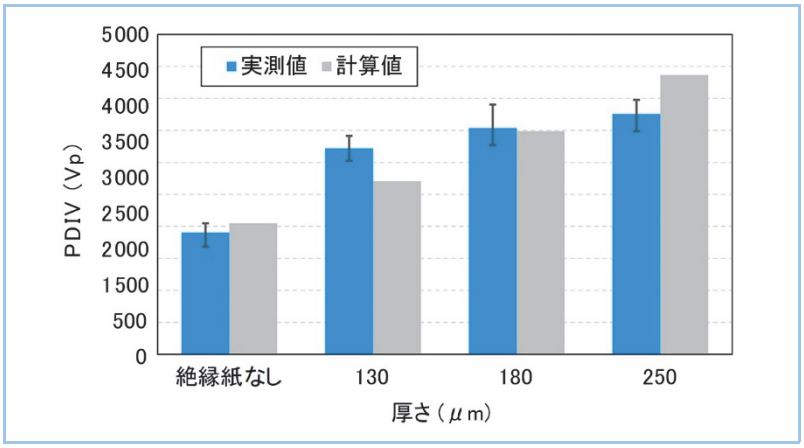


図7 PDIV の実測値と理論計算値（相間絶縁紙厚さ依存性）

4. まとめ

本報では，モータ信頼性を支える電気絶縁技術において重要な要素となる PDIV 予測技術の開発事例を紹介した。部分放電は，環境・電気・材料などの複数の要因が複合的に関与する現象である。このため，実機設計適用に向けては，運転環境を想定した実測データの取得と計算モデルの高度化を両輪として，相互フィードバックを重ねながら現象に基づく知見を蓄積していくことが不可欠である。今後もオープンイノベーションを活用して電気絶縁分野の技術力を強化し，当社の電動化製品における高性能と高信頼性の両立に貢献していく。

謝辞

本報で紹介した V-t 理論計算に際し，国立大学法人九州工業大学小迫研究室の皆様にご協力を賜り，深く御礼申し上げます。

参考文献

(1) 電気学会技術報告 第 1533 号“適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状” (2022)
(2) 長谷ほか，Volume-time 理論を用いたアローペアにおける部分放電開始電圧の湿度依存性の検討，電気学会 基礎・材料・共通部門大会 5-A-a2-3 (2025)
(3) 長谷ほか，相間絶縁紙モデルにおける Volume-time 理論を用いた部分放電開始電圧の推定，第 56 回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム MVP-14 (2025)
(4) 長谷ほか，平角巻線モデルにおける Volume-time 理論に基づく湿度依存性を考慮したインパルス部分放電開始電圧の推定，DEI-25-115 (2025)