

インバータサージ電圧波形と環境変化が 自動車用主機モータ巻線の部分放電現象に及ぼす影響

Influence of Inverter Surge Voltage Waveform and Environmental Change
on Partial Discharge Phenomena in Automobile Main Motor Magnet Wire

久保田 誠¹

Makoto KUBOTA

塚本 能人¹

Yoshito TSUKAMOTO

伊東 悠太¹

Yuta ITO

稲葉 莉久²

Riku INABA

柳澤 岳志¹

Takeshi YANAGISAWA

要 旨

電動自動車に採用される主機モータ巻線のインバータサージ電圧による部分放電開始電圧の単体評価をおこなった。

評価に用いる電圧波形は、波形が部分放電に及ぼす影響を明らかにした上で、電動自動車のインバータ駆動時に於いて最も部分放電が発生しやすい波形条件を包含するように設定した。インバータサージ電圧を用いることで従来の正弦波電圧に対して部分放電開始電圧が22%上昇することがわかった。また主機モータが使われる環境を想定して、部分放電現象における気温、気圧、湿度といった環境因子の影響を明らかにした。以上の結果より、インバータサージ電圧を単体評価に用いることで部分放電開始電圧の上昇が期待でき、環境因子の影響を考慮した絶縁設計をおこなうことで絶縁被膜の薄膜化につなげられることを示した。

ABSTRACT

Evaluation was conducted of the partial discharge inception voltage resulting from inverter surge voltage in the magnet wire, also known as winding wire, of the main motor used in an electric-powered vehicle.

Having clarified the influence of the waveform on partial discharge, the voltage waveform used for evaluation was configured to include waveform conditions under which partial discharge is most likely to occur during operation of the inverter in an electric-powered vehicle. With use of the inverter surge voltage, it was found that the partial discharge inception voltage rose 22% higher than the usual sine wave voltage. Envisioning the environment in which the main motor would be used, the influence of the environmental factors of ambient temperature, atmospheric pressure, and relative humidity on the partial discharge phenomena was also clarified. The use of inverter surge voltage for evaluation based on the above results yields the expectation that a rise in the partial discharge inception voltage can be expected. It also indicated that insulation design that takes the influence of the environmental factors into consideration can contribute to a reduction in the thickness of the insulation film.

1. まえがき

世界では近年の環境問題意識の高まりを受けて、急速な自動車の電動化が進んでいる。日本においては1990年代後半からHybrid Electric Vehicle(HEV)が電動自動車として普及し始めている。現在では更なる環境負荷低減の要求から、再生可能エネルギーを活用できるBattery Electric Vehicle(BEV)の普及へと移り変わりつつある。

このような電動自動車においては主機モータの性能が車両の航続距離に影響することから、モータの高効率化が特に望まれる。

そのため鉄損や銅損といったモータの効率を低下させる要因となるモータ損失を抑制することが盛んに検討されている⁽¹⁾。主機モータの巻線においては、導体の断面積を増して、巻線抵抗を低減することで銅損を抑制することができる。最近では、巻線の絶縁被膜に微小な気泡を導入す

¹ 本田技研工業株式会社

E-mail: makoto_kubota@jp.honda

² 株式会社オートテックジャパン

ることで比誘電率を下げ、膜厚を可能な限り薄くして、巻線スロットにおける導体占積率を向上させた例がある⁽²⁾。⁽³⁾しかし必要以上にモータ巻線の絶縁被膜を薄くすると、巻線の絶縁性が低下して部分放電が発生してしまう。部分放電の発生は、絶縁被膜表面を侵食摩耗させ、最終的には絶縁性能低下に至ることから⁽³⁾、そのモータの巻線仕様における部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception Voltage: PDIV) を適確に把握して、部分放電を発生させない設計をおこなうことが必要である。また電動自動車の主機モータ巻線という性質上、巻線は車両の使用状況に応じた環境条件で使用される。高負荷運転時には温度が上昇、標高が高い地域では気圧が低下するといった、環境変化による部分放電への影響も絶縁保証を検討する上で考慮する必要がある。

電動自動車の主機モータでは、バッテリーから供給される直流電圧をインバータ素子の高速スイッチングによって断続的なパルス波状電圧に変換して印加している。パルス波状電圧の電圧立ち上がりが急峻であるため、インバータからのパルス波状電圧にはサージ電圧が重畳され、主機モータの入力端にはインバータサージ電圧となって印加される。一方、巻線の PDIV 評価では商用周波数域の正弦波電圧が適用されることが多い。その理由としては、インバータサージ電圧による PDIV 評価手法が広く普及していないことや正弦波電圧の波形が規格化しやすく汎用性があることなどがあると著者は考えている。しかしインバータサージ電圧による部分放電現象では、正弦波電圧に対して放電に至る過程が複雑で、PDIV が異なることが知られている⁽⁴⁾。

主機モータ巻線では、単体巻線としての PDIV を設定した後にモータ形状や環境条件などの PDIV 変動要因を考慮して絶縁設計をおこなっている。単体巻線の PDIV 評価を正弦波電圧で代用することで実際の主機モータでの PDIV からかい離を生じてしまうと、必要以上に安全率を確保した膜厚設計を要することになり、それが課題となっていた。

本研究ではインバータサージ電圧によるモータ巻線の PDIV 特性を明らかにすることで絶縁被膜の最適な膜厚設計を可能にして、必要な絶縁性能を確保しながら、絶縁被膜の薄膜化による主機モータの性能向上を狙いとした。

2. 目的

電動自動車の主機モータ巻線、特にセグメントコンダクタ用の厚膜平角線⁽⁵⁾の絶縁設計を検討するにあたり、これまで十分に明らかになっていない次の(1)から(4)の項目について明確にすることを目的とした。

- (1) インバータサージ電圧波形の形状影響
- (2) 印加電圧を正弦波電圧からインバータサージ電圧に

代えることによる PDIV 影響

- (3) 温度および気圧から推定される気体密度と PDIV の相関

- (4) 湿度と PDIV の相関

3. 評価方法

3.1. 試料

PDIV 評価の試料には、比誘電率 $\epsilon_r = 3.0$ であるポリイミドを絶縁被膜材とした厚膜平角線を用いた。被膜厚さは $120\ \mu\text{m}$ とした。ポリイミドは雰囲気湿度に応じて水分を吸放湿する特性があり、その特性が部分放電に影響を及ぼすことから、PDIV 測定前には実験室の雰囲気環境に近い 25°C 、 50% RH に調整した恒温恒湿槽の中で試料を安定化处理して、試験中におけるポリイミド絶縁被膜の水分含有率の変化を抑制した。なお、放電試験を実施する時の雰囲気環境についても、温度および湿度の影響を検証する場合を除き、 25°C 、 50% RH を基本条件とした。

3.2. PDIV 試験片

巻線の PDIV 評価は被膜絶縁された2本の巻線を接触させた状態で保持して、1本は接地、もう1本には徐々に高電圧を印加していくことで巻線間に強電界空間を生じさせ、部分放電が発生した時の印加電圧値を評価する試験である。

部分放電の発生は、パッシェンの法則⁽⁶⁾に従って2本の巻線の絶縁被膜間に形成された僅かな気体隙間で発生する。これは固体と気体の比誘電率の差異から比誘電率の小さな気体部で電界強度が強められるためである。この部分放電が発生する空間を電界ギャップ空間といい、部分放電現象を検討する上で重要な因子となる。

本研究においては、電界ギャップ空間の形状的な再現性を得るため、Fig. 1 右側に示すような新しい試験片形状を採用した。新しい試験片形状は直線形状と一定曲率形状を有する2本の巻線から構成され、それぞれの巻線自体が僅かにしなるような状態で接触することで、常に一点且つ一定面圧で接触するようにホルダで保持されている。本研究においては、この試験片を単一Rペア試験片と呼び、部分放電の評価に採用した。

Fig. 1 では従来のアローペア試験片と単一Rペア試験片に PDIV 以上の電圧を印加して部分放電が発生させた様子を示している。部分放電が発生している部位は電子と気体分子との衝突により電界空間が紫色に発光するため、色の変化によって放電発生部位を知ることができる。アローペア試験片では2本の巻線を背合わせにした直線部から分岐する又部まで広範囲で部分放電が発生している。部分放電が発生する部位が広範囲にわたると、試験片が複数個ある場合は電界ギャップ空間の形状再現性を確保することが容

易ではなく、測定ばらつきの要因となってしまう。単一Rペア試験片では直線形状と一定曲率形状から形成される比較的狭小範囲で部分放電が発生するため、電界ギャップ空間の形状再現性を高めることが可能であり、測定ばらつきを抑制することができる。

3.3. PDIV 評価手法

Fig. 2にPDIV評価装置の概要を示す。インバータ装置の出力端に単一Rペア試験片を接続して、それと並列になるように部分放電検出器が接続されている。単一Rペア試験片で部分放電が発生するとコンデンサCkの電荷バランスが崩れて電荷移動が起こり、検出インピーダンスZの両端に電圧が発生する。この電圧から印加電圧起因の周波数成分のノイズをフィルタ処理することで部分放電信号をよ

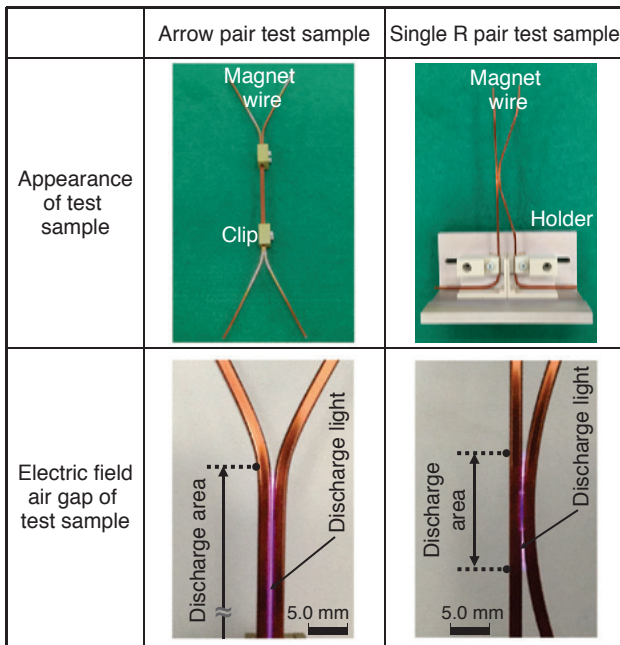


Fig. 1 Appearance of arrow pair test sample and single R pair test sample

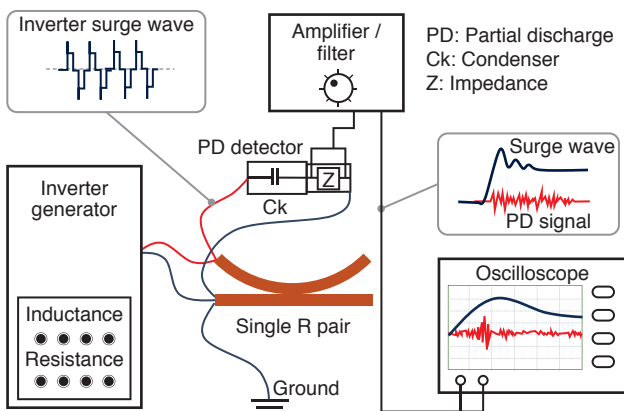


Fig. 2 Schematic diagram of PDIV measurement system

り明確に検出している。放電の電荷量の定量化にはあらかじめ取得しておいた検出電圧と電荷量の校正値から換算して求めた。

Fig. 3に印加電圧と放電電荷量と時間の関係の測定例を示す。印加電圧が設定ピーク値である1.5 kVに到達する直前の0.55 μ sのタイミングで部分放電の信号が現れている。印加電圧の立ち上がり部である0.1 μ sのタイミングでフィルタで除去できなかったインバータ素子のスイッチングノイズ信号が現れているが、部分放電が発生する時間的位相と異なるため、測定の障害にはならない。本研究におけるPDIVの判定基準は、放電1回あたりの電荷量が100 pC以上である部分放電を、所定の確率以上で発生した時とした。なお、電荷量の値の設定については明確な標準規格が存在しないため⁽⁷⁾、正弦波電圧のPDIV測定で一般的に採用されている電荷量と同じにした。

Fig. 4は巻線間の電界空間で発生した初期電子が、放電の初期段階である電子がだれへと成長する過程を示している。

- (a) 電界空間や被膜から初期電子が発生
- (b) 電界によって初期電子が加速され、気体中の水分子や固体被膜表面と衝突して新たな電子を発生
- (c) 増倍した電子を先頭に電子群と正イオン群からなる電子がだれへと成長

Fig. 3で示されるインバータサージ電圧による部分放電

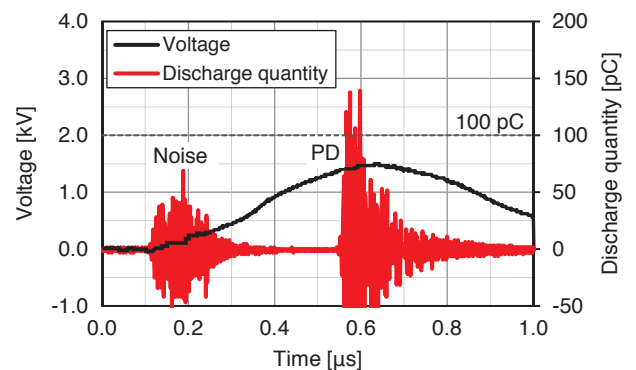


Fig. 3 Example of measurement of applied voltage and discharge quantity

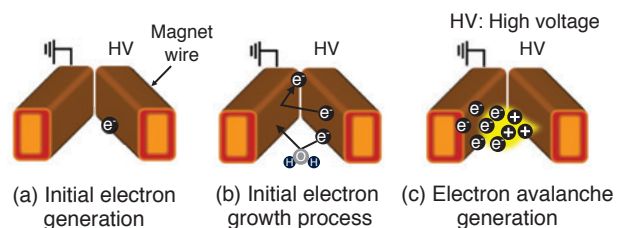


Fig. 4 Process of initial electron growth to electron avalanche

においても極めて短時間内の現象ながら、同様の過程を経て放電に至る⁽⁴⁾。インバータサージ電圧による部分放電現象では、電圧波形や環境条件といった影響要因によって初期電子の発生から電子なだれへの成長過程が変化することから、その影響を明確にすることが重要となる。

4. 評価結果

4.1. インバータサージ電圧波形の PDIV 影響

主機モータを駆動するための電圧波形は Fig. 5(a) に例を示すように Pulse Width Modulation (PWM) 変換によって矩形パルス波形を呈しており、インバータは主機モータへの出力要求に応じてその形状を変化させる。更にこの矩形パルス波は、インバータ素子の特性や電源ケーブルと主機モータのインピーダンス不整合などの構造的影響を受けて、その主機モータ固有のインバータサージ波形へと変化する。そのパルス波形は、パルス幅 W 、周波数 f 、パルス立ち上がり時間 Tr (ピーク電圧値の 10% から 90% まで立ち上がりに要する時間) といった特徴量で表わされる。それぞれの特徴量の定義を Fig. 5(b) に示す。

そこで特徴量が PDIV に及ぼす影響を検証するため、実際の電気自動車のインバータが出力する波形条件と評価装置の対応範囲を加味して、Table 1 に示すパルス幅、周波数、パルス立ち上がり時間をパラメータに設定して、各パラメータの PDIV への影響感度の評価をおこなった。

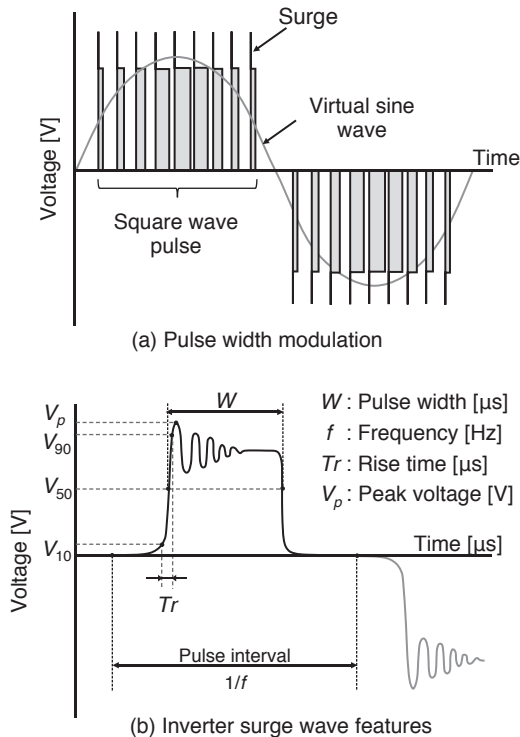


Fig. 5 Square wave pulse controlled by PWM and inverter surge wave features

Table 1 Test conditions for pulse width, frequency, and rise time

Scope Test	Pulse width W [μs]	Frequency f [kHz]	Rise time Tr [μs]
Condition 1	1-500	1.0	0.06
Condition 2	10	0.1-50	0.06
Condition 3	10	1.0	0.06-0.35

4.1.1. パルス幅 W

Fig. 6 にパルス幅 W を 1 から 500 μs で変化させて PDIV との相関を測定した結果を示す。パルス幅 100 μs 以下の領域においてはパルス幅 W が長くなることで PDIV を低下させる影響がある。

4.1.2. 周波数 f

Fig. 7 に周波数 f を 0.1 から 50 kHz で変化させて PDIV との相関を測定した結果を示す。周波数 f が高くなることで PDIV を低下させる影響がある。

4.1.3. パルス立ち上がり時間 Tr

Fig. 8 にパルス立ち上がり時間 Tr を 0.06 から 0.35 μs で変化させて PDIV との相関を測定した結果を示す。パルス立ち上がり時間 Tr が長くなることで PDIV を低下させる影響がある。

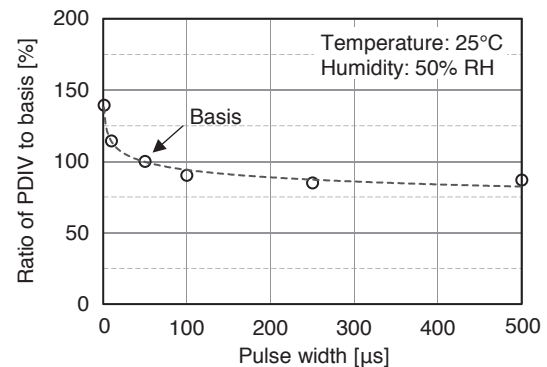


Fig. 6 Relationship between PDIV and pulse width as inverter surge voltage wave features

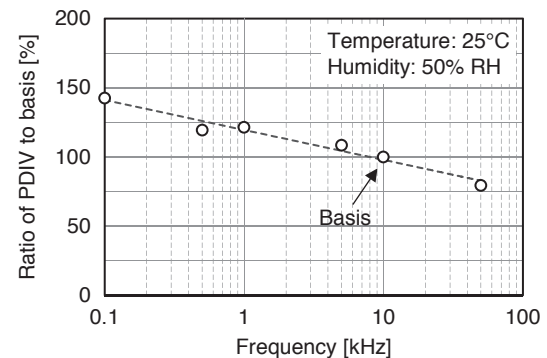


Fig. 7 Relationship between PDIV and frequency of pulse as inverter surge voltage features

4.2. 正弦波電圧とインバータサージ電圧の電圧波形の PDIV 影響

正弦波電圧とインバータサージ電圧の電圧波形の影響を検証するために、同一巻線を用いて両者の電圧波形で PDIV 評価をおこなった。インバータサージ電圧の波形条件を設定するにあたり、4.1. 節で得られたそれぞれの特徴量における PDIV を低下させる傾向を踏まえて、絶縁保証の観点から実際の電動自動車のインバータが出力する電圧波形を包含する形で、最も PDIV を低下させる電圧波形を設定した。その結果を Fig. 9 に示し、これを本研究におけるインバータサージ電圧の基本条件とした。

Fig. 10 に PDIV を比較した結果を示す。インバータサ-

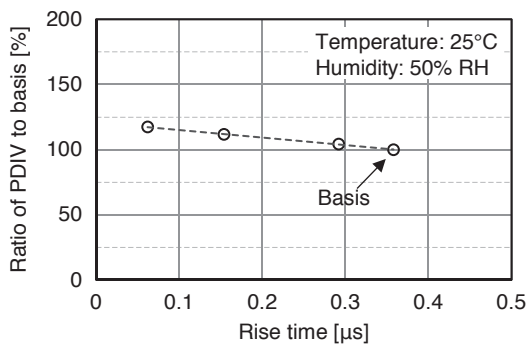


Fig. 8 Relationship between PDIV and rise time of pulse as inverter surge voltage features

	Sine wave voltage	Inverter surge voltage
Waveform image		
Waveform specifications	Waveform: Sine Frequency: 60 [Hz]	Waveform: Bipolar pulse Pulse width: 50 [μs] Frequency: 10 [kHz]

Fig. 9 Basic conditions of sine wave voltage and inverter surge voltage

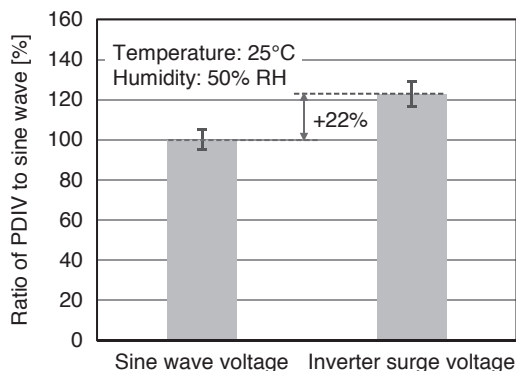


Fig. 10 Comparison of PDIV between sine wave voltage and inverter surge voltage

ジ電圧での PDIV は、正弦波電圧に対して 22% 上昇する結果となった。これはインバータサージ電圧を絶縁被膜の設計に導入することで、従来に対して PDIV で 22% 分の絶縁被膜の薄膜化が可能であることを示している。この PDIV が上昇した要因としては、Fig. 11 に示すように正弦波電圧とインバータサージ電圧では部分放電が発生し得る高電圧領域の印加時間長さが異なるためである。高電圧領域の印加時間長さに着目すると、正弦波電圧では ms 単位であるため、電界空間に生じた初期電子が電子なだれに成長するまで電圧印加が維持されている。一方、インバータサージ電圧では ns 単位であるため初期電子が電子なだれに成長する前に印加電圧が消失してしまう場合がある。

4.3. インバータサージ電圧における環境影響

インバータサージ電圧による部分放電発生においては、電界空間における初期電子の発生確率や電子なだれへと成長する過程が要因となるが、これら要因は環境条件の影響を受けてしまう。そのため、部分放電現象に影響を及ぼす環境因子と PDIV との相関を把握することは、絶縁保証を検討するにあたり重要である。本研究では環境因子として気温、気圧、湿度を抽出して、PDIV との相関を検証した。

4.3.1. 温度と気圧の PDIV 影響

温度と気圧の PDIV 影響を検証するために、温度と気圧から気体密度を推定して、PDIV との相関を求めた。

気体密度の推定は式 (1) の状態方程式を用いて、式 (2) に変換することでおこなった。理想気体においては温度と気圧の間には状態方程式が成立する。実存気体においても低温あるいは高圧の高密度状態を除けば理想気体の特性に類似するため、ここでは状態方程式が成立するものと仮定して検討した。

$$\text{状態方程式: } PV = nRT \quad (1)$$

$$\text{気体密度: } \frac{n}{V} = \frac{1}{R} \times \frac{P}{T} \quad (2)$$

P : 圧力

V : 体積

n : モル数

R : 気体定数

T : 温度

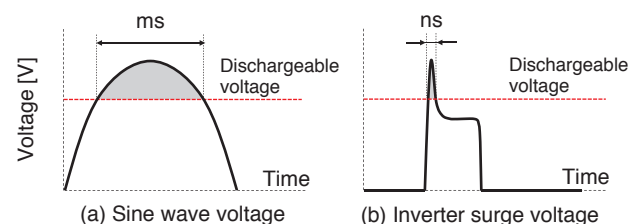


Fig. 11 Comparison between dischargeable times of sine wave voltage and inverter surge voltage

測定の条件は実機モータの作動環境と評価装置の対応範囲を加味して、気圧を大気圧一定にした状態で温度を 40 から 170℃ に変化させた場合、温度を 25℃ に一定にした状態で気圧を 0.1 から 1.0 atm に変化させた場合として、湿度に関しては 30% RH 以下の範囲に収めた。気体密度と PDIV の相関の測定結果を Fig. 12 に示す。

この結果より、気体密度の増加は PDIV を上昇させる。また気圧制御による測定プロット線と温度制御による測定プロット線では湿度条件が異なることによる PDIV の値のずれは認められるものの、気体密度変化に対する PDIV 影響感度は同じであることが明らかになった。

これは気体密度変化による PDIV 影響の要因が、初期電子の運動の障害物となる気体粒子数の変化によって主に生じているためである⁽⁸⁾。気体密度が減少して電子の自由行程が長くなると、電界空間における電子が十分に加速され、電子と気体粒子との衝突や、更に衝突によって発生した陽イオンと固体被膜との衝突が盛んに起こり始める。それによって電界空間における新たな電子が発生して放電が容易となり、PDIV を低下させることになる。

4.3.2. 湿度の PDIV 影響

湿度の PDIV への影響を検証するために、湿度を 10 から 95% RH で変化させて PDIV との相関を測定した結果を Fig. 13 に示す。測定雰囲気は温度を固定した状態で湿度を広範囲に制御可能な 40℃、大気圧とした。

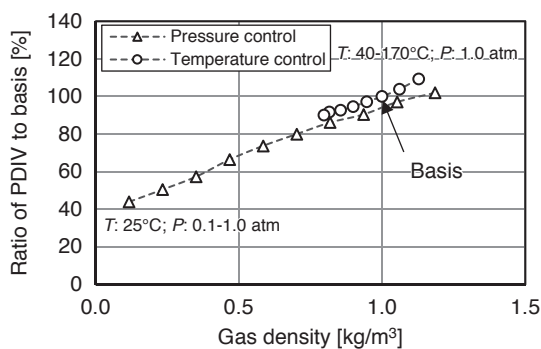


Fig. 12 Relationship between gas density and PDIV

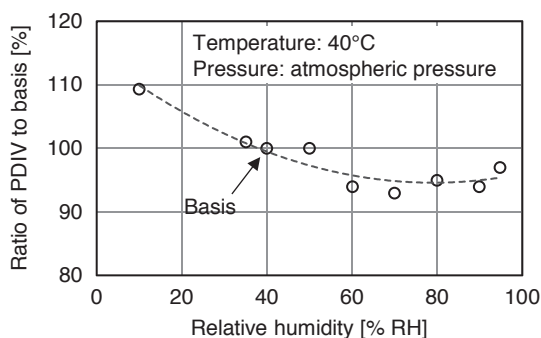


Fig. 13 Relationship between relative humidity and PDIV

Fig. 13 より、10% RH の乾燥状態から湿度を上昇させていくと、PDIV は低下する傾向が認められた。これは湿度が高くなることで電界ギャップ空間に浮遊する水分子が増加して、それらが最終的には酸素負イオンやその水和物といった初期電子の発生源になるためである⁽⁹⁾。しかし、湿度の上昇にしたがって低下傾向であった PDIV が 60% RH 以上の高湿度環境では低下傾向が見られなくなった。

湿度の上昇によって放電が発生しやすい環境が整うにも関わらず、60% RH 以上の高湿度環境において PDIV の低下傾向が見られなくなる現象には他の影響要因が働いていることが示唆される。

5. 高湿度環境における PDIV 挙動の考察

5.1. 湿度影響の一般的な見解との相違

樹脂絶縁材を被膜とする巻線の湿度と PDIV の相関に関しては多くの報告⁽⁵⁾、⁽¹⁰⁾ がなされており、湿度の上昇は PDIV を低下させるというのが一般的な見解となっている。しかしながら、本研究のインバータサージ電圧を用いた検証においては、Fig. 13 に示すように 60% RH 以上の高湿度環境では PDIV の低下傾向が見られなくなった。この原因としては、高湿度環境では絶縁被膜表面に何らかの物性変化が生じて、初期電子の発生が阻害されることが推定される。そこで湿度と放電の電荷量および絶縁被膜の表面抵抗率について検証した。

5.1.1. 湿度と放電電荷量

湿度と初期放電の電荷量の相関を Fig. 14 に示す。ここでは微小な電荷量の放電も評価可能とするため、PDIV の電荷量の判定基準である 100 pC に満たない微小な電荷量の放電も測定対象とした。測定雰囲気は 40℃、大気圧として、初期放電 1 回あたりの電荷量はサンプリングした 10 回の初期放電の電荷量の平均値から求めた。すると、湿度が 19% RH では 1506 pC あった初期放電の電荷量が、湿度が 85% RH では 53 pC まで減少していた。このことから高湿度環境では部分放電が発生したとしても、低湿度時

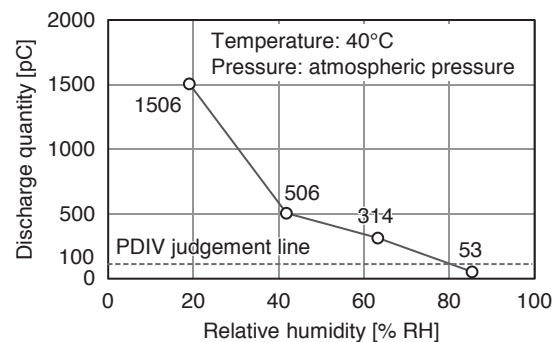


Fig. 14 Relationship between relative humidity and initial discharge quantity per one discharge signal

のような大きな電荷量を伴った放電まで成長せず、比較的に電荷量の小さな放電にしか成長しないことがわかった。このことによって PDIV の判定電荷量を 100 pC と設定した場合、高湿度環境では PDIV の判定電荷量を満たす部分放電の発生確率が低下して、PDIV の低下傾向が抑制されると推定される。

5.1.2. 表面抵抗率と電界強度シミュレーション

湿度が上昇することで初期放電の電荷量が減少することが明らかになったが、その要因について推定した。

高湿度環境では絶縁被膜表面に水分が付着して、表面抵抗率が変化していることが想定される。表面抵抗率の変化は電界ギャップ空間の電界強度に影響を及ぼす。そこで絶縁被膜上に水分膜が存在しない場合と 1.0 μm の厚さの水分膜が存在する場合で電界ギャップ空間に生じる電界強度のシミュレーション解析をおこなった。

解析においては単一 R ペア試験片の放電部位をモデルとして用いた。解析条件として絶縁被膜の厚さ 120 μm 、印加電圧 1.5 kV、水分の電気伝導率を清浄度が異なる水を想定して 5.0×10^{-6} S/m と 5.0 S/m の 2 水準に設定した。シミュレーション解析結果を Fig. 15 に示す。解析結果より、水分膜の存在によって巻線間の電界ギャップ空間に形成される電界強度が緩和されることがわかった。更に水分の電気伝導率が上昇するとその傾向は強まることが明らかになった。このことから高湿度環境では絶縁被膜上に水分膜が形成されて電界緩和が発生することで、初期放電の電荷量が減少する要因の一つとなっていることが推定される。

5.1.3. 湿度と表面抵抗率の測定

絶縁被膜の表面抵抗率の低下が電界ギャップ空間の電界緩和を発生することがシミュレーションから推定されたため、実際のポリイミドフィルムを用いて湿度と表面抵抗率の相関を検証した。Fig. 16 に試料と測定方法を示す。評価には 120 μm 厚さのポリイミドフィルムを用いて、金 (Au) スパッタにて電極を作製した。フィルムは 100°C の乾燥炉であらかじめ絶乾状態になるように調整した後、温度を 40°C、湿度を 30 から 95% RH で変化させて表面抵抗率を測定した。

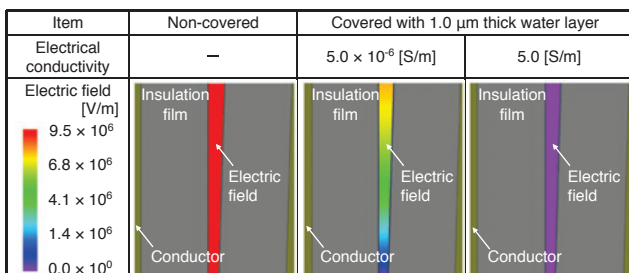


Fig. 15 Simulation of electric field strength at air gap with 1.0 μm thick water layer on insulation film

Fig. 17 に湿度とポリイミドフィルムの表面抵抗率の相関を示す。湿度が上昇するにしたがってポリイミドフィルムの表面抵抗率が低下する傾向が認められた。また本試験条件においては、湿度が 50 から 65% RH の範囲で急激に低下することが明らかになった。

これは湿度が上昇することで雰囲気中の水分子がポリイミドフィルム表面に吸着して、最終的には複数層からなる水分膜を形成していることが推定される。水分膜にはイオンが含まれることから表面抵抗率を低下させる。このことから高湿度環境では水分付着による表面抵抗率の低下により電界緩和が発生して、PDIV の低下傾向が見られなくなると推定される。

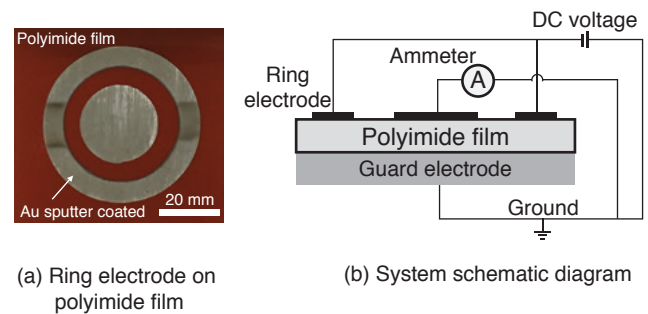


Fig. 16 Surface resistivity measurement method

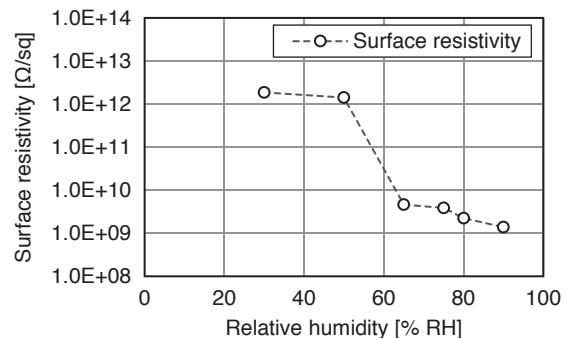


Fig. 17 Relationship between surface resistivity of polyimide film and relative humidity

6. まとめ

本研究によって、これまで十分に明らかにされていなかった主機モータ巻線のインバータサージ電圧による PDIV 特性について、以下の知見を得ることができた。

- (1) インバータサージ電圧の特徴量であるパルス幅、パルス立ち上がり時間が長くなること、また周波数が高くなることで PDIV を低下させる影響がある。いずれの特徴量も高電圧領域の印加時間が長くなることで、電界空間に発生した初期電子から電子なだれへの成長を促進することが要因である。

- (2) 実際の主機モータに印加されるインバータサージ電圧を想定した PDIV 評価では、正弦波電圧による PDIV に対して 22% 上昇した。これによって絶縁被膜の薄膜化が可能であることを示した。
- (3) 温度と気圧は気体密度に換算することで単一影響因子として扱え、気体密度の増加は PDIV を上昇させる。電動自動車の主機モータが使用される環境を想定すると、温度よりも気圧による PDIV の影響が大きい。
- (4) 湿度が 10 から 60% RH に上昇することで、PDIV が 15% 低下した。しかし 60% RH 以上では PDIV の低下傾向が見られなくなる。これは湿度の上昇によって絶縁被膜の表面抵抗率が低下して、電界ギャップ空間における電界緩和が発生したことが要因の一つである。

参考文献

- (1) 高畑良一, 古賀誉大, 浅野能成, 堀充孝, 伊東悠太, 下垣好文: 小型・軽量・高効率化を支える支援要素技術, 2021 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 論文 No. 3-S12-6, (2021)
- (2) 金子遼太郎, 西山忠夫, 梓沢慶介: HEV モータ用マグネットワイヤ絶縁被膜の低誘電率化, Honda R&D Technical Review Vol. 32, No. 2, p. 125-131
- (3) 太田慎弥, 山内雅晃, 溝口晃, 吉田健吾, 田村康: HEV/EV 用駆動モータ向け平角線の開発, SEI テクニカルレビュー, 第 194 号, p. 41-45, (2019)
- (4) 清水郁伸, 謝鵬, 早川直樹, 大久保仁: Volume-Time 理論を用いたインバータサージ電圧下における部分放電開始電圧の解析と実証, 電気学会研究会資料, 放電研究会 2010(1), p. 5-10, (2010)
- (5) 武藤大介, 大矢真, 青井恒夫, 上野孝弘: 巻線の部分放電現象に関する研究, 古河電工時報, 第 133 号, p. 11-18, (2014)
- (6) 大久保仁: 高電界現象論 一基礎と応用一, オーム社, p. 35-36, p. 291-297, (2011)
- (7) 木村健, 匹田政幸: インバータサージと国際規格, 電気学会誌, Vol. 126, No. 7, p. 419-422, (2006)
- (8) 石井彰三: 大気圧付近における放電の基礎, プラズマ・核融合学会誌, 第 70 巻, 第 1 号, p. 61-66, (1993)
- (9) 梶武文, 浅井洋光, 小島寛樹, 早川直樹: インバータサージ電圧下における巻線の部分放電開始電圧に及ぼす温度および湿度の複合的影響, 電気学会論文誌 A, Vol. 139, No. 1, p. 30-37, (2019)
- (10) IEC TS 61934:2011, Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses, (2011)

■ 著 者 ■



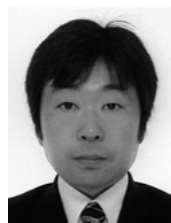
久保田 誠



伊東悠太



柳澤岳志



塚本能人



稲葉莉久