Partial Discharge under Pulse Voltage with Narrow Pulse Width

Koji Obata Member (Hitachi, Ltd., koji.obata.dy@hitachi.com)

Ryozo Takeuchi Member (Hitachi, Ltd., ryozo.takeuchi.wk@hitachi.com)

Tadahiro Shimozono Non-member (Hitachi Industrial Equipment Systems Co. Ltd.,
shimozono-tadahiro@hitachi-ies.co.jp)

Hideyuki Kikuchi Non-member (Hitachi Magnet Wire corp., kikuchi.hideyuki@hmw.hitachi-cable.co.jp)

Keywords : inverter, surge, pulse width, insulation, partial discharge, lifetime

The number of adjustable speed drives with voltage inverters has increased because of benefits for high energy efficiency, energy-savings and flexible controls. But various problems have been reported regarding with steep-fronted and high repetitive surge voltages generated by inverters. For example increase of the voltage stress at the motor terminal and increase of the voltage distribution between windings are caused by the steep fronted surge voltages of inverters and these stresses are repeated by high carrier frequency of the inverter. In addition, voltage waveforms of turn-to-turn insulations are quite different from those in conventional motors, so voltage agings of insulations may also be different from those in conventional motors. In this paper, partial discharge (PD) characteristics under pulse voltages with narrow pulse width which are usually seen at turn-to-turn insulations in motors fed by inverter drives are described.

Partial discharge inception voltage (PDIV) under pulse voltages with narrow pulse width is shown in Fig. 1. PDIV increases with decreasing pulse width of apply voltage compared with PDIV of sine voltage. But the increase of PDIV is little for high repetition frequency.

The number of PD under pulse voltages with narrow pulse width is shown in Fig. 2. The number of PD decreases with decreasing pulse width of apply voltage.

Fig. 1. Partial discharge inception voltage changing width and frequency of pulse voltage compared with sine voltage (sample: polyimide)

Fig. 2. The number of partial discharge changing pulse width of voltage around partial discharge inception voltage of sine (sample: polyimide, frequency: 50Hz)

Lifetime characteristics under pulse voltage is shown in Fig. 3. Time-to-failure of enameld wire applied with pulse voltage increases with decreasing pulse width. In addition, voltage at which lifetime curve becomes horizontal and the lifetime seems to be infinite is higher than that of pulse voltage with wide pulse width.

Waveforms of turn-to-turn voltage of a motor applied surge voltage is shown in Fig. 4. A steep-fronted surge voltage transmits in the winding from line side coil "U1" to neutral side coil "U4". As a result, turn-to-turn voltages occur at each coil. The width of turn-to-turn voltage is less than 1 μs. This is nearly equal to or less than the width of pulse voltage which influences PD and lifetime characteristics. So, it is found that we should measure the waveform of turn-to-turn voltage and consider the electrical agings under such a pulse voltage with narrow pulse width.

One of the reason why these phenomena occur is thought as time lag of spark, especially statistical time lag. Although all results are not shown in this summary, the increase of PDIV decreased when UV is irradiated. The increase of PDIV decreased with increasing the repetition frequency of pulse voltage. These factors influence the population of initial electron and the probability that initial electron is accelerated during a certain interval. So, it is thought that these phenomena described in this paper are occurred by statistical time lag of spark.

Fig. 3. Lifetime characteristics changing pulse width (sample: polyester-imide/polyamide-imide, frequency: 500Hz)

Fig. 4. Turn-to-turn voltage of motor applied surge voltage

幅の狭いパルス電圧下の部分放電特性

正 員 尾畑 功治*

正 員 武内 良三*

非会員 下 蘭 忠弘**

非会員 菊池 英行***

Partial Discharge under Pulse Voltage with Narrow Pulse Width

Koji Obata*, Member, Ryozo Takeuchi*, Member, Tadahiro Shimozono**, Non-member,
Hideyuki Kikuchi***, Non-member

When steep-fronted surge voltages are generated and applied to a motor by an inverter drive, higher voltages are distributed at turn-to-turn insulations than those of a motor supplied by line voltage. In addition, the voltage waveforms are quite different, especially pulse widths of them are narrower than those of a motor supplied by line voltage. This paper describes partial discharge and electrical lifetime characteristics of turn-to-turn insulation when pulse voltages are applied. As a result, it is found that partial discharge inception voltage increases, the number of partial discharges decreases and lifetime of insulations increases when pulse widths of applied voltages decrease as narrow as those of turn-to-turn voltages of motors fed by inverter drives. These results can probably improve a present design and a quality assurance of materials and motor insulations for inverter drives in the future.

キーワード：インバータ，サージ，パルス幅，絶縁，部分放電，寿命

Keywords：inverter, surge, pulse width, insulation, partial discharge, lifetime

1. はじめに

近年，産業用，自動車，鉄道などではインバータを用いたモータの可変速，省エネルギー運転が盛んに行われている。また，パワー半導体，ドライブ制御技術の発展とともに，今後もモータのインバータ駆動化は拡大すると考えられる。しかし，インバータ駆動に伴いモータでは新たな問題が報告されつつある⁽¹⁾。例えば，急峻なインバータサージ電圧がモータに印加されると，正弦波駆動時と異なりモータの巻線間に幅の狭い両極性スパイク状の高電圧パルスが発生することが報告されている^{(2)~(5)}。本研究では今回新たにこのような幅の狭い両極性スパイク状の高電圧パルスに対する絶縁物の部分放電特性および課電寿命特性を測定，検討した。

2. 実験方法

〈2・1〉 試験試料 表 1 および図 1 に試験に用いた絶縁材料およびモデルを示す。試験には，モータ巻線に一般的に使用される 5 種類の絶縁材料を使用した。また，各材料を使用してモータ巻線間絶縁部を模擬したモデル試料を作成した。マイカ，ポリイミド，二重ガラス被覆，エナメル＋二重ガラスでは，絶縁被覆電線の導体平坦部をつき合わせた背合わせ電線試料を作成した。絶縁被覆電線の絶縁厚みは約 100～200 μm であった。一方，ポリエステルイミド／ポリアミドイミドエナメルでは，2 本のエナメル電線を撚り合わせたツイストペア電線試料を作成した。電線の線径は 1.0mm であり，絶縁被覆厚みは約 30 μm であった。

〈2・2〉 試験回路 図 2 に部分放電計測回路を示す。今

表 1 モータ巻線間絶縁試験材料

Table 1. Test materials for turn-to-turn insulation of motor.

	Insulator	Model
1	Mica	Fig. 1 (a)
2	Polyimide	
3	Double Glass Coat (DGC)	
4	Enamel+DGC	
5	Polyester-imide/Polyamide-imide	Fig. 1 (b)

* (株)日立製作所 日立研究所
〒319-1292 日立市大甕町 7-1-1

Hitachi Research Lab., Hitachi, Ltd.

7-1-1, Omika-cho, Hitachi 319-1292

** (株)日立産機システム

〒275-8611 習志野市東習志野町 7-1-1

Hitachi Industrial Equipment Systems Co. Ltd.

7-1-1, Higashinarashino, Narashino 275-8611

*** 日立マグネットワイヤ (株)

〒319-1411 日立市川尻町 4-10-1

Hitachi Magnet Wire Corp.

4-10-1, Kawajiri-cho, Hitachi 319-1411

図 1 モータ巻線間絶縁試験モデル

Fig. 1. Test models for turn-to-turn insulation of motor.

図 2 パルス／正弦波部分放電測回路

Fig. 2. Electrical circuit for measuring partial discharge characteristics under pulse/sine voltage.

回、パルス電源と正弦波 50Hz 電源を使用し、電圧立ち上がり時間が部分放電特性に及ぼす影響を検討した。図 3 にパルス電圧波形の例を示す。パルス電圧の立ち上がり時間、立ち下がり時間はそれぞれ約 $1\mu\text{s}$ 、約 $30\mu\text{s}$ であった。一方、パルス電源ではさらにパルス幅 t_w と繰り返し周波数 f_p を個別に変化させ、これらのパラメータが部分放電特性に及ぼす影響も検討した。試料には並列に結合コンデンサを接続するとともに、低圧側に部分放電検出器を接続した。検出器の出力電圧は差動プローブで計測することで、パルス電圧に伴う充電電流およびノイズを低減しながら部分放電を計測できるようにした。デジタルオシロスコープ内部では、計測した信号をさらにデジタルハイパスフィルタ（遮断周波数 30MHz）処理し、部分放電とノイズを分離した。試料の印加電圧は高電圧プローブにて測定した。試験電圧は電源のスライダックを手動で操作し約 10～50V/s のスピードで昇、降圧した。部分放電開始電圧は、昇圧中に 1 発目の部分放電がトリガされた時点の印加電圧とした。部分放電消滅電圧は、降圧中に部分放電がトリガされなくなった時点の印加電圧とした。

図 4 に幅の狭いパルス電圧を用いた絶縁物の課電寿命測定回路を示す。課電寿命試験では市販のインバータの出力

図 3 パルス電圧波形の例

Fig. 3. Example of pulse waveform.

図 4 幅の狭いパルス電圧を用いた
課電寿命測定回路

Fig. 4. Electrical circuit for measuring time to failure applying pulse voltage with narrow pulse width.

に CR ハイパスフィルタおよびパルストランスを接続し、幅の狭いパルス電圧を作成した。CR ハイパスフィルタとパルストランスの励磁アドミタンスで形成される合成フィルタの遮断周波数は約 200kHz であった。試料には並列に結合コンデンサを接続するとともに低圧側リード線を高周波 CT に互いに逆方向に貫通させることで、充電電流およびノイズを低減しながら、課電寿命試験中に発生する部分放電と、試料が破壊した際の破壊電流を計測できるようにした。試料を流れる電流が所定の値を上回るか、印加電圧が所定の値を下回った際に試料が破壊したと判定し、制御用 PC にてインバータ電源の入力を遮断した。試料が破壊するまでの時間は制御用 PC にて計測した。試料の印加電圧は高電圧プローブにて測定した。

3. 実験結果

〈3・1〉 部分放電計測回路特性 図 5 にパルス電圧を印加して測定した部分放電の例を示す。一般にパルス電圧下ではパルス電圧に伴う充電電流やノイズのため、部分放電の計測が困難である⁽⁶⁾。本試験では、検出器 1, 2 の電流を差動プローブで測定することで、検出器を流れる同極性の充電電流およびノイズを打ち消し、逆極性の部分放電を

図5 充電電流、ノイズを低減した部分放電計測
Fig. 5. Partial discharge (PD) measurements reducing capacitive current and noise.

測定している。また、測定した信号はデジタルハイパスフィルタ処理することで残留充電電流やノイズを除去している。市販の電荷校正器で校正した結果、最小検出可能部分放電電荷量は、パルス電圧では 50pC、正弦波電圧では 3pC であった。なお、図 5 において、パルス電圧と充電電流が立ち上がり始める時刻が僅かに異なっている。この原因には、電圧プローブ、フィルタ、デジタルオシロスコープ、デジタルフィルタなどの測定系における計測時間遅れの違いが考えられる。

〈3・2〉 電圧立ち上がり時間と部分放電特性 図 6 に電圧のパルス電圧と正弦波電圧を印加したときの部分放電特性を示す。マイカ、ポリイミド、DGC、エナメル+DGC について試験した。各試料のプロット数は試験した試料数を示す。試料毎にばらついているが、各試料で見るといずれの試料でもパルス電圧と正弦波電圧の部分放電開始電圧、消滅電圧、部分放電開始電圧における最大放電電荷量はほぼ一致している。このことから、電圧立ち上がり時間が部分放電特性、特に部分放電開始電圧、消滅電圧、開始電圧における部分放電電荷量に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図 7 に、パルス電圧を印加した際の部分放電発生位相を示す。パルス電圧がピークに達しても部分放電は直ちには発生せず、数 μ s 遅れて発生している。また、部分放電は不規則に発生している。同様の現象は他にも報告されており、パルス電圧に特有の現象と考えられる⁽⁶⁾。パルス電圧ではこのように電圧を印加してから時間遅れを伴って部分放電が発生することから、パルス幅が部分放電特性に影響する可能性が考えられる。

(a) Inception voltage

(b) Extinction voltage

(c) Maximum partial discharge at inception voltage

Pulse (rise time: 1 μ s, width: 100 μ s, frequency: 500Hz)
Sine (frequency: 50Hz)

図6 電圧の立ち上がり時間を変化させたときの部分放電開始電圧、消滅電圧、放電開始電圧における最大放電電荷量

Fig. 6. Partial discharge inception voltage, extinction voltage and maximum partial discharge at inception voltage changing rise time of voltage.

〈3・3〉 パルス幅、繰り返し周波数と部分放電特性

図 8 に電圧のパルス幅と繰り返し周波数を変化させたときの部分放電特性を示す。パルス幅を狭くすると部分放電開始電圧が増加する。また、部分放電開始電圧における最大放電電荷量も増加する。ただし、繰り返し周波数を高くすると、これらの値はパルス幅を狭くしても増加しなくなる。一方、部分放電消滅電圧はパルス幅や繰り返し周波数を変化させても変化しない。

図 9 に一定の大きさのパルス電圧を印加して測定した部

図7 パルス電圧下の部分放電発生位相
(試料：ポリイミド)

Fig. 7. Phase time of partial discharge (PD) generated by pulse voltage (sample: polyimide).

部分放電発生頻度を示す。正弦波電圧における部分放電開始電圧付近の電圧を印加して試験した。部分放電発生頻度は1電圧サイクルあたりの発生数 (Pulse Per Cycle) に換算し表示した。パルス幅を狭くすると部分放電発生頻度が低下する。ただし、印加電圧を高くすると部分放電発生頻度の絶対値が増加するとともに、パルス幅に対する部分放電発生頻度の傾きが小さくなる。今回、図8の部分放電計測では印加電圧を昇圧しながら部分放電開始電圧を計測したが、幅の狭いパルス電圧では部分放電発生頻度が低いため、部分放電が計測される前に印加電圧が昇圧され、結果的に部分放電開始電圧が高くなった可能性が示唆される。

なお、図8と図6のPolyimideでは部分放電開始電圧、消滅電圧、最大放電電荷量が異なっている。この原因については不明であるが、試料の部分放電特性のばらつきが可能性の1つとして考えられる。

図10に紫外線を照射しながら電圧のパルス幅と繰り返し周波数を変化させたときの部分放電特性を示す。紫外線を照射した場合、パルス幅、繰り返し周波数を変化させても部分放電開始電圧、消滅電圧、放電開始時の最大放電電荷

図8 パルス幅と繰り返し周波数を変化させたときの部分放電開始電圧、消滅電圧、放電開始電圧における最大放電電荷量 (試料：ポリイミド)

Fig. 8. Partial discharge inception voltage, extinction voltage and maximum partial discharge at inception voltage changing width and frequency of pulse voltage compared with sine voltage (sample: polyimide).

量は変化しなかった。紫外線を照射した場合、試料周囲で初期電子が安定的に生成されることが考えられる。紫外線を照射した場合にはパルス幅を狭くしても部分放電開始電圧が増加しなかったことから、パルス幅を狭くすると部分放電開始電圧が増加し部分放電発生頻度が低下する原因には、初期電子の発生確率が関係している可能性が示唆される。

〈3・4〉 印加電圧の大きさと部分放電特性 図11に印加電圧の大きさを変化させたときの最大放電電荷量を示

(a) Around partial discharge inception voltage of sine

(b) Over partial discharge inception voltage of sine

図9 正弦波電圧の部分放電開始電圧付近の電圧でパルス幅を変化させた際の部分放電発生頻度 (試料: ポリイミド, 周波数: 50Hz)

Fig. 9. The number of partial discharge changing pulse width of voltage around partial discharge inception voltage of sine (sample: polyimide, frequency: 50Hz).

す。正弦波電圧を印加した場合、部分放電開始電圧以上の電圧における最大放電電荷量はほぼ一定となっている。一方、パルス電圧を印加した場合、印加電圧とともに最大放電電荷量が増加している。ところで、ピーク電圧が等しい場合、パルス電圧と正弦波電圧の課電寿命がほぼ一致することが報告されている⁽⁵⁾。ただし、その原因についてはまだ十分検討がされていない。今後、今回のような部分放電特性も含めてパルス電圧下の課電寿命特性を検討する必要があると考えられる。

〈3・5〉 パルス幅、電圧の大きさと課電寿命特性 以上の結果、パルス電圧ではパルス幅と印加電圧の大きさが課電寿命特性に大きく影響する可能性が示唆された。そこで、次にパルス電圧のパルス幅と電圧の大きさを变化させて課電寿命特性を測定した。試験にはツイストペアエナメル電線と図4の回路を使用した。

図12にパルス幅と課電電圧の大きさを变化させたときの課電寿命測定結果を示す。いずれのパルス幅でも、電圧が高くなるとともに寿命は短くなる。高電圧側ではパルス幅

(a) Inception voltage

(b) Extinction voltage

(c) Maximum partial discharge at inception voltage

図10 紫外線を照射してパルス幅と繰り返し周波数を变化させたときの部分放電開始電圧、消滅電圧、放電開始電圧における最大放電電荷量 (試料: ポリイミド)

Fig. 8. Partial discharge inception voltage, extinction voltage and maximum partial discharge at inception voltage changing width and frequency of pulse voltage compared with sine voltage (sample: polyimide).

1μs、100μs の課電寿命はほぼ一致している。しかし、低電圧側ではパルス幅 1μs の課電寿命はパルス幅 100μs の課電寿命より長くなる。また、課電寿命曲線が水平になり寿命がほぼ無限大になる電圧も、パルス幅が狭くなるほど高くなる。このことから、低電圧領域、特に部分放電開始電圧付近の電圧領域では、パルス幅と印加電圧の大きさが巻線間絶縁の部分放電劣化特性や課電寿命特性に大きく影響することが示された。

図13にパルス幅 1μs 付近における部分放電開始電圧の結果を示す。図13では正弦波電圧における部分放電開始電圧

Pulse (rise time: $1 \mu\text{s}$, width: $100 \mu\text{s}$, frequency: 500Hz)
Sine (frequency: 50Hz)

図 11 印加電圧を変化させたときの最大放電電荷量
(試料：ポリイミド)

Fig. 11. Maximum partial discharge increasing apply voltage
(sample: polyimide).

図 12 パルス幅と印加電圧を変化させたときの課電寿命特性
(試料：ポリエステルイミド／ポリアミドイミド，
周波数： 500Hz)

Fig. 12. Lifetime characteristics changing pulse width
(sample: polyester-imide/polyamide-imide, frequency:
 500Hz).

を 1.0 としてパルス電圧の部分放電開始電圧を表した。なお、図 13 には図 8 の結果も併記した。パルス幅が狭くなるとともに部分放電開始電圧が高くなる。特にパルス幅が $1 \mu\text{s}$ 程度になると、繰り返し周波数を高くしても部分放電開始電圧はほとんど低下しなくなる。一般に課電寿命特性では部分放電開始電圧以下では寿命が著しく長くなり、ほぼ無限大になると考えられている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。したがって、図 12 において、パルス幅 $1 \mu\text{s}$ の課電寿命曲線が水平になり寿命がほぼ無限大になる電圧がパルス幅 $100 \mu\text{s}$ よりも高くなった原因には、パルス幅の減少に伴い部分放電開始電圧が増加したことが考えられる。

図 14 にサージ電圧をモータに印加した際の巻線間電圧の測定結果を示す。対地間サージ電圧が $U1 \sim U4$ へとモータ巻線を伝播する際の伝播遅れに伴い、モータ巻線間にパルス電圧が発生している。この電圧のパルス幅は約 $1 \mu\text{s}$ である。

図 13 パルス幅を変化させたときの部分放電開始電圧
(f_p ：パルス繰り返し周波数)

Fig. 13. Increase of the partial discharge inception voltage (PDIV) decreasing the pulse width compared with sine 50Hz voltage (f_p : pulse frequency).

図 14 サージ電圧を印加したときの
モータ巻線間電圧

Fig. 14. Turn-to-turn voltage of motor applied surge voltage.

図 12, 図 13 ではパルス幅が $1 \mu\text{s}$ 以下になると部分放電特性、課電寿命特性が大きく変化することから、インバータ駆動モータではモータ巻線間に実際に発生する電圧のパルス幅を測定するとともに、幅の狭いパルス電圧に対する絶縁材料の特性を評価し、モータ絶縁設計をしなければならないことが示された。

4. 考察

以上の検討の結果、下記の知見が得られた。

- (1) 印加電圧のパルス幅を狭くすると部分放電開始電圧は増加し、部分放電発生頻度は低下する。また、課電寿命は長くなる。
- (2) 電圧の繰り返し周波数を高くするか、紫外線を照射すると、部分放電開始電圧の増加は少なくなる。
- (3) 部分放電開始電圧以上ではパルス電圧の大きさとともに部分放電電荷量が大きくなる。

これらの原因の 1 つには、火花放電遅れ、特に統計遅れが考えられる。図 15 にパルス電圧下における空気の火花放電遅れの概念図を示す⁽⁹⁾。一般に、高電圧を印加した際に空

図 15 パルス電圧下の空気の火花遅れ（概念図）⁽¹⁰⁾

Fig. 15. Time lag of spark applying pulse voltage (Schematic diagram).

図 16 繰り返し周波数および紫外線照射が部分放電特性に及ぼす影響の検討（概略図）

Fig. 16. Consideration on effects of repetitive frequency and UV irradiation for partial discharge characteristics (Schematic diagram).

気が火花放電に至るには、初期電子が出現するまでの統計遅れ時間と、初期電子が加速されて火花放電が完成するまでの形成遅れ時間の和で表される火花遅れ時間が必要である。このため、印加電圧のパルス幅が狭くなりパルス幅が火花遅れ時間と同等以下になると、火花放電が完成する前に高電圧が取り除かれるため火花放電に至らなくなる。したがって、今回、パルス幅を狭くした際に部分放電発生頻度が低下、部分放電開始電圧が増加し、課電寿命が長くなった原因には、パルス幅が火花放電遅れに比べて短くなっ

(a) Voltage between air gap

(b) Partial discharge of air gap

図 17 部分放電開始電圧以上のパルス電圧と正弦波電圧を印加した際に空気に加わる電圧 V_g と部分放電電荷量 Q の関係

Fig. 17. Relationship between voltage of air gap and partial discharge (PD) applying pulse and sine voltage over partial discharge inception voltage.

たことが考えられる。ただし、図 9 では部分放電発生頻度が少ないもののパルス幅の狭い電圧でも部分放電が発生している。電圧のパルス幅が形成遅れ時間より短い場合には火花放電が発生しなくなることから、今回試験したパルス幅は形成時間遅れ以上であり、統計遅れ時間+形成遅れ時間以下であったと考えられる。すなわち、今回の実験結果では火花放電遅れの中でも特に初期電子が出現するまでの統計遅れが時間の影響が大きかったと考えられる。

以上のことを踏まえ、繰り返し周波数と紫外線照射が部分放電特性に与える影響を検討した結果を図 16 に示す。繰り返し周波数を高くした場合、初期電子が出現した時刻に高電圧が発生している確率が高くなり、火花放電に至る確率が高くなる。また、紫外線を照射した場合には、初期電子が安定して供給され、パルス電圧が印加されている間に初期電子が発生し火花放電に至る確率が高くなる。この結果、繰り返し周波数を高くするか、紫外線を照射した場合には、パルス幅を狭くしても部分放電開始電圧が増加しなかったと考えられる。

一方、部分放電開始電圧以上で最大放電電荷量が印加電圧とともに増加した原因の 1 つにも、火花放電遅れが考え

図 18 試料端部の構造と過電圧に伴う部分放電の広がり

Fig. 18. Consideration on partial discharge expansion at the edge of specimen when occurring overvoltage by time lag of spark.

られる。図 17 に、部分放電開始電圧以上のパルス電圧と正弦波電圧を印加した際に空気に加わる電圧 V_g と部分放電電荷量 Q の関係を示す。パルス電圧では印加電圧を大きくしても、火花放電遅れのため瞬間的に正弦波の火花放電電圧 $V_{g(\text{sine})}$ 以上の高電圧（過電圧） $V_{g(\text{pulse})}$ が印加され火花放電が発生することが考えられる。ところで、部分放電電荷量 Q は空気の火花放電電圧 V_g と空気に直列な静電容量 C_0 との積で決まる⁽¹⁰⁾。したがって、パルス電圧では印加電圧を高くするとともに部分放電電荷量が増加したと考えられる。

ただし、今回試験に使用した試料では、図 18 に示すように、試料両端部においてエアギャップが広がっており、部分放電が発生するエアギャップや放電面積に制限が無い。このため、過電圧に伴い部分放電発生箇所や面積が広がり部分放電電荷量が増えた可能性も考えられる。

さらに、以上の考察では個々のパルス電圧で部分放電現象が独立して発生すると仮定して考察した。しかし、実際には複数のパルス電圧が繰り返し絶縁物に印加されている。このような場合、先に印加された電圧による絶縁物への電荷蓄積が次のパルス電圧の部分放電特性に影響を及ぼす可能性も十分考えられる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。今回の実験では繰り返しパルス電圧の周期（周波数）を一定にし、パルス幅を変化させたためパルス休止期間が異なっている。繰り返し周波数が低い領域ではパルス幅に比べてパルス休止期間が長いことため休止期間の影響は少ないと考えられるが、繰り返し周波数が高い領域では休止期間の影響は無視できない。今後、繰り返しインパルス電圧における部分放電特性を検討する際にはパルス休止期間を一定にし、電荷の蓄積や拡散の影響も検討する必要があると考えられる。

以上のようにパルス電圧下における部分放電特性、課電劣化寿命特性は複雑な現象によって支配されている可能性があるため、今後、さらにこれらの現象を区別できる試料

や試験方法を考案し、パルス電圧下における部分放電特性、劣化特性を検討する必要があると考える。

5. まとめ

インバータ駆動モータの巻線間絶縁特性を検討するため、パルス電圧を印加したときの絶縁物の部分放電特性および課電寿命特性を検討した。この結果、モータ巻線間に発生する幅の狭いパルス電圧では部分放電開始電圧が増加する。また、部分放電発生頻度が低下し、課電寿命が長くなることが明らかになった。インバータ駆動モータではモータ巻線間に実際に発生する電圧のパルス幅を測定するとともに、幅の狭いパルス電圧に対する絶縁材料の特性を評価し、モータ絶縁設計をしなければならないことが示された。

（平成 19 年 9 月 27 日受付，平成 19 年 12 月 10 日再受付）

文 献

- (1) 「インバータサージの絶縁システムへの影響」，電気学会技術報告，No.739, pp.6-11 (1999)
- (2) K. J. Cornick and T. R. Thompson : "Steep-front switching voltage transients and their distribution in motor windings Part 2: Distribution of steep-front switching voltage transients in motor windings", *IEE Proc.*, Vol.129, Pt. B, No.2, pp.56-63 (1982)
- (3) Gambica/Rema : "Variable Speed Drives and Motors: Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation", Technical Report, No.1, pp.2-6 (2001)
- (4) K. Obata, K. Fukushi, and R. Takeuchi : "Turn to Turn Insulation of Motor Fed by Inverter", *Proceeding of the 34th Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in Systems*, pp.165-168 (2002) (in Japanese)
尾畑功治・福士慶滋・武内良三：「インバータ駆動モータの層間絶縁」，第 34 回電気電子絶縁材料シンポジウム，pp.165-168 (2002)
- (5) K. Obata, K. Fukushi, and R. Takeuchi : "Lifetime Characteristics of Electrical Insulation in Motor Fed by Inverter", *IEEJ Trans. FM*, Vol.125, No.3, pp.261-267 (2005-3) (in Japanese)
尾畑功治・福士慶滋・武内良三：「インバータサージ電圧下の課電寿命特性」，*電学論 A*, **125**, 3, pp.261-267 (2005-3)
- (6) 森 興次・井上良之：「パルス電圧による部分放電発生特性」，電気学会誘電絶縁材料研資，DEI-93-120, Vol.3, No.4, pp.9-18 (1993)
- (7) M. Kaufhold, G. Borner, M. Eberhardt, and J. Speck : "Failure Mechanism of the Interturn Insulation of Low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.12, No.5, pp.9-16 (1996)
- (8) Gambica/Rema : "Variable Speed Drives and Motors: Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation", Technical Report, No.1, p.10 (2001)
- (9) 電気学会編：放電ハンドブック（上），p.132 (1998)
- (10) F. H. Kreuger : *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, p.29, Butterworths (1989)
- (11) K. Kimura, S. Itaya, S. Ushirone, M. Hitkita, and W. Bito : "Discharge Condition and Surface charge Distribution under Repetitive Bipolar Impulses", *Proc. of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Vol.3, pp. 1061-1064, Nagoya (2003-6)
- (12) K. Inuzuka, M. Morikawa, N. Hayakawa, T. Hirose, M. Hamaguchi, and H. Okubo : "Partial Discharge Inception Characteristics of Nanocomposite Enamel Wire for Inverter-Fed Motor", *2006 National Convention Record IEE Japan*, p.60 (2006) (in Japanese)
犬塚健太・森川真人・早川直樹・広瀬達也・浜口昌弘・大久保仁：「インバータ駆動モータ用ナノ複合エナメル線の部分放電開始特性」，平成 18 年電気学会全国大会，p.60 (2006)

尾 畑 功 治

(正員) 1972年9月6日生。1997年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所に入社。日立研究所にて回転電機絶縁の研究に従事。2007年電気学会論文賞受賞。

下 藺 忠 弘

(非会員) 1973年10月20日生。2000年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。2002年4月(株)日立産機システム設立に伴い転属。誘導電動機及びDCブラシレスモータの設計・開発に従事。

武 内 良 三

(正員) 1945年11月30日生。1970年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所に入社。日立研究所にて電気絶縁技術、画像処理技術およびコンピュータグラフィックス技術の研究開発を順次担当した。IEEE 論文賞, 電気学会論文賞および画像電子学会論文賞などを受賞。IEEE 会員。

菊 池 英 行

(非会員) 1966年2月16日生まれ。1988年3月東京電機大学電子工学科卒業。同年4月日立電線(株)入社。2002年8月より日立マグネットワイヤ(株)設立に伴い出向。1989年より巻線の開発業務に従事。1996年より樹脂合成及びナノコンポジット材料の研究開発を推進。2001年電気学会優秀論文発表賞受賞。