インバータ装置における単極性矩形波 電圧印加時の部分放電特性

正 員 長谷川武敏 (三菱電機) 非会員 松 田 定 (三菱電機)
正 員 木村 俊則 (三菱電機) 正 員 碓 井 修 (三菱電機)

Partial Discharge Characteristics under Unipolar Rectangular Step Pulses for Inverters

Taketoshi Hasegawa, Member, Sadamu Matsuda, Non-member, Toshinori Kimura, Member,
Osamu Usui, Member, (Mitsubishi Electric Corporation)

For high voltage induction motors of large ratings, new driving systems such as inverters using Pulse Width Modulation (PWM) are becoming popular in industrial plants using mill motors and traction motors. Understanding of the partial discharge characteristics under inverter voltage stress is very important to achieve reliable insulation design for these apparatus. A model sample with a single void in insulation and IEC(b) electrode system for surface discharge on insulation were used. Partial discharge inception voltages under ac voltage stress, unipolar rectified ac voltage stress and unipolar rectangular step pulses were investigated by varying the applied voltage. As a result, it was found that the zero-to-peak value of partial discharge inception voltage under unipolar voltage stress was 1.5 to 2 times higher than that under ac voltage stress. This reason can be attributed to the behaviour of the residual voltage after discharge at the void since the occurrence of the partial discharge inception voltage under unipolar stress is considered to be higher than under ac stress.

キーワード：PWMインバータ，パワーエレクトロニクス，部分放電，高電圧，絶縁

1. はじめに

PWM (Pulse Width Modulation)インバータのスイッチング素子として、高電圧・大電流のGTO (Gate Turn Off Thyristor)やIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)等が開発され、工業用の大形モータや電車モータの可変速駆動制御に広く使用されている⁽¹⁾。PWMインバータ制御による出力電圧は、立ち上がり時間が1μs以下の速いパルス電圧の繰り返し波形であると同時に、過渡的に高い電圧が重畳されている。従って、インバータで駆動されるモータには、このような高速繰り返し矩形波が課電されるため、モータ絶縁のインバータ波形に対する部分放電特性について多くの報告例がある^{(2)~(6)}。特に、モータの巻線絶縁では過渡過電圧の侵入は、巻線第1ターンにかかることが予想され、これらのインバータ波形における部分放電開始電圧やインバータ出力電圧による課電劣化寿命試験が行われ、絶縁信頼性の検討が成されている。

一方、PWMインバータの主回路の電圧波形は、単極性の矩形波電圧の繰り返しである。同様に、このような波形における部分放電特性についても調べられている^(4, 5)。その結果、単極性電圧の部分放電開始電圧はインバータ出力電圧波形の両極性電圧に比べ、電圧のピーク値で比較す

ると、1.7~1.8倍高くなるとの報告がある⁽⁵⁾。しかし、部分放電開始電圧に及ぼす電圧波形の影響について、その考え方は明らかになっていないのが現状である。

本報告では、ボイドを含む絶縁物を模擬した試料と絶縁物沿面での部分放電について、両極性電圧として正弦波交流電圧、単極性電圧として正弦波半波電圧、および単極性矩形波電圧を用いて部分放電開始電圧等を調べ、電圧波形の違いによる特性を調べた。さらに、両極性電圧と単極性電圧の部分放電開始電圧の相違について、部分放電発生後のボイドに現れる残留電圧を考慮して検討した。

2. 試料および実験方法

<2.1> 試料 図1は用いた試料の電極構成を示す。同図(a)はボイドを含む絶縁物を模擬したモデル試料で、放電ギャップ(放電電圧 V_i が260Vの真空アレスター)がボイドに相当し、10pFのコンデンサはボイドと直列の健全な絶縁物に相当する⁽⁷⁾。放電ギャップと並列に接続されたコンデンサ(200pF)はボイドにかかる電圧を制限するための分圧用である。このモデル試料の見かけの放電電荷は放電ギャップの V_i と10pFの積で求められ2600pCと計算される。

一方、同図(b)は絶縁物沿面の部分放電特性を調べるた

図1 電極構成

Fig.1. Configuration of Electrode system.

めに用いた IEC(b)電極である。絶縁物は厚さ d が 0.125 mm のポリイミドフィルム(比誘電率 ϵ_r : 3.3)と d が 0.635 mm のアルミナ基板(ϵ_r : 8.6)の2種類を供試した。

<2.2> 実験方法 図2は高電圧発生回路と部分放電測定回路である。正弦波交流電圧の発生は 60Hz の正弦波発振器 (OSC.) の出力を電力増幅器 (Power Amp.) を通し、その出力を昇圧トランスを介して高電圧を発生させた。正弦波半波電圧は同様にトランスで昇圧後、高圧ダイオードを通して発生させた。高圧ダイオードのカットオフ時に負荷が容量性であるためにシャープな半波波形が発生できない。そこで、高圧ダイオードの後に 10M Ω のダミー抵抗を付加して波形の改善を行っている。単極性矩形波の発生は OSC. の信号を矩形波出力とし、同様に昇圧用トランスを介し、その出力を高圧ダイオードで整流することで発生させた。得られた矩形波の立ち上がり時間は約 1kV/10 μ s で、繰り返し周波数は 60Hz とした。

部分放電の測定は、試料と並列に接続された 10pF のカップリングコンデンサーに流れる電流信号を差動増幅器(差動 Amp.)に入力し、正弦波半波、および単極性矩形波の不連続部分で生じる過渡的な変位電流をキャンセルアウトさせ、部分放電の検出感度の向上を図った。その結果、正弦波交流電圧では 1pC、正弦波半波では 2pC、単極性矩形波では 5pC の部分放電を測定できる。

次に、実験方法について説明する。モデル試料においては、各電圧波形における部分放電発生頻度の印加電圧依存性を調べた。IEC(b)電極試料では、同様に各印加電圧波形における最大放電電荷の印加電圧依存性を調べた。また、絶縁材料の厚さと比誘電率の影響について比較検討した。

図2 高電圧発生回路と部分放電測定回路

Fig.2. HV generating circuit and Partial discharge measuring circuit.

それぞれの試験において、ポイント毎に電圧波形と部分放電パルス波形のオシログラムを測定し、正弦波交流電圧、半波電圧、それに単極性矩形波電圧における部分放電発生位相の特徴を調べた。

3. 実験結果および検討

<3.1> モデル試料の部分放電開始・消滅電圧 表1にモデル試料において、それぞれの電圧波形で測定した部分放電開始電圧(V_i)、および消滅電圧(V_e)を示す。電圧表示はピーク値(kVp)である。正弦波半波、単極性矩形波の部分放電開始電圧は非常に不安定である。表1の()内の値は非常に不安定であるが、部分放電が発生し始めた電圧を示している。定義上の V_i は半サイクルに1個発生する電圧である。正弦波交流電圧では、放電が発生すると、その電圧で安定して半サイクルに1個発生する。正弦波交流電圧に対する半波電圧と単極性矩形波電圧における V_i を比較をすると、約2倍の開きがあることが分かる。正弦波半波、単極性矩形波電圧の V_i と V_e は、ほぼ同じ値であると言える。

表1. 各電圧波形における V_i 、 V_e

Table.1 V_i , V_e for various applied voltage waveform.

	V_i (kVp)	V_e (kVp)
正弦波交流電圧	4.3	2.8
正弦波半波電圧	8.6 (6.4)	6.5
単極性矩形波	8.4 (7.0)	7.0

図3は各電圧波形における部分放電発生頻度(N)の電圧依存性である。モデル試料のように放電電圧がほぼ一定な場合は、正弦波交流電圧での発生頻度はディスクリートな変化を示す。一方、正弦波半波、単極性矩形波のような単極性電圧では、放電が発生し始める電圧から不安定な発生挙動を示す。このカーブから、それぞれの電圧波形における放電の開始と消滅電圧が求まり、表1に示した値となる。

図3 部分放電発生頻度の印加電圧依存性

Fig.3. Relation between pd repetition rate and applied voltage various voltage wave.

る。図3からも、正弦波交流電圧と単極性電圧である正弦波半波、単極性矩形波電圧には、 V_i 、 V_e とも約2倍の差があることが分かる。図3の正弦波交流電圧における特性から残留電圧 V_r が求められる。すなわち、消滅電圧 V_e は $(V_i + V_r)/2$ で与えられから、モデル試料の V_r は約1.3kVと見積もることができる。

次に、各電圧波形における部分放電の発生状況を、電圧波形とともに図4～6に示す。図4の結果は正弦波交流電圧を印加した場合の電圧波形と放電パルス発生状況を示す。同図(a)は発生頻度 $N=1(V=4.3\text{kVp})$ の場合で、発生位相が安定な周期性を示している。(b)は $N=2$ の場合で、同様に規則正しく発生している。なお、パルスの大きさを示す放電電荷 q は約2500pCで、上述の計算値と一致している。図5は正弦波半波電圧の場合である。 $N=1$ の場合は、正極性の発生位相はゼロクロスである。 $N=2$ の場合においても、正極性の発生位相はゼロクロス付近に存在する。図6は単極性矩形波電圧の結果で、 $N=1$ の場合について時

図4 正弦波交流電圧における放電パルス発生状況

Fig.4. Pd pulse pattern for sinewave ac voltage.

図5 正弦波半波電圧における放電パルス発生状況

Fig.5. Pd pulse pattern for rectified ac voltage.

図6 単極性矩形波における放電パルス発生状況

Fig.6. Pd pulse pattern for rectangular voltage.

間軸を変えて示している。電圧波形は早い時間域で立ち下がり、約1msでピーク電圧の1/2程度の電圧で一定になり、繰り返し周波数60Hzの1/2周期である8msで、ゆっくりゼロ電位になる。部分放電パルスは急峻な電圧の立ち下がり部分と1/2電圧からゼロ電位に変化する電圧位相で、それぞれ1個発生している。同図(b)は電圧の立ち下がり部分で部分放電が発生している様子を示したものである。以上、単極性電圧である正弦波半波電圧、単極性矩形波電圧とも放電電荷は約2500pCであり電圧波形の影響はない。

<3.2> IEC(b)電極試料における部分放電特性 表2はIEC(b)電極で、ポリイミドフィルムとアルミナ基板試料を用い、正弦波交流、正弦波半波、単極性矩形波電圧で測定した V_i と V_e である。また、それぞれの試料における最大放電電荷と印加電圧の関係を図7、8に示す。

図7はポリイミドフィルムの結果で、正弦波交流電圧の場合は V_i を越えると、電圧の上昇とともに放電電荷は急激に大きくなる。同様に、正弦波半波と単極性矩形波電圧の場合も V_i を越えると大きな放電が発生する。表2に示したように、単極性電圧における V_i は正弦波交流電圧のそれに比べ、約1.4~1.7倍高い値を示す。

図8はアルミナ基板の結果である。各電圧波形において、ポリイミドフィルムの特性に比べ、 V_i を越えても放電電荷は緩やかに大きくなる。正弦波半波と単極性矩形波の特性はほぼ同じ傾向を示す。正弦波半波、単極性矩形波電

表2 各電圧波形における V_i 、 V_e

Table.2. V_i , V_e for various applied voltage waveform.

試料	電圧波形	$V_i(\text{kVp})$	$V_e(\text{kVp})$
ポリイミドフィルム	正弦波交流電圧	1.2	1.2
	交流半波電圧	1.7	1.6
	単極性矩形波	2.0	2.0
アルミナ基板	正弦波交流電圧	1.4	1.4
	交流半波電圧	2.4	2.4
	単極性矩形波	2.1	2.1

図7 ポリイミドフィルムにおける最大放電電荷の印加電圧依存性

Fig.7. Relation between maximum pd magnitude and applied voltage for polyimide film.

図8 アルミナ基板における最大放電電荷の印加電圧依存性

Fig.8. Relation between maximum pd magnitude and applied voltage for alumina substrate.

の V_i は、正弦波交流電圧の約 1.5-1.7 倍高い値を示す。

以上のように、IEC(b)電極による沿面放電試料を用い、正弦波交流電圧、正弦波半波電圧、単極性矩形波電圧で部分放電特性を調べたが、前述の単一ボイドのモデル試料と同様、単極性電圧の部分放電開始電圧はピーク値で比較すれば、正弦波交流電圧の 1.4-1.9 倍である。

<3.3> 部分放電開始電圧と実効絶縁厚さの関係 図9は今回供試したポリイミドフィルム、アルミナ基板の部分放電開始電圧を試料の実効絶縁厚さ (d/ϵ_r) で整理した結果である。ポリイミドフィルムの d/ϵ_r は約 0.04、またアルミナ基板のそれは約 0.07 である。図中には d/ϵ_r が 0.12、0.6 と大きいガラスエポキシ基板のデータも含めて示している。正弦波交流電圧における部分放電開始電圧は、 d/ϵ_r の広い範囲で図9のグラフ上で整理できることが確かめられているが⁽⁸⁾、今回試験した単極性電圧においても同じ傾きで整理できることが分かる。両極性電圧である正弦波交流電圧に比べ、約 1.8 倍高い値を示す。

<3.4> 単極性電圧の部分放電開始電圧 以上のように、単極性電圧の部分放電開始電圧は、両極性電圧の 1.5 ~ 2 倍の値を示すことが分かった。ここでは、その違いについてオーソドックスな手法を用い検討する。

図10はインバータ装置で発生する各種電圧波形を分類

図9 部分放電開始電圧と実効絶縁厚さの関係

Fig.9. Relation between pd inception voltage and effective insulation thickness.

図10 各種インバータ波形の分類

Fig.10. Classification of inverter voltage waveform.

して示したものである。インバータ装置のスイッチング素子周辺では、基本的には単極性波形である。また、駆動されるモータ等の負荷側では両極性波形となっている。それらの中間的波形として、若干アンダーシュートを帯びた波形（単極性+シュート波形）の3種類に分類した。絶縁物を介した部分放電の繰り返しは、基本的には電圧のピーク値からピーク値までの大きさで考えて良い⁽⁷⁾。図10に併記しているように、それぞれのインバータ波形を正弦波に等価な波形として代表させた。

ボイドを含む絶縁物、あるいは絶縁物沿面で発生する部分放電の繰り返し回数(放電発生数)は、図11に示した電氣的等価回路で説明できる。同図(b)に示すように、両極性電圧である正弦波交流電圧に対する放電の繰り返しは、ボイド内の電圧が V_i を越えると急激に残留電圧 V_r まで低下し、半サイクルの間に放電は繰り返される⁽⁷⁾。従って、

図11 部分放電の等価回路と放電の繰り返し

Fig.11. Equivalent circuit of insulation with single void and its pd pulse repetition

V_r は放電の繰り返し回数に重要な意味を持つ。以下に、単極性電圧として、正弦波半波電圧における部分放電開始条件について説明する。

(1) $V_r=0$ の場合 図 12 は $V_r=0$ の場合の印加電圧波形とボイドのギャップ間電圧の変化を示したものである。印加電圧が放電開始電圧 V_i に達すると、ギャップ間電圧は瞬時に零に低下し、その後印加電圧の変化とともに負側に増大し、負極性の開始電圧($-V_i$)に達し、逆極性の放電が発生する。この条件で放電は持続するので、 $V_r=0$ では $V=V_i$ が持続する放電開始電圧となる。

(2) $0 < V_r < V_i$ の場合 この条件は V_r と V_i の相対関係で複雑に変化する。図 13 は $0 < V_r \leq 1/2 V_i$ の範囲内にある場合で、 $V_r=0.4V_i$ を例に印加電圧波形とギャップ間電圧の変化を示したものである。同図(a)は印加電圧 $V=1.4V_i$ の場合で、ギャップ間電圧が V_i に達すると、 $V_r=0.4V_i$ に瞬時に低下する。その後、印加電圧の上昇とともにギャップ間電圧も高くなるが、 V_i を越えることなく電圧は負側に変化する。しかし、負極性の $-V_i$ に達せず、ギャップ間電圧は印加電圧より $0.6V_i$ 負側にオフセットを受けた電位変化を示し、部分放電は持続しないことが分かる。同図(b)は印加電圧 $V=1.6V_i$ の場合を示している。正極性電圧で 2 個の放電が発生した後、ギャップ間電圧は負側に変化し、負極性の $-V_i$ に達して、放電は繰り返し持続する。

図 14 は $1/2 V_i < V_r \leq 2/3 V_i$ の範囲内にある場合で、 $V_r=0.6V_i$ を例に印加電圧波形とギャップ間電圧の変化を示したものである。同図(a)は印加電圧 $V=1.6V_i$ の場合で、ギャップ間電圧が V_i に達すると、 $V_r=0.6V_i$ に瞬時に低下

図 12 $V_r=0$ における放電の繰り返し

Fig.12. Pd pulse repitition under $V_r=0$.

図 13 $0 < V_r \leq 1/2 V_i$ における放電の繰り返し
Fig.13. Pd pulse repitition under $0 < V_r \leq 1/2 V_i$.

図 14 $1/2 V_i < V_r \leq 2/3 V_i$ における放電の繰り返し
Fig.14. Pd pulse repitition under $1/2 V_i < V_r \leq 2/3 V_i$.

し、正極性電圧で 2 発放電した後、印加電圧の上昇とともにギャップ間電圧も高くなるが、 V_i を越えることなく電圧は負側に変化し、負極性の $-V_i$ に達せず、印加電圧より $0.8V_i$ 負側にオフセットを受けた電位変化を示し、部分放電は持続しないことが分かる。同図(b)は印加電圧 $V=1.8V_i$ の場合を示している。正極性電圧で 3 個の放電が発生した後、ギャップ間電圧は負側に変化し、 $-V_i$ に達して放電が繰り返し持続する。

このように、残留電圧 V_r の値により部分放電が持続する条件が異なることが分かった。単極性電圧における部分放電が持続する条件は、以下の関係にあることが分かる。

$$\left. \begin{aligned} nV_i/(n+1) < V_r \leq (n+1)V_i/(n+2): \\ (n+2)V_i - V_r \quad [n=0 \sim \infty] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ex. $0 < V_r \leq V_i/2 : 2V_i - V_r \quad [n=0]$
 $V_i/2 < V_r \leq 2V_i/3 : 3V_i - V_r \quad [n=1]$
 $2V_i/3 < V_r \leq 3V_i/4 : 4V_i - V_r \quad [n=2]$

(3) $V_r=V_i$ の場合 図 15 は $V_r=V_i$ の場合の印加電圧波形とギャップ間電圧の変化を示したものである。同図(a)は $V=V_i$ の場合で、ギャップ間電圧が放電開始電圧 V_i に達すると、ボイド内電圧は $V_r=V_i$ になると同時に、印加電圧は負側に低下し、結局ギャップ間電圧は印加電圧と同じ変化を示し放電は持続しない。同図(b)は $V=2V_i$ の場合で、ギャップ間電圧が放電開始電圧 V_i に達すると、ボイド内電圧は印加電圧のピーク値まで $V_r=V_i$ 一定の電圧を保ち、その後ギャップ間電圧は負側に低下し、負極性の開始電圧($-V_i$)に達し、逆極性の放電が発生する。この条件で放電は持続するので、 $2V_i$ 以上が放電持続条件となる。

図 10 に分類した単極性電圧にオーバシュートした電圧が含まれる波形の部分放電開始電圧は、オーバシュート電圧 a が残留電圧 V_r を越えなければ、単極性電圧と同じ部分放電開始電圧を示す。

以上の検討結果を整理して、図 16 に単極性電圧の部分放電開始(持続)電圧 V_i と残留電圧 V_r の関係をまとめて示す。単極性電圧における部分放電開始(持続)電圧は V_r に

図 15 $V_r=V_i$ における放電の繰り返し
Fig.15. Pd pulse repitition under $V_r=V_i$.

依存していることが分かる。 $V_r=0$ は特異点である。

図 1 に示す放電ギャップを用いたモデル試料の放電発生頻度の電圧特性(図 3)から、正弦波交流電圧における $V_i=4.3\text{kV}$, $V_e=2.8\text{kV}$, $V_r=1.3\text{kV}$ であるので、 $V_r=0.3V_i$ となる。式(1), あるいは図 16 から単極性電圧での放電持続開始電圧は 7.3kV と計算できる。表 1 に示した単極性電圧での部分放電開始電圧は不安定な状態も含め、 $6.4\sim 8.4\text{kV}$ と測定されおり、上述の単極性電圧における部分放電開始(持続)条件の考え方は妥当であると言える。

図 16 残留電圧に対する部分放電開始電圧の変化
Fig.16. Change of pd inception voltage on residual voltage for unipolar voltage.

4. まとめ

インバータ電圧の部分放電特性について、単一ボイドを模擬したモデル試料と絶縁物沿面放電を模擬した IEC(b) 電極を用い、正弦波交流、正弦波半波、単極性矩形波電圧で部分放電特性を比較測定した。また、両極性、単極性電圧の部分放電開始電圧の違いについて、残留電圧を考慮して検討した。主な結果は以下のようである。

(1) 単一ボイドモデル試料および IEC(b) 電極による単極性電圧の部分放電開始電圧は、両極性電圧である正弦波交流電圧に比べ $1.5\sim 2$ 倍高くなることが分かった。

(2) 単極性電圧の部分放電開始電圧に関し、放電直後の

ボイドのギャップ間電圧、すなわち残留電圧を考慮した考え方を示した。この考え方は単一ボイド試料の実験結果を説明できることが分かった。

(平成 8 年 11 月 21 日受付, 同 9 年 4 月 21 日再受付)
文 献

- (1) 例えば, 川上 明・山田富久・森 敏: 「パワーデバイスの現状と展望」, 三菱電機技報, 67, No.9, p.58(平 5)
- (2) Y. Shibuya, K. Kimura, Y. Higashimura, H. Mitsui, K. Haga, H. Suwahara: "Degradation of Winding Insulation under Repetitive Impulse Voltage", CIGRE Paper 15-104, 1995
- (3) 東村 豊・高村 誠・藤岡慎英・小出智通・丸山正一: 「インバータ制御電動機のコイル絶縁に関する検討」, 電気学会絶縁材料研究, EIM-90-30 (平 2)
- (4) 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・絶縁材料研究, DEI-93-120(平 5)
- (5) 芳賀弘二・辻村輝雄: 「エナメル巻線のパルス電圧下での部分放電特性(その 1)」, 平 8 電気学会大会, No.325
- (6) M. Kaufhold, G. Borner, M. Eberhardt: "Endurance of the Winding Insulation of Induction Machines Applying Frequency Inverters", 8th Inter. Sympo. on High Volt. Engineering, 64.02, p.121, 1993.
- (7) 大石嘉男・家田正之・矢作吉之助: 「誘電体現象論: 第 9 章」, 電気学会, 112, 658 (平 4-7)
- (8) 平林庄司・平沢栄一・長谷川武敏・大石嘉男: 「絶縁材料の過電圧部分放電劣化寿命特性に及ぼす絶縁厚さの影響」, 電学論 A, 99, p.297 (昭 54-5)

長谷川 武敏 (正員) 1949 年 5 月 16 日生まれ。68 年 3 月三重県立津工業高等学校電気科卒業。同年 三菱電機(株)入社。以来、同社 中央研究所にて高電圧機器絶縁の研究開発に従事。現在、同社 先端技術総合研究所 電機システム技術部 主幹。工博。昭和 50 年電気学会論文賞受賞。

松田 定 (非会員) 1955 年 8 月 1 日生まれ。74 年 3 月愛媛県立吉田工業高等学校電気科卒業。同年 4 月三菱電機入社。以来、同社 生産技術研究所にて、高電圧機器絶縁の研究開発に従事。現在、同社 先端技術総合研究所 電機システム技術部 主事。

木村 俊則 (正員) 1964 年 6 月 27 日生まれ。90 年 3 月北海道大学大学院物理研究科修士課程修了。同年 4 月三菱電機入社。以来、同社 生産技術研究所にて、高電圧機器絶縁の研究開発に従事。現在、同社 先端技術総合研究所 電機システム技術部。物理学会会員。応用物応用物理学会会員。

碓井 修 (正員) 1970 年 3 月 7 日生まれ。92 年 3 月室蘭工業大学産業機械工学科卒業。同年 4 月三菱電機入社。以来、同社 生産技術研究所にて、高電圧機器絶縁の研究開発に従事。現在、同社 先端技術総合研究所 電機システム技術部。