急峻方形波高電圧を用いたSF₆-N₂混合ガス中 V-t特性の測定

学生員 豊田 裕之* 正員 松岡 成居*

正員 日高 邦彦*

Measurement of Sparkover Voltage and Time Lag Characteristics in SF₆-N₂ Gas Mixtures by using Steep-front Square Voltage

Hiroyuki Toyota*, Student Member, Shigeyasu Matsuoka*, Member, Kunihiko Hidaka*, Member

A square pulse voltage is useful for studying electrical discharge physics and/or very fast transient overvoltage issues. This paper describes sparkover voltages and time lag (*V-t*) characteristics of SF₆-N₂ gas mixtures in a very short time range below a microsecond, which are measured by using a steep-front square voltage with a rise time of 16 nanoseconds and a peak value of 200 kilovolts. SF₆-N₂ gas mixture, which contains nitrogen gas at a ratio of 60 % or less, has equivalent dielectric strength to pure SF₆ gas even in the short time range around 10 nanoseconds. Sparkover voltage and time lag characteristics are evaluated by using the equal area criterion even in the short time range below a microsecond.

キーワード: SF₆, 窒素, 混合ガス, V-t特性, VFTO, 等面積則

Keywords: SF₆, nitrogen, gas mixture, sparkover voltage and time lag characteristics, VFTO, equal area criterion

1. はじめに

放電研究は100年以上の長い歴史を持つが、その機構にはいまだ未解明の部分が多い。これは放電現象が高速に進展する確率的現象で、印加電圧の大きさや波形、媒体の種類や圧力、電極の形状や間隔など複数の要因が複雑に絡み合って影響するために、各要因を分離して検討することが難しいためである。特に印加電圧は波頭峻度、波高値、継続時間などのパラメータを持つが、放電はナノ秒オーダの短時間領域で進展するために、その範囲でパラメータを独立に変化させることが難しい。

この問題を解決するために理想的な電圧は、所望の電圧が瞬時に印加され、それが維持される方形波である。そのため、ナノ秒ないしマイクロ秒の方形波高電圧を用いた測定例が報告されているが⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾、試験電圧の発生自体が困難であるためにその数は多くない。そこで本研究室では一昨年度より、200 kVの波高値と16 nsの立ち上がり時間を実現した急峻方形波高電圧発生装置を導入し、1 μs以下の短時間領域でV-t特性を中心とした放電現象の観測を行ってきた。

こうした短時間領域での放電現象観測は、近年ガス絶縁

開閉装置 (GIS; Gas Insulated Switchgear) に特有の現象として問題となっているVFTO (Very Fast Transient Overvoltage) に対処するためにも有効である。VFTOとはGISの開閉動作に伴って発生する急峻な振動性サージで、数MHzオーダの複数の高周波が重畳して発生する。このような急峻なサージに対する機器絶縁の知見は十分でなく、近年短時間領域に焦点を絞った報告例が数多く見られる⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾。

一方でSF₆ガスは絶縁性能の高さに加えて不活性、無毒無害といった工業的に優れた特性を持ち高電圧機器の気体絶縁媒体として広く用いられているが、地球温暖化係数の高さからこれに替わる絶縁気体が模索されている。そこで本稿ではSF₆-N₂混合ガスを対象とした、1 μs以下の短時間領域におけるV-t特性の測定結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 急峻方形波発生装置 図1に急峻方形波発生装置 (日新電機: NSRG-200型) の側面図および簡易等価回路図を示す。本装置は大まかにマルクス回路、レーザトリガギャップ、放電槽の3つの部分から構成されている。

充電が完了したマルクス回路 (図1(b)15 nFコンデンサ) からインパルス電圧 (波頭長1.8 μs) が出力されると、まず中間蓄積コンデンサ (図1(b)2 nFコンデンサ) が充電される。その後にレーザトリガギャップが短絡されることで、供試ギャップに急峻方形波高電圧が印加される。レーザ

* 東京大学

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

図 1 急峻方形波発生装置（日新電機製：NSRG-200 型）

Fig. 1. Steep-front square voltage generator (Nissin-High Voltage Co., Ltd: NSRG-200).

図 2 急峻方形波電圧波形例

Fig. 2. Example waveforms of the steep-front square voltage.

トリガギャップは、Nd:YAG レーザの 2 倍波をガスギャップに照射し短絡させるもので、高耐電圧と高速動作を両立できる。

図 2 に急峻方形波発生装置の出力電圧波形例を示す。諸元は以下の通りである。

規約波頭長：16 ns

波高値：40-200 kV

継続時間：10 μs

減衰率：2.5%以下（10 μs 経過後）

また、レーザトリガギャップを導線で接続し短絡することで、波頭長 1.8 μs、波尾長 450 μs のインパルス電圧を発生することができる。これにより、同一実験系で雷インパルス印加時に近い特性と比較を行うことができる。

電圧波形の観測は、放電槽底面に取り付けられた容量分圧器を用いて行う。容量分圧器は全体波形測定用の低帯域容量分圧器と、波頭測定用の高帯域容量分圧器を併用する。高帯域容量分圧器の応答特性は、10 ns 以下である。また波形記録には、Tektronix 社製デジタルオシロスコープ TDS684B（周波数帯域 1 GHz、サンプリングレート 5 GS/s）を用

図 3 電極構成

Fig. 3. A schematic diagram of the electrode configuration.

(a) 電圧上昇後にスパークオーバ (b) 電圧上昇中にスパークオーバ

図 4 スパークオーバ発生時の電圧波形例

Fig. 4. Examples of voltage waveform in case of sparkover.

いた。

2.2 電極構成 一連の測定には、図 3 に示す半球-平板電極を使用する。半球電極は直径 100 mm のステンレス製で表面は鏡面加工されており、初期電子の発生を促し統計遅れ時間を極力小さくするために、先端部には放射線源（ ^{60}Co , 3.7 MBq）が埋め込まれている。平板電極は直径 570 mm のステンレス製で、同じく鏡面加工されている。試験電圧は半球電極側に印加される。ギャップ長は 10 mm に設定し、この時の電界利用率（＝平均電界/最大電界）は 0.89 である。

2.3 供試ガス 供試ガスには、純粋 SF_6 、純粋 N_2 、ならびにそれらの混合ガスを用いる。単体、混合で用いる場合とも、全圧を 0.1 MPa（大気圧）に設定する。また、混合比は 20% 毎に変化させる。

2.4 V-t 特性 V-t 特性とは、ある誘電体に電圧が印加された際の、放電電圧と放電時間遅れの関係を表したものである。図 4 に急峻方形波を印加しスパークオーバした時の電圧波形例を示す。電圧上昇後、平坦部でスパークオーバが発生した場合は、図 4 (a) に示すように印加電圧波高値とスパークオーバまでの時間遅れを記録する。過電圧率が高く電圧上昇中にスパークオーバが発生した場合は、図 4 (b) に示すようにスパークオーバ発生地点の電圧と時間遅れを記録する。

3. 実験結果

3.1 SF_6 ガス中 V-t 特性 SF_6 ガス中で測定した V-t 特性を図 5 に示す。正・負極性それぞれに、急峻方形波電圧と 1.8/450 μs インパルス電圧を印加した場合、さ

図 5 大気圧 SF₆ ガス中 V-t 特性

Fig. 5. V-t characteristics in SF₆ gas at atmospheric pressure.

らに放射線源を取り外して急峻方形波電圧を印加した場合の結果を示した。

1.8/450 μs インパルス電圧は、通常絶縁試験に用いられる標準雷インパルス (1.2/50 μs) に近い波頭長を持つ電圧波形である。これを用いた場合の測定可能時間領域は、短時間側で 300 ns 付近までである。かつ、この範囲では短時間側でのスパークオーバー電圧の上昇が小さい。

これに対し、急峻方形波電圧を用いた場合は 10 ns 以下の短時間領域まで測定領域が広がり、その時間領域でスパークオーバー電圧が大きく上昇する特性が得られた。急峻方形波印加時には、大きな極性差は現れていない。

一方で放射線源 (⁶⁰Co) による照射を行わずに急峻方形波電圧を印加すると、放射線源を用いた場合の V-t 特性を下限として測定点の広い範囲にばらつく。これは厚い金属壁に囲まれた容器内で測定を行っているため、放射線源による照射がないと十分な初期電子の発生にマイクロ秒オーダーの時間が必要であると考えられる。

3.2 SF₆-N₂ 混合ガス中 V-t 特性 SF₆-N₂ 混合ガス中で測定した正極性 V-t 特性を図 6 に示す。

放電遅れ時間 100 ns 以上の長時間側 V-t 特性はほぼ平坦になっている。この時間領域では、SF₆ ガスの混合率を 40% まで低下させてもスパークオーバー電圧の低下はほとん

図 6 大気圧 SF₆-N₂ 混合ガス中正極性 V-t 特性

Fig. 6. Positive V-t characteristics in SF₆-N₂ gas mixtures at atmospheric pressure.

図 7 大気圧 SF₆-N₂ 混合ガス中スパークオーバー電圧の混合比による変化

Fig. 7. Sparkover voltage and mixture ratio characteristics in SF₆-N₂ gas mixtures at atmospheric pressure as a parameter of sparkover time lag.

ど見られない。そして混合率を 20%, 0% と低下させてゆくと、スパークオーバー電圧は大きく低下する。これは既に知られている、混合比に対する正の相乗効果 (シナジズム)⁽¹²⁾ が確認されたものである。

一方で放電遅れ時間 100 ns 以下の短時間領域に目を向けても、長時間領域と同様に正の相乗効果が現れている。ただし V-t 特性の立ち上がり急峻になっているため、同じ放電遅れ時間あるいはスパークオーバー電圧で比較すると、純粋 SF₆ ガスの絶縁性能の高さが際立つ。例えば放電遅れ時間 10 ns で比較すると、純粋 SF₆ ガスのスパークオーバー電圧は SF₆ 混合率 40% のそれに対して 2 割ほど高くなっている。また、スパークオーバー電圧 110 kV で比較すると、純粋 SF₆ ガスの放電遅れ時間は SF₆ 混合率 40% の倍程度に達している。

図 7 は混合比に対するスパークオーバー電圧の変化を、放電遅れ時間 10 ns から 10 μs の間で示したものである。いずれの遅れ時間においても、混合率に対するスパークオーバー電圧のシナジズムが現れている。

4. 考 察

図 6 に示した測定結果に対し、等面積則⁽⁴⁾⁽¹³⁾を適用し

図 8 急峻方形波電圧に対する等面積則の適用

Fig. 8. Application of the equal area criterion for steep-front square voltage.

V - t 特性の予測を行った。

図 8 に急峻方形波電圧に対する等面積則適用の概念図を示す。等面積則とは、印加電圧波形に対しある電圧 V_0 を超える部分の電圧-時間積分値（面積パラメータ）が放電特性を決定するというもので、(1) 式によって評価される。

$$\int_{t_0}^{t_d} \{V(t) - V_0\} dt = \text{const.} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $V(t)$: 時刻 t における印加電圧の瞬時値、 t_0 : $V(t) = V_0$ となる時刻、 t_d : スパークオーバ発生時刻である。

本稿ではガス圧力、ギャップ長、電界利用率の影響を加味し、次式により定義した面積パラメータ F を用いる。

$$\int_{t_0}^{t_d} \frac{V(t) - V_0}{pg\eta} dt = F \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 p : ガス圧力、 g : ギャップ長、 η : 電界利用率である。

スパークオーバ電圧は高気圧ではガス圧力に対し飽和するが、ここでは数気圧の範囲を念頭に置き、ガス圧力に比例して変化すると近似した。また、 V_0 としては通常最低スパークオーバ電圧が用いられるが、図 6 の V - t 特性が放電遅れ時間 $1 \mu\text{s}$ 以上ではほぼ平坦になっていることから、ここではスパークオーバ電圧の最低値を用いることとした。

急峻方形波電圧印加時の面積パラメータ F は、図 9 に示すように定義される。スパークオーバが電圧上昇部で発生するか ($t_d \leq 20 \text{ ns}$) 平坦部で発生するか ($t_d > 20 \text{ ns}$) により電圧-時間積分の形状が異なるため、面積パラメータ F は次式のように場合分けをして求められる。

(i) $t_d \leq 20 \text{ ns}$ の場合

$$\begin{aligned} F &= \frac{(t_d - t_0) \{V(t_d) - V_0\}}{2pg\eta} \\ &= \frac{\{V(t_d) - V_0\}^2 t_d}{2pg\eta V(t_d)} \quad [\text{kV} \cdot \text{ns/cm/MPa}] \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

(ii) $t_d > 20 \text{ ns}$ の場合

$$\begin{aligned} F &= \frac{\{(t_d - 20) + (t_d - t_0)\} \{V(t_d) - V_0\}}{2pg\eta} \\ &= \frac{\{(t_d - 10)V(t_d) - 10V_0\} \{V(t_d) - V_0\}}{pg\eta V(t_d)} \\ &\quad [\text{kV} \cdot \text{ns/cm/MPa}] \dots \dots (4) \end{aligned}$$

(a) $t_d \leq 20 \text{ ns}$

(b) $t_d > 20 \text{ ns}$

図 9 急峻方形波電圧印加時の面積パラメータ F

Fig. 9. Equal area parameter F under the steep-front square voltage application.

ただし、(3) 式では $t_0 = V_0/V(t_d) \cdot t_d$ [ns]、(4) 式では $t_0 = V_0/V(t_d) \cdot 20$ [ns] と置き換えられることを利用して、それぞれ t_0 を消去している。単位は、 t_d [ns]、 t_0 [ns]、 $V(t_d)$ [kV]、 V_0 [kV]、 p [MPa]、 g [cm] である。

等面積則の鍵を握るのは面積パラメータ F の値であるが、実験によって得られた F はギャップ条件や印加電圧によって大きく変化し、適当な値を選定することが難しい。そこで本稿では最適な F を得る基準を模索することを目的とし、まずは全ての印加電圧に対し放電遅れ時間の標準偏差ならびに面積パラメータ F を求めた。その結果を図 10 に示す。この図より、印加電圧がある値を下回ると放電遅れ時間の標準偏差が急激に上昇し、同時に面積パラメータ F も上昇していることがわかる。この境界となる電圧を V_F と呼ぶことにし、図 10 中に破線で示した。

一般に同じギャップ条件、印加電圧に対する形成遅れ時間は一定と考えられるので⁽¹⁴⁾、放電遅れ時間のばらつきは統計遅れ時間の変動によると考えられる。すなわち、印加電圧が V_F を下回ると統計遅れ時間の変動が無視できないほどに大きくなり、それに伴って面積パラメータ F も増大すると解釈できる。

ラウエプロットから求めた SF_6 ガスの統計遅れ時間と形成遅れ時間を図 11 に示す。図中には V_F を破線で併記した。印加電圧が V_F を下回ると、統計遅れ時間が急激に増加している。紙面の都合上省略するが、この傾向は図 10 に示した他の気体にも共通して確認された。

V_F 以上の印加電圧に対する面積パラメータ F の平均値 F_{ave} を求めた結果を図 12 に示す。 SF_6 混合率 80 ~ 20% の F_{ave} は 250 ~ 310 kV · ns/cm/MPa 程度のほぼ同じ範囲に分布する。純粋 SF_6 の F_{ave} はそれよりも大きく 529 kV · ns/cm/MPa、窒素の F_{ave} は 1080 kV · ns/cm/MPa とかなり大きな値になっている。これは、最低スパークオーバ電圧 V_0 に対し V - t 特性が短時間側で大きく上昇するほど、 F_{ave} の値が大きくなるためである。

採用する面積パラメータ F によって、 V - t 特性の評価結果は大きく異なってくる。電圧の時間積分は形成時間に対して行うべきであること⁽¹³⁾、 V_F 以下の印加電圧では統計時間遅れが大きくなることから、ここでは F_{ave} を用いて V - t 特性を評価する。

(3)、(4) 式を $V(t_d)$ に対して解いて得られた次式に F_{ave}

図 10 各印加電圧に対する面積パラメータ F と放電遅れ時間の標準偏差Fig. 10. The equal area parameter F and standard deviation of the time lag to sparkover. 図 11 ラウエプロットから求めた純粋 SF₆ ガスの統計遅れ時間 (t_s) と形成遅れ時間 (t_f) の印加電圧による変化Fig. 11. Statistical time lag (t_s) and formative time lag (t_f) in SF₆ gas obtained from the laue plot. 図 12 V_F 以上の印加電圧に対する面積パラメータの平均値 F_{ave} (エラーバーは標準偏差を表す)Fig. 12. Averages of the equal area parameter F_{ave} under the voltage application over V_F depending on the mixture ratio (the error bars represent the standard deviations). 図 13 等面積則により評価した大気圧 SF₆-N₂ 混合ガスの正極性 V-t 特性Fig. 13. Positive V-t characteristics estimated by the equal area criterion in SF₆-N₂ gas mixtures at atmospheric pressure.を適用し、放電遅れ時間 t とスパークオーバー電圧 $V(t)$ の関係を求める。(i) $t \leq 20$ ns の場合

$$V(t) = \frac{pg\eta F_{ave} + tV_0 + \sqrt{(pg\eta F_{ave})^2 + 2pg\eta F_{ave}tV_0}}{t} \quad [\text{kV}] \quad \dots \quad (5)$$

(ii) $t > 20$ ns の場合

$$V(t) = \frac{pg\eta F_{ave} + tV_0 + \sqrt{(pg\eta F_{ave} + tV_0)^2 - 40(t - 10)V_0^2}}{2(t - 10)} \quad [\text{kV}] \quad \dots \quad (6)$$

以上の手順で等面積則の面積パラメータを設定して評価した V - t 特性を図 13 に示す。放電遅れ時間 10 ns 以下の急峻に立ち上がる部分では追従しきれていないケースもあるが、ほぼ実測値に合致した予測結果が得られている。短時間領域では V - t 曲線の立ち上がり急峻なため、わずかな面積パラメータの変動によっても誤差が大きく現れる。一方で長時間領域では V - t 曲線が平坦になっているために誤差が目立たないと考えられる。

5. おわりに

本稿では、16 ns の急峻な立ち上がりを持つ方形波高電圧を用い、SF₆-N₂ 混合ガス中において V - t 特性を測定した結果を報告した。その結果、既に知られているスパークオーバ電圧の混合比に対する正の相乗効果（シナジズム）が、1 μs 以下の短時間領域においても確認された。

さらに、等面積則による V - t 特性の定量的評価を試みた結果、1 μs 以下の短時間領域においても等面積則を適用することができた。評価に用いた面積パラメータ F_{ave} の値は、 V - t 特性が最低スパークオーバ電圧 V_0 に対し短時間側で大きく上昇するほど大きな値になる。

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究（A）の助成を受けて行われたことを記し、謝意を表したい。

（平成 16 年 5 月 10 日受付、平成 16 年 7 月 22 日再受付）

文 献

- (1) 日高邦彦・室岡義広：「ns 沿面放電の解析的考察（正極性）」、電学論 A, Vol.103-A, No.1, pp.9-16 (1983-1)
- (2) 日高邦彦・室岡義広：「ns 沿面放電の解析的考察（負極性）」、電学論 A, Vol.104-A, No.6, pp.307-314 (1984-6)
- (3) K. Watabe, H. Kamatani, N. Kobayashi, M. Onoda, and H. Nakayama: "Effects of Barrier on Creeping Discharge Characteristics in SF₆ and N₂ Gases under Pulse Voltages", *T. IEE Japan*, Vol.117-A, No.11, pp.1090-1096 (1997-11) (in Japanese)
渡部克典・釜谷文博・小林伸匡・小野田光宣・中山博史：「SF₆ および N₂ ガス中のパルス電圧による沿面放電特性に及ぼすバリアの効果」、電学論 A, 117, 11, pp.1090-1096 (1997-11)
- (4) M. Yashima, H. Shinkai, and H. Goshima: "Study on Voltage-time Characteristics of SF₆ in Very Short-time Range Using Steep-front Square Impulse Voltage under Quasi-uniform Filed Gap", CRIEPI Report, T99036 (2000) (in Japanese)
八島政史・新開裕行・五島久司：「方形波インパルスによる SF₆ 中準平等電界ギャップの短時間領域 V - t 特性の解明」、電中研報告, T99036 (2000)
- (5) H. Shinkai, H. Goshima, and M. Yashima: "Voltage-time Characteristics and Observation of Discharge Development in SF₆ Using Steep-front Square Impulse and Fast Oscillating Impulse Voltages under Quasi-uniform Field Gap", *IEEEJ Trans. FM*, Vol.123, No.4, pp.329-337 (2003-4) (in Japanese)
新開裕行・五島久司・八島政史：「方形波インパルスおよび高周波振動性インパルスを用いた SF₆ 中準平等電界ギャップの V - t 特性と放電進展過程の観測」、電学論 A, 123, 4, pp.329-337 (2003-4)
- (6) H. Shinkai, H. Goshima, and M. Yashima: "Study of the Quantitative Estimation Method of Voltage-time Characteristics for High-frequency Oscillating Impulse Voltage in SF₆ under Quasi-Uniform Field Gap", *IEEEJ Trans. FM*, Vol.123, No.10, pp.1023-1029 (2003-10) (in Japanese)
新開裕行・五島久司・八島政史：「SF₆ 中準平等電界ギャップの高周

波振動性インパルスに対する V - t 特性定量化手法の一検討—負極性放電進展の光学的観測結果に基づく評価法—, 電学論 A, 123, 10, pp.1023-1029 (2003-10)

- (7) K. Tekletsadik and L.C. Campbell: "SF₆ breakdown in GIS", *IEE Proc. Measurement & Technology*, Vol.143, pp.270-276 (1996)
- (8) T. Kawamura and B.-H. Lee: "Transient Impulse Breakdowns of SF₆ Gas in Inhomogeneous Electric Fields", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.38, pp.4898-4904 (1999)
- (9) M. Ikeda, S. Fukumoto, H. Takao, S. Ohtsuka, E. Haginomori, and M. Hikita: "Discharge Characteristics of SF₆ Gas for Very Fast Transient Voltage", *J. IEIE Japan*, Vol.23, No.5, pp.363-368 (2002-5)
- (10) Q. Zhang, Y. Khan, Y. Qiu, and M. Hara: "Streamer corona propagation of an inhomogeneous field gap in SF₆ gas stressed by steep-fronted impulse", *J. Phys. D, Appl. Phys.*, Vol.35, pp.2605-2607 (2002)
- (11) S. Okabe, M. Koutou, S. Yuasa, T. Suzuki, T. Rokunohe, and T. Yamaguchi: "Analysis of Non-Standard Lightning Impulse Voltage for Actual Substation and Generation Circuit", *IEEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.2, pp.175-180 (2003-2) (in Japanese)
岡部成光・向富政典・湯浅禎之・鈴木俊之・六戸敏昭・山極時生：「実変電所に侵入する非標準雷インパルス波形の分析と発生回路」, 電学論 B, 123, 2, pp.175-180 (2003-2)
- (12) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：放電ハンドブック, 上巻, p.289, 電気学会 (1998)
- (13) D. Kind: High-Voltage Insulation Technology, p.27, Vieweg (1985)
- (14) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：放電ハンドブック, 上巻, p.132, 電気学会 (1998)

豊田 裕之（学生員）1977 年 4 月 15 日生。2000 年 3 月

東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月、東京大学大学院工学系研究科進学。現在博士課程に在学し、放電現象の研究に従事。2001 年度優秀論文発表賞受賞。

松岡 成居（正員）1953 年 11 月 6 日生。76 年 3 月成蹊大

学工学部電気工学科卒業。同年 11 月東京大学工学部電気工学科勤務、助手、現在に至る。主として、放電現象の研究に従事。1990 年度優秀論文発表賞受賞。

日高 邦彦（正員）1953 年 4 月 27 日生。76 年 3 月東京

大学工学部電気工学科卒業、81 年 3 月同大学院工学系研究科電気工学博士課程修了。工学博士。現在東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻教授。85 年、2000 年電気学会論文賞、2004 年進歩賞、86 年 IEE Duddell 賞、83 年、96 年静電気学会論文賞受賞。主として放電現象及び高電圧工

学に関する研究に従事。IEEE、放電学会、静電気学会会員。