高気圧 SF₆ の雷サージ領域 V-t 特性の定量的評価

正 員 新開 裕行* 正 員 五島 久司*
 正 員 八島 政史* 正 員 藤波 秀雄*

Quantitative Evaluation of Lightning Surge Range Voltage-time Characteristics in High Pressure SF₆ Gas

Hiroyuki Shinkai*, Member, Hisashi Goshima*, Member,
 Masafumi Yashima*, Member, Hideo Fujinami*, Member

Since gas-insulated switchgear (GIS) is subjected to very fast transient overvoltages such as lightning surges or disconnector switching surges. Therefore the sparkover voltage and time (V-t) characteristics of SF₆ in a very short time range of less than 1μs are of great interest from the viewpoint of insulation design and coordination for a GIS. This paper describes the V-t characteristics of SF₆ at a gas pressure of 0.5MPa using a steep-front square impulse voltage under a quasi-uniform field gap and presents a quantitative evaluation of the V-t characteristics for a nonstandard lightning impulse voltage. In the case of a square impulse, the V-t characteristics of positive polarity were observed to be almost flat over a long time range from 80ns to 10μs, and rose steeply over a short time range from 80ns down to 20ns. For negative polarity, the V-t characteristics exhibit a gentle rise from 200ns down to 40ns. In the estimation of V-t characteristics, the equal-area criterion parameters were quantitatively estimated using the square impulse. For a nonstandard lightning impulse, we found that the application of equal area criterion with these parameters for the non-oscillating impulse and oscillating impulse of up to 5.3MHz as a model of lightning surge and disconnector switching surge is possible.

キーワード : GIS, SF₆, V-t 特性, 絶縁設計, 方形波インパルス

Keywords : GIS, SF₆, V-t characteristics, insulation design, square impulse

1. まえがき

SF₆ ガスを主絶縁媒体とするガス絶縁開閉装置 (GIS) は機器の小型化, 密閉化により信頼性・安全性・環境調和性に優れ, 我が国の主要変電所の中核機器として広く利用されている。変電所近傍雷撃により発生する雷サージはほとんど減衰することなく GIS に侵入し, 一般に 100ns~20μs の急峻な立上り時間を持ち⁽¹⁾, かつ振動成分を伴う波形となりやすく, 標準雷インパルス⁽²⁾とは大きく異なる。GIS 特有の過電圧として, 雷サージよりもさらに急峻 (立上り時間 : 100ns 以下) ⁽¹⁾で高周波振動を伴う断路器サージもあり, 一般に断路器サージは雷サージに次いで波高値が高い。避雷器は変電所の引込み口に設置される場合が多く, 雷サージのような侵入サージに対して効果があるが, 直接 GIS 内で発生する断路器サージは避雷器を通過しない。従って, 高性能避雷器で雷サージレベルが従来以上に抑制された系統

や雷サージが進入しにくい地中系統では, 断路器サージが最も厳しい過電圧となることがある。GIS の絶縁寸法は雷インパルス耐電圧試験電圧 (LIWV) が主な決定要因となるが, その決定において, V-t 特性に対する標準雷インパルスと雷サージまたは断路器サージとの波形効果の違いを十分考慮する必要がある。現在までのところ, GIS の V-t 特性データに関して, 標準雷インパルスについては十分整備されており⁽³⁾, いくつかの雷サージおよび断路器サージの V-t 特性についても報告されている^{(4)~(9)}。しかし, GIS に対する基準 V-t 曲線は 1μs 以下の短時間領域については明確に求められておらず, 外挿によるものしか示されていない⁽¹⁰⁾。

以上の背景から筆者らは, SF₆ の任意の波形に対する V-t 特性の定量的評価手法の確立を目的として, 絶縁物本来の V-t 特性を評価できる理想的な方形波インパルスを用いた検討を行っている。これまでは, 大気圧 (0.1MPa) の SF₆ 中準平等ギャップにおける短時間領域 V-t 特性および放電進展様相の観測結果, また放電進展速度に基づく V-t 特性の定量的評価手法を報告してきた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。今回は高気圧 (0.5MPa) SF₆ 中準平等ギャップにおける短時間領域 V-t

* (財)電力中央研究所
 〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
 Central Research Institute of Electric Power Industry
 2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

特性を取得した。この結果に基づき、V-t 特性定量的評価手法の一つである等面積則のパラメータの定量化を行い、その適用可能性を評価した。具体的には GIS の雷サージ、断路器サージのモデル波形に等面積則を適用し、実測値との比較を行った。また、一例として等面積則を使用した LIWV 選定についての検討も行ったので、以下に報告する。

2. 実験方法

図 1 に GIS モデル電極として使用した供試ギャップの配置図を示す。供試電極は鏡面仕上げを施したステンレス製で、半球 (ϕ 50mm) - 平板配置 (平坦部 ϕ 400mm) とした。実験タンク内の SF₆ ガス圧力 (p) は 0.5MPa (絶対圧)、ギャップ長 (g) は 20mm、電界利用率 (ξ) は 0.63 である。初期電子の供給法として、 γ 線や紫外線などの照射を行う方法があるが、非照射の場合でも十分な回数の印加を行うことにより V-t 特性の下限値を議論できる。また、5 章で取り扱う他の波形による実測結果との整合性を保つために、本稿で示すデータは全て非照射のものである。印加電圧波形は高電圧側電極の側面に対向して設置した容量分圧センサにより測定した。本装置には低インピーダンス (50 Ω) で終端する高周波帯域専用の容量分圧器と、高インピーダンス (1M Ω) で終端する広帯域型センサの 2 台を設置した。高周波帯域専用型センサは、矩形波パルスに対する応答特性から 4ns の応答時間が得られたが、低インピーダンス終端

図 1 実験配置図

Fig. 1. Experimental setup.

図 2 印加電圧波形

Fig. 2. Applied test voltage generated by “SPARK”⁽¹³⁾.

のため、低周波数電圧に対しては減衰時定数が小さく波高平坦部は測定できない。広帯域型センサは波高平坦部の測定が可能である。高周波帯域専用型センサとの較正を行った結果、立上り時間 20ns 程度の方形波インパルスに対しては、広帯域型センサでも高周波帯域専用型と同等に実測可能であることから、電圧波形の測定には広帯域型センサを使用した。印加電圧波形はデジタルオシロスコープ (Tektronix, TDS784A, サンプルングレート: 4GS/s, アナログ周波数帯域 1GHz) により測定した。

図 2 に実験で使用した方形波インパルス電圧波形を示す。方形波インパルスは急峻方形波インパルス発生装置 “SPARK”⁽¹³⁾により発生し、立上り時間は 20ns、波高平坦部持続時間 10 μ s である。

3. 実験結果

〈3・1〉 V-t 特性 方形波インパルスの V-t 特性を図 3 に示す。同図において、縦軸はスパークオーバ電圧 (V) をギャップ長 (g) と電界利用率 (ξ) で除した最大電界で整理している。また、実験で得られた最低破壊電界 (E_0) レベルを実線で示す。正極性は 20ns、負極性は 40ns の極短時間領域から 10 μ s までの幅広い範囲の V-t 特性を得ることができた。方形波インパルスでは、V-t 特性の下限値は 100ns 以上の長時間側では負極性の方が低く、それよりも短時間側では正極性の方が低いことがわかる。正極性は長時間側から約 80ns までフラットで、それより短時間側に向けて左上がりの特性となる。また、負極性はフラットな領域から左上がりになる変曲点は約 200ns である。

〈3・2〉 ラウエプロットによる放電時間遅れの整理

一定波高値の方形波インパルスを 40~60 回印加して放電時間遅れの分布を調べた。図 4 にラウエプロットで整理したものを示す。方形波インパルスは他のインパルス波形に比べ立上り時間が格段に短い、それでも 20ns 程度を要する。従って、実質的な放電形成時間遅れ (t_f) は、累積確率 100%におけるスパークオーバ時間 ($t_{100\%}$) から波形の立上り時間 (t_0) を差し引いたものとなる。ここで述べる立上り時間とは、電圧印加 (規約原点) から V-t 特性の下限値 (V_0) に達するまでの時間のことを指し、印加電圧値が高くなるほど波形の立上り峻度が大きくなるため、 t_0 は小さくなる。

図 3 方形波インパルスによる V-t 特性の実測結果

Fig. 3. V-t characteristics measured with square impulse.

図4 放電時間遅れのラウエプロット

Fig. 4. Laue plot for discharge time lag.

表1 ラウエプロットにより整理した放電時間遅れ

Table 1. Organized discharge time lags by Laue plot.

Polarity	Applied voltage [kV]	Time to sparkover in cumulative probability 100% (t_{100}) [ns]	t_0 [ns]	t_f [ns]	Equal-area parameter (A_f) [$V \cdot s/cm$]
Positive	620	52	17	35	1.29×10^{-3}
	660	33	13	20	1.09×10^{-3}
	700	26	12	14	0.95×10^{-3}
Negative	500	213	16	197	8.10×10^{-3}
	540	103	15	88	6.31×10^{-3}
	580	101	13	88	8.92×10^{-3}
	620	66	12	54	6.92×10^{-3}
	660	54	12	42	6.59×10^{-3}
	700	43	11	32	5.72×10^{-3}

表1に累積確率100%におけるスパークオーバー時間 (t_{100})、そのときの t_0 および実質的な形成遅れ時間 ($t_f = t_{100} - t_0$) を示す。同表に併記された面積パラメータ (A_f) については<4・2>節において述べる。また、形成遅れ時間 (t_s) はスパークオーバー時間 (t) から同一印加電圧における累積確率100%におけるスパークオーバー時間 (t_{100}) を差し引いたもの ($t_s = t - t_{100}$) と定義する。従って、ラウエプロットの傾きは t_s のばらつきに対応し、傾きの緩やかなものほど t_s のばらつきが大きいことを意味する。

図4および表1より正・負極性ともに、印加電圧を高くするほど t_s のばらつきが小さくなり、 t_f も短くなることがわかる。同電圧レベルの正極性と負極性を比較すると負極性の t_s のばらつきの方が小さい。

4. V-t 特性定量的評価手法 (等面積則)

<4・1> 等面積則の考え方 等面積則は大気中球ギャップの V-t 特性定量的評価を目的に、D.Kind により提案された手法である。印加電圧波形に対し、ある一定の電圧 (通常は最低スパークオーバー電圧) を超える波形部分の電圧-時間積分値 (面積: A_f) が絶縁破壊特性を決定付けるものとし、(1)式で評価される⁽¹⁴⁾。これは、ギャップ間の放電進展速度が過電圧率 ($V - V_0$, 但し V : 印加電圧値, V_0 : 最低破壊電圧値) に比例すると仮定し、放電がギャップ間を横断したときにスパークオーバーが生じるとの解釈に基づいている。

$$\int_{t_0}^{t_0+t_f} \{V(t) - V_0\} dt = A_f [V \cdot s] \dots\dots\dots (1)$$

但し、 V_0 : 十分に長い波形での最低破壊電圧, t_0 : $V(t) = V_0$ となる時間, t_f : t_0 からスパークオーバーを生じるまでの時間 (統計遅れがない場合、放電の形成時間遅れに相当), A_f : ギャップ条件などに依存する定数 (面積パラメータ)

今回は異なる実験系にも適用するために最大電界で整理し、(1)式の電圧の項をギャップ長 (g) と電界利用率 (ξ) で除した次式を用いる。

$$\int_{t_0}^{t_0+t_f} \{E(t) - E_0\} dt = A_f [V/cm \cdot s] \dots\dots\dots (2)$$

また、振動性インパルスにおいて図5に示すように、面積則パラメータの一つである E_0 レベルが印加電圧波形の振動部に交差する場合、 A_f は E_0 レベルを超える各電圧-時間積分値を加算する次式を用いることとする。

$$A_f = \sum_{i=1}^n A_{fi} \dots\dots\dots (3)$$

振動性インパルス (0.96MHz~7.3MHz) を使用し、SF₆ 圧力0.5MPaの不平等電界ギャップにおいて放電進展様相の観測を行った筆者らの報告⁽¹⁵⁾では、電圧の振動に同期した断続的な放電進展と先駆放電電流が観測されている。振動波の各ピークにおいて、どの程度の電界で放電が再進展するのか現時点では不明であるが、少なくとも同周波数帯では電圧の谷間で放電は進展しておらず、今回の検討では E_0 を一定とした。

等面積則では2つの面積則パラメータ (E_0 , A_f) が重要であり、これまでは雷インパルスを使用してパラメータを決定していたが⁽⁴⁾、雷インパルスは電圧立上りが比較的緩やかであるため、スパークオーバー時間に電圧の立上りによる時間遅れを含み、また印加電圧が波高値に到達後、持続電圧が徐々に減少するなど面積則のパラメータの定量化には問題があった。方形波インパルスの場合、立上りが急峻であり、且つ持続電圧が一定であるためこれらの問題を解決できる。以下に、方形波インパルスによる面積則パラメータの定量化手法を述べる。

<4・2> 方形波による等面積則の定量化 前述したとおり、等面積則はギャップ間の放電進展速度が過電圧率に比例すると解釈に基づいている。SF₆ 中の放電進展は、形

図5 振動性インパルスに対する等面積則の考え方
Fig. 5. Schematic diagram of equal-area criterion for oscillating impulse voltage.

態の異なるコロナ，ストリーマ，リーダ等複数の過程を経るが⁽¹¹⁾，方形波インパルスのように波高値が一定である場合，ギャップ長 (g) を形成時間遅れ (t_f) で除した値を平均放電進展速度 (g/t_f) と考えれば，(g/t_f) と過電圧率 ($E-E_0$ ：ここでは (2) 式にならって，電界で整理する) に比例関係が成立する場合に等面積則の根拠が成り立つことになる。使用する最低破壊電界 E_0 としては， $E_{50}-3\sigma$ 値の適用も考えられるが，本論文では実験より求められた値を用い，正極性では $E_0=453\text{ kV/cm}$ ，負極性では $E_0=355\text{ kV/cm}$ を設定した (図 3 参照)。これは等面積則で評価した $V-t$ 曲線と実測値との直接的な比較が可能であり，5 章で述べるとおり等面積則の適用可能性が明かに判断できるためである。今回のような高気圧の SF_6 の場合，絶縁破壊電界は圧力に対し顕著な飽和傾向を示すことが示されており⁽³⁾，理論的最低破壊電界値を直接推定することは難しい。しかし，大気圧の場合の理論的最低破壊電界は，次式で示す SF_6 の実効電離係数の積分値より正確に求めることができる⁽¹⁶⁾。

$$\int_{x=0}^{x_0} (\alpha - \eta) dx = K \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し， α ： SF_6 の電離係数， η ： SF_6 の付着係数，
 x ：最大電界点から接地電極に向かう座標軸， x_0 ：
 $\alpha - \eta = 0$ となる点， K ：電離指数 (=18)⁽¹⁷⁾

(4)式より，本実験配置において大気圧を仮定した場合の理論的最低破壊電界は 96.4 [kV/cm] となる。この値を基準とすると，今回実験値に基づいて設定した最低破壊電界は，負極性 ($E_0=355 \text{ [kV/cm]}$) の場合で圧力比の 0.81 乗，正極性 ($E_0=453 \text{ [kV/cm]}$) の場合で圧力比の 0.96 乗に比例することになる。これは文献値⁽³⁾ (負極性で圧力比の約 0.8 乗，正極性で約 0.95 乗に比例) とほぼ等しく，設定すべき最低破壊電界値として妥当なものであると考えられる。

表 1 の結果に基づき，過電圧率と平均放電進展速度値の関係を整理したものを図 6 に示す。正・負極性ともに放電進展速度が過電圧率に比例しており，ともに等面積則の成立根拠を満たしている。

表 1 に示す面積パラメータ (A_f) は各印加電圧レベルにおける E_0 ， t_0 ， t_f および (2) 式により得られた値である。印加電圧により A_f の値に若干の違いがあることが分かる。ラウエプロットの場合，累積確率 100% において統計的遅れ時間を

図6 平均放電進展速度と過電圧率の関係
Fig. 6. Relation between average velocity of discharge development and overvoltage ratio.

図7 方形波インパルスによる等面積則パラメータの評価結果
Fig. 7. Quantitative evaluation result of equal-area criterion parameters by square impulse voltage.

零とみなすが，ここで検討している数 ns～数 10ns の時間オーダーを取扱う場合，厳密には零とはみなせない。放電形成遅れ時間についても印加電圧によってばらつきがあり，このばらつきは印加電圧が高くなるほど小さくなることが報告されている⁽¹⁸⁾。つまり，印加電圧による A_f の違いは，微小な統計的遅れ時間や放電形成遅れ時間のばらつきに起因するものであり，印加電圧が高いものほどこれらの誤差を含まないと考えられる。従って，今回は両極性とも最も印加電圧の高い 700 kV 印加時の値を使用し，正極性では $A_f=0.95 \times 10^{-3} [\text{V} \cdot \text{s/cm}]$ ，負極性では $A_f=5.72 \times 10^{-3} [\text{V} \cdot \text{s/cm}]$ を設定した。これらのパラメータにより等面積則で評価された $V-t$ 曲線を図 7 に示す。正・負極性ともに，それぞれ単一の面積則パラメータにより，実測された $V-t$ 特性の全領域にわたって下限に沿う良好な適用結果が得られた。従って，面積則の適用が可能であり，使用したパラメータが適当であることがわかる。

5. 非標準波形に対する等面積則の適用

等面積則の適用可能性を評価するために，方形波により定量化された等面積則を種々の非標準波形に適用する。具体的には雷インパルス (負極性)，吉田氏ら⁽⁴⁾ による 3 種類

の雷サージ模擬波形（正・負極性）および、湯浅氏ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾の 2 種類の断路器サージ模擬波形（負極性）に等面積則を適用し、実測された V-t 特性との比較する。実測された V-t 特性は、 γ 線および紫外線の照射のない球（または半球）－平板電極、ギャップ長 $g=1\sim 2\text{cm}$ 、電界利用率 $\xi=0.6\sim 0.92$ の準平等電界下で得られたデータである。表 2 に実験条件および各波形のパラメータを示す。

等面積則を雷インパルスおよび雷サージ模擬波形に適用した結果を図 8、断路器サージ模擬波形に適用した結果を図 9 に示す。同図の右肩には V-t 特性の実測に用いられた印加波形を併記する。また、機器の絶縁設計において重要となる最低破壊電界値の比較を容易にするため、等面積則により得られた V-t 曲線の最低破壊電界レベルを破線で示す。

表 2 比較対象波形^{(4)~(6)}のパラメータと実験条件

Table 2. Parameters and experimental conditions of comparison waveform ^{(4)~(6)}.

Region of surge	Applied waveform	Waveform parameters			Electrode conditions			Comment	Reference
		Rise time	Wave tail	Frequency	Material	Gap separation (g)	Electric utilization factor (ξ)		
—	Lightning impulse	$1.9\ \mu\text{s}$	$65\ \mu\text{s}$	—	Stainless steel	20mm	0.88	—	—
Lightning surge	Steep-front impulse	740ns	$55.6\ \mu\text{s}$	—	Stainless steel	10mm	0.92	—	(4)
	0.75MHz oscillating impulse	480ns	—	0.75MHz	Stainless steel	10mm	0.92	Single frequency	
	1.45MHz oscillating impulse	280ns	—	1.45MHz	Stainless steel	10mm	0.92	Single frequency	(5)
	4MHz oscillating impulse	100ns	—	4MHz	Aluminum	10mm	0.6	Single frequency	
Disconnector switching surge	5.3+1.2MHz double frequency oscillating impulse	75ns	—	5.3+1.2MHz	Aluminum	10mm	0.6	Double frequency	(6)

図 8 雷インパルスおよび雷サージ模擬波形の適用結果

Fig. 8. Application result of equal-area criterion to waveforms of lightning impulse and model of lightning surge.

図9 断路器サージ模擬波形の適用結果

Fig. 9. Application result of equal-area criterion to waveforms of disconnector switching surge.

等面積則の考え方に基づけば、同じ面積則パラメータを用いる場合の V - t 曲線は、短時間領域は印加電圧の立上りに依存し、長時間側は印加電圧の減衰に依存する。従って、立上りが急峻で電圧の減衰のない方形波インパルスでは、もっとも短いスパークオーバー時間と、長時間領域では最低破壊電圧（面積則パラメータの一つ： E_0 ）を与え、ギャップに対する V - t 特性のもっとも下限を評価することになる。立上りの緩やかな波形や振動波はそれよりも長時間側に評価され（面積パラメータ A_f の確保に時間がかかるため）、電圧の減衰のある波形については V - t 曲線の下限值が高くなる（電圧が V_0 以下まで減衰すると A_f が確保できなくなるため）。このような V - t 特性の印加波形による変化の傾向は、今回の V - t 特性の実測結果、および加藤氏ら⁽⁵⁾の報告と一致する。

6. V - t 特性定量的評価手法の工学的観点

機器の寸法を大きくするとき V - t 特性は全体的に高電圧側にシフトし（絶縁破壊電圧が高くなる）、寸法を小さくするとき V - t 特性は全体的に低電圧側にシフトする（絶縁破壊電圧が低くなる）（図10（a）参照）。機器の最も合理的な寸法とは、雷サージの進入時に絶縁破壊が発生しない最も小さな寸法である。 V - t 特性定量的評価手法により、任意の波形に対する V - t 特性が推定できるとき、図10（a）に示すように、対象となる雷サージの波高値と、推定された対象雷サージ固有の最低破壊電圧値（図中、 $V_{\min<LS>}$ ）が一致する場合に機器は最小寸法となる。これは、 V - t 特性の面から見れば、「最低破壊電圧以下では絶縁破壊が起らないこと」と、雷サージ波形の面から見れば、通常雷サージを解析する場合、使用する雷パラメータや落雷地点などに最も過酷な状況を想定するため、「解析対象となる雷サージを超える過電圧は現実的には発生しない」ということに基づく。従って、 V - t 特性定量的評価手法において工学的な観点から重要となる点は、最低破壊電圧値となる。実際に機器の試験電圧として機器の寸法を決定付けるのは $LIWV$ であり、使用する波形は標準雷インパルスである。すなわち対象となる雷サージと等価な絶縁破壊ストレスを持つ標準雷インパルス電圧値を求めることにより $LIWV$ を決定する

図10 最低破壊電圧値の定量的評価手法の工学的観点

Fig. 10. Technological viewpoint of quantitative estimation method of the minimum sparkover voltage.

ことができる。具体的には、図10（b）に示すように V - t 特性定量的評価手法を用いて、対象となる雷サージ波形と標準雷インパルス波形の最低破壊電圧値を求める。このとき絶縁破壊ストレス的には、標準雷インパルスの最低破壊電圧値（図中 $V_{\min}$ ）と雷サージの $V_{\min<LS>}$ は等しい。従って、対象となる雷サージと標準雷インパルス間の換算係数（ K ）は(5)式より求められる。

$$K = \frac{V_{\min}}{V_{\min<LS>}} \quad \text{.....(5)}$$

対象となる雷サージ波形の波高値が $V_{LS}[V]$ であるとき、これと等価な標準雷インパルス電圧値（ V_{LI} ）は(6)式より求められる。

$$V_{LI} = K \times V_{LS} \dots\dots\dots (6)$$

LIWV を選定する場合、 V_{LI} を超える LIWV のうち、最も小さな値を選べば良い。

7. V-t 特性定量的評価手法を用いた LIWV 選定例

ここでは等面積則を用いた LIWV の選定例を示す。図 11 に 500kV 系統の標準変電所レイアウトにおいて EMTP にて解析された GIS の雷サージ波形を示す⁽¹⁹⁾。最大波高値 $V_{max<LS>}$ は 1404kV である。およそ 1MHz 程度の振動周波数であり、今回の検討より等面積則が適用可能であると判断される。面積則の適用にあたっては最低破壊電圧値の低い負極性の場合で検討することとし、面積則パラメータは、 $E_0=355$ [kV/cm]、 $A_f=5.72 \times 10^{-3}$ [V・s/cm] を使用する。このときの等面積則で評価される標準雷インパルス、および図 11 の雷サージの V-t 曲線を図 12 に示す。これより雷サージと雷インパルスの最低破壊電圧値の換算係数 K は (5) 式より、

$$K = \frac{E_{min}}{E_{min<LS>}} = \frac{360}{413} = 0.87$$

と求められる。従って、最大波高値 $V_{max<LS>}=1404$ kV の雷サージと絶縁破壊に対するストレスが等価な標準雷インパルスは (6) 式より、

$$K \times V_{max<LS>} = 0.87 \times 1404 = 1222 \text{ [kV]}$$

となる。すなわち LIWV は IEC 系列から選定すると 1300kV となる。

図 11 EMTP で解析された雷サージ波形⁽¹¹⁾

Fig. 11. Calculated Lightning surge waveform by EMTP.

図 12 等面積則で評価した標準雷インパルスおよび図 11 の雷サージの V-t 特性

Fig. 12. Evaluated V-t curves of standard lightning impulse and lightning surge (fig.11) by equal-area criterion.

8. まとめ

方形波インパルスを用いてガス圧力 0.5MPa の GIS モデル電極の短時間領域 V-t 特性を実測した。また、その実測結果に基づき等面積則パラメータの定量化を行い、雷インパルス、雷サージ模擬波形、および断路器サージ模擬波形に対して等面積則の適用を行った。主な結果を以下にまとめる。

(1) 方形波インパルス印加時の V-t 特性は、正極性では 20ns、負極性では 40ns の短時間領域から 10μs の長時間領域まで得られた。V-t 特性の下限は正極性では長時間側より 80ns、負極性では 200ns までフラットである。さらに、100ns 以下の短時間側では正極性が下限を与え、長時間側では負極性が下限を与える。すなわち、絶縁破壊の最低電圧は負極性の方が低い。

(2) 方形波インパルスの特徴を生かして、放電時間遅れをラウエプロットにより整理した。同電圧レベルでは正極性に比べ負極性の方が放電時間遅れのばらつきは小さい。正・負極性とも統計的時間遅れのばらつき、および放電形成時間遅れは印加電圧に依存している。

(3) V-t 特性定量的評価手法の検討として、最大電界で整理する等面積則を検討し、方形波インパルスを用いて面積則パラメータの定量化を行った。正極性では $E_0=453$ kV/cm、 $A_f=0.95 \times 10^{-3}$ [V・s/cm]、負極性では $E_0=355$ kV/cm、 $A_f=5.72 \times 10^{-3}$ [V・s/cm] が得られた。

(4) 方形波インパルスを用いて定量化されたパラメータを用いた等面積則により推定される最低破壊電圧値は、少なくとも電界利用率 0.6~0.92 までの準平等電界ギャップにおいて、非振動である雷インパルスから 1MHz 程度の雷サージ、また ~5MHz 程度の二重周波振動性インパルスを含む断路器サージについて正・負極性それぞれ単一のパラメータで良好に評価でき、LIWV の選定手法として有用である。

今後は、本手法を適用できる周波数条件の検討を進めるとともに、ガス圧力について面積則パラメータの拡充を図る。

本研究の実施および取りまとめにあたり、有益なご意見、ご討論を賜った東京大学 河野照哉名誉教授、電力技術研究所 宅間 董研究顧問、横山 茂首席研究員、新藤孝敏上席研究員に厚くお礼申し上げます。また、実験にご協力頂いた東京農工大学大学院工学研究科（現東京電力株式会社）宮下文武氏に謝意を表します。

(平成 16 年 1 月 23 日受付、平成 16 年 9 月 22 日再受付)

文 献

- (1) 電気学会：「内外の絶縁協調技術の現状と今後の方向性」、電気学会技術報告、No.916 (2003)
- (2) STANDARD OF THE JAPANESE ELECTROTECHNICAL COMMITTEE：“STANDARD FOR TEST VOLTAGES”，Denkishoin, JEC0202-1994 (1995) (in Japanese)
電気学会 電気規格調査会標準規格：「インパルス電圧・電流試験一般」，JEC0202-1994，電気書院 (1995)
- (3) 電気学会：「SF₆ ガスの V-t 特性」，電気学会技術報告 (II 部)，No.206 (1986)

- (4) T.Yoshida, H.Fujinami, and T.Kawamoto: "V-t Characteristics of SF₆ Gas for Lightning Surges", *T.IEE Japan*, Vol.116-B, No.10, pp.1232-1239 (1996-10) (in Japanese)
吉田智朗・藤波秀雄・河本 正:「SF₆ガスの雷サージに対する V-t 特性の検討」, 電学論 B, **116**, 10, pp.1232-1239 (1996-10)
- (5) S.Yuasa, K.Kato, T.Kawashima, and S.Okabe: "Insulation Characteristics of GIS for Non-standard Lightning Impulse Waveforms (No.6) - Characteristics for Double Frequency Oscillation Varied Dumping Ratio -", Proc. of the Tenth Annual Conference of Power & Energy Society, *IEE Japan*, No.379 (1999) (in Japanese)
湯浅禎之・加藤敏一・川島 武・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性 (その 6) - 減衰を変えたときの二重周波振動波に対する特性 -」, 平成 11 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.379 (1999)
- (6) K.Kato, S.Yuasa, T.Kawashima, and S.Okabe: "Insulation Characteristics of GIS for Non-standard Lightning Impulse Waveforms (No.7) - Characteristics for Single Frequency Oscillation Varied Frequency and Damping Ratio -", 2000 National Convention Record IEE Japan, No.6-210 (2000) (in Japanese)
加藤敏一・湯浅禎之・川島 武・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性 (その 7) - 一周波数および減衰を変えた場合の単一周波振動波に対する特性 -」, 平成 12 年電気学会全国大会, No.6-210 (2000)
- (7) S.Yuasa, H.Suzuki, and S.Okabe: "Insulation Characteristics of GIS under Non-Standard Lightning Impulse Oscillations - Insulation Characteristics under Single-Frequency Oscillations with Various Conditions -", *T.IEE Japan*, Vol.122-B, No.9, pp.1035-1041 (2002-9) (in Japanese)
湯浅禎之・鈴木浩文・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性 - 単一周波振動波に対する各種条件下 SF₆ギャップの絶縁特性 -」, 電学論 B, **122**, 9, pp.1035-1041 (2002-9)
- (8) S.Yuasa, K.Kato, and S.Okabe: "Insulation Characteristics of GIS under Non-Standard Lightning Impulse Oscillations - Insulation Characteristics under Double-Frequency Oscillations with Various Frequencies and Damping Ratios -", *T.IEE Japan*, Vol.122-B, No.11, pp.1208-1214 (2002-11) (in Japanese)
湯浅禎之・加藤敏一・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性 - 一周波数と減衰を変えた二重周波振動波に対する絶縁特性 -」, 電学論 B, **122**, 11, pp.1208-1214 (2002-11)
- (9) S.Yuasa and S.Okabe: "Insulation Characteristics of GIS under Non-Standard Lightning Impulse Oscillations - Evaluation of Field Overvoltage Waveforms and its Applications -", *T.IEE Japan*, Vol.123-B, No.2, pp.223-229 (2003-2) (in Japanese)
湯浅禎之・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性 - フィールド過電圧波形評価法とその応用 -」, 電学論 B, **123**, 2, pp.223-229 (2003-2)
- (10) Central Research Institute of Electric Power Industry: "Guide to Lightning Protection Design of Power Stations, Substations and Underground Transmission Lines", CRIEPI Report, T40 (1995) (in Japanese)
電力中央研究所:「発電所および地中送電線の耐雷設計ガイドブック」, 電中研 総合報告, T40 (1995)
- (11) 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", *IEEE 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)
- (12) 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 - Based on Optical Observation Result of Negative Polarity Discharge Development Process -", *IEEE Trans. FM*, Vol.123, No.4, pp.329-337 (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 特性定量的化手法の一検討 - 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)
- (13) M.Yashima, H. Goshima, H. Fujinami, Y. Kawakita, K. Tanaka, and E. Oshita: "Development of 1MV Steep-front Rectangular-impulse Voltage Generator and its Performance", CRIEPI Report, T98068 (1999) (in

Japanese)

八島政史・五島久司・藤波秀雄・川北 有・田中和彦・大下英次:「1MV 急峻方形波インパルス電圧発生装置の開発と出力電圧特性」 電中研 研究報告, T98068 (1999)

- (14) D. Kind: "Die Aufbaufläche bei Strossspannungsbeanspruchung technischer Elektrodenanordnungen in Luft", *ETZ-A*, Bd.79, H.3, 1, 2, pp.65-69 (1958)
- (15) M.Yashima, H.Fujinami, and T.Takuma: "Breakdown Characteristics of SF₆ in Non-uniform Fields under Steep-fronted Oscillating Impulse Voltages", Proc. of 10th International Conference on Gas Discharges and their Applications (1992)
- (16) T.Takuma: "Discharge Characteristics of SF₆ gas IV. Theoretical Analysis of Positive Sparkover Voltage in SF₆", CRIEPI Report, 68065 (1969) (in Japanese)
宅間 董:「SF₆ガスの放電特性 その 4 (正極性閃絡電圧の理論的検討)」, 電中研 研究報告, 68065 (1969)
- (17) Pedersen: "Criteria for spark breakdown in sulfur hexafluoride", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-89, No.8, pp.2043-2048 (1970)
- (18) H.Shinkai, H.Goshima, and M.Yashima: "Measurement of Discharge Time Lag under Square Impulse Voltage Application for Quasi-uniform Field Gap in SF₆", Proc. of the Tenth Annual Conference of Power & Energy Society, *IEE Japan*, No.414 (2000) (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方形波インパルス放電時間遅れの測定」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.414 (2000)
- (19) 電気協同研究会絶縁設計合理化委員会:「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, Vol.44, No.3 (1988)

新開 裕行

(正員) 1975 年 3 月 5 日生。1999 年 3 月長岡技術科学大学大学院工学研究科電子機器工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術, パルスパワー応用技術に関する研究に従事。

五島 久司

(正員) 1969 年 9 月 12 日生。1996 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程後期課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術, 雷放電に伴う電磁界現象, 極低温液体の絶縁技術に関する研究に従事。博士 (工学)。

八島 政史

(正員) 1959 年 1 月 24 日生。1983 年 3 月九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術に関する研究に従事。博士 (工学)。1992 年～1993 年カナダ・マニトバ大学客員研究員。1989 年および 1994 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

藤波 秀雄

(正員) 1952 年 12 月 2 日生。1978 年 3 月成蹊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 (財) 電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術, 電力設備の電磁環境に関する研究に従事。博士 (工学)。1989 年～1990 年カナダ・マニトバ大学客員研究員。1989 年, 1994 年および 2001 年電気学会論文賞受賞。IEEE Senior Member。