Insulation Characteristics and its Evaluation Method of N₂ Gas for Non-standard Lightning Impulse Waveforms

Shuhei Kaneko Member (TEPCO)

Shigemitsu Okabe Senior Member (TEPCO)

Keywords: GIS, N₂, non-standard lightning impulse waveform, insulation characteristics, field overvoltage waveform, evaluation method

Until recently, SF₆ gas has widely been used as the best insulating medium in substation equipment. However SF₆ gas was specified to be a greenhouse gas at COP3 in 1997 because of its high global warming potential (GWP), alternative insulation gases to SF₆ have been looked for since long time in the past. Alternatives using the natural gases are considered to be suitable substitute but none of them show better properties for insulation as well as good environmental compatibility. Therefore, it is necessary to rationalize the equipment insulation level and reduce the test voltage of electric power apparatus as low as possible. The actual lightning surge waveform (so-called non-standard impulse waveform) occurring in the actual field is different from the standard lightning impulse waveform (SLI). There are many cases what the actual lightning surge waveform has steeply rising and large decay of overvoltage, and the insulation requirements are not as severe as those of the SLI. In this paper, we focused our research on N₂ gas and investigated the insulation characteristics of N₂ gas for single-frequency oscillatory waveform with various frequencies from 2.7 to 20.0 MHz and damping ratios.

In this investigation, the following results were obtained:

(1) With various frequency and damping ratios, minimum breakdown voltages (V_{min}) were 9 to 20% higher than V_{min} under SLI (LIV_{min}) in N₂. It might be possible to reduce the test voltage of N₂ gas insulation system by evaluating actual lightning surge waveform.

(2) Figure 1 shows the comparison of V-t characteristics under 2.7, 5.3, 20.0 MHz. All of the V_{min} under three different frequency oscillations occurred at the first oscillating wave.

Fig. 1. Comparison of V-t characteristics under 2.7, 5.3, 20.0 MHz single-frequency oscillations

(3) LIV_{min} in N₂ was 31% lower than in SF₆ and V-t characteristics of N₂ under SLI showed steep decline at the time of the wave front.

(4) The waveforms were resolved into elements including pulse, oscillatory and flat part. It was evaluated based on the insulation characteristics for non-standard lightning impulse and the crest value of the waveform that converted into an equivalent SLI was calculated.

(5) The waveform evaluation method was applied to actual surge waveform. Figure 2 is an example and Table 1 shows the results of analyzing and evaluating the waveform. In this case, pulse part is severe than the flat part, and the overall waveform is equivalent to 2401 kV standard lightning impulse waveform. In other words, the crest value was converted into a value that was 8 percent (= 1 - 1/1.09) lower. From the overall cases, the equivalent peak value of the standard lightning impulse waveform is possibly reduced by 9 to 19 percent.

Fig. 2. Analyzed overvoltage waveform in UHV substations

Table 1. Equivalent evaluation of overvoltage waveform to SLI

	Duration time(90%)	Peak voltage	Conversion ratio	Equivalent SLI voltage
Wave crest	0.12μs	2617kV	1.09 (SF ₆ :1.25) (CO ₂ :1.11)	2401kV (SF ₆ :2093kV) (CO ₂ :2358kV)
Wave tail	—	1517kV	0.95 (SF ₆ :0.90)	1597kV

N₂ ガスの非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性と評価法

正 員 金子 周平* 上級会員 岡部 成光*

Insulation Characteristics and its Evaluation Method of N₂ Gas for Non-standard Lightning Impulse Waveforms

Shuhei Kaneko*, Member, Shigemitsu Okabe*, Senior Member

Until recently, SF₆ gas has widely been used as the best insulating medium in substation equipment. However, SF₆ gas was specified to be a greenhouse gas at COP3 in 1997 because of its high global warming potential (GWP), alternative insulation gases to SF₆ have been looked for since long time in the past. Alternatives using the natural gases are considered to be suitable substitute but none of them show better properties for insulation as well as good environmental compatibility. Therefore, it is necessary to rationalize the equipment insulation level and reduce the test voltage of electric power apparatus as low as possible. The actual lightning surge waveform (so-called non-standard lightning impulse waveform) occurring in the actual field is different from the standard lightning impulse waveform (1.2/50 μ s). There are many cases what the actual lightning surge waveform has steeply rising and large decay of overvoltage, and the insulation requirements are not as severe as those of the standard lightning impulse waveform.

In this paper, we focused our research on N₂ gas as SF₆ substitute and investigated the insulation characteristics of N₂ gas for single-frequency oscillatory waveform with various frequencies from 2.7 to 20.0 MHz and damping ratios. From experimental results, it might be possible to reduce the test voltage of N₂ gas insulation by evaluating the crest value of actual lightning surge waveform that was converted into an equivalent standard lightning impulse waveform.

キーワード：GIS, N₂, 非標準雷インパルス, 絶縁特性, フィールド過電圧波形, 評価法

Keywords: GIS, N₂, non-standard lightning impulse waveform, insulation characteristics, field overvoltage waveform, evaluation method

1. まえがき

ガス絶縁開閉装置 (GIS) の絶縁仕様を決定する主要素は雷サージ時間領域の過電圧であり、形式試験及び受入試験で実施される雷インパルス耐電圧試験における印加電圧波形は JEC-0202-1994 (インパルス電圧・電流試験一般)⁽¹⁾ に規定される標準雷インパルス波形 (1.2/50 μ s) が用いられている。一方、実フィールドで発生するサージ波形は機器構成 (母線構成, 避雷器の配置等) により複雑な波形となる。具体的には標準雷インパルス波形に比べ立ち上がりが急峻であるが波形の減衰が大きくなるため、標準雷インパルス波形に比べ波高値に近い電圧の継続時間が短く、結果として実フィールドで発生するサージ波形に対しては耐電圧値が高くなる場合が多い。このような波形を非標準雷インパルス波形と総称し、筆者らはこれまで特に SF₆ ガスギャップにおける非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性につ

き実験的に取得した⁽²⁾。さらにこれらの絶縁特性データから、フィールド過電圧波形の絶縁の厳しさを標準雷インパルス波形のそれに等価換算することで適切な試験電圧値を導き出し、結果として絶縁仕様合理化を可能とする過電圧波形評価法を構築した⁽³⁾。

一方、現在 GIS の主絶縁媒体である SF₆ ガスは CO₂ 比 23900 倍の地球温暖化係数 (GWP) を持ち、1997 年の気候変動枠組条約第三回締約国会議 (COP3) において排出削減対象ガスに指定された。同議定書は 2004 年 11 月ロシア連邦が批准を決定したことを受け、2005 年 2 月 16 日に発効している。このような地球環境問題の観点から、変電開閉設備における SF₆ ガス代替となる環境調和型ガスに関する多くの研究・開発が進められている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。COP3 の排出規制対象とならないガスとしては自然ガスが主となるが、自然ガスの中で絶縁・遮断性能の観点から SF₆ ガスに比肩する絶縁媒体は未だ見出されておらず、絶縁媒体として実機器適用を検討するにあたっては最大限の絶縁合理化が求められる。先行する研究において非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性の取得・検討により、SF₆ ガス、CO₂ ガスにおいて絶縁合理化に関する見通しを得た⁽³⁾⁽⁶⁾。本論文で

* 東京電力 (株)
〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1
Tokyo Electric Power Company
4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

は自然ガスである N₂ ガスに着目し、非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性を実験的に取得することで波形の振動・減衰の影響につき検討を行った。さらに CO₂、SF₆ との比較により N₂ ガスの絶縁特性に関する評価を実施した。

2. 実験回路及び発生波形

〈2・1〉 実験回路および試験方法 図 1 に本研究で用いた実験回路を、図 2 に電極構成を示す。実験では 300 kV 実器相当の単相 GIS 供試器を用いた。供試ギャップはアルミ製の半球棒 (先端 $\phi = 22.5$ mm) 対平板電極 ($\phi = 120$ mm) でギャップ長を 10 mm に設定し、電界利用率 $\eta = 0.60$ 、電極表面粗さは 10 μ m 程度とした。供試ギャップを収めた端部のタンクには N₂ ガスを充填し、それ以外のガス区画には SF₆ ガスを充填している。SF₆ 代替ガスが実機器に適用される場合、高压ガス保安法の適用外となる上限に近いガス圧力で運用されるであろう事を想定し、供試ギャップを収めた端部のガス区画の圧力は 0.70 MPa (絶対圧力) に設定した。

供試器端の電圧は 1 GHz まで対応した容量性分圧器の信号を光変換器 (E/O, O/E 変換) を通して伝送し、デジタルオシロスコープ (周波数帯域 1 GHz, 5 GS/s) にて測定した。供試器端部以外の区画には SF₆ ガスを充填し回路の絶縁を保ち、さらに図 1 中①, ②, ③および④の区画にそれぞれ任意の値の回路素子 (抵抗, インダクタンス, キャパシタ) を配置することで各種振動波形を発生させた。試験では発生波形を供試電極間に印加し、電極間の絶縁破壊特性を取得した。

〈2・2〉 発生波形 実フィールドにおいて発生する雷サージ時間領域の過電圧は高周波振動分を含む急峻な波形であり、また GIS 断路器サージの解析では、最大 9.8 MHz の振動周波が報告されている⁷⁾。これらは SF₆ ガスを用いた GIS における解析結果であるが、SF₆ 代替ガスを絶縁媒体とした GIS でも長さ方向の変化は小さいと考えられるため、同等の振動周波が対象となるものと考えられる。以上を踏まえ、本研究においては 2.7 MHz~20.0 MHz の単一周波減衰振動波形 4 ケースを用い、これに対する絶縁特性を実験的に取得した。また基準となる標準雷インパルス波形に対する絶縁特性も取得した。実験で用いた標準雷インパルス波形の波頭長は約 1.4 μ s、波尾長は約 46 μ s であり JEC-0202-1994 (インパルス電圧・電流試験一般) の規格を満足している。減衰時間 (τ) を振動波形第二波までの上方包絡線から、アース電位に対し波高値の 1/e となる時間と定義すると、本研究における発生波形の τ は 0.19~62.9 μ s の範囲となる。表 1 に単一周波振動減衰波形の試験条件を整理する。

一般に雷サージ時間領域における過電圧に対しては、負極性の方が耐電圧値が低くなるため、標準雷インパルス波形及び非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性の取得においては、負極性を対象とした。ただしグラフは全て正極性表示とした。

図 1 実験回路

Fig. 1. Experimental setup.

図 2 供試電極

Fig. 2. Test electrode.

表 1 試験条件

Table 1. Experimental condition.

Frequency	2.7MHz	5.3MHz	20.0MHz
Damping time t (number of test cases)	62.9 μ s (1)	0.19~3.6 μ s (2)	0.38 μ s (1)

3. 標準雷インパルス波形に対する絶縁特性

図 3 に N₂ の標準雷インパルス波形に対する破壊電圧-時間特性 (V-t 特性⁸⁾) を示す。電圧は破壊までの最大値、時間は電圧の立ち上がりから破壊までの時間である。得られた V-t 特性で最も低い破壊電圧値を最低破壊電圧値 (Vmin) と定義した。標準雷インパルス波形に対する最低破壊電圧値 (LIVmin) は 149.2 kV となった。N₂ における V-t 特性は他のガスと同様に右下がりであり、LIVmin は 2.61 μ s で得られたが、電圧印加後 0.23 μ s においても 156 kV (LIVmin 比 4.6%) で破壊に至っており、波頭領域における V-t 特性の立ち上がりが極めて急峻な特性となった。図 4 に SF₆ ガス及び CO₂ ガスにおける標準雷インパルス波形に対する V-t 特性との比較を示す。N₂ ガス及び CO₂ ガスは前述の通り 0.70 MPa (絶対圧力) で測定したのに対し、SF₆ ガスは実設備の圧力と同等の 0.50 MPa (絶対圧力) で測定した。SF₆ における LIVmin が 217.0 kV、CO₂ における LIVmin

は 120.1 kV であったので、N₂ の標準雷インパルス波形に対する絶縁特性は SF₆ には劣るものの CO₂ よりは高い結果が得られた。この結果を表 2 に整理する。SF₆、CO₂ 及び N₂ とともに LIVmin は標準雷インパルス波形のピーク付近あるいはそれ以降で得られており、それ以降は V-t 特性も

図 3 標準雷インパルス波形に対する V-t 特性
Fig. 3. V-t characteristics under standard lightning impulse waveform.

図 4 標準雷インパルス波形に対する V-t 特性比較
Fig. 4. Comparison of V-t Characteristics under standard lightning impulse waveform in SF₆, CO₂ and N₂.

表 2 各種ガスにおける LIVmin 比較

Table 2. Comparison of LIVmin in SF₆, CO₂ and N₂.

Gas	SF ₆	CO ₂	N ₂
LIVmin	217.0kV	120.1kV	149.2kV
Time to LIVmin	2.10μs	1.34μs	2.61μs

表 3 電圧印加後 0.7 μs における Vmin 比較

Table 3. Comparison of Vmin at 0.7 μs from impulse voltage application.

Gas	SF ₆	CO ₂	N ₂
Vmin(0.7μs)	283.0kV	130.0kV	156.5kV
Vmin(0.7μs)/LIVmin	1.30	1.08	1.05

フラットとなる。波頭部分において V-t 特性の立ち上がりが急峻、即ち電圧印加から破壊電圧値が最低破壊電圧値よりも高くなるまでの時間は N₂、CO₂、SF₆ の順に短い。波頭領域の特性を比較する為、波頭長の半分である 0.7 μs における最低破壊電圧 (Vmin(0.7 μs)) を比較すると (表 3), SF₆ では LIVmin に比べ 30% 高くなるのに対し、CO₂ では 8%, N₂ では 5% の上昇に留まっている。過去の検討において CO₂ が定性的にはあるが SF₆ に比べ放電形成に要する時間が短いことを考察したが⁶⁾、N₂ は CO₂ よりもさらに短いことが以上から考察される。

4. 非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性

前述のように、フィールドで発生する過電圧波形には標準雷インパルス波形と異なる要素が含まれることが考えられる。具体的には波頭領域においてパルス、高周波振動といった要素が含まれる場合があり、波尾領域では避雷器の保護レベルによるフラット部を有することが考えられる。波尾領域のフラット部については別途検討を行う必要があるが、波頭領域の特徴に関しては高周波単一振動波形を対象とし、振動周波数及び減衰のパラメータを変化させることで、非標準雷インパルス波形の代表として検討を行った。

〈4・1〉 振動減衰の影響 図 5 に代表として 5.3 MHz の単一周波振動波形の、減衰時間 $\tau = 5.0 \mu s$ 及び $\tau = 1.0 \mu s$ における V-t 特性を比較示す。V-t 特性は右下がりであり、標準雷インパルス波形と同様に最低破壊電圧値 (Vmin) 以降は飽和する特性を示している。両者ともに Vmin は振動の第一波波高付近で得られており、それぞれ 165.4 kV ($\tau = 5.0 \mu s$), 170.6 kV ($\tau = 1.0 \mu s$) であった。5.3 MHz では振動の第一波で Vmin に至るため、減衰が大きくなることによる Vmin 値上昇への影響はほとんど見られない。図 5 の二波形における Vmin の差は 3.1% である。

〈4・2〉 振動周波数の影響 図 6 に振動周波数 2.7 MHz, 5.3 MHz, 20.0 MHz それぞれの実験条件で得られた最大の τ (2.7 MHz : $\tau = 62.9 \mu s$, 5.3 MHz : $\tau = 3.6 \mu s$,

図 5 $\tau = 5.0 \mu s$, $1.0 \mu s$ における 5.3 MHz 振動波形に対する絶縁特性

Fig. 5. Insulation characteristics under 5.3 MHz oscillations with $\tau = 5.0 \mu s$ and $1.0 \mu s$.

20.0 MHz : $\tau = 0.38 \mu\text{s}$) における V-t 特性を比較し示す。全条件において Vmin は振動の第一波高付近で得られており、最も振動周波数の高い 20.0 MHz の条件においても振動の第二波以降が Vmin に及ぼす影響は見られなかった。また全ての振動周波数において、振動の第二波以降で破壊に至る場合においても大半は波高値付近における破壊であり、波高付近以外で破壊する例は極めて稀な事象であった。また 20.0 MHz の高周波振動波においても振動の谷間の底部で破壊に至る例は見られていない。以上からも N₂ の放電形成に要する時間が極めて短いことが推察出来る。

〈4・3〉 減衰時間の影響 筆者らはこれまで各々の振動周波数に対し、減衰時間 τ と Vmin との関係から後段の振動波の影響に関し検討を行ってきた。図 7 に減衰時間 τ と Vmin との関係を N₂, SF₆, CO₂ とで比較し示す。図 7 の縦軸は Vmin を LIVmin で除することで規格化し、N₂, SF₆, CO₂ との比較を可能としている。図 7 の横軸は各条件における減衰時間を対数表記で示しており、グラフの右ほど減衰が大きい領域となる。Vmin が振動の第二波以降で得られる場合、減衰時間 τ が小さくなると後段の振動波の波高値が低下するため、結果として Vmin/LIVmin が上昇し、最終的には

図 6 2.7 MHz, 5.3 MHz, 20.0 MHz における V-t 特性比較

Fig. 6. Comparison of V-t characteristics under 2.7, 5.3, 20.0 MHz.

図 7 減衰時間 τ と Vmin/LIVmin の関係

Fig. 7. Vmin/LIVmin as a function of damping time τ .

第一波における Vmin/LIVmin (Vmin[1] と定義) へと近づく。SF₆, CO₂ においては、 τ の低下による Vmin/LIVmin の上昇傾向が明確に現れており、その傾向は振動の第二波、第三波とより後段の振動波で Vmin となる高周波振動波において顕著であった。しかし N₂ では 20.0 MHz の振動周波においても第一波で Vmin に至るため、このような傾向は見られない。比較すると、この特性は SF₆ の場合における 1.3 MHz 以下の領域に相当すると考えられる。即ち N₂ は SF₆ における特性をより右側にシフトした特性であると考えられ、N₂ において Vmin の上昇傾向が得られるのは、さらに小さい τ が有効となる極めて高い高周波振動波が印加された場合であると考察される。

5. 標準雷インパルス波形への換算特性の検討

〈5・1〉 継続時間の導入 ガス中における絶縁破壊の生じる時間については、放電の形成に要する形成時間遅れと放電の発生確率に起因する統計的時間遅れとの和で評価出来る。SF₆ ガス及び CO₂ ガスの振動性過電圧波形に対する絶縁特性の評価においては、継続時間 (td) というパラメータを導入し検討を行ってきた。これは油中絶縁などの時間遅れが比較的大きい場合の特性に適用されているパラメータであり⁹⁾、ガス中においても、MHz オーダーの振動波形では弱点の存在確率を含めた統計的時間遅れを考慮して継続時間の概念を適用した。N₂ ガスについても同様に継続時間の概念を適用することで、非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性の標準雷インパルス波形におけるそれとの比較をもとにした評価を可能とした。

継続時間とは対象波形において、ある電圧レベル以上の電圧が印加されている時間の総和と定義する。図 8 に継続時間の算出方法を示す。同図の場合は、電圧をピーク値で規格化した上で閾値 (Vth) を設定し、それ以上の電圧が印加されている時間を算出する (図 8 中 td1, td2)。これを総和した値がこの波形の Vth レベルにおける継続時間 td となる。ある閾値以上の電圧が印加されている時間を各波に応じて td1, td2, ..., tdn とすると td は (1) 式のように示される。

図 8 継続時間の算出方法

Fig. 8. Calculating duration method.

$$td = td1 + td2 + \dots + tdn \quad (n \text{ は波数}) \dots\dots\dots (1)$$

td の算出による評価手法は、絶縁破壊の時間遅れが有る場合に有効である。これまでの検討において非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性においても絶縁破壊の時間遅れが観測されており、継続時間を用いた評価が有効であると考えられる。

〈5・2〉 継続時間算出レベルの検討 継続時間 td を算出する際の閾値については、Vth = 70%, 80%, 90%, 95%とした場合における td を各々算出し、標準雷インパルス波形換算特性を計算することから標準雷インパルス波形に対する相関性を導き出した。ここで標準雷インパルス波形換算特性とは、対象波形に対する最低破壊電圧 Vmin [kV] の標準雷インパルス波形に対する最低破壊電圧 LIVmin [kV] との比 (Vmin/LIVmin) から閾値分を減じたものを表している。閾値を Vth' [%] とすれば、標準雷インパルス波形換算特性 R' は (2) 式のように表される。

$$R' = Vmin/LIVmin - (Vth'/100) \dots\dots\dots (2)$$

表 4 に各算出レベルにおける相関係数 R² を示し、図 9 に 90% 閾値における検討結果を示す。相関係数は全ての場合において 0.9 を超過しているが、特に継続時間閾値を 80～90% とした場合に高い相関性を示す結果となった。適切なレベルの算出については、〈5・3〉節における実絶縁破壊継続時間と波形継続時間の関係も評価し求めるものとする。

〈5・3〉 実絶縁破壊継続時間と波形継続時間との関係

単一周波振動波印加時における N₂ の V-t プロットはその大半が各振動波の波高付近に集中している。また標準雷インパルス波形における V-t 特性からも N₂ における放電形成

表 4 継続時間閾値と相関係数 R² の関係

Table 4. Relation between threshold for duration and R².

threshold	70%	80%	90%	95%
R ²	0.932	0.981	0.977	0.942

図 9 継続時間閾値と R' の関係

Fig. 9. Relation between duration and R'.

が極めて速いことが確認されている。ここで各々の波形で、振動の第一波での破壊で最低レベルとなるプロットの生じる時間幅 (tBD) を求め、印加電圧波形との関係を検討した。図 10 に例として 5.3 MHz 単一周波振動波形の V-t 特性における算出方法を示す。印加電圧波形の第一波における継続時間が tBD と同じとなる電圧レベルを VtBD とし、第一波のピーク値 (Vpeak) に対する割合 (VtBD/Vpeak) を表 5 に整理する。2.7～20.0 MHz の単一周波振動波における実験より算出した VtBD/Vpeak は 78.8～90.0% の範囲であったが、標準雷インパルス波形では VtBD/Vpeak = 95.0% となり、標準雷インパルス波形を含めた平均値は 87.0% という結果が得られた。

〈5・4〉 td による絶縁評価法の構築 〈5・2〉節および〈5・3〉節における td 算出の閾値に関する検討に加え、N₂

における放電形成に要すると考えられる時間が SF₆, CO₂ よりもさらに短く、即ち絶縁破壊に寄与する継続時間に関しても SF₆, CO₂ より短くなる事が考えられる。SF₆ における継続時間算出レベルが 80%, CO₂ における同レベルが 90%であることを考慮し⁽³⁾⁽⁶⁾, N₂ における継続時間算出レベルは 90%が適切であると考察した。対象のサージ波形は複雑な場合もあり、90%を超過する高い閾値を適用すると継続時間算出の精度が落ちることが考えられる。この点からも継続時間算出レベルとして 90%は適切であると考えら

図 10 絶縁破壊プロット時間幅と電圧レベルの関係

Fig. 10. Relation between time width of breakdown plots and voltage level.

表 5 絶縁破壊継続時間と波形レベルの関係

Table 5. Relation between time width of breakdown and VtBD/Vpeak.

Frequency [MHz]	Damping time τ [μ s]	tBD [μ s]	VtBD/Vpeak [%]
20.0	0.38	0.0085	90.0
5.3	3.6	0.045	82.1
	0.91	0.048	78.8
2.7	62.9	0.064	89.0
Standard LI		2.13	95.0
average			87.0

れる。

図 9 に示す特性図をもとに、(3) 式に示す近似曲線で包括的な取り扱いを可能とした。

$$R = 0.90 + 0.136 \times td^{-0.156} \dots\dots\dots (3)$$

図 9 の各プロットは各波形に対する V_{min} であり、それぞれ 20 回程度の昇降法試験中で得られた最も低い値となっているものである。本研究の条件範囲 (0.7 MPa, 電界利用率 $\eta = 0.6$ 相当, 標準インパルス波形～20.0 MHz の周波数成分を有する波形) においては図 9 に示す特性図及び (3) 式から波形に依存せず、継続時間のみから絶縁特性を評価可能であるという結論を得た。

6. 波尾・フラット部に関する検討

振動減衰により波尾部が低い電圧レベルとなる波形と異なり、図 11 に示すような波尾部が標準的な波形の場合、波尾 (フラット部) の電圧レベルが波形全体の絶縁特性に影響を与えることがある。N₂ においては過去 CO₂ において行った検討同様、標準雷インパルス波形における最低破壊電圧の瞬時値に関する検討、及び SF₆ ガスギャップ・油浸絶縁機器における評価法の検討結果をもとに妥当と考えられる評価法を求めた。

標準雷インパルス波形における V-t 特性では、破壊電圧瞬時値の最低値が波形の立ち上がりより 0.5 μ s～2.6 μ s の範囲において発生していた。〈5・3〉節で検討した通り、標準雷インパルス波形では V_{tBD}/V_{peak} $\cong$ 95%であったことから、フラット部の電圧レベルに関しても、ピーク値に対し 95%以上の部分しか絶縁破壊に寄与しないことが考察される。SF₆ 及び CO₂ の絶縁評価では、フラット部の影響レベルを振動部の実絶縁破壊継続時間算出レベル (V_{tBD}/V_{peak}) よりも高く設定しており、これは油浸絶縁機器の場合でも同様である。N₂ においても V-t 特性から波頭に近い領域において絶縁破壊電圧の最低値が現れており、波尾部の影響は波頭部に比べ少ないものと考えられる。以上から振動部の実絶縁破壊継続時間算出レベルにおいて 90%を妥当とした N₂

図 11 波頭部が急峻で波尾部がフラットとなる波形
Fig. 11. The waveform that the wave crest has a steep pulse-shaped part and the wave tail is flat.

表 6 実験波形における標準波波高値への換算係数

Table 6. Conversion ratios from voltage of experimental waveforms to standard lightning impulse voltage.

Frequency [MHz]	Damping time τ [μ s]	Conversion ratio
20.0	0.38	1.19
5.3	3.6	1.12
	0.91	1.15
2.7	62.9	1.09

においては、フラット部の影響レベルは更に高く、95%とすることが妥当であり、0.95 を適当な換算係数として設定する。

7. 絶縁評価アルゴリズム

5 章で検討した 90%継続時間に基づく絶縁評価法 (3) 式及び 6 章で検討したフラット部の絶縁評価法をもとに、両者を包括的に取り扱った絶縁評価アルゴリズムを図 12 に示す。アルゴリズムではまず評価対象となる過電圧波形を振動部とフラット部に分類し、振動部については (3) 式から標準雷インパルス波形に対する比 K を算出する。フラット部は 6 章における検討の通り K = 0.95 とする。振動部・フラット部各々で等価標準波波高値を算出し、そのうちの最大値がその波形において支配的であると考えられるため、その最大値を絶縁評価電圧値として設定する。表 1 の 4 ケースの波形に対し図 12 のアルゴリズムを適用し、等価標準波波高値への換算係数を算出した結果を表 6 に示す。周波数が高く、 τ が小さいものほど低減の効果は高く、実験波形全体では 8～16%の低減効果が得られた。この結果は CO₂ ガスの場合と極めて近く、SF₆ 代替ガスとして同等の低減効果があるものと評価出来る。

8. フィールド過電圧波形への評価法適用

7 章において N₂ における絶縁評価アルゴリズムを構築したが、この章では評価法を EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) 解析結果から得られた GIS における過電圧解析波形への適用を行う。例示した波形は UHV、500 kV と高压系統のものであるが、変電所外部から侵入する雷サージ波形及び断路器サージといった変電所内部で発生する振動性サージ各々の代表的波形として、評価法適用の対象とした。

〈8・1〉 UHV 変電所雷サージ波形への適用 図 13 は UHV 架空変電所における雷サージの解析波形である。この波形は波頭にパルス部を有するが、波尾部は避雷器の保護レベルによりフラットな形状を示している。図 12 のフローに従い波形評価を行った結果を表 7 に示す。パルス部に関しては、90%継続時間が 0.12 μ s であり、波高値の 2617 kV が 2401 kV へと換算された。この波形ではパルス部の換算値が波尾部よりも厳しく、波形全体の絶縁特性はこのパルス部の換算値に支配される。即ち、N₂ においてはおよそ

図 12 波形評価アルゴリズム
Fig. 12. Waveform evaluation flow.

図 13 UHV 変電所雷サージ解析波形例
Fig. 13. Analyzed overvoltage waveform in UHV substation.

8% ($= 1 - 1/1.09$) 波高値を低減した標準雷インパルス波形と同等であると評価された。表 7 には SF_6 及び CO_2 における換算結果も併せて示してある。全てパルス部の換算値が支配的であり、 SF_6 では 2093 kV (20%低減), CO_2 では 2358 kV (10%低減) の等価標準波高値へと換算され

表 7 過電圧波形の標準雷インパルス波形換算評価 (1)

Table 7. Equivalent evaluation of overvoltage waveform to standard lightning impulse waveform (1).

	Duration time(90%)	Peak voltage	Conversion ratio	Equivalent SLI voltage
Wave crest	0.12μs	2617kV	1.09 (SF_6 :1.25) (CO_2 :1.11)	2401kV (SF_6 :2093kV) (CO_2 :2358kV)
Wave tail	—	1517kV	0.95 (SF_6 :0.90)	1597kV (SF_6 :1686kV)

た。 N_2 では CO_2 よりも若干低い低減効果となることが波形評価結果からも確認出来る。 N_2 及び CO_2 における低減効果は SF_6 の場合のおよそ半分程度である。

〈8・2〉 500kV GIS 変電所雷サージ波形への適用 図 14 に示す波形は 500kV GIS 変電所における雷サージの EMTP 解析波形の例である。波形に存在する振動要素は、変電所における母線回路構成によりサージの往復反射が発生したことによるものである。波高値 (V_{peak}) は 1324 kV であり、波形の第 2 波目に発生している。図 14 の波形に対する評価結果を表 8 に整理する。支配的要素はパルス部分にお

図 14 500 kV 変電所雷サージ解析波形例

Fig. 14. Analyzed overvoltage waveform in 500kV substation.

表 8 過電圧波形の標準雷インパルス波形換算評価 (2)

Table 8. Equivalent evaluation of overvoltage waveform to standard lightning impulse waveform (2).

	Duration time(90%)	Peak voltage	Conversion ratio	Equivalent SLI voltage
Wave crest	0.16μs	1324kV	1.08 (SF ₆ :1.18) (CO ₂ :1.10)	1224kV (SF ₆ :1122kV) (CO ₂ :1206kV)
Wave tail	—	793kV	0.95 (SF ₆ :0.90)	835kV (SF ₆ :881kV)

ける絶縁特性であり、等価標準波波高値は 1224 kV となった。即ち、およそ 8% 波波高値を低減した標準雷インパルス波形と同等であると評価出来る。一方 SF₆ における換算値は 1122 kV (16% 低減)、CO₂ では 1206 kV (9% 低減) であり、各種ガス間の低減効果の比較では UHV 変電所雷サージ波形への適用結果と同じ傾向を示した。

以上、二種類のフィールド過電圧波形への評価法適用結果から、N₂ においても CO₂ の場合に近い低減効果が見込まれることが確認された。

9. ま と め

SF₆ 代替ガスの候補の一つである N₂ ガスを対象とし、2.7~20.0 MHz の単一周波振動波形に対する絶縁特性を実験的に取得し、雷サージ時間領域の過電圧波形に対する絶縁特性について検討を行った。さらに得られたデータをもとに N₂ ガスにおける非標準雷インパルス波形の絶縁診断アルゴリズムを構築した。得られた知見を以下に整理する。

(1) 標準雷インパルス波形に対する V-t 特性を実験的に取得した。N₂ における LIVmin は 149.2 kV であり、SF₆ 比で 68%、CO₂ より高い特性であった。波頭部における V-t 特性の立ち上がりは SF₆、CO₂ よりもさらに急峻であり、電圧印加後 0.7 μs の波頭領域でも LIVmin に比べ 5% の上昇に留まる結果が得られた。

(2) N₂ における 2.7~20.0 MHz 振動波形に対する V-t

特性を取得した。実験で実施した 20.0 MHz 以下全ての振動波形に対し、Vmin は振動の第一波で発生した。振動の第二波以降において破壊する場合も各振動波の波高付近に集中しており、振動の谷間底部における破壊例は見られなかった。

(3) 減衰時間と Vmin との関係から、N₂ における放電は CO₂ よりもさらに短時間で形成されるものと考えられ、振動・減衰の影響を検討するにはさらに高い周波数の振動波形における測定が必要であることが分かった。

(4) SF₆、CO₂ と同様に波形評価のパラメータとして継続時間の評価が有効であることを確認した。継続時間 td と Vmin との間の相関性は極めて高く、その算出レベルとしてはピーク値に対し 90% を妥当とした。この結果、実験波形においては 9~19% の低減効果となる見通しを得た。

(5) UHV 変電所における雷サージ過電圧解析波形及び 500 kV GIS 変電所における過電圧解析波形を例として評価法を適用し、等価標準波波高値への換算を行った。その結果、両波形ともおよそ 8% の低減効果が見込まれる結果が得られた。この換算値は SF₆ の場合の約半分であり、CO₂ に近い低減効果であると評価することが出来る。

(平成 18 年 9 月 21 日受付, 平成 19 年 2 月 16 日再受付)

文 献

- (1) "Impulse Voltage and Current Tests in General", JEC-0202-1994 (in Japanese)
「インパルス電圧・電流試験一般」, 電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-0202 (1994)
- (2) For example, 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)
例えば、湯浅禎之・鈴木浩文・岡部成光:「GIS の非標準雷インパルス振動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 ガスギャップの絶縁特性—」, 電学論 B, **122**, 9, pp.1035-1041 (2002-9)
- (3) S. Okabe and S. Yuasa: "Evaluation Method of Non-Standard Lightning Impulse Waveform for GIS", *IEEE Trans. PE*, Vol.124, No.1, pp.156-161 (2004-1) (in Japanese)
岡部成光・湯浅禎之:「GIS における非標準雷インパルス波形の評価法」, 電学論 B, **124**, 1, pp.156-161 (2004-1)
- (4) H. Goshima, H. Shinkai, and M. Yashima: "Lightning Impulse Breakdown Characteristics of High-pressure N₂ as an Alternative Insulation Gas to SF₆", *Proc. of 9th International Symposium on Gaseous Dielectrics*, pp.359-364 (2004)
- (5) K. Juhre and E. Kynast: "High pressure N₂, N₂/CO₂ and CO₂ gas insulation in comparison to SF₆ in GIS applications", *Proc. of the 14th ISH*, C-01 (2005)
- (6) S. Kaneko, T. Yokoi, and S. Okabe: "Insulation Characteristics of CO₂ Gas for Non-standard Lightning Impulse Oscillations—Evaluation Method of Non-standard Lightning Impulse Waveform for CO₂ Gas Insulation—", *IEEE Trans. PE*, Vol.126, No.7, pp.701-707 (2006-7) (in Japanese)
金子周平・横井哲彦・岡部成光:「CO₂ ガスの非標準雷インパルス振動波形に対する絶縁特性—CO₂ ガスにおける非標準雷インパルス波形の評価法—」, 電学論 B, **126**, 7, pp.701-707 (2006-7)
- (7) S. Okabe, M. Koto, T. Kawashima, K. Kato, and S. Yuasa: "Insulation Characteristics of GIS under Non-standard Lightning Impulse Oscillations—Insulation Characteristics under high frequency oscillations—", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.11, pp.1587-1593 (2001-11) (in Japanese)
岡部成光・向富典典・川島 武・加藤敬一・湯浅禎之:「GIS の非標準雷インパルス振動波形に対する絶縁特性—高周波振動波に対する絶縁特性—」, 電学論 B, **121**, 11, pp.1587-1593 (2001-11)
- (8) 電気学会: 放電ハンドブック, 上巻, pp.275-277 (1998)

-
- (9) S. Okabe, M. Koto, T. Inoue, T. Teranishi, and S. Nagaoka: "Dielectric Characteristics of Oil filled Transformer under Non-standard Lightning Surge Waveforms (Dielectric Characteristics of Oil filled Transformer Insulation Models under Fast Front Short Duration Impulse Voltage)", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.6, pp.775-781 (2001-6) (in Japanese)
岡部成光・向富政典・井上 保・寺西常治・長岡 聡:「非標準雷インパルス波形に対する油入変圧器の絶縁特性 (急峻短波尾インパルス電圧に対する油入変圧器絶縁モデルの絶縁特性)」, 電学論 B, **121**, 6, pp.775-781 (2001-6)

岡 部 成 光 (上級会員) 1986 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。1992 年ミュンヘン工科大学客員研究員。現在, 技術開発研究所高電圧・絶縁技術グループマネージャー。工学博士。IEEE 会員。

金 子 周 平 (正員) 2000 年 3 月慶應義塾大学大学院修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。現在, 技術開発研究所高電圧・絶縁技術グループ。主としてガス絶縁開閉器の絶縁に関する研究に従事。