GIS における非標準雷インパルス波形の評価法

正員 岡部 成光* 正員 湯浅 禎之*

Evaluation Method of Non-Standard Lightning Impulse Waveforms for GIS

Shigemitsu Okabe*, Member, Sadayuki Yuasa*, Member

For rationalizing equipment insulation level which can subsequently lead to reductions in the cost of substation equipment such as GIS's and transformers, it is necessary to reexamine insulating test voltages by investigating the method of evaluating lightning surge waveforms in terms of the equivalent standard lightning impulse waveforms. This paper describes the evaluation method for real surges (called non-standard lightning impulse waveform), based on insulation characteristics of gas gaps. The method is applied to typical surges in the lightning surge time region for various UHV and 500 kV systems and it is obtained that the equivalent peak values of the standard lightning impulse waveform are possibly reduced by 20 to 30 percents.

キーワード：GIS，非標準雷インパルス波形，波形評価法

Keywords: GIS, non-standard lightning impulse waveform, evaluation method of waveform

1. まえがき

酸化亜鉛避雷器の高性能化，過電圧解析法の精緻化，機器絶縁特性データの蓄積，絶縁試験法の向上など最近の技術的背景により，ガス絶縁開閉装置（GIS）では絶縁合理化，試験電圧の低減が国際的にも進められている⁽¹⁾。この中で，機器に加わるサージ過電圧，特に雷サージ領域のサージ波形の評価が，技術的課題の一つとして挙げられる⁽²⁾⁽³⁾。サージ波形に対する絶縁特性については，面積則を用いた検討がされているが⁽⁴⁾，実用的な絶縁評価手法については未だ課題となっている。従って，サージ波形（以下，非標準波形）を試験電圧波形である標準雷インパルス波形（以下，標準波形）へ等価的に換算評価することが重要である。非標準波形は標準波形に比べ急峻ではあるものの，波形の減衰が大きいために標準波形より絶縁的に厳しくないのが一般的である。このため，非標準波形と標準波形を定量的に比較評価することにより，絶縁仕様の低減が期待できる⁽⁵⁾。

以上のような背景により，本研究では非標準波形の特徴を分類して，GISの構成要素であるガスギャップとスペーサ沿面における絶縁特性を取得してきた⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾。本論文では，それらの絶縁特性に基づき，非標準波形を標準波形に等価的に換算評価する手法を検討する。

2. 非標準波形の分類

GISに発生する雷サージ領域の非標準波形について，EMTP(Electro-Magnetic Transients Program)⁽¹²⁾による解析結果を分析し，以下のような特徴的な波形が抽出された。

(1) 波頭に突出した急峻部を有し，波尾部はフラットな波形で，本論文ではB波形と称することにする。これは，最初にパルス的な高い電圧が変電所に侵入し，その後は避雷器の保護レベルに落ち着く現象であり，普遍的に発生する波形である。

(2) 第1波がピークとなる減衰振動波形をC波形とする。これは，変電所が直列/並列の共振点を有し，特に入口ブッシングと末端開放点との間の振動が支配的となることが考えられ，これも一般的な波形である。

(3) 第1波でなく第2波以降でピークとなって減衰振動する波形をD波形と称することにする。これは，ブッシングと変電所外部の送電線逆フラッシュオーバー点との間の往復反射による後追いの侵入サージなどの重畳などによるもので，C波形の派生形である。

(4) 低周波成分と高周波成分が重畳した減衰振動波形をE波形と称する。これは，変電所において，母線などの比較的長い経路と分岐点区間などの短い経路でのサージの往復反射が重畳したものであり，500 kV系のような広がり大きな変電所では一般的である。

(5) 非標準波形の基本要素となっている単発パルス波形をA波形として，別途に扱う。B，C，D，Eの波形を標

* 東京電力（株）技術開発研究所

〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

Engineering R&D Division, Tokyo Electric Power Company

4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

準波と比較しての特徴は、波頭部が急峻で振動的であるということである。この部分の特性を明確にするため、別途扱うこととした。B 波形でフラット部が低い場合や C 波形

で第 2 波以降の減衰が大きい場合は、直接当てはまるものでもある。

以上より抽出した A, B, C, D, E の 5 種類の非標準波形を一例ずつ、図 1 に示す。

3. SF₆ ガスギャップの基礎絶縁特性^{(6)~(11)}

GIS の要素モデルとしては、ガスギャップと絶縁スペーサ沿面が考えられるが、これまでの検討における両者の絶縁特性および設計電界の比較から、本論文の GIS の絶縁評価ではガスギャップを対象とした⁽⁷⁾。

3・1 SF₆ ガスギャップモデル 図 2 に示す供試タンク内に、ステンレス製およびアルミ製半球棒-平板電極系を配置した。電極表面は鏡面仕上げであり、電界利用率 η は 0.45 および 0.60 である。スケール効果の検討も行ったため、表 1 に各スケールでのギャップ構成を示す。なお、ガス圧力は、0.50 MPa abs. (20°C) である。

3・2 試験波形 試験波形は、上述の A, B, C, D, E 波形であり、それぞれの波形パラメータの概略は表 2 の通りである。各波形の発生および試験方法などの詳細は、既報を参照していただきたい^{(6)~(10)}。

3・3 ガスギャップ絶縁特性のまとめ^{(6)~(11)} 各波形に対するガスギャップの絶縁特性を以下にまとめる。

図 1 非標準波形例

Fig. 1. Example of non-standard waveforms.

図 2 ガスギャップ試験時の供試タンク

Fig. 2. Tested tank for gas gap test.

表 1 ギャップ条件

Table 1. Gap conditions.

No.	Gap No.	Diameter of rod electrode	Gap length	η
1	G1	ϕ 15mm	12mm	0.45
2	G2	ϕ 20mm	9mm	0.60
3	G3	ϕ 30mm	25mm	0.45
4	G4	ϕ 40mm	19mm	0.60
5	G5	ϕ 40mm	35mm	0.45
6	G6	ϕ 56mm	27mm	0.60
7	G7	ϕ 50mm	44mm	0.45
8	G8	ϕ 70mm	33mm	0.60

(1) A 波形, B 波形波頭部, C 波形, D 波形, E 波形
G1 ギャップにおける A 波形の V-t 特性, G2 ギャップ
における D 波形の V-t 特性および G2 ギャップにおける E
波形の V-t 特性の例を, それぞれ図 3, 図 4 および図 5 に示
す。図中の V_{min} は各波形に対する V-t 特性における波形
全体の最低破壊電圧であり, $V1_{min}$ および $V2_{min}$ はそれ
ぞれ第 1 波, 第 2 波での最低破壊電圧を示している⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。
また, 図 5 中の τ は, 振動減衰の目安としてピーク値の $1/e$
となる時間を示している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

A 波形 7 ケースおよび標準波形について, ピーク値の
80%以上の電圧が継続している時間で整理すると, 一つの
特性線で表わされる⁽⁷⁾。この 80%のレベルは, 各波形に対
する破壊時間の分布と統計処理の相関係数などから求めた
ものである。なお, この閾値レベルの詳細は, 既報を参照
していただきたい⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

B 波形の波頭部は A 波形そのものであり, C, D, E 波
形に関しては, ピークの 80%以上となる時間の総和で考え
ると, A 波形の特性にほぼ一致した。即ち, A 波形, B 波

形波頭部, C 波形, D 波形, E 波形については, 図 6 に示
すように一つの特性で表される。図 6 の縦軸は, 各波形の
 V_{min} を標準波形での V_{min} (LIV_{min}) の比で表したもの

図 4 G2 ギャップにおける D 波形に対する V-t 特性

Fig. 4. V-t characteristics for G2 gap under waveform D.

図 5 G2 ギャップにおける E 波形に対する V-t 特性

Fig. 5. V-t characteristics for G2 gap under waveform E.

表 2 実験波形のパラメータ

Table 2. Parameters of experimental waveforms.

Waveforms	Range of parameters
A	Tf: 0.20~0.91μs Tt: 0.26~1.84μs
B	Tf: 0.26~0.98μs V2/V1: 0.70~0.90
C	Tf: 0.094~1.2μs V2/V1: 0.75~0.90
D	Tf: 0.25~0.94μs V2/V1: 1.0~1.20
E	Tf: 0.25~0.94μs V2/V1: 0.82~0.96
SLI*	Tf: 1.2μs Tt: 50μs

*SLI: Standard lightning impulse waveform

図 3 G1 ギャップにおける A 波形に対する V-t 特性

Fig. 3. V-t characteristics for G1 gap under waveform A.

図 6 継続時間で整理した $\eta = 0.60$ ギャップの特性

Fig. 6. Characteristics for $\eta = 0.60$ gaps arranged according to duration time.

から 80% 閾値を減じたものを示してある^{(6)~(11)}。また、同図にはステンレス製およびアルミ製電極における特性を共に記してあり、両者の特性についても標準波形に対する比で見ると一致する結果となった。

(2) B 波形後続フラット部 B 波形の後続フラット部では、最低破壊のフラット部電圧が標準波破壊電圧の 90% 程度であった。また標準波の破壊の時間遅れは最大約 $8\mu\text{s}$ であり、その瞬時電圧はピークの約 90% であることから、B 波形の後続フラット部は、0.90 で除すことにより標準波形へ換算可能であると考えられる。

4. 非標準波形評価法のアルゴリズム

3 章の各種非標準波形に対する各種ガスギャップの基礎

絶縁特性の整理結果に基づき、非標準波形の評価法を検討する。

基本的な考え方は次の通りである。

- 最初に非標準波形を振動部分、フラット部分などに分解する。
- 各波形要素を等価的な標準波形のピーク値に換算する係数を求める。
- 各波形要素の標準波形換算値のうち、最大値が支配的であると考えられるため、その最大値を波形全体の等価的な標準波形換算値とする。

以上のアルゴリズムをフロー図にして、図 7 に示す。

図 7 非標準波形評価法のアルゴリズム

Fig. 7. Algorithm for evaluation of non-standard waveform.

5. 評価法の適用例

4章で検討した非標準波形評価法を，UHV 変電所における雷サージと 500 kV ケーブル系変電所における断路器再発弧サージの各一例に適用し，等価的な標準波形波高値を求める。

5・1 UHV 変電所雷サージ波形への適用 図 8 は，UHV 架空変電所⁽¹³⁾における雷サージ解析波形である。この波形は，波頭にパルス部を有し，後続に避雷器保護レベルでフラットな形状となっており，いわゆる B 波形の形状である。

図 7 のフローに従った評価を表 3 に示す。同表より，波頭部の換算値の方が厳しく，波形全体としては，波高値が 2617 kV から 2093 kV へ 0.80 倍 ($= 1/1.25$ 倍) となった。

5・2 再発弧サージ波形への適用 図 9 は，500 kV ケーブル系変電所での再発弧サージ解析波形である。この波形は，低周波成分約 1 MHz，高周波成分約 5 MHz の二重周波振動波となっており，E 波形に相当する。

表 4 は，図 7 のフローに沿った評価結果である。同表において，換算値は 1165 kV であり，ピーク値 1401 kV の 0.83 倍 ($= 1/1.20$ 倍) となった。

5・3 考 察 本論文での評価で対象とした波形では，ケース 1 が波頭部で絶縁レベルが決まり，ケース 2 では低周波成分で見た第 1 波分で絶縁レベルが決まる結果となった。

架空引き込み式の GIS 変電所においては，通常引き込み口に避雷器が設置してある。遮断器開放状態で外部から雷サージが侵入し，一旦避雷器を通過後，遮断器開放端から反射して来たサージが再び避雷器に差しかかり，避雷器制限電圧に抑えられるために，ケース 1 は変圧器などと比べ波頭部と後続フラット部の電圧差が大きくなっている。この場合，評価フローにおいて波頭部が支配的であり，実験的にも検証している⁽⁸⁾。

一方，変電所内部で発生する断路器サージなどの再発弧サージについては，ケース 2 のように振動成分が支配的となっている。この場合は，C，D，E 波形の評価フローに従って絶縁レベルが決定される。

500 kV 以上の GIS を主に対象とした他のケースにおいても図 7 の評価フローを適用し，いずれも 20～30% 程度の低減となった。この結果は，サージ波形を定量的かつ低めに評価でき，GIS の雷インパルス試験電圧 (LIWV) の低減，更には機器コスト低減の可能性を示唆するものである。

なお，本論文の評価法は，各実験波形 (A，B，C，D，E 波形) に対する絶縁特性データに基づいて構築した。従って，評価の際分解した波形要素間の関係 (影響) や物理的メカニズムについて，定量的には立脚していない実験式とも言える。また，実際のサージ波形の評価では，図 7 のフローにおいて，検討者の判断が必要な場合がある。これらに対する検討は今後の課題である。

図 8 雷サージ波形の評価 (ケース 1)

Fig. 8. Evaluation of lightning surge waveform (Case1).

表 3 雷サージ波形の評価 (ケース 1)

Table 3. Evaluation of lightning surge waveform in the GIS of a UHV system (Case1).

Waveform element	80% duration time	Peak voltage	Conversion ratio	Equivalent SLI voltage
B (wave crest)	0.16μs	2617kV	1.25 (1.30)	2093kV [$\eta=0.60$] (2005kV [$\eta=0.45$])
B (wave tail)	—	1517kV (1760kV)*	0.90	1686kV (1956kV)*

* : severest estimation

図 9 再発弧サージ解析波形の評価 (ケース 2)

Fig. 9. Evaluation of re-striking surge waveform (Case2).

表 4 再発弧サージ波形の評価 (ケース 2)

Table 4. Evaluation of re-striking surge waveform in the GIS of a 500 kV system (Case2).

Waveform element	80% duration time	Peak voltage	Conversion ratio	Equivalent SLI voltage
Oscillatory part	0.31μs	1401kV	1.20 (1.24)	1165kV [$\eta=0.60$] (1128kV [$\eta=0.45$])

6. ま と め

本論文では、GIS の絶縁合理化を目的として、機器に加わる雷サージ領域のサージ波形（非標準波形）を機器試験電圧波形である標準雷インパルス波形（標準波形）へ換算する評価法を検討した。その結果、下記項目が得られた。

（１）GIS の絶縁要素として、ガスギャップと絶縁スペーサ沿面を考えたが、絶縁特性および設計電界値の比較からガスギャップを対象とした。非標準波形として、A, B, C, D, E 波形の５種類を想定し、実験で取得した絶縁特性から各波形を統一的に扱うことが可能となった。

（２）前項の結果を基に、非標準波形の評価法を検討した。この評価法は、まず非標準波形を波形要素に分解し、次に等価的な標準波形の波高値に換算し、各換算値の中から最大値を波形全体の等価換算値とするものである。

（３）上記評価法を雷サージ波形と再発弧サージ波形の各一例に適用し、等価的な標準波形波高値を検討した。今回の波形では、波高値がそれぞれ 25% および 20% 低減された。

（４）雷サージ領域の非標準波形は、一般に標準波形より減衰が大きいいため、絶縁的に厳しくない場合が多く、その換算値は低減される。本評価法のように、非標準波形を定量的に評価することにより、絶縁仕様低減の可能性が得られることを示唆した。

今後は、更に多くのケースに適用しながら、今回提案した評価法の精緻化、改良などを行っていく予定である。

（平成 15 年 3 月 19 日受付，平成 15 年 7 月 14 日再受付）

文 献

- （１）W. Schmidt and R. Malewski: Special Report for Group 33: CIGRE Session-2000, No.33-00 (2000-8)
- （２）電気協同研究会：「絶縁設計の合理化」，電気協同研究，Vol.44, No.3 (1988)
- （３）試験電圧の合理化協同研究委員会：「試験電圧と機器に関する諸特性」，電気学会技術報告，No.518 (1994-11)
- （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)
吉田智明・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. Okabe and M. Koto: “Evaluation of Non-standard Lightning Surge Waveforms in GIS”, 10th ISH, No.3117 (1997)
- （６）S. Okabe, M. Koutou, S. Yuasa, T. Suzuki, T. Rokunohe, and T. Yamagiwa: “Analysis of Non-Standard Lightning Impulse Voltage for Actual Substation and Generation Circuit,” *IEEE 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)
- （７）S. Yuasa and S. Okabe: “Breakdown Characteristics in SF₆ Gas under Non-Standard Lightning Impulse Voltage—Insulation Characteristics for Gas Gap and Spacer Surface under Single Pulse Waveforms—”, *IEEE Trans. PE*, Vol.123, No.10, pp.1242-1249 (2003-10) (in Japanese)

湯浅禎之・岡部成光：「非標準雷インパルス波形に対する SF₆ ガス中の絶縁破壊特性—単発パルス波形に対するガスギャップおよびスペーサ沿面の絶縁特性—」，電学論 B, 123, 10, pp.1242-1249 (2003-10)

- （８）S. Yuasa and S. Okabe: “Breakdown Characteristics in SF₆ Gas under Non-Standard Lightning Impulse Voltage—Insulation Characteristics for Gas Gap under Oscillatory Waveforms—”, *IEEE Trans. PE*, Vol.123, No.10, pp.1250-1258 (2003-10) (in Japanese)
湯浅禎之・岡部成光：「非標準雷インパルス波形に対する SF₆ ガス中の絶縁破壊特性—振動成分を含む波形に対するガスギャップの絶縁特性—」，電学論 B, 123, No.10, pp.1250-1258 (2003-10)
- （９）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 Frequencies and Damping Ratios—”, *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.5, pp.652-658 (2002-5) (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振動波形に対する絶縁特性—周波数と減衰を変えた単一周波振動波に対する絶縁特性—」，電学論 B, 122, 5, pp.652-658 (2002-5)
- （１０）S. Yuasa, H. Suzuki, 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・加藤敬一・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—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)
- （１１）S. Yuasa and S. Okabe: “Insulation Characteristics of GIS under Non-Standard Lightning Impulse Oscillations—Evaluation of Field Overvoltage Waveforms and Its Applications—”, *IEEE Trans. PE*, 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振動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適用—」，電学論 B, 123, 2, pp.223-229 (2003-2)
- （１２）日本 EMTP 委員会: Alternative Transient Program Rule Book (1994)
- （１３）T. Watanabe, Y. Yamagata, and E. Zaima: “Insulation Coordination for UHV System”, *CIGRE*, 33-101 (1998)

岡 部 成 光（正員）1986 年 3 月東京大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同 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，技術開発研究所絶縁技術グループ。工学博士。IEEE 会員。

湯 浅 禎 之（正員）1996 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 4 月，東京電力（株）入社。現在，技術開発研究所絶縁技術グループ。主としてガス絶縁開閉器の絶縁に関する研究に従事。