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—

正員 岡部 成光 正員 向當 正典 正員 川島 武
正員 加藤 敬一 正員 湯浅 禎之 (東京電力)

Insulation Characteristics of GIS under Non-standard Lightning Impulse Oscillations -Insulation Characteristics under high frequency oscillations-

Shigemitsu Okabe, Member Masanori Koto, Member Takeshi Kawashima, Member
Keiichi Kato, Member Sadayuki Yuasa, Member (TEPCO)

When GIS insulation specifications are improved, it is necessary to recognize the insulation characteristics under oscillatory overvoltage waveforms occurring in the field. Actual overvoltage waveforms, which have oscillation and steep rising, are different from standard lightning impulse waveform. We call these actual waveforms "non-standard lightning impulse waveforms". In this paper, insulation characteristics under non-standard lightning impulse waveforms which are simulated the actual overvoltage waveforms on GIS were investigated. As the first step, we picked up the important actual overvoltage waveforms for insulation design which are double-frequency oscillatory waveform and single-frequency oscillatory waveform. The experimental circuit was designed for generating simulated waveforms by EMTP analyses. Insulation characteristics under single-frequency oscillatory waveforms and double-frequency oscillatory waveforms, which were generated on the experimental circuit, were investigated. As a result, it was obtained that the insulation characteristics under single-frequency oscillatory waveforms are about 15~24% higher than that of standard lightning impulse waveform and insulation characteristics under double-frequency oscillatory waveforms are about 6~13% higher than that of standard lightning impulse waveform.

キーワード：GIS、非標準雷インパルス、絶縁特性、単一周波振動波、二重周波振動波

Keywords: GIS, non-standard lightning impulse waveform, insulation characteristics, single-frequency oscillatory waveform, double-frequency oscillatory waveform

1. まえがき

昨今、電力機器の一層のコストダウンが要求され、絶縁設計に対してもより裕度の削減が要求されるようになってきた。GIS の合理的な絶縁設計や絶縁信頼性の評価⁽¹⁾には、実際に変電所に発生する過電圧波形に対する評価が重要になってくる^(2,3)。サージ波形は、機器構成(避雷器の配置、母線構造等)等により複雑な波形となり、標準雷インパルス波形(1.2/50 μ s)とは異なり、一般に標準雷インパルス波形よりも急峻で減衰が早いことが多い。このため、サージは、同じ波高値では絶縁的に厳しくなく、これらの波形に対する絶縁特性を把握して、標準雷インパルス波形と比較することにより絶縁仕様の低減が期待できる⁽⁴⁾。標準雷インパルス波形とは異なった振動波などのインパルス波形に対する絶縁特性については、異物を混入した不平等電界条件の報告例が多く⁽⁵⁻⁷⁾、準平等電界下においても報告例があるものの⁽⁸⁾、放電メカニズムの検討に関する内容であり、サージ波形を模擬した波形形状に対する絶縁特性について、機器の絶縁仕様を念頭に置いた具体的なデータが少ないのが現状である。

そこで、サージ波形を模擬した波形を標準雷インパルス波形に対応して非標準雷インパルス波形と呼び、特にケーブル系変電所の GIS を対象とした。ケーブル系変電所では、外部から侵入する雷サージがないため、雷サージ領域の過電圧においては断路器サージの過電圧が重要になってくる。断路器サージは急峻で減衰が大きく振動波であるなど標準雷インパルス波形と異なっているのが一般的であり、今回主に対象とした。

本論文では、第一ステップとして、500kV ケーブル系モデル変電所における GIS 断路器サージ波形の過渡現象解析プログラム(EMTP)解析結果について検討し、波高値が大きく、波形も典型的である単一周波振動波および二重周波振動波を抽出した。これらの波形を模擬した振動波波形を発生させる高電圧回路を EMTP によって設計・構築し、GIS の代表的な電界利用率と同等の準平等 SF₆ ガスギャップにおける、各種振動波に対する絶縁特性を取得した。得られた非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性について、標準雷インパルス波形での特性と比較した。

2. 過電圧波形解析の検討

外雷のないケーブル系変電所では、雷サージ時間領域での過電圧は断路器サージが最も重要になってくる。また、断路器サージ波形は、変電所形態、機器配置、各種開閉器状態などにより複雑に変化する。そこで、モデル変電所に対して EMTP 解析を行い、絶縁特性を取得すべき電圧波形の抽出を行った。

〈2.1〉 解析条件

断路器サージ解析は、500kV ケーブル系ユニット式のモデル変電所の 1 ユニット回路に対し、文献(1)の解析法に準拠して行った。主な解析条件は下記の通りである。

- ・ 断路器再点弧箇所：変圧器 1 次母線側断路器（解析波形 1）、線路側断路器（解析波形 2）、線路母線側断路器など
- ・ 再点弧：集中抵抗および集中インダクタンスで模擬
- ・ 断路器極間電圧：極間電圧が最も厳しい 2pu となるよう、断路器の電源側、負荷側のそれぞれに+1pu、-1pu を印加
- ・ ケーブル：集中抵抗で模擬
- ・ 変圧器：集中静電容量で模擬
- ・ 遮断器：1 点切タイプ
- ・ リアクトル：集中静電容量で模擬
- ・ 計器用変圧器：集中静電容量で模擬

解析では、実運用を考慮しながら、電圧レベル的に厳しくなるよう開放端が多い回路を選択した。

〈2.2〉 解析結果

上記条件にて解析した結果について波形を分析した結果、殆どの波形が単一周波振動波および二重周波振動波（2つの主要な周波数が重畳した振動波）に分類されることが判明した。絶縁設計上重要となる波高値が高く代表的な波形例として、解析波形 1 および解析波形 2 をそれぞれ図 1 (a)、(b)に示す。同図において、解析波形 1 は二重周波振動波、解析波形 2 は単一周波振動波となっている。

〈2.3〉 波形パラメータの分析

抽出した各解析波形について、波形パラメータによりその特徴を整理し、表 1 にまとめた。その結果、以下の特徴が判明した。

- ・ 解析波形 1 は、高周波成分：5.3MHz、低周波成分：0.94MHz の二重周波振動波である。
- ・ 解析波形 2 は、9.8MHz の単一周波振動波である。

全般的に、解析波形は単一周波振動波（2MHz～5MHz）および二重周波振動波（低周波成分：約 1MHz、高周波成分：約 5MHz）で、標準雷インパルス波形より減衰が大きい特徴が得られた。

(a) 解析波形 1（二重周波振動波）

(b) 解析波形 2（単一周波振動波）

図 1 断路器サージの解析波形

Fig.1 Analyzed waveforms of disconnector switching surges

表 1 断路器サージ解析波形の分析

Table1 Analysis of waveforms of disconnector switching surge

	波高値 [pu]	減衰時間 [μs]	特 徴
解析波形 1	2.80	2.9	5.3+0.94MHz の二重周波振動波
解析波形 2	2.09	0.26	9.8MHz の単一周波振動波とみなす

※減衰時間とは、ピークの 1/e の値となる時間

3. 実験回路

〈3.1〉 電圧発生回路の設計・構築

2章にて抽出した過電圧波形を模擬した電圧を発生させるため、EMTP 解析を用いた実験回路の設計を行い、発生電圧レベル、供試電極ギャップ長、回路素子設定、インパルス電圧発生装置 (IG) の設定などを決定した。

図2に得られた実験回路を示す。供試器として、300kV 単相実器相当の GIS を用いた。図2中の①、②、③および④の箇所にそれぞれ各種値の抵抗 (R)、インダクタ (L)、キャパシタ (C) を取り付け、雷サージ領域の所要の波形を発生させている。GIS 端部タンク内に、供試ギャップを設置してある。電圧は 1GHz 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 1GHz、5GS/s) で測定した。測定系全体の周波数応答は 100MHz であり、今回の発生電圧の測定には十分な応答であると考えられる。発生波形の一例を図3に示す。同図において、発生波形は負極性であるが、便宜上正極性表示をしてある。本実験回路にて発生させた波形は、解析条件である+1pu と-1pu のスイッチングと実験波形の 0pu と-1pu のスイッチングの条件が異なるものの、周波数成分で見ると、図1(a)に示す断路器サージ波形とほぼ等しいことがわかる。今回の発生波形では、振動減衰の大きさが図1(a)の波形より小さく、絶縁評価的に断路器サージより厳しめの波形となっている。

〈3.2〉 実験条件

供試電極は、GIS の母線部分で代表的な電界利用率 (平均電界強度/最大電界強度: η) の範囲である $\eta=0.6$ となるように、電界解析などを用いて設計した。また、電極材質、表面粗さおよびガス圧力についても実器の条件を模擬した。通常雷サージの時間領域に対する電圧に対しては、負極性の方が絶縁的に厳しいことから、印加電圧の極性は負極性とした。その他試験方法は JEC の標準雷インパルス試験に準拠している。供試電極の諸元ならびに各試験条件を下記に示し、図4に供試電極の構成を示す。

- ・ 印加電圧波形: 単一周波振動波; 5.3MHz
4.0MHz
2.7MHz
二重周波振動波; 5.2+0.90MHz
5.2+1.2MHz
4.0+0.90MHz
- ・ 印加電圧極性: 負極性
- ・ 供試ギャップ: アルミ製半球棒 ($\phi=22.5\text{mm}$)
— 平板電極 ($\phi=120\text{mm}$)
電界利用率 $\eta=0.60$
表面粗さ: 平均約 $10\mu\text{m}$
- ・ ガス圧 : 0.5MPa (絶対圧力)
- ・ 電圧印加間隔: 4 分間

図2 実験回路

Fig.2 Experimental circuit

図3 発生波形の一例 (5.3+0.90MHz の二重周波振動波)

Fig.3 An example of generated waveform (5.3+0.90MHz)

図4 供試電極

Fig.4 Test electrode

4. 非標準雷インパルス波形に対する絶縁特性

上記実験条件にて、単一周波振動波および二重周波振動波の各周波数に対する絶縁特性を取得した。それらの下方包絡線の V-t 特性におけるフラット部電圧を V_{min} とした（フラット部に対して 20 回試験を行い、5% 程度の破壊確率であると考えられる）。以下にその結果を示す。

〈4.1〉 単一周波振動波

〔4.1.1〕 実験結果 図5に 5.3MHz における絶縁破壊電圧-時間特性（V-t 特性）を示す。同図以降、V-t 特性図には印加電圧波形を規格化して併記してある。なお、プロット法は、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を示す⁹⁾。4 波目（0.6 μ s 付近）で V_{min} （268kV）となり、それ以前では破壊電圧が上昇していくのがわかる。また、破壊の多くは各波の波高付近で生じているが、1~2 波および 2~3 波では、振動の谷部分で破壊したものもあった。

図6に 4.0MHz における V-t 特性を示す。同図において、4 波目付近で V_{min} （249kV）となり、それ以前では破壊電圧が上昇していく特性が得られた。この V_{min} は標準雷インパルス波の 1.15 倍であった。また、5.3MHz と同様、振動の谷部分で破壊したものがあった。図7に示す 2.7MHz においても同様の特性が得られ、 V_{min} （249kV）は標準雷インパルス波の 1.15 倍であった。

〔4.1.2〕 考察 図8に、各周波数の単一周波振動波に対する V-t 特性の下方包絡線を示す。同図には、比較のために標準雷インパルス波形に対する特性も併記してあるが、それに比べて振動波の特性は急峻な右下がりの特性を示した。1~2 μ s より短い時間領域では振動波の破壊電圧が標準雷インパルス波形より低く、それ以降では標準雷インパルス波形の方が下回り、全体としては標準雷インパルス波形の方が低い結果となった。

以上の実験結果より、今回の実験結果から以下のことが考えられる。

- ・ 振動波における V_{min} が標準雷インパルス波形での V_{min} より 15~24% 高くなっており、換言すると、標準雷インパルス波より絶縁的に厳しくない波形であると考えられる。
- ・ 今回の実験では、波数で減衰を合わせてあり（3 波目でピークの約 90%）、振動の周波数が速くなるほど、 V_{min} となる時間が早くなっており、振動周波数が絶縁特性に影響を与えているものと考えられる。これは、各周波数とも第3~4 波目で V_{min} となり、それ以降では破壊電圧がフラットな特性となっていることから考えられる。
- ・ すべての周波数に対して振動の谷部分でも破壊しており、その破壊電圧は前波での破壊電圧の最小値とほぼ等しいことから、谷部分での破壊は前波の振動成分に

図5 5.3MHz における V-t 特性

Fig.5 V-t characteristics under 5.3MHz single-frequency oscillatory waveform

図6 4.0MHz における V-t 特性

Fig.6 V-t characteristics under 4.0MHz single-frequency oscillatory waveform

図7 2.7MHz における V-t 特性

Fig.7 V-t characteristics under 2.7MHz single-frequency oscillatory waveform

図8 単一周波振動波の V-t 特性

Fig.8 V-t characteristics under single-frequency oscillatory waveforms

よって発生した空間電荷が何らかの影響を与えることによって引き起こされていると考えられる⁽¹⁰⁾。詳細については今後検討していく。

今回の実験波形は、過電圧波形に比べ絶縁的には厳しく、定性的には振動減衰が大きくなると V_{min} は高くなると考えられる。また、実際の変電所で発生する過電圧は、GIS 内をサージが往復伝搬するため、アーク抵抗などにより振動減衰が大きいのことがわかっている⁽¹⁾。今後は解析波形に近い振動減衰の波形に対する絶縁特性を取得していく。

〈4.2〉 二重周波振動波

[4.2.1] 実験結果 図9に、5.2+0.90MHzにおけるV-t特性を示す。同図において、 V_{min} は229kVであり、標準雷インパルス波形の1.06倍であることがわかる。また、低周波成分の第2波の波高値(1.8μs)前後で V_{min} となり、それ以前では、破壊電圧が上昇する特性となった。単一周波振動波と同様、高周波成分の谷部分および低周波成分の谷部分で破壊しているものもあった。図10に示す5.2+1.2MHzについても同様の特性が得られ、 V_{min} (230kV)は標準雷インパルス波形の1.06倍であった。

図11は、4.0+0.90MHzにおけるV-t特性である。 V_{min} は246kVであり、標準雷インパルス波形の1.13倍であった。また、本ケースでは、低周波成分の第1波の波高(0.8μs)付近で V_{min} となる特性となり、3波目以降ではほとんど破壊しない特性となった。

総じて、今回の試験条件では、次の結果が得られた。

- ・各波形とも標準雷インパルス波形に比べて、 V_{min} が6～13%高くなった。
- ・単一周波振動波に比べて V_{min} が低い特性となった。
- ・ V_{min} となる時間が単一周波振動波と比べて遅い特性となった。

図9 5.2+0.90MHz 二重周波振動波の V-t 特性

Fig.9 V-t characteristics under 5.2+0.90MHz double-frequency oscillatory waveform

図10 5.2+1.2MHz 二重周波振動波の V-t 特性

Fig.10 V-t characteristics under 5.2+1.2MHz double-frequency oscillatory waveform

図11 4.0+0.90MHz 二重周波振動波の V-t 特性

Fig.11 V-t characteristics under 4.0+0.90MHz double-frequency oscillatory waveform

【4・2・2】 考 察 上記実験結果より、単一周波振動波と同様、二重周波振動波も標準雷インパルス波より絶縁的に厳しくない波形であるといえる。また、単一周波振動波と比べて V_{min} となる時間が遅くなっており、これは重畳している低周波成分が絶縁特性に影響しているものと考えられる。単一周波振動波と同様、高周波成分の谷部分および低周波成分の谷部分で破壊しているものもあり、これらは前波の振動成分で生じた空間電荷が何らかの影響を与えているものと考えられるが⁽¹⁰⁾、詳細については別途検討する必要がある。一方、単一周波振動波では、周波数が早くなるに従い V_{min} となる時間が早くなったが、二重周波振動波では同様の特性とはならなかった。これは、二重周波振動波の高周波成分と低周波成分の重ね合わせによって上方包絡線の各ピーク値が異なってしまうことによるものと考えられる。

振動波形においても、標準雷インパルス波形での V - t プロット法に従い、印加波形の最大波高値より後ろで破壊した場合は、最大値を破壊電圧とみなしプロットしている。しかしながら、印加した波形が異なるため、破壊した点の電圧（実破壊電圧）をプロットし、従来法と比較した。図 1 2 に $5.2+1.2\text{MHz}$ での比較例を示す。

実破壊電圧は、ばらつきが大きく、谷で破壊した場合などは低い電圧値を示すのに対し、最大値のプロットは、ほぼ一定値となっている。これは、破壊現象として放電の開始は印加波形の最大値でほぼ決まるものの、全路破壊に至るには遅れを生じることを意味していると考えられ、振動波においても従来の V - t プロット法が妥当であることを表している。

図 1 2 二重周波振動波に対する実破壊電圧の V - t 特性
Fig.12 V - t characteristics of actual breakdown voltages under double-frequency oscillatory waveform

今回の実験では、単一周波振動波と同様に、解析波形に比べ振動の減衰が比較的小さい波形に対する特性を取得した。二重周波振動波についてもサージ波形のように振動減衰が大きくなると V_{min} が高くなると考えられ、今後は解析波形に近い振動減衰の波形に対する絶縁特性を取得していく。

5. まとめ

変電所で発生する実過電圧波形に対する絶縁特性を検討した。500kV ケーブル系モデル変電所の GIS に発生する過電圧を対象として、印加電圧波形の選定、実験回路の設計・構築、非標準雷インパルス波に対する絶縁特性の取得を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 変電所で発生する実過電圧波形について EMTP 解析を行い、絶縁特性を取得すべき波形として、低周波成分が約 1MHz、高周波成分が約 5MHz の二重周波振動波および 2~5MHz の単一周波振動波を抽出した。
- (2) EMTP 解析および電界解析を用いて実験回路を設計・構築し、直列にギャップ、R、L および並列に C を挿入することにより、所要の非標準雷インパルス波形を発生させた。
- (3) 5.3MHz、4.0MHz および 2.7MHz の単一周波振動波に対する絶縁特性を取得した結果、 V_{min} は標準雷インパルス波に比べて 15~24%程度高くなることがわかった。また、振動の谷部分で破壊する場合があった。
- (4) $5.2+1.2\text{MHz}$ 、 $5.2+0.90\text{MHz}$ および $4.0+0.90\text{MHz}$ の二重周波振動波に対する絶縁特性を取得し、 V_{min} は標準雷インパルス波に比べて 6~13%程度高くなる結果が得られた。また、単一周波振動波と同様に、振動の谷部分でも破壊した。
- (5) 非標準雷インパルス波形における絶縁特性と標準雷インパルス波形に対する絶縁特性を比較することにより、従来のように過電圧波形のピーク値をそのまま絶縁設計に適用するのではなく、より低減できる可能性を見出した。

今後は、断路器サージ波形をより厳密に模擬するため、減衰の大きさをパラメータとし、周波数範囲を変えた振動波に対する絶縁特性について検討していく。今回の実験条件では、ギャップ長 10mm、ガス圧力 0.5MPa（絶対圧力）であったが、空間電荷が絶縁特性に影響している可能性について、これらのパラメータを変化させて検討し、極性の影響についても極性反転時の特性も含めて今後検討していく。

（平成 13 年 3 月 5 日受付、平成 13 年 7 月 2 日再受付）

参考文献

- (1) 電気協同研究会：電気協同研究第 44 巻第 3 号「絶縁設計の合理化」、昭和 63 年
- (2) 試験電圧の合理化協同研究委員会：電気学会技術報告第 517 号「試験電圧の考え方と過電圧」、1994
- (3) 試験電圧の合理化協同研究委員会：電気学会技術報告第 518 号「試験電圧と機器の絶縁に関する諸特性」、1994
- (4) S. Okabe, M. Koto, "Evaluation of Non-standard Lightning Surge Waveforms in GIS", 10th ISH, No.3117, 1997
- (5) S. Matsumoto, et al., "Breakdown Phenomena of SF₆ Gas under Fast Oscillating Impulse Voltages", GD88, pp.327-329, 1988
- (6) H. Hiesinger, "Statistical Time-Lag in Case of Very Fast Transient Breakdown", 6th ISH, No.32.23, 1989
- (7) K. Meller, A. Stepken, "Leader Formation in SF₆ for Oscillating Impulse Voltages", 6th ISH, No.32.02, 1989
- (8) A. Pigini, et al., "Dielectric Strength of SF₆ Insulation under Very Fast Overvoltages", 4th ISH, No.32.12, 1983
- (9) JEC-0202-1994、「インパルス電圧・電流試験一般」
- (10) S. Okabe, et al., "Insulation Characteristics of GIS for Non-standard Lightning Surge Waveforms", 11th ISH, Vol.3, pp.167-170, 1999

加藤 敬一

(正員) 1985 年 3 月愛知工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程修了。1986 年(株)高岳製作所入社。1998~2000 年東京電力(株)電力技術研究所。現在、品質保証部ガス絶縁機器品質保証グループ。

湯浅 慎之

(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、電力技術研究所雷・絶縁解析グループ。主としてガス絶縁開閉器の絶縁に関する研究に従事。

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、電力技術研究所雷・絶縁解析グループマネージャー。工学博士。IEEE 会員。

向 當 正 典

(正員) 1989 年 3 月金沢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、山梨支店工務部発変電グループ。

川 島 武

(正員) 1993 年 3 月慶応大学大学院理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、千葉支店成田工務所成田総合制御所保修グループ。