550 kV 変電所における過電圧測定 装置の開発と適用

非会員 萬 屋 鶴 夫 (東京電力)

正 員 岡 部 成 光 (東京電力)

正 員 菅 雅 弘 (東 芝)

正 員 舩 沢 弘 一 (東 芝)

非会員 針 生 勇 治 (東 芝)

非会員 野 月 光 行 (東 芝)

Development and Application of Measuring System of Overvoltages in 550 kV Substations

Tsuruo Yorozyua, Non-member, Shigemitsu Okabe, Member (Tokyo Electric Power Company Inc.), Masahiro Kan, Member, Kouichi Masuzawa, Member, Yuji Hariu, Non-member, Mitsuyuki Nozuki, Non-member (Toshiba Corporation)

The automatic measuring system for transient overvoltages was developed and applied to the actual power stations and substations in service. The surge voltage sensor has the frequency bandwidth from 5 Hz to 10 MHz, and can measure all types of transient overvoltages such as the temporary overvoltage, switching surge, lightning surge and disconnector switching surge. This system was installed and now operating at three 550 kV power stations and substations. Up to the present, 176 records were obtained for the first time with high accuracy. They include induced lightning surges, lightning back flashover surges, circuit breaker closing surges and a disconnector restriking surge.

キーワード：雷サージ，開閉サージ，短時間過電圧，光ファイバリンク，デジタル記録

1. ま え が き

絶縁試験レベルの低減は現在大きな関心を集めているテーマであり，電気学会などでこれに関する検討が広く行われている。この背景には，関連分野における技術進歩がある。例えば，高性能酸化亜鉛形避雷器の実用化と適用，EMTP 解析技術の進歩，急しゅん波および長時間領域の交流ストレスに対する $V-t$ 特性，雷撃電流波形と波高値に関する基礎データの蓄積があげられる。特に，EMTP 解析は最近の絶縁協調設計において重要な役割を果たしている。

EMTP 解析技術は，近年，送電線，鉄塔などの回路モデルの改良により解析精度の向上が図られつつあ

る。しかし，これらの解析には数多くの基本的な仮定が必要であり，得られた過電圧値を評価するには実測による裏づけがぜひ必要であるが，そのような現地実測データは非常に少ないのが実状である。

このテーマに関しては，これまでにも数は少ないものの幾つかの研究がある⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。文献(1)，(2)に記述された研究はこの分野におけるパイオニア的な業績の一つである。この研究においては，実際の 138/550 kV 変電所における多くの実測データが得られている。しかし，目的がリレーの動作検証用データの取得であるため，周波数帯域の低いところを対象としている。文献(3)，(4)，(6)では主に変圧器の絶縁に関心が向けられており，ここでもこの用途にとって有

用な多くのデータが得られている。しかし、センサの周波数帯域はそれぞれ、約 50 kHz および 1 MHz であり、近接雷や GIS 断路器開閉による急しゅん波過電圧を測定するには不十分である。文献(5)、(7)では GIS におけるサージ実測を実施している。ただし、センサの周波数帯域下限値が高い(数 kHz)ので商用周波数成分は測定不可能である。また、近年、デジタル記録技術の進歩は目覚ましく、これを利用した高速サージの自動測定の試みが行われている⁽⁸⁾。

従来以上の精度で絶縁協調を検討していくためにはこのような実測データが蓄積されることが望ましい。このようななかで著者らは、運転中の発電所に侵入および発生する過電圧波形の自動測定装置を開発し、3箇所の 550 kV 発電所に設置して現地過電圧波形実測を実施している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。このシステムのセンサ周波数帯域は、5 Hz~10 MHz であるため、短時間過電圧から急しゅん波雷サージ、GIS 断路器開閉サージまでの波形を測定可能であり、絶縁協調に活用できる実測データを得るという目的に十分かなうものである。本論文ではこの測定装置の開発、およびその適用による測定結果の概要について報告する。

2. 測定システム

〈2・1〉 仕様 測定システムの設計においては下記の仕様を設定した。

- (i) 電圧センサの周波数帯域仕様は、5 Hz~10 MHz とした。下限値については商用周波成分を正確に測定するためであり、上限値については GIS 断路器開閉サージを測定するためである。
- (ii) 常時自動測定可能であること。
- (iii) 繰返しサージを測定できること。そのような現象としては、例えば多重雷があり、またあるいは、逆フラッシュオーバーが発生し、遮断器再投入後、共振過電圧の発生といったケースが想定される。

(iv) 繰返しサージ間の関係を明らかにするために波形発生時刻記録機能を付加した。時間分解能は 0.1 秒とした。

(v) 相間の関係、相間サージ、対称成分を解析するために三相一括トリガ機能をもたせた。

〈2・2〉 システム構成 測定システムの全体構成を図 1 に示す。電圧波形は、線路引込み口付近の GIS 絶縁スペーサを利用した容量分圧器により測定している。また避雷器放電電流も避雷器接地線にサージ CT (変流器) を取付けて測定している。過酷な電磁気環境での使用、および長距離の信号伝送(最大約 200m)が必要となるために光ファイバリングを使用した。波形ディジタル化、CPU、O/E 変換器 (Opto-Electrical converter) を収納する測定盤は変電所のリレー室、または発電所構内の測定ハウス内に設置した。測定システムは 3 箇所のサイトに設置されており、保安電話回線を介して東京電力の技術研究所内のホスト CPU とつながっている。ホスト CPU は 1 日に 1 回、サイトで記録された波形データを自動的に転送する。

〈2・3〉 サージ電圧センサ 容量分圧器および E/O 変換器 (Electro-Optical Converter) の構成を図 2 に示す。高電圧導体と絶縁スペーサの埋込み電極間の漂遊静電容量を分圧器の一次側キャパシタンスとして利用している。二次側キャパシタンスは低インダクタンスのバルク形コンデンサの並列接続により構成している。

同様の構成は文献(5)、(7)でも記述があるが、ここでは、分圧された電圧は直接限流抵抗を介して LED (Light Emitting Diode) に印加されているため、周波数帯域下限値が数 kHz となり商用周波成分が測定できない。

これに対して図 2 においては、容量分圧された電圧は更に次段の C-R 分圧器により分圧され、高入力インピーダンスのバッファアンプに入力される。C-R

図 1 システムダイアグラム
Fig. 1. System diagram.

図 2 サージ電圧センサの構成

Fig. 2. Schematic diagram of the surge voltage sensor.

表 1 光リンク仕様

Table 1. Specification of optical fiber link.

方式	振幅変調形
周波数帯域	DC~20 MHz(-3 dB)
周囲温度	-10°C~+50°C
光ファイバ	プラスチッククラッド石英ファイバ(PCF) コア径 250 μm クラッド径 350 μm

分圧器の抵抗値は約 6 MΩ である。バッファアンプは E/O 変換器をドライブし、電圧信号は光信号に変換され、光ファイバケーブルを介して伝送される。この方法により周波数帯域下限値は約 5 Hz まで下げることができる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_2 R_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 5000 \times 10^{-12} \times 6 \times 10^6}$$

$$\approx 5 \text{ (Hz)}$$

表 1 に光リンクの仕様を示す。図 3 は C-R 分圧器から O/E 変換器までの測定システム全体のステップ応答測定結果を示している。応答時間は 30 ns 以下である。これを周波数帯域に換算すると $0.35/30.0 \times 10^{-9} \approx 10 \text{ MHz}$ である。絶縁スパーサによる容量分圧器の周波数帯域については文献(7)に 15 MHz と報告されており、全体として今回開発したサージ電圧センサの周波数帯域上限は約、10 MHz である。

更に絶縁スパーサを含めた測定システム全体の耐雑音性を検証するために、高電圧の模擬断路器サージ試

左オシロ：入力波形
(70 V_p, 1,800 kV_p 相当, 立上り 20 ns)
右オシロ：O/E 変換器出力波形
(約 5 V_p, 30 ns 立上り)

図 3 C-R 分圧器から O/E 変換器までのステップ応答

Fig. 3. Step response from the C-R divider to O/E converter.

図 4 高電圧模擬断路器サージ試験回路

Fig. 4. Test circuit for the simulated high voltage test of a GIS disconnector switching.

左オシロ：立上り 50 ns 以下の抵抗分圧器で測定
右オシロ：O/E 変換器出力波形(約 0.7 V_p)

図 5 高電圧模擬断路器サージ試験結果
Fig. 5. Result of the simulated high voltage test of a GIS disconnector switching.

験を実施した。図 4 に試験装置の構成を示す。インパルス電圧発生器からの電圧は SF₆ ガスギャップを介してサージ電圧センサに印加されるため急しゅんな立上りを有している。気中ギャップは放電遅れのため遅れてフラッシュオーバーし、サージ電圧センサに印加される

電圧は裁断される。

図5は試験の結果得られたオシログラムである。比較に用いた抵抗分圧器の応答時間は50 nsである。この試験により、サージ電圧センサは抵抗分圧器と同等以上の応答特性を有しており、良好な耐雑音性を有していることが確認された。

サージ電圧センサの最大感度は、適用した発電所のLIWVである1,800 kVとした。

〈2・4〉 避雷器放電電流センサ 既設発電所の避雷器接地線を取外さなくてすむように、分割形の高周波サージCTを開発、適用した。コアは高周波フェライトを使用しており、周波数帯域は1 kHz～1 MHz(−3 dB)である。サージCTの出力は同軸ケーブル(1 m以下)経由でE/O変換器に入力し、電圧波形と同様に光ファイバケーブルを介して伝送する。

〈2・5〉 制御・記録系 表2に波形ディジタイザの仕様を示す。このディジタイザは、プレトリガ、メモリー分割、マルチフレーム記録が可能であり、この機能により繰返しサージの測定が可能である。また、広範な周波数帯域の波形を効率よく記録するために、サンプリング周波数をサンプリング時にダイナミックに変えられる。すなわち、トリガ点付近の前後は高速のサンプリング(10～30 ns/ポイント)を使用し、その

表2 波形ディジタイザ仕様
Table 2. Specification of digitizer.

分解能	10ビット
サンプリング周波数	最大100 MS/s (10 ns/ポイント)
メモリー	32 kWords/ch
その他	プレトリガ機能、 サンプリング周波数のサンプリング時 可変機能、 マルチフレーム記録機能

図6 三相一括トリガ系概念図
Fig. 6. Schematic diagram of three-phase triggering system.

後はサンプリング周波数を落とす(約10 μs/ポイント)。トリガ検出は、対象とする過電圧の周波数帯域が広い場合レベルトリガを使用している。トリガレベルは現在、対地最高回路電圧($550 \text{ kV}/\sqrt{3} \times \sqrt{2}$)の1.2倍に設定している。このレベルはホストCPUから変更できる。

図6に三相一括トリガ系の概念図を示す。ディジタイザがトリガ検出時に出力するデジタル信号を利用して、他相にトリガをかける。自相のトリガは自相のO/E変換器出力と他相からのデジタル信号の和により検出している。時刻の記録は、このデジタル信号を検出して時刻を記録する装置を別に設けて、ディジタイザの波形データをCPUに転送する際に併せて転送し、CPUにより両者を編集してディスク上のファイルに保存する。

3. 適用と結果

〈3・1〉 測定システムの設置 これらの測定システムを東京電力管内3箇所の550 kV発電所(新橋名発電所、新しいわき開閉所、柏崎刈羽原子力発電所)に設置して1987年7月より現地過電圧波形を実測中である⁽⁹⁾。図7に測定箇所、図8にサージ電圧センサ設置状況、図9に測定盤の外観を示す。

〈3・2〉 測定結果の概要 これまでに176件の波形データが得られている⁽¹⁰⁾。このデータを極性、波高値、原因別に分類した結果を図10に示す。原因に関しては誘導雷が約90%を占めている。そのほかには、雷による逆フラッシュオーバー、遮断器投入、断路器再点弧サージが得られている。極性に関しては正極性が圧倒的に多い。これは夏の誘導雷サージが大部分を占めているからであると思われる。図10(b)は波

図7 過電圧現地測定箇所
Fig. 7. Location of field measurement.

図 8 サージ電圧センサ設置状況
Fig. 8. External appearance of the installation of surge voltage sensors.

図 9 測定盤の外観
Fig. 9. External appearance of the measuring panels.

図 10 測定結果の分類
Fig. 10. Classification of the obtained records.

高値別の分類であり、900 kV (約 2 pu) を超えたものは誘導雷による 1,009 kV と逆フラッシュオーバーによ

図 11 雷による逆フラッシュオーバー時の波形例
Fig. 11. Waveforms for the lightning back flashover surge.

る 908 kV であった。

図 11 に雷による逆フラッシュオーバー時に得られた波形例を示す。サンプリング周波数を変化させているため、図において時間軸が前半と後半とで異なっている。逆フラッシュオーバーは、測定している電気所より約 30 km の地点において黒相で発生した。サージ伝搬速度は線間波のほうが大地波より速いため、線間波が先に到達し、誘導相は地絡相に対して振幅が約半分で極性が逆になっている。

4. む す び

現地発電所の過電圧波形の自動測定装置を開発し、運転中の 550 kV 発電所で適用した。本論文の成果を要約すると下記のとおりである。

(1) サージ電圧センサは、5 Hz~10 MHz の周波数帯域を有し、30 ns の応答を示した。工場における高電圧模擬断路器サージ試験により良好な耐雑音性能、応答特性を有していることが実証された。このセンサにより短時間過電圧、開閉サージ、雷サージ、断路器サージなどのすべての過電圧が測定可能となった。

(2) CPU、ディジタイザ、モデムホンを使用した自動測定記録系を開発した。

(3) 繰返しサージ波形とその時刻、および三相一括波形記録が可能となった。

(4) 本システムは1987年7月より良好に稼働中であり、現在までに雷による逆フラッシュオーバ、GIS断路器再発弧サージを含む176件のデータが成功裏に得られた。

本研究は1992年3月まで継続し、更に測定データの蓄積を計ると共にEMTP解析との突合せにより理論的検討も行う予定である。本稿では測定装置の開発に主眼をおいて記述したために触れられなかったその他の測定例については別途報告する予定である。

(平成2年11月28日受付)

文 献

- (1) M. D. Perkins, et al.: "Operation of a Long-Term Transient Monitoring System in a 138-kV and 500-kV Substation", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-103**, 2283 (1984)
- (2) M. D. Perkins, et al.: "Summary of Transient Data Obtained from Long-Term Transient Monitoring of a 138-kV and a 500-kV Transmission Line", *ibid.*, **PAS-103**, 2290 (1984)
- (3) J. M. Schneider, et al., "The Rockport Transient Voltage Monitoring System", CIGRE, Paper, 2304 (1988)
- (4) K. H. Lee, et al.: "Rockport Transient Voltage Monitoring System: Analysis and Simulation of Recorded Waveforms", IEEE/PES 1989 Winter Meeting, Paper 89 WM 108-2 PWRD
- (5) 土谷, 他: 「ガス絶縁開閉装置用雷サージ観測装置の開発」, 昭63電気学会全大, No. 1112
- (6) R. Malewski, et al.: "Automatic digital recording of Transients in EHV Substations", Sixth International Symposium on High-Voltage Engineering, New Orleans, 1989, Paper 50. 08.
- (7) H. Murase, et al.: "Measurement of Transient Voltages Induced by Disconnect Switch Operation", *IEEE Trans. Power Apparatus, Syst.*, **PAS-104**, 157 (1985)
- (8) B. A. Lloyd, et al.: "Instrumentation for High-Speed Digital Recording of Switching Surges", *IEEE Trans. Power Delivery*, **4**, 932 (1989)
- (9) 萬屋, 他: 「変電所侵入サージの自動測定」, 平元電気学会全大, No. 1239
- (10) 萬屋, 他: 「550 kV 変電所における過電圧測定(その2)」, 平2同上, No. 1132

萬 屋 鶴 夫 (非会員)

昭和17年10月8日生。36年小松実業高校卒業。同年、東京電力(株)入社。主として変電所設計、技術開発に従事。

岡 部 成 光 (正員)

昭和33年9月18日生。61年東京大学大学院博士課程修了。工学博士。同年東京電力(株)入社。主として絶縁協調の研究に従事。

菅 雅 弘 (正員)

昭和29年10月22日生。54年京都大学大学院修士課程修了。同年、(株)東芝入社。主として、避雷器の開発、設計に従事。IEEE会員。

舩 沢 弘 一 (正員)

昭和28年9月22日生。54年室蘭工科大学大学院修士課程修了。同年、(株)東芝入社。主として避雷器の開発、試験に従事。

針 生 勇 治 (非会員)

昭和34年4月6日生。53年岩川高校卒業。同年、(株)東芝入社。主として避雷器の開発、設計に従事。

野 月 光 行 (非会員)

昭和34年1月5日生。52年十和田工業高校卒業。同年、(株)東芝入社。主として避雷器の開発、試験に従事。