

変電所における変圧器 侵入雷サージの測定

Measurements of Lightning Surge upon Transformer in Substation

吉村 滋 ※1

Shigeru Yoshimura

緒川 貴伸 ※2

Takanobu Ogawa

遠山 鎮雄 ※2

Shizuo Tohyama

The insulation level of power equipment in a substation is determined by the over-voltage caused by lightning surge.

Recently, together with the improvement in performance of zinc oxide lightning arrestors and accuracy of lightning surge transient analysis by EMTP(Electro-Magnetic Transients Program), it has been studied to reduce the insulation level of power equipment.

In response to these circumstances, lightning surge observation device with an oil-immersed potential divider exclusive to the transformer, has been developed, to make up a measurement system which can measure the internal voltage of transformer windings. These test units were installed in Fukuno Substation of Chubu Electric power Co., Inc. to measure the voltage distribution produced when far/near lightning surge, indirect lightning surge and multiple lightning surge come into the transformer. During this testing term, 33 lightning surges were measured. The results of these measurements produced many useful pieces of which will contribute to the study of the behavior and phenomenon of lightning surges, an assesment of compatibility with EMTP analysis and improvement in accuracy of such analysis, and assist the determination of the optimum insulation design of transformer.

1 まえがき

電力機器の絶縁レベルは主として雷サージ過電圧によって決定されるが、近年、酸化亜鉛型避雷器の高性能化による過電圧抑制技術とEMTP (Electro-Magnetic Transients Program)による過渡現象解析技術の向上を背景にして、機器の絶縁レベル低減方策が検討されている。

しかし、EMTP解析に際しては、構成回路の模擬や多数のパラメータにいくつかの仮定条件が存在するとともに、解析結果の妥当性を総合的に評価するための実測データが不足しているのが現状である。

また以前は、百万分の一秒オーダーの短時間に高電圧・大電流が発生する雷サージ現象を正確且つ、確実に測定する装置がなかったが、最近雷サージ観測に適した高性能な電圧・電流センサ、光ファイバリンク(E/O変換器)及び高性能デジタル測定機器が開発され、コンピュー

タの制御による自動観測、自動記録が可能になった。このため、各方面で実系統における自然雷の観測が盛んに行われており、雷発生時の鉄塔塔脚電流、架空地線電流、変電所入口電圧、避雷器放電電流及び空間電荷等の測定結果が多数報告されている。

このような状況のもとで今回、変圧器の合理的な絶縁設計を行うことを目的に、変圧器巻線内部の雷サージ電圧を測定するための巻線形雷サージ観測装置(以下雷サージ観測装置という)を開発し、測定システムを製作した。雷サージ観測装置は、内部電圧測定用の引出し口を

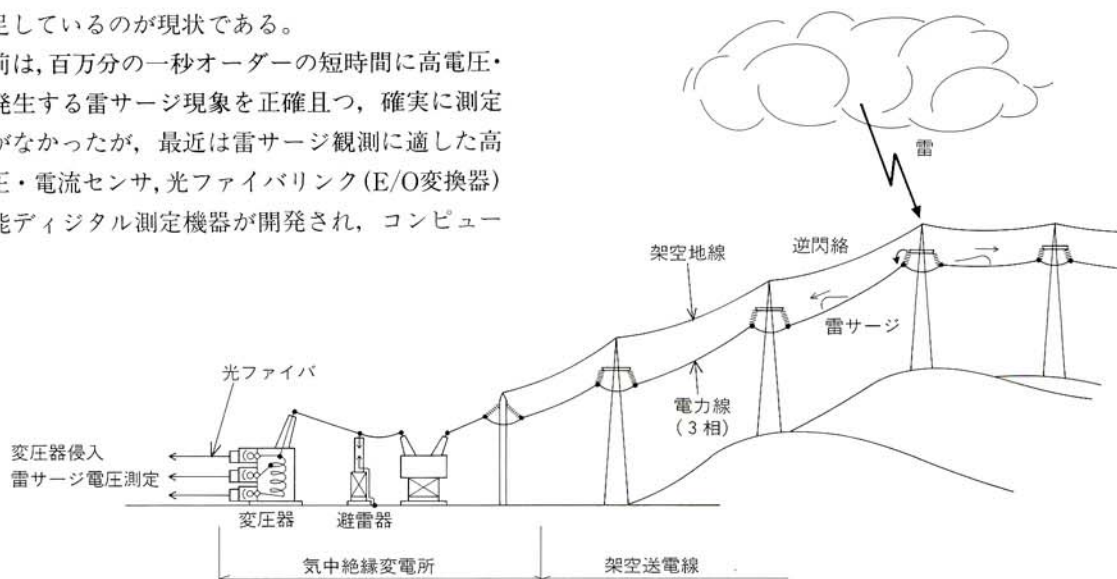


図1/雷サージ観測概念図

Fig. 1/Schematic description of the lightning surge observation

※1 中部電力株式会社 電力技術研究所

愛知電機技報No.12 ※2 変圧器事業部 技術部

備えた変圧器と油中分圧器から成る。この測定装置は、平成2年6月に中部電力㈱福野変電所に設置し、これまでに33波の雷サージを測定している。本論文は、雷サージ観測装置と測定システム、ならびに測定結果の概要について報告する。

2 雷サージ観測の概念

図1に雷サージ観測の概念図を示す。変電所への雷サージの侵入経路としては、

(1) 電力線直撃

架空地線による雷撃しゃへいが失敗し、電力線に直撃する。

(2) 逆閃絡

鉄塔又は架空地線への雷撃電流によって鉄塔の電位が上昇するが、これがアークホーンの絶縁強度を超え

る場合、鉄塔から電力線への逆閃絡となって侵入する。

(3) 誘導雷

上記(2)の雷撃が逆閃絡に至らない場合で、電磁誘導によって電力線にサージ電圧が誘起される。の3つがある。

3 雷サージ観測装置設置箇所

雷サージ観測装置は、中部電力㈱・岐阜支店管内の福野変電所に設置した。福野変電所は岐阜県郡上郡美並村に位置するが、この付近は中部電力管内でも、有数の多襲雷地域である。図2に福野変電所周辺の送電線経過図を示す。

77kVの送電系統は、北岐阜変電所を起点として放射状に構成されており、下牧変電所を介して富之保変電所ならびに福野変電所及び大島変電所等へ送電されている。また、北岐阜変電所から途中までは154kV送電線と同一鉄塔に併架されている。

図3に福野変電所の単線結線図を示す。

福野変電所は、77kV気中絶縁式、2バンク構成であり、雷サージ測定期間中は、1号線(1L)側のLSを切り、常時2号線(2L)から受電している。なお、雷サージ観測装置は、雷観測を目的とするので常時無負荷運転とし、二次側(6750V)にはサージアブソーバ(0.05 μ F \times 3相)を接続している。



図2/福野変電所送電線経過図

Fig. 2/Diagram of electric power system around the Fukuno substation

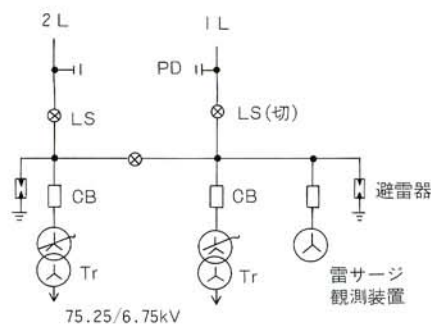


図3/福野変電所単線結線図

Fig. 3/One-line diagram of the Fukuno substation

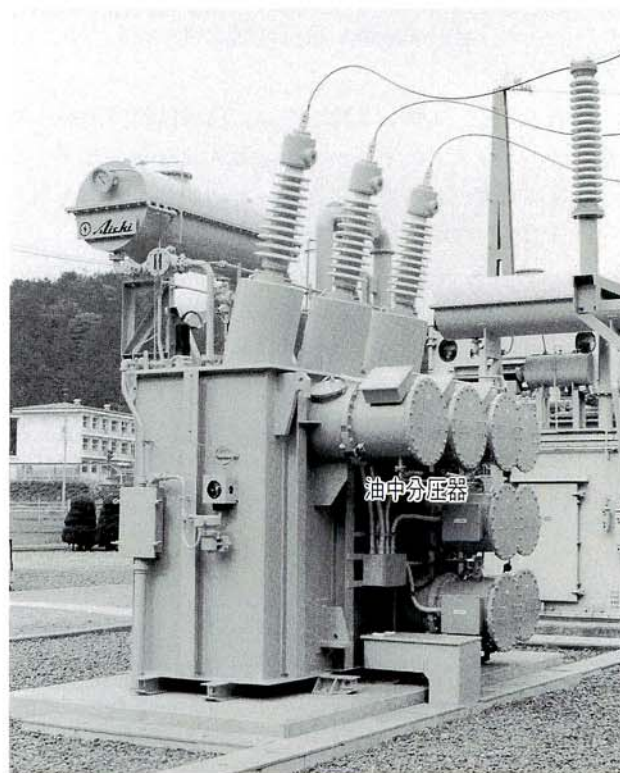


図4/雷サージ観測装置

(3相 60Hz 75250/6750V 10MVA)

Fig. 4/Lightning surge observation device

4 雷サージ観測装置・測定システム

雷サージ観測装置は変圧器と油中分圧器より構成される。

4.1 変圧器

変圧器は、3相 60Hz 10MVA 75.25/6.75kVの中部電力(株)標準仕様の負荷時タップ切換変圧器を使用した。この変圧器の巻線構成は、同軸円筒状に内側より、低圧巻線、高圧巻線、タップ巻線の順に配置され、結線は、星形-星形(Yy0)で安定巻線を内蔵している。なお、中性点は非接地方式である。

図4は雷サージ観測装置の外観写真を、図5は変圧器巻線構成ならびに電圧測定部を示す。電圧測定部は、高圧巻線各相の線路端子の他にU相高圧巻線第2コイル部、U相タップ巻線入口端及び中間部、中性点ならびにV相タップ巻線中間部の8箇所より、本体ケース側面を通して引き出した。表1は、これらの各測定端子の常時対地電位を表す。

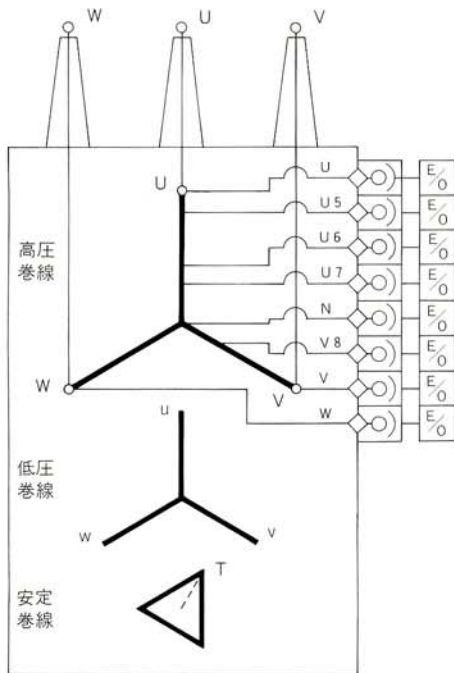


図5/変圧器の巻線構成と電圧測定部

Fig. 5/Structure of coils and measurement points of the voltage on the transformer

表1/各測定端子の常時対地電位

Tab. 1/Normal voltage to the ground of each measurement points

No.	対地電位 (P.U)	備考
U	1.0	高圧巻線端子部U, V, Wを1.0P.Uとし、その巻線比により各巻線測定部の対地電位を表した。
U5	0.975	
U6	0.239	
U7	0.184	
N	0.0	
V	1.0	
V8	0.184	
W	1.0	

4.2 油中分圧器

(1) 雷サージ測定用分圧器の開発目標

雷サージ観測を行うには、小型で高性能な高電圧分圧器を必要とするが、今回の分圧器は、下記の条件を満足することを開発目標とした。

- ① 電圧は、±400kV程度の高電圧まで測定可能とし、高い分圧比(1/40000~1/50000)で正確に測定する。
- ② 急峻な雷サージ電圧に対して十分な応答特性を示し、商用周波数成分(60Hz)も測定可能な広帯域型とする。
- ③ 外部からの変電所ノイズ(磁界、電界)等をしゃ断する構造とする。
- ④ 自然環境(雨、風、温度等)の変化に十分対応する屋外設置型とする。
- ⑤ 耐ノイズ性、絶縁性に優れた光ファイバリンクを使用し、これらとの回路整合が可能なこと。
- ⑥ 供試測定物に対して負荷インピーダンスが、十分に大きい。

これらの条件を満たすよう、種々の検討を重ねた結果、図6のような油中分圧器を開発した。この油中分圧器は、課電極-浮遊電極間静電容量 C_1 と電圧検出静電容量 C_2 により静電容量分圧を行い、さらに次段のR-C(抵抗-静電容量)分圧を組み合わせた方式を採用している。また小型で簡単な構成とし、変圧器本体と分圧器の一体構造を可能とした。耐環境性では、変電所における高磁界、高電界等の悪条件下でも、高精度な高電圧測定が可能であり、風雨等の自然環境に対しても十分耐えることができる。電気的特性に関しては、急峻波サージに対して応答性が優れることは勿論のこと、雷サージ波形が、商用周波数成分のどの位相において、AC重畳したかを判別できるようにした。よってこの油中分圧器の周波数帯域は、商用周波数から数MHzまでの雷サージ周波数にわたる広い範囲において均一

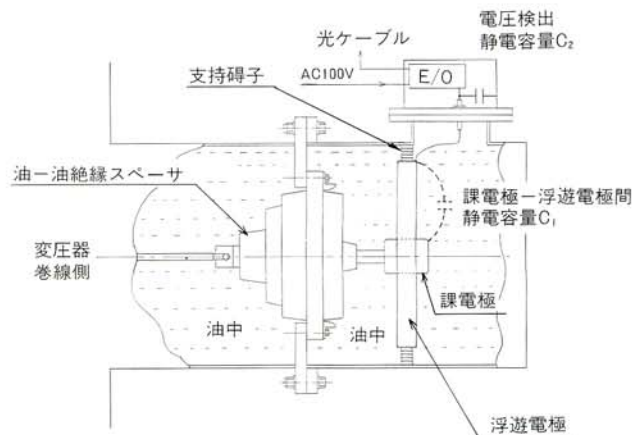


図6/油中分圧器構成

Fig. 6/Structure of the capacitance divider in oil

な分圧比が得られることを特長とする。

(2) 油中分圧器の応答特性

今回必要とする分圧器は、±400kV迄の高電圧雷サージ波形をE/O変換器の入力電圧(最大±10V)まで分圧する高分圧比の回路とし、また商用周波数60Hzを高周波領域と同じ分圧比で測定するためには、一般的に低減カットオフ周波数 f_c を5Hz程度まで下げる必要がある。

図7に示す容量分圧器の低減カットオフ周波数 f_c は、(1)式となる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi R(C_1 + C_2)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\approx \frac{1}{2\pi RC_2} \dots\dots\dots (2)$$

$f_c = 5\text{Hz}$ とするためには、(2)式においてR又は C_2 を大きくしなければならない。しかし C_2 を大容量化することは、コンデンサ固有の残留インダクタンスが大きくなるので、コンデンサ単体の共振周波数は低くなる。よって電圧検出用静電容量として使用することは不適当となる。

これらのことからRを大きくするため、バッファアンプ付のE/O変換器の使用及び静電容量分圧と、R-C分圧を組合せた図8の分圧回路を設計した。

図8の分圧回路における入力(V_{in})と出力(V_{out})の比は、以下の式で算出され、(3)~(10)式をS関数で整理すると(11)式となる。

$$Z_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + j\omega C_4} \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_2' = Z_3 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_3} \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{Z_2'} + j\omega C_2} \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_1 = Z_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_1 = \frac{V_{in}}{Z_1} \dots\dots\dots (7)$$

$$I_2 = \frac{Z_2}{Z_2'} I_1 \dots\dots\dots (8)$$

$$V_{out} = Z_3 I_2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 I_2}{Z_1 I_1} = \frac{Z_3 Z_2}{Z_1 Z_2'} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{S^2 C_1 C_3 + S C_1 r_3}{(C_1 C_3 + C_3 C_4 + C_2 C_4 + C_1 C_4 + C_2 C_3) S^2 + [r_3(C_1 + C_2 + C_4) + r_4(C_1 + C_2 + C_3) + r_5(C_1 + C_2 + C_3)] S + r_3(r_4 + r_5)} \dots\dots\dots (11)$$

ここで

$$r_3 = \frac{1}{R_3}, r_4 = \frac{1}{R_4}, r_5 = \frac{1}{R_5}, S = j\omega$$

分圧器の設計ではカットオフ周波数 $f_c = 5\text{Hz}$ となるような回路のC, R値を決定し、この数値を(11)式に代入すれば図9の分圧器の周波数-利得・位相特性が求められる。この特性計算結果より、本装置で必要とする分圧器の周波数特性は、商用周波数60Hzから高周波まで一様な分圧比(-92.2dB=1/40738)となり、適用できることを確認した。

今回開発した油中分圧器の雷インパルス応答を測定するために、図10の試験回路で標準抵抗分圧器(ハーフェリ製)と特性の比較を行った。図11に試験結果を示す。雷サージ電圧は全波の $0.7 \times 50\mu\text{s}$, 152kVとさい断波 $0.7 \times 30\mu\text{s}$, 204kVを印加した。その結果、波頭部、

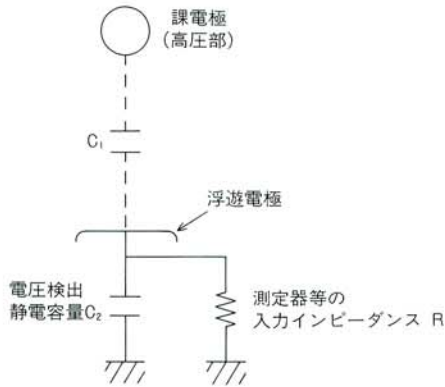
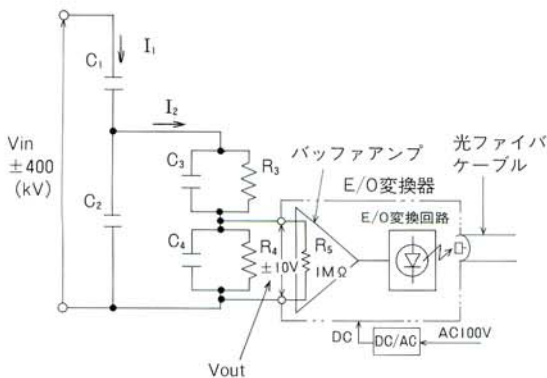


図7/容量分圧器
Fig. 7/The capacitance divider



- C_1 : 課電極-浮遊電極間静電容量(約10pF)
- C_2 : 電圧検出静電容量(5000pF)
- R_3 : 6 M Ω
- R_5 : 1 M Ω (入力インピーダンス)

図8/分圧回路
Fig. 8/Fundamental circuit of the capacitance divider

波尾部の立上り、減衰及び電圧の大きさは両者共一致し、ステップレスポンスは、 $0.18\mu\text{s}$ のステップ波まで十分応答した。これより、この分圧器の周波数帯域上限値は約 2MHz となり、急峻波サージに対しても十分適応できることを確認した。

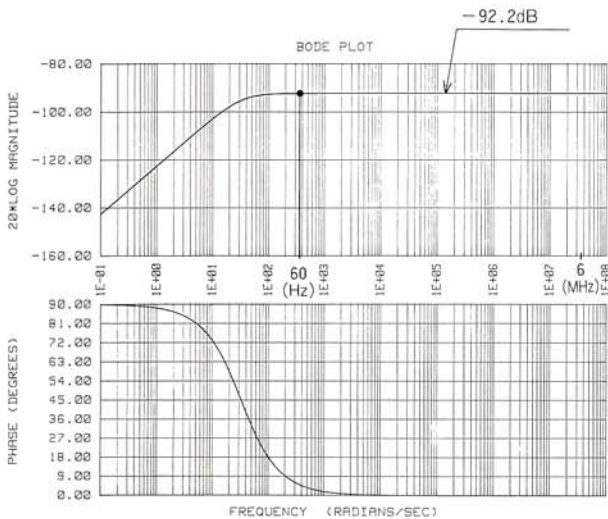


図9/周波数-利得・位相特性 (計算結果)

Fig. 9/Frequency response of gain and phase

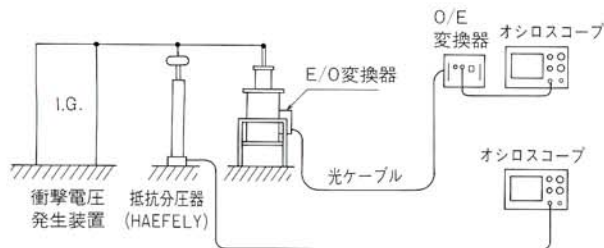


図10/試験回路

Fig. 10/Test circuits

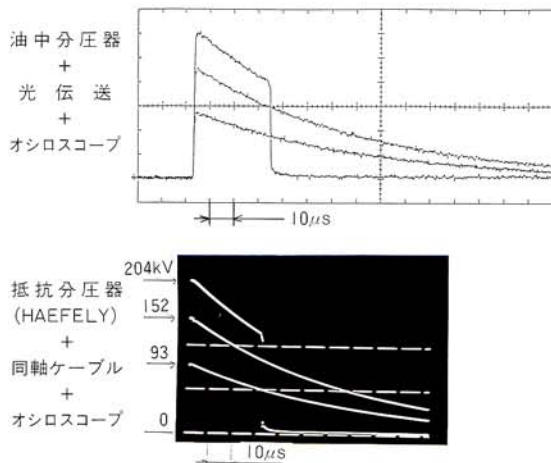


図11/試験結果

Fig. 11/Test results

4.3 雷サージ測定システム

観測個所は無人変電所であるため、自動測定、自動記録を行うシステムを基本とした。このため、瞬時停電時にも雷サージ観測を継続できるように、大容量のバックアップ電源を設置し、電源回復時には自動的にシステムを立上げ、測定を開始する構成としている。

図12は、雷サージ測定システムの構成を示す。各測定端子に加わる雷サージ電圧は、油中分圧器で分圧して検出し、E/O変換器を介して光伝送を行い、高速デジタイザで測定する。高速デジタイザは、コンピュータ (CPU) 制御により、測定と測定データのはき出しを行う。測定時刻は、分解能 0.01 秒にて記録する。これらの測定データは、自動的にハードディスク記録装置に転送され、保存される。

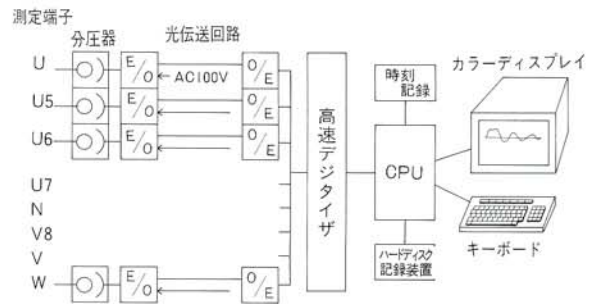


図12/測定システム構成

Fig. 12/Measuring system

表2/測定装置の仕様及び特性値

Tab. 2/The specification of the measuring system

〈分圧器〉	
アナログ周波数帯域	5Hz~2MHz(-3dB)
最大測定電圧	±400kV
〈伝送回路〉	
伝送周波数帯域	DC~20MHz, 振幅変調型
〈高速デジタイザ〉	
サンプリング速度, 分解能	50ns/ポイント, 8ビット
メモリ容量	16KB/ch×4フレーム(合計64KB/ch)
多重雷	最大4波まで測定可能
測定時間	800μs(プリトリガ:200μs設定)/フレーム
トリガ	全チャンネルOR条件同時トリガ
トリガレベル	±150kV設定

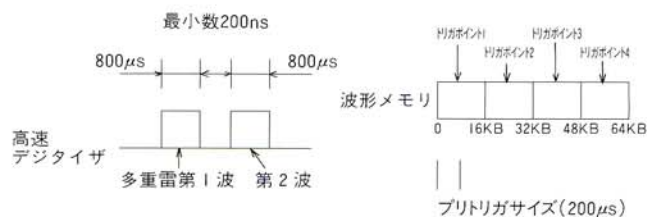


表2は、装置の主な仕様及び特性値を表す。高速デジタルタイザは、雷サージ測定に適した高分解能、高速サンプリングを行い、いずれのチャンネルにサージが侵入しても全チャンネル同時に測定を開始(全チャンネルOR条件同時トリガ)する。また、多重雷は、最大4波まで測定可能であり、第1波と第2波のデッドタイム(測定不可能時間)は最小200nsで非常に短時間に次の雷サージ測定を可能とすることを特長とする。

5 雷サージ観測結果

5.1 観測結果概要

平成2年6月初めから9月末までの測定期間中に福野変電所へ供給する送電線には、雷撃による17件の故障が発生した。測定データとしては、これらの雷サージ電圧波形の他にしゃ断器トリップ後の線路停止中に侵入した雷サージ波形、多重雷及び誘導雷波形が含まれており、合計33波のデータを得た。雷サージの極性は、夏季雷の特徴である負極性雷と推定され、変圧器端子においては、逆閃絡雷は負極性、誘導雷は正極性を示している。図13は、雷サージの侵入様相別件数を示す。また、この雷サージ波形の中には次のような特徴的な波形が含まれている。

5.2 近距離雷サージと遠距離雷サージ

雷撃により変圧器に侵入するサージ波形は、雷撃の種類、大きさ及び雷撃位置の違いにより、様々なサージ波形となることが、測定データから確認された。これらデータのうち変圧器巻線内部に比較的大きな電圧が誘起した場合について検討を行ったが、この代表例を図14に示す。図14(a)は変電所から近距離の鉄塔に雷撃を受け、送電線に逆閃絡して変圧器に到達した雷サージであり、図14(b)は遠距離で雷撃した場合である。両者の第1波形及び後続波形はそれぞれ異なった形状を示している。なお、雷撃位置は測定変電所付近で同時刻に測定された鉄塔塔



図13/測定結果の分類

Fig. 13/Classification of the obtained records

脚電流、架空地線電流より確認した。図15は、測定変電所付近の送電系統構成及び距離を示し、近距離雷撃、遠距離雷撃の雷撃位置を示す。

(1) 近距離雷撃時の雷サージ

図14(a)の雷サージ波形は、福野変電所から約0.71km離れたNo.9鉄塔塔頂に雷撃を受け、赤相(U)、白相(V)が逆閃絡した2相地絡の測定例である。変圧器一次端子は、近距離雷撃時の特徴である立上りの急峻な高い電圧で、後続振動波のない波形を示しており、この時の変圧器巻線内部のU5、U6、U7の第1波には高調波成分が重畳している。また、中性点電圧は、定常電位分布領域になるため、波形の基本周波数は変圧器固有振動数の7.4kHzと一致した値となっている。

(2) 遠距離雷撃時の雷サージ

図14(b)の雷サージは、福野変電所から約7.6km離れた地点における3相逆閃絡時の波形である。この波形は、線路トリップ後再投入するまでの線路停止中に発生した雷撃により侵入した雷サージである。このため波形中には、商用周波数成分(60Hz)は含まれていない。しかし、変圧器端子電圧及び変圧器巻線内部電圧には、雷の進展による誘導電圧が約-80kV現れ、この誘導電圧に雷サージ電圧が重畳した波形である。また形状は、避雷器で制限された台形の第1波と送電線路上の往復反射により形成される後続振動波からなり、波高値、波頭峻度は近距離雷撃と比較して低く、緩慢波となる。一方、中性点誘起電圧は台形第1波に巻線固有の振動波(7.4kHz)が重畳し、最大電圧-292.0kVを誘起し、後続波形は、後続振動波と変圧器固有の振動波が合成され、近距離雷撃時とは異なる振動波を形成している。

以上の結果より変圧器固有の振動数と振動性雷サージの周波数が一致する場合には、比較的高い電圧を誘起することがわかる。

5.3 波頭峻度による変圧器巻線誘起電圧

変圧器侵入雷サージ波形の波頭峻度は、雷撃点位置により急峻波と緩慢波に分類できる。すなわち、雷サージ波形は、送電線路上を伝搬することにより、波形変わり(滑らかになる)を生じるため、雷撃点距離が遠方になる程緩慢波となる。一方変圧器巻線内部では、波頭峻度の度合により巻線入口部の1コイル間に発生する差電圧の大きさに違いが見られた。

図16は近距離雷撃時、遠距離雷撃時の雷サージ波形波頭部を拡大したものである。この場合、波頭部の立上り時間は、それぞれ約1μsの急峻波と、約8μsの緩慢波となり、急峻波雷サージ電圧侵入時のコイル間発生電圧は、-33.8kVを誘起している。一方緩慢波雷サージ電圧侵入時のコイル間には、ほとんど電圧を発生していない。(図

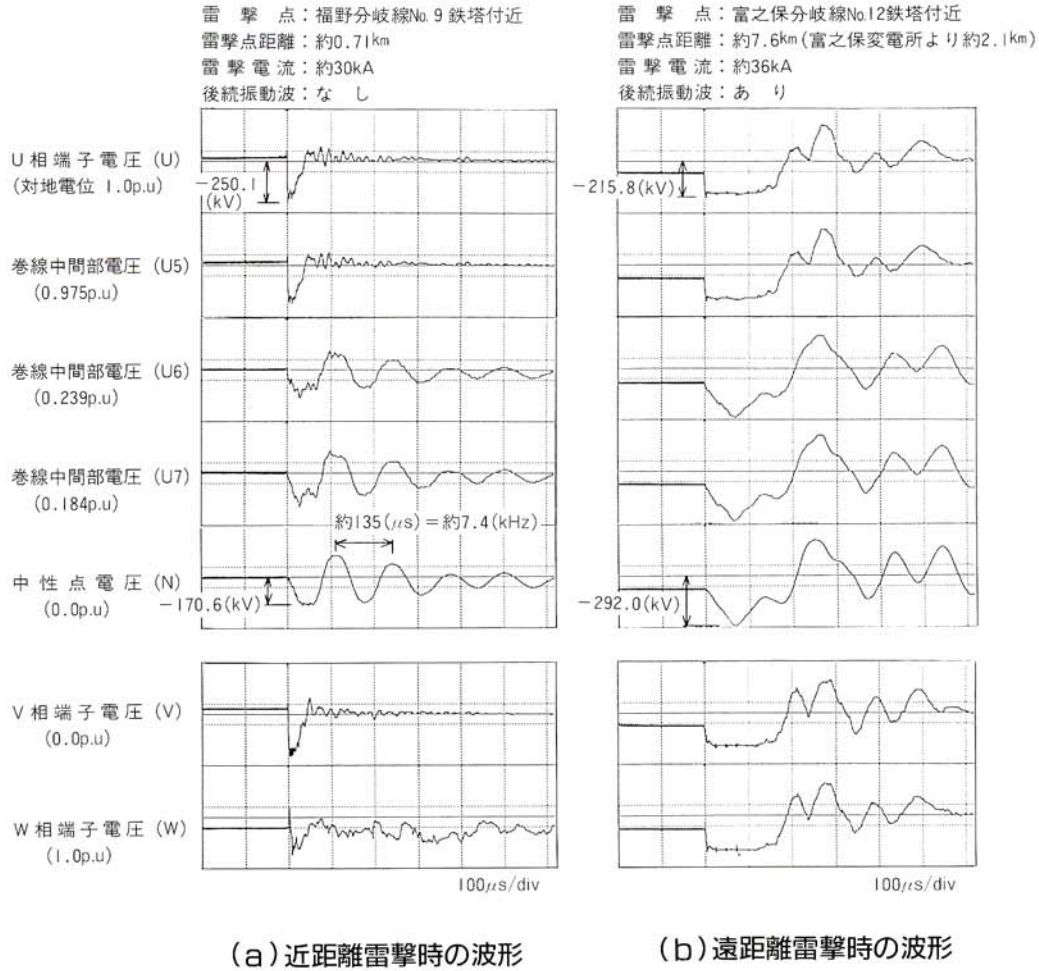


図14/雷撃地点による変圧器端子到達雷サージ波形の変化

Fig. 14/Variation of incoming surge waveforms to a substation transformer on lightning striking points

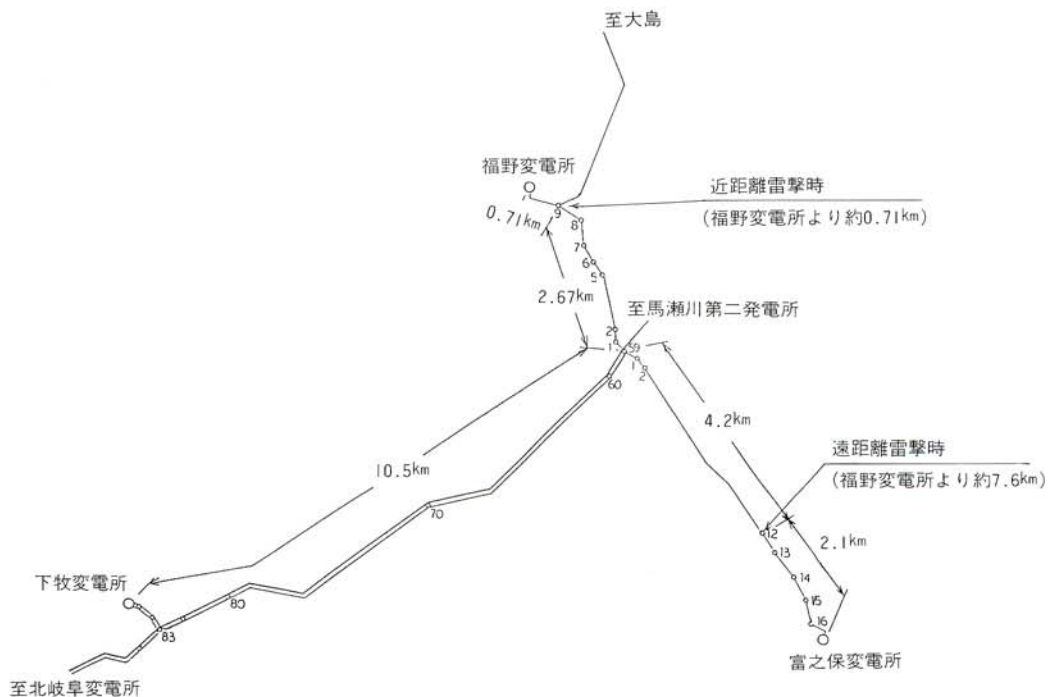
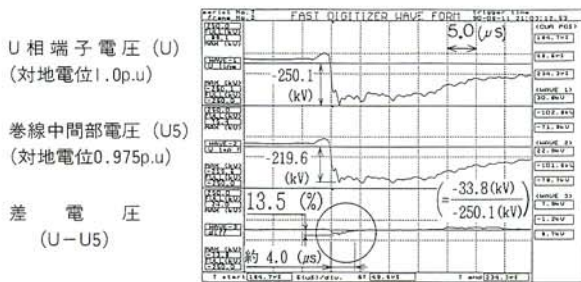


図15/送電系統構成と雷撃位置

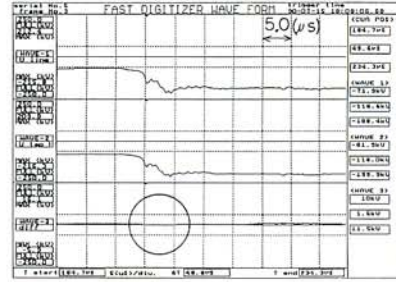
Fig. 15/Lightning striking points on transmission systems

雷撃点：近距離雷撃，福野分岐線No.9鉄塔付近
 雷撃点距離：約0.71km
 波頭峻度：約0.8~2(μ s)
 (変圧器)

雷撃点：遠距離雷撃，富之保分岐線No.12鉄塔付近
 雷撃点距離：約7.6km
 波頭峻度：約8(μ s)
 (変圧器)



(a) 急峻波



(b) 緩慢波

図16/雷サージ波頭部

Fig. 16/The detailed waveform of front part

16(a), 図16(b), ○印部) すなわち, この1コイル間の全巻線に対する割合は, 2.5%であるのに対し, 急峻波雷サージ電圧侵入時では13.5% (33.8kV/250.1kV) の電圧を誘起することを示している。

この場合, 理論的には急峻波雷サージに対して, 最大15.6%の電圧が加わるものと計算されており, 今回の測定結果とほぼ一致している。

5.6 雷撃の発生時刻と変圧器侵入サージの波高値

観測された雷撃は, 16時から21時までの時間に集中して発生しており, この発生件数の合計は, 全体の約8割を占めている。また雷撃の継続時間は約15分~20分程度と考えられる。

- ① 7月15日 17時52分~18時08分 16分間 8件
- ② 8月11日 20時55分~21時14分 19分間 11件
- ③ 8月17日 16時41分~16時56分 15分間 7件

5.4 誘導雷

誘導雷波形は9波測定され, この中には避雷器が動作した比較的大きな雷サージも存在した。測定例を図17に示す。誘導雷サージと言えども最大電圧は+200kVを越えることもあり, サージ持続時間は約100 μ sと比較的長くなる。また, 変圧器中性点電圧は, 約+190kVと比較的高い電圧を誘起している。

5.5 多重雷

逆閃絡後1秒以内に発生した多重雷は4ケースあり, 雷サージの発生間隔は, 1.2サイクル (0.02s) から6.6サイクル (0.11s) 程度で, 3波連続して発生した多重雷も測定された。

これらの多重雷の特徴として, 第1波目の雷サージ波形が, 最も高い電圧を発生するケースが多い。また第2波, 第3波の雷サージ波形でも, -200kVを越えるような高電圧を発生するケースがあるが, 第1波と比較してサージ持続時間は比較的短く, エネルギー量としては, 小さくなるようである。

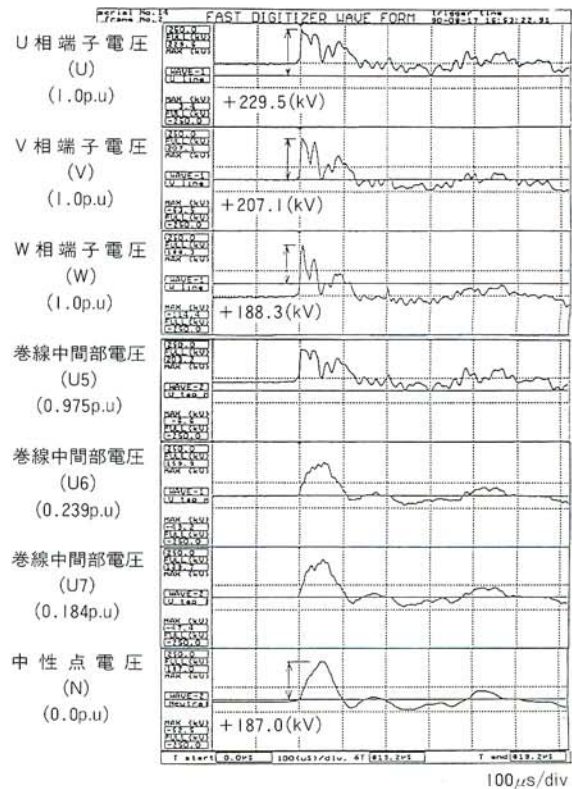


図17/誘導雷

Fig. 17/Indirect lightning

図18、図19は、逆閃絡時の変圧器侵入雷サージ電圧、中性点誘起電圧の波高値をヒストグラムで表したものである。変圧器侵入電圧はLIWL (Lightning Impulse Withstand Level) 値以下であり、中性点誘起電圧の最高値は-300kV程度である。

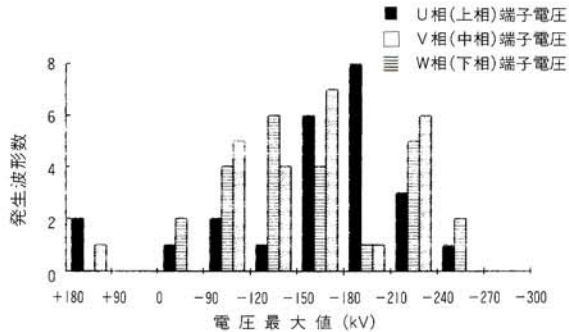


図18/変圧器侵入雷サージ電圧
Fig. 18/The voltage histogram of lightning surge

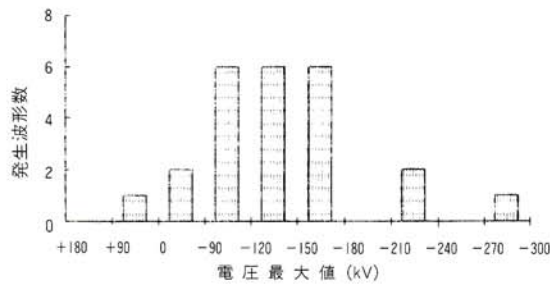


図19/変圧器中性点誘起電圧
Fig. 19/The voltage histogram at neutral point

6 あとがき

今回初めて実系統における変圧器巻線内部の雷サージ観測を行うにあたり、雷サージ測定に適した、広帯域高電圧分圧器を開発した。そして、その油中分圧器の性能を実証し、高電圧測定技術の向上、測定ノウハウの蓄積を図るとともに種々の雷サージ波形を測定した。また、測定結果から変圧器侵入雷サージ波形は、送電線路上の伝搬、反射等の影響により、様々な形状となること、すなわち、雷撃点距離により急峻波と後続振動波を有する緩慢波に分類され、波形によって変圧器内部に誘起する電圧は、巻線部位によって異なることなどを確認した。

変圧器の絶縁強度は、標準雷インパルス (1.2/50 μ s, 400kV：絶縁階級70号)のLIWL値を基準に絶縁設計を行っているが、今回の観測結果は、現状の変圧器設計が妥当であることを示している。しかし、変圧器絶縁設計の合理化を図る場合には、測定により得た多くの雷サージ波形、また線路停止中に発生した雷サージ等を解析し、一層の検討を行うことが必要であると考えられる。

このため、今回測定で得た雷サージ波形を基に、EMTP解析を行い、解析技術・精度の向上を図るとともに酸化亜鉛型避雷器の採用を考慮した絶縁レベルの低減化の動きにも対応し、変圧器絶縁設計の合理化を検討する予定である。なお、この雷サージ観測は平成4年度まで継続し、データの蓄積を図る予定である。