配電用避雷器の雷過電圧抑制効果

正員 藤原 信行 (東京電力) 正員 浅川 聡 (電力中研)
 正員 米山 司 (東京電力) 正員 下村 哲朗 (三菱電機)
 正員 濱田 義之 (東京電力) 正員 山岡 浩一 (三菱電機)
 非会員 横田 勤 (電力中研) 正員 石辺 信治 (三菱電機)

Lightning Overvoltage Protective Effect of Distribution Line Arresters

Nobuyuki Fujiwara, Member, Tsukasa Yoneyama, Member, Yoshiyuki Hamada, Member (Tokyo Electric Power Co.), Tsutomu Yokota, Nom-member, Akira Asakawa, Member (Central Research Institute of Electric Power Institute), Tetsuro Shimomura, Member, Koichi Yamaoka, Member, Shinji Ishibe, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

The primary aim of surge arresters in power distribution lines is to protect lines and equipment from the voltage induced by nearby lightning strokes. For the further improvement of the power system, protection of distribution lines against direct lightning strokes needs to be investigated. One of the effective measures against direct lightning strokes is to increase the number of arresters. However, if the surge current is too large, some surge arresters absorb a large amount of energy in excess of their capability and may be broken, leading to a line fault. To evaluate the protective effect of the surge arresters against direct lightning strokes to overhead ground wire, the authors measured the voltage across arresters and the energy absorbed by surge arresters using a full scale model line and a 12 MV impulse generator. The results were compared with simulation results by EMTP. There have been no previous studies making a comparison of this kind.

キーワード：配電線，直撃雷，架空地線，避雷器，実験，解析

1. ま え が き

我が国の配電線雷事故対策は、誘導雷を主対象として架空地線の架設や避雷器の設置の対策を推進してきた。雷による配電線事故件数はこの10年間で減少しているが、全体の事故件数に占める割合は30%前後とまだ高い。直撃雷が起こった場合、発生頻度は少なくともほとんどが線路事故になるため、この高い割合は変わらないだろうとこれまで考えられてきた。また、瞬時停電が社会に与える影響が重要な関心事になっており、電力供給の信頼性を更に向上させるため、配電用避雷器（以下、避雷器と呼ぶ）の積極的な適用が考えられるが、適用にあたっては直撃雷に対する保護効果とエネルギー責務を評価することが必要である。

直撃雷による配電線の応答に関しては、縮小モデルを用いた計算⁽¹⁾⁽²⁾や、実規模配電線を使った実験的検討⁽³⁾が行われてきた。また著者らは、実規模配電線モデルを用いた実験結果⁽⁴⁾とEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) を使った解析の比較を行ったが⁽⁵⁾、避雷器の電圧・

電流は測定されておらず、避雷器のエネルギー処理量を直接評価できなかった。

今回、著者らは架空地線への直撃雷に対する避雷器の過電圧抑制効果を確認するため、実規模配電線を用いて実験を行い避雷器の電圧・電流や避雷器の処理エネルギーを測定した。本論文では、実験結果とEMTPによる解析結果を比較して、直撃雷に対する配電線過電圧や避雷器の処理エネルギーを解析で精度良く求めることが可能であることを示す。

2. 実験方法

〈2・1〉 実験回路 実験は、電力中央研究所の塩原実験場の12 MVインパルス発生装置を用い、全長350 mの実規模配電線で実施した。実験場の配置を図1に、実験線路の構成を図2に示す。また装柱状況を図3に示す。

実験配電線は、東京電力の標準的な配電線を模擬している。配電線は、6.6 kV 高圧線、架空地線（以下、GWと略記）、架空共同地線から構成される。低圧線は省略した。合計9本のコンクリート電柱を約40 m間隔で図1のよう

に配置し、電柱2本ごとに接地した。配電線のサージインピーダンスと整合をとるため、図2のように末端の1号柱および9号柱で配電線を400Ωの抵抗を介して接地した。

〈2・2〉 実験条件 実験条件を表1に示す。避雷器の雷過電圧抑制効果を確認するため、避雷器の設置場所および電柱の接地位置を変えた。また、インパルス電流の印加点を図2の5号柱の柱頂、4号柱の柱頂、または4号柱と5号柱の径間中央の3点とした。印加電流は本試験構成におけるインパルス発生装置の最大電流に近い18kAと、配電線の中実がいしがフラッシュオーバーしない電流8kAを選定した。またインパルス電流の波頭長(峻度)は2μsを設定し、波尾長は今回の試験構成から決まる11μsとした。

〈2・3〉 測定項目 測定項目は図2に示す5号柱接地

図1 実験場構成図
Fig. 1. Test field.

表1 実験条件
Table 1. Test conditions.

ケース	印加電流 (kA)	電流印加点	接地電柱	避雷器設置場所
A-1	18	4号柱	3, 5, 7	全柱
A-3		5号柱		
B-1	8	4号柱	3, 5, 7	2柱ごと
B-2		中間点		
B-3		5号柱		
C-1	8	4号柱	3, 5, 7	なし
C-2		中間点		
C-3		5号柱		
D-3	18	5号柱	2, 4, 6, 8	全柱

図3 実験線路装柱
Fig. 3. Experimental pole assembly (unit: mm).

図2 実験線路構成
Fig. 2. Experimental line configuration.

図 4 測定装置
Fig. 4. Measuring instruments.

電流 (I_g), 避雷器動作電流 (I_p), 避雷器端子間電圧または高圧中実がいし端子間電圧 (V_p) などである。今回, 実規模配電線モデルで避雷器動作電流および避雷器端子間電圧を測定した。避雷器動作電流 I_p は避雷器の下部に CT を, 避雷器端子間電圧 V_p は柱の腕金部に分圧器をそれぞれ設置して測定し, 腕金部に取り付けられた E/O 変換器で光信号に変換して光ファイバで地上にデータを送信し, 地上で O/E 変換器で電気信号に戻してパーソナルコンピュータ (以下, パソコンと略記) に入力する。分圧器と避雷器または中実がいしの頭部とは約 60 cm の耐熱ビニル電線 (5.5 mm²) で接続した。避雷器の処理エネルギーは避雷器動作電流 I_p と避雷器端子間電圧 V_p の値を用いてパソコンで算出した。なお, 図 2 では, 3, 5, 7 号柱を接地し, 2, 4, 6, 8 号柱は電柱の下部で接地線を開放しており, 表 1 のケース A~ケース C の接地形態に対応している。図 4 に分圧器および E/O 変換器を電柱の腕金部に取り付けられた状態を示す。また接地電流は, 架空共同地線と接地抵抗を接続する接地線に流れる電流と, コンクリート電柱自体を流れる電流を一括して測定した。

3. 解析モデル

解析は EMTP を用いて行った。以下にモデルの考え方を述べる。

〈3・1〉 線路モデル 高圧線, 架空地線, 架空共同地線の線路定数は, 表 2 の線種データおよび図 2, 図 3 の電柱配置データから EMTP の J. Marti セットアップサブプログラムを用いて求めた。

〈3・2〉 避雷器モデル 避雷器の電圧-電流特性を, EMTP の非線形抵抗モデルを用いて折れ線近似で表現した。避雷器の制限電圧は $V_{2.5 \text{ kA}} = 29.4 \text{ kV}$ とした。

〈3・3〉 コンクリート電柱モデル コンクリート電柱は, 内部に数本の鉄筋が円形に配置されており, 鉄筋と電柱表面との間隔は 20 mm である。表 1 のケース D-3 では, 5 号柱は接地されていないにもかかわらず, 図 5 に示す電流が測定されており, インパルス電流がコンクリート電柱を通して大地へ流れている。セメントの固有抵抗は平

表 2 線路定数の条件
Table 2. Dimensions of model line.

項目	設定
線種	架空地線 亜鉛メッキ鋼より線 30mm ²
	高圧配電線 屋外用ポリエチレン絶縁電線 60mm ²
	架空共同地線 屋外用ビニル絶縁電線 60mm ²
電柱間隔	実測値を用いた。(図 2 参照)
地上高	実測値の平均値を使用。架空地線: 10.94m, 高圧配電線: 9.55m 架空共同地線: 7.13m
水平配置	高圧配電線は 850mm 間隔

図 5 非接地柱を流れる電流 (ケース D-3, 5 号柱)
Fig. 5. Current through ungrounded pole No. 5 in case D-3 impulse current: 18 kA.

Rp: コンクリート電柱の接地効果
Rg: 接地線の接地抵抗

(a) 接地線のない電柱モデル (b) 接地線がある電柱モデル

図 6 解析に用いた電柱モデル
Fig. 6. Pole models used in the simulation.

均的に 100~300 Ω・m といわれており⁽⁶⁾, この値を用いると, 図 3 のキャップと鉄筋の間の抵抗はわずか 10~30 Ω 前後である。また, コンクリート電柱の表面と鉄筋の間のインパルス耐電圧は 4~5 kV という報告がある⁽⁷⁾。

これらから, 直撃雷の過電圧解析時には, インパルス電流に対するコンクリート電柱の導電性を考慮して, 電柱を介した接地効果を考慮したほうがよいと考えられる。配電設備において, コンクリート電柱のサージインピーダンスを接地線と並列に考慮して実験と解析結果を比較した例が報告されている⁽⁸⁾。著者らも, 同様のモデルを使用すると

電柱の導電性を考慮しない場合より実測結果に近い解析結果を得ており、上述のモデルの有効性を確認している⁽⁹⁾。

今回、電柱を図6に示すモデルで表現した。接地線のない電柱のサージインピーダンスは、鉄筋が配置されている円周の半径 r 、鉄筋高さ h を次式に入れて求めた⁽¹⁰⁾。

$$Z_T = 60[\ln(2\sqrt{2}h/r) - 1] \dots\dots\dots (1)$$

接地線のある電柱のサージインピーダンスは、接地線と鉄筋が接近しており接地線が細いため、接地線がない電柱のサージインピーダンスと変わらないと考えた。電柱の接地抵抗 $R_p = 70 \Omega$ は、EMTP による解析値が図5の電流値と一致するように設定した。

4. 実測と解析の比較

〈4・1〉 各ケースにおける比較

(1) 避雷器全柱設置の場合 ケース A-1 について
実測と解析波形の比較を表3に示す。解析ではコンクリー

ト電柱のインパルスに対する導電性考慮の有無の影響について検討した。導電性を考慮しない場合、接地線サージインピーダンスは 500Ω とした。電柱の導電性を考慮しないと電流波形が大きく異なる。これに対して、図6のコンクリート電柱のサージインピーダンスを考慮したモデルを用いた場合、波形、ピーク値ともによく一致している。避雷器には、峻度が $0.3 \sim 0.4 \mu s$ の電流が流れており、実測結果では、4号柱および5号柱の避雷器の端子間電圧 V_p の初期部分にスパイク状の電圧が観測される。このスパイク電圧は、避雷器の急峻波応答特性、ならびに避雷器と分圧器の回路のインダクタンスのため測定が避雷器に流れる急峻な電流に影響されることによって生じている。

前者の影響に関しては、単体試験では、峻度 $0.5 \mu s$ の $2.5 kA$ の電流に対する避雷器の制限電圧は、峻度 $8 \mu s$ の電流に対する制限電圧の約1.1倍程度であった。解析に用いた避雷器モデルではこの急峻応答特性を考慮していな

表3 避雷器設置時の波形比較 (ケース A-1)
Table 3. Voltage and current waveforms in case A-1.

い。後者の測定回路への影響についても単体で試験を行った。峻度 $0.5 \mu\text{s}$ の 2.5 kA の電流では峻度 $8 \mu\text{s}$ の場合と比べて約 20~30% 測定電圧が高くなった。更に、分圧器と E/O 変換器との間の同軸ケーブルを使った測定回路は、両端を接地することが避けられなかったため、電磁誘導の影響も考えられる。これに対し CT と E/O 変換器の間の電流測定回路は片端接地で、電磁誘導の影響は少ない。

電圧測定への影響を小さくするには、分圧器を小さくし、かつ避雷器へ極力近付けることにより避雷器と分圧器から構成されるループ回路への鎖交磁束を減らす必要がある。しかし、今回の実験では、避雷器を設置しない場合において、中実がいしの端子間電圧を 300 kV 程度まで測定する必要があるため、図 4 に示すように分圧器のサイズが大きくなり、かつ絶縁距離を確保するため避雷器から離れて設置する必要があり、上述の対策は困難であった。しかし、スパイク電圧の継続時間が短いため、この電圧波形を用いて避雷器処理エネルギーを求める場合、大きな誤差はないと考えられる。

(2) 避雷器 2 柱ごと設置の場合 図 7 は避雷器を 2 柱ごとに設置した場合（ケース B）で、避雷器が設置されていない 4 号柱と 6 号柱の中実がいし端子間電圧を示して

図 7 避雷器 2 柱ごと設置時の外相中実がいし電圧

Fig. 7. Voltage (V_p) across outer-line insulators on poles No. 4 and No. 6 in case B.

表 4 避雷器がない場合の波形比較 (ケース C-3)

Table 4. Voltage and current waveforms in case C-3.

		実 測	解 析
印加電流			
V_p	5号柱		
	6号柱		
	7号柱		

いる。4 号柱に電流を印加した場合に 4 号柱の中実がいし端子間電圧が最も高くなり、両側の電柱に避雷器が設置されていても避雷器が設置されていないがいしの電圧上昇を抑制できない。実験結果と解析結果はよく一致している。

(3) 避雷器なしの場合 避雷器がない場合（表 1 のケース C-3）の実験結果と解析結果の波形の比較を表 4 に示す。波形、波高値ともによく一致している。中実がいしの 50% フラッシュオーバー電圧は 120 kV であるが、今回の実験ではこの値でフラッシュオーバーしなかった。これは、がいしの $v-t$ 特性によるものと考えられる。図 8 は電流印加点を変えたときの中実がいし端子間電圧の最大の値を示したものである。中実がいし両端の電圧は、実測値と解析値はよく一致している。

〈4・2〉 避雷器の処理エネルギー

(1) 避雷器全柱設置の場合 全柱に避雷器を設置した場合の（表 1 のケース A）各避雷器の処理エネルギーの実測値と解析値の比較を図 9 に示す。インパルス電流の印加点として 4 号柱または 5 号柱の 2 ケースを試験したが、いずれの場合も雷撃柱の避雷器の処理エネルギーが大きい。表 4 に示すように、インパルス電流印加柱の避雷器の動作電流値が大きく、動作時間も長いことに対応している。インパルス電流印加電柱の避雷器の処理エネルギー実測値と解析値は、特によく一致しており、実測波形に現れたスパイク電圧は継続時間が短いため処理エネルギー値

図 8 避雷器がない場合の外相中実がいし電圧最大値

Fig. 8. Maximum voltage (V_p) across outer-line insulators in case C.

図 9 外相避雷器の処理エネルギー（ケース A）
Fig. 9. Energy absorbed by outer-line arrester in case A, impulse current 18 kA .

への影響が少ない。今回の実測では、設備の制約から印加電流のピーク値が18 kAと小さく、かつ波尾長が11 μ sと短いため、避雷器の処理エネルギー値は150 J程度と小さい値であった。

(2) 避雷器2柱ごと設置の場合 2柱ごとに避雷器を設置した場合印加電流8 kAに対して、印加柱の避雷器処理エネルギーは実測値13 Jに対し解析値11 Jとよく一致した。

以上のように、実測と解析が一致することから、波高値が大きく波尾長が長い雷電流に対する避雷器処理エネルギーを解析によって求め、避雷器のエネルギー耐量を評価することができる。

5. ま と め

配電用避雷器の雷過電圧抑制効果を評価するために、実規模の配電線を用いて、インパルス電流に対する避雷器の動作電流、電流、処理エネルギー、電柱各部の電圧、電流を測定し、更にEMTPによる解析結果と比較した。これらの結果の概要は以下のとおり。

(1) 避雷器を全柱に設置すると、中実がいし端子間電圧が避雷器制限電圧に抑制されるが、避雷器を2柱ごとに設置した場合、避雷器を設置していない電柱の中実がいしの端子間電圧が避雷器を設置したがいしの端子間電圧に比べて上昇し、隣接電柱の避雷器では過電圧を抑制できないことを確認した。

(2) 実験の結果、接地線のない電柱にも雷撃電流が流れることが観測され、コンクリート電柱の導電性を考慮すると、実測結果と解析がよく一致した。

(3) 避雷器全柱設置、2柱ごと設置、および避雷器なしの場合について各部の電圧、電流および避雷器処理エネルギーの実測波形はEMTPによる解析結果とよく一致した。

これより、配電用避雷器の雷過電圧抑制効果を実規模配電線モデルで確認し、更に、これをEMTPで精度良く解析することが可能となった。

(平成6年12月22日受付、同7年5月24日再受付)

文 献

- (1) Task Force Report: "Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution Circuits Part I: Model study and Analysis", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, No. 8, 1232 (1969)
- (2) Task Force Report: "Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution Circuits Part II: Application and Evaluation", *ibid.*, PAS-88, No. 8, 1239 (1969)
- (3) S. Yokoyama & Asakawa: "Experimental study of Response of Power Distribution lines to Direct Lightning Hits", *IEEE Trans. Power Delivery*, 4, No. 4, 2242 (1989)
- (4) 大西・今井・横山・浅川:「高圧配電線の雷過電圧により誘起される低圧配電線の雷過電圧発生様相」, 電気学会放電高電圧研究, ED-87-91; HV-87-38 (昭62)
- (5) 今井・藤原・横山・下村・山岡・石辺:「直撃雷による低配電線の雷過電圧発生様相」, 電学論B, 113, 881 (平5-8)
- (6) J. Preminger: "Evaluation of Concrete-Encased Electrodes", *IEEE Trans. Industr. Applic.*, IA-11, No. 6, 664 (1975)

- (7) 松延・武智・福島:「コンクリート柱の接地効果について」, 昭54電気学会全大, 1005
- (8) 原・山本・藤澤・高畑・横田・横山:「直撃雷による配電設備の被害様相の分析」, 電気学会電力技術研究, PE-92-23 (平4)
- (9) 藤原・今井・横田・浅川・山岡・下村・石辺:「直撃雷に対する配電用避雷器の保護効果(解析)」, 平5電気学会全大, 1426
- (10) M. A. Sargent & M. Darveniza: "Tower Surge Impedance", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, No. 5, 193 (1969)

藤原 信 行 (正員) 1965年10月17日生。1988年3月千葉大学工学部電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。現在、同電力技術研究所流通研究室に勤務。主として、配電線の雷害対策に関する研究に従事。

米 山 司 (正員) 1956年2月19日生。1981年日本大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。同技術研究所流通研究室勤務。主として、配電線の雷害対策に関する研究に従事。1994年7月(財)日本電気用品試験所出向、研究部主任研究員、現在に至る。

濱 田 義 之 (正員) 1955年12月21日生。1982年3月北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。現在、同電力技術研究所流通研究室主任研究員。主として、配電線の雷害対策に関する研究に従事。

横 田 勤 (非会員) 1952年11月18日生。1975年3月東京電機大学電気工学科卒業。同年(財)電力中央研究所入所。現在、電力中央研究所電気物理部雷放電グループ主査研究員。主として、配電系統の保護、保安、配電自動化関係および雷防護に関する研究に従事。

浅 川 聡 (正員) 1960年4月19日生。1985年3月慶應義塾大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月電力中央研究所泊江研究所電気物理部雷放電グループ主査研究員。主として、配電系統の雷防護、絶縁協調に関する研究に従事。

下 村 哲 朗 (正員) 1948年4月9日生。1972年東京大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。本社(神戸駐在)に勤務, 1987年同伊丹製作所勤務, 現在に至る。主として, 電力系統の解析, 電力機器・システムの開発に従事。1992年電気学会論文賞受賞。

石 辺 信 治 (正員) 1955年1月9日生。1978年九州大学工学部電気工学科卒業。1980年同大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。伊丹製作所勤務, 現在に至る。避雷器の開発・設計に従事。1992年電気学会論文賞受賞。

山 岡 浩 一 (正員) 1962年9月12日生。1989年神戸大学理学部理学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。伊丹製作所勤務, 現在に至る。主として, 電力系統の解析, 電力機器・システムの開発に従事。