配電線 1 相の避雷器省略時の耐雷効果の検討

正員 谷口 弘光 (電力中研) 非会員 中田 一夫 (北陸電力)

正員 浅川 聡 (電力中研) 非会員 大西 賢治 (北陸電力)

正員 横山 茂 (電力中研) 正員 本林 敏功 (北陸電力)

A Study on Lightning Performance of Power Distribution Line without Surge Arresters on One Phase
Hiromitsu Taniguchi, Member, Akira Asakawa, Member, Shigeru Yokoyama, Member (CRIEPI), Kazuo Nakada,
Non-member, Kenji Ohnishi, Non-member, Toshinori Motobayashi, Member (Hokuriku Electric Power Co.)

There is a possibility that satisfactory protective effects for a three-phase power distribution line are attained even if it has surge arresters on only two phases. In order to evaluate the lightning protection effects, experiments of direct lightning strokes and analysis using the EMTP were done.

Lightning protection effects were quantitatively clarified by experiments of direct lightning strokes on simulated full-scale power distribution line with surge arresters on two phases.

Analytical results, which were got by taking the reducing effect of grounding resistance into account, agree well with experimental results. If the value of grounding resistance is less than 30 ohm, the power distribution line with surge arresters on two phases did not suffer from any flashover against the direct lightning stroke with a peak current of 40kA.

キーワード：配電線，避雷器，直撃雷，耐雷効果，耐雷設計

1. まえがき

高圧架空配電線（以下単に配電線とする）の雷害は，従来は誘導雷が主な対象であり，避雷器，架空地線を中心とした対策がなされてきた。その結果，雷事故件数は減少したが，依然として雷以外の原因による事故も含めた全事故に占める雷事故の比率は小さくない⁽¹⁾。今後さらに雷事故の減少を図るには，直撃雷をも対象とした対策が必要となってきた。配電線の直撃雷については，2万アンペアまでの人工雷発生装置を用いた実規模の雷撃実験⁽²⁾やEMTPを用いた解析⁽³⁾などにより検討が行われているが，いずれの場合も避雷器の設置間隔や架空地線の接地間隔を密にすることにより，大きな直撃雷に対しても耐雷効果が得られている。

避雷器焼損事故などを除けば，通常の配電線の雷事故は，雷放電による過電圧によってがいしなどがフラッシュオーバーし，系統の事故電流によって発生すると考えられる。この場合，雷過電圧により1相のみがフラッシュオーバーしても，我が国の配電系統の地絡電流は数A程度と小さいため⁽⁴⁾，短時間で自然消弧し絶縁を回復する。配電線では避雷器などの避雷設備を設置する場合は3相に適用することが多いが，高圧3相線路のうち1相を省略し2相に対策を施せば，

通常は事故につながる大電流の続流はなく，かなり耐雷効果が期待できると予想される。しかし，フラッシュオーバーによる絶縁電線の被覆破壊や変圧器等機器の絶縁破壊防止などの観点からは，1相のみのフラッシュオーバーについても防止することが望ましいが，これまでに避雷設備を1相省略した場合の配電線雷撃応答特性を詳しく検討した例はない。

本論文では，配電線1相の避雷器を省略した場合の直撃雷応答特性について，実規模の雷電流発生装置を用いた実験とEMTPを用いた解析により定量的に明らかにする。

2. 実験概要

<2・1> 試験配電線 実験は電力中央研究所塩原実験場の試験用配電線を用いて実施した。試験配電線は図1に示すとおり，1号柱から11号柱までの10径間（各径間長を（ ）内に示す）で，亘長430mである。線路配列は3相水平配列であり，図1の口の字型の外側の相を外相，中間の相を中相，内側の相を内相とした。相配置は3号，6号，9号柱は通しで，他の柱は引き留めである。図2に6号柱の相配置を示す。

- ・電線：ACSR OC 32mm²
- ・支持物：6号柱は14mその他は12mのコンクリート柱
- ・架空地線：鋼より線22mm²。金具を介して支持物に直

接取付。

- ・避雷器：ギャップ付 ZnO 素子使用，放電開始電圧；約 30 kV， $V_{2.5kA}$ ；約 20 kV

また電線の支持は，引き留め箇所は全て耐張碍子 3 個連とし，ここではフラッシュオーバを生じさせないようにした。縁廻し部と通し部の電線の支持は 10 号中実がいし (50 % フラッシュオーバ電圧；正極性 150 kV⁽²⁾) を使用し，絶縁条件を統一するため電線支持部の被覆はいである。これにより，ここでの実験は，絶縁電線を用いる実配電線の場合より安全側の評価となる。さらに反射を小さくするため 1，11 号柱では架空地線，本線共に 400 Ω の整合抵抗で終端している。

< 2・2 > 接地抵抗 接地は各柱で放射状に配置した接地極を組み合わせるにより得ている。全柱で値が

図 1 試験配電線

Fig.1. Experimental distribution line.

図 2 6 号柱の相配置 (単位；mm)

Fig.2. Configuration of distribution line No.6 pole. (unit；mm)

同一であれば理想的であるが，実際には各柱ではらつきがあり，表 1 のようになった。また実験では「接地なし」の条件を設定した。これは接地線を接地極から切り離し，地上 1.5 m まで巻き上げた状態のことであるが，後で述べるように，鉄筋コンクリート柱には導電性があるため，EMTP による計算結果との比較から，この場合でも 150 Ω 程度の抵抗値で接地がなされていると推定される。

表 1 接地抵抗

Table 1. Grounding resistance value.

目標	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号
30	45	32	35	35	32	52	36	45	56
60	60	60	61	66	67	59	59	59	60
100	95	108	106	104	75	105	95	101	99

< 2・3 > 実験方法 電力中央研究所塩原実験場の 12 MV インパルス電圧発生装置 (I.G.) を用いて，波頭長約 2 マイクロ秒の雷インパルス電流を発生し，6 号柱に流した。流入箇所は，架空地線を施設した場合は架空地線に，施設しない場合は柱頂とした。実験では I.G. の充電電圧を 2 % 程度の刻み幅で上昇または下降させ，各試験ケースでフラッシュオーバを生じる流入電流を求める方式で行った。フラッシュオーバの有無は目視で確認し，6 号柱周辺で以下のように電流 4 箇所と電圧 2 箇所の波形測定を実施した。図 3 に実験様相を示す。

- (1) 流入電流
- (2) 6 号柱の柱脚電流 (接地線を含む)
- (3) 6 号柱の中相 10 号中実がいしのフラッシュオーバ電流
- (4) 6 号柱の内相 10 号中実がいしのフラッシュオーバ電流 (避雷器設置の場合はその動作電流)
- (5) 6 号柱高圧用腕金の対地電圧
- (6) 6 号柱中相の対地電圧

図 3 実験様相

Fig.3. Experiments of direct lightning strokes at No.6 pole.

3. 実験結果

架空地線(G.W.)の有無や避雷器の1相設置と2相設置の違いによる耐雷効果を明らかにするため、表2に示すケースについて実験を行った。流入電流を縦軸に接地抵抗を横軸に取り、実験結果をまとめると図4となる。図4から、フラッシュオーバーを生じる流入電流は接地抵抗が小さいほど大きくなることが明らかである。但し接地なしの点は2章で述べたように150Ωの点に置き、破線の部分は他のケースにならい外挿したものである。

<3・1> 架空地線がない場合の耐雷効果 図4から、架空地線がない場合の耐雷効果は次のとおりである。

(1) 避雷器が設置されない場合

避雷器がない場合、1相がフラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-1)は、接地なしの場合は2kA程度であり、30Ω程度の接地がある場合は5kA程度となる。2相フラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-1')は、曲線H-

表2 試験ケース

Table 2. Test cases of distribution line.

ケース	架空地線	避雷器の設置状況
H-1	なし	避雷器なし
H-2		全柱に避雷器1相(内相)設置
H-3		全柱に避雷器2相(内、外相)設置
H-4	あり	避雷器なし
H-5		全柱に避雷器1相(内相)設置
H-6		全柱に避雷器2相(内、外相)設置

図4 フラッシュオーバーを生じる流入電流

Fig.4. Minimum lightning impulse currents causing flashover on test distribution line.

1より1kA程度大きいだけであり、曲線H-1とH-1'にはほとんど差がない。

(2) 避雷器を1相(内相)設置した場合

避雷器を1相内相に設置した場合、先ず例外なく外相がフラッシュオーバーする。これは避雷器を設置した内相に対して、中相よりも外相の方が離れており、避雷器を通して流れる内相線路電流との電磁結合の影響が小さいためである。この1相フラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-2)は、曲線H-1'より数kA程度大きいだけであるが、2相(外相と中相)フラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-2')は、曲線H-2の2倍の大きさに上昇する。2相フラッシュオーバー時を雷事故とすると、避雷器を1相設置することにより、30Ω程度の接地がある場合は20kAまでの直撃雷に対して配電線は保護される。

(3) 避雷器を2相(内相、外相)設置した場合

避雷器を2相設置した場合、中相でフラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-3)は、曲線H-2'よりさらに大きく、接地抵抗70Ω程度以下では試験雷電流の限界(20kA)を超過する。

<3・2> 架空地線を設置した場合の耐雷効果 図4から、架空地線を設置した場合の耐雷効果は次のとおりである。

(1) 避雷器を設置しない場合

架空地線のみの場合、1相フラッシュオーバーを生じる流入電流(曲線H-4)は、接地抵抗70Ωの場合は9kA程度であり、接地抵抗30Ωでは12kA程度に上昇する。

2 相フラッシュオーバを生じる流入電流（曲線 H-4'）は、曲線 H-4 より 1 kA 程度大きいだけであり、両者にはほとんど差がない。

(2) 避雷器を 1 相（内相）設置した場合

避雷器を 1 相設置した場合、1 相フラッシュオーバを生じる（例外なく外相）流入電流（曲線 H-5）は、曲線 H-4' より 4 kA 程度大きいだけであるが、2 相フラッシュオーバを生じる流入電流は接地なしでも試験雷電流の限界を超過し、実測できなかった。

(3) 避雷器を 2 相（内相、外相）設置した場合

避雷器を 2 相設置した場合、中相でフラッシュオーバを生じる流入電流は試験雷電流の限界を超過したため実測できなかった。

以上の結果から中相でフラッシュオーバを生じるかどうか、または 2 相のフラッシュオーバを耐雷効果の基準として、各試験ケースに順列をつけると次のようになる。

耐雷効果小 → 耐雷効果大

$$H-1 \ll H-4 < H-2 < H-3 < H-5, H-6$$

この関係は架空地線の有無や避雷器設置相と未設置相の幾何学的配置からある程度予想されるが、注目すべき点は、2 相以上のフラッシュオーバを雷事故とした場合、柱頂雷撃に対して架空地線を施設するより、避雷器を 1 相施設する方が耐雷効果が大いことである。

4. フラッシュオーバ抑制状況の考察

避雷器を 1 相設置した場合、避雷器の放電開始電圧や制

限電圧を無視すれば、避雷器の動作により避雷器設置相は非接地相に対して架空地線と同様の効果があると考えられることができる。また避雷器を 2 相設置した場合でも、2 相同時に動作するとすれば、架空地線を 2 条設置したことに等しい。さらに雷撃柱において、雷撃点から高压用腕金（以下高压アームと呼ぶ）までの柱体や接地線、架空地線の取付金物などの効果を考えなければ、雷撃柱の高压アームに生じる電圧（以下アーム電圧と呼ぶ）は架空地線の対地電圧や避雷器設置相の対地電圧に等しいと考えることができる。従って避雷器省略相の誘導電圧とアーム電圧の比をとれば、架空地線や避雷器設置相と避雷器省略相の結合の強さを評価できる。この比を誘導率（ k = 避雷器省略相の誘導電圧 ÷ アーム電圧）と定義し、実験結果から中相對地電圧波高値とアーム電圧波高値の比を求めると図 5 となる。

図 5 において(a)のように内相にのみ避雷器を設置した場合、誘導率は流入電流によって変化する。これは外相がいししのフラッシュオーバ（1 相 F.O.）の影響によるものと考えられるが、外相がいしがフラッシュオーバする流入電流の直前あるいは直後の流入電流における誘導率は、接地抵抗によらずほぼ一定値を示す。さらに外相と中相の 2 相でフラッシュオーバする（2 相 F.O.）流入電流の直前の流入電流における誘導率も、接地抵抗によらずほぼ一定値を示す。これらの値をそれぞれ k_2 、 k_2' とする。その他のケースについても(a)と同様に定義すると、図から以下のことがわかる。ただし(d)、(e)については中相フラッシュオーバのデータは得られていない。

図 5 誘導率（中相對地電圧 ÷ アーム電圧）

Fig.5. The rate of induction. (The voltage ratio of mid phase induced potential to insulator staying arm potential.)

(1) 架空地線なしで、避雷器を1相設置した場合（1条対策）と架空地線のみ設置した場合（1条対策）の誘導率はほぼ等しい。 $k_2 = k_4 = 0.3$

(2) 架空地線なしで、避雷器を2相設置した場合（2条対策）と架空地線と避雷器1相設置の場合（2条対策）の誘導率は同程度である。 $k_3 = k_5 = 0.55$

(3) 架空地線と避雷器を2相設置した場合（3条対策）の誘導率が最も大きい。 $k_6 = 0.7$

(4) 架空地線のみ設置した場合は、外相や内相のそれぞれ1相がフラッシュオーバーしても、2相目がフラッシュオーバーするまでに誘導率はほとんど変化しない。 $k_4 = k_4'$

これは1相目フラッシュオーバーの時間遅れのため、2相目フラッシュオーバーにほとんど影響しないためと考えられる。

(5) 架空地線の有無によらず、避雷器1相設置の場合、外相がいしがフラッシュオーバーし、中相がフラッシュオーバーするまでに誘導率は大きくなるが、中相フラッシュオーバー直前の誘導率は避雷器を2相設置した場合の誘導率と同程度となる。 $k_2' = 0.5$, $k_3 = 0.55$; $k_5' = 0.65$ 以上, $k_6 = 0.7$
これは、外相がいしのV-t特性のため、流入電流の上昇に連れてフラッシュオーバー点がアーム電圧の波尾側から波高点側に移るためと考えられる。

誘導率の大きさを各試験ケースと比較すると次のようになる。

誘導率小 → 誘導率大

$$H-4 < H-2 \leq H-3 < H-5 \leq H-6$$

この関係は先の<3・2>の項で示した関係とほぼ一致しており、このことから架空地線や避雷器を介して雷電流が分流することにより生じる結合によって、避雷器未設置相にフラッシュオーバーを生じにくくする極性の電圧が誘導するのは明らかであり、その結合が大きい（1条対策<2条対策<3条対策）ほどフラッシュオーバーしにくくなる。

以上のことから雷撃柱の避雷器省略相のがいし間電圧は、避雷器省略相の対地電圧波高値とアーム電圧波高値の差となる場合、文献(5)にない誘導率とアーム電圧上昇インピーダンスを用いて次式で表せる。

$$V_{n0} = (k_n - 1) Z_p \cdot I \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_{n0} ：避雷器省略相（n相）のがいし間電圧、 I ：雷撃電流、 Z_p ：アーム電圧上昇インピーダンス（アーム電圧÷雷撃電流）、 k_n ：誘導率（避雷器省略相の対地電圧÷アーム電圧）

5. EMT Pを用いた解析による検討

実験で用いた雷インパルス電流は、インパルス電圧発生装置の能力上20kAが上限であるため、実用面で重要となる20kA以上の電流については、解析により避雷器省略時の特性を検討した。

EMTPを用いた雷サージ解析は、送電線や発電電所を対象にしたものが多いが、近年は配電線の雷サージ解析にも広く用いられつつある⁽³⁾。しかし配電線の解析では未確定のパラメータが多いため、今回の実験結果を基に推定

したパラメータを用いている。

<5・1> 解析条件

(1) 線路

線路は高压配電線各相および架空地線間の相互誘導と周波数特性を考慮できるように、EMTPのJMART Iセッアップサブプログラムを用い、架空地線ありの場合は4相の、なしの場合は3相の線路定数として表現した。各相の配置は試験配電線各径間の中間位置の配置とし、1号柱と11号柱の末端は実験同様に整合抵抗で終端した。

(2) 支持物と接地抵抗

配電線の支持物は鉄筋コンクリート柱が一般的であり、その構造から導体として表現することが妥当である⁽⁶⁾。接地なしのケースでも柱脚電流は測定されているので、解析では接地の有無によらず、支持物を分布定数で表現し、接地抵抗を与えることとした（図6参照）。この場合、高压アームと高压アームから柱頂側の支持物部分（約1m）は無視した。

雷撃柱のアーム電圧を決定する要素としては、支持物のサージインピーダンスと接地抵抗が重要なパラメータである。しかし支持物のサージ特性については、鉄塔などと比

図6 支持物のモデル

Fig. 6. Model of distribution line pole.

図7 雷インパルス大電流に対する実効抵抗

Fig. 7. Effective grounding resistance value measured with a high impulse current.

べて柱長が短いこともあり、あまり実測されていない。接地抵抗については、低減効果や過渡特性などの影響を考慮する必要がある。文献(7)には塩原実験場における波頭長 $0.5 \sim 1 \mu\text{s}$ 、波高値 $1 \sim 15 \text{ kA}$ の電流を用いた模擬塔脚での低減効果が測定され、低電圧過渡特性を含んだ結果として図7が示されている。今回は簡単のため図7の低減効果を直線近似して用い、支持物のサージインピーダンスをパラメータとして計算し、実験結果(ケース H-4)と比較した。表3によると、接地の大電流による低減効果を考慮した値(以下低減接地抵抗と呼ぶ)で計算した場合、支持物のサージインピーダンスは 200Ω で実験結果と計算結果は一致する。ただし伝搬速度は光速とした。またこの場合の波形を実測値と比較して図8に示すが、波形の点でも実験結果と計算結果は一致している。以上の結果から以後の計算においては支持物のサージインピーダンスを 200Ω 、伝搬速度を光速、接地は低減接地抵抗として扱う。

次に接地なしのケースの接地抵抗であるが、接地抵抗をパラメータとして計算した結果と実験結果を比較して表4に示す。表4によると、支持物の接地抵抗は 75Ω 程度と考えられる。ただしこの値は低減接地抵抗値であり、定常接地抵抗では約 150Ω に相当する。

(3) がいいし

中相のがいいしについてはフラッシュオーバーの判定をがいいし間電圧 $220 \text{ kV}^{(2)}$ とした。外相のがいいしについては、中相の結合やアーム電圧に影響するため、 $V-t$ 特性を考

表3 発生サージの計算結果と実験結果の比較
Table 3. Comparison between calculated results and measured results.

ケース	実験 計算	接地抵抗 Ω	サージイン ピーダンス Ω	7- μ 電圧 kV	中相電圧 kV	柱脚電流 kA	流入電流 kA
H-4	実験値	32		-340	-103	-8.0	-11.3
	計算値	32	無視	-251	-93	-7.8	-12.1
			100	-308	-111	-7.9	-12.1
			200	-372	-135	-7.5	-12.1
			300	-430	-157	-7.2	-12.1
		25	低減接地	100	-268	-97	-8.2
			200	-337	-123	-7.8	-12.1
			300	-397	-145	-7.4	-12.1
	実験値	67		-343	-106	-4.4	-9.6
	計算値	67	無視	-382	-141	-5.7	-10.2
			100	-391	-141	-5.6	-10.2
			200	-436	-156	-5.5	-10.2
			300	-477	-172	-5.4	-10.1
		42	低減接地	100	-299	-107	-6.3
			200	-349	-126	-6.1	-10.2
			300	-398	-145	-5.9	-10.2

表4 発生サージの計算結果と実験結果の比較
Table 4. Comparison between calculated results and measured results.

ケース	実験 計算	サージイン ピーダンス Ω	接地抵抗 Ω	7- μ 電圧 kV	中相電圧 kV	柱脚電流 kA	流入電流 kA
H-1	実験値		なし	-182		-1.7	-2.5
	計算値	200	50	-127		-2.5	-2.5
			75	-183		-2.4	-2.4
			100	-233		-2.3	-2.3
H-4	実験値		なし	-308	-95	-2.7	-7.0
	計算値	200	50	-246	-88	-4.1	-7.1
			75	-300	-110	-3.7	-7.0
			100	-353	-129	-3.4	-7.0

図8 各部の電流電圧波形 …… 実験結果と解析結果の比較 ……
(ケース H-4, 架空地線あり, 避雷器なし, 接地 32Ω)

Fig.8. Current waveforms and overvoltage waveforms on test distribution line.
…… Comparison between measured waveform and calculated waveform. ……

慮すべきであるが、短波尾波⁽²⁾によるフラッシュオーバー特性が完全に明らかになっていないこともあり、文献(2)に示される短波尾波での50%フラッシュオーバー電圧値を用い、放電開始電圧220kVの電圧指定スイッチで模擬した。今回の実験でも、常に外相が先にフラッシュオーバーする避雷器を1相設置した場合でも、避雷器を2相設置した場合でも、中相電圧とアーム電圧の差が220kV程度で中相はフラッシュオーバーしていた。

(4) 避雷器
 避雷器は電線とアームの間に接続した。素子の特性はギャップ付き非線形抵抗として折れ線で近似し、ギャップの放電開始電圧は30kV一定とした。図9に避雷器のV-I特性を示す。

<5・2> 実験結果と解析結果の比較 試験ケースH-3、H-5、H-6について、実験で用いた雷インパルス電流波形を模擬して解析を行った結果を図10に示す。またこの場合の誘導率(k)とアーム電圧上昇インピーダンス(Zp)の

図9 避雷器のV-I特性
 Fig.9. Voltage-current characteristics of surge arrester.

図10 フラッシュオーバーを生じる流入電流 (解析結果)
 Fig.10. Minimum lightning impulse currents causing flashover on test distribution line calculated by analytical method.

関係を実験結果と比較して図11に示す。ただし、実験結果で中相がフラッシュオーバーしなかったケースについては、流入電流最大時の測定値を使用している。図10、図11から以下のことがわかる。

(1) ケースH-3 について
 図10から実験結果と計算結果を比較できるポイントは接地なし(低減接地75Ω)のケースのみであるが、計算値と実測値は一致する。図11から接地32Ω(低減接地25Ω)ではkに、接地なし(低減接地75Ω)ではZpに

(a) 避雷器2相設置 (ケースH-3)

(b) 架空地線+避雷器1相 (ケースH-5)

(c) 架空地線+避雷器2相 (ケースH-6)

図11 接地抵抗の評価 …… 解析結果と実験結果の比較 ……

Fig.11. Estimation of earth resistances. …… Comparison between experimental results and calculated results. ……

差を生じるが、その他の点では実測値と計算値は一致している。

(2) ケースH-5, H-6 について

図10から実験結果と計算結果は比較できないが、解析ではケースH-5 とH-6 はほぼ同一の結果となる。図11からケースH-5 の場合、6号柱外相でフラッシュオーバーしない流入電流においては、 k, Z_p ともに実測値と計算値は一致する。さらに6号柱中相がフラッシュオーバーする直前の流入電流において、 k' は実測値と計算値は一致するが、 Z_p' は実測値が小さく、ケースH-6 の場合も同様である。このことから実測では流入電流が大きいほど接地の低減効果あるいは過渡特性が強調される傾向にあり、解析値は安全側となる。ただしケースH-5 とケースH-6 が同一の解析結果となったことについては、実際には、外相のがいしがアーム電圧の波尾側から波高点付近でフラッシュオーバーしているとすれば、(1)式が成り立たないことになるので、がいしのフラッシュオーバーの効果を厳密に解析するには、がいしのV-t特性を考慮する必要がある。

<5・3> 直線上昇波による解析 試験雷電流を模擬した解析では、試験ケースH-5 のように外相のがいしをフラッシュオーバーさせる場合以外は解析結果と実験結果は一致した。しかし試験雷電流波形は複雑で波尾が短いなどから一般的な評価が難しくなる。そこで試験ケースH-3, H-6 について2種類の直線上昇波 ($0.5/40\mu s$, $1/40\mu s$)を雷電流に用いて解析を行った。解析の結果を図12に示す。またこの場合の k と Z_p の関係を図13に示す。図12, 図13から以下のことがわかる。

(1) 雷電流が急峻なほど、フラッシュオーバーを生じる雷電流値は低下するが、これは誘導率によるものではなく、アーム電圧上昇インピーダンスの上昇によるところが大きい。

(2) 誘導率は雷電流波形や接地抵抗によってほとんど変化しない。このことから、雷撃柱での結合の強さは、雷撃柱のがいし間電圧波高値が問題となる時間領域では、隣接柱以降の避雷器の動作状況や接地抵抗により回路条件が変わってもほとんど変化しないと考えられる。

(3) 支持物のみの接地（低減接地 75Ω ）から 30Ω の接地（低減接地 25Ω ）を施した場合、避雷器省略相でフラッシュオーバーを生じる波頭長 $1\mu s$ の雷撃電流は次のようになる。

(a) 架空地線なし、避雷器中相省略 $16\sim 30\text{ kA}$

(b) 架空地線あり、避雷器中相省略 $23\sim 43\text{ kA}$

6. 近似計算による誘導率の算出

標準波による解析の結果、配電線における誘導率の大きさは、接地抵抗などによる配電線側の回路条件によってほとんど変化しない。このことから配電線各相の自己および相互サージインピーダンスから誘導率を近似的に求めることができる。

架空地線を含む配電線を、対地に平行に施設された4条の線路とした場合、各相のサージ電圧はインピーダンス行

図12 フラッシュオーバーを生じる雷電流 (解析結果)

Fig.12. Minimum lightning impulse currents causing flashover on test distribution line calculated by analytical method.

(a) 雷電流波形 0.5×40

(b) 雷電流波形 1×40

図13 誘導率とアーム電圧上昇インピーダンスの解析結果

Fig.13. Analytical results of induction rate and arm-potential-impedance.

列を用いて次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V_n ; 各相のサージ電圧
 Z_{nn} ; n 相の自己サージインピーダンス
 Z_{nm} ; n 相 m 相間の相互サージインピーダンス($m \neq n$)
 I_n ; 各相のサージ電流

自己(相互)サージインピーダンスは、表皮効果により線路導体内部のインダクタンスが無視できる場合、導体の半径および導体の幾何学的配置から次式⁽⁸⁾で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{nn} &= 138 \log_{10} (2h_n / r_n) \\ Z_{nm} &= 138 \log_{10} (D_{nm} / d_{nm}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 r_n ; 線路導体 n の半径[m]
 h_n ; 線路導体 n の地上高[m]
 d_{nm} ; 線路導体 n と線路導体 m の距離[m]
 D_{nm} ; 線路導体 n と線路導体 m の影像間の距離[m]

雷撃柱における計算条件として、アーム電圧と避雷器設置相の電圧は等しく、架空地線がある場合は架空地線の電圧も等しいとすると、式(2)、(3)から誘導率を計算できる。表5に近似計算で求めた誘導率を実測値、解析値と比較して示すが、近似計算による結果は他と大差ない。

表5 近似計算で求めた誘導率
 Table 5. The rate of induction by approximate calculation.

G. W.	避雷器省略相	近似計算	実測値	EMTP
なし	中相	0.58	0.55	0.61
あり	中, 外相	0.55	0.55	0.57
	中相	0.67	0.7	0.7

7. 実配電線での適用

実配電線の装柱例として、図14に示す相配置について避雷器を1相省略した場合の誘導率を式(2)、(3)を用いて算出し、表6に示す。表6の結果から、いずれの装柱でも3相のうち中間の相を避雷器省略相とした場合、誘導率が最も大きく耐雷効果が大いことがわかる。

図12の波頭長 $1 \mu s$ の雷撃電流による解析の結果から、雷撃電流波高値として送電線耐雷設計ガイドブック⁽⁹⁾の推奨する累積頻度分布曲線を用いると、実配電線において、中間の相の避雷器を1相省略しても以下に示す割合の直撃雷に対してフラッシュオーバーを防止できる。

- (1) 架空地線なし、支持物のみの接地の場合 25%
- (2) 架空地線なし、30Ωの接地がある場合 55%
- (3) 架空地線あり、支持物のみの接地の場合 40%

(4) 架空地線あり、30Ωの接地がある場合 70%

図14 相配置(単位;mm)

Fig.14. Configuration of power distribution line. (unit;mm)

表6 避雷器省略相の違いによる誘導率
 Table 6. The rate of induction by approximate calculation.

G. W.	避雷器省略相	水平配列 その1	水平配列 その2	垂直配列
なし	①相	0.50	0.57	0.56
	②相	0.59	0.66	0.66
	③相	0.50	0.57	0.57
あり	①相	0.59	0.67	0.62
	②相	0.68	0.73	0.72
	③相	0.59	0.64	0.69

8. あとがき

配電線1相の避雷器を省略した場合の直撃雷応答特性を検討するため、電力中央研究所塩原実験場の大型雷インパルス電圧発生装置を使用し、実規模配電線での実験を行った。また実験で用いた雷電流以上の、実用面で重要となる領域の雷電流については、EMTPを用いた解析により検討を行った。実験と解析から得られた結果は以下のとおりである。

(1) 避雷器省略相と避雷器設置相や架空地線との結合の強さを評価するために、誘導率(避雷器省略相の誘導電圧とアーム電圧の比)を定義した。実験の結果から、避雷器省略相のフラッシュオーバー抑制効果は誘導率の大小によることを定量的に明らかにした。

(2) 接地の低減効果を考慮したことで、EMTPを用いた解析値は実験値と概ね一致することを示した。

(3) 解析の結果、避雷器の動作状況や接地抵抗により配電線側の回路条件が変化しても、雷撃柱での結合の強さはほとんど変わらないことを示した。

(4) 実配電線(水平配列、垂直配列)では、いずれの配列においても3相線路のうち中間の相の誘導率が最も大きく、これを避雷器省略相とすることが適当である。接地抵抗30Ωで架空地線が施設されない配電線では55%の直撃雷に対して、架空地線が施設された配電線では70%の

直撃雷に対して避雷器省略相のフラッシュオーバを防止できる。

終わりに、本研究を実施するにあたり、御支援、御指導を賜りました中村正孝部長、金岡純一課長をはじめとする北陸電力株式会社配電部の関係者と、実験に御協力頂いた当所塩原実験場の三宅久仁彦場長、電気物理部雷放電グループの橋本洋助氏に厚くお礼申し上げます。

(平成6年2月25日受付、同年6月15日再受付)

文 献

- (1) 横山, 諸岡, 浅川: 「高圧配電線の雷害対策の方向性 — 誘導雷対策から直撃雷対策への展開 — 」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-91-25(1991)
- (2) S. Yokoyama and A. Asakawa: "Experimental Study of Response of Power Distribution Lines to Direct Lightning Hits", IEEE Trans. Power Delivery, 4, 2242 (1989)
- (3) 今井, 松浦, 伊東, 石辺, 東, 下村: 「架空地線直撃雷に対する配電用避雷器の保護効果」, 電学論B, 111巻6号(1991)
- (4) 配電線雷害対策専門委員会: 「配電線雷害対策」, 電気協同研究, 第40巻第6号(S60年2月)
- (5) 電中研技術第一研究所: 「送電線耐雷設計基準要綱」, 技術第一研究所報告, 71037(1971)
- (6) 山本, 木下, 桑原, 大宅: 「7kV接地線に鉄筋コンクリート柱を代用した場合の電圧低減効果」, 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G4-36, G173(S55年11月)
- (7) 川合, 岸嶋: 「鉄塔塔脚接地設計に関する研究」, 電中研技術研究所報告, No64061(1965)
- (8) 耐雷設計基準委員会配電線分科会: 「配電線耐雷設計ガイドブック」, 電中研報告, 175030(1976)
- (9) 耐雷設計基準委員会送電線分科会: 「送電線耐雷設計ガイドブック」, 電中研報告, 175031(1976)

谷口 弘光 (正員) 1958年3月12日生まれ。82年3月武蔵工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月北陸電力(株)入社。平成3年7月電力中央研究所出向。現在、電力中央研究所泊江研究所電気物理部雷放電グループ研究員。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。

浅川 聡 (正員) 1960年4月19日生まれ。85年3月慶応義塾大学大学院電気工学専攻修士課程終了。同年4月電力中央研究所入所。現在、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。

横山 茂 (正員) 1947年3月5日生まれ。69年5月東京大学工学部電子工学科卒業。同年6月電力中央研究所入所。現在、電力中央研究所泊江研究所電気物理部次長兼レーザ・光グループリーダー。工学博士。主として、送配電系統の雷防護、絶縁協調に関する研究に従事。IEEE, 電気設備学会, 日本大気電気学会会員。

中田 一夫 (非会員) 1963年1月10日生まれ。85年3月東北大学工学部電子工学科卒業。同年4月北陸電力(株)入社。現在、北陸電力(株)配電部配電技術課に勤務。主として、配電線の耐雷機材など配電機器の開発、試験に従事。

大西 賢治 (非会員) 1961年3月27日生まれ。83年3月福井大学工学部電気工学科卒業。同年4月北陸電力(株)入社。主として、配電線の耐雷機材など配電機器の開発、試験に従事。平成5年7月北陸電機製造(株)出向、現在に至る。

本林 敏功 (正員) 1952年8月4日生まれ。75年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月北陸電力(株)入社。主として、配電線の耐雷機材など配電機器の開発、試験に従事。平成5年7月同企画室課長、現在に至る。