縮小モデルによる避雷器の配電線誘導雷 電圧抑制効果に関する実験的検討

正員 谷口 淳二 (関西電力)

非会員 首藤 和夫 (関西電力)

正員 原 武久 (京都大学)

正員 関岡 昇三 (関西テック)

Experimental Study of the Suppression Effect of Surge Arresters against Lightning-Induced Voltages on Distribution Lines using Scale Model

Junji Taniguchi, Member, Kazuo Shuto, Non-member (Kansai Electric Power Co., Inc.), Takehisa Hara, Member (Kyoto University), Syozo Sekioka, Member (Kansai Tech Corporation)

This paper investigates the suppression effect of surge arresters against lightning overvoltages on distribution lines caused by indirect lightning strokes. Scale model technique is useful to simulate a large power system network. Then, we use a 1/100th scale model. Geometric dimensions and current waveforms in the return stroke model are determined by the scale factor. Surge arresters are modelled by the base-emitter of a transistor which V-I characteristics are equivalent for a real device.

The paper describes as follows on the induced voltages on the distribution line model.

- (1) Calculated values agree well with experimental results.
- (2) Surge arresters suppress the voltages if the locations of lightning paths are nearby them.
- (3) The voltages are reduced by the simultaneous application of a ground wire and surge arresters more than the case that lightning protections are the arresters or the ground wire alone.
- (4) The voltages at branched points are 1.2 ~ 1.4 times as large as ones on an infinite line.

キーワード：耐雷設計，誘導雷，縮小モデル，避雷器

1. 緒言

現在、電力は必要不可欠なエネルギーであり、良質で低廉な電力を安定して供給することは電力会社の重大な使命となっている。特に最近ではOA機器やHA機器の普及に伴い、瞬時の停電さえも許容されなくなってきた。事故による停電は突発的に発生し、お客さまに与える影響は大きく、特にコンピュータを軸とする高度情報化社会では、停電事故による情報の損失や流通の停滞等の被害は莫大なものとなる。事故原因としては雷によるものが最も多く⁽¹⁾⁽²⁾、配電線においては絶縁レベルが低いことから、主として誘導雷を対象として耐雷設計が行われている⁽³⁾。⁽⁴⁾電力会社では、誘導雷電圧低減の観点から、架空地線や避雷器等の設備対策を行い、雷による事故は減少傾向にある⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、個々の対策の効果が明確で

なく、今後の対策の要否判定と、その効果を予測することは現状では極めて困難である。

Rusckは、帰還雷撃電流により生じる垂直電界が配電線に大きな電圧を発生させると考え⁽⁵⁾、これにより配電線における誘導雷現象についての基礎が確立された。また、古賀らは、大地の導電率が有限であることにより生じる水平電界が誘導雷電圧に大きな影響を及ぼすことを指摘している⁽⁶⁾。横山らは、Rusckの理論に基づく数値計算手法を用いて配電線に生じる誘導雷電圧と架空地線および避雷器の効果について検討している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、誘導雷現象の実験的検討としては、横山らが縮小モデルを用いて誘導雷電圧と架空地線の効果について検討している⁽⁹⁾が、避雷器の効果については、低圧配電線における検討例⁽¹⁰⁾で試みられているにすぎない。

本論文では、トランジスタのベース-エミッタ間の制

限電圧—電流特性が、実システムで使用されている酸化亜鉛型避雷器の特性と相似であることを利用して、1/100 の縮小モデルにおいて非線形素子である避雷器を精度よく模擬できることを示し、その避雷器モデルを用いて、誘導雷に対する避雷器の効果について実験的検討を行った。また、実際の配電線では線路の分岐や曲がり等があり、通常の誘導雷解析で用いられている直線状の線路に発生する電圧とは異なると考えられ、線路形態の違いにより生じる誘導雷の相異を把握しておく必要がある。そこで、線路形態を種々変更して誘導電圧の測定を行った。本論文では、これらの結果に基づいて、架空地線施設において避雷器を適用することにより、さらに過電圧を抑制できること、線路の分岐点等では誘導電圧は、無限長を模擬した直線状の線路より大きくなることを明らかにしている。

2. 実験装置と測定方法

〈2.1〉縮小率の選定 縮小モデルを作成する場合、縮小率（実規模における寸法に対する縮小モデルにおける寸法の比）を小さくとれば、長い雷道と長い配電線を模擬することができる。しかしながら、表1で与えられる縮小モ

表1 縮小モデルと実規模モデルとの関係
Table 1. Relation between scale model and real model.

比較量	換算比
長さ・時間・波長	S
周波数	1/S
伝搬速度	1
導電率	1/S
誘電率・透磁率	1
抵抗値・リアクタンス・インピーダンス	1
キャパシタンス・インダクタンス	S

S=(縮小モデルにおける寸法)/(実規模における寸法)

デルと実規模モデルの間の関係⁽¹¹⁾より、高周波の電流の発生、電圧の測定が必要になる。今回の実験では、パルス電流発生器の性能と測定精度上の制約から縮小率は1/100とした。

〈2.2〉縮小モデルの概要 実験で用いた縮小モデルの概要を図1に示す。本稿では、基本的に横山らが用いた手法⁽⁷⁾⁽⁹⁾を採用した。

(1) 大地モデル 大地の導電率が無限大である場合を考慮するため、厚さ1mmのアルミ板を用いて模擬し、線路直下には厚さ0.5mm、巾20cmの銅帯を重ねて導電性を向上させている。

(2) 線路モデル 相導体、架空地線ともに0.2mmφの軟銅線をそれぞれ大地モデルから10cmおよび11cmの高さに長さ10mにわたって施設しており、実規模では20mmφの電線を1kmにわたって施設したことになる。また、線路形態の影響を調べる際には、線路モデル中央において直角方向に両側1.2mの線路を施設し、分岐点の接続を変更して測定を行った。なお、線路モデルは、木製の板で40cm毎に支持した。以下、図1に示すように紙面上向かって左から支持柱に1号柱、2号柱、……と名前をつける。

表1より線路導体の導電率は実規模の100倍のものを使用する必要があるが、文献(7)によると、実際の実験においては導電率が小さいことによる減衰等の影響はほとんどないことが確認されている。なお、線路の両端は反射のないよう、整合抵抗で終端し、無限長の配電線を模擬した。

(3) 雷道モデル 5mmφのアクリル棒に1.8mmφのホルマール銅線を1mあたり約500回、らせん状に巻き付けたものを使用した。この雷道モデルを天井より整合抵抗を介して吊り下げ（全長5m）、雷道モデルの下端をパルス発生器に接続して、電流が大地から天井に向かって上昇するようにした。

図1 縮小モデルの概要
Fig.1 Experimental setup of scale model.

この雷道モデルを線路から水平距離で40 cm離れたところ(A点)を基準として、一部20 cm(B点)、80 cm(C点)とした場合についても測定を行った。特にことわらない限り雷道モデルの位置(落雷点)はA点とする。

(4) 帰還雷撃電流モデル 実験で使用した帰還雷撃電流モデルを図2に示す。電流の波高値は約2 A、波頭長は約12 nsである。よって、実規模では、それぞれ約40 kA、約1.2 μsとなる(電流波高値は、次に述べる避雷器モデルの制限電圧-電流特性の相似性より換算している)。

図2 帰還雷撃電流モデル
Fig. 2. Return stroke current model.

電流の進展速度については、雷道モデル上端を開放または接地して反射波の到達時間を測定することにより求めた(通常は、整合抵抗で終端している)。その結果を図3に示す。これより、約100 ns以降で終端の影響が現れており、雷道モデル長の往復10mを考慮すると、進展速度は光速のおよそ1/3となっていることが分かる。この値は、各所での雷観測結果の平均値⁽¹²⁾と概ね一致している。

図3 帰還雷撃電流モデルの進展速度の測定
Fig. 3. Measurement of velocity of return stroke current model.

(5) 避雷器モデル 縮小モデルにおいて避雷器を模擬するための条件として、次の3つが挙げられる。

- ①実験で用いている数 ns オーダーのパルス電圧に応答すること
- ②制限電圧-電流特性(V-I特性)が実際の避雷器に相似であること
- ③放電耐量が実験で想定される値以上であること

雷撃電流頻度曲線において、累積頻度10%値は約50 kAである⁽⁴⁾。このことより、50 kA程度の雷撃電流を模擬できれば、ほとんどの雷撃電流波高値に対する検討が可能であり、耐雷設計に関する基礎的検討としては十分である

と考えられる。実際に、6.6 kV系配電線で使用されている避雷器の制限電圧は約20 kVであるから、本実験で使用している帰還雷撃電流モデルの波高値が約2 Aであることを考慮すると、避雷器モデルの制限電圧 V_{RS} は次の関係を満たす必要がある。

$$\frac{20 \text{ kV}}{V_{RS}} = \frac{50 \text{ kA}}{2 \text{ A}} \dots \dots \dots (1)$$

よって、 $V_{RS} = 0.8 \text{ V}$ となる。この値に近く、かつV-I特性が実際のものと相似であるものとして、トランジスタ2SC1815のベース-エミッタ間のPN接合を双方向に並列に接続して用いた。①と②の条件については、図4に示す実験結果より、実際の避雷器に相似な特性をもっていることが分かる。③の条件についても実験での避雷器モデルの放電電流は100 mA以下であり、避雷器モデルの単体試験において問題ないことを確認している。

図4(b)より、避雷器モデルの制限電圧は約1 Vであるから、今回の縮小モデルの実験結果は、実規模モデルでの1/20000に対応する。

(a) パルス応答

(b) V-I特性

図4 避雷器モデル

Fig. 4. Surge arrester model.

<2.3> 測定方法 線路に発生する誘導電圧は、プローブ(SONYTEKTRONIX P6063B, 周波数特性200 MHz)を電磁界の影響を減らすためアルミ箔で遮蔽して測定した。また、パルス発生器(TOKIN MODEL-5556A, 波頭長1 ns)、波頭調整器(10~20 ns可変)およびデジタルオシロスコープ(SONYTEKTRONIX 2440, 周波数特性300 MHz)はできる限り雷道モデルや線路モデルから離れた。帰還雷撃電流モデルは雷道モデル立ち上がり点において電流プローブ(SONYTEK-TRONIX P6063B, 周波数特性200 MHz)を用い

で測定した。さらに、パルス発生器とオシロスコープの電源は携帯用発電機を用いて別電源とし、商用電源からの雑音や測定系相互の影響がないようにした。誘導電圧測定は、他の観測点のプロープの影響が混入しないように1地点ずつ行い、その際、雷撃電流モデルはほとんど一致することを確認した。

3. 誘導電圧の測定

本章では、前章で述べたモデルを用いて、模擬電力線に発生する誘導電圧を測定した結果について述べる。ただし、架空地線単独の誘導雷電圧の抑制効果については、横山らが詳細な検討を行っている⁽⁹⁾ので、本稿では省略する。なお、避雷器モデルは13号柱に対して左右対称に配置している。

＜3.1＞ 変移点がない場合 変移点（架空地線の接地点や避雷器モデルが施設されている箇所）がない場合の13号柱における誘導電圧の測定結果を図5に実線で示す。ただし、図中の破線は、図2の帰還雷撃電流モデルを図6に示す折れ線で近似することにより、Rusckの理論に基づく数値計算⁽¹³⁾により求めたものである。

図5 変移点がないときの誘導電圧
Fig.5. Induced voltages without transition point.

図6 帰還雷撃電流モデルの折れ線近似
Fig.6. Linear approximation of return stroke current model.

変移点がない場合（耐雷設備がない場合）には、避雷器モデルの換算比より、実規模では340 kVの電圧が配電線に発生することになる。これは、耐張がいしの50%フラッシュオーバー電圧110 kV⁽⁴⁾を大きく上回っている。このことより、配電線に耐雷設備がない場合には、誘導雷についても絶縁の脅威となることが明らかである。

ところで、図5において、第1波では計算波形は測定波形によく一致している。第2波以降については、計算波形と測定波形に違いが見られるが、その原因として、次のようなことが考えられる。

- ① 帰還雷撃電流モデルの減衰、変歪の影響
- ② 線路末端の不整合による電圧の反射の影響
- ③ 天井、側壁、外部雑音等による周囲の電磁界の影響

＜3.2＞ 耐雷設備が避雷器だけの場合

（1） 避雷器が1つだけある場合 13号柱のみに避雷器モデルを施設した場合に、線路モデルの13号柱に発生する誘導電圧の測定結果を図7に実線で示す。このとき避雷器モデルは、30Ωの抵抗で接地している。計算波形（破線）は避雷器モデルの接地線インダクタンスを0.5μHとして求めている。この値は実験で用いた接地線の実測値であるが、実規模に換算すると50μHとなる。一般的な接地線のインダクタンスは10～20μHといわれており、実験で用いた値は実規模のものより少し大きい、Rusckの理論に基づく計算結果が測定結果によく一致していることから、避雷器の模擬方法がほぼ妥当であると考えられる。

図7 13号柱のみに避雷器モデルがある場合の誘導電圧
Fig.7. Induced voltages with a surge arrester model at No.13 pole.

図5および図7を比較すると、避雷器モデルを挿入することにより誘導電圧が4分の1程度に低減されている。これより、配電線の誘導雷対策手法として避雷器を用いることは極めて有効であることが分かる。なお、図7で、誘導電圧が避雷器モデルの制限電圧1Vを越えているのは、避雷器モデルの放電電流による接地線インダクタンスおよび接地抵抗モデルにおける電圧降下によるものである。

（2） 避雷器設置間隔の影響 避雷器モデルを8柱、4柱、2柱毎に設置した場合において、避雷器の中間に落雷があった場合（13号柱に避雷器モデルが設置されていない場合）および避雷器の正面に落雷があった場合（13号柱に避雷器モデルが設置されている場合）について測定を行った。13号柱での電圧波形をそれぞれ図8(a)、図8(b)に示す。図8(a)では、誘導電圧は振動性を示している。これは、避雷器モデルが動作することにより避雷器モデル設置点におけるインピーダンスが変化し、避雷器モデル放電電流による誘導電圧とは逆極性の電圧が避雷器モデル間で往復反射することにより生じるものである。振動の周期は次式に示す変移点の間隔で決まる周波数 f 。⁽¹⁴⁾

$$f_i = c_0 / 4 \ell \quad \dots \dots (2)$$

ただし、 ℓ : 変移点間距離、 c_0 : 光速

にほぼ一致する。一方、図8(b)では、観測点が避雷器モデル設置点であるため、自己の避雷器モデルによって過電圧が抑制されるため顕著な振動性は現れていない。

(a) 避雷器中間落雷時における誘導電圧

(b) 避雷器正面落雷時における誘導電圧

図8 複数の地点で避雷器モデルがある場合の誘導電圧

Fig.8. Induced voltages with surge arrester models at several points.

13号柱（落雷点に最も近い点）からの距離に対する線路モデルに発生する誘導電圧波高値の分布を図9に示す。図9の分布⑤、⑥、⑦より、避雷器の正面に落雷があったときには避雷器モデルの設置間隔にかかわらず線路全体の電圧が抑制されている。しかしながら、分布②、③、④より、避雷器の中間に落雷があったときには、避雷器モデルの設置間隔が大きいと、落雷点近傍の電圧はほとんど抑制されないことが分かる。これは、観測点に避雷器モデルがない場合には、近傍の避雷器モデルが動作しても、その効果が観測点に現れるには、次式で表される観測点と避雷器モデル設置点間の距離による時間的な保護遅れ $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{X_A^2 + Y^2} + |X_0 - X_A| - \sqrt{X_0^2 + Y^2}}{c_0} \quad \dots \dots (3)$$

ただし、 X_0 、 X_A : 13号柱を原点としたときの観測点および避雷器モデル設置点の線路上の座標、

Y : 落雷位置と13号柱までの距離

が存在するため、この距離が大きいと、図8(a)から明らかなように、ほぼ波高値に達した時点で電圧が低下する、すなわち、避雷器モデルの効果が現れるためである。

(3) 落雷位置の影響 中間落雷（避雷器モデル8柱毎設置）時における落雷位置と線路モデルとの水平距離を

- ① 避雷器なし
② 8柱毎 (中間落雷)
③ 4柱毎 (中間落雷)
④ 2柱毎 (中間落雷)
⑤ 8柱毎 (正面落雷)
⑥ 4柱毎 (正面落雷)
⑦ 2柱毎 (正面落雷)

図9 避雷器モデルの設置間隔と電圧波高値の比較
Fig.9. Relation between interval of surge arrester models and maximum voltages.

20, 40, 80 cmと変えたときの13号柱における誘導電圧の測定結果を図10に示す。図10より、水平距離が小さくなるほど波頭長が短くなるとともに波高値も大きくなっている。これより、落雷位置と線路の距離が短いほど波頭峻度が大きくなるため、避雷器モデルの効果は小さくなっていることが分かる。

図10 落雷位置を変化させたとき誘導電圧
Fig.10. Induced voltages with various locations of return stroke current model.

(4) 接地抵抗の影響 中間落雷時において、避雷器モデルの接地抵抗を10, 30, 50, ∞ （避雷器モデルがない場合） Ω と変えたときの13号柱における誘導電圧の測定結果を図11に示す。これより、接地抵抗が小さくなると電圧の抑制効果が大きくなるとともに、振動性を示す傾向にある。また、避雷器モデルの接地抵抗が10 Ω の場合と30 Ω の場合とでは差が小さく、避雷器の接地抵抗としては、30 Ω 程度以下であればよいと考えられる。

(a) 13号柱における誘導電圧

(b) 9号柱における誘導電圧

図11 避雷器モデルの接地抵抗を変化させたときの誘導電圧

Fig.11. Induced voltages with various grounding resistances of surge arrester models.

(a) 中間落雷時における誘導電圧

(b) 正面落雷時における誘導電圧

図12 架空地線と避雷器を併設したとき誘導電圧

Fig.12. Induced voltages with ground wire and surge arrester models.

(a) 避雷器中間落雷時における誘導電圧分布

(b) 避雷器正面落雷時における誘導電圧分布

図13 架空地線モデルと避雷器モデルがある場合の電圧波高値の比較

Fig.13. Comparison of maximum voltages between lightning protections.

<3.3> 架空地線と避雷器の併用による効果 前節では耐雷設備が避雷器だけの場合について検討を行ったが、従来から、架空地線は誘導雷対策として広く用いられている^{(1)~(4)}。しかしながら、架空地線と避雷器が併設されたときの避雷器の効果についての検討は少ない^{(4)~(8)}。そこで、本稿では、縮小モデルを用いて、両者を併用した場合

の誘導電圧を測定した。13号柱における誘導電圧波形を図12に、13号柱からの距離に対する線路モデルに発生する誘導電圧波高値の分布を図13に示す。なお、架空地線モデルと避雷器モデルの接地抵抗はともに30Ωで別接地としており、架空地線は全柱で接地している。測定は避雷器モデルが8柱毎に設置されている場合と4柱毎に設置されている

場合について行った。

図13より、架空地線モデルと避雷器モデルが併用されていると、避雷器モデルのみが設置されている場合に比べて、さらに誘導電圧が50～60%に抑制されていることが分かる。従って、避雷器と架空地線を併用することは、耐雷設備を避雷器単独あるいは架空地線単独とした場合よりも誘導電圧を低減する効果があることが確認された。このことは、文献(8)において、架空地線接地間隔が避雷器設置間隔より小さい場合には、架空地線併用の効果が現れるとする結果と一致する。

<3.4> 線路形態の影響 一般の配電線路は分岐や曲がりが多くあり、また線路の末端は開放されているため、誘導電圧サージの様相は、これまで検討してきたような線路が直線状で終端が整合してある場合と異なると考えられる。文献(5)で分岐や曲がりの影響について若干の検討がなされており、線路に分岐点がある場合に誘導電圧が大きくなる場合があることが指摘されている。本節では縮小モデルを用いて、線路形態の影響について検討した結果について述べる。ただし、架空地線については考慮していない。

(1) 末端開放の影響 15号柱あるいは20号柱において線路を開放状態にしたときの誘導電圧波形を図14に、誘導電圧波高値の分布を図15に示す。ただし、避雷器モデルは開放端のみに設置した。図15より、線路末端開放時には、波高値に到達する前に末端の影響が現れる地点における誘導電圧は大きくなるが、避雷器モデルを末端に設置することにより誘導電圧が抑制されている。このことより、末端柱に避雷器を設置することは、末端付近の機材の保護に十分な効果があることが分かる。

(a) 13号柱における誘導電圧

(b) 15(20)号柱における誘導電圧

図14 片端開放線路での誘導電圧
Fig.14. Induced voltages on line with one open end.

図15 片端開放線路での誘導電圧波高値分布
Fig.15. Distribution of maximum voltages on line with one open end.

文献(5)によれば、片端開放線路における開放端誘導電圧の波高値 U_{max} は次式で表される。

$$U_{max} = \frac{30 I_0 h}{y} \left\{ 1 + \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{2(1 - \beta^2) + (\alpha + \beta)^2}} \right\}$$

$$\alpha = y / x$$

$$\beta = v / c_0$$

..... (4)

ただし、 v : 帰還雷撃電流進展速度、 I_0 : 帰還雷撃電流波高値、 h : 線路地上高、 x : 観測点の座標 (図16参照)、 y : 落雷点と線路との距離

図16 落雷位置と線路配置
Fig.16. Configuration of lightning path and line.

線路長が無限大の場合の落雷点に最も近い点 ($x = 0$) における誘導電圧の最大値 U_{0max} は(4)式に $x = 0$ を代入したものと表される⁽⁵⁾。3.1節での13号柱における測定結果を U_{0max} としたときの U_{max} の計算結果を図15に示す。これより、(4)式による計算結果は実験結果と概ね一致している。

(2) 曲がりの影響 線路モデルが直角に曲がっている場合の誘導電圧波形を図17に、波高値の分布を図18に示す。ただし、避雷器モデルは施設していない。これより、線路モデルが雷道モデル方向に曲がっている場合には最大で40%程度大きくなっている。しかしながら、

雷道モデルと反対側に曲がっている場合には、無限長線路模擬と同様の誘導電圧となった。これは、14号柱以遠において、直線状と曲がっている場合とでは雷道モデルと線路モデル間の距離が等しく、かつ終端が整合されているためであると考えられる。一方、落雷位置が線路の延長上の近傍にある場合には誘導電圧は減少している。

(a) 14号柱における誘導電圧

(b) 29(30)号柱における誘導電圧

図17 曲がりがある線路での誘導電圧
Fig.17. Induced voltages on bent line.

図18 屈曲線路および分岐線路での誘導電圧波高値分布
Fig.18. Distribution of maximum voltages on bent lines and branched lines.

曲がりのある線路においても、屈曲点における誘導電圧の最大値は(4)式で表される⁽⁶⁾。末端開放の場合と同様に U_{0max} として測定値を用いた場合の計算結果を図17に示す。これより計算結果は概ね実験結果と一致している。(4)式による計算結果と実験結果との差異は、(4)式導出の際に帰還雷撃電流はステップ波が光速より十分小さい速度で上昇するものとしており、本稿における実験の条件と少し異なることによるものと考えられる⁽⁷⁾。

(3) 分岐の影響 T字分岐および十字分岐線路について誘導電圧を測定した。ただし、避雷器モデルは施設していない。このときの電圧波高値の分布を図18に、電圧波形を図19に示す。

(a) 13号柱における誘導電圧

(b) 29(30)号柱における誘導電圧

図19 分岐線路での誘導電圧

Fig.19. Induced voltages on branched line.

分岐線路では、誘導電圧波高値は直線状の場合に比べて20%程度大きくなっている。これは、落雷点近傍の線路に分岐部分があると、本線部分と分岐部分にそれぞれ電圧が誘起され、それらが重畳するため電圧が大きくなるものと考えられる。

分岐点における誘導電圧は、各分岐線路における誘導電圧が分岐点における透過・反射によって生じたものである。よって、この場合、各分岐線路のサージインピーダンスが等しいことを考慮すると、分岐点における誘導電圧の最大値 U_{bmax} は、次式で表される。

$$U_{bmax} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{max}^i \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 U_{max}^i : i 番目の線路において、分岐点
が切り放されているとした場合の分岐点における
誘導電圧最大値 ((4)式)、 n : 分岐線路の総数

(4)、(5)式を用いて末端開放の場合と同様にして計算を行った結果を図18に示す。これより、実験結果と計算結果は概ね一致している。

4. 接地形態が誘導雷電圧に与える影響

本稿では、架空地線と避雷器とは別接地で行った。本章では、別接地と共用接地⁽⁸⁾の相異について検討を行う。

文献(8)と同様にして、架空地線および避雷器から接地に流れ込む電流 I_G 、 I_P と避雷器設置個所における電力線

電位 V_P は (6)、(7) 式で表される。ここで、記号' は、別接地における値であることを示す。ただし、接地抵抗 R はいずれも同一値であるとする。

$$\left. \begin{aligned} I_G &= \frac{\alpha U_G - \gamma (U_P - E_s)}{\alpha \beta - \gamma^2} \\ I_P &= \frac{-\gamma U_G + \beta (U_P - E_s)}{\alpha \beta - \gamma^2} \\ V_P &= E_s + R(I_G + I_P) \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} I_G' &= \frac{\alpha U_G - \delta (U_P - E_s')}{\alpha \beta - \delta^2} \\ I_P' &= \frac{-\delta U_G + \beta (U_P - E_s')}{\alpha \beta - \delta^2} \\ V_P' &= E_s' + R I_P' \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

ただし、 $\alpha = Z_P/2 + R$ 、 $\beta = Z_G/2 + R$ 、 $\gamma = Z_{PG}/2 + R$ 、 $\delta = Z_{PG}/2$ 、 Z_G 、 Z_P ：それぞれ架空地線および電力線の自己特性インピーダンス、 Z_{PG} ：架空地線-電力線間相互特性インピーダンス、 U_G 、 U_P ：それぞれ耐雷設備がないときの架空地線および電力線の電位、 E_s ：避雷器端子電圧 V_P' と V_P の比 $\zeta (= V_P'/V_P)$ は次の関係を満たす。

$$\zeta = \frac{(\alpha \beta - \delta^2) E_s' + R \{ \beta (U_P - E_s') \}}{(\alpha \beta - \gamma^2) E_s + R \{ (\beta - \gamma)(U_P - E_s) \}} * \\ * \frac{-\delta U_G}{-(\gamma - \alpha) U_G} \cdot \frac{\alpha \beta - \gamma^2}{\alpha \beta - \delta^2} \dots\dots (8)$$

図4より、ある程度避雷器の放電電流が流れると電圧の電流に対する変化は小さくなる。そこで簡単のため、 E_s' と E_s は、ほぼ等しいとし、 $\alpha \beta - \delta^2 > \alpha \beta - \gamma^2$ の関係を考慮すると、(8) 式は次のようになる。

$$\zeta < \frac{(\alpha \beta - \delta^2) E_s + R \{ \beta (U_P - E_s) - \delta U_G \}}{(\alpha \beta - \gamma^2) E_s + R \{ \beta (U_P - E_s) - \delta U_G \}} * \\ * \frac{-R \{ (Z_{PG} + 2R) U_P + Z_{PG} E_s - Z_P U_G \} / 2}{\dots\dots\dots} \dots\dots (9)$$

この実験モデルでは、 $Z_P = 318 \Omega$ 、 $Z_{PG} = 183 \Omega$ であるから、 R が数 10Ω であれば $\zeta < 1$ 、すなわち、 $V_P' < V_P$ となり、接地が独立している方が避雷器の効果が大きいことが分かる。

次に、耐雷設備が架空地線のみである場合と耐雷設備が架空地線と避雷器が併用されている場合とについて考える。この場合、 I_P および I_P' による電圧降下がないため架空地線の効果については接地形態の違いによる差異はない。よって、耐雷設備が架空地線のみである場合に対する耐雷設備が架空地線と避雷器が併用されている場合の効果についても、接地形態の違いによる差異は(9)式で評価できる。これより、別接地の場合の方が架空地線併用の効果が大きいことが分かる。

5. 結 言

本稿では、1/100の縮小モデルを用いて誘導雷に対する避雷器の効果ならびに線路形態の影響について検討を行っ

た。その結果、避雷器は誘導雷電圧抑制に大きな効果があり、架空地線と避雷器が併用されている場合には、架空地線と避雷器の相乗効果があることが確認された。また、線路が分岐していたり、屈曲している場合には、無限長を模擬した直線状の線路より誘導電圧が大きくなることを明らかにした。

避雷器の模擬については、今回はギャップレス形についてのみ検討を行ったが、ギャップ付き形についても今後検討していく必要があると考えられる。その際、ギャップ放電の模擬等、今後さらに実際の避雷器に近いモデルを検討する余地がある。しかしながら、今回の実験においてもほぼ理論どおりの結果が得られたことから、半導体素子を用いて避雷器を模擬し、誘導雷に対する避雷器の効果を実験的に検討することができることがわかった。

最後に、本研究を実施するにあたり、京都大学 林 宗明 名誉教授ならびに山本 修 助手には多大なる御指導と御援助を賜りました。また、電力中央研究所 横山 茂 博士には貴重な御意見を賜りました。実験を行うに当たっては、避雷器の模擬方法につきましては、音羽電機工業(株) 石丸 尚達氏に御助言をいただきました。また、実験装置の製作、測定には(株)関西テック 豊田 章氏に御協力をいただきました。これらの方々に謝意を表します。

(平成6年8月29日受付)

参考文献

- (1) 横山 茂：「架空配電線路の雷による被害およびその対策」，電気評論 75(6)，pp.687-692 (1990)
- (2) 配電線雷害対策専門員会：「配電線雷害対策」，電気協同研究，第40巻6号 (1985)
- (3) 耐雷設計基準委員会配電線分科会：「配電線耐雷設計基準要綱」，電中研報告，vol.13(4) (1963)
- (4) 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」，同上，175030 (1976)
- (5) S. Rusck: "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Line with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low-voltage Networks", Trans. Royal. Inst. Tech., Stockholm, Sweden (1958)
- (6) H. Koga, T. Motomitsu & M. Taguchi: "Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines", Trans. of IECE of Japan, vol. E62(4), pp.216-223 (1979)
- (7) 横山 茂：「配電線誘導雷現象の解析とその実証」，電中研総合報告123 (1986)
- (8) 諸岡泰成・横山 茂・浅川 聡：「架空地線と避雷器併用による配電線誘導雷電圧抑制効果の検討」，電学論B，vol.112(8)，pp.711-719 (1991)
- (9) S. Yokoyama, K. Yamamoto & H. Kinoshita: "Analogue Simulation of Lightning Induced Voltages and its Application for Analysis of Overhead-ground-wire

Effects", IEE Proc, vol. 132, Pt. C, No. 4, pp. 208-216 (1985)

(10) 今井康友・土橋八郎・浅川 聡・横山 茂: 「低圧配電線に生じる誘導雷過電圧の実験的検討」, 電学論B, vol. 110(8), pp. 687-695 (1990)

(11) P. A. Abetti: "Transformer Model for the Determination of Transient Voltages", AIEE Trans, vol. 72, pp. 468-480 (1953)

谷口 淳二 (正員) 1964年2月4日生。87年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在お客さま本部ネットワーク技術グループに勤務。主として、配電システムの運用および配電機材・工法の研究開発に従事。

首藤 和夫 (非会員) 1951年12月13日生。77年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年関西電力(株)入社。主として、配電設備の計画・工事・運營業務に従事。現在、大阪メディアポート(株)へ出向。

(12) 北條準一・石井 勝・河村達夫・鈴木宗福・小室 弘・塩釜 誠: 「落雷に伴う電磁界波形の特性と評価法」, 電学論B, vol. 108(4), pp. 165-172 (1988)

(13) 関岡昇三・永井敏雄・園井康夫・松原一郎: 「雷道の影響を考慮したがいし間電圧計算法」, 同上, vol. 114(6), pp. 373-380 (1994)

(14) 長岡直人・雨谷昭弘: 「2相回路モデルによる雷サージ解析」, 同上, vol. 106(5), pp. 403-410 (1986)

原 武久 (正員) 1943年2月18日生。70年3月京都大学大学院博士課程修了。同年4月同大学電気工学教室助手, 75年4月同助教授となり、現在に至る。工学博士。この間、主として電力系統におけるサージ解析, MHD発電, 電力機器の電磁界解析などの研究に従事。69年電気学会論文賞受賞。日本シミュレーション学会, エネルギー・資源学会会員。

関岡 昇三 (正員) 1963年12月30日生。86年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。87年7月(株)関西テック入社。主として、電力系統における雷サージ解析に関する研究に従事。日本大気電気学会会員。