線路分岐と配電線誘導雷現象

正員	道下 幸志	(静岡大学)
正員	石井 勝	(東京大学)
正員	本郷 保二	(東北電力)

Lightning-Induced Voltage on Power Distribution Line Having a Branch

Koji Michishita, Member (Shizuoka University), Masaru Ishii, Member (The University of Tokyo), Yasuji Hongo, Member (Tohoku Electric Power Co.)

The lightning-induced voltage on power distribution line having a branch is studied based on numerical calculations. The induced voltage is calculated by the method where the tangential component of the electric field to the line is looked upon as inducing sources, and the electric field is calculated by decomposing the lightning channel into numerous dipoles. Accuracy of the calculated result is ensured with experimental result obtained by using a reduced-scale model. The induced voltage on the distribution line turns out to be influenced by its branch, and is found to be dependent not only on the configuration of a branch line but also on the location of the lightning striking point. In most of the cases, the induced voltage increases when a branch is connected to the distribution line.

キーワード：雷，大地導電率，誘導雷サージ，水平電界，垂直電界

1. はじめに

配電線，通信線等に生じる誘導雷現象に効率的な対策を施すためには，誘導雷電圧に影響を及ぼす要因を正確に把握する必要がある。近年では，大地導電率⁽¹⁻⁸⁾や雷放電路の傾き⁽⁹⁻¹⁰⁾が誘導雷現象に及ぼす影響が注目を集めている。

大地導電率は，水平方向の電界（以下，水平電界と表記する）に大きく影響を及ぼすために，水平電界を起誘導源とする誘導雷現象も大地導電率の影響を大きく受けることが明らかにされている^(3,8)。雷道が大地に垂直で，大地導電率が有限な場合には，誘導雷電圧の雷撃点方位への依存性が大地が完全導体の場合とは大きく異なり，有限長線路の一端の誘導雷電圧は，雷撃点までの距離が等しい場合，線路の延長線上に雷撃があった場合に最も大きくなることが示されている⁽³⁾。

配電線に生じる誘導雷電圧現象は，大地導電率や雷放電路の傾きを含めた雷放電路モデルの他に，線路終端点や分岐線など線路構成要素の影響も受ける。線路の終端条件が誘導雷現象に及ぼす影響については検討が行われているものの^(7,11)，線路分岐が誘導雷現象に及ぼす影響については検討例が無く，その詳細は明らかにされていない。現実の配電線は複雑に分岐しており，分岐線をもつ配電線に生じる誘導雷現象を検討しておく事は，配電線の設計を考える上では必須である。

本論文では，水平電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析手法⁽¹²⁾により，雷道が大地に垂直な場合の配電線誘導雷現

象に線路分岐が及ぼす影響について論じる。また，計算結果の妥当性について，縮小モデルを用いた実験結果と比較することにより示す。

2. 解析手法

〈2.1〉 電界計算手法 電界の計算に当たっては，雷放電路を微小な双極子に分割し，各双極子の複素振幅を雷放電路モデルに従って計算する。次に，各双極子の生じる電界をNorton解⁽¹³⁾を用いて求め，それらの和をとる事により空間の任意の点における電界を周波数領域で求め，さらにそれらを逆フーリエ変換して時間領域の解を得た⁽³⁾。電界の計算手法は文献⁽³⁾と全く同一である。電界の計算例については文献⁽³⁾を参照されたい。

〈2.2〉 誘導雷電圧計算手法 誘導雷電圧の計算は，水平電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析手法により行った。大地に水平な線路には水平電界が進行波電流を誘起し，分圧器接続点など大地に垂直な導体には垂直電界が進行波電流を誘起する⁽¹⁴⁾。従って，計算では全線路にわたっての線路の接線方向の電界の計算が必要となり，さらに誘導雷電圧を求める際には大地に水平な線路であっても垂直電界の計算が必要となる。本手法により計算される分岐のない単導線路に生じる誘導雷電圧波形が，大地導電率や雷放電路の傾きにかかわらず妥当である事は，縮小モデルを用いた実験結果と比較することにより確かめられている^(5,7,8,10)。

分岐線が基幹配電線に垂直に接続されている場合には，分岐線および基幹配電線に生じた進行波は，線路分岐点に

おいてのみ結合する。このため、線路分岐が配電線誘導雷電圧に及ぼす影響は、線路分岐点に流入する進行波電流の和が0であるという条件で計算することができる。

このほかの誘導雷電圧の計算手法は、文献(7)と全く同一である。

3. 実験との比較による計算結果の妥当性の検証

〈3.1〉 縮小モデル実験 実験は、東北電力仙台中山野球グラウンドにおいて行った。

図1に模擬雷撃点、模擬分岐線、及び模擬基幹配電線の平面図を示す。縮小率は1/20とし、モデル基幹配電線は、地上高10m、直径10mm、長さ500m相当、実高、実径、実長は各々0.5m、0.5mm、25mである。モデル分岐線は地上高10m、直径10mm、長さ100m相当であり、実長は5mである。模擬分岐線的一端は模擬基幹配電線にほぼ直角に、その中間点に接続し、模擬分岐線路のもう一端と、模擬基幹配電線の両端は、400Ωの抵抗で終端した。これらの終端点における接地抵抗は約40Ωである。分岐線の有無、及び線路分岐点位置が基幹配電線誘導雷電圧に及ぼす影響を検討するために、図1の例の他に、分岐線が接続されていない場合と、長さ5mの分岐線が図1のR点から2.5mの点で模擬基幹配電線に直角に接続されている場合の実験も行った。いずれの場合にも、誘導電圧の測定は、入力容量約10pFの高インピーダンスプローブを用いてR点で行った。電圧プローブの周波数帯域はDC~100MHzである。

図1 模擬雷撃点と模擬配電線の平面図

Fig.1. Plan view of a simulated lightning striking point and a simulated overhead wire with a branch line at the center.

大地に垂直な模擬雷道は、文献(7)と同様に、長さ2mのベーク棒に螺旋状に巻きつけた直径0.5mmの銅線により模擬した。このベーク棒を12本連結し、一端を大地から2cm程度浮かせて固定し、もう一端は気球によりつりさげた。パルス電流は、大地面に近い一端からもう一端に向かって進行するように設定されている。模擬雷道の上端は開放端となっており、雷道上を進行した電流はここで反射される。模擬雷道電流波形は、8.5kHz~100MHzの周波数帯域を持つ電流プローブを用いて大地面付近で測定した。

得られた模擬雷道電流波形、およびモデル配電線誘導電圧波形は、DC~30MHzの周波数帯域を持つオプトラリンクにより測定端まで転送され、8ビットの分解能を持つディジタルによりサンプル時間間隔5nsで記録される。

〈3.2〉 実験結果と計算結果の比較 誘導電圧の計算には、模擬雷道電流の測定結果^(7,15)を折れ線近似したものを用いた。

図2に計算に用いた電流波形を示す。図2に示す模擬雷電流波形が大地から垂直方向に120m/μs^(7,15)で減衰なく伝搬すると仮定して誘導電圧の計算を行い、模擬雷電流が模擬雷道の上端に達する以前の波形を検討対象とした。

図2 解析に用いた模擬雷道電流波形

Fig. 2. Current waveform used in the analysis.

(a) 分岐線がない場合の誘導雷電圧波形

(b) 分岐点が線路中間点にある場合の誘導雷電圧波形

(c) 分岐点がR点から2.5mにある場合の誘導雷電圧波形

図3 線路分岐がない場合(a)、および分岐線が線路右端(R点)から12.5m(b)及び2.5m(c)の位置に接続されている場合の線路右端の誘導電圧波形測定結果と計算結果(大地導電率 σ : 0.03S/m)

Fig. 3. Measured induced voltage waveform at Point R of the trunk line without a branch(a), and those influenced by the 5m-long branch line at 12.5m(b) and 2.5m(c) from Point R, together with calculated waveforms for the ground conductivity of 0.03S/m.

測定点近傍の誘導雷現象に影響を及ぼす周波数帯域の大地導電率は 0.03S/m と推定されている⁽⁸⁾。

図3(a)に分岐線がない場合、図3(b)、(c)に長さ5mの分岐線がR点から12.5m及び2.5mの模擬配電線上の点に直角に接続された場合に、線路右端で測定された誘導電圧波形、および大地導電率を 0.03S/m として計算した波形を各々示す。電圧プローブの入力容量や接地抵抗を考慮して誘導電圧の計算を行い、測定結果との比較を容易にするために、測定系の周波数帯域を考慮した補正を行っている。図3(b)～(c)の分岐線がある場合の誘導電圧は、図3(a)の分岐線がない場合の測定結果と比較して正の誘導電圧が重畳している。分岐線がR点の誘導電圧に及ぼす影響は、それが線路右端に近い点に接続されている場合の方が若干大きい。実測されたピーク値で比較すると、図3(b)、(c)では、ない場合に比べてそれぞれ78%、74%、計算結果ではこれらの値がそれぞれ74%、70%であり、実測結果と計算結果のピーク値の相違は5%程度である。図3(a)～(c)の誘導電圧波形の波尾部分については両者に相違が認められる。これは、場所により異なる大地導電率⁽⁷⁾や大地導電率の周波数依存性のために、水平電界と模擬線路の進行波が影響を受け、この影響が波尾部分において大きかったためと考えられる。

4. 解析モデル

図4に従って、基幹配電線と分岐線および雷撃点との相対的な位置関係を表記する。長さ500m、地上高10m、直径5mmの基幹配電線はx軸上に位置し、線路の両端はサージインピーダンス(540Ω)で終端されている。基幹配電線と直角に接続された分岐線の地上高および直径は基幹配電線と同一とし、長さを l_b 、基幹配電線との接続位置を基幹配電線

図4 基幹配電線と分岐線及び雷撃点の位置関係
Fig. 4. Arrangement of the overhead wire with a branch, and the lightning striking points.

図5 仮定した帰還雷撃電流波形
Fig. 5 Assumed return-stroke current waveform.

左端からの距離 x_b で表す。実際の配電系統においては分岐線の一端は実質的に開放端とみなせることから、S点が開放の場合の誘導雷電圧の計算を行った。

図4のF点(基幹配電線の延長上の点)およびG点(基幹配電線の線路両端からの距離が等しい点)は雷撃点を表し、基幹配電線との距離を d で表す。帰還雷撃電流波形は図5に示す三角波で近似し、雷電流は大地面から垂直方向に $100\text{m}/\mu\text{s}$ で減衰なく伝搬するものと仮定した。

5. 分岐のある配電線に生じる誘導雷電圧波形の特徴

<5.1> 分岐線が誘導雷電圧に及ぼす影響の分類 帰還雷撃により分岐線上に誘起された進行波は、分岐点より基幹配電線に進入する。この進行波は雷撃点と分岐線との相対的な位置関係、分岐線路長、大地導電率、線路終端条件の影響を受ける。また、分岐点では線路定数の不連続に起因した反射が発生するため、基幹配電線上を伝搬する進行波も、分岐線接続点位置の影響を受ける。前述したように、分岐線の一端は実質的に開放端であるため、分岐線では多重反射が発生する。この反射は、分岐線が基幹配電線上の誘導雷に及ぼす影響を一層複雑なものとする。

結局、分岐線が基幹配電線誘導雷電圧波形に及ぼす影響は分岐点から基幹配電線に侵入する進行波によって表され、影響の度合はこの進行波の大きさと到来時間遅れに大きく依存する。

<5.2> 重畳する電圧波形の到来時間遅れの影響 図6に、雷撃点が図3のFで、雷撃点と基幹配電線との距離 d が100m、大地導電率が 1mS/m の場合のP点の誘導雷電圧波形を示す。

図6 分岐点が線路左端から50m(a)及び350m(b)の場合のP点の誘導雷電圧波形
(雷撃点位置: F, $d=100\text{m}$, $\sigma=1\text{mS/m}$)

Fig. 6. Lightning-induced voltage waveforms at Point P of the trunk line having a branch line at $x_b=50\text{m}$ (a) and at $x_b=350\text{m}$ (b), associated with a return stroke at Point F of 100m away. The ground conductivity is 1mS/m .

線路分岐点位置は線路左端から50mおよび350mの場合について、分岐線路長が100m、及び500mの時の波形を、分岐線がない場合と共に示す。

分岐線接続点がP点近傍の場合には、注入される進行波電圧の極性は正で、分岐線がない場合のP点の誘導雷電圧波形にほぼ時間遅れなく重畳するため、図6(a)の計算例のように誘導雷電圧波形は単一のピークをもつ。雷撃点がF点の場合には、分岐線の影響がP点に到来するには、電磁波がP点から線路分岐点まで伝搬する時間の2倍の時間が必要となる。このため、分岐線接続点がP点から離れている場合には、P点の誘導雷電圧波形は複数のピークをもち、図6(b)の場合には、遅れて発生する2番目のピークが最初のピークよりも大きくなっている。いずれの場合にも分岐線路長が長くなると、分岐線があるために重畳する進行波の波高値は大きくなっている。

〈5.3〉 重畳する進行波の強度 図7に、雷撃点が図4のGで基幹配電線との距離 d が2kmの場合に、分岐線が接続された基幹配電線路中間点(Q点)における誘導雷電圧波形を示す。大地導電率は、図7(a)では 1mS/m 、図7(b)では ∞ である。

図7の場合の基幹配電線と雷撃点の位置関係では、分岐線がない場合の誘導雷電圧波形への大地導電率の影響は極めて小さい。これは、大地導電率の影響を大きく受ける水平電界が基幹配電線の誘導雷電圧発生にほとんど寄与していないためである。雷撃点と観測点との距離が2kmと大きい

(a) 大地導電率: 1mS/m .

(b) 大地導電率: ∞

図7 大地導電率が 1mS/m (a)および ∞ (b)の場合のQ点の誘導雷電圧波形(雷撃点位置: G, $d=2\text{km}$, $x_b=250\text{m}$)

Fig. 7. Lightning-induced voltage waveforms at Point Q of the trunk line having a branch line at $x_b=250\text{m}$, associated with a return stroke at Point G of 2km away. The ground conductivity is 1mS/m (a) and ∞ (b), respectively.

場合には、水平電界において、有限な大地導電率のために発生する水平電界成分が支配的となっている⁽³⁾。この成分は、分岐線上では強度の大きい進行波を誘起するために、分岐線が長い場合の図7の波形は、大地導電率の影響を大きく受けている。

6. 分岐線が基幹配電線誘導雷電圧に及ぼす影響

図8に雷撃点が図4のF点の場合の、P点の誘導雷電圧の分岐線接続位置及び分岐線路長への依存性を示す。

分岐線が接続された場合には、P点の誘導雷電圧は増大し、分岐線が長いほどこの傾向は顕著となる。 $d=100\text{m}$ で l_b が500m以上の場合には、S点からの反射波が電圧波形のピークよりも遅れてP点に到達するために、P点の誘導雷電圧波高値には影響しなくなる。この時の誘導雷電圧は分岐線がない場合と比較して最大30%程度増大する。

l_b が500m以上で大地導電率が 1mS/m の場合には、 $d=100\text{m}$ ではP点の誘導雷電圧は分岐点がP点に近づくほど、 $d=2\text{km}$ では線路分岐点がR点に近づくほど増大する。 $d=100\text{m}$ の場合には大地が完全導体の場合にも発生する水平電界成分が、 $d=2\text{km}$ の場合には大地導電率が有限であるために発生する水

(a) $d=100\text{m}$

(b) $d=2\text{km}$

図8 雷撃点までの距離が100m(a)及び2km(b)の場合のP点の誘導雷電圧波高値の分岐線路長および分岐点位置への依存性(雷撃点位置: F)

Fig. 8. Lightning-induced voltage at Point P of the overhead wire having a branch, associated with a return stroke at Point F at the distance of 100m (a) and 2km (b), respectively.

平電界成分が、観測される水平電界において支配的となり、それぞれの成分による誘導雷電圧の発生様相が異なることが、その原因である。 $d=2\text{km}$ でも大地導電率が大きくなると、 $d=100\text{m}$ のときと相反するような傾向は見られない。

図9に、雷撃点が図4のG点で雷撃点までの距離が 100m の場合の、基幹配電線路中間点(Q点)の誘導雷電圧の分岐線路長及び分岐点位置への依存性を示す。この場合には、線路分岐がQ点の誘導雷現象に及ぼす影響は小さく、大地導電率にかかわらずその影響の度合は最大10%程度である。

図9では、分岐点がQ点近傍で分岐線が短い場合に、誘導雷電圧はわずかに大きくなっている。これは分岐線末端における反射のためであり、分岐線が長くなり反射のQ点への到来が遅れた場合には、Q点の誘導雷電圧は若干減小している。

図10に、他の条件が図9と同じで、雷撃点までの距離が

2km の場合の基幹配電線路中間点(Q点)の誘導雷電圧の分岐線路長及び分岐点位置への依存性を示す。

分岐線が接続された場合にはQ点の誘導雷電圧は増大し、この傾向は分岐点がQ点に近いほど顕著となる。また、大地導電率が小さいほど、分岐線がQ点の誘導雷電圧に及ぼす影響が大きくなっている。これは、分岐線上で大地導電率が有限であるために発生する水平電界成分により誘起される進行波の影響が大きいためであり、 $\sigma=1\text{mS/m}$ で分岐点がQ点($x_b=250\text{m}$)の場合には、分岐線路長が長いほどQ点の誘導雷電圧は上昇し、上昇分は l_b が 500m で40%程度、 l_b が 1km で50%程度となる。

7. 結言

水平電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析手法により、長さ 500m の基幹配電線に直角に接続された分岐線が、基幹

(a) 大地導電率 (σ) : 1mS/m

(b) 大地導電率 (σ) : 10mS/m

(c) 大地導電率 (σ) : ∞

図9 大地導電率が 1mS/m (a), 10mS/m (b), ∞ (c)の場合のQ点の誘導雷電圧波高値の分岐線路長及び分岐点位置への依存性 (雷撃点位置: G, $d=100\text{m}$)

Fig. 9 Lightning-induced voltage at Point Q of the overhead wire having a branch, associated with a return stroke at Point G of 100m away.

(a) $\sigma = 1\text{mS/m}$

(b) $\sigma = 10\text{mS/m}$

(c) $\sigma = \infty$

図10 大地導電率が 1mS/m (a), 10mS/m (b), ∞ (c)の場合のQ点の誘導雷電圧波高値の分岐線路長及び分岐点位置への依存性 (雷撃点位置: G, $d=2\text{km}$)

Fig. 10 Lightning-induced voltage at Point Q of the overhead wire having a branch, associated with a return stroke at Point G at the distance of 2km .

配電線誘導雷電圧波形に及ぼす影響を検討した結果以下の知見が得られた。

- (1) 分岐線をもつ基幹配電線上に生じる誘導雷電圧の計算結果の妥当性をモデル実験結果との比較により示した。
- (2) 分岐線が基幹配電線に接続された場合には、分岐線上で誘起された進行波が基幹配電線に流入し、線路端および分岐点では進行波の反射が発生する。分岐線が基幹配電線誘導雷電圧に及ぼす影響は、これらの要因により決定される進行波の大きさと時間遅れに依存する事を明らかにした。
- (3) 線路分岐が誘導雷電圧に及ぼす影響は配電線路と雷撃点の相対的な位置関係に大きく依存する事が明らかになった。雷撃点位置が基幹配電線の延長方向にある場合には、分岐線路長が長いほど分岐線が誘導雷電圧に及ぼす影響は大きく、雷撃点と線路との距離が100mで分岐線路長が500m以上の場合には雷撃点に近い線路終端点の誘導雷電圧は最大30%程度上昇する。
- (4) 雷撃点が線路中間点付近にある場合には、分岐線の影響は、雷撃点が遠方にある方が顕著である。この場合の分岐線の影響は、大地導電率と分岐線路長に大きく依存し、大地導電率が1mS/mで分岐線が500m以上の場合には、線路中間点の誘導雷電圧は40%~50%程度上昇する事が明らかになった。

(平成7年11月28日受付, 同8年1月18日再受付)

文献

- (1) H. Koga, T. Motomitsu, M. Taguchi, "Lightning surge waves induced on overhead lines", Trans. IECE of Japan, E62, 216~223 (1980-4)
- (2) M. J. Master and M. A. Uman, "Lightning induced voltages on power lines: Theory", IEEE Trans., PAS-103, 2502~2518 (1984-9)
- (3) 道下幸志, 石井勝, 河村達雄:「大地導電率の配電線誘導雷電圧波形への影響」, 電学論B, 112, 245~251(平4-3)
- (4) 今井康友, 道下幸志, 石井勝, 河村達雄:「有限な大地導電率を考慮した多導体系配電線の誘導雷現象解析」, 電学論B, 113, 499~508(平5-5)
- (5) M. Ishii, K. Michishita, Y. Hongo, S. Oguma, "Lightning-induced voltage on an overhead wire dependent on ground conductivity", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-9, 109~118 (1994-1)
- (6) A. Zeddam & P. Degauque, "Current and voltage induced on telecommunication cables by a lightning stroke", Electromagnetics, 7, 541~564 (1987)
- (7) 道下幸志, 石井勝, 本郷保二:「単導線路に生じる誘導雷の縮小モデル実験」, 電学論B, 114, 859~865(平6-9)
- (8) 道下幸志, 石井勝, 本郷保二:「配電線誘導雷現象に大地導電率が及ぼす影響のモデル実験—雷道が傾いている場合—」, 電学論B, 115, 964~969(平7-8)
- (9) A. Sakakibara, "Calculation of induced voltages on overhead lines caused by inclined lightning strokes", IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-4,

683~693 (1989-1)

- (10) 道下幸志, 石井勝:「配電線誘導雷電圧への雷放電路の傾きの影響—大地が完全導体の場合—」, 電学論B, 112, 500~506(平4-6)
- (11) M. Rubinstein, A. Y. Tzeng, M. A. Uman, P. J. Medelius, and E. M. Thomson, "An experimental test of a theory of lightning-induced voltage on an overhead wire", IEEE Trans., EMC-31, 376~383 (1989-9).
- (12) 道下幸志, 石井勝, 河村達雄:「水平方向電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析法」, 電学論B, 111, 628~634(平3-6)
- (13) K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere Part II", Proc. IRE, 25, 1203~1236 (1937-9)
- (14) A. K. Agrawal, H. J. Price, S. H. Gurbaxiani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field", IEEE Trans., EMC-22, 119~129 (1980-5)
- (15) 本郷保二, 道下幸志, 石井勝:「配電線誘導雷電圧の分布—大地導電率を考慮した解析—」, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会(論文I), No. 37

道下 幸志

(正員) 1962年9月24日生。1991年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年4月静岡大学助手, 1994年4月同助教授, 現在に至る。主として, 雷に起因する環境電磁工学に関する研究に従事。IEEE, AGU Member.

石井 勝

(正員) 1949年3月11日生。1976年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年4月東京大学助教授, 生産技術研究所勤務, 1992年同教授, 現在に至る。主として系統絶縁, 自然雷, 高電圧現象の測定に関する研究に従事。1989, 1990年度電気学会東京支部評議員。IEEE Senior Member, AGU Member.

本郷 保二

(正員) 1957年6月22日生。1981年横浜国立大学工学部電気工学科卒業。同年4月東北電力(株)入社。現在, 同社研究開発センターに勤務。主として, 配電線雷過電圧発生現象に関する研究に従事。