Evaluation and Application of Overvoltage into Communication Equipment due to Potential Rise at Earthing Terminal of Distribution Line Induced by Lightning Surge

Katsuji Ito Member (Yokohama National University)

Yasuo Hirose Member (Yokohama National University)

Keywords : overvoltage, communication equipment, potential rise, earthing terminal, surge current, discharge current, distribution arrester

Distribution system supplies energy to communication system with pole-mounted compact source equipment.

Harmful breakdown troubles by surge currents due to thunderstorm lightnings often occur in communication system equipment like CATV systems installed together with power distribution systems. This is mainly because over voltages to the equipment due to lightnings, which are usually taken into account for power equipment when the power distribution system is designed, have not been known precisely for communication system, and hence, proper protection methods have not been taken.

This paper describes a quantitative evaluation method of these overvoltages caused by lightning surge currents and especially those due to discharge of power distribution system arresters, and possible protection means of the communication equipment against them.

The origin and natures of the surge currents of distribution system, their invading route into power and communication system, and transmission behaviors of surge current in power

system and communication system are studied, and then, the main circuit components affecting overvoltages such as earth impedance, low voltage transmission line, communication power transformer, and coaxial cable for signal and power transmission are also studied at the point of surge current flow.

Then, circuit model of power system and communication system united in a string is proposed for surge current, and transient analyses are performed to evaluate the overvoltages. The analyses have revealed the mechanism of the overvoltages of all equipments tied in the same earthing of the communication system, and that harmful and appreciable overvoltages are given to the communication equipments.

Application of the obtained analysis results in the difference of the field fault data of communication equipment, and possible protection methods of them are also discussed, and hence, the usefulness of the present method of evaluating overvoltages is shown.

サージ電流による配電線の接地点電位上昇に伴う
通信機器への過電圧の評価と応用

正 員 伊東 勝二* 正 員 廣瀬 靖雄*

Evaluation and Application of Overvoltage into Communication Equipment Due to Potential Rise at Earthing Terminal of Distribution Line Induced by Lightning Surge

Katsuji Ito, Member, Yasuo Hirose, Member

Overvoltage induced by surge currents due to thunderstorm lightnings causes harmful breakdown troubles of CATV communication equipment installed in and with power distribution systems. In this paper, the origin and natures of surge currents, their invading route into the system, and the system components such as earth impedances affecting over voltages are studied. Transient analyses are then performed using an equivalent circuit to evaluate over voltages. Application of the obtained results to the field fault data of communication equipment and possible protection method of them are discussed.

キーワード：通信機器の過電圧、通信用電源、接地点電位の上昇、配電用避雷器、放電電流、サージ電流

Keywords : overvoltage, communication equipment, potential rise, earthing terminal, surge current, discharge current, distribution arrester

1. はじめに

架空配電線から電柱に設置した通信用電源装置に直接受電する CATV 設備などの場合、雷害関係の故障がなかなか減らなかった⁽¹⁾。関東一円に亘る 10 万軒を超える CATV の顧客に配信する通信設備の故障データを筆者の一人がかつて調べた。これらのデータの中で、作業など人による原因の故障を除くと、故障データのうち、明らかに雷害と考えられるもの、その可能性があると保守員が判断したものが多かった。通信装置にはサージ対策として装置内の相導体間などにサージ保護装置などを付けてはいるが、サージにより生ずる過電圧が明らかではないためその効果には不明な点が多く、この対策が機器が使用されるシステムの規模、場所、分岐の有無などによる使用状況を何処まで考慮したものか明確では無かった。

本論文では、配電系では問題とされてこなかった避雷器の放電電流・続流の影響も考慮し、電柱に併設した設備から電力供給を受ける通信用機器に雷サージが原因でかかる過電圧の定量的評価を行い保護方針を得ることを目的として検討を行うことにした。この場合、通信用増幅器にかかる過電圧は、機器の電気的な特性の差異よりも、電源側の回路構成が大きな影響を与えるため、これを中心に扱うこととする。まず、雷サージがどんな経路で通信装置へ侵入

するのか、どのようなサージ源が通信系で問題となるのか、またその性質と伝送特性について検討した。さらに、サージとそれに含まれる主要な周波数成分も考慮しつつ、過電圧に大きな影響を与えると考えられる接地インピーダンス、通信用電源変圧器、信号伝送と電力伝送を兼ねる通信

HV Tr : High Voltage Transformer
 COMM PWR Tr : Communication Power Transformer
 Zop : Power Line Earth Impedance ($\leq$ some 10 Ω)
 Zc : Amplifier Earth Impedance
 Zpc: Impedance between Zop and Zo
 Arc and Va: Communication Arrester and Varister

図1 配電線から通信装置へのサージ侵入経路の概念図

Fig. 1. Schematic diagram of surge invasion pathway into communication equipment from distribution lines

* 横浜国立大学
〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Hirose Labs., Yokohama National University
79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

機器の入力インピーダンス 75Ω の同軸線路などの主要構成要素について検討した。次いで、通信システム全体の等価回路を考え、過渡解析により過電圧を定量的に評価し、その性質を明らかにした。また、この結果をもとに、フィールドテスト結果の検討、通信装置の保護対策についても述べた。

2. 配電系から通信装置への電力供給とサージ侵入経路

図 1 に配電系とそれに接続された通信系システムの主要部分を示す。電力は高圧配電線から避雷器 LA で保護された高圧変圧器により低圧配電線に給電され、さらに、通信用電源変圧器を介して通信信号伝送と兼用の同軸線路により CATV 中継増幅器に給電される。接地系については、高圧配電線の架空地線は電柱の接地線を通して、変圧器の低圧側配電線の中性線や架空共同地線による避雷器の接地線とも接続された P 点で、接地インピーダンス Z_{op} を介して接地されている。低圧配電線に DV 線（引込用ビニル絶縁電線）で接続された通信用電源変圧器は接地インピーダンス Z_0 を介して、また同軸線路の外部導体と接続されている増幅器の接地筐体はインピーダンス Z_c を介して接地されている。

雷等によって生じたサージの配電系から通信系への伝搬経路は次のように考えられる。

サージが架空地線や避雷器 LA からサージ電流として配電柱の接地線を通り、その接地インピーダンス Z_{op} に流れて大地 E に至ると、接地点 P の電位が上昇する。これに伴いこの点に接続されている低圧配電線と通信用電源変圧器の一次側の電位が上昇する。これにより $400\sim 500V$ 程度でも作動する過電圧保護用の通信用避雷器 Arc やバリスター Va が極く短時間で通電、短絡し、低圧配電線の中性線が通信用電源装置の接地インピーダンス Z_0 に A 点でつながり、さらに増幅器に至る同軸線路の接地された外部導体系ともつながった状態になる。この結果、サージによる A 点の電位上昇が同軸線路を通して伝わり、CATV 増幅器等の通信設備に過電圧がかかり様々な障害が起きる。以下このような事象を雷サージ電流によって生ずる過電圧と呼ぶ。

3. 配電系に流れるサージ電流とサージ電圧について

配電系から通信系に流れる雷サージには上記のサージ電流と以下に述べるサージ電圧がある。雷撃に起因するサージ電流には、直撃雷により架空地線から接地線に直接流れるものと、誘導雷により高圧配電線から変圧器の避雷器を通り接地線に流れる二つがある。サージ電圧は落雷による電磁誘導によって配電線に誘起されるもので、配電用変圧器などを経て通信系に伝わる。

〈3・1〉 高圧配電系に流れるサージ電流とサージ電圧

直撃雷による架空地線からのサージ電流は日本における推奨の雷電流波高値累積頻度分布によると 50% 値が $26kA$ にもなる電流であり⁽²⁾、通信機器類に決定的な損傷を与える

図 2 サージ電流の波形

Fig. 2. Wave form of surge current

が発生頻度は少ない。これに対し、誘導雷により高圧配電系の変圧器の避雷器 LA が放電することによるサージ電流は、後述のように大きさが一桁程度小さいが発生頻度が高く通信機器をしばしば損傷する。本論文ではこのサージ電流によって生ずる過電圧を中心に扱うこととする。

このサージ電流波形としては図 2 のものがよく用いられる。サージ電流による過電圧の評価には、立上り時間 t_r とピーク値 I_m が、エネルギーを考える場合には I_m と継続時間 t_f が重要である。以下の検討では、電気学会の文献(3)「避雷器とその適用」に示される避雷器の放電電流・続流の波形に相当する t_r と t_f が $1.2\times 50\mu s$ の波形を主として用いる。また、遠方雷などより避雷器を経由せずに、架空地線から電柱の接地線を経て、 Z_{op} に流れるサージ電流の波形で、国際電気標準会議 IEC⁽⁴⁾および電気学会の電気工学ハンドブック⁽⁴⁾に在るやや鈍ったエネルギーの小さな $8\times 20\mu s$ 、エネルギーの大きな $10\times 350\mu s$ の 2 つの波形も、上記の避雷器の電流の場合の効果と比較するため使用する。

サージ電流 I_{op} のピーク値 I_m については、日本での以前の実測調査である電気学会技術報告第 33 号⁽⁵⁾によれば、避雷器が動作したときの放電電流波高値とその避雷器の台数の割合が知られており、 $400A$ が約 50% 、 $950A$ が約 20% 、 $2800A$ 程度が 5% とする電流値をとる。この放電電流は、金属酸化物の特性をもつ避雷器に課電される電圧が規定値に達したときこれを通して放電するもので、この電流値は図 2 のように急激かつ大幅に変化するため、通常衝撃電流とも呼ばれ⁽³⁾、一般に電流源と考えられている。

以上から、このサージ電流源 I_{op} のピーク値 I_m としては、電流値 $400A$ 、 $950A$ 、 $2800A$ を以下の検討に用いる。

サージ電圧は、配電線の装柱設備が耐えられる電圧として伝播する。 $6.6kV$ 配電線につながる機器の雷インパルス耐電圧は $60kV$ であり、通常この電圧値を配電線側の誘起電圧と考えることにしている⁽⁶⁾。このサージ電圧の波形は図 2 に示す、急峻な立上りの t_r と t_f が $1.2\times 50\mu s$ の波形が使用される。

〈3・2〉 低圧配電系に流れるサージ電流 配電系では問題ないとされる誘導雷などにより高圧配電系の変圧器の避雷器が放電することによる電流や続流による上述のサージ電流の一部が、低圧配電系を経て通信用電源にも侵入し、通信装置故障の主因となる。頻繁に発生するため、このサージに対して、汎用通信機器の使用システム中での設置位置や線路の分岐数を考慮した適切な過電圧保護対策が必要

図3 通信用変圧器の等価回路
Fig. 3. Equiv circuit of comm. transformer

になる。

〈3・3〉 配電系に現れるサージ電圧と伝達特性 前述の配電線側で誘起されたサージ電圧が高圧配電線用変圧器、低圧配電線を介して給電される通信用変圧器を通して通信側へどの程度移行するかを、実験結果⁽⁷⁾に基づき検討する。

(1) 高圧配電用変圧器のサージ電圧伝達特性

インパルス電圧を用いた実験により次のことが確かめられている。高圧配電用変圧器は、1次側に60kVのサージ電圧が加わると、2次側の相間には殆ど移行しないで、相一大地間に移行するが、その大きさは高々1kV程度であることが知られている⁽⁷⁾。

(2) 通信用電源変圧器のサージ電圧伝達特性

次に、低圧配電線から通信用電源に加わるサージ電圧を考える。数百VA程度の通信用電源変圧器の1次、2次間に遮蔽層がある場合は殆ど移行せず、無い場合は、サージ電圧の移行は変圧器の浮遊静電容量で殆ど決まる。状況にもよるが、図3に示すように、この静電容量は1次側に C_1 として100pF程度、1次側と2次側間に C_{12} として200pF程度、2次側に C_2 として200pF程度である。この場合、サージ電圧の1/2程度が1次側から2次側へ伝わるが、通信装置の最も大きくなる過電圧の検討では、サージ電圧の影響はサージ電流の影響に較べて普通充分小さくなり、大まかな検討を主眼にして、以降はサージ電圧の影響を省くこととした。

4. 通信用電源装置に流れるサージ電流と接地インピーダンス

配電系から通信系に至るサージ電流の経路と大きさは次の通りである。

〈4・1〉 サージ電流が流れる経路と回路素子 図4に2章で述べたサージ電流が流れる主要な経路を示した。避雷器の放電や続流であるサージ電流 I_{op} の大部分は主に配電系接地インピーダンス Z_{op} を通り大地深層Eに流れる。 Z_{op} が10Ω前後のとき、サージ電流のピーク値が400A程度のものが流れると接地点Pの電位上昇は4000V程度にもなる。このP点は低圧配電線の中性線と接続されており、この中性線、引込み線などのインピーダンス Z_{pc} を通して通信用電源装置の接地インピーダンス Z_0 とA点で繋がる。従って、サージ電流 I_{op} の一部 I_0 は Z_{pc} を通して、さらに主に通信系接地インピーダンス Z_0 を通して大地深層Eに流れる。

〈4・2〉 接地インピーダンス 敷設環境が通信系と殆

図4 サージ電流 I_{op} と通信系サージ電流 I_0
Fig. 4. Relation between surge current I_{op} and I_0

図5 通信用電源装置の接地インピーダンス
Fig. 5. Earth impedance of comm. source equipment

ど同じである配電系の接地インピーダンスを通信用電源装置に適用する。サージへの使用周波数限界はあろうが、図5に示す容量性、平たん性、誘導性の3種類が知られている。

(a) 容量性回路：静電容量 C_0 と抵抗 R_c との並列回路に直列回路 R_1 が接続された等価回路であり、配電系で多い。代表例は、 $C_0=0.025 \times 10^{-6}F$ 、 $R_c=40\Omega$ 、 $R_1=30\Omega$ ⁽⁸⁾である。

(b) 平たん性回路：抵抗 R_0 で表される場合で、代表例は、 $R_0=10\Omega$ 、 30Ω 、 100Ω などがある。

(c) 誘導性回路：インダクタンス L_0 と抵抗 R_L との並列回路に直列抵抗 R_2 が接続された等価回路で、変電所などの設備で多いとされている。代表例は、 $L_0=40 \times 10^{-6}H$ 、 $R_L=40\Omega$ 、 $R_2=8\Omega$ ⁽⁸⁾である。

(1) 配電系接地インピーダンス

配電用避雷器の接地は、避雷器単独の場合は10Ω以下と定められているが、接地抵抗値を低くすることはそれ程容易なことではなく、配電用変圧器などと近接して敷設する場合には共同接地することが許されている。この場合、配電系の接地インピーダンス Z_{op} は、避雷器、変圧器などの接地抵抗の影響を加味したものとなる。

ところで、過渡解析に必要な上記の10Ω程度の低い接地インピーダンスの例が殆どみられない。また、さらに低い値の局舎や鉄塔塔脚の例が報告されている程度で、地中状況も分かっていないことが多い。そのため、配電系の接地インピーダンス Z_{op} は従来知られている接地抵抗を用いて解析を行う。配電で用いられる避雷器の接地抵抗、変圧器と架空共同地線の接地抵抗の組み合わせには(30Ω、85Ω)、

(75Ω, 20Ω) などが多く、これらを合成した Z_{op} は各々 22Ω, 16Ω 程度となるので、以下では図 1 に示す Z_{op} を 16Ω とする。

(2) 通信用機器の接地インピーダンス

通信用電源装置に施される接地は、電柱に設置した場合の機器用であり、基礎のしっかりした局舎の場合の接地と異なっており、殆どの場合電気設備技術基準の D 種に定められた接地である。その抵抗値は環境条件や季節的な変化もあり、不明な点が多いが 100Ω 程度と考えられる。以下の検討では接地インピーダンス Z_0 として、配電系と殆ど同じ環境でのものとして報告されている (財) 電力中央研究所の報告にある容量性⁽²⁾の 70Ω⁽⁸⁾程度のもを採用し、必要に応じて抵抗素子値を変化させて用いる。

通信用中継増幅器の接地インピーダンス Z_c は、影響が局部的であることから 100Ω の抵抗を用いる。なお、中継器用の接地リード線のインダクタンスが直列に加わる。

〈4・3〉 配電系から通信系への経路のインピーダンス Z_{pc} 低圧配電線の中性線と低圧配電線から分岐して通信装置に引き込む DV 線を合わせた経路のインピーダンス Z_{pc} を求める。低圧配電線は地上 9m 程度あるが、引込み線では地上高は低くなり 6m 程度である。

線路の抵抗成分は 1Ω 程度と小さく、線路の対地間のキャパシタンスは、サージに含まれる主要周波数成分に対してインピーダンスが 1kΩ 以上と大きくなるため、何れも無視でき、線路のインダクタンスのみを考慮すれば良いと考える。

本論文では、サージに含まれる周波数成分のうち、特に機器の絶縁破壊に影響の大きい 500kHz 以下の周波数成分⁽⁹⁾、必要に応じ 200-300kHz 程度を念頭において過電圧を評価する。ただし、インダクタンスの評価では表皮効果は大きめの周波数 1MHz でも殆ど効かないので考慮せずに、直線状の単線の場合、大地が零電位面の場合、大地帰路を第三紀以降の平地で相当大地面の深さが 300m 程度とする場合の、3 通りについて付録 1 の算出式を用いて求めた。得られた Z_{pc} のインダクタンス L は、DV 線では上記の 3 通りの場合について、過電圧の影響が大きく、よく用いられる引込み線の長さ 30m を想定すると各々 59μH, 81μH, 109μH 程度、ACSR-OW (屋外用鋼心アルミ導体ビニル絶縁電線) と DV 線の組合せでは、各々 76μH, 99μH, 118μH 程度が得られた。このように引込み線に異なる導体の組合せを含め複数について L の値を評価したが、 L の値はほぼ 60~120μH の範囲にある。以下は最も簡単な DV 線のみの場合とし、3 通りの算出値の平均値とし、やや短めの 20m 程度でも L の値に大差のない 63.7μH を用いた。

5. 通信系システムの等価回路について

〈5・1〉 通信システムとサージ電流の流れ サージの影響を受ける通信システムは図 4 の回路に中継増幅器へ至る同軸線路系を含めて構成されている。通信機器の配置も含め図 6 に示す。

図 6 通信装置の構成と信号の流れ

Fig. 6. Diagram and signal flow of comm. equipment

(1) サージ電流の流れ

サージ電流が通信用電源装置の接地点 A に侵入し、その電位を上昇させるとともに、通信用電源装置、同軸線路および通信用中継装置など同時に多方向を経て、最終的に大地深層に電流が流れる。この場合、同軸線路でのサージ電流の伝搬は本来の信号電流のそれとは異なる。

(2) サージ電流の同軸線路中の進行

通常の高周波信号が同軸線路を通して伝送される場合、信号電圧は中心導体と外部導体間に加え、中心導体に信号電流が流れれば、外部導体には同じ電流が逆方向に流れる。

これと異なり、サージ電流が同軸線路中を伝わる場合、入射端から出射端に向かって、中心導体および外部導体の両方を通して同じ方向に流れ、CATV 増幅器の接地インピーダンスを通して大地に、さらに大地を通して、等価的には大地内の鏡像導体を通して還流する⁽¹⁰⁾。すなわち、同軸線路を流れるサージ電流は、地上部の同軸線路の中心導体、外部導体、および地表を零電位とする地中部の鏡像同軸中心導体と外部導体で地上と反対方向に流れるので、4 つの多導体系の線路としての取扱いを必要とする。

〈5・2〉 サージに対する同軸線路の回路定数 同軸線路のインダクタンスの評価には前述の多導体系線路モデルを用いる。自己インダクタンス成分の評価では、同軸外部導体は非磁性であるため磁束の遮蔽効果が無いこと、相互誘導については地上と地中鏡像による 4 導体系を考慮する必要がある。

同軸線路の自己、相互インダクタンスの評価には幾何学的平均距離を用いたノイマンの公式⁽¹¹⁾による解析法を用いる。通常の多導体系との差異は、同軸構造内の限られた空間での磁界の有無と相互作用の有無とを組合せて考慮するもので、内部導体の半径を $2.175 \times 10^{-3} \text{m}$ 、外部導体の内半径を $8.8 \times 10^{-3} \text{m}$ 、導体の地上高を 6m、真空の透磁率 μ_0 を $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ とすると、線路長 400m では L_1 , L_2 はそれぞれ 0.69mH, 0.57mH, M_{12} は 0.57mH となる。

キャパシタンス成分については、同軸外部導体は金属による遮蔽効果があるため、地上の 2 導体のみを考慮する。

次節で述べる同軸線路の π 型等価回路を考える場合、中心導体—外部導体間、外部導体—大地間のキャパシタンス成分の値は、同軸円筒状の線電荷と影像法により評価し、

同軸線路の入射端や出射端に分割して配置する。

〈5・3〉 通信系の等価回路

(1) 同軸線路

サージが架空線路や同軸線路を伝搬する場合の速度は $200 \times 10^6 \sim 300 \times 10^6 \text{ m/s}$ 程度となる。サージに含まれる 500kHz 以下の周波数成分では、波長は 400~600m 程度以上となる。増幅器間の同軸線路の長さはよく用いられる 400m とし、同軸線路の等価回路には、入射端や出射端での回路接続を考慮して、図 7 のような π 型 1 段の集中定数回路を用いる。

中心導体と外部導体間のキャパシタンスは長さ 400m の場合、27nF であり、外部導体と大地間では 3.2nF である。サージの周波数成分に対しては、各々数 10Ω 以上、数 100Ω 以上である。

(2) 中継増幅器関係の部分

同軸線路の出射端に接続される増幅器自体の入力インピーダンスは、容量性結合した場合、周波数に逆比例するので、サージの周波数では信号周波数とサージの周波数の比だけ信号の入力インピーダンスが高くなるので省略する。中継増幅器以降の同軸線路の分岐数がサージに対しては影響するので、分岐数と特性インピーダンスを考慮したインピーダンスを出射端に接続する。増幅器の接地インピーダ

図 7 同軸線路の等価回路

Fig. 7. Equiv. circuit of coaxial cable for surge curr.

ンスは、接地線のインダクタンスと接地抵抗が主となり、サージの主要周波数成分に対して数 100Ω 程度となる。

〈5・4〉 通信システムのモデル化と等価回路

前節までの考察をもとに、配電系からのサージ電流源、通信用電源装置、増幅器とそれに給電する同軸線路からなる通信システムのサージに対する等価回路を図 8 に示す。後述の過渡解析に用いる素子定数の例を図中に示す。以下、重要部分について説明する。

(1) 配電系から通信用電源変圧器までの部分

電力配電系の部分は、通信用変圧器入力側の過電圧保護用の通信用避雷器やバリスターが通電した状態で、図 4 のサージ電流の流れる経路で示した通りである。P 点が配電系の接地インピーダンス Z_{op} 、A 点が変圧器の接地インピーダンス Z_0 で接地されている。一例として、 $Z_{op}=16\Omega$ 、 Z_{PC} のインダクタンス 63.7μH、同抵抗 0.48Ω、 Z_0 としては図 5(a) のものを $R_C=40\Omega$ 、 $C_0=0.025\mu\text{F}$ 、 $R_1=30\Omega$ として用いた。

(2) 通信用変圧器及び DV 線の部分

通信用変圧器の部分は、図 3 に示した変圧器の等価回路であり、インダクタンス値の例は、 $L_{T1}=35\text{mH}$ 、 $L_{T2}=29\text{mH}$ 、結合係数 $k=1$ 、浮遊静電容量は同図に示した値とした。変圧器の 1 次側に接続された長さ 20m の DV 線の部分は、両側の二つの静電容量で中央のインダクタンスを挟んだ π 型等価回路で模擬し、サージに影響する右半分のキャパシタンス部分のみ用いる。図 8 の変圧器一次側の各相—大地間の容量 C_{D1} として 60pF、 C_{D2} として 60pF、相間の容量 C_{D3} として 1170pF とした。変圧器 2 次側のノイズ対策用の容量 C_{D4} としては 2000pF を用いた。

(3) 同軸線路部分

同軸線路部分は等価回路を〈5・3〉節(1)で説明した通りで、図 7 に示した数値例を用いた。同軸線路としては PSACOX-17C (17C-CATV 用アルミニウムパイプ形同軸ケーブル)を地上 6m の高さに長さ 400m で敷設した場合を考えた。この場合の雷などのサージに対する線路定数は〈5・2〉

図 8 通信システムのモデル回路

Fig. 8. Model circuit of communication systems

節で述べた方法で求め、図7に示したものを用了。

(4) 中継増幅器およびその接地部分

同軸線路出射端から中継器を見込むインピーダンス Z_{BR} は、増幅器入力インピーダンスと次の区間への同軸線路(図6のCATV amplifier出力側の線路)のインピーダンスを並列合成したものとなる。通常、通信信号に対してはインピーダンス整合をとるが、サージに対しては別途考慮する必要がある。又、次段以降の簡略化を考えるものとする。

中継増幅器自体の入力インピーダンスはサージの周波数では高く無視できる。中継増幅器から次の区間に至る同軸線路は、需要家に分配するため分岐する。分岐無しから5分岐程度まであり、サージに対する同軸線路単線の特異インピーダンスを基に同軸線路の分岐を考慮した値をインピーダンス Z_{BR} とする。その値は分岐線無しの場合の $10k\Omega$ 、 530Ω 、単線を延長した場合の 265Ω 、 132Ω 、 66Ω 、5分岐線相当の場合の 53Ω とした。

CATV 中継増幅器の接地は、図8の A_1 点で接地インピーダンス Z_c により接地されている。具体的には、中継器から接地用リード線により、吊架線、電柱に沿って電柱近傍の大地に接地する。中継器の接地は、接地リード線が20m長程度の場合、そのインダクタンスが $39\mu H$ となり、接地抵抗値 100Ω に直列に加わる。

6. 過渡解析

〈6・1〉 過渡解析のパラメータ 図8のモデル回路にサージ電流源 I_{op} を印加して次の過電圧値をPSpice シミュレータによる過渡解析で評価した。サージ電流源 I_{op} の振幅 I_m は〈3・1〉節(2)で述べた400A, 950A, 2,800Aとした。サージ電流波形の t_r , t_f としては〈3・1〉節(1)で述べた3種類を用いた。

① 通信系システムが最も大きい影響を受ける接地点Aの電位 V_A を検討する。この上昇値が通信システム各機器の受ける過電圧の基本となる。

② サージが侵入する接地点Aに最も近い通信用電源装置の制御装置が受ける過電圧、即ち同軸線路の入射端の電圧 V_{CX1} と対地電位 V_{c1} の上昇を検討する。

③ 中継増幅器が受ける過電圧、すなわち同軸線路の出射端の電圧 V_{CX2} と対地電位 V_{c2} の上昇を検討する。

〈6・2〉 過渡解析結果

i) 通信システムの接地点に現れる電位上昇と機器の過電圧

サージ電流 I_{op} の振幅 I_m を1Aとして、 $1.2 \times 50\mu s$ の波形を印加した時の前述の接地点電位 V_p と V_A 、同軸入射端電位 V_{c1} 、同軸出射端電圧 V_{CX2} と対地電位 V_{c2} の解析例を電流源 I_{op} の波形とともに図9に示した。図8の回路は線形であり、前述のサージ電流の振幅の400A, 950A, 2800Aに対する過電圧を求めるには結果に電流値を乗ずればよい。

V_p はサージ電流とほぼ同じ波形で大きな振幅、 V_A はピークが少し鈍り少し遅れるが V_p に近い波形、 V_{c1} は V_A よりピークがやや小さいが、三つの過電圧はサージ電流 I_{op} とほぼ

図9 過電圧波形の解析例

Fig. 9. Example of potentials and overvoltages calculated

表1 サージ電流による通信用電源接地点電位上昇

Table 1. Potential rise of comm. earth point for different surge current

Surge wave	$V_A(I_m400A)$	$V_A(I_m950A)$	$V_A(I_m2800A)$
$1.2 \times 50\mu s$	4,950V	11,760V	34,665V
$8 \times 20\mu s$	4,655V	11,060V	32,590V
$10 \times 350\mu s$	4,750V	11,275V	33,235V

Earth impedance of comm. equip. $Z_0=70\Omega$

同じ波形であることが分る。

V_{c2} は V_{c1} よりかなり鈍って出射端に現れる。同軸のインダクタンス成分によるものと考えられる。

中継増幅器に加わる過電圧 V_{cx2} は、他の波形と異なり振動的な波形となる。サージ電流の振幅が前述の数100A以上となるとその振幅は数kV程度にもなる。

次に、サージ電流 I_{op} の波形と振幅を変化させたときの通信用電源の接地点電位 V_A の最大値を表1に示す。

接地点電位 V_A の上昇はサージ電流の振幅によるが5~35kVになる。これとほぼ同じ値が通信システム系の通信用電源制御装置や中継増幅器などの電位上昇として現れる。通信用電源制御装置や中継増幅器の過電圧 V_{cx1} , V_{cx2} は V_A の10~12%程度となるが、その値は数kVにもなる。

サージ電流波形の立上り時間の影響に関しては、波形の立上りを $1.2\mu s$ から $8 \sim 10\mu s$ とゆるやかにすると、接地点電位 V_A のピーク値は6~10%程度低下する。

通信系の接地点電位 V_A のピーク値は配電系接地点電位 V_p のそれよりもサージ電流波形の立上り時間 t_r が $1.2\mu s$ の場合で13%, $8\mu s$ の場合で8%, $10\mu s$ の場合で5%程度低くなる。

ii) 通信システムの主要部分に現れる過電圧と影響を与える回路のパラメータ

① 通信用電源の接地点電位 V_A に与える接地インピーダンス Z_0 の影響

サージ電流による V_A の電位上昇への接地インピーダンス

図 10 機器にかかる過電圧と避雷器の制限電圧

Fig. 10. Overvoltage of equip. and breakdown vltg. of arrester

Z_0 の変化による影響は次の通りである。〈4・2〉節で述べた接地インピーダンスは、その時定数が $1\ \mu\text{s}$ 程度であり、サージ電流の立上り時間 t_r 程度を経過すれば、ほぼ抵抗となる。抵抗値を $70\ \Omega$ から $100\ \Omega$ にした場合でも、接地点の電位上昇 V_A は 5% 程度の小幅の上昇に止まった。図 4 から分かるように、時間の経過に伴い、配電系接地インピーダンス Z_{op} の低い抵抗と通信用電源の接地抵抗 Z_0 とが並列状態となり、抵抗値が頭打ちになるためである。

② 通信用電源制御装置、中継増幅器に加わる過電圧と保護特性

通信用電源制御装置に加わる過電圧 V_{cx1} は前述の V_A の上昇により $500\text{V} \sim 4\text{kV}$ にもなる。通信システム系では最も高い過電圧が加わる。図 9 の同軸出射端電圧 V_{cx2} が振動的であることから分かるように、同軸入射端と出射端の電圧の極性は異なる場合が多く見られる。この振動的な応答は同軸線路のインダクタンスと各部のキャパシタンスによるものと見られるが、保護用に用いられる有極性のコンデンサやダイオード素子等に悪影響を与える可能性がある。

次に、制御装置や中継増幅器に加わる過電圧と課電時間について述べる。増幅器内には過電圧保護装置が数種類あるが、代表例がガス避雷器である。その印加電圧と放電動作開始時間の動作曲線を共に対数軸で表すと、印加電圧が少しでも下がると放電動作開始時間が大きく伸びる。従って増幅器に加わる過電圧が保護装置の制限電圧の近くに在れば過電圧の課電時間が長くなり保護特性が低下することが考えられる。

図 10 はサージ電流の振幅 I_m が変化したとき、通信用電源制御装置や中継増幅器などにかかる過電圧 V_{cx1} , V_{cx2} をガス避雷器の過電圧制限電圧の範囲 V_{Ar} とともに示したものである。過電圧が網掛けで示した数 $100\text{V} \sim 1000\text{V}$ 近くの V_{Ar} の範囲内に入ると保護特性が低下する。尚、 V_{Ar} の上限より高い過電圧の部分も同軸線路インピーダンスの分岐数に依存する Z_{BR} や線路定数、機器の接地などの回路パラメータによっては低下してこの範囲に入り、障害を与えることもあり得る。

なお、避雷器の制限電圧を超える大きな過電圧が加わる場合、避雷器は正常に動作するが、その電流耐量を超える

図 11 同軸入射端電圧 V_{cx1} , V_{cx2} と負荷抵抗 Z_{BR} の変化

Fig. 11. Effect of Impedance Z_{BR} to V_{cx1} and V_{cx2}

と場合によっては破壊する。

このように、機器にかかる過電圧の大きさと放電開始時間の両方を考慮した機器の保護特性に要求される指針が、本論文の過電圧評価の手法により求まり、保護特性の改善に役立つと考える。

③ 通信用電源制御装置、中継増幅器に加わる過電圧の変動とその要因

〈5・4〉節(4)で述べたように、サージに対する同軸線路単線の特性インピーダンスを基に同軸線路の分岐を考慮したインピーダンス Z_{BR} が図 8 の同軸出射端につながる。この Z_{BR} を同軸を接続しない $10\text{k}\Omega$ から順次低くして、同軸を 5 分岐する場合の $53\ \Omega$ に変化した場合の同軸の入、出射端の電圧 V_{cx1} , V_{cx2} の変化をサージ電流波形 $1.2 \times 50\ \mu\text{s}$ の場合について図 11 に示す。入射端電圧 V_{cx1} は 20% 程度増加し、出射端電圧 V_{cx2} は 40% 程度減少する。サージ電流波形が $8 \times 20\ \mu\text{s}$, $10 \times 350\ \mu\text{s}$ の場合では、 V_{cx1} は 100% 程度増加し、 V_{cx2} は 70% 程度減少する。この Z_{BR} の変化は同軸入射端より電源側の対地電位には殆ど影響無いことが分かっており、サージが通信用電源の接地点 A から同軸外部導体側に流れることと、外部、内部導体の自己および相互インダクタンスがあるため電圧、電流が相互に影響し、上述の出射端の電圧の変化および同軸線路の入出射端の電位差をもたらすと考えられる。この電位差は内部導体の方が外部導体より大きく、出射端電圧に小さく入射端電圧に大きく影響している。

以上のように中継増幅器にかかる過電圧 V_{cx2} は同軸分岐数の違いによって大きく影響され、この節の②で述べた過電圧に対する保護特性に大きな影響を与えるので注意を要する。

次に、中継増幅器の接地抵抗 Z_c が変化した場合の過電圧への影響は、 Z_c が $100\ \Omega$ から $50\ \Omega$ に低くなった場合には、通信用電源制御装置にかかる電圧 V_{cx1} が 9% 程度、中継増幅器にかかる電圧 V_{cx2} が 10% 程度高くなる。同軸に繋がる機器の保護特性の応答が速くなる影響を与える。サージ電流波形が変わった場合には、 $1.2 \times 50\ \mu\text{s}$ の場合に比べて、 $8 \times 20\ \mu\text{s}$, $10 \times 350\ \mu\text{s}$ の場合にはこれらの電圧は 50~60% 程度低下する。

以上述べたように、インピーダンス Z_{BR} , 接地抵抗 Z_c , サージ電流波形によって機器に加わる過電圧が変動を受ける

ため、これらを総合した保護特性の把握が必要となる。特にサージの波形に対しては変化が大きいので、実際に流れるサージ電流波形の把握は難しいので、本論文の手法によって波形による変動範囲を予め評価しておき、対策を施すことが有効と考えられる。

④ 通信システムの各機器にかかる過電圧のサージ侵入点からの配置の影響

図 12 に図 8 の回路に示す各機器の接地点の電位上昇と同軸入、出射端での電圧の一例を示す。サージ電流 I_{op} の波形は $1.2 \times 50 \mu s$ 、振幅は $I_m = 1A$ とした。配電系の接地点 P から右側の中継増幅器に至る途中の電位 V_p , V_A , V_{c1} , V_{c2} は次第に減少するが、サージ電流の振幅を前述の 400A, 950A, 2800A とすると、同軸出射端 V_{c2} でも数 kV から数 10kV の高い電位となる。また、同軸入、出射端の電圧の大きさについては、回路の条件にもよるが、入射端の方が出射端よりも高い。

⑤ 通信用電源変圧器部分の影響について

通信用電源変圧器には浮遊容量があり、通常過電圧に対して影響があるが、今回のように電源変圧器の負荷側にサージの主要な周波数に対してインピーダンスが低い同軸線路が接続された場合には、インピーダンスの差異が大きいため電源変圧器の浮遊容量などの影響が殆ど現れてこないことが分かった。

iii) 同軸線路の長さによる影響

同軸線路の長さ l を 400m より長くした場合の影響を図 7 の同軸線路の等価回路定数を計算し直して検討した。その結果、表 1 に示す機器の対地電位 V_A のピーク値は高くなり、3km 程度で V_p のそれに等しいかより大きくなる。これは、長さ l の増大と共に線路定数 L_1 , L_2 , C 等が増大するので、接地点 A からみた線路側のインピーダンスが大きくなるためと考えられる。同軸入、出射端の過電圧値はほぼ同じ程度であるが、図 9 に示した出射端電圧 V_{cx2} などの振動波形の周期は、ほぼ同軸線路のインダクタンスとキャパシタンスの積の平方根に比例し、ほぼ線路の長さ按比例することが分った。線路長に依存する線路のインダクタンスとキャパシタンスが振動の周期を決める重要な要素であることが判明した。

iv) 通信システムに加わる過電圧に影響を及ぼす要素のまとめ

① 過電圧に最も大きく影響する要素は、当然ではある

図 12 通信系機器類の対地電位と過電圧例
Fig. 12. Voltage rise of comm. equip by current surge

がサージ電流の大きさ I_m とその波形、回路要素では配電系の接地抵抗 Z_{op} である。

② 次に大きく影響する要素は、通信用電源の接地インピーダンス Z_0 、中継増幅器内の同軸線路の分岐数に依存する Z_{BR} 、中継増幅器の接地抵抗 Z_c 、同軸の線路長とその線路定数などである。これらは同軸の入、出射端電圧に大きく影響する要素でもある。

v) 通信機器の過電圧に対する保護の在り方

中継増幅器の保護特性は、これに加わる過電圧の大きさや頻度と増幅器内過電圧保護素子の特性の両方に影響され、これにより総合的に定まることになる。

以上、通信機器に加わる過電圧およびその変動状況を、通信システムのモデル化を行って検討したが、これらを通信機器毎により詳細につめることにより、本論文の手法により得られた結果の効果がより具体的かつ明らかになると考える。

7. 雷サージによる通信装置の故障と検討

はじめにでも述べたが、筆者の一人は関東一円に亘る 10 万軒を超える需要家に供給する CATV 通信システムのフィールド調査を通信装置類の雷害故障について行って、機器約 1 万台の 2 ヶ年間の故障である百数十件のデータを調べた。

以下では本論文の手法で得られた各部の過電圧の性質を念頭におき、雷害による故障について考察する。

調査した通信システムは三つに分けられる。一つは CATV システムの情報源を収集・送出する設備で山頂などに設置されてシステムセンターと呼ばれている。そこには前置増幅器 PA やヘッドエンド増幅器 HA が備えられている。二つ目はこのセンターと需要家を結ぶ伝送・分配部分であり、同軸線路 (Cable; CBL) と信号を増幅 (Amplify; A)・分配 (Distribute; D) する数種類の中継増幅器が使われる。これらは信号伝送機能で区別しており、同軸幹線 (Trunc; T) の中継および分配に用いる増幅器で主幹線 (Main; M) 用の M-TA, M-TDA, M-TBA や M-A があり、同軸の分岐・分配に用いる増幅器の D-BA や D-EA がある。三つ目は、通信用電源装置である電源変圧器と無停電電源およびその制御装置を含む電源供給機 PS, 伝送設備の最末端で信号を需要家に分配するフェライトコア、コイルなどの受動素子ででき

図 13 通信機器の故障比率例
Fig. 13. Fault rate examples of field comm. equip

ているタップオフ TO などがある。

雷害による各装置の故障部分としては、電源部、ヒューズ、ブレーカ、AVR などがある。各機器毎にこれらの雷害を集計し、全体の平均故障率を 1 として、その比率を示したものが図 13 である。サージ電流が小さく頻度も多い遠方雷などによる雷害の可能性のある場合も含めた広義 (loose mean) の雷害故障 (surge fault) 比率を示した。これには、近傍の落雷などによる障害である狭義の雷障害が 7 割程度含まれており、両者の影響の傾向はほぼ同じで、両方の雷障害の影響が共通して大きい機器が明確となった。これについて、以下の例で述べる。

故障が特に多い機器は、総数 2,800 台の通信用電源装置 PS で全体の平均故障率の 2.5 倍、総数 3,280 台の M-TBA で 1.5 倍、4 分岐相当で約 51,000 台の TO の広・狭義の故障で 1.2~2.2 倍などである。以下ではこれらを中心に述べる。

〈7・1〉 通信用電源装置 PS について PS は図 8 の電源用接地点 A とこれに繋がる通信用電源変圧器の部分で、図 12 に示した V_A および V_{cl} の電位上昇と同軸入射端の過電圧 V_{cx1} が加わる。サージ電流の振幅 I_m が 400A~2800A では、電位上昇が 5~35kV、過電圧が 500V~4kV となる。

ここで注意して置きたいことは、同軸入射端の過電圧 V_{cx1} は通信用機器の接地状態に強く依存する比較的小さな値の電圧であるが、対地電位 V_A 、 V_{cl} にも大きく影響される。これらは〈6・2〉節 ii の②に述べたように配電系の接地インピーダンス Z_{op} とその変動に左右される。例えばサージ電流の発生に際し、多重雷や隣接した落雷など配電系の接地状態の変化などに強く影響を受ける可能性が考えられる。

フューズやブレーカ等は保護機能と簡便さから当然必要ではあるが、一層の保護性能の向上を図り、人手による故障調査と保守方法を少しでも改良するためには、例えば、過電流などを検知して電源遮断の一定時間後に自動回復する遮断方式などの開発が必要であろう。

〈7・2〉 幹線の増幅器と分岐線の増幅器について PS に次いで雷害故障比率が大きいのは M-TBA の 1.5 である。M-TBA は図 8 の同軸幹線の右端 CATV AMPLIFIER の位置にある。機能が殆ど同じではあるが幹線増幅器で同軸が分岐した下段に設置された分岐増幅器 D-BA の故障比率 0.25 はこれに比べて 1/6 程度になる。これは分岐などにより過電圧が低減されるためと考える。即ち、M-TBA には図 12 に示した対地電位 V_{c2} と過電圧 V_{cx2} が加わり、D-BA には前段の M-TBA の内部の同軸の分岐によるインピーダンス Z_{BR} によって図 11 に示されるように低下した過電圧がかかる。例えば、5 分岐が 2 段重なると $0.6 \times 0.6 = 0.36$ 、これが更に 2 段重なると 1/6 程度に低減する。低減が 0.16 では、M-TBA の過電圧 500V~4kV が D-BA では 80~640V となり、この値は避雷器の放電動作電圧 V_{Ar} 以下か下限に近い値になる。過電圧の低下が直ちに故障比率の低下になるとは限らないが、避雷器の放電動作開始時間が伸びて、保護性能が低下する恐れがでてくる。なお、過電圧が更に低下して数 100V 程度以下になれば、避雷器の必要性も少なくなり、実用上

かなりの故障低減効果がみられると考える。従って、増幅器に加わる過電圧 V_{cx2} が避雷器の放電動作電圧 V_{Ar} の前後の値となる場合には、前段増幅器の内部のインピーダンス Z_{BR} を需要家の数だけではなくサージも考慮して設定し直し、次段の増幅器に加わる過電圧を V_{Ar} より小さくすることが故障低減対策の一つになると考えられる。

汎用機器の設置に際し、サージ電流値がどの程度であれば、各機器に加わる過電圧がその保護特性の過電圧制限電圧の範囲 V_{Ar} に入るか否かなどを本論文で述べた方法で検討でき、故障低減に効果が期待できると考える。

〈7・3〉 タップオフ TO について 前述のように TO の故障比率は PS に次いで大きい。TO に接続された需要家側には保安器を設置し、安全のための接地を施すが、各戸で異なる。保安器内に避雷器と低域フィルターがあり、宅内へのサージ侵入阻止と通信ケーブルの電力線との接触事故による強電流阻止をはかっている。TO には図 12 に示す V_{c2} と殆ど同じか少し低下した対地電位がかかり、過電圧は分岐に依存する Z_{BR} による低下分だけ低くなる。TO ではフェライトコアに巻かれた複数のコイルなどのハイブリッド結合によって、対地電位と過電圧が電磁的に結合されており、サージによる過電圧対策には、対地電位の高さ、各戸の接地条件の差異、複数の避雷器の特性など最も複雑な条件を考慮することが要求される。

対策の足がかりとして、TO の接地を十分確認した上で、TO から各戸への引込み線側の接地された避雷器の放電動作をチェックし、接地及び避雷器両方の特性を含めた動作特性を吟味することによって、最も大きいと見られる対地電位による障害などの対策から検討を始めることが必要と考えられる。

8. おわりに

配電系の電柱に併設された通信用電源装置が受けるサージ電流による過電圧を検討した。直撃雷によるサージ電流より小さく配電系では特に問題ないと考えられているが発生頻度の高い避雷器の放電や続流によるサージ電流が配電系の接地点と通信用電源装置の接地点に流れた場合、その電位の上昇が、通信系の諸機器に大きな過電圧を生ずるメカニズムを回路モデルと過渡解析により明らかにした。

次いで、得られた結果をもとにフィールド調査で得られた故障データの説明と検討を行った。さらに、通信システム系の機器にかかる過電圧の影響とこれに依存して決まる保護特性について考察し、この様な検討に本論文の過電圧の評価手法が有効であることを示した。

本論文でとりあげた通信システムのモデル化による過電圧の検討は、接地データや使用システム条件などの外的条件と各機器の具体的な保護対策内容をつめることにより検討効果を一層高められると考える。

謝 辞

ご指導ご鞭撻をいただいた関係各位に感謝を致します。

(平成 19 年 9 月 3 日受付, 平成 20 年 2 月 27 日再受付)

文 献

- (1) M. Aizawa, M. Watabe, and K. Ito : "Field Report of Reliability in CATV System", Communication Study Committee of IEE Japan, CMN-91-25, (1991-3) (in Japanese)
藍澤 實・渡部基雄・伊東勝二 : 「CATV の信頼度調査結果」, 電気学会通信研究会, CMN-91-25 (1991-3)
- (2) Subcommittee for Power Distribution Systems, Lightning Protection Design Committee : "Guide of Lightning Protection Design for Power Distribution Lines", CRIEPI, p.10, Fig. 2.3.1, Curve[1] (2002-2) (in Japanese)
耐雷設計委員会, 配電分科会 : 「配電線耐雷設計ガイド, 総合報告 T69」, 財団法人電力中央研究所, p.10, Fig. 2.3.1 推奨曲線[1] (2002-2)
- (3) J. Masuda : "Arrester and its Application to Field Use", IEEJ, pp.57-60, p.150 (1968-8) (in Japanese)
益田淳一 : 「避雷器とその適用」, 電気学会, pp.57-60, p.150 (1968-8)
- (4) IEC60060-1, Impulse current $8 \times 20 \mu\text{s}$, $10 \times 350 \mu\text{s}$, and others are suggested; IEEJ "Electrical Technology Handbook revised ed.", p.512 (1988-2) (in Japanese)
国際電気標準会議 IEC60060-1 には $8 \times 20 \mu\text{s}$, $10 \times 350 \mu\text{s}$ 等が提示されている。電気学会の電気工学ハンドブック改定版 p.512 には前記の $8 \times 20 \mu\text{s}$ が記されている。(1988-2)
- (5) IEEJ, Technical Committee : "Discharge Current of Arresters", #33, (1959-7) (in Japanese)
電気学会 : 「電気学会技術報告第 33 号避雷器放電電流」, p.8 (1959-7)
- (6) IEEJ, Electrical Engineer's Handbook (1988-2) (in Japanese)
電気学会 : 「電気工学ハンドブック」, 機器の試験電圧, p.498 (1988-2)
- (7) T. Noda, H. Honda, A. Asakawa, T. Shindo, and Yokoyama : "A Pole-Mounted Transformer Model for the Assessment of Transferred Lightning Surges from a Distribution Line to a Consumer Entrances", CIGRE 2006, CA-103
- (8) H. Motoyama : "Experimental Study in Transient Characteristics of Earth Resistance Experienced in Field Electrodes", CRIEPI, Report H04010 (2005-5) (in Japanese)
本山英器 : 「各種接地電極の過渡接地抵抗特性の実験的検討」, 電力中央研究所報告 : 研究報告, H04010 (2005-5)
- (9) J. Hällström, S. Berlijn, et al. : "Applicability of different implementations of K-factor filtering schemes for the revision of IEC60060-1 and 2", Proc. of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 25-29 (2005)
- (10) K. Ohashi, et al. : "Electrical Transmission Technology", IEEJ p.100, p.105 (1967-4) (in Japanese)
大橋 喬, 他 : 「送電工学 (改定版)」, 電気学会, p.100, p.105 (1967-4)
- (11) C. Yamada, M. Katsurai : "Electromagnetics", IEEJ, pp.282-283 (2005-8) (in Japanese)
山田直平・桂井 誠 : 「電気磁気学」, 電気学会, pp.282-283 (2005-8)

付 録

1. インダクタンス L の評価

次の 3 つの式を用いた。

直線状単線の場合 : $L = \mu_0 \times l_x / (2\pi) \cdot (\ln(2 \times l_x / a) - 1)$.

[H], $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, l_x : 線路長 m, a : 導体半径 m。

(電気磁気学, 第 2 改定, p.277, 電気学会)

大地が零電位面の場合 (往復導線状) : $L = \mu_0 / \pi \times$

$(\ln(D-a)/a) \cdot [\text{H/m}]$, D : 導体間 m。

(基礎電磁気学, p.158-159, 電気学会, 両導体間 D で,

$D/2$ を地表とし, D の代わり正確な $D-a$ とし, 電流は導体表面とする。)

相当大地面の深さ H_e が 300m の場合 :

$L_e = L_{11} + L_g$, $L_{11} = (1/2 + 2 \times \ln(2H_e/a)) \times 10^{-7} \cdot [\text{H/m}]$,

$L_g = 1/2 \times 10^{-7} \cdot [\text{H/m}]$, $H_e = 300\text{m}$ 。

(送電工学, 改定版, p.100, 電気学会)

伊 東 勝 二

(正員) 1942 年 2 月 15 日生。1966 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。1968 年 3 月横浜国立大学大学院修士課程修了。同年 4 月古河電気工業 (株) 入社。電力事業部の設計技術部門配電開発関係に従事, その後, 情報通信事業部の電力システム開発・電力通信関係, さらに, 光システム部門に従事など, 現在に至る。

廣 瀬 靖 雄

(正員) 1943 年 8 月 11 日生。1966 年 3 月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。1968 年 3 月同大学大学院修士課程修了。同年同大学工学部電気工学科助手。1973 年イリノイ州立大学大学院博士課程修了。横浜国立大学工学部電気工学科講師を経て 1977 年同大学助教授。現在, 横浜国立大学大学院工学研究院教授。主としてレーザの計測への応用, 電子回路, 光エレクトロニクスなどに関する研究に従事。Ph.D.。電子情報通信学会, IEEE 各会員。