

## 災害に対する電力系統の絶縁信頼度向上

Improvement of Insulation Reliability in the Electric  
Power Systems Against Hazards

河村 達雄\*・石井 勝\*・北條 準一\*・西村 和夫\*

Tatsuo KAWAMURA, Masaru ISHII, Jun'ichi HOJYO and Kazuo NISHIMURA

## 1. ま え が き

大都市等の電力消費地域へ電力エネルギーを供給するために、わが国においては超高压送電線や超々高压送電線が建設・計画されている。これらの電力系統において、いったん事故が発生すると、都市における機能の維持に重大な影響を及ぼすことは明らかである。このために、これらの電力系統においては、従来にも増して信頼度の向上が重要な問題であることは言うまでもない。

電力系統における絶縁破壊事故の原因としては、雷や塩害などの自然災害に起因するもの、および系統の開閉操作などに際して発生する開閉サージといったものがあげられる。本研究は、電力輸送の基幹となる送電系統を対象として、これらの災害事故を軽減せしめるための最適な防護の方策について行なったものである。

電力系統において、雷に対する防護を行なうためには、自然雷に関するパラメータの収集が必要である。また、襲雷の予知を行なうことにより電力系統の雷害事故を防止することも重要と考えられる。これらの目的のためには、雷放電カウンタの利用がきわめて有効である。筆者等はわが国ではじめて雷放電カウンタの研究を行なったが、その後雷放電カウンタによる対地雷放電数分布に関する測定が広く行なわれるようになり、全国的な分布図も得られている。しかしながら現在使用されている方式では、大型の水平アンテナを必要とするため、用地確保上の難点が指摘されている。筆者らはこの点に着目し、広い敷地面積を必要としない垂直アンテナ式雷放電カウンタを開発し、この方式に特有な異常カウント現象による誤差の問題を解決し、従来の方式と互換性のある新型雷放電カウンタの開発、実用化を行なった。

送電線における雷害事故については、電子計算機を利用して雷しゃへのシミュレーション計算によって種々の送電線鉄塔構成について雷しゃへい失敗に関する解析を行なった。

また送電線における逆フラッシュオーバー現象の解析を行なうために、縮小モデルを利用した研究を進め、耐雷設計上新しい知見を得ることができた。

電力系統における開閉サージに対する絶縁信頼度については、開閉サージのハイブリッド計算システムを開発

して、しゃ断器の投入不揃いによって系統に発生する開閉サージ電圧の統計分布をもとめ、さらに開閉サージによる送電線のフラッシュオーバー確率について解析を行なった。これらの成果は電力系統における絶縁信頼度を統計的に評価する上で有力な資料を提供するものと考えられる。

電力系統における塩害事故については、系統におけるフラッシュオーバー危険度やがいしの付着塩分量を気象条件から推定する新しい手法を開発した。この方法により、電力系統における耐汚損絶縁設計の合理化をはかり、また塩害による事故を軽減せしめる系統運用上の有効な方策を与え得るものと期待される。

## 2. 新型雷放電カウンタの開発

電力系統の自然雷による事故を解析し、その信頼度の向上をはかるためには、自然雷の各種のパラメータの収集が必要である。中でも系統への落雷の頻度を支配する対地雷撃頻度は系統の事故率と直接結びつきわめて重要な量であるが、近年雷放電に伴う電界強度の変化を計数する雷放電カウンタによる測定が広く行なわれるようになり<sup>1)</sup>、その地域分布に関してはかなり充実したデータが得られている。この雷放電カウンタは雷放電数に関するデータ収集を行なうのみならず、襲雷の予知に応用することも可能である。しかし現在広く用いられているものは地上高5m、長さ14mの巨大な水平アンテナを必要とし、特にわが国においては容易ではなく、また建造物の屋上などに設置することも不可能である。筆者らはこの点に着目して、敷地面積をほとんど要しない垂直アンテナ式雷放電カウンタを開発し、昭和49年より従来型との互換性の検証を目的として実証試験を行なっている。その結果、この垂直アンテナ式雷放電カウンタは通常の地上に設置する使用状態のもとでは従来型との十分な互換性を有することが確認された。一方で強い静電界と強い降水の並存する状況のもとでは、カウンタが雷放電の有無と無関係に動作するという垂直アンテナ式カウンタに特有の異常カウントと名づけた現象が発生することを初めて明らかにした<sup>2)</sup>。この現象は夏季にくらべ、非常に強い静電界強度が高い頻度で発生する冬季の日本海側や、地上にくらべて静電界強度が数倍にもなる建造物屋上にこの種のカウンタを設置する際には問題となる。この現象の解明をはかるため、夏季に東京、冬季に酒田に

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

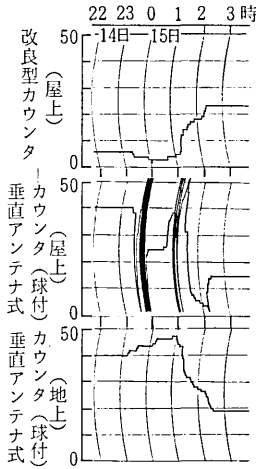


図1 各種カウンタの計数記録例 (昭和51年12月, 酒田)

において、静電界強度、電界変化、アンテナ放電々流などの自動測定を行なった結果、この現象が季節を問わず存在することを確認すると共に、その特性も明らかとなった。この成果にもとづいて、新たに異常カウント現象の計数を防止し、雷放電のみを計数する新型の垂直アンテナ式雷放電カウンタを開発し、現在、実証試験を行なっている。

図1は建造物屋上に設置した新旧2種類の垂直アンテナ式雷放電カウンタと地上のカウンタの計数の例で、冬季に日本海側で得られたものである。中央の旧型の垂直アンテナ式カウンタでは、地上のもの26倍の計数値が記録されているが、そのほとんどは異常カウントである。屋上の新型のカウンタでは、この現象は防止されていることが明らかである。

この新型の垂直アンテナ式雷放電カウンタを開発したことにより、信頼度の高い雷放電度数の記録が得られると共に、これが襲雷予知システムのセンサとして広範囲に使用され、電力系統の雷害に対する信頼度の向上に役立つであろうことが期待される。

### 3. 雷害事故の解析

雷による送電線の事故は、現在のところしゃへい失敗と逆フラッシュオーバの2種に大別されると考えられている。そのいずれの解析を進める上でも、前節の対地雷撃頻度は極めて重要なパラメータとなっている。

雷しゃへいに関する理論として、現在最も完成度が高いと言われているものにArmstrong-Whiteheadの理論がある。その原理は、雷撃を受ける構造物の幾何学的な位置関係と、雷撃電流値に依存する最小雷撃距離の組み合わせから、しゃへい失敗率を予測しようとするもので、これまでに述べた送電線の逆フラッシュオーバ事故率や、変電所への侵入雷による事故率の解析<sup>1)</sup>と同様に、モン

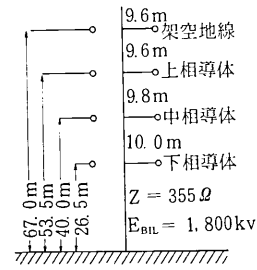


図2 導体配置

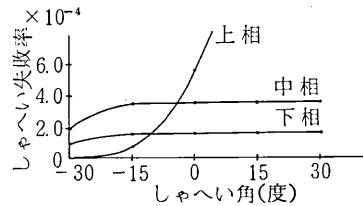


図3 しゃへい角に対するしゃへい失敗率の変化

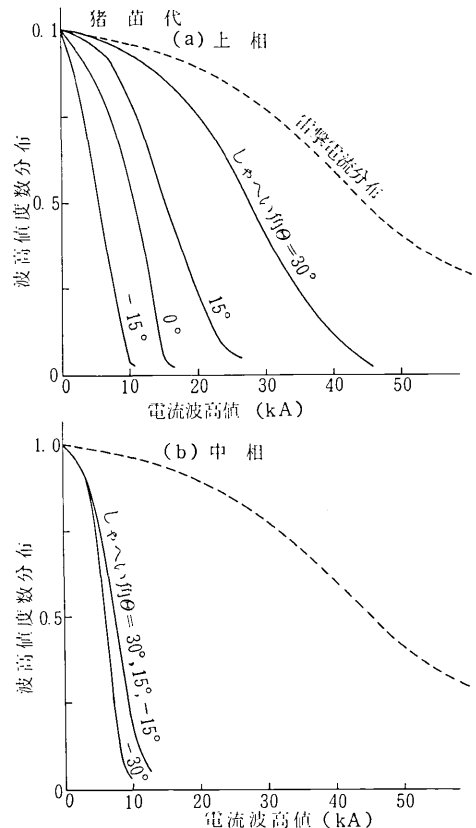


図4 しゃへい失敗を生じた雷の雷撃電流波高値度数分布

テカルロ法によって解析を行なうことが可能である。この手法で500 kV 2回線送電線の雷しゃへいに関する解析を行なった結果について述べる。

解析の対象とした送電線の導体配置を図2に示す。ここで、しゃへい角とは上相導体と架空地線が垂直線と

なす角で、架空地線の方が外側に張り出す場合を負と定義する。仮定した雷撃電流波高値の分布は猪苗代幹線で得られたものを使用し、40,000回の雷撃を対象として計算を行なった。図3はその結果の1例で、しゃへい角に対する各相のしゃへい失敗率を示す。ここで、ある相のしゃへい失敗率とは、雷撃密度を $n$ 回/km・年、その相へのしゃへい失敗による直撃数を $N$ 回/km・年としたとき $N/n$ で定義する。しゃへい角の影響は上相に対しては極めて大きい、中相、下相に対してはあまり影響がなく、 $-5^\circ$ 付近を境にして中相が上相よりもしゃへい失敗率は高くなっている。図4は、しゃへい失敗を生じた雷の雷撃電流波高値の分布をしゃへい角をパラメータとして示したものである。架空地線は、大電流領域の雷撃に対して有効であり、上相へのしゃへい効果はしゃへい角を変えることにより大幅に改善されるが、中相にはほとんど効果がないことが前図と同様に明らかである。

逆フラッシュオーバー現象の解析のためには鉄塔あるいは架空地線への雷撃の際に送電線の各部にあらわれる電位分布を知る必要があり、これまでわが国においては、実鉄塔において測定された鉄塔の回路的パラメータがその計算に用いられていた。しかし従来になく高鉄塔が設計されるようになり、更に耐雷性向上のための架空地線の多条化、静電しゃへい線の効果の検討などを行なう上で、縮小モデルによる実測は極めて有効である。この縮小モデルを用いる手法は、実物の数十分の1に相当する送電線のモデルに直角波電流を流入させ、各部に生じる電位を直接測定するもので、以上のほか、従来の実鉄塔における測定値の再検討、これまで測定されたことのないUHV水平配列型鉄塔の特性の測定を目的として試験を行なった。

試験の結果、これまで広く使用されていた鉄塔と架空地線を進行波回路に置換えて解析する手法は十分実用になることが判明したが、その主要なパラメータである鉄塔サージインピーダンスの値は、わが国における測定値の $100\Omega$ という値は過小で、実際は $140\Omega$ 前後であることが明らかとなった。この値は諸外国で使用されている値と一致する。またわが国で低い値が測定された原因も、縮小モデルにおける試験の結果、ほぼ判明している。このほか架空地線多条化の効果、静電しゃへい線の効果も明らかとなり、後者は接地抵抗値の高い場合しか鉄塔電位上昇の低減効果は期待できないが、架空地線を2条から3条にした場合には、15%程度電位上昇値が抑えられることが判明した。また径間雷撃や水平配列型鉄塔の雷特性も初めて測定されている。

以上、本研究によって、システムの耐雷性を向上させる上で有用な多くの知見が明らかにされている。

#### 4. 開閉サージに関する検討

雷撃等の災害によって系統の一部に事故が発生した場合、系統の切換えによってその事故を迅速に除去し、除去後は直ちに系統を復旧することによって電力供給を維持する必要がある。このような復旧過程は、低電圧系統では容易であるが、超々高圧系統ではしゃ断器の開閉に伴って発生する開閉サージが系統の絶縁を脅すため、それに対する系統の絶縁信頼度を把握しておく必要がある。

最近の絶縁の研究では、対地開閉サージが系統の絶縁に及ぼすフラッシュオーバーの危険度を、統計的に評価する考え方が広く行なわれつつあり、それ故、その前提となる開閉サージ分布を求めることの重要性が認識されている。さらに絶縁設計の立場からは、開閉サージ分布に対する種々のパラメータの影響を詳細に調べることが必要である。筆者らはすでに報告したように、系統の開閉操作に伴う多量のデータの処理が可能な開閉サージのハイブリッド計算システムを開発した<sup>3)</sup>。以下では本装置により得られた知見にもとづいて述べる。

図6は図5の回路において不揃い投入のモンテカルロシミュレーションを行なった結果であり、線路各点にお

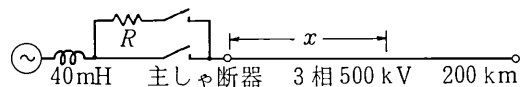
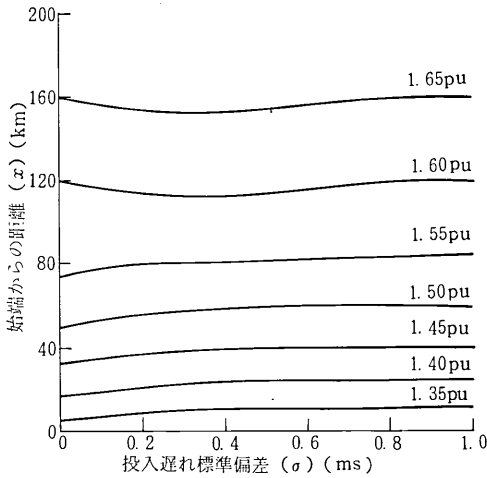


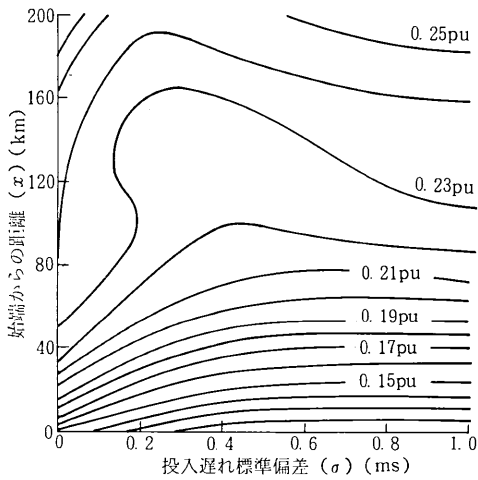
図5 計算対象回路

ける開閉サージ分布の平均値および標準偏差がしゃ断器の投入不揃いの度合によっていかなる変化をするかを示したものである。この場合、はじめに抵抗が投入され、次いで主しゃ断器が投入されて、閉路操作が完了する。線路は日本の代表的な500kV線路である。シミュレーションでは、主しゃ断器の投入不揃いは正規分布として扱い、投入遅れ平均時間は5msとし、標準偏差 $\sigma$ を変数とした。また、抵抗を投入する際の投入不揃いは無視し、投入遅れ時間は10msとした。図6によれば、過電圧の平均値は $\sigma$ には殆んど依存せず、場所のみ依存する。これに対し、過電圧の標準偏差は、線路始端付近では $\sigma$ の上昇につれて減少しているが、終端付近ではいったん減少した後、再び上昇している。

このような結果から、更に鉄塔のフラッシュオーバー確率の推定が可能である。図7は投入抵抗が $1,200\Omega$ の場合の線路各点における鉄塔のフラッシュオーバー確率 $P_t(x, d)$ を示す。ここで、 $d$ は送電線の絶縁耐力を棒-平板ギャップのそれに換算したギャップ長を示す。この図より、単純な線路でも場所によってフラッシュオーバー確率は大きな変化を示すことがわかるが、本図は同時に線路各点における絶縁信頼度の変化をも示しており、この場合には始端付近が最も絶縁の信頼性が高い。ここで、もし線路全



(a) 過電圧平均値



(b) 過電圧標準偏差

図6 線路各点での過電圧平均値と標準偏差

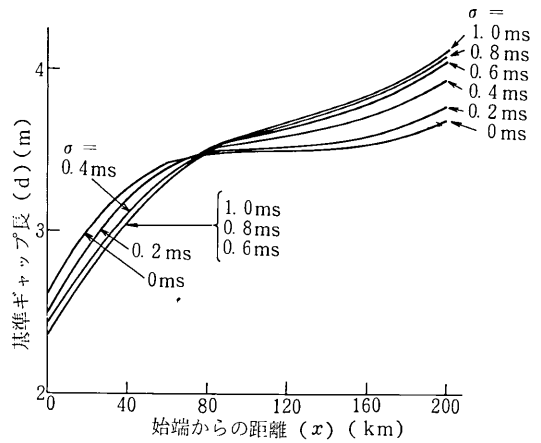


図8 鉄塔のフラッシュオーバー確率を指定した場合に必要な絶縁耐力

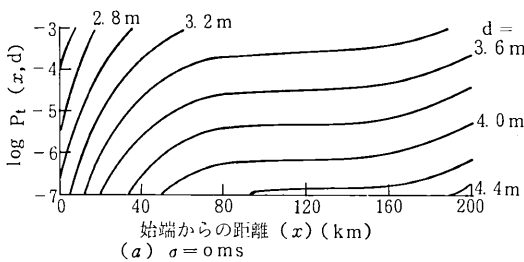
体に対して、各点におけるフラッシュオーバー確率を $10^{-4}$ /回に指定した場合、無負荷投入を、この確率を超えずに安全に行なうために最小限必要とされる系統の絶縁強度は図8のように求められる。ここでは投入操作に限定されているが、実際の場合でも、過電圧を考慮しなければならない操作の種類は少なく、これらの重み付けをして図7と同様な結果を得ることにより、合理的な絶縁設計への指針が得られる。

5. 塩害事故への対策

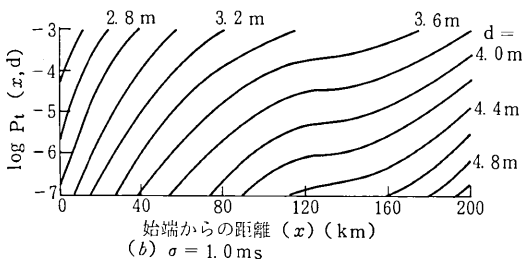
電力系統の塩害に対する信頼度向上のための方策として、現在のところでは、がいし増結等による過絶縁、洗浄などが一般的である。これらの方策を有効なものとするためには、地域的な汚損条件の把握、および適切な洗浄時期の選定を行なう必要があるが、その方法として最も広く行なわれているのは、がいしへの塩分付着量の実測である。しかしこの方法は自動化や連続測定が困難といった欠点があり、これを補う他の手法の開発が望まれている。

わが国において、塩害による事故が発生するに至る過程は、海からの海塩粒子のがいし類への付着にはじまり、これは気象条件および地形的条件に支配される。筆者らはこの点に着目し、気象条件から台風時の送電線の絶縁信頼度を評価する手法を開発した<sup>4)</sup>。そして引続きこの手法をより一般の気象条件、地形的条件のもとに拡張する試みを行なった。これは時系列で与えられる気象条件から系統のフラッシュオーバー危険度、がいしへの塩分付着量を推定しようとするもので、自動化も可能であり、かつある程度の予測も可能といった点から、この手法を汚損管理に応用することは、系統の高信頼度化に有用と思われる。

図9は1例として、冬季の日本海側におけるがいしへの塩分付着密度の実測値と本手法による推定値を比較し



(a)  $\sigma = 0$  ms



(b)  $\sigma = 1.0$  ms

図7 線路各点における鉄塔のフラッシュオーバー確率

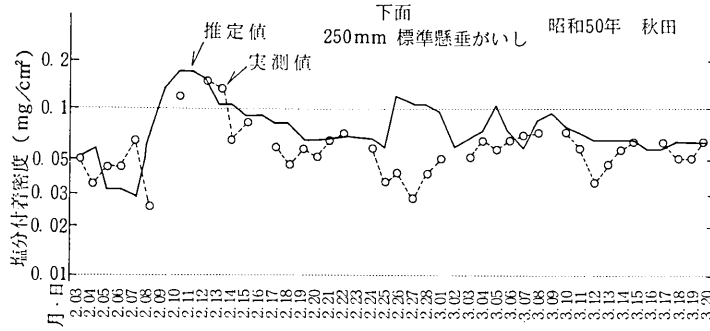


図9 塩分付着密度の推定例

て示したものであり、本手法が降雪を含む条件も処理が可能で、精度の点でも実用が可能なることを示している。並行して行なわれた基礎研究では、がいしが汚損フラッシュオーバーに至る上で不可欠な、汚損物の湿潤をもたらす重要な因子の一つであるがいしと気温の間の温度差について、検討を行なった結果、それが従来考えられていたような汚損フラッシュオーバー事故の主因にはならないと明らかにした<sup>5)</sup>。

この成果により、温度差の実測値の得られていない過去の記録にもとづく事故の解析や、一般の気象データにもとづく送電線経過地の汚損による事故危険度の解析が可能となり、本手法の適用可能範囲は一気に広がることとなった。このほか時系列で推定されるシステムのフラッシュオーバー危険度とシステムの一定期間における事故率との関連も明らかにされたことで、絶縁設計および運用の両面で、本手法は実用が可能となっており、塩害に対するシステムの信頼度向上に役立つことが期待される。

### 6. む す び

大都市にエネルギーを供給する電力システムに要求される信頼度はますます高度なものとなっており、したがって災害に対する電力システムの防護の方策を探究することは電力工学上きわめて重要な問題となっている。この点に着目して、筆者らは本臨時事業において、都市に対するエネルギー供給の根幹となる大電力システムの災害に対する信頼度評価とその向上をはかり、またこれを防護するため

の最適な方策について研究を行なった。

このためには電力システムの絶縁破壊の原因となる雷、塩害などの自然災害やシステムの開閉操作に際して発生する開閉サージ等の多岐にわたる問題を取り上げる必要があり、そのおのおのについて研究を行なった結果、電力システムの絶縁設計の合理化やシステムの運用上有用な方策について、従来得られていない新しい知見を得ることができた。

このように、絶縁信頼度向上につながる多くの問題を取り上げて、総合的な観点に立脚した研究は従来はあまり例がなく、その意味で本研究の成果は電力分野において新しい方策を与えることができるものと期待される。

(1977年9月16日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 河村, 北条, 石井「雷に対する電力供給システムの絶縁信頼度」生産研究 **26**, 457 (1974.11)
- 2) T. Kawamura, J. Hojyo, M. Ishii "Anomalous Counts of a Lightning Flash Counter with Vertical Antenna" Seisan Kenkyu **29**, 49 (1977. 2)
- 3) 河村, 西村, 「開閉サージに対する電力供給システムの絶縁信頼度」生産研究 **29**, 170 (1977.3)
- 4) 河村, 石井, 森田, 伊坂「汚損条件下における電力供給システムの絶縁信頼度」生産研究 **26**, 63 (1974.2)
- 5) 河村, 石井「自然条件下における汚損がいしの温度差ならびにフラッシュオーバー確率の検討」電気学会論文誌 **96-B**, 7 (1976.1)

