

雷に対する電力供給システムの絶縁信頼度

Reliability of Insulation in the Power Transmission Systems against Lightning

河村 達雄*・北條 準一*・石井 勝*

Tsuo KAWAMURA, Jun'ichi HOJYO and Masaru ISHII

1. まえがき

電力需要は年々増大の一途をたどっており、これに対処するために、大都市などへの電力消費地域に電力エネルギーを供給するための超高圧送電線が建設され、さらに超々高圧送電線も計画されている。このような送電線はわが国における電力システムの根幹であって、これらが一旦事故に見舞われると大都市における大停電事故につながるため、これらの送電線の絶縁信頼度を向上させることはきわめて重要な問題である。

わが国における送電線の事故のうち最も多いのは雷によるものである。したがって送電線において合理的な耐雷設計を行ったり、襲雷時における送電システムの運転を行うためには自然雷ならびにこれによるフラッシュオーバー事故について充分の解析を行うことが必要である。

従来送電線における絶縁設計に当っては、フラッシュオーバー事故を発生させるための苛酷な外的要因を想定し、これに対してフラッシュオーバー事故を発生させないことを条件とするいわゆる確定論的手法がもっぱら利用されてきた。しかしながら、この方法によればややもすると絶縁に余裕をとり過ぎる傾向があったが、最近この手法に対して、例えば耐雷設計においては、自然雷の電流波高値や波形に関する統計分布を考慮し、電子計算機を利用して送電線のフラッシュオーバー確率を算定し、電力システムにおける絶縁信頼度の評価やその向上をはかる統計的手法が注目を浴びている。

筆者らはこの立場に基づいて、すでに汚損条件下における絶縁信頼度について発表を行ったが²⁾、本文においては自然雷に対する電力供給システムの絶縁信頼度についての研究結果について述べる。

2. 送電線における雷害事故

送電線における事故の原因としては、自然雷、開閉サージ、がいし汚損による絶縁耐力の低下等が考えられる。事故統計によれば、110 kV 以上の電圧階級の送電線においては、雷に起因するものが全体の 53% を占めており、事故のうちで最も多い。したがってわが国においては送電線建設の際の耐雷設計や運転時における雷害防止対策に多大の努力が払われて来た。

近年電力需要の飛躍的増大に伴ってわが国においても

500 kV 送電線が運転され、さらに超々高圧送電線も計画されている。このような送電線における事故軽減対策をはかることは大都市などの電力消費地域へのエネルギーの安定供給上きわめて重要な問題である。しかるにこれらの送電線においては、電圧階級の低い送電線より得られる予想をはるかに上回る雷害事故が経験されており、これに対処するために雷しゃへいや送電線鉄塔における電位上昇、さらにフラッシュオーバー確率の解明など送電線の絶縁性能向上のための研究が要望されている。

雷に対する送電線の絶縁設計に当っては、送電線經過地における襲雷や雷撃電流の波高値、波頭長等の苛酷な条件を考慮し、これに対してフラッシュオーバーしないことを条件として耐電圧値をきめる確定論的手法が一般に広く利用されている。

近年この手法に対して、雷電流に関するパラメータについての統計的分布を考慮し、電子計算機を利用して送電線における雷特性のシミュレーションを行い、フラッシュオーバー事故発生確率の算定を行って送電システムにおける絶縁信頼度の評価やその向上をはかる手法が注目されている。この方法は雷撃に関する統計的分布を電子計算機に入力し、従来雷撃電流の統計分布上のある点を基準として考慮していた絶縁設計を統計分布そのものを考慮して検討しようとするものであって、いわば統計的手法と名づけることができる²⁾³⁾。この手法によれば、従来の手法における設計の条件が統計分布上どのような位置づけとなっているかを具体的に評価できる点でその意義は大きいものがある。この方法は国際電力技術会議 (CIGRE) における最近の重点研究課題として毎回活発な討論が行われている外に国際電気標準会議 (IEC) においても国際規格化が行われている。

本文においては、この手法に立脚して襲雷時における電力供給システムの絶縁信頼度の評価とその向上に関して行なった研究結果について述べる。

3. 対地雷撃頻度の測定

電力供給システムにおける雷事故率に関する計算を行うためには、まず自然雷に関する信頼できるデータの集積が必要である。図 1 は電子計算機によって送電線の雷害事故確率を算定するための計算プログラムを示す³⁾。同図より明らかなように、必要とされる雷のデータとしては、雷電流波高値、波頭長、雷撃地点等に関する分布

* 東京大学生産技術研究所 第 3 部

とともに、雷による対地放電頻度の地域分布があげられる。

対地雷撃頻度の地域分布については、絶縁設計上きわめて重要な量であるにもかかわらず不明確な点も多く、このため従来から対地雷撃頻度が雷雨日数 (Isokeraunic Level, IKLと略称) に比例するものとして設計が行われている。ここで雷雨日数とは考慮している地点において耳によって雷を感知した年間の日数で表現する。最近この方法に対して、さらに合理的な評価を行う目的で、雷放電カウンタを利用して対地放電数の比較測定が世界的規模で実施されている。筆者はこの方法が雷に対する送電線の絶縁信頼度の評価にき

わめて有効である点に着目し、わが国ではじめて本所千葉実験所において測定を行い、今日まで引き続き資料の収集につとめている。現在ではこの方法で雷の対地放電数を評価しようとする試みが全国的規模で行われるようになり、当初の目的は達成されつつある⁴⁾。

雷放電カウンタは地上高 5 m で水平に架設された長さ 14 m の導線 6 条の両端を短絡したアンテナによって雷放電に伴う電界強度変化をとらえ、これを図 2 に示す計数回路によって計数、記録させるものである。得られた結果の一例を図 3 に示す。同図 (a) は昭和 38 年 6 月～9 月の雷雨期において得られた関東地方における計数値の分布を示してある。これらの数値と雷放電カウンタの動作範囲から対地放電数の地域分布をもとめることができる。同図 (b) には同地域における 6 月～9 月の雷雨日数の地域分布もあわせて記してある⁵⁾。

雷放電度数分布と雷雨日数との間には明らかに相関が認められる。いま各地域における雷放電度数と雷雨日数との差異に着目すれば、雷放電カウンタによる計数値の地域間の差異は雷雨日数のそれよりも多いことがわかる。これはわが国における雷の形式を考えれば理解することができる。このような雷による対地放電に関する資料をもとめておけば、ここを経過する送電線の雷害事故率をもとめることができ、またこれを利用して事故防除対策を行うことができる。

さらに雷放電カウンタを利用し、一定時間内における計数値をもとめることにより襲雷の予知をすることも可能である⁴⁾。このような利用を考える場合には、雷放電

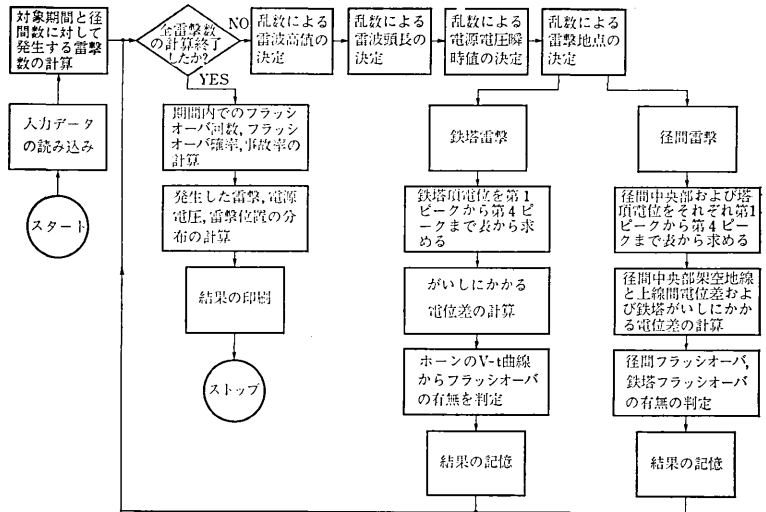


図 1 送電線におけるフラッシュオーバー確率の計算プログラム

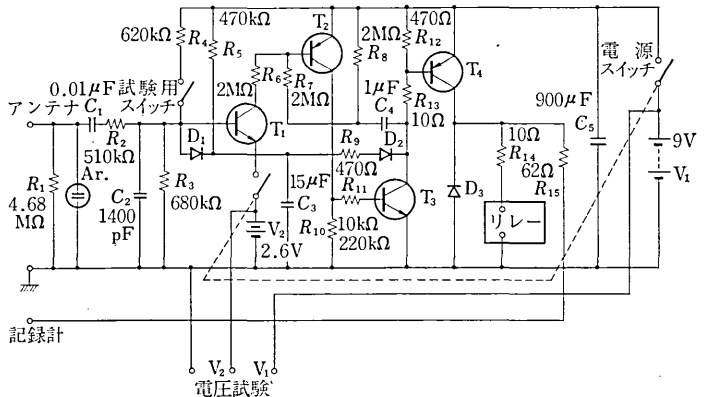


図 2 雷放電カウンタ回路

カウンタの動作範囲、計数値と雷活動の相関、動作感度と計数値との関連等について信頼できるデータの集積が要望される。筆者らはこれらの点にも着目して研究を進めている。

4. 送電線鉄塔における電位上昇の解析⁶⁾

さきに述べた計算プログラムからも明らかのように、雷による送電線のフラッシュオーバー事故確率の算定に当たっては、送電鉄塔やがいし連における雷サージによる電位上昇について充分の解析を行う必要がある。送電線鉄塔におけるサージ特性の解析の手法としては、実際の鉄塔を利用して実測を行う方法、モデル鉄塔による方法、理論計算等があげられるが、筆者はこのうちモデル鉄塔によって解析を進めた。この方法によれば各部の電位上昇が直接測定でき、かつ実際の現象が線形の範囲でほとんど完全に模擬される等の特長を有する。

モデル送電線による雷サージの解析は従来においても

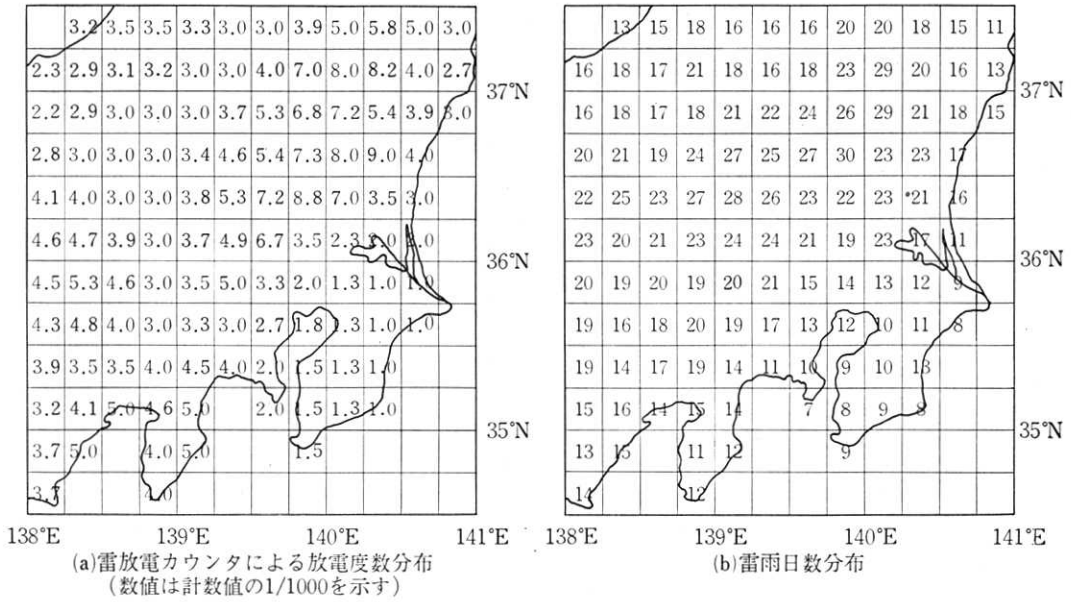


図3 雷放電カウンタによる放電度数と雷雨日数の分布

行われているが、今回新たに縮小モデルを使用した鉄塔電位上昇の解析を行なうのは次のような理由が考えられる。第1に500kV送電系統の運転によって地上高のかなり高い送電鉄塔が多数出現してきたため、かような送

電システムの絶縁信頼度を評価するために、そのサージ特性を明らかにしておく必要が生じたことがあげられる。現在までにこの手法によって研究されて来たのは30m級の鉄塔で、今回のような80m級の高鉄塔について解析が行われた例は見当たらない。第2に急しゅん波高電圧の発生が可能となったため、モデルに高電圧を印加して高電圧、大電流に伴う逆フラッシュオーバーやコロナ発生などの非線形現象を模擬できるようになったことがあげられる。さらに第3に筆者が電力中央研究所、東芝と共同で開発したオプトエレクトロニクスを応用した測定技術によって従来不可能であった高電位点におけるns領域のパルス計測が可能となった点があげられる。

試作したモデルは500kV2回線送電線であって、その縮尺比は1/50とし、3基の鉄塔モデルによって2径間の送電線を模擬している。直接雷撃を受ける中央鉄塔は図4に示すように精密に縮小されている。図5にモデル送電線の概観を示す。

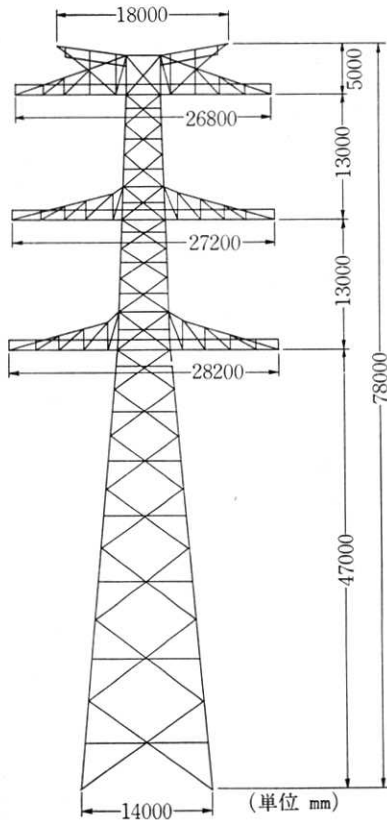


図4 モデルの対象送電線鉄塔

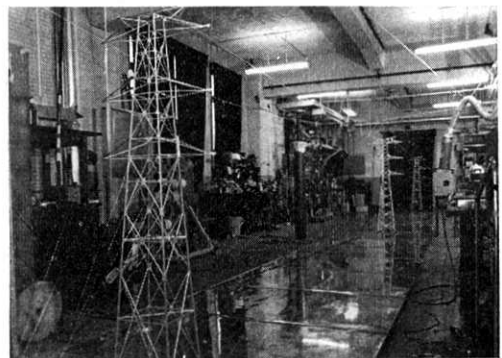


図5 モデル送電線の概観

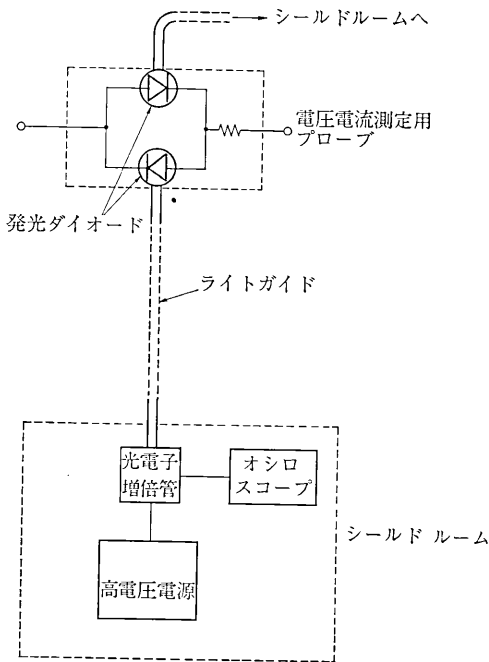


図 6 オプトエレクトロニクスによる高電位点の電圧、電流測定システム

実験に当っては、インパルス電圧発生装置によって充電された伝送線路と高気圧ガスギャップと組み合わせて模擬雷撃電流を発生させ、鉄塔回路に電流を流している。測定装置に要求される性能としては、まず実際の雷現象の 50 倍の高速現象を精度よく測定できなければならない点があげられる。さらに高電位点における電圧、電流を計測できること、モデルのがいし両端の電位が計測できるようプローブが小型であること等が要求される。図 6 に示した発光ダイオードを利用した測定システムによりこれらの条件を充分満足させることが明らかにされたのでこの方式を利用することとした。

モデル鉄塔に模擬雷電流を流した場合に得られた電位上昇の実測値と Bergeron 法によって計算された塔頂電位とを比較した結果を図 7 に示す。これらの結果を見ると、急しゅんな流入電流に対する計算値と実測値との差はピークに達した後の塔頂電位の下がり方に表われている。したがって電位上昇による逆フラッシュの危険率を短波尾長の波形係数まで考慮して予測する場合には問題となってくるものと考えられる。また流入波頭長が長い場合、これは鉄塔高が低い場合にはほとんどがこのケースに当てはまるものであるが、この際には接地抵抗が低い時には図 7 (c) に示すように計算値と実測値との間にはきわめてよい一致がみられる。過去においてモデルの等価性の根拠として示されたのはこの例である。この際にも接地抵抗が低い場合には同図 (d) に示すようによい一致がみられない点に注意を要する。

これらの成果から超高压送電線に利用される高鉄塔に

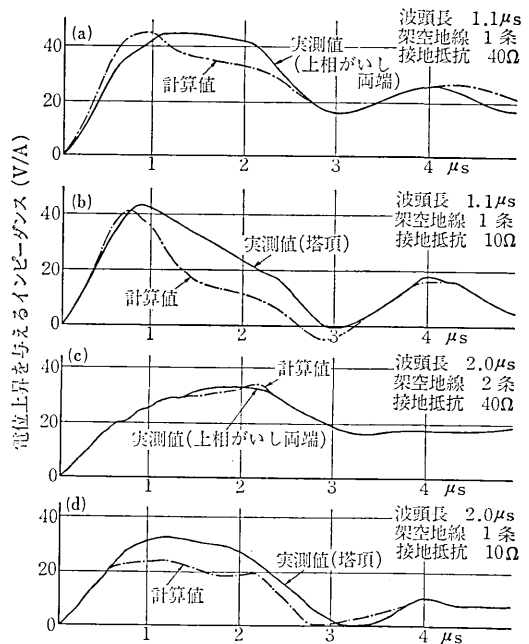


図 7 鉄塔電位上昇の波形

おいて現在行われている解析手法におけるいくつかの問題点が指摘される。本モデル実験の結果から鉄塔電位上昇についての知見が得られ、これを利用して電力供給システムの絶縁信頼度の評価を行うことができる。

5. 電力系統における絶縁信頼度の算定

電力系統における絶縁信頼度の算定に当っては、さきに述べた自然雷、送電線や変電所などの電力設備における電位上昇、絶縁物のフラッシュオーバー特性等に関するデータを入力し、電子計算機を利用してモンテカルロ法によって雷特性のシミュレーションを行い、フラッシュオーバー確率をもとめる方法が利用される。

この手法を変電所に適用して計算を行った例を図 8 に示す⁷⁾。これは 500 kV 変電所に接続されている送電線において逆フラッシュオーバーが発生し、雷サージ電圧が変

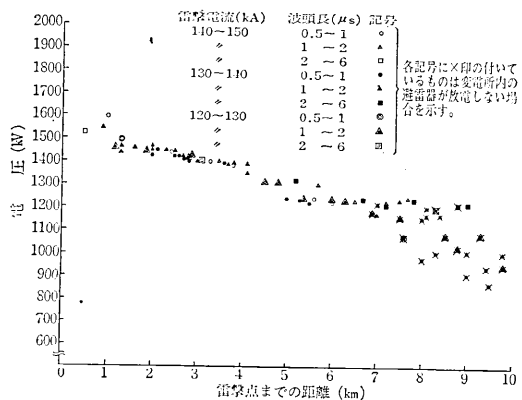


図 8 変圧器点電圧に及ぼす各種パラメータ

電所に侵入した際の変圧器点の電位上昇と雷撃点、雷電流波形との関係を示したものである。計算にあたっては、モンテカルロ法を利用して雷電流の波高値や波頭長をあらかじめ電子計算機に記憶させ、乱数を利用して個々の値を決定している。この計算においては、960年の期間における8,350回の雷撃を対象として計算したことに対応する。

わが国における500kV変電所における変圧器の雷インパルス電圧に対する絶縁強度の基準値は1,550kVである。上記期間において発生する雷サージ電圧がこの値を越える確率は 1.2×10^{-4} と計算される。またこの計算では変電所引込口の絶縁強度の基準値1,800kVを越える確率は 2.4×10^{-4} と計算され、両者はほぼ同じ値を示している。線路引込口におけるフラッシュオーバー確率は絶縁強度を上げてあまり減少しないことが示されているが、この点については今後検討を要する。

送電線における自然雷に対する絶縁信頼度を向上させるために考慮すべき重要な問題に雷しゃへいがあげられる。特に最近超高圧送電線において低い電圧階級の送電線から予想される雷事故を上回るフラッシュオーバー事故が経験されており、その一因がしゃへい失敗によるものと考えられるようになり、これに対する有効な方策の確立が要望されている。筆者らはこの点についてもモンテカルロ法を利用した解析を行い、成果を収めている。

6. むすび

大都市における電力需要の飛躍的な増大に対処するために、超高圧送電線が建設され、さらに超々高圧送電線も計画されている。かような電力供給システムにおいては従来にも増してその絶縁信頼度の評価とその向上をは

かることが重要な問題である。本論文においては、汚損条件下における絶縁信頼度に引き続いて、雷に対する電力供給システムの絶縁信頼度に関する研究結果について述べたものである。このために、フラッシュオーバー事故確率に必要な自然雷および送電鉄塔における電位上昇について研究を行った。さらに電気設備における絶縁信頼度の評価の一例を示した。かような手法は電力供給システムのより合理的な設計や運用の指針を与えるものと考えられる。また襲雷の予知ならびにこれを利用した電力システムの運用については今後さらにデータの集積が必要である。

(1974年9月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 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, p. 23, 1974. 2.
- 2) 広瀬, 河村, 尾崎, 山本, 一原「電力系統における絶縁協調」電気学会雑誌 91, p. 19, 1971. 1.
- 3) 河村「統計的耐雷設計」昭和48年電気四学会連合大会論文集 7, 1973. 10.
- 4) T. Kawamura, J. Hojyo, et al.: Recent Investigation of the Lightning Flash Counter and its Application to Thunderstorm Alarm System, CIGRE Study Committee No. 33, Task Force 01: Lightning Flash Counters 15, 1972. 8.
- 5) 河村, 北條, 三谷「雷放電カウンターによる I. K. L. マップの作成 (昭和48年度)」雷害事故調査委員会資料 No. 23, 1974. 6.
- 6) 河村, 石井, 原田, 岸「モデルによる雷撃時鉄塔電位上昇の検討」昭和49年電気学会全国大会論文集 914, 1974. 3.
- 7) T. Kawamura, et al.: Statistical Approach to the Insulation Co-ordination of Substations against Lightning Overvoltage, CIGRE 1974 Session, Group 33: Overvoltages and Insulation Co-ordination, 1974. 8.