

送電工学におけるモンテカルロ法の応用

—送電線事故率の推定に関する統計的手法—

Application of Monte Carlo Method to the Electric Power Transmission Engineering
—Statistical Method for Estimating the Outage Rate on the Transmission Line—

河 村 達 雄*

Tatsuo KAWAMURA

電子計算機を利用して送電線の雷特性のシミュレーションを行ない、あわせて事故率を計算する方法は最近系統の絶縁設計上新しい手法として注目を浴びている。計算の手段としては通常モンテカルロ法が利用されている。本文においてはこの新しい手法について解説を行ない、あわせて計算結果と実績との比較を行なっている。

1. 緒 言

送電線におけるサージ現象の実態を正確に把握し、あわせてその防護対策を講ずることは電力工学における最も重要な問題の一つであることはいままでもない。近年デジタル計算機による高速度演算能力を利用して従来なし得なかった複雑な現象のシミュレーションを行なうことが可能となり、このためかかる電力系統における統計的手法の適用は最近目ざましい進歩を遂げている。本文ではモンテカルロ法を適用した系統の事故解析法についてのべることとする。ここで取扱う対象そのものは力学系とはまったく異なるものであるが、計算の手法という点から見るとかなりの共通点があるようにも考えられる。このような観点に立ち、本文を力学系の解析に関する特集号の一環として解説を加える次第である。

2. 入力データとその性質

ここではまず取扱う対象について簡単にふれることとする。送電系統中に雷撃が発生した場合には雷撃点において、立ち上がり時間数 μs 、幅 $40 \mu\text{s}$ 程度の異常電圧が発生する。電力を輸送している導体に落雷する場合には、これが直接事故となるが、通常送電線には、雷しゃへいのために頂部に架空地線と呼ばれる線路が架設してあり、ほとんどはこの架空地線に落雷し、その際には異常電圧は地線に沿って伝はんする。個々の鉄塔はこの架空地線と接続されており、したがって伝はんするサージ電圧は各鉄塔で反射、透過の現象を生じ、かくして伝はん波はかなりのひずみを生ずる。鉄塔において架空地線—導体間の電圧がいし連の絶縁強度より大きい場合にはここでせん絡が起り、事故の一因となるが、これを鉄塔逆フラッシュオーバと呼んでいる。また一方架空地線を伝はんする電圧波が架空地線と一番上の導体との間で気中絶縁破壊を起こすに十分なほど大きければ、鉄塔間においてもせん絡現象が発生する。これを径間逆フラッ

オーバと呼んでいる。本計算の目的は対象とする線路に雷撃が発生する場合に、年間、一定区長当たりの事故件数をモンテカルロ法を利用して算定し、これに基づき線路の耐雷設計を統計的に検討しようとするものである。

ここで、この計算に必要な入力データを考えてみる。雷による年間の大地雷撃数については十分によく知られていない面もあり、このために、筆者は雷放電カウンタを利用して大地放電数の比較測定を行なっている。現在までの知識でいい得ることは、この値が雷雨日数 (Isokeraunic Level, IKL と略称) に比例するという点である。ここで雷雨日数とは雷鳴のあつた日数をその強弱にかかわらず全部採録し、年間における発生日数で表現する。大地雷撃数、雷雨日数間の比例定数についてはいくつかの研究結果が発表されている。得られた結果の平均をとれば、 1 km^2 当たり年間の大地雷撃数は雷雨日数の 0.1 倍となることがわかる。

雷撃のうち送電線に吸取される数をもとめるためには、たとえば次式のようなしゃへい面積を考えればよい。

$$A = (2\pi + 1)h_i^2 + 4h_o(L - h_i) \quad (1)$$

ここで A は送電線路によってしゃへいされる全面積を表わし、 h_i は鉄塔高、 h_o は平均架空地線高、 L は径間長である。したがって対象送電線に対する全雷撃数 N は次式により計算される。

$$N = A \cdot M \cdot K \cdot (\text{IKL}) \cdot (\text{年数}) \quad (2)$$

ここで A は (1) 式より決まる数値、 M は送電線の径間数、 K は IKL と大地雷撃数との間の比例定数でほぼ 0.1 に等しい。

送電系統における落雷については、前述のような経過でせん絡事故が発生するが、導体への直撃雷はそれが直接事故とつながるために極力回避しなければならない。架空地線はこのための設備であるが、いま架空地線と一番上の導体とを結ぶ線と、架空地線からの垂線ではさまれる角をしゃへい角と呼び、これを小さくすることによって導体直撃の確率を減らすことができる。すなわちしゃへい角 α とこれに対する直撃率 V_α との間には次の

* 東京大学生産技術研究所第3部

ような関係式が成立する。

$$\log V_a = 0.06 \alpha - 2.2 \quad (3)$$

超高压送電線においてはしゃへい失敗を無視し得る程度の α を採用しており、この影響はきわめて小さいと考えてよい。

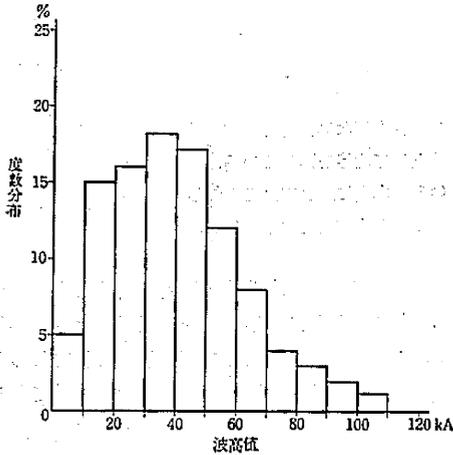


図 1. 雷撃電流波高値度数分布

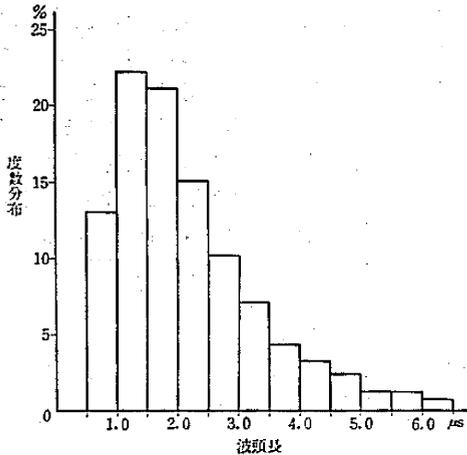


図 2. 雷撃電流波頭長度数分布

次に問題となるのは雷撃電流の波高値ならびに波頭長の統計的分布である。これについては古くから多くの人々によって実測が行なわれているが、その 1 例として雷撃電流の発生度数分布を示せば、図 1 のように表わされる。さらに電流の立ち上がり時間つまり波頭長の度数分布を示したものが図 2 である。多数の実測データからこの両者の間の相関について計算を行なった結果、相関なしと認められた。これは多くの経験とも合致し、当然の結果と考えられる。

3. 回路の応答特性

鉄塔または径間への落雷によって電流が回路に流入する場合に回路がいかなる応答を示すかについて考えてみることにする。一つの計算方法として伝送線路上における

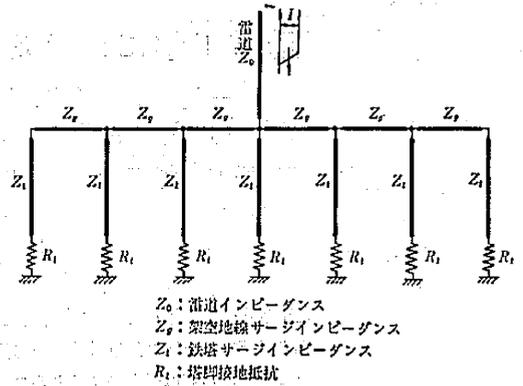


図 3. 鉄塔雷に対する等価回路

進行波理論によるものが考えられる。架空地線ならびに鉄塔はそれぞれサージインピーダンス Z_0 , Z_1 の伝送線路と考えることができる。さらに鉄塔の大地側には、接地抵抗に対応する抵抗を終端抵抗として考慮する必要があるが、この値は通常 10~20Ω である。したがって、鉄塔雷によるサージ伝ばんに対する等価回路は図 3 のように表わされる。雷雲より進展する放電路も一つの伝送線路と見なし、そのサージインピーダンス Z_0 を 400Ω と仮定すれば雷撃電流 I による入射電圧の波高値 E は鉄塔雷の場合には

$$E = 400 \cdot \frac{I}{2} \cdot \frac{2Z}{400 + Z} \quad (4)$$

ここで

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{2Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

径間雷の場合には

$$E = 400 \cdot \frac{I}{2} \cdot \frac{2(Z_0/2)}{400 + (Z_0/2)} \quad (6)$$

で表わされる。さらにかようなパルス波が鉄塔との接続点まで伝ばんするところで反射、透過現象が起こるが、この反射係数、透過係数はそれぞれのインピーダンスから簡単にもとめることができ、したがって伝ばん波形は、たとえば電子計算機などを利用して詳細に計算される。鉄塔のインピーダンスを無視し、鉄塔回路を塔脚接地抵抗のみと見なして計算する方法や、鉄塔を 20μH 程度の集中インダクタンスとして計算する方法もあるが、特に急しゅんな立ち上がりを有するサージ波に対してはやや正確さを欠くおそれがある。

回路のレスポンスをもとめるもう一つの方法として、縮小モデルを利用する方法があげられる。鉄塔や雷道は大地面に対して垂直であるからこれを一つのサージインピーダンスとして表現するのは、一つの近似といえる。このため鉄塔をはじめ送電線を数 10 分の 1 に縮尺した模型を作って、これにパルス電圧を印加し、各部に発生する電圧を測定することによって応答特性をもとめることができる。このためにはこの縮尺比にしたがって時間

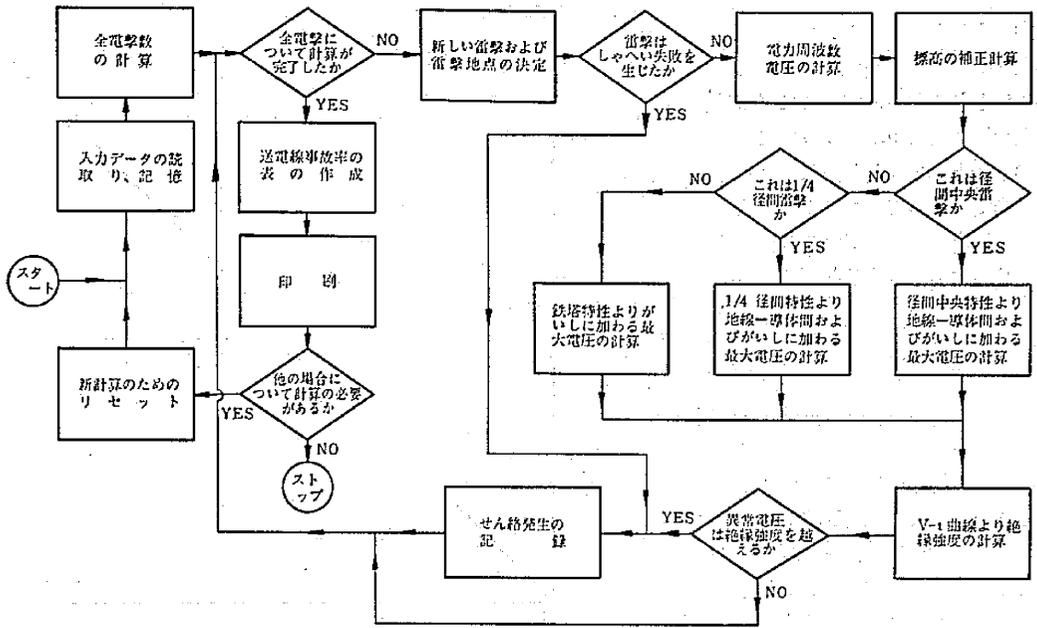


図 4 モンテカルロ法を利用した送電線雷特性計算のためのフローチャート

軸の縮少をさせることが必要であり、この結果ナノ秒のパルス技術が必要とする。測定に当たってはかなり高度の技術が必要とするが、回路の応答特性を的確に把握することが可能である。

4. 計算のプログラム

計算の手法としてはモンテカルロ法が利用される。雷電流波高値、波頭長の統計的分布はすでに明らかにされており、したがってかような分布を持つ集団から乱数を利用して個々の雷撃電流波高値ならびに波頭長を発生させこれを入力として利用する。さらにこの雷撃がしゃへい失敗を生じたか否かを、たとえば(3)式により判定させる。ここでしゃへい失敗はせん絡事故と考えられる。雷撃点については鉄塔、径間中央のみと考える場合とこれに1/4径間を加えて考える場合とがあるが、ここでは後者を例としてあげた¹⁾。この場合のフローチャートを図4に示す。がいし連の両端ならびに径間に現われる異常電圧は前述の縮小モデルによりもとめた回路のレスポンスによって行なうこととし、この結果は計算機の入力データとして取り入れられている。もちろんこのサージ電圧にはその瞬時にける交流電圧も加えて考えねばならず、その位相もやはり乱数を用いて決定する。

せん絡、非せん絡の判定は図5に示すような電圧-時間曲線(V-t曲線)との比較によって行なう。これは衝撃電圧のせん絡電圧とせん絡までの時間との関係を示すものであって、サージ電圧がこの曲線を上回るか否かによってせん絡、非せん絡の判定をさせることができる。

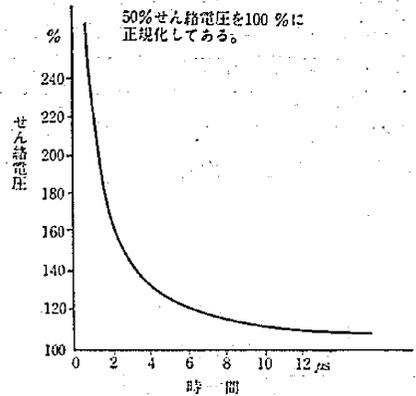


図 5 棒-棒間隙の V-t 曲線 (正極性)

かような計算の結果、個々の雷撃についてせん絡事故に至るかどうかの判定が得られるが、必要な年数にわたる全雷撃数につき計算を行ない、得られたせん絡件数から対象としている送電線の年間、一定亘長の事故件数を算定することができる。

5. 実績との比較

得られた計算データを実績と比較することによって、本計算法で用いられている送電線雷特性のシミュレーションの妥当性を検証することができる。図6は、この計算とアメリカにおける実績との比較を行なった結果である¹⁾。送電線の電圧階級は 110 kV から 345 kV までの間でかなり大幅に変わっており、さらにその構造についても、木柱、鉄塔というように条件もかなり異なっているにもかかわらず、両者の間にはきわめてよい一致が得

られている。

このことはかかるシミュレーションが実際の現象をかなりよく表現していることを示すものにほかならない。筆者らは電気学会高電圧試験専門委員会 SD グループにおける調査研究の一環として、わが国における超高压送電系統を対象としてモンテカルロ法による雷害事故の研究を行なっているが、やはり実績ときわめてよく一致する計算結果が得られている。

6. 結 言

送電線における雷現象の電子計算機によるシミュレーションを行ない、雷害による事故件数の理論的な計算を行なった。計算結果は実績ときわめてよく一致し、ここで用いたシミュレーションや入力データが実際の現象をきわめてよく模擬していることを示している。最近電力工学においては統計的手法を利用して系統の解析を行ない、送電線の設計を試みるものがいろいろと行なわれ、成果を収めつつあるが、これらについては機会を改めてのべつもりである。ここで取扱っている対象は力学系の解析とはまったく異なっているが、数学的手法としてはかなりの共通点があると考えられる。本特集号中の一文としてこの点を特に強調したい。本文がその関連分野と同時に

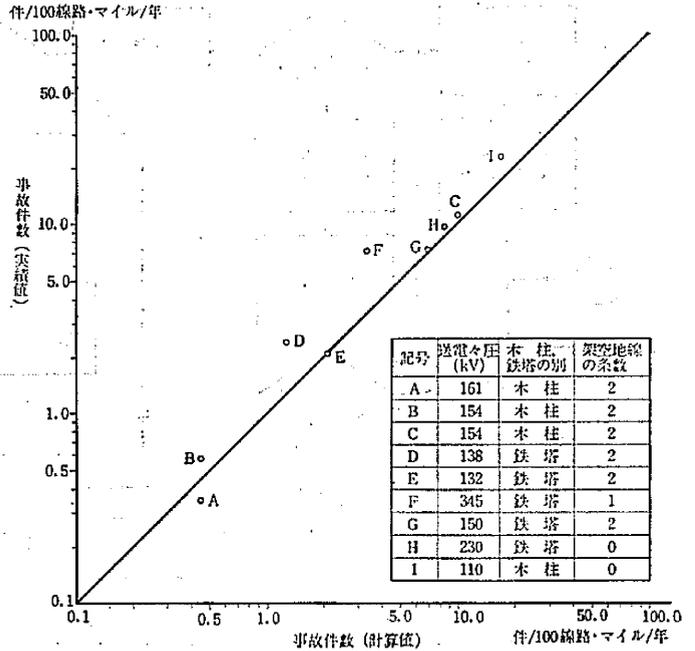


図 6 送電線における事故件数の計算値と実績値の比較

異なる専門の方々の参考になることがあれば筆者の最もよろこびとするところである。(1968年3月14日受理)

参考文献

- 1) J.G. Anderson, Trans. A.I.E.E. 80 p.414 (1961).
- 2) 沼尻, 電気学会雑誌, 81 p.1258 (1964).

(p. 36 よりつづく)

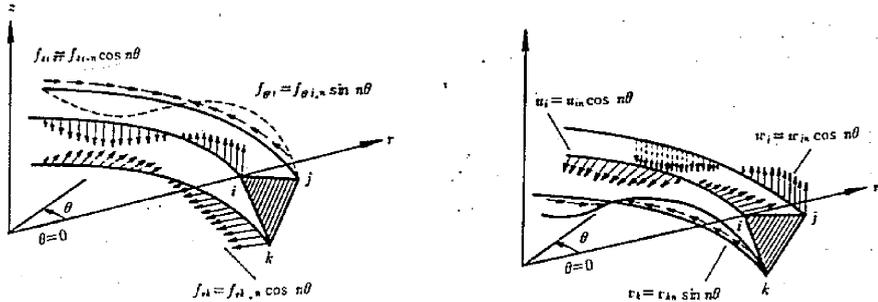


図 17

屋繁松, 田中伸幸の両君に, 厚く御礼を申上げる。

(1968年3月29日受理)

引用文献

- 1) O.C. Zienkiewicz & Y.K. Cheung: The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, 1967, p. 22
- 2) R.W. Clough & J.L. Tocher: Finite Element Stiffness Matrices for Analysis of Plate Bending, Proc. Conf. Matrix Methods in Struct. Mech., Air Force Inst. of Tech., Ohio, 1965
- 3) J.H. Argyris, S. Kelsey & H. Kamel; "Matrix Method of Structural Analysis", AGARDograph 72, Pergamon Press, 1964, pp. 128~135
- 4) 坪井・川股・塩屋・田中: Finite Element Method による連続体の解析, 日本建築学会論文報告集, 号外, 昭 42・10 月
- 5) R.W. Clough: The Finite Method in Structural Mechanics, "Stress Analysis", John Wiley & Sons, 1965, pp. 98~100
- 6) 川股・塩屋: 回転体の非対称問題に対する剛性行列, 生産研究, 20 巻 1号, 1968, (研究速報)
- 7) S. Kawamata & S. Shioya: Application of Finite Element Method to Non-symmetrical Problems of Solids of Revolution, "Recent Researches of Structural Mechanics" —Contributions in Honour of the 60th Birthday of Prof. Y. Tsuhoi, Uno-shoten, to be published, Apr. 1968