

# ハイブリッド手法による開閉サージの統計的研究

Statistical Study of Switching Overvoltages by Hybrid Method

河村 達雄\*・西村 和夫\*\*

Tatsuo KAWAMURA and Kazuo NISHIMURA

## 1. ま え が き

電力系統における絶縁設計に当たっては、従来は絶縁破壊を発生させる要因となる雷、開閉サージなどの異常電圧、台風などの気象条件の最苛酷条件を想定し、これらに対してフラッシュオーバー事故が発生しないことを条件に設計を行う確定論的手法が採用されて来た。これに対して、近年、雷、開閉サージ、汚損条件における統計的性質を考慮して、フラッシュオーバー発生確率を想定し、これによって電力系統の絶縁性能の評価とその向上をはかる統計的手法が注目されている。このような考え方は国際電力技術会議における優先議題として取り上げられ、しばしば討議が行われており、また国際電気標準規格にも採り入れられている。

絶縁設計における確定論的手法は、送電線の絶縁に対して最も苛酷な条件を想定し、これに対してフラッシュオーバー事故が発生しないことを条件として絶縁設計を行うものである。この方法は本来フラッシュオーバーの発生を許さないことを前提とするものであるために、絶縁強度の余裕をとり過ぎる恐れがある。これに対して、統計的手法によれば、フラッシュオーバーの原因となる雷、開閉サージなどの統計分布を考慮することによって、従来の絶縁設計が統計分布上のどのような位置づけとなっているかを定量的に評価することが可能となる。このためにこの手法は、絶縁性能の向上がますます要求される500kVおよびUHV送電線の絶縁設計上有力な指針を与え得るものと考えられる。

統計的手法によって電力系統の絶縁信頼度を向上させるためには、雷、開閉サージなどの統計分布に関する詳細な資料の収集が必要となることは言うまでもない。本研究においては、電力系統に発生する開閉サージの統計分布をもとめるために、過渡現象解析装置とデジタル計算機を組み合わせたハイブリッド計算システムを開発し、その高速度情報処理能力を生かして、開閉サージの統計分布をもとめ、電力系統における絶縁信頼度評価の

ための基礎的検討を行っている。

このようなシステムは高電圧測定、汚損がいしのフラッシュオーバー現象の解析等、広汎な適用が考えられ、今後電力系統における絶縁性能の向上のために広く利用できるものと考えられる。

## 2 ハイブリッド手法による開閉サージ計算<sup>(1)(2)(3)</sup>

開閉サージに対する絶縁設計に統計的手法を導入する場合に、その前提となるのは開閉サージの統計分布である。しかしながら、このことは多数回のサージ計算の必要性を意味し、従来一般に用いられてきた計算手法では計算時間の上で難点がある。

そこで筆者らは、回路計算には過渡現象解析装置(transient network analyzer, TNA)を使用し、データ処理とTNAの制御にはデジタル計算機を用いた開閉サージのハイブリッド計算システムを開発したが、最近このシステムをディスク記憶装置によって強化し、データ処理能力を一段と向上させている。図1に現在のシステム構成を示す。システムのハードウェア構成はすでに報告しているので<sup>(1)</sup>本文ではシステムの計算精度について述べる。

TNAの精度は本システムで最も重要な点であり、デジタル計算との比較によってその検討を行った。TNAは分布定数線路である送電線を $\pi$ 型等価回路の縦続接続によって模擬したものであるが、本システムではRL等価回路によって大地帰路周波数特性を図2のように近似し、精度の向上をはかっている。図3は本システムによって得られた開閉サージ波形とデジタル計算結果との比較であるが、TNAとしては非常に高い精度を有していることが分かる。

## 3 モンテカルロ法による不揃い投入シミュレーション

開閉サージの強度に影響を与える要因の一つにしゃ断器の投入不揃いがある。これは、投入命令から電氣的接触が完了するまでの時間が三相しゃ断器の各相で異なり、確率的なばらつきを持つ現象であるが、それ自体が統計的な量であるため、開閉サージに対するこの現象の影響を評価するためにはモンテカルロ法のような統計的手法

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

\*\* 東京芝浦電気株式会社

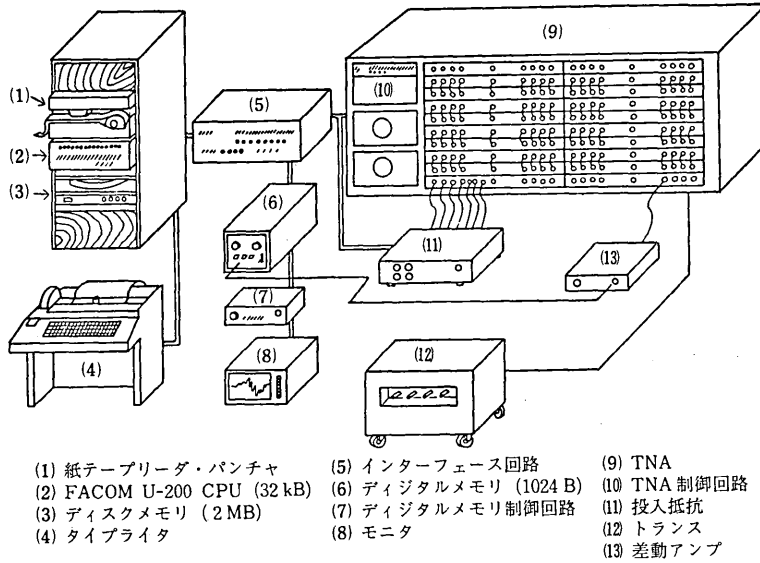


図1 開閉サージのハイブリッド計算システム

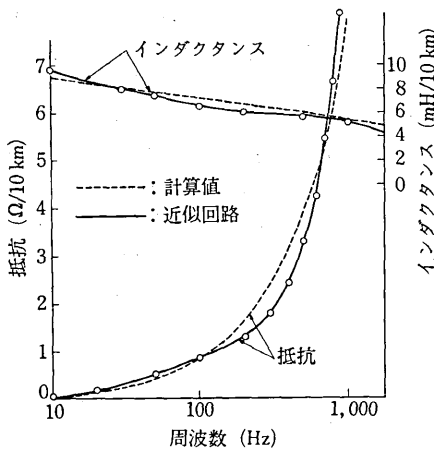


図2 大地帰路周波数特性

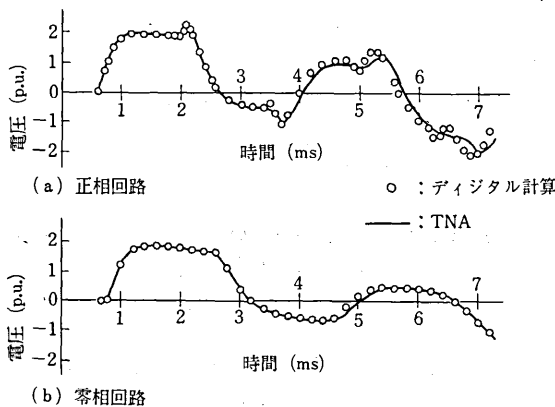
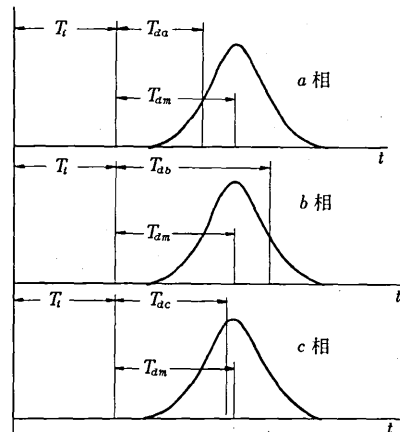


図3 TNAの出力とデジタル計算波形との比較

を必要とする。モンテカルロ法による不揃い投入のシミュレーションは次の仮定の下に行われる。

- (1) 投入命令は電源電圧のある相の1サイクル上で一様に起こる。
- (2) 投入の不揃いは主シャ断器についてのみ考慮し、抵抗投入の際の不揃いは無視する。
- (3) シャ断器の投入遅れは図4に示すように三つのシャ断器について同じ正規分布を成す。

ミニコンピュータは擬正正規乱数によってこのシャ断器投入遅れを作り、シャ断器の投入位相は投入目標位相にこの遅れを加えることによって決めている。以上の仮定の下でのシミュレーションのフローチャートを図5に示す。



$T_i$ : 抵抗投入時間  
 $T_{da}, T_{db}, T_{dc}$ : 各相投入遅れ  
 $T_{am}$ : 投入遅れ平均時間

図4 シャ断器の投入おくれの正規分布仮定

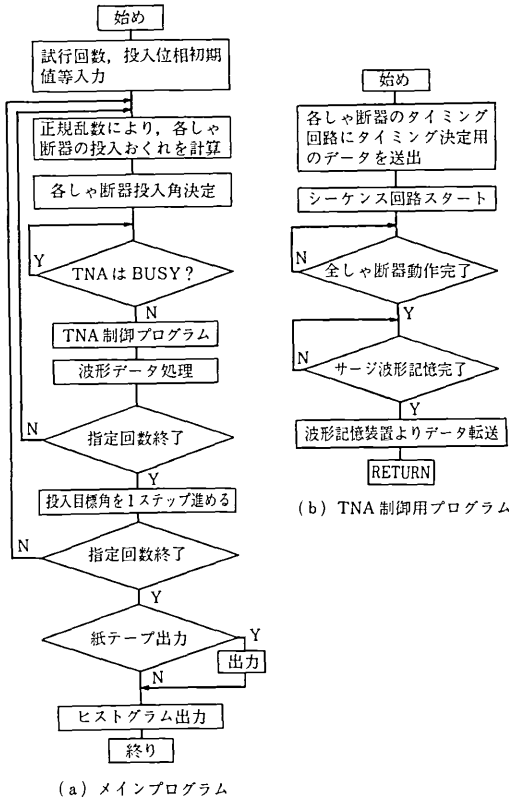


図5 不揃い投入のモンテカルロシミュレーションのフローチャート

4. 開閉サージに関する統計分布

開閉サージの波高値分布は送電線のフラッシュオーバー事故率の計算の基礎データとなるものであり、その分布形について十分な検討をしておくことが今後の研究を進展させる上で望ましい。開閉サージ分布の分布形としては従来しばしば正規分布仮定がなされている。この仮定は実測データが比較的正規分布に近くなる場合が多いことを根拠としているが<sup>(4)</sup>、データ数が小さいという問題があり、より詳細な検討を必要としていた。そこで筆者らは開閉サージのハイブリッド計算システムの優れた計算能力を利用して、開閉サージ分布の正規性に関する研究を行った。この研究は本システムによって初めて可能になったものであり、他に例を見ないものである。

図6は、しゃ断器の投入遅れの標準偏差 $\sigma$ が開閉サージ分布形に及ぼす影響を示している。 $\sigma$ が0msの同時投入の場合には開閉サージ分布の形は正規分布とはかけ離れた形状をしており、曲線の凹凸が大きく、分布のすそはかなり明確な上限を持って切れている。これに対して投入に不揃いが存在する場合には分布はなめらかな形状になる。これは、しゃ断器の不揃いによって投入時の

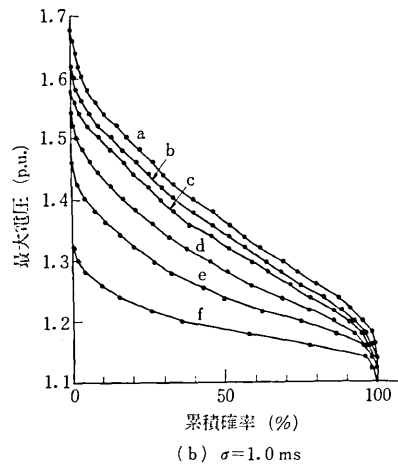
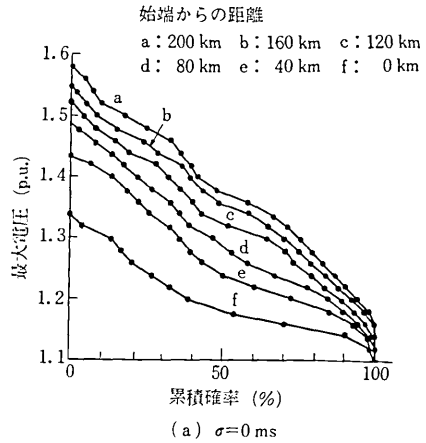


図6 投入不揃いが過電圧分布形状に及ぼす影響

回路条件が同時投入の場合よりも多様になるため、様々な大きさの過電圧が発生するためと考えられる。終端における過電圧最大値は、 $\sigma$ の増加と共に上昇するが、これは分布のすそが伸びる形で生じている。実際のしゃ断器は当然投入のばらつきを持っており、本結果は、実系統でのデータが正規分布に比較的近いという報告例<sup>(3)</sup>と一致した傾向を示している。

このように、しゃ断器の投入不揃いは、開閉サージ分布の正規分布との類似性に大きな影響を与えるが、事故率の計算では、分布の上限付近が重要であり、分布全体の大局的な比較だけでは、類似性の検討に不十分である。そこで、モンテカルロシミュレーションによって得られた分布をそのまま使用して計算した事故率と、この分布と同じ平均値と標準偏差を有する正規分布を考え、それから計算した事故率との比較をした。結果を図7に示す。両事故率の差は、ギャップ長の大小によらず、 $\sigma$ の増加につれて小さくなる。両事故率の差は送電線の絶縁強度

研究速報

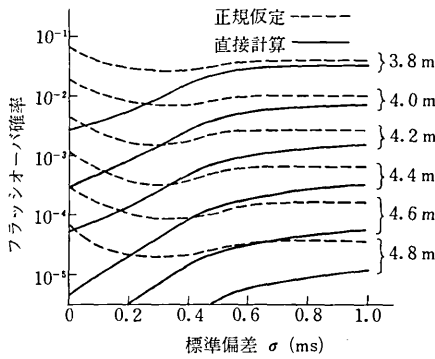


図7 計算した分布から直接求めた線路事故率と正規分布を仮定した場合との比較

が高まるにつれて大きくなっているが、これは、絶縁強度の上昇に伴って開閉サージ分布の上限付近の影響が大きくなることに起因する。すなわち、実際の開閉サージ分布はそのすそが有限値で切れていると考えられるのに対し、正規分布では無限に伸びているためである。

以上の結果より、しゃ断器の不揃いがある程度以上大きい場合には分布の形状についても、また、事故率の算定においても開閉サージ分布を正規分布と見なすことの妥当性が示された。

5. 開閉サージの波頭長分布<sup>(5)</sup>

本システムの特徴の一つに波形記憶装置を用いた開閉サージ波形の高速データ処理機能がある。これにより、波高値以外の波形パラメータに関する統計的な知見を得ることが可能になった。波高値以外の波形パラメータで最も重要なものとしては波頭長が挙げられ、多くの実験によって気中の絶縁強度に対する特異な効果が明らかにされている<sup>(6)</sup>。それ故、波頭長を考慮した絶縁設計を検討する必要があるが、それにはまず、送電線上で発生する開閉サージの波頭長の特徴を統計的に把握する必要がある。

図8は波頭長分布の一例であるが、極値分布と似た形状をしており、1ms程度の波頭長が最頻値となっている。一般に単一線路の充電の際に発生する開閉サージには線路の始端と終端での進行波の反射に関係した周波数が含有されているが、図8の場合には375Hzである。詳細は文献(6)に譲るが、この値から波頭長を逆に推定すると約1msとなり、上の最頻値に対応することが分かる。

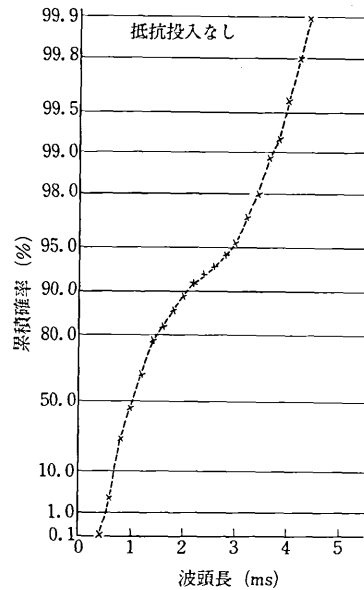


図8 波頭長分布

6. むすび

以上、ハイブリッド計算システムを用いた研究を示したが、これらの成果はこのシステムの優れた計算能力によってもたらされたものであり、絶縁信頼度の評価に大きな寄与をしている。筆者らはすでにこれらの資料に基づき、種々のパラメータと送電線のフラッシュオーバー確率との関連について研究を進展させているが、これについては別の機会に報告したい。終りに本システムの開発に当たって有益な助言をしていただいた本所、石井勝助教授に厚く御礼を申し上げる。(1979年6月11日受理)

参考文献

- 1) 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)
- 2) 河村, 石井, 北条, 西村「災害に対する電力システムの絶縁信頼度向上」生産研究 29, 632. (1977, 11)
- 3) 河村, 西村「ハイブリッド手法による不ぞろい投入サージの検討」電気学会論文誌 98-B, 227 (1978.3)
- 4) 高電圧試験専門委員会, S Dグループ「統計的手法による開閉サージフラッシュオーバー確率の計算法」電気学会技術報告(I部), 95, (1970)
- 5) T. Harada, Y. Aihara, Y. Aoshima: Influence of Switching Impulse Wave Shape on Flashover Voltages of Air Gaps, IEEE Trans., PAS-92, 1085 (1973)
- 6) 河村, 西村「開閉サージの波頭長に関する統計分布」昭和53年電気学会全国大会, 891