

開閉サージ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 Switching Surges

河村達雄*・西村和夫*

Tatsuo KAWAMURA and Kazuo NISHIMURA

1. ま え が き

わが国における大都市の電力消費量は逐年増大の一途をたどっており、これらの大消費地域へ電力エネルギーを供給するための超高压送電線が盛んに建設され、さらに超々高压送電線の建設も計画されている。これらの送電線はわが国における電力システムの根幹であって、その都市の機能を維持するために果す役割はきわめて大きい。

送電線において絶縁破壊を発生させる要因としては、自然雷および台風時などにおけるがいし表面に付着する塩分による絶縁耐力低下とともに、系統における開閉操作によって発生する開閉サージがきわめて重要な問題となっている。

電力系統における絶縁設計に当っては、従来は国内外において、確定論的手法がもっぱら利用されている。この手法は電力系統において自然雷や台風などの要因によって絶縁破壊を発生させる最も苛酷な条件を想定して、この条件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問題を論ずる手法である。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から、フラッシュオーバーの発生頻度はきわめて少なくなるが、ともすると絶縁に余裕をとり過ぎる結果となる。この手法に対して、フラッシュオーバー事故を発生させる雷、台風などの自然条件や開閉サージなどの発生電圧の統計分布によってフラッシュオーバー確率を算定し、電力供給システムの絶縁信頼度を評価する統計的手法が最近きわめて注目されている。

筆者らはこの立場に立脚して、すでに雷および汚損条件下における電力供給システムの絶縁信頼度について発表を行なったが^{1), 2)}本文においては、これらに引き続いて開閉サージに対する絶縁信頼度の向上をはかることを目的として行なった研究成果について述べる。

2. 電力系統における開閉サージ

電力系統における絶縁設計や絶縁信頼度の検討にあたって考慮しなければならない主要な問題として開閉サージがあげられるが、絶縁のレベルの低減が行なわれている超高压電力系統においては開閉サージはきわめて重要な要素である。この場合には、自然雷に対しては、保護特

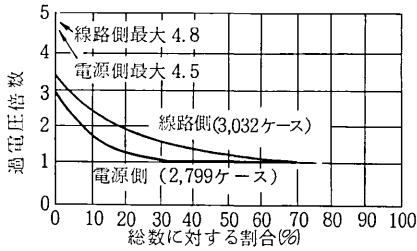
性のよい避雷器を設置して雷サージ電圧をできる限り抑えることが必要である。また、開閉サージに対しては、しゃ断器の性能向上によって高い開閉サージ電圧の発生頻度を減少させるとともに、避雷器によって開閉サージを変電用機器の開閉サージ耐電圧以下に抑制する必要がある。超高压以上の電力系統においては、投入抵抗付しゃ断器などによって開閉サージを抑制し、この電圧に耐えるような絶縁設計が行なわれている。

これらの絶縁設計に当たっては、電力系統の電圧階級などが与えられると絶縁レベルの値が一義的に確定し、これを基準として絶縁問題が論じられている。この方式は従来広く利用されてきたいわゆる確定論的手法である。これに対して統計的手法においては、開閉サージの波高値の統計分布を考慮して電力供給システムにおけるフラッシュオーバー事故の発生確率を定量的に評価することが可能であり、電力供給システムの絶縁信頼度の評価に当ってきわめて有意義と考えられる^{3), 4)}。

統計的手法による電力系統における開閉サージに対する絶縁信頼度の評価に当たっては、系統に発生する開閉サージの統計分布をもとめることがまず必要となる。開閉サージの発生機構として重要視されているものを大別すると、充電電流開閉時、特に再点弧の発生に伴って現われる過電圧と無負荷変圧器の励磁電流のような誘導性小電流しゃ断時の電流さい断によるものが代表的とされている^{5), 6)}。しかしながら、500 kV 系統のような絶縁レベルを極力切りつめた設計においては、特に投入時の過電圧が絶縁設計上重要な問題と考えられる。最近はしゃ断器の投入方式の改善等によって開閉サージの抑制がはかられている。開閉サージの波形に影響を与える電力系統の条件としては、しゃ断方式のほかに線路長、電源の容量などがあげられる。

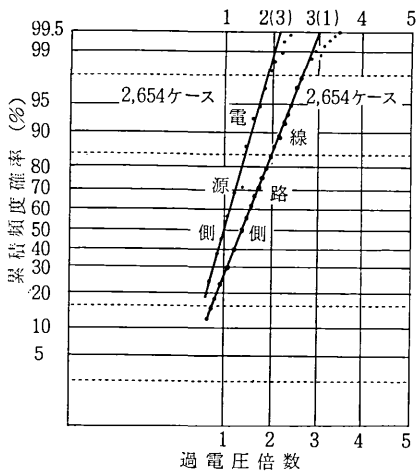
電力系統における開閉サージの波高値の統計分布の1例を第1図に示す。これは国際電力技術会議(CIGRE)において世界各国における結果を取りまとめたものであって、電源側2,799, 線路側3,032, 総計5,831のデータによるものである。これらの結果によれば、系統に発生する開閉サージの波高値の送電線の常規対地電圧波高値に対する倍数の発生頻度分布は正規分布にきわめてよく適合している。いまこの発生頻度分布の平均値を V 、標準偏差を σ とすれば、電源側における V 、 $V+2\sigma$ の値

* 東京大学生産技術研究所 第3部



第1図 開閉サージ倍数累積頻度曲線

はそれぞれ1.10, 2.10, また線路側においてはそれぞれ1.37, 2.63の値が得られている。また第2図はこのデータのうち、有効接地系統についてのみ確率紙上に示したものであって、この場合のV, V + 2σの値は電源側においてはそれぞれ1.02, 1.78, また線路側においては1.37, 2.63であることが示されている。



第2図 過電圧倍数頻度確率曲線

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は、電気学会SDグループにおいて筆者らによって取りまとめが行なわれている。⁵⁾ここでは、(1)送電線に発生する開閉サージの波高値の統計分布ならびに開閉サージの波高値の送電線上における分布 (2)気温, 気圧, 風速, 降雨量等の気象因子の分布 (3)空中放電ギャップおよびがいしの絶縁特性を与えて送電線における開閉サージによるフラッシュオーバー特性の算定を行なっている。ここで送電線に発生する開閉サージの波高値の統計分布は正規分布にしたがうものとし、また開閉サージの波高値の送電線上の分布は直線的に変化するものとしている。かような仮定を設けた場合の開閉端における開閉サージのレベルに対するフラッシュオーバー確率分布の1例を第1表に示す。

この結果からも明らかなように、統計的手法によって開閉サージのフラッシュオーバー確率をもとめるためには、開閉サージに関する信頼性の高い資料が必要とされる。開閉サージの波高値の分布は正規分布を仮定しているが、実際の送電線における実測結果によればこれからはずれ

第1表 開閉サージレベルに対するフラッシュオーバー度数分布

発生電圧レベル	発生回数	フラッシュオーバー回数	フラッシュオーバー確率
1.0 ~ 未満	3	0	0
1.0 ~ 1.1	3	0	0
1.1 ~ 1.2	7	0	0
1.2 ~ 1.3	19	0	0
1.3 ~ 1.4	34	0	0
1.4 ~ 1.5	52	0	0
1.5 ~ 1.6	42	0	0
1.6 ~ 1.7	50	0	0
1.7 ~ 1.8	34	0	0
1.8 ~ 1.9	27	1	0.037
1.9 ~ 2.0	14	1	0.071
2.0 ~ 2.1	9	5	0.555
2.1 ~ 2.2	5	4	0.800
2.2 ~ 2.3	1	1	1.000
計	300	12	

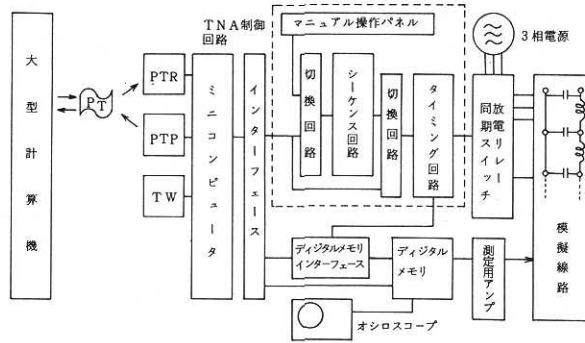
る場合も認められており、またしゃ断器の投入抵抗の開閉サージ波高値との関連等についても詳細な統計資料が望まれる。

大都市などの大電力消費地域へ電力エネルギーを供給するシステムにおいて、系統の開閉操作によって発生する開閉サージに対する絶縁信頼度を向上させ、また合理的な系統構成ならびに開閉制御方式をもとめるためには、種々の系統回路構成ならびにしゃ断の条件に対して発生する開閉サージに関する統計分布をもとめ、その結果を利用して絶縁信頼度の評価を行なう必要がある。この目的のためにはアナログ的な開閉サージの解析装置とデジタル計算機とを結合させたシステムがきめて有利と考えられる。この点に着目して筆者らは本臨時事業において開閉サージのハイブリッド計算システムの開発を行なった。このシステムについては次節において述べることにする。

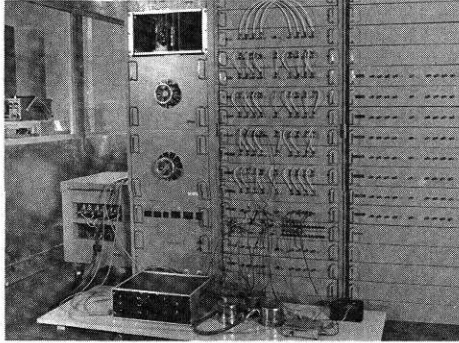
3. 開閉サージのハイブリッド計算システム

電力供給システムにおける開閉サージに対する絶縁信頼度を向上させるためには、まず電力システムにおける開閉サージ波形に関する詳細な統計資料をもとめ、この資料によって系統におけるフラッシュオーバー事故発生確率の評価や絶縁信頼度を向上させるための方策を検討することがきわめて重要である。

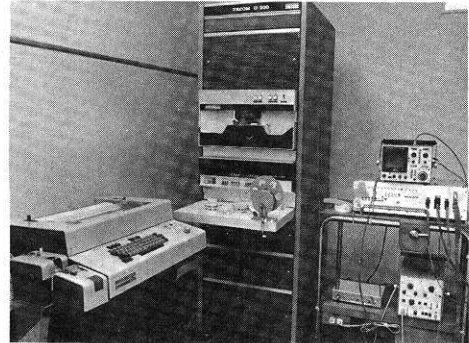
開閉サージの計算手法としては、まず、送配電網をシミュレートした過渡現象解析装置 (Transient Network Analyzer, TNA と略称) によるアナログ計算手法があげられる。TNA は送電線における電気的定数を集中定数で模擬した回路であって、これにしゃ断器などを模擬したスイッチを利用し、電力システムにおける開閉操作によるサージ波形を観測、解析することができる。開閉サージの解析のための他の方法としては、デジタル計算機によって電力システムにおける発生サージ波形について数値解析を行なう方法がある。この方法は近年電子計算機の普及によって目ざましい進歩を遂げているが、統計的手



第3図 開閉サージのハイブリッド計算システム

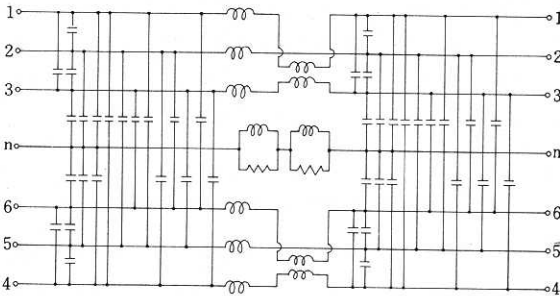


(a)アナログ模擬要素



(b)デジタル制御・計測装置

第4図 システムの外観

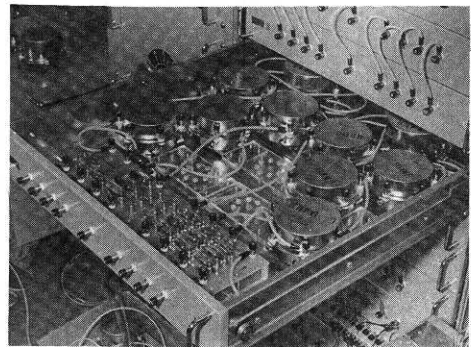


第5図 TNAの線路要素 (不平衡2回線線路構成)

法による絶縁協調の目的に使用される開閉サージに関するデータは統計的な量であり、これをデジタル計算機によってもとめようとする、計算時間の制約のために精度を損う恐れがある。

このような得失を考慮して、筆者らは回路計算にはTNAを使用し、データ処理やTNAの制御にはデジタル計算機を利用したハイブリッド計算システムがきわめて有効であることに着目して、システムの試作を進め、すでに一応の成果を得ている。^{7), 8), 9)}

ハイブリッド計算システムの構成は (1)線路要素, 制御回路等より成るTNA (2)ミニコンピュータ (3)アナログ入力をAD変換し, 内蔵の半導体メモリに記憶するデジタルメモリ (4)インターフェース回路より成っており, そのシステム構成を第3図, またシステムの外観



第6図 等価回路の外観

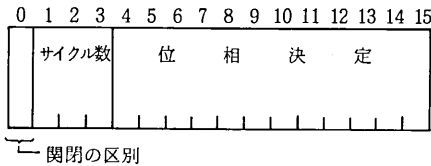
を第4図に示す。

アナログシミュレータであるTNAは、送電線やしゃ断器のアナログ模擬要素と制御部から成っている。送電線のアナログ模擬要素は第5図に示すような受動回路要素を多数個縦続接続することによって送電線の電気的定数を集中定数によって模擬するための回路であり、その外観を第6図に示す。ここで送電線路の集中定数の等価回路要素への分割数が十分に大きくないとしゃ断周波数の低下により誤差を生ずる欠点があるが、計算速度が速く、避雷器等の非線形要素を実現することが容易であり、かつ実系統の一対一模擬が可能のために、系統を複雑にしても計算上の困難が増大しない等の長所を有している。

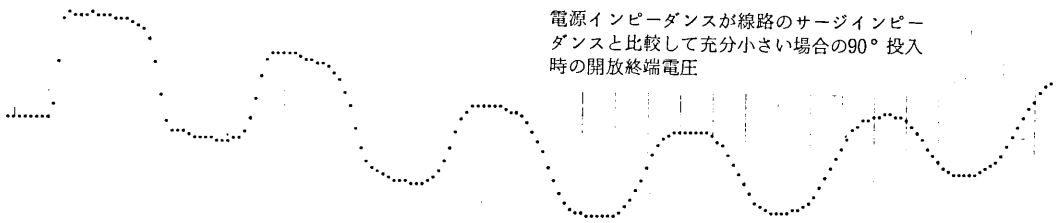
三相回路の線路要素としては、大地帰路の周波数特性を模擬するために、Carsonの式によって大地帰路を含

む線路の自己インピーダンスを計算し、この周波数特性を集中定数により近似的に実現することによって大地帰路による影響を考慮に入れている。

このシステムにおいては、波形をAD変換し、その結果を内蔵の高速度メモリに記憶させる機能を有する波形記憶装置を利用している。この装置は8ビットのAD変換器で、最小サンプル間隔および内蔵の半導体メモリのデータ数がそれぞれ10nsと2,048バイト、および2 μ sと1,024バイトの2種類を利用している。



第7図 データ型式



第8図 タイプライタによる出力表示

TNAの制御部はしゃ断器模擬スイッチ等を開閉するタイミング回路と一連の動作を制御するシーケンス回路およびミニコンピュータのインターフェース回路から成っている。しゃ断器の開閉位相の決定は計数型のタイミング回路によって制御される。この回路はマニュアル操作パネルか又はコンピュータによって与えられるデータを参照して動作する。データの形式は第7図に示すように、ワード中の最初の1ビットで開閉の区別を行ない、3ビットで電源電圧のサイクル数、残りの12ビットで位相の決定をしている。これによって決定されたサイクルの0°より10 μ sきざみで投入位相の決定をすることができる。

さきにも述べたように、電力系統における開閉サージに関する統計計算においては、投入位相等を統計的分布にしたがってランダムに変化させ、これによって発生するサージ波形に関する統計分布を解析することがきわめて重要である。この種の解析を行なうに当たっては、ランダムな投入位相をミニコンピュータによって発生させている。またデータ処理に当たっては、ある程度までミニコンピュータで処理することができるが、さらに高度のデータ処理が必要な場合には、ミニコンピュータによって処理したデータを紙テープに出力してこれを大型計算機によって処理を行なうこともできる。本ハイブリッドシステムの計算例として、システムによって得られた波形をタイプライタによって出力した例を第8図に示す。

ここで開発した開閉サージのハイブリッドシステムはわが国においては未だその例を見ず、海外においても数例を数えるのみであって、今後電力系統における開閉サージの解析と、この結果を利用して大都市にエネルギーを供給する超高圧大電力供給システムの信頼度の向上のためにその威力を発揮し得るものと考えられる。

4. む す び

電力供給システムの信頼度を評価する場合に開閉サージは考慮すべき最も重要な題目の一つである。電子計算機によって開閉サージに対する絶縁信頼度の評価を行なう場合には、電力系統に発生する開閉サージの波形に関する信頼できる統計資料をもとめることがきわめて重要である。電力系統における開閉サージの解析に当たっては、ハイブリッド計算システムがきわめて有利であり、

電源インピーダンスが線路のサージインピーダンスと比較して充分小さい場合の90°投入時の開放終端電圧

この点に着目して、筆者らは開閉サージのハイブリッド計算システムの開発を行なった。今後このシステムによって電力供給システムにおける開閉サージの詳細な解析を進め、これを用いて電力供給システムの絶縁信頼度の向上をはかりたいと考えている。終りにこのシステムの開発に当たって有益な助言をいただいた石井勝助教授に厚く御礼を申し上げる。

(1977年1月25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) 河村, 北條, 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, p. 455, 1974. 11
- 3) 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
- 4) IEC Publication 71: Insulation Co-ordination, Sixth Edition, 1976
- 5) 「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) 第95号, 1970. 8
- 6) 「UHV系統の絶縁協調に関する調査報告」, 電気学会技術報告 (I部) 第109号, 1974. 3
- 7) 河村, 西村「開閉サージのハイブリッド計算システム」昭和51年電気学会全国大会講演論文集 954, 1976. 4
- 8) 河村, 西村「高電圧測定における計算機応用の最近の進歩」昭和51年電気四学会連合大会講演論文集 26, 1976. 10
- 9) 河村, 西村「開閉サージのハイブリッド計算システム」電気学会情報処理研究会資料 IP-76-39, 1976. 11