

XTAP 例題集		番 号	SSW-02
例題名	275 kV 系統の投入サージ解析		
分 野	投入サージ計算, 開閉サージ計算, 過電圧解析		
文 献	電力中央研究所 調査報告 H12005, 「電力系統の瞬時値解析・過渡現象解析手法の調査と XTAP による解析例 (その 1) — 開閉サージ性過電圧の解析 —」		
概 要	投入サージの考え方, 発生原理, 送電系統各要素の模擬手法について解説した後, XTAP により 275 kV 系統の投入サージ解析を行った例を紹介している。 (上記文献からの抜粋)		

## 1 投入サージ

### 1.1 考え方<sup>(5)</sup>

新規に送電線の運転を開始する場合や工事等の後に送電線の運転を再開する場合には、送電線は無負荷にしておいて電源側の遮断器を投入することにより送電線を加圧する。また、落雷等により送電線に地絡事故が生じた場合には、一旦、線路両側の遮断器を開放して地絡事故による続流アークを除去し、再び遮断器を投入することにより送電を再開する（これを再開路と呼ぶ）。このように、送電線を加圧する場合には、無負荷である場合が多い。無負荷の送電線を加圧するとき、送電線において、投入サージと呼ばれる過電圧が発生する。従って、送電線の絶縁は、この投入サージによる過電圧に十分耐えるよう設計されなければならない。

投入サージによる過電圧の大きさは、遮断器投入の瞬間の電源電圧の大きさに大きく依存する。遮断器は、メカニカルな機構により電極の開閉を行う機器であるため、その動作は商用周波に比べて遅く、また、ばらつきも大きい。すなわち、遮断器投入の瞬間の電源電圧の位相については、予想できるものではなく、確率的に（ランダムに）決まるものであると考える方が合理的である。そこで、実際の投入サージの検討では、遮断器の投入タイミングをランダムに変化させて、多数回の投入サージ計算を行い、その結果を図 1 に示すような発生電圧の累積頻度分布の形で表示する。これにより、ある値の過電圧がどれくらいの確率で発生するのか評価することが可能となる。上記のように、ランダムにパラメータを変化させて多数回行ったシミュレーションの結果から統計的な結果を得る手法をモンテカルロ法と呼ぶ。発生電圧の最大値は、シミュレーションの回数を増やすと大きくなる傾向にあるが、発生確率が 2% となる値は、シミュレーションの回数が一定以上であれば回数によらず一定した値となる傾向にあるため、代表値として用いられる場合が多い。発生確率が 2% となる値は「2% 値」と呼ばれている。なお、発生電圧の累積頻度分布は、図 1 に示すような正規確率紙と呼

ばれる種類のグラフにプロットされることが多い。正規確率紙では、正規分布の場合にプロット点が直線となるよう縦軸が目盛られている。

投入サージによる過電圧は、公称電圧の対地波高値を 1 とした場合の倍数として表示する場合が多く、これを過電圧倍数と呼ぶ。単位には p.u. を用いるが、系統解析で用いられる p.u.

(線間電圧の実効値を 1 とする) とは無関係であることに注意が必要である。なお、開閉サージという用語は、厳密には、投入サージだけでなく、遮断サージやコンデンサ投入サージなど、開閉器の開閉に伴って発生するサージの総称として用いられるべきである。しかしながら、慣用的には、開閉サージという用語を投入サージの意味で使用する場合も多い。このことから、上述の過電圧倍数は、開閉サージ倍数とも呼ばれる。

## 1.2 投入サージの発生原理

投入サージによる過電圧は、大別して、電源側のインダクタンスと送電線のキャパシタンスの振動現象として生じるものと、送電線上を伝搬する進行波が開放条件である遠方端で正反射することにより生じるものの 2 種類がある。前者は、ケーブル線路など、線路のインダクタンスが小さくキャパシタンスが大きいことで、線路を集中定数のキャパシタンスに見なせる場合に生じる。一方、後者は、長距離の架空送電線など、線路の分布定数的特性が顕著となる場合に生じる。以下、これらの回路現象について説明する。

まず、電源側のインダクタンスと送電線のキャパシタンスの振動現象として生じる投入サージ現象について説明する<sup>(1)</sup>。いま、発電所もしくは変電所にある遮断器を投入し、無負荷の送電線を充電するものとする。遮断器より上位側の電源を正弦波電圧源  $e(t) = E \sin(\omega t + \theta)$  とこれに直列に接続されたインダクタンス  $L$  で模擬する。送電線については、集中定数のキャパシタンスに見なせると仮定し、キャパシタンス  $C$  で模擬する。以上の等価回路を図示すると図 2 となる。電源の初期位相  $\theta$  が  $90^\circ$ 、送電線の残留電圧が 0 の条件で、 $t = 0$  で遮断器  $S$  を閉じたときの送電線の電圧  $v$  は次式で与えられる。

$$v(t) = \frac{E}{1 - \omega^2 LC} \left( \cos \omega t - \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right) \quad (1)$$

上式では、第 1 項が定常的な電源電圧、第 2 項が  $L$  と  $C$  による振動に対応している。なお、上記の計算では、電源側および送電線の損失を無視したため、第 2 項は減衰しないが、実際には損失により減

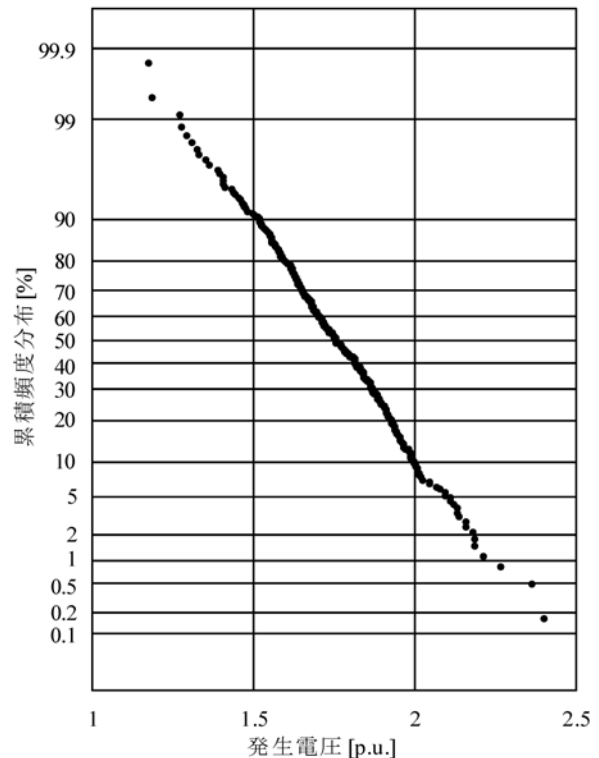


図 1 投入サージにより発生する電圧の累積頻度分布

Fig. 1 Cumulative frequency distribution of voltages generated by energization transients.

衰していく。一例として、 $\omega = 2\pi 60$ ,  $L = 15$  mH,  $C = 2$   $\mu$ F (地中ケーブル数 km 相当) の場合の場合について、(1) 式により計算を行うと、送電線電圧  $v$  の波形として図 3 を得る (電圧値は  $E$  で正規化)。電源電圧に  $LC$  振動による電圧が重畳している様子が見て取れる。通常、(1) 式の  $\omega^2 LC$  の値は 1 より十分小さいため、 $v$  のピーク値は約  $2E$  (すなわち、2 p.u.) に達することが分かる。

(1) 式において、第 2 項の  $LC$  振動による項の振幅は、遮断器  $S$  を閉じる前にそこに印加されていた電圧とほぼ等しい。このことは、送電線に残留電圧が存在する場合にも成立する。例えば、電源が負のピーク値  $-E$  となった瞬間に遮断器を開放したと想定し、送電線に  $V_0 = -E$  の残留電圧が存在した状態から  $\theta = 90^\circ$  で遮断器を投入するとき、送電線の電圧波形  $v$  は、 $-E$  からスタートして振幅約  $2E$  で振動するため、約  $3E$  (3 p.u.) のピーク値をとる。

次に、送電線上を伝搬する進行波が開放条件である遠方端で正反射することにより生じる投入サージ現象について説明する。先と同様に、発電所もしくは変電所にある遮断器を投入し、無負荷の送電線を充電するものとする。遮断器より上位側の電源を正弦波電圧源  $e(t) = E \sin(\omega t + \theta)$  とこれに直列に接続されたインダクタンス  $L$  で模擬する。送電線については、線路長  $l$ , 伝搬速度  $c$ , 特性インピーダンス  $Z_0$  の無損失分布定数回路で模擬する。これを等価回路として図示すると図 4 となる。電源の初期位相  $\theta$  が

$90^\circ$ , 送電線の残留電圧が 0 の条件で、 $t = 0$  で遮断器  $S$  を閉じたとする。このとき、電源の電圧はステップ状に立ち上がるため、 $t = 0$  の直後ではこれを振幅  $E$  のステップ波と考える。送電線始端の電圧  $v_1$  の波形は、このステップ波を  $L$  と  $Z_0$  で分圧したものであるから、時定数  $L/Z_0$  でなまった振幅  $E$  のステップ波形となる。この  $v_1$  の波形が進行波として送電線上を伝搬し、伝搬時間  $\tau = l/c$  後には終端に到達する。分布定数回路論<sup>(6)</sup>によれば、開放端において電圧波は正反射し、2 倍の電圧を生じるから、このとき、送電線の終端では  $2E$  (2 p.u.) の電圧が発生することになる。さらに時間  $\tau$  後には、正反射した進行波は始端に到達する。電源側のインピーダンスは  $L$  のみで小さいため、この電圧波は始端でほぼ負反射し、以降、往復反射を繰り返すことになる。 $t = 0$  の直後では電源電圧をステップ波

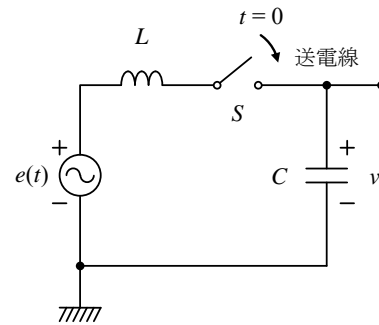


図 2 無負荷送電線投入時の等価回路 (集中定数キャパシタンス近似)  
Fig. 2 Equivalent circuit for energization of a no-load transmission line (lumped capacitance approximation).

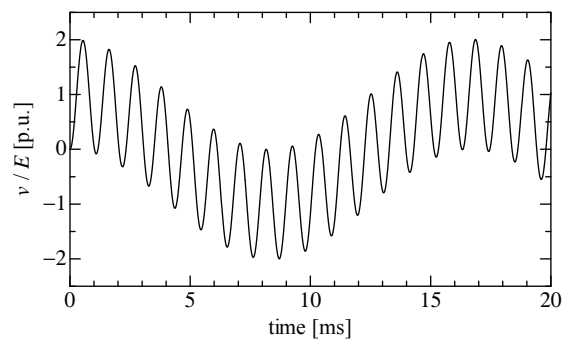


図 3 無負荷送電線投入時の電圧波形 (集中定数キャパシタンス近似)  
Fig. 3 Voltage waveform when a no-load transmission line is energized (lumped capacitance approximation).

と考えたが、長時間で見ると正弦波状に変化するから、実際に送電線に発生する電圧は、正弦波状の電源電圧に上記の往復反射が重畳したものとなる。一例として、架空送電線 100 km 相当を想定し、 $\omega = 2\pi 60$ ,  $L = 50$  mH,  $l = 100$  km,  $c = 300$  m/ $\mu$ s,  $Z_0 = 400$   $\Omega$  の場合について、Bergeron 法<sup>(2)</sup>で終端電圧  $v_2$  の波形を計算した結果を図 5 に示す（電圧値は  $E$  で正規化）。終端に約 2 p.u. のピーク電圧をもたらす往復反射が、電源電圧に重畳している様子が見て取れる。上記の計算では、電源側および送電線の損失は無視しているため、往復反射が持続しているが、損失を考慮することにより往復反射は次第に減衰していく。従って、9 ms および 17 ms 付近に生じているピーク電圧は、実際にはもっと小さく、1 ms 付近の最初のピークが最大値となるものがほとんどである。図 5 中の点線で囲んだ部分のスパイク状の電圧波形は、終端から戻って来た進行波が始端に到達し、インダクタンス  $L$  に流れる電流が急変することにより生じている。なお、ここでは、送電線を分布定数回路として取り扱ったため、進行波の往復反射の初期には、往復反射現象そのものによる周期  $4\tau$  の振動が観測された。一方、終端開放の分布定数回路は、周波数が低くなるにつれて、その振る舞いがキャパシタンスに近づいていく。すなわち、往復反射が繰り返されて高周波成分が失われていくと、振動周期は、電源側のインダクタンスに加えて送電線のインダクタンスと送電線のキャパシタンスにより決まる値に近づいていく（この現象の詳細については、文献 (5) の第 2.3.2 節を参照のこと）。

残留電圧に関する考え方は、先に述べた電源側インダクタンスと送電線キャパシタンスの振動現象として生じる投入サージの場合と同じであるため、ここでは省略する。

### 1.3 残留電圧と投入条件

前節で述べた通り、投入サージによる過電圧は、残留電圧の大きさによって異なる。このため、実際の解析では、現実的な残留電圧を再現するために、実設備の動作に合わせて投入条件を設定する必

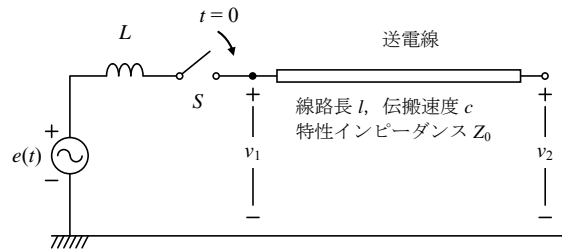


図 4 無負荷送電線投入時の等価回路  
(無損失分布定数回路による模擬)  
Fig. 4 Equivalent circuit for energization  
of a no-load transmission line  
(distributed-parameter modeling).

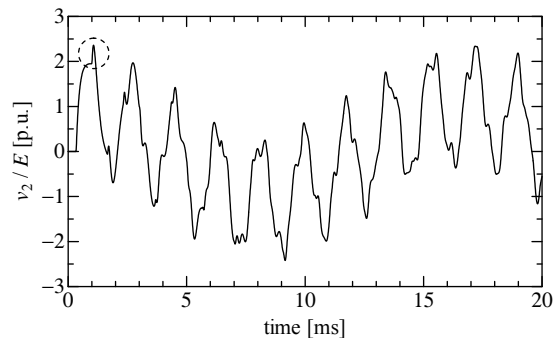


図 5 無負荷送電線投入時の終端電圧波形  
(無損失分布定数回路による模擬)  
Fig. 5 Remote-end voltage waveform when  
a no-load transmission line is energized  
(distributed-parameter modeling).

要がある。以下、文献 (7) の解析で用いられている投入条件を示す。

- (1) 三相投入 …… 新規の運転開始時や工事後の投入など、送電線に残留電圧が無い状態での投入を模擬し、負荷端の遮断器が開放の状態、電源側の遮断器を 3 相一括投入する解析条件。平行他回線が運転されている場合には、その回線からの誘導電圧が重畳する。
- (2) 三相再閉路 …… 事故を生じていない送電線の 3 相一括遮断・再閉路を模擬し、送電線の両端を 3 相一括遮断した後、負荷端の遮断器は開放の状態、電源側の遮断器を 3 相一括投入する解析条件。通常、3 相とも大きな残留電圧が残るため、最も厳しい過電圧値を与える。この解析条件は、事故を生じていない送電線の遮断・再閉路であるため、実際の開閉操作には存在せず、参考値として最過酷の過電圧を求める場合に用いられる。
- (3) 選択再閉路 …… 超高圧送電線の場合に、事故を生じた相のみに対して、送電線の両端を遮断した後、負荷端の遮断器はそのままの状態、電源側の遮断器を投入する解析条件。

また、特定の事例を解析する場合には、上記の 3 条件にこだわらず、その事例で想定される残留電圧を設定して解析を行う。

#### 1.4 電源側の模擬

送電線の両端は、通常、発電所、変電所、開閉所のいずれかに接続されている。送電線の両端のうち電源側において遮断器が投入され、投入サージが発生する。後述する避雷器や別ルートの送電線を除外して考えると、電源側が発電所の場合、遮断器の背後には発電機とその昇圧用変圧器がある。電源側が変電所の場合には、遮断器の背後に変圧器がありその先にさらに送電線があつて系統が広がっている。電源側が開閉所の場合には、遮断器の背後に直接送電線があつて、そこから系統が広がっている。

電源側が発電所もしくは変電所の場合、遮断器背後の系統は、図 6 に示す等価回路で模擬されることが多い。この等価回路は、遮断器背後の系統が発生する電圧とそのインピーダンスを簡略化して模擬したものである。三相電圧源  $e_a(t)$ ,  $e_b(t)$ ,  $e_c(t)$  は、投入する遮断器を開いた状態で、その電源側の母線に生じる正弦波電圧を模擬する。また、インピーダンス  $Z_1$  と  $Z_n$  は、遮断器背後の系統のインピーダンスを模擬するものである。一方、電源側が開閉所の場合には、遮断器背後の送電線を、第 1.5 節に述べる方法により送電線モデルとして模擬し、その先の発電所もしくは変電所以降を図 6 の等価回路で模擬する。送電線の先もまた開閉所の場合は、最初に発電所もしくは変電所に到達するまでの送電線を送電線モデルとして模擬する。開閉所の場合に、その背後の送電線を送電線モデルとして模擬する理由は、遮断器を投入した瞬間の送電線が数百  $\Omega$  の抵抗に相当する特性インピーダンスに見え、図 6 の等価回路では誤差を生じるためである。

三相電圧源の振幅は、運用値より簡単に求めることができるが、問題となるのは、インピーダンス  $Z_1$ ,  $Z_n$  の抵抗とインダクタンスの値であろう。開閉サージ解析に関する IEEE のワーキンググループが取りまとめたガイドライン<sup>(8)</sup>では、 $Z_n$  を省略（短絡）し、 $Z_1$  の抵抗とインダクタンスの値については、遮断器背後の系統の短絡容量から求めるとしている。つまり、背後系統の正相分等価回路から短絡インピーダンスを求め、その実部を抵抗、虚部を  $\omega$  ( $= 2\pi f$ ,  $f$  は商用周波数) で除したものをインダクタンスとして、 $Z_1$  を得る。一方、CIGRE のワーキンググループが取りまとめたガイドライン<sup>(9)</sup>では、遮断器背後に存在する発電機、変圧器、送電線などのインピーダンスを積算して背後系統のインピーダンスを求めており、零相分インピーダンスも考慮している。発電機については、その等価回路が複雑であるため、近似的に  $d$  軸の次過渡リアクタンス  $X_d''$  で模擬する。積算して求めた正相分インピーダンスがそのまま  $Z_1$  に相当し、その実部と虚部から抵抗とインダクタンスを求めることができる。 $Z_n$  の値は、積算して求めた零相分インピーダンスを  $Z_0$  として、

$$Z_n = \frac{1}{3}(Z_0 - Z_1) \quad (2)$$

から求め、その実部と虚部から抵抗とインダクタンスの値を得る。さらに、CIGRE のガイドラインでは、周波数が高くなるにつれて発電機や変圧器の抵抗分が大きくなる周波数依存効果を考慮すべきとし、発電機と変圧器についてその典型的な周波数特性を示している。遮断器背後には、変圧器、送電線、発電機などが存在し、これらを総合した周波数特性を求めることは容易ではない。また、発電機や変圧器それぞれの周波数特性を入手することも容易ではない。ただし、遮断器背後の系統の周波数特性がおおまかに分かる場合には、図 7 のような等価回路を用いることで、周波数依存効果を近似的に考慮することができる<sup>(3),(10)</sup>。

先の (2) 式において、 $Z_0 - Z_1$  の虚部が負となり、インダクタンスを用いた模擬が不可能となる場合がある。この問題に対処するため、文献 (9) では、結合用の理想 Y- $\Delta$  変圧器を用いて模擬を行う方法が紹介されている。なお、遮断器背後の変圧器の中性点が直接接地である場合には、 $Z_0 = Z_1$  となり、 $Z_n$  を省略（短絡）できる。

文献 (5) では、インダクタンス  $L$  の値を、遮断器背後直近の変圧器の漏れインダクタンスのみとし

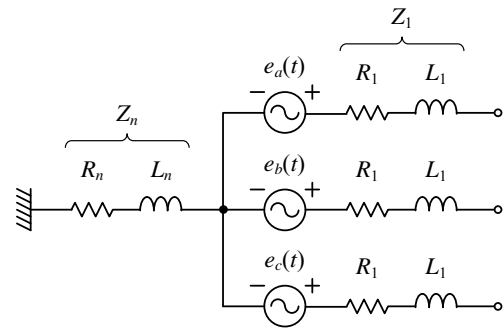


図 6 電源側の等価回路

Fig. 6 Equivalent circuit of the source side.

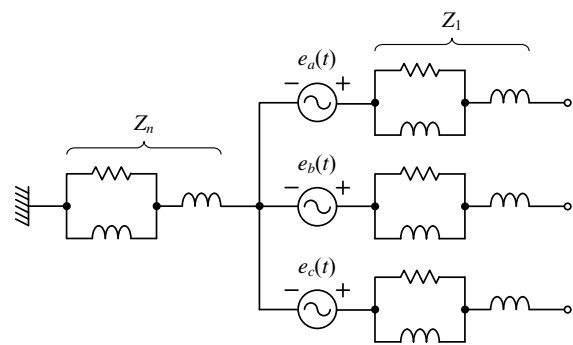


図 7 周波数依存効果を考慮した電源側の等価回路

Fig. 7 Equivalent circuit of the source side considering its frequency dependence.

た場合と、遮断器背後の系統の短絡容量から得たインダクタンスとした場合の計算結果を実測結果と比較している。実測は、四国電力 那賀川幹線と関西電力 奥多々良木線で実施され、これら 2 例とも、遮断器背後直近の変圧器の漏れインダクタンスのみで  $L$  を模擬した場合の方が実測結果に近い計算結果が得られると結論付けている。この結論は、IEEE や CIGRE のガイドブックとは必ずしも整合しないが、重要な研究結果であるため、ここに紹介しておく。これより、実際の解析では、インダクタンス値をパラメータとして変化させて計算を行うのが現実的であると考えられる。

なお、詳細な解析を行う場合には、図 6, 7 の等価回路を用いずに、遮断器背後の系統も組み上げて解析を行ってもよい。

## 1.5 送電線の模擬

投入サージの計算では、遮断器投入直後に観測されるピーク電圧から、往復反射および  $LC$  振動が減衰して商用周波の電源電圧に落ち着くまでの現象を精度良く再現する必要がある。つまり、線路モデルは、商用周波からピーク電圧に対応する高周波までの広い周波数領域の特性を再現する必要がある。基本的には周波数依存線路モデルを用いることが標準となる。ただし、投入される線路が比較的短い地中ケーブルの場合など、第 1.2 節の前半で説明した、電源側のインダクタンスと送電線のキャパシタンスの振動現象として投入サージが生じる場合には、一定パラメータ線路モデルで十分な精度が得られることもある。送電線のキャパシタンスは周波数依存効果を有していないため、このような場合、線路定数を算出する周波数は計算結果に大きな影響を与えない。

同一の鉄塔に装柱された 2 つ以上の回線の間には比較的大きな相互誘導が存在するため、これらは 1 つの送電線モデルとして模擬する。2 つ以上の送電線が近傍を併走しており、これらの間の相互誘導を考慮する場合にも、全回線をまとめて 1 つの送電線モデルとする。通常、投入サージの解析では、線路の始端から終端までを一つの線路モデルとして模擬するため、全径間に亘って平均的な装柱を仮定して、これにより線路定数を計算する。また、架空地線については、その存在を考慮したまま線路定数の行列から消去する。なお、XTAP には、文献 (4) で紹介されている各電圧階級の標準装柱それぞれについて、亘長 25 km, 50 km, 75 km, 100 km の周波数依存線路モデルが用意されている。装柱および亘長がこれらと異なる場合には、XTAP に付属の線路定数計算ルーチン XTLC を用いて、解析者が周波数依存線路モデルを作成することになる。このとき、線路定数計算周波数のサンプルは、0.1 Hz ~ 10 MHz の範囲で 400 点とすることが推奨される。

## 1.6 避雷器の模擬

近年では、雷サージ過電圧のみならず、投入サージ過電圧も酸化亜鉛形避雷器を用いて抑制する方向にある<sup>(7), (11)</sup>。酸化亜鉛形避雷器は、その基本特性である非直線な電圧-電流特性に加えて、 $\mu\text{s}$  オーダの急峻波に対しては制限電圧が若干高くなる特性がある。ただし、投入サージ解析に比べてより急峻な現象を対象とする雷サージ解析においても、500 kV 以下の系統の解析では、急峻波特性の影響は顕著でないため無視されている。すなわち、酸化亜鉛形避雷器は、非直線な電圧-電流特性を再現する非線形抵抗のみで模擬されている<sup>(4)</sup>。なお、1,000 kV 系統の雷サージ解析においては、急峻波

特性を考慮した例がある<sup>(12),(13)</sup>。

投入サージ解析では、雷サージ解析に比べて解析対象の現象が緩やかであるから、当然、酸化亜鉛形避雷器の急峻波特性は無視し、非線形抵抗のみで模擬するのが一般的である。酸化亜鉛形避雷器の代表的な電圧－電流特性については文献(4)に一覧があり、XTAPにはこれらのモデルが用意されている。投入サージに伴う避雷器の処理エネルギーを把握しておくことも重要な解析項目となる。なお、入手可能な電圧－電流特性が、実際の避雷器の特性の上限値になっている場合もあるため、処理エネルギーの解析にあたっては、この事を勘案しておく必要がある。

### 1.7 別ルートの送電線の模擬

投入サージ過電圧の解析において、解析対象の送電線の終端側では遮断器が開放されており、それより遠方の系統を模擬する必要はない。終端側の変電所の線路引込口に酸化亜鉛形避雷器がある場合は、それを模擬しておけばよい。一方、送電線の始端側では、次の設備の模擬が必要となる。まず、投入する遮断器より電源側の系統、つまり、遮断器背後の系統については、第1.4節で説明したとおり、図6もしくは7の等価回路で模擬する。始端の変電所の当該線路側に酸化亜鉛形避雷器があればそれも模擬する必要がある。これらの他に、変電所の当該線路側の母線に別ルートの送電線（以降、単に「別ルートの送電線」と呼ぶ）が接続されている場合には、これを模擬する必要がある。

別ルートの送電線の模擬は、それほど単純ではない。別ルートの送電線は、通常、運用していると想定して解析を行うため、その終端から先にさらに広がる系統をどこまで模擬すればよいかという問題が生じる。この問題を深く検討した例は見当たらないが、通常は、以下のような手順により模擬を行う。まず、別ルートの送電線を辿っていき、送電線の種類や長さから考えて解析結果に与える影響が大きいと判断される変電所までを詳細に模擬する。この詳細模擬の範囲に含まれる送電線については、第1.5節で述べた手法によりそのまま送電線モデルとして模擬する。途中の変電所にある変圧器については、例題SSW-03で述べる手法により2次側も含めて模擬する。また、変電所に避雷器が設置されている場合にはこれを模擬する必要がある。詳細模擬範囲の末端に位置する変電所より遠方の系統については、そこから見た系統が電源か負荷かといった点を勘案し、適切な等価回路で模擬する。

例えば、電源の場合には、図6もしくは7の等価回路を用いることが多い。等価回路中の電圧源 $E$ およびインピーダンス $R, L$ の値は第1.4節で説明した方法により求める。一方、末端の変電所より遠方が負荷の場合、IEEEのガイドライン<sup>(8)</sup>では、図8のような等価回路を用いている。この等価回路では、実際の負荷に至るまでの送配電線や変圧器のインピーダンスを $R_s, L_s$ で表現し、負荷の有効電力を抵抗 $R_p$ で、無効電力をインダクタンス $L_Q$ で表現している（無効電力の値が負の場合にはキャパシタンス $C_Q$ で模擬する）。ここで述べた模擬方法は、

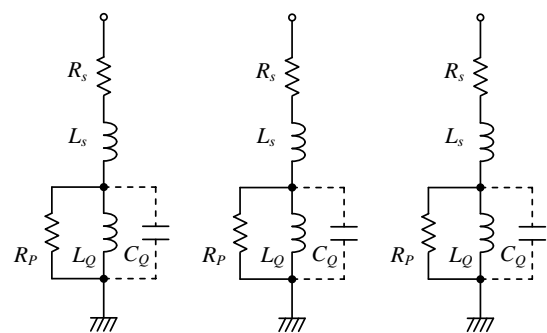


図8 負荷の等価回路

Fig. 8 Equivalent circuit of a load.

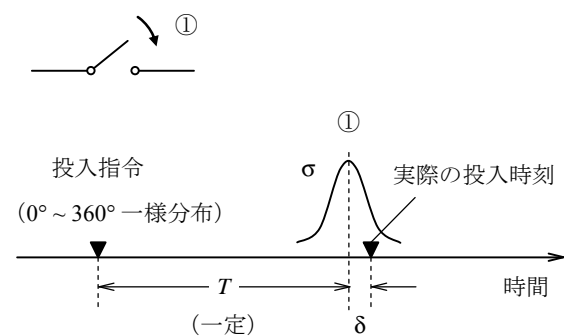


あくまでも一例であり、解析者が個別に判断を行い、模擬を行っているのが実情である。また、詳細模擬すべき系統の範囲を特定すること自体も容易ではなく、実際には、試しに投入サージ計算を行い、その影響をみて、試行錯誤的に決定するケースが多いと考えられる。

### 1.8 遮断器の模擬と統計計算

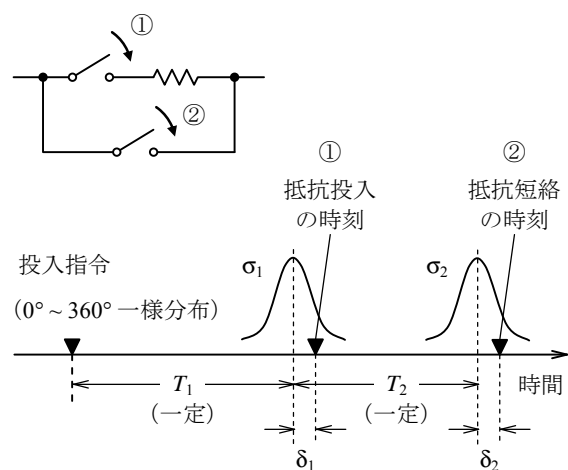
第 1.1 節で述べたように、投入サージ過電圧の大きさは、遮断器の投入タイミングをランダムに変化させて多数回の投入サージ計算を行った結果から統計的に評価する。従って、遮断器は、シミュレーションごとに投入タイミングをランダムに変化できる理想スイッチとして模擬する。

まず、投入抵抗を有さない遮断器の模擬について述べる。図 9 (a) に示す通り、最初に遮断器に対して投入指令が与えられる。この投入指令が発せられるタイミングは、電源電圧の位相の  $0^\circ$  から  $360^\circ$  の間に一様に分布しているものとし、シミュレーションでは一様分布の乱数により決定する。次に、投入指令から一定時間  $T$  だけ経過した時点を目安として、遮断器内部で実際に極間がつながるまでの時間が、標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従いばらつくものとする。このばらつきは、正規分布に従う乱数により生成する。乱数生成の結果得られたそのシミュレーション固有のばらつきを  $\delta$  とすると、遮断器を模擬する理想スイッチは、投入指令から  $T + \delta$  だけ経過した時点で閉じられることになる。上記において、 $T$  は、投入指令が発せられてから遮断器内部で実際に極間がつながるのに要する時間の平均値である。投入指令は、3 相の遮断器に対して同時に与えられるが、 $\delta$  については、相ごとに乱数で生成するため、3 相で異なった値となる。



(a) 投入抵抗なし

投入抵抗を有する遮断器については、次の通り模擬する。図 9 (b) に示す通り、最初に遮断器に対して投入指令が与えられ、そのタイミングが、電源電圧の位相の  $0^\circ$  から  $360^\circ$  の間に一様に分布する乱数として決定されることは、投入抵抗無しの場合と同様である。次に、投入指令から一定時間  $T_1$  だけ経過した時点を目安として、実際に抵抗が投入されるまでの時間が、標準偏差  $\sigma_1$  の正規分布に従いばらつくものとする。さらに、投入指令から一定時間  $T_1 + T_2$  だけ経過した時点を目安として、実際に抵抗が短絡されるまでの時間が、標準偏差  $\sigma_2$  の正規分布に従いばらつくものとする。これら 2 つのば



(b) 抵抗投入あり

図 9 遮断器の模擬

Fig. 9 Representation of circuit breakers.

らつきは、それぞれ、正規分布に従う乱数として生成する。乱数生成の結果得られたそのシミュレーション固有のばらつきをそれぞれ  $\delta_1$  および  $\delta_2$  とすると、抵抗を投入する理想スイッチは、投入指令から  $T_1 + \delta_1$  だけ経過した時点で閉じられ、抵抗を短絡する理想スイッチは、投入指令から  $T_1 + T_2 + \delta_2$  だけ経過した時点で閉じられることになる。 $T_1$  は、投入指令が発せられてから実際に抵抗が投入されるのに要する時間の平均値であり、 $T_1 + T_2$  は、投入指令が発せられてから実際に抵抗が短絡されるのに要する時間の平均値である。投入指令は、3 相の遮断器に対して同時に与えられるが、 $\delta_1$  や  $\delta_2$  については、相ごとに乱数で生成するため、3 相で異なった値となる。

文献 (5) では、遮断器の投入タイミングに関する実験を実施し、そのばらつきは正規分布に従い、遮断器の種類や電圧階級による差はないと結論付けている。また、ばらつきの標準偏差は 0.5 ms から 1.5 ms の間にあり、平均は約 1 ms であるとしている。ただし、この実験を実施してからかなりの年月が経過しているため、上記の知見が最新の遮断器に対しても適用できるかどうかは不明である。

XTAP には、投入指令のタイミングと遮断器投入のばらつきを乱数で与えて、自動的に多数回の投入サージ計算を行う統計計算機能（モンテカルロシミュレーションを行う機能）が装備されており、発生電圧最大値の累積頻度分布を算出する作業は自動化されている。

## 1.9 XTAP による解析例

図 10 に示す 275 kV 系統において、送電線 1 を加圧した場合に発生する投入サージ過電圧の計算例を紹介する。変電所 1, 3, 4 より電源側の系統は、図 6 の等価回路により模擬した。投入サージの計算において潮流は問題とならないため、等価回路中の電圧源の部分は、全て同位相の 275 kV 三相電源とした。このように潮流を生じない条件とすることでフェランチ効果が発生し、過酷側の評価となる。等価回路中のインピーダンスの部分については、それぞれ、想定する短絡容量からインダクタンス値を算出し、現実的な値の抵抗を付加した。これら抵抗値およびインダクタンス値を図 10 中に示しておく。送電線 1, 2, 3 は、全て架空線で、文献 (4) の標準装柱であるとし、大地抵抗率を 100  $\Omega\text{m}$  と仮定して周波数依存線路モデルで模擬した。なお、送電線 1, 2, 3 の亘長は、それぞれ、100 km, 50 km, 70 km で、周波数依存線路モデル作成時の線路定数計算周波数のサンプルは 0.1 Hz ~ 10 MHz の範囲で 400 点とした。投入するのは、送電線 1 の変電所 1 側の遮断器 1 回線で、遮断器は、図 9 (a) の投入抵抗なしのものとした。投入指令から投入時刻までの平均時間  $T$  を 10 ms, 投入時刻のばらつき  $\sigma$  を 1.5 ms とした。また、この解析では、避雷器がない条件を仮定した。このようにして作成した XTAP のデータケースを図 11 に示す。

このデータケースを用い、投入指令が発せられるタイミングが電源位相の  $0^\circ$  から  $360^\circ$  の間に一様分布する乱数として、300 回のシミュレーションを実施した。計算時間刻みは、送電線の伝搬時間から、0.5  $\mu\text{s}$  とした。送電線 1 の末端（変電所 2 側）に発生する電圧の最大値を p.u. 表示（公称電圧の対地波高値を 1 p.u. とする）で正規確率紙にプロットしたものを図 12 に示す。ここで、各相の電圧波形の最大値のうち最も大きな値をもって最大値とした。図 12 より、発生電圧最大値の累積頻度が 2 % に対応する 2 % 値は、約 2.7 p.u. となる。この 2 % 値に対応するケースの各相の電圧波形をプロットしたものを図 13 に示しておく。同図より、b 相で最大電圧が生じていることが確認できる。

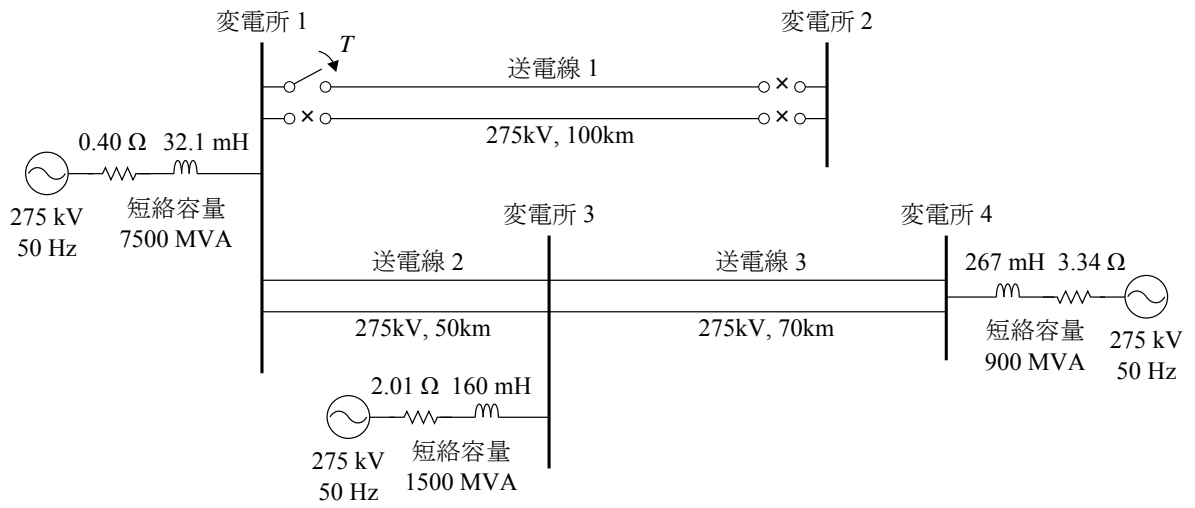


図 10 投入サージ計算の例題回路

Fig. 10 Example circuit for an energization transient simulation.

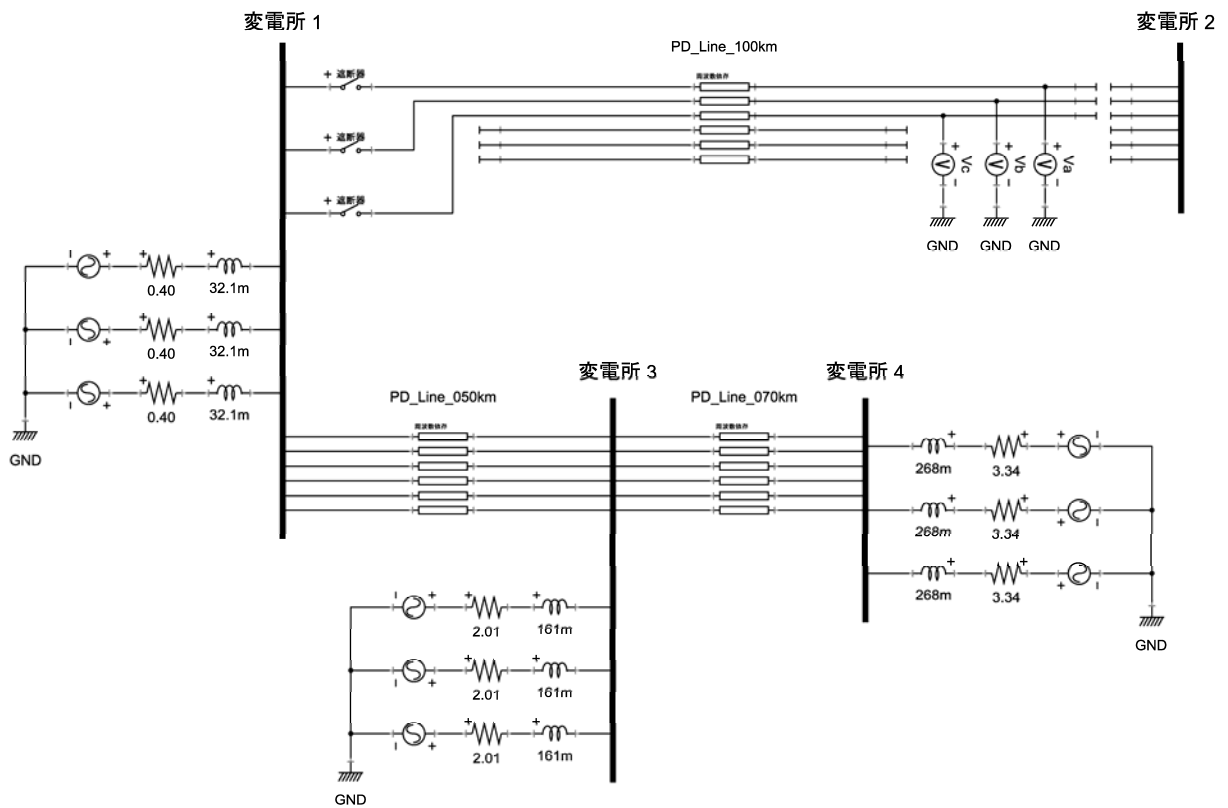


図 11 投入サージ計算のための XTAP データケース

Fig. 11 XTAP data case for the energization transient simulation.

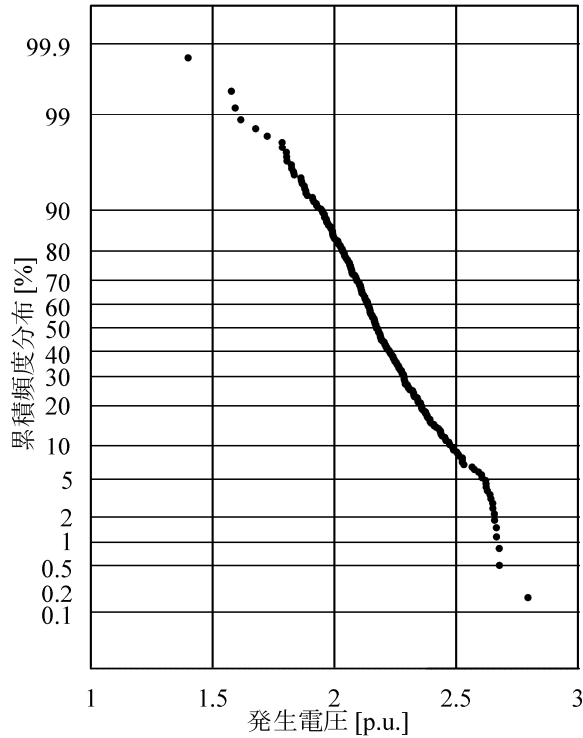
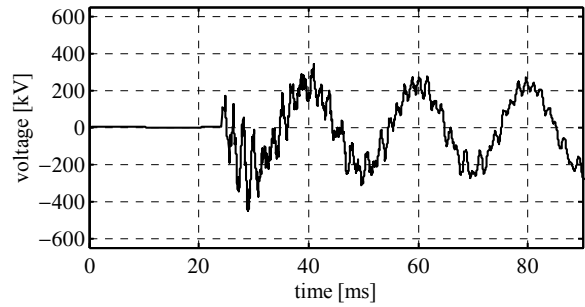
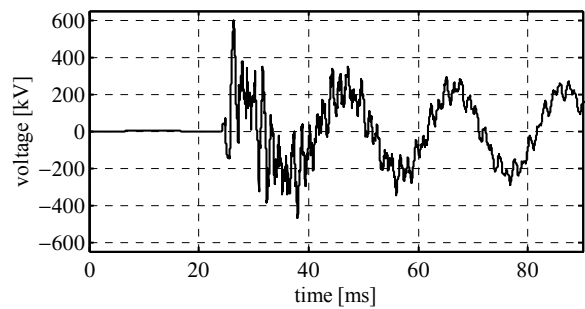


図 12 送電線 1 の末端に発生する  
電圧の累積頻度分布

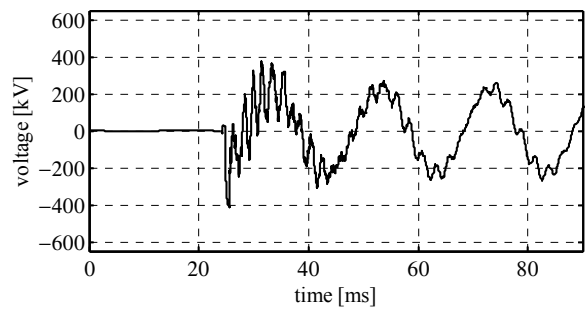
Fig. 12 Cumulative frequency distribution of  
voltages appearing at the receiving end  
of Transmission Line 1.



(a) a 相電圧



(b) b 相電圧



(c) c 相電圧

図 13 2% 値に対応するケースで送電線 1 の  
末端に発生する電圧の波形

Fig. 13 Waveforms of the voltages appearing at  
the receiving end of Transmission Line 1  
in the case of the 2-% value.

## 文献

- (1) 河野照哉, 「系統絶縁論」, コロナ社, 1984.
- (2) H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks," IEEE Trans., Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 388-399, Apr. 1969.
- (3) T. Noda, "Identification of a multiphase network equivalent for electromagnetic transient calculations using partitioned frequency response," IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1134-1142, Apr. 2005.
- (4) 耐雷設計委員会 発変電分科会, 「発変電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」, 電力中央研究所 総合報告 T40, 1995 年 12 月.

※ 本文献は, 次の文献に改訂された。

雷リスク調査研究委員会 発変電雷リスク分科会, 「発変電所及び地中送電線の耐雷設計ガイド(2011 年改訂版)」, 電力中央研究所 総合報告 H06, 2012 年 9 月.

- (5) 尾野孝夫, 「電力系統における開閉サージ性過電圧の検討」, 電力中央研究所 総合報告 121, 1985 年 1 月.
- (6) 雨谷昭弘, 「分布定数回路論」, コロナ社, 1990.
- (7) 松原広治, 尾野孝夫, 本山英器, 「酸化亜鉛形避雷器による開閉サージの抑制」, 電力中央研究所 研究報告 T87085, 1988 年 8 月.
- (8) IEEE Working Group 15.08.09, “Modeling and analysis of system transients using digital programs,” IEEE PES Special Publication, TP-133-0, 1998.
- (9) CIGRE Working Group 13.05, “The calculation of switching surges,” ELECTRA, No. 32, pp. 17–42, 1974.
- (10) 野田 琢, 高崎昌洋, 「電力系統の瞬時値解析のための部分系統縮約手法(その 1)」, 研究報告 T03013, 2004 年 3 月.
- (11) 渡辺 勉, 船橋伸一, 定梶 潤, 「1000 kV 変電機器の開閉サージ解析手法と結果」, 電気学会 開閉保護・高電圧合同研究会 SP-94-47, HV-94-118, 1994.
- (12) J. Takami, S. Okabe and E. Zaima, “Lightning surge overvoltages at substations due to backflashover with assumed lightning current waveforms based on observations,” IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2958–2969, Oct. 2010.
- (13) J. Takami, S. Okabe and E. Zaima, “Study of lightning surge overvoltages at substations due to lightning strokes to phase conductors,” IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 25, No. 1, pp. 425–433, Jan. 2010.

以上

更 新 履 歴		
日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2014/11/19	2.0	XTAP Ver. 2.00 用に修正 XTLC の変更に伴い, 線路定数を再計算
2013/08/20	1.0	初版作成 (XTAP Version 1.21 用)

