

XTAP 例題集		番 号	SSW-04
例題名	500 kV 送電線の地絡サージ解析と実測結果との比較		
分 野	地絡サージ計算, 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	地絡サージの考え方, 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 500 kV 送電線の地絡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 地絡サージ

1.1 考え方 ^{(1), (2), (3), (4)}

落雷などにより, 送電線に地絡事故が生じると, 健全相に過電圧が発生する。多回線の送電線の場合には, 事故を生じた回線以外の回線の各相にも過電圧が発生する。これを地絡サージと呼ぶ。送電線の絶縁レベルが十分でない, 1 線地絡事故が多相地絡事故や多回線にまたがる地絡事故に進展する恐れがあり, この観点から絶縁設計上考慮しておく必要がある過電圧である。特に, 抵抗投入や変電所の避雷器の効果で投入サージによる過電圧が低く抑えられるようになると, 送電線の絶縁において地絡サージが問題となってくる。地絡サージによる過電圧は, 変電所というより送電線に生じる過電圧であるから, 避雷器の設置など有効な抑制手法が無いことも特徴の一つである。

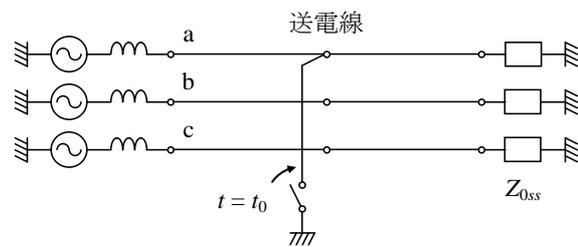
ここで, 投入サージとの考え方の違いについて簡単にまとめておく。例題 SSW-02 で述べたように, 投入サージ過電圧の大きさは, 遮断器の投入タイミングをランダムに変化させて多数回の投入サージ計算を行った結果から統計的に評価する。具体的には, 投入抵抗なしの場合, 投入指令のタイミングとこれをもとに確率的に決まる 3 つの遮断器の投入タイミングに依存して投入サージ過電圧の大きさが決まる。投入抵抗ありの場合は, 投入指令のタイミングとこれをもとに確率的に決まる 6 つの遮断器の投入タイミングに依存して投入サージ過電圧の大きさが決まる。また, 投入指令のタイミングそのものも確率的に決まる。このように, 投入サージ過電圧の大きさは, 確率的に決まる複数のタイミングに依存するため, 過電圧の最大値を与える投入タイミングの組み合わせが実際に生じる確率は極めて低い。従って, 発生頻度が極めて低い過電圧の最大値を求めることよりも, 統計的な評価を行う

ことが合理的であると考えられる。一方、地絡サージ解析の場合は、主に、地絡事故の大多数を占める 1 線地絡を問題とするため、地絡を生じる電源電圧の位相を少しずつ変化させていき、過電圧の最大値を求める。落雷など、地絡を生じる事象が生じるタイミングは確率的ではあるものの、投入サージの場合のように確率的に決まる複数のタイミングに依存する訳ではなく、1 線地絡が生じるタイミングのみに依存するため、過電圧の最大値を与える位相での地絡も十分にあり得ると考える。通常、地絡相の電源電圧がピーク値を取った時刻の少し後に地絡が生じた場合に、過電圧が最大となる。

1.2 地絡サージの発生原理 ^{(1), (2), (4)}

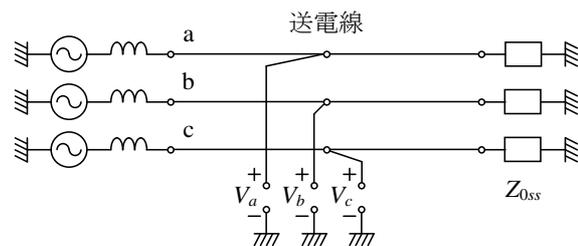
地絡サージの発生メカニズムは、電源電圧による定常電圧に、地絡により生じる過渡電圧が重畳すると考えると理解しやすい。定常電圧は、地絡を生じる前の電圧に対応する。一方、過渡電圧は、地絡前に地絡相に生じていた電圧が $+V(t)$ であるとき、仮想的に電源電圧を零とした送電線を考え、地絡を生じる時刻に $-V(t)$ の電圧を地絡相に印加したときに各相に生じる電圧として得られる。定常電圧と過渡電圧を重ね合わせて考えると、地絡相の電圧は、 $+V(t)$ と $-V(t)$ が打ち消して零（地絡状態）となり、健全相の電圧は、地絡相に $-V(t)$ が印加されることにより生じる過渡電圧と定常電圧の和となる。上記の地絡サージの発生メカニズムを、1 回線送電線の a 相が地絡した場合を例にとり、図解したものを図 1 に示す。

ここで、過渡電圧成分について、もう少し詳しく考察しておく。地絡点については、後述する理由により、送電線の中央で地絡が生じた場合に最も大きな過電圧を生じるから、送電線中央での地絡を考える。先に、地絡サージの過渡電圧成分は、地絡前に地絡相に生じていた電圧が $+V(t)$ であるとき、仮想的に電源電圧を零とした送電線を考え、地絡を生じる時刻に $-V(t)$ の電圧を地絡相に印加し



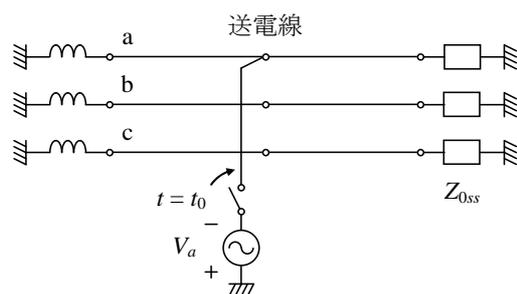
(a) $t = t_0$ で a 相地絡

||



(b) 定常電圧

+



(c) 過渡電圧

- ※ 送電線中央での地絡を想定。
- ※ 電源側のインピーダンスは簡易的にインダクタンスのみで表示。
- ※ Z_{0ss} は、負荷側変電所に接続された送電線の特徴インピーダンスの合成値。

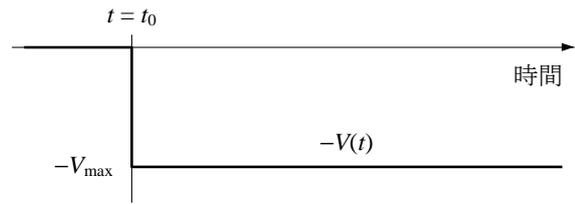
図 1 地絡サージの発生メカニズム

Fig. 1 Illustration of fault surges.

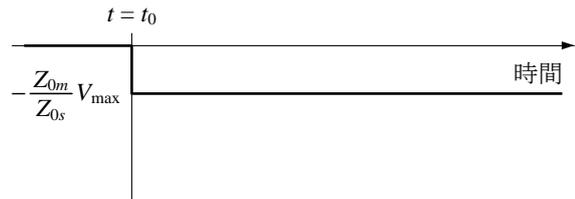
たときに各相に生じる電圧であると述べた。例えば、地絡相の電圧が正のピーク値で地絡を生じたとすると、 $-V(t)$ は、0 から負のピーク値 $-V_{\max}$ にステップ状に立ち上がり、以降、正弦波状に変化する波形となる。ただし、問題となる過電圧は、商用周波の 1 周期よりも短い時間領域で生じるため、近似的に $-V(t)$ を、図 2 (a) に示す 0 から $-V_{\max}$ に立ち上がるステップ波と考えることも差し支えない。仮想的に電源電圧を零とした送電線の中央において、地絡相にこのようなステップ波が印加されると、誘導相には、次式で表される過電圧が発生する。

$$V_m = -\frac{Z_{0m}}{Z_{0s}} V_{\max} \quad (1)$$

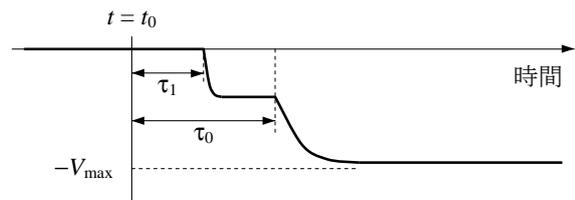
ただし、 Z_{0s} は特性インピーダンス行列の地絡相の自己分、 Z_{0m} は同行列の着目している誘導相と地絡相の間の相互分で、 Z_{0m}/Z_{0s} は、線種と電線配置によるが、通常、0.1 ~ 0.35 程度の値となる。以上より、送電線中央における誘導相の電圧 V_m の波形を図 2 (b) とする。次に、このサージが距離 x の地点まで伝搬したときの波形を考える。送電線上をサージが伝搬すると、複数の線間波と大地帰路波に分波することが知られている。線間波とは、その電流路が往路復路とも送電線の相導体である伝搬モードのことで、伝搬速度はほぼ光速に等しい。正確には、複数の線間波が存在するが、ここでは簡単のため、これらを総称して線間波と呼ぶことにする。一方、大地帰路波とは、送電線の相導体 3 相を一括して電流の往路とし、大地を帰路とする伝搬モードである。大地帰路波の伝搬速度は、線間波の速度の約 90 % 程度である。線間波の伝搬速度を v_1 、大地帰路波の伝搬速度を v_0 とすると、地絡点から距離 x だけ離れた P 点に、線間波が到達するのに必要な時間は $\tau_1 = x/v_1$ 、大地帰路波が到達するのに必要な時間は $\tau_0 = x/v_0$ となる。すなわち、P 点では、図 2 (c), (d) に示すように、



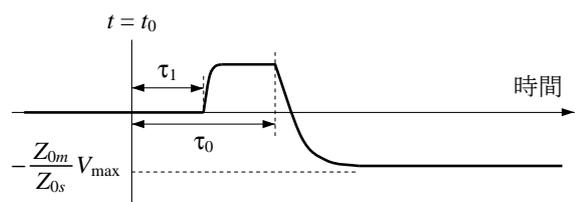
(a) 地絡点, 地絡相の電圧



(b) 地絡点, 誘導相の電圧



(c) 点 P, 地絡相の電圧



(d) 点 P, 誘導相の電圧

図 2 分波現象

Fig. 2 Propagation modes.

地絡の τ_1 後に線間波が到達し、それから $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_1$ だけ経過して大地帰路波が到達する。先に到達する線間波は、地絡相を往路として誘導相を帰路とするため、誘導相の電圧は地絡相と逆極性となる。大地帰路波は、地絡相、誘導相とも往路であるため同極性である。従って、線間波が到達して $\Delta\tau$ の間は、誘導相に地絡相と逆極性、つまり、今考えているように $-V(t)$ が負に立ち上がるステップ波の場合、正極性のサージが発生する。もし、送電線両端の変電所（もしくは発電所）の母線に地中ケーブルや多数の架空送電線が接続されており、地絡を起こした送電線から見た特性インピーダンスが十分小さいという条件が成立すれば、この正極性の線間波サージは、両端の母線で負反射し、負のサージとして送電線中央に戻って来る。このとき、地絡相の電源電圧が正のピーク付近であるから、誘導相の電源電圧は負であり、これに図 2 (b) に示したサージインピーダンスで決まる負極性の過電圧が重畳している。ここに、上記の送電線両側から負反射してきた負のサージが重畳し、さらに、サージが地絡点で反射するときに誘導相の負のサージが大きくなる。詳細なサージ計算を行うと、誘導相の過電圧は、理論上、最大で 2 p.u. 程度になり得る。しかしながら、これは、送電線のちょうど中央で地絡が生じ、かつ、送電線両端の母線の特性インピーダンスが極めて小さいという条件が成立した最過酷の場合であり、実際に発生する地絡サージはもう少し小さい。送電線の中央で地絡が生じた場合に過電圧が最大となる理由は、送電線両側から負反射してきた線間波サージが同じタイミングで重畳するためである。

なお、複数の線間波も伝搬速度は同じではなく、数 10 km 伝搬して数 μs 程度の伝搬時間の差を生じる。これにより、線路長にもよるが、電圧波形に数 μs から数 10 μs オーダの突起が生じ、これがピーク値となる場合がある。しかし、この突起状電圧の継続時間は、開閉サージというより雷サージの時間領域であり、電圧印加時間が短くなればなるほど絶縁体の絶縁性能が高くなる特性 ($V-t$ 特性) を勘案すれば、開閉サージ性の過電圧としては無視できる場合もある。

1.3 各要素の模擬

地絡サージ計算における各要素の模擬は、基本的に、例題 SSW-02 で述べた投入サージ計算の場合と同じと考えてよい。なお、投入サージ計算の場合と同様に判断が難しいのは、系統をどこまで模擬するかという点である。基本的には、解析対象である送電線の両端から、それぞれ、送電線を辿っていき、例題 SSW-02 の第 1.7 節で述べたのと同様に、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。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。やはり、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、試しに地絡サージ計算を行い、その影響をみて、試行錯誤的に決定するケースが多いと思われる。なお、地絡サージの計算では、当該送電線の両端のインピーダンスが小さいほど過酷側の計算結果を与えるため、過酷側の結果が得られることを承知した上で、線路両端に電圧源と小さめのインピーダンスを接続するといった、割り切った考え方もできる。

1.4 XTAP による解析例

図 3 に示す 500 kV 送電系統において、送電線 A のちょうど中央で、第 1 回線の b 相が地絡した場合の地絡サージ過電圧を計算した例を紹介する。G1 と G2 は、それぞれ発電所であり、例題 SSW-02 の図 6 の等価回路で模擬した。インダクタンスの値は、想定する発電機の X_d'' と昇圧用変圧器のインピーダンスから算出した。G3 と G4 は、それぞれ、母線 3 と母線 4 より遠方の系統を縮約して表現したもので、やはり、例題 SSW-02 の図 6 の等価回路で模擬した。電源周波数は 60 Hz とし、潮流は過電圧に影響を与えないと考え、4 つの三相電圧源の位相は同じとした。送電線については、全て、文献 (6) の 500 kV 用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。周波数依存線路モデルを作成するとき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。地絡時のアーク抵抗と塔脚接地抵抗を模擬する地絡抵抗は 1Ω とした。負荷については、簡単のため、模擬しなかった。このようにして作成した XTAP のデータケースを図 4 に示す。このデータケースを用いて、地絡が生じるタイミングを、電源電圧の位相で 0° から 180° まで 1° 刻みで変化させてシミュレーションを行い、地絡発生時の電源位相に対する過電圧最大値の特性を求めた。結果を p.u. 表示 (公称電圧の対地波高値を 1 p.u. とする) したものを図 5 に示す。なお、複数線間波の伝搬時間差により生じる突起状の電圧波形も再現するため、計算時間刻みは $1 \mu\text{s}$ とした。図 5 より、電源位相が 50° のときに地絡を生じると、発生過電圧が最大となること分かる。この条件で計算した各相の電圧波形を図 6 に示す。第 1 回線の c 相で過電圧の最大値が生じている。この例題のファイル名を SSW-04-A.xsf とする。

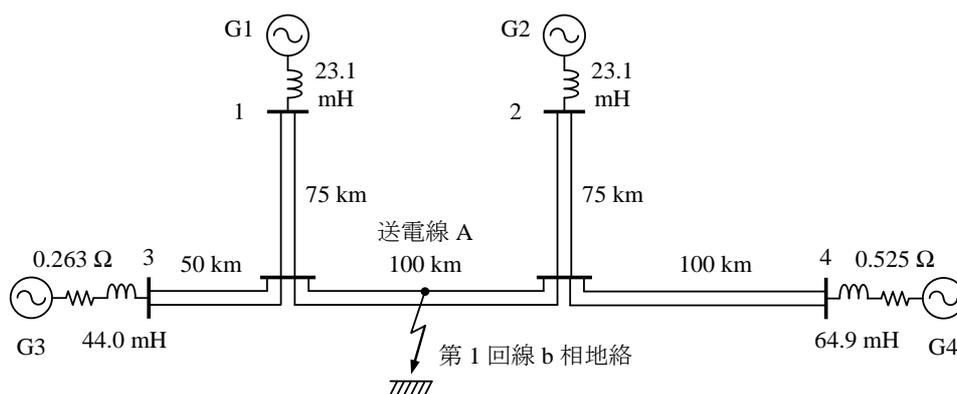


図 3 地絡サージ計算の例題回路

Fig. 3 Example circuit for a fault-surge simulation.

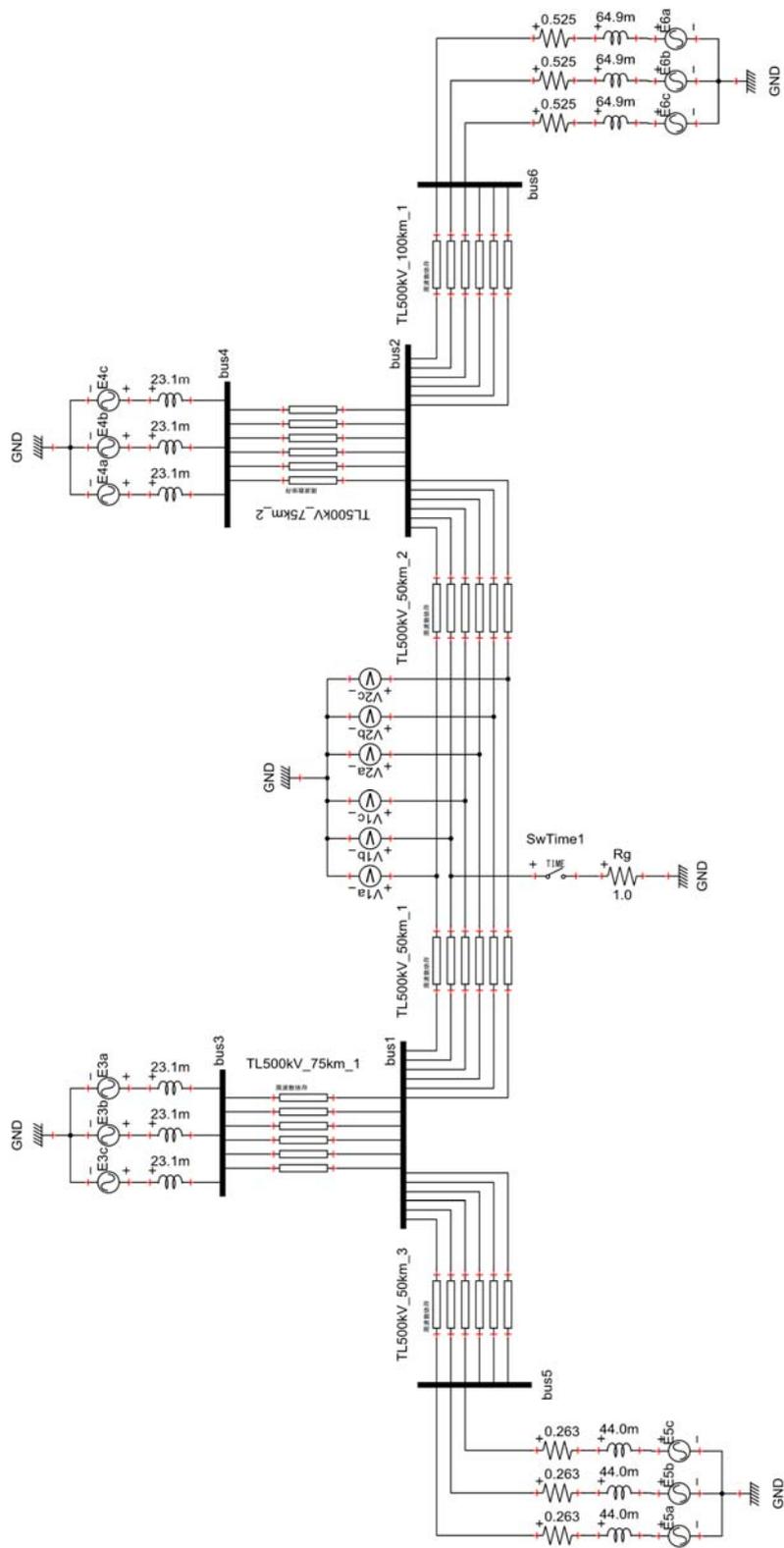


図 4 地絡サージ計算のための XTAP データケース

Fig. 4 XTAP data case for the fault-surge simulation.

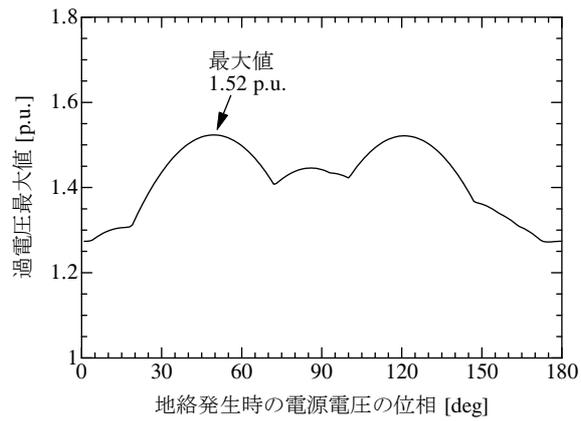
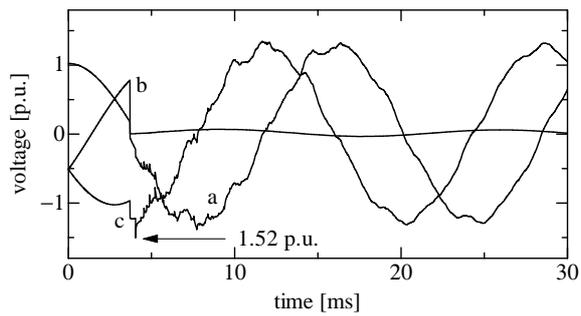
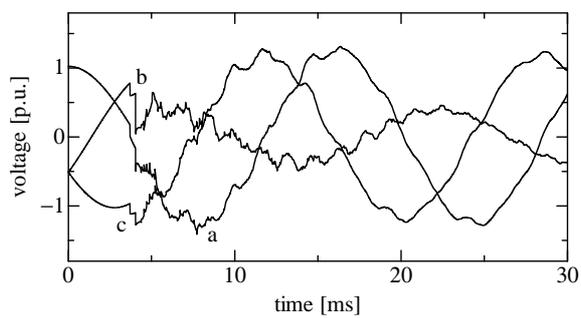


図 5 地絡発生時の電源電圧の位相に対する過電圧最大値の特性
 Fig. 5 Maximum voltage versus the phase angle of the voltage sources
 at the moment that the line-to-ground fault occurs.



(a) 第1回線

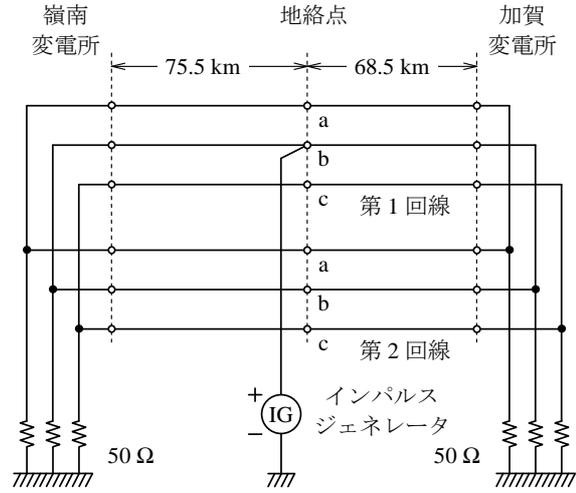


(b) 第2回線

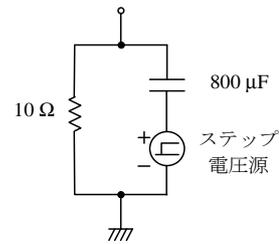
図 6 地絡発生時の電源電圧の位相が 50° の場合の計算結果
 Fig. 6 Calculated result of the case where the line-to-ground fault occurs
 when the phase angle of the voltage sources is 50° .

1.5 実測結果との比較例

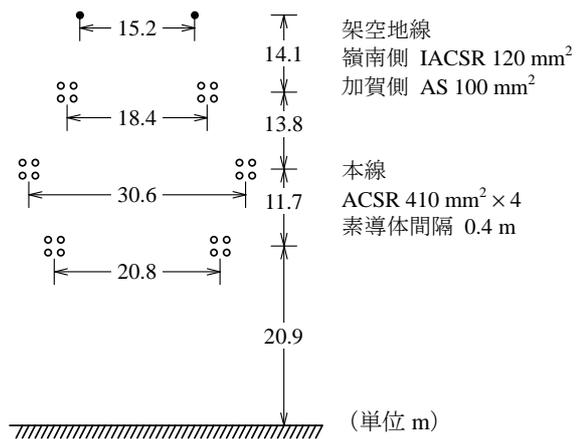
北陸電力加賀変電所と関西電力嶺南変電所を結ぶ 500 kV 加賀嶺南線で行われた地絡サージ試験⁽⁵⁾の結果を再現するために、XTAPによりシミュレーションを行った例を紹介する。第 1.2 節で述べたように、地絡サージにより発生する過渡電圧成分は、地絡前に地絡相に生じていた電圧が $+V(t)$ であるとき、仮想的に電源電圧を零とした送電線を考え、地絡を生じる時刻に $-V(t)$ の電圧を地絡相に印加した場合に生じる電圧として得られる。そこで、このサージ試験では、加賀嶺南線両端の母線の各相をインピーダンスで接地することにより電源電圧を零とし、地絡点の地絡相に上記の $-V(t)$ に対応する電圧を印加することで過渡電圧成分だけを生じさせる手法を用いている。線路両端の母線各相を接地するインピーダンスは、それより遠方の系統のインピーダンスを簡易的に模擬するものであり、ここでは、これを 50Ω の抵抗とした場合について実測結果と計算結果の比較を行う。図 7 に試験回路、電圧印加に用いたインパルス・ジェネレータの等価回路、加賀嶺南線の導体配置を示す。地絡点は、線路のちょうど中央ではなく、線路中央より 3.5 km だけ加賀変電所側である。また、地絡相は第 1 回線の b 相である。この試験回路を模擬した XTAP のデータケースを図 8 に示す。送電線は、周波数依存線路モデルで模擬し、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。また、シミュレーションにおける計算時間刻みは、 $0.5 \mu\text{s}$ とした。図 9 に実測結果を、図 10 に計算結果を示す。複数線間波の伝搬時間差により生じる突起状の電圧波形も含めて、計算結果は実測結果とよく一致している。この例題のファイル名を SSW-04-B.xsf とする。



(a) 試験回路



(b) インパルス・ジェネレータの等価回路



(c) 加賀嶺南線の導体配置

図 7 加賀嶺南線における地絡サージ試験
Fig. 7 Fault-surge test at the Kaga-Reinan line.

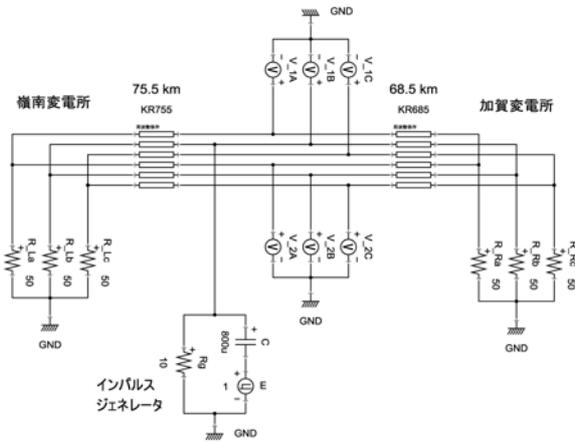


図 8 加賀嶺南線における地絡サージ試験再現のための XTAP データケース

Fig. 8 XTAP data case for reproducing the fault-surge test result of the Kaga-Reinan line.

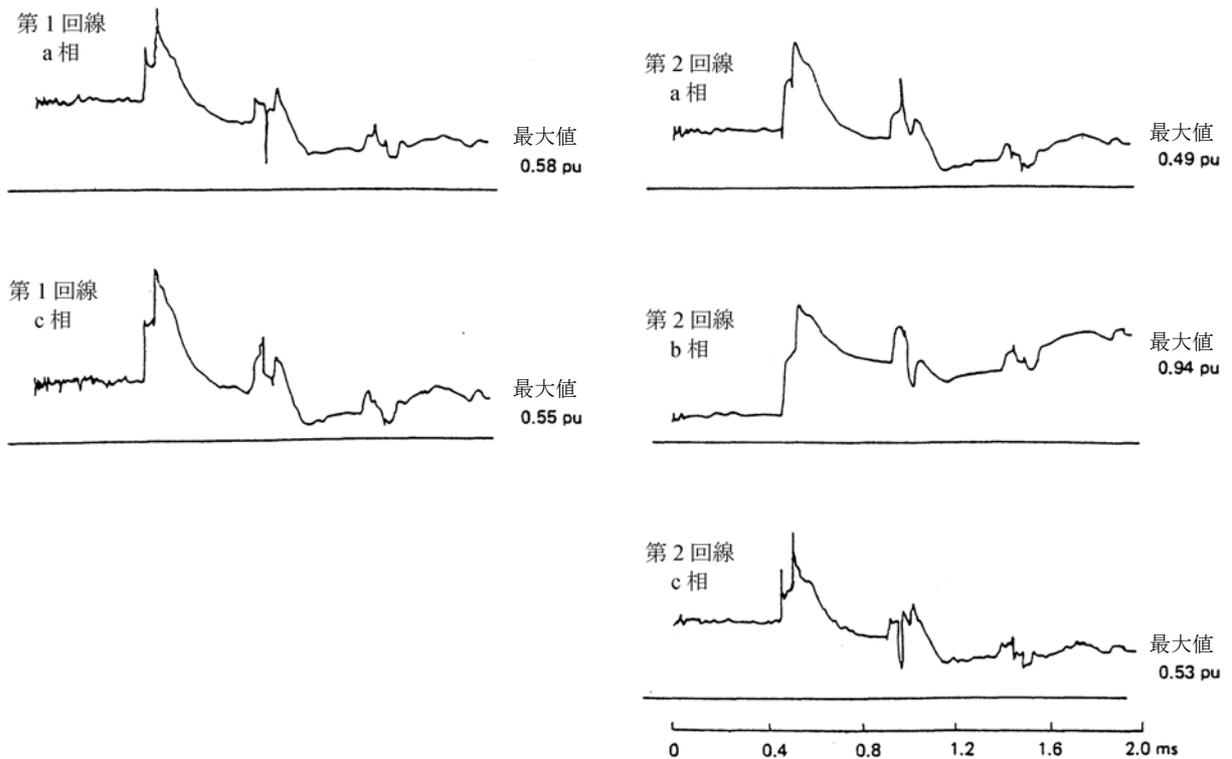


図 9 加賀嶺南線地絡サージ試験の実測結果

Fig. 9 Measured result of the fault-surge test at the Kaga-Reinan line.

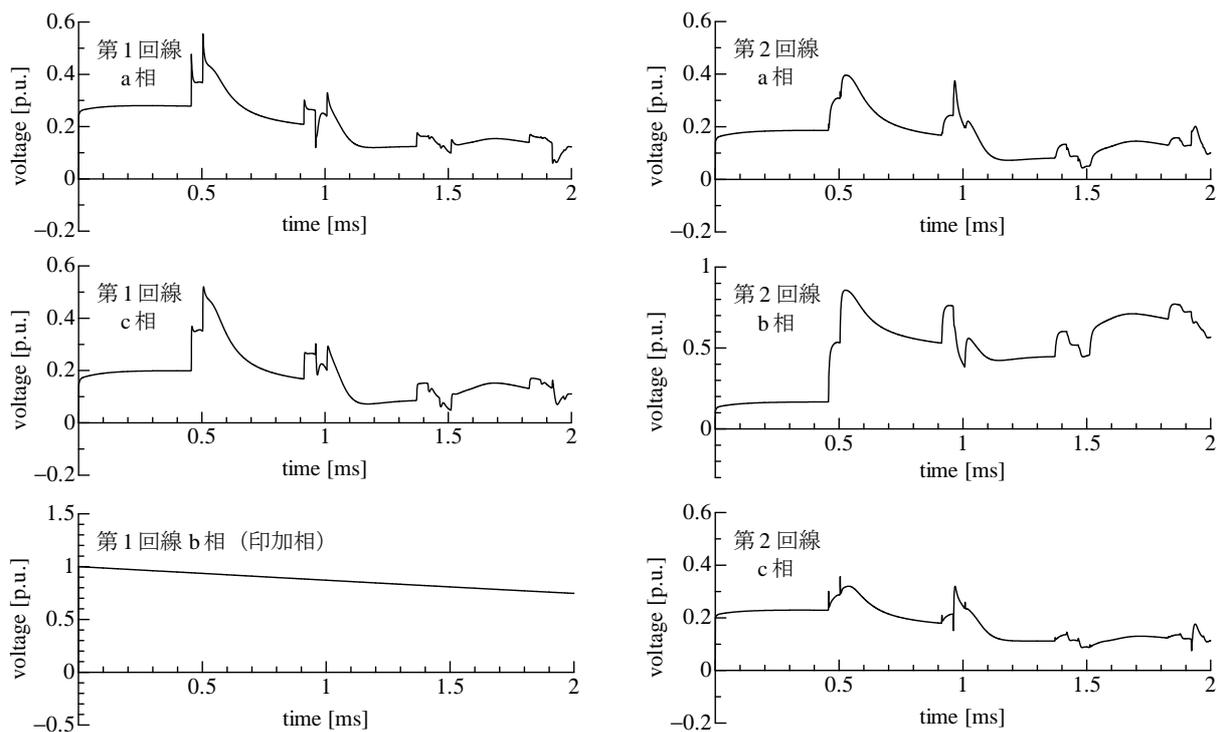


図 10 加賀嶺南線地絡サージ試験の XTAP による再現計算結果

Fig. 10 Reproduced result of the fault-surge test at the Kaga-Reinan line using XTAP.

文献

- (1) 河野照哉, 「系統絶縁論」, コロナ社, 1984.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) E. W. Kimbark and A. C. Legate, "Fault surge versus switching surge: A study of transient overvoltages caused by line-to-ground faults," IEEE Trans., Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 9, pp. 1762-1769, Sep. 1968.
- (5) 尾野孝夫, 松原広治, 「TNA による地絡サージの予測」, 電力中央研究所 研究報告 177042, 1978 年 3 月.
- (6) 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.

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
2013/09/09	1.0	初版作成（XTAP Version 1.21 用）

