

XTAP 例題集		番 号	SSW-03
例題名	大規模系統復旧時のブロック充電による投入サージの解析		
分 野	大規模系統復旧，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	大規模系統復旧時のブロック充電による投入サージについて，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 / 275 kV 系統の解析を行った例を紹介している。 (上記文献からの抜粋)		

## 1 大規模系統復旧時のブロック充電による投入サージ

### 1.1 考え方<sup>(1),(2)</sup>

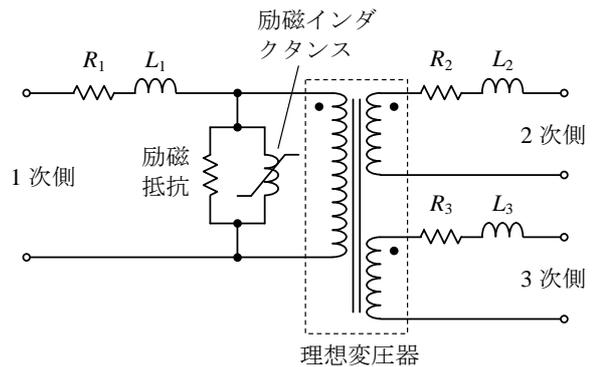
ある電力会社の系統が全域で停電（以降，「全停」と略す）となった場合，連系している隣の電力会社の電圧か，もしくは，自己起動可能な発電機からスタートして系統を復旧していく必要がある。通常の送電線の加圧では，例題 SSW-02 で述べたように，当該の送電線は無負荷にしておいて電源側の遮断器を投入するという操作を送電線ごとに実施する。しかしながら，全停復旧を行う場合には，通常の加圧のように線路を一つずつ加圧していたのでは復旧までに時間がかかり過ぎるため，系統をいくつかのブロックに分割し，ブロックごとに充電していく手順をとる<sup>(3)</sup>（このとき，各ブロックは無負荷としておく）。一つのブロックには複数の送電線と変電所が含まれるから，送電線の亘長が長くなり，そのインダクタンスおよびキャパシタンスも大きくなる。また，変電所の変圧器などのインダクタンスとキャパシタンスがこれに加わる。このように，ブロックごとに充電する場合には，等価的なインダクタンスとキャパシタンスが大きくなり，そこに蓄えられる電磁エネルギーも大きくなるため，線路を一つずつ加圧する場合に比べて，過電圧や避雷器の処理エネルギーの問題が生じやすくなる<sup>(4)</sup>。そこで，大規模系統復旧時の適切なブロック分けの検討，決定したブロック分けにおける過電圧や避雷器処理エネルギーの把握を目的として，ブロック充電による投入サージ現象を解析する必要が生じる。

## 1.2 各要素の模擬

大規模系統復旧のためのブロック充電により発生する投入サージの解析手法は、例題 SSW-02 節で述べた通常の投入サージの解析手法と基本的に同じである。ただし、充電されるブロックに含まれる変電所の機器を考えると、通常の投入サージの解析では存在しない変圧器と調相設備を模擬する必要がある。そこで、次節以降では、変圧器と調相設備の模擬手法について述べる。

## 1.3 変圧器の模擬

変圧器は、教科書等でよく知られている「変圧器の基本等価回路」により模擬する。図 1 に、その 1 相分を示す。この等価回路は、巻線抵抗、漏れインダクタンス、励磁抵抗、励磁インダクタンス、理想変圧器からなる。2 巻変圧器の場合、漏れインダクタンスは等価的に 1 次側にまとめるか、適切な比率で 1 次側と 2 次側に分割する。3 巻変圧器の場合には、試験結果として、1 次側-2 次側間、2 次側-3 次側間、3 次側-1 次側間の漏れインダクタンスが与えられるため、これらのデータから 1 次側、2 次側、3 次側のインダクタンスを算出して用いる。しばしば、2 次側の漏れインダクタンスが負の値となるが、これをそのまま用いるとシミュレーションにおいて数値不安定を起こす場合がある<sup>(5)</sup>。XTAP を用いた解析では、このような場合、小さな正のインダクタンス値を入力しておくことが推奨される。励磁抵抗は、線形抵抗とし、定格電圧における無負荷試験の結果から得られる抵抗値をセットする。励磁インダクタンスは、非線形インダクタンスで模擬し、メーカーより提供された鉄心の飽和特性（電流-磁束特性）をセットする。メーカー提供の鉄心の飽和特性が、ヒステリシス特性も含むものである場合には、図 2 に示すように、その中心を通る特性を用いる。このようにして、1 相分の変圧器の等価回路が得られるが、これを 3 相分用意して、Y-Δ、Y-Y-Δ といった形に結線



$R_1, L_1$ : 1 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス  
 $R_2, L_2$ : 2 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス  
 $R_3, L_3$ : 3 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス

※上図は、3 巻変圧器の場合の 1 相分。2 巻変圧器の場合、3 次巻線は不要。

図 1 変圧器の基本等価回路

Fig. 1 Fundamental equivalent circuit of transformers.

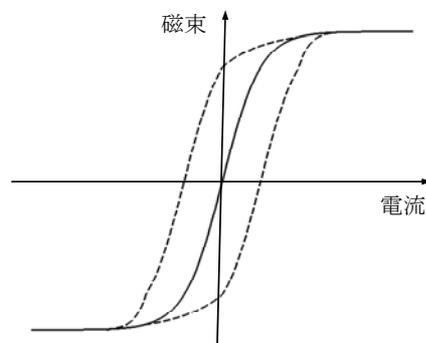


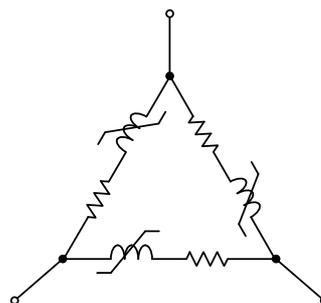
図 2 鉄心のヒステリシス特性

Fig. 2 Hysteresis loop of an iron core.

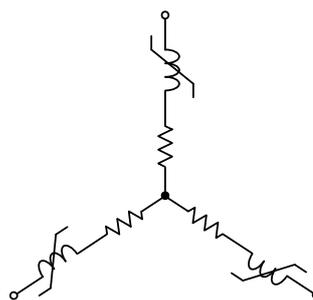
し、変圧器モデルとする。XTAP には、これら三相変圧器のモデルがあらかじめ用意されているため、解析者が結線を行う必要はない（ただし、励磁インダクタンスは外付けの非線形インダクタンスとして模擬する）。

#### 1.4 調相設備の模擬

大規模系統復旧の過程において、ブロックごとに系統を充電していくとき、各ブロックは無負荷としておく。このため、充電後のフェランチ効果による定常的な過電圧を防止する目的で、調相設備であるシャントリアクトルを投入しておく場合がある<sup>(1), (4)</sup>。シャントリアクトルのモデルとしては、図 3 に示すように、各相のリアクトルをインダクタンスと損失を表す抵抗の直列接続で模擬し、これを実機の通り結線したものをを用いる。鉄心の飽和特性が入手可能な場合には、インダクタンスを非線形とする。シャントリアクトルは、主変圧器の 3 次側などに接続されるが、モデルについても実機と同じ箇所に接続する。なお、XTAP には、これらシャントリアクトルのモデルが用意されており、解析者が等価回路を組み上げる必要はない。



(a) Δ 結線



(b) Y 結線

図 3 シャントリアクトルのモデル

Fig. 3 Shunt reactor models.

#### 1.5 高調波過電圧

大規模系統復旧時のブロック充電において、ここで説明した投入サージ過電圧とは異なる原理により減衰の小さい持続性高調波過電圧が生じる場合があり、内外で検討が進んでいる<sup>(4), (6)</sup>。これは、投入対象のブロックの固有振動数が商用周波の低次の整数倍に一致した場合、1 サイクルごとにこの固有振動を強めるタイミングで変圧器の励磁突入電流が流れることにより生じる過電圧である。減衰が小さい理由は、上記のタイミングが合う限り固有振動が励振されることと、充電するブロックに負荷が無く、ダンピングが小さいことによる。

#### 1.6 XTAP による解析例

図 4 に示す 500/275 kV 系統を、全停復旧時のブロックの 1 つと考え、このブロックを充電したときに発生する過電圧を計算する。投入する遮断器より電源側は、周波数特性を考慮して、例題 SSW-02 の図 7 に示した等価回路で模擬した。ここで、周波数特性は、CIGRE のガイドライン<sup>(7)</sup>に示された容量 500 MVA の変圧器の特性と同じであると仮定し、想定する短絡容量 (10,000 MVA) から等価

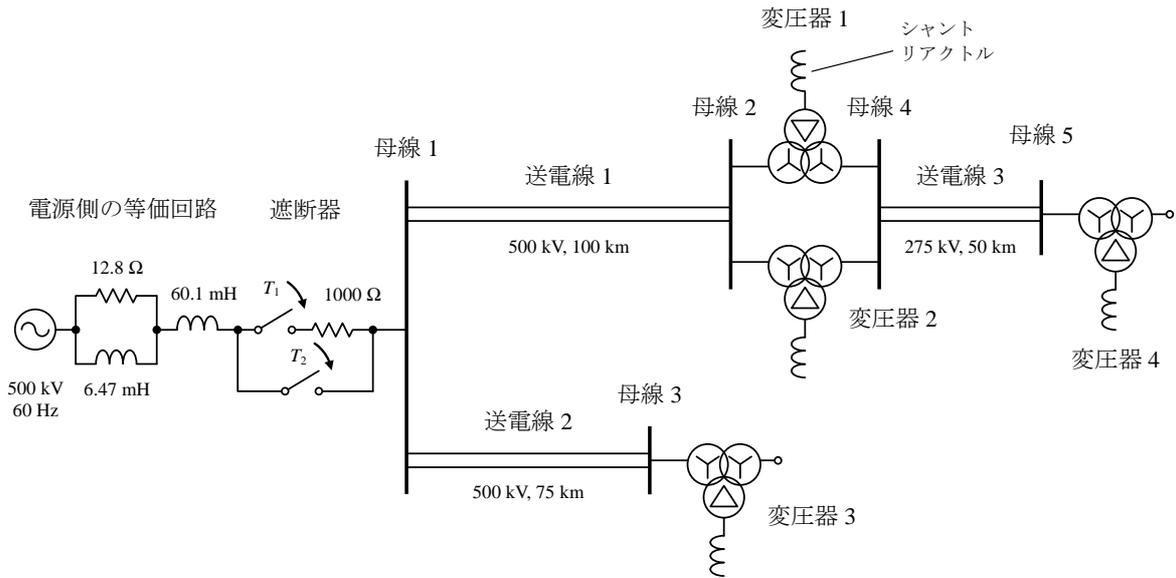
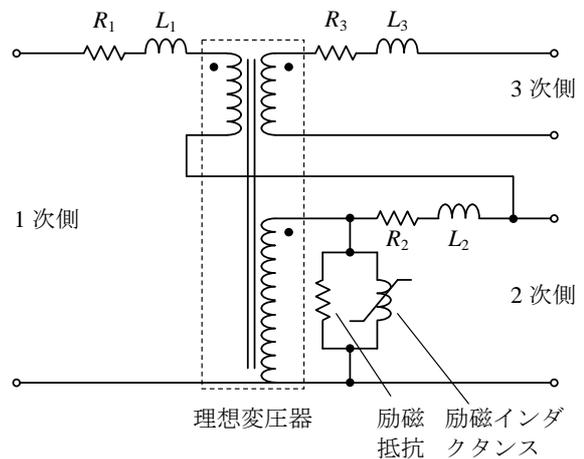


図 4 ブロック充電による投入サージの計算のための例題回路

Fig. 4 Example circuit for a block energization transient simulation.

回路の定数を算出した（算出した定数を図 4 中に示す）。投入する遮断器は、例題 SSW-02 の図 9 (b) に示した投入抵抗ありのもので、投入抵抗の値は  $1,000 \Omega$  とした。投入指令から抵抗投入までの平均時間  $T_1$  と抵抗投入から抵抗短絡までの平均時間  $T_2$  はともに  $10 \text{ ms}$ 、抵抗投入のばらつき  $\sigma_1$  および抵抗短絡のばらつき  $\sigma_2$  はともに  $1.5 \text{ ms}$  とした。送電線 1 と 2 は、それぞれ亘長  $100 \text{ km}$  と  $75 \text{ km}$  の  $500 \text{ kV}$  架空送電線である。また、送電線 3 は、亘長  $50 \text{ km}$  の  $275 \text{ kV}$  架空送電線である。これら送電線の装柱は、文献 (8) 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作成時の線路定数計算周波数のサンプルは  $0.1 \text{ Hz} \sim 10 \text{ MHz}$  の範囲で  $400$  点とした。変圧器 1, 2, 3 は全て同じ定数の  $500/275/77 \text{ kV}$  単巻変圧器とし、図 5 に示す等価回路で模擬した。この等価回路の基本的な考え方は、第 1.3 節で説明した変圧器の基本等価回路と同じであるが、図 1 と比べると、1 次巻線の低圧側と 2 次巻線が共通となる単巻変圧器の結線に変更している。変圧器 4 は、 $275/77/22 \text{ kV}$  の三巻変圧器であ



$R_1, L_1$ : 1 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス  
 $R_2, L_2$ : 2 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス  
 $R_3, L_3$ : 3 次側巻線の抵抗と漏れインダクタンス

※ 上図は、3 巻変圧器の場合の 1 相分。

図 5 単巻変圧器の基本等価回路

Fig. 5 Fundamental equivalent circuit of autotransformers.

り、これは、図 1 の基本等価回路で模擬した。いずれの変圧器も励磁インダクタンスの飽和特性は、図 6 に示す 2 折れ線近似とした。また、各変圧器の 3 次側には、シャントリアクトルが接続されているものとし、図 3 (a) に示した  $\Delta$  結線のモデルで模擬した。簡単のため、リアクトルの非線形特性は考慮せず、想定する容量からインダクタンスおよび抵抗値を算出した。以上の変圧器およびシャントリアクトルの定数を表 1 に示す。避雷器については、文献 (8) に記載された 30 % 減高性能避雷器の特性を有する非線形抵抗で模擬した。設置箇所および個数については、母線 1 ~ 5 それぞれに 1 つずつとした。このようにして作成した XTAP のデータケースを図 7 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  $0.5 \mu\text{s}$  とした。図 8 は、母線 5 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である。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 8 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 1.8 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 9 に示しておく。2 % 値に対応するケースでは、b 相で最大電圧が生じていることが確認できる。

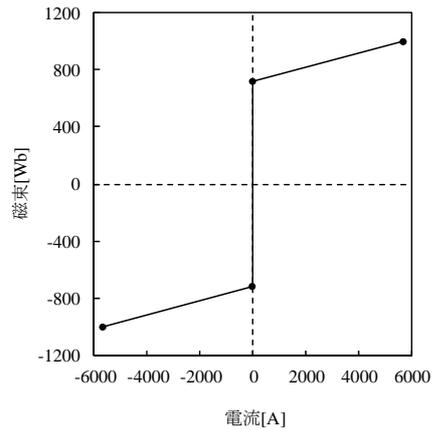


図 6 励磁インダクタンスの飽和特性

Fig. 6 Saturation curve of the magnetizing inductances.

表 1 解析に用いた変圧器およびシャントリアクトルの定数

Table 1 Transformer and shunt-reactor constants used in the simulation.

(a) 変圧器 1 ~ 3

$R_1$	0.152 $\Omega$	$L_1$	87.6 mH
$R_2$	0.227 $\Omega$	$L_2$	17.8 mH
$R_3$	0.178 $\Omega$	$L_3$	4.30 mH
励磁抵抗		400 k $\Omega$	

(b) 変圧器 4

$R_1$	0.756 $\Omega$	$L_1$	60.2 mH
$R_2$	0.237 $\Omega$	$L_2$	0.001 mH
$R_3$	0.0484 $\Omega$	$L_3$	1.93 mH
励磁抵抗		150 k $\Omega$	

(c) シャントリアクトル

変圧器 1 ~ 3 (1 相あたり)			
$R$	0.741 $\Omega$	$L$	590 mH
変圧器 4 (1 相あたり)			
$R$	0.121 $\Omega$	$L$	96.3 mH

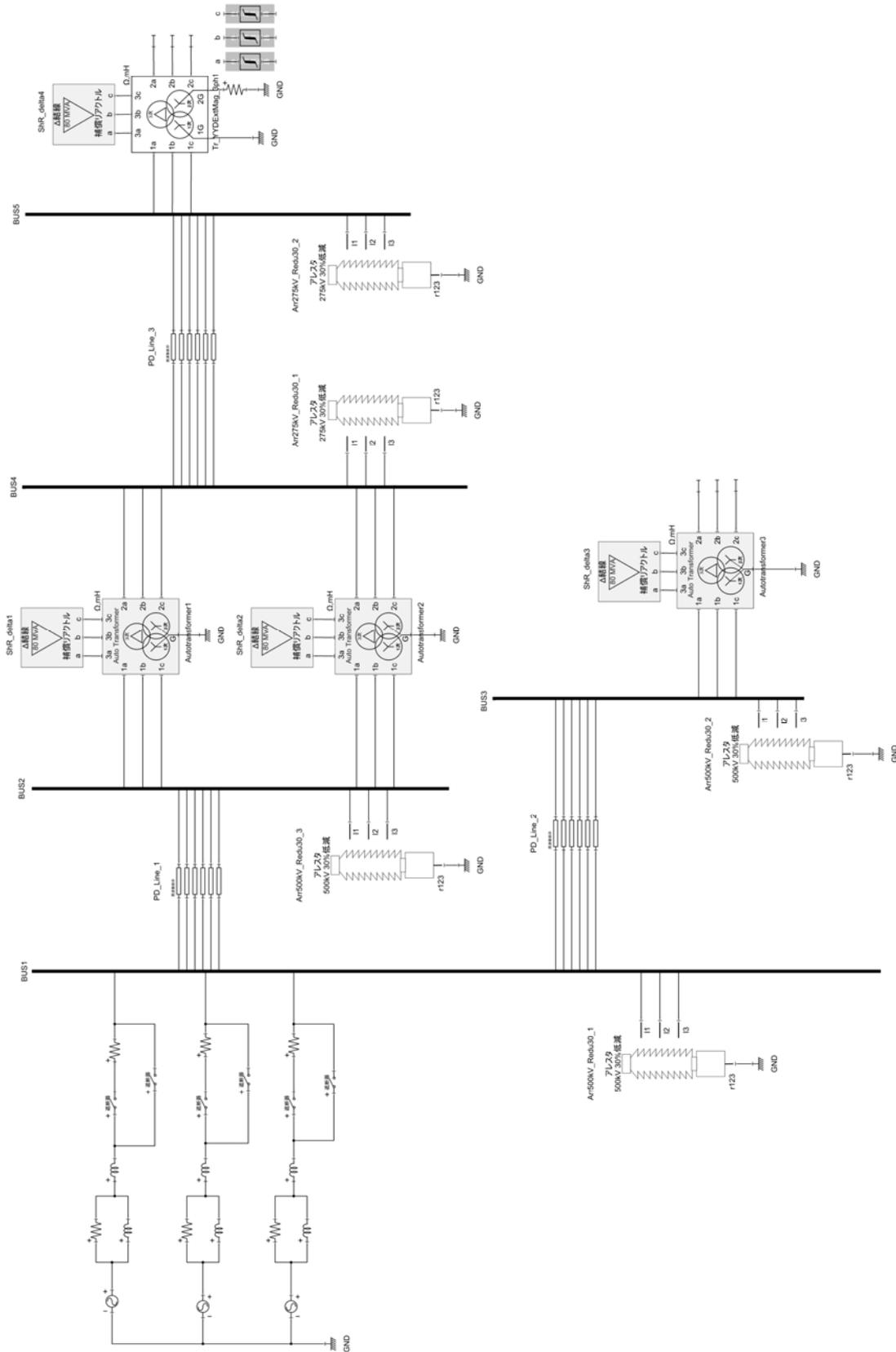


図7 ブロック充電による投入サージの計算のためのXTAPデータケース

Fig. 7 XTAP data case for the block energization transient simulation.

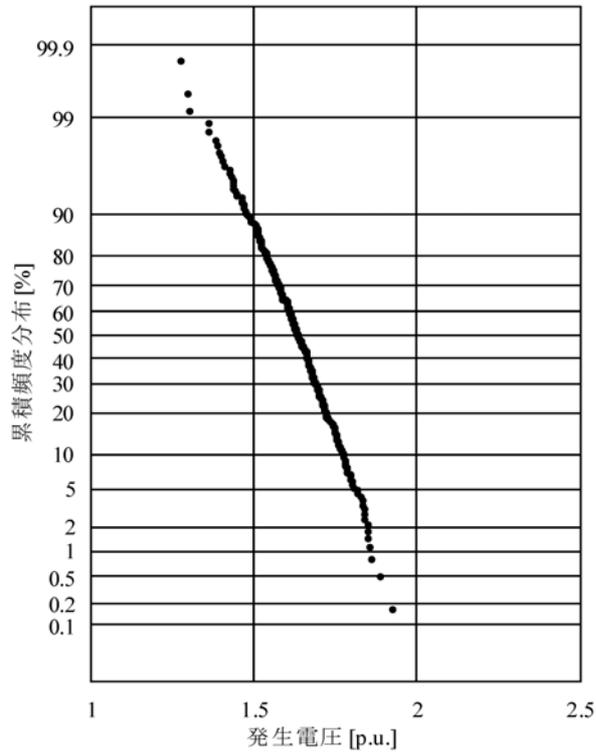


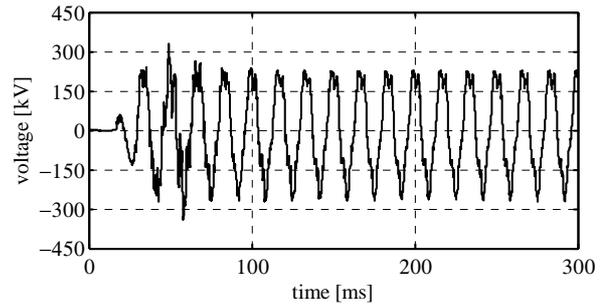
図 8 母線 5 に発生する電圧の累積頻度分布

Fig. 8 Cumulative frequency distribution of voltages appearing at Bus 5.

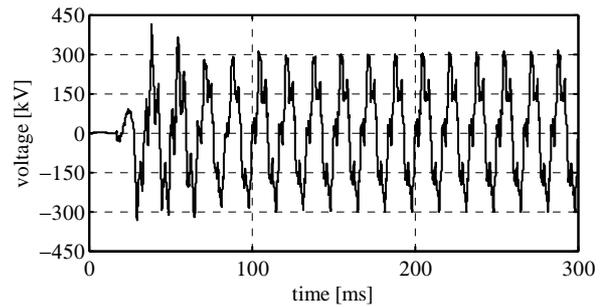
## 文献

- (1) M. M. Adibi, "Power system restoration: Methodologies & implementation strategies," IEEE Press, 2000.
- (2) M. M. Adibi and L. H. Fink, "Restoration from cascading failures," IEEE Power & Energy Magazine, pp. 68-77, Sep./Oct. 2006.
- (3) M. M. Adibi and R. J. Kafka, "Power system restoration issues," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, Apr. 1991.
- (4) M. M. Adibi, R. W. Alexander and B. Avramovic, "Overvoltage control during restoration," IEEE Trans., Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1464-1470, Nov. 1992.
- (5) X. Chen, "Negative inductance and numerical instability of the saturable transformer component in EMTP," IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1199-1204, Oct. 2000.
- (6) 古川功一郎, 舟越節彦, 川内野寿博, 高崎真司, 下條敏一, 平山開一郎, 曾我部敏明, 嶋村武夫, 野原真一, 「系統再起動時に発生する変圧器過電圧と対策」, 電気学会論文誌 B, 125 巻 1 号, pp. 53-64, 2005.
- (7) CIGRE Working Group 13.05, "The calculation of switching surges," ELECTRA, No. 32, pp. 17-42, 1974.
- (8) 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.

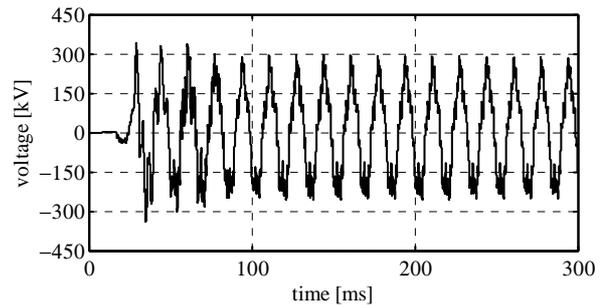
※ 本文献は, 次の文献に改訂された。



(a) a 相電圧



(b) b 相電圧



(c) c 相電圧

図 9 2% 値に対応するケースで母線 5 に発生する電圧の波形

Fig. 9 Waveforms of the voltages appearing at Bus 5 in the case of the 2% value.

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)