

# 計器用変圧器の電位振動解析

論文

■ 森 佑介  
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広  
Akihiro Takizawa

変圧器巻線に雷サージが侵入した際、電位振動現象が発生し、定格運転のときよりも高い電圧分担を生じることが知られており、電力用変圧器を対象とした解析が行われてきた。一方、計器用変圧器については、巻数が非常に多いといった特長から、これまで電位振動現象が解析された事例は少ない。計器用変圧器に生じる電位振動現象が解析できれば、さまざまな周波数のサージに対する耐性を評価することができ、巻線絶縁設計の最適化および製品の信頼性向上に繋がる。本稿では計器用変圧器巻線の等価回路を作成し、電位振動解析を実施した。また、実測との比較検証を行い、本解析の妥当性を確認できたので紹介する。

## 1 はじめに

計器用変圧器は変電設備や受配電設備に設置され、電圧計や保護継電器で扱えるように、高電圧を低電圧に変換する機器である。東光高岳では、各種絶縁媒体を用いた計器用変圧器を開発・製造している。これら計器用変圧器は、十分な耐電圧となるように設計されており、サージのような急峻な高電圧にも耐えることをインパルス試験にて確認している。

サージは各種電力機器に定格以上の過電圧を発生させるが、変圧器巻線においては、巻線内の電圧分担が不均一となり、より大きな電位差が発生することが知られている。この現象は電位振動現象と呼ばれ、電力用変圧器を対象とした解析が行われてきた。このような電位振動現象の解析技術（以下、電位振動解析）により、サージ発生時における巻線内の電位分布を把握できるため、巻線絶縁設計の最適化につながる。また、電位振動解析では、標準インパルス電圧だけでなく、さまざまな波形、周波数に対する電圧分担を解析できる。そのため、より詳細に耐サージ性能を評価でき、巻線絶縁設計の最適化および製品の信頼性向上につながる。

一方、計器用変圧器については、電力用変圧器と比べて巻数が非常に多いといった特長から、電位振動現象を解析した事例は少ない。6.6 kVの計器用変圧器を対象とした解析事例が一部あるものの<sup>(1)</sup>、さらに巻数が多く、絶縁的に厳しい特別高圧クラスを対象とした解析事例は見受けられない。本稿では、特別高圧クラスの計器用変圧器を対象に、等価回路を作成し、電位振動解析を実施した。また、実測との比較検証により本解析の妥当性を確認した。

## 2 計器用変圧器の特長

### 2.1 計器用変圧器の巻線構造

計器用変圧器の巻線構造を図1に示す。低電圧側の

二次巻線や三次巻線は簡略化しており、高電圧となる一次巻線の断面イメージを記載した。一次巻線は、図中の破線矢印のように巻かれ、層間には絶縁紙が挿入される。電圧階級によって異なるが、巻数は数万ターンオーダーにも及ぶことがある。

一次巻線の絶縁設計においては、層間電圧や対地電圧などを考慮し、十分な絶縁耐力を確保できるように絶縁材料や寸法を決定する必要がある。

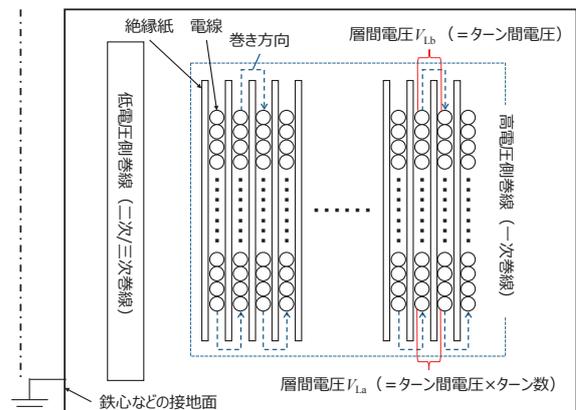


図1 計器用変圧器の巻線構造 (断面イメージ図)

### 2.2 計器用変圧器巻線の層間電圧

計器用変圧器巻線は1ターンごとに電圧が変化（以後、ターン間電圧）するため、巻線内の位置に応じて層間電圧が異なる。巻線端部の層間電圧は大小を交互に繰り返す。図1に示す層間電圧  $V_{La}$  には、ターン間電圧  $\times 2$  層分のターン数の電圧が発生する。層間電圧  $V_{Lb}$  にはターン間電圧しか生じない。通常定格運転において、層間電圧  $V_{La}$  は層間絶縁耐力に比べて非常に小さく、絶縁性能には大きな裕度がある。しかし、サージが侵入すると、前述のとおり、過電圧が発生するだけでなく、電位振動現象により各層の電圧分担が不均一になり、高い層間電圧が発生する可能性がある。

筆者らは、特別高圧クラスの計器用変圧器を対象に等

価回路の作成，電位振動解析を実施し，層間電圧の周波数特性を評価した。なお，ターン間電圧については，層間電圧に比べて非常に小さいため，本稿で紹介する解析（以下，本解析）では評価対象外としている。

### 3 電位振動解析モデル

#### 3.1 等価回路

サージは商用周波数よりも高周波数になるため，巻線内の電位分布を解析するには，インダクタンスだけでなく，静電容量を考慮する必要がある。図2(a)に計器用変圧器の等価回路を示す。ここで， $L$ および $R$ は1ターンごとの自己インダクタンスおよび巻線抵抗を表す。 $M$ は各ターン間の相互インダクタンスを表す。 $C_L$ ， $C_T$ ， $C_g$ は，それぞれ1ターンごとの層間静電容量，ターン間静電容量，対地間静電容量を表す。なお，低電圧側の二次巻線や三次巻線は，一次巻線に比べて電圧が低く，巻数も非常に少ないため接地として扱い，一次巻線との電磁的結合は無視している。

同図(a)の等価回路で解析する場合，計器用変圧器は巻数が非常に多いため，回路素子の数も多くなる。特に相互インダクタンス $M$ については，巻数 $N$ の一次巻線に対して， $N(N-1)/2$ 個必要であり， $N$ が数万にも及ぶと解析時間が膨大になるだけでなく，解析ソフトで模擬できる素子数の上限を超え，解析できない可能性がある。そこで本解析では，図2(b)のように等価回路を簡略化した。2層分をひとつのブロックとしており， $L'$ および $R'$ は2層分の自己インダクタンスおよび巻線抵抗を表す。 $M'$ は各ブロック間の相互インダクタンスを表す。 $C_s$ は2層分の静電容量を表す。ここに発生する電位差が層間電圧 $V_{La}$ に相当し，耐サージ性能の評価において重要となる。

#### 3.2 自己/相互インダクタンス

通常の電位振動解析では，1ターンごとに自己インダクタンスおよび相互インダクタンスを算出する。本解析では巻数の多い計器用変圧器に対応するため，巻線を有限長のソレノイドコイルと考えて，2層分の自己インダクタンスを次式より計算する。

$$L' = \frac{K_N \mu_0 N^2 S}{w} \dots \dots \dots (1)$$

ここで， $K_N$ は長岡係数<sup>註1)</sup>， $\mu_0$ は真空の透磁率， $N$ は2層分の巻数， $S$ は巻線の断面積， $w$ は巻幅を表す。なお，電位振動解析は高周波における評価が重要となるため，空心として計算した。

各ブロック間の相互インダクタンス $M'$ は，以下の手順で求めた。

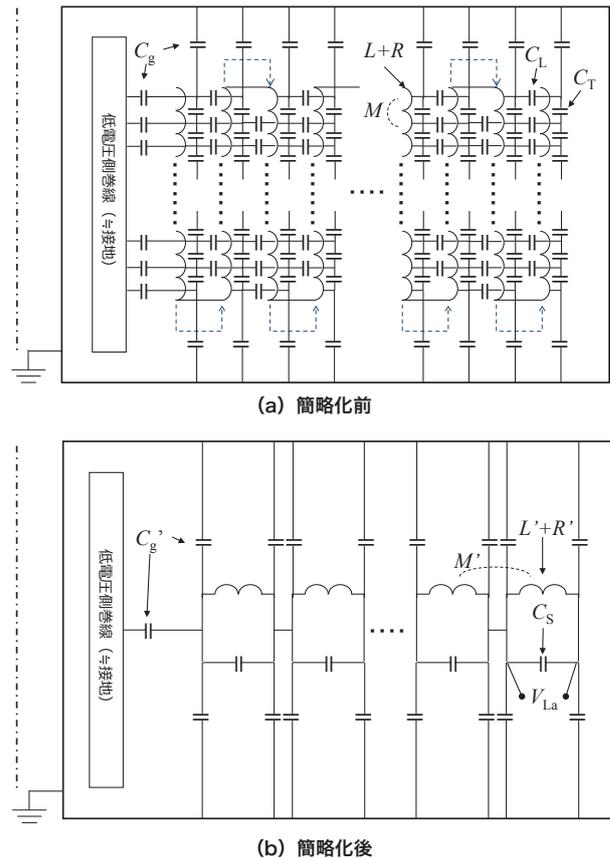


図2 等価回路イメージ

- (1) 巻線の有限要素解析モデルを作成する。その際，巻線を複数個に分割してモデル化する（以下，ここで作成した個々のモデル形状をボディとよぶ）。
- (2) 磁場解析を行い，各ボディ間の結合係数を求める。
- (3) 各ボディ間の位置と結合係数の関係について，近似式を求める。
- (4) 上記(3)で求めた近似式より，各ブロック間の結合係数を求める。

ここで，等価回路の1ブロックと有限要素解析の1ボディにおける層数は異なる。前述のとおり，等価回路の1ブロックは2層分を模擬するが，有限要素解析の1ボディは2層分以上を模擬する。これは計器用変圧器の層数が非常に多いため，有限要素解析上で2層分を1ボディで模擬すると多数の薄いボディが形成され，メッシュ数が過多になるためである。これを回避するため，上記のように結合係数の近似式を求める手順を行っている。

#### 3.3 静電容量

静電容量については，はじめに図2(a)に記載した1ターンごとの層間静電容量 $C_L$ ，ターン間静電容量 $C_T$ ，対地間静電容量 $C_g$ を，各種寸法および各種絶縁材料の誘電率より計算する。その後，蓄積エネルギー法<sup>(2)</sup>の考え方を適用し，図2(b)の $C_s$ を求める。蓄積エネルギー

ギー法とは、個々の静電容量に蓄積されるエネルギーの総和と等しくなるように、等価的な静電容量を求める方法であり、基本的な考え方は次式で表される。

$$\frac{1}{2}C_s V_{La}^2 = \sum \text{層間の静電エネルギー} + \sum \text{ターン間静電エネルギー} \dots\dots\dots(2)$$

簡略化後の対地間静電容量  $C_g'$  については、簡略化した分だけ各  $C_g$  を足し合わせた。

そのほか、巻線抵抗  $R'$  については、各層の巻線長に応じた抵抗値を使用した。厳密には、表皮効果の影響で高周波数になるほど抵抗値が増加する傾向にある。ただし、本解析で対象とした計器用変圧器は電線径が細く、表皮効果の影響は軽微と考え、一定の抵抗値とした。

以上のように求めた回路定数を用いて、ATP<sup>注2)</sup> で解析を実施し、その妥当性を評価した。

## 4 電位振動解析の妥当性評価

本解析の妥当性を確認するため、実測との比較検証を実施した。検証には、各部の層間電圧を測定できるように加工した特別高圧モールド計器用変圧器を供試器とした。供試器のインピーダンスおよび層間電圧の周波数特性を測定し、解析結果との比較を行った。なお、空心として回路定数を求めた解析との比較のため、供試器も空心状態で測定を行った。

### 4.1 インピーダンスの周波数特性

インピーダンスの周波数特性に関する解析結果および実測結果を図3に示す。実測と解析結果がよく一致していることから、回路全体のインダクタンス、各種静電容量、抵抗の値が妥当であることがわかる。

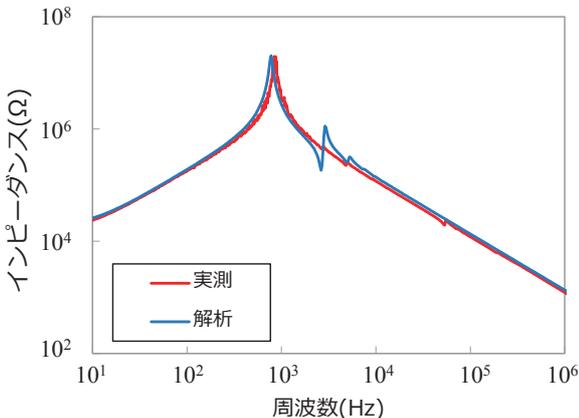
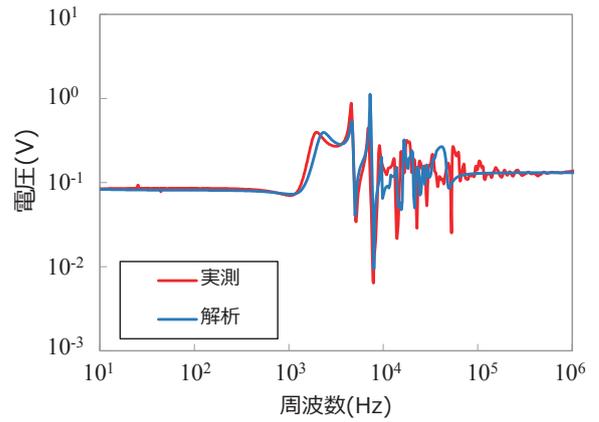


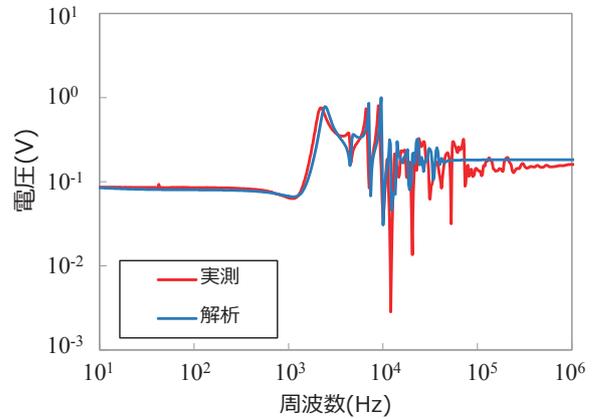
図3 インピーダンスの周波数特性

### 4.2 層間電圧の周波数特性

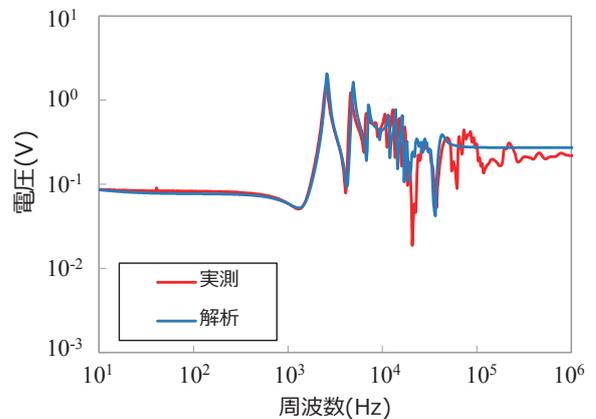
層間電圧の周波数特性に関する解析結果および実測結果を図4に示す。ここで示す電圧は、測定時に印加した電圧に対して層間に発生するものである。測定時は、定格よりも低電圧を印加しながら、周波数を変化させている。したがって、定量的な値ではなく、商用周波数における電圧に対する変化率が重要である。この変化率とサージの電圧値より、サージ侵入時の層間電圧を計算できる。また、層間電圧の周波数特性は測定箇所によって変化するため、図4には代表的な3箇所の層間電圧を



(a) 内周側



(b) 中央付近



(c) 外周側

図4 層間電圧の周波数特性

記載した。実測結果をみると、1 kHz 以下の領域においては、いずれも層間電圧は安定しているが、1 kHz 以上から層間電圧が大きく変動していることがわかる。解析結果も 1 kHz 以上から層間電圧が変動しており、実測と一致している。また、外周側のほうが層間電圧の最大値が高くなる傾向にあり、この傾向も実測と解析で一致している。一方で、実測では 100 kHz 以上の高周波数領域で若干の変動があるのに対して、解析ではその変動がない。この要因として、本解析では計器用変圧器を集中定数回路としてモデル化しているためと考えられる。前述のとおり、計器用変圧器巻線は巻数が多く、本検証で使用した供試器においても 1 層あたりの電線長は数十 m オーダーになる。サージの伝搬速度（ $\approx$ 光速）と電線長から考えると、100 kHz 付近から分布定数の考えが必要になると想定される。ただし、実測結果からわかるとおり、この層間電圧の変動は比較的小さく、最も層間電圧が高くなる周波数帯域の評価には、十分適用できるものと考えられる。

## 5 おわりに

電力システムのサージを完全に抑制することは難しく、また、ひとことにサージといっても、雷サージや開閉サージなどのさまざまな発生要因があり、その電圧や周波数もさまざまである。また、近年では再生可能エネルギーの導入拡大をはじめとして、電力系統も変化してきている。このようななかで、各種電力機器の耐サージ性能について、試験だけでなく、解析技術で評価できることの意義は大きく、電位振動が生じる周波数や巻線内の電圧分担を定量的に把握することができる。その結果、巻線絶縁設計の最適化および製品の信頼性向上につながる。

本稿では、巻数が非常に多い特別高圧クラスの計器用変圧器を対象とした電位振動解析技術について、等価回路および各種回路定数の計算概要、実測との比較結果について記載した。実測と比較した結果、インピーダンスおよび層間電圧の周波数特性がよく一致し、耐サージ性能の評価に有用であることがわかった。

今後は、本解析技術を活用し、計器用変圧器の信頼性向上および開発効率化につなげていきたい。

### ■参考文献

- (1) 渋谷義一, 和田耕太郎, 武藤浩隆:「計器用変圧器の高周波振動の解析」, 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.12 (2006)
- (2) 岡部光成, 石川雅之, 向當政典, 小林恒夫, 寺西常治, 才田敏之:「ガス絶縁シャントリアクトルの高周波サージ解析用電気モデル」, 電気学会論文誌 B, Vol.117, No.5 (1997)

### ■語句説明

- 注 1) 長岡係数: 有限長ソレノイドコイルのインダクタンスを求めるための係数
- 注 2) ATP: Alternative Transient Program の略称で、電気・電子回路の汎用解析ソフト

### 森 佑介

戦略技術研究所  
技術開発センター 解析・試験技術グループ 所属

### 滝澤 明広

戦略技術研究所  
技術開発センター 解析・試験技術グループ 所属