

# 系統サージ解析から変圧器絶縁評価までのコンビネーション解析

Combination Analysis System from Lightning Surge Analysis to Transformer Insulation Evaluation

高橋 誠<sup>※1</sup>  
Makoto Takahashi  
久須美 寿彦<sup>※1</sup>  
Toshihiko Kusumi  
佐藤 徹<sup>※2</sup>  
Toru Satoh  
小松 巖<sup>※3</sup>  
Iwao Komatsu

## 1 まえがき

従来の、変電機器の設計手法は、機器個別の最適化及び高信頼化が主眼とされていた。しかし近年では送変電システム全体の最適性を考えて設計した製品がユーザから求められている。この全体最適という考えはシステムコーディネーション<sup>(1)</sup>と呼ばれている。システムコーディネーションが必要とされる背景は、変電機器構成の変化などが挙げられる。

当社の主力製品である電力用変圧器についてのシステムコーディネーションを考えると、その絶縁・冷却・構造などが挙げられる。これらのうち絶縁は最重要の検討事項である。従来は規定の雷インパルス試験を実施すれば系統では問題はないと考えられていた。しかし変圧器に振動性のサージ波形が侵入した場合、たとえ電圧レベルが避雷器の制限電圧以下であっても、サージ波形の周波数と変圧器巻線の共振周波数が一致すると巻線に雷インパルス試験時よりも大きな電圧が発生する可能性がある。

米国では変圧器巻線の共振が原因と考えられる事故が報告されている<sup>(2), (3), (4)</sup>。また国内でも同様な報告がされている<sup>(5)</sup>。一方、変圧器とGIS(ガス絶縁母線や開閉器)との直結構造で変圧器の事故が多いことも報告されている<sup>(6)</sup>。この事故は1MHz以上の振動成分が多く含まれるサージ電圧、いわゆるVFTO(Very Fast Transient Overvoltage)が原因で発生するとされている。これらの事故の背景としては、前者については雷インパルス試験電圧の低減の適用が、後者については変電機器の構成の変化などが考えられている。

これらのことから雷インパルス試験による絶縁評価の他に、さらに信頼性を確認するため、変圧器を設置する系統で発生すると推定される雷サージ電圧波形を考慮した絶縁評価が必要である。

当社では、以上に述べた変圧器におけるシステムコーディネーションに対応するため、系統サージ解析-変圧器巻線の電位振動解析-絶縁評価を結合した解析システム(以下、コンビネーション解析システムという)を構築した<sup>(7)</sup>。

本稿では、本システム完成のポイントになった周波数伝達関数(以下、 $G(\omega)$ 法という)による変圧器巻線の電位振動解析手法を中心に、コンビネーション解析システムの概要を紹介する。

## 2 コンビネーション解析の概要

### 2.1 コンビネーション解析とは

コンビネーション解析とは、系統サージ解析と任意波形による変圧器巻線の電位振動解析及び電界解析を用いた絶縁評価法を組合せて、一連の処理ができるシステムである。システムの構成は、汎用プログラムであるEMTP(Electro Magnetic Transients Program)及び電界解析プログラム(有限要素法など)と、当社が独自で開発した $G(\omega)$ 法による電位振動解析プログラムを結合したものである。図1にその解析フローを示す。

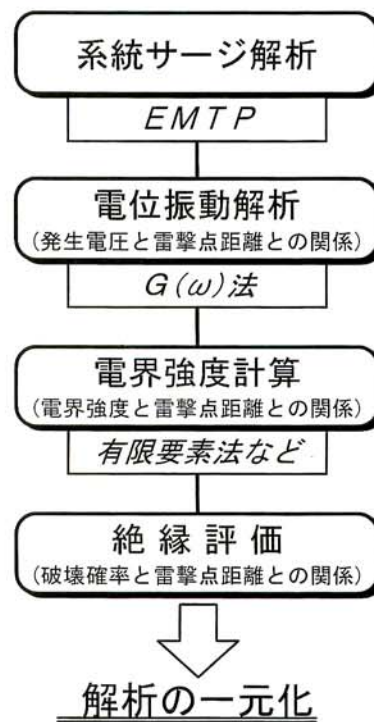


図1 コンビネーション解析のフロー  
Fig.1. Flow of combination analysis

### 2.2 解析の目的

変電機器は、系統に発生する雷サージに対して絶縁検証を行うために、雷インパルス耐電圧試験を実施する。この試験電圧に対して裕度をもたせて機器設計し、試験電圧に合格すれば実系統で運用しても問題はない。しかし振動性

※1 電力事業本部 変圧器事業部 技術部  
※2 電力事業本部 配電自動化開発室  
※3 技術開発本部 開発部

サージ電圧が変圧器に侵入した場合、変圧器巻線の共振周波数と印加波形の周波数とが一致すると、共振によって巻線内部に大きな電圧が発生する可能性がある。

このことから、雷インパルス耐電圧試験で用いる波形の他に、系統で発生する種々の雷サージ電圧波形に対して、変圧器巻線の絶縁評価を行うことが望まれている。

本解析システムの目的は、系統で発生する雷サージ波形を解析し、その波形を印加した場合の変圧器巻線の絶縁評価を行うことにある。

## 2.3 特長

本解析システムの特長を以下に示す。

- ① 任意波形を印加した場合の変圧器巻線の電位振動解析が高精度に行える。
- ② 系統サージ解析により得られた多数の波形を短時間で電位振動解析し、かつ絶縁評価することができる。
- ③ 電界強度の時間変化を求めているので、巻線内の最大電界強度を確実に計算できる。
- ④ 系統サージ波形の周波数分析を自動で行うことができる。
- ⑤ コンビネーション解析結果より、系統及び変圧器の相互から、共振現象などに対して種々の対策を実施することが可能である。

本解析システムはこれらの特長を持つため、系統全体をモデル化し雷撃点と雷撃電流などをパラメータとして、変圧器の絶縁評価との関係を求めることが可能である。

## 3 コンビネーション解析システム

### 3.1 解析システムのポイント

本コンビネーション解析システムは、

- ① 系統サージ解析 (EMTP)
- ② 変圧器巻線の電位振動解析 ( $G(\omega)$ 法)
- ③ 電界解析
- ④ 絶縁評価

から構成されている。

本解析システムにおける最大のポイントは、これまで計算が困難であった任意波形に対して、高精度に電位振動解析できる  $G(\omega)$ 法<sup>⑧, ⑨, ⑩</sup>を当社独自で開発したことにある。この解析手法の有効性については後に詳しく説明する。

系統サージ解析と電界解析は汎用プログラムを利用している。このため本解析システム構築のため工夫した点をそれぞれ述べる。

### 3.2 系統サージ解析

コンビネーション解析は、系統サージ解析から始まる。本来、系統サージ解析は雷サージ・開閉サージなど広い内

容をもつ。しかし本稿では雷サージ波形を求めるための系統過渡現象の解析を系統サージ解析ということにする。

系統サージ解析を行う手順の概略を以下に示す。

- ① 送電系統を構成する、送電線・鉄塔などをその幾何学形状から回路定数にモデル化する。
- ② モデル化した定数を組み合わせて、送電系統全体をモデル化する。
- ③ 雷撃点を鉄塔に選んで、雷撃をランプ波及び指数関数波などの電流波形でモデル化する。
- ④ これらの条件を入力してEMTPで計算を行い、系統各部の電圧・電流波形を求める。

周知のように、EMTPは世界的に最も広く使用されている汎用回路解析プログラムである。回路解析において、分布定数線路はDommel法で、集中定数は台形近似法で計算を行う<sup>⑪</sup>。

EMTPで雷サージ解析した結果と測定結果は、比較的良好に一致していることが報告されている<sup>⑫</sup>。これは上記に示したモデル化を適切に行えば実測値と良く一致する解析結果が得られることを示している。現在でも種々のモデル化に関して高度な研究が行われている。

コンビネーション解析の目的の1つは、雷撃点(鉄塔)と変圧器までの距離と絶縁評価の関係を求めることである。

このような場合、通常の方法では解析者が1鉄塔ごとに雷撃条件を入力して解析するため、非常に労力がかかった。これを解決するために、一度解析条件を設定すると自動で全鉄塔について雷サージ解析を行い、それぞれの解析結果波形を保存できるようにした。

この解析・保存された多数の雷サージ電圧波形を変圧器巻線の電位振動解析プログラムに渡して  $G(\omega)$ 法による計算を行う。

### 3.3 変圧器巻線電位振動解析の現状とその問題点

#### (1) 従来の解析方法と現在の問題点

初期段階での変圧器巻線の電位振動解析は、進行波理論及び定在波理論を用いて行われていた。しかし、これらの解析方法では巻線構造が複雑になると理論解析が困難になるので、縮小モデルを製作して実験的に電位を求める必要があった。

その後、計算機の進歩により、巻線の空心のインダクタンスと巻線の直列静電容量及び巻線対タンクなどの並列静電容量を組み合わせた等価回路を用いて変圧器をモデル化し、次に印加電圧条件を与えて連立微分方程式を解いて各部の電圧を求める解析手法が一般的になった。

通常、上記の解析手法では、変圧器を単純な空心モデルとしている(鉄心を見捨てる場合が多い)。また、印加電圧波形も標準インパルス波形など数式化が容易な波形に限られている。また、本来考慮しなければならないインダクタンスや抵抗の周波数依存性は微分方程式に取り込むことが

できない。

さらに、変圧器の等価回路モデルの妥当性の直接的確認方法がなく、単に、特定の波形を入れて、その計算結果と実験結果を比較するという間接的確認しかできない。等価回路の定数関係も実験結果をもとに補正するという作業が一般的に行われるため、ある波形(例えば標準波)で定数を追い込み、計算と実験が一致するように回路モデルを作成しても、入力波形(印加波形)が変わると、計算結果と実験結果が全く異なったりする場合が多々あるなどの問題点が挙っている。

これらの、根本原因は、等価回路モデルを直接測定できないためである。したがって、ブラックボックスである変圧器へのある特定波形の入力/出力結果から等価回路の妥当性を間接的に判断せざるを得ないというのが現状である。

そこで、著者らは、変圧器のサージに関する特性を直接測定する(等価回路モデルを直接測定)とはどのようなことかを検討し、新しい解析手法として $G(\omega)$ 法を見いだした。

### 3.4 $G(\omega)$ による解析手法

#### (1) 時間領域解析と周波数領域解析

変圧器巻線内の電位振動解析手法は、微分方程式を解く

時間領域での手法と、フーリエ変換を用いた周波数領域での解析手法とに分けられる。

著者らはいち早く周波数領域での解析手法に着手し<sup>(8),(9),(10)</sup>、現在ではコンビネーション解析システムの構築をはじめ、電位振動解析に有効に活用している。周波数領域での解析手法は最近になって注目され、研究されるようになってきた<sup>(11)-(13)</sup>。

変圧器巻線の電位振動解析手法は図2の(a)(b)(c)に示すように分類・整理できる。以下これらについて説明する。

#### (a)微分方程式解析

従来手法では、時間に関する微分方程式を解くことにより、巻線各部の電圧波形を求める。図2に示すように、この方法では入力電圧波形を数式化し、変圧器の等価回路を数式化したものと合せて一体の微分方程式として解いている。このため、入力波形は数式化できる波形にしか適用できず、いい換えれば微分方程式が解ける入力波形しか解析ができない。

また、式が一本であるので変圧器自身の特性と入力波形との分離が明確にできないため、正確なモデル化が困難である。

#### (b)ラプラス変換解析

変圧器を線形システムと考え、入力条件に依存しないシステムそのものの特性(本質特性)である伝達関数( $G(s)$ )

#### 《解析フロー》

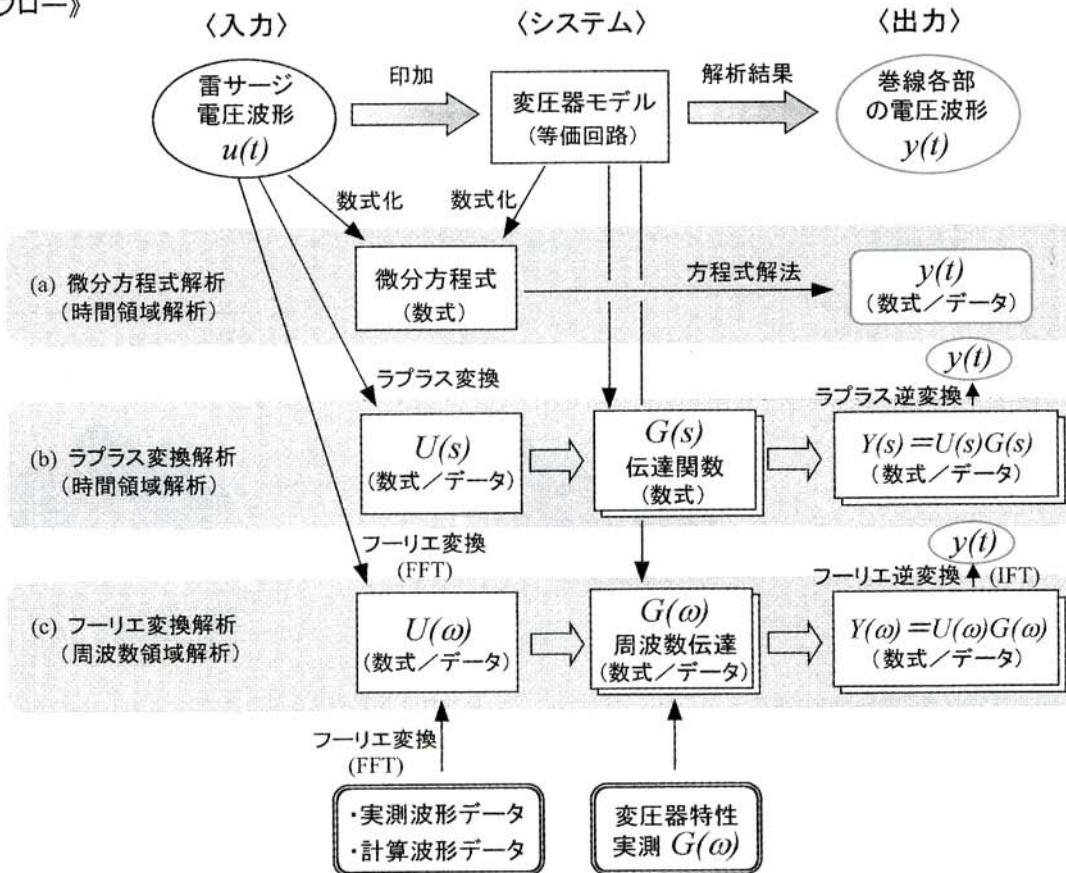


図2 変圧器の電位振動解析手法

Fig.2. Analytical method of transformer voltage oscillation

が変圧器のサージ特性を直接表わすと考えた解析法である。伝達関数は入力波形に依存しないため、(a)のように印加電圧の波形制限がない(任意波形応答が計算できる)。また、(a)で微分方程式が立てられれば、伝達関数は導出できる。

この方式は、(a)より一歩進んで、入力電圧と変圧器を分離した解析であり、しかも入力電圧は数式でも数値データのどちらでも解析可能である。

しかし、伝達関数  $G(s)$  は数式であって、数値データではないので、変圧器を測定して直接  $G(s)$  を求めることはできない。もちろん、変圧器定数に周波数依存性をもたせることもできない。

しかし、一部では、この方法に着目し、数値ラプラス変換やインパルス応答による  $G(s)$  の推定等の解析が行われているが<sup>15, 16, 17</sup>、 $G(\omega)$  法の方が、すべての面で優れていると考えられる。

### (c) フーリエ変換解析

数学的には(b)の伝達関数  $G(s)$  の変数であるラプラス演算子  $s$  を複素角周波数  $j\omega$  に置き換えたものである。

この  $j\omega$  を変数にした伝達関数を周波数伝達関数  $G(j\omega)$  又は  $G(\omega)$  として、 $G(s)$  と区別して使用する。

これにより、変圧器の特性が周波数領域で解析できることになる。一見簡単な  $s$  から  $j\omega$  への置き換えであるが、変圧器の電位振動解析方法が一変してしまう。

$G(\omega)$  は一般的にいうところの周波数特性に他ならない。このことは、変圧器のサージに関する特性(これにより、すべての電位振動特性が決まる)が直接測定できることになる。すなわち(a)の微分方程式や(b)の伝達関数が測定できるということに相当し、今まで間接的にしか把握できなかった変圧器の特性を直接見る(例、図4)ことができる。

また、すべての解析が数式と数値データのどちらでも行えることになり、電圧波形データ、 $G(\omega)$  データ共に計算

値、実測値の相互利用ができることになり、解析可能な範囲が飛躍的に広がる。

このため、 $G(\omega)$  によって変圧器のサージ解析、電位振動解析方法を画期的に進展させることができた。

### (2) 解析手法の概要

$G(\omega)$  によるサージ解析手法の概要を図3に示す。ここで用いる  $G(\omega)$  は印加電圧のフーリエ変換と、変圧器巻線内のある点の誘起電圧のフーリエ変換との比であるが、これらは、いわゆる周波数特性又は定常交流分圧比と同じものであり、測定や計算は容易である。取扱う  $G(\omega)$  のデータは複素数値データである。

本手法の優れている点は、( $G(\omega)$ ) そのものが変圧器固有の性質を表しており、かつその特性が目で見えるということにある。微分方程式や伝達関数( $G(s)$ ) は数式であるため特性は目で見えず、数式の形と定数値で、その特性を一目で想定することはできない。 $G(\omega)$  は印加サージ波形に依存しないため、従来のような応答波形による変圧器モデルの評価よりも、より明確な評価が行える。さらにモデルコイルの回路要素に周波数依存性を容易に導入できるので、より実際に近いモデルが得られる。また図3に示すように、変圧器内部の  $G(\omega)$  を3次元的に見ることにより、全体的な電位振動特性が明瞭に把握できる。これらの正確な  $G(\omega)$  を求めておけば、任意のサージ応答波形はフーリエ変換法により正確に計算できる。

### (3) 実測

変圧器巻線の  $G(\omega)$  を実測することにより、電位振動の様相が明瞭になる。例えば図4に示すように多点の  $G(\omega)$  を測定することにより、部分共振の位置やその大きさ、周波数が判明する。 $G(\omega)$  は印加波形に左右されない特性な

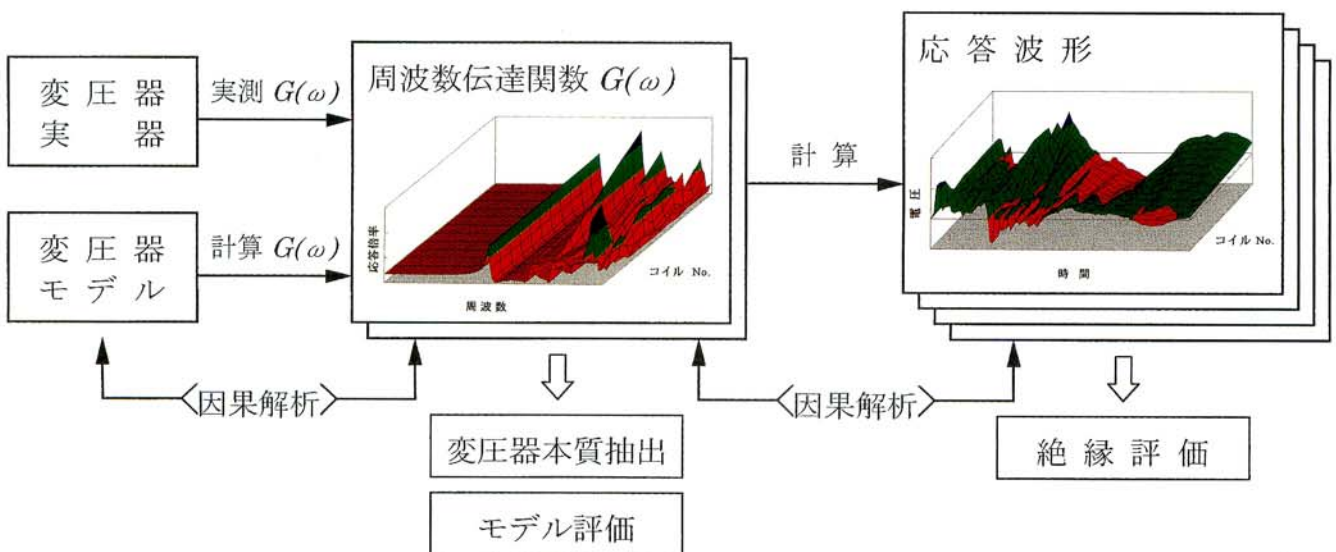


図3 変圧器の電位振動解析手法

Fig.3. Analytical method of transformer voltage oscillation

ので、発生する諸現象の原因の理解やその対策が容易になる。

$G(\omega)$ の測定方法にはFFTアナライザを用いる方法と単一周波数をスイープして測定する方法の2種類がある。前者の方法については多数の報告があり、最も一般的に用いられているようである。しかしこの方法は一定電圧のホワイトノイズで全周波数領域を測定するため、利得の低い高周波域では誤差が増大し、またノイズ弁別も困難なため、精度上に問題がある。

このため、筆者らは後者の方法で、利得に応じて測定電圧を変え、また測定周波数以外のノイズは除去することにより、精度の高い測定を行っている。

#### (4) 任意波形応答計算

$G(\omega)$ を用いた任意波形応答計算手法を図5に示す。入力任意波形  $u(t)$  と変圧器内部のある点の  $G(\omega)$  から、その点の電位応答出力  $y(t)$  がフーリエ変換よりで高精度で計算できる。

実測  $G(\omega)$  を用いた場合は、実際にその波形を印加して得られる波形とはほぼ完全に一致した計算結果が得られる。図6には、標準雷インパルス波形に対する応答波形の実測と計算の結果を比較して示す。両者はよく一致している。また、図7に示すように、系統サージ解析の結果得られた複雑な入力波形に対しても、実測波形と計算波形はよく一致している。

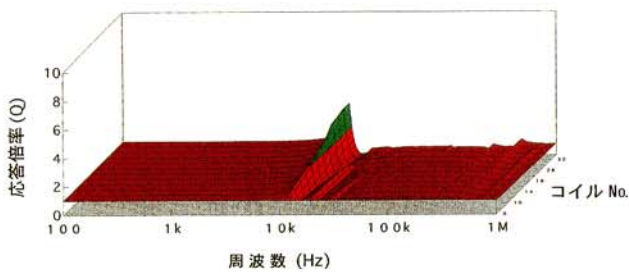


図4 実測  $G(\omega)$   
Fig.4. Measured value of  $G(\omega)$

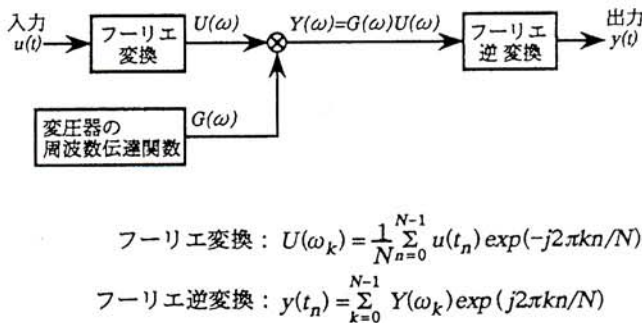


図5 任意波形応答計算  
Fig.5. Calculation of arbitrary waveform response

これにより  $G(\omega)$  を一度測定しておけば、標準雷インパルス波及びさい断波インパルス波など各種サージ波形に対する応答波形の観測・実験が不要となり、解析実験の省力化に大いに寄与する。

$G(\omega)$ 法は単純な原理でありながら、これまでほとんど研究されていなかったが、その有効性は上記より理解できる。

この  $G(\omega)$ 法の完成があつて、コンビネーション解析システムが構築されたのはいうまでもない。

#### (5) 計算 $G(\omega)$ —厳密モデル

コンビネーション解析には、実測  $G(\omega)$ があれば十分である。一方、変圧器の新製品開発及び改良においては、等価回路から  $G(\omega)$ を計算して求められるとよい。

等価回路から平衡方程式を導出する方法は従来と同じで

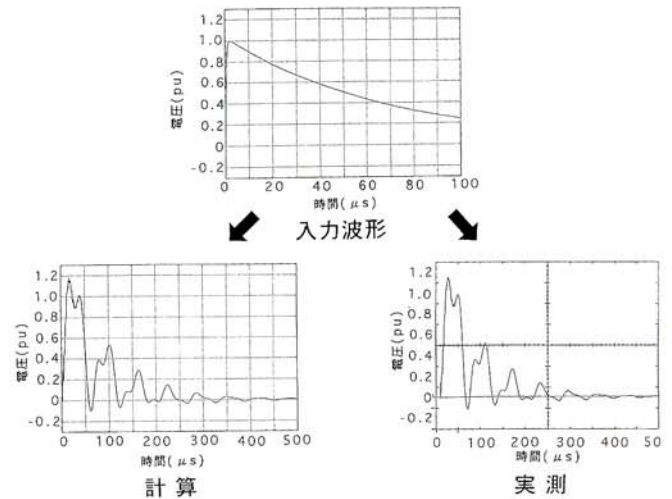


図6 標準波形(1.2/50 $\mu$ s)に対する応答  
Fig.6. Response for full waveform

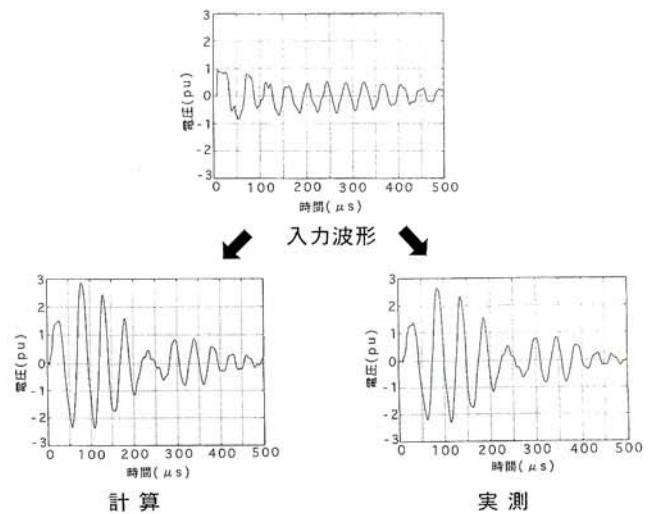
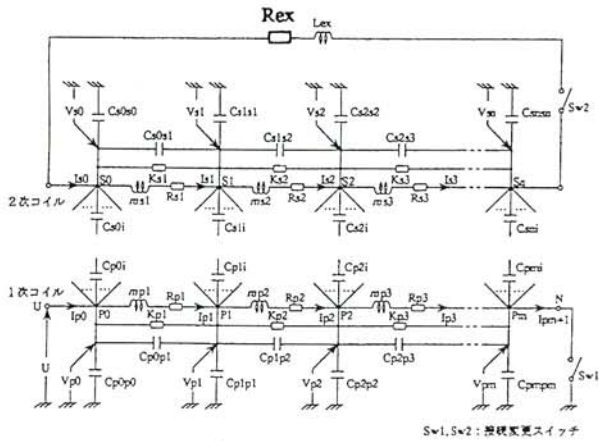


図7 雷サージ波形計算結果に対する応答  
Fig.7. Response for computed result of lightning surge waveform

あるが、そこから  $G(\omega)$  を求めるのは単なる代数計算である。これは、微分方程式の数値近似解法とは異なり、定常解析解であるので取扱いが容易である。

図8に示す変圧器モデルに対する節点方程式は(1)~(3)式で与えられる。このうち(3)式の係数行列は、接続条件によって変更される。これらの方程式から電圧・電流を求めたものが(4)式で、これで求められた各節点電圧と入力電圧の



$$E v(\omega) = e_0 U(\omega) + \{j\omega M(\omega) + R(\omega)\} i(\omega) \dots (1)$$

$$I i(\omega) = -\{j\omega C(\omega) + K(\omega)\} v(\omega) \dots (2)$$

$$B_1 v(\omega) = \{j\omega A_1 + B_2\} i(\omega) \dots (3)$$

$$\therefore \begin{bmatrix} v(\omega) \\ i(\omega) \end{bmatrix} = \left( j\omega \begin{bmatrix} 0 & M(\omega) \\ C(\omega) & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -E & R(\omega) \\ K(\omega) & I \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} -e_0 \\ 0 \end{bmatrix} U(\omega) \dots (4)$$

$$\therefore g(\omega) = v(\omega) / U(\omega) = \left( j\omega \begin{bmatrix} 0 & M(\omega) \\ C(\omega) & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -E & R(\omega) \\ K(\omega) & I \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} -e_0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots (5)$$

- $g(\omega)$  : 周波数伝達関数ベクトル
- $v(\omega)$  : 電圧ベクトル,  $i(\omega)$  : 電流ベクトル
- $M(\omega)$  : インダクタンス行列,  $C(\omega)$  : キャパシタンス行列
- $R(\omega)$  : レジスタンス行列,  $K(\omega)$  : コンダクタンス行列
- $E$  : 電圧係数行列,  $I$  : 電流係数行列
- $e_0$  : 入力電圧係数ベクトル

中性点条件と負荷条件によって変わる行列  
 $A_1$  : 負荷インダクタンス行列  
 $B_1$  : 電圧係数行列,  $B_2$  : 負荷抵抗行列

図8 変圧器モデルと  $G(\omega)$  計算式  
 Fig.8. Transformer model and computing expression of  $G(\omega)$

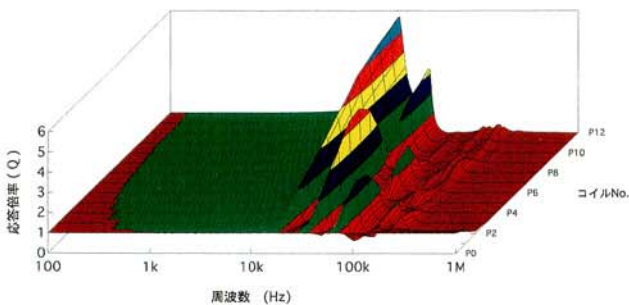


図9  $G(\omega)$  計算結果  
 Fig.9. Computed value of  $G(\omega)$

比を求めることにより(5)式の伝達関数ベクトル  $g(\omega)$  が求められる。

実際に変圧器の  $G(\omega)$  を計算した例を図9に示す。本例では、1次側巻線を11分割、2次側巻線を8分割としたモデルにしている。

空心コイルのインダクタンス理論値を(5)式のインダクタンス  $M$  に適用した場合、 $G(\omega)$  が実測と合致せず、鉄心を考慮する必要があることが、筆者らの実験で判明している。周波数依存性についても、現時点では理論的に求めることが困難なため、多くの実測例から求めた周波数特性の実験式を  $M(\omega)$ ,  $R(\omega)$ ,  $K(\omega)$  に適用した。なお、キャパシタンス  $C$  は周波数依存性が小さいことから、周波数非依存の定数としている。

この計算  $G(\omega)$  を用いて、標準波 (1.2/50  $\mu$ s) を印加し

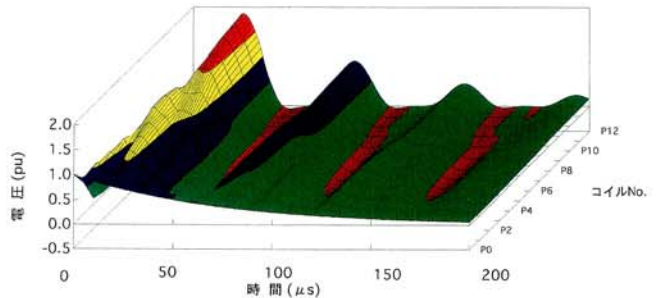


図10 標準波 (1.2/50  $\mu$ s) 印加時の応答波形計算結果  
 Fig.10. Computed result of response waveform with full waveform impression

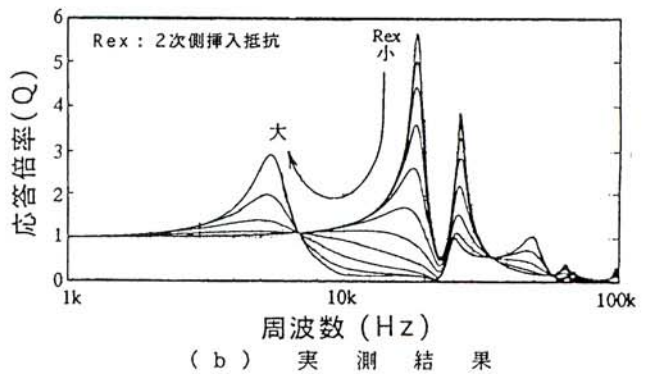
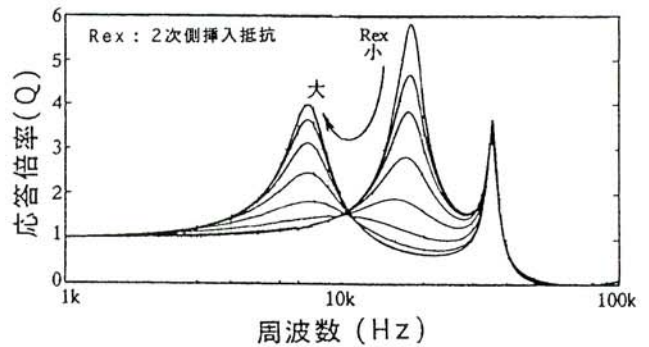


図11  $R_{ex}$  を変化した時の中性点  $G(\omega)$  の比較  
 Fig.11. Comparison of neutral  $G(\omega)$  with variation of  $R_{ex}$

た時の各部電圧波形を計算した結果が図10である。

このモデル計算の妥当性を確認するために、変圧器の2次側に抵抗(Rex)を挿入し、それを変化させた時の中性点G(ω)の変化を調べる検証実験も行っている。図11にその結果を示すが、傾向としては、計算と実験は概ね合致している。このように条件変更を行っても、その変更を的確に反映するモデルが、変圧器の本質を表現するモデルといえる。

### (6) 計算G(ω)-近似モデル

日常の設計業務で手軽に利用するために、等価回路の厳密性は欠くものの、設計者が汎用的に使用できる近似モデルでの電位振動解析プログラムも開発している<sup>9)</sup>。このプログラムは巻線寸法諸元を入力すれば変圧器巻線各部の周波数特性(G(ω))の計算や標準波はもちろん、系統雷サージ解析波形に対する変圧器巻線の電位振動解析が汎用的に行えるようになっている。

この解析方法は、従来の微分方程式による解析を現代的なシステム行列の状態方程式による解析に発展させたものである。

変圧器巻線の等価回路から得られる回路方程式は(6)式で与えられる。この回路方程式は(7)式の状態方程式に変換することができる。これにより、汎用的な計算ソフトウェアの利用が可能となり、各種の解析計算を行うことができる。

$$C\ddot{V}(t) + G\dot{V}(t) + MV(t) = -Gm\ddot{u}(t) - Gm\dot{u}(t) - Mmu(t) \dots\dots\dots(6)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

このように数式が与えられれば、当然各巻線ノードのG(ω)計算できる。同様に任意波形入力に対する各巻線ノードの応答も、もちろん計算できる。

巻線定数には周波数依存性があるが、計算G(ω)-厳密モデルではこれを導入できることを前項に示した。一方、状態方程式を用いた計算G(ω)-近似モデルではこれを導

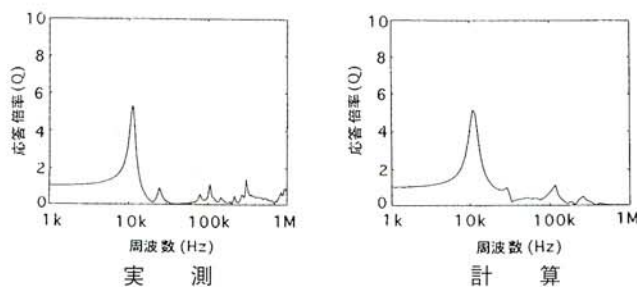


図12 周波数特性  
Fig.12. Frequency characteristic

入することは困難である。このため、インダクタンス、キャパシタンスは周波数依存性が小さいため周波数特性は無視し、巻線抵抗は周波数依存性が大きいので、各種試験で蓄積したデータに基づく周波数依存性近似式により決定して、周波数非依存の定数で回路計算をしている。

図12に高圧巻線中性点付近におけるG(ω)の実測と計算とを示す。両者は比較的良好に一致している。

同様に系統サージ解析より求めた振動波印加時の計算結果を図13に示す。波形は高圧巻線電圧印加端部のセクション間分担電圧である。実測と計算はよく一致している。

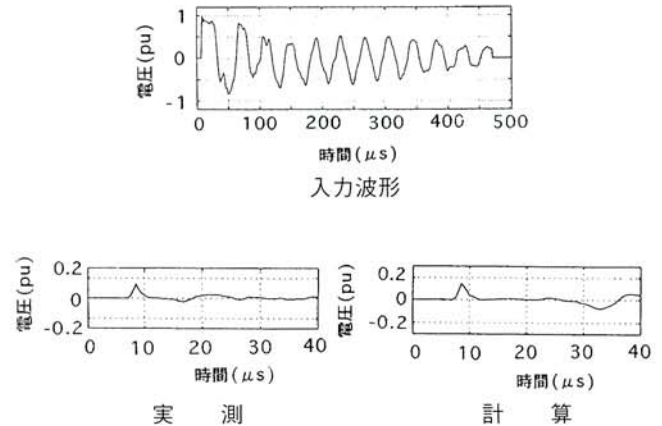


図13 実測と計算の比較  
Fig.13. Comparison with measured and computed value

## 3.5 絶縁評価

### (1) 概要

これまで計算が困難であった任意波形入力に対する応答が、実測G(ω)の適用で可能となった。この高精度に計算された応答波形で巻線各部の絶縁評価ができればコンビネーション解析の目的が達成できる。

油入変圧器の絶縁は、一般的には交流及びインパルス試験電圧の両者に対して考慮する必要がある。しかし、耐電圧試験回路の違いや雷インパルス耐電圧試験時の巻線内分担電圧の非線形特性などのため、絶縁各部(主絶縁・巻線端部絶縁・巻線内部絶縁など)で、交流耐電圧試験に対して厳しい部分、あるいはインパルス耐電圧試験に対して厳しい部分とがある。

絶縁構成中の巻線内部絶縁は、一般的にインパルスに対して絶縁強度設計している。これは交流は均一な電圧分担であるのに対して、インパルスは巻線の電位振動により、電圧分担が不均一となるためである。このため、本コンビネーション解析ではインパルスに対する巻線内絶縁について検討している。

### (2) 巻線内絶縁と電界計算手法の工夫

一般的には、変圧器巻線内絶縁は図14に示すようにターン間・セクション間油道・巻線エッジ部をそれぞれ評価さ

れている。

ターン間及びセクション間油道はそれぞれの分担電圧値がわかれば、電界解析するまでもなく電界強度が計算でき、破壊実験結果から得られた実験式と比較して絶縁評価することが可能となる。

一方、巻線エッジ部は電界解析による数値計算によらなければ電界強度を求めることは困難である。コンビネーション解析システムの中に電界解析プログラムを組み込み、任意絶縁形状に対して電界解析できれば理想的である。しかし現在のところでは、それは困難である。

そこで、これらの問題点を解決するため、簡易的な電界計算式を用いた方法を考案したので、その内容を以下に述べる。

周知のように電界強度は、幾何学形状と各電位が決めれば一義的にその値が決定される。この条件から、電界解析技術を利用してエッジ部電界強度が簡単に計算できるようにし、解析効率の改善を行った。

エッジ部は図15に示すように、主絶縁距離、セクション間距離、巻線被覆厚さ、電線の曲率半径をパラメータとして計算が行われる。

これらのパラメータは、通常、使用する範囲が限定されている。このため標準的なエッジ部に対してあらかじめ電界解析しておき、任意の主絶縁間分担電圧及びセクション間分担電圧に対してエッジ部電界強度が計算できるようにすればよい。

種々の条件を変えた電界計算結果からエッジ部の電界強度( $\dot{E}e$ )は(8)式で与えられる。

$$\dot{E}e = \dot{E}m + \dot{E}s \dots\dots\dots (8)$$

$\dot{E}m$  : 主絶縁方向の電界強度(kV/mm)  
 $\dot{E}s$  : セクション間方向の電界強度(kV/mm)

この電界計算式をコンビネーション解析システム中の電界強度計算サブルーチンの中に取り入れ、任意の応答波形に対応した電界強度を効率よく計算できるようにした。

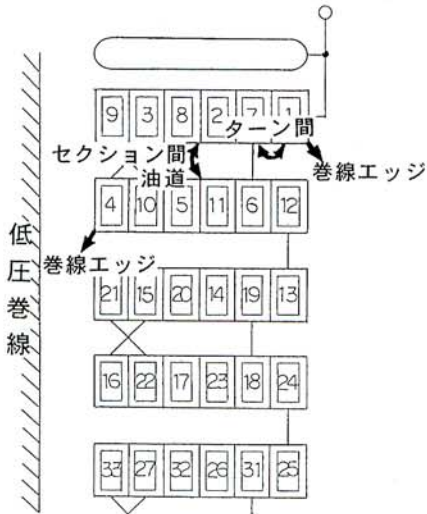


図14 変圧器巻線内絶縁  
 Fig.14. Insulation system in transformer winding

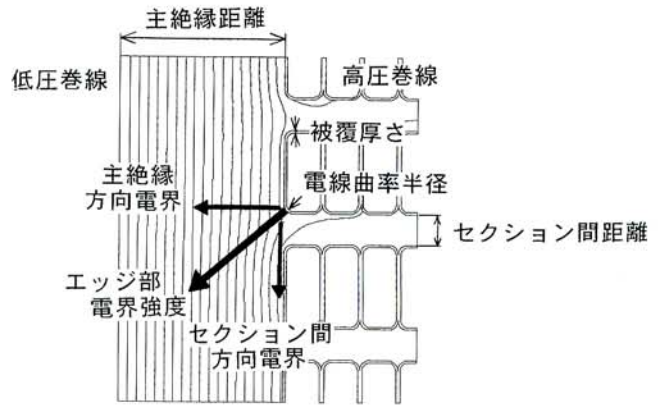


図15 巻線エッジ部電界解析  
 Fig.15. Electric field analysis of winding edges

### (3) 電界強度の時間変化

ターン間及びセクション間油道はもちろん、巻線エッジ部は電界解析技術を用いて求めた前述の電界計算式((8)式)を用いれば、容易に電界強度の時間変化を計算することができる。

電界強度の時間変化を計算する理由は、ターン間及びセクション間油道はそれぞれの分担電圧が最大のときに最大の電界強度になるのに対して、巻線エッジ部は必ずしもそうならないためである。このことは、セクション間分担電圧が最大になる時刻の電位、又は対地電位が最大になる時刻の電位が必ずしもエッジ部の電界強度が最大になる条件ではないことを示している。このため電界強度の時間変化を計算することによって巻線エッジ部の電界強度最大値(絶対値)が確実に計算できるようにした。

有限要素法などを用いて電界強度の時間変化を計算しようとすると現時点では多大な労力、時間が必要である。このため前項で示した電界計算式を用いて電界強度の時間変化を計算する。

電界強度の時間変化計算結果から電界強度(絶対値)及び電圧-時間特性( $V-t$ 特性)を求め、モデル実験結果から求めた平均破壊電界強度、 $V-t$ 特性、バラツキなどを考慮し、統計処理(ワイブル破壊確率など)を行い破壊確率を計算して絶縁評価することができる。

## 4 コンビネーション解析による耐雷設計例

### (1) 解析例

架空線路の送電系統でコンビネーション解析を行った例を図16に示す。解析を行う系統の模式図を図16(a)に示す。系統雷サージ解析の内容は系統中にある鉄塔すべて(全71鉄塔)に標準的なモデルでの雷撃を行い、系統に設置されている変圧器①に侵入する雷サージ電圧波形をEMTPで求めている。この場合、変圧器①に侵入する雷サージ電圧

波形は71種類になる。

また変圧器絶縁評価に直接関係しないが、変圧器①に侵入する雷サージ波形の周波数特性を知りたい場合も考えられる。このため多数の系統雷サージ解析波形を自動で周波数分析し、周波数特性と雷撃点までの距離の関係を計算できるようにしている。分析結果例を図16(b)に示す。

この雷サージ波形を変圧器①に入力して電位振動解析を行う。これには変圧器実測  $G(\omega)$  を用いる。この解析例では絶縁評価すべきセクション間分担電圧波形を計算し、次にその分担電圧ピーク値と、変圧器①から雷撃点までの距離との関係を示している。図16(c)からその最大値は4 km 付近であることがわかる。

図16(b)は実測  $G(\omega)$  を用いて計算した応答波形から電界強度の時間変化を求め、その最大値(絶対値)と距離との関係を解析したものである。

最後に電界強度を計算した結果からワイブル破壊確率と距離との関係を計算(図16(e))して、一連の計算が終了する。この解析結果例では、4 km 付近の雷撃点での破壊確率が高くなっていることがわかる。

この一連の計算により、系統条件・変電設備を考慮した変圧器巻線の詳細な絶縁設計及び絶縁評価が可能となった。

## (2) 評価と対策

当社では、まれに発生すると考えられる共振現象に対し、製作コストを考慮した上で巻線構造や絶縁構成を工夫し対策している。それでも、高い破壊確率を示す結果が得られた場合は、その対策を実施しなければならない。その対策を以下に示す。

- ①巻線構造を変更して、巻線における共振応答倍率の低減を図った設計を行う。
- ②絶縁の耐電圧値が高くなるよう、絶縁構成を工夫する。
- ③VFTO に対してはGISを適切に配置するなどして、変圧器巻線の共振周波数と一致するようなサージ波形が発生しないことを事前に確認する。

## 5 あとがき

送変電システム全体の最適性すなわちシステムコーディネーションの必要性を背景に、系統サージ解析から変圧器絶縁評価までの全体を解析するコンビネーション解析システムを構築した。これにより系統条件及び変電所設備を考慮した変圧器絶縁設計が可能になった。

コンビネーション解析システムの最も重要な要素技術で

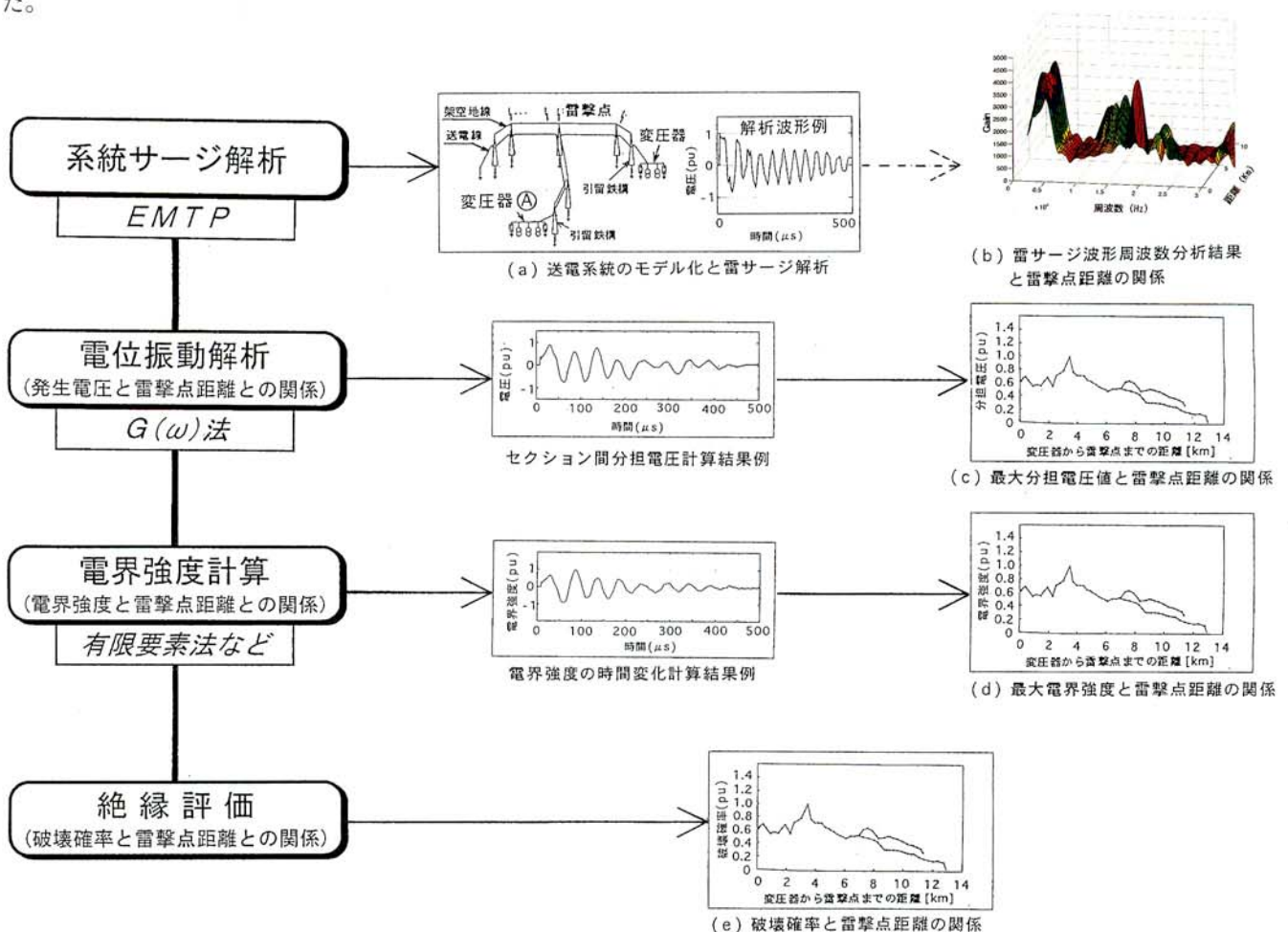


図16 コンビネーション解析の例  
Fig.16. Example of combination analysis

ある新しい電位振動解析手法  $G(\omega)$  法を説明しその有効性を示した。

今後、このコンビネーション解析より精度向上を図るため、下記の課題がある。

(1) 系統サージ解析では変圧器のサージ侵入キャパシタンスは単一に集中キャパシタンス定数で模擬している。しかし単純なモデル化では精度の高い系統サージ解析結果が得られないという報告もあるので、インダクタンスや抵抗を付加した回路での検討が必要である。

(2)  $G(\omega)$  法については、計算  $G(\omega)$  では周波数依存特性の理論的定数算定法の確立<sup>20, 21</sup>、実測  $G(\omega)$  ではリード線の影響が大きい VFTO 領域での測定精度向上が今後の課題として考えられる<sup>22</sup>。

以上のように、今後解決及び解明すべき課題が多く残されている。これらの問題究明を通して本コンビネーション解析手法をさらに発展させたいと考えている。

最後に、本解析システムを完成するにあたり、ご協力いただいた関係各位の方々に対して深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) 電気協同研究会：「電力系統・設備のシミュレーション技術」第51巻 第4号 (1996.3)
- (2) H.B.Margolis, et al : "Experience with Part-Winding Resonance in EHV Auto-Transformers ; Diagnosis Corrective Measures" IEEE Trans.vol.PAS-94, No.4 (1975) p.1294-1300
- (3) A.J.McElroy : "On the Significance of Recent EHV Transformer Failures involving Winding Resonance" IEEE Trans.vol.PAS-94, No.4 (1975) p.1301-1316
- (4) R.J.Musil, et al : "Voltage Stresses Produced by Aperiodic and Oscillating System Overvoltages in Transformer Windings" IEEE Trans.vol.PAS-100, No.1 (1981) p.431-441
- (5) 伊藤：「主変圧器の内部電位振動現象」火力原子力発電 Vol.47, No.6 (1996) p.53-56
- (6) CIRGE WG 33/13-09 : "Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations" CIRGE Report (1988) 33-13
- (7) 高橋, 佐藤, 神谷：「系統雷撃から変圧器絶縁評価までのコンビネーション解析」平成9年度電気関係学会東海支部連合大会 (1997.9) 156
- (8) 佐藤, 神部, 高橋：「周波数伝達関数による変圧器のサージ解析手法」平成4年度電気関係学会東海支部連合大会 (1992.10) 140
- (9) 佐藤, 神部, 高橋, 神谷：「周波数伝達関数を用いた変圧器の電位振動解析法」平成5年度電気関係学会全国大会 (1993.3) 945
- (10) 佐藤, 神部, 高橋, 神谷：「変圧器モデルの周波数伝達関数に基づいたサージ解析法」平成6年度電気関係学会全国大会 (1994.3) 1372
- (11) 関根, 雨谷：「分布定数回路論」(1991) コロナ社
- (12) 植田：「変電所侵入雷サージからみた送電用避雷装置の効果の検討」電学論B, Vol.117-B (1997.10) p.1389-1396
- (13) V.Woivre, et al : "Transient overvoltage study and model for shell-type power transformers" IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.8, No.1 (1993.1) p.212-220
- (14) Ryszard Malewski, et al : "Experimental Validation of A Computer Simulating An Impulse Voltage Distribution in HV Transformer Windings" IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.9, No.4 (1994.10) p.1789-1798
- (15) 加藤：「伝達応答法による変圧器の過渡電圧波形算定」電学論B, Vol.114-B (1994.3) p.299-304
- (16) 西村：「電力用変圧器の高周波特性の計算法」平成8年度電気関係学会全国大会 (1996.3) 1128
- (17) 堀口他：「急峻波サージ侵入時の変圧器コイルターン間過渡電圧の解析」電気学会研究会資料, DEI-97-137 (1997.11) p.227-232
- (18) 加藤：「変圧器の伝達応答法による変圧器の過渡電圧波形の算定法」平成5年度電気関係学会全国大会 (1993.3) 1393
- (19) 加藤：「変圧器の伝達関数計算プログラムの評価用解析的テストデータ- 裁断波の場合 -」平成8年度電気関係学会全国大会 (1996.3) 1670
- (20) 高橋, 藤井, 久須美：「状態方程式を用いた電位振動解析」平成9年度電気関係学会東海支部連合大会 (1996.9) 157
- (21) 高橋, 佐藤, 小松：「変圧器巻線定数の周波数依存特性」愛知電機株技報 No.16 (1995)
- (22) 岡部他：「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」電学論B, Vol.117-B (1997.5) p.700-705
- (23) 西村：「電力用変圧器の高周波領域での特性計算法」平成9年度電気関係学会全国大会 (1997.3) 1251

## 筆者紹介



### 高橋 誠

電力事業本部  
変圧器事業部 技術部  
電力用変圧器の研究開発に従事



久須美 寿彦  
電力事業本部  
変圧器事業部 技術部 課長  
電力用変圧器の設計に従事



佐藤 徹  
電力事業本部  
配電自動化開発室 次長  
配電機器の研究開発に従事



小松 巖  
技術開発本部  
開発部 次長  
電力機器の基礎技術の研究開発に従事