油入変圧器の高周波モデルと雷サージ解析

正員 岡部 成光 (東京電力) 正員 向當 政典 (東京電力)
正員 寺西 常治 (東芝) 非会員 竹多 昭治 (東芝) 正員 才田 敏之 (東芝)

High Frequency Model of Oil-immersed Transformer and Lightning Surge Analysis
Shigemitsu Okabe, Member, Masanori Koutou, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.)
Tsuneharu Teranishi, Member, Syouji Takeda, Non-member, Toshiyuki Saida, Member (Toshiba Corporation)

We proposed a circuit model of oil-immersed transformer for surge analyses in high frequency regions and evaluated its effectiveness by referring to measurement results of a model winding. We also carried out lightning surge analyses in a 500kV substation with the new transformer model and investigated effects of transformer modeling on the lightning surge voltage at the transformer terminal. In the case of applying the new model for transformer modeling, the peak value of the surge voltage decreases but the rate of the voltage rise increases compared with the conventional transformer modeling by a concentrated capacitance element. This difference can be explained considering the charging process of capacitors in the transformer model.

キーワード：油入変圧器、雷サージ、電気モデル、500kV変電所、EMTP解析

1. はじめに

油入変圧器の雷インパルス試験電圧の設定のために、従来よりEMTPで雷サージを解析し発生過電圧を求めている。その際、変圧器はサージ侵入キャパシタンスと呼ばれる単一の集中キャパシタンスで模擬されることが多い⁽¹⁾。しかしこのキャパシタンスの値をいくらに選ぶべきか、あるいは数kHzから数MHzまで単一のキャパシタンスで模擬してよいか必ずしも明らかではない。

一方、変電所のコンパクト化、GISへの直結化などにより、従来より高周波の過電圧が加わる状況にある⁽²⁾。また変圧器自体も、大きな直列キャパシタンスを持つ巻線の採用などにより、1MHz前後の高周波で共振の挙動を示すことが知られている⁽³⁾。

このような状況で、雷サージの周波数領域での新しい変圧器モデルが望まれる。高周波領域まで巻線を精密に模擬するためには、導体1ターンごとにインダクタンスやキャパシタンスを与えた詳細な等価回路が必要である⁽⁴⁾。しかし、このようなモデルでは、巻線内部の電位分布を問題にするのではなく、変電所あるいは系統全体のサージ解析を行って変圧器端子に発生する電圧を求めることを目的とする場合、変圧器全体のモデルとして複雑になりすぎる。前報では、275kVガス絶縁シャントリアクトルについて高周波領域まで模擬できる比較的簡易な電気モデルを提案した⁽⁵⁾。

本論文では、その手法を500kV油入変圧器に適用し、

油入変圧器の高周波電気モデルを作成し、モデル巻線の測定結果との照合でその妥当性を評価した。次にその新モデルを用いて500kV変電所の雷サージ解析を行い、従来の侵入キャパシタンスで変圧器を模擬した場合と比較して変圧器端に発生する雷サージの過電圧レベルと波形への影響を検討した。

2. 巻線の電気モデル

＜2・1＞ 基本的手法 モデル構築の方法は、文献5に詳述されており、基本的に同じ手法であるので、ここでは特徴のあるハイセルキャップ巻線の2セクション分のモデルの骨子のみ記述する。結果としては、図1に示す3段のL-C並列回路となる。

変圧器全体としては、2セクションを積み上げて1つの巻線モデルを作り、別の（2次巻線など）のモデルも作って、相互誘導や対地キャパシタンスを加えることになる。

＜2・2＞ ハイセルキャップ巻線の2セクションモデル（低周波） L_0 と C_0 からなる並列回路で表す。 C_0 は、2セクション内の各ターンが線形な分布を持つと仮定して、ターン間に蓄えられる静電エネルギーを2セクション全体で総計し、これと等しい静電エネルギーを持つ1つのキャパシタンスとして求める。

L_0 は、2セクション分を1つのインダクタンス素子で表したもので、セクション当たり n ターンあるとすると、 $2n$ ターンのインダクタンスになるので、1ターンの

インダクタンスのほぼ $(2n)^2$ 倍の値を持つ。ただし、雷サージ領域の解析に適用する場合、鉄心の影響は少ないと考え、ここでは空心コイルのインダクタンス値を用いた。

図1 高周波電気モデル
Fig.1. High frequency model.

<2・3> ハイセルキャップ巻線の2セクションモデル (高周波) ハイセルキャップ巻線をスパイラル状に巻かれた平行平板キャパシタと見なして、急峻波に対しては伝送線と応答すると考える。2セクション分の伝送線での往復反射で発生する振動の共振周波数 f_1 を L_1 、 C_1 の並列回路で表現する。

更にセクション内に発生する往復反射による振動として、基本振動周波数の他に2次の共振周波数まで考えることとし、

$$L_2 = L_1 / 2 \quad C_2 = C_1 / 2$$

の関係のある L_2 、 C_2 の並列回路を考える。

また高周波の減衰の抵抗は、 $L-C$ に並列に抵抗 $R = k\sqrt{L/C}$ を入れて表し、 k の値は3章で述べる実験結果と整合するよう決定する。

3. 電気モデルの評価

<3・1> モデル巻線と測定方法 2章で考案した電気モデルの妥当性を評価するため、モデル巻線としてハイセルキャップ巻線2セクションを製作し、インピーダンスの周波数特性を測定した。さらに、10セクションのモデル巻線を製作し、インパルス電圧に対する巻線内各部の応答波形の測定も行った。

測定は、ネットワークアナライザ (アンリツ MS3401A) を用いた。巻線に正弦波を印加し、その周波数を1kHzから10MHzまで掃引し、各周波数におけるインピーダンスを測定した。なお測定は全て絶縁油中で行った。

<3・2> 電気モデルの解析と実測 前節のモデル巻線の大きさ、材料の定数を用いて、図1の等価回路を求めると、

$$L_0 = 4.76 \text{ mH}, \quad C_0 = 5570 \text{ pF}$$

$$L_1 = 5.08 \mu\text{H}, \quad C_1 = 1840 \text{ pF}$$

$$L_2 = 2.54 \mu\text{H}, \quad C_2 = 920 \text{ pF}$$

となる。 k は周波数特性と、本論文では紹介していないがインパルス応答の振動波形の減衰率の測定結果との比較から、 $k=10$ 、すなわち $R_1=R_2=526 \Omega$ とした。

インピーダンスの周波数特性の測定結果と $k=10$ としたときの等価回路による解析結果を比較して、図2に示す。解析は過渡現象解析プログラムEMTPを用いた。

第1並列共振、高周波領域の第2、3並列共振において、周波数、インピーダンスの大きさとも良くあっており、2章のモデルが妥当であることがわかる。なお、700kHz付近の直列共振点において実測に小さな並列共振が認められる。これは、図1の電気モデルでは考慮されていないが、測定状態で生じるモデル巻線の対タンクへの漂遊キャパシタンスの影響と考えられる。

図2 モデル巻線のインピーダンス周波数特性
Fig.2. Frequency characteristics of impedance of model winding.

4. 500kV油入変圧器の電気モデル

<4・1> 電気モデルの構築 まず、変圧器の各巻線の巻き方に応じ、ハイセルキャップ巻線であれば第2章の方法、連続円板巻線は本論文では述べていないが文献5の方法で、例えば2セクション毎の部分モデルを作り結合し

図3 500kV変圧器の電気モデル
Fig.3. 500kV transformer model for analysis.

て全体モデルを作る。その際、低周波用のLは、図3では省略されているが、巻線間の相互インダクタンスも含めたインダクタンス行列で表される。次に、各巻線間の静電結合や対地容量を付与する。

この手順で、高压巻線がハイセルキャップ巻線、中圧巻線、三次巻線が連続円板巻線の内鉄形変圧器を想定してモデルを作成すると図3のようになる。図3において、ハイセルキャップ巻線の部分の1段のL-C並列回路が、図中に示すように、実際には図1で示した3段のL-C並列回路に置き換えられる。

＜4・2＞ インピーダンスの周波数特性

500 kV内鉄形変圧器を想定して図3のモデルを作成し、高压端子から見た1相分のインピーダンスの周波数特性を図4に示す。ただし、中圧巻線および三次巻線端子は接地の条件である。

図4より次のことがわかる。

- ・基本共振周波数 f_0 は6.2 kHzである。
- ・ f_0 以下ではインピーダンスはL性を示す。
- ・ f_0 以上の5 kHzから50 kHzの間に4点の共振点

図4 500 kV変圧器のインピーダンス周波数特性
Fig.4. Frequency characteristics of impedance of 500kV transformer.

があるが、それ以上の周波数ではC性のインピーダンスを示し、 $f = 100 \text{ kHz}$ で $C = 4080 \text{ pF}$ である。

- ・ $f = 300 \text{ kHz}$ 以上の高周波領域では、各3点の並列共振周波数と直列共振周波数を持つ。

- ・ $f = 2 \text{ MHz}$ 以上の高周波領域でのキャパシタンスは約 1500 pF である。

なお、高压巻線の対地キャパシタンス（対中圧および対タンクキャパシタンスの和）は 10410 pF である。

以上のように、図3の変圧器モデルの解析結果は、500 kHz以上の高周波領域において、いくつかの共振点が存在しかつ、100 kHz領域のキャパシタンス値に比べ、MHz領域のキャパシタンス値が小さくなる点が図2の実測結果の特性をよく表している。

5. 500 kV変電所の雷サージ解析

本論文で提案してきたモデル（以下、高周波モデルと呼ぶ）や従来のモデルを含む各種モデルで、雷サージ解析を行い、結果への影響を調べる。

＜5・1＞ 解析対象系 耐雷技術委員会発変電所分科会の「発変電所侵入サージの実用的解析手法とその適用」⁽⁶⁾の、回路B、即ち500 kV系統の三相一括GIS変電所を対象とした。この手法は、JEC-0102「試験電圧標準」や耐雷設計委員会の「発変電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」でも採用されている。

詳細は文献6を参照していただきたいが、主要な解析条件は以下の通りである。

(a) 雷撃条件

- ・雷撃電流：150 kA、 $1/70 \mu\text{s}$ ランプ波
- ・雷撃点：第1鉄塔塔頂
- ・AC重畳：逆極性波高値

(b) 送電設備

- ・送電線：多相送電線模擬（J.Martiモデル）

図5 解析変電所回路

Fig. 5. Substation circuit for analysis.

- ・鉄 塔：4段鉄塔
- (c) 変電設備
 - ・回路条件：4回線引き込み2バンク構成の1回線引き込み1バンク運用時(図5に回路を示す)
 - ・三相GIS：多相模擬(K.C.Leeモデル)
 - ・避雷器：870kV(10kA)

- 〈5・2〉 変圧器模擬 下記の5ケースを考えた。
- ケース1：高周波モデル(図3のもの)
- ケース2：集中キャパシタンス $C=10730\text{ pF}$ (巻線対地キャパシタンス 10410 pF +ブッシングキャパシタンス 320 pF)
- ケース3：集中キャパシタンス $C=3790\text{ pF}$ (巻線対地キャパシタンス $10410\text{ pF}/3$ +ブッシングキャパシタンス 320 pF)
- ケース4：集中キャパシタンス $C=4080\text{ pF}$ (高周波モデルの $f=100\text{ kHz}$ でのインピーダンスから算出)
- ケース5：集中キャパシタンス $C=1500\text{ pF}$ (高周波モデルの $f=2\text{ MHz}$ 以上のインピーダンスから算出)

なお、従来は巻線の電位分布を線形と仮定して求められるケース3の値を用いることが多い。

〈5・3〉 解析結果 上記5ケースの変圧器模擬に対応する変圧器端子の雷サージ波形を図6に示す。模擬方法の違いにより発生電圧のピーク値と dV/dt が異なる。図7にケース1と3の立ち上がり部分を時間軸を拡大して示した。解析波形から電圧立ち上がり部分の最大電位傾度を dV/dt として求め、ピーク値とともに各ケースを比較した結果を表1に示す。

高周波モデル(ケース1)を接続した場合、従来の模擬方法である対地キャパシタンスの $1/3$ に相当する集中キャパシタンスを接続した場合(ケース3)に比べ、電圧ピーク値は84%に減少するのに対して、電圧上昇率は128%まで上昇している。

集中キャパシタンスで模擬した場合、電圧上昇率はキャパシタンス値が小さくなるほど高くなるが、電圧ピーク値はキャパシタンスに対して単調な増減をするわけではない。図8に、変圧器模擬集中キャパシタンス値と発生電圧

表1 雷サージピーク値と電圧上昇率
Table 1. Peak value and rate of voltage rise of lightning surge.

ケース	変圧器模擬方法	ピーク値(kV)	$dV/dt(kV/\mu s)$
1	高周波モデル	968	1474
2	集中C(10730pF)	910	562
3	集中C(3790pF)	1149	1156
4	集中C(4080pF)	1133	1127
5	集中C(1500pF)	1097	1950

ピーク値との関係を示す。キャパシタンスを小さくしていくと、 3000 pF で一旦極大値をもち、 1200 pF で極小値を経たのち 300 pF で最大となる。サージ波形を見ると、 1200 pF を境にこれ以下のキャパシタンスに対しては第1波がピークを与え、これ以上のキャパシタンスに対しては第2波がピークを与える。

図6 変圧器端の雷サージ波形
Fig.6. Waveforms of lightning surges at transformer terminal.

図7 雷サージ波形立ち上がり部
Fig.7. Rising part of lightning surge.

図8 変圧器模擬C値と雷サージピーク値の関係
Fig.8. Relation between capacitance values simulating transformer and peak values of lightning surge.

変圧器端の電圧波形の立ち上がり部分に現れる振動成分は、避雷器設置点から変圧器までのGISと変圧器のキャパシタンスの振動によって周波数が決まる。このため、変圧器模擬のキャパシタンス値が大きくなると振動成分周波数が低下している。この周波数は数100 kHzから1 MHz程度の範囲にあるが、変電所他の部分でのサージの往復反射によってもこの領域の周波数の振動が生じる可能性があるため、それらとの相互干渉によって変圧器端の電圧波形ピーク値が影響を受けていると考えられる。

6. 検討

＜6・1＞ 変圧器モデルの影響 前述のように、雷サージ解析において変圧器のモデルとして高周波モデルを使うと、従来モデルに比べ、変圧器端の電圧は波高値が低く峻度が高くなった。この差異は変圧器内部の静電容量の充電過程によるもので、以下のように説明される⁽⁷⁾。

すなわち、従来モデルでは、線路のサージインピーダンスと対地静電容量の積の時定数で指数関数的に充電され

る。これに対し高周波モデルでは、従来モデルに対応する第0ステージ（図1の L_0 、 C_0 の並列回路）と同様に振る舞うが、高周波の第1ステージ（図1の L_1 、 C_1 の並列回路）は約700 kHz、第2ステージ（図1の L_2 、 C_2 の並列回路）は約1.4 MHzで振動する。そのため、第0ステージが充電中に高周波要素は放電の位相に入り波高値が抑えられ、また高調波要素の小さなCを最初に充電するために立ち上がりが速くなる。

この高周波モデルは、前述のように測定に基づいて構築されたものであり、高周波領域において、変圧器端子から見たキャパシタンスが小さくなることに起因してサージ波形が影響を受けることから、ケース1の解析結果が実際の雷サージに近いと考えられる。同じ波高値でも波形により絶縁的に厳しさが異なるので⁽⁸⁾、より正確な波形の追求は重要である。

これらのことから、変圧器のモデル化にあたっては、通常雷サージ解析で扱われる周波数領域で、巻線の構造に応じて高周波特性を考慮したモデル化が必要になることがわかる。

＜6・2＞ 変電所回路の影響 今回雷サージ解析に用いた変電所回路は、図5に示すように、避雷器設置位置から変圧器端まで30 mの長さのGISがある。また、500 kV 3相母線は、雷サージの侵入を仮定したG1の回線がつながるBU-2、BU-4、BU-6のノードから右側に35 mの拡がりがある。そこで、G1回線から侵入した雷サージの母線内への分波さらには母線端からの反射が変圧器端の電圧波形に及ぼす影響をみるために、図5の回路においてノードBU-6で母線を切り離れた条件で雷サージ解析を行った。

その結果を図9に示す。(a)が変圧器模擬のケース1、(b)がケース3である。発生電圧最大値は1117 kVおよび1270 kVとなり、図6の結果と比較してそれぞれ

図9 変電所回路の影響
Fig.9. Effect of substation circuit.

15%および11%上昇している。波形的にも第1波が高くなり、図6のように第2波が高くなるのは母線の分波や反射の影響であることがわかる。このように、避雷器設置位置から変圧器までが離れている場合、変圧器端の発生電圧はその距離に応じて避雷器制限電圧より高くなるが、その上昇率は変電所の構成によって大きく影響を受ける。

変圧器端の雷サージ波形を検討する場合、その波形は変圧器のモデル化に影響を受けるだけでなく、変電所構成にも相互依存するので注意を要する。

7. まとめ

500kV油入変圧器に対し、高周波領域まで模擬できる比較的簡易な電気モデルを作成し、モデル巻線の測定結果との照合で妥当性を評価した。また、その新モデルを用いて500kV変電所の雷サージ解析を行い、従来の模擬方法と比較して、変圧器端に発生する雷サージへの影響を検討した結果以下の知見が得られた。

(1) 油入変圧器のハイセルキャップ巻線についても、L-C並列回路を3段直列に接続した簡易モデルで高周波領域まで、巻線のインピーダンス特性をよく模擬することができる。

(2) 500kV系の三相一括GIS変電所における雷サージ解析で、高周波モデルを接続した場合、従来の模擬方法である対地キャパシタンスの1/3に相当する集中キャパシタンスを接続した場合に比べ、電圧ピーク値は減少するのに対して電圧上昇率は増加する。このことは変圧器模擬方法に基づくものであり、変電所形態によらず一般的にいえると考えられる。

(3) 上項の差異は、変圧器内部のキャパシタンスの充電過程を考えることによって説明できる。

(4) 雷サージ解析では、母線長や接続回線など変電所回路により分波や反射などの状況が変わって、得られる結果が異なってくるが、変圧器模擬法により、それらとの相互干渉で波形や波高値が変化する。したがって、変圧器端の雷サージ波形を正確に求めようとする場合、高周波領域の特性まで考慮した変圧器模擬法が必要である。

(平成10年10月26日受付、同11年3月9日再受付)

文献

- (1)「変電所統計的絶縁設計のための雷サージ評価手法」電気学会技術報告、II部、No. 566 (平7)
- (2)岡部、向當、腰塚、西脇、高橋、才田：「変圧器励磁突流遮断時の再発弧過電圧」、平成10年電気学会全国大会 No.1519 (1998)
- (3)T.Teranishi, M.Ikeda, M.Honda & T.Yanari: "Local Voltage Oscillation in Interleaved Transformer Windings", IEEE Trans. Power Apparatus System, PAS-100, 873 (1981)
- (4)K.Cornick, B.Filliat, C.Kieny & W.Muller: "Distribution of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings", CIGRE Report 12-204 (1992)
- (5)岡部、向當、寺西、石川、小林、才田：「ガス絶縁シヤ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、117巻、5号 700~705 (1997)
- (6)「発変電所侵入雷サージの実適用解析手法とその適用」電力中央研究所報告：T90068 (1991)
- (7)S.Okabe, M.Koto, T.Teranishi, M.Ishikawa & T.Saida: "An Electric Model of Gas-Insulated Shunt Reactor and Analysis of Re-Ignition Surge Voltages", IEEE, Power Apparatus System, PE-065-PWRD-0-07-1998 (1998)
- (8)岡部、向當、井上、寺西、長岡：「非標準インパルス波形に対する油入り変圧器の絶縁特性」、平成10年電気学会全国大会 No.1129 (1998)

岡部 成光

(正員)1958年9月18日生。1986年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。1992年ミュンヘン工科大学客員研究員。現在、電力技術研究所雷・絶縁解析グループ。主として、変電機器の絶縁協調および診断技術の研究に従事。工学博士。IEEE 会員。1993年電気学会論文賞受賞。

向當 政典

(正員)1965年3月1日生。1989年3月金沢大学大学院修士課程修了。同年4月東京電力(株)入社。電力技術研究所勤務時に、変電機器の絶縁協調および診断技術の研究に従事。現在、山梨支店工務部発変電グループ。

寺西 常治

(正員)1946年2月10日生。1973年3月名古屋大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月(株)東芝入社。変圧器開発設計に従事。79年より、主として変圧器絶縁技術に関する研究に従事。工学博士。IEEE 会員。

竹多 昭治

(正員)1958年2月11日生。1982年3月慶応義塾大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。同社変圧器部において、主として電力用変圧器の設計に従事。

才田 敏之

(正員)1967年1月12日生。1991年3月名古屋大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。同社電力変電技術部において、主として変電プラントのシステムエンジニアリングに従事。