多重カスケード接続変圧器の電位分布特性

正員 中島達人 (東京電力)

正員 鈴木宏和 (東京電力)

正員 松尾尚英 (日立製作所)

正員 斉藤 達 (日立製作所)

正員 稲垣恵造 (日立製作所)

Voltage Distribution in Multi-Cascaded Transformer

Tatsuhito Nakajima, Member (Tokyo Electric Power Co.) Takahide Matsuo, Member (Hitachi Ltd.)

Hirokazu Suzuki, Member (Tokyo Electric Power Co.) Sadamu Saito, Member (Hitachi Ltd.)

Keizo Inagaki, Member (Hitachi Ltd.)

Voltage distribution for lightning surge in multi-cascaded transformer, that will be used for a converter transformer in self-excited DC transmission, was studied using model transformers. There was good agreement between measured data and calculated results. It was cleared that our calculation program have enough performance for estimating voltage distribution.

Maximum voltages in high-voltage windings for lightning surge were below 120% and transfer voltages to converting circuit were below about 5%. Therefore, there were no serious problems in cascaded transformers for lightning surge. However, their voltage distribution was not satisfactory when same transformers were connected in cascade. We clarified with simulation that the distribution could be improved by modifying every transformer's structure according to position in cascade connection.

キーワード：変圧器，電位振動，自励式変換器，カスケード接続変圧器

1. まえがき

将来の自励式直流送電設備の実現のために，自励式変換器本体の大容量化が進められており，それと同時に，変換器への入出力を担う変換用変圧器の大容量化が求められている。また，変換器出力を，中間電圧を介することなく直接連系電圧まで昇圧出来れば，連系用主変圧器が不要となり変圧器の高効率化，小型化が期待できる。このような1段変圧方式を実現するために，変換用変圧器の高変圧化，高電圧化も要求されている。

変圧器の大容量，高電圧化を図る方法の一つとして，複数台の変圧器の高電圧巻線を直列に接続し，各低電圧巻線を並列に接続することにより高い変圧比を得る，多重カスケード接続変圧器方式がある。これは図1のように構成されており，交流系統電圧から交直変換用電圧まで1回の変圧で可能なことから，自励式変換用変圧器ではこの方式の採用が考えられている。

カスケード接続変圧器はこれまで主に比較的低電圧，小容量向けに用いられて来ており，サージ特性等の考慮はあまり行われて来なかった。そのため，採用に当たっては系統からのサージ侵入に対する特性を把握しておく必要がある。また，HVDCの変換用変圧器として使用するためには，変圧器自身のサージ特性のみではなく，変換器側への移行

サージレベルも重要である。

これらのサージ特性については，実測および解析によって検討することになるが，設計段階では解析を主体とした検討を行うことになるため，解析の精度も問題となる。カスケード接続された変圧器を対象とした電位振動解析は経験があまりないため，特に多重接続による解析精度の低下がないかどうかを確認しておく必要がある。

そこで，今回，自励式変換用変圧器の電磁モデル（縮小モデル変圧器）を製作し，雷サージに対するカスケード接

図1 カスケード接続変圧器の構成

Fig.1. Cascaded transformer system.

続変圧器の電位分布特性を実験、計算の両面から検討した。

2. 実験および計算方法

実験および解析用に製作したモデル変圧器は、実変圧器の1/4サイズのものであり、基本的仕様の実器との関係は表1に示すとおりである。縮小モデルの構造によっては電位振動の周波数特性、つまり時間特性や移行電圧が実器と異なるものになってしまうが、ここでは、結果を実器に反映させるために、時間特性および巻数比が実器とほぼ1対1に対応するように各諸元を設定した。

モデル変圧器は高電圧、低電圧巻線から成る二巻線変圧器であり、それぞれ、電力用変圧器によく用いられる二つの円板状コイルを一組としたツインコイルから成っている。導体には実器と同じ断面形状である $6 \times 3.4 \text{ mm}$ のエッジワイズ（横長）導体を使用し、単一コイルでは3ターン、ツインコイルとしては6ターン巻いてある。

高電圧巻線のツインコイルは、図2に示すようにその構造により系統側から3つの領域に分けられている。全巻線中系統側3/10の領域ではコイルの一部に侵入サージに対する電位振動を抑制するための、制振遮蔽用シールド導体を2ターン巻き込んであり、次の1/10の領域では1ターン巻

表1 モデル変圧器の仕様

Table 1. Parameter of model transformer.

項目	実器	モデル
寸法比	d	d/4
巻数比	N	N
電圧比	V	V/16
電流比	I	I/16
時間比	t	t

図2 モデル変圧器の構造

Fig.2. Structure of model transformer.

き込んである。残りの接地側6/10の領域にはシールド導体は巻き込んでいない。

このモデル変圧器と同一構造のものを6台製作し、単相1台～単相4台カスケード接続時、および三相2台カスケード接続時について、高電圧側端子から $1.2/50 \mu\text{s}$ 標準雷サージが侵入した時の電位分布特性を測定した。

各変圧器の低電圧巻線の両端は、実系統においては交直変換回路へと接続される出力端子となる。そこでカスケード接続時の測定および計算においては、変換回路における最小インピーダンスに基づき、低電圧巻線の両端を 75Ω の抵抗で接地した。

変圧器巻線内各部の発生電圧の計算には、図3に示すような詳細RLC等価回路で模擬し、マトリクス方程式の形で解く電位振動計算専用プログラム^(1,2)を用いた。このプログラムは、1ツインコイルを等価回路の1単位として計算を行うため、巻線内の任意の部位の電位を知ることができ、測定結果との比較が容易だという利点がある。等価回路内の定数である全ツインコイルの自己インダクタンスおよび相互インダクタンス、ならびにツインコイル内部の直列静電容量と対向面のコイル間静電容量は、モデル変圧器の寸法および形状から計算して求めた。さらに減衰成分としては直流抵抗分と誘電体損を考慮している。

L, M: インダクタンス G: コンダクタンス
S, K, C: キャパシタンス R: 抵抗

マトリクス方程式

$$\begin{aligned}
 [B][V] &= [M]p[I] + [R][I] \\
 -[B][I] &= [F]p[V] + [G][V]
 \end{aligned}$$

$[V], [I]$: 電圧, 電流ベクトル
 $[B]$: 接続係数マトリクス
 $[M]$: インダクタンスマトリクス
 $[F]$: キャパシタンスマトリクス
 $[R]$: 直列抵抗マトリクス
 $[G]$: コンダクタンスマトリクス

図3 電位振動計算用等価回路

およびマトリクス方程式

Fig.3. Equivalent circuit for oscillatory voltage calculation and matrix equation.

3. 測定および計算結果

3.1 解析精度 図4に変圧器1台単独時の高電圧巻線部における対地電位分布の測定および計算結果を、図5に単相4台カスケード接続時の高電圧、低電圧巻線についての結果をそれぞれ示す。ここでは巻線内各位置における最大発生電位をプロットしている。また、図6にそれぞれの場合における代表的な対地電圧波形を示す。なお、本報告においてはカスケード接続による電位分布への影響に話

を絞ったため、三相試験の結果については割愛した。各図においては、印加サージ電圧の波高値を100%とした相対値で示してある。いずれの場合においても、計算結果と測定結果とは非常に良く一致した。特に高電圧巻線部については、図4、5ともに印加電圧に対し平均して±5%程度以下の誤差しかなく、十分な精度であると言える。図5中の低電圧巻線部に関しては、中央部付近で10%近く計算値の方が高めているが、変換器側である各巻線端部の値はほぼ一致しており実用上特に問題はない。

図4 変圧器1台単独時の高電圧巻線の対地電位分布

Fig.4. Voltage distribution in high-voltage winding on single transformer.

図5 単相4台カスケード接続時の対地電位分布

Fig.5. Voltage distribution on single phase 4 cascaded transformers.

0 μs 100%/div, 2 μs/div
実測結果

(a) 変圧器1台単独時

計算結果

0 μs 100%/div, 2 μs/div
実測結果

(b) 4台カスケード接続時

計算結果

図6 実測および計算による対地電位波形

Fig.6. Measured and calculated voltage waveform, on (a)single, (b) 4 cascaded

図6の波形についても、概略形状については測定結果と計算結果は良く一致した。振動周波数については、計算結果は測定結果に比べて平均して10%程度周波数が低くなっているが、振動のパターンおよび減衰の傾向については測定結果とはほぼ同一であった。また、カスケード接続によって計算対象変圧器の台数が増えても、そのことによって誤差の増大などの影響は生じておらず、実規模での解析にも十分耐えられる解析精度が得られた。

3.2 カスケード接続時の特徴 図4、5の対地電位分布に示した破線は、定常状態時に得られる理想的な分布であり、サージ侵入時には電位振動により最大対地電位の上昇が発生している。本研究においては縮小モデルを使用したこともあって構成が最適化されてはいないため、中央付近での電位上昇が若干高めになったが、変圧器1台単独時には定常電位の1.5倍程度であった。結果として変圧器1台単独時には、高電圧巻線部では制振遮蔽用シールドの効果により最大発生電位は100%以下に抑えられ、電位分布全般についても特に過大電圧は発生しなかった。

カスケード接続にすると1台単独時に比べて最大発生電位はやや高めになったが、それでも高電圧巻線部での最大値は120%を越えない程度、低電圧巻線部では実測ベースでは10%以下であり、変圧器としては絶縁上問題のないレベルであった。また、低電圧巻線端部の最大発生電位は5%程度以下であり、変換器側へのサージ移行電圧も十分に低いことが確認できた。

しかし、高電圧巻線部の電位分布形状を見てみると、カスケード接続にすると全体のうちサージ電圧印加端側の約半分の領域では最大発生電位が100%前後のはほぼ一定値に保たれ、残りの接地端側領域でようやく低下し始めるという分布になっている。つまり、全体としては特に過大電圧は発生しておらず絶縁上問題はないが、変圧器1台ごとで見ると、2台目以降の変圧器では定常状態に対して最大2倍程度の対地電位が発生することになる。その結果、4台目を除く変圧器全てにおいて1台目と同様のフル絶縁が必要となるが、電位分布を改善できれば2台目以降において絶縁裕度が得られ小型軽量化等を図ることができる。

このような電位分布になるということは、変圧器1台単独時には効果のあった制振遮蔽用シールドが、カスケード接続時にはほとんど効果を発揮できていないことを示している。従って、全体としての電位分布特性を改善するための構成が必要となる。

4. 電位分布改善方法の検討

変圧器のサージに対する電位分布特性はC分圧による電位分布、いわゆる初期電位分布に大きく影響される。図7に示すような一端接地状態にある変圧器の等価回路において、印加端からx離れた位置の初期電位eは、回路中のキャパシタンスのみによって電流が流れると仮定して、次の式で表される⁽³⁾。

$$e = V_0 \frac{\sinh \alpha (1 - x/l)}{\sinh \alpha} \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{C_g / C_s}, \quad V_0: \text{印加電圧}$$

C_g : コイルの対地静電容量

C_s : コイルの直列静電容量

初期電位の分布形状は、 α の値が小さいほど、つまりコイルの対地静電容量に対して直列静電容量が大きくなるほど直線に近くなる。電位振動はこの初期電位分布と定常状態での電位分布（理想分布）との差が小さいほど発生しにくくなる。従って、対地静電容量が無い場合には、各コイルの直列静電容量を同じにすれば初期電位分布は直線になり、その結果サージに対する電位分布も直線状になるが、実際には対地静電容量があるためなんらかの補正が必要になる。制振遮蔽用シールドやインターリーブコイルによる電位分布改善方法は、印加端側コイルの直列静電容量を大きくして印加端から接地端までの静電容量分布を変え、初期電位分布を直線に近づけることに基づいている⁽⁴⁾。

今回のモデル変圧器は導線サイズの制約等により最適構造ではないが、それでも1台単独で見ると初期電位分布はシールドの効果により図8の実線のように直線に沿ってお

図7 初期電位に対する変圧器等価回路
Fig.7. Equivalent circuit for initial voltage.

図8 モデル変圧器の初期電位分布（計算値）
Fig.8. Initial voltage distribution in model transformer.

り、そのためサージ電位分布特性は良好である。しかし、この変圧器をそのまま単純にカスケード接続にすると、全体としての直列静電容量のバランスが崩れて初期電位分布形状が太い破線のように直線から大きくはずれてしまう。

この時の初期電位分布は、2台目以降ではほとんど大地電位であり、印加端から接地端までの形状として見てみると、むしろ細い破線で示された制振遮蔽用シールドを施していない変圧器1台単独時の分布に近くなる。これは、同一構造の変圧器をカスケード接続にすると、変圧器ごとに各コイルの直列静電容量が同じ値をとることになり、そのために初期電位分布が見かけ上、変圧器単体において電位分布改善処置を施さずに全体を同一巻線構造とした場合と同様のものになったのだと考えられる。このことから、カスケード接続された変圧器のサージ電位分布特性を改善するためには、全体としての各コイルの直列静電容量分布を変圧器単体時に置き換えて考え、調整すれば良いと思われる。つまり、印加端側（系統側）に近い変圧器ほど内部のコイルの直列静電容量が大きくなるようにすれば良い。

この考え方を検証するために、4台のモデル変圧器の構造を印加端からの位置によってそれぞれ変えた場合のサージ電位分布を計算してみた。構成としては、表2に示したように、印加端側変圧器3台の高電圧巻線の導体形状を縦長にしてコイルターン間の静電容量を増やし、コイルの直列静電容量が増すようにした^(4,5)。さらに、印加端側に近い変圧器ほど高電圧巻線への制振遮蔽用シールドの巻き込み回数を多くし、接地端側の変圧器についてはシールド無しの構造にした。また、コイル導体形状を変えることにより、そのままだと巻線全体の径方向寸法及び高さ寸法が変わるが、ツインコイル当たりの導体ターン数とツインコイル数を調整して、巻線全体の外形寸法及び総ターン数が変わらないように注意した。なお、低電圧巻線については4台とも同じ構造のままで特に変更はしなかった。

計算結果を図9に示す。図において、細い実線は図5に示した同一構造変圧器を4台カスケード接続した時の電位分布、太い実線が接続位置により構造を変えた場合の電位分布をそれぞれ示している。また、図中の細い破線および太い破線は、同様にそれぞれの場合における初期電位分布を表している。この結果から明らかなように、印加端からの位置関係により変圧器の構造を変えて、高電圧巻線内コイルの直列静電容量分布を全体として調整することにより、初期電位分布を直線に近づけることができた。

この結果、印加端側から1台目の最大発生対地電位は100%以下に低減され、2台目以降についてもそれぞれ90%、70%、40%以下に低減された。4台全て同じ構造にした場合に比べ、発生電位が20~30%程度低減できており、絶縁上の裕度が非常に大きくなった。その結果、2台目以降の変圧器について軽量化等が可能になるものと思われる。ここではモデル変圧器を計算対象としたこともあって、必ずしも計算結果をそのまま実器に適用できるとは言えないが、カスケード接続変圧器のサージ特性の改善方法の検証はで

きた。従って実器においても同様な方法に基づき、サージに対する過電圧を抑制することが可能であると思われる。

5. まとめ

自動式直流送電用の変換用変圧器として採用が検討されている、多重カスケード接続変圧器の雷サージに対する電位振動特性を、縮小モデル変圧器を対象に実測および解析によって検討し、以下のことがわかった。

(1)今回解析に用いた、ツインコイル単位の等価回路に基づいてマトリクス方程式で解く電位振動計算専用プログラムの計算誤差は、印加電圧に対して平均±5%程度以下であり、カスケード接続時においても実用上十分な精度を持っている

表2 変圧器の電位振動抑制構造

Table 2. Structure to prevent voltage oscillation on transformer.

	印加端からの位置	導体形状	シールド	ツインコイル ターン数
改善前	1~4	6×3.4 mm (横長)	3/10: 2ターン	6
			1/10: 1ターン	
			6/10: なし	
改善後	1	3.4×6 mm	全: 4ターン	10
	2	3.4×6 mm	7/10: 3ターン	10
			3/10: 2.5ターン	
	3	3.4×6 mm	4/10: 2ターン	10
			6/10: 1ターン	
	4	6×3.4 mm	全: なし	6

図9 変圧器ごとに巻線構造を変えた時の電位分布計算結果

Fig.9. Voltage distribution at modifying every transformer winding.

ることが確認できた。

(2)モデル変圧器に $1.2/50 \mu s$ 標準雷サージを印加した結果、高電圧巻線部の最大発生電位は、変圧器 1 台単独時には 100%以下、4 台カスケード接続時でも 120%を越えない程度であり、変圧器としては絶縁上問題のないレベルであった。

(3) 低電圧巻線端部における最大発生電位は 5%程度以下であり、変換器側へ侵入するサージ移行電圧も十分に低く抑えられる。

(4) 1 台単独時でのサージ電位分布特性が良好であっても、同一構造の変圧器をそのままカスケード接続にすると、全体のうち印加端側の約半分の領域では最大発生電位が 100%前後のほぼ一定値に保たれ、残りの接地端側領域でようやく低下し始めるという電位分布になる。

(5) カスケード接続された変圧器のサージ電位分布特性を改善するためには、全体としての各コイルの直列静電容量分布を変圧器単体時に置き換えて調整すれば良く、印加端側（系統側）に近い変圧器ほど内部コイルの直列静電容量を大きくすることにより、発生電位を 20~30%程度低減することができた。

本研究により、自動式変換用変圧器の巻線構造に関する有益な基礎資料を得た。今後、実用化に重要な鉄心構造に関する検討を実施していく予定である。

(平成 8 年 5 月 27 日受付, 同 8 年 10 月 28 日再受付)

文 献

- (1) A.Miki, T.Hosoya, K.Okuyama: "A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings", IEEE Trans. PAS, Vol.PAS-97, No.3, PP.930-939, May/June (1977).
- (2) 中島達人・鈴木宏和・松尾尚英・齊藤達・稲垣恵造: 「カスケード接続変圧器の電位振動特性」, 平成 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.560.
- (3) 例えば, 「電気工学ハンドブック」, 電気学会.
- (4) 奥山賢一: 「変圧器巻線の直列キャパシタンスと衝撃電位分布」, 電学誌, 87 巻 951 号, PP.2409-2415 (昭 45-12).
- (5) 稲垣恵造・五反田米蔵・松尾尚英・小沢淳: 「変圧器巻線の電位分布特性」, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.585.

中島 達人 (正員) 1962 年 11 月 13 日生まれ。90 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。同社電力技術研究所にて主として電力系統へのパワーエレクトロニクス適用技術に関する研究に従事し現在にいたる。工学博士。IEEE 会員。

鈴木 宏和 (正員) 1958 年 2 月 27 日生まれ。82 年 3 月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。現在、電力技術研究所パワーエレクトロニクス研究室勤務。工学博士。日本応用磁気学会, IEEE 会員。

松尾 尚英 (正員) 1963 年 10 月 22 日生まれ。88 年 3 月九州大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて主としてイオンビーム応用開発に従事した後、変圧器の電位振動抑制技術の開発を担当。現在、同社電力・電機開発本部電機第 2 部変圧器グループ所属。

齊藤 達 (正員) 1945 年 9 月 3 日生まれ。69 年 3 月山形大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて主として変圧器の損失に関する研究に従事。現在、同社電力・電機開発本部電機第 2 部変圧器グループリーダー。IEEE 会員。

稲垣 恵造 (正員) 1945 年 2 月 18 日生まれ。63 年 3 月山口県立宇部工業高等学校卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて主として変圧器の電磁気回路解析研究に従事。92 年 2 月より国分工場に勤務し, UHV 変圧器関係の開発を担当, 現在に至る。IEEE 会員。