外鉄形変圧器絶縁モデルの

交流V-t特性とインパルスV-N特性

正員 岡部 成光 (東京電力)	正員 岸 章夫 (三菱電機)
正員 大野 高宏 (東京電力)	正員 青野 一朗 (三菱電機)
正員 財満 英一 (東京電力)	正員 細川 登 (三菱電機)

AC V-t and Impulse V-N Characteristics of Shell-Form Transformer Insulation Model
 Shigemitsu Okabe, Member, Takahiro Ohno, Member, Eiichi Zaima, Member
 (Tokyo Electric Power Co., Inc.)
 Akio Kishi, Member, Kazuaki Aono, Member, Noboru Hosokawa, Member,
 (Mitsubishi Electric Corp.)

In order to evaluate an appropriate level of AC test voltage for 1000kV transformers, it is necessary to make an accurate estimation of AC V-t characteristics. For the level of impulse test voltage, V-N characteristics are important to evaluate effects of impulse stress repetition. Since both of the characteristics are dependent on insulation structures and manufacturing processes of transformers, it is important to make accurate simulations on transformer insulation for reliable insulation data.

To obtain some of the basic data for 1000kV transformer test levels, long time AC V-t tests and impulse V-N tests of up to 1000 times voltage application were carried out on an insulation model simulating fundamental structure of shell-form transformers. The model is composed of a parallel electrodes system with a compound structure of pressboard barrier and oil gap.

The tests showed the following characteristics: AC V-t characteristics of up to several ten days could be described by two lines, each representing short time and long time characteristics. V-N characteristics of lightning and switching impulse were expressed by relatively flat lines, which showed decrease in breakdown voltage by less than 10% after 1000 times impulse application.

キーワード: 油入変圧器, 試験電圧, 交流V-t特性, インパルスV-N特性, 1000kV変圧器

1. まえがき

変圧器の交流試験電圧は、V-t特性を含む破壊確率分布をもとに系統の過電圧と寿命期間中の運転電圧を対象とした信頼度評価を行なって決定される。¹⁾²⁾³⁾

今回、1000kV変圧器の交流試験電圧検討に際し、油浸複合絶縁系の基礎特性調査の一環として、外鉄形変圧器内部の基本絶縁構成を模擬して交流部分放電開始V-t特性試験を行なった。⁴⁾⁵⁾⁸⁾

油浸絶縁系の交流V-t特性については従来よりいくつかの報告がなされている⁷⁾¹⁰⁾が、絶縁性能に影響すると考えられる材料の処理・管理条件等の変革もあり、今回、最新の製造技術を適用して製作した要素モデルで長時間域までの試験を行ない、V-t特性の傾き及び、時間軸に関する確率分布を調べた。

また、インパルス試験電圧に対しては、変圧器運転期間

中に、雷サージ、開閉サージストレスを繰り返し受けることを考慮して、インパルス部分放電開始電圧又は破壊電圧への繰り返し電圧印加の影響を把握しておく必要があるが、実器の絶縁要素モデルに対するインパルスV-N特性に関する報告例は少ない。

そこで、インパルスでの破壊と部分放電開始のV-N特性を求める試験を、交流V-t特性と並行して同一の絶縁モデルで行なった。試験では、雷インパルス、開閉インパルス電圧を各々、系統での運転期間中に発生すると想定されるサージの回数以上の最大1000回まで印加して、部分放電開始と破壊のV-N特性の傾きを調べた。

本論文では外鉄形変圧器の基本絶縁構造として、平等電極系で行なったこれらの試験結果について述べる。

2. 外鉄形変圧器の絶縁構造

高電圧大容量の外鉄形変圧器の高圧巻線には、高圧線路

端を中心にコイルを左右対称に配置したつづみ形コイル配置(図1)を採用している。

一般に、変圧器の巻線内の絶縁では、変圧器の交流試験電圧とインパルス試験電圧の比と油中絶縁での交流破壊電圧、インパルス破壊電圧の比の関係、あるいは、変圧器試験時の交流とインパルスでの巻線接地位置の相違等から、巻線-鉄心間(図1中○印：主絶縁部)は交流特性が、コイル間(図1中○印：コイル間絶縁部)はインパルス特性が支配的となる。

図1の巻線構造では、交流絶縁が支配的な巻線-鉄心間の電界を、上述のコイル配置によって、図2の等電位線図に示すように均等化している。¹¹⁾ また、プレスボードバリアは同質のプレスボードで製作したスペーサによって適正な寸法の油隙を確保し、ほぼ等電位線に沿って配置している。

また、インパルス試験の影響が大きいコイル間絶縁部分においても、インパルスを印加した場合には、等電位線がコイル間に配置したプレスボードバリアにほぼ沿って分布することになる。¹²⁾

従って、外鉄形変圧器の基本的な絶縁特性は、ほぼ平等な電界内でスペーサを含んだ複合絶縁系の特性と言える。さらに言えば、プレスボードよりも比誘電率が小さい油隙の特性と考えてもよい。

3. モデルの構造

今回の試験に用いたモデルの構造を図3に示す。平坦部直径105mmのステンレス製電極間に、各々プレスボード製のバリア(2.3mm厚)とスペーサ(3mm厚)で油隙を作り、平行平板形状の複合絶縁モデルを構成した。又、試験対象外である電極-油浸紙間のクサビ状間隙は、エポキシ樹脂を充填して絶縁を強化した。

プレスボードは変圧器と同様の乾燥油浸処理をした後に電極系に組み込み、試験タンクに封入して真空脱気注油した。使用した油はJIS 2号鉱油である。

試験時の油温度は常温を対象としたが、交流V-t特性試験において比較確認のため、ヒータ装置を接続して高温油での試験も実施した。

試験タンクの容積は3000ℓで、ゴム袋式コンサベータで試料油(脱気油)と大気とを隔離している。

なお、試料は全てデータ1点取得毎に交換した。絶縁処理の主な管理値を表1に示す。

4. 交流V-t特性

<4.1> 試験方法

(1) 試験電圧レベルの設定

1分間ステップアップ法により平均部分放電発生電圧を求め、その104%~80%の範囲で7レベルの電圧を設定した。

(2) 電圧印加

所定電圧まで直線上昇後、電圧を保持し、部分放電発生までの時間を測定した。測定時間範囲は数10msから数力

図1 外鉄形変圧器のつづみ形絶縁構成
Fig.1 Insulation structure of symmetrically arranged coils in shell-form transformer

図2 外鉄形変圧器のつづみ形コイル配置での等電位線図
Fig.2 Equipotential map of symmetrically arranged coils in shell-form transformer

図3 モデル構造
Fig.3 Configuration of model

表1 絶縁物の主な管理値
Table.1 Major properties of insulation samples

プレスボード水分量 : 0.5%以下
絶縁油中水分量 : 10ppm以下
絶縁油中ガス量 : 0.5%以下

月である。

(3)部分放電の検出

部分放電発生時に試験回路で発生する電気パルスをERA法で検出した。部分放電検出感度は10pCとした。尚、発生した部分放電は数千pC以上である。同時に、試料タンク内で発生する油中音波を音響センサーで検出して部分放電を確認した。図4に試験回路を示す。

(4)試験条件

試験は常温に対して実施した。2レベルの電圧については、高温での試験も行い、常温との相違を比較確認した。電圧は60Hzの正弦波であるが、系統の過電圧波形を考慮した台形波との比較も行なった。又、油浸絶縁の基礎データとして油中粒子数を約1桁減少させた条件でのV-t特性も取得した。

<4・2> 試験結果及び検討

(1)常温油での特性

図5に、部分放電発生時の電圧と、部分放電パルス及び油中音波の信号波形例を示す。今回のモデルの部分放電は、いわば油隙の破壊現象であり、電気パルス、音響信号とも明瞭に検出することができた。

図6に、部分放電開始の交流V-t特性試験の結果を示す。図中、□印中の数値は、電圧上昇中に部分放電が発生した数、○印中の数値は、試験打ち切りまで発生しなかった数を示す。○印は部分放電発生点を示す。電圧レベル80%~86%において傾斜は緩やかになる傾向がみられる。

各電圧レベルについて、時間に関するワイブルプロットから50%確率を示す点(図中×印)を求め、短時間域と長時間域の2直線に近似して50%部分放電確率を示すV-t特性の式を、各々(1)式として求めた。

$$V = K \cdot t^{(-1/n)} \quad (1)$$

その結果、傾きを示すn値は短時間領域32.6、長時間領域97.7となった。V-t特性を2直線で表わした場合の屈曲点は数時間のオーダーになると推定される。

表2に、各電圧レベルでのワイブル分布の形状パラメータを示す。また、時間に関するワイブルプロットの例を図7に示す。

形状パラメータは、初期故障型を示す値となっている。すなわち、部分放電特性は油隙に存在する弱点が、顕在化した結果として現れたものと考えられる。

また、各電圧レベル毎の形状パラメータは、高電圧の領域から、低電圧の領域に移るに従い値が小さくなる傾向が見られる。これは長時間域から短時間域へのV-t特性の変化を示す指標の一つとも考えられる。

これらの値は、従来報告されている値¹⁾と大きくは変わっていないが、今回の試験で、従来あまり明確でなかった数十日までの長時間域での50%確率点データを得ることができた。これは、本モデルの系が平等電極系であるために、例えば、油中に存在する塵埃等が電界によって動きながら電極内全域で弱点として振舞い得るのに対し、電界集中部をもった系では、それらが局所的な高電界部に存在す

図4 試験回路
Fig.4 Circuit diagram

図5 部分放電の測定例
Fig.5 Signals generated at partial discharges

図6 交流V-t特性
Fig.6 AC V-t characteristics

表2 各電圧での形状パラメータ
Table.2 Shape parameters
at various voltage level

電圧レベル(%)	104	100	93	89	86	83
形状パラメータ	0.43	0.41	0.44	0.40	0.37	0.30

図7 時間に関するワイブルプロット
Fig.7 Weibull distribution concerning
with the time to partial discharge inception

る確率が少ないなど、構造の違いに起因するものと考えられる。

(2) 油中粒子を変化させた場合の特性

油浸絶縁の基礎データの1つとして、油中粒子数をパラメータとした場合の特性を取得した。フィルターによりタンク内の油中粒子数を約1桁減少させた場合の特性を図8に示す。試験方法はフィルター無の場合と同様に、ステップアップ法で求めた平均部分放電開始電圧を100%としている。この場合も傾き n は、短時間域34.5、長時間域123となり、形状パラメータも表3に示す値となった。フィルター無の場合と比較し傾斜はやや緩やかになる傾向にあるが、大きな差は見られなかった。

(3) 台形波と正弦波の比較

系統で発生する短時間交流過電圧を考慮する場合、避雷器動作時の台形波と、定常時の正弦波の特性を比較しておく必要があり、短時間域について正弦波と台形波の比較を行なった。台形波はMOA素子を用いて成形し、波高値率を約0.75となるよう調整した。波形例を図9示す。台形波と正弦波の部分放電発生までの時間の比較を図10に示す。50%確率点(図中●,▲印)を比較すると両者間に大きな差はない。

(4) 高温油での特性

高温油に関しては、これまでに55~65℃でのV-t特性¹⁾が報告されているが、今回、より高温域も確認しておくべく、温度を80±2℃に設定した。電圧レベル100%,93%について常温油の場合と同様の試験を行った。結果の比較を表4に示す。高温油での50%部分放電発生時間(t_{50})は、常温に比べて長くなる、すなわち耐電圧値は高くなるが、形状パラメータ(a)は、ほぼ同等の値となった。従って機器のV-t特性を、常温油の特性で代表させても支障はないと考える。

表4 高温油と常温油の比較

Table.4 Comparison of 50% failure-time and shape parameter between high temperature and normal temperature

	100%電圧		93%電圧	
	t_{50} (分)	a	t_{50} (分)	a
常温油	0.64	0.41	4.0	0.44
高温油	1.1	0.43	8.5	0.41

図8 交流V-t特性(フィルタ処理油)
Fig.8 AC V-t characteristics
(with oil filtering)

表3 各電圧での形状パラメータ(フィルタ処理油)
Table.3 Shape parameters at various voltage level (with oil filtering)

電圧レベル(%)	105	100	92.5	85	82.5	80
形状パラメータ	0.44	0.39	0.42	0.42	0.30	0.26

図9 台形波波形
Fig.9 Clipped waveform

図10 60Hzの正弦波と台形波での部分放電発生までの時間の比較
Fig.10 Comparison of time to partial discharge inception between sinusoidal wave and clipped wave at 60Hz

5. インパルスV-N特性

< 5・1 > 試験方法

(1) 試験電圧の設定

雷インパルス、開閉インパルス試験ともに、ステップアップ法で50%部分放電発生電圧と破壊電圧とを求め、この電圧を100%として約90%の電圧までの範囲で3~4レベルの印加電圧を設定して、部分放電発生又は、破壊まで正極性電圧を繰り返し印加した。最大印加回数は1000回である。電圧印加間隔は3分とした。尚、雷インパルスについては、正負交互印加の影響についても調べた。

(2) 印加電圧波形

印加したインパルス電圧は以下の波形である。

- ・ 雷インパルス : 1.2/50 μ s
- ・ 開閉インパルス : 100/1000(0)/200(90) μ s

(3) 部分放電の検出

試験の効率化のため、図11に示すように、同一タンク内に複数個の試料を設置した。また、部分放電試験では、電圧を複数試料に同時に印加した場合もある。

タンクには観測窓を設けており、部分放電は油隙の発光を直接または光ファイバーを介して、カメラで検出した。交流部分放電で確認した結果では、数千pCの放電を検出する感度があった。インパルス試験で発生した部分放電は、10⁻⁴pC以上である。尚、試料側でのファイバー設置位置については、電界解析によって試験対象部の電界に影響を与えていないことを確認している。

< 5・2 > 試験結果及び考察

図12は、光ファイバーを用いて複数試料の部分放電による発光を、同時に検出している例である。光ファイバーは、複数本を束ねて受光面積を油隙の開口部とほぼ同等に大きくしたので、特に高感度の撮像装置を用いることもなく簡便に検出することができた。

図13に雷インパルス電圧での部分放電と破壊のV-N特性を、図14に開閉インパルスでのV-N特性を示す。図に

図11 インパルス試験時の試験装置
Fig.11 Experimental setup for impulse voltage tests

図12 部分放電の検出例
(a) 光ファイバー端の外観 (b) 部分放電による発光

Fig.12 Example of optical detection of partial discharges

(a) Outside view of the end of optical fiber
(b) Detected optical signals

図13 雷インパルスV-N特性
Fig.13 V-N characteristics of lightning impulse voltage

図14 開閉インパルスV-N特性
Fig.14 V-N characteristics of switching impulse voltage

において○印は部分放電発生点、●印は破壊点を示し、□内の数値は、1回の印加で破壊又は部分放電が発生した回数を、○内の数値は、1000回まで現象が起らなかった回数を示す。

各電圧レベルにおいて、50%確率を示す回数（図中×印）をワイブルプロットにより求めた。V-N特性は平坦な傾きとなることを示しているため、その回帰式を、(2)式とみなしてV-N特性の式を求めた。

$$V = K \cdot N^{(1/n)} \quad (2)$$

V-N特性の傾きを示すn値は、表5に示すように、いずれの場合も65.1~80.9と平坦な傾きとなっており、n=65.1の場合でも1000回印加での低下は約10%である。

図15に、印加回数に対するワイブルプロットの例を示す。このように、いずれの電圧レベルにおいても、横軸（印加回数）方向のパラッキは2桁以上あり、ワイブル分布の形状パラメータも0.37~0.78となり、初期故障型となっている。

このことから、V-N特性は繰り返し印加による絶縁物の劣化よりも、むしろ、平等電極系内の油隙やプレスボードバリアの弱点が本来持っている破壊確率に従った印加回数の効果が現れた結果と考えられる。

又、比較のため、正極性電圧と負極性電圧を交互に印加した場合の影響を雷インパルスについて調べた。試験系は平等電極系であるため、部分放電開始特性については差はなかったが、破壊特性では図16に示すように、傾きはn=39.7となり、単極性よりも印加回数の影響は大きい。これは破壊前の部分放電による電荷蓄積の影響によるものと考えられる。尚、この特性は、印加回数の増加に伴って直線的に下がるのではなく、漸近的に部分放電の特性に近付いて行くものと推定できる。

6. まとめ

1000kV変圧器の試験電圧検討に関し、油浸絶縁系の基礎絶縁特性を把握する試験の一環として、外鉄形変圧器の絶縁構造（巻線-鉄心間およびコイル間）を模擬した平行平板複合絶縁モデルでの長時間交流V-t特性試験と、雷インパルス・開閉インパルスのV-N特性試験を行ない、以下のような結果を得た。

(1) 交流部分放電開始V-t特性では、数十日の範囲において、短時間域、長時間域の2直線で表わせるデータが得られ、その傾きは各々32.6, 97.7であった。

また、時間軸に関するワイブル分布の形状パラメータは0.30~0.43であり、初期故障型であった。

(2) 交流放電開始V-t特性に関しては、高温油と常温油、正弦波と台形波、油中粒子の変化に対して各々比較試験を実施し、傾き、形状パラメータとも常温・正弦波・フィルタ無しの基準ケースと変わらないことを確認した。

(3) 雷インパルス・開閉インパルスのV-N特性では破壊特性、部分放電特性ともn値は65.1~80.9であり、1000回印加での低下は10%以下となって平坦な特性を示すこと

図15 印加回数に関するワイブルプロット
Fig.15 Weibull distribution concerning with the number of impulse voltage application

表5 V-N特性のn値
Table.5 n values of Impulse V-N characteristics

	雷インパルス	開閉インパルス
破壊特性	75.6	80.9
部分放電特性	70.5	65.1

図16 雷インパルス正負交互印加時のV-N特性
Fig.16 Effect of polarity alternation on impulse V-N characteristics

が判った、印加回数に関するワイブル分布の形状パラメータは、0.39~0.78であり、初期故障型であった。

(平成6年7月27日受付)

文 献

- (1) 「絶縁設計の合理化」：電気協同研究
第44巻 3号 昭和63年
- (2) 岡部・財満・河野：「ワイブル分布関数による変電機器の絶縁の信頼性評価について」
電学論誌 A113巻 11号 平成5年
- (3) 財満：「変電機器の絶縁合理化に関する最近の研究動向」電学論誌 B114巻 3号 平成6年
- (4) 山田直平：「UHV交流送電」電学誌 昭和57年5月
- (5) 電力中央研究所 UHV送電特別委員会 機器部会
「UHV交流機器の試験電圧に関する検討」第8次報告
昭和57年
- (6) 田邊 愈：「100万V昇圧に向けた技術開発・建設について」平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会
No.575
- (7) 電気学会：「最近の油浸絶縁と将来展望」
電気学会技術報告 (II部) 第224号 昭和61年
- (8) 電気学会：「V-t特性からみた500kV油入変圧器の交流絶縁試験の検討」電気学会技術報告 (II部)
第47号 昭和51年
- (9) 池田・井上・矢成：「変圧器複合絶縁強度の確率分布とV-t特性」電学論誌 101巻 10号 昭和56年
- (10) 矢成・池田・寺西・井上：「UHV変圧器の長期信頼性に関する一考察」電学論誌 103巻 4号 昭和58年
- (11) 岡部・大野・財満・他：「外鉄形変圧器絶縁要素モデルの交流V-t特性」平6全大 No.952
- (12) 岡部・大野・財満・他：「外鉄形変圧器絶縁要素モデルのインパルスV-N特性」平6全大 No.953

岡部成光

(正員) 1958年9月18日生。1981年3月
東京大学工学部電気工学科卒業。1986年
3月同大学大学院博士課程修了。同年4月
東京電力(株)入社。主として、変電機器
の診断技術および絶縁協調の研究に従事。
現在、技術研究所電力研究室主任研究員。
工学博士。1993年電気学会論文賞受賞。

大野高宏

(正員) 1964年10月9日生。1988年3月
北海道大学工学部電気工学科卒業。1990
年3月同大学大学院修士課程修了。同年4月
東京電力(株)入社。主として、変電機器
診断技術の研究に従事。現在、技術研究所
電力研究室勤務。

財満英一

(正員) 1949年10月28日生。1974年3月
東京大学工学部電気工学科卒業。1990年
6月マサチューセッツ工科大学大学院
修士課程終了。1974年東京電力(株)入社。
主として、変電技術およびUHV等の
絶縁協調の検討、研究に従事。現在、技術
研究所電力研究室副研究室長。
1993年電気学会論文賞受賞。IEEE会員。

岸 章夫

(正員) 1946年6月3日生。1970年3月
大阪大学工学部電気工学科卒業。1972年
3月同大学大学院工学研究科修士課程修
了。同年4月三菱電機(株)入社。
同社赤穂製作所で電力用変圧器の研究開発
に従事。

青野一朗

(正員) 1954年11月29日生。1977年3月
大阪大学工学部電気工学科卒業。1979年
3月同大学大学院工学研究科修士課程修
了。同年4月三菱電機(株)入社。
同社赤穂製作所で電力用変圧器の研究開発
に従事。

細川 登

(正員) 1951年1月26日生。1973年3月
京都大学工学部電子工学科卒業。1975年
3月同大学大学院工学研究科修士課程修
了。同年4月三菱電機(株)入社。
同社赤穂製作所で電力用変圧器の研究開発
に従事。