UDC 621.314.212.027.7.048.2-192

論 文

58-B34

UHV 変圧器の長期絶縁信頼性に 関する一考察

正 員 矢 成 敏 行 (東京芝浦電気)
 正 員 池 田 正 己 (東京芝浦電気)
 正 員 寺 西 常 治 (東京芝浦電気)
 正 員 井 上 保 (東京芝浦電気)

1. ま え が き

昭和 60 年代中ごろに予定されている UHV 送電については現在 UHV 送電特別委員会を中心にその実用化への基礎検討が精力的に進められ、既に目標電圧として 1,100 kV が選定されている⁽¹⁾。この委員会の機器部会での検討によれば UHV 変圧器の開発の困難さは絶縁試験電圧の選定レベルによって、大きく左右されることが明らかになっており、現在、既にその選定作業に入っている⁽²⁾。

UHV 送電では、酸化亜鉛形避雷器を採用できるのが基本的には 500 kV より、一段と低減絶縁の採用が可能と考えられている⁽³⁾。しかし、それは絶縁試験電圧の低減に関して、これまで以上の確固たる裏付けがあることが前提としてある。機器部会はこの点に鑑み精力的な調査を進めてきたが、下記の問題に実験データの充実が必要であると中間報告している⁽⁴⁾。

- (1) 油入絶縁の部分放電開始 $V-t$ 特性の正確な把握
- (2) UHV 交流運転ストレスに対する長期絶縁信頼性の検証
- (3) 複合ストレスに対する絶縁信頼性の検証
 - (a) サージ重量
 - (b) 温度、短時間過負荷による気ほう形成
 - (c) 油の流動、流動帯電

筆者らは、これらの要請に呼応して、(1)と[(3)(c)]項の問題について、すでに調査を進め報告して

きた⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。それらに引き続き本報では 3 年間にわたる変圧器要素モデルについての長期課電試験結果などを中心に(2)の問題と、複合ストレス問題で最も大きな比重を占める[(3)(a)]項すなわち交流と開閉インパルスの重畳問題を調査した結果を述べる。また、試作した UHV プロトタイプ変圧器の長期課電試験の内容を報告する。更に、これら調査結果をもとにした交流絶縁試験法の一決定法を提案する⁽⁹⁾。

2. 長期課電試験とその結果

前章で述べた各種ストレスのうち、ここでは交流運転ストレスに対する検証について述べる。長期課電試験を実施したのは絶縁要素モデルと試作した UHV プロトタイプ変圧器である。

〈2・1〉 絶縁要素モデルの長期課電試験 変圧器の代表的絶縁要素であるターン間、セクション間、主ギャップの絶縁について図 1(a)~(c)の形状でのモデルの長期課電試験を行なった。表 1 に、長期課電電圧と時間を示す。電圧は長期間にわたり $\pm 1\%$ 以下に安定させる定電圧装置によって安定化させた。部分放電は自動計測され、その下限測定限度は 70~90 pC である。

(i) ターン間モデル 別報で報告したように、初期特性測定用として試料を 200 個製作し、雷インパルス、開閉インパルス、交流の 0.2 秒、1 分間電圧に対する部分放電開始電圧(PDV)と破壊電圧(BDV)の確率分布および等確率 PDV- t と BDV- t 特性をすでに求めている⁽⁶⁾。

その結果によれば交流 1 分間の 50% 確率 PDV は 58.8 kV であり、46 kV において 20 個のモデルとも 4 日間無部分放電であった。 $V-t$ 特性の傾きを $V \propto t^{-1/n}$ の式で表わせれば数時間まで $n \approx 45$ 程度、それ以降では $n \approx 89$ 程度に平坦化した。

Long-Term Reliability for UHV Transformer Insulation. By Toshiyuki Yanari, Member, Masami Ikeda, Member, Tsuneharu Teranishi, Member & Tamotsu Inoue, Member (Toshiba Corporation).

矢成敏行: 正員, 東京芝浦電気株式会社
 池田正己: 正員, 東京芝浦電気株式会社
 寺西常治: 正員, 東京芝浦電気株式会社
 井上 保: 正員, 東京芝浦電気株式会社

同様な工場試験を完了後、工場の屋外試験ヤードで長期課電試験に入った。

図3に試験回路を示すように、プロトタイプ変圧器は、三次巻線から励磁され、中性点はその三次巻線の励磁電圧でつきあげられている。試験電圧および経過時間は表2に示すような三つのステップで行なわれ、全期間をとおして、部分放電⁽¹⁾、静電気帯電量および油中溶存水素ガスの自動監視あるいは計測を行った。

この他、毎月、部分放電と油中可燃性ガスを精密測定した。測定データの一部を表2に示す。内部部分放電の発生はなく、測定値に異常は認められなかった。

1.2E 11,400時間の無部分放電の試験結果から、油入絶縁の部分放電開始 $V-t$ 特性を用いてプロトタイプ変圧器の長期信頼性を評価した結果を図4に示す。
 〈2・1〉 節および筆者らの別報(6)で述べたように油入変圧器の絶縁要素の $V-t$ 特性の傾き n は数秒から数時間まで 30~45 であり、数時間以上では 60~90 に平坦化する。いま、運転電圧 1.0E で期待寿命 30

図3 UHV プロトタイプ変圧器の試験回路
 Fig. 3. Test circuit for UHV proto-type transformer.

表2 UHV プロトタイプ変圧器長期課電試験結果

Table 2. Result of long-term PD test for UHV proto-type transformer.

ステップ	印加電圧 (1.0E=1,200 kV/ $\sqrt{3}$)	印加時間	各種測定結果		
			部分放電 (バックグラ ンドノイズ) (pC)	中性点直 流電流 (μ A)	油中水素 ガス量 (ppm)
I	1.0E	502 (21日)	無 (100~150)	-0.06 -0.07	2
II	1.1E	3,030 (126日)	無 (100~150)	-0.07 -0.08	3
III	1.2E	11,400 (1.30年)	無 (120~150)	-0.07 -0.09	5

図4 UHV プロトタイプ変圧器の長期課電試験の評価

Fig. 4. Evaluation of long-term PD test for UHV proto-type transformer.

年間の無部分放電が検証されたかどうかを評価するために、PDV- t 特性が短時間域の 30~45 の傾きのままで低下すると仮定すると図4に示すように一定の課電電圧に対する運転時間を検証達成ゾーン、検証未達成ゾーン、およびその中間のゾーンに分けることができる。この中間ゾーンとは PDV- t 特性の傾きが小さいデータを引用すると達成されるが、傾きが大きなデータでは未達成であることを意味する。

図4の下側の横棒で示した 1.2E 11,400 時間という長期課電試験結果は十分に検証達成ゾーンに達している。この変圧器は工場内において 1.5E 2時間の長時間部分放電試験を行っており、これも同図の上側の横棒に示す。これら二つの横棒で示すようにこの変圧器は 1.0E 30 年無部分放電を二点で検証したことになる。

〈2・3〉 検討と考察 絶縁要素モデルと UHV プロトタイプ変圧器の長期課電試験の実施により検証された事からを列挙すると次のとおりである。

(1) これまで油入絶縁の部分放電開始 $V-t$ (PDV- t) 特性は 10 時間以内の時間帯で求められてきた。変圧器の交流運転寿命をこれら PDV- t 特性を直線延長することにより論じる考え方がすでに一般化している⁽¹²⁾。しかし、 $V-t$ 特性にはいくつかのパターンがあり、長期間帯域で上方へ屈曲して平坦化するもの、あるいは下方へ屈曲するものなどのパターンがある⁽¹³⁾。油入絶縁の PDV- t 特性が下方へ屈曲するタイプであれば、これまでの変圧器絶縁寿命の考え方は根本的にくずれることになる。

〈2・1〉 節で述べた絶縁要素モデルによる長期課電試験の結果により、小ななくとも 3 年間までは PDV- t 特性は下方屈曲は認められなかった。

(2) セクション間モデルについては PDV- t 特性の延長線上を上まわる電圧 50kV を課電電圧に選ぶ

ことにより、少なくとも $n=84$ まで平坦化することを確認した。

(3) 主ギャップモデルでは、交流1分間に対する50% 確率 PDV, V_{50} (160 kV) の62.5%である100 kVで3年間部分放電の発生はなかった。

油入複合絶縁では threshold 電圧 V_0 すなわち、これ以下の電圧では部分放電が発生しない下限電圧が存在すると考えられる。セクション間モデルで V_{50} の64%, 主ギャップモデルで V_{50} の62.5%の電圧で3年間以上も部分放電が発生しなかったことから、この V_0 値は V_{50} の60%数%近くに存在することがわかってきた。

(2)でセクション間の PDV- t 特性は $n=84$ にまで平坦化すること述べたが、この平坦化は上述の V_0 の存在により現われ、現象的にはこれ以下の電圧では部分放電が発生しないことを意味する。従って、PDV- t 特性の傾きの度合を示す指数である n は無限大になるべきで、 $n=84$ は実際に検証された時間の長さで決まり、必ずしもその数値自体はあまり意味はないと考えられる。

(4) 試作した UHV プロトタイプ変圧器について1.2 倍の電圧で、1年間以上の長期課電試験を実施した。前述したように、 $V-t$ 特性から、1.2E 1年間の課電は、最高運転電圧で30年以上運転したことに相当し、実器の絶縁構造で、変圧器の期待寿命を検証したことになる⁽¹⁴⁾。

3. 交流電圧に重畳した開閉インパルス試験

開閉インパルス (S. Imp) 重畳試験は変圧器絶縁モデルと試験用変圧器および、UHV プロトタイプ変圧器について実施した。

〈3.1〉変圧器絶縁モデルについての試験 変圧器絶縁モデルの形状を図1(d)に示す。絶縁階級は、100号相当である。モデルの個数は5個である。乾燥注油などの処理は、EHV 変圧器なみの基準で行なった。供試モデルに試験用変圧器から交流電圧 (50 Hz) を印加しておき、球ギャップで分離されたインパルス発生器から、S. Imp (+200×2,000 μ s) を重畳した。位相調整はこの試験で行っていない。

重畳試験に先立ち、5個のモデルの交流部分放電特性を測定した。結果を図5に示す。#5のモデルの部分放電特性が極端に悪く、部分放電開始電圧 (PDV) は1.5E (E : 100号の常規対地電圧) で、部分放電消滅電圧 (PDEV) は0.9Eであった。#2モデルはPDVとPDEVとも2.0Eであった。#1, 4モデルは部分放電特性は良好で、PDV, PDEVとも2.5E

図5 変圧器絶縁モデルの部分放電特性

Fig. 5. PD characteristics of transformer insulation models.

以上であった。S. Imp 重畳試験の結果を表3(a)に示す。S. Imp は BIL の83%⁽¹⁵⁾の457 kVを100%と表示し、表中の $N/10$ とは10回印加し、 N 回だけ部分放電を誘発したことを表す。

表3(a)に示すように、#2, 3, 5モデルで部分放電の誘発があった。これらのモデルは、いずれもヒステリシス特性があり、部分放電の誘発には、部分放電のヒステリシス特性が関与している様である。部分放電が誘発したケースは合計9ケースあったが、これらの詳細データを表3(b)に示した。#2, 3モデルは部分放電を誘発したが、3分以内に消滅した。部分放電特性が最も劣る#5モデルでは電荷量も500 pCと他モデルと比べ大きく、3分以上持続するケースが多い。

〈3.2〉300 kV 試験用変圧器についての試験

この試験用変圧器 (T.Tr) は1955年に絶縁階級140号で設計・製作され、これまで高電圧の耐圧試験に供されていた。部分放電特性はPDVやPDEVが安定しており、大きなヒステリシス特性があった。そのPDV, PDEVおよび部分放電量を図6に示した。

部分放電は図6に示したように、④、⑤および⑥の三種に見分けられ、部分放電のパターンから、④、⑤はボイド放電、⑥は高電圧電極近傍の電界集中点での沿面で発生していると推定された⁽¹⁶⁾。

S. Imp は高圧回路に入れたシャ断器を再閉路させて発生させる方法 (H. T 発生法) と T. Tr の低圧巻線から誘導で発生させる方法 (L. T 発生法) の二通りで試験した。それぞれの試験回路を図7(a), (b)に示した。

実系統での開閉サージの発生に酷似した H. T 発生法は空気シャ断器 (ABB) を閉→開→閉させて S. Imp を発生させる。最初の閉→開で C_1 (0.03 μ F) のコンデンサに交流の波高値に近い電圧が残留する。次の開→閉で C_1 のコンデンサに充電された電圧が L_1 (0.2 H)

表 3 変圧器絶縁モデルにおける開閉インパルス重畳試験結果
Table 3. Test result of switching-impulse superposed test for transformer insulation models.

(a)						
交流電圧	開閉インパルス電圧	#1モデル	#2モデル	#3モデル	#4モデル	#5モデル
1.0E (115kV/ $\sqrt{3}$)	0.8 S.Imp	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
"	0.9 S.Imp	"	"	"	"	"
"	1.0 S.Imp	"	"	"	"	"
1.2E	1.2×0.8 S.Imp	"	"	"	"	"
"	1.2×0.9 S.Imp	"	"	"	"	4/10
"	1.2×1.0 S.Imp	"	1/10	"	"	6/10
1.4E	1.4×0.8 S.Imp	"	0/10	"	"	10/10
"	1.4×0.9 S.Imp	"	"	2/10	"	"
"	1.4×1.0 S.Imp	"	1/10	5/10	"	"

(b)									
ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9
変圧器モデル (No.)	# 2	# 2	# 3	# 3	# 5	# 5	# 5	# 5	# 5
交流電圧	1.2E	1.4E	1.4E	1.4E	1.2E	1.2E	1.4E	1.4E	1.4E
開閉インパルス電圧	1.2×1.0 S.Imp	1.4×0.8 S.Imp	1.4×0.9 S.Imp	1.4×1.0 S.Imp	1.2×0.9 S.Imp	1.2×1.0 S.Imp	1.4×0.8 S.Imp	1.4×0.9 S.Imp	1.4×1.0 S.Imp
部分放電発生率 (%)	10	10	20	50	40	60	100	100	100
電 荷 量 (pC)	86	35	100~140	53~350	500	500	500	500	500
消滅までの 時間と頻度	1 分	0	1	2	4	1	0	0	0
	2 分	0	0	0	1	0	2	0	0
	3 分	1	0	0	0	2	1	0	0
	3分以上 を継続	0	0	0	0	1	2	10	10

と ab 間の C_2 で構成される直列回路で放電され、開閉サージを発生する。この H.T 発生法ではどの程度の S. Imp が発生するかは残留電圧や再投入位相に依存するので予測できない。

L.T 発生法は図 7(b) に示した C_0 に直流を充電しておき、高速度投入器を指定の位相で投入させることにより、T.Tr の高圧巻線に S. Imp を発生させた。PD の持続時間は 1 時間まで確認し、それ以上持続したときは交流電圧を切り、PDV が元に戻るまで休止させた。

L.T 発生法での S. Imp 重畳試験結果を表 4 に示した。表には一定に保持された交流電圧と 5 回重畳された 140 号の常規対地電圧の波高値に対する S. Imp の大きさ、PD の誘発回数、誘発された PD のタイプと持続した時間を示した。

最も低い電圧で発生する A タイプの PD は、AC 50 kV では 1 回も誘発されなかった。AC 電圧を

図 6 300kV 試験用変圧器の部分放電特性
Fig. 6. PD characteristics of 300kV testing transformer.

(a) HT 発生法

(b) LT 発生法

図 7 試験回路
Fig. 7. Test circuits.

60, 70 kV に上げると PD は誘発されるが、10 分以内に消滅した。AC 電圧を更に PDEV 以上の 80, 90 kV に上げると 1 時間以上持続し続けるケースがでる。すなわち、AC 電圧が PDEV 以下では PD が誘発されても消滅するが、PDEV 以上では PD は持続し続けることがある。この現象は B タイプの PD でも同様であった。C タイプの PD に関しては PDV より僅かに下まる AC 110 kV で S. Imp を重畳させたが、1 度も誘発されることはなかった。

H.T 発生法における S. Imp 電圧は L.T 発生法よ

表 4 L.T 発生法での 300kV 変圧器の開閉インパルス重畳試験結果

Table. 4. Test result of switching-impulses superposed test by L.T method for 300kV testing transformer.

交流電圧 (kV)		50		60		70		90		110	
S.Imp (p.u)		3	4	3	4	3		3		3	
PDタイプ		A		A		A	B	A	B	A	B
PD誘発回数		0/10		3/5		3/5	0/5	4/5	1/5	5/5	4/5
PD 持続 時間	1 分以内	—	3	1	—	2	1	0	1	0	2
	10 分以内	—	1	2	—	0	0	0	2	0	0
	1 時間以内	—	0	0	—	2	0	1	1	0	1
	" 以上	—	0	0	—	0	0	4	0	3	0

り低い 1.31~1.40 pu であったが、この場合においても L.T 発生法と同様な結果を示した。つまりこの方法でも S.Imp 重畳により PD が誘発されるか否かは印加されている AC 電圧に依存した。すなわち、誘発し始めるのは AC 60kV で、1 時間以上持続するのは AC 80kV からである。この H.T 発生法による結果は、S.Imp の波高値の高い L.T 発生法による結果とはほぼ同じであった。これらの結果から、PD が S.Imp で誘発され、その波高値には依存しないことがわかった。

〈3.3〉 UHVプロトタイプ変圧器の開閉インパルス重畳試験 試験回路を図 3 に示す。この試験ではプロトタイプ変圧器の中性点は接地した。基本的にはこれまで述べてきた L.T 発生法と同じ方式である。S.Imp 印加の前後の部分放電は中圧ブッシングのブッシングタップで測定した。

図 8(a) に開閉インパルス単独印加時の波形をまた同 (b) に交流電圧に開閉インパルスを重畳したときの波形を示す。後続交流波形は若干ひずんでいる。

UHV 系統における開閉サージレベルについては検討が進められているが、1.6 p.u に抑える計画となっている⁽⁴⁾。重畳試験はそれを勘案して、まず交流電圧を 1.0 E とし、0°, 90°, 180°, 270° の位相で 1.4, 1.5 および 1.6 p.u の電圧をそれぞれ 50, 20 および 10 回重畳印加した。次に交流を 1.1 E に上げ、同様に試験を行なった。結果は、これら S.Imp の重畳によっても変圧器の内部部分放電が誘発されることは一度もなかった。

〈3.4〉 検討と考察 油入絶縁の部分放電特性が不安定で、再現性を示しにくいことはよく知られている⁽¹⁶⁾。従って、これらの試験結果に明確な共通性を見出すことはむづかしいが、次に列挙する事からは共通に言えるようである。

(1) 部分放電特性にヒステリシスのある部分放電

のタイプは開閉インパルス (S.Imp) の重畳により誘発され易いようである。ボイド性の部分放電は典型的に誘発され易いタイプであり、他方、誘発されにくいタイプの部分放電もある。以下に述べるのは部分放電が誘発され易いタイプのみについてである。

(2) PDV や PDEV が交流運転電圧に対し、十分高い場合の部分放電は S.Imp で誘発されない。例えば表 3 の #1, #4 モデルは 1.4 E でも誘発されなかったが、#1, #4 の PDV や PDEV は 2.5~3 E であり、2 倍の余裕があった。また、表 4 に示すように 50 kV では 1 度も誘発されなかった 300kV T.Tr は PDEV は 70kV であった。この場合の余裕は 1.4 (=70/50) であった。

(3) PDV が交流運転電圧の 1.4 倍以下のときは部分放電が誘発されることがある。しかし PDEV が

(a)

(b)

図 8 開閉インパルス重畳試験の波形

Fig. 8. Oscillograms of switching-impulses superposed test.

交流運転電圧以上であれば、ほとんど数分以内に自然消滅してしまう。一方、PDEV が交流運転電圧を下まわるときは部分放電が1時間以上持続することがある。

(4) 部分放電が持続するかどうかは S. Imp 波高値には依存せず、重畳される交流運転電圧のみで決まる。

4. 交流絶縁試験電圧の新しい決定法

交流絶縁試験の役割りについてはこれまで議論の多いところであった⁽¹²⁾。最近の UHV 機器部会の調査研究により、30 年間の常規運転電圧に対する強度は長時間部分放電試験で、系統での持続性異常電圧は交流短時間試験で検証すべきとの同意が機器部会でほぼ固まりつつある⁽⁴⁾。このことを前提として、交流の長、短時間試験電圧と時間の新しい決定法について以下述べる。

筆者らによる部分放電開始 $V-t$ (PDV- t) 特性や確率分布の調査研究により、ある時間幅の電圧が N 回繰返し印加された場合に部分放電が発生するかどうか確率値として求められるようになった⁽⁶⁾。その研究結果によれば部分放電開始確率分布と $V-t$ 特性は次の一般式で与えられる。

$$P = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{V}{V_1} \right)^m \left(\frac{t}{t_1} \right)^a \right\} \dots\dots\dots (1)$$

変圧器バリヤ絶縁の場合は、印加電圧時間幅が 0.2 秒や 1 分の短時間域では、 m および a がそれぞれ 11.75, 0.43 という値が実測されている⁽⁶⁾。PDV- t 特性の傾き n は m/a で関係づけられ、 $n=27.5$ である⁽⁶⁾。

(1) 式より、試験電圧 V_t 、時間 t_t の 1 回の交流短時間試験による部分放電の発生確率 P_t (V_t , t_t , 1 回) は次式で与えられる。

$$P_t(V_t, t_t, 1 \text{ 回}) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{V_t}{V_1} \right)^m \left(\frac{t_t}{t_1} \right)^a \right\} \dots\dots\dots (2)$$

一方、全寿命運転期間中に t_s 時間持続する異常電圧 V_s に N 回曝され、1 回でも部分放電が発生する確率 P_s (V_s , t_s , N 回) は確率相乗則により (3) 式で求まる。

$$P_s(V_s, t_s, N \text{ 回}) = 1 - (1 - P_t)^N \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 P_s と P_t を同じにすれば、運転中に曝されるストレスと同等の厳しさの試験を工場組立段階で課し、無部分放電であることを確認することになる。しかし、工場試験は品質保証の観点から、運転中に曝される条件より更に厳しい条件で実施すべきであり $P_t = \alpha \cdot P_s$ としたとき、 $\alpha=5$ 程度と仮定して検

図 9 交流短時間試験電圧と試験時間の計算結果

Fig. 9. Calculation result of test voltage and time for AC short-duration test.

討するのが妥当と考えられる。一般に工場試験における不合格率は 1~2% 程度に設計されることを考えると⁽¹⁸⁾、現地運転での部分放電発生確率は 0.2~0.4% ということになる。この値は変圧器の事故統計が 0.2% (年・台)、すなわち、30 年で 6% といわれる平均事故率と比べ十分に低い。従って、 $\alpha=5$ という安全率は適当な値と筆者らは考えている。 $P_t = \alpha \cdot P_s$ の条件を入れて (2), (3) 式から交流短時間試験電圧と時間 (V_t , t_t) は (4) 式のように求まる。

$$V_t^m t_t^a = N \cdot V_s^m t_s^a \frac{\ln(1 - \alpha \cdot P_s)}{\ln(1 - p_s)} \dots (4)$$

式中の V_s は持続性異常電圧、 t_s はその継続時間、 N は全寿命期間中に持続性異常電圧に曝される回数である。 P_t は 2% で計算したが、計算結果はこの値にほとんど依存しない。

図 9(a) に 1.5 p.u., 0.2 秒 N 回に確率的に等価な試験電圧 V_t 、時間 t_t を示す。 V_t としては、現在交流短時間試験電圧として検討されている 1.73~2.4 p.u. の範囲で、全寿命運転期間中の持続性異常電圧の回数 N はたかだか数回程度と想定されるので、同図では、 $N=5$ とそれに余裕をとった回数として 2 倍の $N=10$ の二通りについて算出している。

様々な電圧と時間の組み合わせをとれるが、1.5 p.u., 0.2 秒、 $N=10$ を工場試験で検証するには 2.4 E では 0.01 秒以下、2.0 E では 0.7 秒、1.73 E では 36 秒となる。

一方、一線地絡時の健全相電圧上昇の 1.2 p.u., 0.2 秒の回数 N は 1.5 p.u. の回数と比較してはるかに多い。年に 2 回程度、50 年寿命として 100 回が目安とされているので、ここでは $N=100$ と 200 を計算した結果を図 9(b) に示した。一応 N を多めの 200 回とすると、2.4 E では 0.1 秒以下、2.0 E では 1.7

図 10 交流長時間試験電圧の計算結果

Fig. 10. Calculation result of test voltage AC long-duration test.

秒, $1.73E$ では 90 秒である。

両者の過電圧を比較してみると, 1.5 p.u. 10 回より 1.2 p.u. 200 回繰返しの方がやや厳しく, その分だけ試験時間が長くなっている。以上の試算から, 交流短時間試験電圧としては, $2.0E$ であれば 5 秒, $1.73E$ であれば 5 分程度の試験をとれば, 1.2 p.u. と 1.5 p.u. の両持続性異常電圧を検証できるという結論が引き出せる。

交流長時間試験も上と同じ考え方で理論化できる。 m と a の値は油入絶縁のバリヤ絶縁の長時間帯の実測データからそれぞれ 13.9 と 0.278 をとる。従って PDV- t 特性の傾き n は 50 ($=13.9/0.278$) となる。これらの値と $N=1$ 回, $t_s=30$ 年, $P_t (=P_s/\alpha)=0.02$, $V_s=1.0$, $t_s=1$ 時間を (4) 式に入れた計算結果を α をパラメータにして, 図 10 に示した。 $1.0E$, 30 年と同等の厳しさの試験は $\alpha=1$ の直線上で $1.283E$, 1 時間である。推奨される案は, 短時間試験と整合性をもたせた $\alpha=5$ の $1.441E$, 1 時間である。

以上の論点から, 交流の短時間および長時間試験電圧, 時間を推奨したが, どちらも, 油中絶縁の部分放電開始電圧の確率分布と $V-t$ 特性の実験データを裏づけとしている。従って, 合格規準は無部分放電とすべきである。このような試験によれば, 運転条件より 5 倍厳しい (部分放電発生確率が 5 倍高い) 試験を実施したことになり, 運転状態で部分放電を発生する虞れはまずないといえるであろう。

5. 結 論

UHV 変圧器の長期絶縁信頼性の諸問題のうち, 長期交流運転ストレスと, 開閉インパルス重畳の問題について試験結果を中心に述べた。また, 変圧器の交流絶縁試験電圧の新しい一決定法について述べた。これらの結果を要約すると次の通りである。

(1) PDV- t 特性の下方屈曲は, 少なくとも 3 年間までは認められず, 数時間以上の長時間領域での傾きは少なくとも $n=84$ にまで平坦化する。

(2) 油入複合絶縁系での部分放電開始 threshold 電圧は, 交流 1 分間 50% 確率部分放電開始電圧の 60% 近くに存在することがわかった。

(3) 開閉インパルス (S. Imp) で誘発された部分放電 (PD) が, 持続するか否かは, S. Imp 波高値には依存せず重畳される交流電圧のみで決まる。

(4) 前述した結果をもとに, 交流絶縁試験電圧の一決定法を提案し, 交流短時間試験として, $2.0E$ であれば 5 秒, $1.73E$ であれば 5 分, 交流長時間試験として, $1.441E$, 1 時間を推奨した。

最後に, 本研究の方向づけをいただきました UHV 送電送別委員会や機器絶縁部会, 宮地委員長を始めとして, 同部会の関係各位に感謝いたします。

(昭和 57 年 1 月 7 日受付, 同 57 年 8 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 山田:「UHV 交流目標電圧の選定について」電学誌 101, 225 (昭 56-3)
- (2) UHV 送電特別委員会: 第 2 次中間報告 (昭 54-7)
- (3) 池田・矢成, 他: 昭 55 電気四学会連大 S13-3
- (4) UHV 送電特別委員会: 第 4 次中間報告 (昭 55-4)
- (5) 矢成・池田, 他:「変圧器絶縁油の長期運転劣化の調査結果」電学誌 B 101, 719 (昭 56-12)
- (6) 池田・矢成, 他:「変圧器複合絶縁強度の確率分布と $V-t$ 特性」電学誌 B 101, 571 (昭 56-10)
- (7) 池田, 他:「流動油の絶縁破壊特性」電学誌 B 99, 635 (昭 54-10)
- (8) S. Shimizu, et al: IEEE Trans. Power Apparatus, Syst. PAS-98, 4, 1244 (1979-7)
- (9) 池田・矢成, 他: 高電圧研究会資料 HV-81-24 (昭 56-3)
- (10) 村田・矢成, 他: 東芝レビュー 35, 5, 458 (昭 55-5)
- (11) 後藤・井上, 他: 東芝レビュー 36, 3, 231 (昭 56-3)
- (12) 電気学会技術報告: II 部, 47 (昭 51-9)
- (13) 井関, 他: 昭 46 電気四学会連大 No. 219
- (14) 矢成・谷口, 他: 昭 57 電気学会全大 No. 626
- (15) 高電圧試験専門委員会: 開閉サージ分科会電気学会技術報告 89, 27 (昭 44-5)
- (16) F. H. Kreuger (岡田訳): 部分放電検出 (昭 41) コロナ社
- (17) 井関, 他:「交流油中コロナの特性」電学誌 81, 874 (昭 36)
- (18) CIGERE: WG 12-03 Paper 12-72 (WG-03) (1972)