Feasibility of Replacement Postponement Based on Insulation Test for Aged Gas-Insulated Power Equipment

Hisashi Goshima Member (CRIEPI, goshima@criepi.denken.or.jp)

Masafumi Yashima Member (CRIEPI, yashima@criepi.denken.or.jp)

Takatoshi Shindo Member (CRIEPI, shindo@criepi.denken.or.jp)

Tadasu Takuma Member (Tokyo Denki University/CRIEPI, takuma@criepi.denken.or.jp)

Keywords: insulation test, Weibull distribution, replacement postponement, V-t characteristics, gas-insulated power equipment

With the urgent need for cost reduction in electric power equipment, investment in equipment will be controlled and the number of aged equipment will increase in the future. Moreover, it is requested that aged equipment should be used to the utmost limit by postponing the replacement to as late a date as possible. At this time, it is important to discuss how we can evaluate and guarantee the residual lifetime of equipment. As a method of replacement postponement, there is an alternative possibility of guaranteeing the lifetime by executing an insulation test on the aged equipment again.

In this paper, we investigate long-time V-t characteristics and the meaning of AC insulation tests for gas-insulated power equipment such as gas insulated switchgear (GIS). Furthermore, we discuss the feasibility to replacement postponement by executing the insulation test on the aged equipment again.

Figure 1 shows the deterioration tendency and maintenance concept for typical power equipments. The “n” value of long-time V-t characteristics for a GIS spacer is reported to be from 10 to 16 in V-t characteristics of the spacer model without a void. Therefore, the principal deterioration factor is regarded as insulation deterioration because the “n” value is small. However, electric field stress is generally controlled in order to ensure long-term insulation

performance. In GIS, the electric field strength in a solid insulator such as the spacer after 30 years is 2 times larger than the electric field constantly applied to the solid insulator of GIS. Therefore, it is supposed that the random failure mode continue and the “bath-tub curve” (failure probability) is still flat (constant) after 30 years. In this case, it is difficult to detect insulation deterioration by some diagnosis such as partial discharge measurement as transformer and cable. On the contrary, it may be possible to prove a healthy condition by executing the insulation test on the aged equipment again after refreshment of equipment components such as gas exchange, contacts of switching devices, sealing materials, and so on. Thus, postponement of replacement may be applicable for the aged GIS. Figure 2 shows flowchart of replacement postponement for aged GIS.

From the viewpoint of replacement postponement, it is necessary to confirm the healthy condition of the inside (initially with no void) of a solid insulator, such as the spacer in GIS, if the equipment is intended for long-term use (more than 30 years). The “n” value of V-N characteristics of a solid insulator is comparatively small. Therefore, it is considered that microvoids at the interface of the electrode in the spacer are generated due to the application of repeated surge; partial discharge occurs, and deterioration progresses. From this mechanism, it is necessary to discuss whether microvoids due to repeated overvoltage are generated and if partial discharge occurs under working voltage. Therefore, it is important to prove the healthy condition of the solid insulator when two different levels (waveform or value) of voltage are applied to the solid insulator. Hence, it is necessary to acquire fundamental data on long-time V-t characteristics and statistical parameters such as “n” value that consider deterioration due to repeated overvoltage. If these fundamental data are accumulated, an insulation test method for replacement postponement of gas-insulated equipment can be proposed.

Fig. 1. Deterioration tendency and maintenance concept for typical power equipments

Fig. 2. Flowchart of replacement postponement for aged GIS

経年ガス絶縁機器の絶縁試験によるリプレイス時期延伸の可能性

正員 五島 久司* 正員 八島 政史*
正員 新藤 孝敏* 正員 宅間 董*,**

Feasibility of Replacement Postponement Based on Insulation Test for Aged Gas-Insulated Power Equipment

Hisashi Goshima*, Member, Masafumi Yashima*, Member, Takatoshi Shindo*, Member,
Tadasu Takuma*,**, Member

With the urgent need for cost reduction in electric power equipment, investment in equipment will be controlled and the number of aged equipment will increase in the future. Moreover, it is requested that aged equipment should be used to the utmost limit by postponing the replacement to as late a date as possible. At this time, it is important to discuss how we can evaluate and guarantee the residual lifetime of equipment. As a method of replacement postponement, there is an alternative possibility of guaranteeing the lifetime by executing an insulation test on the aged equipment again.

The present standards of AC insulation tests for high voltage power equipment in Japan are based on the reliability evaluation according to the Weibull distribution assumed as fault occurrence probability of the equipment. The present evaluation is not considered a proper one as it doesn't take into account non-accidental change of the equipment with time. One of the authors has pointed out this problem in a recent paper.

In this paper, we investigated long-time V-t characteristics and the meaning of AC insulation tests for gas-insulated power equipment. Furthermore, we discuss the fault probability when two different levels (waveform or value) of voltage are applied to equipment. Finally, we investigate the feasibility to replacement postponement by executing the insulation test on the aged equipment again.

キーワード：絶縁試験，ワイブル分布，リプレイス時期の延伸，V-t 特性，ガス絶縁電力機器

Keywords: insulation test, Weibull distribution, replacement postponement, V-t characteristics, gas-insulated power equipment

1. まえがき

電力輸送設備の維持・管理に対するコスト削減の要請から、各種診断技術を活用した保守・保全コストの削減、既設設備の極限までの有効活用、リプレイス（交換）時の健全部品の再利用（リユース）などが重要な課題となっている。特にこれまでは、需要増に対応した機器にリプレイスが進められ、高経年機器はあまり存在しなかったが、今後は設備投資が抑制され、高経年機器が着実に増加するとともに、リプレイス時期を極力延伸させて既設設備を極限ま

で使い切ることが求められる。このとき、機器の健全性や余寿命をどのように評価し、また保証するかが大きな課題となる。また、極限まで使用した機器は、リプレイスの際は極力健全部品をリユースすることも新設機器のコスト低減の上で有効である。さらに、アジア地域における中古品のマーケットの可能性からも、健全品のリユースは重要である。

このような観点から、筆者らは、リプレイス時期の延伸手法の一つとして、経年機器の絶縁試験による健全性評価の可能性について検討した。機器据え付け後の現地試験での過電圧の印加は、初期絶縁性能が経年とともに逆 n 乗則に従って減衰したとしても、期待寿命経過後（例えば経年 30 年）に所要の絶縁性能が維持されていることを検証するものと解釈されている。機器の絶縁性能が実際にこのような減衰特性を示すかどうかは議論が必要と考えられるが、一つの考え方として、経年機器に再度、過電圧を印加した絶縁試験を実施することにより、リプレイス時期の延伸が保

* (財) 電力中央研究所電力技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

** 東京電機大学工学部
〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2
Tokyo Denki University
2-2, Kanda-nishikimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

証される可能性がある。このようなリプレース時期の延伸方法は、有効な CBM (Condition Based Maintenance; 状態監視保全) によって機器の状態が良好に保持されていること、ユーザの自己責任を前提とする割り切りが必要となるが、過電圧印加と絶縁性能に関する長期 V-t 特性の關係に理論的説明が与えられれば、実用の可能性はあると考えられる。

一方、機器の故障確率は、構成要素の絶縁媒体や機器そのものの V-t 特性を基にしてワイブル分布で与えることが行われる。ところが、過電圧と常規電圧など異なる電圧が印加されたとき、故障確率をどのように与えるかはいまだに明らかになっていない。この点から、近年、ワイブル分布に基づく機器の信頼度計算および機器の絶縁試験法（試験電圧の選定）に関する問題点が提起されている⁽¹⁾。

以上の経緯から、本論文では、ガス絶縁開閉装置 (GIS) を中心としたガス絶縁機器を対象に、現行の長時間 V-t 特性および絶縁試験の考え方を調査するとともに、3 種類のモデルを設定して、印加時間や値の異なる電圧が印加された場合の故障確率の考え方を整理した。さらに、経年機器における再度の絶縁試験によるリプレース時期延伸の可能性について検討した。

2. GIS の長時間 V-t 特性と交流絶縁試験

〈2・1〉 長時間 V-t 特性 GIS の主たる絶縁構成は、SF₆ ガスと固体絶縁物の並列構成であり、試験電圧はそれぞれの絶縁特性を調査し、最弱の特性で検討されている。GIS に係わる絶縁媒体の長時間 V-t 特性に関する報告例をまとめたものを表 1 に示す。GIS 内部のような準平等電界での高気圧 SF₆ については、部分放電開始後、即絶縁破壊に至りやすく部分放電開始と絶縁破壊はほぼ等しいと考えられる。また、絶縁破壊は、電極表面の突起や微小な異物などによる高電界部分の弱点により生じると考えられ、絶縁破壊電圧の分布、破壊時間の分布はワイブル分布によく合っている。SF₆ ガス自体は化学的に安定であり、通常の使用状態では経年劣化は生じないと考えられている。このため、SF₆ ガスで V-t 特性が現れるのは、時間の経過とともに弱

点から放電の発生する確率が増すためであると考えられる。このことから、準平等電界（清浄時）の長時間 V-t 特性の n 値は大きく、74⁽²⁾～82⁽³⁾ と報告されている。一方、金属異物混入時では、短時間と長時間で n 値が異なるデータ⁽³⁾や、異物長によって n 値が異なるデータ⁽²⁾などが報告されているが、全般的には 30 以上となっている。

スペーサなど固体絶縁物中においては、最も電界強度の大きい部分は金属（埋込電極）と絶縁物の界面に存在する。ボイド欠陥がない場合、n=10～16 程度と評価されている⁽⁴⁾。また、絶縁破壊直前の部分放電は検出されていない。一方、ボイドありおよびなしのエポキシ注形絶縁物における絶縁破壊に対する長時間 V-t 特性においては、ボイドなしでは n=16、ボイドあり試料では n=7.3 等の報告例があり⁽⁵⁾、ボイドにより n 値は小さくなる。

〈2・2〉 交流試験電圧の選定⁽²⁾ 試験電圧と印加時間は、長時間 V-t 特性を基に決定されている。絶縁破壊の前駆現象である部分放電試験で異常を検出することが望ましいが、ガス絶縁機器では通常、部分放電発生後直ちに破壊に至るため、絶縁破壊に対する V-t 特性を用いている。

GIS の絶縁構成要素としては、ガスそのもののように劣化はなく、ある確率のもとでしか破壊が生じないと考えられるものと、固体絶縁物のように、高電界においては劣化が進行するが、使用期間では十分所期性能を保持できると解釈できる寿命検証とがある。試験電圧決定で考慮すべき絶縁特性としては、固体絶縁物は例えば 30 年というような長期の常規対地電圧に耐えることが要求される。ここで無ボイド固体絶縁物の V-t 特性から、劣化が n=10～16 の逆 n 乗則に従うとすれば、30 年後の絶縁物が耐え得る電界強度は、通常、GIS の絶縁物に常時加わる電界強度の 2 倍以上の大きさを持っていることになる。このため、固体絶縁物の劣化は考慮に入れなくてもよいと考えられ、考慮すべきはガス中の絶縁特性とされている。GIS はガス中に目視できるような異物（品質管理値として 3～5 mm 以上）は残留しないように製造されているが、現行の交流試験電圧選定のベースとなった V-t 特性データは、安全面から異物存在時のデータが用いられている。

表 1 GIS の長時間 V-t 特性に関するデータ

Table 1. Summary of data on long term V-t characteristics of GIS.

Insulation medium Condition	SF ₆ gas		Epoxy resin (spacer)	
	Clean	with metallic particle(including spacer surface)	Inside without void	Inside with void
Typical "n" values of V-t characteristics	82 ⁽³⁾ 74 ⁽²⁾	69(long time) ⁽³⁾ 30(short time: up to 10min) ⁽³⁾ 62-38(particle length 10-30mm) ⁽²⁾	10-16 ⁽⁴⁾ , 16 ⁽⁵⁾ 20.1(1min-1h), 15(more than 1000h), 8.3(1-1000h) ⁽⁶⁾	7.3 ⁽⁵⁾ 4-8 ⁽⁴⁾
Typical "a" values of V-t characteristics	0.35-0.5 ⁽³⁾ 0.25-0.5 ⁽²⁾	1(short time), 0.5(long time) ⁽³⁾ 0.6-1.3 ⁽²⁾	0.8-0.9 ⁽⁷⁾ 0.6-1.4 ⁽⁷⁾	
Typical "m" values of V-t characteristics	20-25 ⁽²⁾	30-35 ⁽³⁾		
Typical "n" values of V-N characteristics		Spacer surface LI*1 : 124 ⁽⁹⁾ SI*1 : 134 ⁽⁹⁾	LI*1 : 35.7 ⁽⁸⁾ SI*1 : 45.5 ⁽⁸⁾	

*1: LI: Lightning impulse, SI: Switching impulse

〈2・3〉 リプレース延伸に向けた健全性評価 上述のとおり GIS の場合、主絶縁媒体の SF₆ は基本的に劣化が無く、固体絶縁物も電界ストレスが小さいため、30 年程度での使用では劣化事象は小さいと考えて良い。今後のリプレース延伸の観点からは、さらなる長期使用（想定以上：30 年程度以上）を考えた場合の健全性評価が必要となる。この場合、GIS における健全性評価の対象としては、固体絶縁物内部（初期はボイドなし）が重要であると考えられる。固体絶縁物内部（ボイドなし）では、インパルス電圧の繰り返しによる V-N 特性の n 値が比較的小さく、埋込電極表面の微小突起や界面の剥離による微小ボイドが影響し微小部分放電が発生して劣化が進行すると考えられている⁽⁸⁾。このメカニズムから、想定以上の経年において、過電圧による部分放電の発生と微小ボイドの生成・進行および常規電圧の長時間印加による部分放電の発生と劣化の進行が起るかを検討する必要がある。このため、過電圧と常規電圧の 2 種の電圧における V-t 特性および故障確率の評価が重要であると考えられる。そこで、次章では電圧を複数回印加した時の故障確率の考え方について考察する。

3. 電圧を複数回印加したときの故障確率

機器の試験法や寿命に関しては、機器に印加される種々の電圧（常規電圧、試験電圧、過電圧）を考慮する必要がある。このような電圧に対して機器の状態、とくに故障確率がどうなるかは機器の特性（故障確率モデル）と印加状況（電圧値、休止時間など）から考察しなければいけない。これまで電力機器の試験法に関する検討では、電圧を複数回印加したときの故障確率を常に初期状態（前歴や変化を考慮しない）で考えていたが、これは厳密には正しくない。以下では機器の故障確率がワイブル分布である場合について、複数回でも最も簡単な 2 回印加の場合を考える。

2 種類の電圧を印加したときの故障確率は、最初の印加状態に対応して故障確率が変化する場合には、それによって確率密度関数に変化する、いわば複合型ワイブル分布というべき特性を考えなければいけないことが指摘されており、これに対するモデルが提案されている⁽¹⁾⁽¹⁰⁾。本論文では、既に報告されているこれらのモデルに加え、以下に 3 種類のモデルを検討する。

〈3・1〉 ワイブル分布 簡単のため、ワイブル分布の確率分布関数を (1) 式のように表す。

$$P_0 = 1 - \exp(-AV_0^m t^a), \quad A = V_0^{-m} T_0^{-a} \dots\dots\dots (1)$$

このとき確率密度関数は、(2) 式となる。

$$f_0 = AaV_0^m t^{a-1} \exp(-AV_0^m t^a) \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式から、電圧 V_1 、時間 $0 \sim T_1$ の故障確率を P_1 、電圧 V_2 、時間 $0 \sim T_2$ の故障確率を P_2 とすると、これらは (3) 式で表される。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 1 - \exp(-AV_1^m T_1^a) \\ P_2 &= 1 - \exp(-AV_2^m T_2^a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

表 2 係数 α および β
Table 2. coefficient α and β .

Model	α	β
I ⁽¹⁾	$\exp[-A(V_1^m - V_2^m)T_1^a]$	0
II	$\exp(-AV_1^m T_1^a)$	T_1
III ⁽¹⁰⁾	1	$T_1[1 - (V_1/V_2)^{m/a}]$

以下では、電圧 V_1 、時間 $0 \sim T_1$ 印加、電圧 V_2 、時間 $T_1 \sim (T_1 + T_2)$ 印加という場合を考える。

〈3・2〉 確率密度関数の補正 2 種類の電圧を印加したときの故障確率は、最初の印加状態に対応して故障確率が変化する特性を考える。ここでは、以下の条件⁽¹⁾を設定する。

- (a) 時間 T_1 以降の故障確率が、電圧 V_1 、時間 $0 \sim T_1$ 印加の故障確率と連続
- (b) 無限大時間印加時の故障確率が 1 となる
- (c) 機器の V-t 特性の n 乗則を満たす

なお、確率密度関数は $t = T_1$ において連続である必要はない。むしろ異なる電圧が印加されるので、不連続であるほうが自然である。

この条件において、 $t = T_1$ で V_2 が印加された場合の故障確率および確率密度関数は、係数 α および β を用いて以下の形で表される。

$$P = 1 - \alpha \exp[-AV_2^m(t - \beta)^a] \dots\dots\dots (4)$$

$$f = \alpha AV_2^m a(t - \beta)^{a-1} \exp[-AV_2^m(t - \beta)^a] \dots\dots\dots (5)$$

ここで、係数 α および β を表 2 に示す。文献 (1) および (10) での提案は、モデル I およびモデル III になる。モデル III での $V_1 = 0$ 、 $V_1 = V_2$ のケースは、それぞれモデル I、モデル II に帰着する。

〈3・3〉 各モデルの特徴と問題点 モデル I は、 V_1 、 V_2 、 T_1 が一定のとき、 V_2 と T_1 以後の t 、あるいは $(T_1 + T_2)$ との関係は n 乗則になっている。問題点としては、時間 T_1 までは電圧が V_2 でなく V_1 であるにもかかわらず、 V_2 と $(T_1 + T_2)$ の関係が n 乗則になっている点などが挙げられる。

モデル II では、 V_2 と T_2 の関係が n 乗則になっている。問題点としては、 $V_2 = V_1$ という場合の故障確率が、もとのワイブル分布で V_1 を $(T_1 + T_2)$ 印加したときの故障確率の式と一致しない点などが挙げられる。モデル III は時間をシフトさせて、 T_2 からの V_2 の確率分布を V_1 の確率分布に接続する方法である。このモデルでは、 $V_1 = 0$ のとき、あるいは $V_2 = V_1$ のとき、モデル I あるいはモデル II で生じた矛盾は生じない。

〈3・4〉 異なる電圧を印加したときの破壊特性 図 1 に各モデルにおける確率分布の一例を示す。同図は、最初に $V_1 = 2$ [a.u.] を印加し、 $T_1 = 0.15$ [a.u.] で、 $V_2 = 1$ [a.u.] を印加した場合であり、各パラメータは、 $m = 4$ 、 $a = 2$ 、 $A = 1$ とした。また、 P_1 のみおよび P_2 のみの場合も併記

し、 P_2 に関しては、 $T_1 = 0.15$ を開始点としている。同図は非常に極端な例であるが、例えば、最初に $V_1 = 2$ [a.u.] で比較的高い電圧が印加され、それによる履歴を考慮した $T_1 = 0.15$ [a.u.] 以降の確率分布は、 $V_2 = 1$ [a.u.] の印加で初期状態から考えた場合と比較して異なる。例えば、累積確率 0.5 に到達する時間で見た場合、 P_2 を初期状態から考えると、時間は 1.0 程度であるが、 P_1 の履歴を考慮すると、各モデルで異なるが、0.4~0.8 程度となる。このように、例えば常規電圧や過電圧を複合的に考えた場合では、規定の故障確率に到達する時間が早くなる場合が想定される。

図 1 では、各モデルで確率分布が異なるが、〈3・3〉節で示したとおり、モデル III は他と比べて合理的である。これは基本的に異なる電圧印加において、 $V^m t^a$ が同じであれば同じ作用（故障あるいは一般的には状態変化）を及ぼすということがベースになっている。しかし、最終的な判断は対象とする機器の時間的変化の理論的考察や実験結果によらなければいけない。これはそもそもワイブル分布という故障確率そのものも、V-t 特性データを満たす条件で導入されたもので、理論的に確立されたものでないことに注意する必要がある。したがって、モデル I あるいはモデル II も、故障確率（密度）として近似的に成立するかもしれない。

まず電圧印加が休止時間を伴って行われ、 V_1 印加後 $t = T_1$ において初期状態に戻ると考えて良いようなときは、最初の V_1 の印加による故障確率の変化を考えず、初期状態からの故障確率を与えるのが適当と思われる。

図 1 各モデルにおける確率分布の一例

Fig. 1. Example of cumulative probability for different models.

さらに、故障確率が変化した状態で次の電圧を印加する場合も、各モデルで電圧 V_2 に対する n 乗則が相違する。したがってワイブル分布のメカニズム、あるいは電圧を 2 回印加したときの V-t 特性 (n 乗則)、あるいは電圧の印加状況に依存する。特に 2 回印加時の V-t 特性のデータが必要である。

このような実験データは少なくとも GIS に係わる絶縁媒体に関してはほとんどないようである。わずかに GIS 用のエポキシ樹脂スパーサについて、交流課電、雷インパルス、開閉インパルス印加の影響（破壊電圧変化）が調べられている⁽¹⁾。その結果、たとえば交流課電による劣化によって m 値が 15.4 から 10.6~10.8 の値に低下し、雷インパルスでも同様に m 値が低下するとされている。これまでの検討はこのような m 値の変化を考えていないので、本論文で述べている経年機器への再度の絶縁試験における具体的な試験法（試験電圧、印加時間）の検討では、新たな観点からの考察が必要となる可能性がある。

4. 絶縁試験によるリプレース期間延伸の可能性

第 2 章では、絶縁媒体の長時間 V-t 特性のデータとそのメカニズム、さらにはこれに基づく交流長時間試験法の決定の経緯について整理した。本章では、今後の高経年機器に対して、再度、絶縁試験を実施することによる機器の健全性評価およびリプレース時期延伸の可能性を検討した。

〈4・1〉 絶縁特性と劣化要因 表 3 は、長時間 V-t 特性のデータなどから、各機器の絶縁特性と主な劣化要因との関係を整理したものである⁽⁶⁾。同表では、代表的な電力流通設備である変圧器および XLPE ケーブルについても比較のため併記している。長時間 V-t 特性の n 値が小さいと電圧印加による絶縁性能の低下が顕著であることから、 n 値が小さい GIS の絶縁スパーサと XLPE ケーブルについては、主劣化要因は絶縁劣化と考えられている⁽⁶⁾。ただし、通常はこの劣化特性を考慮して電界ストレスを低く抑えるなどして長期の機器寿命を検討している。例えば、GIS では先に述べたとおり、30 年後の絶縁物が耐え得る電界強度は、GIS の絶縁物に常時加わる電界強度の 2 倍以上に設定されており、この期間での劣化は考慮しなくて良いと考えられている。いずれにせよ、スパーサ内部や XLPE ケーブルの

表 3 代表的な電力流通設備の絶縁特性と劣化要因との関係⁽⁶⁾

Table 3. Relation between degradation factor and breakdown characteristics for typical power equipments.

Equipment	Insulation medium	n value (Long term)	Deterioration factor		Deterioration factor and spot
			Insulation	Others	
GIS	SF ₆ + epoxy resin	10-16	○		Partial discharge at interface of electrode in spacer (There is little influence because working stress is controlled (low).)
Transformer	Oil + paper	60 (30 at short time)		○	Deterioration of insulation paper due to heat (Consequently, intensity of tension declines for short-circuit electromagnetic force.)
XLPE cable	XLPE	15 (20 if it isn't flooded)	○		Progress of water tree in XLPE

ように、固体、固体と電極の界面のような微小ギャップまたはボイドなど、欠陥が固定される絶縁構成では、その欠陥での絶縁特性が支配的となり、ここから劣化が進行する絶縁特性となる⁹⁾。

一方、変圧器では、 n 値が比較的大きく、絶縁紙の熱劣化が主劣化要因と考えられており、外部短絡時の電磁機械力による絶縁紙の引張強度の低下が機器寿命を決定すると考えられている。

〈4・2〉劣化傾向と健全性評価 図2に代表的な電力流通設備の劣化傾向と保守コンセプトを示す。30年程度の経年を考えると、(1)設計電界等も考慮して劣化はほとんど起こらない場合、(2)絶縁設計では、劣化特性を考慮しているが、現行の劣化検出手段で検出できる程度の何らかの劣化が進行する場合に大別できると考えられる。前者の例はGIS、後者の例は変圧器およびXLPEケーブルである。

現行の設計寿命で固体絶縁物の絶縁劣化がほとんど起こらないGISでは、偶発故障の事象が続き、絶縁に関してはバスタブ曲線はほぼフラットのままであることが想定される。このため、初期欠陥の検出で有効な部分放電測定などによって劣化状況を検出することは困難である。この場合には、再度の絶縁試験で健全性を評価し、リプレース時期の延伸（例えばX年の長期信頼性保証）を図ることが可能ではないかと考えられる。GISの場合、スペーサの劣化は電界（絶縁）が主要因であると考えられることから、具体的な試験法の検討においては、第3章で述べたような異なる電圧印加での絶縁特性（V-t特性）の検討が、熱劣化などが複雑に影響する変圧器などよりも比較的容易であると考えられる。

ここで、固体絶縁物以外のコンポーネントに関しては、劣化、消耗状況に応じて、リフレッシュ（ガスの交換、開閉接点の交換およびシール材などの劣化消耗品の交換）することが有効である。表4はGISの各コンポーネントにおいて想定される劣化とメンテナンス方法をまとめたものである。固体絶縁スペーサを除く各コンポーネントは、O-リン

グの経年劣化や、開閉接点の消耗などが想定されるが、タンク開放を想定すれば、大部分は交換・修理が可能と考えられる。

一方、変圧器やXLPEケーブルのように、劣化が進行する機器については、再度の絶縁試験前にそれまでの劣化状況を把握し、さらに再度の絶縁試験によって想定される劣化を考慮する必要がある。この場合、絶縁試験によりそれまでの劣化をさらに進行させる可能性もある。このため、これらの機器については、常時あるいは随時、的確な劣化診断により劣化状況を検出しつつ寿命限界まで使い切ることが有効であると考えられる。具体的には、変圧器では、平均重合度による絶縁紙の熱劣化評価、油中ガス分析による評価が挙げられる。一方、XLPEケーブルでは部分放電測定などが挙げられる。

〈4・3〉GISにおける絶縁試験によるリプレース時期延伸に向けた課題 図3は高経年GISにおけるリプレース時期延伸のフローを示したものである。新設機器導入時

表4 GIS各コンポーネントの劣化傾向と保守
Table 4. Supposed degradation and maintenance for GIS components.

Component	Supposed degradation	Maintenance
SF ₆ gas	<ul style="list-style-type: none"> • Purity reduction • Moisture mixing 	<ul style="list-style-type: none"> • Refilling of new gas
Solid Spacer	<ul style="list-style-type: none"> • No degradation under normal operating condition 	<ul style="list-style-type: none"> • Not necessary
Switching contact	<ul style="list-style-type: none"> • Wear-out due to current interruption 	<ul style="list-style-type: none"> • Exchange of switching contact
Connection of bus	<ul style="list-style-type: none"> • No degradation unless abnormal contact condition 	<ul style="list-style-type: none"> • Not necessary
Mechanical moving part (including grease)	<ul style="list-style-type: none"> • Hardening in moving operation • Mechanical damage 	<ul style="list-style-type: none"> • Repairable
Adsorbent	<ul style="list-style-type: none"> • Reduction in adsorption by chemical degradation 	<ul style="list-style-type: none"> • Replaceable
Gasket (O-ring, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Hardening with time and heat cycle 	<ul style="list-style-type: none"> • Replaceable (Irreplaceable in some part in GIS)
Tank, flange	<ul style="list-style-type: none"> • Surface rust and corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Repairable

図2 代表的な電力流通設備の劣化傾向と保守コンセプト

Fig. 2. Deterioration tendency and maintenance concept for typical power equipments.

図3 高経年 GIS におけるリプレース時期延伸のフロー

Fig. 3. Flowchart of replacement postponement for aged GIS.

の長期信頼性試験において保証された想定寿命（例えば 30 年）到達時点で、機器をリプレースするか、さらに継続使用するかを決定する。ここでは、主に経済的的局面によって決定されることが予想される。継続使用が決定した場合でも、先に述べたとおり、O-リング等交換が必要な部品も想定されるため、タンクを開放し当該部品のリフレッシュを図る。その後、リフレッシュによる初期欠陥の検出および長期信頼性保証（例えば X 年）のための絶縁試験を実施し、クリアすれば再度運用に入る。この間、何らかの不具合によりリプレース延伸が不可となる場合も想定されるが、これまでの運転実績、高信頼性、劣化状況調査などから、そのようなケースはごくまれであると考えられる。

高経年の固体絶縁スパーサの長期信頼性保証に関しては、第 3 章で述べたようなより厳密な故障確率および V-t 特性の評価からの検討が GIS の高信頼性維持の観点から重要である。図 4 に GIS の高経年使用時における固体絶縁スパーサの健全性評価に関する研究課題を示す。スパーサの劣化メカニズムを考えると、第 2 章で述べたとおり、固体絶縁物内部（ボイドなし）における埋込電極表面の微小突起や界面の剥離による微小ボイドが影響し、微小部分放電が発生して劣化が進行することが考えられる。このメカニズムから、機器の運転状態では、過電圧による部分放電の発生と微小ボイドの生成・進行および常規電圧の長時間印加による部分放電の発生と劣化の進行が考えられる。このため、過電圧と常規電圧の 2 種の電圧における寿命評価が重要であると考えられる。さらに、過電圧による微小ボイドからの部分放電の発生を健全性評価の観点から非常に高感度の部分放電検出レベルで実施できれば、スパーサの健全性評価（スパーサのリユース）にも繋がると考えられる。

従来の実機器で想定される範囲（想定寿命内）で、このような 2 種の電圧におけるデータが取得されており⁽¹⁾、顕著な劣化は見られないとの報告があるが、更なる長期使用も想定したデータ取得が重要と考えられる。すなわち、過電圧の繰り返しによる劣化を考慮した長時間 V-t 特性と統計的パラメータ値（n, m, a 値）の基礎データの取得が必

図4 GIS の高経年使用時における固体絶縁スパーサの健全性評価に関する研究課題

Fig. 4. Research items for estimation of healthy condition of solid insulation spacer for aged GIS.

要である。さらに、m 値などの統計的パラメータが変化するなどの結果⁽¹⁾が報告されており、実機器のスパーサを含む高経年の固体絶縁スパーサにおける統計パラメータおよび V-t 特性を再評価した上で、リプレース時期延伸のための具体的な絶縁試験法を提案する必要がある。本論文では、高経年 GIS への絶縁再試験によるリプレース時期延伸の可能性を示し、適切な絶縁試験法を提案するための問題提起を行った。今後は、本論文で述べた実験データの取得およびそれに基づく具体的な試験法について検討を進める。

5. まとめ

GIS を中心としたガス絶縁機器を対象に、現行の長時間 V-t 特性および絶縁試験の考え方を整理し、経年機器における再度の絶縁試験によるリプレース時期延伸の可能性について検討した。

現行の設計寿命でほとんど劣化しない（非劣化型）と考えられる GIS では、機器をリフレッシュなどした後、再度の絶縁試験で健全性を再評価することが可能と考えられる。一方で、変圧器および XLPE ケーブル等の劣化累積型機器では、絶縁設計において劣化特性を考慮し、現行の劣化検出手段で劣化を検出できると考えられる。この場合、常時

あるいは随時これらの劣化診断により劣化状況を検出することが寿命評価に有効であると考えられる。

さらに、印加時間や値の異なる電圧が印加された場合の故障確率の考え方を整理した。GISのような非劣化型の機器を対象とした再度の絶縁試験による健全性評価では、複合ストレスによるV-t特性データおよび故障確率の評価が必要であることを示した。すなわち、過電圧の繰り返しによる劣化を考慮した長時間V-t特性と統計的パラメータ値の基礎データから、V-t特性を再評価した上で、リプレース時期延伸のための具体的な絶縁試験法を提案する必要がある。

最後に、本研究の実施にあたりご協力頂いた(財)電力中央研究所 電力技術研究所高橋紹大主任研究員、水谷嘉伸主任研究員、高橋俊裕主任研究員、栗原隆史研究員に厚く御礼申し上げます。

(平成17年9月26日受付, 平成18年2月2日再受付)

文 献

- (1) T. Takuma: "Consideration on AC (Power-Frequency) Insulation Tests for High Voltage Power Equipment", *IEEE Trans. PE*, Vol.124, No.7, pp.977-983 (2004-7) (in Japanese)
宅間 董:「電力機器の交流絶縁試験に対する考察」, 電学論 B, **124**, 7, pp.977-983 (2004-7)
- (2) 電気協同研究会絶縁設計合理化専門委員会:「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, Vol.44, No.3 (1988)
- (3) 岡庭 潔・財満英一・青柳浩邦・小山 博・大久保仁・上原京一:「GIS 実器モデル(66kV 母線)の長時間V-t特性」, 昭和63年電気学会全国大会, No.1173, p.1534 (1988)
- (4) 青柳浩邦・本多正己・小林伸光:「各種絶縁材料のV-t(破壊電圧—時間)特性——基礎から実用面まで——エポキシ絶縁物」, 昭和56年電気四学会連合大会シンポジウム, S13-4, pp.2-119-2-122 (1981)
- (5) 青柳浩邦・小屋政吉・岡本幸男:「エポキシ注形品の長時間寿命特性」, 昭和49年電気学会全国大会, No.331, p.421 (1974)
- (6) 電気学会電力システムにおける機器共通の高電圧絶縁技術調査専門委員会:「電力機器・絶縁材料技術の横断的評価と共通技術の体系化」, 電気学会技術報告, No.945 (2003)
- (7) M. Honda, H. Aoyagi, M. Koya, N. Kobayashi, and M. Tamura: "V-t Characteristics of Epoxy Mold Insulation for Sustained AC Voltage", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol.PAS-103, No.5, pp.1017-1023 (1984)
- (8) S. Okabe, T. Ono, E. Zaima, H. Aoyagi, H. Murase, and I. Oshima: "Deterioration Characteristics of Insulating Spacer Model toward Repeating Impulse Voltage", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.8, pp.978-984 (1995-8) (in Japanese)
岡部成光・大野高広・財満英一・青柳浩邦・村瀬 洋, 大島 巖:「GIS スペース内部モデルの繰り返しインパルス絶縁特性」, 電学論 B, **115**, 8, pp.978-984 (1995-8)
- (9) S. Okabe, T. Ono, E. Zaima, K. Kobayashi, T. Yamagiwa, and F. Endo: "Surface Insulation Characteristics of a GIS Spacer Model for Repeated Impulse Voltage", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.2, pp.187-193 (1995-2) (in Japanese)
岡部成光・大野高広・財満英一・小林健三・山極時生・遠藤奎将:「GIS 用スペース内部モデルの繰り返しインパルス絶縁特性」, 電学論 B, **115**, 2, pp.187-193 (1995-2)

- (10) H. Hirose: "Theoretical Foundation for Residual Lifetime Estimation", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.2, pp.168-173 (1996-2)
- (11) S. Okabe, E. Zaima, K. Inami, K. Sasamori, and S. Sakuma: "Deterioration Characteristics of Model of Insulating Spacer for GIS under AC and Impulse Voltage", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.1, pp.30-35 (1995-1) (in Japanese)
岡部成光・財満英一・井波 潔・笹森健次・佐久間秀一:「GIS 用スペース内部モデルの交流, インパルス電圧絶縁劣化特性」, 電学論 B, **115**, 1, pp.30-35 (1995-1)

五 島 久 司 (正員) 1969年9月12日生。1996年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程後期課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術, 雷放電に伴う電磁界現象に関する研究に従事。博士(工学)。1996年および2005年電気学会論文賞受賞。

八 島 政 史 (正員) 1959年1月24日生。1983年3月九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所, 現在に至る。主としてガス絶縁機器の絶縁技術に関する研究に従事。博士(工学)。1992年~1993年カナダ・マニトバ大学客員研究員。1989年, 1994年および2005年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

新 藤 孝 敏 (正員) 1953年11月21日生。1978年3月東京大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所, 現在に至る。主として大気中の放電現象, 送変電設備の外部絶縁設計に関する研究に従事。工学博士。1987年~1988年アメリカ・フロリダ大学客員研究員。IEEE Fellow。日本大気電気学会会員。

宅 間 董 (正員) 1938年9月30日生。1966年東京大学大学院博士課程修了。工学博士。同年同大学電気工学科講師。1967年(財)電力中央研究所入所。高電圧, 放電, 電磁界解析, 核融合などの研究に従事。1989年~1993年九州大学客員教授。1995年~2002年京都大学大学院工学研究科教授。2002年から電力中央研究所研究顧問。2004年東京電機大学教授。1975年英国電気学会 Maxwell 賞, 1981年および1991年電気学会著作賞, 1992年業績賞ならびに科学技術庁長官賞受賞。IEEE Fellow。