Reliability Evaluation Method with Weibull Distribution for Temporary Overvoltages of Substation Equipment

Shigemitsu Okabe Senior Member (Tokyo Electric Power Company)

Toshihiro Tsuboi Member (Tokyo Electric Power Company)

Jun Takami Member (Tokyo Electric Power Company)

Keywords: electric power equipment, power-frequency withstand voltage test, Weibull distribution, reliability evaluation, V-t characteristic

The Japanese standard of high voltage testing, JEC-0102-1994, specifies the “lightning impulse withstand voltage test” and the “power-frequency withstand voltage test” for electric equipments. As for the “power-frequency withstand voltage test”, the “long-duration power-frequency withstand voltage test” has applied for an effective grounding system of 187 kV and above. Test voltages are evaluated with power frequency voltage and temporary overvoltage on electric equipments and the lifetime reliability, using Weibull distribution function.

The reliability evaluation method by Weibull distribution function was widely recognized in study of power frequency withstand voltage for JEC-0102 establishment in 1994. There were some discussions about the Weibull distribution technique in those days. However, the question about reliability estimating with the Weibull distribution was left after the issue of JEC-0102.

Lately, investigation for the revision of JEC-0102 standard has carried out. The main targets of the revision is the tests for un-effective grounding system, which had not been revised in JEC-0102-1994. In connection with that, the questions about the reliability estimation method by Weibull distribution technique have been again raised about the case that the different voltages are applied one after another.

The reliability estimation method used for JEC-0102 (hereinafter, “the conventional method” and “Method I” in figures) is independent of past failure hysteresis at the time of changing voltage. With regards to the method, it is necessary to verify the validity of adapting the failure probability distribution from time 0 each time of applying voltages.

On the other hand, another model (“Method II” in figures) which retains cumulative fault probability was proposed. The model shifts the V-t characteristic to another with the relationship that $V^n t$ is equal at the time of changing voltage. Moreover, the other method (“Method III” in figures) of adjusting a failure frequency density function was proposed recently. This method sets the failure probability “1” at the infinite time applying voltage and fulfills the condition of the power law in the V-t characteristics of equipments.

The present paper first discusses the physical meanings of the various kinds of evaluating methods and secondly examines their effects on the “power-frequency withstand voltage test”. Further, an appropriate method is investigated for an oil-filled transformer and a gas insulated switchgear with taking notice of dielectric breakdown or partial discharge mechanism under various insulating material and structure conditions. The following results were obtained in this paper.

(1) The physical meanings of three kinds of reliability estimation methods were clarified, and the failure probability density function and cumulative failure probability under each

voltage were formulized. The conventional method is reasonable for the independent failure phenomenon. The other methods proposed recently should be used for the phenomenon of accumulation of failure progress.

(2) Based on the above result, the formula of the short-duration part of the “long-duration power-frequency withstand voltage test” was formulized in terms of consideration of plural voltages applied. Further, the influence of the Weibull parameter values on the test voltage were evaluated by trial calculations. Under the condition of the time shape parameter “a” of being smaller than 1, the conventional method gave the highest test voltage.

(3) The tentative conclusion gives that the conventional method would be most pertinent under the present conditions in order to evaluate reliability of an oil-filled transformer and a gas insulated switchgear.

Fig. 1. Cumulative fault probability given by reliability evaluation method in case of $V_1 < V_2$ ($a = 0.39$)

Fig. 2. Trial calculation of test voltage with changing a-value by reliability evaluation method (m: constant)

ワイブル分布を用いた変電機器の交流短時間過電圧 に対する信頼度評価

上級会員 岡部 成光* 正 員 坪井 敏宏*
正 員 高見 潤*

Reliability Evaluation Method with Weibull Distribution for Temporary Overvoltages of Substation Equipment

Shigemitsu Okabe*, Senior Member, Toshihiro Tsuboi*, Member, Jun Takami*, Member

The power-frequency withstand voltage tests are regulated on electric power equipment in JEC by evaluating the lifetime reliability with a Weibull distribution function. The evaluation method is still controversial in terms of consideration of a plural number of faults and some alternative methods were proposed on this subject. The present paper first discusses the physical meanings of the various kinds of evaluating methods and secondly examines their effects on the power-frequency withstand voltage tests. Further, an appropriate method is investigated for an oil-filled transformer and a gas insulated switchgear with taking notice of dielectric breakdown or partial discharge mechanism under various insulating material and structure conditions and the tentative conclusion gives that the conventional method would be most pertinent under the present conditions.

キーワード：電力機器，商用周波耐電圧試験，ワイブル分布，信頼度評価，V-t 特性

Keywords: electric power equipment, power-frequency withstand voltage test, Weibull distribution, reliability evaluation, V-t characteristic

1. はじめに

電力機器の絶縁仕様として，一般に「雷インパルス耐電圧試験」と「商用周波耐電圧試験」がJEC-0102「試験電圧標準」⁽¹⁾で規定されている。このうち187kV以上の有効接地系では「商用周波耐電圧試験」として「長時間商用周波耐電圧試験」が規定され，使用期間中の常規電圧と1LG時・負荷遮断時などの短時間過電圧に対する所要の絶縁性能を検証する。この試験電圧の設定に当たっては，機器に加わる常規電圧・過電圧と試験電圧を，ワイブル分布を用いて評価し信頼度を検証する⁽²⁾。

ワイブル分布による信頼度評価法は，1988年の電気協同研究第44巻3号「絶縁設計の合理化」⁽³⁾で広く認知され，その後1994年のJEC-0102⁽¹⁾で採用された。その間，本手法の是非に関していくらか議論があったが⁽⁴⁾⁽⁵⁾，その後は実務的なニーズの機会が無かったこともあり，議論や検討は沈静化していた。最近になり，取り残されていた非有効接地系の合理化を含めてJEC-0102改定の動きがあり，再び

ワイブル分布による信頼度評価法で特に複数の電圧レベルが混在する場合に対して課題が提起された^{(6)~(8)}。

本報告では，短時間過電圧を長時間商用周波耐電圧試験の短時間部で評価することを対象とし，最初に複数の電圧レベル混在時のワイブル評価の各種手法を物理的意味と対応付けて整理し，次に各手法の試験電圧レベルへの影響を試算した。更に，電力機器の各種絶縁媒体・絶縁構造に対し，絶縁破壊または部分放電の開始および進展メカニズムから，適切な評価法を検討した。

2. ワイブル分布による信頼度評価法

〈2・1〉 信頼度評価法の基礎概念 変圧器やGISを代表とする機器の絶縁要素の絶縁破壊や部分放電開始の電圧-時間特性（V-t特性）は， $V^m t = K$ （一定）で良く近似される。電圧Vを時間t印加した場合の累積故障確率P（無部分放電確率R）は一般にワイブル分布に従い，さらに“ $V^m t$ ”が一つの変数である⁽⁹⁾とすると次式で表される⁽⁹⁾。

$$P = 1 - \exp(-AV^m t^a) \cdots \cdots \cdots (1)$$

A：定数，a：時間形状パラメータ，m：電圧形状パラメータ

次に，機器に印加される電圧（常規運転電圧，短時間過電圧など）に対する試験電圧の信頼度評価法について示す。

* 東京電力（株）技術開発研究所
〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1
High Voltage & Insulation Group, R&D Center, TEPCO
4-1, Egasaki-cho, Turumi-ku, Yokohama 230-8510

(1) 式より試験電圧 (変数のサブスクリプト t) と、過電圧などの機器印加電圧 (変数のサブスクリプト s) における信頼度 R ($= 1 - P$) を表す式の比を取ると次式が得られる。

$$V_t^m T_t^a = V_s^m T_s^a \frac{\ln R_t}{\ln R_s} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式に機器の絶縁特性から得られるワイブルパラメータ n , m , a 値と、寿命期間に想定される過電圧および常規運転電圧の条件 V_s , T_s および試験中の信頼度 R_t を与えて、運転期間に期待される信頼度 R_s を満足する試験電圧値 V_t と試験時間 T_t を設定する。上記の評価法は、電気協同研究「絶縁設計の合理化」⁽³⁾ で広く認知され、現行の JEC-0102「試験電圧標準」⁽⁴⁾ の信頼度評価の根拠となっている評価法である。本論文では、このうち短時間過電圧を長時間商用周波耐電圧試験の短時間部で評価することを対象とする。常規対地電圧と長時間部の評価は、絶縁要素の V - t 特性取得時の物理現象との等価性を別途検討する必要性があると考える。

以上は電圧印加が 1 回の場合の、基本的な考え方である。次に電圧を複数回印加した場合の故障確率の考え方について述べる。試験電圧の評価法としての検討は 3 章に記すが、ここでは 3 つの手法を取り上げ、その故障確率モデルの特徴・物理的な意味について述べる。

JEC-0102 で採用されている評価法 (本稿では以下、独立事象法 (従来法) と呼ぶ) では、各々の事象が履歴に関係なく独立であると考え、毎回時間 0 からの故障確率分布に従うことの是非などの課題を含んでいる⁽⁷⁾。これに対し、電圧が変化した場合には、累積故障確率が保存されるように、“ $V^m t^a$ ” が等しい V - t 特性上に移行するモデル (本稿では以下、累積故障法と呼ぶ) が提案された⁽¹⁰⁾。また、最近、無限大時間印加時の故障確率が 1 となり、機器の V - t 特性が n 乗則を満たす条件で、時間 0 からの確率密度関数を補正する方法 (本稿では以下、残存確率法と呼ぶ) が提案されている⁽⁷⁾。

〈2・2〉 電圧を複数回印加した場合の評価手法 前述の 3 種の評価法について、異レベル電圧が 2 回印加された場合の累積故障確率 P 、故障確率密度関数 f は文献 (8) に整理されている。ここでは、 P , f の定式化と 2 種の電圧レベル印加時の故障確率密度関数のイメージを表 1 に示す。故障確率密度関数は、ワイブル分布の時間形状パラメータ a が $a < 1$ と $a > 1$ について、電圧 V_1 を時間 T_1 印加した後に電圧 V_2 ($V_1 > V_2$) を印加した場合について示す。前提として、機器の V - t 特性が n 乗則を満たし、ワイブル分布の n , m , a 値が V , t に依らず一定である場合を対象としている。

(1) 方法 I (独立事象法 (従来法)) 電圧の印加毎に時間 0 からの故障確率密度分布に従うモデルである。これは、毎回の事象が履歴に関係なく独立しており、いわゆるエージングや劣化などの影響が無いとするモデルである。

電圧を 2 回印加した場合の累積故障確率 P は、1 回目と 2 回目の電圧印加による故障確率をそれぞれ P_1 , P_2 とした

場合 $P = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)$ と表現される。すなわち

$$P = 1 - \exp \{ -AV_1^m T_1^a - AV_2^m (t - T_1)^a \} \dots\dots\dots (3)$$

となる。

簡単な例えとして、100 個の試料に電圧 V_1 を時間 T_1 印加した後に V_2 を印加した場合の累積故障確率を考えると、独立事象法 (従来法) は、 V_1 を T_1 印加して 100 個中 80 個が残存した場合に、時刻 T_1 から新たに 80 個の試料を用意し、 V_2 を印加して累積故障確率を求める方法である。

(2) 方法 II (累積故障法) “ $V^m t^a$ ” が等しいストレスは、設備に等しい影響を与えるとして、累積故障確率を保存するようにストレスが累積すると考えるモデルである。

数式上では、印加電圧が V_2 となる時刻 T_1 以降の確率密度関数について、時間 0 からの V_2 印加の確率密度関数を時間 s_1 により補正するモデルである。

先の例えでは、 V_1 を T_1 印加して 100 個中 20 個故障した場合に、時刻 0 から新たに 100 個の試料に V_2 を印加して 20 個壊れた時刻を T_1' ($= s_1$) とする。この時刻を T_1 とみなして、 T_1 以降の V_2 印加時の累積故障確率を求める方法である。

(3) 方法 III (残存確率法) 残存確率を一致させることにより先行印加電圧の履歴を残したモデルである。

数式上では、時間 0 から電圧 V_2 を印加した故障確率密度関数に $\exp(-AV_1^m T_1^a) / \exp(-AV_2^m T_1^a)$ を乗じて補正したモデルである。 $\exp(-AV_1^m T_1^a)$ とは、電圧 V_1 を時間 T_1 印加した場合の残存確率であり、無限大時間経過時の累積故障確率が 1 となるように、電圧 V_2 印加時の確率密度関数を補正する。

先の例えでは、 V_1 を T_1 印加して 100 個中 80 個が残存した場合に、 V_2 を T_1 印加して 100 個中 40 個が残存するならば、時刻 0 から新たに 200 ($= 100 \times 80/40$) 個の試料に V_2 を T_1 印加して、80 個が残存する時刻 T_1 以降より V_2 印加時の累積故障確率を求める方法である。

上記のモデルを絶縁物のイメージに照らし合わせると、絶縁破壊現象が進展を開始しても印加電圧が除去されると印加前の状態に復帰する場合には、独立事象法 (従来法) が想定される。逆にある種の固体絶縁物における絶縁破壊メカニズムのように、トリーが進展し電圧除去後も元の状態に復帰しない場合には、累積故障法の想定に近いと考えられる。

3. 信頼度評価法と試験電圧

〈3・1〉 累積故障確率と信頼度評価式 2 章の表 1 に示した各手法の累積故障確率 P について、大きさの異なる電圧を 2 回印加した場合の累積故障確率の時間変化のイメージを図 1 に示す。ワイブルパラメータ値は $n = 30$, $m = 11.75$, $a = 0.39^{(9)}$ とし、 $V_1 < V_2$ ($V_1 = 1.00 \text{ pu}$, $V_2 = 1.25 \text{ pu}$) と $V_1 > V_2$ ($V_1 = 1.25 \text{ pu}$, $V_2 = 1.00 \text{ pu}$) の各々の場合について試算した結果を示す。 V_1 印加中の期間 $[0 \sim T_1]$ は、どの計算法でも同一の特性である。絶縁物性で一般に現れ

表 1 各信頼度評価手法の特徴

Table 1. Feature of reliability evaluation method.

Method	Formulation of a model (Voltage V_2 is impressed after impressing voltage V_1 for time T_1)	Fault probability density function in the case of $a > 1$ (Wear-out failure type) and $V_1 > V_2$	Fault probability density function in the case of $a < 1$ (Initial failure type) and $V_1 > V_2$
Method I (Independent phenomenon method) ⁽¹⁾	<p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \leq T_1$;</p> $P = 1 - \exp(-AV_1^m t^a)$ $f = AaV_1^{m,a-1} \exp(-AV_1^m t^a)$ <p>A: Constant, a: Shape parameter on time, m: Shape parameter on voltage</p> <p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \geq T_1$;</p> $P = 1 - \exp\left\{-AV_1^m T_1^a - AV_2^m (t - T_1)^a\right\}$ $f = AaV_2^m (t - T_1)^{a-1} \exp(-AV_1^m T_1^a) \exp\left\{-AV_2^m (t - T_1)^a\right\}$		
Method II (Failure accumulation method) ⁽¹⁰⁾	<p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \leq T_1$; same as Method I</p> $P = 1 - \exp(-AV_1^m t^a)$ $f = AaV_1^{m,a-1} \exp(-AV_1^m t^a)$ <p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \geq T_1$;</p> $P = 1 - \exp\left\{-AV_2^m (t - T_1 + s_1)^a\right\}$ $f = AaV_2^m (t - T_1 + s_1)^{a-1} \exp\left\{-AV_2^m (t - T_1 + s_1)^a\right\}$ <p>where, $s_1 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{a}{m}}$</p>		
Method III (Remain probability method) ⁽⁷⁾	<p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \leq T_1$; same as Method I</p> $P = 1 - \exp(-AV_1^m t^a)$ $f = AaV_1^{m,a-1} \exp(-AV_1^m t^a)$ <p>○ Cumulative fault probability P and fault probability density function f in the time region $t \geq T_1$;</p> $P = 1 - \exp\left\{-AV_1^m T_1^a - AV_2^m (t - T_1)^a\right\}$ $f = AaV_2^m t^{a-1} \exp\left\{-AV_1^m T_1^a\right\} \exp(-AV_2^m t^a)$

(a) In case of $V_1 < V_2$ (b) In case of $V_1 > V_2$ 図1 各信頼度評価法による累積故障確率の特性
($a = 0.39$)Fig. 1. Cumulative fault probability given by reliability evaluation method ($a = 0.39$).

ることの多い $a < 1$ の場合の累積故障確率は、時間 0 付近の高い故障確率を累積する独立事象法（従来法）が最も高い。残存確率法については、高い電圧が先行する場合には累積故障法よりも高く、低い電圧が先行する場合には累積故障法よりも低い。また、 $a > 1$ の場合の累積故障確率は、 $a < 1$ の場合と 3 つのモデルの大小関係が逆転し、独立事象法（従来法）が最も低い。

次に 2 章に示した故障確率モデルによる信頼度評価式を表 2 に示す。前提として、機器の V-t 特性が n 乗則を満たし、ワイブル分布の n, m, a 値が V, t に依らず一定である場合を対象とする。試験電圧、時間を $[V_i, T_i]$ とし、N 回の過電圧および継続時間を $[V_i, T_i]$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) とし、累積故障確率と信頼度評価の一般式を示した。

累積故障確率を表わす式からもわかる様に、各々のモデルは無限大時間経過時の累積故障確率が 1 となる。また、それぞれ想定している時間領域は異なるが、印加電圧に対して V-t 特性の n 乗則に従う。a = 1 の場合には、3 つのモデルの累積故障確率は等しい。独立事象法（従来法）、累積故障法の信頼度評価値は、電圧印加の順番や時刻が変化した場合でも、印加電圧と印加時間の組み合わせが同じ場

表 2 各信頼度評価法の試験電圧計算式

Table 2. Calculation equation on test voltage of reliability evaluation method.

Method	Calculation equation of reliability evaluation
Method I Independent phenomenon method ⁽¹⁾ (conventional method)	<p>○Cumulative fault probability defined as P_t during voltage test and as P_s during overvoltage defined;</p> $P_t = 1 - \exp\left\{-A V_t^m T_t^a\right\}$ $P_s = 1 - \exp\left\{-A \sum_{i=1}^N \left(V_i^m T_i^a\right)\right\}$ <p>○Equation of reliability evaluation</p> $V_t^m T_t^a = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(V_i^m T_i^a\right) \right\} \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$ <p>○Equation for short time part voltage of long time power-frequency withstand voltage test</p> $V_t^m T_t^a = \left(N_1 V_1^m T_1^a + N_2 V_2^m T_2^a \right) \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$
Method II Failure accumulation method ⁽²⁾	<p>○Cumulative fault probability defined as P_t during voltage test and as P_s during overvoltage defined;</p> $P_t = 1 - \exp\left\{-A V_t^m T_t^a\right\}$ $P_s = 1 - \exp\left\{-A \left(\sum_{i=1}^N V_i^m T_i^a \right)^a\right\}$ <p>○Equation of reliability evaluation</p> $V_t^m T_t^a = \left(\sum_{i=1}^N V_i^m T_i^a \right)^a \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$ <p>○Equation for short time part voltage of long time power-frequency withstand voltage test</p> $V_t^m T_t^a = \left(N_1 V_1^m T_1^a + N_2 V_2^m T_2^a \right)^a \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$
Method III Remain probability method ⁽³⁾	<p>○Cumulative fault probability defined as P_t during voltage test and as P_s during overvoltage defined; (Final time when the N-th voltage V_N is impressed: defined as T_{IN})</p> $P_t = 1 - \exp\left\{-A V_t^m T_t^a\right\}$ $P_s = 1 - \exp\left\{-A V_N^m T_{IN}^a - A \sum_{i=1}^N \left\{ V_{i-1}^m - V_i^m \right\} T_{i(i-1)}^a \right\}$ <p>○Equation of reliability evaluation (Final time when the N-th voltage V_N is impressed: defined as T_{IN})</p> $V_t^m T_t^a = \left[V_N^m T_{IN}^a + \sum_{i=1}^N \left\{ V_{i-1}^m - V_i^m \right\} T_{i(i-1)}^a \right] \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$ <p>Where, $T_{i0} = 0, V_0 = 0$</p> <p>○Equation for short time part voltage of long time power-frequency withstand voltage test</p> $V_t^m T_t^a = \left\{ V_2^m (N_1 T_1 + N_2 T_2)^a + \left(V_1^m - V_2^m \right) (N_1 T_1)^a \right\} \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)}$ <p>As cumulative fault probability varies according to order of voltages applied, cases are divided as follows;</p> <p>Method III①: Lower voltage is first applied.</p> <p>Method III②: Higher voltage is first applied.</p>

合には評価値は同じ結果となる。電圧 V_1, V_2 が加わる期間 T_1, T_2 により評価値が一意に決定される。残存確率法については、電圧印加時刻や順序によって評価結果が相違し、高い電圧が先行して印加される場合と、低い電圧が先行する場合を評価値の上下限とする特徴を有する。

〈3・2〉 試験電圧試算結果の比較 表 2 に示した 3 つの試験電圧評価式により、変圧器の短時間部の商用周波試験電圧値を評価した結果を図 2 に示す。

Test voltage for a-value [pu]								
a-value	0.2	0.39	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	
Method I	3.57	2.03	1.66	1.51	1.43	1.39	1.35	
Method II	1.95	1.62	1.51	1.46	1.43	1.42	1.40	
Method III①	1.91	1.59	1.49	1.45	1.43	1.43	1.44	
Method III②	2.06	1.66	1.53	1.47	1.43	1.41	1.39	

(a) Trial calculation of test voltage (n: constant)

Test voltage for a-value [pu]								
a-value	0.2	0.39	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	
Method I	2.15	2.03	1.91	1.80	1.70	1.60	1.47	
Method II	1.66	1.62	1.64	1.67	1.70	1.73	1.79	
Method III①	1.56	1.59	1.63	1.66	1.70	1.74	1.79	
Method III②	1.69	1.66	1.66	1.67	1.70	1.73	1.78	

(b) Trial calculation of test voltage (m: constant)

図2 a値を変化させた時の各評価手法による試験電圧値の試算結果

Fig. 2. Trial calculation of test voltage with changing a-value by reliability evaluation method.

信頼度評価の条件については、電協研⁽⁹⁾の条件に従い、寿命期間において発生する一線地絡事故：1.25 pu, 2 秒, 100 回, 負荷遮断：1.43 pu, 1 秒, 3 回とし、ワイブルパラメータ $n = 30$, $m = 11.75$, $a = 0.39$ とする。試験中の絶縁信頼度 $R_t = 98\%$ として、運転期間中の絶縁信頼度 $R_s = 99.8\%$ を満足することを条件とする。検討のために $n = m/a$ の関係式に従い n または m 値を一定として、 a 値をパラメータとする試験電圧評価値を求めた。

$a = 0.39$ での試験電圧評価結果（図2太枠）は、独立事象法（従来法）で 2.03 pu に対し、累積故障法では 1.62 pu, 残存確率法では最大で 1.66 pu, 最小で 1.59 pu となる。即ち、試験電圧評価値の大小関係は、独立事象法（従来法）> 残存確率法（高い電圧が先行）> 累積故障法 > 残存確率法（低い電圧が先行）となる。 $n = m/a$ の関係式に従って a 値を変化させた場合、 $a = 1$ （偶発故障形）では3つの方法によ

る評価値は一致し、 n 値一定で 1.43 pu, m 値一定で 1.70 pu となる。 $0.8 < a < 1.2$ では、3つの方法による評価値の差は小さく、評価法の中では独立事象法（従来法）による評価値が $a = 1$ を境に逆転して最大、最小値を与え、 n 値一定では 1.39~1.51 pu, m 値一定では 1.60~1.80 pu の範囲である。 $a \ll 1$ （初期故障形）の場合、独立事象法（従来法）の結果が最も厳しい評価値となり、各手法による評価値の大小関係は先の $a = 0.39$ の場合の通りである。 $a > 1$ （磨耗故障形）の場合は、 $a < 1$ の場合と大小関係が逆転する。

現在の長時間商用周波耐電圧試験においては、油入変圧器および GIS において $a \leq 1$ が採用されており⁽¹⁾、独立事象法（従来法）による試験電圧評価値は、累積故障法を採用した場合よりも厳しい試験条件を与えていることになる。独立事象法（従来法）は電圧の印加履歴が残らないモデルであるが、累積故障法は電圧の印加履歴を考慮したモデルであるため、機器の物性を踏まえた上で評価式を選定する必要がある、4章で検討する。

4. 電力機器の絶縁特性と信頼度評価法

〈4・1〉 機器の絶縁要素 絶縁材料の形態としては、気体、液体、固体、真空などがあり、それぞれの絶縁耐力や各種条件下での絶縁特性は大きく異なっている。また同じ気体でも、大気と高気圧 SF_6 ガスでは絶縁耐力の大きさや電界分布に対する特性は大きく異なり、同じ大気でも平等電界と不平等電界の特性は区別すべきものである。この耐力も雷インパルスと AC では絶縁種類により相対比が異なるといったこともあり、破壊のモード、繰り返しや温度に対する特性など、様々である。また、実際の機器では、絶縁材料は単体で用いられるより複合的な構成で用いられることが多く、特有な性質を有する⁽¹¹⁾。その絶縁特性に、機器に加わる電圧ストレス・機械ストレス・熱ストレスなどを考慮し、所要信頼度を得よう試験電圧は決められている⁽¹²⁾。

本論文では主要な機器で絶縁材料や構造の対照的なものとして、GIS と油入変圧器を考える。GIS の主要な絶縁要素には、ガスギャップ、エポキシスペーサ沿面、スペーサ内部および中心導体やシールド電極との界面などがある。清浄状態では基本的に同軸円筒構造で、電界利用率が 0.4~0.6 程度の準平等電界であるが、その製造・据付・運用時に異物混入・発生があれば、絶縁特性は大きく異なったものとなる。また油入変圧器の主要な絶縁要素は、コイル間の主絶縁、タンク絶縁、リード絶縁、コイル内の絶縁などがあり、油浸紙絶縁構造から区別すると油道バリア、ターン間絶縁、セクション間絶縁、油長ギャップなどとなる。

〈4・2〉 絶縁媒体・構造と絶縁特性 GIS および油入変圧器の主要な絶縁構造を中心に、比較のため CV ケーブルに用いられる架橋ポリエチレンを加えて、各種絶縁構造の AC に対する絶縁特性、およびその試験法の観点からの信頼度評価を表3に示す。特に実験で得られるワイブル分布の時間形状パラメータ a 値以外に、実験時間と過電圧や

表 3 各種絶縁材料・構造の商用周波電圧に対する絶縁特性と試験法の観点からの信頼度評価法の検討*1

Table 3. Insulating property for power-frequency voltage of various insulating material and structure and reliability evaluation method in terms of test voltage*1.

Kind of Insulation	Insulating material structure	Phenomena	Measurement of insulation characteristics				Classification and characteristics by Weibull Parameter *6	Generation Mechanism of BD (or PD) and Time Scale until Appearance	Development Mechanism of BD (or PD) and Time Scale	Evaluation Technique of Reliability *7
			Reference	Model for Measurement	n	m				
Solid Composite Gas Insulation	SF ₆ gas gap	BD	13	Coaxial cylinder with insulating spacer (under quasi-uniform field) [66kV and above model]	74	20-25	0.25-0.50	0.39	The protrusions on the electrode surface and unevenness on the spacer insulator surface would be weak points. The weak points consistently exist from the beginning and show up in the time of the PFWT.	Comprehensively, it is a quasi-uniform electric field and the time period needed for the weak points to be BD is usually shorter than the time period of the PFWT. The method I is appropriate because the accumulation effect by the phenomenon development is low.
			14		82.0	26-39	0.32-0.48			
	SF ₆ gas gap with metallic particle	BD	15	Length of metallic particle: 10,15,30mm	38-62		0.6-1.3	0.94	When metallic particles exist, the particles would be the cause for starting of BD phenomena. The time period until the particles stand up disperses supposing the condition where the particles lie on the tank bottom face.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> Because the development time of the phenomenon after the particles stand up is shorter than the time of the PFWT, the whole phenomenon is ruled by the trigger occurrence.
			14	Coaxial cylinder with metallic particles (length: 3mm) [66kV model]	30	26-29	0.88-0.98			
Solid Composite Liquid Insulation	Spacer (creepage in SF ₆)	BD	16	Cylinder with corn 60mmφ outer 150mmφ	124	22	0.18	0.18	The characteristics are similar to those of the SF ₆ gas gap with BD.	
			17	Gap between planes (Gap length: 10mm)	18	7.6-8.05	0.43-0.44	0.50	The BD phenomena are started because of sources such as fine particles in the oil. The time period until the weak points show up is long in comparison to the time scale of the PFWT and disperses.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> The weak point appearance is physically accidental. In addition, because the status returns to the initial state by oil flow, the evaluation using method I is thought to be appropriate.
Liquid Composite Solid Insulation	Oil gap	BD	18		13.6-15.2	8.1	0.53-0.60		The time of development is short and the status returns to the initial state by oil flow when the voltage is removed. The effect of hysteresis is thought to be small.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> The weak point appearance is physically accidental. In addition, because the status returns to the initial state by oil flow, the evaluation using method I is thought to be appropriate.
			19		27.5	8.3-15.2	0.30-0.55		Electric field concentrated parts such as the PD correspond to BD in the oil and insulating oil parts. The time of development is short and the status returns to the initial state by accidental. In addition, because the status returns to the initial state by oil flow, the evaluation using method I is thought to be appropriate.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> The insulation characteristics are similar to those of the oil and insulating oil parts. The time of development is short and the status returns to the initial state by accidental. In addition, because the status returns to the initial state by oil flow, the evaluation using method I is thought to be appropriate.
	Oil duct barrier	PD	20	Element model of oil duct barrier [500kV,UHVClass]	44.2	17.1	0.39	0.41	The voltage taken charge of by the solid insulator become higher after the PD occurs and the BD of the solid insulator is an intrinsic BD.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> Because the development of BD in the intrinsic breakdown is rapid, the effect of hysteresis is thought to be small and the evaluation using method I is thought to be appropriate. In addition, the value is nearly 1 and the difference between the evaluation methods is small as a result.
			21		32.6	13.4	0.41			
Solid Composite Liquid Insulation	Section to section	PD	19	Element model of section to section [500kV,UHVClass]	43.2	9.0-10.2	0.21-0.24	0.28	The characteristics are similar to those of the oil-duct-barrier with PD (The characteristics are also somewhat similar to those of the oil gap with BD).	
			20		39.9	16	0.4			
	Turn to turn	BD	19		10.9	8.2-9.4	0.75-0.86	0.81	The characteristics are similar to those of the oil-duct-barrier with BD.	
			22	Element model of turn to turn [500kV,UHVClass]	47.1	15.7-17.2	0.33-0.37	0.36	The characteristics are similar to those of the oil-duct-barrier with PD (The characteristics are also somewhat similar to those of the oil gap with BD).	
Liquid Composite Solid Insulation	Epoxy	BD	20		44.9	22.7	0.42		The characteristics are similar to those of the oil-duct-barrier with BD.	
			19		18.1	11.2-14.0	0.62-0.77	0.70		
	Cross linked polyethylene	BD	23	Gap between planes (gap length: 3mm)	16	12.8-14.4	0.8-0.9	0.70	Though the involvement of the weak points of the electrode - solid insulator surface boundary would be assumed microscopically, the BD of the solid insulator is an intrinsic BD comprehensively.	<Method I: Independent Phenomenon Method (Conventional Method)> Because the development of BD in the intrinsic breakdown is rapid, the effect of hysteresis is thought to be small and the evaluation using method I is thought to be appropriate. In addition, the value is nearly 1 and the difference between the evaluation methods is small as a result.
			24		20.1	11.1-11.3	0.55-0.56		those of the oil-impregnated paper insulation with BD.)	<Method II: Failure Accumulation Method> The failure accumulation method (method II) is considered to be applied because the development of insulation deterioration lasts for a long time and the development situation remains after the applied voltage is removed.

*1: Dielectric breakdown: BD, Partial discharge: PD, Power frequency withstand voltage test: PFWT. *2: As a whole, composite insulating structure varies depending on manufacturers and apparatus types (for example, the ratio between the oil-duct and insulating paper coverage thickness in the section-section insulation) and this table shows the evaluation result of relatively well-established cited references. *3: The secular changes of the physical insulation characteristics other than the development of failures are not considered because of lack of data. *4: The time scales of the phenomena in comparison to the time period of the PFWT are examined. *5: The "big", "medium" and "small" classification is rough one. *6: For the interval of the repeat applied overvoltage, the situation without voltage application is assumed. *7: The assumed BD and PD mechanisms are typical ones.

試験電圧の継続時間のスケールの大小を考慮した。なおこれらは実器を念頭に想定される主なケースであり、学問的な厳密な追求とは異なるものである。本目的に適切な絶縁特性の把握は大変重要な課題⁷⁾であり、別途新データの取得も含め深遠な検討が必要である。ここでは現状の代表値である JEC-0102⁽⁴⁾ 制定時の値に準拠した。

GIS 中の絶縁要素の SF₆ 絶縁では、ギャップ（清浄時）と異物存在時では、絶縁破壊電圧のみならずワイブルパラメータの特徴も大きく異なることがわかる。油ギャップの絶縁破壊・油道バリアの部分放電・ターン間絶縁の部分放電・セクション間絶縁の部分放電には共通点が見られ、また油道バリアの絶縁破壊・ターン間絶縁の絶縁破壊・セクション間絶縁の絶縁破壊の特性も類似しているが、今回の条件のエポキシの絶縁破壊も似ているとも言える。架橋ポリエチレンの絶縁破壊が唯一（物性の真性的特徴で他材料と比してという意味で無く、機器製造・品質管理技術やモデル構造・スケールの差異を含めて今回の調査の中ではという事であるが）、絶縁劣化進展が蓄積される絶縁破壊メカニズムであった。架橋ポリエチレンの a 値は 0.32 で 1 よりずっと小さく、一見すると劣化蓄積タイプと逆のように思えるが、 a 値の測定値には絶縁破壊開始のばらつきと進展時間の遅れの両者が混じり合っている可能性がある。絶縁破壊の開始から進展時間（時間遅れ）と印加電圧継続時間の大小関係という観点からは、時間領域が雷インパルスであるが、標準雷インパルス波形への等価換算評価時に、SF₆ ギャップ・油ギャップの絶縁破壊はあるレベル以上の電圧継続時間全てを合計し、ターン間絶縁の絶縁破壊ではある 1 波のみであるレベル以上の電圧継続時間に注目することと共通点がある⁽²⁶⁾。

〈4・3〉 試験法の観点からの信頼度評価法の考察 前述のように本目的に直接応える絶縁物性の整備は現状では困難な状況であるが、工学的見地からある程度の推測と不明時は安全側に評価することを基本に論を進める。従って評価結果は結論でなく、現時点での可能性を示している。

GIS は何らかの原因により数 mm 程度以内の金属性異物が混入することを想定して設計される。即ち清浄な状態ではかなり絶縁耐力に裕度がある。従って、表 3 の「SF₆ ガスギャップ金属異物混入」の項目（上部の網掛け）に着目する。今回の異物形態（電極上垂直固定配置などでなく、タンク底面水平置き）では部分放電開始後、即絶縁破壊を生じる⁽¹⁴⁾ か、短時間で絶縁破壊を生じており⁽¹⁵⁾、両者のワイブルパラメータは大差ないため、絶縁破壊特性と部分放電開始特性を区別しない。表 3 より a 値は 0.94 であるが、異物起立などが偶発的な現象として表われていると考えられる。現象が偶発的であるので、独立事象法（従来法）と累積故障法のどちらの方法でも同様な計算結果を与えるが、先行する印加電圧による空間電荷や帯電の影響は小さい場合が多いと想定されるため電圧印加が終了するごとにリセットされるという意味合いからは独立事象法（従来法）で評価することが考えられる。

油入変圧器は AC で決定される主要部位は油道バリア構造であるため、表 3 の「油道バリア」の項目（下部の網掛け）に着目する。この構造ではまず油ギャップで部分放電が開始し長時間商用周波耐電圧試験でも部分放電で合否判定するので、部分放電特性を用いる。表 3 より a 値は 0.41 であるが、これは油中浮遊粒子などがトリガーとなる弱点破壊現象を表わしている。しかしながら、この弱点の出現時間は AC 試験時間スケールより長めでばらつく。また進展の時間は短く、電圧が除かれると油流により初期の状態に戻り履歴の影響は小さいと考えられる。独立事象法（従来法）による評価は a 値が 1 より小さい場合に、他の評価法と比較して安全側となる高めの試験電圧値を与えることをからも、独立事象法（従来法）による評価が考えられる。

今回は各機器の基礎絶縁特性として定評のある文献データをベースとしたが、必ずしも実機器と等価とは言えない場合もある。今後は、モデルとしては実機器の絶縁破壊進展を等価的に表現するモデル、材料の経年劣化特性も考慮したモデル、試験条件としては印加電圧の前歴の影響（先行過電圧、過電圧インターバルの低電圧など）・過電圧継続時間と同等の時間領域の考慮、における基礎絶縁特性などの取得が必要と考えられる。

5. あとがき

電力機器の絶縁仕様である「商用周波耐電圧試験」策定の際、ワイブル分布関数を用いて信頼度評価が行なわれるが、複数の電圧レベルが混在する場合に対して課題が提起されている。本報告では、最初に複数の電圧レベル混在時のワイブル評価の各種手法を物理的意味と対応付けて整理し、次に各手法の試験電圧レベルへの影響を試算した。更に、電力機器の各種絶縁媒体・絶縁構造に対し、絶縁破壊または部分放電開始メカニズムから、適切な評価法を検討した。

以下の結果を得た。

（1） 3 種類の信頼度評価法の物理的意味合いを明らかにし、各電圧レベル下での故障確率密度関数・累積故障確率を定式化した。JEC-0102 の方法は独立事象を前提とし、その他に対極的な方法として故障進展の累積を前提とするものがある。

（2） 上項をベースに、複数の電圧印加時の長時間商用周波耐電圧試験の短時間部の計算式を定式化し、各方法におけるワイブルパラメータ値の試験電圧への影響を試算した。独立事象を前提とする従来法は、時間形状パラメータ a が 1 より小さい条件では、最も高い試験電圧を与えた。

（3） 電力機器の各種絶縁媒体・絶縁構造に対し、絶縁破壊または部分放電開始の開始および進展メカニズムから、信頼度評価法を検討した。現状利用できるデータから工学的に評価すると GIS・油入変圧器とも独立事象法（従来法）が考えられる。

上記課題に関しては、微細なメカニズムは明確ではなく、また利用できる絶縁特性データも直接応える条件下のもの

では無いが、本論文が今後の議論やデータ取得の参考になれば幸いである。

(平成 18 年 7 月 27 日受付, 平成 19 年 3 月 30 日再受付)

文 献

- (1) 「試験電圧標準」, JEC-0102-1994
- (2) 「試験電圧の考え方と過電圧」, 電気学会技術報告, No.517 (1994)
- (3) 電気協同研究会: 「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, Vol.44, No.3 (1988)
- (4) H. Hirose: "A Consideration on Mathematical Models Applied for Long-term V-t (Voltage-lifetime) Characteristics", *T. IEE Japan*, Vol.106-A, No.4, pp.185-192 (1985-4) (in Japanese)
広瀬英雄: 「長時間 V-t (電圧-時間) 特性に用いられる数学モデルについての一考察」, 電学論 A, **106**, 4, pp.185-192 (1985-4)
- (5) S. Okabe, E. Zaima, and T. Kouno: "Reliability Evaluation of Insulation of Substation Equipment by Weibull Distribution Function", *T. IEE Japan*, Vol.113-A, No.11, pp.791-792 (1993-11) (in Japanese)
岡部成光・財満英一・河野照哉: 「ワイブル分布関数による変電機器の絶縁の信頼度評価について」, 電学論 A, **113**, 11, pp.791-792 (1993-11)
- (6) 「66~154 kV (非有効接地系統) の絶縁合理化の可能性」, 電気学会技術報告, No.990 (2004)
- (7) 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)
- (8) H. Goshima, M. Yashima, T. Shindo, and T. Takuma: "Feasibility of Replacement Postponement Based on Insulation Test for Aged Gas-Insulated Power Equipment", *IEEE Trans. PE*, Vol.126, No.7, pp.694-700 (2006-7) (in Japanese)
五島久司・八島政史・新藤孝敏・宅間 董: 「経年ガス絶縁機器の絶縁試験によるリブレース時期延伸の可能性」, 電学論 B, **126**, 7, pp.694-700 (2006-7)
- (9) H. Hirose: "On The Relation Between The Weibull Distribution and The Inverse Power Law in The Long-term V-t Characteristics", *T. IEE Japan*, Vol.106-A, No.12, p.598 (1986-12) (in Japanese)
広瀬英雄: 「長時間 V-t 特性におけるワイブル分布と逆 n 乗則との関係について」, 電学論 A, **106**, 12, p.598 (1986-12)
- (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, N. Hayakawa, H. Murase, H. Hama, and H. Okubo: "Common Insulating Properties in Insulating Materials", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.13, No.2, pp.327-335 (2006)
- (12) H. Murase, S. Okabe, T. Kumai, H. Takakura, M. Takahashi, and H. Okubo: "Systematization of Insulation Design Technology for Various Electric Power Apparatus", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.13, No.2, pp.400-407 (2006)
- (13) C.M. Cooke: "Time Dependence of Breakdown in Compressed SF₆", *CI-GRE SC15 WG03* 15-76 (1976)
- (14) 岡庭 潔・財満英一・青柳浩邦・小山 博・大久保仁・上原京一: 「GIS 実機モデル (66 kV 母線) の長時間 V-t 特性」, 電気学会全国大会, No.1173, p.1534 (1988)
- (15) T. Hattori, M. Honda, H. Aoyagi, N. Kobayashi, and T. Terasaka: "A Study on Effects of Conducting Particles in SF₆ GAS and Test Methods for GIS", *IEEE*, 84WM 155-8 (1984)
- (16) S. Okabe, T. Ohno, 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・大野高宏・財満英一・小林健三・山極時生・遠藤奎将: 「GIS スパース沿面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)
- (17) M. Ikeda, S. Menju, and H. Murano: "Breakdown Probability Distribution and V-t Characteristics of Transformer", *T. IEE Japan*, Vol.95-B, No.11, pp.555-562 (1975-11) (in Japanese)
池田正巳・毛受新一・村野 稔: 「変圧器油の絶縁破壊確率分布と V-t 特性」, 電学論 B, **95**, 11, pp.555-562 (1975-11)
- (18) M. Ikeda, T. Inoue, and T. Yanari: "Wide-Time Region Equiprobabilistic Breakdown V-t Characteristic of Transformer Oil", *T. IEE Japan*, Vol.101-B, No.9, pp.564-568 (1981-9) (in Japanese)
池田正巳・井上 保・矢成敏行: 「変圧器油の広時間帯域等破壊確率 V-t 特性」, 電学論 B, **101**, 9, pp.564-568 (1981-9)
- (19) M. Ikeda, T. Inoue, and T. Yanari: "V-t Characteristics and Probabilistic Distribution of Partial Discharge and Breakdown Voltages for Transformer Insulation", *T. IEE Japan*, Vol.101-B, No.10, pp.571-578 (1981-10) (in Japanese)
池田正巳・井上 保・矢成敏行: 「変圧器複合絶縁強度の確率分布と V-t 特性」, 電学論 B, **101**, 10, pp.571-578 (1981-10)
- (20) E. Zaima, S. Okabe, T. Ohno, Y. Taniguchi, and H. Murase: "AC V-t Characteristics of Core Type Transformer Insulation Model", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.4, pp.375-381 (1995-4) (in Japanese)
財満英一・岡部成光・大野高宏・谷口安彦・村瀬 洋: 「内鉄形変圧器絶縁モデルの交流 V-t 特性」, 電学論 B, **115**, 4, pp.375-381 (1995-4)
- (21) S. Okabe, T. Ohno, E. Zaima, A. Kishi, K. Aono, and N. Hosokawa: "AC V-t and Impulse V-N Characteristics of Shell-Form Transformer Insulation Model", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.4, pp.394-400 (1995-4) (in Japanese)
岡部成光・大野高宏・財満英一: 「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」, 電学論 B, **115**, 4, pp.394-400 (1995-4)
- (22) 「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)
- (23) M. Honda, H. Aoyagi, M. Koya, N. Kobayashi, and M. Tamura: "V-t Characteristics of epoxy mold insulation for sustained AC voltage", *IEEE Trans. PD*, Vol.PAS-103, No.5 (1984-5)
- (24) S. Aoyagi, S. Yamada, H. Murase, I. Ohshima, and T. Iida: "V-t characteristics of GIS Insulating Spacer Model for a Sustained AC Voltage", 9th ISH, pp.1923-1926 (1995)
- (25) K. Ohata, G. Katsuta, Z. Iwata, Y. Maruyama, Y. Sekii, and M. Kanaoka: "A Study on Long-Term Characteristics of XLPE Cables", *T. IEE Japan*, Vol.112-B, No.9, pp.821-824 (1992-9) (in Japanese)
大島勝一・勝田銀造・岩田義輔・丸山義雄・関井康雄・金岡 護: 「CV ケーブルの長期絶縁特性に関する検討」, 電学論 B, **112**, 9, pp.821-824 (1992-9)
- (26) S. Okabe, S. Yuasa, M. Koto, and E. Zaima: "Evaluation of lightning surge waveform for LIWV reduction of substation equipment", 13-ISH P.05.66 (2003)

岡 部 成 光 (上級会員) 1986 年 3 月東京大学大学院工学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。1992 年ミュンヘン工科大学客員研究員。現在, 技術開発研究所高電圧・絶縁技術グループマネージャー。工学博士。IEEE 会員。

坪 井 敏 宏 (正員) 1999 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年 4 月, 東京電力(株)入社。現在, 技術開発研究所高電圧・絶縁技術グループ所属。主として送変電設備の絶縁協調に関する研究に従事。

高 見 潤 (正員) 1997 年 3 月同志社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, 技術開発研究所高電圧・絶縁技術グループ。主として送変電設備の絶縁協調に関する研究に従事。