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

正員 岡部 成光 (東京電力)

正員 財満 英一 (東京電力)

正員 河野 照哉 (東京大)

Reliability Evaluation of Insulation of Substation Equipment by Weibull Distribution Function

Shigemitsu Okabe, Member, Eiichi Zaima, Member (Tokyo Electric Power Company) Teruya Kouno, Member (The University of Tokyo)

キーワード：ワイブル分布関数，変電機器，試験電圧，信頼度評価

1. はじめに

変圧器・GIS など変電機器の試験電圧（波形，値，時間）は，運転期間中に加わる過電圧・運転電圧（以下，過電圧で代表させる）と絶縁物の時間的特性，すなわち，いわゆる V - t 特性を基に信頼度評価を行って決められる。近年 JEC「試験電圧」の改訂や UHV 系統の導入など新たに試験電圧を検討する機会が多いが，過電圧解析技術の進歩や基礎絶縁データの充実に対し，信頼度評価手法に関しては必ずしも明確になっていない。

現在，信頼度評価で専ら用いられているのは(1)式であり，これは一般に2変数ワイブル分布関数と呼ばれているが，数学的に2変数の分布関数ではありえないことが判明している⁽¹⁾。本レターでは，この関数の意味を明らかにし，現在採用されている信頼度評価法の正当性を説明する。

$$P=1-\exp\left\{-\left(\frac{V}{V_0}\right)^m\left(\frac{t}{t_0}\right)^a\right\} \cdots \cdots (1)$$

P ：絶縁破壊あるいは部分放電などの累積確率分布， V ：印加電圧， t ：印加時間

2. ワイブル分布関数の考え方

(1) 従来の(1)式の求め方 同等の多数のサンプルに対し一定電圧 V_1 を印加して，次々に絶縁破壊あるいは部分放電開始の時間を測定し， V_1 に対する P の分布，すなわち $P_{50\%}$ の t の値と a が得られる。この過程を複数の V で実施し， $P_{50\%}$ をとる (V, t) の組合せより m/a ，従って m を得る。すなわち， a が

どの電圧レベルでもほとんど不変という，実験結果に基づく実験式といえることができる。この式は V と t が平等に現れ，一見2変数の関数のようにみえることから，2変数ワイブル分布関数と説明されてきた。

ただし，変圧器や GIS の部分モデルの V - t 特性はかなり良く(1)式で表される⁽²⁾ことは認識しておくべき事項で，本レターはこの事実を前提として以後展開してゆく。

(2) (1)式の解釈 変圧器や GIS の部分モデルの絶縁特性に関し，絶縁破壊あるいは部分放電開始

図 1 V - t 特性の $\ln V$ - $\ln t$ 平面上での
取扱い

Fig. 1. Handling of V - t characteristics on
a $\ln V$ - $\ln t$ plane.

の電圧 V と、破壊までの時間 t は独立ではない。これは高い V に対する t は低い V に対する t より小さいことからすぐ理解されるであろう。定量的には、今回の場合は(1)項の前提より $V^n t = \text{一定}$ ($n = m/a$)の関係がある。換言すれば、 $V^n t = \text{一定}$ である複数のサンプルは、絶縁特性の面からは全く同一とみなせるということである。なお V, t について一次の自由度しかないということは、対象系の破壊に関する本質的な属性であり、ワイブル分布関数の適否など分布を近似する関数形の議論以前の基本的な特性であることを付け加えておく。

従って、 $V-t$ 平面上の破壊した (V, t) を表す点は、 $V^n t$ 軸への投影で分布を考えるべき性質のものである。その様子を図1に示すが、 $\ln V - \ln t$ 平面（取扱いを容易にするため、 $V-t$ 平面でなく $\ln V - \ln t$ 平面で考える）上に分布する要素、例えば a 点、 b 点は $\ln(V^n t) = K$ の直線に平行に移動して等価な $\ln(V^n t)$ 軸上のそれぞれ A 点、 B 点に変換する。

すなわち、分布は $V^n t$ の一変数関数とみるのが合理的であって、(1)式は変形した(2)式のほうがこの状況をよく表している。

$$P = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{V^n t}{V_0^n t_0}\right)^a\right\} \dots\dots\dots (2)$$

3. ワイブル分布による信頼度評価

(1) 従来の手法 試験電圧に関する量をサブスクリプト t 、過電圧について s で表すと、試験電圧・過電圧それぞれに(1)式を立て、除することにより(3)式を得る。ただし、ここでは簡単のため過電圧は1種類で1回のみとする。

$$V_t^m t_t^a = V_s^m t_s^a \frac{\ln(1-P_t)}{\ln(1-P_s)} \dots\dots\dots (3)$$

V_t : 試験電圧, t_t : 試験時間, V_s : 過電圧,
 t_s : 過電圧継続時間, P_t : 試験中の部分放電発生確率, P_s : 過電圧下の部分放電発生確率

(3)式の右辺の V_s, t_s, m, a, P_t, P_s は既知ないし仮定できる量であるので、 V_t または t_t を与えたらもう一方の量が求まる。あるいは、 V_t, t_t, P_t を与えることにより P_s が求まる。例えば、1.6 pu, 20 s の過電圧に対し、2 pu, 1 min の試験で絶縁設計の仕様とし、 $P_t = 2\%$ と仮定すると、 $m = 11.7, a = 0.39$ (電協研の検討⁽³⁾)で集約された変圧器に対する値)では $P_s = 0.1\%$ となる。

(2) 今回の手法 対象系の絶縁に関する属性として $V^n t = \text{一定}$ を認めると、今回示した解釈に従い、累積確率分布は(2)式となるが、それに基づく信頼度の評価は式の表記上の差異のみで計算上は上述の従来法と全く一致する。逆にいえば、従来法は2変数であることを必要としていない。

4. ま と め

変電機器の試験電圧決定の際に用いられるワイブル分布による信頼度評価法について検討した結果、2変数という言い回しは正確ではないものの、計算法としては問題のないことを確認した。

(平成5年6月16日受付)

文 献

- (1) 広瀬:「長時間 $V-t$ (電圧-寿命) 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**, 185 (昭61-4)
- (2) 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」, 同上 B, **101**, 571 (昭56-10)
- (3) 「絶縁設計の合理化」, 電気協同研究, **44**, No.3 (昭63)

岡 部 成 光 (正員)

昭和33年9月18日生。61年東京大学大学院博士課程修了。同年東京電力(株)入社。主として、絶縁協調の研究に従事。工学博士。

財 満 英 一 (正員)

昭和24年10月28日生。49年東京大学卒業。同年東京電力(株)入社。平成2年マサチューセッツ工科大学大学院修了。主として、変電技術、絶縁協調の研究に従事。IEEE 会員。

河 野 照 哉 (正員)

昭和9年6月21日生。37年東京大学大学院数物系研究科修了。現在、同大学工学部電気工学科教授。主として、高電圧工学、電気材料の研究に従事。工学博士。