熱を主ストレスとする絶縁破壊電圧の経時劣化特性の直線表示に関する一考察

正 員 袴 田 武 司 (日 立)

1. はじめに

単独の熱劣化や熱劣化に電気劣化や機械劣化が組合さった複合劣化における熱劣化を表わす式は、Dakin氏の提唱以来、化学反応速度論に基づく一次反応の式で表わされてきた。しかしながら、実際にはこの時間の関数として特性がどのように変化するかを表わす経時劣化特性の表現はほとんど使われず、この式から導かれたアレニウスプロットが賞用されてきた。これは寿命の判定値に特性が低下するに要した時間を実測すれば反応次数には関係なく、その劣化温度と実測された時間の関係より作図できる。従って、反応次数の問題は見過されてきた。

最近、予防保全のための絶縁診断がクローズアップされてきて、個々の機器の残存特性を知ることができれば、それから寿命を予測できるので、経時劣化特性そのものが関心の対象になってきた。また、経時劣化特性を直線表示することで長時間側への外挿を容易にすることは、予防保全の実践活動には極めて有効である。

本論文は、このニーズにこたえるために熱劣化による破壊電圧の経時劣化特性の直線表示について考察を加えるものである。

2. 経時劣化特性の直線表示法

Dakin氏は化学反応速度論に基づく絶縁の寿命推定法を提案した⁽¹⁾。そこでは、引張り強さとか絶縁破壊電圧などの物理量 x も(1)式を満たすものと仮定し、 $n=1$ の場合の解である(2)式が熱ストレス T による時間 t に伴う劣化特性を片対数軸で直線表示するのに

適しているとした。そして、マニラ紙の引張り強さやワニスフィルムの絶縁抵抗の事例を片対数で直線表示した。また、電気学会有機材料劣化専門委員会もこれを受けて一次反応として取扱っている⁽²⁾。

$$dx/dt = -Kx^n \dots\dots\dots (1)$$

$$\ln(x/x_0) = -Kt \quad (n=1) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 K はよく知られるように、

$$K = A \exp(-B/T) \dots\dots\dots (3)$$

であり、これを(2)式へ代入して、 t について解くと(4)式のアレニウスプロットを得る。

$$\ln t = A' + B/T \dots\dots\dots (4)$$

ところが、高圧回転機の絶縁のように材料を複合して構成するシステムでは実際には一次反応とならず、従って片対数軸では直線表示とならない場合が多い。図1はこのモデルである。直線表示の重要性は短時間の試験によって得られたこう配を使って、特性の経時劣化を長時間側へ外挿することや、その温度依存性から実働温度での劣化特性などを実験的に許容し得る時間内で予測することにある。それは、図1における実

図1 片対数表示による劣化温度の異なる場合の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 1. Breakdown voltage on a logarithmic scale versus aging time on a linear scale with parameter of aging temperature.

A Consideration of Straight Line Expression on Graph for Degradation of Electrical Breakdown Voltage with Time of Thermal Aging. By Takeshi Hakamada, Member (Hitachi, Ltd.).

袴田武司: 正員, (株)日立製作所

験温度 T_i ($i=1, 2, 3, \dots$) での特性曲線を寿命の判定値 x_{sp} まで外挿して t_i を知ることや、実働温度 T_r での特性の予測である。図1のように経時劣化特性が直線で表わされていない場合は、これらの推定は困難であり、 T_i と t_i を使って作図される(4)式のアレニウスプロットは正しいものとならない。

ところで、熱劣化の式を従来のように一次として扱うにしても、本論文のように n 次 ($n \neq 1$) としたほうが良く直線近似できるとしても、これらの式のうえでの特性の低下 (x/x_0) は時間 t に対して連続である。しかし、実際は絶縁が十分に劣化すると、既報⁽³⁾⁽⁴⁾のようにある時点で残存破壊電圧が急激に低下し、経時劣化特性が連続でなくなる。当然のことながら、この不連続現象が現われた以降の劣化にはいずれの式もあてはまらない。

本論文の目的は、この不連続点が現われる以前の経時劣化特性を直線表示することであり、この範囲において一次反応を仮定しては直線表示とならない絶縁システムの経時劣化特性に対して、直線表示するのに適した式を提案することにある。そこで、(1)式を $n \neq 1$ について解くと、

$$x/x_0 = \{1 + K(n-1)x_0^{n-1}t\}^{-1/(n-1)} \dots (5)$$

となる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} (n-1)x_0^{n-1} &= 1/\beta \\ 1/(n-1) &= \gamma \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

とおくと、

$$x/x_0 = \{1 + Kt/\beta\}^{-\gamma} \dots (7)$$

となり、 $Kt/\beta \gg 1$ ならば、 K/β を改めて K として

$$(x/x_0)^{-1/\gamma} = Kt \dots (8)$$

を得る。なお、 $Kt/\beta \gg 1$ の仮定より $t \gg \beta/K$ でなければならない。この β/K は種々の絶縁システムの実験結果から 0.5~240 時間の範囲にある。一方、寿命試験は数百時間から数千時間、実働運転は数万時間の範囲にある。従って、 β/K は t よりはるかに小さく、(5)式は一般の寿命評価においては十分に成り立つ。

さて、(8)式に(3)式を代入して対数をとると、

$$\ln(x/x_0) = -\gamma \ln t + \gamma B/T - \gamma \ln A \dots (9)$$

となる。(9)式を両対数で表示すると図2となる。

試料を加熱、振動、吸湿などの劣化サイクルに従って劣化していき、規定のサイクル、例えば 10 サイクル後に残存破壊電圧を測定すると、10 サイクルに要した時間 t_i に対して x_i で代表される分布を得ることができる。この規定サイクルで打切る方法を定サイクル試験と呼ぶ。ここで、破壊電圧を測定することなく、更に劣化サイクルを進めていけば、やがて耐電圧試験

図2 両対数表示による破壊電圧の経時劣化特性
Fig. 2. Breakdown voltage versus aging time both on logarithmic scales.

値の x_{sp} で破壊する時間の分布 t_i' を得ることができる。この方法を定ストレス試験と呼ぶことにする。図中の山形は x_i, t_i' のワイブル分布の確率密度を模式的に表わしたものである。

(9)式は定サイクル試験および定ストレス試験の結果に対して、

$$\ln(x_i/x_0) = -\gamma \ln t_i + \gamma B/T_i - \gamma \ln A \dots (10)$$

$$\ln(x_{sp}/x_0) = -\gamma \ln t_i' + \gamma B/T_i - \gamma \ln A \dots (11)$$

となる。(10)式から(11)式を引き、 γ について整理すると、

$$\gamma = \ln(x_i/x_{sp}) / \ln(t_i'/t_i) \dots (12)$$

が求まる。なお、定サイクル試験の結果は x_i を判定値としたときの寿命が t_i であったとみなすこともできる。このように、判定値を高めることでも試験時間 t_i' を t_i まで短縮できることから、 t_i' と t_i の比である Ax_{sp} は判定加速係数⁽⁵⁾と呼ばれ、

$$Ax_{sp} = t_i'/t_i = (x_i/x_{sp})^{1/\gamma} \dots (13)$$

で与えられる。

(13)式は判定値を変えたときの寿命時間の比が γ 、すなわち絶縁システムで異なることを示している。同じ意味で(2)式の判定加速係数を求めるなら、

$$Ax_{sp} = t_i'/t_i = \ln(x_i/x_0) / \ln(x_{sp}/x_0) \dots (14)$$

となる。

一般には、既報⁽³⁾のように判定値を変えた場合の寿命時間の比は絶縁システムが変われば変わるので、(14)式は普遍性に欠けることとなり、この点でも反応次数を一次としないほうが良いことがわかる。

なお、(9)式に $x=x_{sp}$ 、 $T=T_r$ として実働寿命 t_r を得ることができる。

$$\ln t_r = \ln(x_{sp}/x_0)^{-1/\gamma} - \ln A + B/T_r \dots (15)$$

ここで特に注目したいのは、同じ温度で劣化し、同じ劣化率を判定値としても寿命 t_r が異なる結果となる要因が γ と A にあることである。 A は頻度定数と呼ばれ、図2の直線 T_i および T_r 全体の時間 t に対する位置を与えるのに対し、 γ は T_i および T_r 共通のこう配を与える係数である。

3. 試料および試験方法

試料は誘導電動機、車両用電動機などに使われている絶縁システムであり、表1にその絶縁仕様を示す。モデルは図3に示す形状に成形したコイルに表1の絶縁テープをテープ巻きし、それをモデルコアに6個ずつ組み込み、さし木で固定した後いずれの試料も無溶剤レジンに真空加圧含浸したものである。

試験法は、図4に示す IEEE 275⁽⁶⁾などに準拠したいわゆるモータレット法である。すなわち、試料の予

表 1 試料の絶縁仕様

Table 1. Insulation specification of test models.

試料番号	絶縁テープの材料構成	ワニス処理法
A	ポリイミドフィルムおよび ポリアミドフィルム	無溶剤エポキシ真空加 圧含浸
B	ポリイミドフィルム 裏打集成マイカ	無溶剤 ISOX* レジン 真空加圧含浸
C	ガラスクロス 裏打集成マイカ	無溶剤エポキシ真空加 圧含浸

*: Isocyanurate Oxazolidone の略、イソシアネートとエポキシの反応生成物

図 3 モデルの外観、形状

Fig. 3. Test model.

図 4 IEEE 275 準拠のモータレット試験
1 サイクルの構成

Fig. 4. One cycle of motorette test in accordance with IEEE 275.

想耐熱区分に従って、温度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ でそれぞれ 1, 4, 14 日熱劣化した後、振動劣化を誘導電動機用は 1.5 G, 車両電動機用は 7G で行ない、その後湿度 90~100% RH の条件で十分に吸湿させた。吸湿後は直ちに耐電圧試験を x_{sp} で実施した。電圧は機器の試験電圧の 85% 値、1 分である。なお、 $\theta_1 \sim \theta_3$ は試料の予想される耐熱区分によって異なり、後述の温度を採用した。なお、(3)式の T は θ の絶対温度である。

各試料は 4~5 セットずつを準備し、適宜初期および 5, 10, 15, 20 サイクル劣化後の残存破壊電圧の分布を測定した。しかし、できるだけ劣化程度の広い範囲で経時劣化特性の直線性を確認する目的からは、20 サイクル後でもまだ十分と言えなかった。そこで、ある試料については残存破壊電圧が実働ストレスを基準とした寿命の判定値まで低下する時間の分布を測定することにした。

4. 試験結果

特性の時間に伴う劣化がどのような関数で直線表示できるかを確認するためには、データのばらつきに十分注意しなければならない。本来、絶縁の劣化データは試料の製作条件、劣化条件に起因してかなりばらつくものである。この対応策として、本論文ではデータはすべてワイブル分布上で処理して、母集団の劣化を代表する(16)式の x_i を用いることにした。図5、図6、図7は試料 A について図2を得るために求めたデータを三つの時間断面におけるワイブル分布の変化として見たものである。

まず、図5は試料 A の劣化温度 200°C での破壊電圧のワイブル分布の経時変化である。ワイブル分布の破壊確率は

図 5 試料 A の劣化サイクルに伴う
残存破壊電圧の変化

Fig. 5. Weibull distribution of residual breakdown voltage with aging cycles for model A.

図 6 試料 A の 10 サイクル後の残存破壊電圧

Fig. 6. Weibull distribution of residual breakdown voltage depending on aging temperature for model A.

図 7 試料 A の判定値での破壊時間の分布

Fig. 7. Weibull distribution of failure time by life criteria for model A.

$$F(x) = 1 - \exp\{-(x/x_s)^m\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

で表わされ、 m は形状パラメータ、 x_s は尺度パラメータと呼ばれている。この二つの定数が決まれば分布が決まる。紙数の関係で 180°C と 220°C の図は省略するが、これから劣化サイクルにつれての破壊電圧の分布の変化がわかる。

図 6 は同じく試料 A の 10 サイクル後の劣化温度による残存破壊電圧の比較であり、劣化温度 3 点がほぼ等加速劣化の条件を満たしていることがわかる。これは定サイクル試験の一例である。

図 7 は最も劣化が進行したところを知るための寿命の終点を、残存破壊電圧が x_s となったときとする時間の分布である。これは、定ストレス試験の一例である。

これらのワイブル分布定数をまとめて表 2 に示す。また、試料 B および C の結果についても同様に表 3 と表 4 に示す。これらのワイブル分布に共通なことは、劣化温度や劣化サイクルにかかわらず直線のこう配はほぼ平行であることである。すなわち、形状パラメータが一定であり、図 5 の例なら初期から 15 サイ

表 2 試料 A の劣化サイクルに伴うワイブル分布定数の変化

Table 2. Change of Weibull distribution constant with aging time for model A.

		初 期	10 後	15 後	x_{sp} における 寿命時間
220°C	m	10.4	10.3	11.7	7.1
	x_1	26.0	15.3	9.6	670
200°C	m	10.4	10.6	10.9	7.6
	x_2	26.0	16.6	9.9	2,200
180°C	m	10.4	11.8	11.2	9.4
	x_3	26.0	17.6	9.6	7,400

表 3 試料 B の劣化サイクルに伴うワイブル分布定数の変化

Table 3. Change of Weibull distribution constant with aging time for model B.

		初 期	5 後	10 後	20 後
270°C	m	9.2	10.9	10.5	10.5
	x_1	25.0	15.8	13.0	9.5
250°C	m	9.2	10.4	9.7	10.0
	x_2	25.0	15.8	11.4	8.7
230°C	m	9.2	10.3	11.3	10.1
	x_3	25.0	18.3	12.0	8.8

表 4 試料 C の劣化サイクルに伴うワイブル分布定数の変化

Table 4. Change of Weibull distribution constant with aging time for model C.

		初 期	5 後	10 後	15 後	20 後
230°C	m	9.4	11.2	9.2	9.3	9.9
	x_1	38.8	27.6	24.9	24.0	22.0
210°C	m	9.4	8.1	6.7	6.7	—
	x_2	38.8	28.5	25.7	24.8	—
190°C	m	9.4	10.3	—	—	—
	x_3	38.8	29.5	—	—	—

クルの範囲では劣化のメカニズムが一定であることを示唆している。

5. 実験結果の考察

まず、図 8 は表 2 の試料 A の 10, 15 サイクル後の定サイクル試験の結果および判定値を x_{sp} とする定ストレス試験の結果であり、図 2 の表示法により各劣化温度ごとのプロットを直線回帰したものである。すなわち、10 サイクルと 15 サイクル後の破壊電圧 x_i を初期値 x_0 で除した値 x_i/x_0 をその劣化時間 t_i に対してプロットした。また、 x_{sp}/x_0 を x_{sp} に至った時間 t_i' に対してプロットした。図 2 に示すように定サイクル試験と定ストレス試験の結果は x の分布と t' の分布の違いはあるが、分布を代表する値 x_i と t_i を使って構成する座標 $(t_i, x_i/x_0)$ と $(t_i, x_{sp}/x_0)$ と同じ

図 8 両対数表示による試料 A の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 8. Breakdown voltage versus aging time on logarithmic scales for model A.

図 9 片対数表示による試料 A の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 9. Breakdown voltage on a logarithmic scale versus aging time on a linear scale for model A.

意味であり、これを直線で結ぶことができる。各直線のこう配は、220°C が 1.0, 200°C が 1.4, そして 180°C が 1.5 であり、平均的には 1.3 となる。このように、 γ の値は熱劣化の温度に関係なくほぼ一定の値となることが明らかである。これより反応次数を求めると $n=1.8$ となる。このように、 (x/x_0) と t は両対数表示において良く直線で近似できる。

これを片対数グラフにプロットしたものが図 9 であり、実験結果より長時間側への外挿や劣化温度間の規則性の予測などが全く困難なことが容易に確かめられる。

次に、図 10 は同じく図 2 の表示法に従って、表 3 の試料 B の結果をプロットしたものである。この例は図 8 と異なり、すべて定サイクル試験のデータで座標を構成した。そして各劣化温度ごとの 3 点を直線で結んで 270, 250, 230°C における破壊電圧の経時劣化特性を得た。各直線のこう配を表わす γ はこの順に 0.37, 0.43, 0.53 であり、平均的には $\gamma=0.44$ である。従って、この n は 3.3 となる。このように絶縁システムが変わると γ の値は変わるが、劣化温度には

図 10 両対数表示による試料 B の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 10. Breakdown voltage versus aging time on logarithmic scales for model B.

図 11 片対数表示による試料 B の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 11. Breakdown voltage on a logarithmic scale versus aging time on a linear scale for model B.

関係なくやはりほぼ一定となる。これらの実験結果は γ を絶縁システムに依存する定数とし、温度には無関係と考えたことが妥当であったことを示している。

ところで、図 10 のデータを片対数表示すると図 11 となる。この図には実測範囲の実線を 2 倍の時間まで外挿した値として Δ 印を打点し、一点鎖線で示した。この外挿は図 10 より読取った Δ 印により可能となった。図 11 そのものではこの外挿は難しく、あるいは誤差の大きいものとなる。

ほかの事例として、図 12 は表 4 の試料 C の結果を図示したものである。この例では、できるだけ寿命評価の試験を短時間で終了する目的から高温側で劣化サイクルを多くし、直線性を 4 点で確認した。一方、1 サイクルに時間を要する低温側はサイクル数を減らし、高温側の直線のこう配を利用しようとするものである。これら直線の γ は高温側から 0.15, 0.13 であり、平均は 0.14 である。従って、この n は 8.1 である。

図 13 はこの片対数表示である。この例では、試料の耐熱性に対して劣化温度がやや低過ぎた結果 x/x_0

図 12 両対数表示による試料 C の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 12. Breakdown voltage versus aging time on logarithmic scales for model C.

図 13 片対数表示による試料 C の破壊電圧の経時劣化特性

Fig. 13. Breakdown voltage on a logarithmic scale versus aging time on a linear scale for model C.

が十分低下したところまで確認できてはいない。このようなデータの例では図 13 の片対数表示による実験範囲から長時間側への外挿は、図 12 の両対数表示より一層難しい。

以上の事例より、絶縁システムの残存破壊電圧の熱ストレスによる経時劣化のデータは、反応次数を n 次 ($n \neq 1$) として、両対数表示することにより良く直線で近似できる。

6. 結 言

絶縁の経時劣化特性を直線表示することは、試験条件と異なる判定値における寿命の予測や、実機の使用条件下での劣化特性の推定に極めて有意義であり、新しい絶縁システムの開発や、予防保全に有力な手段である。

(1) 高圧回転機の絶縁のように材料を複合して構成する絶縁システムの破壊電圧の経時劣化は、片対数表示では直線とならない場合が多く、これは両対数表示において直線となる。

(2) 残存破壊電圧の経時劣化特性を直線表示することにより、直ちに任意な時間における破壊電圧の推定や寿命の判定値となる時間を予測できる。

(3) この直線表示の式としては、化学反応速度論に基づく式、 $(x/x_0)^{-1/\tau} = Kt$ が取扱いに適している。

(4) この式により、定サイクル試験の結果を他の時間における特性の分布に換算することや、定ストレス試験の結果を他の寿命判定値における寿命時間の分布に換算することができる。

(昭和 58 年 9 月 20 日受付, 同 59 年 1 月 20 日再受付)

文 献

- (1) T. W. Dakin: "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon", *AIEE Trans.*, **67**, No. 113 (1948)
- (2) 電気学会有機材料劣化専門委員会編: 高分子材料の劣化 (昭 33) コロナ社
- (3) 袴田: 「絶縁の耐熱性評価における定ストレス法と定サイクル法の比較」, 電学論 A, **104**, 179 (昭 59-4)
- (4) T. Hakamada: "Analysis of Weibull Distribution for Electrical Breakdown Voltage of Stator Windings", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, **EI-19**, 114 (1984)
- (5) 塩見・高木: 信頼性技術—試験と解析 (昭 56) 電機大出版局
- (6) "Systems of Insulation Materials for A-C Electric Machinery Employing Form-Wound Preinsulated Stator Coils", *IEEE* 275 (1966)