

変圧器の開閉インパルス試験のエキスパートシステム

岩崎晴光・落合鎮康

Expert System of Switching Impulse Test for Transformer

Harumitsu IWASAKI and Sizuyasu OCHIAI

The power transformer used on UHV, EHV transmission line is put into switching impulse test after produced in the manufactory. This experiment is done in the impulse voltage generator (IVG). The experiment, according to the defined experimental voltage and the voltage wave's shape, needs the next conditions. One of the conditions is to determine the transformer, another to obtain its equivalent circuits constants, and then the construction of IVG and the charging voltage must be determined.

Until now, this experiment has been the cut & try method based on the experience, for which the expert knowledge must be piled up and leads to more loss of the time required for IVG exchange time. The authors have tried the experiments of transformers for long. Recently we considered the algorism for the estimation of circuits constants in switching impulse test of transformer. From the results, the expert system for switching impulse test of transformer, adding the memories and educational functions, was developed by the arrangement of various expert knowledge.

1. まえがき

UHV・EHV送電に用いられる電力用変圧器は、工場で製造されると、開閉インパルス耐電圧試験が課せられる。この試験はインパルス電圧発生器（以下IVGと略記）を用いて実施される。規定の試験電圧⁽¹⁾と電圧波形⁽²⁾などに従って、試験を行なうためには、変圧器が定まると、その等価回路定数を求めて、IVGの構成と充電電圧を決定しなければならない。

従来より、この試験は経験により、Cut & Tryで行なわれることが多く、専門的知識の積み重ねが必要なうえ、IVG組み替えの時間的損失が多かった。筆者は、嘗て、変圧器の試験に関与し、最近はSplin関数（以下、S関数と略記）を用い、変圧器の開閉インパルス試験回路定数算定のアルゴリズムを研究した⁽³⁾。従って、これら専門的知識を整理して、記憶し、推論機能を加えて、所謂、エキスパートシステムを開発した。

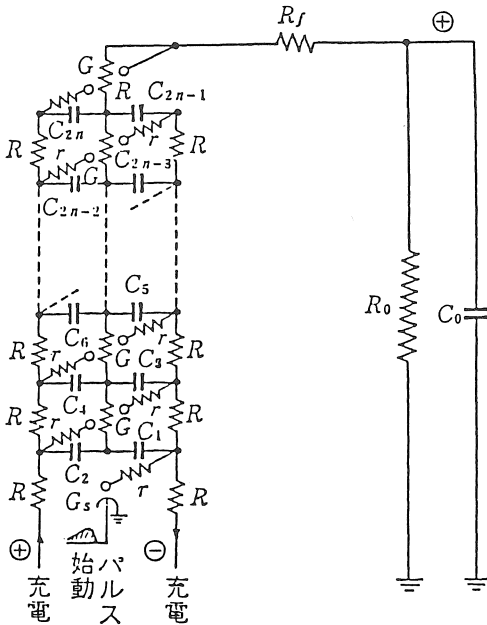
2. 変圧器とIVG

試験する変圧器が決まると、試験電圧、極性、が与えられる。まづ、IVGの段数を決めなければならない。

2・1 IVGの段数

図1(a)はIVGのみの実際の回路、図1(b)はその等価回路を示す。 C_g はインパルス電圧発生器の直列総合等価静電容量、 $C_g = C_1 / 2N$ 、 N は段数、 r_0 は合成等価充電抵抗、 r_s は波頭調整用抵抗（全制動抵抗の和 $r_{s1} = 2Nr$ を含む）、倍電圧直列充電方式の場合、 $r_0 = (N-1)R/3$ となる。

図2(a)は変圧器の低圧巻線にIVGを接続した低圧誘導法の試験回路をしめす。低圧巻線の巻数を n_1 、高圧巻線の巻数を n_n 、 $n_n/n_1 = n$ とすれば、低圧巻線の印加電圧は高圧巻線には n 倍となって現われる。試験電圧を V_m 、IVGの利用率を η 、IVGの充電電圧を E とすれば、 $E = V_m / (n\eta)$ と E の値が求まり、これを段数で割れば1段の充電電圧の概算値が求められる。 η の値は0.45~0.65で、やや低めに採っ



$C_1, C_2 \dots C_{2n}$: 充電コンデンサ, 一般に $C_1 = C_2 \dots C_{2n} = C'$
 R : 充電抵抗 r : 制動抵抗
 R_f : 波頭調整用抵抗
 C_0 : 波頭調整用コンデンサ
 R_0 : 放電抵抗 (あるいは分圧器抵抗)

図1 (a)開閉インパルス電圧発生回路 (正極性電圧発生の場合)

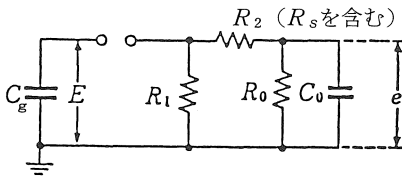


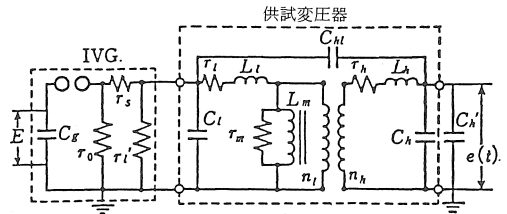
図1 (b)開閉インパルス電圧発生の等価回路

たほうがよい。Eの正確な値は後で計算して決めるので、ここでは段数を選ぶための概算である。

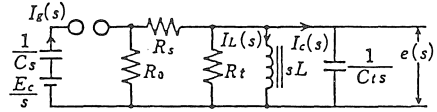
図2(b)は変圧器の高圧巻線にIVGを直接印加する試験回路である。高圧巻線側に換算されたIVGの充電電圧 $E_c (=nE)$ は、 $E_c \doteq V_m / \eta$ これを段数で割れば1段の充電電圧 $= E/n$ の概算値が求められる。 η の値は0.65~0.85で、やや低めに採る。 E_c の正確な値は後で計算して決める。

2・2 変圧器のL, C_hの測定

図2(a)のC_hで示される高圧巻線側に入れる波頭



(a) IVGと変圧器の試験回路 (低圧誘導法)



(b) s-平面の試験等価回路

図2 変圧器の開閉インパルス試験等価回路

長調整固定コンデンサ約 $6E-9[F]$, $r_s n^2 \doteq 3E4 [\Omega]$ を接続し、 r_1 は接続しないで、出来るだけ低い充電電圧で1回変圧器に電圧を印加し、電圧波形を測定する。次に、直ちにIVGの極性を変えて、同じ充電電圧でもう1回電圧を印加し消磁をしておく。測定した電圧波形より波頭長の値 T_{crm} と波尾長の値 T_{2m} を計る。

図2(b)の高圧側巻線に換算された試験等価回路に於いて、 $C = C_g n^{-2}$, $E_c = nE$, $R_s = n^2 r_s$, $R_0 = n^2 r_0$, $R_t \doteq R_1 = n^2 r_1$, $L = n^2 L_m$ である。

$$a = (CR_0)^{-1} + (CR_s)^{-1} + (C_t R_s)^{-1} + (C_t R_t)^{-1} \dots (1.1)$$

$$b = (LC_t)^{-1} + (CC_t R_0 R_s)^{-1} + (R_0^{-1} + R_s^{-1})(CC_t R_t)^{-1} \dots (1.2)$$

$$d = (R_0^{-1} + R_s^{-1})(LCC_t)^{-1} \dots (1.3)$$

$$a_0 = ad^{-1/3} \dots (1.4)$$

$$b_0 = bd^{-2/3} \dots (1.5)$$

とする。

時間変換した波頭長 T'_{cr} は a_0 と b_0 の S 関数で、これを $T'_{cr}(a_0, b_0)$ とすると、

$$T'_{cr}(a_0, b_0) = \exp [A_0 + A_1 \ln a_0 + A_2 (\ln a_0)^2 + \{B_0 + B_1 \ln a_0 + B_2 (\ln a_0)^2\} \ln b + \{D_0 + D_1 \ln a_0 + D_2 (\ln a_0)^2\} \ln b_0] \dots (2)$$

$A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, D_0, D_1, D_2$ の値は表1に示す。

時間変換した波尾長 T'_2 は a_0, b_0 の S 関数で、これを $T'_2(a_0, b_0)$ とすると、

$$T'_2(a_0, b_0) = \exp [K_0 + K_1 \ln a_0 + K_2 (\ln a_0)^2 + \{M_0 + M_1 \ln a_0 + M_2 (\ln a_0)^2\} \ln b_0 + \{N_0 + N_1$$

表1 $Ter'(a_0, b_0)$ の $A_0 \sim D_2$

$A_0=5.680E-2$	$A_1=-2.193E-1$	$A_2=-6.890E-2$
$B_0=-2.490E-1$	$B_1=5.030E-2$	$B_2=-3.840E-3$
$D_0=-6.377E-2$	$D_1=1.763E-2$	$D_2=-1.270E-3$

$5.680E-2 = 5.680 \times 10^{-2}$

表2 $T'_2(a_0, b_0)$ の $K_0 \sim O_2$ の値

1 ≤ a ₀ ≤ 10, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 100		
$K_0=6.379E-1$	$K_1=-1.311E-1$	$K_2=1.323E-1$
$M_0=-2.202E-1$	$M_1=-1.283E-2$	$M_2=-2.100E-3$
$N_0=-6.921E-2$	$N_1=-2.835E-2$	$N_2=9.345E-3$
$O_0=0$	$O_1=0$	$O_2=0$
10 ≤ a ₀ ≤ 100, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 2		
$K_0=-1.340E-1$	$K_1=4.902E-1$	$K_2=7.061E-3$
$M_0=-3.907E-1$	$M_1=9.590E-2$	$M_2=-5.958E-3$
$N_0=-9.970E-2$	$N_1=2.311E-2$	$N_2=-1.277E-3$
$O_0=0$	$O_1=0$	$O_2=0$
10 ≤ a ₀ ≤ 100, 2 < b ₀ ≤ 100		
$K_0=8.200E-2$	$K_1=3.516E-1$	$K_2=1.641E-2$
$M_0=-9.021E-1$	$M_1=4.943E-1$	$M_2=-4.743E-2$
$N_0=-6.924E-3$	$N_1=-1.848E-1$	$N_2=2.739E-2$
$O_0=5.475E-2$	$O_1=-4.441E-3$	$O_2=-7.200E-4$

$$\cdot \ln a_0 + N_2(\ln a_0)^2\}(\ln b_0)^2 + \{O_0 + O_1 \ln a_0 + O_2(\ln a_0)^2\}(\ln b_0)^3 \dots\dots\dots(3)$$

$K_0, K_1, K_2, M_0, M_1, M_2, N_0, N_1, N_2, O_0, O_1, O_2$ の値は表2に示す。

L, C_1 以外の C, R_s, R_o, R_t の値は与えられているので、 T'_{cr}, T'_2 は L, C_1 の関数であり、 d も L, C_1 の関数であるから、次の連立方程式が成立する。

$$T'_{cr}(L, C_1)d^{-1/3} - T_{cr} = 0 \dots\dots\dots(4.1)$$

$$T'_2(L, C_1)d^{-1/3} - T_{2m} = 0 \dots\dots\dots(4.2)$$

(4)式の根 L, C_1 は次のように、逐次2分法によりコンピュータで求めるとよい。

(1), (4)式の L に推定値 $L=1E2[H]$, C_1 を $C_{t1}=1E-9[F]$, $C_{t2}=2E-8[F]$, $C_{t3}=(C_{t1}+C_{t2})/2$ として、

$$T'_{cr}(L, C_{t1})d^{-1/3} - T_{cr} = T_{cr1}$$

$$T'_{cr}(L, C_{t2})d^{-1/3} - T_{cr} = T_{cr2}$$

$$T'_{cr}(L, C_{t3})d^{-1/3} - T_{cr} = T_{cr3}$$

を計算する。 $T_{cr1}, T_{cr2}, T_{cr3}$ は数値である。 $T_{cr1} \cdot T_{cr2} < 0$ ならば区間 $C_{t1} \sim C_{t3}$ に根を含む、さもなければ区間 $C_{t3} \sim C_{t2}$ に根が含まれる。いずれの区間にも根がふくまれないならば、区間 $C_{t1} \sim C_{t2}$ を拡げる。

根を含む方を改めて、 C_{t1}, C_{t2} として、以上の操作を繰り返し、 $|C_{t2} - C_{t1}| \leq 1E-13[F]$ が満たされる C_{t1} を C_t とする。

(2), (4)式の C_t に(1)で求めた C_t の値を入れ、 L を $L_1=1E2[H]$, $L_2=2E4[H]$, $L_3=(L_1+L_2)/2$ として、

$$T'_2(L_1, C_t)d^{-1/3} - T_{2m} = T_{21}$$

$$T'_2(L_2, C_t)d^{-1/3} - T_{2m} = T_{22}$$

$$T'_2(L_3, C_t)d^{-1/3} - T_{2m} = T_{23}$$

を計算する。 T_{21}, T_{22}, T_{23} は数値である。

$T_{21} \cdot T_{23} < 0$ ならば区間 $L_1 \sim L_3$ に根を含む、さもなければ区間 $L_3 \sim L_2$ に根が含まれる。いずれの区間にも根がふくまれないならば、区間 $L_1 \sim L_2$ を拡げる。根を含む方を改めて、 L_1, L_2 として、以上の操作を繰り返し、 $|L_2 - L_1| \leq 1E-1[H]$ が満たされる L_1 を L の値とする。

(3), (2)で求めた L の値を(4.1)式に与え(1)で求めた C_t の1.5倍を C_{t1} とし、 C_t の1/2を C_{t2} として(1)と同じ操作により C_t を求める。

(4), (3)で求めた C_t を(4.2)式に与え、(2)で求めた L の1.5倍を L_1 とし、 L の1/2を L_2 として(2)と同じ操作で L を求める。

(5), (3), (4)の操作を繰り返して、 $|C_{t2} - C_{t1}| \leq 1E-13[F]$, かつ $|L_2 - L_1| \leq 1E-1[H]$, が満たされる C_{t1} を C_t, L_1 を L と決める。

3. 与えられた電圧波形にする回路定数の算定

電圧波形は $T_{cr}/T_2(0)/T_d(90)$ か T_{cr}/T_2 で与えられる。図2(b)の等価回路で、 C はIVGの段数より既に決められている。IVGの設備により、 CR_0 の値は段数が変わっても一定である。たとえば、一例では $CR_0=1.5E-2$, 従って、 C が決まれば R_o もきまる。 L, C_t の値は2・2で求められているので、 R_s, R_t の値を算定する。

3・1 $T_{cr}/T_d(90)$ が与えられた場合

時間変換した波頭長 $T'_{cr}(a_0, b_0)$ は C, R_o, L, C_t の値が定められているので、(1.1)~(1.5)式より $T'_{cr}(a_0, b_0)$ は $T'_{cr}(R_s, R_t)$ になる。波高値の90%を越える時間 $T_d(90)$ を時間変換した T'_d は、 a_0, b_0 のS関数であって、次式で表される。

$$T'_d(a_0, b_0) = \exp [F_0 + F_1 \ln a_0 + F_2 (\ln a_0)^2 + F_3 (\ln a_0)^3 + \{G_0 + G_1 \ln a_0 + G_2 (\ln a_0)^2 + G_3 \cdot (\ln a_0)^3\} \ln b_0 + \{H_0 + H_1 \ln a_0 + H_2 (\ln a_0)^2 + H_3 (\ln a_0)^3\} (\ln b)^2 + \{J_0 + J_1 \ln a_0 + J_2 (\ln a_0)^2 +$$

表3 $T_d'(a_0, b_0)$ の $F_0 \sim J_3$ の値

$1 \leq a_0 \leq 7, 0.1 \leq b_0 \leq 100$			
F_0	F_1	F_2	F_3
-3.731E-1	3.999E-2	-1.900E-2	2.380E-2
G_0	G_1	G_2	G_3
-2.436E-1	-1.123E-2	-1.261E-2	0
H_0	H_1	H_2	H_3
-7.261E-2	-1.567E-2	2.031E-2	-4.772E-3
J_0	J_1	J_2	J_3
O	O	0	0
$7 \leq a_0 \leq 100, 0.1 \leq b_0 \leq 1$			
F_0	F_1	F_2	F_3
4.017E-2	-6.684E-1	3.471E-1	-3.096E-2
G_0	G_1	G_2	G_3
1.443E-1	-4.588E-1	1.399E-1	-1.184E-2
H_0	H_1	H_2	H_3
-7.658E-3	-5.939E-2	1.756E-2	-1.183E-3
J_0	J_1	J_2	J_3
O	0	0	0
$7 \leq a_0 \leq 100, 1 < b_0 < 100$			
F_0	F_1	F_2	F_3
1.888E-1	-8.018E-1	3.838E-1	-3.411E-2
G_0	G_1	G_2	G_3
1.115	-1.409	4.045E-1	-3.423E-2
H_0	H_1	H_2	H_3
-7.657E-1	7.742E-1	-2.698E-1	2.760E-2
J_0	J_1	J_2	J_3
8.901E-2	-8.983E-2	3.305E-2	-3.623E-3

$$J_3(\ln a_0)^3] \dots\dots\dots(5)$$

$F_0 \sim J_3$ の値は表3に示す。

$T_d'(a_0, b_0)$ は $T_d'(R_s, R_t)$ であるから次の連立方程式の根, R_s, R_t の値を前述の逐次二分法と同じ方法で求める。

$$T_{cr}'(R_s, R_t)d^{-1/3} - T_{cr} = 0 \dots\dots\dots(6. 1)$$

$$T_d'(R_s, R_t)d^{-1/3} - T_d(90) = 0 \dots\dots\dots(6. 2)$$

R_s の初期値の範囲は3~60K [Ω], R_t の初期値の範囲は10~2,000K [Ω]にとるとよい。

3・2 T_{cr}/T_2 が与えられた場合

$T_2'(a_0, b_0)$ は(3)式で示され $T_2'(R_s, R_t)$ となるから, 次の連立方程式の根, R_s, R_t の値を同じく, 逐次二分法で求めればよい。

$$T_{cr}'(R_s, R_t)d^{-1/3} - T_{cr} = 0 \dots\dots\dots(7. 1)$$

$$T_2'(R_s, R_t)d^{-1/3} - T_2 = 0 \dots\dots\dots(7. 2)$$

表4 $\eta'(a_0, b_0)$ の $P_0 \sim S_2$ の値

$1 \leq a_0 \leq 25, 0.1 \leq b_0 \leq 100$			
P_0	P_1	P_2	P_3
-6.723E-1	-4.398E-1	-1.547E-1	1.416E-2
Q_0	Q_1	Q_2	
-2.008E-1	1.073E-1	-1.500E-2	
S_0	S_1	S_2	
-5.426E-2	2.538E-2	-3.533E-3	
$25 < a_0 \leq 100, 0.1 \leq b_0 \leq 100$			
P_0	P_1	P_2	P_3
-6.723E-1	-4.398E-1	-1.547E-1	1.416E-2
Q_0	Q_1	Q_2	
-8.784E-2	3.765E-2	-4.085E-3	
S_0	S_1	S_2	
-6.185E-2	2.488E-2	-2.552E-3	

R_s, R_t の初期値は3. 1と同じでよい。

4. 利用率 η の計算と IVG の充電電圧 E の決定

C, R_o, R_s, R_t, L, C_t の値が決まると, (1. 1)~(1. 5)式より a_0, b_0 の値を求めて, IVGの利用率 η を計算する。

$$V_m = E_c \eta = E_c (C_t R_s d^{-1/3})^{-1} \cdot \eta(a_0, b_0) \dots\dots\dots(8)$$

a_0, b_0 のS関数である η' は次式で表される。

$$\eta'(a_0, b_0) = \exp [P_0 + P_1 \ln a_0 + P_2 (\ln a_0)^2 + P_3 \cdot (\ln a_0)^3 + \{Q_0 + Q_1 \ln a_0 + Q_2 (\ln a_0)^2\} \ln b_0 + \{S_0 + S_1 \ln a_0 + S_2 (\ln a_0)^2\} (\ln b_0)^2] \dots\dots\dots(9)$$

$P_0 \sim S_2$ の値は表4に示す。

$\eta = (C_t R_s d^{-1/3})^{-1} \eta'(a_0, b_0)$ と η の値が計算出来る。従って, 充電電圧 E は次式で求められ, これを段数で割れば1段の充電電圧となる。

$$E = E_c / n = V_m / (\eta n) \dots\dots\dots(10)$$

5. 逆極性低減電圧

変圧器の開閉インパルス試験では, 印加電圧が高くなると鎖交磁束が飽和し, 飽和までの時間 T_s から電圧波形の波尾が急落する。それを防ぐため試験印加電圧と逆極性の低減電圧を印加する。

5・1 与えられた波形が $T_{cr}/T_2(0)/T_d(90)$ の場合

$T_{cr}/T_d(90)$ にする回路定数は, 3. 1で計算されている。定められた $T_2(0) \geq 1,000\mu s$ にするために

表5 r₀のg₀~q₃の値

1 ≤ a ₀ ≤ 5, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 100			
g ₀	g ₁	g ₂	g ₃
1.679E-3	4.829E-1	6.526E-1	-2.129
h ₀	h ₁	h ₂	h ₃
-5.628E-1	2.423E-2	4.658E-1	-1.818E-1
p ₀	p ₁	p ₂	p ₃
-2.956E-1	-1.758	2.629	-8.961E-1
q ₀	q ₁	q ₂	q ₃
0	0	0	0
5 < a ₀ ≤ 20, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 100			
g ₀	g ₁	g ₂	g ₃
-1.648E-1	1.124	-2.387E-2	0
h ₀	h ₁	h ₂	h ₃
-1.151	1.424	-5.829E-1	7.939E-2
p ₀	p ₁	p ₂	p ₃
-1.581E-1	1.024E-1	-1.654E-2	0
q ₀	q ₁	q ₂	q ₃
0	0	0	0
20 < a ₀ ≤ 100, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 100			
g ₀	g ₁	g ₂	g ₃
1.547E-1	9.299E-1	8.000E-3	0
h ₀	h ₁	h ₂	h ₃
-6.902E-2	3.007E-2	-3.300E-3	0
p ₀	p ₁	p ₂	p ₃
0	0	0	0
q ₀	q ₁	q ₂	q ₃
0	0	0	0

は、逆極性・低減電圧・波高値 V_{m0}を印加すればよい。E_nを供試高圧巻線の定格電圧実効値、ωを角速度、B_nを設計値の最大磁束密度、開閉インパルス電圧の飽和磁束密度 B_s = 2 [T]、時間変換した飽和までの時間 T'_s = T_sd^{-1/3} ≧ (750E-6)d^{-1/3}とする。x³ + a₀x² + b₀x + 1 = 0 の3根を -α₀, -β₀, -γ₀とすると、γ₀は次の(11)式により求められ、{x² + (α₀ + β₀)x + α₀β₀}(x + γ₀) = 0 から α₀, β₀が計算される。k₁ = {(α₀ - β₀)(γ₀ - α₀)⁻¹}, k₂ = {(β₀ - γ₀)(α₀ - β₀)⁻¹}, k₃ = {(γ₀ - α₀)(β₀ - γ₀)⁻¹}となる。

$$r_0 = \exp [g_0 + g_1 \ln a_0 + g_2 (\ln a_0)^2 + g_3 (\ln a_0)^3 + \{h_0 + h_1 \ln a_0 + h_2 (\ln a_0)^2 + h_3 (\ln a_0)^3 \} \ln b_0 + \{k_0 + k_1 \ln a_0 + k_2 \ln a_0 + k_3 (\ln a_0)^3 \} (\ln b_0)^2 + \{q_0 + q_1 \cdot \ln a_0 + q_2 (\ln a_0)^2 + q_3 (\ln a_0)^3 \} (\ln b_0)^3] \dots \dots \dots (11)$$

g₀~q₃の値は表5に示す。時間変換した鎖交磁束をΦ'_mとすると、

表6 φ m' (a₀, b₀)のU₀~W₂の値

1 ≤ a ₀ ≤ 7, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 100		
U ₀	U ₁	U ₂
-2.657E-1	-4.928E-1	8.630E-3
V ₀	V ₁	V ₂
-4.218E-1	1.003E-1	-1.557E-2
W ₀	W ₁	W ₂
-1.283E-1	6.996E-3	3.169E-3
7 < a ₀ ≤ 100, 0.1 ≤ b ₀ ≤ 4		
U ₀	U ₁	U ₂
-4.177E-1	-3.940E-1	-7.067E-3
V ₀	V ₁	V ₂
-4.887E-1	1.355E-1	-1.060E-2
W ₀	W ₁	W ₂
-1.405E-1	3.841E-2	-3.040E-3
7 < a ₀ ≤ 100, 4 < b ₀ ≤ 100		
U ₀	U ₁	U ₂
-1.131	2.095E-1	-1.086E-1
V ₀	V ₁	V ₂
2.394E-2	-3.042E-1	6.952E-2
W ₀	W ₁	W ₂
-2.155E-1	8.063E-2	-1.326E-2

$$\Phi'_m(a_0, b_0) = \exp [U_0 + U_1 \ln a_0 + U_2 (\ln a_0)^2 + \{V_0 + V_1 \ln a_0 + V_2 (\ln a_0)^2\} \ln a_0 + \{W_0 + W_1 \cdot \ln a_0 + W_2 (\ln a_0)^2\} (\ln b_0)^2] \dots \dots \dots (12)$$

U₀~W₂の値は表6に示す。依って、V_{m0}は次式で与えられる。

$$V_{m0} = [\sqrt{2} E_n B_s \eta (a_0, b_0) d^{1/3} (\omega B_n)^{-1} - V_m \{-k_1 \exp(-\alpha_0 T_s) - k_2 \exp(-\beta_0 T_s) - k_3 \exp(-\gamma_0 T_s)\}] \cdot \{\Phi'_m(a_0, b_0)\}^{-1} \dots \dots \dots (13)$$

5・2 与えられた波形が標準波形 T_{cr}/T₂の場合

標準波形 T_{cr}/T₂にする回路定数は、3・2で計算されている。波尾に於いて磁気飽和を起こすことなく標準波形にするためには、逆極性の50%低減電圧を続けて2回印加し、1回目の電圧・電流波形は故障検出の認定に使用し、2回目で逆極性の大きい残留磁束を与えて、次に、所定の試験電圧を印加すればよい。

この場合、低減・所定の電圧・電流波形はともに相似な標準波形になる。標準波形の場合の T_d(90)/T_{cr} = 2.2~2.5, T₂/T_d(90) = 4.0~4.6である。標準波形 T_{cr}/T₂ = 250/2500μs の場合の T_d(90)の値は 547~614μs で常に、200μs より大きい。

6. 各種試験規格と IVG の運用

鎖交磁束の値は電圧波形の時間積分値に等しく、鉄心に残る残留磁束は、巻線に流れる電流が最後に零になった時の磁束に等しい。これを打ち消すように、逆極性に大きく励磁して置けば所定の電圧波形の波尾は落ちない。

所定の電圧を印加するため IVG を充電中、IVG

が不整放電を起こす，所謂自爆が起こった場合は，直ちに IVG の充電の極性を換え，自爆と同じ充電電圧で逆極性の電圧を印加すれば，変圧器は所定の電圧を印加する前の条件に，ほぼ戻る。また，変圧器の L, C_r の測定のための電圧の印加，所定の電圧を印加する IVG の充電電圧を決めるために行なう低減電圧の印加には，必ずその直後，逆極性の同じ充電電圧の電圧を印加し，電圧を印加するまえの条件にして置く。以上のことを考慮して，試験規格に従って，試験を実施する。

6・1 JEC-0301「静止誘導器インパルス耐電圧試験」⁽²⁾に依る試験

試験電圧波形は， $+T_{cr}/T_2(0)/T_d(90)=+100/1000(0)/200(90)\mu s$ 。波形の裕度は $T_{cr}=50\sim 150\mu s$ ， $T_2(0)\geq 800\mu s$ ， $T_d(90)\geq 160\mu s$ 。試験の順序と回数，50～75%の低減電圧を1回，所定の試験電圧を1回。以上の試験において，変圧器にて絶縁破壊を生じてはならない。その認定は，低減・所定の試験において電圧・電流波形間の比較によって行なう。

JEC-212「インパルス電圧電流試験一般」⁽⁴⁾は電気機器ならびにその他の電気工作物の試験に適用される。標準開閉インパルスの試験電圧波形は， $\pm T_{cr}/T_2=\pm 250/2500\mu s$ 。波形の裕度は $T_{cr}=200\sim 300\mu s$ ， $T_2=1000\sim 4000\mu s$ 。個々の試験対象に特有の事項は，それぞれの規格による，となっている。変圧器の開閉インパルス電圧試験においては，巻線に印加する電圧が高くなると，鉄心の磁気飽和のため励磁インダクタンスが急激に小さくなり，電圧の継続時間が制限される。従って変圧器には， $100/1000(0)/200(90)\mu s$ を用いることが推奨されている。

以上のことから，試験電圧波形を， $+T_{cr}/T_2=+150/1500\mu s$ にすると， $T_{cr}=50\sim 150\mu s$ ， $T_d(90)\geq 160\mu s$ ， $T_2(0)\geq 800\mu s$ を満足する。そして，低減・所定の電圧波形は，いずれも波尾において，磁気飽和の起こらない全波電圧波形を用いる。実施の方法は，5・2に示されている。

6・2 ANSI/IEEE C57⁽⁵⁾に依る試験

試験電圧波形は， $T_{cr}\geq 100\mu s$ ， $T_2(0)\geq 1000\mu s$ ， $T_d(90)\geq 200\mu s$ ，極性は+または-のいずれか，あるいは両方。試験の順序と回数は，50～70%の低減電圧1回，所定の試験電圧2回。この場合は，試験電圧波形として， $T_{cr}/T_2=200/2000\mu s$ にする。+70%低減電圧1回，-100%電圧1回，+100%電圧1回に

すると，低減・所定の電圧波形はいずれも全波電圧波形になり，波形は規格を満足し，印加回数も最小である。

6・3 IEC Standard Pub. 76-3⁽⁶⁾に依る試験

試験電圧波形は， $T_{cr}\geq 20\mu s$ ， $T_2(0)\geq 500\mu s$ ， $T_d(90)\geq 200\mu s$ ，極性は-。試験の順序と回数は，50～75%の低減電圧1回，所定の試験電圧3回。この場合， $T_{cr}\geq 20\mu s$ ではあるが，波形調整のし易さから試験電圧波形は， $T_{cr}/T_2=200/2000\mu s$ にする。-50%低減電圧1回，+50%低減電圧3回（逆極性励磁を大きくするため），-100%電圧1回め，+70%低減電圧3回，-100%電圧2回め，+70%低減電圧3回，-100%電圧3回め。低減電圧を多数回印加するが，低減・所定の電圧波形はいずれも全波電圧波形となり，故障検出に危擬をはさむ余地はなくなる。

7. あとがき

エキスパート・システムとは，問題領域の専門家（エキスパート）が得ている専門知識を用いて推論を行い，専門的に高度な現実の問題を，専門家と同等のレベルで解決する知的システムをいう⁽⁷⁾。

つまり，エキスパートでなければ，うまく解決できないような問題を，エキスパートと同等のレベルで，解決できる能力（performance）をもつことが，重要なポイントである。エキスパート・システムのユーザが専門家である場合には，問題解決に関する作業能率や，信頼性の向上などの，利点は大きい。現代のように，専門領域の細分化が進んでくると，すべての領域に関連して，十分な知識に精通することは，困難となるばかりでなく，勘違いや見落としからくる作業能率の低下や，信頼性の低下が避けられない。このような状況から，エキスパート・システムの必要性が生まれてくる。

参考文献

- (1) JEC-193-1974：試験電圧標準。
- (2) JEC-0301-1989：静止誘導器インパルス耐電圧試験。
- (3) 岩崎晴光，宮地 敏，落合鎮康，富永雅久，大久保 修：変圧器の開閉インパルス試験回路定数算定のアルゴリズム，電気学会論文誌100巻6号，269-276，1988。
- (4) JEC-212-1984：インパルス電圧電流試験

一般

- (5) ANSI/AIEE C57. 12. 00—1980
- (6) IEC Standard Publication 76-3, 1980 :
Power Transformers Part 3 : Insulation Level
and dielectric tests
- (7) 上野晴樹, 小山照夫 : エキスパートシステム,
3, オーム社, 東京, 1988.
(受理 平成元年1月25日)