

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2023.01.025

基于等级云模型的油纸绝缘老化状态评估

刘庆珍¹, 陈俊鸿²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司晋江市供电公司, 福建 晋江 362200)

摘要: 针对油纸绝缘介电响应法中单一特征量老化评估不准确等问题, 提出运用等级云模型进行多特征量的油纸绝缘老化状态评估。首先, 运用矩阵束算法对等效电路进行参数辨识, 提出两个能分别表征几何支路和极化支路老化状态的新时域特征量; 然后, 结合主、客观两种不同赋权方法进行综合权重的计算; 最后, 使用等级云模型来构建设备老化状态的评估模型: 根据云模型理论和实测数据得到各标准等级云模型的数字特征, 将待评估设备的各项指标与标准等级云模型进行关联度计算, 从而得到设备的绝缘老化等级。经若干实例验证, 该方法得到的评估结果能正确反映设备的真实情况, 具备较高的应用可行性。

关键词: 油纸绝缘; 介电响应法; 老化状态评估; 矩阵束算法; 等级云模型

Assessment of Ageing State of Oil-paper Insulation Based on Grade Cloud Model

LIU Qingzhen¹, CHEN Junhong²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Jinjiang Power Supply Company, Fujian Jinjiang 362200, China)

Abstract: Aiming at the problem of inaccurate aging assessment of single characteristic quantity in the oil-paper insulation dielectric response method, the grade cloud model is proposed to assess the aging state of oil-paper insulation with multiple characteristic quantities. First, the matrix pencil method is used to identify the parameters of the equivalent circuit, and two new time-domain characteristic quantities that can characterize the aging state of the geometric branch and the polarization branch are proposed respectively. Then, the comprehensive weight calculation is performed in combination with the subjective and objective weighting methods. Finally, the grade cloud model is used to construct the assessment model of the aging state of the equipment. According to the theory and the actually measured data of the cloud model, the digital characteristics of each standard grade cloud model are obtained. The correlation calculation of the various indexes of the equipment to be assessed and the standard grade cloud model is performed to obtain the insulation aging grade of the equipment. It is proved by a number of examples that the assessment results obtained by this method can correctly reflect the real condition of the equipment and have high application feasibility.

Key words: oil-paper insulation; dielectric response method; aging state assessment; matrix pencil method; grade cloud model

0 引言

油纸绝缘电力变压器是电力系统中最重要、最核心的设备之一, 其正常运行是电力系统安全运行的重要前提之一^[1], 及时、有效地对设备进行油纸绝缘老化评估, 对避免因绝缘老化问题引起停电事故具有十分重要的意义^[2]。

目前通过油纸绝缘介电响应特性实验法得到的能表征变压器绝缘老化状态的时域特征量已有许多, 如初始斜率 $S_p^{[3]}$ 、回复电压峰值 $U_{\max}^{[3]}$ 、峰值时间 $t_p^{[3]}$ 、主时间常数 $t_{\text{dcom}}^{[3]}$ 、陷阱密度谱峰值 $S_{\max}^{[1]}$ 、豫贡献度 $A^{[4]}$ 、弛豫谱线能量 $Q^{[4]}$ 、极化小电阻支路数 $l_{\text{low_r}}^{[5]}$ 、极化最大斜率 $a\tau_{\max}^{[5]}$ 、最大截距 $b\tau_{\max}^{[5]}$ 等均与变压器的绝缘老化有一定的关系, 其中文[1]引入了陷阱密

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174117)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(61174117).

度理论,提出了陷阱密度谱峰值 S_{\max} 以及其对应的峰值时间 T_{\max} ;文[4]结合老化机理分析对电流数据进行数学计算,提出弛豫贡献度 A 以及弛豫谱线能量 Q 。并且目前油纸绝缘的时域介质响应法中还蕴含着许多特征量等待挖掘。

单一特征量的诊断往往具有片面性,所以现在越来越多学者综合考虑多种特征量并运用评估算法进行综合诊断,均得到了良好的评估准确度,如TOPSIS法^[6]、区间灰靶分类^[7]、灰色关联度^[8]、粗糙集理论^[9]。其中文[8]通过对比设备参数与标准状态之间的灰色关联度,成功评估出绝缘状态;文[9]利用粗糙集理论对评估指标进行决策表属性简约,有效去除冗余指标,形成简化决策表,且对大部分变压器的评估结果都较准确。但这些传统模糊评价方法需要先验知识的隶属函数来确定决策表,存在主观性,不能真实反映实际情况。

为了丰富油纸绝缘时域特征量以及完善目前已有的综合评估方法,文中运用矩阵束算法进行参数辨识,提出基于等效电路的新特征量,并运用等级云模型进行多特征量指标的绝缘老化状态综合评估,通过引入事物的随机性,同时考虑了事物的模糊性与随机性,使评估结果更加符合实际情况。

1 特征量的提取与分级区间的确定

1.1 ED等效电路的参数辨识

1.1.1 ED等效电路的建立与辨识公式推导

扩展等效电路模型(ED)因其能有效解释绝缘内部的介质响应而被广泛使用^[10],其电路图见图1,其由两部分组成:一部分是几何等效电路, R_g 是几何电阻, C_g 是几何电容;另一部分是极化等效电路,由多条RC串联支路并联而成, R_{pi} 、 C_{pi} 为各极化支路的极化电阻和极化电容。

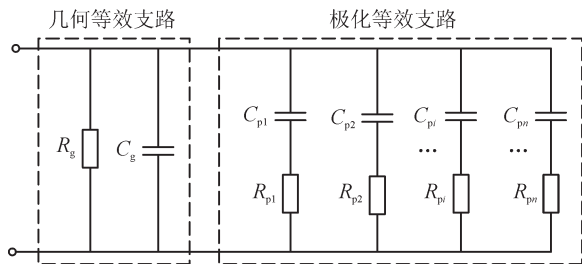


图1 扩展德拜等效电路

Fig. 1 Extended Debye equivalent circuit

在极化去极化电流法(PDC)中,去极化电流 $i_d(t)$ 在ED等效电路的基础上是一条由 N 条极化支路电流叠加而成的曲线^[5]为

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^N i_{di}(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

式(1)中, A_i 为第 i 条极化支路的弛豫系数,根据文[4]可知其在ED等效电路里的表达式为

$$A_i = \frac{U_0}{R_{pi}} \left(1 - e^{-t_i/\tau_i}\right) \quad (2)$$

式(2)中: U_0 为外施电压; $\tau_i=R_{pi}C_{pi}$ 为极化时间常数。

根据式(2)以及时间常数的定义式即可得到各极化支路的极化电阻和极化电容的计算式为

$$\begin{cases} R_{pi} = \frac{U_0}{A_i} \left(1 - e^{-t_i/\tau_i}\right) \\ C_{pi} = \frac{\tau_i}{R_{pi}} \end{cases} \quad (3)$$

几何电容 C_g 属于绝缘结构的固有属性,在老化过程中变化不大,可直接由工业测量得到^[10]。当极化充电时间为无穷大时,极化电流 i_p 可以表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_p(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{U_0}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} e^{-t/\tau_i} \right) = \frac{U_0}{R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}} \quad (4)$$

所以几何电阻 R_g 的计算式可表示为

$$R_g = \frac{U_0}{\lim_{t \rightarrow \infty} i_p(t) - \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_{pi}}} \quad (5)$$

因此,变压器ED等效电路参数辨识的关键就是拟合出去极化电流 $i_d(t)$ 的各子谱线的 A_i 和 τ_i 。

文[5]从末端开始解谱,将多指数函数转化为单指数函数,准确地求出 A_i 和 τ_i ,但在解谱过程中,需要在每条子谱线的末端取两点进行求解,存在人为选点的主观性。因此文中运用矩阵束算法^[11]来拟合曲线的 A_i 和 τ_i ,避免了主观性。

1.1.2 矩阵束算法拟合的步骤

1) 将去极化电流 $i_d(t)$ 构建成如下汉克尔矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(L+1) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-L) & x(N-L+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (6)$$

式(6)中: N 为采样点数; L 为矩阵束的参数,常取 $N/4$ 。

对矩阵 X 进行奇异值分解得

$$X = SV_1D_1^T \quad (7)$$

式(7)中: S 和 D 分别为 $(N-L) \times (N-L)$ 和 $(L+1) \times (L+1)$ 的正交矩阵; V 为 $(N-L) \times (L+1)$ 的对角矩阵,其对角线上的元素 σ_i 为矩阵 X 的第 i 个奇异值,并且大小按降序排列,判断数值显著较大奇异值的数量,记为 n ,即为极化支路数 n 。

2) 保留 V 的前 n 列向量,记为 V_1 ;保留 D 的前 n 列向量的第1行到第 L 行,记为 D_1 ;保留 D 前 n 列向量的第2行到第 $L+1$ 行,记为 D_2 。

参照式(7),可重新得到两个矩阵 X_1 和 X_2 :

$$X_1 = SV_1 D_1^T \quad (8)$$

$$X_2 = SV_1 D_2^T \quad (9)$$

3)通过 X_1 和 X_2 定义矩阵束为 $X_2 - \lambda X_1$,运用信号极点求其广义特征值,记为 λ_i ($i=1, 2, \dots, n$),代入下列最小二乘法即可得到信号幅值 R_i 。

$$\begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

从而可以求得各条子谱线的 A_i 和 τ_i 为

$$\begin{cases} A_i = |R_i| \\ \tau_i = -\frac{T_s}{R_e(\ln \lambda_i)} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: T_s 为采样时间间隔; A_i 和 τ_i 代回式(3)即可完成ED等效电路参数的辨识。

1.2 油纸绝缘新特征量的提出与验证

随着油纸绝缘老化加深,老化产物增多,介质响应特性将发生变化,从而等效电路的参数也会发生变化,几何支路代表变压器整体的绝缘状态,而极化支路代表绝缘介质的老化情况^[8],故等效电路内部参数的变化趋势与绝缘老化状态会有一定的关系。根据文[9]可知,随着绝缘老化的加深,变压器等效电路中的几何电阻 R_g 会减小,几何电容 C_g 会增大,各极化电阻 R_{pi} 会减小,各极化电容 C_{pi} 会增大。因此,文中定义两个新的特征量——几何因子 K_g 和极化因子 K_p 为

$$\begin{cases} K_g = \frac{R_g}{C_g} \\ K_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_{pi}}{C_{pi}} \end{cases} \quad (12)$$

分析式(12),随着绝缘老化加深,式(12)中的分子会变小,分母会变大,因此从数学分析的角度上可知 K_g 和 K_p 的数值都会变小。

现用矩阵束算法对30台已知糠醛含量或绝缘状态的变压器进行参数辨识,并代入式(12)进行新特征量的计算,将结果记录见表1,由表1中的数据可知,随着糠醛含量的增大,即随着老化程度的加深,几何因子 K_g 和极化因子 K_p 的参数值均有越来越小的趋势,与式(12)的数学分析得到的变化趋势相一致。

表1 各变压器参数信息

Table 1 Parameters of each transformer

编号	糠醛	绝缘状态	K_g	K_p
R_1	0.079	绝缘良好	0.094 7	8.422 7
R_2	0.150	绝缘良好	0.058 8	8.085 3
R_3	0.427	绝缘良好	0.052 0	3.474 2
R_4	0.549	绝缘良好	0.051 3	3.051 8
...
R_{23}	0.835	绝缘一般	0.040 7	1.927 1
R_{24}	1.259	绝缘一般	0.031 1	1.384 2
R_{25}	不详	绝缘一般	0.010 2	0.800 7
R_{26}	1.722	绝缘一般	0.010 1	0.800 4
R_{27}	3.771	老化严重	0.008 4	0.653 7
R_{28}	不详	老化严重	0.005 0	0.582 6
R_{29}	19.382	老化严重	0.000 7	0.027 1
R_{30}	不详	老化严重	0.000 3	0.004 3

1.3 油纸绝缘标准状态分级区间的确定

文中采用十余年来收集的51台变压器的实验数据作为客观研究依据,从回复电压法(RVM)、极化去极化电流法(PDC)和ED等效电路3个方面进行老化特征量提取:

1)RVM特征量包括初始斜率 S_r 、主时间常数 t_{dcom} 和峰值时间 t_p ,均可由RVM实验数据直接提取,研究表明,随着绝缘老化的加深, S_r 会变大;而 t_{dcom} 和 t_p 越小,绝缘老化越严重^[3,12]。

2)PDC特征量包括弛豫系数 A 和去极化电量 Q 。其中 A 可由式(2)计算得到,另对去极化电流积分即可得到 Q ,研究表明, A 和 Q 均随着绝缘老化的加深而增大^[4]。

3)ED等效电路特征量则由1.2节定义的几何因子 K_g 和极化因子 K_p 组成,其提取过程已在1.1~1.2节介绍,老化越严重, K_g 和 K_p 就越小。

经过上述特征量的提取,得到51×7维的客观指标矩阵,运用FCM算法将这51组数据聚类成3个模糊簇类,经验证其与变压器绝缘状态有较高的准确性,为了使评估结果更加精确,将3个聚类中心作为四类等级的分级指标,便可将变压器的3类绝缘状态进一步细分成4个等级:绝缘良好(I级)、绝缘一般(II级)、轻微老化(III级)、老化严重(IV级),从而建立油纸绝缘变压器的标准绝缘状态分级区间,见表2。

2 各特征量权重系数的确定

对于融合多特征量的油纸绝缘变压器综合评估而言,每一个能表征变压器老化状态的特征量都具有各自不同程度的重要性,因此有必要给各特征量指标赋上科学、合理的权重系数,量化区分各指

标的影响程度,有助于提高诊断结果的准确性。

表2 油纸绝缘标准状态的分级区间

Table 2 Classification interval of oil-paper insulation standard state

特征量	油纸绝缘老化状态等级			
	绝缘良好(I)	绝缘一般(II)	轻微老化(III)	老化严重(IV)
$S/(V \cdot s^{-1})$	<37.48	37.48~114.69	114.69~254.74	>254.74
t_{deom}/s	>1413.81	722.34~1413.81	70.30~722.34	<70.30
t_p/s	>450.12	322.37~450.12	105.42~322.37	<105.42
$A/10^{-7}$	<33.93	33.93~103.95	103.95~299.41	>299.41
$Q/10^{-7} C$	<187.51	187.51~409.83	409.83~1001.33	>1001.33
K_g	>0.083 5	0.010 8~0.083 5	0.002 6~0.010 8	<0.002 6
K_p	>4.262 0	0.731 7~4.262 0	0.051 3~0.731 7	<0.051 3

2.1 主观 AHP 赋权法

层次分析法(AHP)^[13-14]是一种融合专家经验的定性与定量方法的系统分层分析方法:

1)根据 1.3 节多特征量评估指标的建立过程,生成层次关系图见图2,通过9标度法^[15]和专家经验^[4-8,16]进行两两指标间相互重要程度比较,得到目标层和中间层判断矩阵 A 、 B_1 、 B_2 和 B_3 ,以 A 为例见式(13)。

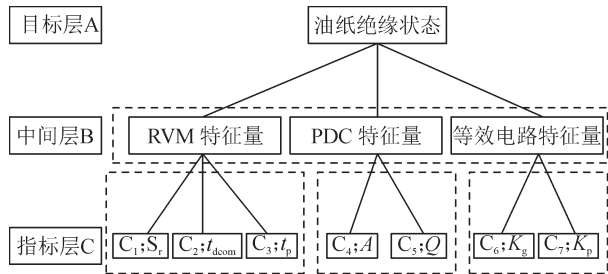


图2 油纸绝缘老化状态评估的评估指标模型

Fig. 2 Evaluation index model of oil-paper insulation aging state evaluation

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中, a_{ij} 表示第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要性比较, a_{ii} 一般取值都为1,并且 a_{ij} 与 a_{ji} 是互为倒数的关系(即 $a_{ij}=1/a_{ji}$)。

为了避免传统 AHP 法需对 A 进行一致性检验的缺点,文中运用文[6]改进的 AHP 方法,首先将 A 按照式(14)进行计算,转化得到符合一致性检验要

求的拟优化传递矩阵 F 。

$$\begin{cases} D = \ln A \\ e_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (d_{im} - d_{jm}), \forall i, j \in 1, \dots, n \\ f_{ij} = 10^{e_{ij}} \end{cases} \quad (14)$$

然后利用范列平均法计算拟优化传递矩阵 F 最大特征值对应的特征向量 $m_A=(m_i)_{1 \times n}$ 。

$$\begin{cases} q_{ij} = f_{ij} / \sum_{m=1}^n f_{mj} \\ \mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: q_{ij} 为第 i 台变压器的第 j 个指标的所占比重; n 为中间层的数量,组合而成的 $m_A=(m_i)_{1 \times n}$ 即为目标层的权重向量。

继续重读上述步骤,计算出指标层的权重向量 m_{B1} 、 m_{B2} 和 m_{B3} ,从而根据式(16)得到指标层 $C_1 \sim C_7$ 的主观权重向量 W_1 为

$$W_1 = \mu_{指} * [\mu_{B1} \mu_{B2} \mu_{B3}] \quad (16)$$

结合文献中专家经验^[4,7],并根据式(13)–(16)计算得到这7个特征量评估指标的主观权重为: $W_1=[0.343 7, 0.139 4, 0.056 5, 0.108 9, 0.054 5, 0.099 0, 0.198 0]$

2.2 客观熵权赋权法

根据信息熵理论,当指标对应的熵值越大,则说明该指标的信息变化程度就越小,对评价的影响程度也越小,所占权重也一定越小,文中采用熵权法^[17]来进行客观赋权,具体步骤如下:

对 1.3 节里 51×7 维的客观指标矩阵进行无量纲归一化处理,其中成本型指标(S 、 A 和 Q)与效益型指标(t_{deom} 、 K_g 和 K_p)分别按式(17)和(18)处理。

$$f_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (17)$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (18)$$

式(17)、(18)中: $\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 分别表示第 $j(j=1, 2, \dots, 7)$ 个指标中数据的最大值与最小值; x_{ij} 为原始的第 $i(i=1, 2, \dots, 51)$ 台变压器的第 j 个指标的数据; f_{ij} 为归一化处理后的数据。

因此第 j 个指标的信息熵 H_j 可由式(19)得到

$$\begin{cases} H_j = - \sum_{i=1}^{51} (p_{ij} \ln p_{ij}) / \ln 51 \\ p_{ij} = f_{ij} / \sum_{i=1}^{51} f_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中, p_{ij} 为第 i 台变压器的第 j 个指标的所占

比重。

最后根据式(16)计算得到每个评价指标的客观权重值 W_{2j} 以及客观权重向量 W_2 为

$$\begin{cases} W_{2j} = \frac{1 - H_j}{\sum_{i=1}^7 (1 - H_i)} \\ W_2 = [W_{21} \ W_{22} \ W_{23} \ W_{24} \ W_{25} \ W_{26} \ W_{27}] \end{cases} \quad (20)$$

通过式(17)–(20)的计算过程可得到中文特征量评估指标的客观权重为: $W_2 = [0.063 \ 1, 0.148 \ 3, 0.094 \ 4, 0.013 \ 4, 0.008 \ 3, 0.382 \ 7, 0.289 \ 8]$

2.3 综合权重赋权法

主观赋权法通过专家经验来决定权重,忽略了客观事实;而客观赋权法通过客观实测数据来决定权重却忽略了专家的主观经验,因此文中结合这两种方法,引入了综合权重法^[18],构造出主、客观权重向量的线性组合为

$$W_{\text{综}} = \alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 \quad (21)$$

式(21)中, $W_{\text{综}}$ 为最后求出的综合权重向量, α_1 和 α_2 为主客观占比系数,并且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; W_1 和 W_2 分别为2.1–2.2计算得到的主、客观权重向量。

为了使 $W_{\text{综}}$ 向量里的各权重与 W_1 、 W_2 向量里的对应权重间的数值偏差最小,建立如下关于系数 α_1 、 α_2 的优化函数为

$$\begin{cases} \min \left\| \sum_{k=1}^2 \alpha_k W_k^T - W_k \right\|_2 \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \end{cases} \quad (22)$$

将优化得到的 α_1 、 α_2 代入式(21)中,即可得到文中油纸绝缘多特征量指标综合评估的最终权重向量为: $W_{\text{综}} = [0.172 \ 9, 0.144 \ 8, 0.079 \ 6, 0.050 \ 8, 0.026 \ 4, 0.271 \ 6, 0.253 \ 9]$

3 基于等级云模型的油纸绝缘综合评估

3.1 云模型理论

云模型^[9]是李德毅院士于1995年首次提出的概念,能实现定性概念与定量信息描述之间的不确定关系的转换,其综合考虑了事物的模糊性与随机性,解决了以往油纸绝缘综合评估只注重模糊性的问题。在云模型理论中,假设 C 为精确论域 U 里的一个定性概念的集合,若集合 C 中存在参数 $x \in U$ 是定性概念中的一个稳定随机数,则称 x 对 C 的隶属度 $m(x) \in [0, 1]$ 存在稳定的随机数, x 的分布为云,每个点 $(x, m(x))$ 称为云滴。

云模型的定性概念可由期望 E_x 、熵 E_n 以及超熵 H_c 整体来表示^[20],即 $Y(E_x, E_n, H_c)$:

1)期望 E_x 为云模型云滴的论域中心点,其表示论域空间里云滴的平均值,是最能体现设备在此指标下的绝缘状态的特征量。

2)熵 E_n 在论域空间里表示期望云曲线的宽度,其能够衡量事物的不确定度,综合反应了定性概念的随机性与模糊性。

3)超熵 H_c 是衡量 E_n 的不确定性的量度,即熵之熵,其既反映了熵的离散程度,也反映了云滴的凝聚程度, H_c 的数值越大,则云模型里的云层就越厚。

为了更直观地了解三者云模型里的作用,现假设某个云模型的数字特征量 $Y(E_x, E_n, H_c)$ 为 $Y(0, 1, 0.1)$, 并且令云滴数 N 为5000, 仿真得到的云模型的云滴分布见图3。

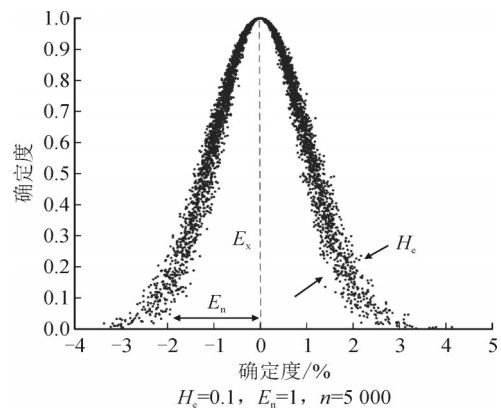


图3 云模型的云滴分布图

Fig. 3 Cloud drop distribution map of cloud model

3.2 云模型数字特征的确定

根据云模型数字特征之期望的定义可知,指标约束区间的中心值是最能代表该等级的概念,因此文中采用双约束空间 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 来表示各等级绝缘状态指标的界限,因此各等级云模型的期望 E_x 均取值为

$$E_x = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \quad (23)$$

等级云熵 E_n 的取值会直接影响到待评估指标与标准指标间关联度计算的结果,为了使相邻的等级云在对应的边界处都能严格分辨,文中采用基于“ $3E_n$ ”的计算规则^[21],其与高斯分布的“ 3σ ”类似,将在 $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$ 之外的云滴视为小概率事件,视作不可能发生的事情,且不影响各等级云模型的整体特征,则 E_n 取值为

$$E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (24)$$

等级云超熵一般取常数,其可根据评估指标的数值大小、实际经验和不确定性进行取值。

因此,将表2分级数据代入上述计算,得到 7×4 维的等级云模型数字特征矩阵,见表3。

表3 各指标标准等级云模型数字特征
Table 3 Digital characteristics of cloud model of each index standard grade

指标	油纸绝缘老化状态等级			
	绝缘良好(I)	绝缘一般(II)	轻微老化(III)	老化严重(IV)
$S_r(V \cdot s^{-1})$	(18.74, 3.12, 0.1)	(76.09, 12.87, 0.1)	(184.72, 23.34, 0.1)	(254.74, 10.88, 0.1)
t_{dcom}/s	(1 413.81, 21.03, 0.1)	(1 068.06, 115.25, 0.1)	(396.32, 108.67, 0.1)	(35.15, 5.86, 0.1)
t_p/s	(450.12, 7.65, 0.1)	(386.25, 21.29, 0.1)	(213.89, 36.16, 0.1)	(52.71, 8.79, 0.1)
$A/10^{-7}$	(16.97, 2.83, 0.1)	(68.94, 1.67, 0.1)	(201.68, 32.58, 0.1)	(299.41, 24.93, 0.1)
$Q/10^{-7} C$	(93.76, 15.63, 0.1)	(298.67, 37.05, 0.1)	(705.58, 98.58, 0.1)	(1 001.33, 99.28, 0.1)
K_g	(0.094 3, 0.022 2, 0.001)	(0.052 6, 0.014 4, 0.001)	(0.006 7, 0.001 5, 0.001)	(0.001 3, 0.000 2, 0.001)
K_p	(4.262, 0.544 5, 0.001)	(2.496 9, 0.588 4, 0.001)	(0.391 5, 0.113 4, 0.001)	(0.025 7, 0.004 3, 0.001)

3.3 油纸绝缘老化状态评估模型的建立

将综合赋权法和等级云模型应用到变压器的绝缘老化状态评估中,得到文中油纸绝缘老化状态评估的流程图见图4,对应步骤如下所示:

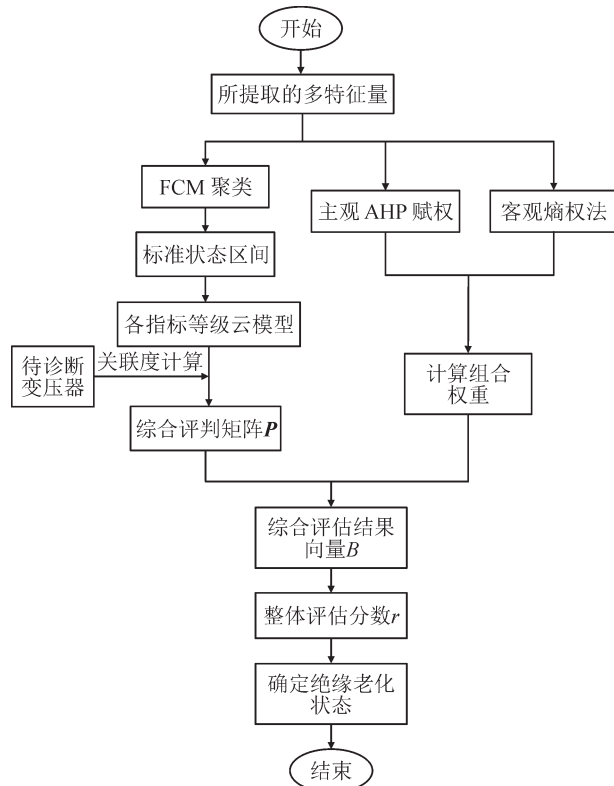


图4 油纸绝缘老化状态评估的流程图

Fig. 4 Flow chart of oil-paper insulation aging evaluation

1)根据变压器实验数据库的特征量数据,运用FCM 聚类算法的聚类中心建立4个绝缘状态等级的油纸绝缘标准状态区间;

2)结合主观层次分析法和客观熵权法,运用综合赋权法得到每个评估指标的综合权重;

3)引入3.1节等级云模型理论,根据式3.2节公式得到7×4维的标准等级云(E_x, E_n, H_c)矩阵。在此基础上,根据待诊断设备的7种特征量数据与7×4维的各标准等级云矩阵进行如式(25)的关联度 k 数值计算,并将每个单独的 k 汇总得到7×4维的综合评判矩阵 P 。

$$k = \exp\left[\frac{-(x - E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \quad (25)$$

式(25)中: x 为待诊断变压器的某一特征量指标; E_n' 是由期望为 E_n ;方差为 H_c 生成的正态随机数。

4)将评判矩阵 P 与综合权重向量 w 相乘并将同一等级的关联度求和,得到综合评估结果向量 $B=[b_1, b_2, b_3, b_4]$,利用加权平均法求得待诊断变压器的综合评估分数 r 为

$$r = \sum_{i=1}^4 b_i f_i / \sum_{i=1}^4 b_i \quad (26)$$

式(26)中, f_i 为各绝缘状态等级 i 的对应分数,设等级 I 至 IV 对应的分数为 1 至 4。

考虑到式(25)产生的 E_n' 是正态随机数,存在一定的偶然性,故文中采用多次重复计算取平均值的方法求得平均综合评估分数为

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (27)$$

式(27)中: r_i 为第 i 次计算得到的综合评估分数; n 为重复计算的次数。

5)根据 \bar{r} 的数值见表4。确定待诊断变压器的绝缘状态等级。

表4 评估分数的分级区间

评估分数	油纸绝缘老化状态等级			
	I级	II级	III级	IV级
\bar{r}	1~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4

4 实例验证

现有9台待评估的油纸绝缘变压器,根据现场实测的数据进行上述特征量的提取,得到各变压器各特征量指标数据见表5。同时对比观察表2,若直接根据表2中的各指标分级区间来判断某一台变压

器的绝缘老化状态时,会出现多指标分级区间不尽属于II级,3个指标属于III级,当出现这种现象时将无法准确地评估变压器的绝缘状态。

表5 9台待诊断变压器的各项特征量指标

Table 5 Various characteristic indexes of 9 transformers to be diagnosed

序号	变压器型号	运行状况/ 糠醛含量/(mg·L ⁻¹)	特征量指标数据						
			S _r /(V·s ⁻¹)	t _{deon} /s	t _p /s	A/10 ⁻⁷	Q/10 ⁻⁷ C	K _g	K _p
T ₁	SFSZ10-180000/220	新投运/0.184	23.7	1 335.30	469.0	12.21	128.05	0.157 5	5.103 6
T ₂	SFZ7-31500/110	已退役/不详	272.0	52.31	63.7	310.39	1 403.25	0.004 1	0.002 1
T ₃	SFZ-31500/110	运行10年/1.275	67.1	866.20	338.0	40.33	291.02	0.012 4	1.077 0
T ₄	LB7-252W2	运行8年/1.738	102.3	141.40	301.0	72.17	379.15	0.011 5	0.700 3
T ₅	SP-400/10	已有老化/2.772	180.2	114.96	164.0	120.35	374.76	0.005 1	0.191 8
T ₆	SFPS-18000/220	刚检修/0.416	35.8	1 540.30	423.0	31.48	208.46	0.060 3	4.372 1
T ₇	SSZ10-31500/10	已退役/17.283	295.0	37.62	44.9	365.51	1 280.78	0.000 3	0.006 1
T ₈	cub-MRM	运行20年/6.012	264.0	15.61	78.0	366.45	873.53	0.009 1	0.040 2
T ₉	SF08-31500/110	运行15年/3.285	231.0	109.68	104.0	204.21	774.48	0.005 3	0.054 3

现采用文中所提出的评估方法对这9台待评估的变压器各项指标数据进行计算,并将得到的各评估分数以及评估结果见表6。根据变压器T₃的评估分数可知其老化状态属

表6 各变压器绝缘状态等级评估结果

Table 6 Diagnosis results of the insulation status of each transformer

分数/ 结果	待评估油纸绝缘变压器序号								
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉
\bar{r}	1.062 5	3.696 1	2.000 6	2.211 8	2.988 9	1.436 5	3.987 7	3.593 3	3.055 3
评估结果	I	IV	II	II	III	I	IV	IV	III

于绝缘一般(II级),而经检测T₃油中糠醛含量为1.275 mg/L,已快有轻微老化现象,绝缘状态一般,与文中评估结果一致。而其余变压器的评估结果:T₁和T₆的绝缘状态属于绝缘良好(I级),T₄的绝缘状态属于绝缘一般(II级),T₅和T₉的绝缘状态属于轻微老化(III级),T₂、T₇和T₈的绝缘状态属于老化严重(IV级),均与表5中的运行状况以及糠醛含量相符,证实了本文所提出的方法能准确、有效地评估油纸绝缘变压器的绝缘老化状态。

5 结论

1)运用矩阵束算法对等效电路进行参数辨识,提出两个等效电路的新特征量:K_g和K_p,并且老化越严重,两者数值均越小。

2)结合主观AHP赋权法、客观熵权赋权法提出综合赋权法,不仅有专家经验作为参考,又有客观实测数据作为依据,实现了权重的科学、合理调整。

3)提出基于等级云模型的油纸绝缘老化状态评估方法,经过验证,其评估结果可作为油纸绝缘设备在实际检修中的参考依据。

参考文献:

[1] 蔡金锭,陈汉城.基于陷阱密度谱特征量的油纸绝缘变压器老化诊断[J].高电压技术,2017,43(8):2574-2581.
CAI Jinding, CHEN Hancheng. Aging diagnosis of oil-paper insulated transformer based on characteristic quantity of trap density spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2574-2581.

[2] GUBANSKI S. Assessment of insulation state of power transformer after 35 years of operation using different diagnostic methods[J]. Bulletin of the Malaysian Mathematical Society, 2005, 2(2):247-256.

[3] 曾静岚,蔡金锭.基于回复电压特征量分析的油纸绝缘老化状态评估[J].电子测量与仪器学报,2015,29(11):1639-1646.
ZENG Jinglan, CAI Jinding. Evaluation of aging condition of oil paper insulation based on characteristic analysis of return voltage[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1639-1646.

[4] 叶荣,蔡金锭.基于弛豫贡献度的变压器油纸绝缘系统老化状态评估[J].电工电能新技术,2018,37(11):

- 15-22.
YE Rong, CAI Jinding. Assessment of aging state of transformer oil-paper insulation system based on relaxation contribution[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(11): 15-22.
- [5] 张晓燕, 刘庆珍, 蔡金锭. 基于末端双点解析法的变压器油纸绝缘新特征量提取及老化诊断[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3317-3326.
ZHANG Xiaoyan, LIU Qingzhen, CAI Jinding. New feature extraction and aging diagnosis of transformer oil-paper insulation based on terminal double-point analysis method [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3317-3326.
- [6] 蔡金锭, 叶 荣, 刘庆珍. 基于改进TOPSIS和时域特征量的油纸绝缘状态分类分级评估[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(1): 86-94.
CAI Jinding, YE Rong, LIU Qingzhen. Classification and grading evaluation of oil-paper insulation state based on improved TOPSIS and time-domain feature quantity[J]. *Journal of Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 86-94.
- [7] 蔡金锭, 陈汉城. 基于样本集的变压器油纸绝缘状态区间灰靶分类及老化诊断[J]. *高电压技术*, 2018, 44(8): 2486-2492.
CAI Jinding, CHEN Hancheng. Gray target classification and aging diagnosis of transformer oil-paper insulation state interval based on sample set[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(8): 2486-2492.
- [8] 蔡金锭, 黄云程. 基于灰色关联诊断模型的电力变压器绝缘老化研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(10): 3296-3301.
CAI Jinding, HUANG Yuncheng. Research on insulation aging of power transformer based on grey correlation diagnosis model[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(10): 3296-3301.
- [9] 林晓宁, 蔡金锭. 基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 22-29.
LIN Xiaoning, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation state based on rough set theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 22-29.
- [10] 陈汉城, 蔡金锭. 基于数学解析法的油纸绝缘参数辨识研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(2): 146-154.
CHEN Hancheng, CAI Jinding. Research on oil - paper insulation parameter identification based on mathematical analysis method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(2): 146-154.
- [11] 张晨萌, 苏少春, 谢 敏, 等. 基于矩阵束算法的XLPE电力电缆绝缘介质响应参数辨识[J]. *高电压技术*, 2019, 45(5): 1647-1653.
ZHANG Chenmeng, SU Shaochun, XIE Min, et al. Identification of response parameters of XLPE power cable insulation based on matrix bundle algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(5): 1647-1653.
- [12] 刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭. 基于降维技术与K-means聚类的油纸绝缘状态综合灰评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 62-70.
LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive gray assessment of oil-paper insulation state based on dimensionality reduction technology and K-means clustering[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 62-70.
- [13] 陈 蔚, 刘雪娇, 夏莹杰. 基于层次分析法的车联网多因素信誉评价模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(4): 722-731.
CHEN Wei, LIU Xuejiao, XIA Yingjie. Multi - factor reputation evaluation model of car networking based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2020, 54(4): 722-731.
- [14] DEHRAJ P, SHARMA A. An empirical assessment of automaticity for autonomic query optimizers using fuzzy - AHP technique[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2020, 90(1): 106137.
- [15] 彭道刚, 陈跃伟, 范俊辉, 等. 基于层次分析法和粗糙集的变压器状态评估研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(7): 150-157.
PENG Daogang, CHEN Yuewei, FAN Junhui, et al. Research on transformer condition assessment based on analytic hierarchy process and rough set[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7): 150-157.
- [16] 刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭. 基于多元模糊联系度模型的变压器油纸绝缘老化评价[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 47-54.
LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation aging based on multivariate fuzzy connection model[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 47-54.
- [17] XU H, MA C, LIAN J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated K-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018(563): 975-986.
- [18] 陈 婧, 赵 敏, 周 华, 等. 基于博弈论组合赋权的姜堰区模糊综合水质评价法及应用[J]. *水电能源科学*,

- 2019, 37(9): 32-35.
- CHEN Jing, ZHAO Min, ZHOU Hua, et al. Fuzzy comprehensive water quality evaluation method and application in jiangyan district based on combination weighting of game theory[J]. Hydropower Energy Science, 2019, 37(9): 32-35.
- [19] 沈进昌, 杜树新, 罗 祎, 等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(6): 115-123.
- SHEN Jinchang, DU Shuxin, LUO Yi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method and application based on cloud model[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2012, 26(6): 115-123.
- [20] 方诗圣, 田海涛, 黄德洲, 等. 基于熵权法—多维云模型的围岩稳定性分类研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 229-232.
- FANG Shisheng, TIAN Haitao, HUANG Dezhou, et al. Research on surrounding rock stability classification based on entropy weight method and multi - dimensional cloud model[J]. Coal Mine Safety, 2020, 51(1): 229-232.
- [21] 陈永刚, 周净毓, 戴乾军, 等. 基于组合赋权—云模型的LTE-R系统的安全评估研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3110-3118.
- CHEN Yonggang, ZHOU Jingyu, DAI Qianjun, et al. Research on security evaluation of LTE-R system based on combined weighting - cloud model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3110-3118.
- 刘庆珍(1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为设备故障诊断与系统优化的研究(E-mail: lqz515@163.com)。
- 陈俊鸿(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电气绝缘老化设备诊断(E-mail: 444845296@qq.com)。

~~~~~  
(上接第 175 页)

- LIU Dunaan, WANG Qiang, LI Peng, et al. Correction and optimization of distribution network construction project investment based on system dynamics[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 205-208.
- [29] 黄 伟, 赵晓凤, 蒋利民, 等. 基于节能因素的变压器LCC评价方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 148-153.
- HUANG Wei, ZHAO Xiaofeng, JIANG Limin, et al. Study of LCC evaluation method for transformer based on the grid energy saving[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 148-153.
- 吐松江·卡日(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备状态评估、人工智能与模式识别(E-mail: minyun229@163.com)。
- 逯浩坦(1997—), 女, 硕士, 主要从事断路器故障诊断与寿命评估(通信作者)(E-mail: 1586934148@qq.com)。