

可拓理论在变压器油纸绝缘状态综合评估中的应用

周子旺¹, 高飞翔¹, 高腾², 全世超², 宋福根²

¹宁波市电力设计院, 浙江 宁波

²福州大学, 福建 福州

收稿日期: 2021年9月9日; 录用日期: 2021年9月25日; 发布日期: 2021年10月9日

摘要

针对变压器绝缘状况本身存在的模糊性和不确定性, 导致应用单一指标评估油纸绝缘变压器的状态时, 可能会出现互相矛盾和不相容状况, 本文提出了基于可拓理论的评估模型, 融合多时域特征量综合评估变压器的油纸绝缘状态。首先, 搭建变压器评估的分层多级框架, 引入可拓层次分析法确定各指标的权重系数; 其次, 利用大量的实测数据建立变压器四种物元模型状态的经典域和节域; 然后采用关联函数确定待诊变压器的绝缘状态, 实现变压器定性与定量相结合的综合评估; 最后通过实例验证该方法的有效性和可行性。

关键词

油纸绝缘, 可拓层次分析法, 关联函数, 物元, 多指标评估

Application of Extension Theory in Comprehensive Assessment of Transformer Oil-Paper Insulation

Ziwan Zhou¹, Feiling Gao¹, Teng Gao², Shichao Tong², Fugen Song²

¹Ningbo Electric Power Design Institute, Ningbo Zhejiang

²Fuzhou University, Fuzhou Fujian

Received: Sep. 9th, 2021; accepted: Sep. 25th, 2021; published: Oct. 9th, 2021

Abstract

Due to the fuzziness and uncertainty of the transformer's insulation state by itself, when using the index to evaluate the oil-paper insulation transformers alone, it may appear contradictory and incompatible situations. In this paper, an evaluation model based on extension theory is proposed to comprehensively evaluate the oil paper insulation state of transformer by integrating multi time domain features. Firstly, the hierarchical framework of transformer evaluation is established, and the extension analytic hierarchy process is introduced to determine the weight coefficient of each index; Secondly, we need to build the classical domain and joint domain of transformer's four kinds of matter-element models using large amounts of the measured data. Then, using correlation function to determine the insulation state of transformers, this paper realizes the synthetic evaluation with the qualitative and quantitative combination for the transformer. Finally, the effectiveness and feasibility of the method are verified by an example.

Keywords

Oil-Paper Insulation, Extensive AHP, Correlation Function, Matter-Element, Multi-Index Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

时域介电响应法是一种无损诊断方法, 因为其具有蕴含信息量非常丰富, 抗干扰性强, 无需吊芯, 操作简便等优点, 近年来被广泛用于变压器绝缘状态评估[1] [2]。由于油纸变压器是由绝缘纸和绝缘油构成的复杂系统, 反映油纸绝缘变压器的特征量众多且存在很大的模糊性和不确定性, 单一特征量很难准确反映变压器的绝缘状态, 所以借助于数学理论融合多时域特征量可以较为准确地评估变压器的绝缘状态[3]。目前常用的变压器绝缘状况的评估方法有模糊分析法, 灰色关联分析法, 粗糙集和证据推理法等。虽然这些方法在一定程度上可以较好地反映变压器的绝缘状况, 但是这些方法由于计算量大且过程复杂, 难以得到广泛的推广应用[4]。

鉴于目前变压器绝缘状态诊断存在的不足, 本文提出了基于可拓理论的变压器绝缘状态综合评估, 可以融合多时域特征量的同时计算过程较为简单[5] [6]。首先, 依据各个能够反映绝缘状态的特征量, 搭建分层多级框架模型, 采用可拓层次分析方法确定变压器各层指标的权重系数。然后, 基于大量的实测数据和计算分析得到的结果, 确定了变压器四种绝缘状态的经典域和节域; 最后, 通过关联函数确定待诊变压器关于四种绝缘状态的关联函数值, 从而确定待诊变压器的绝缘状态。

2. 可拓理论

可拓理论是以物元理论和可拓集合理论为理论框架, 依据经典域、节域和关联函数等基本概念, 并结合与可拓区间数相关的可拓层次分析法, 从而计算待评估物元关于各个评估状态等级的关联度的一种方法[7]。

2.1. 物元模型

对于给定事物的名称 N , 特征 c , 和关于特征 c 的量值 v , 可以组成有序三元组 $R = (N, c, v)$ 作为描述事

物的基本元, 简称物元[8]。其中, v 由 N 和 c 确定, 记作 $v = c(N)$ 。

对于某个确定的事物有多个特征值 c_1, c_2, \dots, c_n 和相其对应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n , 其物元模型表示为式(1):

$$R = \begin{pmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2. 物元的经典域与节域

将研究的物元状态划分为 N_1, N_2, \dots, N_m 共 m 种状态。对于某物元特征 c_i , 在某种状态下, 其取值绝大多数都落在区间 $[\mu_{ij} - 3\sigma_{ij}, \mu_{ij} + 3\sigma_{ij}]$ 上[9][10], 因此确定各状态等级物元的经典域矩阵 R_p 为式(2):

$$R_p = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_j & \cdots & N_m \\ c_1 & v_{p11} & v_{p12} & \cdots & v_{p1j} & \cdots & v_{p1m} \\ c_2 & v_{p21} & v_{p22} & \cdots & v_{p2j} & \cdots & v_{p2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_i & v_{pi1} & v_{pi2} & \cdots & v_{pij} & \cdots & v_{pim} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n & v_{pn1} & v_{pn2} & \cdots & v_{pnj} & \cdots & v_{pnm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $v_{pij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示特征量 c_i 在第 j 种状态下的经典域: $v_{pij} = [\mu_{ij} - 3\sigma_{ij}, \mu_{ij} + 3\sigma_{ij}]$, 其中 μ_{ij} 、 σ_{ij} 由式(3)计算可得。

$$\begin{cases} \mu_{ij} = \frac{1}{t_j} \sum_k^{t_j} v_{ijk} \\ \sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{t_j} \sum_k^{t_j} (v_{ijk} - \mu_{ij})^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ_{ij} 、 σ_{ij} 分别表示特征值 c_i 在第 j 种状态下的平均值和标准差; t_j 为全部统计的历史数据库物元状态为 N_j 的样本数。

确定各状态等级物元的节域矩阵如式(4):

$$R_q = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_j & \cdots & N_m \\ c_1 & v_{q11} & v_{q12} & \cdots & v_{q1j} & \cdots & v_{q1m} \\ c_2 & v_{q21} & v_{q22} & \cdots & v_{q2j} & \cdots & v_{q2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_i & v_{qi1} & v_{qi2} & \cdots & v_{qij} & \cdots & v_{qim} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n & v_{qn1} & v_{qn2} & \cdots & v_{qnj} & \cdots & v_{qnm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $v_{qij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示在历史统计的样本数据下, 物元特征量 c_i 在第 j 种状况下的节域:

$v_{qij} = \langle v_{ij\min}, v_{ij\max} \rangle$; $v_{ij\min}$ 表示特征值 c_i 第 j 种状态下对应的特征值的最小值 $v_{ij\min} = \min_k^{t_j} (v_{ijk})$, $v_{ij\max}$ 表示 c_i

在第 j 种状态下对应的特征值的最大值 $v_{ij\max} = \max_k^{t_j}(v_{ijk})$ 。

2.3. 关联函数

关联函数用来确定待评估物元关于物元各状态等级的关联程度。如果，物元关于某一状态的关联值 K 越大，表示待测物元隶属于该状态等级的可能性越大[11]。关联函数 K 如式(5)：

$$K = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, v_{pij})}{\rho(v_i, v_{qij}) - \rho(v_i, v_{pij})}, \rho(v_i, v_{qij}) \neq \rho(v_i, v_{pij}) \\ -\rho(v_i, v_{pij}) - 1, \rho(v_i, v_{qij}) = \rho(v_i, v_{pij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： v_i 表示特征量值， v_{pij} 为经典域； v_{qij} 为节域；表示 $\rho(v_i, v_{pij})$ 是点 v_i 关于区间 $v_{pij} = \langle v_{pij1}, v_{pij2} \rangle$ 的距，计算式如式(6)所示。

$$\rho(v_i, v_{pij}) = \left| v_i - \frac{v_{pij1} + v_{pij2}}{2} \right| - \frac{v_{pij2} - v_{pij1}}{2} \quad (6)$$

2.4. 可拓层次分析法确定指标权重

本文引入了多指标对变压器进行综合评估，不同的指标对评估变压器的老化状态的作用是不同的。根据各指标的相对重要程度对各指标进行不同权重的赋值对准确评估变压器的绝缘状态是相当重要的。本文采用可拓层次分析法来确定变压器各指标的权重[7]。

首先构造可拓判断矩阵，对于可拓判断矩阵 $E = (e_{ij})_{n \times n}$ ，其中 e_{ij} 需要满足如下条件，对于所有 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 均有： $e_{ij} = \langle e_{ij}^-, e_{ij}^+ \rangle$ ，且 $1/9 \leq e_{ij}^- \leq 9$ ； $e_{ii} = 1$ ， $e_{ji} = e_{ij}^{-1} = \langle 1/e_{ij}^+, 1/e_{ij}^- \rangle$ 。各指标的权重的具体确定步骤如下：

1) 求出左判断矩阵 $E^- = (e_{ij}^-)_{n \times n}$ 和右判断矩阵 $E^+ = (e_{ij}^+)_{n \times n}$ 的最大特征值分别对应特征向量，并对其进行归一化处理，得到 $X^- = (a_{ij}^-)_{n \times n}$ ， $X^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$ 。

2) 求 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T = \langle rX^-, sX^+ \rangle$ ，其中 r, s 由式(7)计算。

$$\begin{cases} r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n 1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}} \\ s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n 1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}} \end{cases} \quad (7)$$

3) 通过 λ 求出各指标单层排序权重。

假设两个区间数 $e = \langle e^-, e^+ \rangle$ ， $f = \langle f^-, f^+ \rangle$ ，则：

$$V(e \geq f) = \frac{2(e^+ - f^-)}{(e^+ - e^-) + (f^+ - f^-)} \quad (8)$$

4) 由式(8)可计算 $V(\lambda_i \geq \lambda_j)$ ， $(i = 1, 2, \dots, n \geq 0; i \neq j)$ 。若 $V(\lambda_i \geq \lambda_j) \geq 0$ ，则 $\omega_j = 1$ ， $\omega_i = V(\lambda_i \geq \lambda_j)$ 。其中 ω_i 表示变压器层次结构框架里下层第 i 个元素对第上层某个因素的单排序，经归一化后得到 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 表示下层各元素对上层某元素单排序权重向量。

3. 可拓理论在变压器油纸绝缘状态评估中的应用

3.1. 变压器可拓评估指标体系的建立

根据已有研究成果，对变压器油纸绝缘状态的时域特征量包括回复电压，去极化电流以及德拜等效电路参数等[2] [4] [6]。本文根据此前已有研究结论，选取 8 个评估特征指标，包括极化谱峰值 U_{rmax} 、主时间常数 t_{cdom} 、初始斜率峰值 S_{rmax} 、峰值时间常数 t_{peak} 、绝缘电阻 R_g 、弛豫机构数 N 、极化谱能量 W_{rmax} 、能量谱峰值时间 t_{rmax} ，并建立如图 1 所示的评估指标层次分析图。

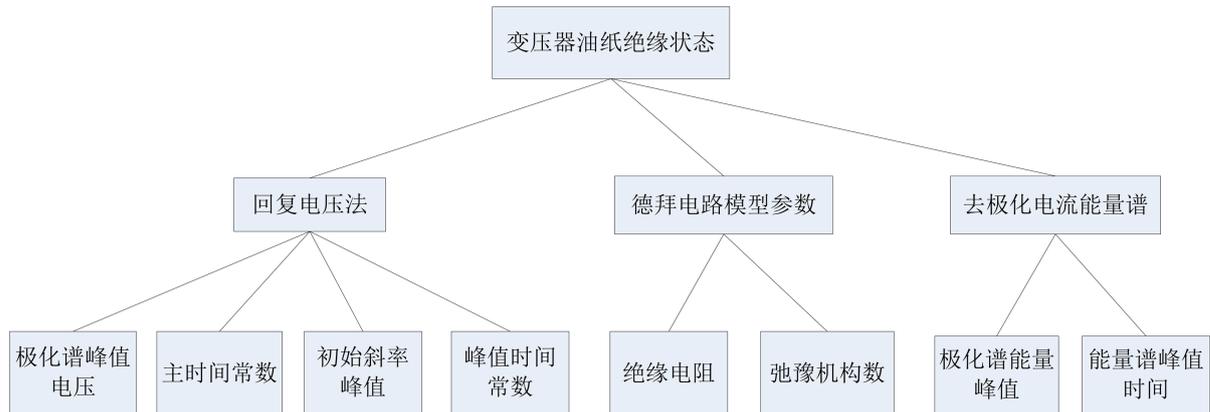


Figure 1. Analytic hierarchy diagram of transformer's evaluation index

图 1. 变压器评估指标层次分析图

由于各指标的量纲不同，对各参数需要进行无量纲化处理。对评估指标体系中指标的不同性质，对于极大型指标(越大越好)采用的效益测度评估指标，如式(9)所示；对于极小型指标(越小越好)采用成本测度评估指标，如式(10)所示。

$$v_i = \frac{v'_i - v'_{i-min}}{v'_{i-max} - v'_{i-min}} \tag{9}$$

$$v_i = \frac{v'_{i-max} - v'_i}{v'_{i-max} - v'_{i-min}} \tag{10}$$

式中： v'_{i-min} ， v'_{i-max} 表示特征值 v_i 的最小值和最大值。

3.2. 确定变压器各状态等级的经典域物元模型和节域物元模型

假设变压器的绝缘状态为物元 N 。根据《电力设备预防性试验规程》的规定，若将变压器绝缘状态分为 4 种状态： N_1 表示绝缘状态良好； N_2 表示绝缘状态中等； N_3 表示绝缘轻微老化； N_4 表示绝缘严重老化[6]。然后需确定变压器各个状态物元下的经典域和节域。文中经典域和节域的确定是根据现场测定的 60 余台变压器的特征量及其相应的绝缘实际状况。

根据变压器的结构和运行方式的不同，变压器状态物元某一指标 c_i 的取值存在一定的模糊性、不确定性和随机性，所以可以近似地把变压器特征值 c_i 看成一个随机变量，由概率论的相关知识可知，在大样本的情况下随机变量 c_i 服从正态分布[7] [8] [9]。通过实测的关于变压器各个特征量值的大量统计数据并结合变压器实际绝缘状态，求出变压器在四种绝缘状态下各个特征值的均值 μ 和均方差 σ_{ij} ，

$$P\{\mu_{ij} - 3\sigma_{ij} \leq v_{ij} \leq \mu_{ij} + 3\sigma_{ij}\} = 0.997。$$

根据 3.2 节求出变压器各个绝缘状态的经典域矩阵和节域矩阵如下所示：

$$R_p = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \\ c_1 & \langle 0.0266, 0.0824 \rangle & \langle 0.2226, 0.3258 \rangle & \langle 0.0723, 0.5403 \rangle & \langle 0.3371, 1 \rangle \\ c_2 & \langle 0, 0.1108 \rangle & \langle 0.3129, 0.8511 \rangle & \langle 0.1937, 0.9929 \rangle & \langle 0.9459, 1 \rangle \\ c_3 & \langle 0, 0.6187 \rangle & \langle 0.3908, 0.5528 \rangle & \langle 0.1868, 1 \rangle & \langle 0.2987, 1 \rangle \\ c_4 & \langle 0, 0.8517 \rangle & \langle 0.34, 0.4528 \rangle & \langle 0.2802, 0.7266 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ c_5 & \langle 0, 0.025 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.0119, 1 \rangle \\ c_6 & \langle 0, 0.1034 \rangle & \langle 0, 0.8496 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.4646, 1 \rangle \\ c_7 & \langle 0, 0.4428 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.1851, 0.9033 \rangle & \langle 0.5, 1 \rangle \\ c_8 & \langle 0, 0.1629 \rangle & \langle 0, 0.8684 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.9732, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

$$R_q = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \\ c_1 & \langle 0.0232, 0.1859 \rangle & \langle 0.1517, 0.3933 \rangle & \langle 0.0723, 0.5724 \rangle & \langle 0.2767, 1 \rangle \\ c_2 & \langle 0, 0.1706 \rangle & \langle 0.2122, 0.8912 \rangle & \langle 0.0024, 0.9929 \rangle & \langle 0.9243, 1 \rangle \\ c_3 & \langle 0, 0.7284 \rangle & \langle 0.2435, 0.5743 \rangle & \langle 0.1272, 1 \rangle & \langle 0.2264, 1 \rangle \\ c_4 & \langle 0, 0.9327 \rangle & \langle 0.23, 0.67 \rangle & \langle 0.2607, 0.8327 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ c_5 & \langle 0, 0.2432 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle \\ c_6 & \langle 0, 0.2023 \rangle & \langle 0, 0.9322 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.4213, 1 \rangle \\ c_7 & \langle 0, 0.6396 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.5, 1 \rangle \\ c_8 & \langle 0, 0.2736 \rangle & \langle 0, 0.8722 \rangle & \langle 0, 1 \rangle & \langle 0.9439, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

3.3. 确定变压器各指标的权重

根据3.3节所述方法，综合多名专家的建议可得如下变压器可拓区间判断矩阵[10][11]，结果如下：

$$A = \begin{pmatrix} \langle 1, 1 \rangle & \langle 5, 7 \rangle & \langle 3, 4 \rangle \\ \langle \frac{1}{7}, \frac{1}{5} \rangle & \langle 1, 1 \rangle & \langle \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \rangle \\ \langle \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \rangle & \langle 3, 4 \rangle & \langle 1, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} \langle 1, 1 \rangle & \langle \frac{1}{7}, \frac{1}{5} \rangle & \langle 3, 4 \rangle & \langle 5, 7 \rangle \\ \langle 5, 7 \rangle & \langle 1, 1 \rangle & \langle 6, 7 \rangle & \langle 7, 9 \rangle \\ \langle \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \rangle & \langle \frac{1}{7}, \frac{1}{6} \rangle & \langle 1, 1 \rangle & \langle 3, 4 \rangle \\ \langle \frac{1}{7}, \frac{1}{5} \rangle & \langle \frac{1}{9}, \frac{1}{7} \rangle & \langle \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \rangle & \langle 1, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} \langle 1, 1 \rangle & \langle \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \rangle \\ \langle 2, 3 \rangle & \langle 1, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} \langle 1, 1 \rangle & \langle \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \rangle \\ \langle 3, 4 \rangle & \langle 1, 1 \rangle \end{pmatrix}$$

由上述专家给出的可拓判断矩阵及第3.3节可拓层次分析法可分别求出变压器各个等级信息指标的

权重如下：一级指标权重为 $\omega_1 = (0.5772, 0.0372, 0.3856)$ ；回复电压各指标的权重 $\omega_{21} = (0.2599, 0.4471, 0.2779, 0.0152)$ ；德拜模型的各项指标权重 $\omega_{22} = (0.0829, 0.9171)$ ；去极化电流能量谱的各项指标权重 $\omega_{23} = (0.0415, 0.9585)$ 。

3.4. 基于可拓理论的状态评估步骤

综上所述，基于可拓理论的变压器油纸绝缘状态评估步骤如下：

- 1) 按式(2)~(4)确定变压器各状态等级物元的经典域、节域及待评估变压器物元模型。
- 2) 按照可拓层次分析法的步骤确定各特征值权重。
- 3) 根据2.3节的关联函数，按式(5)计算各特征值关于绝缘状态等级的关联度 $K(v_i)$ 。
- 4) 结合确定的各指标权重系数 w_i ，根据式(11)计算待评估物元 N 关于各状态等级的关联度 $K_j(N)$ 。

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^8 w_i \times K(v_i) \tag{11}$$

式中： $K_j(N)$ 是在考虑特征值重要性程度下的综合值，表征待评估物元中各特征值关于各状态等级的关联度。

- 5) 根据式(12)，确定出待评估变压器物元 N 的绝缘状态等级。

$$K_{j'} = \max \{K_j(N)\}, j = 1, 2, 3, 4 \tag{12}$$

式中： j' 为变压器的绝缘状态等级。

4. 实例分析

根据近 60 台变压器进行回复电压实测结果，统计分析提取了能够较好反映变压器绝缘状态的 8 个特征量 U_{rmax} 、 t_{cdom} 、 S_{rmax} 、 t_{peak} 、 R_g 、 N 、 W_{rmax} 、 t_{rmax} 。限于篇幅，本文仅列出 8 台变压器的特征量值如表 1 所示。

Table 1. Statistical data of the measured values of 8 transformers

表 1. 8 台变压器各特征量值实测统计数据

编号	U_{rmax}/V	t_{cdom}/s	$S_{rmax}/V \cdot s^{-1}$	t_{peak}/s	$R_g/G\Omega$	$N/条$	W_{rmax}/J	t_{rmax}/s	运行年限	绝缘状态, 糠醛含量	对应的绝缘状态等级
T ₁	397.91	895.32	98.56	312.03	9.56	7	0.198	45.6	16	受潮且老化严重	N ₄
T ₂	190.32	2226.87	40.72	403.42	14.24	4	0.124	168.5	7	轻微老化, 3.54 mg/L	N ₃
T ₃	269.35	1135.54	111.35	401.65	5.68	6	0.156	171.1	9	低压侧已有老化	N ₂
T ₄	172.92	2436.51	30.57	246.35	20.69	4	0.054	192.6	4	绝缘状况良好	N ₁
T ₅	387.56	902.56	189.11	651.25	8.79	7	0.197	42.8	15	高、低压侧老化严重	N ₄
T ₆	257.54	1057.65	98.65	389.41	6.87	5	0.098	124.5	3	低压侧老化, 2.57 mg/L	N ₂
T ₇	598.36	849.57	114.32	346.52	8.96	7	0.198	42.2	11	受潮且老化严重	N ₄
T ₈	162.58	2578.68	85.44	546.23	20.84	4	0.076	204.3	2	绝缘良好, 0.036 mg/L	N ₁

由实测的近 60 台变压器,把变压器的绝缘状态分为四类,由前述概率论的正态分布理论及式(2)~(4) 求出变压器各个状态等级的经典域矩阵和节域矩阵。计算出的经典域和节域反映变压器各个特征量值和各个状态等级的隶属关系,此经典域与节域的计算过程是基于

大量的统计数据 and 历史数据库,因此如果经典域和节域的计算过程基于变压器的台数越多,诊断的结果越可靠。由求出的变压器的经典域、节域和各特征值的权重系数,根据式(5)、式(12),最终求出待评估物元关于各个状态等级的关联度。结果如表 2 所示。

Table 2. The correlation degree of 8 transformers on each state level
表 2. 8 台变压器关于各状态等级的关联度

关联度	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
N ₁	-6.3841	-0.9931	-5.2236	-0.3313	-7.9793	-4.4036	-8.2021	0.684 4
N ₂	-11.946	-1.2234	0.1817	-1.7652	-17.3414	36.296	-15.0436	-1.6522
N ₃	-0.168	-0.6935	-0.6476	-1.2911	-0.8269	0.1086	-1.9073	-0.3925
N ₄	0.9489	-19.734	-11.2346	-23.4335	0.8594	-6.955	-0.332	-24.6
诊断结果	N ₄	N ₃	N ₂	N ₁	N ₄	N ₂	N ₄	N ₁

对比表 1 与表 2 可知: T₁~T₈ 共 8 台变压器的基于可拓理论的状态评估诊断结果分别为: N₄、N₃、N₂、N₁、N₄、N₂、N₄、N₁, 其实测绝缘状况分别为: N₄、N₃、N₂、N₁、N₄、N₂、N₄、N₁, 说明基于可拓理论的状态评估诊断结果与实际情况是完全一致的(由于篇幅有限,本文仅列出 8 台变压器,其余 50 多台变压器的理论分析结果与实测结果也保持一致),即基于可拓理论的变压器油纸绝缘状态综合评估方法是具有可行性及准确性的。

以 T₁ 和 T₂ 变压器为例来说明诊断结果:如表中 T₁ 计算出的四种关联度 N₁、N₂、N₃ 和 N₄ 的值分别为-6.3841、-11.946、-0.168 和 0.9489,其中最大值 N₄ 为 0.9489,即其对应的状态是“绝缘严重老化”,即诊断结果与实际状态是相同的。此外, T₂ 变压器计算出的关联度值中最大值是 N₃,即对应的绝缘状态是“绝缘轻微老化”,它与实际状况也是基本一致。

5. 结论

本文应用可拓理论对变压器油纸绝缘状态进行评估,得到如下相关结论:

- 1) 运用可拓层次分析法求解变压器各个特征量的权重的过程,综合了多名专家的建议,构造可拓判断区间,有效地对变压器各参量进行赋权,同时将权重向量的求解与一致性检验有机结合起来,大大减少了传统层次分析法验证一致性过程的繁杂计算。
- 2) 将可拓理论中的物元模型和关联函数引入了变压器绝缘状态评估过程中,定量的计算变压器绝缘状况等级的同时能够融合多特征量进行评估,较单一特征量对变压器绝缘状态进行评估具有更高的精确度。
- 3) 把概率论中正态分布的理论运用到求解经典域和节域的过程当中,可以最大限度地利用历史参考数据库。
- 4) 将实测数据、实际绝缘状态与基于可拓理论的绝缘状态理论计算结果进行对比,其结果具有一致性,验证了基于可拓理论的变压器油纸绝缘状态综合评估方法的可行性、有效性及准确性。

基金项目

国家自然科学基金(61174117)。

参考文献

- [1] 刘捷丰, 廖瑞金, 吕彦冬, 等. 电力变压器油纸绝缘含水量定量评估的时域介电特征量[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 196-203.
- [2] 刘骥, 赵明云, 等. 变压器油纸绝缘老化介电谱特性及特征量研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11): 67-74.
- [3] 宋人杰, 刘瑞英, 王林. 灰色定权聚类 and 变权模式在变压器状态评估中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 75-80.
- [4] 贺德华, 蔡金锭, 黄云程. 基于等效电路参数特征量的油纸绝缘老化状态评估[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(6): 44-49.
- [5] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
- [6] 刘骥, 尹梦涵, 李秀婧, 等. 油纸绝缘老化评估的 Davidson-Cole 模型参数提取方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(3): 63-70.
- [7] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1190-1199.
- [8] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于物元可拓模型的电力变压器故障的可拓诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 45-49.
- [9] 马丽叶, 丁荣荣, 卢志刚, 等. 基于可拓云模型的配电网经济运行综合评价及灵敏度分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(7): 8-16.
- [10] 杨贵军, 蒋朝辉, 桂卫华, 等. 基于熵权-可拓理论的高炉软熔带位置状态模糊综合评判方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 75-83.
- [11] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.