

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.07.020

基于定量修正层次分析的变压器性能评估方法研究

党建¹, 魏慧², 贾嵘^{1,2}, 刘广一¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 西安理工大学西安市智慧能源重点实验室, 西安 710048)

摘要: 电力变压器是电网电力输送中的核心电气设备,合理评估变压器的性能对保证电力系统稳定运行意义重大。文中根据变压器故障的原因和评价指标来源,提出了基于定量修正层次理论的变压器性能评估方法。针对变压器性能评估指标体系中评价因素结构复杂、数量庞大的问题,首先依据指标体系中反映变压器故障的准确程度,筛选出能够反映变压器绝缘性能、油性能、过热性故障和放电性故障的关键指标,建立了变压器性能评估关键指标体系;其次利用层次分析法并结合定量修正评分函数,确定指标的最优权重,得到各指标的评分值,有效抑制了主观因素对性能评估的影响;最后选取两台不同电压等级的变压器为实例进行性能评估,验证所用方法的合理性和实用性。

关键词: 变压器; 指标体系; 层次分析法; 定量修正评分函数

Research on Transformer Performance Evaluation Based on Quantitative Correction Analytic Hierarchy Process

DANG Jian¹, WEI Hui², JIA Rong^{1,2}, LIU Guangyi¹

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Energy, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The transformer is the core equipment of the power system, and it is of great significance to reasonably evaluate the performance of the transformer. Based on the causes of transformer faults and the sources of evaluation indicators, this paper proposes a transformer performance evaluation method based on quantitative correction hierarchy theory. Aiming at the complex structure and large number of evaluation factors in the performance evaluation index system of transformers, firstly, according to the accuracy of the transformer faults reflected in the index system, the key indicators that can reflect the insulation performance, oil performance, overheat fault and discharge fault of the transformer are selected. The key index system of transformer performance evaluation is established. Secondly, the analytic hierarchy process is combined with the quantitative correction scoring function to determine the optimal weight of the indicators, and the scores of each indicator are obtained. The influence of subjective factors on performance evaluation is reduced. Finally, two transformers of different voltage levels are selected for performance evaluation to verify the rationality and practicability of the method used.

Key words: transformer; index system; analytic hierarchy process; quantitative correction scoring function

0 引言

电力变压器是电网电力输送中的核心电气设备,一旦变压器发生故障,会导致电网不能稳定运

行。随着电网等级的不断提高,对变压器的整体性能有了更高的要求,因此,开展变压器性能评估研究意义重大^[1]。变压器性能评估是依据获取的运行和检修数据,对变压器整体运行情况和关键部位的

收稿日期:2020-03-30; 修回日期:2020-05-10

基金项目:陕西省自然科学基金青年资助项目(2019J-130);国家自然科学基金资助项目(5179206);陕西省教育厅专项科研计划(19JK0581)。

Project Supported by Natural Science Fund Youth Project of Shaanxi Province(2019J-130), National Natural Science Foundation of China(5179206), Special Research Program of Shaanxi Provincial Department of Education(19JK0581).

运行状态展开评估。目前,性能评估方法的主流是基于导则的评估方法,国家电网、南方电网和各省等都出台了相关导则,规定了变压器正常运行时的各项参数。

随着监测技术的发展,测得的可表征变压器性能的指标量有很多,指标与指标之间以及指标与性能之间均存在关联,这使得变压器性能评价指标体系十分复杂。如何正确处理与分析获得的数据并应用到性能评估中是目前的研究热点。针对以上问题,很多学者进行了研究,开展了基于贝叶斯理论^[2-3]、模糊理论^[4-5]、证据理论^[6-7]、熵权分析法^[8]、人工神经网络^[9]方法的变压器性能评估。其中,层次分析法(AHP)^[10-11]凭借全局思考、比较判断的综合思维,不割断各个因素对结果的影响的优势在电气设备评估中得到了广泛的关注;文[12]将变压器的各种参数按层次分析结构分为基本参数、运行参数、可靠性参数和不良工况参数,分别分析主绝缘老化、绝缘运行状态、部件缺陷情况以及热点温升模型,综合评价变压器的寿命;文[13]提出了一种基于部件划分和综合权重确定的变压器绝缘性能评估方法。在合理划分部件后,利用层次分析法和熵权分析法确定变压器各指标的权重,使得评价体系结构化;文[14]利用 ANFIS 模型分析溶解气体对变压器的影响,比较 ANFIS 模型相对其他方法的优点;文[15]提出一种变压器评估模型,集合模糊理论、层次分析法和改进加权平均法 3 种方法的优点,评估变压器的健康状况;文[16]构建了一种层次化状态评估模型,运用灰色聚类方法分析得到指标所处状态,并改进证据理论中的冲突证据合成规则,将聚类系数作为基本概率赋值函数来评价变压器的整体状态。然而现有的基于层次分析法的变压器性能评估研究含有的主观因素过多,缺乏客观理论依据,严重影响了评价结果的可信度。

针对上述研究中存在的缺陷,文中考虑将主客观因素综合应用于变压器性能评估中,提出基于定量修正层次理论的变压器性能评估方法。首先,在指标体系中按照反映变压器故障准确度的方法,筛选出反映变压器绝缘性能、油性能、过热性故障和放电性故障的主要指标,构建变压器性能评估关键指标体系。此体系分为 3 个层次:部位层、性能层和指标层;其次,利用层次分析法确定各关键指标的最优权重,并针对层次分析法主观因素过多的问题,构建定量修正评分函数,在最优指标权重的基础上量化指标贡献度,有效抑制了主观因素对性能评估的影响;最后,选取天津和南京两台不同地区、

不同电压等级的变压器作为实例,评估这两台变压器的性能,验证本文所提方法的合理性和实用性。

1 变压器性能评估关键指标体系

变压器评价指标体系中含有不良工况参数、部件可靠性参数、运行试验参数和基本参数几个方面,这些指标之间相互联系、相互影响,使得构成的指标体系结构复杂、数量庞大,缺乏层次性和系统性^[17]。将这些指标用于评价变压器性能时,若不把指标分类,忽略各指标之间的联系对性能的影响,会导致评价结果缺乏准确性和实用性。所以,文中将评价指标体系按照部位和性能进行层次划分。

1.1 指标体系层次构建

基于评价结果的实用性,将评价结果用于实际检修工作中,准确定位变压器的故障位置,本文依据变压器的部位和性能划分指标,构建变压器的指标体系。指标体系分为 3 个层次:部位层、性能层和指标层。根据文[18-20]将变压器划分为 6 个部位,即本体、套管、铁心、分接开关、冷却系统和非电量保护。其中,本体、套管和铁心是变压器的重要部位,受到电气及机械应力的影响较大,易发生故障,故将部位层划分为本体、套管和铁心 3 个部位。各部位包含的重要部件见表 1。

表 1 变压器部位划分

Table 1 Division of transformer parts

部位	代号	包含部件
本体	P ₁	高压绕组、中压绕组、低压绕组、调压绕组、平衡绕组、油箱本体、储油柜、密封、接地、升高座、呼吸器、绝缘油。
套管	P ₂	高压套管、中压套管、低压套管、中性点套管、铁芯接地套管、夹件接地套管。
铁心	P ₃	铁芯接地绝缘、夹件、拉板、穿芯螺杆、磁屏蔽及回路。
冷却系统	P ₄	散热器、风扇、潜油泵、油流继电器、控制箱。
分接开关	P ₅	有载分接开关、无载分接开关、在线滤油装置、操作机构。
非电量保护	P ₆	气体继电器、压力释放阀、温度计、压力突变保护、在线监测装置。

1)本体中包含油箱、绝缘油和绕组 3 个变压器中最容易发生故障的部件。绕组是变压器的电路部分,易于发生短路故障和绝缘故障^[21],其中,绕组绝缘十分重要,绝缘的寿命在一定程度上决定变压器的使用寿命;绝缘油是变压器的关键部分,评价变压器性能时应重视绝缘油的劣化程度,同时,通过油色谱试验^[22-23]监测油中溶解气体的含量及产生

速率,来反映变压器发生的多种故障,结合三比值法^[24],可判断变压器发生的故障及故障位置。故本体性能可分为绝缘性能、油中溶解气体和油性能三项。

2)据相关部门统计,套管发生故障的机率很高,且套管是变压器箱外的主要绝缘装置,所以有些单位会单独评估套管性能^[25]。套管上一般进行电气试验和油色谱试验来检测套管的故障,所以文中用绝缘性能和油中溶解气体来评价套管性能。

3)铁心是变压器的磁路部分,易发生多点接地故障,造成铁心局部发热,严重时甚至会烧坏变压器。

部位层的下一层是性能层,由不同部位发生的不同故障,划分部位性能。由于铁心发生的故障多为接地故障,故不再划分具体性能。依靠部位和性能挑选出能够表征变压器性能的参数,构成指标层。部位层、性能层和指标层共同构建变压器性能关键指标体系。

1.2 关键指标体系

参考状态评价导则,能够反映变压器本体性能的指标有{绝缘电阻,吸收比,极化指数,油中特征气体含量,油中特征气体产气速率,油介损,绕组介损,油中含水量,绕组直流电阻互差,直流电阻,泄漏电流,局部放电量,中性点油流静电电流,糠醛含量,体积电阻率,纸板聚合度,击穿电压};反映套管性能的指标有{套管外绝缘,末屏绝缘电阻,套管介损,电容量误差,套管油中气体含量,套管油中气体产生速率};反映铁心性能的指标有{接地电流,接地电阻,铁心绝缘电阻,乙烯含量,乙烷含量}。其中有些指标能够准确反映性能情况,有些则不能,或不易测量。为使评价结果准确,从中选出能准确反映部位性能、具有代表性的指标,构建关键指标体系,并用 $D=\{d_1,d_2,\cdots,d_{23}\}$ 表示指标。关键指标体系见表2。

2 基于定量修正层次分析法的关键指标权重计算

关键指标是影响变压器性能的重要因素,在关键指标体系中,有些指标与变压器性能的关联性强,对变压器的影响大,有些指标与性能的关联性弱,影响较小。确定关键指标的权重对于变压器性能评估有很大的影响,所以评估变压器性能时,要根据指标对性能的贡献度合理分配指标所占的权重,从而得到最优权重。依据权重进行性能评分更加合理实用。文中的指标体系分为3层,每一层的指标对变压器总体性能的贡献度不同,对性能贡献度大的所占权重大,因此对每一层都应进行权重计算。

表2 关键指标体系
Table 2 Key indicator system

部位层	性能层	指标层	编号
本体	绝缘性能	绝缘电阻	d_1
		极化指数	d_2
		吸收比	d_3
		纸板聚合度	d_4
		绕组介损	d_5
	油中溶解气体	总烃	d_6
		氢气	d_7
		乙炔	d_8
		CO含量	d_9
		CO ₂ 含量	d_{10}
		CO产生速率	d_{11}
		CO ₂ 产生速率	d_{12}
	油性能	油中含水量	d_{13}
		油介损	d_{14}
		击穿电压	d_{15}
套管	绝缘性能	末屏绝缘电阻	d_{16}
		套管介损	d_{17}
	油中溶解气体	乙炔含量	d_{18}
		氢气含量	d_{19}
		甲烷含量	d_{20}
		CO含量	d_{21}
		CO ₂ 含量	d_{22}
	铁心	接地电流	d_{23}

变压器的性能指标复杂,在性能评估时对不同地区、不同型号、不同运行环境下的变压器应作出不同的分析,针对这种特点,文中选用层次分析法计算权重,层次分析法在解决复杂系统的决策问题方面有重要应用,适用于变压器的性能评估。

层次分析法是一种解决多目标复杂问题的决策方法,将定性定量结合,依靠经验决定各因素之间的相对重要程度,从而构造判别矩阵,得到合理的权重。它适用于多目标、多准则、多层次的系统分析,将复杂的问题变得结构化、数量化,简化系统。其具体计算步骤如下。

2.1 建立指标层次结构体系

在文1.2节将关键指标体系分为3层,如表2所示。

2.2 构建各层判别矩阵

对每一层的指标两两比较,对于性能层,应将位于同一部位下的因素两两比较,指标层则将位于同一性能下的指标两两比较,通过比较得到相对重要程度,用1-9这9个标度来表示相对重要程度,用 $a_i(i=1,2,\cdots,n)$ 表示指标, $a_{ij}(j=1,2,\cdots,n)$ 表示 a_i 与 a_j 相比的重要度,并用相对应的数值表示。在标度

1-9中,1、3、5、7、9分别表示一样重要、比较重要、更重要、强烈重要、极其重要。2、4、6、8分别表示处于1-3、3-5、5-7、7-9中间的重要程度。相反的,若 a_i 与 a_j 相比不重要,则用对应的倒数表示。得出判别矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 层次单排序

对于上一层的某一个因素来说,将本层次的各个因素的重要程度排序,即层次单排序。解文2.1.2节中的判别矩阵,把各指标的重要程度排列出来。解判别矩阵最重要的是求得其最大特征根和特征向量。判别矩阵的最大特征根和它对应的特征向量的求法有很多,文中只选取其中一种,计算过程为

1)计算判别矩阵的每一行的乘积为

$$B_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (2)$$

2)计算乘积的 n 次方根

$$\bar{B}_i = \sqrt[n]{B_i} \quad (3)$$

3)得到向量 $\bar{B} = (\bar{B}_1, \bar{B}_2, \cdots, \bar{B}_n)^T$ 后,将它正规化

$$B_i = \bar{B}_i / \sum_{j=1}^n \bar{B}_j \quad (4)$$

得出向量 $B = [B_1, B_2, \cdots, B_n]^T$ 即是要求的特征向量。

4)求判别矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \sum [(AB)_i / nB_i] \quad (5)$$

2.4 一致性检验

要求得到的判别矩阵是一致矩阵,即满足对任意的 i, j, k 都有 $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ 成立的正反矩阵。判别矩阵的一致性指标是 CI ,即

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) \quad (6)$$

当 $CI=0$ 时,矩阵 A 一致;当 CI 越大,表示矩阵 A 的不一致性越严重。当不满足一致性检验时,需要调整判别矩阵,再进行一致性检验。一般通过一致性比率 $CR=CI / RI$ 来判断矩阵 A 的一致性容许范围。 RI 表示随机一致性指标,判别矩阵中的元素个数不同, RI 的值也不同。 RI 的值随元素个数的变化见表3。当 $CR < 0.1$ 时, A 的一致性程度在容许的范围内; $CR > 0.1$,则一致性检验不通过。

2.5 计算权重

首先计算每一层指标的权重,部位层的权重结

表3 RI 的值随元素个数的变化

Table 3 RI values vary with the number of elements

n	1	2	3	4	5	6
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	—
RI	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	—

果记为 w_{1i} ,性能层指标记为 w_{2i} ,指标层权重记为 w_{3i} ,最终得到综合指标为

$$w_i = w_{1i} \cdot w_{2i} \cdot w_{3i} \quad (7)$$

式(7)中, w_i 即第 i 个指标的综合权重。

3 定量修正评分函数

考虑到指标体系中指标值的变化与性能的关系存在较大差异,有的指标和变压器性能呈线性关系,有的呈非线性关系。如果按照以往的评分方法,将所有指标全部按照线性来评分,则会导致评价结果不够准确。为了更好的评价变压器的性能,增加评价结果的可信度,文中引入了劣化度,用于表征指标对性能的影响,并根据劣化度与指标之间的关系,将指标分为线性和非线性两类。

3.1 基于劣化度的指标划分

文中参考规程,引入劣化度将指标体系划分为线性指标和非线性指标。在文中所选的关键指标体系中:线性指标={绝缘电阻,极化指数,吸收比,纸板聚合度,击穿电压,套管外屏绝缘电阻,油中含水量},其余指标均为非线性指标。

线性指标和非线性指标标准比与劣化度之间的关系见图1、2。标准比是实测值与注意值的比值,各指标的注意值见表4。由图1可以看出,随着线性指标标准比的变化,劣化度在均匀改变,即对变压器性能的影响在均匀变化。随着非线性指标标准比的改变,到某个值时,劣化度发生了突变,也就是指标到达某个数值时,该指标对变压器性能的影响程度发生了变化,使得变压器的性能进一步劣化。

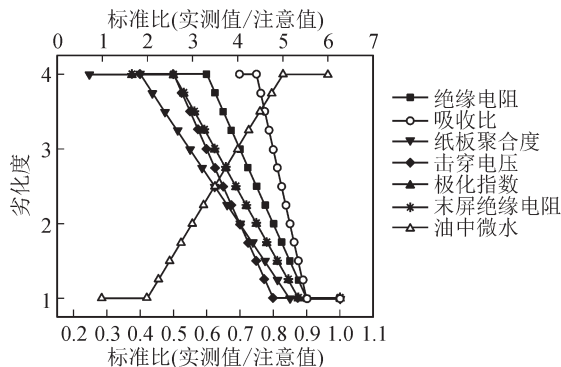


图1 劣化度随线性指标的变化

Fig. 1 Change of degradation degree with linear index

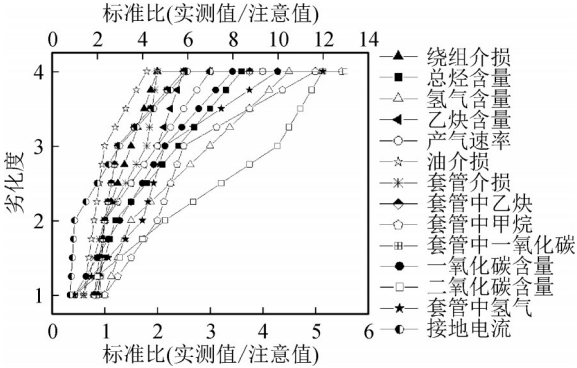


图2 劣化度随非线性指标的变化

Fig. 2 Changes of degradation degree with non-linear indicators

3.2 定量修正评分函数

在将指标划分为线性和非线性两类之后,根据指标与劣化度的关系划分指标的状态等级,文中分为4个状态等级,分别为正常、注意、异常和严重,依据劣化度和状态等级给出评分函数,见表5。并将线性指标与非线性指标的评分函数共同称为定量修正评分函数。

3.2.1 线性指标

由于各指标的量纲不同,相互之间没有可比性,不易进行总体的性能评估,故应先使指标无量纲化。对于线性指标,评分函数选用“max-min标准化”,使得无量纲化后的指标评分在[0,1]内。其公式为

表4 关键指标注意值

Table 4 Attention values of key indicators

指标	注意值
绝缘电阻/MΩ(3 ~ 10 kV、20 ~ 35 kV、63 ~ 330 kV);吸收比 K_m ;极化指数 PI ;纸板聚合度 DP ;击穿电压/kV(<35 kV、66 ~ 220 kV、330 kV);绕组介损 $\tan\delta/\%$ (<35 kV、60 ~ 220 kV、330 ~ 500 kV);油中微水/(mg·L ⁻¹)(<110 kV、220 ~ 330 kV、500 kV);末屏绝缘电阻/MΩ;套管介损 $\tan\delta/\%$;套管中C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)(<220 kV、>330 kV);套管中CH ₄ /(μL·L ⁻¹)(<220 kV、>330 kV);套管中H ₂ /(μL·L ⁻¹)(<220 kV、>330 kV);套管中CO/(μL·L ⁻¹);套管中CO ₂ /(μL·L ⁻¹);H ₂ /(μL·L ⁻¹);总烃/(μL·L ⁻¹);CO/(μL·L ⁻¹);CO ₂ /(μL·L ⁻¹);CO速率/(mL·d ⁻¹);CO ₂ 速率/(mL·d ⁻¹);油介损 $\tan\delta/\%$;C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)(<220 kV、>330 kV);接地电流/mA	(300、400、800);1.3;1.5;1 300;(35、40、50);(1.5、0.8、0.5),(15、15、10);1 000;0.4;(2、1);(100、100);(500、500);300;400;150;150;400;4 500;100;200;0.7;(5、1);100

表5 指标测量范围及状态等级

Table 5 Indicator measurement range and status level

状态	范围
满分	$x \geq g_4 / x \leq g_4$
正常	$g_3 \sim g_4$
注意	$g_2 \sim g_3$
异常	$g_1 \sim g_2$
严重	$g_0 \sim g_1$
零分	$x \leq g_0 / x \geq g_0$

$$x^* = \frac{x - \min}{\max - \min} \tag{8}$$

式(8)中: x^* 表示指标标准化后的结果; x 表示指标的测量值; min 是指标允许的最小值; max 是指标允许的最大值。把“max—min 标准化”应用到指标的性能评分中来,即

$$f(x_i) = \frac{x_i^+ - x_i}{x_i^+ - x_i^-} \tag{9}$$

$$f(x_i) = \frac{x_i - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \tag{10}$$

式(9)用于值越小越好的指标;式(10)用于值越大越好的指标。其中 $f(x_i)$ 表示第 i 个指标的评分; x_i^+ 表示第 i 个指标的最优值,即满分值; x_i^- 表示第 i 个

指标的注意值,即零分值; x_i 表示第 i 个指标的实测值。有些指标的实测值会比最优值或4级劣化值要大或者小很多,标准化后的值不在评价范围内,为了解决这个问题,当实测值超过最优值或者4级劣化值时,按照最优值和4级劣化值计算。

3.2.2 非线性指标

对于非线性指标的评分函数,由于劣化度与指标呈非线性关系,所以在不同评价等级内采用“max—min 标准化”进行评分,非线性指标的评分函数见式(11)、(12)。

$$f(x_i) = \left(\frac{g_j - x_i}{g_j - g_{j-1}} + j - 1 \right) \times 25 \quad 1 \leq j \leq 4 \tag{11}$$

$$f(x_i) = \left(\frac{g_{j-1} - x_i}{g_{j-1} - g_j} + j - 1 \right) \times 25 \quad 1 \leq j \leq 4 \tag{12}$$

式(11)适用于非线性指标中值越大越好的指标;式(12)适用于非线性指标中值越小越好的指标。式(11)、(12)中: $f(x_i)$ 表示第 i 个指标的评分值; x_i 表示第 i 个指标的测量值; j 表示测量值所处劣化度的等级。根据以上评分公式得到每个指标的评分结果,再由式(13)得到变压器性能总体评分。

$$s = \sum w_i f(x_i) \tag{13}$$

式(13)中: w_i 表示第 i 个指标的综合权重; $f(x_i)$ 表示第 i 个指标的评分结果; s 表示变压器总体性能评分。

由评分结果分析变压器性能,首先通过评分结果划分变压器所处性能等级,再由性能等级推荐检修等级。文中根据导则分为4个检修等级,即A级、B级、C级和D级,见表6。

表6 性能评价等级

Table 6 Performance evaluation level			
评分	等级	性能描述	检修
0 ~ 25	严重	性能非常低,需要尽快停电检修	A级
26 ~ 50	异常	性能较低,要安排检修,必要时停电检修	B级
51 ~ 75	注意	可以继续运行,平时监视运行	C级
76 ~ 100	正常	整体运行情况良好,近期不必检修	D级

表7 110 kV 指标测量值

Table 7 110 kV transformer index measured value

指标	测量值	指标	测量值	指标	测量值	指标	测量值
绝缘电阻/M Ω	1 180.000	末屏绝缘电阻/M Ω	2 300.000	CO ₂ 相对产气速率/(mL·d)	25.430	C ₂ H ₆ /(μ L·L ⁻¹)	1.300
吸收比	1.320	套管介损 tan δ /%	0.353	油中微水/(mg·L ⁻¹)	15.600	C ₂ H ₄ /(μ L·L ⁻¹)	2.200
极化指数	1.300	套管中 H ₂ /(μ L·L ⁻¹)	158.920	油介损 tan δ /%	0.650	CO 相对产气速率/(mL·d ⁻¹)	23.073
纸板聚合度	960.000	套管中 CH ₄ /(μ L·L ⁻¹)	63.310	击穿电压/kV	40.000	CO ₂ /(μ L·L ⁻¹)	901.400
绕组介损 tan δ /%	0.310	C ₂ H ₂ /(μ L·L ⁻¹)	1.300	套管中 C ₂ H ₂ /(μ L·L ⁻¹)	0.320	铁心接地电流/mA	80.000
H ₂ /(μ L·L ⁻¹)	54.510	总烃/(μ L·L ⁻¹)	18.600	套管中 CO/(μ L·L ⁻¹)	46.30	—	—
CH ₄ /(μ L·L ⁻¹)	13.800	CO/(μ L·L ⁻¹)	294.600	套管中 CO ₂ /(μ L·L ⁻¹)	177.82	—	—

1)由各指标的测量值首先计算指标的权重。指标的权重由层次分析法得出,具体计算过程见文2.1.1~2.1.5节。计算得到指标的综合权重,在计算权重时,需要注意以下两点:①据统计,110 kV 变压器最经常发生的两种故障为短路故障和绝缘故障,因此在评估110 kV 变压器性能时,要适量增加与变压器的短路故障和绝缘故障相关的指标所占权重;②由于铁心中所选指标较少,铁心的接地电流的评分即代表铁心整体性能的评分,故接地电流的权重会相对较大。

2)由指标测量值所处的劣化等级计算每个指标的性能评分,线性指标的评分公式为式(9)、(10);非线性指标的评分公式为式(11)、(12)。

3)根据式(13)计算出变压器的最终评分。权重计算结果及评分结果见表8、9。

由表9中可知,该变压器的整体性能评分为

4 实例分析

文中以110 kV和220 kV两台不同地区、不同电压等级的变压器为例,验证提出的基于定量修正层次分析的变压器性能评估方法对评估不同电压等级的变压器正确性和有效性。110 kV和220 kV是中国变压器常用的电压等级,故评估这两种电压等级的变压器具有代表性。

4.1 实例1

选取天津地区某变电站110 kV的主变压器为例进行分析,该变压器型号为SFSZ7-50000/110,已投入运行5年,测得的本体、套管和铁心的相关指标数值见表7。

具体评估过程如下:

74.56,根据表6的等级划分,可知其处于注意状态,仍旧可以继续运行,但应加强监控。各指标评分中,评分较低的有极化指数、吸收比、纸板聚合度、油中含水量、油介损、击穿电压和套管介损。

绝缘电阻、极化指数和吸收比反映绕组的绝缘水平,该变压器的绝缘电阻值处于正常范围内,但极化指数和吸收比的值均超出正常范围,这是因为只有当绕组绝缘是贯穿性缺陷时,才能由绝缘电阻值反映出来,绝缘存在的局部缺陷则可以由极化指数和吸收比来反映。导致极化指数和吸收比的值偏离正常范围的原因可能是绝缘整体受潮或部件表面受潮、脏污、瓷件破裂、引线接壳、器身内有铜线搭桥、绝缘部件破裂等。

纸板聚合度评分很低,可知该变压器的绝缘纸劣化严重,这可能是变压器绝缘纸的正常老化现象,也可能是绕组温度过高或油温过高导致的。

表8 110 kV变压器各指标权重分配

Table 8 The weight distribution of each indicator of 110 kV transformer

指标	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}
权重	2.8	5.6	5.6	8.4	2.8	5.6	2.8	2.8	5.6	5.6	4.0	5.0
指标	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}	d_{17}	d_{18}	d_{19}	d_{20}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	整体
权重	5.0	4.0	5.6	2.8	6.0	2.0	2.0	2.0	2	2	10	100

表9 110 kV变压器各指标性能评分

Table 9 Performance rating of each indicator of 110 kV transformer

指标	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}
评分	90.00	43.00	41.33	51.43	100.00	100.00	100.00	100.00	75.68	73.47	89.33	98.30
指标	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}	d_{17}	d_{18}	d_{19}	d_{20}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	整体
评分	70.00	58.92	66.67	100.00	60.31	95.00	95.09	80.21	85.53	81.56	87.50	74.56

油中含水量、油介损及击穿电压都是反映绝缘油劣化程度的指标,该变压器的这3项指标评分都较低,油中含水量超标说明绝缘油受潮严重,击穿电压和油介损表明绝缘油中的杂质过多,导致绝缘油性能劣化,绝缘水平下降。

油中溶解气体能够反映多种变压器故障,所以要单独考虑特征气体的含量及产生速率。由于该变压器各气体含量的值均在正常范围内,所以可不考虑该编码对应的变压器发生的故障。

根据表6,文中实例中的变压器推荐C级检修,并根据指标的评分得出,重点检修部位是绕组、绝缘纸、绝缘油和铁心,检查绕组绝缘是否存在隐藏性的局部缺陷,绝缘纸的老化程度和受潮程度,是否需要更换绝缘纸,同时由指标的评分可以看出绝

缘油的劣化较为严重,故应检修绝缘油的运行情况。实际检修中,该变压器的绝缘油劣化,杂质和含水量过高,与评价结果符合。

4.2 实例2

以南京地区的某台220 kV变压器为例,型号为SFPSZ10—120000/220,各指标测得数值见表10。南京供电公司统计了在1996—2015年的10年间220 kV变压器的故障情况,发现故障率较高的有导电回路接触不良、导线间短路、油泵内部放电和引线绝缘击穿等故障。这些故障多集中在本体,且会产生特征气体,并由油色谱试验检测出。因此在计算指标权重时应考虑到220 kV变压器的故障情况,合理分配权重。指标权重以及评分过程在与实例1一样,因此不再重述,各指标权重和变压器评分情况见表11。

表10 220 kV变压器指标测量值

Table 10 Measurement value of 220 kV transformer index

指标	测量值	指标	测量值	指标	测量值	指标	测量值
绝缘电阻/MΩ	1 092.00	末屏绝缘电阻/MΩ	23 050.000	CO ₂ 相对产气速率/(mL·d)	27.45	C ₂ H ₆ /(μL·L ⁻¹)	52.50
吸收比	1.75	套管介损 tanδ/%	0.251	油中微水/(mg·L ⁻¹)	6.30	C ₂ H ₄ /(μL·L ⁻¹)	40.60
极化指数	2.20	套管中 H ₂ /(μL·L ⁻¹)	208.700	油介损 tanδ/%	1.42	CO相对产气速率/(mL·d ⁻¹)	18.10
纸板聚合度	850	套管中 CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	63.310	击穿电压/kV	55.60	CO ₂ /(μL·L ⁻¹)	961.76
绕组介损 tanδ/%	0.91	C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)	0.720	套管中 C ₂ H ₂ /(μL·L ⁻¹)	0.66	铁心接地电流/mA	38.40
H ₂ /(μL·L ⁻¹)	55.08	总烃/(μL·L ⁻¹)	188.800	套管中 CO/(μL·L ⁻¹)	51.27	—	—
CH ₄ /(μL·L ⁻¹)	94.98	CO/(μL·L ⁻¹)	94.710	套管中 CO ₂ /(μL·L ⁻¹)	82.04	—	—

该变压器的总体性能评分为78.63,处于正常运行状态,推荐D级检修。通过表11的评分可知,评分较低的指标包括纸板聚合度、绕组介损、总烃含量、油介损。

纸板聚合度评分仅为35.71分,即知该变压器

的绝缘纸老化严重;绕组介损超出了注意值,运行时应当关注绕组的绝缘情况;同时变压器绝缘油介损评分极低,表明绝缘油劣化严重,应及时清理绝缘油;该变压器的总烃指标超过注意值,由测得的特征气体含量可知:C₂H₂/C₂H₄=1,CH₄/H₂=0.25,C₂H₄/

表 11 220 kV 变压器各指标权重分配及评分

Table 11 Weight distribution and grading of each indicator of 220 kV transformer

项目	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}
权重	2.4	4.8	4.8	7.2	4.8	4.8	2.4	2.4	2.4	2.4	4.8	4.8
评分	73.00	100.00	74.29	35.71	49.17	43.53	100.00	100.00	100.00	72.21	94.93	97.16
项目	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}	d_{17}	d_{18}	d_{19}	d_{20}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	整体
权重	2.4	4.8	4.8	8.75	8.75	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.0	100.0
评分	100.00	0.00	100.00	100.00	78.44	89.69	90.94	80.32	83.98	91.45	100.00	78.63

$C_2H_6=1.69$, 对应编码为 $[0, 2, 0]$, 可利用三比值法确定发生的故障。根据指标评分分析变压器发生的异常运行情况, 具体分析见表 12。

表 12 220 kV 变压器故障分析

Table 12 Failure analysis of 220 kV transformer

指标	故障
纸板聚合度	由于长期的热和电的作用导致绝缘纸老化, 失去强度, 机械强度下降
绕组介损	绕组绝缘受潮
油介损	绝缘油劣化, 油中杂质和水分过多
三比值编码 $[0, 2, 0]$	低温过热($150 \sim 300$ °C)故障, 可能由分接开关接触不良、铁心接地、局部短路、层间绝缘故障、铁心多点接地、引线夹件螺丝松动或接头焊接不良引起

分析该变压器的运行情况以及发生的故障, 在检修时, 应重点检修该变压器的绝缘纸板老化程度, 绕组介损的受潮程度和绝缘油的劣化度, 以及是否发生了分接开关接触不良、铁心接地等导致变压器低温过热的故障。现场检查发现该变压器的绕组绝缘和绝缘纸板发生了受潮和老化现象, 绝缘油中水分和杂质超标, 与文中提出方法的预测结果符合。证明该评估方法的实用性。

基于文中提出的性能评估方法, 可根据总体性能及各指标评分, 推荐检修等级, 有针对性的检修变压器, 大大节省了检修时间和花费的人力物力, 有效提高检修效率。

5 结论

目前对变压器性能评估的研究已经很深入, 但是大多由专家打分实现, 主观因素过多, 本文提出的基于定量修正层次分析法的变压器性能评估方法, 在层次分析法的基础上利用评分函数进行打分, 在一定程度上降低了主观因素的影响。

1) 在考虑了部位重要程度和故障概率的基础上, 选取了变压器中最易发生故障的本体、套管和铁心 3 个部位来评估变压器的性能, 并选出能够表征发生故障的有代表性的指标, 构建了关键指标体

系。使得复杂的变压器指标体系具有层次性, 根据指标有针对性的展开评价, 细化评价结果。

2) 选用的层次分析法简化分解评价体系, 综合考虑各个因素对总体性能的影响, 每个层次的因素对与最终结果都存在着量化的联系, 条理清晰。但是也存在着定性成分多, 定量成分过少的缺点。定量修正评分函数通过实际数据进行打分, 弥补这个缺点, 评价结果更具有说服力。

3) 对于变压器所处状态, 文中依据劣化度进行了更细致的划分, 把状态等级与劣化度对应起来, 分为正常、注意、异常和严重 4 种状态, 解决了以往状态划分的不确定性和模糊性问题。

参考文献:

- [1] 廖瑞金, 王有元, 刘 航, 等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3454-3464.
LIAO Ruijin, WANG Youyuan, LIU Hang, et al. Research status of state assessment methods for power transmission and distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3454-3464.
- [2] 石少伟, 王 可, 陈 力, 等. 基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 60-66.
SHI Shaowei, WANG Ke, CHEN Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 60-66.
- [3] 吴晋媛, 夏国强, 李 通, 等. 基于时域介电法和动态贝叶斯网络的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 196-203.
WU Jinyuan, XIA Guoqiang, LI Tong, et al. Evaluation of the aging state of transformer oil-paper insulation based on time-domain dielectric method and dynamic Bayesian network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55 (10): 196-203.
- [4] 吴瞻宇, 董 明, 王健一, 等. 基于模糊关联规则挖掘的电力变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 157-163.
WU Zhanyu, DONG Ming, WANG Jianyi, et al. Power transformer fault diagnosis method based on fuzzy association

- rules mining[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 157-163.
- [5] ABU - SIADAA, HMOODS, ISLAM S. A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2343 - 2349.
- [6] LIAO R J, ZHENG H B, GRZYBOWSKI S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1111-1118.
- [7] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 474-481.
- LIAO Ruijin, MENG Fanjin, ZHOU Nianrong, et al. Evaluation method of transformer insulation state based on set pair analysis and evidence theory fusion[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 474-481.
- [8] 黄大荣, 陈长沙, 孙国玺, 等. 电力变压器故障的客观熵权识别及诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 206-211.
- HUANG Darong, CHEN Changsha, SUN Guoxi, et al. Objective entropy weight identification and diagnosis method for power transformer faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 206-211.
- [9] 阮 玲, 谢齐家, 高胜友, 等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 822-828.
- RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in transformer state evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 822-828.
- [10] 向利娟, 孙 跃, 胡 超, 等. 基于 AHP 和 FCE 的 IPTS 电磁机构性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 848-857.
- XIANG Lijuan, SUN Yue, HU Chao, et al. Performance evaluation for magnetic couplers in IPTS using AHP and FCE[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(3): 848-857.
- [11] 李 黎, 张 登, 谢龙君, 等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 152-159.
- LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.
- [12] 王有元, 陈璧君. 基于层次分析结构的变压器健康状态与综合寿命评估模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2845-2850.
- WANG Youyuan, CHEN Bijun. Transformer health status and comprehensive life assessment model based on analytic hierarchy results[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2845-2850.
- [13] 张 鹏, 齐 波, 李文璞, 等. 考虑部位和性能的电力变压器差异化评价方法[EB/OL]. [2019-06-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.181880>.
- ZHANG Peng, QI Bo, LI Wenpu, et al. Differentiated evaluation method of power transformer considering location and performance[EB/OL]. 2019-06-25. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.181880>.
- [14] KHAN S A, EQUBAL M D, ISLAM T. A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 590-596.
- [15] SUN L, MA Z, SHANG Y, et al. Research on multi-attribute decision - making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3855-3864.
- [16] 苗 飞, 任建文, 汤国庆, 等. 基于灰色聚类与证据合成的变压器状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 50-55.
- MIAO Fei, REN Jianwen, TANG Guoqing, et al. Transformer condition assessment based on grey clustering and evidence synthesis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 50-55.
- [17] 宋人杰, 刘瑞英, 刘耀伟, 等. 基于层次灰关联分析的变压器状态评估关键指标体系构建及应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2509-2515.
- SONG Renjie, LIU Ruiying, LIU Yaowei, et al. Construction and application of key indicator system for transformer state assessment based on hierarchical grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2509-2515.
- [18] 廖瑞金, 刘 斌, 张懿议, 等. 基于部件划分和熵权的变压器绝缘状态评估策略[J]. 高电压技术, 2013, 39(8): 1830-1836.
- LIAO Ruijin, LIU Bin, ZHANG Yiyi, et al. Evaluation strategy of transformer insulation state based on component partitioning and entropy weight[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1830-1836.
- [19] 110 kV~500 kV 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/CSG11001—2010[S]. 2010.
- Guide for condition evaluation of 110 kV~500 kV oil-immersed power transformers: Q/CSG 11001—2010[S]. 2010.
- [20] 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 169—2011[S]. 2011.
- Oil-immersed transformer(reactor) state evaluation guideline: Q/GDW 169—2011[S]. 2011.
- [21] 黄桂朝. 关于 110 kV 油浸式电力变压器绝缘受潮故障原因分析及处理探讨[J]. 中国设备工程, 2018(22): 72-73.
- HUANG Guichao. Analysis and treatment of the 110 kV oil-

- 代仪器, 2000(1):1-13.
- PAN Yanbin, ZHAO Yong, ZHANG Fuyi. IR fingerprint spectrum and its analyzing method[J]. Modern Instruments, 2000(1):1-13.
- [19] 黄金保. 纤维素快速热解机理的分子模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- HUANG Jinbao. Molecular simulation study of pyrolysis mechanism of cellose[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 37-38.
- [20] LU T, CHEN F W. A multifunctional wavefunction analyzer [J]. Journal of Computational Chemistry, 2012, 33(5): 580-592.
- [21] LI S, LYONS-HART J, BANYASZ J, et al, Real-time evolved gas analysis by FTIR method: An experimental study of cellulose pyrolysis[J]. Fuel, 2001, 80(12):1809-1817.
- [22] SHEN D K, GU S, The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(24):6496-6504.
- 李亚莎(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术和电磁场计算方面的研究。
- 徐程(1992—), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。
-
- (上接第 141 页)
- immersed power transformer insulation moisture fault[J]. China Equipment Engineering, 2018(22): 72-73.
- [22] ABU-SIADA A, HMOOD S, ISLAM S. A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2343-2349.
- [23] 赵婉芳, 王慧芳, 邱剑, 等. 基于油色谱监测数据的变压器动态可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22):38-42.
- ZHAO Wanfang, WANG Huifang, QIU Jian, et al. Dynamic reliability analysis of transformer based on oil chromatographic monitoring data[J]. Automation of Power Systems, 2014, 38(22): 38-42.
- [24] 梁永亮, 郭汉琮, 薛永端. 基于特征气体关联特征的变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):386-392.
- LIANG Yongliang, GUO Hancong, XUE Yongduan. Transformer fault diagnosis method based on characteristic gas correlation feature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2):386-392.
- [25] 杨贤, 冯达, 李冲, 等. 基于威布尔分布的油纸套管寿命预测模型[J]. 高压电器, 2015, 51(11):103-109.
- YANG Xian, FENG Da, LI Chong, et al. Life prediction model of oil-paper casing based on Weibull distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11):103-109.
- 党建(1991—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为电气设备故障诊断及性能评估。