

# 基于检测量分析的变压器可靠性灰关联层次综合评估

为弥补基于运行量的变压器可靠性评估模型缺陷与不足,从变压器绝缘油中气体产生的机理出发,建立了基于检测量分析的变压器可靠性灰关联层次综合评估模型。为了能够量化评价变压器的健康状态,提出使用灰关联分析来对变压器进行状态评估,并采用层次分析法来确定各因素的权重值。通过实例分析表明,所提出的灰关联层次综合评价方法能够较好地地区分变压器的各种不同健康状态,为变压器的状态评估提供了新的思路。

赖美云 黄德林 杜智聪/广东广特电气有限公司  
李 鑫 汪进锋/广东电网有限责任公司电力科学研究院

## 0 引言

变压器的故障机理复杂,其可靠性水平很难从一个侧面就能得到科学合理的评估。大部分变压器可靠性模型是以正常热老化为基础所建立的模型,仅只考虑了运行负荷、环境温度等正常运行过程中变量<sup>[1-3]</sup>。然而,变压器实际上处于非常复杂的环境之中,会受到各种随机因素的影响。偶然的外部短路,会导致变压器绕组短时的过电流过热;大气过电压或内部过电压,会导致局部放电的产生;一些随机的机械振动,也会对绕组产生损伤。一旦有类似这些的极端状况发生,将会对变压器的健康状态造成严重的损害<sup>[4]</sup>。由于这些随机事件均无法反映在正常的运行量上,因此如果仅依靠基于运行量的模型进行评估,随着时间的积累将会导致较大的误差。

因此,为弥补基于运行量的变压器可靠性评估模型缺陷与不足,本文从变压器绝缘油中气体产生的机理出发,建立了基于检测量分析的变压器可靠性评

估模型。

变压器作为一个复杂的多指标系统,其可靠性因素带有随机性。使用传统的系统理论,能够充分地研究那些具有充分信息的系统<sup>[5-6]</sup>。而对于信息比较缺乏的系统,则可以使用黑箱原理来研究。然而,对于像变压器可靠性状态这种带有部分信息清楚、部分信息不清楚的系统,非常适合使用灰色系统原理来研究解决<sup>[7-8]</sup>。

灰关联分析是邓聚龙教授近年来提出的灰色理论中关于灰评估与决策的方法<sup>[9]</sup>。它能够对没有评判标准的一系列模式,通过设定评估模式来找到标准模式,然后将诸模式与标准模式进行比较,根据其于标准模式的灰关联度来对模式进行量化的评价。另一方面,非均权形式的灰关联度在评价整体的性能上更加科学合理。为更好地给出各指标的权重系数,使其合理地反映指标对整体评价的影响,本文采用经典的层次分析法<sup>[10]</sup>(Analytic Hierarchy Process, AHP)来进行权重分配。

## 1 评估指标的选取

一般来说,变压器的健康状态与变压器所处的环境因素、运行历史、检修记录以及随机发生的一些意外情况密切相关。变压器的状态评判指标的选取必须能够真实全面地反映变压器的健康状态,给运行维护人员作出指导。另一方面,评判指标的选取也要考虑到实际检测的可操作性,方便运维人员定期或不



赖美云/工程师

### 关键词/Keywords

检测量分析·  
变压器可靠性·  
灰关联层次·  
综合评估·

定期对各评判指标进行检测和提取。

对于电力变压器，预防性试验一直是一个重要的运维管理环节，为变压器的安全运行提供了积极的作用。中国南方电网有限责任公司《电力设备预防性试验规程》规定<sup>[11]</sup>的变压器试验项目如表1所示。

表1 变压器绝缘预防性试验项目

| 序号 | 需要做的试验项目                        |
|----|---------------------------------|
| 1  | 油中溶解气体色谱分析                      |
| 2  | 油中水分                            |
| 3  | 油中含气量                           |
| 4  | 油中糠醛含量                          |
| 5  | 油中颗粒度测试                         |
| 6  | 绝缘油试验                           |
| 7  | 绕组直流电阻                          |
| 8  | 绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比或极化指数            |
| 9  | 绕组连同套管的 $\tan \delta$           |
| 10 | 电容型套管的 $\tan \delta$ 和电容值       |
| 11 | 绕组连同套管的交流耐压试验                   |
| 12 | 铁心及夹件绝缘电阻                       |
| 13 | 穿心螺栓、铁轭夹件、绑扎钢带、铁心、绕组压环及屏蔽等的绝缘电阻 |
| 14 | 局部放电试验                          |
| 15 | 绕组所有分接的电压比                      |
| 16 | 校核三相变压器的组别或单相变压器极性              |
| 17 | 空载电流和空载损耗                       |
| 18 | 短路阻抗和负载损耗                       |
| 19 | 绕组变形测试                          |
| 20 | 全电压下空载合闸                        |
| 21 | 有载分接开关的试验和检查                    |
| 22 | 测温装置校验及其二次回路试验                  |
| 23 | 气体继电器校验及其二次回路试验                 |
| 24 | 压力释放器校验及其二次回路试验                 |
| 25 | 冷却装置及其二次回路检查试验                  |
| 26 | 整体密封检查                          |
| 27 | 套管中的电流互感器试验                     |
| 28 | 绝缘纸(板)聚合度                       |
| 29 | 绝缘纸(板)含水量                       |
| 30 | 噪声测量                            |
| 31 | 箱壳振动                            |
| 32 | 红外检测                            |

对上述众多的试验项目，需要选择能够不影响变压器的正常运行，可以随时检测的量作为评判指标。与绝缘油相关的指标（绝缘油试验、油

中溶解气体色谱分析DGA等的指标）由于仅需要提取小部分绝缘样品做试验，不会影响变压器的正常运行，因此是可以选择的较好评判指标。

电力变压器油中溶解气体色谱分析（DGA）<sup>[12]</sup>是目前在工程和科研领域都有较成熟研究的一种变压器状态检测方法。主要通过气相色谱分析试验来得到变压器油中的各类气体的含量，准确度高且能够进行带电测试，甚至可以实现在线测试和在线分析。目前工业界普遍使用气相色谱分析中 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 及 $C_2H_2$ 这五种气体含量作为对变压器状态的评价指标，使用三比值法来对故障变压器进行诊断。然而三比值法一般仅适用于故障变压器，主要用于判断故障类型和故障严重程度，对于正常运行的变压器没有给出判断其可靠性水平的指标。另一方面，三比值法并没有给出量化的评价，不利于对变压器可靠性水平进行横向比较从而指导安排检修次序。

为了能够量化地评价变压器的健康状态，本文提出使用灰关联分析来对变压器进行状态评估，并使用层次分析法来确定各因素的权重值。

## 2 灰关联分析模型

本文通过以下步骤来建立变压器健康状态评估的灰关联分析模型，如图1所示。

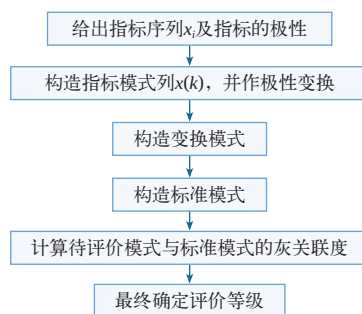


图1 变压器健康状态评估步骤

具体步骤如下。

1) 步骤一。建立评估模式。

设 $i$ 为第 $i$ 个评估对象， $j$ 为第 $j$ 个指标，建立评估模式如下。

$$X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)] \quad i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

称

$$X(j) = [x_1(j), x_2(j), \dots, x_m(j)] \quad j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

为指标模式序列。

2) 步骤二。设立指标的极性, 对指标序列  $X(j)$  进行极性变换。

变压器健康状态良好时, 绝缘油中并不会含有氢气和烃气。只有在绝缘油经受过热或放电时, 才会产生裂解从而分解出自由氢气和短链的烃气。越高温的过热, 越高能的放电, 对变压器健康会造成越严重的损伤, 也会产生越多的自由氢气和烃气。因此, 油中溶解气体指标属于极小性指标 (即越小健康状态越好), 可以使用如下的极性变换方法

$$x_i(j) = \frac{\min_i X_i(j)}{X_i(j)} \quad (3)$$

式中,  $x_i(j)$  为  $X_i(j)$  的极性变换。

3) 步骤三。构造标准模式。

由于油中溶解气体指标属于极小值指标, 标准指标的选取按如下原则

$$X_0(j) = \min_i X_i(j) \quad X_i(j) \in X(j) \quad (4)$$

得标准指标序列

$$X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\} \quad (5)$$

根据步骤二对标准指标序列进行极性变换后就称为标准模式

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\} \quad (6)$$

4) 步骤四。计算待评价模式  $x_i$  对标准模式  $x_0$  的灰关联系数。

使用邓氏关联公式计算灰关联系数

$$\Delta_i(j) = |x_0(j) - x_i(j)| \quad (7)$$

$$r_i(j) = \frac{\min_i \min_j \Delta_i(j) + \xi \max_i \max_j \Delta_i(j)}{\Delta_i(j) + \xi \max_i \max_j \Delta_i(j)} \quad (8)$$

式中,  $\xi \in (0, 1)$ 。

5) 步骤五。进行等级评估。

评估等级根据待评估对象  $x_i$  对标准模式  $x_0$  的灰关联度  $r_i = r(x_0, x_i)$  的数值大小来决定。

灰关联度的构建可以直接使用邓氏关联公式来计算

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_i(j) \quad (9)$$

显然, 式 (9) 认为各个指标的灰关联系数具有同样权值, 即认为各指标对整体评价具有相同

的重要性。这是均权形式的评价方法。然而, 由于实际上各个评价指标具有不同的评价侧面, 对整体评价的权重可能不一样。很可能某个指标对整体评价的影响很小, 而另一指标却占据了主导作用。因此, 非均权形式的灰关联度公式更具有代表性和说服力。非均权形式的灰关联度可以用如下公式来表达

$$r_i = \sum_{j=1}^n k(j) r_i(j) \quad (10)$$

式中,  $k(j)$  为第  $j$  个评价指标的权重值;  $k(j)$  满足关系式  $\sum_{j=1}^n k(j) = 1$ 。

根据灰关联度的计算步骤可知,  $\min_i \min_k \Delta_{0i}(k) = 0$ , 即有

$$r_i(j) = \frac{\xi \max_i \max_j \Delta_i(j)}{\Delta_i(j) + \xi \max_i \max_j \Delta_i(j)} = \frac{\xi}{\frac{\Delta_i(j)}{\max_i \max_j \Delta_i(j)} + \xi} \quad (11)$$

由于

$$0 \leq \Delta_i(j) \leq \max_i \max_j \Delta_i(j) \leq 1 \quad (12)$$

故

$$0 \leq \frac{\Delta_i(j)}{\max_i \max_j \Delta_i(j)} \leq 1 \quad (13)$$

又由于  $0 < \xi < 1$ , 根据式 (9) 和式 (11) 可得

$$r_i(j) \geq \frac{\xi}{1 + \xi} \quad (14)$$

取  $\xi = 0.5$  时, 有  $r_i(j) \geq 1/3$ , 可得

$$r_i \geq \sum_{j=1}^n \left[ k(j) \times \frac{1}{3} \right] = \frac{1}{3} \times \sum_{j=1}^n k(j) = \frac{1}{3} \quad (15)$$

即最小的灰关联系数为  $1/3$ 。

因此,  $1/3 < r(x_0, x_i) < 1$ 。可以根据当次评估数据的具体情况, 使用合适方式在  $1/3 \sim 1$  之间进行分级。然后根据待评估变压器所处的级别来评估其健康状态, 指导运维人员进行相应的检修工作。根据对检修影响的不同<sup>[13]</sup>, 变压器的健康状态级别可以划分为以下五个级别: ①健康级别。意味着所有预试数据均与优质产品出厂值相近, 远离规程中的注意值。条件允许情况下变压器检修周期可以延长。②正常级别。意味着变压器没

有明显问题，所有预试数据均未达到规程中的注意值，没有劣化趋势，与同类变压器相比相当或偏好。按计划进行检修即可。③缺陷级别。部分预试数据达到规程中的注意值，有一定的劣化趋势，与同类变压器相比有一定的差异性。对变压器短期运行的可靠性没有显著影响，但长期运行可能不利，条件允许情况下需要缩短维修周期进行检修。④恶化级别。多数预试数据达到规程中的注意值，有明显的劣化趋势，与同类变压器相比差异性较为明显。应根据生产情况、供电安全情况以及资金情况尽快安排变压器的检修。⑤故障级别。指电力变压器发生故障或性能严重下降，必须立即停运。

### 3 层次分析法确定指标权重

由上一节可知，非均权形式的灰关联度在评价整体的性能上更加科学合理。对于油中含的气体而言，不同的气体组分和含量与电力变压器故障的类型及其严重程度有密切关系。电力行业标准DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》<sup>[14]</sup>将不同的故障类型产生的主要特征气体和次要特征气体归纳如表2所示。

表2 不同故障类型产生的气体

| 故障类型      | 主要气体组分                                                                | 次要气体组分                                                                          |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 油过热       | CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                       | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                                  |
| 油和纸过热     | CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                                  |
| 油纸绝缘中局部放电 | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                        | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub> |
| 油中火花放电    | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                        | —                                                                               |
| 油中电弧      | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                        | CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
| 油和纸中电弧    | H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>  | CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>主要产生于电力变压器发生高于700℃的高温过热严重故障时，在放电时也会产生。CH<sub>4</sub>在过热和放电时都会产生。C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>主要产生于变压器发生高能放电时，正常情况下并不存在于变压器油中。电晕放电、火花放电、水电解或铁锈和过载，高温过热等形式都会有H<sub>2</sub>产生。

为了能科学合理地给出各指标的权重系数，使其合理地反映指标对整体评价的影响，本文使用AHP来进行权重分配。

AHP的特点：使用指标间两两重要程度之比的形式来判断两个指标的重要度等级，然后将两两比较的结果构成判断矩阵，再利用计算特征值的方法来求出各指标的权重系数。

由于各气体含量指标对变压器的健康状态都有较为重要的影响，没有哪个指标可以占据主导地位而另一些指标只起小部分作用。因此其权重值相差不会太大。在各指标权重相差不大的情况下，直接运用两两比较标度法进行判断的时候，由于两两之间的差别过小，进行判断时可能会出现 $a>b$ ， $b>c$ 却 $a<c$ 这种情况，即矩阵无法满足一致性校验；而如果要人为避免这种情况，人们往往趋向于把两两比较的差距拉大，这会造成人为加重各指标差异性的现象。

为了解决这一问题，本文提出使用差值评分表的形式来构建评判矩阵。步骤如下。

1) 步骤一。按照AHP的要求，邀请5位专家对各评判指标进行打分。打分表如表3所示。

表3 专家评分表

| 指标                            | 专家1 | 专家2 | 专家3 | 专家4 | 专家5 | 平均分 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H <sub>2</sub>                | 74  | 73  | 76  | 72  | 80  | 75  |
| CH <sub>4</sub>               | 71  | 76  | 80  | 75  | 78  | 76  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 82  | 83  | 90  | 84  | 86  | 85  |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 73  | 80  | 84  | 78  | 75  | 78  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 93  | 90  | 95  | 88  | 94  | 92  |

2) 步骤二。利用各指标平均分的差值来构建评判矩阵。构建方法如下。

定义指标的平均分为： $R_i$ ， $i=1,2,3,4,5$ 。

评判矩阵元素使用如下方法构建

$$a_{ij} = \begin{cases} 1+(R_i - R_j) & R_i > R_j \\ \frac{1}{1+(R_i - R_j)} & R_i < R_j \\ 1 & R_i = R_j \end{cases} \quad (16)$$

根据评分表，形成评判矩阵如下

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1.16 & 1.07 & 1.14 & 0.855 \\ 1.01 & 1 & 0.917 & 0.98 & 0.862 \\ 1.1 & 1.09 & 1 & 1.07 & 0.935 \\ 1.03 & 1.02 & 0.935 & 1 & 0.877 \\ 1.17 & 0.99 & 0.909 & 0.971 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由于评判矩阵是通过评分的形式来确定的,不会产生由于两两评判过程中因为尺度把握不好而发生评分次序错乱的情况。因此评判矩阵具有较好的一致性。取最大特征值的特征向量来构建评判权重,得评判权重为

$$k=[0.188\ 3\ 0.190\ 1\ 0.207\ 0\ 0.193\ 8\ 0.220\ 8]\quad(18)$$

综上所述,本文提出的基于检测量分析的变压器可靠性灰关联层次综合评估模型,其具体评估步骤如图2所示。

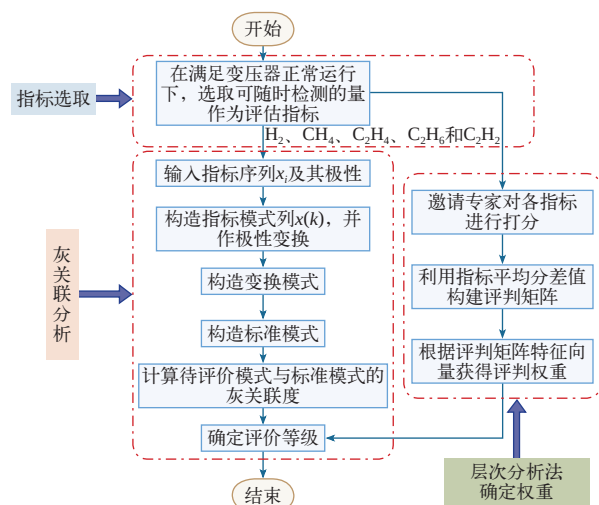


图2 综合评估流程图

## 4 实例分析

根据收集到的变压器DGA数据,使用非均权形式的灰关联模型进行分析。为了详细进行说明,本文仅随机选取了30个数据进行算例说明。

DGA测试数据集如表4所示。

由于DGA指标是属于极小值指标,根据式(3)可知,当指标序列中含有0时,所有非零的指标经过极性变换后都变成0,而所有零指标经过极性变换后都变成1。如此会降低灰关联模型的分辨能力,不利于判别状态。另一方面,根据变压器预试规程可知,如果变压器油中含气量很少,一般均认为是健康状态而无须使用三比值法等方法来对其进行故障诊断。这是由于试验存在误差,特别是在小数值情况下其误差的百分比可能更大。

因此,本文提出建立对比数据库的方法,将所有零数据和较小数值的数据排除,再将其他待

表4 气体含量数据表

| 序号 | 气体含量/( $\mu\text{L/L}$ ) |                 |                               |                               |                               |
|----|--------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|    | H <sub>2</sub>           | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
| 1  | 22.08                    | 23.83           | 24.44                         | 14.66                         | 0                             |
| 2  | 16.16                    | 9.72            | 4                             | 12.88                         | 0                             |
| 3  | 21.67                    | 27.28           | 70.85                         | 121.32                        | 0                             |
| 4  | 4.39                     | 3.44            | 0.53                          | 1.9                           | 0                             |
| 5  | 26.01                    | 2.82            | 2.4                           | 2                             | 0                             |
| 6  | 0                        | 0.51            | 0                             | 0.9                           | 0.39                          |
| 7  | 7.69                     | 5.56            | 8.75                          | 11.42                         | 0                             |
| 8  | 3.4                      | 23.79           | 8.23                          | 8.23                          | 0                             |
| 9  | 45.52                    | 21.74           | 10.82                         | 12.12                         | 14.24                         |
| 10 | 0                        | 1.12            | 0.64                          | 1.35                          | 0.26                          |
| 11 | 6.55                     | 5.4             | 2.9                           | 4.29                          | 0.1                           |
| 12 | 0                        | 8.38            | 5.77                          | 13.11                         | 0                             |
| 13 | 212.7                    | 256.97          | 87.4                          | 357.74                        | 21.34                         |
| 14 | 8.86                     | 7.41            | 12.03                         | 10.93                         | 0                             |
| 15 | 0                        | 1.71            | 0.98                          | 3.79                          | 0.45                          |
| 16 | 97.34                    | 87.43           | 34.67                         | 78.32                         | 54.34                         |
| 17 | 6.46                     | 4.7             | 2.11                          | 0.95                          | 0                             |
| 18 | 7.1                      | 5.15            | 1.4                           | 1.76                          | 0                             |
| 19 | 41.54                    | 67.23           | 23.69                         | 32.58                         | 1.37                          |
| 20 | 28.41                    | 32.83           | 33.47                         | 40.94                         | 2.57                          |
| 21 | 0                        | 0.57            | 0                             | 0.16                          | 0                             |
| 22 | 2.14                     | 1.22            | 1.8                           | 1.85                          | 0                             |
| 23 | 10.47                    | 0.7             | 0.54                          | 0.36                          | 0                             |
| 24 | 0                        | 0.85            | 1.37                          | 0.51                          | 0                             |
| 25 | 163.69                   | 438.68          | 123.22                        | 661.57                        | 12.36                         |
| 26 | 2.62                     | 8.55            | 7.04                          | 13.83                         | 0                             |
| 27 | 19.37                    | 2.08            | 45.72                         | 10.45                         | 1.08                          |
| 28 | 86.63                    | 87.93           | 86.45                         | 89.43                         | 0.25                          |
| 29 | 3.4                      | 23.79           | 8.23                          | 8.23                          | 0                             |
| 30 | 58.38                    | 27.46           | 12.21                         | 15.79                         | 21.74                         |

评估数据放入对比数据库。将较小数值的数据排除出对比数据库可以提高灰关联分析对故障严重程度分辨能力。而对较小数值的变压器均认为是处于第一健康等级,这也提高了对小数值试验数据误差的免疫能力。

根据变压器预试规程中对气体含量注意值的规定可知,C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>的注意值要比其他烃类气体和氢气的注意值小很多,因此C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>的小数据界限要低于其他气体1~2个数量级。根据表4的数据,具体建立对比数据库如表5所示。

表5 对比数据库

| 指标模式序列 (已按大小进行排序) |        |        |        |       |
|-------------------|--------|--------|--------|-------|
| X(1)              | X(2)   | X(3)   | X(4)   | X(5)  |
| 212.7             | 438.68 | 123.22 | 661.57 | 54.34 |
| 163.69            | 256.97 | 87.4   | 357.74 | 21.74 |
| 97.34             | 87.93  | 86.45  | 121.32 | 21.34 |
| 86.63             | 87.43  | 70.85  | 89.43  | 14.24 |
| 58.38             | 67.23  | 45.72  | 78.32  | 12.36 |
| 45.52             | 32.83  | 34.67  | 40.94  | 2.57  |
| 41.54             | 27.46  | 33.47  | 32.58  | 1.37  |
| 28.41             | 27.28  | 24.44  | 15.79  | 1.08  |
| 26.01             | 23.83  | 23.69  | 14.66  | 0.45  |
| 22.08             | 23.79  | 12.21  | 13.83  | 0.39  |
| 21.67             | 23.79  | 12.03  | 13.11  | 0.26  |
| 19.37             | 21.74  | 10.82  | 12.88  | 0.25  |
| 16.16             | 9.72   | —      | 12.12  | —     |
| 10.47             | —      | —      | 11.42  | —     |
| —                 | —      | —      | 10.93  | —     |
| —                 | —      | —      | 10.45  | —     |

可以看出,由于不计入零项数据和小数值数据,对比数据库中各指标序列并不具有一样的长度。建立好对比数据库后,再分别对各标本使用灰关联法进行评估。

首先对1<sup>#</sup>标本 $X_1=[22.08\ 23.83\ 24.44\ 14.66\ 0]$ 进行评估。将1<sup>#</sup>标本各指标与对比数据库中各指标模式序列一起形成评估样本集,并从样本集中选出标准模式 $X_0=[10.47\ 9.72\ 10.82\ 10.45\ 0]$ 。

对各指标序列进行极性变换后,使用邓氏关联公式计算1<sup>#</sup>标本与标准模式的灰关联系数,计算结果如表6所示。

表6 标本1计算结果

| 指标            | j       |         |         |         |   |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---|
|               | 1       | 2       | 3       | 4       | 5 |
| $x_i(j)$      | 0.464 2 | 0.407 9 | 0.442 7 | 0.712 8 | 1 |
| $\Delta_i(j)$ | 0.535 8 | 0.592 1 | 0.557 3 | 0.287 2 | 0 |
| $r_i(j)$      | 0.470 1 | 0.452 3 | 0.450 1 | 0.631 5 | 1 |

使用上文的权重系数 $k=[0.188\ 3\ 0.190\ 1\ 0.207\ 0\ 0.193\ 8\ 0.220\ 8]$ ,计算可得 $r_i=0.611\ 7$ 。同理,对2<sup>#</sup>~30<sup>#</sup>标本分别进行评估计算,结果如表7和图3所示。

根据评估结果的数据分布情况进行相应

表7 评估结果

| 序号 | 灰关联度    | 序号 | 灰关联度    | 序号 | 灰关联度    |
|----|---------|----|---------|----|---------|
| 1  | 0.611 7 | 11 | 1       | 21 | 1       |
| 2  | 0.866 2 | 12 | 0.943 4 | 22 | 1       |
| 3  | 0.533 3 | 13 | 0.336 8 | 23 | 1       |
| 4  | 1       | 14 | 0.946 7 | 24 | 1       |
| 5  | 0.895 1 | 15 | 0.895 8 | 25 | 0.334 8 |
| 6  | 0.907 5 | 16 | 0.359 2 | 26 | 0.935 7 |
| 7  | 0.971 5 | 17 | 1       | 27 | 0.643 9 |
| 8  | 0.895 9 | 18 | 1       | 28 | 0.494 6 |
| 9  | 0.593 7 | 19 | 0.401 8 | 29 | 0.895 9 |
| 10 | 0.984 2 | 20 | 0.397 7 | 30 | 0.505 4 |

的分级。一般而言可以取 $r_i \in (0.9, 1]$ 为第一级别(健康),这一级别内的样本多数指标均优于对比数据库中最优指标序列。取 $r_i \in (0.8, 0.9]$ 为第二级别(正常),这一级别内的样本多数指标均在较佳范围内。取 $r_i \in (0.6, 0.8]$ 为第三级别(缺陷),这一级别内的样本已出现部分指标偏离范围。取 $r_i \in (0.4, 0.6]$ 为第四级别(恶化),这一级别内的样本多数指标偏离范围。取 $r_i \in (0.3333, 0.4]$ 为第五级别(故障),这一级别内的样本指标均偏离范围较多,可认为已发生了较严重的故障。

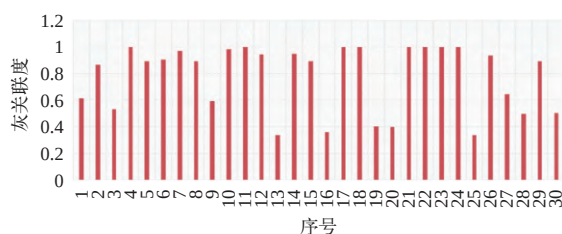


图3 样本评估结果分布图

使用三比值法和预试规程对原数据进行分析,认为高能量放电和高温过热是属于第五级别,低能量放电和中温过热属于第四级别,局部放电和低温过热属于第三级别,无故障则属于第一和第二级别,分析结果对比如表8和图4所示。其中,A指的是使用本文的评估方法所得的结果,B指的是使用传统三比值法所得的结果。可见本文所使用方法的评估结果与传统的三比值法相符合。由于本文的方法在等级划分的基础上还给出了量化的评价指标,且对于非故障变压器也给出了量化指标来区分其可靠性水平,因此更有利于指导运维人员进行相应的运维管理操作。

表8 评估结果对比表

| 序号 | A  | B     | 序号 | A  | B     |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1  | 缺陷 | 第三级别  | 16 | 故障 | 第五级别  |
| 2  | 正常 | 无故障级别 | 17 | 健康 | 无故障级别 |
| 3  | 恶化 | 第四级别  | 18 | 健康 | 无故障级别 |
| 4  | 健康 | 无故障级别 | 19 | 恶化 | 第四级别  |
| 5  | 正常 | 无故障级别 | 20 | 恶化 | 第四级别  |
| 6  | 健康 | 无故障级别 | 21 | 健康 | 无故障级别 |
| 7  | 健康 | 无故障级别 | 22 | 健康 | 无故障级别 |
| 8  | 正常 | 无故障级别 | 23 | 健康 | 无故障级别 |
| 9  | 恶化 | 第四级别  | 24 | 健康 | 无故障级别 |
| 10 | 健康 | 无故障级别 | 25 | 故障 | 第五级别  |
| 11 | 健康 | 无故障级别 | 26 | 健康 | 无故障级别 |
| 12 | 健康 | 无故障级别 | 27 | 缺陷 | 第三级别  |
| 13 | 故障 | 第五级别  | 28 | 恶化 | 第四级别  |
| 14 | 健康 | 无故障级别 | 29 | 正常 | 无故障级别 |
| 15 | 正常 | 无故障级别 | 30 | 恶化 | 第四级别  |

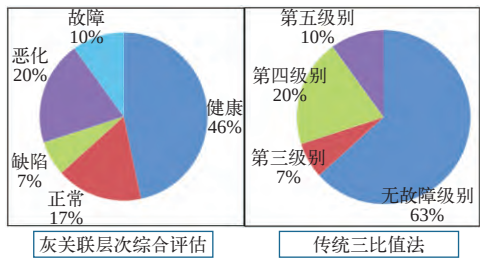


图4 评估结果统计对比

5 结束语

本文主要考虑使用检测量对变压器的健康状态进行反映评估，提出了使用灰关联理论和层次分析的综合方法来评估变压器当前的健康状态，主要有以下几点贡献：①介绍变压器的各类状态评判因素，选择油中气体含量作为评判指标；②建立起变压器的健康状态评估的灰关联分析模型，并使用层次分析法确定各评判指标的权重值；③使用实例详细展示了评估的具体过程和步骤，实例分析表明，所提出的综合评估方法能够较好地地区分变压器的各种不同健康状态，为变压器的状态评估提供了新的思路。

参考文献

[1] Lundgaard L E, Hansen W, Linhjell D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (1) : 230-239.

[2] Weekes T, Molinski T, Swift G. Transient transformer overload ratings and protection [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20 (2) : 32-35.

[3] Muthanna K T, Sarkar A, Das K, et al. Transformer insulation life assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (1) : 150-156.

[4] 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.

[5] 廖瑞金, 肖中男, 巩晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (2) : 322-328.

[6] 余文辉, 王沾, 曾祥君, 等. 基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (6) : 78-85.

[7] 吕干云, 程浩忠, 翟海保, 等. 基于改进灰色关联分析的变压器故障识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10) : 121-126.

[8] 熊浩, 孙才新, 张昀, 等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7) : 55-60.

[9] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[10] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18 (5) : 148-153.

[11] Q/CSG 114002—2011 电力设备预防性试验规程 [S].

[12] 张建文, 许允之. 电力变压器预防性试验有效性分析 [J]. 变压器, 1999 (6) : 27-31.

[13] 喇元, 王红斌, 陈忠东. 变压器状态检修技术的研究及应用 [J]. 变压器, 2013, 50 (8) .

[14] DL/T 722—2014 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

(收稿日期: 2015-07-26) EA