

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.008

基于灰色聚类与证据合成的变压器状态评估

苗 飞¹, 任建文², 汤国庆³, 魏俊姣²

(1. 徐州供电公司, 江苏 徐州 221005; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 包头供电局, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 针对变压器状态信息的不确定性,建立了变压器层次化状态评估模型,组建了变压器的状态指标体系,综合指标的主、客观权重设计了其最优权重。运用灰色聚类方法对单项指标作聚类分析以得到综合指标所处状态,改进了 D-S 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以评价变压器的整体状态。实例分析结果显示,文中建立的评估模型具有较高的识别准确率,可以有效地把握变压器的运行状态并为变压器实行状态检修提供良好的指导作用。

关键词: 变压器; 指标体系; 权重设计; 灰色聚类; 证据合成; 状态评估

Transformer State Assessment Based on Gray Clustering and Evidence Synthesis

MIAO Fei¹, REN Jianwen², TANG Guoqing³, WEI Junjiao²

(1. Xuzhou Power Supply Company, Jiangsu Xuzhou 221005, China; 2. North China Electric Power University, State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Hebei Baoding 071003, China;
3. Baotou Power Supply Bureau, Inner Mongolia Baotou 014030, China)

Abstract: A hierarchical model of transformer state assessment is built by taking uncertain information of transformer into consideration. A transformer state index system is established. The indexes can be given optimal weights by considering their subjective and objective weights. The gray clustering method is used to cluster every index to get the state of comprehensive indexes. The rules of conflict evidence synthesis in D-S evidence theory are improved, and the clustering coefficient is taken as a function of basic probability assignment for assessing the overall state of transformer. Practical example shows that the proposed model is simple, effective, and accurate, and it may be applied to condition-based maintenance of transformers.

Key words: transformer; index system; weight design; grey clustering; evidence synthesis; state assessment

0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一,其运行可靠性直接关系到电力系统的安全与稳定。对变压器实行状态检修可以提高其可靠性与维修效率,使检修工作更加科学化,准确评估变压器的运行状态是实施变压器状态检修的基础。2010 年国网公司有 95.5% 的 110 kV 及以上变压器完成了状态评价,所采用的方法主要是根据文[1]中对观测指标的劣化情况进行简单的扣分累加,进而确定设备所处

状态。该方法的应用推进了电力设备状态检修机制的实施,但对设备状态的评估不够准确而且自动化程度也不高。

变压器结构复杂,状态指标众多,而且状态信息存在不确定性,针对变压器的这些特点,研究者引入了众多评估算法,如模糊综合评判法^[2]、贝叶斯网络^[3]、支持向量机^[4]、灰色层次评估法^[5]、云理论^[6]、可拓分析法^[7]、证据理论^[8-9]等。这些方法在处理不准确数据和不完备信息方面取得了一定效果,但也存在不足之处,如模糊数学中隶属函数的确定缺乏完善的标准、训练样本不易获得影响了贝叶斯网络的应用范围、支持向量机依赖学习机的参数与核函数的确定、

收稿日期:2015-10-23; 修回日期:2015-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50837022)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50837022).

灰色模型的分辨系数难以确定、证据冲突时往往导致证据合成的结果与实际矛盾等。近年来电力设备故障诊断与状态评估方法在向综合智能技术方向发展,即将两种或两种以上智能方法相结合以弥补彼此的缺陷,如物元理论与证据理论的融合^[10]、模糊数学与证据推理^[11]、集对分析与证据理论^[12]等。

基于以上分析,文中组建了两层评估模型将灰色聚类与证据合成方法相结合,首先对单项指标作聚类处理以减少证据空间维数,然后在改进证据合成规则的基础上将聚类系数作为基本概率赋值函数来评估变压器的整体状态,最后通过实例分析验证了笔者所提方法的有效性。

1 指标选取及状态划分

变压器状态的确定是一个多指标决策问题,选取切实可行的观测指标并建立科学、全面的指标体系对准确判断变压器运行状态非常重要。参考《国网输变电设备状态检修试验规程》和《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》等标准建立的指标体系见图 1。

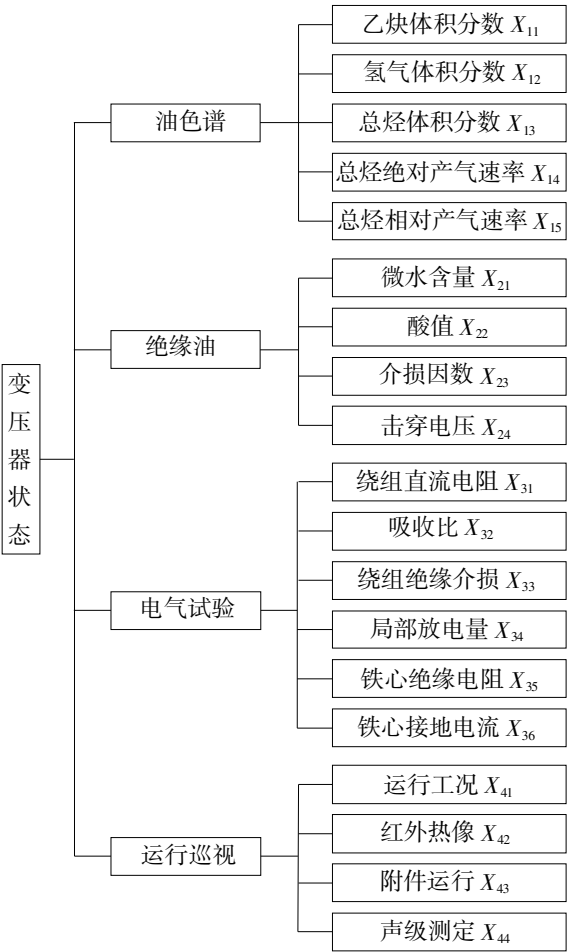


图 1 变压器状态评估指标体系

Fig. 1 Index system of transformer condition assessment

因为指标体系中既有定量指标又有定性指标而

且定量指标的量纲与数量级也不尽相同,不能直接用统一标准进行评估定级,所以文中采用相对劣化度的方式对指标做归一化处理。对于乙炔体积分数、介损因数等越小越优型数据按式(1)计算其相对劣化度;对于击穿电压、吸收比等越大越优型数据按式(2)处理;对于运行工况、红外热像等信息,文中将由凭经验给出相应的劣化度。关于 X_{j0} 、 X_{j1} 的取值,参考文[13-14]和设备的出厂试验数据与运行标准。

$$X_{ij} = \begin{cases} 0 & X_{ij} \leq X_{j0} \\ \frac{X_{ij} - X_{j0}}{X_{j1} - X_{j0}} & X_{j0} < X_{ij} \leq X_{j1} ; \\ 1 & X_{ij} > X_{j1} \end{cases} \quad (1)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 0 & X_{ij} \geq X_{j0} \\ \frac{X_{j0} - X_{ij}}{X_{j0} - X_{j1}} & X_{j1} \leq X_{ij} < X_{j0} 。 \\ 1 & X_{ij} < X_{j1} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $x_{ij}(i=1,2,\cdots,4;j=1,2,\cdots,6)$ 为指标的相对劣化度,取值范围为 $[0,1]$; X_{ij} 是指标的观测值; X_{j0} 表示指标的理想值或出厂值; X_{j1} 代表指标的注意值或警示值。

变压器状态一般可划分为 4 级或 5 级,文[15]中将变压器划分为优良、良好、注意、异常以及严重这五个状态。相对劣化度取值范围与状态描述、检修策略的关系见表 1。

表 1 状态划分
Table 1 State divided

相对劣化度	状态描述	检修策略
0.0~0.2	H ₁ 优良	延期检修
0.2~0.4	H ₂ 良好	计划检修
0.4~0.6	H ₃ 注意	优先检修
0.6~0.8	H ₄ 异常	尽快检修
0.8~1.0	H ₅ 严重	立即检修

2 指标权重设计

在多指标综合评价问题中,科学地设定指标权重是获得准确评价结果的关键。根据设置权重时原始信息来源的不同,目前可将赋权方法分为两类^[16]:一类是根据专家提供的指标相对重要性来设计权重的主观赋权法,包括德尔菲法、AHP、未确知有理数法等;另一类是根据实际样本数据的统计特征确定指标权重的客观赋权法,如主成分分析法、灰色关联度分析法、熵权法等。主、客观权重没有绝对的优劣之分,有效地集成二者将能获得更加合理的指标权重。设有 p 类主观赋权法和 q 类客观赋权法,则指标最优权重为

$$\omega = \frac{\alpha \sum_{i=1}^p \omega_i + \beta \sum_{j=1}^q \omega_j}{\alpha p + \beta q} \quad (3)$$

式(3)中, α 和 β 分别表示主、客观权重的相对重要程度。

文中采用 AHP 与熵权法共同赋予变压器单项指标权重, 即 $\omega_{ij} = \alpha \omega_{ij}' + \beta \omega_{ij}''$, 而综合指标权重将通过 3.2.2 节介绍的证据源可信度来获得。层次分析法首先对指标重要性进行两两比较以构造判断矩阵, 然后通过求取矩阵的最大特征值对应的特征向量来计算指标权重, 为获得合理的指标权重还要对判断矩阵进行一致性验证。建立单项指标判断矩阵并用 MATLAB 对其求解, 得到的主客观权重见表 2。假设对某一指标采集了 $m(k=1, 2, \dots, m)$ 组数据, 则指标的熵值根据式(5)计算, 指标的熵权则由式(6)获取。

表 2 基于 AHP 的指标权重
Table 2 Index weights based on AHP

参数	单项指标的主客观权重
油色谱	{0.206 3, 0.368 8, 0.206 3, 0.109 3, 0.109 3}
绝缘油	{0.350 9, 0.189 1, 0.109 1, 0.350 9}
电气试验	{0.327 3, 0.188 3, 0.098 7, 0.098 7, 0.098 3}
运行巡检	{0.423 5, 0.227 1, 0.122 3, 0.227 1}

$$p_{ij}^k = \frac{x_{ij}^k}{\sum_{k=1}^m x_{ij}^k}; \quad (4)$$

$$h_{ij} = \frac{1}{\ln(m)} \sum_{k=1}^m (p_{ij}^k \ln p_{ij}^k); \quad (5)$$

$$\omega_{ij}'' = \frac{1 - h_{ij}}{n - \sum_{j=1}^n h_{ij}} \quad (6)$$

3 变压器状态评估模型

应用灰色聚类评估模型对变压器单项指标作聚类处理以得到综合指标所处状态, 然后把综合指标的聚类系数作为变压器综合状态的证据源并利用改进的证据合成规则对其进行信息融合以得到变压器的整体状态, 评估架构见图 2。

3.1 单项指标的灰色聚类

变压器状态信息存在不完全、不准确等问题, 而灰色理论是处理不确定信息的有效工具。灰色聚类就是根据灰色关联矩阵或灰数的白化权函数将观测指标或考察对象划分成若干个可定义类别的方法^[17]。文中采用基于三角白化权函数的聚类方法对单项指标作聚类分析, 步骤如下。

1) 首先基于表 1 的状态划分确定 5 个灰类, $s=$

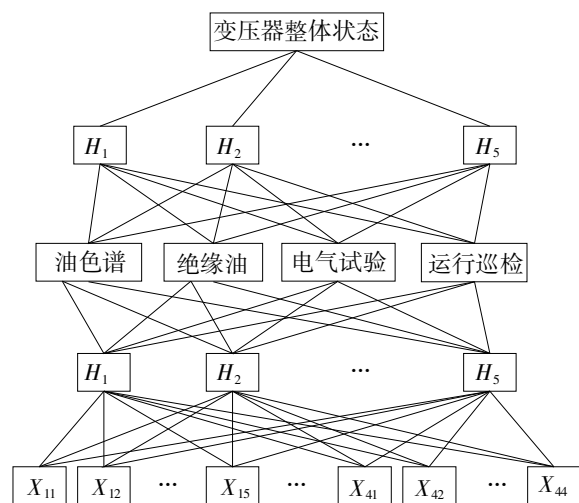


图 2 变压器状态评估的基本架构

Fig. 2 The basic structure of transformer condition assessment

$\{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\}$ 和单项指标相对劣化度 x_{ij} 的 5 个取值区间 $[0, 0.2]$ 、 $[0.2, 0.4]$ 、 $[0.4, 0.6]$ 、 $[0.6, 0.8]$ 、 $[0.8, 1.0]$;

2) 其次确定单项指标的 5 个灰类的白化权函数

$$f_i^t(x_{ij})(t=1, \dots, 5)$$

$$\begin{cases} f_i^1(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_{ij} < 0.1 \\ 1.5 - 5x_{ij} & 0.1 \leq x_{ij} < 0.3 \end{cases} \\ f_i^2(x_{ij}) = \begin{cases} 5x_{ij} - 0.5 & 0.1 \leq x_{ij} < 0.3 \\ 2.5 - 5x_{ij} & 0.3 \leq x_{ij} < 0.5 \end{cases} \\ f_i^3(x_{ij}) = \begin{cases} 5x_{ij} - 1.5 & 0.3 \leq x_{ij} < 0.5 \\ 3.5 - 5x_{ij} & 0.5 \leq x_{ij} < 0.7 \end{cases} \\ f_i^4(x_{ij}) = \begin{cases} 5x_{ij} - 2.5 & 0.5 \leq x_{ij} < 0.7 \\ 4.5 - 5x_{ij} & 0.7 \leq x_{ij} < 0.9 \end{cases} \\ f_i^5(x_{ij}) = \begin{cases} 5x_{ij} - 3.5 & 0.7 \leq x_{ij} < 0.9 \\ 1 & 0.9 \leq x_{ij} \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

3) 然后基于式(7), 由式(8)计算出综合指标的聚类系数 θ_i^t

$$\theta_i^t = \sum_{j=1}^6 \omega_{ij} f_i^t(x_{ij}) \quad (8)$$

从而得到聚类系数矩阵

$$\Sigma = (\theta_i^t) = \begin{bmatrix} \theta_1^1 & \theta_1^2 & \dots & \theta_1^5 \\ \theta_2^1 & \theta_2^2 & \dots & \theta_2^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_4^1 & \theta_4^2 & \dots & \theta_4^5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

4) 最后根据 $\max\{\theta_i^t\} = \theta_i^{t^*}$, 判断综合指标属于灰类 t^* 。

3.2 综合指标的证据合成

3.2.1 D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种不确定性推理方法, 能处理随机性与模糊性所导致的不确定性问题; 另外, 证据理论易于同其他一些方法相结合, 使得它具有广阔的使用范围和应用前景, 目前 D-S 证据理论已经在目标识别、军事指挥等领域发挥了重要作用^[18-19]。

在证据理论中, 首先定义一个识别框架 Θ , 它是

由一些互斥且可穷举的元素构成的集合。如果集函数 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 满足: $m(\phi)=0$; $\sum m(A)=1$ 则称 m 为基本概率赋值函数, 表示对 A 的精确信任程度; 另外, Θ 上信度函数与似然函数的定义分别见式(10)、(11), $Bel(A)$ 表示对 A 为真的信任程度, $Pl(A)$ 表示对 A 为非假的信任程度。

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B); \quad (10)$$

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}). \quad (11)$$

若 $A \subseteq \Theta$ 且 $m(A) > 0$, 则称 A 为焦元。设识别框架 Θ 上的两个证据 E_1 和 E_2 的基本概率赋值函数分别为 m_1 和 m_2 , 如果 $K < 1$, 则 D-S 证据合成规则为

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1-K} & A \neq \emptyset \\ 0 & A = \emptyset \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j). \quad (13)$$

式(13)表示证据之间的冲突信息, 系数 $1/(1-K)$ 称为归一化因子。

3.2.2 证据合成规则的改进

D-S 证据理论在实际应用中有时候并不理想, 甚至会出现与直觉相违背的结果, 产生这种情况的原因主要是由于证据间存在冲突。针对冲突信息的处理, 许多学者进行了研究, 并提出了一些解决方案, 一致认为冲突信息应该得到重新分配。

引入证据距离的概念, 见式(14), 其反应两个证据之间的差距。设 $coh(S_i, S_j)$ 为证据 S_i, S_j 之间的一致性程度, 设 $sup(S_i)$ 表示一个证据 S_i 被其他所有证据支持的程度, 由此定义单个证据源的可信度 $cre(S_i)$, 见式(17)。基于冲突信息可以完全利用的思想, 即证据源总体可信度为 1, 认为冲突信息可以全部分配给证据的焦元, 并且冲突信息的分配取决于单个证据的最优权重; 另外, 若焦元只含单个元素, 则不存在交叉融合, 这时证据合成的改进规则为式(18)。

$$d(S_i, S_j) = \sqrt{\frac{1}{2} (\|S_i\|^2 + \|S_j\|^2 - 2 \langle S_i, S_j \rangle)}; \quad (14)$$

$$coh(S_i, S_j) = 1 - d(S_i, S_j); \quad (15)$$

$$sup(S_i) = \sum_{i=1, j \neq i}^M coh(S_i, S_j); \quad (16)$$

$$cre(S_i) = \frac{sup(S_i)}{\sum_{i=1}^M sup(S_i)}; \quad (17)$$

$$m(A) = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cdots = A} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(C_k) \cdots +$$

$$K \sum_{i=1}^M [m_i(A) cre(S_i)]. \quad (18)$$

3.2.3 证据合成的步骤

将综合指标的聚类系数作为变压器整体状态评估的证据源, 根据改进后的证据合成规则进行信息融合, 具体步骤如下:

- 1) 基于表 1 的状态划分建立识别框架 $\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\}$;
- 2) 将聚类系数作为基本概率赋值函数 $m_i(H_j) = \theta_j^i$;
- 3) 由式(14)–(17)计算单个证据源的可信度 $cre(S_i)$;
- 4) 由式(18)计算 $m(H_i)$, 根据 $\max\{m(H_1), m(H_2), m(H_3), m(H_4), m(H_5)\}$ 的取值给出变压器评估决策。

4 实例分析

4.1 实例 1

某台型号为 SFPSZ10-180000/220 的电力变压器 2009 年 1 月投运, 状态指标的初始值、警示值和该变压器的两次试验数据见表 3。

表 3 指标的注意值与试验数据

Table 3 Warning value and test data of index

单项指标	X_{j0}	X_{j1}	试验 1	试验 2
乙炔体积分数/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	5	0	0
氢气体积分数/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.00	150.00	54.51	64.83
总烃体积分数/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.50	150.00	22.31	31.37
总烃绝对产气速率/($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.00	12.00	1.12	1.26
总烃相对产气速率/($\% \cdot \text{月}^{-1}$)	0.00	10.00	5.83	3.69
油中微水含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	8.3	25.0	19.4	9.8
酸值/($\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.019	0.100	0.008	0.020
油介损因数/%	0.080	4.000	0.085	0.033
油击穿电压/kV	50	35	48	39
直流电阻不平衡率/%	0.00	2.00	0.48	0.65
吸收比	1.50	1.30	1.34	1.32
绕组绝缘介损/%	0.18	0.80	0.22	0.29
局部放电量/pC	85	300	132	144
铁心绝缘电阻/M Ω	10 000	100	5 000	3 000
铁心接地电流/mA	5	100	17	21

该变压器无不良工况记录, 红外热像发现套管柱头发热, 分接开关外有油迹, 变压器声级正常。由此可得指标的劣化度: $x_1 = [0, 0.420 \ 6, 0.206 \ 5, 0.105 \ 0, 0.369 \ 0]$, $x_2 = [0.089 \ 8, 0.012 \ 3, 0.0733 \ 3]$, $x_3 = [0.325 \ 0, 0.900 \ 0, 0.177 \ 4, 0.274 \ 4, 0.707 \ 1, 0.168 \ 4]$, $x_4 = [0, 0.750 \ 0, 0.650 \ 0, 0]$ 。赋予单项指标主客观同等程度的重要性, 即 $\alpha = \beta = 0.5$, 求得单项指标的最优权重向量为: $\omega_1 = [0.103 \ 2, 0.225 \ 6, 0.261 \ 2, 0.074 \ 5, 0.335 \ 5]$, $\omega_2 = [0.283 \ 0, 0.280 \ 0, 0.250 \ 9, 0.186 \ 1]$, $\omega_3 = [0.260 \ 3, 0.094 \ 5, 0.129 \ 5, 0.057 \ 0, 0.317 \ 4, 0.141 \ 3]$ 。根据式(8)计算得到的聚类系数矩阵为

$$\sum_{i=1}^n (\theta_i) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.297 & 9 & 0.450 & 3 & 0.251 & 8 & 0 & 0 \\ 0.813 & 9 & 0 & 0 & 0.155 & 1 & 0.031 & 0 \\ 0.179 & 7 & 0.379 & 5 & 0.032 & 6 & 0.306 & 1 & 0.105 & 7 \\ 0.650 & 6 & 0 & 0.030 & 5 & 0.262 & 1 & 0.056 & 8 \end{bmatrix}。$$

由此判断变压器综合指标所处状态分别为良好、优良、良好、优良。

由式(13)~(17)计算得到: $K=0.971\ 653$; $cre(S_i)=[0.236\ 8, 0.249\ 4, 0.242\ 0, 0.271\ 8]$ 。最后由式(18)计算得到变压器与各个状态等级间的关联度为 $[0.508\ 2, 0.192\ 0, 0.073\ 7, 0.178\ 8, 0.047\ 3]$,由此可判断变压器整体处于优良状态,可适当延迟计划检修的时间。

4.2 实例2

某台型号为 SFPZ-360000/220 的电力变压器,其油色谱试验与例行试验数据见表 4~6。

表 4 油色谱试验数据

Table 4 The data of oil chromatographic

日期	$X_{11}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	$X_{12}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$X_{13}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	$X_{14}/(\text{mL}\cdot\text{d}^{-1})$	$X_{15}/(\%\cdot\text{月}^{-1})$
2011-05-12	0.72	25.79	150.83	10.82	18
2011-05-22	0.79	26.99	162.84	32.68	27

表 5 绝缘油例行试验数据

Table 5 The data of oil test

日期	$X_{21}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$X_{22}/(\text{mgKOH}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_{23}/\%$	X_{24}/kV
2010 例行	12.0	0.06	2.41	38
2011 例行	16.7	0.08	3.11	37

表 6 电气试验数据

Table 6 The data of electrical test

日期	$X_{31}/\%$	X_{32}	$X_{33}/\%$	X_{34}/pC	$X_{35}/\text{M}\Omega$	X_{36}/mA
2010 例行	0.57	1.51	0.46	195	230	45
2011 例行	0.80	1.55	0.77	202	200	39

计算得到的指标最优权重见表 7。

表 7 指标最优权重

Table 7 The optimal weight of indicators

参数	单项指标的最优权重
油色谱	{0.107 0, 0.185 3, 0.105 4, 0.482 3, 0.120 0}
绝缘油	{0.386 3, 0.255 4, 0.181 7, 0.176 6}
电气试验	{0.300 9, 0.095 5, 0.361 6, 0.050 7, 0.072 9, 0.118 4}
运行巡检	{0.423 5, 0.227 1, 0.122 3, 0.227 1}

计算得到聚类系数矩阵如下:

$$\sum_{i=1}^n (\theta_i) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.187 & 2 & 0.105 & 1 & 0 & 0 & 0.707 & 7 \\ 0.251 & 1 & 0.135 & 2 & 0.088 & 3 & 0.504 & 1 & 0.021 & 3 \\ 0.006 & 8 & 0.323 & 2 & 0.221 & 7 & 0.013 & 8 & 0.434 & 5 \\ 0.317 & 6 & 0.276 & 2 & 0.227 & 1 & 0.148 & 5 & 0.030 & 6 \end{bmatrix}。$$

从而获得变压器整体状态信息为 $[0.188\ 8, 0.217\ 2, 0.140\ 7, 0.162\ 4, 0.290\ 9]$,因此可判断变压器处于严重状态,应立即安排检修。对该变压器吊罩检修,诊断出的故障类型为固态绝缘老化。

4.3 应用效果分析

为评价模型的有效性,文中收集了 362 组电力变压器的试验与运行数据,并结合设备在采样之后一个检修周期内的实际运行情况给出其明确状态。采用文中模型测试的结果见表 8。

表 8 样本测试结果

Table 8 The test results of samples

状态类型	样本个数	识别结果对应的状态类型					识别正确率/%
		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	
H_1	53	52	1	0	0	0	98.11
H_2	109	2	106	1	0	0	97.25
H_3	96	0	2	94	0	0	97.92
H_4	87	0	1	3	82	1	91.95
H_5	17	0	0	0	0	17	100.00

为了更好地验证所提方法的优越性,将其与文[5]的灰色聚类 and 文[8]的证据理论的应用效果进行比较,对比结果见表 9。验证结果显示,基于灰色聚类与证据合成的变压器状态评估方法有着更高的识别准确率,文中研究具有重要的理论与实践意义。

表 9 识别结果统计

Table 9 The statistical results of condition assessment

评估方法	样本个数	识别结果	识别准确率/%
灰色聚类	362	329/362	90.88
证据理论	362	337/362	93.09
灰色聚类与证据合成	362	351/362	96.96

5 结语

为促使变压器检修策略科学化,避免因变压器的突发事故造成电网大面积停电、发电厂非计划停机,对变压器状态评估方法做了深入研究。首次将灰色聚类方法与证据合成方法相结合,运用灰色聚类模型分析了变压器综合指标的状态,把聚类系数作为基本概率赋值函数,利用改进的证据合成规则得到变压器的整体状态,为变压器状态评估提供了一种新方法。实例验证了文中评估模型的有效性与先进性,所提方法可用于指导变压器实行状态检修。

参考文献:

- [1] Q/GDW 169—2008 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- Q/GDW 169—2008 Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors) [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

- [2] 郭坚铮. 电力变压器状态诊断方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
GUO Jianzheng. Study of the diagnosis method for the power transformer condition [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [3] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1032-1039.
ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by bayes networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1032-1039.
- [4] 朱永利, 申涛, 李强. 基于支持向量机和 DGA 的变压器状态评估方法[J]. 电力科学与工程, 2008, 20(6): 111-115.
ZHU Yongli, SHEN Tao, LI Qiang. Power transformer condition evaluation based on support vector machine and DGA[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 20(6): 111-115.
- [5] 刘从法, 罗日成, 雷春燕, 等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 104-107.
LIU Congfa, LUO Richeng, LEI Chunyan, et al. Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 104-107.
- [6] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [7] 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.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [8] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [9] LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, 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.
- [10] 梁永亮, 李可军, 牛林, 等. 变压器状态评估多层次不确定模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 73-78.
LIANG Yongliang, LI Kejun, NIU Lin, et al. A multilayer uncertain transformer condition assessment model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 73-78.
- [11] 雷兴列, 盛戈皞, 严英杰, 等. 基于组合赋权与 D-S 证据理论的变压器状态评估[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2023-2027.
LEI Xinglie, SHENG Gehao, YAN Yingjie, et al. Condition evaluation of transformer based on combined weight and D-S evidence theory[J]. East China Electric Power, 2013, 41(10): 2023-2027.
- [12] 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. Assessment strategy for inner insulation condition of power transformer based on set-pair analysis and evidential reasoning decision-making [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 474-481.
- [13] DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
DL/T 596—1996 Preventive test code for electric power equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [14] Q/GDW 168—2008 国网输变电设备状态检修试验规程[S]. 北京: 中电力出版社, 2008.
Q/GDW 168—2008 Regulations of condition-based maintenance test for electric equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [15] 骆思佳, 黄文武, 冯杰. 电力变压器状态多层次评估模式的研究[J]. 变压器, 2013, 50(3): 32-36.
LUO Sijia, HUANG Wenwu, FENG Jie. Research on multi-layer condition assessment mode for power transformer [J]. Transformer, 2013, 50(3): 32-36.
- [16] 何强. 群组评价中指标最优权重设计[J]. 统计研究, 2011, 28(8): 99-102.
HE Qiang. Optimal weighting design of indications in group evaluation[J]. Statistical Research, 2011, 28(8): 99-102.
- [17] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 开封: 河南大学出版社, 2013.
LIU Sifeng, GUO Tianbang. Grey system theory and its applications[M]. Kaifeng: Henan University Press, 2013.
- [18] 廖燕子, 方键, 马小平, 等. D-S 证据理论融合技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
LIAO Yanzi, FANG Jian, MA Xiaoping, et al. D-S evidence theory of fusion technology and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [19] 程文清, 李新叶. 基于改进理想点解法的电力变压器状态综合评估[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 120-123.
CHENG Wenqing, LI Xinye. Integrated condition assessment of power transformer based on improved TOPSIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 120-123.

苗飞(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测与故障诊断技术。

任建文(1961—), 男, 教授, 博士, 从事电网调度运行与控制、变电站综合自动化技术的教学和研究工作。