

基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价

吴奕¹, 朱海兵¹, 周志成², 李晓健³, 熊浩¹, 杨志超³, 崔玉¹

(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;
3. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心(南京工程学院), 江苏 南京 211167)

摘要: 针对变压器状态评价中各指标的不确定性、模糊性以及变压器在线监测状态量信息过多的问题, 提出一种基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评估新方法。引用信息熵反映数据本身的效用值来计算指标的权重系数, 建立了基于熵权模糊物元模型。并采用主元分析法提取了信息数据中的主成分, 有效解决了权重分配困难和在线监测状态量过多的问题。最后结合实例分析, 验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 变压器; 熵权; 模糊物元模型; 主元分析; 状态评估

Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis

WU Yi¹, ZHU Haibing¹, ZHOU Zhicheng², LI Xiaojian³, XIONG Hao¹, YANG Zhichao³, CUI Yu¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Smart Distribution Network, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Aiming at the problem of the transformer condition assessment of each index in the uncertainty, fuzziness and too many transformer on-line monitoring state information, this paper puts forward a new method of transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis. Citing the information entropy which reflects value of the data itself to compute the weight coefficient of index, setting up the model of entropy fuzzy matter-element, and employing principal component analysis method to extract the main components in the information data which effectively solves the difficulty of weight allocation and on-line monitoring state quantity too much. Finally, combined with examples, the validity and practicability of the method is verified.

Key words: transformer; entropy; fuzzy matter-element model; principal component analysis; condition assessment

中图分类号: TH 133, TM411

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)17-0001-07

0 引言

变压器是电力系统中非常重要的设备, 其运行可靠性对电网安全稳定运行起着决定性的作用。准确地对变压器运行状态做出评价, 为电力公司提供变压器的健康状态信息, 对指导实施变压器状态维修和提高设备的可靠性具有重要意义。

变压器是一个多元复杂体系, 其运行状态的影响因素非常多, 各因素的影响规律也各不相同, 而

且其中一些影响指标本身又难以定量描述, 这使得变压器状态评价呈现不确定性和模糊性。在对变压器运行状态进行综合评价时, 由于评价标准不是量化标准, 评价范围、评价指标以及评价范围的选择等都具有模糊性, 这使其综合评价模型难以构建。而采用单项指标进行状态标评价往往会因为遗漏一些有用的信息, 而影响评价的准确性。

针对上述一系列问题, 国内外学者提出了模糊综合评判法^[1-2]、神经网络评价法^[3-4]、灰色关联分析法^[5]、证据理论^[6-7]、基于专家系统的评估方法^[8]等多种评价方法, 这些方法各有其自身特点, 并在实践中取得了较好的应用效果, 但是尚存在不足之处。其中神经网络评价法依赖大量的样本数据, 评

基金项目: 江苏省电力公司 2015 年科技项目支持 (J2015005); 江苏省电力公司电力科学研究院 2015 年科技项目支持 (J2015026)

价模型具有隐含性,难以对评价结果进行因果分析;灰色关联分析方法要求样本数据有时间序列特性,如何确定分辨率系数目前也没有成熟的方法;证据理论评价在证据体间有冲突时,易造成合成公式失效;基于专家系统的评价方法由于专家的主观性很难做到客观的评价。

物元理论是由我国学者蔡文等人^[9]于1983年提出,它把人们解决问题的过程进行形式化,从而建立相应的物元模型。物元分析可以从定性和定量两个角度解决多指标不相容的问题,因此它适用于多指标的综合评价问题,近年来在设备状态综合评价方面得到了广泛的应用,并取得了较好的效果^[10]。但是,现有文献采用物元理论进行变压器状态评价时,没有考虑变压器在线监测状态量指标过多的问题,如果对每种状态量都进行评价,往往导致评价效率较低;另外,多利用专家打分的办法来确定评价指标的权重,受专家经验影响较大。

本文为使变压器状态评价更加客观、全面,采用物元分析理论将变压器多元不相关的指标信息进行融合,并将熵权法引入到权重计算中,同时考虑到变压器在线监测状态信息量大以及部分信息不完整的问题,采用主元分析法提取主要成分,用主要的成分代替所有的成分,有效解决了权重分配困难和在线监测量过多与不完整的问题,最后通过实例分析验证了所提方法的有效性和实用性。

1 变压器状态评估指标体系的建立

由于变压器状态指标信息众多,如何从众多的信息中选择有用的信息尤为重要。我国《电力设备预防性试验规程》明确规定指标的选取要综合考虑变压器的油中溶解气体分析数据、绝缘油试验数据、电气试验数据、历史资料数据。因此,本文根据国标规定和国内外现有研究成果,建立了变压器状态评价指标体系,如表1所示。

表1指标体系中,油中溶解气体的成分和含量在一定程度上反映出变压器绝缘老化和故障程度,根据油中气体的组成和含量,可以判断变压器故障性质及严重程度,从而评估变压器的健康状况。

变压器绝缘油对变压器的运行和使用寿命影响极大,绝缘油的品质将直接影响变压器的电气性能、老化速率、温升及散热。

变压器的电气试验可以有效考察变压器的绝缘性能,反映分接开关及导线接头不良等故障,同时它也是判断各相绕组直流电阻是否平衡的有效手段。

变压器的检修历史可以辅助判断变压器的整体状态,显然对于不同的检修历史的设备,即使某项

结果为同一数值,该数值所代表的设备状态信息也是不同的。

IEC把变压器随时间变化的曲线描述为“浴盆曲线”,曲线两边高,中间低而平缓,所以运行年份是关系变压器状态和剩余寿命的一个重要因素。

表1 状态评价指标体系

数据类别	数据指标
油中溶解气体分析数据	CO
	CO ₂
	H ₂
	CH ₄
	C ₂ H ₂
	C ₂ H ₄
绝缘油试验数据	C ₂ H ₆
	油中水分
	油介损
	油击穿电压
电气试验数据	油中糠醛
	绕组直流电阻不平衡系数
	吸收比
	极化指数
	绕组泄漏电流变化
	电容型套管介损
历史资料数据	绕组介损
	运行及检修历史分析
	运行年限分析

2 基于熵权模糊物元评估模型的构建

2.1 模糊物元构建

模糊物元定义以事物 N 为对象, c 为特征, N 关于 c 所取的量值 v 构成的有序三元组 $R = (N, c, v)$ 称为一维物元,其中 c 和 v 构成的二元组 $M = (c, v)$ 表示事物 N 的特征,若事物 N 有 n 个特征 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 及相应的量值 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则其构成的阵列式(1)称为 n 维物元^[11]。

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

根据该定义,本文建立四个模糊物元,分别是油中溶解气体物元 R_1 , 绝缘油试验物元 R_2 , 电气试验物元 R_3 , 历史资料物元 R_4 。对应表1可知 R_1 对应 CO、CO₂、H₂、CH₄、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆ 这7个特征; R_2 对应油中水分、油介损、油击穿电压和油中糠醛这4个特征; R_3 对应绕组直流电阻不平衡系数、吸收比、极化指数、绕组泄漏电流变化、电容型套管介损和绕组介损这6个特征; R_4 对应运行

及检修历史分析和运行年限分析这两个特征。

2.2 物元数据模糊化处理

由于采集到的变压器状态量数据量纲不同,所以这些数据不能同时使用,需进行模糊化处理。对于越小越优型指标,如油中含水量,采用式(2)进行模糊化处理。

$$\mu_j = \frac{X_1 - X_j}{X_1 - X_0} \quad (2)$$

对于越大越优型指标,如极化指数,采用式(3)进行模糊化处理。

$$\mu_j = \frac{X_j - X_1}{X_1 - X_0} \quad (3)$$

式中: X_j 为指标 j 的实测值; μ_j 为模糊化处理后的数值; X_1 为该指标的上限值; X_0 为该指标的下限值, X_1 和 X_0 可根据《电力设备预防性试验规程》和《电力变压器运行规程》确定。

把变压器状态量指标分成越大越优型和越小越优型,本文越大越优型指标只有极化指数,其余均是越小越优型,相应地把上述指标按照式(2)或式(3)进行模糊化处理,即可得到模糊物元 R_μ :

$$R_\mu = \begin{bmatrix} N & c_1 & \mu_1 \\ & c_2 & \mu_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \mu_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 指标权重的确定

熵权法是根据各指标的变异程度,利用信息熵计算各指标的熵权,再通过熵权对各指标的权重进行修正,从而得出较为客观的权重。如果某个指标的熵值越小,说明该指标提供的信息量越多,在综合评价指标中该指标起的作用越大,其权重越大;反之,如果某个指标的熵值越大,在综合评价指标中该指标起的作用越小,其权重越小。

设变压器状态量数据有 m 次测量结果, n 个评估指标,其构成数据矩阵 X_{ij} 。

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, x_{ij} ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$) 为经过模糊化处理后的变压器状态量指标数据。

第 j 个指标的熵为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中: $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m f_{ij}$; $k=1/\ln m$ 。当 $f_{ij}=0$ 时, $\ln f_{ij}$

接近负无穷,此时令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

计算完第 j 个指标的熵之后,可以得到第 j 个指标的熵权 W_j ,即

$$W_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (7)$$

式中, $0 \leq W_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ 。

2.4 评估指标的合成及状态的评定

经典数学中,用特征函数描述论域中的元素是否具有某种性质,特征函数只取 0 和 1;在模糊数学中,用隶属函数表征论域中元素具有某种性质的程度,其值域为 $[0,1]$ 的实值函数;物元的概念为事物的分类和模式识别提出了一个新的途径,结合可拓集合的基本思想,建立关联函数的概念,来表示事物具有某种性质的程度,其取值范围是整个实数轴,关联函数以正域、负域、零界反映一个对象所处的状态,使得根据事物关于特征的量值判断事物属于某集合的程度更加全面和精细化。

关联度定义 U 为论域, K 为 U 到实域 I 的一个映射,则称式(8)为论域 U 上的一个可拓集合,其中 $y=K(u)$ 为 \tilde{A} 的关联函数, $K(u)$ 为 u 关于 \tilde{A} 的关联度^[12]。

$$\tilde{A} = \{(u, y) | u \in U, y = K(u) \in (-\infty, +\infty)\} \quad (8)$$

给定实域上的两个数值区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $X = \langle c, d \rangle$, 且 $X_0 \subset X$, 则称式(9)为点 x 关于区间 X_0 和 X 组成的区间套的位置^[12]。

$$D = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0) & \rho(x, X) \neq \rho(x, X_0) \\ & \text{且 } x \notin X_0 \\ \rho(x, X) - \rho(x, X_0) + a - b & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\rho(x, X_0)$ 表示实轴上任意一点 x 与实轴上任一有限区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 的距离,计算公式为

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (10)$$

给定区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $x_0 \in \left[a, \frac{a+b}{2} \right)$, 称式(11)

为 x 与区间 X_0 关于 x_0 的左侧距^[12]。

$$\rho_1(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a - x, & x \leq a \\ \frac{b - x_0}{a - x_0} (x - a), & x \in \langle a, x_0 \rangle \\ x - b, & x \geq x_0 \end{cases} \quad (11)$$

给定区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $x_0 \in \left(\frac{a+b}{2}, b \right]$, 称式(12)

为 x 与区间 X_0 关于 x_0 的右侧距^[12]。

$$\rho_r(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a-x, & x \leq x_0 \\ \frac{a-x_0}{b-x_0}(b-x), & x \in \langle x_0, b \rangle \\ x-b, & x \geq b \end{cases} \quad (12)$$

给定区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $X = \langle c, d \rangle$, $x_0 = \langle a, b \rangle$, 且 $X_0 \subset X$, 称式(13)为最优点在 x_0 处达到时的初等关联函数, 此关联函数在 $x = x_0$ 时达到最大值^[12]。

$$K(x) = \begin{cases} \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{D(x, X_0, X)}, & \text{其他} \\ \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{D(x, X_0, X)} - 1, & \rho(x, X) = \rho(x, X_0) \\ & \text{且 } x \notin X_0 \end{cases} \quad (13)$$

2.5 状态的判定

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \omega_i \quad (14)$$

称 K 为关联函数值, 其中 K_i 为指标 i 的关联函数, ω_i 为指标 i 所对应的权重。

把计算出来的 K 值与表 2 对比^[13-14], 得出变压器的状态等级。

表 2 关联函数与状态等级的关系及语义描述

Table 2 Relationship of correlation functions and state level and semantic description

关联函数值	状态等级	语义描述
(0.5,1]	正常状态	状态量处于正常的量变范围内, 可正常运行
(0,0.5]	注意状态	状态量由量变向质变发展, 仍可继续运行, 但应加强监视
(-1,0]	异常状态	故障已很可能存在, 应密切监视并适时安排检修
≤ -1	严重状态	故障已存在, 应尽快安排检修

3 主元分析法

3.1 主元分析的原理

考虑到变压器运行年限较长, 状态量过多, 可能会给计算速度和精度带来很大影响, 本文采用主元分析方法对变压器的状态量数据进行处理, 根据处理后的数据采用熵权模糊物元方法对变压器进行状态评价, 可以减少在线监测的状态量, 减少经济投入。主元分析是设法将原来众多具有一定相关性的变压器指标重新组合成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标^[15]。

3.2 主元模型的建立

主元模型为

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \\ F_2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \\ \vdots \\ F_p = a_{1p}X_1 + a_{2p}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \end{cases} \quad (15)$$

式中: X_i 为变压器的状态量特征; a_{ij} 为状态量特征 X_i 对应的系数; F_i 为第 i 个综合指标。

满足以下条件:

(1) 每个主元系数平方和为 1, 即有

$$a_{1i}^2 + a_{2i}^2 + \dots + a_{pi}^2 = 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

(2) 主元之间互不相关, 即有

$$\text{cov}(F_i, F_j) = 0 \quad (17)$$

(3) 主元方差依次递减, 即有

$$\text{var}(F_1) \geq \text{var}(F_2) \geq \dots \geq \text{var}(F_p) \quad (18)$$

通过对变压器原始指标数据进行标准化变换、计算相关系数矩阵、计算相关矩阵的特征值和特征值所对应的特征向量、计算主元贡献率及累计贡献率、确定主元个数、计算主元载荷、计算主元得分这七步进行主元分析。一般选取特征值大于 1 的量或累计百分比达到 80%~85% 以上的特征值对应量作为主元, 这样既可以使损失的信息不太多, 又达到减少变量、简化问题的目的, 这种方法可以减少变压器在线监测的状态量, 提高变压器状态评估计算的速度和精度, 节省投资成本。

4 实例分析

某 240 MVA、220 kV 变压器, 型号为 SFPSZ1-240000/220, 2002 年的两次油中溶解气体分析数据如表 3 所示, 2001 年、2002 年的绝缘油试验数据、电气试验数据如表 4、表 5 所示, 历史资料数据如表 6 所示^[16]。

表 3 油中溶解气体分析数据

Table 3 Data of gases dissolved in transformer oil analysis

试验日期	μL/L						
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
2002.5.28	30.6	310	64	7.7	1.1	10	2.5
2002.8.9	197	2 481	92.1	28	3.2	73.6	9.1

表 4 绝缘油试验数据

Table 4 Data of insulating oil test

试验项目	2001 年	2002 年
油中水分 c ₈	16 mg/L	21 mg/L
油介损 c ₉	1.57%	2.41%
油击穿电压 c ₁₀	52 kV	48 kV
油中糠醛含量 c ₁₁	0.27 mg/L	0.32 mg/L

表 5 电气试验数据

Table 5 Data of electrical test

试验项目	2001 年	2002 年
绕组直流电阻不平衡系数 c_{12}	0.51%	0.55%
吸收比 c_{13}	1.48	1.28
极化指数 c_{14}	2.3	1.72
绕组泄漏电流变化 c_{15}	23.1%	122.7%
绕组介损 c_{16}	0.275%	0.59%
电容型套管介损 c_{17}	0.57%	0.72%

表 6 历史资料数据

Table 6 Data of historical information

运行及检修历史分析 c_{18}	运行年限分析 c_{19}
曾遭受过雷电过电压, 经历过短期急救性负载, 进行过 1 次大修	该变压器从 1989 年投运至 2002 年其运行年限为 13 年

(1) 根据表 3~表 6 中的数据得到 4 个模糊物元 $R_{\mu 1} \sim R_{\mu 4}$, 其中 $R_{\mu 1} \sim R_{\mu 3}$ 可以根据式(2)和式(3)计算得出, $R_{\mu 4}$ 可以根据专家评分得到。

$$R_{\mu 1} = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & 0.9126 \\ & c_2 & 0.876 \\ & c_3 & 0.58 \\ & c_4 & 0.9358 \\ & c_5 & -0.1 \\ & c_6 & 0.8 \\ & c_7 & 0.9615 \end{bmatrix}, R_{\mu 2} = \begin{bmatrix} N_2 & c_8 & 0.36 \\ & c_9 & 0.6075 \\ & c_{10} & 0.6 \\ & c_{11} & 0.73 \end{bmatrix},$$

$$R_{\mu 3} = \begin{bmatrix} N_3 & c_{12} & 0.6573 \\ & c_{13} & 0.26 \\ & c_{14} & 0.4 \\ & c_{15} & 0.846 \\ & c_{16} & 0.6563 \\ & c_{17} & 0.1857 \end{bmatrix}, R_{\mu 4} = \begin{bmatrix} N_4 & c_{18} & 0.7 \\ & c_{19} & 0.7667 \end{bmatrix}。$$

(2) 确定各指标的权重

根据式(5)~式(7), 利用 Matlab 软件仿真得出各指标的权重:

$$w_{c_1} = 0.2052, w_{c_2} = 0.2368, w_{c_3} = 0.0112, w_{c_4} = 0.1181, w_{c_5} = 0.0856, w_{c_6} = 0.2248, w_{c_7} = 0.1182, w_{c_8} = 0.2544, w_{c_9} = 0.6234, w_{c_{10}} = 0.0222, w_{c_{11}} = 0.0999, w_{c_{12}} = 0.0021, w_{c_{13}} = 0.0076, w_{c_{14}} = 0.0303, w_{c_{15}} = 0.7433, w_{c_{16}} = 0.1970, w_{c_{17}} = 0.0197, w_{c_{18}} = 0.6671, w_{c_{19}} = 0.3329。$$

(3) 计算指标的关联函数

根据式(9)~式(13)计算关联函数:

$$K(c_1) = 0.3883, K(c_2) = 0.0048, K(c_3) = 0.3122, K(c_4) = 0.7667, K(c_5) = -0.4074, K(c_6) = -0.472, K(c_7) = 0.8600, K(c_8) = 0.1143, K(c_9) = -0.4700,$$

$$K(c_{10}) = 0.2286, K(c_{11}) = 0.3333, K(c_{12}) = 0.7250, K(c_{13}) = 0.2931, K(c_{14}) = 0.3929, K(c_{15}) = 0.4862, K(c_{16}) = 0.1780, K(c_{17}) = 0.13, K(c_{18}) = -0.2241, K(c_{19}) = 0.4972。$$

(4) 变压器状态判定

根据式(14)和表 2 判定变压器状态。

$$K_1 = \sum_{i=1}^7 K(c_i)w_{ci} = 0.1176, K_2 = \sum_{i=8}^{11} K(c_i)w_{ci} = -0.2255, K_3 = \sum_{i=12}^{17} K(c_i)w_{ci} = 0.4146, K_4 = \sum_{i=18}^{19} K(c_i)w_{ci} = 0.0162。$$

式中: K_1 为油中溶解气体关联函数; K_2 为绝缘油试验关联函数; K_3 为电气试验关联函数; K_4 为历史资料关联函数。

表 7 给出了相应的评价结果。由表 7 可见, 该变压器油中溶解气体项目处于注意等级; 绝缘油试验项目处于异常等级; 电气试验项目和历史资料项目处于注意等级。由此可以判断该变压器绝缘性能不佳, 内部可能存在故障, 应尽快安排检修。一个月后的停电检修发现油箱顶部和套管将军帽密封不严, 有绝缘受潮现象, 证实了本文方法的有效性。

表 7 状态评价结果

Table 7 Result of condition evaluation

项目	K 值	评估等级
油中溶解气体	0.1176	注意
绝缘油试验	-0.2255	异常
电气试验	0.4146	注意
历史资料	0.0162	注意

(5) 主元分析

为进一步提高所提方法在大数据下的评价效果, 针对多维数据降低评级模型精度和效率的问题, 本文进一步采用主元分析法, 提取变压器状态量数据中的主要成分, 得到表 8 油中溶解气体分析数据主元矩阵, 表 9 绝缘油试验数据主元矩阵, 表 10 电气试验数据主元矩阵。

表 8 油中溶解气体分析数据主元矩阵

Table 8 Component matrix of gases dissolved in transformer oil data

试验项目	主元	
	1	2
CO	-0.914	0.396
CO ₂	-0.906	0.166
H ₂	0.817	0.561
CH ₄	0.227	-0.888
C ₂ H ₂	-0.589	0.586
C ₂ H ₄	0.781	0.505
C ₂ H ₆	0.950	0.218

表 9 绝缘油试验数据主元矩阵

Table 9 Component matrix of insulating oil test data

试验项目	主元	
	1	2
油中水分	-0.613	-0.741
油介损	0.996	-0.050
油击穿电压	-0.606	0.754
油中糠醛	0.963	0.054

表 10 电气试验数据主元矩阵

Table 10 Component matrix of electrical test data

试验项目	主元	
	1	2
绕组直流电阻不平衡系数	-0.217	-0.976
吸收比	0.913	0.394
极化指数	0.730	0.063
绕组泄漏电流变化	0.921	-0.232
绕组介损	-0.491	0.869
电容型套管介损	0.991	0.024

从表 8 可以看出, C_2H_6 和 CO 在第一主元中载荷较大, CH_4 和 C_2H_2 在第二主元中载荷较大; 从表 9 可以看出, 油介损和油中糠醛在第一主元中载荷较大, 油中水分和油击穿电压在第二主元中载荷较大; 从表 10 可以看出, 电容型套管介损和绕组泄漏电流变化在第一主元中载荷较大, 绕组直流电阻不平衡系数和绕组介损在第二主元中载荷较大。

根据主元分析法处理后的状态量数据, 采用熵权模糊物元方法对变压器运行状态进行评价, 得出的结果如表 11 所示。

表 11 状态评估结果

Table 11 Result of condition evaluation

项目	K 值	评估等级
油中溶解气体	0.126 4	注意
绝缘油试验	-0.147 6	异常
电气试验	0.325 9	注意
历史资料	0.213 5	注意

可见, 使用主元分析法得到的状态评估等级与原来的结果一致, 说明该方法可以减少变压器在线监测的状态量, 由原来的对所有的状态量进行在线监测变成现在的对主元状态量进行在线监测, 为电力公司节省投资成本。

5 结论

(1) 物元理论可以解决不相容的问题, 为多信息融合评估提供理论基础, 实现多因素的综合评估。

(2) 引用熵权理论, 在一定程度上减少了权重确定的主观性。

(3) 主元分析法可以对数据进行降维, 用主要的成分代替所有的成分, 解决变压器在线监测状态量过多的问题。

(4) 通过实例的对比分析, 表明基于熵权模糊物元和主元分析方法能够有效应用到变压器运行状态的判定, 为变压器的状态评价问题提供一种新的思路。

参考文献

- [1] 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.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.
- [2] 赵云峰, 张永强, 聂德鑫, 等. 基于模糊和证据理论的变压器本体绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 58-61.
ZHAO Yunfeng, ZHANG Yongqiang, NIE Dexin, et al. Application of fuzzy and evidence theory in power transformers condition assessment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 58-61.
- [3] 杨志超, 张成龙, 吴奕, 等. 基于粗糙集和 RBF 神经网络的变压器故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(21): 34-39.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, WU Yi, et al. Research on rough sets and RBF neural network based transformer fault diagnosis method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(21): 34-39.
- [4] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 114-116.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 114-116.
- [5] 鲁斯光, 李硕. 基于改进加权灰色关联度的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 83-87.
LU Siguang, LI Shuo. Faulty diagnosis for power transformer based on weighted degree of improved grey incidence[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 83-87.
- [6] 雷兴列, 盛戈峰, 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):

- 2024-2027.
LEI Xinglie, SHENG Gegao, 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): 2024-2027.
- [7] 程加堂, 艾莉, 段志梅. 改进证据理论与神经网络集成的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 93-96.
CHENG Jiatang, AI Li, DUAN Zhimei. Transformer fault diagnosis based on improved evidence theory and neutral network integrated method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 93-96.
- [8] LIAO S H. Expert system methodologies and applications a decade reviews from 1995 to 2004[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(1): 93-103.
- [9] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994: 1-51.
- [10] 杨丽徙, 于发威, 包毅. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 55-57.
YANG Lixi, YU Fawei, BAO Yi. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 55-57.
- [11] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1059.
ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1059.
- [12] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 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): 521-523.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-523.
- [14] 黄飞龙. 基于未确知理论和物元分析的变压器绝缘状态评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
HUANG Feilong. Study of transformer insulation condition assessment method based on unascertained theory and matter element analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [15] 苑津莎, 尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 27-28.
YUAN Jinsha, SHANG Haikun. Pattern recognition based on principle component analysis and probabilistic neural networks and partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 27-28.
- [16] 廖玉祥. 一种电力变压器运行状态综合评估模型的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LIAO Yuxiang. Study on the comprehensive assessment model of transformer operation condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-04-30

作者简介:

吴奕(1968-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网运行管理; E-mail: wu_yi1968@sohu.com

朱海兵(1978-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网运行管理;

周志成(1977-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网设备状态评价。

(编辑 魏小丽)