

DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.017

基于集对分析和综合赋权的电力变压器套管绝缘状态评估

李志超^{1,2}, 李卫国¹, 汤浩³, 贾鹏飞³, 张书琦³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网北京通州供电公司, 北京 101149;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对当前电力变压器套管绝缘状态评估中各评价参量存在复杂性和不确定性的问题,文中应用集对分析方法对变压器套管进行绝缘状态评估。首先选取用于套管状态评估的指标,对评估结果进行等级划分并制定响应策略,采用层次分析法和熵权法融合的综合赋权法来确定各评估指标的权重,构造联系度数学表达式来描述评估指标与状态等级之间的关联程度,建立起集对分析状态评估模型。实例计算分析表明,基于集对分析方法和综合赋权的状态评估模型能够有效反映变压器套管的绝缘状态,评估结果可为变压器的状态检修提供有效参考。

关键词: 变压器套管; 绝缘状态评估; 集对分析; 层次分析法; 熵权

Insulation Condition Assessment for Power Transformer Bushing Based on Set Pair Analysis and Comprehensive Weights

LI Zhichao^{1,2}, LI Weiguo¹, TANG Hao³, JIA Pengfei³, ZHANG Shuqi³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Beijing Tongzhou Electric Power Supply Company, Beijing 101149, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: For the complexity and uncertainty of the assessment indicators in insulation condition assessment of power transformer bushing, the set pair analysis is employed. First, indexes for bushing condition assessment are selected, assessment result is graded, and response strategies are worked out. Then, the weights of the assessment indexes are determined by using the comprehensive weighting method with combination of AHP and entropy method, mathematical expressions are established to describe the degree of association between evaluation criteria and state level, and a condition assessment model is built using set pair analysis. Example shows that the assessment model based on the set pair analysis and comprehensive weight can effectively reflect the insulation condition of transformer bushing, and the assessment results can be taken as a reference for transformer state-based maintenance.

Key words: transformer bushing; insulation condition assessment; set pair analysis; AHP; entropy weight

0 引言

随着电网容量的不断增大,对其可靠性与安全性的要求也在与日俱增,电网的安全与稳定不仅关系到经济的稳定增长,也为社会生活稳定良好的运行提供保障^[1]。坚强智能电网的概念已经在电力行业普及,而稳定性和安全性是坚强智能电网的保障,

因此如何确保电力设备的正常有效运行就成为一项关系到电网安全的重要课题。电力变压器作为重要的电力设备,是连接不同电压等级电网的枢纽,其重要性不言而喻。变压器造价昂贵,一旦发生故障,不仅维修成本高,而且影响了区域内的供电,因此及时发现故障隐患并提前处理将会产生巨大的有形的和无形的效益^[2-3]。

电力设备的检修一般可分为故障检修、周期性

收稿日期:2017-09-06; 修回日期:2017-11-09

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-15-042)。

Project Supported by Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(GY71-15-042).

检修、状态检修。状态检修可以对电力设备的状态进行评估,预测可能发生的故障,做到防患于未然,得到了电力行业人员和相关学者的关注。目前国内学者在变压器状态评估方面作了许多研究,将数学理论应用到该方面,取得了良好的效果。变压器状态评估的理论主要有模糊数学理论^[4-5]、证据理论^[6-7]、贝叶斯网络理论^[8]、支持向量机理论^[9-10]、物元理论^[11]、可拓分析^[12]等。由于变压器结构复杂,除本体外还包括套管、冷却系统等附件,影响变压器整体性能的因素众多,使得变压器的绝缘状态和此类因素之间不具备确定性,至今还没有统一的标准来对变压器进行状态评估。

套管作为电力变压器的重要组成部分,用于变压器高压引线对金属外壳的绝缘,是将变压器内部的高压线引到变压器油箱外部的装置,在运行中要长期经受电、力、热以及它们联合作用的严格考验,其绝缘性能直接关系电网的安全、稳定和经济运行。变压器的故障有相当一部分是由套管故障引起的^[13],因此,保证变压器套管良好的绝缘性能至关重要^[14]。当前对电力变压器绝缘状态的评估绝大多数都是对其整体进行的,单独对套管进行评估的研究较少^[15-17],这对于结构复杂的变压器来说过于笼统,不具有针对性。评价指标大多也只是选取套管介质损耗这一项,这样忽略其它影响套管绝缘状况因素的做法在实际应用中容易产生误判。因此,对套管单独进行绝缘状态评估就具有重要意义。

文中选取了变压器套管评估指标,对评估等级进行划分并制定响应策略,采用层次分析法与熵权法结合的综合赋权法确定各指标的权重,建立了基于集对分析方法的变压器套管绝缘状态评估模型,通过最大隶属度原则确定套管的状态等级。

1 变压器套管绝缘状态评估体系构建

1.1 评估指标选取

变压器套管的绝缘状态受多种因素影响,评估指标的选取应尽可能全面地反映套管的绝缘状况^[18]。应选取方便测量的参数,并应具有代表性,尽量避免参数冗余的现象。参照相关资料^[15,19],根据科学、可行、全面的原则,选取末屏电阻、介质损耗因数、总烃相对产气率、电容量偏差、一氧化碳相对产气率、乙炔含量及氢气含量7个参数作为状态评估指标,虽然7项指标具有一定代表性,但在实际中它们所反映的套管的绝缘状态及可靠性存在一定差异,因此,文中采取综合赋权的方式来反映不同指标的可靠程度。

1.2 评估等级划分

根据国家电网公司制定的相关标准将电力变压器套管绝缘状态评定结果分为4个等级,分别为正常、注意、异常(故障)、严重,分别用 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 表示。套管状态评估的等级界限见表1,参照相关研究成果^[20-21],制定出套管状态评估等级所采取的响应策略见表2。

表1 变压器套管绝缘评估等级界限

Table 1 Transformer bushing insulation assessment grade boundaries

指标	1级	2级	3级	4级
末屏电阻 $K_1/\text{M}\Omega$	1 000	800	600	400
介质损耗因数 $K_2/\%$	0.30	0.49	0.58	0.70
电容量偏差 $K_3/\%$	3.2	5.0	7.0	9.0
总烃产气率 $K_4/\%$	6.5	10.0	13.5	24.0
C_2H_2 体积分数 $K_5 \times 10^{-6}$	2	4	6	8
CO 产气率 $K_6/\%$	4.0	6.0	13.5	24.0
H_2 体积分数 $K_7 \times 10^{-6}$	400	500	700	800

表2 状态等级与响应策略

Table 2 State level and the response policy

状态等级	策略
z_1	套管各项评估指标处于稳定并在规程规定的警示值、注意值之内。
z_2	套管评估指标的变化趋势朝接近标准限值方向发展,加强运行监视。
z_3	套管评估指标变化较大,已接近或略微超过标准限值,适时安排停电检修。
z_4	套管评估指标严重超过标准限值,需要安排停电,必要时更换套管。

2 评估指标权重的确定

在状态评估中需要确定各评价指标在表征被评价对象状态上的可靠程度,常见的确定权重的方法可分为主观赋权法、客观赋权法、综合赋权法,主观赋权法是依据专家学者的实际经验对各评估指标进行赋权,稳定性较强,但主观性和偶然性也较大。客观赋权法是根据实际采集的数据,根据它们的重要程度确定各因素的权重,能够反映客观事实,但忽视了决策者的经验。综合赋权法将前两者的优点结合起来,在权重确定方面更加符合实际需要,因此采用层次分析法与熵权法结合的综合赋权法来确定各评估指标的权重。

2.1 层次分析法确定主观权重

层次分析法是一种将定性与定量分析相结合的决策分析方法^[22],该方法将一个复杂问题分解为若

于个因素,结合专家的实际经验判断,对两两因素的重要程度进行比较,再用数学方法得出判断矩阵,求该矩阵的特征值并特征向量,就可得出不同因素的权重^[23],计算过程如下:

1)采用1-9标度法确定判断矩阵 A ,各标度的含义见表3,通过两两比较,反映各指标的相对重要程度。

表3 判断矩阵标度含义

Table 3 Meaning of judgment matrix scale	
标度	含义
1	两指标具有相同重要性
3	两指标相比,前者比后者稍微重要
5	两指标相比,前者比后者明显重要
7	两指标相比,前者比后者强烈重要
9	两指标相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
以上标度	指标 i 与指标 j 的重要性之比为 a_{ij} ,则指标 j 与的倒数 指标 i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

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

式(1)中,元素值 a_{ij} 表示第 i 个指标比第 j 个指标的重要程度。

2)依据以下公式计算判断矩阵 A 的特征向量并进行正规化处理。

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

3)计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

4)进行一致性检验。计算一致性指标 CI 和一致性比例 CR 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式(5)、(6)中:随机一致性指标 RI 见表4。当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵满足一致性要求,否则需要对判断矩阵作修改。

表4 平均随机一致性指标

Table 4 Index of mean random consistency							
n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36

2.2 熵权法确定客观权重

熵权法是一种客观的赋权方法,它根据各评估指标数值变化程度所反映的信息量的多少来确定指标权重,各指标的差异越大,所具有的信息量也越大,熵权就越大,其对评估结果的影响也越大^[24]。假设有 m 个待评价方案,每个方案有 n 个评价指标,则第 j 个评价指标的信息熵如下所示

$$\begin{cases} H_j = -f \sum_{i=1}^m u_{ij} \ln u_{ij} \\ u_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $f=1/\ln m$; r_{ij} 为第 i 个评价方案中第 j 个评价指标归一化后的值,当 $u_{ij}=0$ 时, $u_{ij} \ln u_{ij}=0$ 。

则第 j 个指标的熵权定义为

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (8)$$

2.3 综合权重的确定

鉴于层次分析法脱离客观实际,熵权法忽视了专家的经验,采用层次分析法与熵权法结合的综合赋权法,各指标的综合权重为

$$d_i = a\theta_i + b\omega_i \quad (9)$$

式(9)中: θ_i 和 ω_i 分别为为层次分析法和熵权法确定的各指标权重, a 、 b 为比例系数,且 $a+b=1$,考虑两种方法的均衡性,取 $a=b=0.5$ 。

3 基于集对分析的套管绝缘状态评估模型

集对分析(SPA)理论(简称集对论)由中国学者赵克勤在1989年提出的一种新的数学工具,用来处理模糊和不确定知识。集对论能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不确定信息,并从中发现隐含的知识,揭示潜在的规律^[25]。集对论认为,任何系统都是确定性与不确定性的统一整体,确定性和不确定性在一定条件下可以相互转化,并用联系数来定量描述这种不确定性^[21]。随着集对论理论研究的深入,越来越多的学者将其应用到实际中去,在决策、预测、不确定性推理、综合评价、网络设计方面得到了广泛应用,集对分析这座大厦已然成形。

3.1 集对分析原理

所谓集对,就是两个具有某种关联的集合组成的对子,集对分析就用于描述这两个集合之间的关联程度,并从同一度、差异度、对立度这3个方面研究两个集合之间的关系。同、异、反三者相互联系、相互影响、相互制约,又在一定条件下相互转化^[26]。

集对分析的基本思路是:假定给定两个集合 A 和 B , 它们组成的集对为 $H=\{A,B\}$, 在具体背景下, 对集对 H 的特性进行分析, 共得到 N 个特性, 其中有 S 个特性为集合 A 和集合 B 所共有, 而在另外 P 个特性对立, 在剩余的 F 个特性上存在差异, 既不统一也不对立。则两个集合的联系度可以表示为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (10)$$

式(10)中: μ 为两集合的联系度; S/N 、 F/N 、 P/N 分别为两个集合在所分析的背景下的同一度、差异度、对立度, 三者满足归一化条件, 用 a 、 b 、 c 分别表示同一度、差异度、对立度, 则联系度又可简记为

$$\mu = a + bi + cj \quad (11)$$

式(11)中: $a+b+c=1$; i 为差异标记系数, 在 $[-1, 1]$ 之间视不同情况取值; j 为对立标记系数, 在一般情况下规定取值为 -1 , 用以表示差异度与同一度相反。在不计较 i 、 j 的取值时, 可以仅将它们作为标记系数。联系度 μ 和差异系数 i 是集对分析的核心所在。

在实际需要的情况下, 可以对两个集合的联系度由三元联系度扩展成四元联系度或更高元数的联系度, 用以更加细致地刻画两个集合在差异上的关联程度。经扩展后的联系度如下式所示, 称之为 l 元联系度。

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \cdots + b_{l-2}i_{l-2} + cj \quad (12)$$

3.2 集对分析算法

假设指标体系有 N 个指标组成, 状态等级划分为 K 级。设指标 x_m 组成的集合为 U , 各状态等级组成的集合为 Z , 则 U 和 Z 构成的集对 $H=(U, Z)$ 。集对 H 的 K 元联系度 μ_m 可表示为

$$\mu_m = a_m + b_{m,1}i_1 + b_{m,2}i_2 + \cdots + b_{m,K-2}i_{K-2} + c_mj \quad (13)$$

式(13)中: a_m 表示指标 x_m 与 $k(k=1, 2, \cdots, K)$ 级状态同一级的同一度; $b_{m,1}$ 表示指标 x_m 与 k 级状态相差 1 级的差异度; $b_{m,2}$ 表示指标 x_m 与 k 级状态相差 2 级的差异度; $b_{m,K-2}$ 表示指标 x_m 与 k 级状态相差 $K-2$ 级的差异度; c_m 表示指标 x_m 与 k 级状态差异 $K-1$ 的对立度。在评估结果中, 联系分量越大, 表明指标隶属于这一级的程度越高。

将套管绝缘状态评估结果分为 4 个等级, 即正常、注意、异常(故障)、严重, 将这 4 个等级作为一个集合, 将评估指标作为一个集合, 采用四元联系度来分析两个集合之间的关联程度。为表达方便, 且不影响联系度的数学内涵, 定义 a_m 为指标属于正常状态的程度, $b_{m,1}$ 为指标属于注意状态的程度, $b_{m,2}$ 为指标属于异常(故障)的程度, c_m 为指标属于严重状态的

程度, 将四元联系度表示如下形式

$$\mu_m = a_m + b_{m,1}i_1 + b_{m,2}i_2 + c_mj \quad (14)$$

式(14)中: a_m 、 $b_{m,1}$ 、 $b_{m,2}$ 、 c_m 为联系分量, a_m 、 $b_{m,1}$ 、 $b_{m,2}$ 、 $c_m \in [0, 1]$ 。不考虑 i_1 、 i_2 、 j 的取值时, 仅将 i_1 、 i_2 、 j 作为标记使用。

根据变压器套管的特性, 可以将评估指标分为越大越好型和越小越好型, 根据两种评估指标构造其对状态等级的隶属函数, 越小越好型指标与状态等级的联系度表达式为

$$\mu_m = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j & x \in [0, S_1] \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S_1} + \frac{x - S_1}{S_2 - S_1}i_1 + 0i_2 + 0j & x \in (S_1, S_2] \\ 0 + \frac{S_3 - x}{S_3 - S_2}i_1 + \frac{x - S_2}{S_3 - S_2}i_2 + 0j & x \in (S_2, S_3] \\ 0 + 0i_1 + \frac{S_4 - x}{S_4 - S_3}i_2 + \frac{x - S_3}{S_4 - S_3}j & x \in (S_3, S_4] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j & x \in (S_4, +\infty] \end{cases} \quad (15)$$

越大越好型指标与状态等级的联系度表达式为

$$\mu_m = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0j & x \in (S_1, +\infty] \\ \frac{S_1 - x}{S_1 - S_2} + \frac{x - S_2}{S_1 - S_2}i_1 + 0i_2 + 0j & x \in (S_2, S_1] \\ 0 + \frac{S_2 - x}{S_2 - S_3}i_1 + \frac{x - S_3}{S_2 - S_3}i_2 + 0j & x \in (S_3, S_2] \\ 0 + 0i_1 + \frac{S_3 - x}{S_3 - S_4}i_2 + \frac{x - S_4}{S_3 - S_4}j & x \in (S_4, S_3] \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 1j & x \in [0, S_4] \end{cases} \quad (16)$$

式(15)、(16)中: S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为各个评价指标 z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 4 个状态等级的标准限值; m 为第 m 个评估指标; x 为各个指标的实测值。

根据各评估指标的权重可以确定总体联系度, 表达式如下

$$\mu = \sum_{m=1}^7 d_m \mu_m \quad (17)$$

式(17)中: μ 为套管评估指标集与状态等级的联系度; d_m 为第 m 项指标在所有指标中的权重; μ_m 为第 m 项指标与状态等级的联系度。

3.3 评估步骤

变压器套管绝缘状态评估步骤可分为 5 步:

- 1) 选取表征变压器套管绝缘状态的特征参量作为评估指标;
- 2) 按照 2.1-2.3 节所述, 计算各评价指标的综合权重;
- 3) 按照式(15)、(16)计算各指标对各状态等级的联系度;
- 4) 根据式(17)计算总体联系度;
- 5) 根据最大隶属度原则判定套管绝缘状态等

级,根据响应策略制定需采取的措施。

4 实例分析

下面以某地区 500 kV 变电站 2 号主变为例进行验证^[15],该变压器 A 相 220 kV 套管的型号为 BRDLW2-252/630-3,共收集 3 组数据,分别在 2005 年、2006 年、2006 年测的,试验数据见表 5。

表 5 3 组实测数据

Table 5 3 set of measured data

参数	第 1 次	第 2 次	第 3 次
$K_1/\text{M}\Omega$	46 000	50 000	45 000
$K_2/\%$	0.363	0.601	0.534
$K_3/\%$	5.2	6.3	8.0
$K_4/\%$	12.65	14.20	28.04
$K_5\times 10^{-6}$	0	65	460
$K_6/\%$	5.80	8.69	9.60
$K_7\times 10^{-6}$	33.7	208.8	327.0

变压器套管评估指标判断矩阵见表 6。按照 2.1 节所述计算方法得出各评估指标的主观权重为 $\theta=\{0.064,0.113,0.128,0.232,0.354,0.067,0.042\}$;按照 2.2 节所述计算方法得出客观权重为 $\omega=\{0,0.197,0.196,0.169,0.111,0.124,0.203\}$;按照 2.3 节所述计算方法得出综合权重为 $d=\{0.032,0.155,0.162,0.200,0.232,0.096,0.123\}$ 。

根据式(15)-(17)计算得到指标参数与状态等级

表 6 变压器套管评估指标判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of evaluation index for transformer bushing

A	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
K_1	1	1/2	1/3	1/6	1/9	1	3
K_2	2	1	1	1/3	1/6	2	7
K_3	3	1	1	1/2	1/5	2	8
K_4	6	3	2	1	1/2	6	9
K_5	9	6	5	2	1	9	9
K_6	1	1/2	1/2	1/6	1/9	1	3
K_7	1/3	1/7	1/8	1/9	1/9	1/3	1

联系度的结果见表 7-9。

根据上文计算出的联系度结合最大隶属原则可以确定出变压器套管的绝缘状态等级,由表 4 中可知联系分量中 a 的值最大,说明套管处于正常状态;由表 5 可知,联系分量中 b_2 的数值最大,套管状态隶属于异常的程度最高,且与 c 的差值最小,判断套管此时处于异常状态,如果不加以处理则可能向严重状态发展,根据响应策略,此时应进行停电检修。由表 9 可知,联系分量中 c 的数值最大,判断此时套管

处于严重状态。实际情况是,第 2 次试验之后未对该套管进行解体,第 3 次试验之后对该套管进行了返厂解体处理,发现在主绝缘第 1 屏和导电杆之间的高压连接带上有明显放电点,而第 2 次与第 3 次试验的时间相近,推断出对第 2 次试验的评估结果符合事实,由此看来文中评估结果与实际情况相符,从而证明了集对分析方法在套管绝缘状态评估上的可行性。

将所构造的评估模型与基于云理论和核向量空

表 7 联系度的计算值 1

Table 7 The calculated value 1 of the degree of contrary

联系度	$a(z_1)$	$b_1(z_2)$	$b_2(z_3)$	$c(z_4)$
μ_1	1.000	0.000	0.000	0.000
μ_2	0.668	0.332	0.000	0.000
μ_3	0.000	0.900	0.100	0.000
μ_4	0.000	0.243	0.757	0.000
μ_5	1.000	0.000	0.000	0.000
μ_6	0.100	0.900	0.000	0.000
μ_7	1.000	0.000	0.000	0.000
μ	0.500	0.332	0.168	0.000

表 8 联系度的计算值 2

Table 8 The calculated value 2 of the degree of contrary

联系度	$a(z_1)$	$b_1(z_2)$	$b_2(z_3)$	$c(z_4)$
μ_1	1.000	0.000	0.000	0.000
μ_2	0.000	0.000	0.825	0.175
μ_3	0.000	0.350	0.650	0.000
μ_4	0.000	0.000	0.933	0.067
μ_5	0.000	0.000	0.000	1.000
μ_6	0.000	0.641	0.359	0.000
μ_7	1.000	0.000	0.000	0.000
μ	0.155	0.117	0.455	0.273

表 9 联系度的计算值 3

Table 9 The calculated value 3 of the degree of contrary

联系度	$a(z_1)$	$b_1(z_2)$	$b_2(z_3)$	$c(z_4)$
μ_1	1.000	0.000	0.000	0.000
μ_2	0.000	0.511	0.489	0.000
μ_3	0.000	0.000	0.500	0.500
μ_4	0.000	0.000	0.000	1.000
μ_5	0.000	0.000	0.000	1.000
μ_6	0.000	0.520	0.480	0.000
μ_7	1.000	0.000	0.000	0.000
μ	0.155	0.128	0.203	0.514

间模型、基于熵权 TOPSIS 的评估模型作对比,见表 10,可发现文中所构造的基于综合赋权的集对分析模型

所给出的结果是明确且符合实际的。

表10 不同评估方法对比

Table 10 Comparison of different assessment methods

评估模型	第1次	第2次	第3次
云理论和核向量 空间模型	正常	故障	接近严重
TOPSIS模型	正常	注意	故障
集对分析模型	正常	故障	严重

5 结语

文中提出了一种利用集对分析法来评估变压器套管绝缘状态的方法,解决了评估指标与状态等级之间的不确定性和模糊性问题。采用主客观权重融合的方式使得各个评价因素对反映评价结果的可靠性更高,权重系数更加客观真实。将评估状态划分为4个等级并制定了响应策略,为套管评估结果的处理措施提供了参考。实例分析的结果表明本文建立的状态评估模型用于变压器套管绝缘状态评估是有效可行的,为现场运行维护提供了有效地参考。

参考文献:

- [1] 李 鹏,李金忠,崔博源,等.特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术,2016,42(2):1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):1068-1078.
- [2] 谢龙君,李 黎,程 勇,等.融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):277-286.
XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A Fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2):277-286.
- [3] 孙玉娇,周勤勇,申 洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术,2013,37(7):1929-1935.
SUN Yujiao, ZHOU Qinyong, SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of China's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1929-1935.
- [4] YANG H T, LIAO C C, CHOU J H. Fuzzy learning vector quantization networks for power transformer condition assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1):143-149.
- [5] LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, GRZYBOWSKI S, et al. An integrated decision-making model for condition as-

essment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2):1111-1118.

- [6] 廖瑞金,廖玉祥,杨丽君,等.多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(3):119-124.
LIAO Ruijin, LIAO Yuxiang, YANG Lijun, et al. Study on synthetic diagnosis method of transformer fault using multi-neural network and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):119-124.
- [7] TANG W H, SPURGEONK, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4):1696-1703.
- [8] 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. 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.
- [9] 郑蕊蕊,赵继印,赵婷婷,等.基于遗传支持向量机和灰色人工免疫算法的电力变压器故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2011,31(7):56-63.
ZHENG Ruirui, ZHAO Jiyin, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7):56-63.
- [10] 杨 洪,古世甫,陶加贵,等. 自适应分级多分类支持向量机在变压器故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2010,46(5):49-52.
YANG Hong, GU Shifu, TAO Jiagui, et al. Application of adaptive hierarchical multi-class SVM to transformer fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5):49-52.
- [11] 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):55-58.
YANG Lixi, YU Fawei, BAO Yi. Transformer insulation condition grade assessment based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6):55-58.
- [12] 杜 林,袁 蕾,熊 浩,等.电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术,2011,37(4):897-903.
DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):897-903.
- [13] 肖天为. 变压器套管局部放电的特征与识别[J]. 高压电器,2015,51(7):141-147.
XIAO Tianwei. Partial discharge detection and pattern recognition for transformer bushings based on UHF technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):

- 141-147.
- [14] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. Online monitoring and fault diagnosis of electric equipment[M]. Beijing: The Press of Tsinghua, 2006.
- [15] 周 淦, 徐 智, 廖瑞金, 等. 基于云理论和核向量空间模型的电力变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1101-1106.
- ZHOU Quan, XU Zhi, LIAO Ruijin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1101-1106.
- [16] 陈金强, 李群湛. 基于熵权TOPSIS的变压器套管绝缘状态评估[J]. 绝缘材料, 2014, 47(4): 89-92.
- CHEN Jinqiang, LI Qunzhan. Insulation condition assessment of transformer bushing based on TOPSIS method with entropy weight[J]. Insulating Materials, 2014, 47(4): 89-92.
- [17] 骆思佳, 刘昕鹤, 吕启深, 等. 基于物元分析法的电力变压器套管健康状态评估[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 177-184.
- LUO Sijia, LIU Xinhe, LIU Qishen, et al. Condition assessment for power transformer bushings based on matter element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 177-184.
- [18] 李 磊, 熊小伏, 沈智健. 基于变权重的变压器状态模糊综合评价方法[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 100-105.
- LI Lei, XIONG Xiaofu, SHEN Zhijian. Fuzzy synthetic evaluation of transformer condition with variable weight value[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 100-105.
- [19] 国家电网公司生产技术部. 设备状态检修规章制度和技术标准汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- The Production Technology Department of State Grid. Equipment state maintenance rule making and technology standard assembly[M]. Beijing: The Press of China Electric Power, 2008.
- [20] 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 169—2008[S]. 2008.
- Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 169—2008[S]. 2008.
- [21] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 等. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 55-60.
- LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, YANG Lijun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 55-60.
- [22] 刘新宪, 朱道立. 选择与判断[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990.
- LIU Xinxian, ZHU Daoli. Selection and judgement[M]. Shanghai: Shanghai Science Trade Press, 1990.
- [23] 赵云飞, 陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-95.
- ZHAO Yunfei, CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 85-95.
- [24] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159.
- OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(21): 156-159.
- [25] 蒋云良, 徐从富. 集对分析理论及其应用研究进展[J]. 计算机科学, 2006, 33(1): 205-209.
- JIANG Yunliang, XU Congfu. Advances in pair analysis theory and its applications[J]. Computer Science, 2006, 33(1): 205-209.
- [26] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18-23.
- ZHAO Keqin, XUAN Aili. Set pair theory—A new theory method of non-define and its applications[J]. Systems Engineering, 1996, 14(1): 18-23.
- 李志超(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障诊断和绝缘技术。
- 李卫国(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备故障诊断和绝缘技术。
- 汤 浩(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压绝缘技术等方面的研究工作。
- 贾鹏飞(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压绝缘技术等方面的研究工作。
- 张书琦(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压绝缘技术等方面的研究工作。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。