

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.014

基于最优变权正态云模型的电力变压器绝缘状态评估

郑理科¹, 李帅兵², 王晓东¹, 辛东立², 吴广宁²

(1. 国网四川省电力公司内江供电公司, 四川 内江 641000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 电力变压器整体绝缘状态评估过程中的主、客观因素并存,致使评价结果具有较大的随机性和不确定性。为此,笔者提出一种基于最优变权正态云模型的变压器绝缘状态评估策略。首先确定了绝缘状态评估指标体系,并基于复合二元语义实现了主观评估标度的定量转换,通过最优变权确定了各状态量的权重,在合理确定云模型数字特征的基础上,采用正态云模型描述绝缘状态评估中的模糊性与随机性,通过云运算确定绝缘状态及故障类型。实例分析验证了该方法的可行性,为针对性的变压器绝缘状态在线检修工作提供了一种新思路。

关键词: 最优变权; 正态云模型; 变压器; 状态评估

Insulation Condition Assessment for Power Transformer Based on Normal Cloud Model with Optimal Variable Weights

ZHENG Like¹, LI Shuaibing², WANG Xiaodong¹, XIN Dongli², WU Guangning²

(1. Neijiang Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Sichuan Neijiang 641000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the condition assessment process of power transformers, the evaluation results have great randomness and uncertainty due to both subject and object factors coexist. An assessment strategy based on normal cloud model with optimal variable weights is proposed, which realizes the translation from qualitative to quantitative scale by using a compound two tuple method and optimal variable weights of each state quantity is determined accordingly. A normal cloud model with reasonable digital characteristics is proposed to describe the fuzzy and random of the insulation condition. Then, the whole insulation condition and fault types of transformer are determined via cloud aggregation. Local case study proves the feasibility of the strategy proposed, which provides a new method for the targeted online insulation condition maintenance of power transformer.

Key words: optimal variable weight coefficient; normal cloud model; transformer; status assessment

0 引言

随着电网规模的持续扩大和电压等级的提升,电网对供电可靠性要求不断提高。电力变压器持续不间断运行的状态检修策略兼顾运行安全性和经济性等技术指标要求,是目前高压电力设备状态检修的主要方式和发展趋势^[1]。表征电力变压器绝缘状态的特征参量,如油中溶解气体、局部放电量、油温等在线监测信息以及电气试验、检修记录等离线数据与设备运行状态变化及故障模式具有密切联

系。已有研究表明,油中溶解气体体积分数、局部放电量等在线监测信息可反映变压器当前运行状态^[2];油中产气速率、局部放电重复率和温升变化率可反映内部潜伏性故障的发展程度^[3]。通过建立特征参量与典型故障之间的映射关系,结合人工神经网络^[4]、贝叶斯网络^[5]、证据理论^[6]、支持向量机^[6]、关联规则分析^[7]、灰色聚类^[8]、集对分析^[2]等智能信息处理技术是实现电力变压器绝缘状态评估的主要方式,目前已有大量学者予以关注^[4-8]。

由于变压器绝缘故障机理复杂,评价语言和评价等级的划分具有的模糊特征,已有故障诊断和状态评估方法对处于相邻状态模糊区间的数据难以

有效划分。一方面,故障信息样本的数据量、数据完整性和数据间的相关性对于故障诊断和状态评估结果具有决定性影响。另一方面,已有评估方案对于表征变压器绝缘状态的特征量和评估语言不能很好地定量映射。云理论将模糊理论中的模糊性和概率论中的随机性有效结合,可实现定性和定量的相互映射,能更加客观地对状态评价过程中定性指标的量化处理,在变压器状态评估方面得到了初步应用^[9-11]。

然而,在目前研究过程中,状态评估等级的定性划分和云模型数字特征的给定具有较大主观性,影响了评估结果的准确性和可信度。为此,笔者通过复合二元语义方法对绝缘状态等级进行定量映射,并赋予最优变权重系数,客观给定云模型数字特征,通过云运算对变压器绝缘状态进行综合评估。

1 电力变压器绝缘状态评价指标体系

1.1 评估参量和评估标度的选择

电力变压器绝缘故障的发生,通常由量变引发质变,致使多个状态量超限,仅凭在线监测数据无法全面准确地对其状态进行正确评估。因此,需要结合变压器检修记录和预防性试验数据等离线测试手段,将离线数据和在线数据相结合,进而指导其绝缘状态评估。

为全面准确地评估变压器绝缘状态,参考相关标准^[12-13],笔者以在线监测数据和离线数据为单项状态量,得到表1所示电力变压器绝缘状态评估参量。定义变压器的故障状态集 $S=\{S_i|i=1,2,\dots,7\}$,依次为:绝缘受潮、铁心故障、局部放电、油流放电、电弧放电、绝缘老化以及绝缘油劣化7种状态。

根据文[7]给出的变压器单项状态量和综合状态量的对应关系,同时考虑检修情况对设备绝缘状态的影响,将综合状态量 S_i 表示为与之相关单项状态量集合的形式,对应关系见表2。

根据变压器绝缘故障程度,文中将其划分为{优秀,良好,一般,故障,严重故障}5种状态,用 $H=\{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\}$ 表示,与之对应的检修策略为:{正常运行,延期检修,计划检修,尽快检修,立即检修}。据此建立变压器绝缘状态评价的语言评价体系。

1.2 基于二元语义的评估标度定量转换

以故障程度为度量的变压器运行状态评价,其评价语集本身具有模糊性和不确定性,无法定量评估变压器绝缘状态。对评估等级的划分,通常依据设备状态得分或相对劣化度,人为确定各定量区

表1 电力变压器绝缘状态评估参量

Table 1 State parameters for insulation condition assessment of power transformer

综合状态量	编号	单项状态量
油色谱数据	A_{11}	H_2 体积分数
	A_{12}	CH_4 体积分数
	A_{13}	C_2H_2 体积分数
	A_{14}	C_2H_4 体积分数
	A_{15}	C_2H_6 体积分数
	A_{16}	油中含气量
其他在线数据	A_2	局部放电量
	A_3	套管介损
	A_4	油中含水量
变压器油试验	B_{11}	油击穿电压
	B_{12}	糠醛体积分数
	B_{21}	极化指数
	B_{22}	体积电阻率
	B_{23}	铁心绝缘电阻
	B_{24}	绕组直流电阻互差
	B_{25}	中性点油流静电流
	B_{26}	纸板聚合度
	B_{27}	绕组绝缘介损
电气试验	B_{28}	铁心接地电流
	B_{29}	绝缘电阻吸收比
	B_{31}	家族缺陷
	B_{32}	同类设备检修记录
	B_{33}	该设备检修记录

表2 变压器单项状态量与综合状态量的对应关系

Table 2 Corresponding relationship between the individual state variables and comprehensive state variables

状态集符号	绝缘故障状态集	绝缘故障类型
S_1	$\{A_{11}, A_3, A_4, B_{11}, B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{29}\}$	绝缘受潮
S_2	$\{A_{14}, A_{15}, B_{23}, B_{28}\}$	铁心故障
S_3	$\{A_{11}, A_{12}, A_{16}, A_2, A_4, B_{24}\}$	局部放电
S_4	$\{A_{13}, A_{16}, A_3, B_{22}, B_{25}\}$	油流放电
S_5	$\{A_{11}, A_{13}, A_2, B_{23}\}$	电弧放电
S_6	$\{A_{16}, A_3, B_{12}, B_{22}, B_{26}, B_{27}\}$	绝缘老化
S_7	$\{A_{16}, A_3, A_4, B_{11}, B_{22}, B_{23}\}$	绝缘油劣化

间。由于主观因素的模糊性和随机性,缺乏准确性和可靠性。为此,文中采用复合标度二元语义分析方法^[14]实现绝缘状态评估标度向数字标度 $[0,1]$ 的转换。

设 $H_i \in H(i=0,1,\dots,g, g \in N^*)$ 是一语言评价集,映射 f 描述从定性语言到定量指标之间的转换为 $f: H_i \rightarrow \theta_i(i=0,1,\dots,g)$,相应的二元语义形式可通过如下函数获得

$$\theta_i = \begin{cases} \frac{\alpha^{g/2} - \alpha^{g/2-i}}{2\alpha^{g/2} - 2} & 0 \leq i \leq g/2 \\ \frac{\alpha^{g/2} - \alpha^{i-g/2} - 2}{2\alpha^{g/2} - 2} & g/2 \leq i \leq g \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\alpha = 9^{1/(g+1)}$ 。

2 最优变权重系数的确定

对于变压器绝缘状态评价这一多属性决策问题,各个评价因子的合理给定决定了最终评估结果的正确性。主观赋权法能够反映决策者的意志,但决策结果具有很大的主观随意性;客观赋权法具有较强的数学理论依据,可以避免评价结果的主观随意性,但忽略了决策者的经验。因此,文中采用最优理论,根据状态矩阵动态给定评价因子的权值。

2.1 常权系数的确定

假设由主、客观赋权法得到的属性集权向量分别为 w^s 和 w^o , 用 α, β 分别表示主观权重 w^s 和客观权重 w^o 的重要程度, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1, \alpha + \beta = 1$ 。客观赋权法采用熵值赋权法^[15], 主观赋权采用 AHP 赋权法^[16]。将主观权重和客观权重综合, 得到

$$w_j = \alpha w_j^s + \beta w_j^o \quad (2)$$

根据多属性决策的加权法则, 可求得决策方案的评价目标值为

$$d_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} w_j = \sum_{j=1}^n b_{ij} (\alpha w_j^s + \beta w_j^o) \quad (3)$$

式(3)中, b_{ij} 为规范化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 的元素。

对于变压器健康状态而言, d_i 越大越好, 如果 $d_i > d_j$, 则方案 S_i 优于 S_j 。为此, 构造如下多目标规划模型为

$$\begin{cases} \max Z = \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} (\alpha w_j^s + \beta w_j^o) \\ \text{s.t. } \alpha^2 + \beta^2 = 1, \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

显然, 式(4)所述为多属性决策规划问题, 用等权的线性权和法综合成如下单目标优化模型为

$$\begin{cases} \max Z = \sum_{i=1}^m d_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} (\alpha w_j^s + \beta w_j^o) \\ \text{s.t. } \alpha^2 + \beta^2 = 1, \alpha, \beta \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

应用 Lagrange 条件极值原理, 可得到式(5)的最优解 α^* 和 β^* , 并作归一化处理, $\alpha_s^* = \alpha^* / (\alpha^* + \beta^*)$, $\beta_s^* = \beta^* / (\alpha^* + \beta^*)$, 由此得到最优综合权重 w_j 。

2.2 变权系数的确定

作为因素空间理论的重要建模原理之一, 变权重理论可以反映综合评价中各要素状态的均衡性。当电力变压器的某一状态量数值严重偏离正常值, 即变压器某一方面性能已严重下降时, 若仅仅根据

常权重系数来进行故障状态评估, 由于该状态量权重占整体比例并不大, 变压器的整体评价可能还是正常水平。为此, 引入变权公式^[17]为

$$w_j^* = w_j s(x_j) / \left[\sum_{p=1}^n w_p s(x_p) \right] \quad (6)$$

式(6)中, $s(x)$ 为均衡函数, 对于效益型指标, 如吸收比等。

$$s(x_j) = \begin{cases} e^{-\varepsilon \left(\frac{x_j - \lambda_j}{|\gamma_j^+ - \gamma_j^-|} \right)} & x_j < \lambda_j \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

对于成本型指标, 如介损等。

$$s(x_j) = \begin{cases} e^{-\varepsilon \left(\frac{\lambda_j - x_j}{|\gamma_j^+ - \gamma_j^-|} \right)} & x_j > \lambda_j \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、(8)中, x_j 为第 j 项指标状态值, λ_j 为指标 j 的惩罚阈值, 若第 j 项指标为定量指标, 则 λ_j 为国家标准规定的技术合格线; 若第 j 项指标为定性指标, 则 λ_j 为指标合格分数线; ε 为惩罚水平, $\varepsilon > 0$ 且 ε 越大, 惩罚效果越明显, 实际评价中可根据不合格指标的惩罚力度灵活选取; γ_j^+, γ_j^- 分别为第 j 项指标的合格区间上、下界。

3 正态云模型及其评价方法

3.1 云模型及其数字特征

云模型是以自然语言描述的某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型, 它将对象的综合模糊性和随机性有效融合, 实现定性概念到定量表示之间的不确定性映射^[18-20]。云的数字特征由期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He 3 个参数表示。其中, 期望值是属性概念在论域上的中心位置, 是最能代表属性概念的值; 熵是对属性概念模糊程度的衡量, 反映了被属性概念所接受的数值范围; 超熵反映了云滴的离散程度, 揭示了自然语言属性概念的随机性和模糊性之间的关联性。

文中, 云模型的生成采用前向正态云发生器 $CG(Ex, En, He, N)$, N 为云滴数。根据已划分的 5 级标度, 对于 x 的有效论域 $[X_{\min}, X_{\max}]$, 云的中心 Ex_i 可由式(9)计算

$$Ex_i = X_{\min} + \theta_i (X_{\max} - X_{\min}) \quad (9)$$

对于任意云滴 (x_i, y_i) , 由于 $x_i \sim N(Ex_i, En_i'^2)$, 因此 En_i' 的取值应满足 3σ 准则, 即

$$3\varepsilon_1 En_i' = \max\{X_{\max} - Ex_i, Ex_i - X_{\min}\} \quad (10)$$

式(10)中, $\varepsilon_1 \geq 1$ 。

将 En_i 的取值可看作与其对应的云朵及其相邻云朵 En_i' 的平均值, 可表示为

$$En_i = \begin{cases} (En'_i + En_{i+1}')/2 & i=0 \\ (En_{i-1}' + En'_i + En_{i+1}')/3 & 0 < i < g \\ (En'_i + En_{i+1}')/2 & i=g \end{cases} \quad (11)$$

又由于 $En'_i \sim N(En_i, He_i^2)$, 因此 He 的取值也应满足 3σ 准则, 即

$$3\varepsilon_2 He_i = \max\{En'_i - En_i, En_i - En'_i\}. \quad (12)$$

式(12)中, $\varepsilon_2 \geq 1$ 。

考虑到实际应用中两朵云过于贴近时, 其刻画的模糊概念也会出现如图 1(a)所示过早重叠现象, 因此文中重新调整 En'_i 的大小, 取 $\varepsilon_1=1, \varepsilon_2=2$, 以解决状态云过早交叠问题。

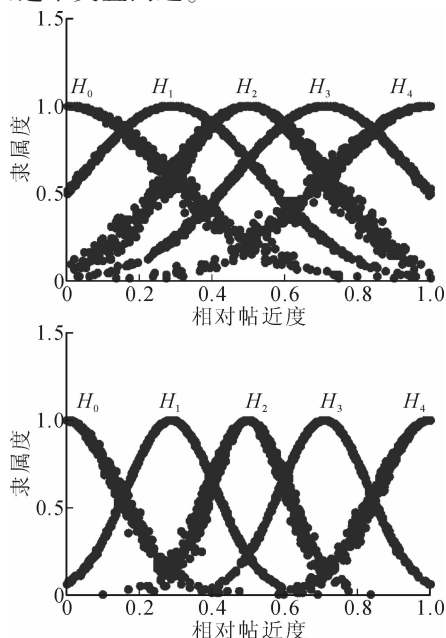


图1 不同云熵下的状态云

Fig. 1 State clouds with different cloud entropy

在得到表3所示云的全部数字特征后, 根据云生成算法^[20], 得到如图1(b)所示状态云。文中, 论域 $[X_{\min}, X_{\max}] = [0, 1]$, 依相对劣化度确定。

表3 云模型数字特征

Table 3 Digital characteristics of cloud model

参数	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4
Ex_i	0.000	0.289	0.500	0.711	1.000
En_i	0.143	0.123	0.107	0.123	0.143
He_i	0.008	0.001	0.008	0.001	0.008
En'_i	0.167	0.119	0.084	0.119	0.167

3.2 云运算

对单项状态量进行状态划分时, 通常会出现某一单项定量指标 x_m , 在给定的状态划分准则下可能同时属于多个状态云的情况。通常根据该值与各状态云中心 Ex_i 的距离 $d_i = |Ex_i - x_m|$ 判断其状态归属: 若 $d_j = \max\{d_i | i=1, 2, \dots, 5\}$ ($j=1, 2, \dots, 5$), 则 x_m 可用定性状态 H_j 描述。然而, 这一方法忽略了 x_m 属于其他状

态云的归属信息。为此, 文中引入云聚合运算, 用聚合云表示 x_m 的状态。

定义 1^[9]: 设 $Y_i = (Ex_i, En_i, He_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为同一论域 X 上的一组正态云, Ω 为该论域上全体正态云的集合, 定义正态云加权算数平均(CWAA)算子 $CWAA: \Omega^n \rightarrow \Omega$,

$$CWAA_w(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \sum_{i=1}^n w_i Y_i. \quad (13)$$

式(13)中, $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为 Y_i 的加权向量;

$w_j \in [0, 1]$ ($j=1, 2, \dots, n$), $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。在单项状态量定性云的生成过程中, $w_j = u_i$ 表示定量指标 x_m 同时属于各状态云 Y_i 的隶属度。若 x_m 同时属于 k 个定性概念, 则表示其状态归属的状态云为 $Y = \sum_{i=1}^k u_i Y_i$, 并且对于不满足 3σ 准则的云滴 (x, y) , 其定性状态云不参与合成运算。

定义 2^[9]: 给定云滴 (x, y) 对于定性概念 T 的贡献由得分函数 $s = xy$ 确定。对于任何一个由多个云滴组成的云 Y , 其得分函数的期望值 $\hat{s}$ 可以看作该云对于定性概念 T 的总得分

$$\hat{s}(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (14)$$

对于云 Y_1 和云 Y_2 , 若存在 $\hat{s}(Y_1) \geq \hat{s}(Y_2)$, 则 $Y_1 \geq Y_2$ 。

3.3 置信准则

3.3.1 整体绝缘状态的判断

以 Y 为表示变压器绝缘状态的综合云, 用综合云的中心与定性云中心距离 RID 作为该云朵与各定性云朵 Y_i 的相对贴近度, λ 为置信水平。如果 λ 满足

$$\lambda = \min\{RID_i | i=0, 1, \dots, 4\}. \quad (15)$$

则认为变压器当前绝缘状态为 H_i 。

3.3.2 故障类型的判断

根据式(13)、(14), 采用聚合云从理论上确定设备整体绝缘状态的等级。然而, 对于得到的故障状态云, 在不知道得分函数 s 的具体概率分布情况下无法获取 $\hat{s}$ 和 s_{mid} , 因而无法确定最终的故障类型。为此, 笔者根据正态云生成算法, 基于蒙特卡洛模拟的思想对样本的 s 加以估计, 以样本均值作为 s 的估计 $\hat{s}$

$$\hat{s} = \bar{s} = \sum_{i=1}^N s_i / N \quad (16)$$

然后根据式(14)计算各故障云的总得分并排序, 得分越高表示发生该故障的可能性越大。

3.4 变压器绝缘状态评估流程

根据最优变权重系数法得到各单项状态量和综合状态量的权重值后,以正态云模型和云聚合运算为主导思想的电力变压器绝缘状态评估流程见

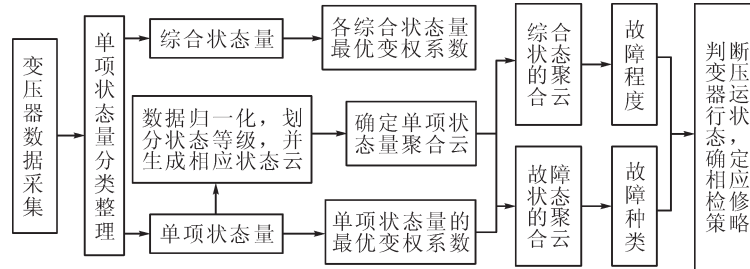


图2 变压器绝缘状态评估流程

Fig. 2 Flow chart of transformer insulation condition assessment

2)读取各单项状态量 x_m ,根据相对劣化度的定义归一化处理,归一化数据表示为 x_m^N ,确定该值对应的云朵,直至所有单项状态量产生对应云朵;

3)依据式(13)生成每个单项状态量的聚合云;

4)根据最优变权法计算单项状态量、综合状态量和故障状态集的最优变权重系数;

5)采用 CWAA 进行合成运算。得到各综合状态量和各故障集的聚合云;然后根据各综合状态量聚合云计算最终状态云;

6)依式(15)给出的置信准则和 5)计算得到的综合状态云判断变压器当前绝缘状态;

7)计算各故障状态云的得分,根据得分由高到低排序,确定变压器故障类型;

8)根据 6)和 7)的评估结果给出制定相应检修策略。

4 算例分析

为验证文中所提评估策略的有效性,以四川某变电站 220 kV 主变压器(SZ11-120000/220)为例,给出 2012 年某天的试验数据进行验证分析。各单项状态量的试验数据见表 4、5。其中,油色谱数据和其他在线数据为当日 3 次采样数据,变压器油试验、电气试验数据为当日试验值,检修情况为截至当日的统计结果。

该变压器无家族缺陷,日常巡检过程中未发现明显故障;定检过程中更换过一次变压器呼吸器硅胶,对该设备其他试验数据无影响;同类设备有变压器漏油、铁心低阻引发的多点接地和变压器油老化换油等大修记录。

将表 4、5 给出的数据进行归一化处理,结合检修信息,依式(13)生成相应状态量的聚合云,并根据式(5)、(6)给出的最优变权重系数法计算各单项状态

图 2,具体过程如下。

1)选择适当的评价标准,将设备绝缘状态划分为 $g+1$ 个等级,根据式(1)进行定量映射,确定单项状态量和绝缘故障集;

表 4 单项状态量在线测试数据

Table 4 Online test data of independent status parameters

单项状态量	实测值			初始值	注意值
	1 st	2 nd	3 rd		
$A_{11}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	282.0	286.0	287.0	5.8	150.0
$A_{12}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	16.6	16.6	16.7	9.0	100.0
$A_{13}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	0.2	0.2	0.2	0.0	5.0
$A_{14}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	51.6	51.7	51.7	4.5	50.0
$A_{15}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	88.2	88.4	88.4	2.0	65.0
$A_{16}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	1.57	1.57	1.59	1.00	3.00
A_2/pC	107	108	108	35	500
$A_3/\%$	2.81	2.85	2.86	0.50	4.00
$A_4/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	10.8	10.8	10.8	2.8	25.0

表 5 单项状态量试验数据

Table 5 Test data of independent status parameters

单项状态量	试验值	初始值	注意值
B_1/kV	50.8	52.0	35.0
$B_{12}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.05	0.00	0.20
B_{21}	2.28	2.47	1.50
$B_{22}/(\text{G}\Omega\cdot\text{m})$	57.6	62.0	3.0
$B_{23}/\text{M}\Omega$	420	1 200	150
$B_{24}/\%$	2.80	1.96	5.00
$B_{25}/\mu\text{A}$	0.21	0.05	1.00
B_{26}	920	1 000	250
$B_{27}/\%$	0.41	0.20	0.80
B_{28}/mA	2 490	21	100
B_{29}	1.58	2.10	1.30

量和综合状态量的最优变权重系数,见表 6。特别地,对于相对劣化度大于 1 的指标,其状态云直接用 Y_4 表示。

根据 CWAA 算子,计算出各综合状态的聚合云:
 $Y_{A1}=(0.225, 0.555, 0.008)$, $Y_{A2}=(0.455, 0.138, 0.005)$;
 $Y_{B1}=(0.238, 0.143, 0.007)$, $Y_{B2}=(0.448, 0.138, 0.006)$,

表6 各单项状态量权重系数及聚合云
Table 6 Weight coefficient and aggregation cloud of independent status parameters

单项状态量	聚合云	最优变权重系数	
		单项	综合项
H ₂ 体积分数	(0.000,0.143,0.008)	0.355	0.436
CH ₄ 体积分数	(0.073,0.146,0.007)	0.261	
C ₂ H ₂ 体积分数	(0.038,0.147,0.008)	0.137	
C ₂ H ₄ 体积分数	(1.000,0.143,0.008)	0.119	
C ₂ H ₆ 体积分数	(1.000,0.143,0.008)	0.057	
油中含气量	(0.351,0.139,0.004)	0.071	0.188
局部放电量	(0.159,0.139,0.006)	0.493	
套管介损	(0.898,0.137,0.005)	0.329	
油中含水量	(0.460,0.135,0.005)	0.178	
油击穿电压	(0.195,0.146,0.007)	0.631	
糠醛体积分数	(0.312,0.138,0.005)	0.369	0.086
极化指数	(0.217,0.139,0.005)	0.262	
体积电阻率	(0.065,0.145,0.007)	0.066	
铁心绝缘电阻	(0.921,0.140,0.009)	0.037	
绕组直流电阻互差	(0.332,0.139,0.003)	0.128	
中性点油流静电电流	(0.177,0.137,0.006)	0.034	0.243
纸板聚合度	(0.095,0.143,0.007)	0.051	
绕组绝缘介损	(0.452,0.135,0.005)	0.194	
铁心接地电流	(1.000,0.143,0.008)	0.111	
绝缘电阻吸收比	(0.865,0.136,0.005)	0.117	
家族缺陷	(0.000,0.143,0.008)	0.436	0.047
同类设备检修记录	(0.224,0.139,0.005)	0.345	
该设备检修记录	(0.046,0.146,0.008)	0.219	

$Y_{B3}=(0.087,0.142,0.007)$,并生成最终表示变压器绝缘状态的综合云: $Y=(0.317,0.141,0.007)$ 。

依式(15)给出的置信准则, $\lambda=RID_1$,认为当前情况下该变压器整体绝缘状态为良好,可延期检修。

根据表2给出的变压器单项状态量与综合状态量的对应关系,以各故障集中各故障因素的相对重要程度赋予最优变权,过程同表6中各单项状态量权重系数的计算。依式(13)和式(14)分别计算各故障集的CWAA结果和得分值,计算结果见表7。通过比较各绝缘故障类型的聚合云得分 $\hat{s}$ 可知: $\hat{s}_2>\hat{s}_1>\hat{s}_7>\hat{s}_6>\hat{s}_5>\hat{s}_4>\hat{s}_3$ 。

从表7可以看出,铁心故障的定性得分值明显大于其他状态的定性得分,表明变压器的当前绝缘状态可能故障类型为铁心故障,同时可能产生绝缘受潮及绝缘油劣化等故障。

通过计算表征铁心故障定性云与各定性云的相对贴度,得到 $\lambda=RID_4$,属于严重故障的范畴。综合

表7 各综合状态量权重系数及CWAA结果
Table 7 Weight coefficient and aggregation cloud of comprehensive fault status parameters

绝缘故障类型	CWAA结果	得分
绝缘受潮	(0.480,0.130,0.008)	0.346
铁心故障	(0.943,0.138,0.008)	0.672
局部放电	(0.190,0.141,0.006)	0.133
油流放电	(0.203,0.140,0.006)	0.143
电弧放电	(0.260,0.141,0.007)	0.183
绝缘老化	(0.300,0.139,0.006)	0.213
绝缘油劣化	(0.465,0.141,0.007)	0.329

以上信息可知,虽然变压器整体绝缘状态为良好水平,但其局部绝缘受损,具体表现为铁心故障。因此,应安排尽快检修。

为了进一步验证该方法的有效,按照上述评估方法将由文献中归纳得到的19组数据和对实际运行变压器检修过程中测试得到的33组数据代入文中状态评估体系进行评估。在这52组数据中,28组取自运行状态异常的变压器,24组取自正常运行变压器,样本数据具体情况见表8。

表8 53组测试样本数据

Table 8 53 sets sample data

数据类型	数据组数
正常数据	无故障 24
	绝缘受潮 3
	铁心故障 1
	局部放电 4
故障数据	油流放电 1
	电弧放电 2
	绝缘老化 9
	绝缘油劣化 8

根据表8给出的样本数据,首先分别计算了各单项状态量、综合状态量的最优变权重系数和状态云,并通过云运算规则得出描述变压器整体绝缘情况的状态云。然后采用集对分析法、模糊综合评价法和层次分析法分别计算了各自的评价结果并进行了对比分析,结果见表9。

表9 不同评价方案下评估结果对比

Table 9 Comparison of assessment results with different strategies

评估方法	评估结果				
	优秀	良好	一般	故障	严重故障
集对分析	4	13	5	26	2
模糊综合评价	3	13	4	26	2
层次分析法	3	15	6	27	1
文中方法	3	14	6	26	3

在评估结果的统计过程中,文中将优秀、良好和一般 3 种状态归结为正常状态,而将故障和严重故障状态归结为异常状态。从表 9 可以看出,与传统的集对分析法、模糊综合评价法和层次分析法相比,笔者提出的方法可以得到类似的评估准确度,评估结果与实际情况基本吻合。这说明文中所述方法能够较为准确地反映变压器的运行状态。然而,根据采用文中所提方法的评估结果,属于正常运行状态的测试样本数量比实际给出的少一组:实际正常状态的样本数据为 24 组,文中为 23 组,而这组缺少的样本被划分到了故障样本中,具体故障为绝缘受潮。

通过进一步分析发现,该组样本数据中 C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/H_2 和 C_2H_4/C_2H_6 的比值采用 IEC 三比值法无法分类,且状态量数值在注意值附近,而油中含水量为正常水平的 3 倍。考虑到该组数据是通过在线监测系统采集得到的,因此数据本身存在一定的不确定性。并且在单项状态量常权值较小情况下,采用集对分析法、模糊综合评价法和层次分析法不能根据含水量的明显变化动态调整权值大小。通过以上分析可以看出,文中提出的评估方法不但能够同传统的集对分析法、模糊综合评价法和层次分析法等一样,能根据状态量数值大小合理评估整体绝缘水平,并且对于某些由单项状态量超标所致的潜伏性故障能提早发现,因而评估结果更为全面、可靠,对于针对性的故障检修更具指导意义。

5 结论

针对电力变压器状态评估问题,将主、客观赋权法相结合,提出了一种采用最优变权重系数正态云模型的评估策略。通过云运算评估了变压器整体绝缘状态和故障诊断,并利用实测数据和预防性数据进行了验证和对比分析,得到以下结论:

1)采用最优变权重系数法,根据状态量取值动态调整权值,更能反映变压器的真实运行状态;

2)采用复合二元语义方法实现定性语言到定量标度之间的转换,并客观给定云模型数字特征,使评估结果更加真实可信;

3)以综合状态量和故障状态集的分类方式,在实现对变压器整体绝缘状态评估的同时,能够确定具体绝缘故障类型,为针对性的在线状态检修提供了科学依据。

参考文献:

[1] SINGH J, SOOD Y R, JARIAL R K, et al. Condition monitoring of power transformers-bibliography survey[J]. IEEE

Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(3):11-25.

- [2] 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.
- [3] MALPURE BHASKAR D, CHAUDHARI SUSHIL E. Importance of bushing-DGA in condition assessment of power transformers[C]//IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012:589-592.
- [4] 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 power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):822-828.
- [5] 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.
- [6] 姜万录, 吴胜强. 基于 SVM 和证据理论的多数据融合故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8):1738-1743.
JIANG Wanlu, WU Shengqiang. Multi-data fusion fault diagnosis method based on SVM and evidence theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8):1738-1743.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Elec-

- trotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [10] 周 淦, 孙 超, 廖瑞金, 等. 基于云理论的变压器多重故障诊断及短期预测方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1453-1460.
- ZHOU Quan, SUN Chao, LIAO Ruijin, et al. Multiple fault diagnosis and short-term forecast of transformer based on cloud theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1453-1460.
- [11] 许惠君, 王宗耀, 苏浩益. 基于 DGA 的反馈云熵模型电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 115-119.
- XU Huijun, WANG Zongyao, SU Haoyi. Dissolved gas analysis based feedback cloud entropy model for power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 115-119.
- [12] IEEE Std C57104—2008 IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers[S]. 2008.
- [13] 国家电网公司企业标准.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.
- [14] HERRERA F, MARTINEZ L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(6): 746-752.
- [15] 罗赞骞, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和熵权的网络性能综合评估模型[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2009, 21(6): 771-775.
- LUO Yunqian, XIA Jingbo, CHEN Tianping. Network performance comprehensive evaluation model based on cloud model and entropy weight[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2009, 21(6): 771-775.
- [16] 张翠玲, 王立志, 王安娜, 等. 基于模糊 AHP 变压器运行状态判断矩阵建立方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 317-321.
- ZHANG Cuiling, WANG Dazhi, WANG Anna, et al. Establishment of judgment matrices for the condition assessment of the power transformer based on fuzzy AHP[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(3): 317-321.
- [17] 王雁凌, 张雪佼, 阎敬民. 基于变权灰云模型的风电场并网技术性综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3546-3551.
- WANG Yanling, ZHANG Xuejiao, YAN Jingmin. Weight-varying gray cloud model based comprehensive evaluation on technical performance of overall grid-integration of wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3546-3551.
- [18] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
- LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [19] 徐 刚, 马宏忠, 陈 楷, 等. 电力变压器噪声的主动控制[J]. 变压器, 2013, 50(5): 15-17.
- XU Gang, MA Hongzhong, CHEN Kai, et al. Active control of power transformer noise[J]. Transformer, 2013, 50(5): 15-17.
- [20] 邵莴峰, 樊 伟, 陈江波, 等. 电力变压器故障诊断中交互式推理的研究与实现[J]. 变压器, 2013, 50(3): 70-72.
- SHAO Minfeng, FAN Wei, CHEN Jiangbo, et al. Research and implementation of interactive reasoning in power transformer fault diagnosis[J]. Transformer, 2013, 50(3): 70-72.
- [21] WANG Jianqiang, PENG Lu, ZHANG Hongyu, et al. Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information[J]. Information Sciences, 2014(274): 177-191.
- 郑理科(1979—), 男, 工程师, 硕士, 从事电网运维专业管理工作。
- 李帅兵(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压电力设备在线监测及状态检修、高压电力设备故障诊断。
- 王晓东(1985—), 男, 助理工程师, 本科, 从事变压器专业管理工作。