

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.023

220 kV 变压器油中溶解气体体积分数动态预警方法

陈 太¹, 郑作霖¹, 娄坚鑫¹, 康 铮², 吴志伟², 郑跃胜², 舒胜文²

(1. 福建和盛高科技产业有限公司, 福州 350003; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要: 油中溶解气体分析是监测电力变压器运行状态最常用的方法之一。针对现有标准对油中溶解气体体积分数预警阈值设定单一和裕度过大等不足,提出了一种基于数据统计和分布模型的220 kV变压器油中溶解气体体积分数动态预警方法。首先,对某电网近10万条220 kV变压器油中溶解气体体积分数数据进行统计与分类处理,并建立了油中溶解气体体积分数的分布模型;然后,根据油中溶解气体体积分数实际预警数据统计结果,通过分布模型的逆累积运算计算得到动态预警值,从而实现了一种油中溶解气体体积分数的动态预警方法;最后,将动态预警方法与现有标准以及10%划分规则的计算结果进行了对比分析,并讨论了预警阈值的动态特性。结果表明,该方法与现有标准相比能够降低漏预警率,与10%划分规则相比能够降低误预警率,即在漏报警和误报警之间取得了一个较好的平衡点,具有一定的工程应用价值。

关键词: 变压器; 油中溶解气体; 动态阈值; 分布模型; 在线监测

Dynamic Early-warning Method Based on Dissolved Gas in Oil of 220 kV Transformer

CHEN Tai¹, ZHENG Zuolin¹, LOU Jianxin¹, KANG Zheng², WU Zhiwei²,

ZHENG Yuesheng², SHU Shengwen²

(1. Fujian Hoshing Hi-Tech Industrial Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Dissolved gas analysis in oil is one of the most common methods for monitoring the operating state of power transformers. The existing standard set the early-warning threshold for volume fraction of dissolved gas in oil as a fixed and too large value. In response to this problem, a dynamic early-warning method based on data statistics and distribution model is proposed in this paper. Firstly, nearly 100,000 volume fraction data of dissolved gas in oil for 220 kV transformer in a certain power grid is statistically and classified, and the volume fraction distribution model of dissolved gas in oil is established. Then, based on the actual volume fraction early-warning data of dissolved gas in oil, the dynamic early-warning value is calculated by the inverse accumulation operation of distribution model. Thus, a dynamic early-warning method for the volume fraction of dissolved gas in oil has been realized. Finally, the dynamic early-warning method is compared with the existing standard and the calculation results of the 10% partition principle and the dynamic characteristics of early-warning threshold is discussed. The results show that this method can reduce missed alarms compared with the existing standard, also can reduce false alarms compared with the 10% partition principle. In other words, a good balance between missed alarm and false alarm has been achieved, which has a certain value of engineering application.

Key words: transformer; dissolved gas in oil; dynamic threshold; distribution model; online monitoring

0 引言

电力变压器作为电网中大规模投运的核心设

备,其运行状态对于电网的安全稳定至关重要。油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)对于发现油浸式电力变压器内部潜伏性故障卓有成效,并

于70年代后开始普及国内电网^[1]。从1996年至今国内颁布的《电力设备预防性试验规程》中,油中溶解气体分析均被置于油浸式电力变压器试验项目的首要位置^[2]。随着传感技术的不断进步和发展,变压器油中溶解气体在线监测技术开始得到广泛应用,已成为监测油浸式电力变压器运行状态的主要手段之一^[3-5]。

合理的告警阈值设定,有助于减少油中溶解气体在线监测装置的误报和漏报,提高告警有效性。然而,在线监测装置由于受到现场大气和电磁环境的影响,数据准确性和稳定性不如离线试验数据。由此也导致不同运行环境下处于正常运行状态的变压器油中溶解气体体积分数存在较大差异,难以固定一个普适性强的告警阈值。因此,目前针对油中溶解气体在线监测告警阈值的设定,尚未制定相关国标或行标,仅有行标对在线监测装置^[6]及其检验进行了规范^[7];告警阈值的设定仍然参考针对离线数据的《GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[8]。该标准基于变压器运行中各类故障与所产生气体种类以及体积分数的关系,利用特征气体法及比值法来判断变压器故障。该标准适用的电压等级为6~1 000 kV,适用的设备包含变压器、互感器、套管等。然而,该标准中仅给出了氢气、乙炔及总烃体积分数及其产气率的阈值,另外两种气体仅采用比值法进行较为粗略的判定;且在不同电压等级下并未细分,评判法则固定,应用于在线监测时存在不够灵活的问题^[9]。此外,一些研究和工程应用经验表明,国标中的部分油中溶解气体体积分数阈值设置过高,对于某些变压器故障类型存在一定的漏预警率^[9]。

针对现有标准存在的不足,大量学者开始研究油中溶解气体分布特性的新规律,并将数理统计方法应用于油中溶解气体分析中。文[10]引入了4种不同的数理统计模型,对油色谱数据进行了模型分析。文[11]根据MCD稳健理论对油色谱数据中的部分气体数据进行了异常值分类,避免了该部分数据对分布模型计算带来的干扰。文[12]通过一种改进的小波消噪方法对油色谱数据进行预处理,减少了数据中的信号波动与噪声。上述文献对油色谱数据进行预处理,提升了原始数据质量,一定程度上改善了气体体积分数阈值的计算精度。文[13]通过对数据进行清洗后,根据10%划分规则计算出了220 kV电力变压器油色谱气体体积分数阈值,但普遍较低,存在较高的误预警率。文[9]则通过最小错误和最小损失诊断法计算出了变压器中溶解气体

的阈值以及异常概率,并与国标阈值进行对比,认为目前国标阈值设定过高。

针对现有标准对油中溶解气体体积分数预警阈值设定单一和裕度过大等不足,文中提出一种基于数据统计和分布模型的220 kV变压器油中溶解气体体积分数动态预警方法。首先,根据某电网近5年220 kV变压器油中溶解气体体积分数数据的统计结果,建立油中溶解气体体积分数的分布模型;然后,根据油中溶解气体体积分数实际预警数据统计结果,通过分布模型的逆累积运算计算得到动态预警值;最后,将动态预警方法与现有标准以及10%划分规则的计算结果进行对比分析,并讨论预警阈值的动态特性。文中旨在通过设定变压器油中溶解气体体积分数动态阈值,在漏报警和误报警之间取得一个较好的平衡点,在提高预警准确性的同时降低误报警带来的运维工作量。

1 油中溶解气体体积分数分布模型

1.1 数据处理

文中采集某地区电网近5年来56台220 kV电力变压器油色谱在线监测数据作为分析样本,共有99 428组数据。其中,在线监测的油中溶解气体种类包括氢气(H₂)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)、乙炔(C₂H₂)、乙烯(C₂H₄)、乙烷(C₂H₆)、总烃。

主要的在线监测装置型号为和盛科技SPM-2,其采用气相色谱法进行监测,取气方法采用半导体检测器加全真空脱气技术,具有脱气率高,单次取样油量少的特点,采样周期约为55 min。该装置经过多年的运行,通过与停电预防性试验数据和带电检测数据的比对分析,监测数据的准确性和稳定性是基本令人满意的^[14]。

1.1.1 异常数据的处理及取舍

通过分析现有油色谱数据,发现油中溶解气体数据存在着大量的空值、零值和超出量程的数值。造成这些数据异常的原因多种多样,主要包括:设备检修造成无数据上传,传感器装置通道异常,现场电磁干扰。这类数据不具备统计意义,对后期建模与计算将产生较大影响,归为异常数据。

文中采用达依拉准则对原始数据进行数据筛选^[15]。数据样本近10万条,满足达依拉准则对数据样本数量的要求。根据切比雪夫不等式,若随机变量 A 的期望 $E(A)=\mu$,方差 $D(A)=\sigma^2$,则对于任意给定的正数 ε ,有

$$P(|A-\mu|\geq\varepsilon)\leq\frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \quad (1)$$

当 ε 取 3σ 时,可以认为,随机变量 A 的取值几乎

全部集中在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 区间内,超出这个范围的可能性仅占不到0.3%,剩余的99.7%的数据得以保存。经过筛选之后,可在保留原始数据基本特征的基础上,剔除对整体数据产生较大影响的异常数据,即可得到第1次优化后的数据。

1.1.2 基于线性插值法的数据补全

对上述剔除的异常数值后的优化数据,为了弥补可能存在的数据断层,需要利用数据补全的方法对其进行进一步的处理。数据缺省的补全工作需要保守考虑,原因在于油色谱数据量庞大,并且不同变压器的数据趋势走向有所差异,若贸然填进其他数据可能会造成新的奇异值。文[16]所采用的均值替换法、多重替代法、回归替换法虽然都是基于原始数据,但由于油色谱数据存在差异,上述补全方法对数值的处理往往不够保守。因此,文中采取关联前后数据的线性插值法对数据进行补全处理^[17]。

线性插值法是指使用连接两个已知量的直线来确定在这两个已知量之间的一个未知量的值的方法。设已知坐标 (m_0, n_0) 与 (m_1, n_1) ,要得到 (m_0, m_1) 区间内某一位置 m 在直线上的值。两点式直线方程为

$$\frac{n-n_0}{n_1-n_0} = \frac{m-m_0}{m_1-m_0} \quad (2)$$

当方程两边的值为 k ,由于 m 值已知,即可将方程变形为式(3),得出 n 值。

$$n = n_0 + k(n_1 - n_0) \quad (3)$$

通过线性插值法处理之后,即可得到第2次优化后的最终数据。

以某变压器油中溶解氢气全年的在线监测数据为例,原始数据和处理后的数据见图1。

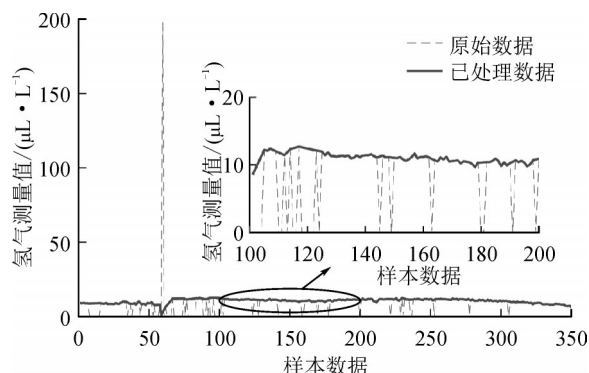


图1 某变压器油中氢气数据处理

Fig. 1 Data processing of H_2 dissolved in transformer oil

由图1中可以看出,处理后的数据保持了原有的数据特征,不仅剔除了奇异数值,也补全了数据空缺,提升了整体数据质量。

1.2 概率分布模型

威布尔分布被广泛应用于各种寿命试验的数

据处理,主要用于描述金属材料的疲劳寿命问题、电子元器件的寿命问题等,尤其适用作为机电类产品磨损累计失效的分布形式^[18-19]。有研究表明,油中溶解气体的分布同样符合威布尔分布^[9,13]。文中通过对比两参数威布尔分布和对数正态分布的拟合效果,发现两参数威布尔分布模型拟合度更高,因此采用该分布模型对油中溶解气体体积分数进行评估与建模。

1.2.1 威布尔分布的原理

二参数威布尔分布的密度函数和累积分布函数分别为:

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-(x/\eta)^\beta} \quad (4)$$

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\eta)^\beta} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: β 表示威布尔斜率,也称形状参数,是威布尔分布中最重要且具有实际意义的参数; η 表示特性值,也称比例参数。当这两个参数确定后,威布尔参数模型就唯一确定。

1.2.2 油中溶解气体分布模型

以某220 kV变压器油中总烃为例,基于威布尔分布建立的总烃体积分数概率分布直方图见图2、累积分布图见图3。

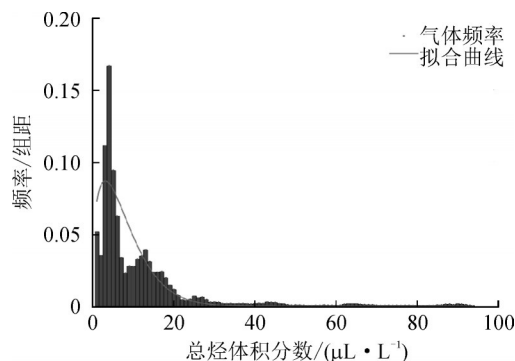


图2 某220 kV变压器总烃体积分数概率分布直方图

Fig. 2 Probability distribution histogram of total hydrocarbon volume fraction for a 220 kV transformer

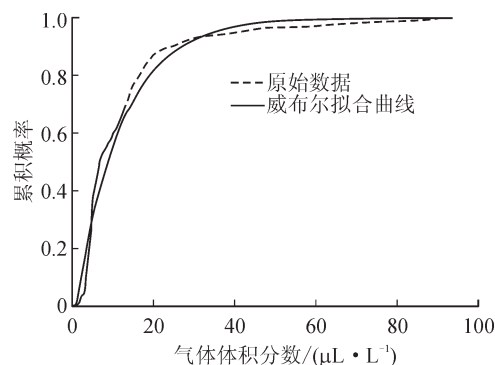


图3 某220 kV变压器总烃体积分数累积分布图

Fig. 3 Cumulative distribution diagram of total hydrocarbon volume fraction for a 220 kV transformer

同理,可拟合得到其他油中溶解气体体积分数的分布模型,拟合度见表1。从表1可以看出,氢气与烃类气体对威布尔分布模型的拟合度都较高。结合图3中累积概率分布图,可以得出:该220 kV变压器油中溶解气体体积分数大多落在(0~60)μL/L之间,计算所得的 $\beta=1.339$, $\eta=0.057\ 27$ 。由威布尔模型的性质可知,当 $\beta>1$ 时, β 的值越大,峰值越高,寿命越短。而氢气的国标阈值为150 μL/L,样本数据大多落于气体体积分数较低的水平,符合威布尔分布模型的规律。故对于拟合度较高的气体,适合采用威布尔分布进行建模分析。CO是固体绝缘老化过程与故障情况下的劣化分解的产物,一般没有严格的界限。从拟合度来看,CO不适合用威布尔分布模型拟合分析。

表1 某220 kV变压器各溶解气体体积分数拟合度

Table 1 Numerical simulation methods adopted in different periods in the interrupting process of vacuum switch arc

气体种类	H ₂	CO	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	总烃
拟合度	0.72	0.14	0.99	0.99	0.99	0.99	0.74

2 油中溶解气体体积分数动态阈值

2.1 阈值计算原理

若数轴上某随机点的坐标为 X ,则分布函数 $F(x)$ 在 x 处的函数值就表示 X 落在区间 $(-\infty, x)$ 上的概率,即

$$P\{X\leq x\}=F(x)$$
 (6)

在已知分布模型的情况下,若对分布函数求其逆函数,则有

$$x'=F^{-1}(P)$$
 (7)

则通过设定一个概率值,即可确定对应的 x' 。由于油中溶解气体体积大体上服从威布尔分布,其分布函数式(5), β 和 η 的确定对大量原始数据通过极大似然估计法进行拟合而得出。式(5)的似然函数为

$$L(\theta|x)=\prod_{i=1}^n\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{x_i}{\eta}\right)^{\beta-1}e^{-\left(\frac{x_i}{\eta}\right)^{\beta}}$$
 (8)

对式(8)取对数处理并分别对 β 和 η 进行偏导,联立得到

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(\theta|x)}{\partial \beta}=0 \\ \frac{\partial \ln L(\theta|x)}{\partial \eta}=0 \end{cases}$$
 (9)

在解出联立方程组后,代入数据即可计算出所需系数 β 和 η ,从而确定式(9)。

对式(9)求逆函数,可得

$$x'=F^{-1}(\alpha)=-\eta(\ln(1-\alpha))^{1/\beta} \quad \alpha\in[0,1]$$
 (10)

式(10)中, α 为累积概率值,通过设定不同的 α ,可以得到不同的 x' 即阈值。

2.2 预警值计算方法

以某种油中溶解气体为例,3种气体体积分数预警值计算方法见图4。

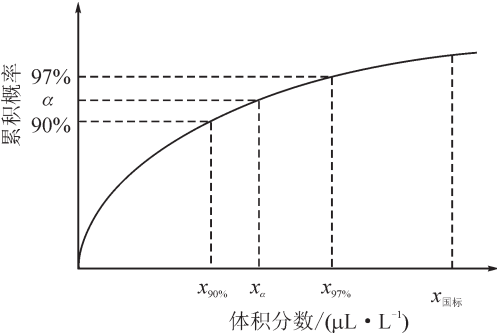


图4 3种气体体积分数预警值计算方法

Fig. 4 Three kinds of method for calculating the early-warning value of gas volume fraction

方法1是国标法。《GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则》规定各类油中溶解气体预警阈值,为固定值,例如H₂设定为150 μL/L。

方法2是10%划分规则。IEC 60599—2015^[20]通过统计分析国外上万台变压器的数据,提出在进行变压器油中溶解气体的数据管理时,可以认为10%的变压器需要检修,其他90%正常。ZTZ公司的变压器专家Sokolov进一步分析认为,在需要检修的变压器中,约只有3%的设备是属于需要更换的故障设备^[21]。由此,根据90%和97%累积概率计算得到的阈值分别为注意值和警示值。该方法基于大量数据统计,通过故障设备所占比例从整体上反映油中溶解气体体积分数的预警比例,较为符合客观规律,但该计算值也是固定值。

方法3是动态预警法。工程实际中,由于不同运行环境和工况下的变压器状态存在一定的差异,油中溶解气体体积分数在线监测通常是参考国标给出的阈值,根据实际运行经验设定预警值。由此,可将实时统计得到的预警数占比(缺陷率)作为累积概率值 α ,代入式(10)动态计算得到预警值 x_{α} 。由于该累积概率值 α 随着变压器的运行状态在实时变化,因此得到的预警值是动态变化的。

3 结果与分析

3.1 对比分析

3种方法计算得到的该地区220 kV变压器各类油中溶解气体体积分数预警值和预警比例见表2。

表2 220 kV变压器油中溶解气体体积分数预警值和比例
Table 2 Early-warning values and ratios of gas volume fraction in oil for 220 kV transformer

气体	国标法		10%划分规则		动态预警法	
	预警值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	预警比 例/%	预警值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	预警比 例/%	预警值/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	预警比 例/%
H ₂	150	0.11	44.10	11.18	68.80	3.53
CH ₄	—	—	19.06	8.74	31.72	2.73
C ₂ H ₂	5	0.05	3.06	0.15	5.19	0.05
C ₂ H ₄	—	—	6.91	7.90	15.08	4.02
C ₂ H ₆	—	—	7.55	8.34	14.39	4.18
总烃	150	0.58	30.06	8.43	54.06	4.69

从表2可知,动态预警法得到的预警值和预警比例处于国标法和10%划分规则之间,即与现有标准相比能够降低漏预警率,与10%划分规则相比能够降低误预警率,即在漏报警和误报警之间取得了一个较好的平衡点。

以变压器油中H₂体积分数为例,原始数据及3种方法计算得到的预警值和预警比例见图5。其中,动态预警方法取前50 000组数据作为基准数据,剩下的数据以5 000组为步长,求取动态预警阈值。

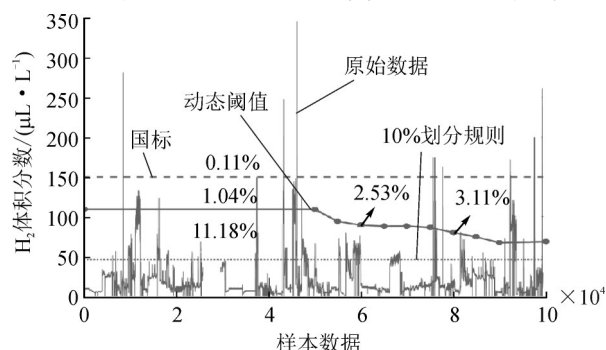


图5 H₂体积分数预警值和比例
Fig. 5 Early-warning values and ratios of H₂ volume fraction

从图5可以看出,若根据国标给出的阈值150 $\mu\text{L}/\text{L}$ 进行预警,H₂体积分数预警占比仅为0.11%,对于一些潜伏性故障可能会出现漏预警的情况。若以10%划分规则的进行计算,预警比例高达11.18%,预警条数达11 116条,如此高的预警比例虽然可以涵盖更多的潜伏性故障,但同时也引入了大量干扰数据,由此带来很高的预警处理时间和人力成本,不适合工程应用。动态预警方法得到的预警值和比例位于国标法和10%划分规则之间,且随着时间的推移动态变化,从而在提高预警精确性的同时又减小了高误报警率带来的运维成本,较适合工程应用。

3.2 阈值动态特性

采用提出的动态预警法,以单台变压器为分析对象,对部分220 kV变压器油中溶解H₂体积分数的预警值进行计算,并统计其运行年限,结果见表3。

表3 油中H₂体积分数预警值与运行年限
Table 3 Early-warning values of volume fraction for H₂ and serviced year

变电站	变压器	预警值/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	运行年限
站A	1	42.954 3	13
	2	11.617 6	3
站B	1	8.729 0	4
	2	10.249 4	16
站C	1	120.915 7	9
	2	18.673 7	4
站D	1	6.526 6	19
	2	34.651 7	8

由表3可以看出,不同变压器的预警值存在较大的差异。研究表明,变压器的运行年限是影响其运行状态的主要因素之一^[22]。为此,有必要研究油中溶解气体体积分数预警值随运行年限的动态变化特性。

由于随着变压器运行年份的增长,变压器内会发生一定次数的局部放电以及电弧放电故障,H₂是主要分解产物之一,故选取油中H₂作为分析对象。变压器油中H₂体积分数预警值与运行年限的关系见图6。

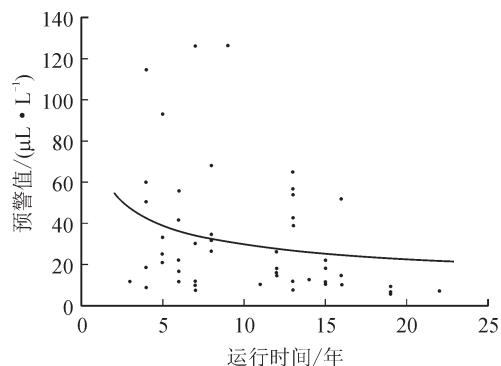


图6 油中H₂体积分数预警值与运行年限的关系
Fig. 6 Relationship between early-warning value of volume fraction and serviced year for H₂ in oil

从图6可以看出,预警值总体上随运行年限的增长而减小。以一般电力变压器30年运行寿命为界,根据散点图的分布情况进行分析,投运年限小于15年的台数高达36台,占总台数的70%。从相关系数的计算结果来看,H₂预警值与运行年限的相关系数不高,仅为-0.3,属于弱相关性;但显著性检验结果表明二者在95%程度上显著,说明H₂预警值与

运行年限呈显著负相关关系, 较为符合图 7 所示的电力变压器浴盆曲线^[23]早中期状态。

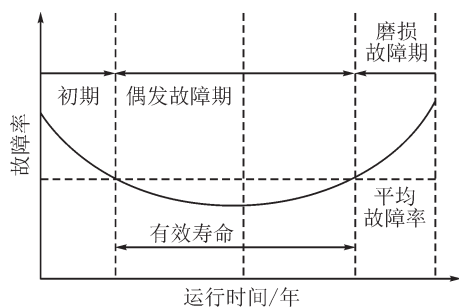


图 7 电力变压器的浴盆曲线

Fig. 7 Bathtub curve of power transformer

需要说明的是, 文中提出的动态预警方法是一种基于数理统计的通用分析方法, 阈值是建立在检验气体分布模型拟合度水平的基础上通过分布模型计算得出的值, 该方法并不仅仅适用于 220 kV 变压器, 同样适用于其他电压等级变压器, 前提是监测数据的样本数要满足统计意义。实际运行工程经验表明, 国标中针对离线数据设置的单一阈值, 难以适应变压器油中溶解气体的在线监测告警问题。在保证监测数据稳定性的前提下, 在线监测的阈值应当探索根据不同的维度进行个性化设定, 如不同电压等级、不同生产厂家、不同运行环境等, 甚至可以对单台变压器建立其特有的预警阈值。后续将对该问题开展进一步深入研究。

4 结论

文中针对现有标准对油中溶解气体体积分数预警阈值设定单一和裕度过大等不足, 提出了一种基于数据统计和分布模型的 220 kV 变压器油中溶解气体体积分数动态预警方法, 并开展了应用分析, 得出了以下结论:

1) 动态预警法得到的预警值和预警比例处于国标和 10% 划分规则之间, 与现有标准相比能够降低漏预警率, 与 10% 划分规则相比能够降低误预警率, 即在漏报警和误报警之间取得了一个较好的平衡点。

2) 变压器油中溶解气体体积分数预警值与运行年限呈显著负相关。随着运行年限的增加, 油中溶解气体体积分数反而越低, 相应计算出的预警值越低, 该规律较符合电力变压器运行浴盆曲线的早中期状态。

文中下一步将深入研究不同维度(电压等级、生产厂家、运行环境等)下变压器油中溶解气体体积分数的动态预警阈值。

参考文献:

- [1] 孙才新, 陈伟根, 李 俭. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
SUN Caixin, CHEN Weigen, LI Jian. On-line monitoring and fault diagnosis technology for gas in electric equipment oil[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—1996[S]. 1996.
Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—1996[S]. 1996.
- [3] MACKENZIE E A, CROSSEY J, DE PABLO A, et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers[C]// IEEE International symposium on Electrical Insulation. San Diego, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [4] 许 坤, 周建华, 茹秋实, 等. 变压器油中溶解气体在线监测技术发展展望[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 30-32.
XU Kun, ZHOU Jianhua, RU Qiushi, et al. Development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitoring technology[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 30-32.
- [5] 操敦奎. 变压器油色谱分析与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
CAO Dunkui. Transformer oil chromatographic analysis and fault diagnosis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [6] 变电设备在线监测装置技术规范 第 2 部分: 变压器油中溶解气体在线监测装置: DL/T 1498. 2—2016[S]. 2016.
Technical specification for on-line monitoring device of transformation equipment - Part 2: On-line monitoring device of gases dissolved in transformer oil: DL/T 1498. 2—2016[S]. 2016.
- [7] 变电设备在线监测装置检验规范 第 2 部分: 变压器油中溶解气体在线监测装置: DL/T 1432. 2—2016[S]. 2016.
Testing specification for on-line monitoring device of transformation equipment - Part 2: On-line monitoring device of gases dissolved in transformer oil: DL/T 1432. 2—2016[S]. 2016.
- [8] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T 7252—2001[S]. 2001.
Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: GB/T 7252—2001[S]. 2001.
- [9] 宋安琪. 基于现场油色谱数据的变压器诊断阈值的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
SONG Anqi. Diagnostic threshold of transformers: A study base on on-site dissolved gases[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [10] MOSINSKI F, PIOTROWSKI T. New statistical methods for evaluation of DGA data[J]. IEEE Transactions on Dielec-

- trics and Electrical Insulation, 2003, 10(2):260-265.
- [11] 高树国,王学磊,李庆民,等. 基于MCD稳健统计分析的变压器油色谱异常值检测及分布特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3477-3482.
- GAO Shuguo, WANG Xuelei, LI Qingmin, et al. Outliers detection and distribution characteristics of the transformer DGA data based on MCD robust statistics[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3477-3482.
- [12] 郑一鸣,孙淑莲,孙翔,等. 基于自适应小波分析的在线油色谱数据预处理方法[J]. 浙江电力, 2016, 35(11):1-6.
- ZHENG Yiming, SUN Shulian, SUN Xiang, et al. Preprocessing method of online oil chromatographic data based on adaptive wavelet analysis[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(11):1-6.
- [13] 章彬,李穆,吕启深,等. 基于数理统计的变压器油色谱联合预警策略[J]. 高压电器, 2016, 52(5):186-191.
- ZHANG Bin, LI Mu, LYU Qishen, et al. Joint early-warning strategies of transformer oil chromatogram based on mathematical statistic[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5):186-191.
- [14] 张少涵,应宗明. 在线监测系统数据替代预防性试验数据分析[C]//全国输变电设备状态检修技术交流研讨会. 西安:[s. n.], 2009, 95-100.
- ZHANG Shaohan, YING Zongming. Study on replacing preventive test data with online monitoring system data[C]// Power Transmission and Equipment Status Maintenance Technical Seminar. Xi'an:[s. n.], 2009, 95-100.
- [15] 葛余博. 概率论与数理统计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- GE Yubo. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2005.
- [16] 茅群霞. 缺失值处理统计方法的模拟比较研究及应用[D]. 成都:四川大学, 2005.
- MAO Qunxia. A simulated comparative study and application of statistical methods in datasets with missing values [D]. Chengdu:Sichuan University, 2005.
- [17] 李庆扬. 数值分析基础教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- LI Qingyang. Numerical analysis basic tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [18] 虞鸿,李波,蒋裕丰. 基于威布尔分布的大坝变形监控指标研究[J]. 水力发电, 2009, 35(6):90-93.
- YU Hong, LI Bo, JIANG Yufeng. Study on monitoring indexes of dam deformation based on Weibull distribution [J]. Water Power, 2009, 35(6):90-93.
- [19] 张黎. 电气设备寿命分布分析[D]. 济南:山东大学, 2005.
- ZHANG Li. Analysis of life distribution of electrical equipment[D]. Jinan:Shandong University, 2005.
- [20] Mineral oil-impregnated electrical equipment in service—guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis:IEC 60599:2015[S]. 2015.
- [21] SOKOLOV V, BASSETTO A, MAK J, et al. Transformer risk assessment considerations[C]//Proceedings of the Euro. Tech. 2002 Conference. Birmingham, UK:[s. n.], 2002:1-18.
- [22] 梁博渊,刘伟,杨欣桐. 变压器健康状况评估与剩余寿命预测[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11):37-43.
- LIANG Boyuan, LIU Wei, YANG Xintong. Transformer condition assessment and residual life prediction[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2010, 26(11):37-43.
- [23] 李珊,欧世锋,李克文,等. 基于浴盆曲线的配电变压器故障率模型[J]. 信息技术, 2018(3):83-88.
- LI Shan, OU Shifeng, LI Kewen, et al. Fault rate model of distribution transformer based on bathtub curve[J]. Information Technology, 2018(3):83-88.
- 陈太(1982—),男,高级工程师,主要研究方向为电力状态监测及电力智能化技术。
- 郑作霖(1978—),男,算法工程师,主要研究方向为人工智能、大数据和智能电网软件技术。
- 娄坚鑫(1973—),男,高级工程师,主要研究方向为输变电设备在线监测技术和变电站智能辅助监控技术。
- 康铮(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压与绝缘技术。
- 吴志伟(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为输电线路防雷评估。
- 郑跃胜(1981—),男,博士,教授,主要研究方向为高电压试验技术、气固复合绝缘技术和电磁场数值计算及应用。
- 舒胜文(1987—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为高电压新技术、输变电设备状态检测与防灾减灾(通信作者)。