

基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估

周敬嵩¹, 俞京锋¹, 杨欢红², 朱斌泉¹, 丁宇涛², 王 洁²

(1. 国网浙江省电力有限公司德清供电公司, 浙江 德清 313200; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:针对目前变压器状态评估缺乏考虑多阶段信息的动态性、变化趋势的现状,提出一种基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。首先,对效益型和成本型指标数据进行归一化处理;其次,引入区间灰数的方差和均差来衡量区间指标数据的波动性,进而赋予指标最佳权重;然后,综合考虑变压器多维时间阶段信息集结和指标的阶段间动态变化,提出一种基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法,求取靶心度作为状态评估的依据;最后,通过算例分析某变电站多台变压器多阶段的运行数据,验证了该状态评估方法的客观性和有效性。

关键词:状态评估;变压器;区间灰数;动态灰靶

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.018 中图分类号:TM407 文章编号:1673-9140(2020)04-0133-08

A condition assessment method of transformers based upon the dynamic grey target with the interval grey number

ZHOU Jingsong¹, YU Jingfeng¹, YANG Huanhong², ZHU Binquan¹, DING Yutao², WANG Jie²

(1. Deqing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Deqing 313200, China;
2. Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Nowadays, the condition assessment of transformer doesn't consider the dynamic characteristics and variational tendency of information in different stages. On this background, a dynamic gray target assessment model based on approaching degrees is proposed in this paper. First of all, the index data of benefit-type and cost-type are standardized. Secondly, the variance and the mean deviation of the interval grey number are introduced to evaluate the data volatility of the interval index. Then, the best weight can be determined. After that, a dynamic grey target evaluation model of interval grey number is proposed considering the accumulation of transformer phase information and the dynamic variation of index. The approaching degree is regarded as the basis of condition assessment. At last, the multi-stage operation data of multiple transformers in a substation is analyzed to verify the validity of the proposed method.

Key words: assessment method; transformer; dynamic grey target; interval grey number

电力变压器作为电网中的大型复杂高压输变电设备,是承担电压变换、电能分配和转移的核心设备,实现变压器状态合理准确评估对保证电网稳定

运行意义重大。

由于变压器本身结构和运行环境十分复杂,能够表示变压器状态的指标较多,而且各状态指标之

间的关系模糊不确定,要准确评估变压器的状态难度较大。近些年许多业内学者针对电力变压器状态评估方法开展一系列的研究,评估指标由最初的单一数据源或少许考量数据到现在考虑多层次、多源数据融合评估,设备状态评估结果由以往“合格”或“不合格”2种状态发展到更加细致地分级多元化的评估,取得了卓越成效。文献[1]采用灰色聚类确定指标变权重矩阵,用模糊评判法逐层评估变压器的状态,采用变权重的方式但忽略了信息的不充分性;文献[2]综合考虑变压器故障机理,修正了马尔可夫状态评估模型,提出基于状态检修的全状态评估模型,算法简单,但存在一定的应用局限性;集值统计专家估价法^[3]引入专家评估信任因子,对指标进行定性评估,准确性高但对数据要求较高;文献[4]提出了合作博弈法和云模型的变压器状态评估体系,采用合作博弈法获取组合权重并进行修正,通过云模型标定变压器各状态等级的隶属度,最后分层评估得到结果,过程较为繁琐,计算量大。还有一些文献采用区间数 TOPSIS 法^[5-7]、物元可拓分析法^[8-9]、序关系—熵值法^[10]、粗糙集与 D-S 证据理论^[11-13]、剩余电压微分谱线法^[14-15]等方法进行评估。目前研究尚未考虑多维时间阶段内变压器评估指标动态变化趋势的影响,没彻底挖掘出多维时间阶段状态信息中蕴含的变压器动态变化特点及其发展趋势,这必然对最终的状态评估结果造成一定的偏差。

鉴于上述讨论分析,该文提出基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。对指标数据进行归一化处理,为衡量指标波动性的大小引入区间数据的方差和均差,进而赋予指标最佳权重。融合多维时间阶段的变压器运行数据和指标信息的阶段间动态变化,利用动态灰靶理论求取反映变压器状态的综合靶心度。通过算例分析多维时间阶段的运行数据,验证提出的变压器状态评估方法的准确性。

1 变压器状态评估指标选取

变压器运行指标数据众多,选取具有代表性的关键指标,建立全面、合理、可行的状态评估指标体系,是保证实现变压器状态客观、准确、有效评估的

基础前提。但由于影响因素来自不同层次、不同方面,彼此还存在一定的关联,若考虑全部影响因素则存在一定的难度。

为了能够有效、全面地判断变压器的运行状态,笔者遵循可行性、全面性、层次与系统性等原则,从绝缘油、油中溶解气体、电气试验选择 10 个具有代表性的关键状态指标建立评估体系^[16],如表 1 所示。

表 1 变压器状态评估体系

项目	指标	单位	序号
绝缘油试验	油中微水	mg/L	c ₁
	油介损	%	c ₂
	油击穿电压	kV	c ₃
电气试验	绝缘电阻吸收比	%	c ₄
	极化系数	—	c ₅
	绕组介损损耗因素	%	c ₆
油中溶解气体	H ₂ 含量	μL/L	c ₇
	C ₂ H ₂ 含量	μL/L	c ₈
	总烃含量	μL/L	c ₉
	总烃相对产气速率	%	c ₁₀

2 区间灰数动态灰靶的状态评估方法

设某动态多属性评估问题由 m 个拟定的评估对象组成评估对象集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, 每个对象评估 n 个指标组成指标集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 相应的属性权重为 ω_j , 阶段样本点为 t , 相应的权重为 $\tau(t)$, 在阶段 t 指标 c_j 下的指标样本值为 $a'_{ij}(\otimes)$, 区间灰数 $a'_{ij}(\otimes) = [a'_{ij}{}^L, a'_{ij}{}^U]$ 。变压器的状态信息是时刻动态变化的,可以根据采集时间采用区间灰数^[17]表示。对于以区间灰数 $a'_{ij}(\otimes) = [a'_{ij}{}^L, a'_{ij}{}^U]$ 表示的状态信息,可以构成区间矩阵 $\mathbf{A}'(\otimes) = [a'_{ij}(\otimes)]_{m \times n}$, 其中, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, $t = 1, 2, \dots, l$ 。

2.1 指标数据归一化处理

2.1.1 变压器指标值的归一化

变压器的指标信息是多源的,对数据进行预处理归一化到同一个量纲下是开展评估工作的前提。依据变压器评估指标的性质一般分为效益型和成本

型指标两大类。所谓归一化(标准化),就是运用不同的方法消除不同属性、不同量纲指标之间的差异,转换为标准化指标的过程。

效益型指标归一化:

$$b_{ij}^t(\otimes) = [b_{ij}^{Lt}, b_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{a_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Ut}}, \frac{a_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^{Lt}} \right] \quad (1)$$

成本型指标归一化:

$$b_{ij}^t(\otimes) = [b_{ij}^{Lt}, b_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{y_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Ut}}, \frac{y_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}^{Lt}} \right] \quad (2)$$

式(1)、(2)中 b_{ij}^{Lt} 、 b_{ij}^{Ut} 分别为归一化处理后区间指标数据的下界和上界。

$$y_{ij}^{Lt} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Lt} - a_{ij}^{Lt} + \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Lt}$$

$$y_{ij}^{Ut} = \max_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Ut} - a_{ij}^{Ut} + \min_{1 \leq i \leq m} a_{ij}^{Ut}$$

2.1.2 指标数据变化差值的归一化

多维时间阶段的指标差值归一化方法与指标值的归一化方法稍有不同,应按照公式进行指标变化差值归一化,即

$$e_{ij}^t(\otimes) = [e_{ij}^{Lt}, e_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{a_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^l a_{ij}^{Ut}}, \frac{a_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^l a_{ij}^{Lt}} \right] \quad (3)$$

$$e_{ij}^t(\otimes) = [e_{ij}^{Lt}, e_{ij}^{Ut}] = \left[\frac{y_{ij}^{Lt}}{\sum_{i=1}^l y_{ij}^{Ut}}, \frac{y_{ij}^{Ut}}{\sum_{i=1}^l y_{ij}^{Lt}} \right] \quad (4)$$

$$\Delta_{ij}^{t,t+1}(\otimes) = e_{ij}^{t+1}(\otimes) - e_{ij}^t(\otimes) \quad (5)$$

式(3)~(5)分别为效益型指标、成本型指标、指标变化差值的归一化。

$$y_{ij}^{Lt} = \max_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Lt} - a_{ij}^{Lt} + \min_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Lt}$$

$$y_{ij}^{Ut} = \max_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Ut} - a_{ij}^{Ut} + \min_{1 \leq i \leq l} a_{ij}^{Ut}$$

2.2 最佳权重的确定方法

变压器状态数据具有模糊性、灰色性的特点。同时为避免专家主观赋权的随机性,将运行数据以区间灰数的形式表示,引入区间数据的方差和均差来确定各指标的最佳权重。

变压器运行时指标数据是时刻动态变化的。从变压器状态评估和安全运行的角度考虑,应赋予数据波动大的指标较大的权重,赋予数据波动小的指标较小的权重。引入方差 T 和均差 V 来衡量指标数据波动性的变化,定义方差 T 和均差 V 为

$$T_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\omega_j b_{ij}^t(\otimes) - \omega_j \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{kj}^t(\otimes) \right]^2 = \omega_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(b_{ij}^t(\otimes), b_j^t(\otimes)) \quad (6)$$

$$V_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\omega_j b_{ij}^t(\otimes) - \omega_j \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{kj}^t(\otimes) \right] = \omega_j \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(b_{ij}^t(\otimes), b_j^t(\otimes)) \quad (7)$$

式(6)、(7)中 $b_j^t(\otimes) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m b_{kj}^t(\otimes)$, $d(b_{ij}^t(\otimes), b_j^t(\otimes))$ 表示阶段 t 各指标平均值与各区间指标值的距离。记 $\sigma_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(b_{ij}^t(\otimes), b_j^t(\otimes))$, $\delta_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(b_{ij}^t(\otimes), b_j^t(\otimes))$ 。

在阶段 t , 为确定各指标的最佳权重 ω_j , 应满足 n 个指标的总方差、总均差的和最大,即 $F(\omega)$ 最大。因此,构造目标函数:

$$\max F(\omega) = \omega_j \sum_{j=1}^n (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) \quad (8)$$

式中 $\alpha + \beta = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$ 。求解目标函数,得到指标 c_j 的权重 ω_j 为

$$\omega_j = (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) / \sum_{j=1}^n (\alpha \sigma_j + \beta \delta_j) \quad (9)$$

调整 α 和 β 的数值,求得指标的最佳权重。

2.3 基于多维时间阶段信息集结的状态评估

在变压器运行阶段 t 确定最佳指标值序列 $b^+ = (b_1^{t+}, b_2^{t+}, \dots, b_n^{t+})$ 为期望靶心, $b_j^{t+} = \max_{i=1,2,\dots,m} b_{ij}^t$; 确定最劣指标值序列 $b^- = (b_1^{t-}, b_2^{t-}, \dots, b_n^{t-})$ 为边缘靶心, $b_j^{t-} = \min_{i=1,2,\dots,m} b_{ij}^t$, 其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

阶段 t 变压器运行状态关于指标 c_j 处的期望靶心系数为

$$\gamma(b_{ij}^t, b_j^{t+}) = \frac{\min_i \min_j d(b_{ij}^t, b_j^{t+}) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^t, b_j^{t+})}{d(b_{ij}^t, b_j^{t+}) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^t, b_j^{t+})} \quad (10)$$

变压器 s_i 在阶段 t 的期望靶心度为

$$\gamma(b_i^t, b^{t+}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot \gamma(b_{ij}^t, b_j^{t+}) \quad (11)$$

根据各阶段 t 的权重值 $\tau(t)$, 得到变压器 s_i 的期望靶心度为

$$\gamma(b_{i+}) = \sum_{t=1}^l \tau(t) \cdot \gamma(b_i^t, b_j^{t+}) \quad (12)$$

阶段 t 变压器运行状态关于指标 c_j 处的边缘靶心系数为

$$\gamma(b_{ij}^t, b_j^{t-}) = \frac{\min_i \min_j d(b_{ij}^t, b_j^{t-}) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^t, b_j^{t-})}{d(b_{ij}^t, b_j^{t-}) + 0.5 \max_i \max_j d(b_{ij}^t, b_j^{t-})} \quad (13)$$

变压器 s_i 在阶段 t 的边缘靶心度为

$$\gamma(b_i^t, b^{t-}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot \gamma(b_{ij}^t, b_j^{t-}) \quad (14)$$

根据各阶段 t 的权重值 $\tau(t)$, 得到变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(b_{i-}) = \sum_{t=1}^l \tau(t) \cdot \gamma(b_i^t, b^{t-}) \quad (15)$$

变压器 s_i 的相对靶心度为

$$f_i = \frac{\gamma(b_{i+})}{\gamma(b_{i-}) + \gamma(b_{i+})} \quad (16)$$

2.4 基于指标变化趋势的状态评估

设变压器评估指标 c_j 关于 s_i 在 $t \sim t+1$ 相邻时间阶段的归一化差值为 $\Delta_{ij}^{t,t+1} (\otimes)$ 。变压器 s_i 关于指标 c_j 在所有相邻差值序列记为 $\Delta_{ij} = (\Delta_{ij}^{1,2}, \Delta_{ij}^{2,3}, \dots, \Delta_{ij}^{l-1,l})$ 。确定 c_j 在各阶段的变化趋势最好的序列 $\Delta_{j+} = (\Delta_{j+}^{1,2}, \Delta_{j+}^{2,3}, \dots, \Delta_{j+}^{l-1,l})$ 为指标 c_j 变化趋势期望靶心, $\Delta_{j+}^{t,t+1} = \max_{i=1,2,\dots,m} \Delta_{ij}^{t,t+1}$; 确定 c_j 在各阶段的变化趋势最差的序列 $\Delta_{j-} = (\Delta_{j-}^{1,2}, \Delta_{j-}^{2,3}, \dots, \Delta_{j-}^{l-1,l})$ 为指标 c_j 变化趋势边缘靶心, $\Delta_{j-}^{t,t+1} = \min_{i=1,2,\dots,m} \Delta_{ij}^{t,t+1}$, 其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

变压器 s_i 关于指标 c_j 的变化差值序列在阶段 $t \sim t+1$ 间的期望靶心系数为

$$\gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) = \frac{\min_i \min_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1})}{d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1})} \quad (17)$$

该文中暂不考虑时间阶段权重的影响, 得到变压器 s_i 关于指标 c_j 的期望靶心度为

$$\gamma(\Delta_{ij+}) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} \gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j+}^{t,t+1}) \quad (18)$$

根据各指标 c_j 的权重值 ω_j , 得到变压器 s_i 的

期望靶心度为

$$\gamma(\Delta_{i+}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(\Delta_{ij+}) \quad (19)$$

变压器 s_i 关于指标 c_j 的变化差值序列在阶段 $t \sim t+1$ 间的边缘靶心系数为

$$\gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) = \frac{\min_i \min_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1})}{d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) + 0.5 \max_i \max_t d(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1})} \quad (20)$$

指标 c_j 下变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(\Delta_{ij-}) = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} \gamma(\Delta_{ij}^{t,t+1}, \Delta_{j-}^{t,t+1}) \quad (21)$$

根据各指标 c_j 的权重值 ω_j , 得到变压器 s_i 的边缘靶心度为

$$\gamma(\Delta_{i-}) = \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(\Delta_{ij-}) \quad (22)$$

变压器 s_i 的差值相对靶心度为

$$f_{\Delta i} = \frac{\gamma(\Delta_{i+})}{\gamma(\Delta_{i-}) + \gamma(\Delta_{i+})} \quad (23)$$

2.5 综合状态评估

为提高变压器状态评估的准确性, 该文将基于多维时间阶段信息集结和指标变化趋势相结合, 以综合靶心度 z_i 作为表征变压器状态的“健康指数”。综合靶心度为

$$z_i = \mu f_i + (1 - \mu) f_{\Delta i} \quad (24)$$

其中, μ 为优选因子, 反映对多维时间阶段信息集结和指标变化趋势两方面评估的注重程度, 该文认为两方面同等重要, 令 $\mu = 0.5$ 。

2.6 状态等级划分

该文将靶心度作为评估变压器状态的“健康指数”, 按照靶心度范围把状态等级分为 5 个层次, 表征变压器健康状态的靶心度与检修建议的对应关系如表 2 所示^[18]。

表 2 变压器状态等级划分

Table 2 Classification of transformer condition

状态等级	靶心度范围	状态描述及检修建议
1	[0.8, 1)	正常状态, 安全稳定, 延期检修
2	[0.6, 0.8)	良好状态, 计划安排检修
3	[0.5, 0.6)	一般状态, 优先安排检修
4	[0.4, 0.5)	异常状态, 尽快安排检修
5	[0.33, 0.4)	严重状态, 立即停电检修

3 算例分析

性,收集 4 台变压器 s_1, s_2, s_3, s_4 的 10 个评估指标的实际运行数据,以变压器多维时间阶段历史运行数据进行计算分析,对原始数据进行归一化处理,数据如表 3 所示。

为验证提出的状态评估方法的合理性和准确

表 3 变压器的归一化数据

Table 3 Normalized data of transformer

阶段 t	s_i	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
1	s_1	[0.179,0.386]	[0.236,0.267]	[0.225,0.281]	[0.202,0.277]	[0.262,0.287]
	s_2	[0.199,0.299]	[0.185,0.301]	[0.232,0.256]	[0.222,0.258]	[0.195,0.227]
	s_3	[0.178,0.336]	[0.162,0.273]	[0.211,0.292]	[0.265,0.301]	[0.241,0.242]
	s_4	[0.190,0.317]	[0.256,0.351]	[0.241,0.273]	[0.229,0.254]	[0.256,0.293]
2	s_1	[0.248,0.248]	[0.192,0.287]	[0.233,0.266]	[0.242,0.270]	[0.187,0.338]
	s_2	[0.180,0.203]	[0.206,0.368]	[0.219,0.259]	[0.199,0.252]	[0.194,0.272]
	s_3	[0.235,0.257]	[0.225,0.270]	[0.239,0.284]	[0.242,0.295]	[0.204,0.332]
	s_4	[0.280,0.352]	[0.218,0.264]	[0.238,0.268]	[0.239,0.268]	[0.202,0.330]
3	s_1	[0.200,0.248]	[0.203,0.239]	[0.233,0.266]	[0.236,0.272]	[0.281,0.252]
	s_2	[0.194,0.311]	[0.255,0.255]	[0.232,0.245]	[0.225,0.302]	[0.212,0.236]
	s_3	[0.224,0.349]	[0.253,0.326]	[0.238,0.283]	[0.200,0.282]	[0.274,0.301]
	s_4	[0.199,0.316]	[0.209,0.267]	[0.244,0.260]	[0.230,0.267]	[0.207,0.238]
4	s_1	[0.238,0.324]	[0.189,0.227]	[0.224,0.262]	[0.249,0.277]	[0.213,0.240]
	s_2	[0.222,0.343]	[0.227,0.292]	[0.244,0.265]	[0.237,0.272]	[0.248,0.293]
	s_3	[0.200,0.287]	[0.246,0.279]	[0.232,0.274]	[0.229,0.264]	[0.236,0.271]
	s_4	[0.180,0.238]	[0.242,0.310]	[0.232,0.272]	[0.228,0.246]	[0.247,0.254]
阶段 t	s_i	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
1	s_1	[0.205,0.368]	[0.235,0.257]	[0.267,0.279]	[0.254,0.265]	[0.263,0.266]
	s_2	[0.159,0.264]	[0.210,0.286]	[0.178,0.216]	[0.222,0.244]	[0.284,0.297]
	s_3	[0.242,0.311]	[0.220,0.287]	[0.269,0.278]	[0.252,0.246]	[0.245,0.241]
	s_4	[0.197,0.302]	[0.222,0.299]	[0.247,0.247]	[0.253,0.265]	[0.180,0.225]
2	s_1	[0.129,0.283]	[0.226,0.255]	[0.235,0.230]	[0.242,0.252]	[0.216,0.256]
	s_2	[0.264,0.415]	[0.228,0.272]	[0.176,0.299]	[0.243,0.254]	[0.242,0.317]
	s_3	[0.143,0.236]	[0.230,0.281]	[0.235,0.368]	[0.247,0.262]	[0.252,0.302]
	s_4	[0.221,0.387]	[0.226,0.291]	[0.206,0.276]	[0.242,0.257]	[0.194,0.231]
3	s_1	[0.220,0.236]	[0.230,0.258]	[0.191,0.272]	[0.252,0.258]	[0.251,0.292]
	s_2	[0.227,0.293]	[0.231,0.285]	[0.234,0.284]	[0.240,0.276]	[0.243,0.274]
	s_3	[0.241,0.350]	[0.232,0.258]	[0.245,0.346]	[0.245,0.270]	[0.241,0.240]
	s_4	[0.184,0.268]	[0.223,0.291]	[0.191,0.259]	[0.216,0.245]	[0.207,0.256]
4	s_1	[0.273,0.263]	[0.238,0.269]	[0.260,0.239]	[0.237,0.246]	[0.230,0.250]
	s_2	[0.219,0.263]	[0.240,0.271]	[0.240,0.250]	[0.240,0.266]	[0.200,0.227]
	s_3	[0.141,0.229]	[0.226,0.256]	[0.260,0.304]	[0.248,0.279]	[0.236,0.289]
	s_4	[0.289,0.331]	[0.232,0.261]	[0.198,0.250]	[0.229,0.258]	[0.260,0.316]

3.1 最佳权重的计算

取阶段1的4台变压器历史运行数据(归一化),计算各变压器的指标平均值与各区间指标值的距离,进一步求得 σ_j 和 δ_j ;设置合理的 α 和 β 使 $F(\omega)$ 最大,确定最佳权重: $\omega_1=0.0760$; $\omega_2=0.2515$; $\omega_3=0.0413$; $\omega_4=0.1226$; $\omega_5=0.0957$; $\omega_6=0.1118$; $\omega_7=0.0412$; $\omega_8=0.01113$; $\omega_9=0.0407$; $\omega_{10}=0.1079$ 。此时,目标函数 $F(\omega)=0.0517$ 。

3.2 变压器的综合状态评估

以阶段1的4台变压器历史运行数据(归一化)举例说明,确定最佳指标值序 $b^+ = ([0.199, 0.386], [0.256, 0.351], [0.241, 0.292], [0.265, 0.301], [0.262, 0.293], [0.242, 0.368], [0.235, 0.299], [0.269, 0.279], [0.254, 0.265], [0.285, 0.297])$,变压器 s_1 关于指标 c_j 的靶心系数分别为0.7665、0.4364、0.7718、0.4964、0.9182、0.6373、0.6147、1、1、0.6363;依据式(11)得到 s_1 在阶段1的期望靶心度为0.6558。求解边缘靶心度,先确定最差指标值序 $b^- = ([0.178, 0.230], [0.162, 0.267], [0.211, 0.256], [0.202, 0.254], [0.195, 0.227], [0.159, 0.264], [0.230, 0.257], [0.178, 0.217], [0.222, 0.244], [0.180, 0.225])$,计算变压器 s_1 与期望靶心关于指标 c_j 的靶心系数分别为0.4216、0.4633、0.6897、0.7389、0.4102、0.3582、0.7127、0.3424、0.6248、0.4080;依据式(14)计算得到变压器 s_1 在阶段1的边缘靶心度0.4839。同样地,变压器 s_2 、 s_3 、 s_4 在阶段1的

期望靶心度分别为0.5118、0.5963、0.6962,边缘靶心度分别为0.7564、0.6049、0.5622。多台变压器多维时间段的期望、边缘靶心的靶心度、相对靶心度如表4所示。

基于多维时间阶段间指标变化趋势的差值相对靶心度依据式(17)~(23)计算,得到指标 c_j 下变化趋势与期望、边缘靶心的靶心度、相对靶心度如表5所示。

各变压器基于多维时间阶段的现状信息、发展趋势、综合两方面因素的相对靶心度、综合靶心度及各变压器优劣排序如表6所示。

表4 各变压器多阶段相应的靶心度
Table 4 Target degrees of transformers in different stages

变压器	靶心度	阶段 t			
		1	2	3	4
s_1	$\gamma(b_1^{tk+})$	0.6658	0.6171	0.5273	0.6491
	$\gamma(b_1^{tk-})$	0.4839	0.7538	0.7538	0.7689
	f_1	0.5791	0.4502	0.4116	0.4578
s_2	$\gamma(b_2^{tk+})$	0.5118	0.7561	0.5793	0.7461
	$\gamma(b_2^{tk-})$	0.7564	0.6997	0.6070	0.6610
	f_2	0.4036	0.5194	0.4883	0.5302
s_3	$\gamma(b_3^{tk+})$	0.5963	0.7478	0.8534	0.7400
	$\gamma(b_3^{tk-})$	0.6049	0.6891	0.5012	0.6828
	f_3	0.4964	0.5204	0.6300	0.5201
s_4	$\gamma(b_4^{tk+})$	0.6962	0.6949	0.4898	0.8062
	$\gamma(b_4^{tk-})$	0.5622	0.7155	0.7567	0.6838
	f_4	0.5532	0.4927	0.3929	0.5411

表5 变压器的变化趋势期望、边缘、相对靶心度

Table 5 Variation tendency expectations, edges and relative approaching degrees of transformers

变压器	靶心度	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
s_1	$\gamma(\Delta_{1j+})$	0.5524	0.5838	0.7980	0.5040	0.6812	0.6121	0.5532	0.6141	0.7817	0.7391
	$\gamma(\Delta_{1j-})$	0.5915	0.4716	0.4815	0.6292	0.4143	0.5056	0.6991	0.6562	0.4505	0.5842
	$f_{\Delta 1j}$	0.4829	0.5532	0.6237	0.4448	0.6218	0.5477	0.4418	0.4834	0.6344	0.5585
s_2	$\gamma(\Delta_{2j+})$	0.5185	0.4755	0.6304	0.6922	0.4600	0.6290	0.5274	0.5536	0.4243	0.8065
	$\gamma(\Delta_{2j-})$	0.6707	0.5548	0.6454	0.6515	0.6760	0.6223	0.6933	0.7420	0.6382	0.4166
	$f_{\Delta 2j}$	0.4360	0.4615	0.4941	0.5152	0.4049	0.5027	0.4320	0.4273	0.3993	0.6594
s_3	$\gamma(\Delta_{3j+})$	0.6099	0.4973	0.7305	0.8606	0.5517	0.7737	0.6818	0.6480	0.4126	0.6112
	$\gamma(\Delta_{3j-})$	0.5298	0.6325	0.5383	0.4660	0.5501	0.5648	0.5577	0.5171	0.5840	0.6106
	$f_{\Delta 3j}$	0.5351	0.4402	0.5757	0.6487	0.5007	0.5781	0.5500	0.5562	0.4140	0.5002
s_4	$\gamma(\Delta_{4j+})$	0.7497	0.6220	0.7623	0.6599	0.7116	0.5768	0.7492	0.8222	0.7295	0.4339
	$\gamma(\Delta_{4j-})$	0.5654	0.6227	0.5003	0.5167	0.4625	0.6429	0.5070	0.4579	0.5713	0.7522
	$f_{\Delta 4j}$	0.5701	0.4997	0.6038	0.5609	0.6061	0.4729	0.5964	0.6423	0.5608	0.3658

表6 关于各因素的变压器靶心度及排序

Table 6 Transformer approaching degree of various factors and sort

评估方法	各变压器相对靶心度、综合靶心度	排序
集结各阶段现状信息	$f_1 = 0.4747, f_2 = 0.4854, f_3 = 0.5417, f_4 = 0.4950$	$s_3 > s_4 > s_2 > s_1$
指标变化趋势	$f_{\Delta 1} = 0.5349, f_{\Delta 2} = 0.4805, f_{\Delta 3} = 0.5226, f_{\Delta 4} = 0.5319$	$s_1 > s_4 > s_3 > s_2$
综合纵横信息	$z_1 = 0.5048, z_2 = 0.4830, z_3 = 0.5321, z_4 = 0.5135$	$s_3 > s_4 > s_1 > s_2$

3.3 结果分析

从表4可以看出,对于多维时间段的状态信息集结的变压器状态评估,得到的相对靶心度 f_i 在4个阶段各不相同,反映了各变压器在被评估阶段的状态时刻动态变化的。

从表5可以看出,基于指标变化趋势的状态评估,求取的差值相对靶心度 $f_{\Delta i}$ 反映了变压器在被评估阶段的状态变化趋势。例如:变压器 s_1 的指标 c_4 和 c_7 差值相对靶心度偏小,表明变压器的绝缘电阻吸收比大幅减小、 H_2 增长速度快;变压器 s_2 的指标 c_5 和 c_9 差值相对靶心度较小,表明变压器的极化系数变大、总烃增长速度快。指标数据变化的快慢不能准确判定变压器是否发生了故障,但能通过差值相对靶心度 $f_{\Delta i}$ 的数值分析,体现变压器各运行指标的变化趋势,为运检人员判断潜在故障类型提供数据支撑。

从表6可以看出,单一考虑多维时间阶段信息的集结,变压器 s_1 和 s_2 的相对靶心度分别为0.4747、0.4854,均处于异常状态;若考虑变化趋势,变压器 s_2 指标变化最快,可能处于异常状态;综合两方面考虑因素,变压器 s_2 的综合靶心度为0.4830,处于异常状态。从变压器 s_2 的差值相对靶心度可以看出,指标 c_5 、 c_7 、 c_8 、 c_9 增加迅速,判断变压器可能存在局部过热或绝缘受潮。停电检修后实际情况为变压器绝缘油分解出水分,固定螺丝屏蔽帽镀层脱落。

4 结语

1)为充分考虑多维时间阶段信息的动态性和变化趋势,提出基于区间灰数动态灰靶的变压器状态评估方法。该方法不仅充分挖掘现阶段状态包含的潜在信息,而且能够清晰地展现变压器在多维时间阶段的表现和本体状态的发展趋势。

2)该文将运行数据表示为区间灰数的形式,评估过程中引入方差和均差作为衡量指标数据的波动

性,并确定了最佳权重,避免了主观赋权的差异性。

3)提出的状态评估方法实现了对变压器状态的准确评估,同时分析过程清晰,为运维检修人员查找潜在故障、安排检修任务提供有益参考。

参考文献:

- [1] 宋人杰,刘瑞英,王林. 灰色定权聚类 and 变权模式在变压器状态评估中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2017,36(3): 75-80.
SONG Renjie, LIU Ruiying, WANG Lin. Application of grey fixed weight clustering and variable weight model in transformer condition evaluation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 75-80.
- [2] 张桦,魏本刚,李可军,等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(5): 134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [3] 孙莹,高贺,李可军,等. 基于多时段信息融合的配电变压器运行状态评估模型[J]. 高电压技术, 2016,42(7): 2054-2062.
SUN Ying, GAO He, LI Kejun, et al. Condition assessment model of distribution transformer based on multi-period information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2054-2062.
- [4] 徐岩,陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015,35(3): 88-93.
XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [5] 卜宪存,张海英. 基于区间数 TOPSIS 法的电力变压器状态评估[J]. 高压电器, 2016,52(4): 205-209.
BU Xiancun, ZHANG Haiying. Condition assessment of power transformer based on intervals TOPSIS[J]. High

- Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 205-209.
- [6] 杨国生,戴飞扬,王文焕,等. 基于灰度关联法和 TOPSIS 法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 94-103.
YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.
- [7] LIU Zifa, ZHANG Jiechao, LI Cong. Spatial electric load forecasting based on AHP and TOPSIS method[C]// IEEE 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, China, 2009.
- [8] 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.
- [9] 王涛云,马宏忠,崔杨柳,等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [10] 马纪,刘希喆. 基于序关系一熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [11] 曾丹乐,杜修明,盛戈皞,等. 基于因子分析法与 D-S 证据理论的变压器关键参量提取和状态评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 7-14.
ZENG Danle, DU Xiuming, SHENG Gehao, et al. Key parameters extraction and condition evaluation of transformer based on factor analysis and D-S evidence theory[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 7-14.
- [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] 林晓宁,蔡金锭. 基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 22-29.
LIN Xiaoning, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation based on rough set theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 22-29.
- [14] 王岭,蔡金锭. 基于剩余电压时域特征的变压器绝缘状态评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 130-137.
WANG Ling, CAI Jinding. Assessment strategy on transformer insulation condition based on residual voltage time domain characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 130-137.
- [15] 谢松,蔡金锭,林韩. 变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 123-129.
XIE Song, CAI Jinding, LIN Han. Assessment method for transformer oil-paper insulation condition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 123-129.
- [16] 杨杰明,董玉坤,曲朝阳,等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109.
YANG Jieming, DONG Yukun, QU Chaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.
- [17] 闫书丽. 灰靶决策方法及应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [18] CHEN Guo-jin, XU Ming, LIU Ting-ting, et al. Research on condition monitoring and evaluation method of power transformer [C]//IEEE 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Zhangjiajie, China, 2013.