

DOI: 10.7667/PSPC180735

基于灰色理论和云模型的智能变电站二次设备状态评估方法

叶远波, 谢民, 黄太贵, 王同文

(国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘要: 针对智能变电站二次设备故障机理的复杂多样性, 传统的单一性指标评估难以有效挖掘出潜在的安全隐患。在相应研究基础上建立了二次设备状态评估递阶层次评估模型和指标体系, 运用灰色理论中的灰色聚类建立二次设备的状态评估灰色聚类模型。为了节省人力同时兼顾状态评估的客观性, 采用灰色预测 GM(1,1)模型对专家评分进行离散建模以获得足够的评估样本。同时考虑到评估指标的不确定性, 采用云模型构建灰色白化权函数, 并结合层次分析法计算状态指标的组合权重。实际案例仿真结果表明, 所提方法计算量小且操作简单, 可以准确及时地为智能变电站二次设备和系统的状态检修工作提供科学指导。

关键词: 二次设备; 状态评估; 云模型; 层次分析法; 灰色理论

A state assessment method for intelligent substation secondary equipment based on grey theory and cloud model

YE Yuanbo, XIE Min, HUANG Taigui, WANG Tongwen

(State Grid Anhui Electric Power Limited Company, Hefei 230022, China)

Abstract: For the complex diversity of the secondary fault mechanism of the smart substation, the traditional single-factor assessment is difficult to effectively mine potential safety hazards. A hierarchical evaluation model and index system for the secondary equipment state assessment is established based on the corresponding research. And grey clustering in grey theory is used to establish a grey clustering model for the state assessment of secondary equipment. In order to save manpower and take into account the objectivity of the state assessment, the grey prediction GM (1,1) model is used to discretely model the expert scores to obtain enough evaluation samples. At the same time, taking into account the uncertainty of the evaluation index, a grey model is used to construct a grey white weight function, and combined with the analytic hierarchy process to calculate the combined weight of the state indicators. The actual case simulation results show that the method supposed in this paper is small in computation and simple in operation, and can provide scientific guidance for the state-repairing work of secondary equipment and systems in smart substations accurately and in a timely manner.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521200160021 and No. 521200170027).

Key words: secondary equipment; state assessment; cloud model; analytic hierarchy process; grey theory

0 引言

智能变电站是坚强智能电网的重要环节, 智能变电站二次设备的安全可靠运行直接关系到智能变电站一次设备能否稳定运行^[1-2]。然而, 传统的智能变电站继电保护设备采取的是定期检修的运行维护手段。这种检修方式存在一些问题, 例如过度检修

和检修不足^[1-2]。状态评估作为状态检修的基础, 可以及时并合理地二次设备状态检修提供理论指导和检修计划, 从而可以提高二次设备状态检修的针对性和有效性, 整体上提高二次系统的运行可靠性和综合经济效益。为了制定科学合理的状态检修策略, 智能变电站二次设备的状态评估正在得到研究人员的重视^[1-3]。

相对于智能变电站二次设备的状态评估, 电力变压器状态评估的研究成果则十分丰富。马尔科夫^[4]、故障树^[5]和贝叶斯网络^[6]等理论被用于电力变压器

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (521200160021, 521200170027)

的状态评估,并取得了一定的评估效果。相反,针对智能变电站二次设备包括继电保护设备等的状态评估则相对较少。目前,研究人员倾向于针对继电保护装置可靠性的状态监测与评估。然而,单一二次设备状态对二次系统整体的状态检修并无实际指导意义^[1-2]。此外,当前二次设备状态评估的前提条件是智能变电站的历史统计数据,并未考虑二次设备在线监测信息,因此基于历史检测数据的评估状态缺乏实时有效性,换言之就是存在滞后性^[7]。考虑到继电保护设备状态的模糊性,将模糊综合评价用于对继电保护装置进行状态评估,但是继电保护设备指标体系的建立存在片面性,并且评价指标的取舍对于继电保护装置综合状态影响的权重也缺乏科学严谨的理论依据^[8]。针对状态评估普遍存在的问题,文献[9]考虑到评估指标的模糊性和随机性,采用合作博弈法确定状态评估指标的组合权重;文献[10]运用加权灰靶理论中的灰贡献度分析理论确定状态评估指标的权重分配问题。文献[11]采用模糊云理论获得状态评估的模糊评判矩阵。文献[2]提出了一种基于变权理论和梯形云模型的二次设备整体性能模糊综合评判方法,并采用层次分析法和变权理论实现评估指标权重的动态修正。

本文在文献[1]的研究基础上,全面建立了智能变电站二次设备状态评估指标体系,运用灰色聚类建立二次设备的状态评估灰色聚类模型。同时鉴于样本数据的贫乏,采用灰色预测 GM(1,1)来扩充评估样本。考虑到大多数评估指标具有模糊性和随机性,通过云模型构建灰色聚类的白化权函数,然后结合层次分析法得到评估指标的组合权重。实际案例仿真结果表明,本文方法计算量小且操作简单,可以准确并及时地为智能变电站二次设备和系统的状态检修工作提供科学指导。

1 智能变电站二次设备状态评估指标体系构建

根据IEC 61850标准,智能变电站典型系统架构可以概括为“三层两网”结构。其中,“三层”分为智能变电站的过程层、间隔层和站控层;“两网”分为过程层网络和站控层网络^[12-13]。与常规变电站的主要区别在于智能变电站过程层设置了合并单元、智能终端和交换机等数字化设备,从而保障了全站的信息传输实现了数字化通信^[14-15]。数字化的智能变电站继电保护系统通常由电子式互感器、合并单元、保护设备、智能终端、断路器、光纤通信链路以及电缆连接回路等共同组成^[2,16]。智能变电站二

次设备间的相互配合是实现二次系统功能的根本保障。其中,继电保护系统的功能状态是二次设备整体运行状况的综合反映。为了易于建立状态评估模型且具备建模的准确性,本文合理地选取二次系统中主要的二次设备包括测量回路、通信网络、测控装置、保护装置、智能终端以及同步系统共计6大部分作为设备级的状态评估指标^[1]。详细的层次化二次设备整体评估指标体系结构如图1和图2所示。

此外,变电站配置描述文件(Substation Configuration Description, SCD)正确配置与否直接决定了继电保护设备能否正确实现其保护功能。而合并单元负责一次电气量的采集,并且完成通用面向对象变电站事件量和采样值量的时间标记并上传,其是二次设备功能实现的重要前提条件。当然,其他的一些二次设备例如管理板、CPU板、直流电源板、采集板、故障录波器等广义的二次设备也应该作为二次系统的状态评估指标。因此,下一步将重点考虑SCD文件和合并单元以及广义的二次设备作为评估指标,并纳入到二次系统状态评估体系中去。

2 基于灰色理论和云模型的状态评估模型

灰色理论建模^[17]的首要目的是根据实际灰色系统的行为特征数据,充分挖掘数据中的显性信息和隐性信息,从而找到各因素间或因素自身的数学规律。离散模型通常被用来对灰色系统建立一个时间尺度上的逐段分析模型。具体地,本文主要采用灰色聚类 and 灰色预测来建立智能变电站二次设备的状态评估模型。

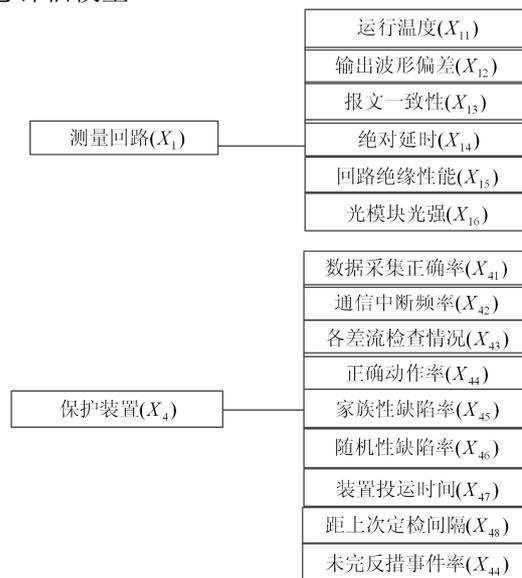


图 1 二次系统测量回路和保护装置状态评估指标体系
Fig. 1 Measurement index system and protection device status evaluation index system for secondary system

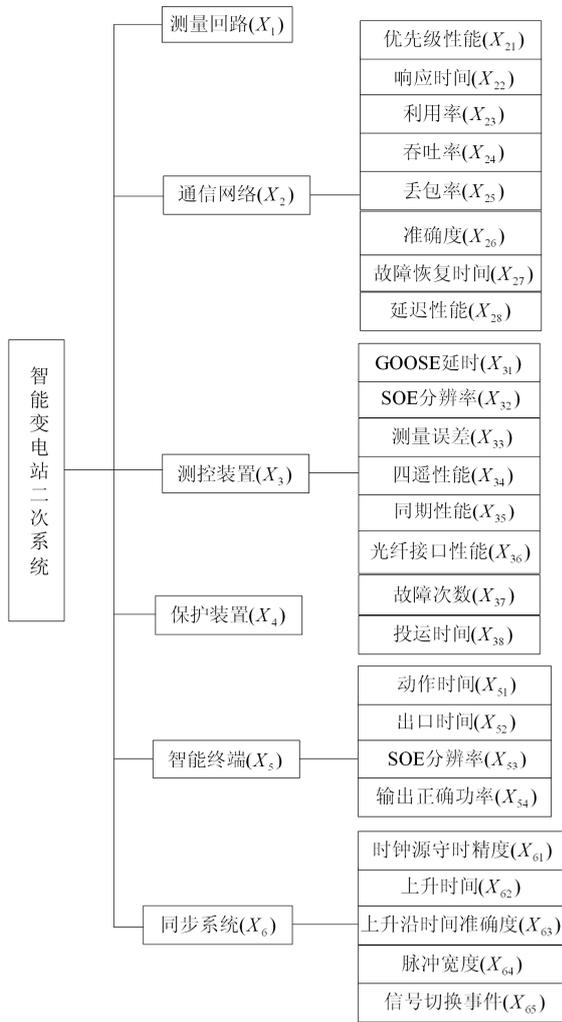


图2 二次设备整体状态评估指标结构体系

Fig. 2 Overall status assessment indicator structure system for secondary equipment

2.1 智能变电站二次设备状态评语集的建立

综合考虑故障诊断、运行经验和专家分析等因素, 文中将智能变电站二次设备的整体状态划分为四类情况, 即严重 λ_1 、注意 λ_2 、一般 λ_3 和良好 λ_4 。相应地, 状态评估的评语集 $V = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]$, 各评语所对应的取值范围以及相应的状态检修策略^[1-2]如表1所示。

表1 二次设备状态的概念及检修决策

Table 1 Definition of secondary equipment state

状态等级	取值范围	检修决策
严重 λ_1	[0,0.4]	立即检修
注意 λ_2	(0.4,0.6]	优先检修
一般 λ_3	(0.6,0.8]	计划检修
正常 λ_4	(0.8,1]	延迟检修

从表1中可以看出, 二次设备整体状态得分越

高表征其运行状态越佳。值得一提的是这里的设备状态划分并不是意味着实际二次设备就只有这4种情况。例如对于某些设备如时钟同步或者主站通信单元故障时其余设备仍可以短暂运行一段时间, 也就是说其状态可能处于严重(立即检修)和注意(优先检修)之间, 需要限时检修。考虑到这一问题, 下文中将采用云模型建立二次设备灰色聚类评估模型的白化权函数以弥补这一缺陷。此外, 各种状态等级的取值区间的选取依据也是值得进一步研究的。

2.2 二次设备状态指标评估样本矩阵的建立

为了避免单一专家对于指标判断的主观性以及提高智能变电站二次设备状态评估的可靠性和准确性, 邀请 c 名专家根据专家对于采集的二次设备运行状态指标数据和运行经验对含有 m 个评估指标的二次设备指标体系进行打分, 并根据打分结果主观地评估智能变电站二次设备的总体运行状况。为此, 对于第 $i, i \in (1, c)$ 个专家对于第 $s, s \in (1, m)$ 个评价指标给出的评分记为 f_s^i , 从而可以建立所有评估专家对 m 个评估指标的评估结果构成一个 $m \times c$ 的矩阵如式(1)所示。

$$F = \begin{bmatrix} f_1^1 & \cdots & f_1^c \\ \vdots & & \vdots \\ f_m^1 & \cdots & f_m^c \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 基于云模型的二次设备灰色聚类评估模型

智能变电站二次设备的状态指标具有很大的不确定性, 其中包括评估指标的模糊性和随机性。传统的灰色聚类分析中白化权函数通常采用三角白化权函数, 其中包括所谓的典型白化权、下限测度白化权、适中测度白化权以及上限测度白化权函数^[18], 它们能够反映越大越优型或越小越优型评估指标的量化特点。但是, 三角白化权函数^[19]难以表征出评估指标的随机性和模糊性, 对于两种评估状态分界点处这种情况表现得尤其突出。为此, 采用正态云模型来建立灰色聚类分析中的灰色聚类函数, 从而兼顾了评估指标的模糊性和随机性。采用灰色聚类分析^[18-19]对智能变电站二次设备评估进行建模的关键在于给定评价灰类的等级数、灰类的灰数及灰类的白化权函数。本文中评估灰类 e 为智能变电站二次设备的整体状态, 即严重、注意、一般和正常, 分别记为 $e=1,2,3,4$ 。每个灰类的灰数为专家的打分, 其取值范围见表1所示。灰数所对应的灰色聚类函数, 即所谓的白化权函数采用正态云模型来量化, 其取值分布在区间[0,1]上, 并且白化权函数值越大表征二次设备整体状态的白化程度越高, 也就意味着智能变电站二次设备运行状态越好。下面具体介绍如何采用云模型构造白化权函数的过程。

云模型^[9,11,20]是一种处理模糊问题的理论。通过对概率论和模糊理论的有机交叉结合,经期望、熵和超熵重构成特定功能的发生器,该发生器可以用来处理模糊数学问题。

云理论的数学思想可以表述如下:

设 U 是一个用确定数值描述的论域, C 是论域 U 上的定性概念集,若存在参数 $x \in U$ 是概念集 C 的一次随机出现,并记 x 对 C 的隶属度函数 $\mu(x) \in [0,1]$ 是稳定倾向的随机数,即

$$\mu: U \rightarrow [0,1], x \in U \quad x \rightarrow \mu(x)$$

称 x 在论域 U 上的分布为云(Cloud),记为 $C(x)$ 。

由众多的云滴 $(x, \mu(x))$ 聚合在一起便构成了云。云的数字特征包括期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 。其中,云的期望表征了云滴在论域上的空间分布的期望值大小;熵是概念模糊程度的测度;超熵是熵的熵,其大小反映了熵的离散程度^[11,20]。本文采用正态云模型来构建灰色聚类的白化权函数,已知正态云的数学期望曲线如式(2)所示。

$$C(x) = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2En^2}\right) \quad (2)$$

正态云的生成算法具体过程如下^[11]:

- 1) 按照公式 $En'_i = \text{NORM}(En, He^2)$ 生成以 En 为期望、 He^2 为标准方差的正态随机数 En'_i 。
- 2) 按照公式 $x_i = \text{NORM}(Ex, En_i'^2)$ 生成以 Ex 为期望, $En_i'^2$ 为标准方差的正态随机数 x_i 。
- 3) 按照公式计算 $\mu(x_i) = \exp\left[\frac{-(x_i - Ex)^2}{(2En_i'^2)}\right]$, 并记 (x_i, μ_i) 为一个云滴。
- 4) 重复上述步骤 1)至 3), 直到产生 N 个云滴为止。

若记正态云的数字特征值记为 $C(Ex, En, He)$, 则可用上述的正态云生成器得到指定云滴数量的正态云模型。根据表 1 中关于智能变电站二次设备整体状态的定义,给出如下灰类的灰数和白化权函数。

$$\begin{aligned} g_{\lambda_1}(f_s^i) &= \begin{cases} 1, f_s^i \in [0, 0.2] \\ C_1(0.2, 0.2/3, 0.01), f_s^i \in (0.2, 0.4] \end{cases} \\ g_{\lambda_2}(f_s^i) &= C_2(0.5, 0.1/3, 0.01), f_s^i \in (0.4, 0.6] \\ g_{\lambda_3}(f_s^i) &= C_3(0.7, 0.1/3, 0.01), f_s^i \in (0.6, 0.8] \\ g_{\lambda_4}(f_s^i) &= \begin{cases} C_4(0.9, 0.1/3, 0.01), f_s^i \in (0.8, 0.9] \\ 1, f_s^i \in (0.9, 1] \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $g_{\lambda_e}(f_s^i)$ 表示二次设备状态评估中专家打分为 f_s^i 时,其所对应的二次设备整体状态等级 $\lambda_e, e=1,2,3,4$ 时的白化权函数值。基于云模型的白化权函数如图 3 所示。

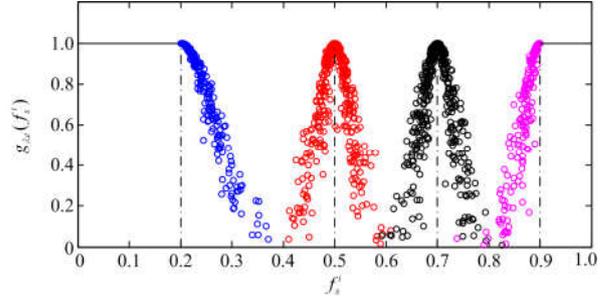


图 3 基于云模型的白化权函数

Fig. 3 Whitening weight function based on cloud mode

二次设备灰色聚类评估模型的基本概念建立起来以后,下一步就是求解状态评估指标的灰色评估系数和评估权。如图 3 所示,对于同一个 f_s^i ,其白化权函数值可能对应几个不同的值,此时应取这几个函数值的平均值作为其白化权函数值。因此,对于如图 1 和 2 所示的任意一个状态评估指标 $x_{ij}(i=1,2,\dots,6; j=1,2,\dots,9)$ 所对应的第 $n(n=1,2,\dots,4)$ 个评估灰类的灰色评估系数记为 $y_{ij,n}$;记各个评估灰类的总灰色评估系数为 y_{ij} ;记第 n 个评估灰类的灰色评估权为 $\eta_{ij,n}$,其相应的计算公式如式(4)~式(6)所示。

$$y_{ij,n} = \sum_{i=1}^c g_{\lambda_n}(f_s^i) \quad (4)$$

$$y_{ij} = \sum_{n=1}^e y_{ij,n} \quad (5)$$

$$\eta_{ij,n} = \frac{y_{ij,n}}{y_{ij}} \quad (6)$$

2.4 智能变电站二次设备状态评估指标权重确定

考虑到智能变电站二次设备的状态评估所涉及的评估指标十分繁杂,而且大多数状态指标具有不确定性,因此本文的研究对象是一个多层次、多变量的综合评估体系^[1-2]。为了客观合理地评价智能变电站二次设备的整体状态情况,并且运行数学评估手段给出各个状态指标的相对重要程度即权重,本文采用层次分析法获得各层次的指标权重。由于层次分析法在电力系统状态评估中的应用比较成熟,本节不再详细介绍层次分析法确定二次设备状态指标权重的具体流程。

2.5 综合聚类 and 状态评估结果的确定

记评估对象对应于第 n 个灰类的综合聚类系数 Θ_n 为

$$\Theta_n = \sum_{i=1}^m (\eta_n \times W) \quad (7)$$

式中: η_n, W 分别取智能变电站二次设备或系统的相应评估权和指标权重。取 $\xi_n = \max_{n \in (1, e)} \{\Theta_n\}$ 作为智能变电站状态评估的最终结果。

3 算例分析

为了验证文中所提算法对于智能变电站二次设备状态评估的有效性, 采用文献[1]中对某地区 220 kV 智能变电站二次设备的状态评估测试数据。考虑到文献[1]中仅采用 4 名专家对二次设备状态评估指标进行打分难以保证评估结果的客观性, 为此采用灰色预测理论中 GM(1,1)模型^[17]对这 4 名专家的评分结果进行离散建模, 获得如下的 6 名专家的打分结果所构成的样本评估矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.24 & 0.31 & 0.39 & 0.5 & 0.64 \\ 0.3 & 0.29 & 0.31 & 0.33 & 0.35 & 0.37 \\ 0.65 & 0.71 & 0.68 & 0.66 & 0.63 & 0.61 \\ 0.9 & 0.85 & 0.81 & 0.77 & 0.74 & 0.71 \\ 0.85 & 0.9 & 0.92 & 0.95 & 0.97 & 1.0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.8 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix} \in R^{40 \times 6} \quad (8)$$

值得一提的是, 对于某些情况(例如设备电源故障或者 CPU 板故障等状态)应该将专家打分直接取零分以排除人为因素的影响, 从而加大二次设备本身状态参数权重的作用。

根据上文对于评估灰类的灰色评估系数的定义, 以测量回路报文一致性指标 x_{13} 为例具体说明其计算过程如下:

$$\text{当 } n=1 \text{ 时, } y_{13,1} = \sum_{i=1}^6 g_{\lambda_1}(f_s^i) = 0; \text{ 当 } n=2 \text{ 时,}$$

$$y_{13,2} = \sum_{i=1}^6 g_{\lambda_2}(f_s^i) = 0; \text{ 当 } n=3 \text{ 时, } y_{13,3} = \sum_{i=1}^6 g_{\lambda_3}(f_s^i) =$$

$$2.977; \text{ 当 } n=4 \text{ 时, } y_{13,4} = \sum_{i=1}^6 g_{\lambda_4}(f_s^i) = 0. x_{13} \text{ 对应}$$

的总灰色评估系数 $y_{13} = 2.977$ 。从而由公式(6)得到 x_{13} 对应于 4 个评估灰类的灰色评估权重为 $\eta_{13} = [0, 0, 1, 0]$ 。同理。可以求得全体状态指标所构成的灰色评估权矩阵 η 。

$$\eta = \begin{bmatrix} 0.54 & 0.36 & 0.1 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.74 & 0.26 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0.52 & 0.48 & 0 & 0 & 0.03 & 0.97 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.92 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.51 & 0.49 \\ 0 & 0 & 0.14 & 0.86 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.97 & 0.03 & 0 & 0 & 0.02 & 0.98 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.67 & 0 & 0 & 0.33 \\ 0 & 0.05 & 0.45 & 0.5 & 0 & 0 & 0.69 & 0.31 \\ 0 & 0 & 0.12 & 0.88 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.92 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0.98 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.51 & 0.49 & 0 & 0 & 0.97 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0.54 & 0 & 0.46 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0.69 & 0.31 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0.19 & 0.02 & 0.79 \end{bmatrix}$$

采用层次分析法获得各个指标对于二次系统的组合权重 W , 具体的计算过程参见文献[1]。二次系统的组合权重矩阵 W 如下:

$$W = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.03 & 0.01 & 0.05 \\ 0.06 & 0.02 & 0.02 & 0.01 \\ 0.01 & 0.04 & 0.01 & 0.04 \\ 0.03 & 0.05 & 0.03 & 0.03 \\ 0.04 & 0.03 & 0.02 & 0.01 \\ 0.04 & 0.03 & 0.04 & 0.04 \\ 0.02 & 0.01 & 0.03 & 0.01 \\ 0.03 & 0.03 & 0.02 & 0.01 \\ 0.02 & 0.01 & 0.03 & 0.03 \\ 0.01 & 0.02 & 0.01 & 0.01 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

根据上节可得二次设备和二次系统整体的状态评估结果记为 $\psi_{ij} (i=1, \dots, 6; j=1, 2, 3, 4)$, 其中前 6 行表示二次设备的状态评估结果, 最后 1 行表示智能变电站二次系统整体的状态评估结果。

$$\psi_{ij} = \begin{bmatrix} 0.32 & 0.04 & 0.46 & 0.18 \\ 0 & 0.07 & 0.44 & 0.49 \\ 0 & 0.06 & 0.3 & 0.64 \\ 0.05 & 0 & 0.15 & 0.8 \\ 0 & 0.54 & 0.42 & 0.04 \\ 0 & 0.02 & 0.01 & 0.97 \\ 0.12 & 0.08 & 0.22 & 0.58 \end{bmatrix}$$

根据上述评估结果计算最后 1 行中 $\max_{1 \leq j \leq 4} \{\psi_{7j}\} = 0.58$ 对照评价灰类, 得知其所对应的评估灰类为正常, 这说明智能变电站二次系统整体状态为正常状态, 可以延期检修; 此外, 二次设备中测量回路对应的评估灰类为一般状态, 应安排对其进行计划检修; 通信网络、测控装置、继电保护和同步系统对应的评估灰类为正常, 均可以延期检修; 智能终端对应的评估灰类为注意, 应优先检修。总体来看, 应优先安排对智能终端的检修工作以确保二次系统的正常运行。

4 结论

针对目前智能变电站二次设备故障机理的复杂多样性, 传统的单一性指标评估难以有效挖掘出潜在的安全隐患。文中全面建立了二次设备状态评估指标体系, 运用灰色理论建立二次设备状态评估灰色聚类模型, 并采用模糊云模型构造二次设备灰色聚类评估模型的白化权函数, 并利用层次分析法获取状态评估指标的组合同权重。结合灰色理论、云模型和层次分析法实现二次设备状态的定性和定量评估。实际案例仿真结果表明, 本文方法计算量小且操作简单, 可以准确并及时地为智能变电站二次设备和系统的状态检修工作提供科学指导。

参考文献

- [1] 王洪彬, 曾星星, 张友强, 等. 智能变电站二次设备状态的灰色层次聚类评估[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 28-36.
WANG Hongbin, ZENG Xingxing, ZHANG Youqiang, et al. Grey hierarchy cluster assessment on the operating condition intelligent substation secondary equipment[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2016, 39(3): 28-36.
- [2] 张友强, 王洪彬, 刁兴华, 等. 计及保护失效的智能变电站二次系统综合风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 155-163.
ZHANG Youqiang, WANG Hongbin, DIAO Xinghua, et al. Integrated risk assessment of intelligent substation secondary system considering the protection failure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 155-163.
- [3] 叶远波, 纪陵, 黄太贵, 等. 面向状态检修的智能变电站二次设备公共信息模型扩展研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 49-58.
YE Yuanbo, JI Ling, HUANG Taigui, et al. Extended common information model for the condition based maintenance of secondary equipment in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 49-58.
- [4] 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.
- [5] 陈少华, 马碧燕, 雷宇, 等. 综合定量计算继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 111-115.
CHEN Shaohua, MA Biyan, LEI Yu, et al. Integrative and quantitative calculation of reliability for relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 111-115.
- [6] 霍利民, 朱永利, 范高锋, 等. 一种基于贝叶斯网络的电力系统可靠性评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 36-40.
HUO Limin, ZHU Yongli, FAN Gaofeng, et al. A new method for reliability assessment of power system based on Bayesian networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 36-40.
- [7] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chunchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [8] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41.
LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [9] 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.
- [10] 郑蕊蕊, 赵继印, 吴宝春, 等. 基于加权灰靶理论的电力变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 60-66.
ZHENG Ruirui, ZHAO Jiying, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target

- theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 60-66.
- [11] 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 Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [12] 伊洋, 刘育权, 陈宇强, 等. 基于信息综合判断的智能变电站网络通信故障定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 135-140.
YI Yang, LIU Yuquan, CHEN Yuqiang, et al. Research of network communication fault location technique in smart substation based on comprehensive information judgment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 135-140.
- [13] 丁修玲, 张延旭, 蔡泽祥, 等. 基于报文解析的变电站过程层网络信息流异常保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 58-63.
DING Xiuling, ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, et al. A protection method of abnormal information flow in process layer network based on packet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 58-63.
- [14] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.
LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.
- [15] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [16] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.
WANG Chao, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.
- [17] 王开友, 陈定元. 灰色 GM(1,1)模型建模的理论探讨[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2008, 14(3): 23-25.
WANG Kaiyou, CHEN Dingyuan. Discussion on the grey modeling of GM(1,1)[J]. Journal of Anqing Teachers College (Natural Science Edition), 2008, 14(3): 23-25.
- [18] 燕国云, 侯大志. 基于灰色聚类的通信链路效能分析[J]. 电子设计工程, 2015, 23(2): 181-183.
YAN Guoyun, HOU Dazhi. Effectiveness analysis of communication link based on gray cluster method[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(2): 181-183.
- [19] 丁亚非, 李文生, 徐跃. 灰色层次聚类法在通信对抗装备效能评估中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(1): 103-107, 113.
DING Yafei, LI Wensheng, XU Yue. Application of grey hierarchy cluster algorithm to effective evaluation of communication EW equipment[J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(1): 103-107, 113.
- [20] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)