

DOI: 10.7667/PSPC151166

# 智能变电站继电保护装置状态评估实用化研究

师元康<sup>1</sup>, 姜振超<sup>2</sup>, 安寸然<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 3. 河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018)

**摘要:** 在新一代智能变电站的试点建设中, 继电保护装置的内部参数成为可观测指标, 弥补了目前继电保护状态评估工作可用数据不足和评估方法可行性差的缺陷。基于监测到的动态数据和运行及检修积累的静态数据对保护装置状态评估的实用化进行了研究。首先, 对现有基于模糊综合评判法的状态评估方法进行了改进: 对重要评价指标进行补充, 提出更完善的评价指标体系; 针对其对快速劣化指标的反应灵敏度不足, 提出了“隶属度动态修正”思想。随后, 针对所建立评估模型仍可能存在的不足, 又补充了辅助决策规则加以完善。最后, 在算例中利用该方法对某设备进行状态评估, 通过对结果的分析验证了该方法的可行性。

**关键词:** 继电保护; 状态评估; 实用化; 模糊综合评判

## Research on practical state evaluation of protection device in smart substation

SHI Yuankang<sup>1</sup>, JIANG Zhenchao<sup>2</sup>, AN Cunran<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 3. School of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** The construction of new generation smart substations makes the internal parameters of protection devices can be observed. It makes up the defect of current state assessment that lack of available data and feasibility. The paper does the practical research on state assessment of protection devices based on the monitored dynamic data and static data accumulated by operation and maintenance. Firstly, the paper improves the existing state assessment method which is based on fuzzy comprehensive evaluation method: supplement the important evaluation index to put forward a more complete evaluation index system; put forward a dynamic correction coefficient which can modify the evaluation result indirectly to make up the insufficient of the existing method that is unable to characterize the variation trend. Then, the paper adds an auxiliary decision rules to complete the possible shortcoming of the established evaluation model. Finally, the paper evaluates a device respectively in the case and analyzes the result to verify the feasibility of the established state assessment method.

**Key words:** protection devices; state assessment; practicability; fuzzy comprehensive evaluation

## 0 引言

目前, 我国智能变电站继电保护装置的检修模式为定期检修, 此类检修方式存在诸多不足, 可能造成“检修过剩”或“检修不足”。而状态检修是通过了对设备状态进行有效监测, 在准确把握设备状态的基础上展开检修工作, 可以有效解决以上问题。状态评估是状态检修的核心环节, 只有准确的评估结果才能正确地指导检修工作。

现有的继电保护装置状态评估研究主要是基于

历史运行资料、检修资料等静态资料和重要自检告警信息<sup>[1-4]</sup>。自检告警信息是装置发生缺陷或异常后发出的信息, 而状态评估的目标是掌握设备的当前状态及变化趋势, 进而提前发现缺陷并进行处理, 因此, 应将重要自检告警信息作为状态评估的补充和后备构建起整个状态检修体系, 而非作为状态评估的主要依据。同样, 静态数据无法体现设备的实时状态。文献[5]提出了对继电保护装置的电源温度、保护采集量等信息进行监测的思路, 对状态检修的实用化工作做了探索, 但对于如何利用监测信

息建立评估体系没有进行深入研究。由于缺少对继电保护装置内部状态量进行监测、收集和分析的条件，所以保护装置的状态检修的实用化研究一直没有取得实质性进展。而新一代智能变电站的试点工程实现了对装置内部部分参数的监测和收集，为状态检修的实用化研究创造了有利条件。文献[6]提出了基于部分监测量和历史信息的模糊评估算法，但仍存在一些不足：(1) 评价指标较为简单，难以对保护装置的所有重要部件进行全面、有效的评估；(2) 对快速劣化指标的反应灵敏度不足。本文针对现有研究的不足，一方面，从静态资料中挑选了重要指标并加以量化，对保护装置各插件的各类参数特性进行分析，兼顾可行性，提出了动态评价指标，并按照数据类型、内部结构和插件指标建立了三级评价指标体系；另一方面，重点对动态监测指标劣化趋势进行量化，对评估结果进行动态修正。

### 1 模糊综合评判流程

模糊综合评价是基于模糊线性变换和隶属度综合原则，将与被评价事物相关的各因素指标统一量化，并根据不同指标对评价对象的影响程度来分配权重，从而对评价对象做出合理的综合评价<sup>[7]</sup>。

电力系统在生产中会产生巨量的数据，且数据形式多样，如变电站设备的出厂资料、验收资料、台账资料、检修资料、运维资料、实时运行数据、状态监测数据等，呈现出“大数据”特征。电力系统中越来越多的分析工作将依靠“大数据”来完成，二次系统的状态检修将是“大数据”在电力系统的应用之一。在大数据背景下，问题分析过程更关注于相关性，而非直接的因果关系，模糊综合评判在一定程度上契合了此思想，故本文选取此方法为基础进行研究，结合本文的研究思路得到模糊综合评判流程如图 1 所示。

## 2 继电保护装置模糊综合评判模型

### 2.1 动态数据评价指标选取

评价指标的选取应兼顾有效性和可行性。本研究对继电保护装置内部重要模块的各项监测指标进行分析，选取了可有效反应设备状态并且现有条件可监测的指标。

#### 1) 电源插件

开关电源故障主要是由电解液的干涸以及温升导致的其他失效模式引起的<sup>[8-9]</sup>，故温度为其最主要的监测指标，此外，主要性能指标输出电压和电压纹波也是重要的监测指标。

#### 2) CPU 插件

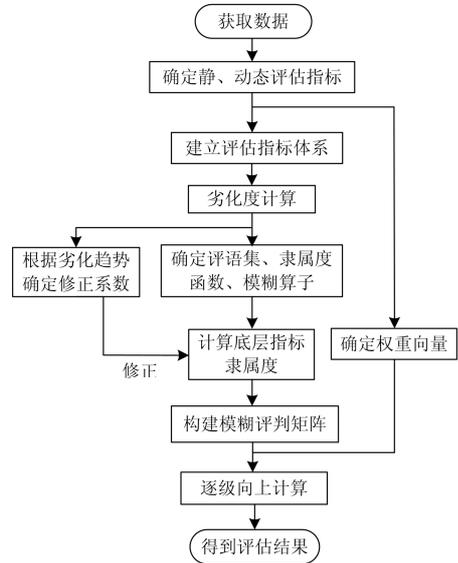


图 1 模糊综合评判过程

Fig. 1 Process of fuzzy comprehensive evaluation

CPU 插件的退化并不会明显影响计算规格和速度，并没有直接的性能指标能表征其退化程度，但温度和负荷率过高会显著影响 CPU 的性能，可能导致不可预知的软硬件故障发生，故选取温度和负荷率为监测指标。

### 3) 光模块

大多数的光学 SFP 收发器都支持数字诊断监测，使得参数可以方便获得，主要监控量：温度、激光偏置电流、发送光功率和接收光功率<sup>[10]</sup>。激光偏置电流在温度和电压恒定的条件下应该保持稳定，若偏置电流升高则意味着激光器的劣化；发送光功率直接影响到数据传输的可靠性，正常情况下 SFP 工作在恒定功率模式，若发生很大变化则可能无法正常工作且无法恢复<sup>[11]</sup>；接收光功率反映了合并单元和智能终端到继电保护装置光纤通道的工作状况，直接影响数据的传输，进而影响保护装置正常工作。

### 2.2 劣化度计算

本研究提出如下劣化度计算方法：在正常误差范围(即良好值参考范围)内均认为没有劣化，超出后按偏移程度进行量化。各指标的良好范围及上下限值可参考表 1，不同型号产品可按实际参数进行调整。

由于各评价指标的特性不同，具体的处理方法也不尽相同。

(1) 插件的工作电压、电流等指标上下波动偏离额定范围均可能导致设备故障。此类双向劣化指标以工作电压为例，处理如下：

表 1 各指标的良好值参考范围及上下限值

Table 1 Reference range of the normal values and limit values of the indexes

评价指标	良好值参考范围	门限值
电源温度	-10~65 ℃	上限: 85 ℃
电源电压	4.9~5.1 V	上限: 5.5 V 下限: 4.5 V
电源纹波系数	-1.5~+1.5%	上限: 5% 下限: -5%
CPU 温度	-10~65 ℃	上限: 85 ℃
CPU 负荷率	0~70%	上限: 95%
光模块温度	-10~65 ℃	上限: 85 ℃
光模块发送功率	-18~-14 dBm	下限: -20 dBm
光模块接收功率	-25~-14 dBm	下限: -31 dBm
光模块偏置电流	30~65 mA	上限 80 mA

评价参考模型如图 2 所示, 电压劣化计算公式如式(1)所示。

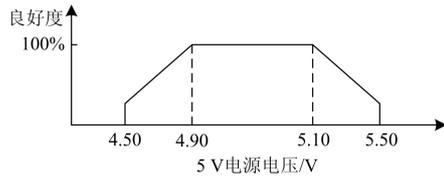


图 2 电源电压评价参考模型

Fig. 2 Evaluation reference model of supply voltage

$$U_{deg} = \begin{cases} \left| \frac{U - U_{n1}}{U_{th1} - U_{n1}} \right| & U_{th1} < U < U_{n1} \\ 0 & U_{n1} \leq U \leq U_{n2} \\ \left| \frac{U - U_{n2}}{U_{th2} - U_{n2}} \right| & U_{n2} < U < U_{th2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left| \frac{U - 4.9}{-0.4} \right| & 4.50 < U < 4.90 \\ 0 & 4.90 \leq U \leq 5.10 \\ \frac{U - 5.1}{0.4} & 5.10 < U < 5.50 \end{cases}$$

式中:  $U_{deg}$  为电压劣化度;  $U$  为电压实测值;  $U_{n1}$ 、 $U_{n2}$  分别为电压良好范围上下限;  $U_{th1}$ 、 $U_{th2}$  分别为电压告警上下限值。

(2) 光模块接收光功率随光纤通道劣化而减弱, 发送光功率随插件老化而减弱; CPU 负荷率过高会导致死机等故障; 由于预制式二次设备仓的室温稳定在 5~25 ℃<sup>[12]</sup>, 插件温度不会出现越最低限值的情况, 因此仅考虑高温影响。此类单向劣化指标以接收光功率为例, 处理如下:

评价参考模型如图 3 所示, 电压劣化计算公式

如式(2)所示。

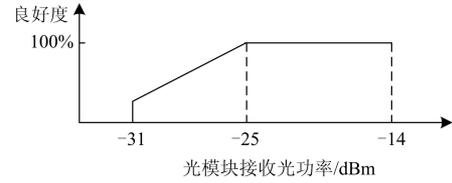


图 3 光模块接收光功率评价参考模型

Fig. 3 Evaluation reference model of received optical power

$$P_{deg} = \begin{cases} 0 & P \geq P_n \\ \left| \frac{P - P_n}{P_{th} - P_n} \right| & P_{th} < P < P_n \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 & P \geq -25 \\ \left| \frac{P - (-25)}{-6} \right| & -31 < P < -25 \end{cases}$$

式中:  $P_{deg}$  为接收光功率劣化度;  $P$  为接收光功率实测值;  $P_n$  为接收光功率良好范围下限;  $P_{th}$  为接收光功率告警下限值。

利用式(1)、式(2)同理可将各指标统一为越小越优型或分段越小越优型, 便于后续隶属度函数的建立。

### 2.3 静态数据评价指标选取

静态数据主要包括历史运行资料和检修资料等<sup>[2]</sup>, 从中选取重要指标进行量化, 并将其统一为越小越有型, 将常用的正确动作率用不正确动作率替换, 绝缘情况用绝缘电阻劣化值表示, 如表 2 所示。

表 2 静态数据评价指标

Table 2 Evaluation indexes of static data

评价指标	评价内容	单位
自身缺陷情况	缺陷次数	次/年
家族缺陷情况	缺陷次数	次/年
绝缘情况	装置绝缘电阻劣化值	MΩ
设备运行时间	投运时间	年
反措情况	未完成次数	次/年
不正确动作率	本年的不正确动作率	100%

### 2.4 评价指标体系建立

经过上文对各类指标的分析, 可建立继电保护装置的状态评价指标体系, 如图 4 所示。

## 3 继电保护装置状态评估

### 3.1 因素集和评语集的确定

因素集是所有评价指标的集合, 按照层次可将因素集分为三级共 6 个子系统:

第一级:  $U = \{u_1, u_2\}$ ;

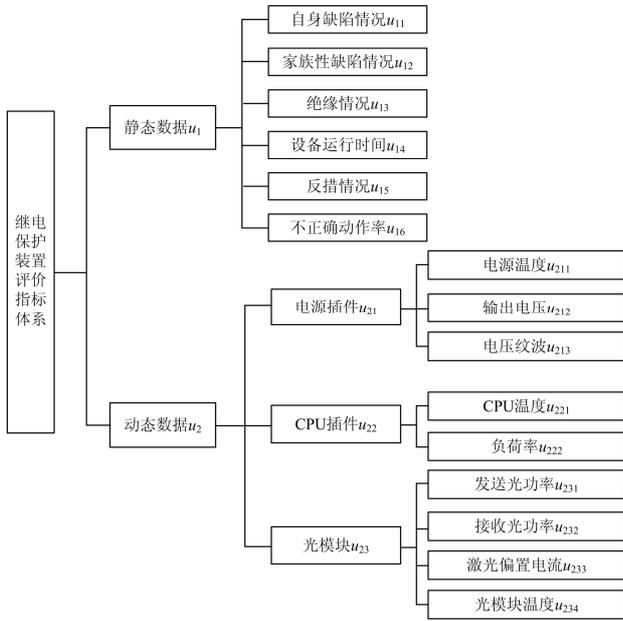


图4 继电保护装置评价指标体系

Fig. 4 Evaluation index system of protection devices

第二级： $u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\}$ 、 $u_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}$ ；

第三级： $u_{21} = \{u_{211}, u_{212}, u_{213}\}$ 、 $u_{22} = \{u_{221}, u_{222}\}$ 、 $u_{23} = \{u_{231}, u_{232}, u_{233}, u_{234}\}$ 。

评语集是设备可能处于的所有状态的集合，继电保护装置的运行状态可分为正常、一般、注意和严重状态，对应评语集可表示为  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{正常}, \text{一般}, \text{注意}, \text{严重}\}$ 。

### 3.2 权重的确定

各指标权重的确定对评价结果的影响显著，是模糊综合评价的关键环节。

由于继电保护装置基于监测信息的状态评估实用化研究还处于起步阶段，在缺乏统计数据的情况下，宜采用专家评估法，故本研究综合多位企业和高校专家的经验得出了评价指标各子系统的权重矩阵  $W = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n]$ 。

随着监测数据的积累、历史样本的补充，在实际应用中应对设备的评估成果进行定期跟踪分析，利用数据挖掘、回归拟合等方法，对权重进行不断修正，使评估结果更为合理<sup>[13-14]</sup>。

### 3.3 模糊评判矩阵的建立

设第  $i$  个指标  $u_i$  对继电保护装置的评估结果对应评语集中状态  $v_j$  的隶属度为  $r_{ij}$ ，则可将评估结果用隶属度矩阵  $R_i = [r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}]$  表示<sup>[15]</sup>。通过计算所有指标的评估结果对应的隶属度集，可建立模糊评判矩阵，如式(3)所示。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 3.4 隶属度函数的确定

选取符合实际的隶属度函数是建立模糊关系矩阵的关键，常用函数有：三角型、抛物型、正态型、岭型等。其中岭型分布函数具有主值区宽、过渡平缓的特点<sup>[16]</sup>，故本文利用岭型分布隶属函数，对应于运行状态  $v_1 \sim v_4$  的隶属度函数表达式分别如式(4)一式(7)所示。

$$r_{i1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{(a_2 - \Delta a) - a_1} \left( x - \frac{a_1 + a_2 - \Delta a}{2} \right), & a_1 < x < a_2 - \Delta a \\ 0 & x \geq a_2 - \Delta a \end{cases} \quad (4)$$

$$r_{i2}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{(a_2 - \Delta a) - a_1} \left( x - \frac{a_1 + a_2 - \Delta a}{2} \right), & a_1 < x < a_2 - \Delta a \\ 1 & a_2 - \Delta a < x < a_2 + \Delta a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - (a_2 + \Delta a)} \left( x - \frac{a_2 + \Delta a + a_3}{2} \right), & a_2 + \Delta a < x < a_3 \\ 0 & x \geq a_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$r_{i3}(u) = \begin{cases} 0 & x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{(a_3 - \Delta a) - a_2} \left( x - \frac{a_2 + a_3 - \Delta a}{2} \right), & a_2 < x < a_3 - \Delta a \\ 1 & a_3 - \Delta a < x < a_3 + \Delta a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - (a_3 + \Delta a)} \left( x - \frac{a_3 + \Delta a + a_4}{2} \right), & a_3 + \Delta a < x < a_4 \\ 0 & x \geq a_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$r_{i4}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_3 + \Delta a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - (a_3 + \Delta a)} \left( x - \frac{a_3 + \Delta a + a_4}{2} \right), & a_3 + \Delta a < x < a_4 \\ 1 & x \geq a_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 和 $\Delta a$ 共同确定了四种运行状态的边界, 如图5所示, 进而即可求得隶属度矩阵  $R$ 。

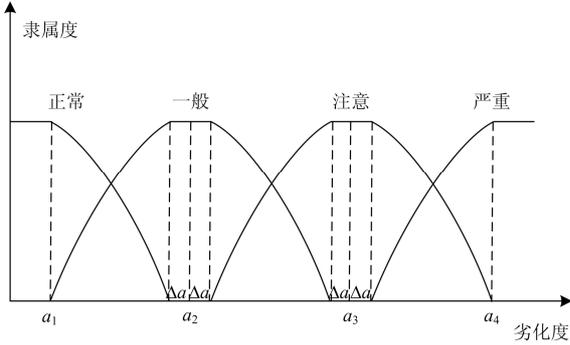


图5 岭型隶属函数

Fig. 5 Ridge-type membership function

### 3.5 隶属度动态修正

根据动态指标的当前监测值即断面信息对设备的评估存在一定的不足, 如图6中所示的两种劣化趋势, 虽然在当前时刻  $t$  具有相同的劣化度, 但其设备状态明显不能等同。

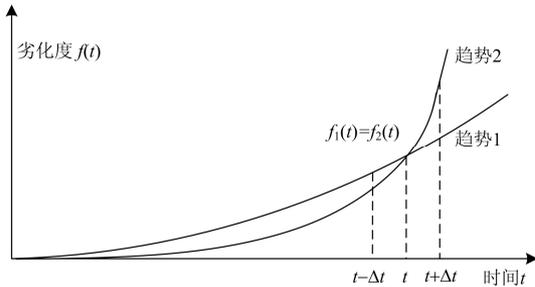


图6 劣化趋势分析

Fig. 6 Analysis of degrading tendency

目前, 新一代智能变电站对状态监测信息所作基本要求中规定: 全站二次设备每 2 h 报送一次状态信息<sup>[12]</sup>, 即  $\Delta t=2$  h。在缓慢劣化过程中,  $\Delta t$  相对于整个过程相对较小, 现有方法可及时调整评估结果, 得到相对准确的结果; 而在快速劣化过程中, 由于反应灵敏度不足, 导致评估结果不合理。针对此问题, 本研究提出隶属度修正方法, 根据不同的劣化速度进行相应的修正。设备指标劣化速度越快, 则使其隶属关系逼近严重状态的速度越快, 进而使运行人员处理越及时。

经简单分析可知, 某一动态指标只可能同时与 1 个或相邻的 2 个状态存在隶属关系, 即  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$  或  $(v_1, v_2)$ 、 $(v_2, v_3)$ 、 $(v_3, v_4)$ 。设上一次上送值、当前上送值和下一次上送值的劣化度分别为  $f(t-\Delta t)$ 、 $f(t)$  和  $f(t+\Delta t)$ , 值域均为  $[0, 1]$ , 当前隶属度计算结果对应的状态  $v_i$ 、 $v_{i+1}$  分别为  $r_i$ 、 $r_{i+1}$  (若仅隶属于  $v_i$ , 则

$v_{i+1}$  为 0), 隶属度函数边界由  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  和  $\Delta a$  确定。

若两次上传量变化满足式(8), 则将该指标的隶属度按式(9)或式(10)进行修正。

$$0.05 \cdot x \leq f(t) - f(t - \Delta t) < 0.05 \cdot (x + 1) \quad (8)$$

当  $r'_i \geq 0$  且  $i+1 \leq 4$  时, 对 2 个状态相应的隶属度进行调整:

$$\begin{cases} r'_i = r_i - \frac{a_{i+1} - a_i}{2} \cdot x \\ r'_{i+1} = r_{i+1} + \frac{a_{i+1} - a_i}{2} \cdot x \end{cases} \quad (9)$$

当  $r'_i < 0$  且  $i+2 \leq 4$  时, 即当隶属状态发生后移 ( $v_{i+1}$ 、 $v_{i+2}$ ) 后的相应调整:

$$\begin{cases} r'_i = 0 \\ r'_{i+1} = r_{i+1} + \frac{a_{i+1} - a_i}{2} \cdot x \\ r'_{i+2} = \left| r_i - \frac{a_{i+1} - a_i}{2} \cdot x \right| \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $x=0, 1, 2, 3, 4, 5$  为修正系数。

若  $f(t+\Delta t) - f(t)$  仍满足式(8), 则保留上次修正, 继续按此方法进行处理; 若  $f(t+\Delta t) - f(t) < 0$ , 则认为此前变化为偶然波动, 取消修正; 若  $f(t+\Delta t) - f(t) \geq 0.3$ , 则直接触发告警。

通过上述隶属度动态修正方法, 既可以对快速劣化进行及时处理, 又可以避免由偶然波动可能造成的误判, 尤其对于负荷率、温度此类波动性较大的指标更为必要。

### 3.6 模糊评判

模糊综合评判的运算顺序是从最底层(第三级)开始, 逐级向上运算。

首先, 对第三级子系统的权重矩阵  $W_{2i}$  和隶属度函数矩阵  $R_{2i}$  进行模糊运算, 即可得到该级各子系统的综合状态隶属度矩阵  $b_{2i} = W_{2i} \circ R_{2i} (i=1, 2, 3)$ , 其中  $\circ$  是广义模糊算子, 常用算子有:  $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\bullet, \vee)$ 、 $M(\wedge, \odot)$  和  $M(\bullet, \odot)$ , 本文采用体现权重作用明显、综合程度强的加权平均型算子  $M(\bullet, \odot)$ 。

同理, 可得到第二级的综合状态隶属度矩阵  $b_i = W_i \circ R_i (i=1, 2)$ , 进而得到第一级的隶属度矩阵  $B = [b_1, b_2]^T$ 。

最后, 利用第一级系统权重矩阵  $W$  和隶属度矩阵  $B$ , 计算得到继电保护装置整体的综合评判隶属度矩阵  $C = W \circ B = [c_1, c_2, c_3, c_4]$ , 其中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和  $c_4$  分别对应正常、注意、异常和严重四种状态的隶属度值, 隶属度值最大项对应状态即为最终评判结果。

### 3.7 辅助决策规则

1) 经过分析可知, 模糊综合评判法存在一定的缺点: 其对处于非严重状态和装置整体劣化明显的设备, 评估效果较好; 而对于某个模块的单一指标严重劣化的设备, 评估可能存在偏差。当底层参数严重劣化, 由于权值的逐层传递, 可能在上层体现的并不明显, 导致设备异常被掩盖<sup>[7]</sup>, 而任一关键模块的异常均可能导致保护装置拒动或误动。故当某评价指标的状态隶属于严重, 应触发告警, 跳出评判体系, 尽快安排处理。

2) 由于新一代智能变电站还未大规模投入运行, 继电保护装置的实时监测数据以及状态评估的应用经验都很匮乏, 在现阶段难以提出完善的方法完全利用监测指标实现状态检修, 尤其是 CPU 插件, 其故障原因多样、难以预知, 电磁干扰等突发性原因都可能造成其硬件或软件故障。此类故障一般是跃变或劣化过程极短, 此时需自检告警作为后备进行配合, 根据告警信息及时对其进行处理。

## 4 算例分析

以某台继电保护装置为例, 使用本文建立的模糊综合评判方法对其运行状态进行评估。

该装置静态数据的评判因素集  $u_1=\{1,5,0,2,0.5,0\}$ , 动态数据评判因素集如表 3 所示。

表 3 动态数据评判因素集

Table 3 Evaluate factors of dynamic data

子因素集	$f(t-\Delta t)$	$f(t)$	
$u_{21}$	原始值	{68.0℃,4.98,0.5%}	{68.6℃,5.01,0.8%}
	劣化度	{0.15,0,0}	{0.18,0,0}
$u_{22}$	原始值	{68.6℃,42%}	{69.2℃,43%}
	劣化度	{0.18,0}	{0.21,0}
$u_{23}$	原始值	{-18.2 dBm, -25.9 dBm, 67 mA, 69.4℃}	{-18.7 dBm, -25.9 dBm, 67 mA, 69.8℃}
	劣化度	{0.10,0.15,0.08,0.22}	{0.33,0.15,0.08,0.24}

将各类数据代入式(4)一式(7), 其中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  和  $\Delta a$  分别取 0、0.25、0.55、0.8 和 0.05, 可得到各子因素集对应的模糊评判矩阵分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.14 & 0.81 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{21} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.98 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0.96 & 0.23 & 0 \\ 0.15 & 0.85 & 0 & 0 \\ 0.65 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对应权重矩阵分别为:  $W_1=[0.15 \ 0.13 \ 0.12 \ 0.19 \ 0.21 \ 0.20]$ 、 $W_{21}=[0.42 \ 0.37 \ 0.21]$ 、 $W_{22}=[0.47 \ 0.53]$ 、 $W_{23}=[0.30 \ 0.30 \ 0.22 \ 0.18]$ 。

由  $b=W \circ R$  可分别计算得到各子系统的综合状态隶属度矩阵:

$b_1=[0.89 \ 0.11 \ 0 \ 0]$ 、 $b_{21}=[0.59 \ 0.41 \ 0 \ 0]$ 、 $b_{22}=[0.53 \ 0.47 \ 0 \ 0]$ 、 $b_{23}=[0.19 \ 0.80 \ 0.07 \ 0]$ 。

1) 按照常规的模糊综合评判进行评估

同理逐级进行计算, 最终得到评判结果为  $C=[0.51 \ 0.49 \ 0.02 \ 0]$ , 即设备处于正常状态。

2) 按照本文改进的模糊综合评判进行评估

发送光功率指标  $u_{231}$  较上一次上送劣化了 0.23, 满足式(8)条件, 隶属度修正后为  $[0 \ 0.36 \ 0.83 \ 0]$ , 最终评判结果为  $C=[0.51 \ 0.43 \ 0.08 \ 0]$ , 虽然设备整体状态仍判定为正常, 但该指标的状态被判定为注意状态, 运行人员对其进行持续观察。若继续以此趋势劣化, 则光模块显然已出现异常, 在实际劣化度达到严重之前, 将其隶属状态修正为严重, 根据辅助决策规则, 应及时对设备进行处理; 若指标劣化度下降, 则放弃修正, 避免误告警的发生。

## 5 结论

本文对继电保护装置状态评估的实用化方法进行了研究, 在原始的模糊综合评判基础上, 提出了较为完善的评价指标体系和“隶属度动态修正”思想, 并以辅助决策规则作为补充, 建立了相对完善和实用的评估方法。最后, 通过算例分析对本方法进行验证, 结果表明本评估方法可较为准确地反应设备的实际状态, 通过动态修正和辅助决策规则可使工程实际中可能遇到的问题得到有效解决。

后续需要开展的工作: 当前的评估方法在权重确定方面存在较多的人为因素, 随着监测数据的积累、历史样本的补充, 还应进一步对其优化, 提高评估的准确性。

### 参考文献

[1] 周晨. 台州电网继电保护状态检修评估体系的构建[D].

- 北京: 华北电力大学, 2012.
- ZHOU Chen. The construction of relay protection state maintenance evaluation system for Taizhou Grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 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.
- [3] 侯艾君. 继电保护状态评价方法及其在检修决策中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- HOU Aijun. The state evaluation method of relay protection and its use in maintenance decision[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [4] 吕文超, 吕飞鹏, 张新峰. 模糊聚类法在继电保护状态检修中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 93-97.
- LÜ Wenchao, LÜ Feipeng, ZHANG Xinfeng. application of fuzzy clustering method in the condition-based maintenance (Cbm) of relay protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(2): 93-97.
- [5] 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.
- [6] 韩平, 赵勇, 李晓朋, 等. 继电保护状态检修的实用化尝试[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 92-95.
- HAN Ping, ZHAO Yong, LI Xiaopeng, et al. Instantiation sample of relay protection state maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 92-95.
- [7] 肖运启, 王昆朋, 贺贯举, 等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2132-2139.
- XIAO Yunqi, WANG Kunpeng, HE Guanju, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132-2139.
- [8] 欧阳帆, 张亮峰, 李刚, 等. 微机保护装置逆变电源故障原因分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 150-153.
- OUYANG Fan, ZHANG Liangfeng, LI Gang, et al. Analysis of power supply module faults for microprocessor protection devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 150-153.
- [9] 师元康, 姜振超, 赵书涛. 基于内部温度的继电保护装置时变失效率研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 123-128.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, ZHAO Shutao. Research on time-varying failure rate of protection devices based on internal temperature[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 123-128.
- [10] CLARK R. SFP 光收发模块的集成故障诊断方法[J]. 光通信技术, 2003(1): 49-51.
- CLARK R. Integrated fault diagnosis methods for SFP optical transceiver module[J]. Optical Communication Technology, 2003(1): 49-51.
- [11] 周金林. 光收发模块监测系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- ZHOU Jinlin. Designing and realization of the monitoring system for optical transceiver module[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [12] 郑玉平. 智能变电站二次设备与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [13] 宫宇, 吕金壮. 大数据挖掘分析在电力设备状态评估中的应用[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 74-77.
- GONG Yu, LÜ Jinzhuang. Application of big data mining analysis in power equipment state assessment[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 74-77.
- [14] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.
- SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [15] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [16] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
- XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.

收稿日期: 2015-07-08; 修回日期: 2016-02-20

作者简介:

师元康(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站及继电保护; E-mail: yuankang\_shi@163.com

姜振超(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能变电站及继电保护。

(编辑 周金梅)