

DOI: 10.7667/PSPC162115

基于云理论的智能变电站二次设备状态评估

王月月¹, 陈民铀¹, 姜振超², 齐孟元¹, 练睿³

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 3. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000)

摘要: 针对智能变电站二次设备故障机理复杂、通过单一指标难以有效评估设备潜在隐患的问题, 根据装置内部可观测参数, 提出一种基于变权理论与梯形云模型的二次设备整体性能模糊综合评判方法。全面建立包含继电保护装置中间节点信息的二次设备状态评估指标体系, 结合层次分析法(AHP)和变权理论实现各状态指标权重的实时调整。通过云理论的数字特征处理状态参量出现的模糊性和随机性, 能够对评估指标状态特征和性能进行有效关联。实例分析表明该方法简单易行, 可为智能变电站二次设备和系统的状态检修工作提供理论依据。

关键词: 二次设备; 状态评估; 中间节点信息; 变权理论; 梯形云模型

A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model

WANG Yueyue¹, CHEN Minyou¹, JIANG Zhenchao², QI Mengyuan¹, LIAN Rui³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 3. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Failure mechanisms of secondary equipment in intelligent substation are complex, and single indicator does not provide sufficient information to predict potential failures of secondary equipment. Focusing on these problems, a fuzzy comprehensive assessment model of secondary equipment is proposed based on variable weight theory and trapezoidal cloud model. According to the observed internal parameters of devices, a state assessment indicators system of secondary equipment including the intermediate node information in relay protection device is established. The Analytic Hierarchy Process (AHP) and variable weight theory are combined to adjust variable weights of assessment indicators in real time. The eigenvalues of trapezoidal cloud model are used to describe the fuzziness and randomness of the state parameters. The characteristics and variation rule of assessment indicators are associated effectively. Case study shows that the proposed assessment model is feasible and effective, the theoretical basis is provided for condition-based maintenance of secondary equipment and relay protection system in intelligent substation.

This work is supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M612909).

Key words: secondary equipment; state assessment; intermediate node information; variable weight theory; trapezoidal cloud model

0 引言

智能变电站作为坚强智能电网的重要支撑, 其二次设备的安全可靠是电力系统稳定运行的有力保障。目前, 在继电保护系统运行维护中, 通常采用二次设备定期检修模式, 该类方法可能存在“检修过剩”或“检修不足”导致设备健康状况不明确、

故障点无法快速锁定等问题。而状态检修通过对运行设备进行状态监测, 在及时准确评估和预测设备状态的基础上开展检修工作, 能够增强设备检修的针对性和有效性, 提高系统运行可靠性以及综合经济效益, 成为当前电气设备检修的研究发展方向。状态评估是状态检修的基础, 只有准确有效地评估设备状态才能制定合理的状态检修策略。

状态评估在变压器设备中应用较多, 通常采用的方法是马尔科夫、故障树和贝叶斯等^[1-3]。而针对智能变电站二次设备的状态评估较少, 目前的研究

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M612909); 四川省电力公司科技项目“智能变电站验收评价辅助系统开发与研究”

主要集中于继电保护装置可靠性^[4-6]的状态监测与评估,单台设备状态对整个系统的检修无指导意义。状态评估^[7]大多数仍基于历史统计数据,未参考在线监测信息,评估状态缺乏实时有效性。文献[8]引入模糊综合评判对继电保护装置进行评估,指标体系不具全面性,各评价指标对装置综合状态影响的权重也缺乏科学严谨的选取。本文针对上述已有研究的不足,一方面,建立了包含继电保护装置中间节点信息的二次设备评估指标体系,采用多级模糊评判,在层次分析法基础上利用变权理论实现各状态指标权重的实时调整;另一方面,引入隶属梯形云模型,同时兼顾模糊性和随机性,以实现对各二次设备运行状态准确有效地定量评估。

1 二次设备状态评估模型构建

基于 IEC 61850 标准,智能变电站典型的系统架构为“三层两网”结构,与常规变电站的主要区别在于信息交互采用数字化传输,增加了合并单元、智能终端和交换机等过程层设备^[9-10]。数字化继电保护系统由常规或电子互感器、合并单元、保护设备、智能终端、断路器、光纤通信链路与电缆连接回路共同构成,如图 1 所示。设备间相互配合是系统功能实现的保障,继电保护系统功能状态是各装置运行状况的综合反映。为简化评估模型且不失科学性,本文选取系统主要的二次设备进行性能评估,出现故障时按照对象和功能关联性大小的不同,将保护系统所含设备重要部件及通道监测信息(简称“物理监测指标”)、设备内部逻辑中间节点信息(简称“逻辑监测指标”)整体纳入综合评估。

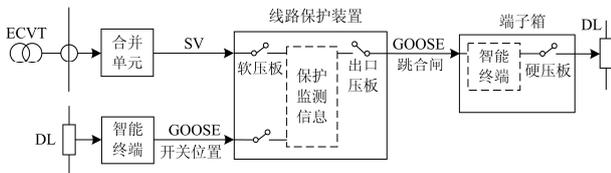


图 1 智能变电站的继电保护系统构成

Fig. 1 Constituent parts of relay protection system in intelligent substation

1.1 设备评估指标选取

智能变电站的状态评估大多数只针对单台设备,无法真实反映系统整体的实时运行状态。变电站数字化技术的应用迫切需要站在系统的角度建立一套完善的二次设备整体性能与功能的评估体系。因此,评价指标在满足可监测性和有效性的同时还应该具有整体性。

1) 继电保护装置评价指标

保护装置的性能评估应主要关注通信性能,为全面反映保护装置性能,还应考虑其逻辑动作情况。《继电保护信息规范》规定了保护启动后装置内部生成的保护功能关键逻辑点、状态量、保护元件的计算模拟量等中间节点信息的输出要求。通过分析故障过程中保护装置内部动作逻辑和先后顺序,发现潜在问题并采取有效解决措施。

以线路保护装置中的纵联差动主保护和距离后备保护为例,分别如图 2、图 3 所示。通过电流类型环节区分相间电流保护和零序电流保护,异常告警主要包括 CT 断线和通道异常,任何一个逻辑环节异常,都会影响保护装置是否跳闸。当具体到对每个保护装置进行状态评估时,根据自身的动作逻辑选取装置内部关键逻辑结果作为保护装置逻辑性指标。因此,选取纵联差动正动性(装置正确动作时逻辑监测为“0”,错误为“1”),以及距离保护正动性等指标作为线路保护逻辑监测指标。

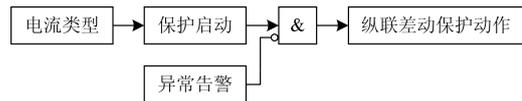


图 2 纵联差动保护逻辑框图

Fig. 2 Logic diagram of longitudinal differential protection

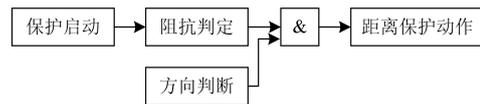


图 3 距离保护逻辑框图

Fig. 3 Logic diagram of distance protection

经上述分析,将保护装置的评价因素分为检修指标和运行指标两大类,选取历史统计信息作为静态指标、检修记录作为动态指标、在线监测信息作为运行指标,建立相应状态评价体系,如图 4 所示。

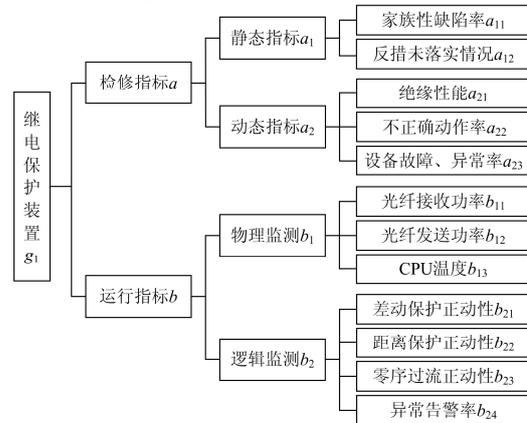


图 4 继电保护装置状态评估指标体系

Fig. 4 State assessment indicators system of relay protection device

2) 合并单元评价指标

合并单元负责采集一次电流电压信息, 是智能变电站测量、保护及控制等功能实现的基础, 作用十分重要。因此, 其对数据采样精确度具有较高要求; 另外, 时间标记是采样值的基本属性, 所以对时间同步性能的要求也较高。

3) 智能终端评价指标

智能终端实现对一次设备状态监测、控制等, 负责传达其他二次设备的开关控制命令。其侧重于控制, 对时间和通信性能要求较高。智能终端一般靠近断路器、变压器等就地安装, 工作环境较恶劣, 需要加强监控力度, 提高设备安全性和可靠性。

4) 交换机评价指标

智能变电站以光纤以太网作为信息传输通道、以太网交换机成为信息中间转换的枢纽, 其性能和运行状况将直接影响全站设备运行可靠性, 在通信性能中选取关键状态参量作为评估指标。

1.2 二次设备评估指标体系建立

通过对评价指标的分析, 建立全面反映二次设备整体运行状态的指标体系如图 5 所示。

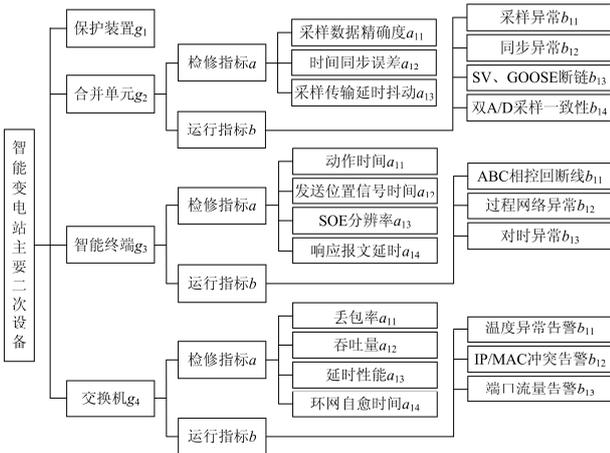


图 5 智能变电站二次设备状态评估指标体系
Fig. 5 State assessment indicators system of secondary equipment in intelligent substation

2 云模型的基本理论

云模型能够实现自然语言中定性概念与其定量区间的不确定性转换, 能够将模糊性(边界亦此亦彼)和随机性(发生可能性)有机结合, 构成定性定量间的映射^[11-12]。模糊评估常用的隶属函数一旦假定后, 便转化成精确数值表达式, 且没有考虑复杂系统的随机性。云模型能够很好地解决当前采用隶属函数进行模糊评估的不彻底性问题。目前, 云模型在多层次、多指标的复杂性系统中得到广泛应用, 能够适用于对评价指标的描述具有较强模糊性和随

机性的二次设备综合评估体系中。

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念, 若定量值 $x \in U$, 且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 属于 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数, 则 x 在论域 U 上的分布称为云, 用 $C(x)$ 表示, 每个 $(x, \mu(x))$ 称为一个云滴。 N 个云滴聚集在一起便形成了云。

云的数字特征为期望 Ex 、熵 En 、超熵 He , 其中期望表示云滴在论域空间分布的期望值; 熵表示模糊性和随机性的相关度; 超熵为熵的熵, 体现熵的离散程度, 间接反映云的离散程度与厚度。

正态云的数学期望曲线, 即 x 对 C 的隶属度为

$$\mu(x) = \exp\left[-(x - Ex)^2 / 2En^2\right] \quad (1)$$

正态云的生成算法如下:

1) $En'_i = \text{NORM}(En, He^2)$, 生成以 En 为期望、 He^2 为标准方差的正态随机数 En'_i 。

2) $x_i = \text{NORM}(Ex, En'^2_i)$, 生成以 Ex 为期望、 En'^2_i 为标准方差的正态随机数 x_i 。

3) 计算 $\mu_i(x) = \exp\left[-(x_i - Ex)^2 / 2En'^2_i\right]$, 得到 (x_i, μ_i) 的云滴。

4) 重复步骤 1)~3), 直到形成 N 个云滴。

为更合理地描述评价指标特点, 本文在正态云基础上, 采用更为普遍的梯形云。梯形云共有 4 个数字特征, 用 (Ex_1, Ex_2, En, He) 表示。它的期望值是一个区间, 可实现定性到多个定量的转换。用自然语言描述的“青年人”梯形云模型, 如图 6 所示。

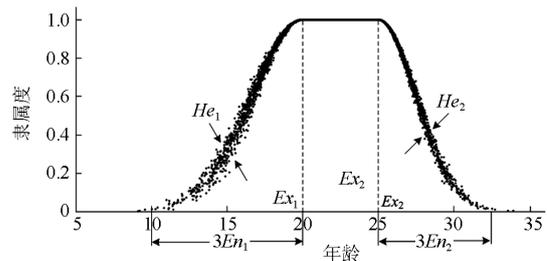


图 6 “青年人”梯形云及其特征值
Fig. 6 Age range trapezoidal cloud of young people and its eigenvalues

3 模糊梯形云模型评估方法

3.1 常权重的确定

二次设备状态评估是分层次、多指标的综合评判, 根据指标间的相对重要性客观合理地分配各指标权重是量化评估的关键, 本文采用层次分析法对各层次的指标赋予权重^[13-16]。

邀请多位专家对图 5 中同一级别的各个指标采

用表 1 的 1-9 标度法进行状态指标间的重要性比较。

表 1 判断矩阵的 1-9 标度法

Table 1 1-9 scale law of judge matrix

p_i 比 p_j	相同	稍强	强	很强	绝对强	反比较
a_{ij}	1	3	5	7	9	$a_{ji} = 1/a_{ij}$

介于相邻等级之间的程度依次用 2、4、6、8 将其量化，由此得到权重判断矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times m}$ 。

利用判断矩阵 A 求出其最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量，将其归一化处理。为消除不同专家打分的主观性与片面性，归一化处理后的特征向量需要通过一致性检验，即可得到表征各评价指标相对重要性的初始权重矩阵 $W_k^0=[w_1^0, w_2^0, \dots, w_m^0]$ 。具体计算过程请见文献[13]。

3.2 变权重系数的建立

经过层次分析法确定的各指标权重为常数，不会随着指标状态量值的不同而改变。在二次设备评估指标体系中，当权重较小的指标严重偏离正常值时，不能通过模糊算子突出该指标对评判结果的影响。

为充分反映二次设备的真实运行状态，本文引用变权理论^[17]突出异常状态量或性能较差指标在综合评价中的影响，实现对各评价指标权重系数的实时调整。依据变权理论，单个指标 i 的变权计算公式为

$$w_i = \frac{w_i^0 S_i}{\sum_{k=1}^n w_k^0 S_k} \quad (2)$$

式中， S_i 为状态变权，是关于指标实际测量值 u_i 的函数。根据评估体系中性能指标的特点，选择相应的 S_i 函数作为性能指标的状态变权。

越小越优型

$$S_{i1} = \begin{cases} \frac{u_{i\max} + u_i}{u_{i\max}}, & u_i \geq u_{i0} \\ 1, & u_i < u_{i0} \end{cases} \quad (3)$$

越大越优型

$$S_{i2} = \begin{cases} \frac{u_{i\min} + u_i}{u_i}, & u_i \leq u_{i0} \\ 1, & u_i > u_{i0} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $u_{i\max}$ 或 $u_{i\min}$ 为该指标运行极限值，即注意值； u_{i0} 为该指标运行允许值，即状态良好值。具体数值可以通过相应设备说明书、技术规范以及运行经验获得。通过上述变权处理就可以在常数基础上，对性能较差的指标适当增加权重值，突出在综合评估

中的作用，使得对二次设备性能的模糊综合评价更加准确可靠。

3.3 评估指标状态等级划分

本文采用相对劣化度 x_i 来表征设备各指标偏离正常状态的程度，它是一个介于 0 与 1 之间的定量指标，具有统一量纲。0 和 1 分别为 x_i 处于劣化的始末两种极端状态。根据不同性能指标的特点，越小越优型指标如 SOE 精确度等，如式(5)所示。

$$x_i = \left(\frac{u_i - u_{i0}}{u_{i\max} - u_{i0}} \right)^\alpha \quad (5)$$

越大越优型指标如绝缘性能等，如式(6)所示。

$$x_i = \left(\frac{u_{i0} - u_i}{u_{i0} - u_{i\min}} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中， $\alpha=1$ ，反映指标参数变化对设备状态的影响程度。要对二次设备的状态进行合理评估，在相对劣化度的基础上更好地反映各设备运行状态的优劣程度。根据专家意见以及运行经验，将二次设备各评价指标的运行状态划分为“正常、注意、异常、严重”4 个等级，相应的评语集为 $V=[v_1, v_2, v_3, v_4]$ ，如表 2 所示。

表 2 指标状态评估标准

Table 2 State assessment standard for indicators

相对劣化度	0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	0.8~1
运行状态	正常(v_1)	注意(v_2)	异常(v_3)	严重(v_4)
检修策略	延期检修	计划检修	尽快检修	立即检修

3.4 隶属梯形云模型的建立

根据相对劣化度和运行状态的关系，将单个评价指标的 4 个状态等级区间定为： $C_1(0, a)$ ， $C_2(a, b)$ ， $C_3(b, c)$ ， $C_4(c, d)(d, \infty)$ 。按照表 3 中的方法^[18-19]计算云的数字特征，即可得到各评估指标相对应的梯形云模型，其中 He 取 0.005。

表 3 梯形云模型特征值确定方法

Table 3 Eigenvalues determination of trapezoidal cloud model

特征值	C_1	C_2	C_3	C_4
Ex_1	0	$a+0.4(b-a)$	$b+0.4(c-b)$	$c+0.4(d-c)$
Ex_2	$0.6a$	$a+0.6(b-a)$	$b+0.6(c-b)$	d
En_1	—	$\frac{Ex_{21} - Ex_{12}}{3}$	$\frac{Ex_{31} - Ex_{22}}{3}$	$\frac{Ex_{41} - Ex_{32}}{3}$
En_2	$\frac{Ex_{21} - Ex_{12}}{3}$	$\frac{Ex_{31} - Ex_{22}}{3}$	$\frac{Ex_{41} - Ex_{32}}{3}$	—
He	0.005	0.005	0.005	0.005

以动作时间为例，生成的梯形云模型如图 7 所示。当得到确定的相对劣化度时，可以直观地看出它隶属于某一状态等级的程度。

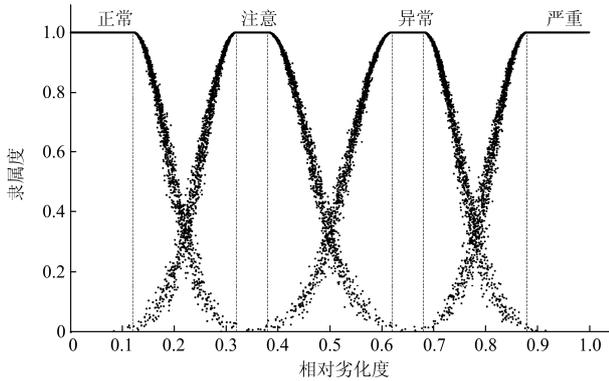


图 7 隶属梯形云模型

Fig. 7 Membership trapezoidal cloud model

根据测得的第 i 个评估指标状态量 u_i , 计算出对应的相对劣化度 x_i , 设 x_i 在一定范围误差内与第 j 个状态等级的梯形云朵有 M 个云滴相交, 则取相交云滴的隶属度平均值作为该指标 i 在第 j 个等级的隶属度, 记为 r_{ij} 。通过对同一级别所有指标进行计算, 得到各自相应的隶属度, 从而构建模糊评判矩阵 R_k 。

3.5 基于梯形云模型的模糊综合评判

模糊综合评判从最底层次开始, 逐级往上运算。首先, 对第 4 级指标的变权重矩阵 W_{4k} 与评判矩阵 R_{4k} 进行模糊综合运算, 得到该级综合评判矩阵

$$D_{4k} = W_{4k} * R_{4k} = [w_1, w_2, \dots, w_m] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{m4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $*$ 为模糊算子, 常用算子有 $M(\wedge, \vee)$ 、 $M(\cdot, \vee)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$ 。本文采用对所有指标依权重大小均衡兼顾, 适用于多层次、多指标综合程度强的加权平均算子 $M(\cdot, +)$ 。

同理, 进一步可依次得到第二级和第一级的综合评判矩阵 $D=[D_1, D_2, D_3, D_4]^T$, 利用第一级指标变权重矩阵 W 与 D 进行评价, 由此得到所有设备整体运行状态评估矩阵 $B=W*D=[b_1, b_2, b_3, b_4]$ 。最后通过隶属度最大原则判断设备整体运行状态等级。

4 算例分析

以某省网所辖智能变电站为例, 根据继电保护运行管理系统所获得的运行参数, 采用本文建立的模糊云模型综合评判方法对其运行状态进行评估。

根据相关规程规范, 得到各设备隶属函数参数, 如表 4—表 6 所示。其中, 运行指标状态正常用 “0” 表示, 异常用 “1”。

表 4 继电保护装置隶属函数参数

Table 4 Membership function parameters of protection device

保护装置 g_1		单位	u_{\min}	u_0	u_{\max}	u_i
静态指标	家族性缺陷率 a_{11}	次/年	0	0	3	2
	反措未落实情况 a_{12}	次/年	0	0	0	0
动态指标	绝缘性能 a_{21}	MΩ	10	20	20	14.2
	不正确动作率 a_{22}	次/年	0	0	2	1
	设备故障异常率 a_{23}	次/年	0	0	4	3
物理检测	光纤接收功率 b_{11}	dBm	-20	-17	-14	-18.1
	光纤发送功率 b_{12}	dBm	-31	-22	-14	-26.4
	CPU 温度 b_{13}	℃	-20	60	85	68.6
逻辑监测	差动保护正动性 b_{21}	—	—	0	—	1
	距离保护正动性 b_{22}	—	—	0	—	0
	零序过流正动性 b_{23}	—	—	0	—	0
	异常告警 b_{24}	—	—	0	—	1

表 5 合并单元隶属函数参数

Table 5 Membership function parameters of merging unit

合并单元 g_2		单位	u_{\min}	u_0	u_{\max}	u_i
检修指标	采样数据精确度 a_{11}	%	0	0	5	1.83
	时间同步误差 a_{12}	μs	-1	0	1	2
	采样传输延时抖动 a_{13}	μs	0	1	2	1.43
运行指标	采样异常 b_{11}	—	—	0	—	0
	同步异常 b_{12}	—	—	0	—	1
	SV、GOOSE 断链 b_{13}	—	—	0	—	1
	双 A/D 采样一致性 b_{14}	—	—	0	—	0

表 6 智能终端隶属函数参数

Table 6 Membership function parameters of smart terminal

智能终端 g_3		单位	u_{\min}	u_0	u_{\max}	u_i
检修指标	动作时间 a_{11}	ms	0	4	7	6.5
	发送位置响应时间 a_{12}	ms	0	10	15	12.6
	SOE 分辨率 a_{13}	ms	0	1	2	1.4
	响应报文延时 a_{14}	ms	0	0.8	1	0.9
运行指标	ABC 相控回断线 b_{11}	—	—	0	—	0
	过程网络异常 b_{12}	—	—	0	—	0
	对时异常 b_{13}	—	—	0	—	0

采用层次分析法可得保护装置第四级各指标的常权重为 $W_{1a1}^0=[0.55, 0.45]$ 、 $W_{1a2}^0=[0.164, 0.539, 0.297]$ 、 $W_{1b1}^0=[0.25, 0.25, 0.5]$ 、 $W_{1b2}^0=[0.423, 0.227, 0.227, 0.123]$ 。由式(2)一式(4)对常权进行变权重处理, 可得到相应变权重为 $W_{1a1}=[0.671, 0.329]$ 、 $W_{1a2}=[0.174, 0.503, 0.323]$ 、 $W_{1b1}=[0.261, 0.328, 0.411]$ 、 $W_{1b2}=[0.498, 0.178, 0.178, 0.146]$ 。与初始常权重对比分析得出, 动态修整后的权重可以较为贴切地反映出保护装置实际运行状况, 提高了性能较差指标在综合评价中的影响。通过 3.3 节计算出各指标相对劣化度, 再根据 3.4 节进行分析, 分别得到保护装置各指标的模糊评判矩阵:

$$R_{1a1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.019 \\ 0.495 & 0.218 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1a2} = \begin{bmatrix} 0 & 0.052 & 0.879 & 0 \\ 0 & 0.324 & 0.338 & 0 \\ 0 & 0 & 0.574 & 0.155 \end{bmatrix}$$

$$R_{1b1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.955 & 0.077 & 0 \\ 0 & 0.108 & 0.682 & 0 \\ 0.058 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1b2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.214 & 0.491 \\ 0.489 & 0.202 & 0 & 0 \\ 0.493 & 0.266 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.219 & 0.482 \end{bmatrix}$$

由 $D=W*R$, 逐级分析计算, 得到继电保护装置综合评判矩阵 $D_1=[0.095, 0.239, 0.329, 0.127]$ 。可以看出保护装置处于异常状态, 发生故障的可能性较高, 应加强关注尽快检修。

按照相同方法分别对各设备进行计算, 合并单元综合评判矩阵 $D_2=[0.140, 0.185, 0.081, 0.397]$, 性能较差需立即检修; 智能终端综合评判矩阵 $D_3=[0.293, 0.237, 0.078, 0.130]$; 最终得到所有设备整体的评估矩阵 $B=[0.149, 0.226, 0.217, 0.189]$ 。若用最大隶属度判定所有二次设备整体处于注意状态, 使得评判信息未得到充分利用, 造成综合评判决策不易分辨。从评估矩阵可以看出, 整体设备在“注意”和“异常”的隶属度分别为 0.226、0.217, 相差不大。由此推断, 二次设备整体的状态处于“注意”和“异常”之间。总体而言, 设备可靠性在下降, 整体性能有劣化倾向, 可以继续运行。需要对隶属于“异常”较高的指标持续观察, 若劣化趋势仍在增加, 应及时对设备进行处理。

5 结论

依照相关技术规范与标准, 建立了全面反映二次设备整体状态的指标体系。引入变权理论实现指标权重的实时调整, 科学反映部分指标偏离正常值时在综合决策过程中的影响。采用梯形云模型代替模糊隶属度函数, 兼顾评估指标的模糊性与随机性, 实现指标运行状态隶属度的定量计算。该模糊综合评判方法实现了对多层次、多指标系统的综合评估。实例分析表明, 该方法对智能变电站二次设备的实际运行状态进行了合理有效评估, 为状态检修提供了一种新型适用的理论方法。

基于梯形云模型评估的准确度, 取决于设备各指标自身的运行特点和性能, 即云模型的数字特征

值, 特别是两个期望值。其可以根据大量监测数据和运行经验得到, 期望值的获取比直接得到各指标数据的分布规律更容易, 实用价值大。因此, 为克服数据处理的不足之处, 减少特征值确定的主观性, 将对评估模型进一步优化, 提高评估准确度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.
XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [5] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.
ZENG Kee. Research on operation situation and reliability indices of protective relays in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85.
- [6] 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.
- [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] 曹团结, 黄国方. 智能变电站继电保护技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [10] 贺晓, 李俊, 陈洁羽, 等. 智能变电站配置文件管控系统建设方案研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(8): 75-87.
- HE Xiao, LI Jun, CHEN Jieyu, et al. Construction scheme study on configuration file management and control system in intelligent substation[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(8): 75-87.
- [11] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [12] 田松峰, 胥佳瑞, 王美俊, 等. 基于 EEMD 云模型与 SVM 的汽轮机转子故障诊断方法[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 111-114.
- TIAN Songfeng, XU Jiarui, WANG Meijun, et al. A rotor fault diagnosis method based on EEMD cloud model and SVM[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 111-114.
- [13] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [14] 赵云飞, 陈金富. 层次分析法在及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-87.
- ZHAO Yunfei, CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 85-87.
- [15] 顾煜炯, 徐婧, 李倩倩, 等. 燃煤发电机组调峰能力模糊综合评估方法[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 15-21.
- GU Yujiong, XU Jing, LI Qianqian, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method for peak shaving capability of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 15-21.
- [16] 左军, 王永庆, 马磊. 基于多层次模糊综合评价法的配电网风险评估研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 28-32.
- ZUO Jun, WANG Yongqing, MA Lei. Distribution grid risk assessment based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 28-32.
- [17] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)—变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
- LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII) — variable weights analysis[J]. Fuzzy System and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [18] 张键议, 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.
- [19] 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.
- [20] 师元康, 姜振超, 安寸然. 智能变电站继电保护装置状态评估实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 119-125.
- SHI Yuankang, JIANG Zhenchao, AN Cunran. Research on practical state evaluation of protection device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 119-125.
- [21] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [22] 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.

收稿日期: 2016-12-28; 修回日期: 2017-03-20

作者简介:

王月月(1992—), 女, 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: w_yyue@163.com

陈民铀(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算智能及其在电力系统中的应用、分布式发电技术、智能电网; E-mail: mchencqu@126.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. E-mail: jiangzhenchao@126.com

(编辑 张爱琴)