

DOI: 10.7667/PSPC160617

基于变权物元可拓模型的二次设备状态综合评价

刘映尚¹, 陶文伟¹, 周凯², 叶艳军³, 李金¹, 徐鹏¹

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对二次设备状态评价的特点, 提出了基于变权物元可拓的二次设备状态综合评价模型。结合物元可拓理论, 确立二次设备的状态信息经典域, 建立状态参量物元矩阵。同时, 充分考虑权重确定过程的主观性, 运用变权理论对各评价指标的权重进行修正, 并比较了三种权重确定方法。结果表明, 变权法对异常指标具有放大作用, 更加符合设备管理要求。最后引入贴近度函数对二次设备的状态进行综合评判。以某 220 kV 变电站某二次装置为例, 评价结果显示设备处于注意状态, 偏向异常状态的程度较大, 结果基本符合设备实际运行情况, 从而验证了该方法的正确性。

关键词: 变权理论; 物元可拓模型; 二次设备状态评价; 贴近度; 敏感度分析

Comprehensive evaluation on secondary equipment condition based on matter-element extension model with variable weight

LIU Yingshang¹, TAO Wenwei¹, ZHOU Kai², YE Yanjun³, LI Jin¹, XU Peng¹

(1. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: This paper proposes secondary device status evaluation comprehensive model based on variable weights matter-element extension aiming at characteristics of the secondary device status evaluation. A secondary device status information classical field is established to get state parameters matrix. At the same time, state parameters' weights are corrected by using variable weights theory to overcome the subjective factors of traditional method, three kinds of weight determination method are compared, the results indicate that variable weighting method enlarges anomaly index to make evaluation result worse, which is in line with the device management requirements. Finally, closeness degree is also introduced to judge the condition of the secondary device comprehensively. A secondary device in an 220 kV substation is evaluated using this method, the result shows that the device is in the state of attention, tending to a greater degree of abnormal state, which is consistent with actual operation status of the device, verifying the correctness of the method.

Key words: variable weight theory; matter-element extension model; secondary equipment state evaluation; closeness degree; sensitivity analysis

0 引言

随着电网规模的快速发展, 数量急剧增长的电气二次设备对运维管理提出了更高的要求, 采用状态检修相比事故后检修、定期检修等检修方式可提高运维效率, 开展二次设备状态检修必然成为趋势。二次设备状态评价作为其状态检修的基础^[1], 状态评价结果的客观性直接关系到检修决策的正确性。

因此, 需要建立一种客观、合理的综合评价方法对二次设备状态进行评价。

近年来, 国内已经对二次设备状态评价工作开始重点关注, 但仍处于起步阶段, 当前对二次设备状态评价的方法大致有模糊理论方法^[2]、马尔科夫模型^[3]、层次分析法^[4]、专家打分法^[5-6], 模糊理论和层次分析法在综合评价二次设备健康状态时, 受到主观的影响较大, 评价结果的客观性较差; 聚类分析法无需主观确定权重, 但评价时所需的样本数据较大, 且物理意义不够明确; 专家打分法操作简

单, 在目前的评价中应用最为广泛, 该方法需要评价人员对业务有较高的熟练程度, 且存在主观因素较强等问题, 另外该方法只能根据由人员进行逐项打分, 工作量较大, 因此不能很好地适用于二次设备状态评价。

物元可拓模型是一种能够解决评价对象模糊性、多样性、不相容性的评价方法^[7], 该方法在电网风险^[8]、变压器状态^[9]、电能质量评价^[10]等方面已经有了较好的应用, 本文引用物元可拓方法对二次设备进行状态评价, 并采用变权理论确立权重以减少主观因素对设备评价结果的影响, 基于该方法对设备状态贴合度进行综合预判, 最后以某 220 kV 变电站测控装置为例, 采用本文提出的方法进行了验证, 并分析了各指标对设备状态影响的敏感度, 评价结果符合实际。

1 变权物元可拓模型

物元理论是通过利用物元模型来解决实际问题的, 以可拓集合理论和物元可拓方法作为理论框架, 建立经典域、节域和评价等级, 根据指标的实际数据求取待评价对象与评价等级之间的隶属度, 以此来确定评价对象的等级。

物元是物元可拓模型的基本组成, 作为描述事物的基本元, 物元是以事物、特征及事物关于该特征的量值三者所组成的有序三元组, 记为 $R=(\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})=(N, C, V)$ 。该方法的基本步骤如下。

- 1) 确定待评价的物元矩阵及经典域、节域物元矩阵表示为

$$R_0 = (N_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} N_0 & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_0 为待评价的物元; C_i 表示 N_0 的 n 个特征; $i=1, 2, \dots, n$, 为待评物元的指标数; V_i 是 N_0 对应 C_i 的实际值。

经典域物元 R_j 表示为

$$R_j = (N_j, C_i, V_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & V_{1j} \\ & C_2 & V_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & C_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N_j 为标准事物划分的第 j 个评价等级; V_{ij} 是 N_j 对应 C_i 的取值范围, 即为经典域; a_{ij} 和 b_{ij} 分别为 V_{ij} 的上下限。 $j=1, 2, \dots, m$ 。

节域物元 R_p 表示为

$$R_p = (N_p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & V_{p1} \\ & C_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_p 为标准事物全体; V_{pi} 是 N_p 对应 C_i 的取值范围, 即为节域。

2) 变权理论确立各评价指标的权重

在评价过程中, 各指标对需要研究的评价事物的不同重要程度的量化反映通过指标权重来确定, 权重是否合理对二次设备的状态评价至关重要。本文引用文献[11]提出的基于因素空间理论的变权综合模型所得出的结论。

设因素状态变量为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 因素常权变量为 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$, 状态变权向量为 $S(X)=(S_1(X), S_2(X), \dots, S_n(X))$, 则 W 和 $S(X)$ 的归一化的 *Hadamard* 乘积可求得变权向量 $W(X)=(w_1(X), w_2(X), \dots, w_n(X))$ 为

$$w_i(X) = \frac{w_i S_i(X)}{\sum_{k=1}^n w_k S_k(X)}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: $S_i(X) = e^{\alpha(x_i - \bar{x})}$; α 为变权因子, α 的取值不同各指标的权重变化不同。

3) 贴适度计算

在对评判结果集化时最常采用的方法是最大隶属原则, 因该方法简便实用, 而此法在评判过程中可能丢失大量的信息, 导致一些评判结果与实际不相符^[12], 本文采用贴适度概念代替最大隶属度函数, 分析各层面指标对状态等级的集化程度, 文献[13]提出贴适度公式整理得

$$K = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D w_i \quad (5)$$

式中: K 为贴适度; D 为距离; w_i 为待评指标的权重; n 为评价指标的个数。

待评物元与经典域的距离为

$$D_j(v_i) = \left| v_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \quad (6)$$

则待评物元对应于各等级的贴适度为

$$K_j(N) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D_j(v_i) w_i(X) \quad (7)$$

4) 等级判定

由贴适度计算待评物元的等级变量特征值为

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \overline{K}_j(N)}{\sum_{j=1}^m \overline{K}_j(N)} \quad (8)$$

其中, $\overline{K}_j(N) = \frac{K_j(N) - \min K_j(N)}{\max K_j(N) - \min K_j(N)}$, 根据

特征值即可判断出待评物元所处等级。

2 二次设备健康状态评价模型

2.1 评估体系的构建

本文基于二次设备运行机理, 结合全寿命周期理论和可靠性理论, 将二次设备的信息按来源对象不同分为历史运维记录、实时运行状态、运行环境因素三个方面, 二次设备健康状态评估体系如图 1 所示, 分别表示设备不同运行时期与设备健康状态有关的状态参量。

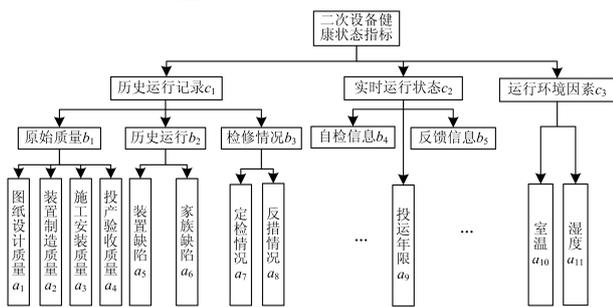


图 1 二次设备健康状态评价指标体系

Fig. 1 Secondary equipment health evaluation index system

2.1.1 二次设备历史运行记录

二次设备经过一段时间的运行后, 由于故障、维修、设备老化等原因, 导致二次设备的运行状态相对于设备刚投运时的状态有所下滑, 根据二次设备的历史因数信息进行分析, 二次设备的历史因数主要从设备的历史运维记录和台账信息中获取, 主要包括原始质量、历史运行和检修情况 3 个方面^[14]的内容。

2.1.2 二次设备在线监测信息

随着计算机和通信技术的发展, 数字化及智能芯片的运用, 以及二次设备数字化与智能化, 监测数量和精度都有很大程度的提高, 二次设备监测信息一方面来源于自检, 包括设备本身的自检信息, 还包括设备相关附属元器件的自检信息, 如继电保护设备的自检和二次回路的自检信息; 另一方面, 来源于其他设备的反馈信息, 即与监测对象相关的设备与该设备通信或比对而反馈的信息, 如同源信息比对等。由于二次设备种类繁多, 不同设备之间的监测信息存在很大差异, 甚至同种设备而来自不

同厂家监测信息也有较大差异, 因此难以实现监测信息的统一。此外, 运行年限也作为一种实时运行信息影响设备的运行状态。

2.1.3 运行环境信息

二次设备健康状态与设备所处的运行环境息息相关, 设备运行环境的优劣程度会直接或间接的对二次设备的健康状态产生影响, 对设备运行环境进行监测, 实时把控设备运行环境, 并及时调整, 使设备运行在最佳环境。二次设备的运行环境主要从影响二次设备运行的温湿度和磁场等方面考虑。

2.2 健康状态评价流程

本文采用的物元可拓模型评价方法的基本思路是: 首先将评价对象的水平分为 j 个等级, 结合相关标准和运行人员经验确定各级别的范围; 其次, 运用变权理论确定各评价指标的权重, 将各评价指标值代入各等级集合中计算贴近度, 最后根据贴近度计算设备的等级特征值, 由此判断待评设备的状态。评价流程如图 2 所示。

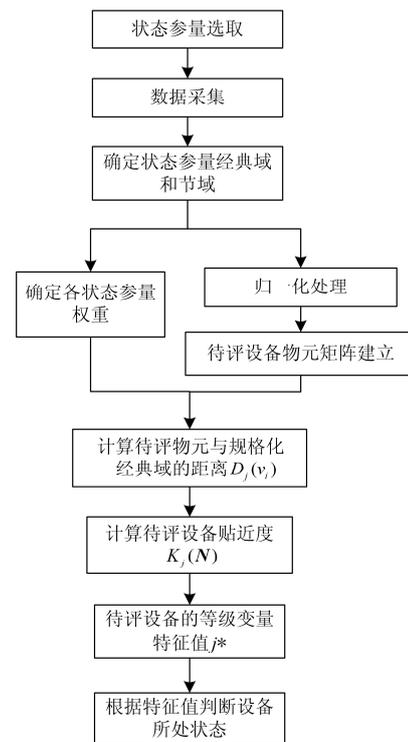


图 2 二次设备健康状态评估流程图

Fig. 2 Secondary equipment health status assessment flowchart

1) 经典域和节域的建立

本文依据中国南方电网公司二次设备状态评价相关规定确定各二次参量经典域。在进行经典域建立时, 各评价参量单位不一, 状态量之间的数值相差较大, 因此, 需要对各状态量的状态值进行归一

化处理。

经典域归一化

$$\mathbf{R}'_j = (N_j, \mathbf{C}_i, \mathbf{V}_{ij}) = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & (a_{1j}/b_{p1}, b_{1j}/b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{2j}/b_{p2}, b_{2j}/b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{nj}/b_{pn}, b_{nj}/b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

待评物元归一化

$$\mathbf{R}'_0 = (N_0, \mathbf{C}_i, \mathbf{V}'_i) = \begin{bmatrix} N_0 & C_1 & V_1/b_{p1} \\ & C_2 & V_2/b_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n/b_{pn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

节域的建立为对应各经典域之和。

2) 权重系数的确定

本文依据层次分析法对各指标的权重进行初步确定, 在此基础上采用变权理论对各指标权重进行修正, 为将评价对象主动参与到状态评价中, 状态变权向量的确定, 可根据指标的实际数据和其对应节域来确定。式(4)可变为

$$w_i(\mathbf{X}) = \frac{w_i \exp[\alpha(d_{i_{\max}} - d_{i_{\min}})]}{\sum_{k=1}^n w_k \exp[\alpha(d_{k_{\max}} - d_{k_{\min}})]} \quad (11)$$

式中: $d_{i_{\max}} = \max\{|v_i - a_{pi}|, |v_i - b_{pi}|\}$; w_i 由层次分析法求得, $d_{i_{\min}} = \min\{|v_i - a_{pi}|, |v_i - b_{pi}|\}$ 。本文取变权因子 $\alpha = -1$, 生成 n 维惩罚型状态变量。

3) 计算待评物元的贴适度, 判定设备状态

首先计算待评物元与经典域的距离 $D_j(v_i)$, 然后计算与各等级的贴适度 $K_j(N)$ 。进而求取设备等级变量特征值 j^* , 二次设备健康状态等级分为 4 个级别^[5]: 1—正常, 2—注意, 3—异常, 4—严重。

3 实例分析

以某 220 kV 变电站内国电南瑞 SLC-3M 测控装置为例, 该装置在 2013 年 1 月投运。本文根据中国南方电网公司的有关规定, 确定测控装置的经典域如表 1 所示, 由于各个设备监测信息难以统一, 故此处采用了告警信息的个数对设备自检信息和反馈信息进行了简化为 a_{12} 。该设备的实际值为 $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}) = (0.5, 0.5\%, 0.5, 1, 3, 2, 2, 1, 3.2, 40, 65\%, 2.8)$ 。

待评物元归一化处理后的结果如下:

$$\mathbf{R}'_0 = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & 0.1667 \\ & c_2 & 0.050 \\ & c_3 & 0.1429 \\ & c_4 & 0.1000 \\ & c_5 & 0.1250 \\ & c_6 & 0.1000 \\ & c_7 & 0.5714 \\ & c_8 & 0.1667 \\ & c_9 & 0.2667 \\ & c_{10} & 0.8333 \\ & c_{11} & 0.6500 \\ & c_{12} & 1.0000 \end{bmatrix}$$

为不失一般性, 本文分别基于变权、层次分析法^[4]、熵权法^[15]求取各指标的权重, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在指标值处于较好的状态下时, 3 种方法求得的权重差异不大, 而当设备的状态信息出现异常时, 如 a_5 , 变权法求得的权重较大, 这是由于变权法确立的权重与指标的取值有关, a_5 取值较大, 而 a_9 的取值较小, 从而导致 3 种方法的权重不同, 这说明了变权法对异常状态信息的敏感性, 有利于发现设备隐患。

表 1 某型号测控装置健康状态评价指标经典域

Table 1 Classical field of health status evaluation for a monitoring device

评价指标	指标量化	单位	正常	注意	异常	严重
图纸设计质量 a_1	出错次数	次/a	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0
装置制造质量 a_2	入网检测不合格率	1	0~0.5%	0.5%~1%	1%~5%	5%~10%
施工安装质量 a_3	违规次数	次/a	0~0.5	0.5~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5
投产验收情况 a_4	缺失类别	类	0~1	1~2	2~5	5~10
装置缺陷 a_5	缺陷次数	次/a	0~1	1~3	3~5	5~8
家族缺陷 a_6	缺陷次数	次/a	0~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
定检情况 a_7	距上次定检时间	年	0~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5
反措情况 a_8	未完成次数	次/a	0~1.0	1.0~4.0	4.0~5.0	5.0~6.0
投运年限 a_9	运行年限	年	0~5.0	5.0~7.0	7.0~10.0	10.0~12.0
室温 a_{10}	温度	°C	20.0~40.0	40.0~42.0	42.0~45.0	45.0~48.0
湿度 a_{11}	相对湿度	1	0~65%	65%~70%	70%~85%	85%~100%
实时运行情况 a_{12}	告警次数	次/a	0~0.5	0.5~1.5	1.5~2.5	2.5~3.0

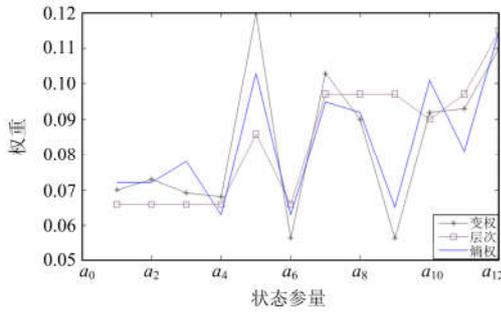


图 3 3种方法确定权重结果对比

Fig. 3 Comparison results of three ways to determine the weight

然后根据式(7)和式(11)计算待评设备物元矩阵与各等级的贴近度 $K_j(N)$, 根据式(8)求得等级特征值, 计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 3 种方法确立的权重所求得的等级特征值 $1 < j^* < 2$, 故该测控装置处于注意状态, 偏向异常状态程度较大, 咨询相关运维人员, 该装置的评价结果与实际运行状态基本吻合。根据三种方法进行比较可知, 采用变权法求得的 j^* 值比常权法求得的值要大一些, 即设备的状态要更加接近于异常状态, 这是由于变权法确立的权重与指标的取值有关, 对取值较差的指标作用进一步放大, 指标 a_5 和 a_{12} 的取值分别处于异常状态和严重状态, 表明设备出现故障和告警次数较多, 运行工况较差, 设备有劣化的趋势, 变权法求得的结果最为符合。

表 2 贴近度和等级特征值计算结果

Table 2 Calculation result of closeness and j^*

状态	正常	注意	异常	严重	j^*	
贴近度	变权	0.9971	0.9982	0.9967	0.9951	1.94
	层次	0.9979	0.9987	0.9958	0.9953	1.60
	熵权	0.9974	0.9985	0.9962	0.9956	1.77

当二次设备状态信息发生变化时, 状态信息的权重和等级特征值也会发生相应的变化, 据此, 对该测控设备的评价指标对健康状态等级做灵敏度分析。对二次设备的每个指标按 9 个点 $a_{i1}, (a_{i1}+a_{i2})/2, a_{i2}, (a_{i2}+a_{i3})/2, a_{i3}, (a_{i3}+a_{i4})/2, a_{i4}, (a_{i4}+b_{i4})/2, b_{i4}$, 从最小值变化到最大值, 其他值为 a_{i2} 不变, 其权重和等级变量特征值的变化如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知, 所有指标在经典域内逐渐增大时, 指标的权重呈现先变大后变小的规律, 特殊地, 对指标 a_6 和 a_9 出现幅值后, 随着指标的增大, 指标的权重基本不变。指标 a_{11} 的幅值最大, $a_1, a_3, a_4, a_5, a_7, a_{10}$ 的幅值相差不大, 指标 a_2 出现幅值后, 随着指标值的增大持续了一段时间, 然后再降低,

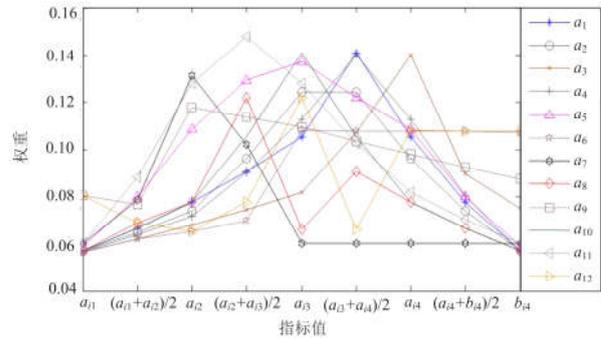


图 4 权重随指标值变化对应情况

Fig. 4 Variation of weight values with the index

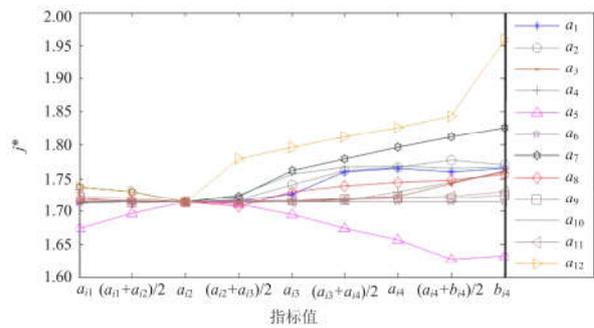


图 5 等级指数特征值随指标取值的变化情况

Fig. 5 Variation of j^* values with the index

指标 a_8 和 a_{12} 出现了两个幅值, 呈现波动状态。通过分析上述指标权重随指标值的变化可以看出, 指标值的权重会随着指标值的大小而变化, 这体现了指标在评价过程中的主动参与。

由图 5 可以看出, 随着指标值的增大, 等级变量特征值 j^* 变化幅度在 1.6~1.95 变化, 说明单个指标的劣化, 其他指标处于较好的状态时, 设备的健康状态不会发生很大变化, 其中指标 a_5, a_7 和 a_{12} 随着指标值的增大, j^* 的变化较大, 因此 a_5, a_7 和 a_{12} 是该设备健康状态评价的敏感性指标。

4 结论

为进一步提高二次设备状态评价的合理性, 本文结合变权理论和物元可拓模型, 建立基于变权物元可拓的二次设备状态评价模型。通过算例分析证明了该方法的正确性, 与常权法比较可知, 变权法在评价过程中能进一步放大异常信息对设备状态的影响, 可以更好地反映设备的状态, 提高评价结果的可信度。另外, 根据状态参量灵敏度分析可知, a_5, a_7 和 a_{12} 是影响该测控设备健康状态的敏感性指标。在确定设备各健康等级的经典域时, 有些指标相关标准还未做出明确规定, 这些指标经典域主要依据运行人员的经验确定, 难免会造成误差, 因此

需要对指标等级量化方面进一步验证和调整。另外, 二次设备实时监测信息数量非常大, 是状态评价的非常有效的信息, 但由于缺乏统一规范, 难以纳入评价状态信息中。

参考文献

- [1] 秦建光, 刘恒, 陶文伟, 等. 电力系统二次设备状态检修策略[J]. 广东电力, 2011, 24(1): 24-27.
QIN Jianguang, LIU Heng, TAO Wenwei, et al. Status oriented maintenance strategy for secondary equipment in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(1): 24-27.
- [2] 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.
- [3] 王晓亮, 董海鹰, 任伟. 基于信息融合的 750 kV 电网二次设备状态评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 40-46.
WANG Xiaoliang, DONG Haiying, REN Wei. State evaluation of secondary device in 750 kV Power Grid based on information fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 40-46.
- [4] 王俏文, 丁坚勇, 陶文伟, 等. 基于层次分析模型的二次设备状态检修方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 97-102.
WANG Qiaowen, DING Jianyong, TAO Wenwei, et al. A condition-based maintenance method of secondary electrical equipments based on hierarchy model[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 97-102.
- [5] 中国南方电网公司. 中国南方电网公司二次设备状态评价与风险评估导则[Z]. 2014.
China Southern Power Grid. State evaluation and risk assessment guidelines on secondary equipment in China Southern Power Grid [Z]. 2014.
- [6] 国家电网公司. 国家电网公司继电保护状态检修导则[Z]. 2013.
State Grid Corporation of China. Status maintenance guidelines of protection in State Grid[Z]. 2013.
- [7] 蔡文, 杨春艳. 可拓学工程[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.
- [8] 史智萍, 单体华, 刘文峰, 等. 基于物元-可拓模型的电网运行风险综合评价[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3233-3239.
SHI Zhiping, SHAN Tihua, LIU Wenfeng, et al. Comprehensive evaluation of power network operation risk based on matter-element extensible model[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3233-3239.
- [9] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [10] 赵建立, 周雯娟, 郑庆荣, 等. 基于用户责任的重要电力用户用电安全风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 71-77.
ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan, ZHENG Qingrong, et al. Electrical safety assessment for important power users based on user's responsibility[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 71-77.
- [11] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII)[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [12] 陈耀辉, 孙春燕. 模糊综合评判法中的最大隶属原则有效度[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2001, 18(1): 45-47.
CHEN Yaohui, SUN Chunyan. A study of the validity of the maximum subordination principle for the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2001, 18(1): 45-47.
- [13] 王新凡, 杨小娟. 基于联系数贴近度的区间多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(3): 16-22.
WANG Xinfan, YANG Xiaojuan. Connection-number-similarity-measure-based method for multiple attribute decision making with interval numbers[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(3): 16-22.
- [14] 曹建东, 吴姜, 蔡泽祥, 等. 电力系统二次设备状态参量模型的构建[J]. 南方电网技术, 2012, 6(3): 107-110.
CAO Jiandong, WU Jiang, CAI Zexiang, et al. The structure of state parameter model for the secondary equipments of power systems[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(3): 107-110.
- [15] 张海瑞, 韩冬, 刘玉娇, 等. 基于反熵权法的智能电网评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 24-29.
ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yujiao, et al. Smart grid evaluation based on anti-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24-29.

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-08-03

作者简介:

刘映尚(1964-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事智能电网技术与管理研究;

陶文伟(1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力自动化研究与技术管理; E-mail: taoww@csg.cn

周凯(1991-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要从事电力系统风险分析研究。E-mail: dqzk@whu.edu.cn

(编辑 张爱琴)