

高压断路器运行状态的变权模糊综合评判方法

陈伟根, 魏延芹, 廖瑞金

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 根据高压断路器状态信息的多层次性和多因素性, 建立高压断路器状态评估的层次型指标体系。利用模糊综合评判法, 建立高压断路器运行状态评估模型, 通过对各层评判因素的评估, 综合得出断路器的具体运行状态。指标的权重先由层次分析法确定常权权重, 然后引入基于均衡函数的变权模式, 对常权进行修正得到变权, 以提高状态评估的准确性, 为高压断路器状态评估提供了一种新的思路。

关键词: 高压断路器; 状态评估; 模糊综合评判; 变权

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0073-05

Variable Weight Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Operation Condition of High Voltage Circuit Breaker

CHEN Wei-gen, WEI Yan-qin, LIAO Rui-jin

(State Key Laboratory of Transmission & Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The high voltage circuit breaker's condition messages are of multilayer and multifactor, so a layered evaluation index system is built in this paper. An operation condition evaluation model for high voltage circuit breaker, which evaluates the state of every layer and gives a comprehensive assessment of circuit breaker, is established on the basis of the fuzzy comprehensive judgment. A constant weight of every index is firstly determined by the AHP method. Then by introducing the variable weight model based on the balanced function to modify the constant weight, a variable weight is obtained to improve the assessment accuracy. This study would provide a new method for high voltage circuit breaker condition assessment.

Key words: high voltage circuit breaker; condition assessment; fuzzy comprehensive evaluation; variable weight

0 引言

断路器是电力系统中的重要设备之一, 起着控制和保护的作用。因此, 判断高压断路器的运行状态对于高压断路器开展状态检修及提高电力系统的运行可靠性具有重要意义。现有的评价方法很不完善, 主要表现在两个方面^[1,2]: 一是对于高压断路器的监测工作还仅仅局限于电气或者机械的某一种特性, 缺乏系统性和综合性, 没有建立起全面的评价体系; 二是现有的方法所确定的高压断路器指标权重是固定的, 不会因为评价指标的指标值变化而变化, 缺乏科学性和准确性。

鉴于以上不足, 笔者从多方面考虑高压断路器的运行状态, 建立综合大量因素的评估指标体系; 在用层次分析法确定指标权重的基础上, 引入基于均

衡函数的变权模式, 根据评判因素偏离正常值的大小对常权进行调整, 构造断路器运行状态的多层次模糊综合评价模型。

1 高压断路器运行状态评价指标体系的建立

断路器的状态信息包括了预防性试验、在线监测数据、不良运行工况记录、缺陷记录、检修记录等。高压断路器预防性试验的主要内容包括: 绝缘介质相关试验, 如气体的湿度、泄漏、密度等; 操动机构试验, 如断路器的时间参量、速度特性等; 辅助回路和控制回路的相关试验。触头电寿命是体现高压断路器开断能力的一个重要标准, 也是直接影响其使用寿命最直接的因素^[3,4]。另外, 工作环境、外观情况、生产厂家和检修状况等也含有重要的状态信息, 需依照一定的标准进行考察与判断^[5]。

笔者在总结先前经验的基础上, 结合目前相关

资料,遵循可行性、时效性、定性和定量相结合的原则,建立起如图 1 的评估指标体系。

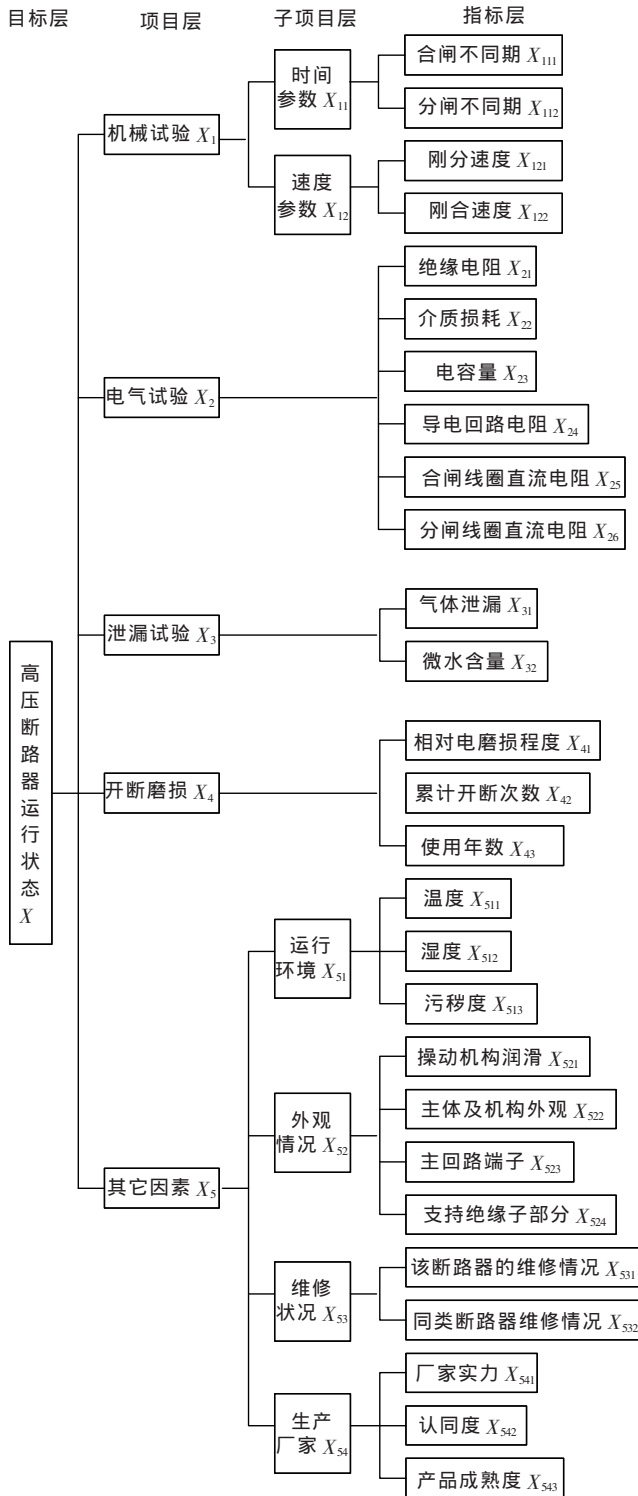


图 1 高压断路器状态评判指标体系

在各指标中,有些指标为定量指标,有些指标为定性指标,其原始数据规格化的方法是不同的。

对于指标体系中的定量指标,量化采用升、降半梯形函数,其中极小型指标如气体泄漏采用升半梯形函数,极大型指标采用降半梯形函数。

升半梯形函数

$$X = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & x > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

降半梯形函数

$$X = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{a_2-x}{a_2-a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (2)$$

X 为指标归一化后的值, x 为指标实测值, a₁、a₂ 表示该指标的注意值(最优值)和最优值(注意值),其值的确定参考《电力设备预防性试验规程》、《高压开关运行规程》及制造厂家的规定。

对外观情况、工作环境、检修状况、生产厂家等定性指标通过专家调查的形式,即给出评判对象和评价指标根据,由多位专家按经验进行评分。评分区间为[0, 1],而且指标反应断路器状态越好,分值越接近 0。

2 运行状态的变权模糊综合评判模型的建立

(1) 建立评判对象的因素集

将选定的状态参量作为评判因素,建立高压断路器运行状态因素分析图(见图 1)。图中为层次型的指标体系,目标层断路器综合状态可分解成项目层中的 5 个评判项目, U_X=(U_{X1}, U_{X2}, U_{X3}, U_{X4}, U_{X5}),然后分解,把各项目层分解为下一级子项目,子项目分解为最后一级的指标,如果没有子项目层,则直接把项目分解为指标。如机械试验分解为 2 个子项目: U_{X1}=(U_{X11}, U_{X12}),其中时间参数子项目分解为 2 个指标: U_{X11}=(U_{X111}, U_{X112})。

(2) 确定评语集 V

笔者将高压断路器的状态划分为四个等级:“良好”、“一般”、“注意”、“故障”,即评语集为: V={良好、一般、注意、故障}={ν₁, ν₂, ν₃, ν₄}

(3) 确定权重集 λ

权重的确定方法将在下文中详细阐述。

(4) 建立各层次模糊评判矩阵^[6]

计算评判模型各指标对 4 种状态的隶属度,可得到如下模糊综合评判矩阵

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ \vdots \\ R_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{i1} & \cdots & \mu_{i4} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{in1} & \cdots & \mu_{in4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, n 为指标数, R_{in} 为项目 i 下指标 n 的单因素评价。

对机械试验、电气试验、泄漏试验、开断磨损等项目指标隶属函数的确定,笔者选用较为简单的三角形和半梯形相结合分布函数,建立各指标对应于不同状态等级的隶属函数,见图 2。

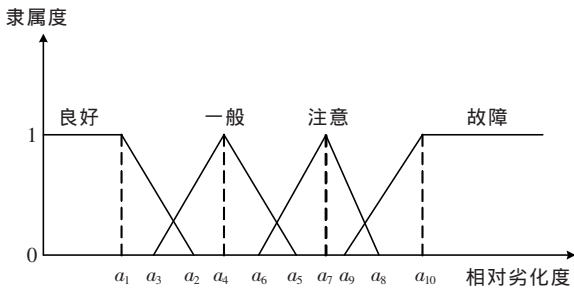


图2 半梯形和三角形隶属函数分布图

“良好”等级的隶属函数为

$$\mu_{v_1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{a_2-x}{a_2-a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 0 & x \geq a_2 \end{cases}$$

“一般”等级的隶属函数为

$$\mu_{v_2}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_3}{a_4-a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ \frac{a_5-x}{a_5-a_4} & a_4 < x < a_5 \\ 0 & x \leq a_3 \text{ 或 } x \geq a_5 \end{cases}$$

“注意”等级的隶属函数为

$$\mu_{v_3}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_6}{a_7-a_6} & a_6 < x \leq a_7 \\ \frac{a_8-x}{a_8-a_7} & a_7 < x < a_8 \\ 0 & x \geq a_8 \text{ 或 } x \leq a_6 \end{cases}$$

“故障”等级的隶属函数为

$$\mu_{v_4}(x) = \begin{cases} \frac{4-10x}{3} & a_9 < x < a_{10} \\ 1 & x \geq a_{10} \\ 0 & x \leq a_9 \end{cases}$$

对外观情况、工作环境、检修状况和生产厂家等定性描述的数据采用模糊统计试验法。具体做法是首先制作专家打分调查表，对每一具体评价对象的每项指标根据专家经验和看法进行认定，在打分表上对应等级处打“√”，再通过多位专家调查表的汇总，得到各个因素对应于等级的频数，经归一化处理，即可得到各个因素对应于等级的隶属度，从而得到单因素评判矩阵，表达式为

$$\text{隶属度} = \frac{\text{认为因素 } i \text{ 属于 } j \text{ 评语的人数}}{\text{参加评定的专家总人数}} \quad (4)$$

(5)采用模糊算子进行综合评判

在模糊综合评判式 $\tilde{A} \delta \tilde{R} = \tilde{B}$ 中，模糊算子的选择比较重要，笔者选用加权平均型的 $M(\bullet, \oplus)$ 模型，

它定义为 $b_j = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{ij}$ 。这种算法既考虑了主要因素的影响，又考虑了非主要因素的影响，在文中使用该算子不仅考虑了所有因素对高压断路器的影响，还保留了单个因素的全部信息。

经过模糊综合评判得到评估值 b_j ($j=1,2,3,4$) 后，根据最大隶属度原则，取与最大评估值 $b_{\max} = \max\{b_j | j=1,2,3,4\}$ 相对应的评判集元素作为评估结果。

3 变权重的确定

断路器运行状态评估是分层次的多指标综合评判，需要赋予各指标合理的权重，以正确反映它们在同一层次评估中不同的重要性。

层次分析法将评价系统按其内在的逻辑关系，以评价指标的形式构成一个有序的层次结构，然后针对每一层的指标，运用专家的知识、经验、信息和价值观，对同一层指标进行两两比较对比，并按规定的标度值构造比较判断矩阵，计算出比较判断矩阵的最大特征根，并解特征方程，得到对应最大特征根的特征向量，最后将特征向量归一化，得到各指标的权重向量^[7]。按照上述方法，采用层次分析法对高压断路器各指标赋予权重，计算结果见表1。

表1 评估指标的常权值

指标	下层子指标的权重
X	(0.214, 0.213, 0.142, 0.236, 0.195)
X ₁	(0.645, 0.355)
X ₂	(0.326, 0.172, 0.075 1, 0.220, 0.131, 0.075)
X ₃	(0.347, 0.653)
X ₄	(0.758, 0.112, 0.130)
X ₅	(0.124, 0.356, 0.326, 0.194)
X ₁₁	(0.347, 0.653)
X ₁₂	(0.355, 0.645)
X ₅₁	(0.323, 0.599, 0.077)
X ₅₂	(0.273, 0.177, 0.088, 0.462)
X ₅₃	(0.6, 0.4)
X ₅₄	(0.297, 0.539, 0.164)

用层次分析法确定的各因素的权重为固定的，不会因为状态或评价因素的不同而发生改变。而在断路器评判指标体系中，当某些参数严重偏离正常值时，往往表示断路器某部分的性能已经急剧下降，需加强监视甚至停电检查，但在常权评判模式中可能会因其权重较小，整体评价还是正常的，不能反映断路器的真实状态。因此，在断路器状态评估中，常权常常是不合适的^[8]。

变权综合理论是因素空间理论的重要建模原理之一，它反映了综合评价中诸要素状态的均衡性。在确定评判因素常权过程中，常按不同因素提供状态信息的多少、灵敏度及对安全的影响程度来考虑它们的相对重要性。在断路器实际运行中，有的因素因能提供较多信息且检测灵敏度很高而得到很大的权重，但从整体来说却较能容忍其反映的缺陷；有的因素权重虽小，但其反映的状态却难以容忍，其量值太大(小)时往往会严重影响断路器的整体性能。因此，

在断路器状态评判中, 需要考虑评判因素间均衡性的问题, 以对常权作出均衡性的调整。

笔者将均衡函数引入变权综合, 其模式 [9, 10] 的变权公式为

$$w_j(x_1, \dots, x_m) = \frac{w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}}{\sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}} \quad (5)$$

式(5)中, w_j 为第 j 种因素的变权重, $w_j^{(0)}$ 为第 j 种因素的常权重, x_j 为第 j 种因素的量值。

一般来讲, 评判者较保守的情况下 $\alpha > \frac{1}{2}$, 即对诸因素的平衡问题考虑得较多; 评判者较开明的情况下 $\alpha < \frac{1}{2}$, 即比较能容忍某方面的缺陷。多数而言, 取 $\alpha = \frac{1}{2}$ 为宜。笔者在对断路器状态的评价中, 取 $\alpha = \frac{1}{2}$ 。

4 实例分析

(1) 某 SF₆ 断路器, 开关型号为 LW-35, 额定电压为 35 kV, 额定短路开断电流为 31.5 kA, 额定电流为 2 000 A, 工频耐受电压为 95 kV, 机械寿命为 3 000, 刚分速度为 (3.4±0.8) m/s, 刚合速度为 (3.2±0.2) m/s, SF₆ 气体报警压力为 0.42 MPa。该断路器投运 11 年, 累计开断次数为 363 次。最近一次预防性试验测得合/分闸不同期为 1.6 ms 和 0.9 ms, 刚合速度均为 3.1 m/s, 导电回路电阻为 98 μΩ, 绝缘介质中气体压力为 0.43 MPa, 湿度为 121×10⁻⁶, 绝缘电阻为 17 GΩ, 介损为 0.166%, 电容量为 2 507 pF, 分/合闸线圈直流电阻为 215 Ω。

根据以上信息, 对该断路器各个指标进行归一化处理, 得各项目指标量化值结果如下

$$\begin{aligned} X_{11} &= (0.32, 0.3) & X_{12} &= (0.3125, 0.25) \\ X_2 &= (0.45, 0.668, 0.53, 0.424, 0.32, 0.32) \\ X_3 &= (0.1, 0.597) & X_4 &= (0.461, 0.121, 0.3) \\ X_{51} &= (0.2, 0.5, 0.7) & X_{52} &= (0.4, 0.6, 0.2, 0.6) \\ X_{53} &= (0.4, 0.6) & X_{54} &= (0.3, 0.4, 0.3) \end{aligned}$$

根据各指标的量化数据和表 2 的常权值, 利用式(4), 可得到各指标的变权, 计算结果见表 2。

按照上述两种隶属函数的求取方法, 确定图 1 中各评判因素对应于 4 种状态的隶属函数, 再以实际运行参数的量化值代入隶属函数, 分别求得各因素相应的隶属度, 可得到各评判因素的评判矩阵, 再结合权重分配, 即可得到各项目的评估结果。下面以机械特性试验项目为例说明评估过程:

时间参数的评判矩阵为

表 2 指标层中各指标的变权值

项目	该(子)项目下指标的变权
X_{11}	(0.339 7, 0.660 3)
X_{12}	(0.33, 0.67)
X_2	(0.323, 0.14, 0.069, 0.225, 0.154, 0.088)
X_3	(0.564 9, 0.435 1)
X_4	(0.666 3, 0.192 2, 0.141 5)
X_{51}	(0.257 6, 0.427 1, 0.315 3)
X_{52}	(0.281 4, 0.072 3, 0.258 7, 0.387 6)
X_{53}	(0.647 5, 0.352 5)
X_{54}	(0.320 2, 0.503 2, 0.176 6)

$$R_{X_{11}} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.8 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配, 可求得

$$B_{X_{11}} = \lambda_{X_{11}} R_{X_{11}} = [0.796 2, 0.535 9, 0, 0]$$

速度参数的评判矩阵为

$$R_{X_{12}} = \begin{bmatrix} 0.718 & 0.565 & 0 & 0 \\ 0.515 & 0.967 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配, 可求得

$$B_{X_{12}} = \lambda_{X_{12}} R_{X_{12}} = [0.581 9, 0.834 3, 0, 0]$$

$$\text{则 } B_{X_1} = \lambda_{X_1} \begin{bmatrix} B_{X_{11}} \\ B_{X_{12}} \end{bmatrix} = [0.720 1, 0.641 8, 0, 0]$$

同理可得其它项目的评估结果

$$B_{X_2} = \lambda_{X_2} R_{X_2} = [0.147, 0.247, 0.465, 0.159]$$

$$B_{X_3} = \lambda_{X_3} R_{X_3} = [0.169, 0.505, 0.599, 0]$$

$$B_{X_4} = \lambda_{X_4} R_{X_4} = [0.112, 0.216, 0.672, 0]$$

$$B_{X_5} = \lambda_{X_5} R_{X_5} = [0.175, 0.401, 0.354, 0.069]$$

综合以上的评估结果, 对该断路器进行整体评估

$$B_X = \lambda_X [B_{X_1}, B_{X_2}, B_{X_3}, B_{X_4}, B_{X_5}]^T =$$

$$[0.270, 0.282 1, 0.411 7, 0.047 3]$$

根据最大隶属度原则, 可知该断路器的整个工作状态处于“注意”阶段, 说明该断路器的整体可靠性在下降, 应引起现场运行人员的注意。从实际数据中可以看出, 有些数据已经偏离出厂值或最优值, 有劣化倾向。实际运行情况为: 分闸铁芯卡涩, 导致操作时拒分, 与笔者所得结果基本吻合。

若用常权进行计算, 评估结果为: (0.249, 0.458, 0.295, 0.041), 根据最大隶属度原则, 判断该断路器整体处于“一般”状态, 工作状态正常, 这与实际状态有较大的偏差。可以看出, 采用变权比常权更客观反映断路器某些参数偏离正常值给整体带来的影响, 其评估结果更接近实际运行状态。

(2) 某 SF₆ 断路器, 开关型号为 3AQ2EE, 额定电压为 145 kV, 额定电流为 4 000 A, 工频耐压电压为 275 kV, 额定短路开断电流为 100 kA, 允许开断

故障次数为 50, SF₆ 气体额定压力 0.6 MP。该断路器投运 13 年, 累计开断次数 472。最近一次预防性试验测得合、分闸不同期分别为 1.65、1.73 ms, 刚分速度与刚合速度分别为 2.4、2.1 m/s, 绝缘介质中 SF₆ 气体压力为 0.55 MP, 湿度为 89×10⁻⁶, 分/合闸线圈直流电阻为 90、125 Ω, 导电回路电阻为 27 μΩ, 电容器绝缘电阻大于 100 GΩ, 介损 0.314%, 电容量为 512.3 pF。

根据以上信息, 对该断路器各个指标进行归一化处理, 得各项目指标量化值结果如下

$$\begin{aligned} X_{11} &= (0.67, 0.423) & X_{12} &= (0.08, 0.19) \\ X_2 &= (0.5, 0.372, 0.25, 0.33, 0.182, 0.12) \\ X_3 &= (0.083, 0.41) & X_4 &= (0.43, 0.16, 0.2) \\ X_{51} &= (0.2, 0.3, 0.4) & X_{52} &= (0.2, 0.3, 0.1, 0.4) \\ X_{53} &= (0.3, 0.4) & X_{54} &= (0.3, 0.2, 0.5) \end{aligned}$$

根据各指标的量化值, 计算指标层的变权, 结果见表 3。

表 3 指标层中各指标的变权值

项目	该(子)项目下指标的变权
X_{11}	(0.297, 0.703)
X_{12}	(0.459, 0.541)
X_2	(0.256, 0.157, 0.083, 0.213, 0.17, 0.12)
X_3	(0.541, 0.459)
X_4	(0.669, 0.162, 0.169)
X_{51}	(0.373, 0.564, 0.063)
X_{52}	(0.314, 0.166, 0.143, 0.376)
X_{53}	(0.634, 0.366)
X_{54}	(0.274, 0.609, 0.117)

然后按照第 2 节和第 3 节中介绍的方法, 对各个项目进行评估, 评估结果如下

$$\begin{aligned} B_{X_1} &= [0.645, 0, 0.058, 0.297] \\ B_{X_2} &= [0.438, 0.402, 0.035, 0] \\ B_{X_3} &= [1, 0, 0, 0.565] \\ B_{X_4} &= [0.334, 0.233, 0.433, 0] \\ B_{X_5} &= [0.453, 0.359, 0.217, 0.026] \end{aligned}$$

综合以上的评估结果, 对该断路器进行整体评估

$$B_X = \lambda_X [B_{X_1}, B_{X_2}, B_{X_3}, B_{X_4}, B_{X_5}]^T = [0.540, 0.211, 0.164, 0.149]$$

根据最大隶属度原则, 可知该断路器整个工作状态处于“良好”阶段, 这期间高压断路器电磨损小, 工作性能稳定, 故障发生可能性低。实际运行情况也证明该断路器运行可靠, 工作稳定, 与笔者所得结果基本吻合。

基于模糊数学理论结合变权思想对高压断路器

状态进行综合评估, 为断路器状态评估提出了一种新的思想。通过更多实例特别是有故障状态的断路器作为分析依据, 结合现场应用的实际需求, 对现有评估模型进行改进, 这是作者今后要重点开展的工作。

5 结语

笔者建立了高压断路器状态评估的指标体系, 综合机械试验、电气试验、开断磨损、气体泄漏、生产厂家、外观情况、工作环境和检修状况等因素, 采用模糊综合评判的方法对高压断路器的运行状态进行评估。在用层次分析法确定指标常权的基础上, 采用基于均衡函数的变权模式, 考虑评判指标间的均衡性, 对常权进行修正, 使各指标的权重更加合理, 从而提高了高压断路器状态评估模型的正确性。通过实例分析说明了采用变权比常权更能反映断路器的实际运行状态。

高压断路器的现场运行条件复杂, 故障影响因素众多, 基于变权模糊综合评判方法为高压断路器状态评估提出了一种新的思路, 但是离现场的实际应用还有一段距离, 需要结合实际运行经验进行改进。

参考文献:

- [1] FARROKHI M, RAFIEE M. Evaluation of Used and Repaired Power Transformers Using Neural Networks [J]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001(1): 143-146
- [2] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An Evidential Reasoning Approach to Transformer Condition Assessments [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004(194): 1 696-1 703.
- [3] 林 辛, 张冠生, 洪 翠. 基于模糊理论的真空断路器开断电寿命综合评判的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 15-18.
- [4] 孙福杰, 王章启, 秦红三, 等. 高压断路器触头电寿命诊断技术 [J]. 电网技术, 1999, 23(3): 9-61.
- [5] 陈伟根, 李 伟. SF₆ 断路器状态分析的模糊综合评价方法 [J]. 高压电器, 2004, 40(6): 361-363
- [6] 袁志坚, 孙才新, 李 剑, 等. 基于模糊多属性决策的变压器状态维修策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 65-77.
- [7] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [8] 俞 峰, 杨成悟. 基于熵权的高压断路器状态模糊综合评判 [J]. 电气传动自动化, 2007, 29(1): 8-11.
- [9] 汪陪庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- [10] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.