

# 基于模糊理论的高压断路器状态评估研究

李 宇, 张国钢, 耿英三

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

The Condition Assessment Method for HV Circuit Breakers Based on Fuzzy Theory

LI Yu, ZHANG Guo-gang, GENG Ying-san

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 结合目前国内外高压断路器的状态监测及评估现状, 将模糊数学理论应用到高压断路器的状态评估中。采用模糊层次分析法代替层次分析法对评价因素集进行权重分配, 改进了以往模糊综合评估中的判断矩阵一致性问题, 确定了各评判因素对象及其计算方法和隶属函数, 建立了模糊综合评估模型, 利用多种评价因素对高压断路器的工作状态进行了评估。

关键词: 高压断路器; 模糊层次分析; 状态评估;

模糊综合评估

中图分类号: TM561

文献标志码: A

Abstract: Based on the status monitoring and evaluating of high voltage circuit breaker in domestic and international, fuzzy theory was applied in assessing condition of the HVCB. Firstly, the fuzzy analytical hierarchy was adopted instead of analytical hierarchy which made the judgment more consistent. Then, the paper discussed the main factors of HVCB's condition and evaluated the importance of them. Finally, the multi-layer fuzzy comprehensive evaluation model for HVCB was presented, and an example was analyzed.

Key words: high voltage circuit breaker(HVCB);

fuzzy analytical hierarchy process;

condition assessment;

fuzzy comprehensive evaluation

## 0 引言

高压断路器是电力系统中重要的电气设备, 其运行状态进行准确评估具有十分重要的意义。20 世纪 70 年代末, 国际已开始对电力设备实施状态检修。文[1, 2]专门论述了对断路器的故障调查、分析、诊断及断路器的检测可行性分析。国内的福州大学、重庆大学分别将数学上的模糊综合评估理论应用于真空断路器开断寿命<sup>[3]</sup>、SF<sub>6</sub> 高压断路器状态评判<sup>[4, 5]</sup>上, 虽然取得了一定的成果, 但还不够完善, 主要表现在评

判因素的分类合理性、权重分配的确定等方面。

笔者在已有研究成果的基础上, 探索了将模糊层次分析<sup>[6, 7]</sup>应用于模糊综合评判<sup>[8]</sup>过程的高压断路器状态评估方法。模糊综合评判是应用模糊集方法通过对事物所涉及到的各因素分别进行评价, 然后综合多因素做出总体决策的方法。模糊层次分析法的应用解决了模糊综合评判因素权重分配过程中判断矩阵与实际决策者思维的不一致性问题。

## 1 用模糊层次分析确定权重分配法

层次分析法(AHP)是根据多目标评价问题的性质和目标, 把问题本身按层次进行分解, 构成一个至下而上的梯阶层次结构。AHP的关键步骤是由专家给出判断矩阵, 然后计算排序向量。但是用 AHP 做出的判断矩阵结果和决策者的思维可能并不一致, 而检验判断矩阵一致性的标准: CR<0.1, 目前仅是一个经验数据, 缺乏科学有效的证明。

笔者针对上述问题引入模糊层次分析法(FAHP)进行分析。FAHP 的思想和步骤同 AHP 基本一致, 但引入的模糊一致矩阵解决了上述问题, 其求矩阵中各元素相对重要性的方法也与 AHP 不同。

模糊层次分析法的步骤是建立由影响元素  $a_1, a_2, \dots, a_n$  两两相互比较而得到的模糊互补判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

其中  $r_{ij}$  表示元素  $a_i$  比  $a_j$  重要的程度,  $r_{ij} + r_{ji} = 1$ ,  $r_{ij}$  是采用 0.1 ~ 0.9 标度法<sup>[9]</sup>(表 1)进行数量标度的。

模糊互补判断矩阵的一致性反映了人们思维判断的一致性, 但实际所研究问题的复杂性和人们认

收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-03-19

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(105158); 教育部新世纪人才支持计划(NCET-04-0924)。

作者简介: 李 宇(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压断路器的状态评估。

表1 0.1~0.9 标度说明

标度	定义	说明
0.5	同等重要	两元素比较, 同等重要
0.6	稍微重要	两元素比较, 一个比另一个稍微重要
0.7	明显重要	两元素比较, 一个比另一个明显重要
0.8	重要的多	两元素比较, 一个比另一个重要得多
0.9	极端重要	两元素比较, 一个比另一个极端重要
0.1, 0.2 0.3, 0.4	反比较	元素 a 与元素 a 相比较得到: $r_{ij}$ , 则元素 a 与元素 a 相比较得到: $r_{ji}=1-r_{ij}$

识上的片面性可能使构造出的矩阵 R 不具有一致性, 需运用模糊一致矩阵的充要条件对其进行调整。

调整方法是确定出一个同其余元素的比较判断有把握的元素, 设决策者认为对判断  $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n}$  比较有把握, 那么用 R 的第 1 行元素减去第 2 行对应元素, 若所得的差相等, 则不需要调第 2 行元素; 否则, 对其调整。直至调整为模糊一致矩阵为止。

调整后的模糊一致矩阵 R 满足  $r_{ji}=r_{ik}-r_{jk}+0.5$ , 若元素  $a_1, a_2, \dots, a_n$  的权重分别是  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , 则权重的计算公式为

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

式中 a 为调整参数, a 越大, 权重之间差距越小; 反之越大, 最重视元素间差异的取法是  $a=(n-1)/2$ 。

## 2 评估因素的分类和权重分配

截止到 2004 年底, 国家电网公司系统对 72.5 kV 及以上电压等级的高压断路器总装用量为 52 451 台, 其中 SF<sub>6</sub> 断路器占 74%<sup>[10]</sup>。分析 SF<sub>6</sub> 高压断路器的发生故障, 发现影响 SF<sub>6</sub> 断路器状态的因素很多, 根据文[11]和 IEEE 的标准文献, 并考虑试验数据收集的完整性, 因素集定为以下内容: 相对电磨损、使用年数、开断次数、操动机构部件变形/磨损、分(合)及重合闸下操动机构液(气)压下降值、线圈端子因过热变色等、端子松动、接地接触不良、分/合闸不同期性、刚分速度、刚合速度、导电回路电阻、微水含量、气体泄漏率、厂家实力。根据文[11]并参考文[12]对这些因素进行了权重分配。

在故障影响因素确定后, 应进行相关危险程度或风险估计。风险有两个因素: 发生概率和结果。当故障很可能发生且发生后影响严重时风险高; 发生的可能性低且影响大时风险中等; 发生可能性小, 影响不严重或可能性大但影响小时, 风险低。

经风险估计后, 将影响因素分为两大类: 第 1 类为故障很可能发生且对断路器影响严重的因素, 定名为高风险因素; 其余为第 2 类, 定名为低风险因素。经分析确定高风险因素, 见图 1。对这些因素应用模糊聚类分析法, 取此 7 个因素分别处于接近出厂状态时断路器存在故障的可能及危害度、在出厂

状态和预规限制值间时状态故障的可能及危害度、不满足及接近预规状态时故障的可能及危害度作为 7 个因素的 3 个特征来进行模糊聚类分析, 最后得到 7 个高风险因素的分类结果。

若假设重要性高的元素平均权重为 A, 重要性

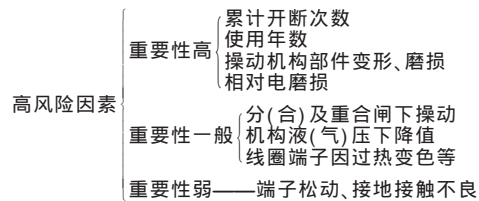


图1 高风险因素聚类图

一般的元素平均权重为 B, 重要性弱的元素平均权重为 C, 根据第 2 节中提到的标度法对 A、B、C 两两之间相互比较, 如认为 A 比 B 重要的多时, 可得  $r_{12}=0.8$ ; A 比 C 极端重要时, 可得  $r_{13}=0.9$ ; 依次类推可对 A、B、C 建立模糊互补判断矩阵如下

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.9 \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

可得权重比为 (0.566 7, 0.266 7, 0.166 7), 然后根据重要性高、重要性一般和重要性弱三类中因素的多少重新计算分配并归一化后得到高风险因素项的权重比为 (0.764 0, 0.179 8, 0.056 2)。

同上, 建立开断次数、使用年数、操动机构部件变形及磨损、相对电磨损这 4 个因素的互补判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.45 & 0.55 & 0.11 \\ 0.55 & 0.50 & 0.60 & 0.15 \\ 0.45 & 0.40 & 0.50 & 0.05 \\ 0.90 & 0.85 & 0.95 & 0.50 \end{bmatrix}$$

计算得权重分配为 (0.18, 0.22, 0.15, 0.45); 分、合及重合闸下操动机构液(气)压下降值和线圈端子因过热变色的权重分配为 (0.6, 0.4)。

对于低风险因素进行分类, 见图 2。

建立运行参数、绝缘介质、其他因素的互补判断

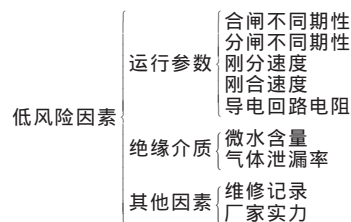


图2 低风险因素分类图

矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.9 \\ 0.4 & 0.5 & 0.8 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

得出权重分配为 (0.5, 0.4, 0.1);

合闸不同期性、分闸不同期性、刚分速度、刚合

速度、导电回路电阻的互补判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.7 & 0.5 & 0.5 \\ 0.7 & 0.5 & 0.9 & 0.7 & 0.7 \\ 0.3 & 0.1 & 0.5 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 0.3 & 0.7 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.3 & 0.7 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

得出权重分配为(0.2, 0.3, 0.1, 0.2, 0.2); 湿度、气体泄漏率的权重分配为(0.6, 0.4); 维修状况、生产厂家的权重分配为(0.7, 0.3); 高风险因素和低风险因素的权重比定为(0.9, 0.1)。

### 3 模糊综合评估方法

#### 3.1 模糊评判级和隶属函数的确定

笔者将研究的评判集分为4等:  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ , 式中  $V_1$  属优等级;  $V_2$  较优等级;  $V_3$  属一般等级;  $V_4$  属需要注意等级。因各评判因素的试验数据对于不同的断路器对应于不同的判断指标, 其数量级或量纲可能不同, 所以需先作归一化处理。

对分/合闸不同期和  $SF_6$  气体湿度数据符合要求, 取其数值部分, 略去其量纲即可。

累计开断次数的处理算法为  $f = n/N$ 。式中  $n$  为开断次数;  $N$  为允许开断次数, 即机械寿命。

使用年数的处理算法为  $f = (\frac{n}{N})^2$ 。式中  $n$  为实际使用年数;  $N$  为规定可使用年数。这样处理后, 就可使得规定开断次数和使用年数不同的断路器可用同样的隶属函数进行处理, 使用年数用二次方是为了数据的变化趋势类似于电力设备使用寿命老化规则中的浴盆曲线。

相对电磨损则是根据触头损耗等效定律<sup>[13]</sup>计算得到, 触头损耗等效定律为

$$\begin{cases} N_s = 1.83 \times (0.35 I_s / I_n)^3 & I_s < 0.35 I_n \\ N_s = (0.5 I_s / I_n)^{1.7} & I_s > 0.35 I_n \end{cases} \quad (1)$$

该定律是以  $0.5 I_n$  ( $I_n$  为额定短路开断电流) 一次开断的电磨损为基数, 故先将  $I_s = I_n$  带入式(1), 计算与一次  $0.5 I_n$  开断电磨损相同的  $I_n$  的等效开断次数  $N = 0.5^{1.7}$ 。

然后计算实际  $n$  次开断时的等效开断电流  $N_1, N_2, \dots, N_n$ , 相对电磨损  $Q$  为

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i / N$$

刚分速度和刚合速度的处理算法如式(2)所示

$$f = \exp\left[-\left(\frac{-a}{0.2}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中  $a$  为断路器要求的最佳速度, 因为一般断路器的最佳速度范围都是可左右变动 0.2 m/s, 故取 0.2 来调整函数的宽度。

导电回路电阻一般要求所测数值不大于

170  $\mu$ , 故处理算法取

$$f = \frac{170 - R}{170}$$

对以上处理后的数据确定隶属函数的主要方法有模糊统计方法、三分法、模糊分布法等, 笔者采用模糊分布法。

文中经处理后的变量一般为线性变动, 或者近似线性变动, 因此可取隶属函数为偏小型的降半梯形分布(式3)、偏大型的升半梯形分布(式4)作为评判等级  $V_1$  和  $V_4$  的分布函数; 对于中间的评价等级  $V_2$  和  $V_3$ , 不失一般性, 可取中间型的三角形分布(式5)和正态分布(式6)。

$$\mu_{\sim}(x) = \begin{cases} 1 & x < a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 0 & a_2 < x \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{\sim}(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 1 & a_2 < x \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{\sim}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x < a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 < x < a_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{\sim}(x) = e^{-k(x-a)^2} \quad (6)$$

其余的评价因素如操动机构磨损、线圈端子因过热变色、端子松动、接地接触不良等不能直接用测量数据来给出具体数值, 可以采用专家评分的方法根据实际情况来确定等级及相应的隶属度。对于厂家实力则是根据厂家的知名度, 相应的定出隶属度, 如 ABB 可定为(0.7, 0.2, 0.1, 0)。

#### 3.2 模糊综合评估模型的确定

一般的模糊综合评判模型有以下几类: 主因素决定型  $M_1(\cdot, \cdot)$ , 该模型的评判结果是由数值最大的决定, 其余数值在一个范围内变化不影响结果; 主因素突出型  $M_1(\cdot, \cdot)$ 、 $M_1(\cdot, \oplus)$ , 它们与  $M_1(\cdot, \cdot)$  接近, 但稍精细一些, 由它们得到的评判结果在一定程度上反映了非主要指标; 加权平均型  $M_1(\cdot, \oplus)$ , 它对所有的因素均衡兼顾, 体现出整体特性。

以一级模型为例, 评判向量  $B$  为

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

若综合模型为  $M_1(\cdot, \cdot)$ , 则

$$b_j = \max_{i=1}^n (a_i \cdot r_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, m$$

若综合模型为  $M_1(\cdot, \oplus)$ , 则

$$b_j = (a_1 \cdot r_{1j}) \oplus (a_2 \cdot r_{2j}) \oplus \dots \oplus (a_n \cdot r_{nj})$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

若综合模型为  $M_1(\cdot, \oplus)$ , 则

$$b_j = (a_1 \cdot r_{1j}) \oplus (a_2 \cdot r_{2j}) \oplus \dots \oplus (a_n \cdot r_{nj})$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

笔者所做的 SF<sub>6</sub> 高压断路器状态评估主要采用了主因素突出型算法和加权平均型算法，如果评估时用到的因素数据比较全面，则采用加权平均型算法 M<sub>1</sub>(·, ⊕)；如有很多数据缺失，则采用主因素突出型算法 M<sub>1</sub>(·, )。

#### 4 举例说明

变电站某断路器主要技术参数见表 2。

表 2 ELFSP5-21 断路器主要技术参数表

项目	参数值		
开关型号	ELFSP5-21		
制造厂	ABB		
投运日期	1998-03-19		
额定电压/kV	330		
额定电流/A	4 000		
填报日期	2004-04-12		
累计开断次数	11		
累计开断电流/kA	2 420		
维修记录	无		
断路器的相	A	B	C
湿度/(μL/L)	58.9	53.5	52.9

因操动机构状态良好，取操动机构状态的隶属度为[0.7 0.2 0.1 0]。

用隶属函数计算其他 3 部分隶属度后，得到重要性高的因素评判矩阵

$$R_{\text{重要性高}} = \begin{bmatrix} 0.250 & 0 & 0.713 & 3 & 0.007 & 2 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0 & 0.499 & 4 & 0.001 & 9 & 0 \end{bmatrix}$$

从而

$$B_{\text{重要性高}} = [0.18 \ 0.22 \ 0.15 \ 0.45] \circ \begin{bmatrix} 0.250 & 0 & 0.713 & 3 & 0.007 & 2 & 0 \\ 1.000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.700 & 0 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.500 & 0 & 0.499 & 4 & 0.001 & 9 & 0 \end{bmatrix} = [0.595 \ 0 \ 0.383 \ 1 \ 0.017 \ 2 \ 0]$$

单从重要性高的因素评判看，断路器状态良好，因当时未记录其他高风险因素数据，只知当时未记录因素无故障。为了突出重要性高的因素所反映出的状态，取未知因素的隶属度等于重要性高的因素所得出的隶属度，即可得到

$$B_{\text{高风险}} = [0.595 \ 0 \ 0.383 \ 1 \ 0.017 \ 2 \ 0]$$

对于低风险因素中运行参数的数据虽未记录具体数据，但知其数据均满足运行要求，取运行参数的隶属度为[0.7 0.2 0.1 0]，经计算绝缘介质、其他因素后得

$$R_{\text{低风险}} = \begin{bmatrix} 0.700 & 0 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.880 & 0 & 0.080 & 0 & 0.040 & 0 & 0 \\ 0.800 & 0 & 0.100 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

从而

$$B_{\text{低风险}} = [0.5 \ 0.4 \ 0.1] \circ \begin{bmatrix} 0.700 & 0 & 0.200 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \\ 0.880 & 0 & 0.080 & 0 & 0.040 & 0 & 0 \\ 0.800 & 0 & 0.100 & 0 & 0.100 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.782 \ 0 \ 0.172 \ 0 \ 0.076 \ 0 \ 0]$$

最后得

$$B_{\text{断路器}} = [0.9 \ 0.1] \circ \begin{bmatrix} 0.595 & 0 & 0.383 & 1 & 0.017 & 2 & 0 \\ 0.782 & 0 & 0.172 & 0 & 0.076 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.613 \ 7 \ 0.362 \ 0 \ 0.023 \ 1 \ 0]$$

从 2004 年的数据计算结果来看，该断路器处于良好状态，结果与该断路器在 2004~2006 年期间工作状态良好、性能稳定相吻合。

#### 5 结语

多级模糊综合评判是一种综合、全面的评价方法，其优越性在于能使被评判对象的各种单参数性能指标经归算后形成量化数据，并在模糊综合评判数学模型的基础上进行多因素综合评价。随着状态检测技术的不断发展，特别是在线监测技术的应用，高压断路器的监测参量将不断丰富，多级模糊综合评判提供了一种利用各种现场参量进行状态评价的有效手段。

#### 参考文献:

- [1] IEEE Std C37.10.1-2000. IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers[S].
- [2] IEEE Std C37.10-1995. IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers[S].
- [3] 林 莘, 张冠生, 洪 翠. 基于模糊理论的真空断路器开断寿命综合评判的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 15-18.
- [4] 李 伟. 基于模糊综合评判的高压断路器状态评估方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [5] 陈伟根, 李 伟, 陈新岗, 等. SF<sub>6</sub> 高压断路器状态分析的模糊综合评判方法 [J]. 高压电器, 2004, 40(5): 361-363.
- [6] 张吉军. 模糊层次分析法 [J]. 模糊系统与数学, 2002, 14(2): 80-88.
- [7] 李洪兴. 工程模糊数学方法及应用 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.
- [8] 吕跃进. 基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法排序 [J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2): 79-85.
- [9] 陶余会. 如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵 [J]. 四川师范学院学报, 2002, 32(3): 283-285.
- [10] 顾霓鸿, 宋 杲. 高压开关事故分析和故障对策 [J]. 供用电, 2006, 23(1): 5-8.
- [11] DL/T 596-1996. 电力设备预防性试验规程 Preventive Test Code for Electric Power Equipment[S].
- [12] 钱家骥. 高压断路器的更换技术和日本的更换量化标准 [J]. 高压电器, 2003, 39(2): 53-55.
- [13] 黎 斌. 断路器电寿命的折算、限值及其在线检测技术 [J]. 高压电器, 2005, 41(6): 428-43.