

# 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估

国连玉,李可军,梁永亮,孙立军

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

**摘要:** 针对高压断路器状态评估因素具有模糊性和灰色性的特点,将灰色模糊理论应用到高压断路器的状态评估中。基于试点工程,建立考虑高压断路器运行机理的递阶层次评估模型;采用层次分析法计算各层次评估因素权重集的模部,结合信息充裕程度及专家经验,确定相应评估因素权重集的灰部;综合定性分析与定量分析,以隶属度描述评估因素与状态等级间的模糊关系,并引入点灰度描述模糊关系的不可信程度,建立灰色模糊判别矩阵,进而对高压断路器运行状态进行综合评估。实际算例表明,所提模型能够客观有效地评估高压断路器的状态。

**关键词:** 断路器; 状态评估; 模糊性; 灰色模糊理论; 递阶层次评估; 层次分析法; 模型; 隶属度函数  
**中图分类号:** TM 56      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.025

## 0 引言

高压断路器是电力系统中最重要开关设备之一,其运行状况的好坏对电力系统的安全与稳定运行具有重大的影响<sup>[1]</sup>。目前,断路器维修还处于定期检修阶段,除检修量大、经济费用高外,还容易造成检修不足或检修过度,因此,对断路器进行“当修则修”的状态维修具有重要意义,而对断路器进行准确的状态评估是施行状态维修的关键性前提。

目前国内已提出不同的高压断路器状态评估模型:文献[2-3]将模糊数学理论应用于断路器的状态评估;文献[4]将突变理论应用到断路器状态模糊综合评估中;文献[5]将故障树与模糊数学理论结合进行断路器状态综合评估;文献[6]通过引用均衡函数的变权模式进行断路器状态模糊综合评判。上述方法虽然取得了一定的成果,但其仅仅考虑了评估因素的模糊性,而未考虑评估因素的灰色性。

基于已有的研究成果,针对高压断路器状态评估因素具有模糊性和灰色性的特点,本文将隶属度和灰度综合应用到高压断路器的状态评估中。首先,对断路器的运行机理及相关试验项目进行系统的分析,综合建立递阶层次评估模型;然后,基于层次分析法的普适性,确定评估因素权重集的模部,结合专家经验及信息的充裕程度,确定权重集的灰部;最后,通过隶属度来定量刻画状态评估因素与状态等级间的关系,以灰度来描述信息的充裕程度,建立灰色模糊判别矩阵。在此基础上,对高压断路器运行状态进行灰色模糊综合评估,并进行实例验证。

## 1 灰色模糊数学基础

设  $\tilde{A}$  是空间  $X=\{x\}$  上的模糊子集,若  $x$  对于  $\tilde{A}$

的隶属度  $\mu_A(x)$  为  $[0,1]$  上的一个灰数,其点灰度为  $v_A(x)$ ,则称  $\tilde{A}$  为  $X$  上的灰色模糊集合,记作:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x), v_A(x)) | x \in X\} \quad (1)$$

给定空间  $X=\{x\}$ 、 $Y=\{y\}$ ,若  $x$  与  $y$  对模糊关系  $\tilde{R}$  的隶属度为  $\mu_R(x,y)$ ,其对应的点灰度为  $v_R(x,y)$ ,则称集合  $\tilde{R} = \{(x,y, \mu_R(x,y), v_R(x,y)) | x \in X, y \in Y\}$  为直积空间  $X \times Y$  上的灰色模糊关系,也可以用灰色模糊矩阵的形式表示如下:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, v_{11}) & (\mu_{12}, v_{12}) & \cdots & (\mu_{1n}, v_{1n}) \\ (\mu_{21}, v_{21}) & (\mu_{22}, v_{22}) & \cdots & (\mu_{2n}, v_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1}, v_{m1}) & (\mu_{m2}, v_{m2}) & \cdots & (\mu_{mn}, v_{mn}) \end{bmatrix} = [(\mu_{ij}, v_{ij})]_{m \times n} \quad (2)$$

其中,  $\mu_{ij}$  为评判对象  $i$  对评语集  $j$  的隶属度,  $v_{ij}$  为相应的点灰度。

$\tilde{R}$  还可以用集偶表示为  $\tilde{R} = (\tilde{R}, R)$  的形式,其中,  $\tilde{R} = \{(x,y, \mu_R(x,y)) | x \in X, y \in Y\}$  表示空间  $X \times Y$  上的模糊关系,  $R = \{(x,y, v_R(x,y)) | x \in X, y \in Y\}$  表示直积空间  $X \times Y$  上的灰色关系<sup>[8]</sup>。

设有灰色模糊矩阵  $\tilde{W} = [(w_{ij}^W, v_{ij}^W)]_{m \times s}$  以及  $\tilde{R} = [(\mu_{ij}^R, v_{ij}^R)]_{s \times n}$ ,则  $\tilde{W}$  与  $\tilde{R}$  的合成关系为:

$$\tilde{B} = \tilde{W} \circ \tilde{R} = [(\tilde{W} \circ \tilde{R}, W \circ R)] = \left[ \left( +F_{k=1}^s (w_{ik}^W \cdot F \mu_{kj}^R), \cdot G_{k=1}^s (v_{ik}^W + G v_{kj}^R) \right) \right]_{m \times n} \quad (3)$$

其中,  $+F_{k=1}^s (w_{ik}^W \cdot F \mu_{kj}^R)$  为模部;  $\cdot G_{k=1}^s (v_{ik}^W + G v_{kj}^R)$  为灰部;  $\cdot F$ 、 $+F$  分别为模部运算广义“与”和“或”算子;  $\cdot G$ 、 $+G$  分别为灰部运算广义“与”和“或”算子<sup>[7-8]</sup>;  $\circ$  为模糊合成算子。

收稿日期:2013-12-18;修回日期:2014-09-30  
基金项目:山东省科技发展项目(2014GGE27054)  
Project supported by Shandong Scientific and Technology Program(2014GGE27054)

## 2 灰色模糊综合评判模型

灰色模糊综合评判是一种基于灰色模糊数学的综合评判方法,该方法通过模糊关系来描述评估因素与评估对象间的关系,并引入点灰度来描述相应模糊关系的可信程度,能有效地解决模糊的、信息不全的系统问题。基于此,本文将灰色模糊综合评判应用于高压断路器状态评估,评估流程如图 1 所示。

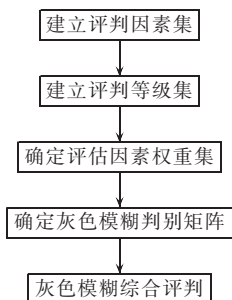


图 1 灰色模糊综合评估流程图

Fig.1 Flowchart of gray-fuzzy comprehensive assessment

### 2.1 建立评判因素集

高压断路器作为一个复杂的多因素系统,机械、电气、绝缘方面的因素是影响断路器状态的主要因素,除此之外,还有一些因素应予以考虑,如工作环境、外观状况、维护状况等<sup>[3,9]</sup>。在此基于系统的观点,考虑断路器的运行机理及相关试验项目,选取代表性指标,兼顾建模的合理性和全面性,综合建立高压断路器评判模型,如表 1 所示。

表 1 高压断路器状态评价模型

Table 1 State assessment model for HV circuit breakers

| 目标层       | 准则层                  | 子准则层                         | 指标层                 |
|-----------|----------------------|------------------------------|---------------------|
| 高压断路器运行状态 | 机械特性                 | 时间参数                         | 合闸/分闸不同期、其他         |
|           |                      | 速度参数                         | 刚分速度、刚合速度、其他        |
|           | 电气特性                 | 分合闸线圈直流电阻                    | 分闸、合闸线圈直流电阻         |
|           |                      | 开断磨损                         | 相对电磨损程度、累计开断次数、使用年数 |
| 绝缘特性      | 最低动作电压               | 分闸、合闸线圈最低动作电压                |                     |
|           | 绝缘介质                 | 微水含量、气体泄漏、其他                 |                     |
|           | 长时工频耐压试验<br>一次回路对地绝缘 |                              |                     |
| 其他因素      | 工作环境                 | 湿度、温度、污秽度、其他                 |                     |
|           | 维修状况                 | 指定断路器、同类断路器                  |                     |
|           | 外观情况                 | 操作机构润滑、主体及机构外观、主回路端子、支持绝缘子部分 |                     |
|           | 生产厂家                 | 厂家实力、认同度、产品成熟度               |                     |

### 2.2 建立评判等级集

评判集的等级需根据实际情况划分,需综合考虑评判精度及运算的复杂程度<sup>[7]</sup>。本文将高压断路器运行状态划分为“优”、“良”、“中”、“差”4 个等级,对应集合  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$  中的  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 。

### 2.3 确定评估因素权重集

权重集可视为评判对象与评判因素之间的灰色模糊关系,权重集的模部以量化的形式反映了各评估因素在总体评估中的重要程度,其灰部反映了该评估的可信度。本文将权重集的模部和灰部分开确定,权重集的模部通过具有普适性的层次分析法 AHP (Analytical Hierarchy Process) 来确定<sup>[10-11]</sup>;在保证评估精度的前提下,为了尽量减少运算量,本文假定同一父层次下的评估因素的权重集灰部相同,通过专家打分取均值的方法确定;假设某父层次下具有  $N$  个子评估因素  $a_1, a_2, \dots, a_N$ 。

#### 2.3.1 权重集模部的确定

层次分析法将定性分析与定量分析相结合,是一种用于分析多目标、多准则、复杂系统的系统分析法,在很多领域得到了广泛的应用<sup>[12]</sup>。利用该方法进行权重集模部确定的步骤如下。

步骤 1: 根据问题的总目标,建立评估系统的递阶层次模型,详见 2.1 节。

步骤 2: 由专家对评价指标进行两两比较,构造判别矩阵。

判别矩阵表示针对上一层某因素,本层次与之相关元素之间的相对重要性,其确定通过元素间的两两相互比较,采用 1—9 标度法<sup>[10]</sup>进行标注,标注含义见表 2。

表 2 1—9 标度法

Table 2 Definition for 9 scales

| 标度      | 含义                           |
|---------|------------------------------|
| 1       | 因素 $U_i$ 与因素 $U_j$ 同等重要      |
| 3       | 因素 $U_i$ 比因素 $U_j$ 稍微重要      |
| 5       | 因素 $U_i$ 比因素 $U_j$ 明显重要      |
| 7       | 因素 $U_i$ 比因素 $U_j$ 强烈重要      |
| 9       | 因素 $U_i$ 比因素 $U_j$ 极端重要      |
| 2,4,6,8 | 分别表示相邻判断 1-3,3-5,5-7,7-9 的中值 |

步骤 3: 计算权重,并进行标准化。

对步骤 2 所得判别矩阵,求解其最大特征根  $\lambda_{\max}$  及所对应的特征向量  $W'_i = (w'_1, w'_2, \dots, w'_N)$ , 所求特征向量为各评估因素重要性排序,即权重分配,进行标准化处理后即得权重集模部  $W_i = (w_1, w_2, \dots, w_N)$ 。

步骤 4: 一致性验证。

在实际决策分析中,由于所研究的问题的复杂程度和人们认识上可能产生的片面性,构造出的判别矩阵往往不具有 consistency,因此需要进行一致性验证,可通过一致性公式完成。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$CI = \frac{1}{N-1} (\lambda_{\max} - N) \quad (5)$$

其中,CR 为判别矩阵的随机一致性比率;CI 为判别

矩阵的一般一致性指标;RI 为与  $N$  阶判别矩阵的平均随机一致性指标,对于 1—9 阶判别矩阵,RI 的值列于表 3。

表 3 平均随机一致性指标值

Table 3 Index value of average random consistency for 9 scales

| $N$ | RI   | $N$ | RI   |
|-----|------|-----|------|
| 1   | 0    | 6   | 1.24 |
| 2   | 0    | 7   | 1.32 |
| 3   | 0.58 | 8   | 1.41 |
| 4   | 0.90 | 9   | 1.45 |
| 5   | 1.12 |     |      |

当  $CR < 0.1$  时,认为判别矩阵具有满意的一致性,说明权重分配是合理的;否则需要调整判别矩阵,直到取得满意的一致性。

下面以机械特性下的时间参数为例进行计算说明。

机械特性下的时间参数包括合闸不同期、分闸不同期和其他因素,由专家根据经验进行两两比较得判别矩阵  $[1 \ 1/2 \ 3; 2 \ 1 \ 5; 1/3 \ 1/5 \ 1]$ ,求得最大特征根  $\lambda_{\max} = 3.0037$  及所对应的特征向量  $W_i = (0.463, 0.871, 0.164)$ ,进行标准化处理得  $W_i = (0.309, 0.582, 0.109)$ ,进一步可得判别矩阵的随机一致性比率  $CR = 0.0032 < 0.1$ ,说明判别矩阵具有满意的一致性。所以,机械特性下的时间参数权重集模部  $W_i = (0.309, 0.582, 0.109)$ 。

2.3.2 权重集灰部的确定

由于同一层次下评估因素风险数据相对充裕程度相差不大,为简化运算,本文假定同一父层次下评估因素的权重集具有相同的灰部<sup>[7]</sup>。结合专家经验,权重集的灰部采用专家打分求均值法确定,打分标准见表 4,具体方法如下所示。

表 4 灰度打分标准

Table 4 Description for different gray scales

| 描述性语言 | 灰度值        |
|-------|------------|
| 很充分   | (0, 0.2]   |
| 比较充分  | (0.2, 0.4] |
| 一般    | (0.4, 0.6] |
| 比较匮乏  | (0.6, 0.8] |
| 很匮乏   | (0.8, 1.0] |

$M$  个专家分别对  $N$  个子评估因素  $a_1, a_2, \dots, a_N$  进行综合打分,对应分值为  $h_1, h_2, \dots, h_{M0}$ 。为了减轻专家主观偏见,去除一个最大值和一个最小值,然后求均值,则对应于该父层次下的子评估因素  $a_1, a_2, \dots, a_N$  的权重集灰部为:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^M (h_j - \max h_j - \min h_j)}{M - 2} \quad (6)$$

其中,  $i \in \{1, 2, \dots, l\}$ ,  $l$  为与该父层次同层次的评估

因素数目。

综上,构造权重集矩阵,该父层次下的评估因素  $a_1, a_2, \dots, a_N$  对应的权重集模部为  $\{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ , 权重集灰部为  $v_i$ , 则权重集的矩阵表示形式如下:

$$\widetilde{W}_i = [(w_1, v_i), (w_2, v_i), \dots, (w_N, v_i)] \quad (7)$$

2.4 确定灰色模糊判别矩阵

灰色模糊判别矩阵由模部和灰部组成。模部以模糊隶属度来表征各评估因素与评估状态之间的模糊关系,灰部以点灰度来表征相应模糊隶属关系的可信度。下面给出确定灰色模糊判别矩阵的具体方法。

2.4.1 模部的确定

在高压断路器状态指标中包含定量指标和定性指标。对于定量指标,本文选用简单且适用性强的三角隶属函数确定隶属度;对于定性指标,本文采取模糊统计试验法求取隶属度。

对于定量指标,综合考虑计算精度和运算量,本文首先对相关原始数据做相应预处理<sup>[2, 13-14]</sup>。然后,采用应用广泛的半梯形分布函数和三角函数作为隶属度函数,根据指标类型确定相应隶属度函数分布<sup>[15]</sup>。对于越小越优型指标,评判等级  $V_1$  的分布函数采用偏小型的降半梯形分布(式(8)),评判等级  $V_2, V_3$  的分布函数采用不失一般性的中间型三角分布(式(9)),评判等级  $V_4$  的分布函数采用偏大型的升半梯形分布(式(10))。对于越大越优型指标,评判等级  $V_1$  的分布函数采用偏大型的升半梯形分布(式(10)),评判等级  $V_2, V_3$  的分布函数仍采用不失一般性的中间型三角分布(式(9)),评判等级  $V_4$  的分布函数采用偏小型的降半梯形分布(式(8))。最后,根据相关试验规范及专家经验确定不同评判等级对应分布中包含的参数  $m_1, m_2, m_3$ <sup>[14, 16]</sup>,并将经过预处理的数据代入相应隶属度函数求取模糊隶属度  $\mu_{ij}$ 。

$$\mu_{ul}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq m_1 \\ \frac{m_2 - x}{m_2 - m_1} & m_1 < x \leq m_2 \\ 0 & x > m_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{ml}(x) = \begin{cases} \frac{x - m_1}{m_2 - m_1} & m_1 < x \leq m_2 \\ \frac{m_3 - x}{m_3 - m_2} & m_2 < x < m_3 \\ 0 & x \leq m_1, x \geq m_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{ul}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq m_1 \\ \frac{x - m_1}{m_2 - m_1} & m_1 < x \leq m_2 \\ 1 & x > m_2 \end{cases} \quad (10)$$

对于难以量化的定性指标,本文采用模糊统计试验法<sup>[6]</sup>求取其隶属度,具体方法为:制作专家打分调查表,由专家根据经验对各个评估因素进行判定,



在打分表的对应等级处打勾,然后进行汇总得各评估因素对应等级频数,进行归一化处理得对应等级隶属度,其公式为:

$$\mu_{ij} = \frac{\text{认为第 } i \text{ 个因素属于第 } j \text{ 条评语的专家人数}}{\text{参加评估的专家人数}} \quad (11)$$

#### 2.4.2 灰部的确定

在确定模部时,各评估因素收集到的信息量不同,会造成确定的模糊关系存在不可信度,且因信息的充裕程度不同而存在一定的差异。考虑其对总体评估的影响,在灰色模糊关系矩阵中引入灰部,并使用一定的描述性语言来对应一定的灰度范围,如表 4 所示。灰部的确定需要根据实际信息的充裕程度进行选值<sup>[7]</sup>,针对各个评估因素本文采用专家打分求均值的思路确定相应灰度值。

综上,确定该父层次下子评估因素的灰色模糊关系矩阵为:

$$\tilde{R}_i = \begin{pmatrix} (\mu_{11}, v_{11}) & (\mu_{12}, v_{12}) & (\mu_{13}, v_{13}) & (\mu_{14}, v_{14}) \\ (\mu_{21}, v_{21}) & (\mu_{22}, v_{22}) & (\mu_{23}, v_{23}) & (\mu_{24}, v_{24}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (\mu_{N1}, v_{N1}) & (\mu_{N2}, v_{N2}) & (\mu_{N3}, v_{N3}) & (\mu_{N4}, v_{N4}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

#### 2.5 灰色模糊综合评判

高压断路器的状态评估是对断路器状态变化趋势的分析,状态评估因素实际上并非都能准确把握。为了保留尽可能多的评判信息,模部运算采用  $M(\cdot, +)$  算子,灰部运算采用  $M(\odot, +)$  算子,参照式(3),合成的灰色模糊综合评判的结果为:

$$\tilde{B}_i = \tilde{W}_i \circ \tilde{R}_i = \left[ \left( \sum_{k=1}^N (w_k \mu_{kj}), \prod_{k=1}^N (1 \wedge (v_i + v_{kj})) \right) \right]_{1 \times 4} \quad (13)$$

其中,  $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ ;  $i \in \{1, 2, \dots, l\}$ ,  $l$  为与该父层次同层次的评估因素数目;  $\tilde{W}_i$  为权重集矩阵,  $\tilde{R}_i$  为与之对应的灰色模糊判别矩阵;  $w_k$ 、 $v_i$  分别为各评估指标的权重及对应灰度;  $\mu_{kj}$ 、 $v_{kj}$  分别为相应评估因素的隶属度值及对应点灰度值;“ $\wedge$ ”表示取极小值运算。

由与该父层次同层次的评估因素的综合评判结果  $\tilde{B}_i$  组成高阶层次评估因素的灰色模糊判别矩阵,如式(14)所示。结合对应权重集进行灰色模糊运算,依此类推,逐层运算求得高压断路器运行状态的综合评判结果  $\tilde{B}_{state}$ 。

$$\tilde{B}_{state} = [\tilde{B}_1^T \quad \tilde{B}_2^T \quad \dots \quad \tilde{B}_l^T]^T \quad (14)$$

目前对评判结果的处理主要有 2 种方法:一种是采用区间数的形式,转化为排序可能性矩阵,但此法较复杂<sup>[8]</sup>;另一种是依据隶属度最大原则和点灰度最小原则进行判断,但此方法无法有效判别隶属度和点灰度都较大的情况。针对这些不足,本文引用

内积法和最大隶属度原则相结合的方法进行处理<sup>[7]</sup>。

假设  $b_i$  是  $\tilde{B}_{state}$  的第  $i$  个向量,令  $d_i = 1 - v_i$  表示  $b_i$  的可信度。令  $b_i = (\mu_i, d_i)$  (其中,  $\mu_i$  为最终评判对象,即高压断路器运行状态对评判集  $i$  的模糊隶属度),则综合评判结果  $\tilde{B}_{state}$  可以通过计算  $b_i$  的大小来确定,简化为求解  $b_i$  的范数:

$$\|b_i\| = \sqrt{[b_i, b_i]} \quad (15)$$

其中,  $[b_i, b_i]$  为向量  $b_i$  的内积。最后,利用最大隶属度原则得出高压断路器的运行状态。

### 3 算例验证

为了验证该算法在高压断路器状态评估中应用的有效性及其可行性,本文对杭州西门子高压开关有限公司生产的 3AP1FG 型 SF<sub>6</sub> 断路器进行了灰色模糊综合评估。该断路器主要技术参数如表 5 所示,由预防性试验所得的合、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;分、合闸直流电阻分别为 90、125 Ω;该断路器投运 13 a,累计开断次数为 472 次,分、合闸线圈最低动作电压分别为 63、70 V,主回路电阻为 27 μΩ;绝缘介质中气体压力为 0.55 MPa,湿度为 1.63 × 10<sup>-4</sup>,一次回路对地绝缘电阻为 8 GΩ。

表 5 3AP1FG SF<sub>6</sub> 断路器主要技术参数  
Table 5 Main technical parameters of SF<sub>6</sub> circuit breaker 3AP1FG

| 技术参数                           | 参数值       |
|--------------------------------|-----------|
| 额定电压/kV                        | 145       |
| 额定电流/A                         | 3150/4000 |
| 额定短路关合电流/kA                    | 100       |
| 额定短路开断电流/kA                    | 40        |
| 额定工频耐压/kV                      | 275       |
| 相间分闸同期性/ms                     | ≤3        |
| 相间合闸同期性/ms                     | ≤5        |
| SF <sub>6</sub> 气体质量/kg        | 8         |
| 20℃ 时 SF <sub>6</sub> 额定压力/MPa | 0.6       |
| 20℃ 时 SF <sub>6</sub> 最低压力/MPa | 0.5       |
| 20℃ 时 SF <sub>6</sub> 报警压力/MPa | 0.52      |
| 20℃ 时 SF <sub>6</sub> 闭锁压力/MPa | 0.5       |
| 操作机构                           | 弹簧机构      |

由表 1 可知,本文主要考虑 4 个方面的因素:机械特性、电气特性、绝缘特性和其他因素(环境、外观等),具体验证过程如下。

步骤 1:确定机械特性子因素权重集及灰色模糊判别矩阵,以时间参数为例进行说明。

#### a. 时间参数权重集的确定。

首先,确定其模部,具体过程及结果见 2.3.1 节;然后,针对其模部的可信度,7 位专家根据经验分别进行打分,得打分值 {0.2, 0.4, 0.3, 0.3, 0.1, 0.3, 0.5}, 基于 2.3.2 节所介绍的专家打分求均值法,由式(6)

得灰部  $v_i=0.3$ ;由式(7)得时间参数的权重集矩阵  $\tilde{W}_{tp} = [(0.309, 0.3) (0.582, 0.3) (0.109, 0.3)]$ ,同理可得速度参数和分合闸线圈直流电阻的权重集矩阵见表 6。

表 6 机械特性子因素的权重集

Table 6 Weight set for mechanical factors

| 评估因素      | 权重集矩阵                                    |
|-----------|--|
| 时间参数      | [(0.309, 0.3) (0.582, 0.3) (0.109, 0.3)] |
| 速度参数      | [(0.297, 0.3) (0.539, 0.3) (0.164, 0.3)] |
| 分合闸线圈直流电阻 | [(0.5, 0.1) (0.5, 0.1)]                  |

注:各评估因素权重顺序与表 1 中各因素顺序一一对应。

**b. 时间参数灰色模糊判别矩阵的确定。**

首先,确定灰色模糊判别矩阵的模部。对于合闸、分闸不同期因素,采用三角隶属函数求隶属度。因合闸、分闸不同期数据数量级为 1,满足计算精度,在此直接采用原始数据,即预处理函数  $f(x)=x$ 。合闸不同期因素和分闸不同期因素均属于越小越优型的指标,据此选择相应的分布函数,并根据相关试验规范及专家经验确定不同评判等级对应分布中包含的参数  $m_1, m_2, m_3$ <sup>[14,16]</sup>,得合闸、分闸不同期因素的隶属度函数,见表 7,并将已知数据代入求得相应隶属度。对于其他因素,采用模糊统计试验法<sup>[6]</sup>求取其隶属度为[0.3, 0.5, 0.2, 0]。综上求得时间参数的模部

$$\text{为} \begin{bmatrix} 0.35 & 0.65 & 0.325 & 0.217 \\ 0 & 0.54 & 0.73 & 0.487 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}。$$

表 7 合闸、分闸不同期隶属函数

Table 7 Membership functions for nonsynchronous closing and breaking

| 评判等级 | 隶属度函数   |   |         |  |
|------|---|---|---------|--|
|      | 合闸不同期因素   |   | 分闸不同期因素 |  |
| 优    | $\mu_{cl}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ 2-x & 1 < x \leq 2 \\ 0 & x > 2 \end{cases}$                           | $\mu_{br}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ 3-2x & 1 < x \leq 1.5 \\ 0 & x > 1.5 \end{cases}$                  |         |  |
| 良    | $\mu_{cl}(x) = \begin{cases} x-1 & 1 < x \leq 2 \\ 3-x & 2 < x < 3 \\ 0 & x \leq 1, x \geq 3 \end{cases}$           | $\mu_{br}(x) = \begin{cases} 2x-2 & 1 < x \leq 1.5 \\ 4-2x & 1.5 < x \leq 2 \\ 0 & x \leq 1, x > 2 \end{cases}$ |         |  |
| 中    | $\mu_{cl}(x) = \begin{cases} \frac{x-1}{2} & 1 < x \leq 3 \\ 4-x & 3 < x < 4 \\ 0 & x \leq 1, x \geq 4 \end{cases}$ | $\mu_{br}(x) = \begin{cases} x-1 & 1 < x \leq 2 \\ 5-2x & 2 < x < 2.5 \\ 0 & x \leq 1, x \geq 2.5 \end{cases}$  |         |  |
| 差    | $\mu_{cl}(x) = \begin{cases} \frac{x-1}{3} & 1 < x \leq 4 \\ 1 & x > 4 \\ 0 & x \leq 1 \end{cases}$                 | $\mu_{br}(x) = \begin{cases} \frac{2(x-1)}{3} & 1 < x \leq 2.5 \\ 1 & x > 2.5 \\ 0 & x \leq 1 \end{cases}$      |         |  |

注:  $x=f(x)$ ,  $f(x)$  为数据预处理函数<sup>[2,13-14]</sup>。

其次,确定灰色模糊判别矩阵的灰部。时间参数下合闸不同期因素的等级属于“优”,7位专家根据数据的充裕程度及经验,进行打分得 {0.6, 0.5, 0.4, 0.4, 0.4, 0.2, 0.3},由式(6)求得对应点灰度值为 0.4。同理,求得各指标因素相应隶属等级的点灰度值。

综上得时间参数的灰色模糊判别矩阵见表 8。同理可得速度参数和分合闸线圈直流电阻的灰色模糊判别矩阵见表 8。

表 8 机械特性子因素判别矩阵

Table 8 Discrimination matrix of mechanical factors

| 评估因素      | 灰色模糊判别矩阵  |
|-----------|---|
| 时间参数      | $\begin{bmatrix} (0.35, 0.4) & (0.65, 0.2) & (0.325, 0.1) & (0.217, 0.3) \\ (0, 0.3) & (0.54, 0.3) & (0.73, 0.2) & (0.487, 0.3) \\ (0.3, 0.5) & (0.5, 0.4) & (0.2, 0.4) & (0, 0.1) \end{bmatrix}$ |
| 速度参数      | $\begin{bmatrix} (0.4245, 0) & (0.849, 0.2) & (0.151, 0.3) & (0, 0.2) \\ (0, 0.15) & (0, 0.15) & (0, 0.1) & (1, 0) \\ (0, 0.3) & (0.3, 0.3) & (0.5, 0.15) & (0.2, 0.3) \end{bmatrix}$             |
| 分合闸线圈直流电阻 | $\begin{bmatrix} (0.974, 0) & (0.106, 0.2) & (0, 0.1) & (0, 0) \\ (0.647, 0.1) & (0.7925, 0.1) & (0, 0) & (0, 0) \end{bmatrix}$   |

利用灰色模糊综合评估进行相关子评估因素综合评判,由式(13)可得时间参数、速度参数和分合闸线圈直流电阻这 3 个因素的评估结果分别为:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{tp} &= \begin{bmatrix} (0.1409, 0.3360) \\ (0.5696, 0.2100) \\ (0.5471, 0.1400) \\ (0.3505, 0.1440) \end{bmatrix}^T \\ \tilde{B}_{sp} &= \begin{bmatrix} (0.1261, 0.0810) \\ (0.3014, 0.1350) \\ (0.1268, 0.1080) \\ (0.5718, 0.0900) \end{bmatrix}^T \\ \tilde{B}_{wr} &= \begin{bmatrix} (0.7755, 0.02) \\ (0.4492, 0.06) \\ (0, 0.02) \\ (0, 0.01) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

步骤 2:由步骤 1 中计算所得的子因素综合评判结果构成机械特性的灰色模糊判别矩阵为:

$$\tilde{R}_{mc} = [\tilde{B}_{tp}^T \quad \tilde{B}_{sp}^T \quad \tilde{B}_{wr}^T]^T$$

同理可以得到电气特性、绝缘特性和其他因素的灰色模糊判别矩阵。参照 2.3 节中的方法确定断路器运行状态子评估因素权重集,则断路器运行状态子评估因素的权重集以及判别矩阵分别如表 9 和表 10 所示。

由式(13)对机械特性、电气特性、绝缘特性和其他评估因素进行灰色模糊综合评估,评估结果分别为:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{mc} &= \begin{bmatrix} (0.2406, 0.0331) \\ (0.4702, 0.0357) \\ (0.3325, 0.023) \\ (0.3587, 0.0209) \end{bmatrix}^T, \tilde{B}_{el} = \begin{bmatrix} (0.1964, 0.0017) \\ (0.2455, 0.0097) \\ (0.4485, 0.005) \\ (0.2402, 0.0062) \end{bmatrix}^T \\ \tilde{B}_{is} &= \begin{bmatrix} (0.2502, 0.1564) \\ (0.3783, 0.1335) \\ (0.417, 0.769) \\ (0.014, 0.0406) \end{bmatrix}^T, \tilde{B}_{other} = \begin{bmatrix} (0.1971, 0.5488) \\ (0.2914, 0.5029) \\ (0.4212, 0.3191) \\ (0.0894, 0.2892) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

表 9 断路器运行状态子因素权重集  
Table 9 Weight set for operational factors

| 评估因素 | 权重集矩阵                                    | 评估因素 | 权重集矩阵  |
|------|--|------|--|
| 机械特性 | [(0.539,0.2) (0.297,0.2) (0.164,0.2)]    | 绝缘特性 | [(0.6370,0.3) (0.1047,0.3) (0.2583,0.3)]         |
| 电气特性 | [(0.6483,0.1) (0.2297,0.1) (0.1220,0.1)] | 其他因素 | [(0.09,0.5) (0.364,0.5) (0.342,0.5) (0.204,0.5)] |

表 10 断路器运行状态子因素判别矩阵  
Table 10 Discrimination matrix of operational factors

| 评估因素 | 判别矩阵  |
|------|---|
| 机械特性 | [(0.1409,0.336) (0.5696,0.210) (0.5471,0.140) (0.3505,0.144)<br>(0.1261,0.081) (0.3014,0.135) (0.1268,0.108) (0.5718,0.090)<br>(0.7755,0.020) (0.4492,0.060) (0,0.0200) (0,0.0100)]   |
| 电气特性 | [(0.1360,0.0056) (0.1912,0.0472) (0.5478,0.0113) (0.3263,0.0131)<br>(0.4710,0.0625) (0.5290,0.1200) (0,0.0500) (0,0.0100)<br>(0,0) (0,0.2) (0.765,0.2) (0.235,0.4)]   |
| 绝缘特性 | [(0.2200,0.0724) (0.3718,0.1046) (0.4318,0.0846) (0.0219,0.038)<br>(0.8048,0.3) (0.488,0.3) (0,0.1) (0,0)<br>(0.1,0.4) (0.35,0.25) (0.55,0.2) (0,0.1)]  |
| 其他因素 | [(0.0559,0.1050) (0.2578,0.2184) (0.5178,0.1470) (0.1585,0.1540)<br>(0.1600,0.4200) (0.300,0.200) (0.54,0.14) (0,0.105)<br>(0.0715,0.4860) (0.2727,0.5040) (0.4361,0.2707) (0.2197,0.3744)<br>(0.5360,0.8550) (0.3222,0.8500) (0.1418,0.7200) (0,0.3430)] |

步骤3:对高压断路器运行状态进行灰色模糊综合评判,并对评判结果进行处理。

由步骤2中计算所得的子因素综合评判结果构成高压断路器运行状态的灰色模糊判别矩阵为:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\text{state}} = \left[ \begin{matrix} \tilde{\mathbf{B}}_{\text{mc}}^T & \tilde{\mathbf{B}}_{\text{el}}^T & \tilde{\mathbf{B}}_{\text{is}}^T & \tilde{\mathbf{B}}_{\text{other}}^T \end{matrix} \right]^T$$

高压断路器运行状态的权重集矩阵为:

$$\tilde{\mathbf{W}}_{\text{state}} = \left[ \begin{matrix} (0.549,0.3) \\ (0.214,0.3) \\ (0.142,0.3) \\ (0.095,0.3) \end{matrix} \right]^T$$

由  $\tilde{\mathbf{R}}_{\text{state}}$  和  $\tilde{\mathbf{W}}_{\text{state}}$  求得灰色模糊评判结果为:

$$\tilde{\mathbf{B}}_{\text{state}} = \left[ \begin{matrix} (0.2284,0.0389) \\ (0.3921,0.0362) \\ (0.3778,0.023) \\ (0.2588,0.0197) \end{matrix} \right]^T$$

对得到的灰色模糊综合评判结果取范数得  $\|\mathbf{b}_1\|=0.9879$ ,  $\|\mathbf{b}_2\|=1.0405$ ,  $\|\mathbf{b}_3\|=1.0475$ ,  $\|\mathbf{b}_4\|=1.0139$ 。结合最大隶属度原则,最终判定该高压断路器的运行状态为“中”。由实际运行数据可以看出,有些数值已经偏离出厂值或最优值,有劣化趋向,实际运行状况为:传动机构卡涩,导致合闸速度降低或拒合。若仅根据隶属度来判定,该断路器运行状态属于“良”,与实际运行状态存在较大偏差,原因在于该隶属度所对应的灰度较大,即该隶属度的可信度较低。由此可见,基于灰色模糊综合评判得出的结论更加有效可信。

## 4 结论

基于灰色模糊理论的高压断路器状态评估充分考虑了评估信息的模糊性以及灰色性,在系统地调

研高压断路器运行机理及相关试验项目的基础上,综合建立了高压断路器运行状态的递阶层次评估模型。结合定量分析与定性分析,将隶属度与灰色综合应用到断路器运行状态的的综合评判过程中,通过模糊关系定量刻画评估因素与运行状态间的关系,并引入点灰度来描述相应模糊关系的可信度,对高压断路器的运行状态进行综合评估。实例验证表明,本文所提算法能够客观有效地评估高压断路器的运行状态,为高压断路器的状态维修提供了可靠的参考。同时,如何更加合理地确定权重集有待进一步的研究与完善。

## 参考文献:

- [1] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K, et al. Priority assessment of online monitoring investment for power system CBs part I: qualitative-quantitative approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(2): 928-938.
- [2] 李宇, 张国刚, 耿英三. 基于模糊理论的高压断路器状态评估研究[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 274-277.  
LI Yu, ZHANG Guogang, GENG Yingsan. The condition assessment method for HV circuit breakers based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 274-277.
- [3] 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.  
CHEN Weigen, LI Wei, CHEN Xingang, et al. The fuzzy comprehensive evaluation method for condition analysis of SF<sub>6</sub> high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 361-363.
- [4] 陈伟根, 吴娅, 刘强. 基于突变理论断路器运行状态模糊综合评判方法[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 127-131.  
CHEN Weigen, WU Ya, LIU Qiang. The fuzzy comprehensive evaluation of the high voltage circuit breaker condition based on catastrophe theory[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 127-131.
- [5] 马宏明, 卢勇, 董华英. 基于故障树和模糊综合评判的高压断

- 器状态评价研究[J]. 电气技术,2012(9):1-4.
- MA Hongming,LU Yong,DONG Huaying. The condition assessment method for HV circuit breakers based on fault tree analysis and fuzzy comprehensive estimation[J]. Electrical Engineering, 2012(9):1-4.
- [6] 陈伟根,魏延芹,廖瑞金. 高压断路器运行状态的变权模糊综合评判方法[J]. 高压电器,2009,45(3):73-77.
- CHEN Weigen,WEI Yanqin,LIAO Ruijin. Variable weight fuzzy comprehensive evaluation method for operation condition of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):73-77.
- [7] 张媛,熊小伏,周家启,等. 基于灰色模糊综合评判的断路器维修排序方法[J]. 电网技术,2008,32(8):21-24.
- ZHANG Yuan,XIONG Xiaofu,ZHOU Jiaqi,et al. Research on sequence of maintenance of circuit breakers based on grey fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Technology,2008,32(8):21-24.
- [8] 卜广志,张宇文. 基于灰色模糊关系的灰色模糊综合评判[J]. 系统工程理论与实践,2002(4):141-144.
- BU Guangzhi,ZHANG Yuwen. Grey fuzzy comprehensive evaluation based on the theory of grey fuzzy relation[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2002(4):141-144.
- [9] 赵越,马小波. 高压断路器运行状态模糊综合评估[J]. 山西电力,2011(4):1-4.
- ZHAO Yue,MA Xiaobo. Fuzzy comprehensive evaluation on the operation of high voltage breakers[J]. Shanxi Electric Power,2011(4):1-4.
- [10] 刘建珍,马小波. 试论基于层次分析与熵权法的高压断路器运行状态模糊综合评估[J]. 科技情报开发与经济,2011,21(11):181-183.
- LIU Jianzhen,MA Xiaobo. Discussion on the fuzzy comprehensive evaluation on the operating conditions of high-voltage circuit breaker based on AHP(Analytic Hierarchy Process) and entropy method[J]. Scitech Information Development & Economy, 2011,21(11):181-183.
- [11] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- DENG Xue,LI Jiaming,ZENG Haojian,et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory,2012,42(7):93-100.
- [12] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1998:1-22.
- [13] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001:14-68.
- [14] 吴娅. 基于突变理论的高压断路器运行状态模糊综合评估方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- WU Ya. Study of the condition fuzzy evaluation method for high voltage circuit breakers with catastrophe theory[D]. Chongqing: Chongqing University,2006.
- [15] 余琼芳. 模糊数学中隶属函数的构造策略[J]. 漯河职业技术学院学报,2003,2(1):12-13.
- YU Qiongfang. The constructing policy of membership function in fuzzy mathematics [J]. Journal of Luohe Vocational and Technical College,2003,2(1):12-13.
- [16] 张海龙. 基于模糊数学与灰色理论的高压断路器运行状态评估研究[D]. 太原:太原理工大学,2010.
- ZHANG Hailong. Based on fuzzy mathematics and grey theory of high voltage circuit breaker operation condition assessment study[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2010.

#### 作者简介:



国连玉

国连玉(1988—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为高压断路器的在线监测与状态维修(**E-mail**:laogui1234@163.com);

李可军(1972—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,通讯作者,主要研究方向为柔性交、直流输配电技术和输变电设备状态检修(**E-mail**:lkjun@sdu.edu.cn);

梁永亮(1987—),男,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向为变压器在线监测与故障诊断;

孙立军(1988—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为基于电压源换流器的多端直流输电技术的控制与应用。

## HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation

GUO Lianyu,LI Kejun,LIANG Yongliang,SUN Lijun

(School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**Abstract:** As the factors of HV(High Voltage) circuit breaker state assessment are fuzzy and gray,the gray-fuzzy theory is applied to it. A hierarchical evaluation model considering the operational mechanism is established based on a pilot project of HV circuit breaker. The weight set of each assessment factor at different levels is composed of fuzzy part and gray part. Its fuzzy part is calculated based on the AHP (Analytic Hierarchy Process) and its gray part is determined based on the redundancy degree of information and the experiences of experts. The fuzzy relation between assessment factor and state grade is described by the membership degree to combine qualitative analysis and quantitative analysis. The incredibility of fuzzy relation is described by the pixel gray scale to establish the gray fuzzy discrimination matrix for the comprehensive assessment of HV circuit breaker state. The practical calculation example shows that the proposed model can objectively and effectively assess the state of HV circuit breakers.

**Key words:** electric circuit breakers; state assessment; fuzzyness; gray-fuzzy theory; hierarchical evaluation; analytic hierarchy process; models; membership functions