

# 基于改进模糊层次分析法的 SF<sub>6</sub> 断路器状态评估

王军霞<sup>1</sup> 张彼德<sup>1</sup>, 赵金龙<sup>2</sup>, 凌骁州<sup>1</sup> 邹江平<sup>1</sup>

(1. 西华大学 四川 成都 610039; 2. 成都电业局 四川 成都 610000)

**摘要:** 准确了解和评估高压断路器运行状态,对节约检修成本和提高系统运行的经济效益,都具有重要意义。针对以往评估方法中评估参数只局限于某一种特性,缺乏系统性和综合性,确定指标权重主观臆断,缺乏科学准确性,提出了基于模糊层次分析法确定参数权重的综合状态评估的方法,从电气、机械等方面综合建立状态评估体系,为改善人的判断模糊性,采用引进三角模糊数的改进模糊层次分析法确定评估指标权重,结合指标权重与评判矩阵进行模糊运算得到高压断路器的综合运行状态。并以 SF<sub>6</sub> 高压断路器为例验证了该方法的有效性。

**关键词:** SF<sub>6</sub> 高压断路器; 三角模糊数; 模糊层次分析法; 状态评估

**Abstract:** It is a vital significance for saving inspection cost and improving economic benefits of system operation by accurately comprehending and evaluating the status of HV circuit breaker. Aiming at the former parameter evaluation methods which are confined only to a particular characteristic and lack of systematicness, comprehensiveness and scientific accuracy by subjectively assuming and determining the target weight, the integrated condition assessment method is proposed to determine the weight based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), and the integrated condition assessment system is established electrically and mechanically. In order to improve the fuzzy judgment of human beings, the improved fuzzy analytic hierarchy process is adopted to determine and evaluate the target weight by importing the triangular fuzzy number, and the comprehensive operational condition of HV circuit breaker is obtained by fuzzy calculation combining with target weight and judgment matrix. Taking SF<sub>6</sub> HV circuit breaker for example, the effectiveness of the proposed method is verified.

**Key words:** SF<sub>6</sub> HV circuit breaker; triangular fuzzy number; fuzzy analytic hierarchy process; condition assessment

中图分类号: TM561 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0005-06

## 0 引言

断路器是电力系统中的重要设备之一,它的检修是目前检修工作的重点内容。随着国家电网公司对输变电状态检修工作的推进,如何在保障系统安全运行的工作前提下,更科学地评估判断高压断路器的运行状态,有针对性地开展检修工作,理性更换断路器,对节约检修成本和提高系统运行的经济效益,都具有重要意义。

中国的状态检修起步较晚,现有的评估方法还不够完善,主要存在着对断路器的监测只局限于机械、电气或某一种特性,缺乏系统性和综合性;在高压断路器评价指标权重确定方面大多采用主观赋值法,主观臆断性太强缺乏科学准确性<sup>[1-2]</sup>,鉴于以上两方面的主要不足,综合运用运行参数(机械、电气)、

基金项目: 西华大学省级重点实验室开放研究基金资助(SZJJ2009-015); 西华大学流体及动力机械省部共建教育部重点实验室资助(SBZDPY-11-13,14); 西华大学研究生创新基金资助(YCJJ201163)

绝缘介质、相对电磨损、工作环境和其他方面的参数建立评估体系;为改善主观赋值的随意性和人的判断模糊性,采用引进三角模糊数的模糊层次分析法确定高压断路器状态评估指标的权重,从而使高压断路器的状态评判更科学合理。

## 1 高压断路器状态评估指标体系的建立

根据断路器多年运行经验及故障统计,参看国内外一些监控系统的运行分析,目前能监、检、测量体现断路器状态的数据并不多,主要包括预防性试验、在线监测数据、运行检修记录等(大致有分闸时间、分闸位置、分闸电流、分闸电压、振动信号、动态电阻、开断电流、行程曲线、气体的湿度、密度、泄露等几大类)。除此之外,工作环境、生产厂家、外观情况等也包含着断路器运行状态的重要信息,需依照一定的标准考察与判断<sup>[3-7]</sup>。

据国内外对 63 kV、110 kV 及以上高压 SF<sub>6</sub> 断

路器运行事故及故障调查及统计,表明主要故障有:拒动、误动事故、绝缘事故、开断事故和载流事故。其中绝缘事故占41.7%,拒动及开断关合事故占25%,误动事故占22.2%,载流事故占2.8%,其他占8.3%。按故障发生部位,机械部分为49.47%,处于工作电压的元部件占23.13%,电气控制及辅助回路部分占21.55%,其他占5.85%<sup>[8-10]</sup>。就以上主要故障类型结合目前能监、检、测量体现断路器状态的数据和高压断路器多年的运行记录、检修记录,遵循可行性、时效性和定量与定性相结合的原则,建立多层次评估指标体系(见图1)。

## 2 建立基于模糊层次法的 SF<sub>6</sub> 高压断路器运行状态的综合评估模型

### 2.1 建立评估对象的因素集

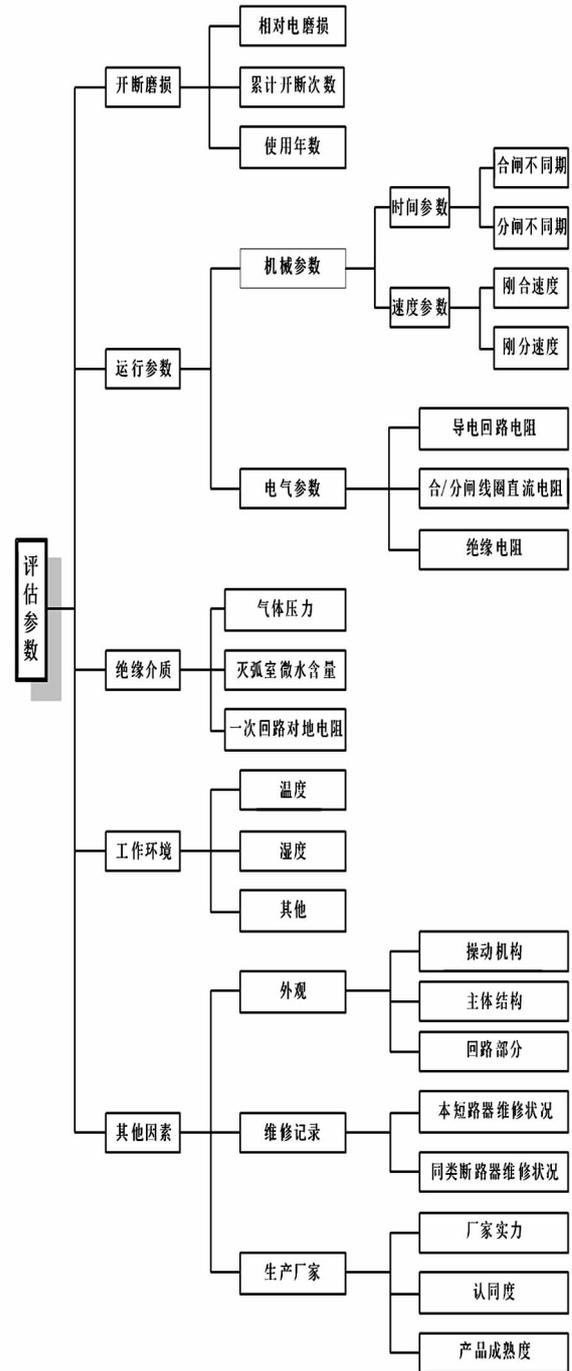
由于电网运行复杂多变,影响高压断路器状态的因素众多,根据多年实际运行维护的经验,将图1的评估体系分成5个主要的评判项目,再根据各个评判项目的自身特点,把各个评判项目分解为下一级的子项目层,子项目层再分解成能够更全面地体现断路器的综合运行状态的评判指标,从而使对断路器评估全面、系统、科学准确。

### 2.2 确立各评判指标的权重

众所周知,对于复杂的多目标系统进行评估,所选的评估指标越多,建立的评估体系层次也更深,规模也就越大,那么权重就很难确定,即便能确定,也很难通过判断一致性,影响评估结果可靠性和科学性。层次分析法是把定性方法与定量方法有机地结合起来,使复杂的系统分解,通过两两比较确定同一层次元素相对上一层次某相关指标的相对重要性权重。但以往的层次法在确定权重构造两两判断矩阵时多采用1~9来说明其相对重要程度(1、3、5、7、9来表示同等重要、稍微重要、重要、明显重要和非常重要;2、4、6、8表示中间值),没有考虑人判断的随意性和模糊性,主观臆断性太强缺乏科学准确性;引进三角模糊数来确定评估指标的权重,能有效提高在构造两两判断矩阵时人的判断模糊性,从而使评估结果更科学,该方法将在下面详细讲述。

### 2.3 隶属度函数的确立

隶属度函数的确定过程,目前还没有一套成熟有效的方法,对于开断磨损、机械试验、电气试验、气



体泄漏试验等可以量化的评估指标,选用典型降半岭分布函数。

对于像工作环境、维修记录、生产厂家、外观情况等其他定性描述的数据,采用模糊统计实验法的专家评定法<sup>[11]</sup>:制作专家打分表,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,再通过多位专家调查表的总汇,得到各个因素对应等级的频数,经过归一处理,即可得到各个因素对应等级的隶属度。这种方法虽然带有一定的主观性,但

是却反映了大量的经验积累。

$$\text{因素的隶属度 } r_{ij} = \frac{\text{认为因素 } i \text{ 属于第 } j \text{ 评语的人数}}{\text{参加评定的总人数}}$$

### 2.4 建立评语集

当评判因素确定后,还要将因素分成等级,等级的划分不宜太多也不宜太少。根据高压断路器状态评价导则,将各因素评语统一设为{“良好”(v<sub>1</sub>)、“正常”(v<sub>2</sub>)、“注意”(v<sub>3</sub>)、“异常”(v<sub>4</sub>)} 4个等级<sup>[12]</sup>,对应的隶属函数如下。

第一级隶属函数式为

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_2 - a_1)} \left( \frac{x - a_1 + a_2}{2} \right) \right] & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0 & x \geq a_2 \end{cases}$$

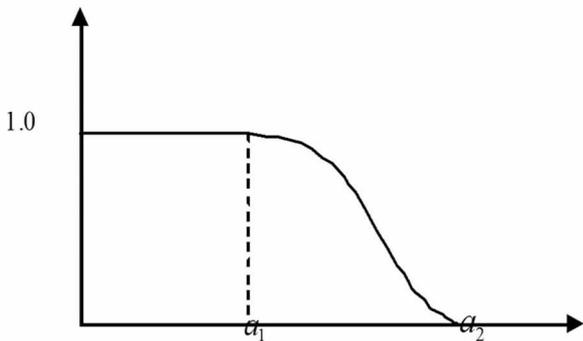


图2 第一级隶属函数图

第二级隶属函数式为

$$r_{i2} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_4 - a_3)} \left( \frac{a_3 + a_4}{2} - x \right) \right] & a_3 \leq x < a_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_5 - a_4)} \left( x - \frac{a_4 + a_5}{2} \right) \right] & a_4 \leq x < a_5 \\ 0 & x \leq a_5, x < a_3 \end{cases}$$

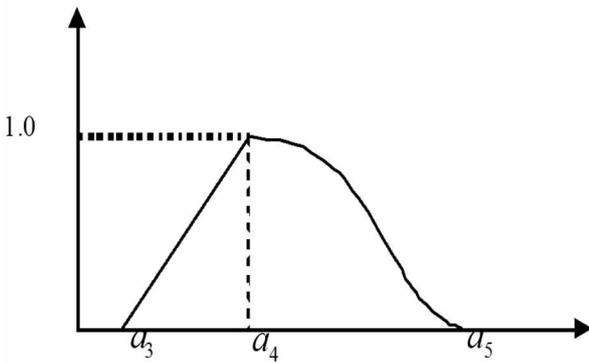


图3 第二级隶属函数

第三级隶属函数式为

$$r_{i3} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_7 - a_6)} \left( \frac{a_6 + a_7}{2} - x \right) \right] & a_6 \leq x < a_7 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_8 - a_7)} \left( x - \frac{a_7 + a_8}{2} \right) \right] & a_7 \leq x < a_8 \\ 0 & x \geq a_8, x < a_6 \end{cases}$$

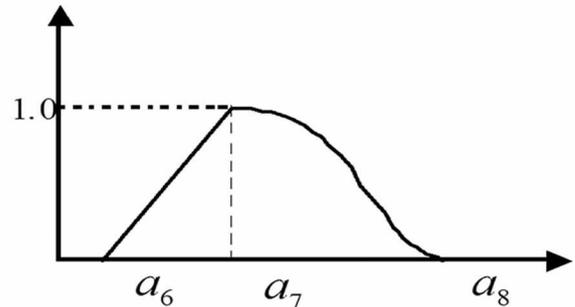


图4 第三级隶属函数图

第四级隶属函数式为

$$r_{i4} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{\pi}{(a_{10} - a_9)} \left( \frac{a_9 + a_{10}}{2} - x \right) \right] & a_9 \leq x < a_{10} \\ 1 & a_{10} \leq x < a_{11} \\ 0 & x \geq a_{11}, x < a_9 \end{cases}$$

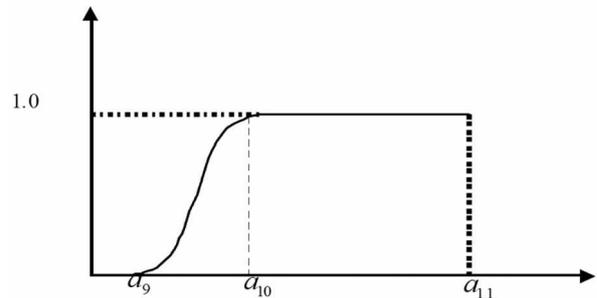


图5 第四级隶属函数图

### 2.5 采用模糊算子进行模糊综合评估

由于影响断路器的因素众多,采用适合系统综合评估的模糊综合评判。其模型如下。

$$\bar{U} = \bar{B}_i = \bar{A}_i \cdot \bar{R}_i = \bar{A}_i \cdot \begin{vmatrix} \bar{A}_{i1} \cdot \bar{R}_{i1} \\ \bar{A}_{ij} \cdot \bar{R}_{ij} \end{vmatrix}$$

式中  $\bar{B}_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$  代表第一级模糊评判集合;  $\bar{A}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$  和  $\bar{A}_{ij} = (\bar{A}_{ij1}, \dots, \bar{A}_{ijl})$  分别为相应的权重集合;  $\bar{R}_{ij}$  代表划分因素的模糊关系矩阵; “ $\cdot$ ” 表示模糊运算,从原则上讲有无穷多种,这里采用加权平均型简称为  $M(+, \cdot)$ , 定义为  $b_j = \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{ij}$ , 这种运算既考虑了主要因素的影响,又考虑了非主要因素的影响,适合于系统综合指标的评判<sup>[13,14]</sup>。运算结果按照最大隶属度原则选择最大的  $b_j$  所对应的评价  $v_j$  作为综合评判的结果。

### 3 引进三角模糊数的模糊层次分析法 (FAHP) 确定权重<sup>[15-17]</sup>

荷兰学者 F. J. M. Van Laarhoven 和 W. Pedrycz 提出了用三角 Fuzzy 数表示 Fuzzy 比较判断的方法。

定义: 设论域  $R$  上的 Fuzzy 数  $M$  如果  $M$  的隶属度函数  $\mu_M: R \rightarrow [0, 1]$  表示为式 (1) 形式。式中  $1 \leq m \leq u$ ,  $l$  和  $u$  表示  $M$  的下界和上界值。 $m$  为  $M$  的隶属度为 1 的中值。一般三角 Fuzzy 数  $M$  表示为  $(l, m, u)$ 。

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{1}{m-x}x - \frac{1}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{1}{m-u}x - \frac{u}{m-u} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (-\infty, l) \cup [u, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

在指标评价的两两比较矩阵中,为了考虑人的模糊性,三角模糊数  $M_1, M_3, M_5, M_7, M_9$  被用来代表传统的 1, 3, 5, 7, 9 (如表 1), 特别是对于同一评估子项目层有 3 个及以上的评估指标时,大大降低了权重确定的主观随意性,从而提高评估的准确性。

表 1 两两评价指标相对权重

评价指标 A 和 B 的相对权重	定义	说明
$M_1$	同等重要	A, B 对目标具有同样的贡献
$M_3$	稍微重要	A 比 B 稍微重要
$M_5$	重要	A 比 B 重要
$M_7$	明显重要	A 比 B 明显重要
$M_9$	非常重要	A 比 B 非常重要

以开断磨损评估项目的相对电磨损  $C_1$ 、开断次数  $C_2$ 、使用年数  $C_3$  指标为例,以往层次分析法在确定权重,构造两两判断矩阵如下。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 6 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{6} & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

用几何平均法取权向量,归一化得到权重向量为  $A_{\text{开断磨损}} = (0.7, 0.2, 0.1)$ 。

引进三角模糊数的模糊层次分析法,构造两两判断矩阵如下。

$$A = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_4 & M_1 & M_5 \\ M_6 & M_7 & M_1 \end{bmatrix}$$

其中  $M_x$  为三角模糊数,根据三角 Fuzzy 数  $M$  的定义,结合对相对电磨损  $C_1$ 、开断次数  $C_2$ 、使用年数  $C_3$  的模糊评价矩阵(如表 2)。

表 2 模糊评价矩阵

	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$C_1$	(1, 1, 1)	(1, 2, 3) (2, 3, 4) (1, 2, 3)	(1, 1, 2) (1, 2, 3) (1, 2, 3)
$C_2$	(1/3, 1/2, 1/1) (1/4, 1/3, 1/2) (1/3, 1/2, 1/1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 2) (1, 2, 3) (1, 1, 2)
$C_3$	(1/2, 1/1, 1/1) (1/3, 1/2, 1/1) (1/3, 1/2, 1/1)	(1/2, 1/1, 1/1) (1/3, 1/2, 1/1) (1/2, 1/1, 1/1)	(1, 1, 1) (1, 1, 1) (1, 1, 1)

根据计算第  $K$  层元素  $i$  的综合模糊值  $D_i^k$  (初始权重),计算公式为

$$D_i^k = \sum_{j=1}^n a_{ij}^k \div \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^k \right) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

去模糊化公式,定义  $1: M_1(l_1, m_1, \mu_1)$  和  $M_2(l_2, m_2, \mu_2)$  是三角模糊数,  $M_1 \geq M_2$  的可能度用三角模糊函数为式 (3):

$$v(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)} & m_1 \leq m_2, \mu_1 > l_2 \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

计算得到如下模糊判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (1.33, 2.33, 3.33) & (1, 1.67, 2.67) \\ (0.31, 0.44, 0.83) & (1, 1, 1) & (1, 1.33, 2.33) \\ (0.38, 0.67, 1) & (0.44, 0.83, 1) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

去模糊化、归一化最终得到的权重向量为

$$A_{\text{开断磨损}} = (0.51, 0.30, 0.19)$$

通过大量实际运行、检修及更换断路器的数据检测,结合相关专家分析,运用三角模糊数得到的全向量更加符合实际运行情况,能更好地避免人的判断主观随意性,从而避免因某个人的主观随意性而影响评估结果的正确性和科学性。

### 4 实例分析

(1) 开关型号 LW-35 额定电压 35 kV 额定开断

电流 31.5 kA 额定电流 2 000 A 工频耐受电压 95 kV , 额定热稳定电流 31.5 kA 机械寿命 3 000 次 , 气体报警压力 0.42 MPa , 刚分速度  $3.4 \pm 0.8$  m/s , 刚合速度  $3.2 \pm 0.2$  m/s , 气体重量 8 kg , 生产厂家为西安高压开关厂。该断路器投运 7 年 , 累计开断 98 次 , 最近一次预防性试验合闸不同期为 1.3 ms , 分闸不同期为 0.5 ms , 导电回路电阻为  $45 \mu\Omega$  , 刚分速度为 3.5 m/s 刚合速度为 3.3 m/s , 绝缘介质中气体压力为 0.487 MPa , 湿度为  $163 \times 10^{-6}$  , 绝缘电阻为 17 G $\Omega$  , 分/合闸线圈直流电阻为 102  $\Omega$ 。

根据以上信息 , 采用普通模糊层次分析法 , 得到各项目层的权重为

$$A_{\text{开断磨损}} = (0.758 \ 0.112 \ 0.130)$$

$$A_{\text{运行参数}} = (0.55 \ 0.45)$$

$$A_{\text{绝缘介质}} = (0.309 \ 0.582 \ 0.109)$$

$$A_{\text{工作环境}} = (0.5 \ 0.27 \ 0.23)$$

$$A_{\text{其他因素}} = (0.4 \ 0.4 \ 0.2)$$

而用引入三角模糊数的模糊层次分析法得到各项目层的权重为

$$A_{\text{开断磨损}} = (0.51 \ 0.3 \ 0.19)$$

$$A_{\text{运行参数}} = (0.62 \ 0.38)$$

$$A_{\text{绝缘介质}} = (0.557 \ 0.310 \ 0.133)$$

$$A_{\text{工作环境}} = (0.432 \ 0.332 \ 0.236)$$

$$A_{\text{其他因素}} = (0.435 \ 0.338 \ 0.227)$$

表3 开断磨损隶属度函数

		相对电磨损	
良好	$u(x) = \begin{cases} 1 & x < 0.1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{3}(10x - 2.5)] & 0.1 \leq x < 0.4 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$	$x < 0.1$	
		$0.1 \leq x < 0.4$	
正常	$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{2}(2 - 10x)] & 0.1 \leq x \leq 0.3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{2}(10x - 4)] & 0.3 \leq x < 0.5 \\ 0 & x \geq 0.5 \end{cases}$	$0.1 \leq x \leq 0.3$	
		$0.3 \leq x < 0.5$	
		$x \geq 0.5$	$x < 0.1$
注意	$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{2}(4 - 10x)] & 0.3 \leq x < 0.5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{3}(10x - 6.5)] & 0.5 \leq x < 0.8 \\ 0 & x \geq 0.8 \end{cases}$	$0.3 \leq x < 0.5$	
		$0.5 \leq x < 0.8$	
		$x \geq 0.8$	$x < 0.3$
异常	$u(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{3}(7.5 - 10x)] & 0.6 \leq x < 0.9 \\ 1 & 0.9 \leq x < 1.0 \\ 0 & x \geq 1.0 \end{cases}$	$0.6 \leq x < 0.9$	
		$0.9 \leq x < 1.0$	
		$x \geq 1.0$	$x < 0.6$

以开断磨损评估项目为例 , 确定各可量化指标参数的隶属函数 , 根据相对电磨损概念和  $N_1 - I_c$  曲线 , 求得任意开断电流  $I_c$  的对应开断次数  $N_1$  , 则对应的单次开断的相对电磨损为  $1/N_1$  (定义为  $Q_m$ ) ,

于是可以求得开断  $m$  次的总的相对电磨损为  $\sum Q_m$  。 相对电磨损为  $f(x) = \sum Q_m$  , 因为  $\sum Q_m$  为 0 ~ 1 之间的数 , 直接作为隶属函数  $x$  值。一般来说 , 高压断路器的累计动作次数为 3 000 次 , 所以将其转换函数设为  $f(x) = \frac{x}{3\ 000}$  , 将此函数值作为隶属函数中  $x$  的值。对于规定使用年数为  $M$  年的断路器 , 将其转换函数设为  $f(x) = (\frac{x}{M})^2$  , 同样将此函数值作为隶属函数中  $x$  的值。根据实际运行经验和参考有关标准 , 得到相应评估参数的隶属度函数<sup>[18, 19]</sup>。

计算得到开断磨损的评判矩阵如下。

$$R_{\text{开断磨损}} = \begin{bmatrix} 0.997 & 0.006 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合用层次分析法得到的权重 , 该项目的评估结果为

$$B_{\text{开断磨损}} = A_{\text{开断磨损}} \cdot R_{\text{开断磨损}}$$

$$= (0.998 \ 0.05 \ 0 \ 0)$$

同理可得到其他项目的评估结果为

$$B_{\text{运行参数}} = (0.521 \ 0.501 \ 0.027 \ 0.007)$$

$$B_{\text{绝缘介质}} = (0.637 \ 0.045 \ 0.32 \ 0)$$

$$B_{\text{工作环境}} = (0.4 \ 0.25 \ 0.28 \ 0.07)$$

$$B_{\text{其他因素}} = (0.623 \ 0.304 \ 0.054 \ 0.01)$$

从而得到整个断路器的评估结果为

$$U_{\text{断路器}} = A_{\text{断路器}} \cdot R_{\text{断路器}}$$

$$= (0.78 \ 0.21 \ 0.045 \ 0.003)$$

结合引进三角模糊数得到的权重 , 各项目的评估结果为

$$B_{\text{开断磨损}} = (0.9 \ 0.09 \ 0 \ 0)$$

$$B_{\text{运行参数}} = (0.577 \ 0.338 \ 0.198 \ 0.004)$$

$$B_{\text{绝缘介质}} = (0.399 \ 0.827 \ 0.012 \ 0)$$

$$B_{\text{工作环境}} = (0.49 \ 0.25 \ 0.138 \ 0.122)$$

$$B_{\text{其他因素}} = (0.479 \ 0.357 \ 0.164 \ 0)$$

从而得到整个断路器的评估结果为

$$U_{\text{断路器}} = A_{\text{断路器}} \cdot R_{\text{断路器}}$$

$$(0.25 \ 0.275 \ 0.232 \ 0.167 \ 0.076) \begin{pmatrix} 0.998 & 0.003 & 0 & 0 \\ 0.557 & 0.338 & 0.198 & 0.004 \\ 0.399 & 0.827 & 0.012 & 0 \\ 0.49 & 0.25 & 0.138 & 0.122 \\ 0.479 & 0.367 & 0.164 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.613 \ 0.354 \ 0.093 \ 0.02)$$

根据最大隶属度原则 , 结合评判语 , 虽然两种评

估方法的评估结果,均为该断路器处于“良好”状态,但运用后者的评估结果更加能说明该断路器虽处于“良好”状态,但有些数据已偏离出厂值或最优值,该断路器的整体可靠性呈下降趋势,在今后的运行巡视工作中应注意,有发生故障的可能性。

(2) 开关型号 LW-35 额定电压 35 kV, 额定开断电流 31.5 kA, 额定电流 2 000 A, 工频耐受电压 95 kV, 额定热稳定电流 31.5 kA, 机械寿命 3 000 次, 气体报警压力 0.42 MPa, 刚分速度  $3.4 \pm 0.8$  m/s, 刚合速度  $3.2 \pm 0.2$  m/s, 气体重量 8 kg, 生产厂家为西安高压开关厂。已知其投运 11 年, 累计开断 363 次, 最近一次预防性试验合/分闸不同期分别为 1.6 ms 和 0.9 ms, 导电回路电阻为  $98 \mu\Omega$ , 刚分速度均为 3.1 m/s, 绝缘介质中气体压力为 0.487 MPa, 湿度为  $163 \times 10^{-6}$ , 绝缘电阻为 17 G $\Omega$ , 分/合闸线圈直流电阻为 215  $\Omega$ 。

运用一般层次分析法 (计算过程不再详细列举) 得到整个断路器的评估结果是

$$U_{\text{断路器}} = (0.25 \quad 0.46 \quad 0.2 \quad 0.09)$$

根据最大隶属度原则, 判断该断路器处于“正常”状态。而运用引入三角模糊数的模糊层次法, 得到的评估结果是

$$U_{\text{断路器}} = (0.27 \quad 0.29 \quad 0.42 \quad 0.037)$$

根据最大隶属度原则, 判断该断路器处于“注意”状态。两种评估结果不同, 对于运行巡视人员安排巡视工作就有差异, 前一种评判该断路器处于“正常”状态, 运行维护人员只要正常巡视即可; 而用引进三角模糊数评判该断路器处于“注意”状态, 则要求巡视人员对该断路器重点巡视, 缩短巡视周期, 做好重点巡视记录; 该评估结果与断路器实际运行中分闸时出现铁心卡涩、导致操作时拒分的运行情况吻合, 对巡视工作安排提供了正确的指导依据。

(3) 某开关额定电压 550 kV, 额定开断电流 50/63 kA, 额定电流 4 000 A, 机械寿命 3 000 次, 合闸时间 80 ms, 分闸时间 30 ms, 报警压力 0.64 MPa, 该断路器投运 4 年, 累计开断 126 次, 最近一次预防性试验合闸不同期为 0.6 ms, 分闸不同期为 0.5 ms, 导电回路电阻为  $73 \mu\Omega$ , 刚分速度为 4.0 m/s, 刚合速度为 3.1 m/s, 绝缘介质中气体压力为 0.68 MPa, 微水含量为 48  $\mu\text{L/L}$ , 合闸时间为 60 ms, 分闸时间为 15 ms。

运用一般层次分析法 (计算过程不再详细列举) 得到整个断路器的评估结果是

$$U_{\text{断路器}} = (0.65 \quad 0.26 \quad 0.09 \quad 0.01)$$

根据最大隶属度原则, 判断该断路器处于“良好”状态。而运用引入三角模糊数的模糊层次法, 得到的评估结果是

$$U_{\text{断路器}} = (0.19 \quad 0.36 \quad 0.38 \quad 0.09)$$

根据最大隶属度原则, 判断该断路器处于“注意”状态。该评估结果与断路器实际虽投运 4 年, 但由于其多次受外力破坏, 贮压筒活塞杆密封圈处出现漏油, 出现过打压频繁的运行情况更加吻合; 实际工作中已加强对该断路器的重点巡视, 并计划合理安排时间检修, 更换密封圈。

## 5 结 论

结合高压断路器的实际运行状况, 针对以往状态评估在评估参数选取和评估指标权重确定方面的主观随意性, 确立了以高压断路器开断磨损、运行参数 (机械参数、电气参数)、绝缘参数、工作环境及其他参数作为评判指标; 提出采用引进三角模糊数的模糊层次分析法和模糊综合评判相结合的方法, 对断路器整体运行状态进行评估的方法, 并通过对大量不同电压等级、不同运行状态断路器的评估以及和以往评判方法评判结果的对比, 验证了该方法的有效性。

### 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] 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.
- [3] 刘亚芳. 国内外高压 SF<sub>6</sub> 断路器运行状况及维修策略综述 [J]. 电力设备, 2003, 3(1): 26 - 29.
- [4] Heising C. R. . Worldwide Reliability Survey of High Voltage Circuit Breakers [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1996(3): 65 - 66.
- [5] Solver C. E. , Holgersson P. . Modular SF<sub>6</sub> Circuit Breaker for Modern HV Substations [J]. Power System Technology, 1998, 8: 176 - 180.
- [6] Yanabu S. , Zaima E. , Hasegawa T. . Recent Development of High Voltage Circuit Breaker for High Voltage Power Transmission and Distribution System [J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 (10): 1438 - 1443.

(下转第 23 页)

滤波电感的感应量应和滞环宽度结合起来一起考虑。经过分析,本实验装置中滞环宽度取为0.0005,输出滤波电感为0.008 H。图5中,模型首先建立一个可以给定角频率和相位的参考电流模型,然后利用锁相环从系统电压 $E_3$ 处获取角频率和相位;然后将相同的角频率和相位赋给参考电流 $I_{ref}$ ,运用滞环比较器将参考电流 $I_{ref}$ 和并网电流 $I_a$ 进行幅值的比较,并网电流 $I_a$ 和参考电流 $I_{ref}$ 的比较波形如图6所示。

将 $S_1$ 区域放大,如图7。可以看出,并网电流围绕着参考电流进行上下波动,被限制在环宽上限和环宽下限之间。

等效单相分布式电源并网系统输出功率如图8所示。

采用相同的频率特性进行比较,由图9可以看出,并网电流可以快速稳定地跟踪上参考电流的变化,并网电流相位幅值与电网电压同频同相,满足输出功率因数的设计要求。

经分析,并网电流总谐波失真率(THD)小于5%,满足IEEE 1547-2003中关于分布式电源并网电流电能质量的要求,仿真模型得到验证。

## 6 结 论

利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC建立

了等效单相分布式电源并网系统的仿真模型,包括逆变器、滞环比较器和锁相模块,利用输出的仿真波形,结合之前的分析,验证了模型的正确性。

### 参考文献

- [1] 袁超,吴刚,曾祥君,等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.
- [2] 张志坚,王建东,马进,等. 分布式发电及其关键技术[J]. 山西电力, 2007(2): 57-61.
- [3] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力系统自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
- [4] 崔容强,赵春江,吴达成. 并网型太阳能光伏发电系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [5] Pongpornsup V, EUA - Arporn B. Impacts of Nonutility Induction Generator to Distribution Network[C]. Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Yokohsma (Japan), 2002(2): 1352-1356.
- [6] 崔岩,蔡炳煌,李大勇. 太阳能光伏模板仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 529-834.

作者简介:

刘林(1985),男,硕士研究生,四川省建筑设计院设计三所;

罗剑(1985),男,四川省建筑设计院设计三所。

(收稿日期:2013-01-06)

(上接第10页)

- [7] 曹荣江. 高压交流断路器的运行条件[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999: 24-25.
- [8] 苑舜. 高压开关设备状态检修与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 44-45.
- [9] 刘亚芳. 高压断路器事故调查[J]. 国际电力, 1997(3): 12-15.
- [10] 陈三运,谭洪恩,蒋志刚. 输变电设备的状态检修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 42-57.
- [11] 韩富春,张海龙. 高压断路器运行状态的多级模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 60-64.
- [12] 国家电网公司企业标准 SF<sub>6</sub> 高压断路器状态评价导则[S].
- [13] 陈伟根,李伟. 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(5): 361-363.
- [14] 余琼芳,陈迎松. 模糊数学中隶属函数的构造策略[J]. 河北职业技术学院学报, 2003, 2(1): 12-13.

- [15] 程里春,陈化成. 基于有界算子的三角模糊数运算[J]. 模糊系统与数学, 1993(2): 33-42.
- [16] 唐有文. 模糊层次分析法[J]. 青海大学学报自然科学版, 2002, (3): 19-23.
- [17] 张吉军. 模糊层次分析法 FAHP[J]. 模糊系统与数学, 2000(2): 80-88.
- [18] 田静,林铸明,孙文俊. 模糊层次分析法在渡河决策中的应用[J]. 工兵装备研究, 2007, 26(6).
- [19] 林莘,张冠生. 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(2): 15-18.

作者简介:

王军霞(1980),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电气设备状态评估;

张彼德(1975),男,博士,副教授,研究方向为电气设备状态检修;

赵金龙(1980),男,硕士,成都电业局线路管理专责。

(收稿日期:2013-02-19)