

# 高压试验安全模糊综合评价方法研究

王建<sup>1</sup> 邓慰<sup>2,3</sup> 李炼炼<sup>2,3</sup> 魏伟<sup>1</sup> 秦浩浩<sup>2,3</sup> 马勤勇<sup>1</sup>

(1 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2 南瑞集团有限公司, 南京 211106;  
3 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

**摘要** 电气设备的高压试验大多属于破坏性试验, 容易引起设备故障和人身伤亡. 为了评估实验室高压试验的安全风险, 运用层次分析法和模糊综合评价法, 以试验环境风险因素、试验设备风险因素、人员素质风险因素、现场管理风险因素、应急与事故风险因素为目标层建立安全指标评价体系, 并对新疆某高压实验室高压试验安全风险进行了相应的定量计算. 计算结果表明: 建立的三层评价体系, 经过一致性校验,  $CR$  值均小于 0.1, 即证明所确定的目标层和准则层各影响因素权重是合理的; 监护制度管理和应急准备评分值最低, 说明该高压实验室高压试验安全体系中监管体制不够严格, 同时安全风险的应急准备不充分; 高压试验安全等级综合评价最终的综合评价值为 0.7181, 表明该高压实验室安全风险管控处于安全的状态. 该评价方法可为电力行业高压实验室高压试验安全管理提供参考.

**关键词** 高压试验; 安全评价; 层次分析法; 模糊综合评价法; 一致性检验

**中图分类号** TM726 **文献标识码** A **文章编号** 1672-4321(2018)04-0095-05

## Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Safety of High Voltage Test

Wang Jian<sup>1</sup>, Deng Wei<sup>2,3</sup>, Li Lianlian<sup>2,3</sup>, Wei Wei<sup>1</sup>, Qin Haohao<sup>2,3</sup>, Ma Qinyong<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Institute of Science, State Grid Electric Power Company, Urumqi 830011, China; 2. NARI Group Corporation Ltd. Nanjing 211106, China; 3. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract** The high voltage test of electrical equipment is mostly destructive testing, which can easily lead to equipment failure and personal injury. In order to evaluate the safety risk of high-voltage test in laboratory, analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method are used. The safety index evaluation system was established based on the test environment risk factors, test equipment risk factors, personnel quality risk factors, site management risk factors, emergency and accident risk factors. The safety risk of high voltage test in a high voltage laboratory in Xinjiang was quantitatively calculated. The calculation results show that: the three-layer evaluation system is established, and the CR value is all less than 0.1 by the consistency check. It is reasonable to prove the influence factors of the target layer and criterion layer; the monitoring system management and emergency preparedness score are the lowest, which indicates that the supervision system in the high voltage test safety system of the high voltage laboratory is not strict enough. Meanwhile, the emergency preparedness for security risks is inadequate; the overall evaluation value of the comprehensive evaluation in the high voltage test safety grade is 0.7181, which indicates that the safety risk control of the high voltage laboratory is in a safe state. The evaluation method can provide reference for the high voltage test safety management in the power industry.

**Keywords** high voltage test; safety evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method; consistency check

电力系统由众多电气设备构成, 其中高压电气设备的稳定运行是保障整个系统可靠运行的关键.

高压试验是防患于未然, 保证电力系统安全、经济运行的重要措施之一. 大部分高压试验针对电气设备

收稿日期 2018-06-14

作者简介 王建(1986-) 男, 高级工程师, 研究方向: 高电压与绝缘技术, E-mail: yaowang360@613.com

基金项目 国网新疆电力有限公司资助项目(SGXJDK00PJJS1700104)

进行破坏性试验验证,其工作较为特殊,容易造成非常恶劣的安全事故,造成人身安全以及国家财产损失<sup>[1,2]</sup>。由于高压试验的特殊性、复杂性和不确定性,量化其风险存在一定的困难,目前国内主要采用定性分析方法对其风险进行评估,然后采取制度措施来加强安全管理,如国家电网公司制定了《电力安全工作规程》来加强高压试验的安全性,而对高压试验安全评价的研究较少<sup>[3]</sup>。

对于安全综合的评价方法,常用的方法主要有事故树分析、安全检查表、预先危险性分析等<sup>[4-6]</sup>。应用较多的是层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation method, FCEM),两者相结合可运用于高压试验的安全性定性和定量分析<sup>[7,8]</sup>。

针对高压试验存在模拟气象环境的极性端、不同设备自身电压差异性等因素,例如图 1 所示的模拟输电线路绝缘子覆冰闪络试验,本文采用层次分析法和模糊综合评价法对新疆某高压实验室高压试验的安全状况进行了评估。

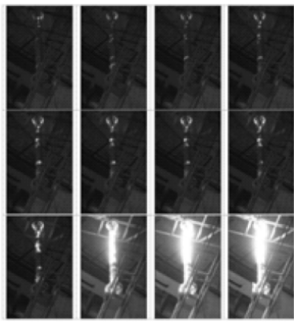


图 1 高压绝缘子覆冰闪络试验

Fig.1 Ice flashover test of high voltage insulator

建立了包括人员素质、试验设备、试验环境、应急与事故处理、现场管理等高压试验安全评价指标体系,在高压试验安全评价指标体系的基础上,进行了相应的定量分析,分析了高压试验的危险因素,确定了该实验室高压试验的安全风险等级。

## 1 基于层次分析法的高压试验安全综合评价指标体系

### 1.1 建立递阶层次结构模型

(1) 高压试验安全综合评价体系由若干递阶层次因素构成,递阶层次结构通常可分为顶层、中间层和底层。顶层为安全综合评价的结果,中间层被分解成为试验环境风险因素、试验设备风险因素、人员素质风险因素、现场管理风险因素、应急与事故风险因素这 5 部分,这一层次的诸因素从属于顶层,同时又按其属性和关系形成底层相邻上一层次的影响因素作为准则,支配下一层次相关元素。

(2) 同一层次的各影响因素基于准则进行相互比较,并定量其重要程度,最终形成判断矩阵。判断矩阵中各元素的取值采用 1~9 标度法确定,主要基于专家评估或者历史数据<sup>[9,10]</sup>。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中的  $a_{ij}$  表示的是第  $i$  个指标与第  $j$  个指标进行比较的值,参照层次分析标度法,如表 1 所示:

表 1 层次分析标度法

Tab.1 Analytic hierarchy process of scaling method

| 意义  | 极不重要                                 | 很不重要 | 不重要 | 略不重要 | 同等重要 | 略微重要 | 重要 | 很重要 | 极重要 |
|-----|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|----|-----|-----|
| 标度值 | 1/9                                  | 1/7  | 1/5 | 1/3  | 1    | 3    | 5  | 7   | 9   |
| 备注  | 取 1/8、1/6、1/4、1/2、2、4、6、8 为上述评价值的中间值 |      |     |      |      |      |    |     |     |

### (3) 进行一致性检验。

为保证判断矩阵的准确性,判断矩阵需进行一致性检验

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2)$$

其中如果  $CI$  值越大,就意味着主观判断的一致性越大, $CI$  值越小(接近于 0),就意味着一致性检验结

果越好,矩阵的构建也就越合理。

$CI$  值的取值范围要求与初始判断矩阵的阶数以及人们对其判断的一致性误差有关,为了实现矩阵的评判标准一致性,进行归一化处理,选择  $RI$  值指标,对于  $n=1, 2, \dots, 9$  的值,平均随机一致性指标如表 2 所示:

表 2 平均随机一致性指标  
Tab.2 Consistency index of average random

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>n</i>  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| <i>RI</i> | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.90 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.46 |

因此, 判断矩阵的一致性指标公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.10, \quad (3)$$

当  $CR < 0.01$  时, 判断矩阵的一致性满足, 其构建是合理的; 否则, 判断矩阵是不科学的.

(4) 分层指标权重确定 运用乘积方根的方法:

$$b_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

再把  $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$  进行归一化,

$$\omega_j = \frac{b_j}{\sum_{k=1}^n b_k} \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

最后, 最大特征值的计算为:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \omega_j}{\omega_i}. \quad (6)$$

## 2 构建高压试验安全体系的综合评价模型

高压试验安全综合评价需要定性与定量相结合, 其中许多评价工作需要借助数学模型和适宜的工具. 模糊综合评价基于等级模糊子集的构造方法, 量化被评事物的模糊指标, 接着基于模糊变换原理对各类指标进行综合评价. 模糊综合评价法充分考虑主观与客观因素, 是一种适用于评价包含相互联系、相互影响的多个因素的系统方法.

### 2.1 高压试验安全体系模糊综合评价的数学模型

建立评价对象因素集合, 设定评估指标集:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\},$$

评价对象因素集合  $U$  就是  $m$  个评价指标的集合. 它由第二层次子集的  $n$  个因素决定, 即:  $U = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}\}$ .

### 2.2 确定权重矩阵

根据每一层次中各高压试验安全综合评价指标的重要程度, 利用层次分析法确定每个因素以相应的权重数, 第一层次、第二层次权重集分别为:

第一层次权重集:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m),$$

第二层次权重集:

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}),$$

其中  $i = 1, 2, \dots, n$ .

### 2.3 一级模糊综合评判

第一层次各因素均由下一层次的子因素决定, 第一层次每一因素的单因素评判基于下一层次的多因素综合评判所得. 第二层次单因素评判矩阵设为  $R_i$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{in1} & r_{in2} & \dots & r_{inp} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$R_i$  矩阵行数由  $U$  中第二层次的因素个数决定, 加权后一级模糊综合评判集  $B_i$  为:

$$B_i = A_i \cdot R_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ip}], \quad (8)$$

其中,  $\cdot$  为模糊算子.

为了实现客观评价高压试验安全体系, 既要考虑所有安全因素, 又要保留单因素的评判信息, 采用模糊算子的表达式为:

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

### 2.4 二级综合评价

(1) 每一个  $U_i$  视为一个元素  $B_i$  作为单因素评判, 又可构成评判矩阵  $R_i$ :

$$B_i = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \dots \\ A_m \cdot R_m \end{bmatrix}. \quad (10)$$

(2) 二级模糊综合评价为:

$$B = A \cdot R_i = A \cdot \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \dots \\ A_m \cdot R_m \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_p). \quad (11)$$

最终通过  $B$  值的取值范围来判断高压试验安全综合的等级, 见表 3.

表 3 高压试验安全风险综合评价指标的评语集

Tab.3 Evaluation of comprehensive evaluation index in safety risk of high voltage test

| 分值         | 程度说明 |
|------------|------|
| ( 0.8 ,1]  | 非常安全 |
| ( 0.6 0.8] | 安全   |
| ( 0.4 0.6] | 一般   |
| ( 0.2 0.4] | 不安全  |
| [0 0.2]    | 很不安全 |

### 3 实例

#### 3.1 构建安全综合评价指标体系

构建新疆某高压实验室高压试验安全综合评价指标层次结构体系,如表 4 所示.

表 4 新疆某高压实验室安全综合评价指标体系

Tab.4 Safety comprehensive evaluation index system of a high voltage laboratory in Xinjiang

| 目标层            | 准则层   |
|----------------|---|
| 试验环境风险因素( B1)  | 环境气压及温、湿度( C11)、屏蔽体屏蔽效能( C12)、接地电阻( C13)、人工模拟环境(覆冰、污秽、淋雨等)( C14)、职业卫生( C15) |
| 现场管理风险因素( B2)  | 工作许可制度管理( C21)、工作票制度管理( C22)、监护制度管理( C23)、检查制度管理( C24)                      |
| 试验设备风险因素( B3)  | 升压设备( C31)、吊装设备( C32)、试验试品( C33)、安全保护装置( C34)                               |
| 人员素质风险因素( B4)  | 安全教育培训( C41)、试验人员生理素质( C42)、试验人员心理素质( C43)、试验人员专业技能( C44)                   |
| 应急与事故风险因素( B5) | 应急准备( C51)、事故报告( C52)、应急响应( C53)、应急保障( C54)、事故调查( C55)                      |

#### 3.2 目标层的指标权重计算

分析各层的影响因素对上一层指标的影响程度建立判断矩阵,按照层次分析法的建模步骤确定每层各影响因素的权重,并检验是否具有-致性.目标层影响因素重要性比较的评判结果见表 5.

表 5 目标层影响因素重要性比较的评判结果

Tab.5 Evaluation result of the comparison of the importance of the influence factors in the target layer

| 目标层指标          | 权重值    | 一致性检验                                   |
|----------------|--------|---|
| 试验环境风险因素( B1)  | 0.2763 | $\lambda_{\max} = 5.25$<br>$CR = 0.055$ |
| 现场管理风险因素( B2)  | 0.2414 |   |
| 试验设备风险因素( B3)  | 0.0896 |   |
| 人员素质风险因素( B4)  | 0.2452 |   |
| 应急与事故风险因素( B5) | 0.1475 |   |

其最大特征值  $\lambda_{\max}$  为 5.25,根据公式得出随机

-致性比值  $CR$  值为 0.055,此矩阵具有满意的一致性,即证明所确定的各因素的权重是合理的.

#### 3.3 准则层的指标权重计算

同理,就准则层的影响因素对于上层目标层的影响程度建立判断矩阵,计算结果见表 6.

表 6 准则层影响因素重要性比较的评判结果

Tab.6 Evaluation result of the comparison of importance in factors influencing the criterion layer

| 准则层指标                   | 权重值    | 一致性检验                                    |
|-------------------------|--------|--|
| 环境气压及温、湿度( C11)         | 0.1225 | $\lambda_{\max} = 5.11$<br>$CR = 0.0246$ |
| 屏蔽体屏蔽效能( C12)           | 0.2065 |  |
| 接地电阻( C13)              | 0.3149 |  |
| 人工模拟环境(覆冰、污秽、淋雨等)( C14) | 0.2468 |  |
| 职业卫生( C15)              | 0.1093 |  |
| 工作许可制度管理( C21)          | 0.2937 | $\lambda_{\max} = 4.24$<br>$CR = 0.089$  |
| 工作票制度管理( C22)           | 0.3894 |  |
| 监护制度管理( C23)            | 0.0924 |  |
| 检查制度管理( C24)            | 0.2245 |  |
| 升压设备( C31)              | 0.2654 | $\lambda_{\max} = 4.08$<br>$CR = 0.029$  |
| 吊装设备( C32)              | 0.2543 |  |
| 试验试品( C33)              | 0.1846 |  |
| 安全保护装置( C34)            | 0.2957 |  |
| 安全教育培训( C41)            | 0.2568 | $\lambda_{\max} = 4.17$<br>$CR = 0.063$  |
| 试验人员生理素质( C42)          | 0.1548 |  |
| 试验人员心理素质( C43)          | 0.3121 |  |
| 试验人员专业技能( C44)          | 0.2763 |  |
| 应急准备( C51)              | 0.1877 | $\lambda_{\max} = 5.24$<br>$CR = 0.0535$ |
| 事故报告( C52)              | 0.2037 |  |
| 应急响应( C53)              | 0.2064 |  |
| 应急保障( C54)              | 0.2065 |  |
| 事故调查( C55)              | 0.1957 |  |

根据表 6 中准则层的最大特征值,代入式 ( 3) 得出随机-致性比值  $CR$  均小于 0.1,这些指标层的矩阵均具有满意的一致性,即证明所确定的准则层各影响因素权重是合理的.

#### 3.4 计算指标评分值

对新疆某高压实验室安全综合评价体系中的具体指标进行评价,主要是根据设计的调查问卷,结合试验安全操作规程以及相关标准,面向测试人员、安全人员、管理人员以及相关专家,采用匿名的形式,进行打分根据公式计算各个指标层的模糊评价结果,如环境气压及温、湿度( C11) 指标的模糊评价结果为:

$$D_{11} = ( 1.0 \ 0.8 \ 0.6 \ 0.4 \ 0.2 ) \begin{pmatrix} 0.12 \\ 0.36 \\ 0.28 \\ 0.25 \\ 0.30 \end{pmatrix} = 0.696.$$

同理可得其他所有指标的模糊评价结果,如表

7 所示.

表7 各指标的模糊评价结果  
Tab.7 Fuzzy evaluation results of each index

| 序号 | 具体指标                    | 模糊评价值  |
|----|-------------------------|--------|
| 1  | 环境气压及温、湿度( C11)         | 0.696  |
| 2  | 屏蔽体屏蔽效能( C12)           | 0.6543 |
| 3  | 接地电阻( C13)              | 0.6342 |
| 4  | 人工模拟环境(覆冰、污秽、淋雨等)( C14) | 0.7321 |
| 5  | 职业卫生( C15)              | 0.6759 |
| 6  | 工作许可制度管理( C21)          | 0.7453 |
| 7  | 工作票制度管理( C22)           | 0.704  |
| 8  | 监护制度管理( C23)            | 0.5121 |
| 9  | 检查制度管理( C24)            | 0.6573 |
| 10 | 升压设备( C31)              | 0.7217 |
| 11 | 吊装设备( C32)              | 0.6740 |
| 12 | 试验试品( C33)              | 0.8129 |
| 13 | 安全保护装置( C34)            | 0.7642 |
| 14 | 安全教育培训( C41)            | 0.6873 |
| 15 | 试验人员生理素质( C42)          | 0.6998 |
| 16 | 试验人员心理素质( C43)          | 0.7015 |
| 17 | 试验人员专业技能( C44)          | 0.6945 |
| 18 | 应急准备( C51)              | 0.5976 |
| 19 | 事故报告( C52)              | 0.7123 |
| 20 | 应急响应( C53)              | 0.6854 |
| 21 | 应急保障( C54)              | 0.7368 |
| 22 | 事故调查( C55)              | 0.7853 |

由表7可知,现场管理风险因素中的监护制度管理和应急与事故风险因素中的应急准备评价值最低,均小于0.6,说明高压试验安全体系中监管体制不够严格,同时安全风险的应急准备不充分,应该加强这两方面管理.

将指标权重值与指标评价值进行矩阵计算,最终的综合评价值为0.7181,由表3可知,该高压试验室高压试验安全风险管控处于安全状态.

## 4 结语

(1) 为评估新疆某高压实验室高压试验的安全状态,采用层次分析法和模糊综合评价法,建立了三层评价体系,经过一致性校验,CR值均小于0.1,即证明所确定的目标层和准则层各影响因素权重是合

理的.

(2) 通过准则层的模糊评价结果知,监护制度管理评价值为0.5121,应急准备评价值为0.5976,是所有二级指标中最低的,说明高压试验安全体系中监管体制不够严格,同时安全风险的应急准备不充分,应该加强这两方面管理.

(3) 进行了高压试验安全综合评价的指标权重计算,最终的综合评价值为0.7181,表明该高压试验室高压试验安全风险管控处于安全的状态.

## 参 考 文 献

- [1] 王 晖,纪 秀,刘建树,等.基于时序特性的配电网运行安全评价研究[J].工业安全与环保,2017,43(12):1-5.
- [2] 曹小龙,曹小虎,吉 玲,等.高压试验工作中应重视的安全问题[J].电力安全技术,2010,12(12):55-57.
- [3] 国家电网公司.供电企业安全综合评估规范[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 欧相林,邓鹤鸣,王力农,等.10kV配电网带电作业安全综合评价应用分析[J].高压电器,2013,49(2):55-60.
- [5] 张 峤,邓贵仕.煤矿作业人员安全心理特性模糊综合评价方法研究[J].工业安全与环保,2015,41(6):69-72.
- [6] 邓鹤鸣,欧相林,胡建勋,等.10kV配网带电作业安全评价方法[J].水电能源科学,2012,30(5):171-173.
- [7] 褚 钰.基于多主体合作的突发水灾害应急管理评估方法研究[J].工业安全与环保,2018,44(3):39-41.
- [8] 徐 星,孙光中,王公忠.基于层次分析法的矿井突水风险模糊综合评价[J].工业安全与环保,2016,42(6):26-29.
- [9] 张树围.220kV输电线路工程施工质量管理综合评价方法研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [10] 张梦雅,龙祖根,唐志鹏.基于改进FAHP模型的煤尘爆炸危险性评价研究[J].工业安全与环保,2017,43(10):47-49.

(责任编辑 雷建云)