

# Status Assessment of Secondary Equipment for Smart Substation Based on Improved Hierarchical Fuzzy Evaluation

Wei Xiong<sup>1</sup>, Xingxing Zeng<sup>2\*</sup>, Youqiang Zhang<sup>1</sup>, Yan He<sup>1</sup>, Jinxin Ouyang<sup>2</sup>, Xiaofu Xiong<sup>2</sup>, Yong Zeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Electric Power Research Institute, State Grid, Chongqing

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: \*[437160047@qq.com](mailto:437160047@qq.com)

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2015; accepted: Mar. 27<sup>th</sup>, 2015; published: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

For smart substation secondary equipments' failure mechanism are complex, uncertain and difficult to be effectively evaluated, a comprehensive evaluation method based on improved analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation is proposed in this paper. On the basis of run maintenance procedures and test specification and taking operating experience, work environment and maintenance records into consideration, this paper establishes the quantitative and qualitative state evaluation index system of secondary equipment and gives the corresponding weight according to the relative importance of each indicator. Through building the scoring model of state indicator by the semi-trapezoidal distribution function and introducing the relative deterioration degree to characterize the membership function of secondary equipment status transformation degree and to establish a hierarchical fuzzy evaluation matrix. Thus, a condition assessment model of smart substation secondary system based on improved analytic hierarchy process and fuzzy synthetic evaluation is established. Example analysis shows that this method is effective and feasible and provides a new way for the health assessment of smart substation secondary system.

## Keywords

Smart Substation, Secondary System, Condition Assessment, Improved Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Synthetic Evaluation

---

\*通讯作者。

# 基于改进层次模糊评判的智能变电站二次系统状态评估

熊伟<sup>1</sup>, 曾星星<sup>2\*</sup>, 张友强<sup>1</sup>, 何燕<sup>1</sup>, 欧阳金鑫<sup>2</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 曾勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆

<sup>2</sup>输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆

Email: [437160047@qq.com](mailto:437160047@qq.com)

收稿日期: 2015年3月15日; 录用日期: 2015年3月27日; 发布日期: 2015年4月3日

## 摘要

针对智能变电站各二次设备故障机理复杂、具有不确定性、难以有效评估的问题, 提出了基于改进层次分析法和模糊评判理论的智能变电站二次系统综合评估方法。以运行检修规程、测试技术规范为基础, 综合考虑运行经验、工作环境和检修记录, 建立二次设备状态定量和定性评估指标体系, 并根据各指标的相对重要性赋予相应权重; 通过半梯形分布函数构建状态指标评分模型, 并引入相对劣化度来表征二次设备状态转化程度的隶属函数, 进而建立层次模糊评判矩阵; 由此, 建立基于改进层次模糊评判的智能变电站二次系统状态评估模型。实例分析表明该方法有效可行, 为智能变电站二次系统健康状态评估提供了新的思路。

## 关键词

智能变电站, 二次系统, 状态评估, 改进层次分析法, 模糊评判

## 1. 引言

智能变电站作为智能电网的支撑, 其二次设备的安全可靠运行是保障整个电力系统稳定性的重要条件。随着电网结构日益复杂, 智能变电站某些重要电气设备经常在极限值附近运行[1], 致使二次设备故障概率大大增加, 从而严重影响电网的安全性和稳定性。因此, 加强智能变电站二次设备状态监测和评估, 提高其运行可靠性成为电力部门关注的重要问题。

目前在二次系统实际运行维护中, 采用二次设备定期检修制度, 对保证系统安全起到积极作用, 但也存在诸如二次设备健康状态不明确、故障位置或原因不清晰等弊端[2], 同时造成了不必要的人力物力资源浪费。而状态检修[3] [4]可以降低检修成本, 减少停电时间, 成为当今世界电气设备检修研究的发展方向。状态评估是状态检修的基础, 如何对智能变电站二次设备运行状态进行有效的评估, 是一热门的研究方向。但是, 目前对智能变电站二次系统状态评价研究还处于起步阶段, 主要集中于继电保护的状态监测和评估方面[5]-[7], 专家学者研究较多的是通过专家系统、模糊理论对单一设备进行评估[8]-[11]。鲜有从二次系统的宏观角度全面建立其状态评估指标体系, 缺乏针对智能变电站二次设备故障类型的状态评估方法。

为此, 本文建立了能全面反映智能变电站各二次设备运行状态的指标体系, 引入最优传递矩阵使层次分析法计算指标权重科学有效, 有机结合客观隶属度函数与专家主观评分, 从而建立基于改进层次模

糊评判的智能变电站二次系统状态评估模型，为运行检修人员开展二次系统状态评价及制定维修策略提供科学的理论依据。

## 2. 智能变电站二次系统状态指标及评分方案

### 2.1. 二次系统状态指标的确定

如图 1 所示，智能设备及网络通信回路共同构成了智能变电站“三层二网”式的二次系统。

其中，站控层设备作为监测控制其他二次设备的装置，本身不影响二次系统的运行状态，在此不将其纳入二次设备状态评估范畴。同理，录波、计量及同步测量装置也不直接参与监测和控制一次系统运行状态，也不将其作为状态评估对象。此外，为简化模型且不失严谨性，将完成相同功能联系紧密的某些二次设备作为整体考虑，在此将电子式互感器和合并单元作为测量回路整体评估，将交换机和以太网作为通信网络整体评估。

由于智能变电站二次设备的不同状态量相关性较强，若把各个状态量都纳入到指标体系中，则整个评估系统将非常复杂且不具可行性。为了尽量使评估指标全面客观的反映智能变电站二次设备工作状态，选择影响各二次设备运行的主要因素作为其状态指标，且以指标信息易于获取或计算为原则。根据已有研究文献[12]-[14]和相关规程规范[15]-[18]及测试技术[19] [20]建立智能变电站二次设备状态评估指标体系，如图 2 所示。

### 2.2. 状态指标评分方案的建立

为使状态指标更好的反映二次设备运行状态的优劣程度，且减小状态等级划分的模糊度，将评估对象状态划分为 4 个等级，即“差”、“注意”、“一般”、“良好”，对应的维修策略及分值见表 1。

## 3. 改进层次模糊评判模型的建立

### 3.1. 建立模糊评判矩阵

#### 1) 定量状态指标评分模型及隶属函数的确定

引入相对劣化度[8]的概念来表征智能变电站二次设备当前实际的状态，根据劣化度分值的大小反映指标对应设备状态的优劣，它是一个取值范围为 0~1 的定量分值。

对越大越优型指标，采用升半梯形模型，其评分表达式：

$$I(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{\min}; \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x < x_{\max}; \\ 1, & x \geq x_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

对越小越优型指标，采用降半梯形模型，其评分表达式为：

$$I(x) = \begin{cases} 1, & x < x_{\min}; \\ 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x < x_{\max}; \\ 0, & x \geq x_{\max}. \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x$ 、 $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$  分别为状态指标的实测值、极限最小值以及极限最大值， $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  可以通过设备说明书、规程规范、测试技术及运行经验获得。

如果分值非常靠近两个状态等级的边界时，上述方法很难准确描述设备真实状态，如测量回路绝对

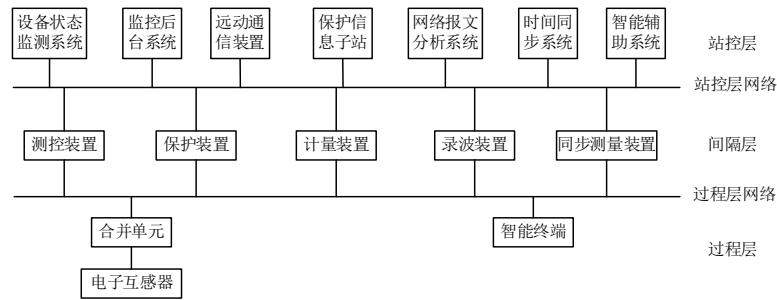


Figure 1. Smart substation secondary system

图 1. 智能变电站二次系统

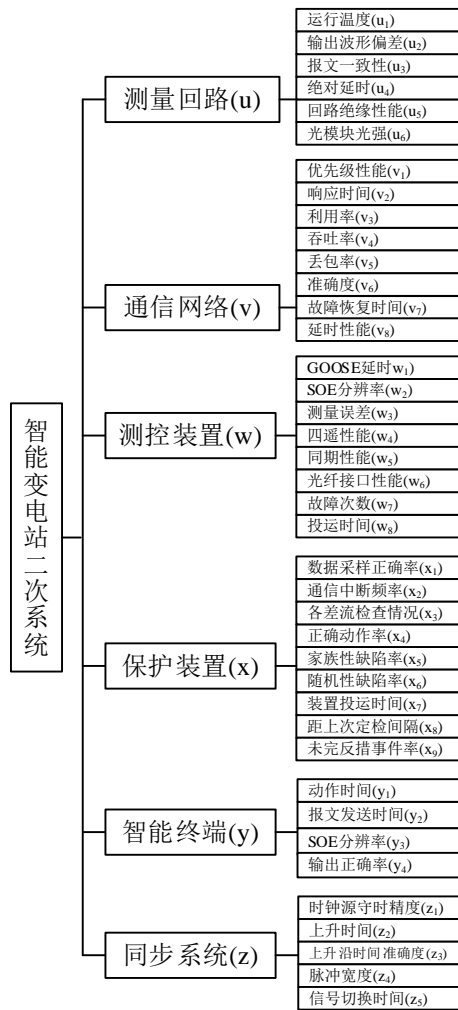


Figure 2. Condition evaluation indices system

图 2. 状态评估指标体系

Table 1. Graded table of condition indicators

表 1. 状态指标评分表

分值范围	0~0.30	0.31~0.60	0.61~0.80	0.81~1
状态描述	差(v <sub>1</sub> )	注意(v <sub>2</sub> )	一般(v <sub>3</sub> )	良好(v <sub>4</sub> )
维修策略	立即维修	尽快检修	计划维修	延期维修

延时指标  $u_4$  评分为 0.86，则难以断定该指标所反映状态是“良好”还是“一般”。为此，采样隶属度函数来柔化各状态等级间边界，选取较为简便的三角形和半梯形分布函数作为隶属度函数。

通过式(1)或式(2)对原始数据进行劣化度评分，然后根据规程或专家经验确定隶属度分布函数对于 4 中状态等级的模糊分界区间。例如可建立测量回路绝对延时指标的隶属度函数，如表 2 所示。

2) 定性状态指标隶属度的确定

对于环境因素、检修记录和设备缺陷等定性描述的状态指标数据采用模糊统计评分。通过专家调查的形式，根据评价依据对给定的状态指标进行评分，由此确定各指标的隶属度，其表达式为：

$$\text{隶属度} = \frac{\text{认为状态指标 } i \text{ 属于第 } j \text{ 状态等级的专家人数}}{\text{参加评定的专家总人数}} \quad (3)$$

3) 模糊评判矩阵的建立

设状态指标  $i$  与其对应二次设备某状态等级  $v_j$  ( $j=1,2,3,4$ ) 的隶属度为  $r_{ij}$ ，则可得该状态指标的隶属度集：

$$r_i = [r_{i1} \quad r_{i2} \quad r_{i3} \quad r_{i4}] \quad (4)$$

若智能变电站二次系统有  $m$  个状态指标，根据式(3)可建立二次系统模糊评判矩阵如下：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{m4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3.2. 改进层次分析法

各状态指标对智能变电站二次系统状态评估结果影响程度各不相同，因此需根据状态指标的相对重要性赋予相应权重。传统层次分析法中一致性检验不可缺少，然而实际判断时一般凭大致估计来调整判断矩阵，带有随意性且需经多次调整才能满足一致性要求。为此，采用改进层次分析法，利用最优传递矩阵对传统层次分析法进行改进，使之自然满足一致性要求，直接求出状态指标权重。其步骤如下：

1) 建立比较矩阵  $A$

为降低判断难度，是判断结果更准确，采用三标度表示状态指标间的重要性比较结果，如式(6)所示。

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & \text{状态指标 } a_i \text{ 比 } a_j \text{ 重要} \\ 1 & \text{状态指标 } a_i \text{ 与 } a_j \text{ 同等重要} \\ 0 & \text{状态指标 } a_j \text{ 比 } a_i \text{ 重要} \end{cases} \quad (6)$$

由此，可得权重比较矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times m}$ 。

2) 构造判断矩阵  $B$

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} \times (d_m - 1) + 1, & r_i \geq r_j; \\ \left[ \frac{|r_i - r_j|}{r_{\max} - r_{\min}} \times (d_m - 1) + 1 \right]^{-1}, & r_i < r_j. \end{cases} \quad (7)$$

式中： $r_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}$ ，( $i = j = 1, 2, \dots, m$ )； $r_{\max} = \max(r_i)$ ； $r_{\min} = \min(r_i)$ ； $d_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}$ 。

**Table 2. Membership function table**  
**表 2. 隶属度函数表**

状态描述	隶属度函数表达式
差	$r_{v_1}(l) = \begin{cases} 1, & l \leq 0.3; \\ 3 - \frac{20}{3}l, & 0.3 < l < 0.45; \\ 0, & l \geq 0.45. \end{cases}$
注意	$r_{v_2}(l) = \begin{cases} \frac{20}{3}l - 2, & 0.30 \leq l \leq 0.45; \\ 1, & 0.45 < l < 0.55; \\ \frac{13}{2} - 10l, & 0.55 \leq l < 0.65. \end{cases}$
一般	$r_{v_3}(l) = \begin{cases} \frac{11}{2} - 10l, & 0.55 < l \leq 0.65; \\ 1, & 0.65 < l < 0.75; \\ 6 - \frac{20}{3}l, & 0.75 \leq l < 0.90. \end{cases}$
良好	$r_{v_4}(l) = \begin{cases} 0, & l \leq 0.75; \\ \frac{20}{3}l - 5, & 0.75 < l < 0.90; \\ 1, & l \geq 0.90. \end{cases}$

3) 求最优传递矩阵  $L$

$$l_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \lg \frac{b_{ik}}{b_{jk}} \quad (8)$$

4) 求矩阵  $B$  的拟优一致矩阵  $B^*$

$$b_{ij}^* = 10^{l_{ij}} \quad (9)$$

5) 求状态指标权重

求矩阵  $B^*$  最大特征值对应的特征向量  $W^*$ ，经归一化处理，即可得到表征各状态指标相对重要性的权重向量  $W$ 。

### 3.3. 模糊综合评判运算结果

基于 3.1 节和 3.2 节所得的模糊评判矩阵与状态权重向量，利用加权平均模型进行模糊综合计算，便可得状态评估结果。综合模糊评估表达式为：

$$P = W \odot R = (p_1, p_2, p_3, p_4) \quad (10)$$

式中： $\odot$  为广义模糊算子， $P$  为模糊综合评价集， $p_1 \sim p_4$  代表评估结果所对应 4 种状态等级的隶属度。

由式(10)，实际中可取与最大评估值  $p_{\max} = \max\{p_i | i=1,2,3,4\}$  相对应的评判结果  $v_i$  作为最终评估结果；也可直接把  $p_i$  看做最终评估结果，以便运行维修人员全面认识二次设备或系统的工作状态。

## 4. 实例分析

表 3 为某智能变电站智能终端运行状态记录数据，根据第 2 节建立其改进层次模糊评估模型，计算

其模糊评判矩阵和各状态指标权重。

表 3 中状态指标  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$  为越小越优型定量状态指标,根据式(2)可得其相对优劣度  $l(y_1)=0.714$ 、 $l(y_2)=0.6$ 、 $l(y_3)=0.9$ 。进而根据表 1 的隶属度分布函数可分别求得状态指标  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$  的隶属度为:  
 $r_{y_1} = \{0 \ 0 \ 1 \ 0\}$ 、 $r_{y_2} = \{0 \ 0.5 \ 0.5 \ 0\}$  和  $r_{y_3} = \{0 \ 0 \ 0 \ 1\}$ 。

输出正确率指标  $y_4$  是根据历史运行数据而得到的统计值,属于模糊定性描述指标,聘请 15 位业内专家对其状态进行评价,评价结果如表 4 所示。

根据表 4 的状态指标  $y_4$  的专家评价结果,由式(3)可定性计算得智能终端输出正确率指标的隶属度为  $r_{y_4} = \{0.133 \ 0.2 \ 0.467 \ 0.2\}$ 。

由此,可得智能终端的模糊评判矩阵:

$$r_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.133 & 0.2 & 0.467 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

另外,按照 3.2 节改进层次分析法可求得智能终端各状态指标权重所占比例,进行归一化处理之后,其结果为:

$$W_y = \{0.336 \ 0.128 \ 0.174 \ 0.362\} \quad (12)$$

由式(10)~(12)可得基于改进层次模糊评判的智能终端状态评估结果:

$$P_y = W_y \odot R_y = (0.048, 0.136, 0.463, 0.305) \quad (13)$$

由式(13)结果可知,智能终端运行状态“一般”的隶属度最大,其次“良好”和“注意”,“差”的隶属度最小。由此,根据 3.3 节可判定智能终端整体运行状态大致处于“一般”,应依照规程规范按计划进行检修。

同理,可对智能变电站其他二次设备进行状态评价,并将各二次设备作为智能变电站整个二次系统的状态指标,根据相同的原理完成系统的状态评估,进而制定相应的检修计划作为运行人员管理维修的理论依据。

**Table 3. Smart terminal operation data**  
**表 3. 智能终端运行状态数据**

状态指标(y)	实测值	规定范围
动作时间(y <sub>1</sub> )	2.0 ms	7 ms 之内
报文发送时间(y <sub>2</sub> )	6.0 ms	15 ms 之内
SOE 分辨率(y <sub>3</sub> )	0.2 ms	小于 2 ms
输出正确率(y <sub>4</sub> )	98.6%	100%

**Table 4. Evaluation of expert group on output accuracy index**  
**表 4. 专家组对输出正确率指标的评价**

状态等级	v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>	v <sub>3</sub>	v <sub>4</sub>
评价结果	2	3	7	3

## 5. 结语

本文将模糊理论和改进层次分析法引入到智能变电站二次系统的状态等级评判中,为二次系统的状态评估提供了一种新的途径。将完成特定相同功能的几种二次设备合成为一个项目作为评估对象,依照相应规程规范建立了比较全面、合理的评估指标体系。实例分析表明,建立的层次模糊评判模型可对智能变电站二次系统作出有效的评估,并具有较强的操作性。

## 参考文献 (References)

- [1] 潘华君,许晓峰,许东,吴焕 (2014) 基于模糊评判法的智能变电站二次系统状态评估. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, **2**, 143-147.
- [2] 王德文,王艳,邸剑 (2011) 智能变电站状态监测系统的设计方案. *电力系统自动化*, **18**, 51-56.
- [3] 张晓华,刘跃新,刘永欣,孙嘉,邱俊宏 (2011) 智能变电站二次设备的状态监测技术研究. *电气技术*, **4**, 41-44.
- [4] 吴杰余,张哲,尹项根,胡文平 (2002) 电气二次设备状态检修研究. *继电器*, **2**, 22-24.
- [5] 刘力丰,高中德,刘百震,曹利安 (1997) 电力系统继电保护设计专家系统的模糊知识处理. *电力系统自动化*, **6**, 34-37.
- [6] 李瑞生,李燕斌,周逢权 (2010) 智能变电站功能架构及设计原则. *电力系统保护与控制*, **21**, 24-27.
- [7] 倪益民,杨宇,樊陈,郭艳霞,窦仁晖,黄国方 (2014) 智能变电站二次设备集成方案讨论. *电力系统自动化*, **3**, 194-199.
- [8] 廖瑞金,王谦,骆思佳,廖玉祥,孙才新 (2008) 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型. *电力系统自动化*, **3**, 70-75.
- [9] 卢绪祥,李录平,张晓玲,黄竹青 (2006) 基于相对劣化度模型的大型汽轮机状态综合评价. *动力工程*, **4**, 507-510.
- [10] Jiang, H. and Ruan, J.H. (2009) Fuzzy evaluation on network security based on the new algorithm of membership degree transformation-M(1, 2, 3). *Journal of Networks*, **4**, 324-331.
- [11] Song, Z.Y., Zhu, H.Q., Jia, G.W. and He, C.N. (2014) Comprehensive evaluation on self-ignition risks of coal stockpiles using fuzzy AHP approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **32**, 78-94.
- [12] Zhang, J.C. (2012) The theory of membership degree of conclusion in several n-valued logic systems. *American Journal of Operations Research*, **2**, 147-152.
- [13] 段若晨,王丰华,顾承昱,满玉岩,傅正财,刘亚东 (2014) 采用改进层次分析法综合评估 500 kV 输电线路防雷改造效果. *高电压技术*, **1**, 131-137.
- [14] Zhang, Y., Zhang, H., Gao, X., et al. (2007) Improved AHP method and its application in lake environmental comprehensive quality evaluation—A case study of Xuanwu Lake, Nanjing, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **25**, 427-433.
- [15] (2010) Q/GDW441-2010 智能变电站继电保护技术规范.
- [16] (2010) Q/GDW428-2010 智能变电站智能终端技术规范.
- [17] (2010) Q/GDW427-2010 智能变电站测控单元技术规范.
- [18] (2010) Q/GDW429-2010 智能变电站网络交换机技术规范.
- [19] 袁宇波,高磊,卜强生,宋亮亮,等 (2013) 智能变电站集成测试技术与应用. 中国电力出版社,北京.
- [20] 何建军,徐瑞林,陈涛 (2012) 智能变电站系统测试技术. 中国电力出版社,北京.