

Smart Substation Secondary Equipment Condition Assessment Based on Cloud Model

Hongbin Wang¹, Hong Zhao², Yan He¹, Jinxin Ouyang², Qiaobo Liu², Youqiang Zhang¹

¹Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing

²Chongqing University, Chongqing

Email: 359380128@qq.com

Received: Dec. 12th, 2015; accepted: Dec. 24th, 2015; published: Dec. 31st, 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

Substation secondary equipment condition assessment is the basis to realize condition maintenance, and the key ensuring the safe operation of the equipment. However, the mechanism of secondary equipment fault is complex, which may have recessive fault, and the index required is more complex. This paper proposes a new method for smart substation secondary equipment condition assessment based on Cloud Model, establishes evaluation flow process, divides the condition level, and uses the analytic hierarchy process and varied weight process. The results show that this method can evaluate the smart substation secondary equipment condition more accurately, and provide theoretical basis for the maintenance of it.

Keywords

Smart Substation, Cloud Model, Condition Assessment, Analytic Hierarchy Process

基于云模型的智能变电站二次设备状态评估

王洪彬¹, 赵红², 何燕¹, 欧阳金鑫², 刘乔波², 张友强¹

¹重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆

²重庆大学, 重庆

Email: 359380128@qq.com

收稿日期: 2015年12月12日; 录用日期: 2015年12月24日; 发布日期: 2015年12月31日

摘要

变电站二次设备状态评估是实现状态检修的基础,是保证一次设备安全运行的关键工作,而二次设备故障机理复杂,存在隐性故障,其状态评估所需指标更为复杂。提出基于云模型的智能变电站二次设备状态评估方法,建立基于云模型状态评估方法流程,划分评估智能变电站二次设备状态等级,采用层析分析法变权重方法进行处理。结果表明采用云模型的评价方法能更准确的评估智能变电站二次设备运行状态。为智能变电站二次设备状态检修工作提供理论依据。

关键词

智能变电站,云模型,状态评估,层次分析法

1. 引言

随着二次设备的不断优化升级,其故障概率以及复杂程度也相应增加。从而直接影响到对一次系统的可靠保护,导致电网安全和稳定性下降 [1]。有必要对影响二次设备正常工作的关键指标进行分析,在此基础上对二次设备运行状态进行评估,进一步指导电力部门相关人员采取及时的维修措施。智能变电站二次系统的状态监测能够完成自动信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能。为智能变电二次系统状态评估提供有利支撑,而状态评估又为二次设备的状态检修提供指导 [2]。

目前进行状态评估的方法主要有采用马尔科夫、故障树及神经网络等方法。有文献采用 BP 神经网络, D-S 证据理论, 灰靶理论, 贝叶斯方法进行状态评估, 此类状态评估方法主要针对变压器设备 [3]-[6], 而对于智能变电站二次设备状态评估研究相对较少。也有学者将云理论引用到变压器状态评估 [7]。以上研究主要针对一次系统或一次设备进行评估, 并没有针对智能变电二次设备进行评估, 二次系统具有异于一次系统的特征。并且以上评估方法均从单方面考虑模糊性状态评估, 缺乏对随机性的分析, 采用云模型的评价方法不仅可以兼顾模糊性, 同样将随机性考虑其中。

智能变电站二次系统结构

智能变电站二次系统本质上是一个信息交换系统,二次系统是一次系统的镜像,收集一次设备信息,根据负荷对一次设备进行控制,并根据一次设备的运行状态做出相应的反应。如图 1 所示。

智能变电站二次系统从按功能上可以分为三部分:站控层、间隔层、过程层,智能变电站与传统的变电站二次系统的主要区别在于其增加了过程设备 [1]。按照在智能变电站二次系统中出现运行故障的对象不同,可以将二次设备进行不同的划分,过程层包括合并单元、智能终端。间隔层包括保护装置、测控装置、电度表、故障录波器、网络分析仪、备自投、稳控、PMU 等。站控层包括监控主机、操作员主机、五防主机、远动装置、保信子站。二次系统的连接示意图如图 2。

智能变电站二次设备通过 IEC61850 通信协议进行信息传输。IEC61850 系列标准由于在互操作性、开放性、可扩展性方面的杰出表现,很大程度上推动了数字化变电站的建设,必将成为智能电网信息通信体系的重要组成部分。

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,根据相关规程规范和已有研究文献 [8] [9]建立智能变电站二次设备状态评估指标体系如图 3。



Figure 1. The signal of secondary system
图 1. 二次系统信号示意图

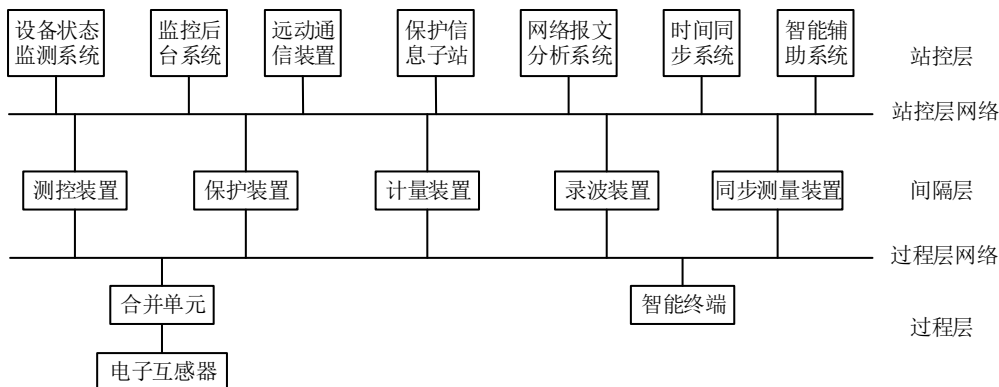


Figure 2. Intelligent substation secondary system
图 2. 智能变电站二次系统

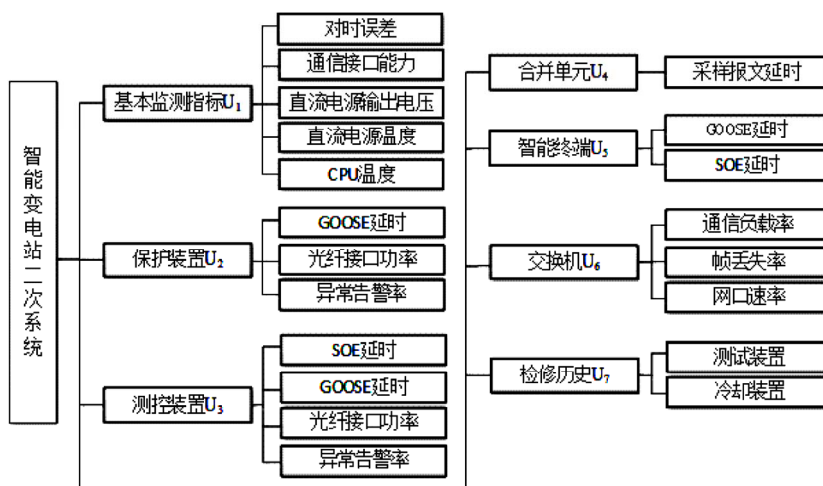


Figure 3. Condition evaluation indices system
图 3. 状态评估指标体系

2. 智能变电站二次设备云模型评价方法

2.1. 智能变电站二次设备状态等级划分

采用相对劣化度来表征指标偏离正常状态的程度，相对劣化度值为介于 0 和 1 之间的数，0 和 1 分别为两种极端状态。不同指标一般分为两类：越大越优型和越小越优型。其对应的计算式分别为(1)(2)式：

$$x_m = \left(\frac{z_m - z_0}{z_1 - z_0} \right)^\alpha \quad z_0 \leq z_m \leq z_1 \quad (1)$$

$$x_m = \left(\frac{z_0 - z_m}{z_0 - z_1} \right)^\alpha \quad z_1 \leq z_m \leq z_0 \quad (2)$$

其中： z_0 为二次设备的出厂值，即正常值； z_0 可根据《电力设备预防性试验规程》查得， z_1 为指标处于严重劣化状态的值，即注意值； z_m 为指标测量值，采用 $\alpha=1$ ，可以有上面两式计算得出相对劣化度为 $x=(x_1x_2x_3\cdots)$ 。

相对劣化度的采用可以为智能变电站二次设备的状态评估提供等级划分基础，为了使状态指标更好的反映各二次设备运行状态的优劣程度，且减小状态等级划分模糊程度，将评估对象的运行状态划分为4个等级，即“严重状态”、“异常状态”、“注意状态”、“正常状态”，对应的维修策略及分值见表1。

2.2. 云模型评价方法

云是使用语言值来表示某个定性概念与其定量之间不确定性的转换模型，以达到反应自然世界中事物或者人类知识概念的不确定性：模糊性与随机性，不仅从随机理论和模糊集合理论中给出解释，而且也反映了模糊性与随机性之间的关联性，构成了定量与定性之间的映射。正态云的生成算法可以用下流程表示：在正向云发生器的计算中，主要由以下两步，输入：表示定性概念云的3个数字特征值 E_x, E_n, H_e 以及云滴的个数 N ；输出： N 个云滴的定量值以及每一个云滴所代表的确定值。其具体算法为：

- 1) 根据云的数字特征， (E_x, E_n, H_e) 生成以期望为 E_n ，标准差为 H_e 的正态随机数 E_n^* ；
- 2) 生成一个以期望为 E_x ，标准差为 E_n 的绝对值的正态随机数 x ， x 就称为论域空间 U 上的一个云滴；
- 3) 根据1)和2)计算 x 属于定性概念 C 的确定度 μ ： $\mu = \exp\left[-(x - E_x)^2 / (2E_n^*)^2\right]$ ；
- 4) 重复1)~3)步，直到产生 N 个云滴为止。

若给定以上三个参数，就可以得到指定参数和云滴个数的正态云模型。若参数 $E_x = 89$ ； $E_n = 4$ ； $H_e = 0.5$ 可得一个正态云模型(如图4)。

Table 1. Graded table of condition indicators
表 1. 状态指标评分表

评分	0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	0.8~1
状态描述	正常(d_1)	注意(d_2)	异常(d_3)	严重(d_4)
维修策略	延期维修	计划维修	尽快检修	立即维修

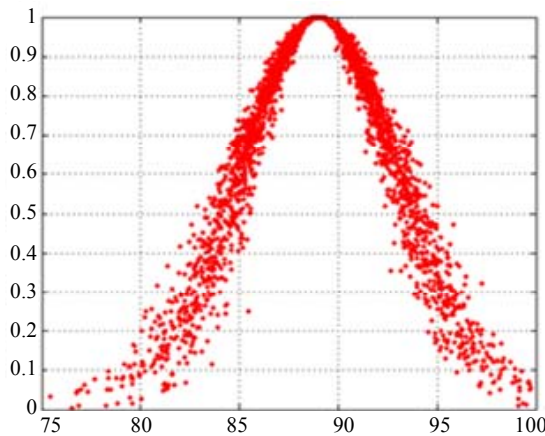


Figure 4. Normal cloud model
图 4. 正态云模型

2.3. 基于云模型智能变电站二次设备状态评估

2.3.1. 指标权重

智能变电站二次设备状态评估是分层次多指标综合评判，不同指标对设备重要程度不尽相同，故其权重也不一致。采用层次分析法对不同指标赋予相应权重，如表2。层次分析法根据问题的性质和预期目标将问题分解为不同组成元素，并按因素间的相互关联度及隶属度关系将因素以不同层次聚集结合，形成一个多层次的的分析评判模型。

采用层次分析法的弊端在于各指标权重值固定，不会随着二次设备的状态变化而改变。而当设备某个指标严重偏离正常值时，该指标应当提高相应权重，才能真正刻画该指标在严重变化时对设备带来的影响。采用文献[7]的方法进行变权处理，可得公式：

$$w_i(x_1 x_2 \cdots x_m) = w_i^{(0)} x_i^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1} \quad (3)$$

2.3.2. 智能变电站二次设备状态评估流程

评估二次设备状态的指标有定性和定量两类。定量指标可以通过二次设备测量值带入隶属度函数，再乘以相应权重就可得到处于不同状态的隶属度。而定性指标则通过专家调查的形式，根据评价对状态指标进行打分，可得相应的隶属度。这样通过对定性指标和定量指标的评定可以对智能变电站二次设备进行综合状态评估，流程如图5。

2.3.3. 单因素评估方法

根据二次设备状态等级与相对劣化度的关系。将各指标的四劣化度分别划分为 $[0, a]$ 、 $[a, b]$ 、 $[b, c]$ 、 $[c, 1]$ 四个区间。云的数字特征根据四个区间可求出，如表3。对于 q 值，取0.01，则可根据给出的数字特征得出正态云模型。

以测量回路温度为例，生成的云模型如图6。从左到有分为四种状态等级，第一个半云为代表隶属度为第一等级的概率，依次类推。

因此，基于云模型的智能变电站二次设备状态评估的算法流程可归纳为如下：按给定云模型数字特征生成给定数量云滴，读取二次设备指标数据 X_0 ，设该值与云多在一定范围误差内有 M 个云滴相交，则取 M 个云滴隶属度均值作为该指标隶属度。形成隶属度矩阵 $A_{p \times k}$ 的行表示不同的指标，列表示指标处于不同的状态，如 $A_{m,k}$ 表示第 m 个指标隶属于第 k 个状态的隶属度。最后归一化隶属度矩阵的每行，从而构建模糊评判矩阵 R 。

利用已得到的指标变权矩阵 W 与评判矩阵 R 进行综合评价，得到评语集 D ：

$$D = W \cdot R = (w_1 w_2 \cdots w_m) \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.4. 状态等级确定

对项目层进行模糊综合评判后得到对各状态的隶属度 b_j ($j = 1, 2, 3, 4$)后,可采用最大隶属度原则判断二次设备状态等级，也可对状态的4个等级分别赋予分值1、2、3、4，然后根据评判结果对这4种状态的隶属度加权平均，可表示为：

$$f = \sum_{j=1}^4 b_j^k h / \sum_{j=1}^4 b_j^k \quad (5)$$

Table 2. Weights of assessment indices
表 2. 项目及指标权重

项目名称	权重	项目下指标权重
基本监测指标 U_1	0.2596	0.2351, 0.1538, 0.1538, 0.2274, 0.2299
保护装置 U_2	0.1326	0.4953, 0.1391, 0.3656
测控装置 U_3	0.1269	0.2163, 0.1793, 0.3520, 0.2524
合并单元 U_4	0.1358	1.0000
智能终端 U_5	0.1085	0.4206, 0.5794
交换机 U_6	0.1021	0.5126, 0.1589, 0.3285
检修历史 U_7	0.1345	0.4135, 0.5865

Table 3. Digital characteristic of cloud mode
表 3. 云模型特征值

	E_x	E_n	H_e
g_1	$E_{x1} = 0$	$E_{n1} = (E_{x2} - E_{x1})/6$	q
g_2	$E_{x2} = (a + b)/2$	$E_{n2} = (E_{x2} - E_{x1})/6$	q
g_3	$E_{x3} = (b + c)/2$	$E_{n3} = (E_{x3} - E_{x2})/6$	q
g_4	$E_{x4} = d$	$E_{n4} = (E_{x4} - E_{x3})/6$	q

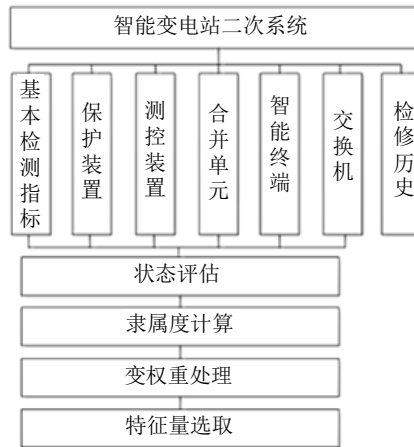


Figure 5. Flow chart of status assessment
图 5. 状态评估流程图

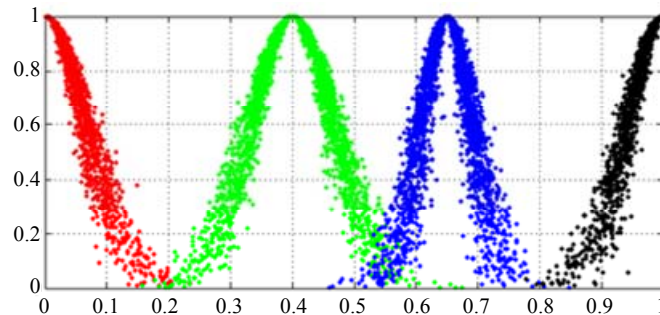


Figure 6. Cloud model membership
图 6. 隶属云模型图

2.5. 定性状态指标隶属度

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：

$$\text{隶属度} = \frac{\text{认为状态指标 } i \text{ 属于第 } j \text{ 状态等级的专家人数}}{\text{参加评定的专家总人数}} \quad (6)$$

3. 算例分析

3.1. 基本监测指标评估

以文献给出的实例进行分析 [8] [9]，带入前述越大越优型指标劣化度函数和越小越优型指标劣化度函数，求得基本监测指标相应的劣化度值 $U_1 = [0.8601, 0.6458, 0.4245, 0.8398, 0.6298]$ ；由表 2 可知，指标权重为 $w_{u1} = [0.2351, 0.1538, 0.1538, 0.2274, 0.2299]$ ，经过式(4)变权后权值为 $W_{u1} = [0.2878, 0.1414, 0.0929, 0.2718, 0.2061]$ 。根据 2.2 节进行计算，基本监测指标的隶属度计算结果见于表 4。

通过以上数据可知，基本监测指标中对时误差和直流电源输出电压隶属于 d_4 状态的隶属度分别为 0.8977 和 0.9342，即为处于严重状态的概率。因此，应将这两类指标视为处于严重状态，需尽快安排停电检修。

3.2. 其他各项指标评估

按照以上方法分别对其他各项指标进行隶属度计算，保护装置指标劣化度值 $U_2 = [0.1601, 0.9458, 0.3245]$ ，根据表 2 中保护装置指标常权值为 $w_{u2} = [0.5102, 0.1032, 0.3866]$ ，通过式(4)计算变权值为 $W_{u2} = [0.2681, 0.3203, 0.4116]$ 。同样方法可得到 U_3 至 U_6 的数据，如下：

$$\begin{cases} U_3 = [0.4511, 0.7948, 1.0000, 0.1012] \\ w_{u3} = [0.3589, 0.1245, 0.2451, 0.2715] \\ W_{u3} = [0.3035, 0.1855, 0.4595, 0.0515] \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_4 = [0.9455] \\ w_{u4} = W_{u4} = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_5 = [0.1275, 0.3458] \\ w_{u5} = [0.4521, 0.5479] \\ W_{u5} = [0.2333, 0.7667] \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_6 = [0.4528, 0.9458, 0.5245] \\ w_{u6} = [0.2150, 0.4845, 0.3005] \\ W_{u6} = [0.1365, 0.6425, 0.2210] \end{cases}$$

以上数据可以看出，变权计算能够增大偏离正常值严重指标的权重值，这样能够更加准确反映实际情况，说明该指标严重偏离正常值时对二次设备带来危害更大。此外，对于定性指标进行专家打分，分数如表 5。

根据专家打分结果利用公式(6)可计算得测试装置和冷却系统的隶属度值：

$$u_1 = [0.133, 0.200, 0.467, 0.200]$$

$$u_2 = [0.267, 0.400, 0.267, 0.066]$$

根据以上方法进行计算，智能变电站二次设备各指标隶属于不同状态的隶属度计算结果见于表6。

从表中数据可以看出， U_6 中第一个指标通信负载率，该指标正有从 d_2 状态向 d_3 状态恶化的趋势，需安排检修。其他各指标的隶属度可以反映出相应二次设备状态演变。判定二次设备所处状态方法如下：二次设备整体状态的评估按单项指标的最严重状态评估。例如当任一单项指标达到严重状态时，系统整体评估应视为严重状态。由表6综合以上分析可以判定智能变电站二次设备处于 d_4 状态，即严重状态，应尽快安排维修系统。

Table 4. Degree of U_1 membership
表 4. U_1 隶属度计算值

隶属度	d_1	d_2	d_3	d_4
u_1	0	0	0.1023	0.8977
u_2	0	0.0759	0.9241	0
u_3	0	0.9253	0.0747	0
u_4	0	0	0.0658	0.9342
u_5	0	0	0.6891	0.3109

Table 5. Evaluation of expert group on output accuracy index
表 5. 专家打分值

状态	d_1	d_2	d_3	d_4
测试装置	2	3	7	3
冷却系统	4	6	4	1

Table 6. Degree of all indices membership
表 6. 各指标隶属度值

	隶属度	d_1	d_2	d_3	d_4
U_1	u_1	0	0	0.1023	0.8977
	u_2	0	0.0759	0.9241	0
	u_3	0	0.9253	0.0747	0
	u_4	0	0	0.0658	0.9342
	u_5	0	0	0.6891	0.3109
U_2	u_1	0.9245	0.0755	0	0
	u_2	0	0	0.1345	0.8655
	u_3	0	0.8452	0.1548	0
U_3	u_1	0.1153	0.8124	0.0723	0
	u_2	0	0.1095	0.8905	0
	u_3	0	0	0	1.0000
U_4	u_4	0.7532	0.1458	0.1010	0
	u_1	0	0	0.1023	0.8977
U_5	u_1	0.7103	0.2897	0	0
	u_2	0	0.9012	0.0988	0
U_6	u_1	0.2451	0.6346	0.1203	0
	u_2	0	0	0.0438	0.9562
	u_3	0	0.3561	0.6314	0.0125
U_7	u_1	0.133	0.200	0.467	0.200
	u_2	0.267	0.400	0.267	0.066

与文献 [8] 中数据相比较, 可以看出采用云模型方法使得评估结果隶属度值更集中于某个区间, 评估结果更为准确。由各项目权重值与模糊评判矩阵值, 通过式(4)计算可得智能变电站二次系统状态评估向量为 $D = [0.1617, 0.2731, 0.2219, 0.3433]$ 。根据最大隶属度判断原则, 系统状态等级为 d_4 , 即注意状态, 与第一种判定方法一致。

4. 结论

提出了智能变电站二次设备状态评估的一种有效精准的方法。首先建立了反应智能变电站二次设备状态的指标体系, 进行二次设备状态等级划分。在劣化度函数基础之上提出基于云模型的智能变电站二次设备状态评估方法并给出进行评估的具体方法流程。对于定性指标的评估, 采用专家打分方法进行量化分析。整个评估过程采用了层次分析法对常权值进行优化, 使得变权值能准确反应二次设备实际情况。最后, 经过对单项指标和整个指标体系的实例分析, 验证了该方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-61.
- [2] 李明, 韩学山, 王勇, 等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 196-202.
- [3] 王洪飞, 施绮. 基于故障树(FTA)方法的二次系统项目评估方法研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2747-2750.
- [4] Dai, Z.H., Li, Z.J., Jiao, Y.J., *et al.* (2014) Reliability Assessment Based on BP Neural Network for Relay Protection System with a Few Failure Data Samples. *Electric Power Automation Equipment*, **11**, 129-134.
- [5] 雷兴列, 盛戈峰, 严英杰, 等. 基于组合赋权与 D-S 证据理论的变压器状态评估[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2023-2027.
- [6] 郑蕊蕊, 赵继印, 吴宝春, 等. 基于加权灰靶理论的电力变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 60-66.
- [7] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
- [8] 张友强, 熊小伏, 欧阳金鑫, 等. 基于灰色层次聚类的智能变电站二次设备状态评估[J]. 重庆大学学报, 2015(1): 23-28.
- [9] 王晓亮, 董海鹰, 任伟. 基于信息融合的 750 kV 电网二次设备状态评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 40-46.