

基于模糊评判的变电设备评估

周松霖¹, 段佳奇², 齐伟强¹

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100040; 2. 华电重工股份有限公司, 北京 100070)

摘要: 变电设备状态评估是掌握设备运行状态的重要手段, 能及时发现设备问题及潜在风险并采取有效的检修措施预防故障和事故发生。在此背景下, 提出基于模糊综合评判的变电设备评估方法, 该方法根据各项检测指标对变电设备进行综合评估, 并进行运行状态分级, 对电网设备进行全面评估与动态管控。常规评估方法往往采用单项打分的办法, 而模糊评判的设备评估方法, 可以实现从多层面面对变电设备更有效的全面的评估。通过具体算例, 举例说明用模糊评判进行变电设备评估的具体流程与分级方法。采用该方法后, 北京电网变电设备状态管控水平有较大提升, 设备故障率呈现逐年下降的趋势。

关键词: 模糊评判; 变电设备; 状态评估

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.021 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2021)03-0174-06

Substation equipment state evaluation method based on fuzzy comprehensive evaluation

ZHOU Songlin¹, DUAN Jiaqi², QI Weiqiang¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Power Science Research Institute Co., Ltd., Beijing 100040, China;

2. Huadian Heavy Industries, Beijing 100070, China)

Abstract: The state assessment is an important means to evaluate the condition of substation equipment. In this paper, a fuzzy comprehensive evaluation-based method is proposed to evaluate the substation equipment. The proposed method can provide an comprehensive evaluation of substation equipment and establish the operating state level for the management of substations. The conventional method usually utilizes the single item scoring method. While the proposed method can evaluate the states of substations from multiple aspects more effectively and more accurate. A simulation example is demonstrated to introduce the procedure of state evaluation. As an instance of application, the state management and control level of substation equipment in Beijing power grid has been greatly improved, and the equipment failure rate have been declining in recent years.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation; substation equipment; state evaluation

电网中已经投入运行的变电设备在其全寿命周期内需要开展必要的检修工作, 以使其保持、恢复或改善运行状态^[1-4]。变电设备状态评估是掌握设备

运行状态的重要手段, 科学的设备评估可及时发现设备问题及潜在性故障, 在设备故障前及时采取有效的检修措施, 预防故障和事故发生, 确保电网安全

可靠运行。

常规的设备评估方法往往采用对设备各项指标单项打分的方式进行,并对单项指标超标的设备予以监视或停运检修,但是该方法难以对设备的整体情况进行评估。该文提出基于模糊评判的变电设备评估方法,根据各项指标对设备整体情况做出评判。开展该项工作以来,北京电网变电设备状态管控水平有较大提升,设备故障率呈逐年下降的趋势。

1 变电站设备评估模式

变电设备评估定级按照逐站、逐台设备开展评估定级工作,根据评估定级结果深化新技术在设备运维管理方面的应用,优化变电设备状态检修策略,实现设备“应修必修、修必修好”,从而及时对变电设备状态进行评估,提升检修管理水平。

1.1 变电设备评估数据来源

变电设备评估定级数据来源包括设备基本台账信息、运行维护数据、调度监控信息数据、隐患排查数据、18项反措排查数据、缺陷数据等,又可划分为设备本身数据(设备运行温度、绝缘情况等)和外部环境数据(电网电压、频率、不良工况等)。

1) 投运前信息。

主要包括设备技术说明书、设备监造报告、计算书、型式试验报告、出厂试验报告、运输记录、到货验收记录、交接试验报告、安装验收记录、新(改、扩)建工程有关图纸等纸质和电子版资料^[5-6]。

2) 运行信息。

主要包括设备运行过程中,设备常规和特殊巡视记录、维护记录、故障跳闸记录、缺陷和消缺记录、设备隐患记录、调度监控异常信息数据以及不良工况信息等。

3) 检修试验信息。

主要包括例行试验报告、诊断性试验报告、状态检测数据、巡检记录、检修报告及设备技术改造信息等。

4) 隐患信息。

同型号、同厂家、同类设备故障的情况及家族性缺陷、相关反措执行情况,其他影响设备安全稳定运行的数据,以及污秽区域分布图、雷区分布图、冰区分布图、风区分布图等电网运行环境信息等。

1.2 变电设备评估分级

变电设备定级评估将设备状态分为1级、2级、3级和4级等4个级别,分级标准和处理措施如表1所示。

表1 变电设备状态评估分级

Table 1 Classification of State Evaluation

等级	运行状况	处理措施
1	各状态量处于稳定且良好范围内	正常运行
2	有违反反措或不良情况,但仍可运行	加强监视
3	存在故障隐患	监视运行适时检修
4	在重要状态量严重超过标准限值	尽快停电检修

1.3 变电设备评估定级分类

开展状态评估定级工作,根据评估定级时间、对象的不同,分为专项评估定级、定期评估定级,并坚持专项评估定级和定期评估定级相结合的原则。

1) 专项评估定级。

专项评估定级是由公司职能部门运检部、调控中心分专业组织,包括全国“两会”保电及公司明确重大保电活动需开展评估定级的设备,以及其他明确需评估设备。依据评估定级标准,逐站、逐台设备进行评估定级,作为相关运维单位异常设备处置以及保电工作的重要数据来源。

2) 定期评估定级。

公司职能部门组织,在各运维单位收资的基础上,逐站逐线开展设备评估定级,将评估定级结果作为项目储备、停电检修计划、运维重点等依据。缺陷评估定级,包括运行缺陷和家族缺陷评估定级。运行缺陷评估定级指发现运行设备缺陷后,定期根据设备相关状态量的改变,结合带电检测和在线监测数据对设备进行的评估定级;家族缺陷评估定级指上级发布家族性信息后,定期对运维范围内存在家族缺陷设备进行的评估定级。

1.4 变电设备评估流程和要求

1) 每年3月底前,各运维单位收集设备运行信息,主要包括:设备缺陷、隐患、异常信号、状态检测结果、检修试验结果、反措情况、不良工况等。

2) 每年5月中旬,各运维单位组织召开评估定级会,根据收集的输变电设备运行资料,依据评估定级标准,逐站、逐线、逐台设备进行定级,形成“一站一本帐”、“一线一本帐”,并针对问题提出整改措施。

根据各专业工作需要,公司运检部、调控中心、安质部、专家可参与其中。

3)每年5月底前,汇总各运维单位设备评估定级情况,针对存在问题较多、存在重大问题或对问题存在异议的,组织专家组开展专项评估定级,确保设备评估定级准确。

4)每年7月底,公司职能部门组织完成设备评估定级报告编写发布工作。各运维单位依据设备评估定级结果,作为项目储备、年度检修计划编制、运维重点工作依据。在设备评估定级中遇到技术难题或共性问题时,将临时组织专家共同研究解决。

2 模糊综合评判

2.1 模糊综合评判理论

第1节介绍了变电设备评估的标准、数据来源、评估流程及要求。具体的评估方法则使用模糊综合评判^[5-6],其基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,与被评估事物相关的因素都可以纳入考虑范围;然后把各项指标统一量化,并依据不同指标对评判对象的影响程度来分配权重,从而对各评判对象做出合理的综合评估^[7-11]。对于变电设备评估问题,具体方法是将测量到的变电设备各个状态量与标准值或参考值对比,根据与标准值或参考值的偏差,使用劣化度函数得到其劣化程度;然后对于每项指标的劣化度,利用隶属度函数确定其处于各评估等级的概率;再根据每项指标对设备的重要程度赋予权重系数,从而得到统一的量化指标;最后根据隶属度最大原则,判断该指标最可能隶属于何种评估级别,即可得到综合性评判结果。

设因素集合和评判集集合之间的模糊关系用评估矩阵 \mathbf{R} 表示。考虑各因素权重 A , 评判结果为

$$B = A * \mathbf{R} = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n] \quad (1)$$

式中 $*$ 为模糊集 A 和评判矩阵 \mathbf{R} 合成时所选用的模型算子,最常见的是加权平均。根据隶属度最大原则,最优解为

$$b_{\max} = \max(b_j \mid j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

根据该最优解来确定被评估对象最可能的状态。

2.2 劣化度函数

劣化度函数反映了变电设备状态量偏离正常运

行参考值的严重程度。对于变电设备的状态量,可以分为单向最优和中间最优两类。单向最优的状态量包括越小越优或越大越优的状态量,对于避雷器来说,其绝缘电阻值越大越优;而其额定工作电压下的泄漏电流,则是越小越优。中间型最优则是指该状态量与参考值偏差越小越优,例如实际工作电压,与额定电压偏差越小越好,电压过高或过低都可能影响设备正常运行。

对于越小越优的状态量,其定义为

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & x > \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中 $g(x)$ 为劣化度函数;区间端点值 α 与 β 分别为评估指标下限值和上限值,其取值是根据变电设备检修规程中的限制值确定的。一般可达到4级,即设备状态量严重超标,必须尽快停电检修时的值定为 β , 而将1级,即状态量满足要求,正常运行时的值定为 α 。 x 为评估指标实测值。越大越优的指标与此类似。

对于有中间最优的状态量,其定义为

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x < \alpha_1 \\ \frac{x - \alpha_1}{\beta_1 - \alpha_1}, & \alpha_1 \leq x \leq \beta_1 \\ 0, & \beta_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ \frac{\beta_2 - x}{\beta_2 - \alpha_2}, & \alpha_2 \leq x \leq \beta_2 \\ 1, & x > \beta_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $g(x)$ 为劣化度函数;区间端点值 α_1 、 α_2 与 β_1 、 β_2 分别为评估指标下限值和上限值; x 为评估指标实测值。越大越优的指标与此类似。

2.3 隶属度函数

隶属度反映了状态量对应某一评估等级的概率。根据问题的性质套用现成的某些形式的模糊分布,然后根据测量的数据确立分布中包含的参数,这种确定隶属函数的方法被称为指派法,也是较为简便常用的一种方法。其中三角形隶属函数形状简单,并且与其他较复杂的隶属函数得出的结果差别较小,因此可以利用三角形和半梯形组合的分布函数,建立各指标对应于不同状态等级的隶属函数,具

体如图 1 所示。这里隶属度函数的含义是:当一项指标的劣化度 x 达到某一数值时,该指标处于某一评估分级的概率 $p(x)$ 。如劣化度为 0 时,该指标一定处于 1 级;而劣化度处于 (x_1, x_2) 区间时,该指标可能处于 3 级或 4 级,且劣化度越接近 1,处于 4 级的概率越大,处于 3 级的概率越小。所有状态量的隶属度就形成了评判矩阵。

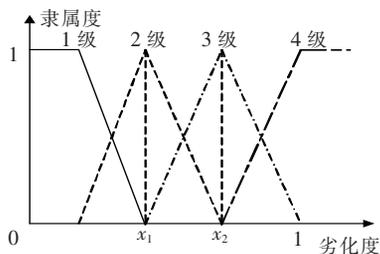


图 1 半梯形与三角形隶属度函数

Figure 1 Distribution map of half-ladder-shaped and triangular membership function

2.4 权重系数

权重系数用来反映该项状态量对设备正常运行的重要性,权重越大说明该项指标的劣化越可能引起设备故障。通常可以根据经验选取常权系数,若认为权重分配不准确,也可以采取变权系数,对系数分配进行修正。这里采用按经验确定常权系数的方法。变权系数为

$$A_{R_{ijk}}(g_{R_{ij1}}, \dots, g_{R_{ijd}}) = \frac{A_{R_{ijk}}^{(0)} (1 - g_{R_{ijk}})^{\delta-1}}{\sum_{s=1}^d A_{R_{ijs}}^{(0)} (1 - g_{R_{ijk}})^{\delta-1}} \quad (5)$$

确定各状态量的权重系数后,将权重分配给评判矩阵,即可得到评判结果。

2.5 计算举例

以避雷器设备评估举例说明。为简化计算只取如下监测指标:底座绝缘电阻、 $U_{1\text{mA}}$ 偏差值、 $0.75 U_{1\text{mA}}$ 下泄漏电流、运行交流电压下阻性电流分量与初始值的比值。各项指标的限值如表 2 所示。

表 2 评估项目参数限值

Table 2 Limit values of evaluation entries

状态量	单位	下限值(α_1/β_1)	上限值(α_2/β_2)
底座绝缘	MΩ	10/50	无
$U_{1\text{mA}}$ 偏差	%	无	3/5
$0.75 U_{1\text{mA}}$ 泄漏电流	μA	无	40/50
阻性电流倍数	%	无	30/100

1) 隶属度函数计算。

以 $0.75 U_{1\text{mA}}$ 下的泄漏电流为例,参考文献^[12-14]中关于避雷器泄漏电流的参考值规定,设定其属于 1 级状态的泄漏电流范围为 $40 \mu\text{A}$ 以下,2、3、4 级的节点分别为 $43.3, 46.7, 50 \mu\text{A}$,对应劣化度分别为 $0.33, 0.67, 1$ 。则根据图 1 的半梯形图,1 级的隶属度函数为

$$\begin{cases} 1, & g \leq 0 \\ 1 - 3g, & 0 < g < 0.33 \\ 0, & g \geq 0.33 \end{cases} \quad (6)$$

同样可以得到 2、3、4 级的隶属度函数为

$$\begin{cases} 3g, & g \leq 0.33 \\ 2 - 3g, & 0.33 < g < 0.67 \\ 0, & g \geq 0.67 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 3g - 1, & 0.33 < g \leq 0.67 \\ 3 - 3g, & 0.67 < g < 1 \\ 0, & g \leq 0.33 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0, & g \leq 0.67 \\ 1 - 3g, & 0.67 < g < 1 \\ 1, & g \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

2) 确定评判矩阵。

首先根据检测值计算劣化度。实测值为 $44.3 \mu\text{A}$,则劣化度为

$$g(x) = \frac{44.3 - 40}{50 - 40} = 0.443 \quad (10)$$

将劣化度带入隶属度函数,可以得到该状态量对应 1、2、3、4 级的隶属度分别为 $0, 0.671, 0.329, 1, 0$ 。

若测得运行交流电压下阻性电流分量与初始值的比值为 1.45, $U_{1\text{mA}}$ 偏差为 3.70%,绝缘底座阻值大于 $50 \text{ M}\Omega$ 。计算这些参数的劣化度分别为 $0.350, 0.214, 0$ 。按照同样方法可以确定其他指标的评判矩阵,得到评判矩阵为

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0.671 & 0.329 & 0 \\ 0 & 0.95 & 0.05 & 0 \\ 0.358 & 0.642 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3) 变权系数。

首先应根据经验或层次流程法给出常权系数。若常权系数为 $[0.3 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.2]$,按照式(5)计算变权系数,则第一项为

$$A_{R_{11}} = \frac{A_{R_{11}}^{(0)} (1 - g_{R_{11}})^{-2}}{\sum_{s=1}^4 A_{R_{1s}}^{(0)} (1 - g_{R_{1s}})^{-2}} = \frac{0.3 \times (1 - 0.443)^{-2}}{0.3 \times (1 - 0.443)^{-2} + 0.25 \times (1 - 0.35)^{-2} + \dots} = 0.447 \quad (12)$$

按此方法可以得到变权后的权重系数为

$$A = [0.447 \quad 0.274 \quad 0.187 \quad 0.092] \quad (13)$$

4) 状态评估。

将权系数分配到评判矩阵中,即可得到一级模糊评判的状态评估的结果^[15-16]。如果设备的指标分为若干层次,每个层次中有不同的子项目评估,将评估 B 结果继续作为新的评判矩阵 V ,按照更上一级的评估项目的权重分配,还可以得到 2 级、3 级模糊评判结果。这里仅进行 1 级模糊评判计算,即

$$B = A \times V = [0.447 \quad 0.274 \quad 0.187 \quad 0.092] \times \begin{bmatrix} 0 & 0.671 & 0.329 & 0 \\ 0 & 0.95 & 0.05 & 0 \\ 0.358 & 0.642 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.159 \quad 0.680 \quad 0.161 \quad 0] \quad (14)$$

根据隶属度最大的原则,“2 级”的隶属度最大,因此判断该避雷器的状态为 2 级,即设备出现不良状态但仍可继续运行。结合参考文献[9], U_{1mA} 偏差大于 3% 小于 5%、 $0.75 U_{1mA}$ 泄漏电流大于 $40 \mu A$ 小于 $50 \mu A$ 及阻性电流分量增加大于 30% 小于 50%,避雷器阀片可能处于轻度老化或受潮状态,虽仍可以运行,但应加强监测。

3 变电设备评估定级应用

将模糊评判方法应用于近 3 年北京电力公司的变电设备评估中,主要评估对象是变压器和组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备。

3.1 变压器设备评估

通过对北京市电力公司近 3 年变压器运行数据进行分析得到变压器主要问题为违反 18 项反措规定,随着逐年治理,该项问题呈现下降趋势,设备缺陷与隐患数量相当,总数保持相对稳定。各类问题随着年份变化情况如图 2 所示。

通过评估得到,近 3 年主变压器运行情况基本稳定,未发生变压器本体绝缘造成的破坏性故障,发

现的缺陷主要为变压器渗漏油、35 kV 铝线圈变压器、单根接地引下线、有载调压开关、主变容量不足、超过 15 年未更换储油柜胶囊等问题,以上大部分属于变压器附件类的缺陷,基本均能得到及时处理,对于设备存在的隐患及不满足 18 项反措要求等问题,根据需要安排大修技改项目处理,对于其它问题,制定差异化管控措施。应用新的评估方法后,3 年内存在隐患与缺陷的变压器数量有明显下降趋势。

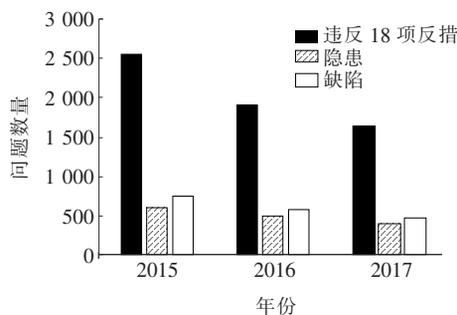


图 2 近 3 年变压器评估情况

Figure 2 State evaluation of transformers

3.2 组合电器设备评估

通过对北京市电力公司近 3 年组合电器运行数据进行分析得到组合电器主要问题为违反 18 项反措规定,由于治理受停电安排、电网可靠性要求影响,导致治理进度较慢,设备缺陷与隐患数量相当,数量呈逐年下降的趋势。各类问题随着年份变化情况如图 3 所示。

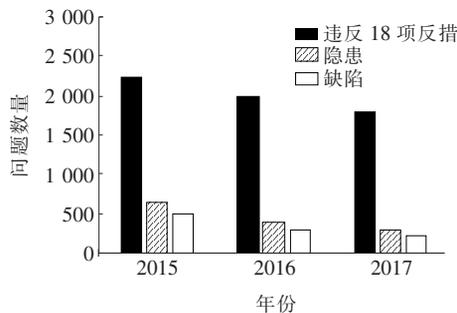


图 3 近 3 年组合电器评估情况

Figure 3 State evaluation of GIS

目前北京市电力公司在运的组合电器主要为 66、110、220、500 kV 组合电器。未落实反措要求的主要问题有:组合电器最大气室气体量过大问题、220 kV 及以上 GIS 母线隔离开关与母线共用气隔室问题、未定期开展弹簧机构断路器机械特性试验问题、新投运的 220 kV 及以上开关的压力闭锁继电器双重化配置问题等。应用新的评估方法后,3 年内存在隐患与缺陷的组合电器数量有明显下降趋势。

4 结语

该文提出应用于变电设备评估与管理的模糊评判方法,与传统的单项指标打分相比,该方法能根据设备各项运行指标对设备运行状况做出整体性评估,从而更科学合理地安排检修计划。该文提出的评估方法及管理理念在生产实际中应用3年来,设备状态管控水平大幅提升,检修、维护策略更加合理,变电设备问题数量逐年下降,电网供电可靠性水平持续提升。

参考文献:

- [1] 丁茂生,孙维佳,蔡星浦,等. 电力系统极端事件的风险评估与防范[J]. 中国电力,2020,53(1): 32-39+65.
DING Maosheng, SUN Weijia, CAI Xingpu, et al. Risk assessment and prevention of extreme events in power systems[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 32-39+65.
- [2] Q/GDW 1903—2013. 输变电设备风险评估导则(试行)[S].
- [3] 张伟. 基于状态评价及风险评估的变电设备状态检修方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
- [4] 朱太云,陈忠,杨为,等. 电网设备差异化状态检修新模式研究[J]. 高压电器,2020,56(1):236-240.
ZHU Taiyun, CHEN Zhong, YANG Wei, et al. Study on the new mode of differential state maintenance of power grid equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):236-240.
- [5] 陈丽光,何绍洋,俞晓峰,等. 考虑设备故障率时变特性的电网检修计划优化编制[J]. 智慧电力,2020,48(12):109-115.
CHEN Liguang, HE Shaoyang, YU Xiaofeng, et al. Optimal formulation for power grid maintenance scheduling considering time-varying characteristics of equipment failure rate[J]. Smart Power, 2020, 48(12):109-115.
- [6] 方涛,钱晔,郭灿杰,等. 基于天牛须搜索优化支持向量机的变压器故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(20):90-96.
FANG Tao, QIAN Ye, GUO Canjie, et al. Research on transformer fault diagnosis based on a beetle antennae search optimized support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20):90-96.
- [7] 唐俊熙,何迪,郭创新. 基于模糊综合评估的电网人因可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(3):63-68.
TANG Junxi, HE Di, GUO Chuangxin. Analysis of human reliability in power grid based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 63-68.
- [8] 徐贵林,罗斌,马瑞. 基于模糊综合评判的火电厂节能状态评估[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(1):86-90.
XU Guilin, LUO Bin, MA Rui. Fuzzy comprehensive evaluation based energy saving condition assessment of thermal power plants[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 86-90.
- [9] 王福忠,李媛媛,韩素敏,等. 基于模糊综合评价的矿用提升机电气传动系统状态评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):166-172.
WANG Fuzhong, LI Yuanyuan, HAN Sumin, et al. Status assessment of mine hoist electric drive system based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9):166-172.
- [10] 胡姚刚. 并网风力发电机组的状态评估[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [11] 雷春燕,刘从法,罗日成. 基于多目标智能加权灰靶理论的电力变压器状态维修决策[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(2):85-88.
LEI Chunyan, LIU Congfa, LUO Richeng. Condition-based maintenance decision of transformer based on multi-attribute intelligent grey target[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(2):85-88.
- [12] Q/GDW 11241—2014. 金属氧化物避雷器检修决策导则[S].
- [13] 徐辉,沈荣顺,胡月琰,等. 一种利用阻性电流数据进行预测的避雷器状态检修方法[J]. 电瓷避雷器,2016(6):162-165.
XU Hui, SHEN Rongshun, HU Yueyan, et al. A condition-based maintenance method of arrester predicted by using resistive current data [J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 162-165.
- [14] 谢鹏,张国栋. 金属氧化物避雷器试验测试方法的发展及应用[J]. 电瓷避雷器,2006(5): 36-38.
XIE Peng, ZHANG Guodong. Development and application of MOA testing methods [J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(5): 36-38.
- [15] 毛慧明,张天运. 不同场所金属氧化物避雷器的智能监测方法[J]. 电瓷避雷器,2018(4): 124-127.
MAO Huiming, ZHANG Tianyun. Intelligent monitoring methods of MOA in different scenarios[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4): 124-127.
- [16] 甘锡淞,傅成华,余洋. 基于模糊环境 AMPSO-SVM 氧化锌避雷器故障诊断研究[J]. 电瓷避雷器,2017(5):41-46.
GAN Xisong, FU Chenghua, YU Yang. Study on fault diagnosis for Zinc Oxide arrester based on hybrid fuzzy environment AMPSO-SVM [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5):41-46.