

不同运行年限的 GIS 缺陷率统计分析与运维建议

张 欣¹, 李高扬², 黄荣辉¹, 向 真¹, 赵宇明¹, 姚森敬¹, 王小华²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 随着组合电器运行年限的增高,其缺陷率往往呈现增高的趋势。通过统计近年来南方电网部分地区在不同运行年限组合电器的缺陷率情况,并对组合电器的控制系统、密封、机构等组成部分的缺陷单独进行详细的分析,揭示了不同类别缺陷的增长变化规律,并对运行在不同阶段组合电器的运维重点提出了建议。
关键词: GIS; 运行年限; 缺陷率; 控制系统; 密封; 机构

Statistical Analysis of Defects and Maintenance Advice for GIS in Different Operating Years Above 110 kV

ZHANG Xin¹, LI Gaoyang², HUANG Ronghui¹, XIANG Zhen¹,
ZHANG Yuming¹, YAO Senjing¹, WANG Xiaohua²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518001, China;

2. State Key Lab. of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The defect rate of gas insulated switchgear (GIS) usually increases along with its operating years. According to statistical analysis of defect rate of GIS in different life period, and the similar analysis for its components respectively, including the control system, seal ring and mechanism, the growth rule of different kind of defects is revealed. Moreover, some maintenance advice for GIS of different lifetime is also proposed.

Key words: gas insulated switchgear(GIS); operating year; defect rate; control system; seal; mechanism

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)因可靠性高、维护简单、占地面积小、绝缘性能优良等诸多优点受到广泛运用。但随着近年 GIS 设备用量的增加,其缺陷和事故也逐渐显露,且 GIS 设备往往运行于枢纽电站和关键地区,发生事故往往会导致严重的后果,GIS 的运行可靠性是 GIS 全生命周期管理的重要依据^[1-2]。目前的 GIS 可靠性和全生命周期管理的研究和实践中较依赖专家经验,或是结合在线监测的一些方法^[3-4],对基础数据的收集和整理多集中在可靠性评价指标和缺陷表现上^[5-7],缺乏对运行时间这个关键变量的统计分析。

相对于导致严重后果的事故,缺陷是运维人员日常维护的重点,且数量较多更易进行统计分析。

文中主要关注 GIS 运行过程中发生的缺陷,并对不同运行年限设备不同组成部分的缺陷率进行了统计分析,为对不同运行年限设备有针对性的维护和进行事故预防提供了依据。

1 110 kV 以上不同运行年限 GIS 的缺陷率

GIS 由于结构的复杂性,其寿命试验通常只针对单个零部件,整机的寿命试验由于时间和空间限制较难完成,因此现场数据成为 GIS 可靠性数据收集的主要途径。

对南方电网某区域 2006—2013 发生的 GIS 缺陷数据进行数理和排查,共筛选出一千二百余条有效的缺陷数据。截止到 2013 年底,该区域共有 GIS 间隔 4 338 个,其中 2009—2013 年投运有 2 010 间隔;2004—2008 年间有 1 694 个间隔;1999—2003 年有 470 个间隔;1999 年之前的间隔有 164 个。绝大

部分的设备在近十年间投运,处于设备运行的早期阶段。但是在未来几年,有相当多的 GIS 间隔运行时间将进入十年以上。

现场缺陷数据存在较多的冗余和混乱,必须首先进行筛选。区别于一般的寿命实验数据^[9],发生缺陷的 GIS 大部分经过修复后会继续投入运行。在此将各个零部件看作独立的系统,若修复方式是对某个零部件的更换,则认为此零部件修复如新;若修复方式未从根本上消缺,如 SF₆ 泄漏后仅进行补气操作,则认为缺陷部件修复非新。对于同一台 GIS 设备因处理不及时而重复发生的同类缺陷,以第一次缺陷为准^[9]。

以两年作为分类间隔,统计得到不同运行年限的 GIS 设备的缺陷率见图 1。



图 1 不同运行年限的 GIS 设备缺陷率

Fig. 1 Defect rate of GIS in different operating years

从图 1 可以看到运行年限小于 10 年的 GIS 设备缺陷率在 5% 左右,且缺陷率有缓慢下降的趋势。运行时间大于 13 年的设备缺陷率出现了明显升高。

结合可靠性理论中“浴盆曲线”的相关理论^[9],GIS 设备的缺陷率随时间可以分为 3 个阶段:第 1 阶段为早期缺陷阶段,主要是由设计和制造工艺的原因导致的先天缺陷,如材料缺陷、装配缺陷等,此阶段主要在 0 到 4 年间;第 2 阶段为偶然缺陷阶段,GIS 的缺陷率较低且呈现近似常数的特点,在第 5 到 12 年;从第 13 年左右起,GIS 设备进入损耗缺陷阶段,缺陷率迅速上升。

2 GIS 设备各缺陷类别在不同运行年限的缺陷率

2.1 GIS 设备缺陷分类统计

从元件的寿命实验数据推断 GIS 设备整体的可靠性实际上是一个自下而上的推断过程。文中将 GIS 的缺陷分解到各个系统进行缺陷分析,是一个自上而下的分析过程,目前对 GIS 缺陷的分类仍然缺乏统一而有效的分类方法。笔者依据缺陷发生器件的详细位置,结合功能分区,将 GIS 的缺陷分为密

封、控制系统、机构、绝缘子、灭弧室、SF₆ 气体成分和其他 7 个部分。各缺陷种类详细的分解见表 1。

表 1 GIS 缺陷分类

Table 1 Classification of GIS defects	
类别	缺陷详细位置及表现
密封	SF ₆ 气体泄漏
	二次系统:分合闸线圈、接触器、各种继电器等控制元件;
控制系统	动力系统:电机、空压机等动力元件;
	汇控柜:柜内加热器等。
机构	机构本体:传动杆、合闸挚子等传动元件;液压机构的漏油缺陷;气动机构的漏气缺陷等;
	机构箱体:柜内加热器等。
灭弧室	灭弧室内部缺陷。
绝缘子	盆式绝缘子、内部其他支撑绝缘子等。
SF ₆ 气体成分	SF ₆ 气体湿度超标;
	SF ₆ 气体组分异常。
其他	表计指示:带电显示装置、计数器、气压表等;
	部件损坏:门、转换开关等一般部件;
人为因素、载流系统等。	

各类缺陷数量占总体的比例见图 2。

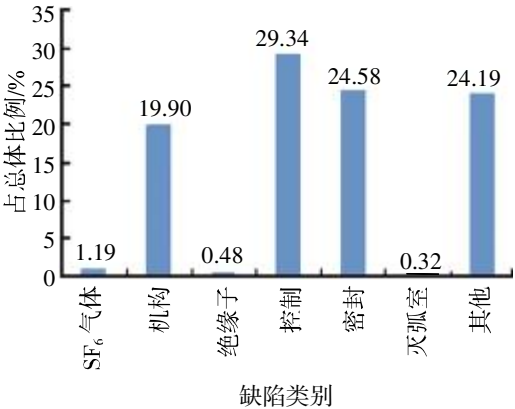


图 2 各类缺陷占缺陷总体的比例

Fig. 2 Proportion of different kinds of defects

图 2 中除其他缺陷外,占比最大的是控制系统、密封和机构 3 个部分。GIS 组成复杂,其缺陷率随运行年限分布实际上是各个组成系统缺陷分布的叠加结果。

2.2 控制系统缺陷

控制系统由于涉及的元器件众多,结构复杂,其缺陷原因也体现多样而分散的特性。

在此对控制系统的定义是二次系统和动力系统的结合。二次系统主要由分合闸线圈、接触器等一系列控制器件组成。而动力系统则指电动机、油泵等动力器件。

不同运行年限的 GIS 控制系统的缺陷率见图 3。



图3 不同运行年限 GIS 控制系统缺陷率

Fig. 3 Defect rate of control system of GIS in different operating years

从图3可以看到,控制系统缺陷随运行年限的增加在总体上呈现增长的趋势,没有明显的早期缺陷阶段和偶然缺陷阶段的分界。在前12年的增长速度较慢,之后的增长速度加快,从缺陷率的分布可以看出控制系统较明显的自然老化趋势。

在统计得到的370起控制系统缺陷中,有266起二次系统的缺陷和92起动力系统缺陷以及少量汇控柜缺陷。在二次系统缺陷中,占比最多的为分合闸线圈缺陷,达62起,占二次缺陷的23.34%;其次为储能继电器、密度继电器等继电器缺陷,占比20.30%;微动开关、接触器和辅助开关缺陷分别占比13.91%、12.78%和12.41%。在南方电网2009—2013年统计得到的50次GIS事故中,与控制系统相关的有一起辅助接点短路引发的事故和一起线圈卡涩引发的事故。

在92起动力系统缺陷中,最常见的是电机缺陷,达到60起;除此之外还有26起空压机缺陷和6起油泵缺陷;电机碳刷积炭、卡阻最终导致的烧毁是常见的电机缺陷发生过程。

2.3 密封缺陷

密封缺陷的直接表现形式为 SF_6 气压低于规定值,相对与其他系统,密封缺陷发生的元件较为单一^[10]。在有明确缺陷部位的记载中,由波纹管破裂和螺栓松动导致的 SF_6 气体泄漏占密封缺陷的3.2%;通过 SF_6 压力表的泄漏占5.1%;剩余密封缺陷中大部分是因密封圈自身表面的裂缝、凹陷、凸起问题和结合面结合不良等导致;通过各种焊缝导致的泄漏极少。不同运行年限GIS密封缺陷率见图4。

由图4可见,不同寿命阶段的GIS设备缺陷率表现出较为明显的“浴盆曲线”形状,类似于总体的缺陷率分布,可分为3个阶段:从安装开始到第8年左右的设备,其缺陷率在大体上呈现下降趋势,此阶段的主要缺陷原因是元件的质量及安装问题,可见

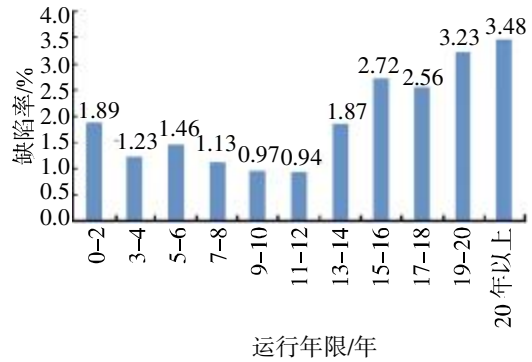


图4 不同运行年限 GIS 密封缺陷率

Fig. 4 Defect rate of sealing system of GIS in different operating years

在密封圈的设计和安装水平上依然有一定的提升空间;第2阶段为9-12年,呈现较为稳定且较低的缺陷率;从运行13-14年的设备开始,密封缺陷出现了明显的上升趋势。密封圈在实际现场环境中发生缺陷性老化的时间在运行的第13年左右。

目前对于密封缺陷现场处理方式有相当一部分是进行补气操作到额定气压,该方式只能暂时解决问题,经过一段时间 SF_6 泄漏问题往往会复发;若要完全解决 SF_6 泄漏问题,需寻找漏点并进行补漏或更换操作。

2.4 机构缺陷

不同运行年限GIS机构的缺陷率见图5。

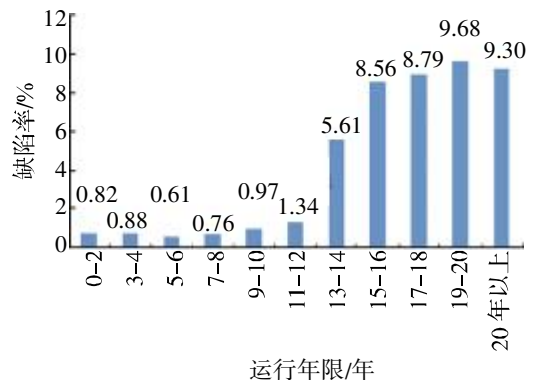


图5 不同运行年限 GIS 机构缺陷率

Fig. 5 Defect rate of mechanism of GIS in different operating years

不同于密封和控制系统的缺陷,机构缺陷呈现出较为独特的特点:在运行年限小于12年的设备上一直呈现较低的缺陷率;而到达第13年之后其缺陷率出现了明显的上升并稳定在高位。随着设备机构动作次数的增加,动作器件的磨损、变形逐渐累积,并最终以各种缺陷的形式表现。在运行年限超过14年的设备中,机构缺陷占比接近全部缺陷的一半。

在机构缺陷中,占比最大的是液压机构渗漏油缺陷,达机构缺陷的48.23%;其次是气动机构的漏

气缺陷,占比 10.18%;且液压机构渗漏油和气动机构漏气分别占液压机构缺陷和气动机构缺陷的大部分。机构结构的复杂性伴随着缺陷的多样性^[11],传动杆、缓冲器、插销、脱扣器等位置都发生过缺陷。上述单个部件的缺陷中占比最大的是传动杆错位者断裂缺陷,占机构缺陷的 10.18%。机构的事故和缺陷的分布存在偏差,在南方电网 50 起事故记录中,有 3 起与机构相关,分别是传动轴螺母松动,伸缩节断裂和动触头不对中导致,而没有占比最大的漏油和漏气缺陷。漏油和漏气缺陷是一个渐变的过程,会导致开关性能下降但往往不至于引起开断失败,机构事故多是由某个传动部件的失效断裂而导致。

2.5 绝缘、SF₆ 气体成分和灭弧室等缺陷

2.5.1 绝缘缺陷

各系统的缺陷数量受发现难度的影响很大。由于盆式绝缘子和其他支撑绝缘子位于 GIS 内部,其缺陷在日常的运维过程往往难以被发现^[12]。在统计得到的 7 次绝缘缺陷中,有 1 起绝缘盆放电缺陷,6 次绝缘子的爆裂脱落缺陷,都发生在其运行的前 5 年之内。事实上,在南方电网 2009—2013 年统计得到的 50 次 GIS 事故过程中,有 26 起的事故都由绝缘子引起,最常见的绝缘事故是表面粉尘造成的击穿,数量到达 15 起。可见绝缘问题的主要原因是设备的质量或安装问题。在设备的制造安装阶段,场内安装工艺把关不严,环境中粉尘含量超标,埋下了安全隐患;同时绝缘缺陷难以被发现,在运行过程中出现事故往往会导致严重的后果。

2.5.2 SF₆ 气体成分缺陷

SF₆ 气体的缺陷常不是独立的,而与密封、绝缘缺陷相关性很大^[13-14]。在统计得到的 15 起 SF₆ 气体缺陷中,有 13 起微水超标缺陷和 2 起分解产物超标缺陷。微水超标大多发生在运行时间超过 5 年的 GIS 设备上,主要原因是长期运行过程中气体通过接口、法兰、铸件的沙孔等渗入等;气体组分异常主要是 SO₂ 等气体含量超标。事故记录中有一起微水超标事故。

2.5.3 灭弧室缺陷

常见的灭弧室事故的主要原因是由于异物存在,在振动和气流的影响下,引起电场畸变和绝缘性能下降,最终导致灭弧过程失败,过去的事故中曾有两例此类记录。这类缺陷也缺乏有效且可普及的探查手段。此次统计仅得到 4 起灭弧室缺陷,包括内部的异响、异物和短路,灭弧室缺陷的预防必须从开始的设计和安装步骤抓起。

2.5.4 其他缺陷

除上述 6 大系统之外的其他缺陷大部分是表计和指示缺陷,包括计数器缺陷和带电显示装置异常等,占其他缺陷的 60%以上;但由于发现难度低和危害不大,严重和危急等级的表计缺陷仅占全部表计缺陷的 2%左右。除表计缺陷外,其他缺陷还包括部件损坏、人为失误和接触不良导致的发热等。其中需特别注意的是接触不良引起的电火花和电晕放电在过去 50 起事故中占比达到了 10%。

2.6 国内外 GIS 设备缺陷率和事故率比较

南方电网中国产 GIS 设备占比较多的厂家有北京北开、西安西开、河南平高、现代重工和新东北等;而国外较有代表性的厂家有 ABB、西门子、阿尔斯通、三菱等。统计显示,国内 GIS 设备的平均缺陷率为 5.47%,国外为 3.18%;对事故而言,国内 GIS 平均事故率为 0.16%,而国外为 0.12%。国内与国外生产的 GIS 缺陷率与事故率的比值分别为 1.72 和 1.33。进口 GIS 设备无论在缺陷还是事故上都有比国内设备有更为优异的表现;国产设备在事故上与进口设备的差距较小,而在缺陷上则表现出与进口设备较大的差距。

3 GIS 设备的运维建议

1)目前南方电网的电器设备检修和预防性实验指导下,GIS 设备的大多数检修依项目不同大多以 3 年或者 6 年为一个检修周期。如断路器的时间参量以 6 年为周;辅助回路和控制回路的绝缘电阻和交流耐压实验在 500 kV 设备以 3 年为一个周期,500 kV 以下以 6 年为周期。就统计的结果来看,对于运行时间较长的设备,其缺陷率常可达之前的 2 倍甚至更高;考虑到过多的检修可能对设备造成不必要的损伤,因此对于运行时间已超过 12 年的设备,建议检修周期缩短至之前的一半左右是比较合适的。

2)密封缺陷体现了较高的早期缺陷率,应确保密封胶圈的质量,并在安装过程中严格遵守安装规程,保证精度。同时来自绝缘、灭弧室的缺陷也大多与设备的生产和安装过程相关。在 GIS 的制造阶段,应严格控制周围环境清洁度,保证安装质量。GIS 局部放电的超高频、超声波等监测技术应进一步推广^[15],建立包括局放和泄漏电流^[16]、内部温度场监测^[17]、线圈电流和分合闸行程^[18]、振动信号^[19]、SF₆ 气压及成分^[20]等多种监测手段结合在线监测系统,并针对不同设备的实际工况灵活调整监测组合。对每套组合电器建立相应的健康档案,并建立以组合电器个体为单位的数据记录机制。

3)机构的早期缺陷并不明显,在超过15年之后有显著的提高,因此对于运行时间较长的断路器,可进一步加强巡查。对液压机构和气动机构,需加强对漏油和漏气缺陷的巡查力度;设备的日常机械特性实验数据,在是否达标的基础上,可进行进一步的趋势分析以发现隐含缺陷。

4)控制系统是GIS设备的关键部位,其缺陷随运行时间的增加呈现稳定的增长。须注意控制系统的缺陷直接体现常是机构的动作失败,应仔细区分。

5) SF_6 气体成分的异常往往是由密封或者局部放电引起,加强对 SF_6 气体分解产物监测对其他隐含缺陷的发现也有帮助。

6)目前的缺陷记录仍缺乏统一的记录标准,建议对设备的缺陷情况、特别是同类设备的缺陷,建立完善的分类和上报机制,以进一步总结缺陷规律和及时发现家族性缺陷。

4 结语

文中通过统计GIS设备控制系统、密封、机构等组成部分和总体在不同运行时间设备上的缺陷率分布,研究了不同种类缺陷的缺陷率变化规律,并据此对GIS设备不同时期的运维重点提出了建议。

参考文献:

- [1] 吴贵义,马燕峰,李军,等. 基于全寿命周期成本的高压断路器综合寿命评估[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(1):72-77.
WU Guiyi, MA Yanfeng, LI Jun, et al. Comprehensive life assessment of high voltage circuit breaker based on life cycle cost[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition),2014,41(1): 72-77.
- [2] 王 一,何奔腾,王慧芳. 基于全寿命状态的设备可靠性研究[J]. 电网技术,2011,35(8):207-211.
WANG Yi, HE Benteng, WANG Huifang. Research on equipment reliability based on life cycle states[J]. Power System Technology,2011,35(8): 207-211.
- [3] 李东妍,荣命哲,王 婷,等. 超高压GIS剩余寿命评估方法综述[J]. 高压电器,2011,47(10):87-92.
LI Dongyan, RONG Mingzhe, WANG Ting, et al. Review of residual service life estimation methods on extra-high voltage GIS[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(10): 87-92.
- [4] YANG S, XIANG D, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010,25(11): 2734-2752.
- [5] 宋 杲,李 炜,宋竹生,等. 国网公司系统组合电器运行情况分析[J]. 高压电器,2009,45(6):78-82.
SONG Gao, LI Hui, SONG Zhusheng, et al. operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China [J]. High Voltage Apparatus,2009,45(6): 78-82.
- [6] 韩克存,刘福涛. 组合电器类设施可靠性统计方法[J]. 山东电力技术,2012,4(4):46-50.
HAN Kecun, LIU Futao. Discussion on statistical methods of GIS reliability[J]. Shandong Electric Power,2012,4(4): 46-50.
- [7] 武 星,游一民,成 勇,等. 高压开关设备可靠性评价指标及计算方法探究[J]. 高压电器,2012,48(5):93-98.
WU Xing, YOU Yimin, CHENG Yong, et al. Research of reliability evaluation indices and calculation method for high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(5): 93-98.
- [8] 张 黎. 电气设备寿命分布分析[D]. 济南:山东大学,2005.
- [9] 赵 宇,杨 军,马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [10] 郭清海,邝 石. GIS设备渗漏原因分析及对策[J]. 电网技术,2000,24(9):8-9.
GUO Qinghai, KUANG Shi. Analysis on leakage of GIS equipment and its countermeasures[J]. Power System Technology,2000,24(9): 8-9.
- [11] 李 刚,林其雄. 高压断路器液压机构故障诊断、分类和处理方法的探讨[J]. 高压电器,2001,37(4):50-51.
LI Gang, LIN Qixiong. Discussion on diagnosis, classification and handling of the malfunction for hydraulic pressure actuator in high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2001,37(4): 50-51.
- [12] 孙 苗,薛 源,郭宏伟. 126 kV GIS设备典型故障分析与处理[J]. 高压电器,2010,46(11):95-98.
SUN Zhuo, XUE Yuan, GUO Hongwei. Analysis and solution to a 126 kV GIS equipment fault[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(11): 95-98.
- [13] 王 宇,姚唯建,庄贤盛,等. 广东省220 kV及以上 SF_6 组合电器气体中 SO_2 和 H_2S 含量的现状分析[J]. 广东电力,2008,21(10):10-14.
WANG Yu, YAO Weijian, ZHUANG Xiansheng, et al. Situation and analysis of sulfur dioxide and sulfureted hydrogen content in sulfur hexafluoride of gas insulated switchgear (220 kV and above) in Guangdong province[J]. Guangdong Electric Power,2008,21(10): 10-14.
- [14] 钟卫良. SF_6 电气设备中气体微水含量超标原因分析及处理[J]. 电网技术,2006(s1):223-224.
ZHONG Weiliang. Cause analysis and treatment for excessive water content in SF_6 electrical apparatus[J]. Power System Technology,2006(s1): 223-224.
- [15] LI Tianhui, RONG M, CHEN Zheng, et al. Development simulation and experiment study on UHF partial discharge sensor in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(4): 1421-1430.

(下转第194页)

- [10] 李娟. 高压断路器在线监测信号的小波处理方法[J]. 北京机械工业学院学报, 2007, 22(1): 19-22.
LI Juan. New signal process scheme based on wavelet for online monitoring of high voltage circuit breaker[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2007, 22(1): 19-22.
- [11] 郭丹枫, 庞兵. 振动信号处理的时频域方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(4): 15-17.
GUO Danfeng, PANG Bing. Methods of time-frequency processing for vibration signal[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2007, 12(4): 15-17.
- [12] 沈力, 黄瑜珑, 钱家骊. 断路器振动信号的相频特性及在监测中的应用[J]. 电工技术学报, 1997, 13(2): 42-45.
SHEN Li, HUANG Yulong, QIAN Jiali. Phase-frequency characteristic of vibration signal in circuit breaker and its application in condition monitoring[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 13(2): 42-45.
- [13] 杨武, 荣命哲, 陈德桂, 等. 高压断路器操作振动信号处理的一种新方法[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(3): 57-61.
YANG Wu, RONG Mingzhe, CHEN Degui, et al. A new method of high-voltage circuit breaker's vibration signal processing[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(3): 57-61.
- [14] 王成友, 闫红华, 刘灿东, 等. 液压式高压断路器机械特性在线监测故障几率研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 86-91.
WANG Chengyou, YAN Honghua, LIU Candong, et al. Analysis on online monitoring fault probability of mechanical characteristics for hydraulic high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 86-91.
- [15] 臧春艳, 廖一帆, 肖声扬, 等. 振动法检测支柱绝缘子缺陷的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 8-12.
ZANG Chunyan, LIAO Yifan, XIAO Shengyang, et al. Vibration method for the defects detection of post insulator[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 8-12.
- [16] 李晓红, 郭慧英, 刘云, 等. 基于振动法检测的瓷绝缘子损伤探讨[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 101-103.
LI Xiaohong, GUO Huiying, LIU Yun, et al. Research on vibration-based damage detection method of porcelain insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 101-103.
- [17] 刘冠辰, 王孟, 郑欣, 等. 基于振动声学对瓷支柱绝缘子强度的检测技术[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 44-48.
WANG Guanchen, WANG Meng, ZHENG Xin, et al. Strength detection of porcelain post insulator based on the acoustic vibration technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 44-48.

杨鼎革(1982—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为开关设备及其故障诊断、检修技术。

(上接第 188 页)

- [16] 陈攀, 孙才新, 米彦, 等. 一种用于绝缘子泄漏电流在线监测的宽频带微电流传感器的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 144-148.
CHEN Pan, SUN Caixin, MI Yan, et al. Research of broad bandwidth micro-current sensor character for insulator leakage current monitoring system[J]. Proceedings of The Chinese Society For Electrical Engineering, 2005, 25(24): 144-148.
- [17] 师晓岩, 查伟, 孙福, 等. UHV GIS 内部温度场的红外热诊断技术[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 16-20.
SHI Xiaoyan, ZHA Wei, SUN Fu, et al. Inner temperature distribution of UHV GIS using infrared thermo-diagnosis technology[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 16-20.
- [18] STEPHEN B, STRACHAN S M, MCARTHUR S J, et al. Design of trip current monitoring system for circuit breaker condition assessment[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 89-95.
- [19] HUANG Jian, HU Xiaoguang, GENG Xin. An intelligent fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EMD energy entropy and multi-class support vector machine[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 400-407.
- [20] SUEHIRO J, ZHOU Guangbin, HARA M. Detection of partial discharge in SF₆ gas using a Carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2005, 105(2): 164-169.

张欣(1984—), 男, 学士, 工程师, 研究领域主要集中在电力传输和变电设备状态监测、数据的分析和监测方面。