

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.037

一起220 kV GIS设备异响缺陷分析与处理

刘 媛, 贾勇勇, 杨景刚, 宋思齐, 高 山, 李洪涛
(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要:文中针对一起220 kV GIS设备在运行过程中产生的异响缺陷,结合现场停电解体检查,对可能引起设备异响的原因做了详细的分析和验证。结果表明,内部放电及内部紧固件松动导致的设备异常振动都可引起设备异响及局部放电检测结果超标,该次缺陷的原因为设备在安装时没有将卡簧装入卡簧槽,造成卡簧始终卡在导杆上,在长期的运行过程中产生了不可恢复的变形,伴随着导杆的热胀冷缩,卡簧与导杆存在的微弱位移使得卡簧最终落入卡簧槽,然而形变使得卡簧与卡簧槽尺寸不匹配,在高电压、大电流情况下,屏蔽罩与卡簧在电磁力的作用下产生异常振动,引发设备异响。总结该缺陷的经验,为了避免同类缺陷的再次发生,建议在设备生产制造阶段进一步完善设备安装工艺管控措施,在设备运维阶段加强放电类及机械类缺陷检测与诊断分析,在设备出现缺陷时第一时间明确缺陷原因,并采取针对性措施,严防缺陷发展为故障。

关键词: 气体绝缘设备; 超声波局放检测; 紧固件松动; 电磁力; 异响缺陷

Analysis and Treatment of an Abnormal Noise Defect in a 220 kV Gas Insulated Switchgear

LIU Yuan, JIA Yongyong, YANG Jinggang, SONG Siqi, GAO Shan, LI Hongtao
(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: An abnormal noise defect occurred in operation of a 220 kV gas insulated switchgear (GIS) is analyzed in detail by means of overhaul inspection, and the possible causes of the abnormal noise are discussed. The result shows that both the abnormal vibration of the GIS due to loose of the internal fastener and the internal discharge can cause the abnormal noise and make the partial discharge exceed the standard. This abnormal noise defect is due to that the spring was not put into the spring slot in the GIS installation, so it was clipped on the guide rod to suffer non-recoverable deformation during long-time operation process. Although the weak displacement between the spring and the guide rod caused by thermal expansion and cold contraction made the spring eventually fall into spring slot, the deformation led the spring not to match the spring slot. Consequently, abnormal vibration of the shield and spring happened under high voltage and large current as well as the effect of electromagnetic force, resulting in the abnormal noise of the equipment. To avoid this kind of defects, some precautionary measures are suggested as follows: 1) In the equipment manufacturing phase, the control of equipment installation should be improved; 2) In the equipment operation and maintenance phases, the detection and diagnosis analysis of discharge and mechanical defects should be strengthened; and 3) Once defect is detected, the cause of the defect should be clearly defined in time, and pertinent measures should be taken to prevent the defect from developing to a failure.

Key words: gas insulated switchgear; ultrasonic detection of partial discharge; fastener loose; electromagnetic force; abnormal noise defect

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)因具有占地面积和空间小、受外界环境干扰小、运行安全可靠、维护工作量少、检修周期长等优点,已经越来越广泛地被采用,特别是在高电压等级电网中,其优点更突出,装备量大,呈逐年快速增长趋势^[1~4]。由于GIS是全封闭组合电力设备,一旦出现事故,造成的后果比分离式敞开设备严重的多,其故障修复尤为复杂,且其停电范围大,常涉及非故障元件^[5~9]。GIS实际运行中除了放电性故障之外,机械性故障也是事故发生的主要原因^[9~12]。GIS机械性缺陷会导致设备内外部振动,长期异常振动可能造成螺栓松动,损害绝缘子和绝缘支柱,引起气体泄漏等,引发电网安全事故^[12~20]。如何提升GIS设备运行可靠性,及时发现GIS设备运行过程中存在的潜在缺陷隐患,对于保障电网运行安全至关重要。

文中针对某220 kV变电站内的GIS设备在运行过程中产生的异响缺陷,结合现场停电解体检查,对可能引起设备异响的原因做了详细的分析和验证,结果表明,引起该次设备异响的原因为GIS母线卡簧松动,在电磁力的作用下设备内部导体振动引起。

1 故障过程

2016年3月8日,某220 kV变电站运维人员在巡视时,发现220 kV GIS正母线筒位于2601间隔处有轻微的疑似异常放电声。随即组织检修试验人员赴现场进行超声波局放检测,发现吸附剂手孔上侧处的信号幅值为25 dB,后经专业测试人员与厂家人员复测,经过精确定位,最终明确了信号最大值点在吸附剂盖左边相邻壳体上,见图1。

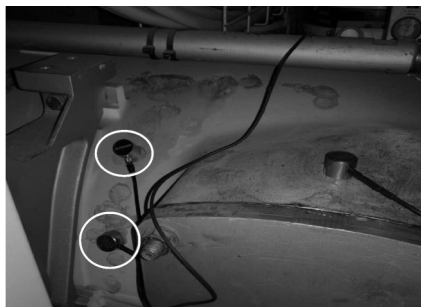


图1 220 kV GIS正母线超声检测

Fig. 1 Ultrasonic partial discharge detection of 220 kV GIS bus

由于设备内部紧固件松动引发的异常振动也会导致超声波检测结果超标,而该设备内部未安装特高频传感器,现场不具备特高频检测及局部放电

检测条件,因此无法确定设备异响是由绝缘缺陷导致的放电引起还是由内部紧固件松动导致的异常振动引起。查阅设备内部结构图,发现该处内部为母线支撑绝缘子,考虑到支撑绝缘子缺陷引发的放电发展较快,因此定性该缺陷为紧急缺陷,申请对正母线进行停电隔离。

2 解体检查

在解体前对该次缺陷的原因进行了初步的分析,认为产生异响缺陷的原因可能有5个方面,在3月11日开盖前各项准备工作完毕后,首先打开超声波检测超标的气室,对可能产生异响的原因逐一进行了检查与验证,具体情况如下。

1)吸附剂罩局部松动检查。手孔盖打开后首先检查了吸附剂罩是否松动,见图2。仔细检查后未发现螺丝松动或吸附剂罩变形以及吸附剂外漏情况,因此排除吸附剂泄漏引起局放可能。



图2 吸附剂罩外观情况

Fig. 2 The exterior of adsorbent cover

2)母线支撑绝缘件检查。用人眼及内窥镜对气室内所有绝缘件进行了探照检查,所有绝缘件表面均未发现表面脏污、爬电或受损情况。

3)壳体内表面检查。同样采用内窥镜结合人眼观察对母线壳体内表面进行了仔细检查,在壳体底部发现头发丝状物质,见图3。仔细检查该物质附近未发现放电痕迹,且前期对该位置对应的壳体进行超声检测时,未检测到局放信号,因此基本排除该物质引起放电可能,该头发丝状物质可能为气室打开吸附剂罩及母线支撑绝缘件检查时由外界带入。

4)角落不易观察位置检查。对气室内部不易观察的角落位置仔细检查,在B相导体支撑绝缘子与壳体固定底座的凹槽内以及紧固螺栓表面发现疑似金属的粉末,见图4。采用干净的刷子收集该粉末,发现凹槽中的疑似金属粉末只有少量为粉末,其他均粘在凹槽表面,且在其周围未发现放电痕迹。初

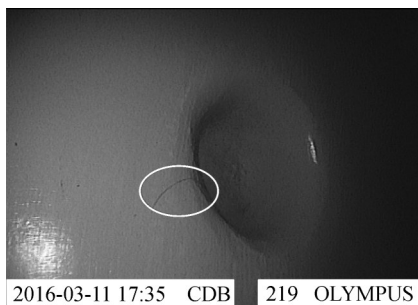


图3 壳体内部检查情况

Fig. 3 The examination of inner surface of the shell
步分析,由于该凹槽与紧固螺栓均处在导体之间(底座上下断面),且底座通过外壳接地,因此发现粉尘的地方电场强度几乎为零,进而排除此处放电可能。

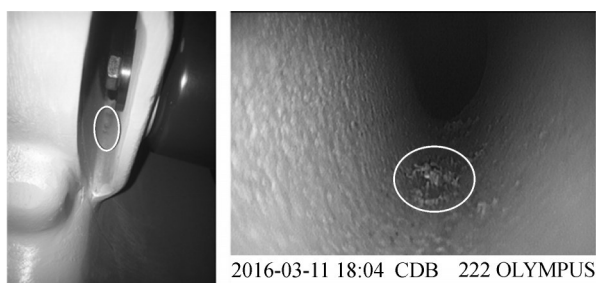


图4 紧固螺栓表面及底座凹槽中粉末

Fig. 4 Powder in surface of the fastening bolt and in the groove of the base

5)紧固件松动检查。在完成以上检查的基础上,对气室内部多处紧固件是否松动进行检查时发现,B相导体耦合触头附近在用手轻敲的时候可以听到明显的振动声音,而对其他两相进行相同操作时则听不到声音,由此判断此处卡簧偏移松动或变形引起振动,从而检测到超声信号。通过分析该部位的结构图纸,判断如图5所示的导杆连接屏蔽罩处可能存在部件松动的情况。

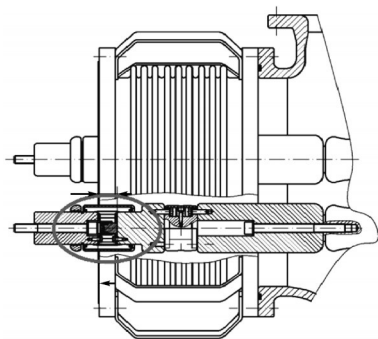


图5 屏蔽罩结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of shield

3 缺陷原因分析

3.1 异响原因分析

3.1.1 卡簧检查及尺寸对比分析

根据现场检查及图纸结构分析,存在异常振动

情况的部件见图6。

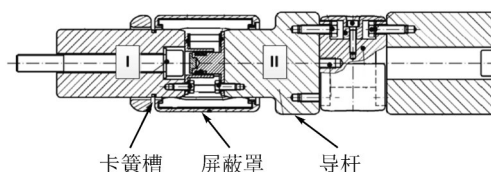


图6 异常振动部件结构图

Fig. 6 Structural diagram of abnormal vibratory components

该部件位于波纹管附近,I号、II号导杆插接在一起,主要起连接通流作用,在接头部位罩以屏蔽罩,该屏蔽罩起均压作用,正常运行情况下只有少量电流流过。为了防止该屏蔽罩左右晃动,在I号导杆上设置卡簧槽,通过卡簧限制屏蔽罩运动。

现场拆解了旧卡簧,并和新卡簧进行比对,发现旧卡簧已发生明显变形,最大偏差量达4 mm,见图7。

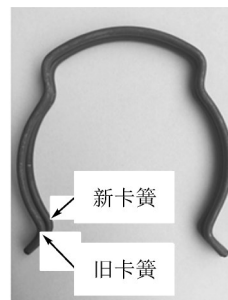
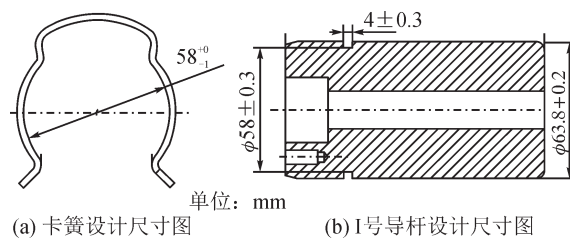


图7 新旧卡簧对比图

Fig. 7 Contrast diagram of new and old spring

查阅厂商提供的图纸,卡簧和设置有卡簧槽的I号导杆结构见图8。



(a) 卡簧设计尺寸图

(b) I号导杆设计尺寸图

图8 卡簧和导杆设计图

Fig. 8 Design diagram of spring and guide rod

由图8所示,卡簧内径为58 mm,I号导杆外径为63 mm,I号导杆上的卡簧槽内径58 mm,即当卡簧正常安装到位时,卡簧正好卡紧卡簧槽内的导体被固定在卡簧槽内,从而起到固定屏蔽罩的作用。该次缺陷的卡簧由于某种原因产生了较大变形,最大形变量达到4 mm,导致其不能卡住卡槽内的导杆,可以在卡槽内晃动,因此失去固定屏蔽罩的作用。

3.1.2 三相共体GIS内部导体电磁力计算分析

三相共体GIS的三相导体在腔体内会产生一个交变的磁场,每相导体会相互作用^[21]。设三相导体

中的电流分别为

$$\begin{cases} I_a = I \sin \alpha \\ I_b = I \sin(\alpha - 120^\circ) \\ I_c = I \sin(\alpha + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: I 为线路中通电电流的幅值; $\alpha = \omega t$, 其中 ω 为角频率; t 为时间。

三相导体受力见图 9, 设 a 与 b , b 与 c , a 与 c 两相导体之间距离分别为 l_{ba} , l_{bc} , l_{ac} , b 、 c 两相电流在导体 a 处产生的磁感应强度大小分别为

$$\begin{cases} B_{ba} = \frac{\mu_0 I}{2\pi l_{ba}} |\sin(\alpha - 120^\circ)| \\ B_{ca} = \frac{\mu_0 I}{2\pi l_{ca}} |\sin(\alpha + 120^\circ)| \end{cases} \quad (2)$$

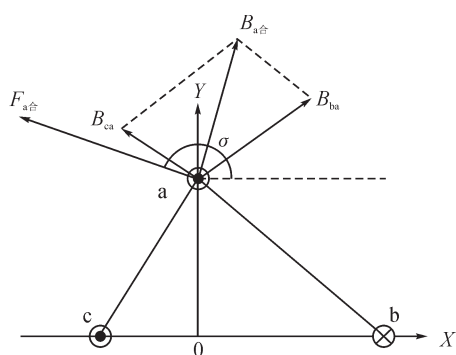


图 9 三相导体受力

Fig. 9 The force diagram of three-phase conductor

设 B_{ba} , B_{ca} 之间的夹角为 θ , 二者在导线 a 处产生的合磁场为 B_{ag} , ac 与 ab 的夹角为 γ , 则有:

$$\begin{cases} \cos \gamma = \frac{l_{ba}^2 + l_{ca}^2 - l_{bc}^2}{2l_{ba}l_{ca}} \\ B_{ag} = \sqrt{B_{ba}^2 + B_{ca}^2 - 2B_{ba}B_{ca}\cos(180^\circ - \theta)} \end{cases} \quad (3)$$

则在每一个电流周期内, a 相导体的受力表达式为

$$F_{ag} = B_{ag} i_a l_a = \frac{\mu_0 I^2 l_a |\sin \alpha|}{2\pi} \times \left[\frac{\sin^2(\alpha - 120^\circ)}{l_{ba}^2} + \frac{\sin^2(\alpha + 120^\circ)}{l_{ca}^2} + \frac{\sin(\alpha - 120^\circ)\sin(\alpha + 120^\circ)(l_{ba}^2 + l_{ca}^2 - l_{bc}^2)}{l_{ba}^2 l_{ca}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在 GIS 的实际运行中, 三相导体往往排列成等边三角形, 此时设 $l_{ba} = l_{bc} = l_{ac} = d$ 则单位长度导体受力为

$$f = F_{ag} / l_a = \frac{\sqrt{3} \times 10^{-7} I^2}{d} |\sin(\omega t)| \quad (5)$$

由此可判断每一个导体所受电磁力的频率为电流频率的 2 倍, 当电流频率为 50 Hz 时, 力的频率为 100 Hz。

3.1.3 异响原因讨论分析

由于该次缺陷的设备为三相共箱结构, 单相导

体处于其他两项导体的交变的电磁场中, 长期受到电磁力的作用, 而正常运行情况下屏蔽罩上会有少量电流流过, 因此其会在电磁力的作用下带动卡簧一起振动。由此产生的振动信号通过 B 相导体及支持绝缘子传递到壳体。由于 B 相支持绝缘子离卡簧最近, 因此在 B 相支持绝缘子附近外壳最先测得超声信号, 且信号值最大, 分析与实测吻合。

此外, 根据运维值班人员回忆, 在倒负荷后, 断开电压前 2601 间隔处疑似异常放电声变小, 查阅倒负荷前该段母线上流过的负荷电流为 800 A 左右, 倒负荷后该段母线再没有负荷电流。分析疑似异常信号变小的原因为: 负荷减小后, 通过导杆的电流变小消失, 卡簧及屏蔽罩所受电力减小, 振动减弱, 进一步验证了该次异常信号的来源。现场更换母线卡簧, 恢复运行后设备异响消失, 故障消除, 说明该次设备异响原因确实为母线卡簧变形松动引起。

3.2 卡簧变形原因分析

3.2.1 安装过程分析

根据厂商提供的卡簧安装说明, 在对接 I、II 号导杆前, 先将屏蔽罩和卡簧安装到 I 号导杆上, 见图 10。

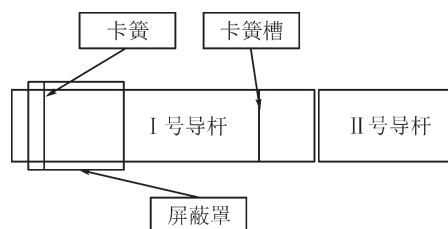


图 10 屏蔽罩安装到位前状态

Fig. 10 Shield before installation in position

当 I、II 号导杆拼接完成后, 手动将屏蔽罩推向 I、II 号导杆接头处, 当屏蔽罩上的卡簧落入 I 号导杆的卡簧槽中时, 则认为安装完毕, 屏蔽罩安装到位见图 11。

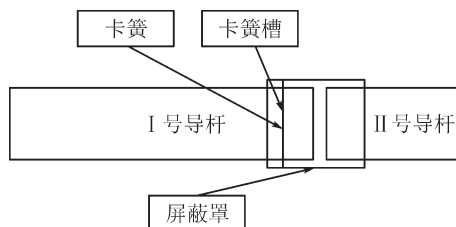


图 11 屏蔽罩安装到位后示意图

Fig. 11 Shield after installation in position

由此过程可知, 卡簧在安装到位前, 一直卡在 I 号导杆上, 即内径为 58 mm 的卡簧, 卡在外径为 63 mm 的导杆上, 形变量较大; 当卡簧安装到位后, 卡簧落入内径为 58 mm 的卡簧槽中, 几乎无形变量。

3.2.2 卡簧变形原因分析

通过分析卡簧的结构、作用及安装工艺要求,判断卡簧变形松动的原因有以下几方面:

1)卡簧加工尺寸不满足要求。当卡簧在安装前,即存在尺寸偏大的问题,即出现卡簧与卡簧槽尺寸不匹配的情况,则会在GIS设备运行过程中发生异常振动信号,而该设备投运后进行过多次带电检测,以前均未发现异常信号,也就是近期才发现出现了异常信号,因此,可排除卡簧加工尺寸不满足要求的可能。

2)卡簧材质不满足要求。由于卡簧安装时,先要卡在大尺寸的导杆上,当卡簧材质不满足要求时,可能会在安装过程中出现尺寸不能复原的情况,即在导杆上发生较大变形,而卡簧落入卡簧槽后未及时恢复,从而出现卡簧与卡簧槽尺寸不匹配的情况。由于该设备投运后进行过多次带电检测,以前均未发现异常信号,也就是近期才发现出现了异常信号,因此,可排除卡簧材质不满足要求的情况。

3)卡簧安装工艺控制不满足要求。当屏蔽罩在安装到位前状态时,卡簧卡在大外径尺寸的I号导杆上,当安装工人向II号手动推屏蔽罩时,遇到的阻力较大,容易出现未将卡簧推到位的情况,尤其是当卡簧处于卡簧槽的边沿时,工人误以为卡簧已落入槽中,而不继续推送,这样就造成卡簧始终卡在导杆上。随着设备运行年限的增大、伴随着导杆的热胀冷缩,卡簧与导杆存在微弱位移,在某种情况下,卡簧最终落入卡簧槽。此时,由于卡簧卡在导杆上已有近10年,产生了不可恢复的变形,从而出现卡簧与卡簧槽尺寸不匹配的情况,在高电压、大电流情况下,屏蔽罩与卡簧在电磁力的作用下产生异常振动。

4 结论

通过上文中的分析,可以得出该次设备异响的原因为GIS母线卡簧松动,在电磁力的作用下设备内部导体振动引起,现场更换母线卡簧后,设备异响消失,故障消除。该缺陷暴露了设备在安装过程中,存在工艺控制不严的情况。为了避免同类缺陷的再次发生,建议采取以下措施:

1)进一步完善卡簧安装工艺措施。由于该次缺陷的设备在安装时未明确卡簧现场安装的具体工艺要求,导致工人在现场操作时,在卡簧未能完全落入卡簧槽情况下就结束了安装。目前已明确,工人在确认屏蔽罩到位时,需采取用手摸卡簧的羊角确认是否突出屏蔽罩、推拉屏蔽罩不发生位移等措

施,确保卡簧安装到位。

2)加强GIS设备带电检测工作。除了开展局部放电带电检测工作以外,还需要加强对GIS设备的异常振动检测技术的研究与应用,尤其要针对内部元器件异常松动的情况加以检测分析,确保不引发严重故障。

3)第一时间明确故障/缺陷原因。GIS设备产生异响可能是由于内部放电引起,也可能是由于内部紧固件松动,在电磁力作用下通流设备异常振动引起。GIS设备如产生异响,应首先通过超声波检测快速确定异响位置,有条件进行特高频检测及振动检测时,还应结合特高频检测及振动信号检测结果判断异响的原因,确定异响是由内部放电引起还是部件松动异常振动引起。

参考文献:

- [1] 孙 茁,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.
- [2] 杜凤青,盛戈皞,徐 剑,等. 基于IEC 61850的GIS智能监测信息建模及信息交互系统设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):163-167.
DU Fengqing, SHENG Gehao, XU Jian, et al. Information modeling for GIS smart monitoring based on IEC 61850 and development of information interaction system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 163-167.
- [3] 凌 颖,赵莉华,林 显,等. 高压隔离开关电触头性能改善探讨[J]. 高压电器,2010,46(8):101-105.
LING Ying, ZHAO Lihua, LIN Xian, et al. Discussion of improvement method of electrical contacts on high voltage disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 101-105.
- [4] 王俊波,苗银银,罗容波,等. GIS触头接触状况检测现状分析[J]. 高压电器,2013,49(12):137-140.
WANG Junbo, MIAO Yinyin, LUO Rongbo, et al. Analysis of present situation of GIS contact detection[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 137-140.
- [5] 郑晓光,陈 俊,王 宇,等. 基于SF₆成分分析的气体绝缘金属封闭开关设备潜伏性缺陷判断的研究及应用[J]. 广东电力,2012,25(1):30-35.
ZHENG Xiaoguang, CHEN Jun, WANG Yu, et al. Research on judgement of hidden defects of GIS based on composition analysis of SF₆ and its application[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(1): 30-35.
- [6] LANDRY M, LEONARD F, LANDRY C, et al. An improved vibration analysis algorithm as a diagnostic tool for detecting mechanical anomalies on power circuit breakers

- [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1986-1994.
- [7] HOSL F L. Contact parameter computation and analysis of air circuit breaker with permanent magnet actuator[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013, 8(3):595-602.
- [8] 张国栋, 牛国平, 宋建成. 高压断路器振动信号在线监测系统的研究[J]. 山西电力, 2012(3):50-54.
ZHANG Guodong, NIU Guoping, SONG Jiancheng. Study on vibration signal online monitoring system for high voltage circuit breaker[J]. Shanxi Electric Power, 2012(3): 50-54.
- [9] 文韬, 张乔根, 赵军平, 等. 特高压GIS设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):30-33.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of on-site standard lightning impulse test technology for UHV GIS equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):30-33.
- [10] DING P, YAN Z H, MA F Y, et al. The study of vibration diagnosis method for GIS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(295-298):2429-2432.
- [11] 常广, 张振乾, 王毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器, 2011, 47(8):85-90.
CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8):85-90.
- [12] 刘君华, 王江, 钱勇, 等. GIS中电磁波传播特性的仿真研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(8):139-142.
LIU Junhua, WANG Jiang, QIAN Yong, et al. Simulation analysis on the propagation characteristics of electromagnetic wave in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 139-142.
- [13] 赵科, 李洪涛, 杨景刚. 特高压GIS集中监造工作的若干思考[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2):69-71.
ZHAO Ke, LI Hongtao, YANG Jinggang. Discussions on the centralized supervision of UHV GIS[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2):69-71.
- [14] 杨景刚, 刘媛, 高山, 等. 高压断路器机械故障诊断技术[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2):1-5.
YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2):1-5.
- [15] 丛浩熹, 李庆民, 齐波, 等. 基于红外传感的GIS隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):144-148.
CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Online GIS Switch contact temperature monitoring based on IR sensing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [16] 武胜斌, 郑研, 陈志彬. 基于红外测温技术的GIS导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 100-102.
WU Shengbin, ZHENG Yan, CHEN Zhibin. An on-line monitoring scheme of conductor temperature in GIS based on infrared temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4):100-102.
- [17] 丛浩熹, 行晋源, 李庆民, 等. 有屏蔽罩结构的GIS触头温度红外在线监测技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9):148-153.
CONG Haoxi, XING Jinyuan, LI Qingmin, et al. Infrared online temperature monitoring technology for shielded GIS contacts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9):148-153.
- [18] 常广, 王毅. 高压断路器机械状态在线监测装置的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(2):44-46.
CHANG Guang, WANG Yi. An on-line mechanical condition monitoring device for high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2):44-46.
- [19] 潘徽, 宋政湘, 牛博. 基于振动的断路器状态检测系统的设计与开发[J]. 高压电器, 2014, 48(12):83-88.
PAN Hui, SONG Zhengxiang, NIU Bo. Design and development of condition monitoring system for circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 48(12):83-88.
- [20] 李华斌. GIS电压互感器振动的在线检测与诊断[J]. 机电工程技术, 2012, 41(7):247-249.
LI Huabin. On-line detection and diagnosis on the vibration of GIS voltage transformer[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(7):247-249.
- [21] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 基于振动原理的GIS母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11):99-104.
HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangang, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):99-104.

刘媛(1989—),女,工程硕士,主要从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作。

贾勇勇(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事高压电力设备状态检测技术研究。

杨景刚(1984—),男,硕士,主要从事高压开关设备故障诊断相关研究以及开关类设备专业技术管理工作。

宋思齐(1991—),男,工程师,主要从事高电压与绝缘技术及电力设备状态检测研究。

高山(1971—),男,研究员级高工,致力于全过程技术监督与开关类设备专业技术管理工作。

李洪涛(1987—),男,博士,高级工程师,主要从事现场试验技术以及高压开关设备故障诊断相关研究。