

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.034

基于开关柜缺陷模型的局放检测方法对比研究

赵常威, 丁国成, 杨 为, 杨海涛, 程登峰, 李宾宾
(国网安徽省电力公司电力科学研究院, 合肥 230022)

摘要: 金属封闭式开关柜在变电站中应用非常广泛,其安全稳定运行直接影响电网可靠性。因此,开展开关柜局部放电(PD)检测具有重要意义。当前可用于开关柜局部放电检测的方法有超声波法、特高频(UHF)法、暂态对地电压(TEV)法及高频电流法等,但对上述方法灵敏度和定位效果的分析对比研究尚不够深入。文中以实体开关柜为实验平台,设计了3种不同绝缘缺陷模型,对开关柜施加不同的电压,采用以上4种方法对模型局部放电进行了测量。经过对测量数据对比分析,结果表明:在灵敏度方面,超声波法检测效果最好,TEV法次之;在定位效果上4种方法均有不同程度的效果,但由于超声波法测量值较低,因此在背景噪声较大的现场测试中,超声波与TEV的联合检测法是开关柜局放检测最有效手段。

关键词: 开关柜;局部放电;特高频;超声波;暂态对地电压

Comparative Study of Partial Discharge Detection Technologies Based on the Switchgear Defect Models

ZHAO Changwei, DING Guocheng, YANG Wei, YANG Haitao, CHENG Dengfeng, LI Binbin
(State Grid Anhui Electric Power Company, Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: At present, the methods for detecting partial discharge (PD) in switchgear include such as acoustic emission (AE) method, ultra high frequency (UHF) method, transient earth voltage (TEV) method and high-frequency current method. However, comparative analyses on their sensitivity and locating effect are not enough. In this study, a real switchgear was taken as the partial discharge test platform, and three kinds of insulation defect models were established. The switchgear was applied different voltages, and the discharge quantity of these defect models was measured by the above four different methods. Comparison among the measurements indicates that AE method is the best in sensitivity, TEV method obtains the largest amplitude of PD signal, and the four methods have varying degrees of locating effect on partial discharge. It is concluded that the union of AE and TEV methods can achieve the most effective measurement of partial discharge in the switchgear with high background noise.

Key words: switchgear; partial discharge; UHF; AE; TEV

0 引言

金属封闭式开关柜是当前 10 kV 配电网构成的主要电气设备之一,其运行稳定性对配电网安全有极为重要的影响。在运行期间,高压开关柜可能因绝缘老化、人为操作、化学腐蚀等因素造成部分绝缘性能下降,导致局部放电现象,而局部放电将使开关柜绝缘状况进一步恶化,最终造成运行事故^[1-2]。因此对开关柜的绝缘情况,特别是局部放电进行监测

和分析,并及时检修是保障开关设备安全运行的一个重要工作。

目前用于金属封闭式开关柜局部放电检测的方法较多,主要包括特高频(UHF)法、射频扫描(RFS)法、暂态对地电压(TEV)法、超声波法、高频电流法等^[3-12]。上述方法均为利用局部放电发生时引起的电量或非电量变化来判定局部放电的严重程度并依据放电量的大小关系进行局放定位^[5]。在实际现场检测中上述方法均有应用,但同时应用的场合较少,对这几种

方法检测灵敏度和定位效果也缺乏深入的研究。

文中应用实体开关柜搭建局部放电模型,在同一测试条件下同时用特高频法、高频电流法、暂态地电压法和超声波法进行局部放电测量,在逐步升高电压的过程中记录各方法所测得的局部放电幅值变化曲线与背景噪声强度来比较其灵敏度,并通过不同位置的信号强度对比来比较上述4种方法的定位效果。

1 4种局部放电检测方法的基础

1.1 特高频法

开关柜发生局部放电时,放电通道的瞬时脉冲电流将会激发特高频电磁波辐射,它们遵循麦克斯韦的电磁场基本方程,电磁波将以一定的速度从局部放电点向外部辐射^[13]。通常特高频电磁波的频率可达300 MHz~3 GHz,而现场电晕干扰信号的频率多数在300 MHz以下,因此特高频法具有灵敏度高,抗干扰能力强等特点^[13~16]。

通常以特高频(UHF)传感器在一定距离内接收局部放电辐射的特高频信号,并经连接线输入示波器显示设备进行处理。由于UHF信号衰减较快,因此可以通过设置数个不同位置的传感器利用信号强度差异和时间差来对局部放电进行定位^[9,10]。

1.2 高频电流法

高频电流,通常是指频段位于3~30 MHz范围内的脉冲电流信号。局部放电脉冲在此频段内具有较高的能量,在开关柜内部发生局部放电时,会有高频电流分量沿接地线传至大地,此时在接地线处就可以检测到放电信号。高频电流测量一般使用基于Rogowski线圈原理制成的高频电流传感器来实现,高频电流在线圈环形磁芯中间穿过时将在线圈上产生感应电压^[17~19]。此方法属于非侵入式检测,安装方便,简单可靠。

高频电流传感器(HFCT传感器)耦合得到的高频电流信号,通过积分电阻形成电压信号。该电压信号通常较为微弱,须经过前置放大器电路,放大到可采集的信号幅值范围。其传感器的结构示意图1。

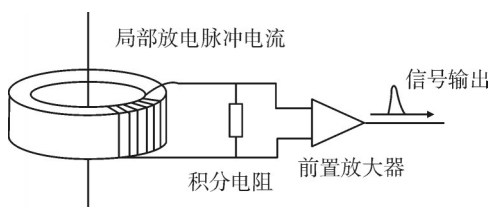


图1 高频电流传感器结构示意图

Fig. 1 Structure of HFCT sensor

1.3 超声波法

超声波(AE)法利用局部放电时在开关柜腔体内高频冲击振动产生的超声波检测来实现局部放电的测量和定位^[20~23]。超声波法作为一种检测非电信号的检测方法,其抗电磁干扰能力是文中所述所有方法中最强的,但如周围环境中存在噪声或其他的机械振动,也可能对检测结果造成较大的干扰。

超声波信号的频率在20 kHz~2 MHz区间,由于频率相对较低,在固体介质中衰减极大,很难穿透开关柜的金属外壳传播到外部空间。因此其传感器必须紧贴开关柜外壁,而且需要特定的信号放大器才能较好地检测^[2]。超声波法的定位是基于多个位置的传感器测量得到的信号时间差来进行空间几何计算,从而获得局部放电的具体位置^[9]。

1.4 暂态地电压法

高压开关柜内部出现局部放电时,在局部放电源处辐射电磁波,电磁波传播至开关柜外壳处时,将在接地的金属外壳上产生一个持续时间仅为几纳秒,幅值约为几十毫伏至几伏的暂态电压,称为暂态对地电压(TEV)^[1~2, 24~27]。使用专门的传感器捕捉这一电压信号,即可间接测得局部放电的强度,其检测原理可以用图2来说明。TEV测量通常只需要读取信号幅值、放电次数和相位分布特征,没有复杂而庞大的波形数据,对检测人员的要求较低,简单实用,可以大范围检测。

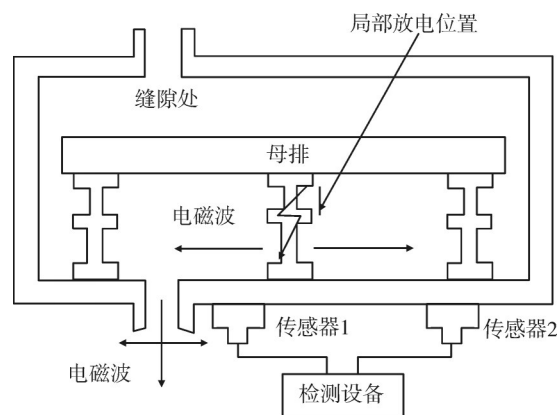


图2 TEV法局部放电检测原理图

Fig. 2 Principle of TEV in PD detection

TEV法的定位原理是利用不同位置安装的传感器测得的信号幅值差异来确定局部放电发生的位置。由于此方法提供的数据量较少,目前在放电模式识别的准确性方面,较其他就几种方法有所欠缺^[1,24]。

上述4种检测方法均有各自的优势和不足。基于此现状,利用实体开关柜设计了3种典型局部放电模型,对比了4种检测方法的灵敏度和定位性能。

2 实验设计

2.1 实验平台构建

文中以实体开关柜为实验平台,直接在开关柜绝缘子处设计模型,共设计了3个典型局部放电绝缘缺陷模型,分别为尖端放电、悬浮放电和沿面放电模型。3种模型的实物形式见图3。图3中,尖端放电模型在高压电极端部固定一枚尖锐的铁钉,尖端距离接地的开关柜外壁约为15 mm;悬浮放电模型为在高压电极突起部分用绝缘胶带固定一块薄铁片,距离电极约8 mm;沿面放电模型使用淡盐水混合少量泥沙均匀喷洒在绝缘子表面形成脏污表面。

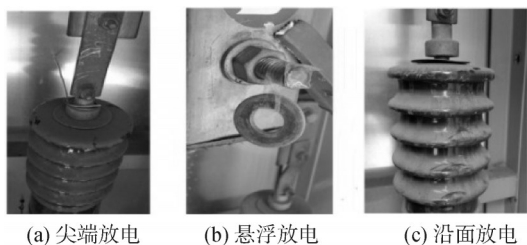


图3 局部放电模型

Fig. 3 PD models

实验电路图见图4。图4中超声传感器和TEV传感器采集的信号由超声与地电压联合检测仪读取,特高频传感器和高频电流传感器的信号由示波器读取,并以脉冲电流法检测阻抗所测得的局部放电量作为参考值。

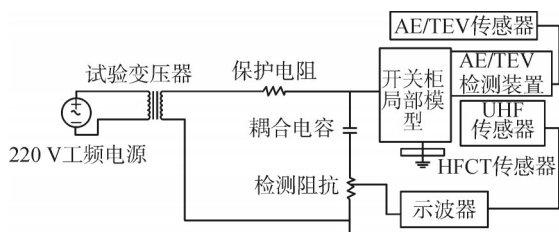


图4 实验电路连接图

Fig. 4 Circuit connection of the experiment equipment

为比较这些方法定位效果的优劣,在同一位置设置局部放电模型后,测量同一电压作用下传感器不同位置时的局部放电信号强度以对比其幅值差异,初步选定各传感器的安装位置见图5,以不同形状区分不同测量方式的测试点,数字表示测试点序号。TEV与超声传感器吸附于开关柜不同侧面的外壁,特高频传感器放置在正对开关柜不同柜体间的缝隙外围,高频电流传感器设置于不同柜体引出的地线上。

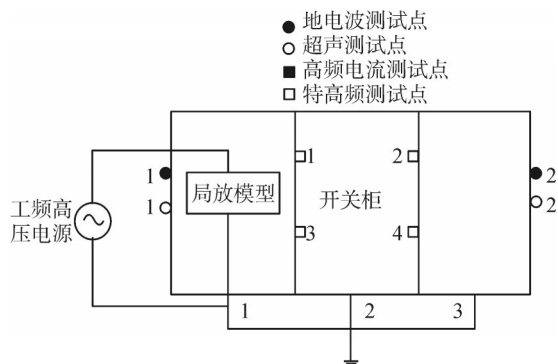


图5 不同传感器在开关柜的安装位置

Fig. 5 Installation position of different sensors in switchgear

2.2 实验流程

在实验平台搭建完成后,将4个传感器都安装在各自的1号测点,安装完毕后,首先读取在未加电压时,各传感器采集的背景噪声信号强度。通过试验变压器,对局部放电模型进行加压。记录起始放电电压后,再以线性方式提高模型所受电压值,分别记录在各级电压作用下,采用常规脉冲电流法测得的局部放电幅值和不同传感器的信号强度的变化情况。电压加至一定值后停止本轮测量,降压放电后,将传感器变换位置,重复上述实验步骤。第二次实验与第一次相同的变量是每级电压下脉冲电流法测得的局部放电量。

该次试验应用的各传感器的性能参数见表1。由于传感器自身灵敏度间的一定差异,可能对实验结果产生一定的误差,但作为定性研究的结论基本不会受到影响。

表1 传感器参数

Table 1 Parameter of sensors used in this experiment

传感器类型	检测频带	检测灵敏度	检测值范围
UHF传感器	300 MHz~2 GHz	10~50 pC	0~10 000 pC
HFCT传感器	3~30 MHz	50~100 pC	0~25 000 pC
AE传感器	20 kHz~2 MHz	<1 dBμV	-7~65 dBμV
TEV传感器	10~150 MHz	<1 dBmV	0~60 dBmV

3 实验结果整理与分析

3.1 检测灵敏度对比分析

对3种局部放电模型全部加压一次,并记录每个特定局部放电量时的作用电压和4个传感器的信号幅值。随后改变传感器的位置,重新加压至产生固定的局部放电信号,记录此时的新传感器信号幅值。以尖端放电模型为例,模型的局部放电起始电

压为 2.7 kV, 此时的局部放电量为 400 pC。在随后的实验中以较缓慢的速度增加电压, 可得到在从 2.7 kV 到 4.4 kV 的 6 个电压值作用下的 4 个传感器的信号幅值, 局部放电检测仪读取的局部放电量见表 2。记录传感器信号数值并绘制曲线图, 见图 6。图 6 中特高频与高频电流幅值以左侧 Y 轴为参照, TEV 与超声幅值以右侧 Y 轴为参照。

表 2 尖端放电模型不同电压作用下的局部放电量

电压/kV	局部放电量/pC	电压/kV	局部放电量/pC
2.7	400	3.7	850
3.0	500	4.2	1 000
3.3	640	4.4	1 200

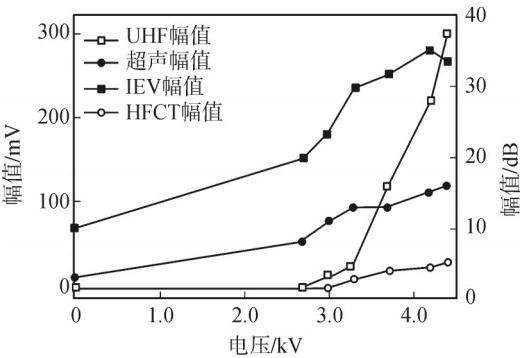


图 6 尖端放电模型的 4 种信号幅值变化曲线
Fig. 6 Curves of different signals following voltage (Point-plate model)

由图 6 可以看出, 在局部放电检测仪开始检测到局部放电的时刻即 2.7 kV 时, TEV 与超声传感器都已经检测到信号, 而高频与特高频则未检测到信号。说明在最小可测范围的对比中, TEV 和超声法表现较好, 而相对检测值的变化率来看又以超声法更加灵敏; 而在信噪比的对比上, 可以看出特高频法具有非常明显的优势。由于特高频传感器在未加压时检测的噪声信号在 3 mV 以下, 依照信噪比计算公式^[28]

$$\frac{s}{n} = 20 \lg(U_s/U_n)$$

(1)

可见在 4.4 kV 电压下, S/n 的值超过 40 dB, 同时超过了超声和 TEV 的检测值。而且放电越剧烈, 特高频法的效果越出色。但由于文中实验前提环境是仅有一处局部放电源, 而在现场测试中, 可能因为较大的背景噪声使特高频法的信噪比有所下降, 使其优势不再显著。

在变换模型继续进行测试的过程中发现, 对于悬浮放电模型, 特高频法的灵敏度有所上升, 放电量相当时检测信号更强, 而其他 3 种方法则有所削

弱; 测试沿面放电模型时, 特高频法的灵敏度在 3 个模型测试中处于最低点, 而高频电流法则有明显的幅值上升。

3.2 定位效果对比研究

在此以悬浮放电模型下的检测结果为例说明各检测方法在定位效果方面的性能。因在多次对不同模型的测试中, 实验结果略有差异但整体趋势并无不同, 故对其他两组模型的结果不再赘述。悬浮放电实验中某一典型的外加电压和局部放电量, 以及不同位置的传感器信号幅值的关系见表 3。

表 3 不同测试点的信号幅值对比

参数	数值
电压/kV	11.2
局部放电量/pC	1 000
UHF 传感器 1 号测点幅值/mV	50
UHF 传感器 2 号测点幅值/mV	40
UHF 传感器 3 号测点幅值/mV	50
HFCT 传感器 1 号测点幅值/mV	40
HFCT 传感器 2 号测点幅值/mV	40
HFCT 传感器 3 号测点幅值/mV	37
TEV 传感器 1 号测点幅值/dB	33
TEV 传感器 2 号测点幅值/dB	32
AE 传感器 1 号测点幅值/dB	17
AE 传感器 2 号测点幅值/dB	15

进行一系列升压操作并记录多个局放值时的传感器信号幅值后, 可以得到图 7 的不同传感器信号变化曲线对比图。图 7 中实线为测点 1 的信号幅值, 虚线为测点 2, 点虚线为测点 3。

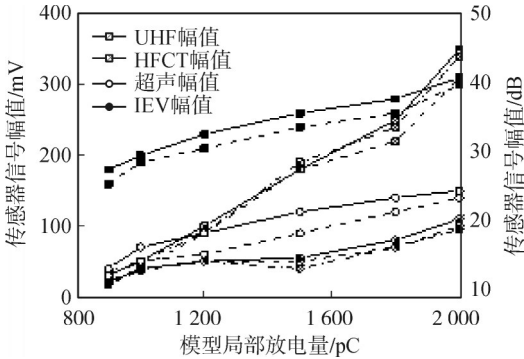


图 7 传感器在不同位置下的测试结果
Fig. 7 Test results of sensors in different locations

由图 7 可见, 对比不同测点的信号幅值的相对差值, 超声波法的差距最为显著, 因此若仅以多个不同位置传感器检测信号幅值的差值来进行空间几何定位, 超声波法的效果应为最佳。TEV 法也有一定可检测的差异, 但其幅值相对较大, 因此其相对差值较超声法低。

4 结语

文中利用实体开关柜和实体局部放电模型,采用4种局部放电检测方法:特高频法、高频电流法、超声法和暂态地电压法对局部放电同时进行检测,并在相同条件下变换传感器位置进行了多次测量,对测量得到的信号幅值进行了数学分析与对比。根据文中所述实验环境下测量结果的分析,可以得到的结论有:TEV法在相同条件下测得的信号幅值最大,而特高频法在检测环境较好的情况下拥有更好的信噪比;超声法在利用信号差值进行空间几何定位的方法下具有最好的定位效果。还有一点值得注意:由于在实际配电网中,开关柜的接地线在很多情况下是封闭在柜内的,因此高频电流法在现场测试中存在一定的使用范围局限。综上所述,文中认为在现场实测中采用超声与地电位的声电联合局放检测方法进行开关柜的局部放电检测将具有最佳的效果。

参考文献:

- [1] 魏振,张强,齐波,等. 高压开关柜典型缺陷局部放电TEV特征的研究[J]. 高压电器,2014,50(2):60-67.
WEI Zhen, ZHANG Qiang, QI Bo, et al. Analysis of TEV caused by partial discharge of typical faults in HV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 60-67.
- [2] 章涛,王俊波,李国伟. 10 kV 开关柜局部放电检测技术与运用[J]. 高压电器,2012,48(10):100-104.
ZHANG Tao, WANG Junbo, LI Guowei. Research on the partial discharge detection technology for 10 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):100-104.
- [3] CHENG Xue, DU B X, HAN Tao, et al. Comprehensive detection and analysis of partial discharge in switchgear[C]// Innovative Smart Grid Technologies. Asia (ISGT Asia): IEEE, 2012: 1-6.
- [4] BIRLASEKARAN S, LEONG W H. Comparison of known PD signals with the developed and commercial HFCT sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1581-1590.
- [5] MULROY P, HURTADO A, BADETZ D. On-line partial discharge monitoring system for distribution networks[C]// International Conference Condition Monitoring and Diagnosis(CMD). Paris: IEEE, 2012: 542-545.
- [6] 王流火,吕鸿,吴吉,等. 开关柜局部放电检测技术的应用研究[J]. 高压电器,2014,50(3):62-67.
WANG Lihuo, LYU Hong, WU Ji, et al. Application study on detection technology of switchgear partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 62-67.
- [7] 王卫东,赵现平,王达达,等. GIS局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器,2012,48(8):13-17.
WANG Weidong, ZHAO Xianping, WANG Dada, et al. Analysis on the method of GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 13-17.
- [8] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等. 油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J]. 高电压技术,2008,34(7):1401-1404.
ZHAO Xiaohui, YANG Jinggang, LU Xiuli, et al. Comparative research on current pulse method and UHF measurements of partial discharge in mineral oil[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7):1401-1404.
- [9] 陆忠,朱卫东,陈桂文,等. 多种局部放电检测手段诊断开关柜放电缺陷[J]. 高压电器,2012,48(6):94-98.
LU Zhong, ZHU Weidong, CHEN Guiwen, et al. Diagnosis of partial discharge fault in switch cabinet by different detection methods[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 94-98.
- [10] 张伟平,陈庆祺,谢建容,等. 开关柜局部放电同步联合检测技术的应用[J]. 电气应用,2013(13):62-65.
ZHANG Weiping, CHEN Qingqi, XIE Jianrong, et al. Application of joint synchronization switchgear partial discharge detecting technology[J]. Electrotechnical Application, 2013(13):62-65.
- [11] RENFORTH L, MACKINLAY R, SELTZER - GRANT M. Deployment of distribution on-line partial discharge monitoring devices on medium voltage electricity networks[C]// 20th International Conference and Exhibition Electricity Distribution - Part 1. Prague: CIRED, 2009:1-4.
- [12] 郑雷. 开关柜局部放电声电波检测技术的运用[J]. 高压电器,2012,48(11): 87-93.
ZHENG Lei. Application of acoustic emission technique to detection of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 87-93.
- [13] 曾雄杰,江健武,侯俊. TEV和UHF在10 kV开关柜带电检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(1):41-47.
ZENG Xiongjie, JIANG Jianwu, HOU Jun. Application of TEV and UHF in PD detection for the live 10 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 41-47.
- [14] TENBOHLEN S, DENISSO D, HOEK S M, et al. Partial discharge measurement in the ultrahigh frequency(UHF) range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1544-1552.
- [15] 丁登伟,高文胜,刘卫东. 采用特高频法的GIS典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术,2011,37(3):706-710.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [16] 刘云鹏,王会斌,王娟,等. 高压开关柜局部放电UHF在线监测系统的研究[J]. 高压电器,2009,45(1):15-17.
LIU Yunpeng, WANG Huibin, WANG Juan, et al. Re-

- search on on-line partial discharge UHF monitoring system for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 15-17.
- [17] 郭灿新, 张连宏, 姚林朋, 等. 局部放电 HF/UHF 联合分析方法的现场电缆终端检测应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 92-95.
- GUO Chanxin, ZHANG Lianhong, YAO Linpeng, et al. Application of HF/UHF joint partial discharge analysis to on-site power cable terminal detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 92-95.
- [18] 郑文栋, 杨宁, 钱勇, 等. 多传感器联合检测技术在 XLPE 电缆附件局部放电定位中的试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 84-88.
- ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al. Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 84-88.
- [19] ZHU J, YANG L, JIA J, et al. The design of Rogowski coil with wide band using for partial discharge measurements [C]//Proc. of 2005 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials. Kitakyushu, Japan: [s.n.], 2005: 518-521.
- [20] 陈武奋, 刘爱莲, 李英娜, 等. 无线超声传感器网络在开关柜局部放电中的在线监测研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(3): 31-33.
- CHEN Wufen, LIU Ailian, LI Yingna, et al. Research on wireless ultrasonic sensor networks in switchgear partial discharge on-line monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(3): 31-33.
- [21] 裴斌斌, 张丽, 郭灿新, 等. 基于超声的局放检测系统[J]. 电工技术, 2012, 11: 94-98.
- PEI Binbin, ZHANG Li, GUO Canxin, et al. Detecting system based on ultrasonic[J]. Electrician Technology, 2009, (11): 43-44.
- [22] WANG Liuhuo, WANG Haijing, WANG Lijun, et al. Experimental investigation of transient earth voltage and acoustic emission measurements of partial discharge signals in medium-voltage switchgears[C]//2nd International Conference Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Matsue: IEEE, 2013: 1-4.
- [23] 赵爱华, 李伟, 叶剑涛, 等. 超声波局部放电检测法在电缆终端中的应用[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(6): 112-118.
- ZHAO Aihua, LI Wei, YE Jiantao, et al. Application of ultrasonic detection for partial discharge to cable terminals [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(6): 112-118.
- [24] NING W J, WU C, WANG L H, et al. Experimental investigation of typical partial discharge signals in medium-voltage switchgear[C]//International Symposium Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Mumbai: IEEE, 2014: 393-396.
- [25] 陈庆祺, 张伟平, 刘勤峰, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压的分布特性研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 88-93.
- CHEN Qingqi, ZHANG Weiping, LIU Qinfeng, et al. Research of transient earth voltage distribution characteristics by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 88-93.
- [26] 王有元, 李寅国, 陆国俊, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1683-1688.
- WANG Youyuan, LI Yinwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1683-1688.
- [27] 靳键云. 开关柜局部放电暂态对地电压检测法的研究[J]. 山西电力, 2011, 10(5): 10-12.
- JIN Jianyun. Study of TEV detection on switchgear partial discharge[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 10(5): 10-12.
- [28] REID A J, JUDD M D, DUNCAN G. Simultaneous measurement of partial discharge using TEV, IEC 60270 and UHF techniques[C]//Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium Electrical Insulation (ISEI). [S.l.]: IEEE, 2012: 439-442.
- 赵常威(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力设备在线监测和带电检测技术方面的研究工作。

(上接第 219 页)

- quantity[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2009(35): 211-212.
- [19] 舒开期, 叶利, 申莉, 等. 电压互感器误差主动测量系统的设计[J]. 电测与仪表, 2013, 8(572): 72-75.
- SHU Kaiqi, YE Li, SHEN Li, et al. Design of active measurement system for voltage transformer error test[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 8(572): 72-75.
- 王欢(1984—), 女, 工程师, 博士研究生, 主要从事互

感器运维及测量方面的技术研究。

王佳颖(1981—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事电磁场仿真计算技术研究。

项琼(1974—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事一次设备运维技术研究。

汪本进(1971—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电子式互感器技术研究。

余也凤(1984—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事互感器误差测量技术研究。