

两起不同工艺35 kV电缆中间接头振荡波局部放电缺陷对比分析

李旭¹, 郝晓光¹, 朱明正¹, 孟峥峥¹, 方静², 薛超³, 王伟⁴

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 国网天津市电力公司城西供电分公司, 天津 300190;

3. 国网天津市电力公司城南供电分公司, 天津 300201; 4. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要:在大型城市的配电网中,电力电缆的广泛应用为城市电网发展发挥了重要作用。文中介绍了配网电缆振荡波局放检测技术的应用现状及基本原理,并结合2017年全运会保电期间检测发现的缺陷,选取两起不同工艺35 kV电缆中间接头局放缺陷实例,对其局放产生原因、局放起始电压、局放量等展开对比分析,发现接头工艺对局放类型及局放各项参数具有明显影响,为振荡波局部放电检测技术的推广应用、缺陷状态的科学评估提供了参考。

关键词:配网; 电缆接头; 振荡波; 局部放电

Comparative Analysis of Oscillating Wave Induced Partial Discharge Defects in Two 35 kV Cable Joints with Different Processes

LI Xu¹, XI Xiaoguang¹, ZHU Mingzheng¹, MENG Zhengzheng¹, FANG Jing²,
XUE Chao³, WANG Wei⁴

(1. State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China; 2. Chengxi Electric Power Supply Company of Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300190, China; 3. Chengnan Electric Power Supply Company of Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300201, China; 4. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the distribution grid of large cities, the wide application of power cables plays an important role in the development of urban power grids. This paper introduces the application and basic principle of the detection technology of partial discharge due to oscillating wave in city distribution network cable, and selects two partial discharge defects in 35 kV cable joints with different processes for examples. The causes of partial discharge, partial discharge initial voltages, and partial discharge capacities are comparatively analyzed. It is found that the process has obvious influences on the type of partial discharge and the parameters of the partial discharge. This study may provide a reference for promotion and application of the partial discharge detection technology and scientific evaluation of partial discharge defect state.

Key words: distribution grid; cable joint; oscillating wave; partial discharge

0 引言

随着中国城市电网的不断发展及改造,电力电缆逐渐取代架空线路,广泛应用于城区输配线路当中。它具有占地面积小,供电可靠,传输效率高,运行不受恶劣气候条件影响等优点。其中,以交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆应用最为广泛^[1]。交联聚乙烯(XLPE)电缆于20世纪60年代初问世,具有绝

缘性能好、供电安全可靠、易于制造和安装方便等优点^[2],然而由于电缆深埋于地下,一旦发生故障将难以进行查找与处理,随之停电造成的损失将是巨大的^[3]。因此,有计划地对电缆进行准确可靠的检测及试验,提前发现电缆绝缘缺陷,及时安排修复或更换,避免故障发生,保证电网安全稳定运行,显得尤为重要。

目前常用的电缆离线试验方法主要从施加的

电压类型加以区分,包括直流电压、交流电压、超低频电压及阻尼振荡电压。直流耐压试验可以发现电缆中最为严重的缺陷,但不能发现其他细小的缺陷,且施加直流电压将会造成 XLPE 电力电缆积聚大量的空间电荷,容易引发绝缘击穿^[4]。交流耐压不会引入空间电荷,但由于电缆属于容性设备,试验电源体积和重量通常较大,现场不便于开展^[5]。超低频电压通常试验时间较长,且可能引发新的缺陷^[6]。阻尼振荡电压与交流电压具有良好的等效性,且与交流电压、超低频电压相比,作用时间短、操作方便、便于携带运输,试验时不会对电缆造成损伤^[7-10],可以一次性发现整条电缆中所有不同位置的局布放电,对运维检修具有良好的指导作用。

1 振荡波局部放电检测基本原理

振荡波局部放电测试是利用外施电压在一定条件下,缺陷处电场畸变程度超过临界放电场强时激发局部放电现象,局部放电信号以脉冲电流的形式向两边同时传播,在测试端并联一个耦合器收集这些电流信号并实现定位的方法^[11-13]。

1.1 系统构成

振荡波测试系统(OWTS)的构成见图 1。首先在被测试电缆端加直流电压至预设值,之后闭合高压开关 IGBT,通过设备电感与被测试电缆电容发生谐振,在被测试电缆端产生阻尼振荡电压,激发电缆及其附件中绝缘薄弱位置产生局部放电,并通过测试回路采集局放信号^[14-16]。

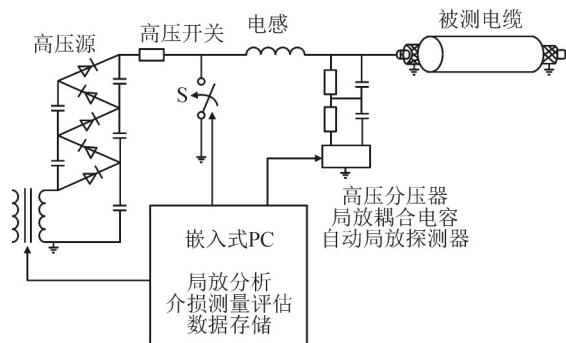


图1 振荡波测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OWTS

1.2 局部放电定位原理

OWTS利用脉冲反射法对局部放电信号进行定位。当测试一条长度为 l 的电缆时,假设在距测试端 x 处发生局部放电,放电脉冲沿电缆向两个相反方向传播,其中一个脉冲经过时间 t_1 到达测试端;另一个脉冲向测试对端传播,在对端电缆末端发生反射之后再向测试端传播,经过时间 t_2 到达测试端,见

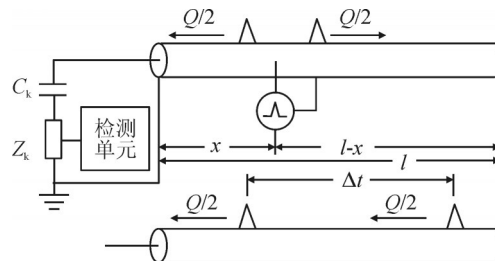
图2。根据两个脉冲到达测试端的时间差 Δt ,可计算出局部放电发生的位置^[17],即

$$t_1 = x/v \quad (1)$$

$$t_2 = (2l-x)/v \quad (2)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2(l-x)/v \quad (3)$$

式(1)-(3)中: v 为放电脉冲在电缆中的传播速度; x 为局部放电脉冲的起始位置。



Q —放电信号幅值; C_k —高压电容; Z_k —匹配阻抗。

图2 脉冲反射法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of pulse reflection method

此外,入射波、反射波的判定选择是数据分析初始环节的重要步骤,其判断结果会直接影响局部放电定位的准确度。以下为选择入射波、反射波的基本标准^[18]:

- 1) 脉冲波形形状基本相似;
- 2) 反射波幅值比入射波小;
- 3) 入射波上升沿较反射波上升沿更陡^[19];
- 4) 反射波脉冲较入射波脉冲更宽^[20];
- 5) 出现较难判断时,分析入射波波形周围的变化趋势,观察是否有波形具有相同的趋势。

2 两起现场应用案例

为了保障第十三届全国运动会顺利召开,国网天津电力公司组织技术力量对重要保电电缆线路开展振荡波局部放电检测,这也是首次在天津地区大范围应用此项技术。在发现的缺陷案例中,以下选取具有代表性的两起不同工艺 35 kV 电缆接头局部放电缺陷,对局部放电的特征及各项参数进行对比分析。

2.1 冷缩中间接头

2017年5月,在城西某 35 kV 电缆线路进行振荡波测试时发现,2 983 m 处中间接头存在局部放电异常现象。通过进一步查询路径测绘图见图 3,核实确认该位置存在冷缩中间接头,城西公司随即安排停电检修工作,对缺陷接头进行更换。

经解体发现,该冷缩中间接头硅橡胶内表面与电缆主绝缘交界面上存在 7 处黑色放电痕迹,见图 4。

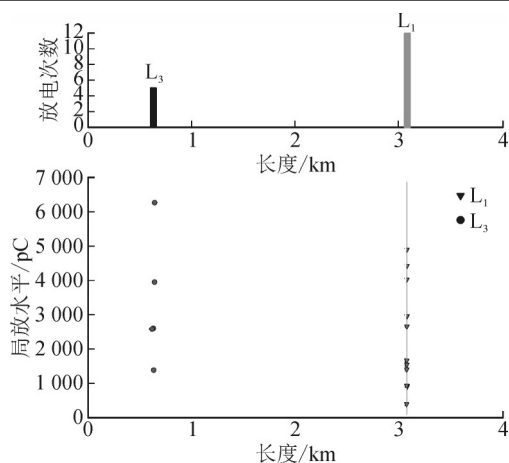


图3 城西公司某35 kV电缆振荡波局放定位图

Fig. 3 The PD mapping of a 35 kV cable of Chengxi company by OWTS

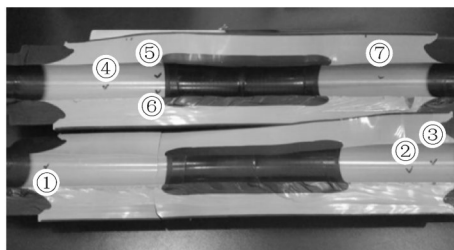


图4 冷缩接头内表面放电痕迹

Fig. 4 Discharge marks on the inner surface in cold shrinkable cable joint

利用体视显微镜对以上7处放电痕迹进行观察,发现存在黑色微小杂质,且均产生不同程度的电树枝发展迹象,见图5。

2.2 热缩中间接头

2017年6月,在城南某35 kV电缆线路进行振荡波测试时发现,409、770、976 m 3处中间接头存在局部放电异常现象。通过进一步查询路径测绘图,核实确认以上位置存在热缩中间接头,城南公司随即安排停电检修工作,首先对局放较为严重的409 m接头进行更换。城南公司某35 V电缆振荡波局放定位图见图6。

经解体发现,该热缩接头内绝缘管外表面存在一条楞状突起,突起上存在放电痕迹,痕迹周围有类似油状分解产物,见图7。

此外,在检查与该位置对应的外层绝缘管内壁时,发现与该位置对应的外层绝缘管内存在相同的放电痕迹,见图8。

3 数据对比及分析

结合解体情况可以看出,冷缩接头发生放电的位置位于接头与电缆本体的交界面,怀疑在打磨电缆外半导体屏蔽时产生半导体颗粒,不慎残留在界

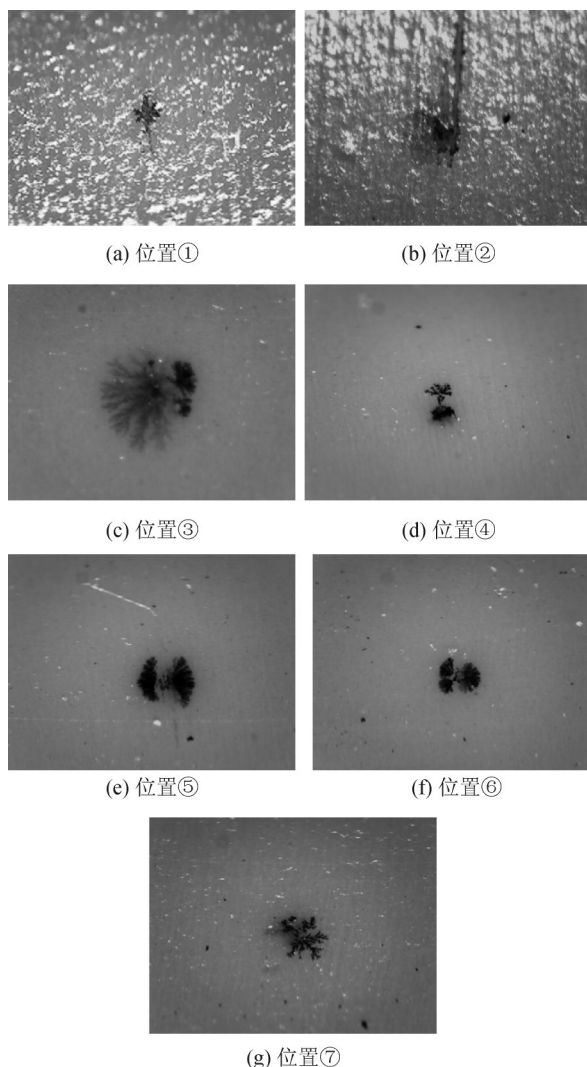


图5 显微镜下7处放电痕迹

Fig. 5 The 7 discharge marks under microscope

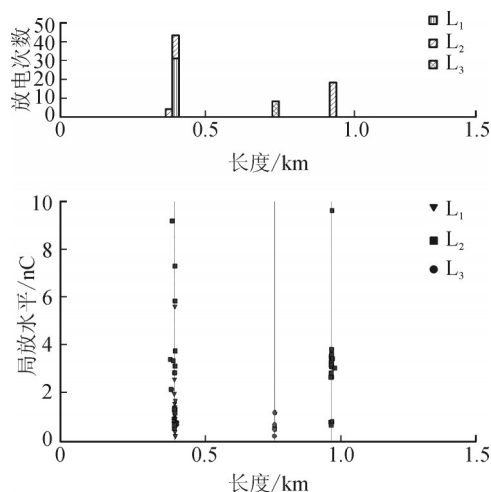


图6 城南公司某35 kV电缆振荡波局放定位图

Fig. 6 The PD mapping of a 35 kV cable of Chengnan company by OWTS

面处引发局部放电,属于绝缘介质界面的放电现象;热缩接头发生放电的位置同样位于两层绝缘管

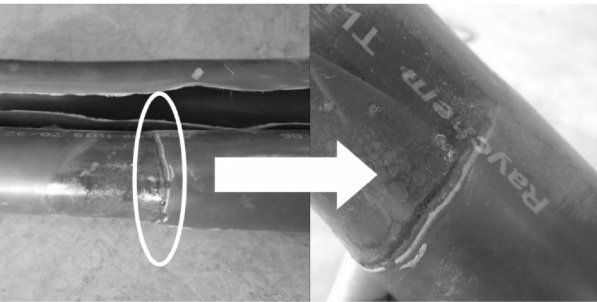


图7 热缩接头内放电痕迹

Fig. 7 Discharge trace in heat shrinkable cable joint

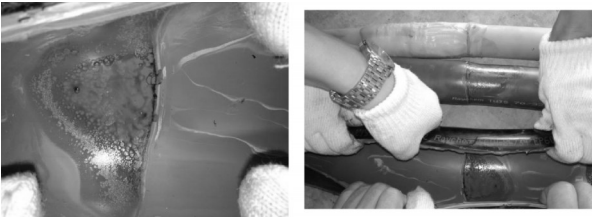


图8 对应外层绝缘管存在相同痕迹

Fig. 8 The insulation pipe in the outer layer of the corresponding position has the same trace

界面之间,但热缩接头主要依靠人为加热绝缘管,绝缘管受热收缩实现绝缘配合,当加热不均匀时,会导致绝缘管收缩不均匀,从而在两层绝缘管之间产生空隙引发局部放电,属于气隙放电。冷缩接头界面放电示意图见图9,热缩接头界面放电示意图见图10。

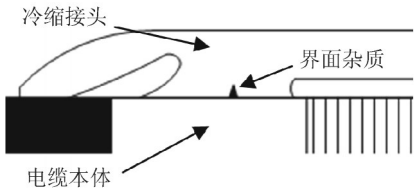


图9 冷缩接头界面放电示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the interface discharge of cold shrinkable joint

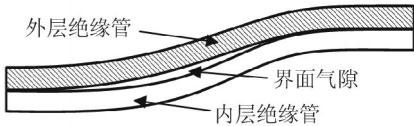


图10 热缩接头界面放电示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the interface discharge of heat shrinkable joint

通过对上述两个接头的局部放电情况进行整理分析,对比局部放电起始电压、最大局部放电量及局部放电次数3个参量,见表1。

通过对比发现,冷缩接头的局部放电起始电压高于热缩接头,最大局部放电量、局部放电次数低于热缩接头,可见冷缩接头内的局部放电不如热缩接头剧烈。

表1 两个接头局部放电情况对比

Table 1 Comparison of partial discharge in two joints

局部放电参量	冷缩接头	热缩接头
局部放电起始电压($U_0=26\text{ kV}$)	$1.0U_0$	$0.7U_0$
最大局部放电量/ pC	4 800	9 100
局部放电次数/次	12	30

结合以上的分析可知,冷缩接头产生的局部放电属于绝缘介质界面放电,而热缩接头产生的局部放电属于气隙放电,由于空气的击穿场强低于绝缘介质,因此导致冷缩接头局部放电的起始电压高于热缩接头。在进行振荡波测试时,由于气隙放电的起始电压较低,随着施加在被试电缆上的电压逐渐升高,气隙放电的发展程度要高于绝缘介质放电,因此气隙放电的最大局部放电量、局部放电次数也相应高于绝缘介质放电。从解体后的放电情况来看,冷缩接头内为几个点存在放电迹象,而热缩接头内为一片区域存在放电,放电程度明显高于冷缩接头,与测试数据的对比结果相一致。

此外,虽然冷缩接头的放电程度弱于热缩接头,电树枝的发展尚处于初始阶段,但在趋势上呈现出向绝缘纵深方向发展的态势。相比之下热缩接头的放电痕迹主要沿气隙在绝缘管表面发展,而非向绝缘管内部发展。由此可见冷缩接头的放电危害性很可能高于热缩接头,在今后的测试分析中仍需要进一步积累研究,针对不同工艺的接头合理制定缺陷判别标准。

4 结论

1)电缆振荡波测试可以有效检测出电缆接头的局部放电缺陷,并准确定位,有利于针对性开展运维检修工作。

2)通过以上对比发现,两种接头均在界面处发生放电,但冷缩接头是由于界面存在杂质导致的介质放电,而热缩接头是由于界面存在气隙导致的气隙放电,可见不同工艺的接头在放电成因上存在较大区别。

3)通过对比两起案例的局部放电情况,发现冷缩接头的局部放电起始电压高于热缩接头,最大局部放电量、局部放电次数低于热缩接头。说明不同工艺的接头在局部放电参量表征上存在差异。

4)对比两个接头的局部放电参量可知,冷缩接头内的局部放电不如热缩接头剧烈,但结合解体情况发现,冷缩接头内部绝缘上已产生电树枝,且呈现向纵深发展的趋势;而热缩接头的放电痕迹主要

沿气隙在绝缘管表面发展,证明了不同工艺的接头存在局部放电时,放电参量不一定正相关于放电危害性,对于接头运行安全性的影响程度存在差异,在后期有待进一步积累研究,制定相应的差异化缺陷评估标准。

参考文献:

- [1] 任志刚,丛光,李华春,等. GIS电缆终端缺陷综合局放诊断与分析[J]. 高压电器,2014,50(3):44-49.
REN Zhigang, CONG Guang, LI Huachun, et al. Combined diagnosis of partial discharge for GIS cable terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3):44-49.
- [2] 段乃欣,马翠姣,邱毓昌,等. 交联聚乙烯电缆敷设后的局部放电检测[J]. 供用电,2001,18(4):12-14.
DUAN Naixin, MA Cuijiao, QIU Yuchang, et al. Partial discharge detection as an after-laying test for XLPE cable lines[J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(4):12-14.
- [3] 陈显富,苏毅,兰国良,等. 一起典型振荡波诊断电缆放电故障实例分析[J]. 电气应用,2014,33(14):89-92.
CHEN Xianfu, SU Yi, LAN Guoliang, et al. A typical example of oscillating wave diagnosis of cable discharge fault[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(14):89-92.
- [4] 罗俊华,马翠姣,邱毓昌,等. 35 kV及以下XLPE电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术,2000,24(12):58-61.
LUO Junhua, MA Cuijiao, QIU Yuchang, et al. Study on test methods of XLPE power cable rated up to 35 kV[J]. Power System Technology, 2000, 24(12):58-61.
- [5] SCHALK N V. On-site testing of high voltage systems after laying: voltage test[C]//IEEE Colloquium on Super Tension (66~500 kV) Polymeric Cables and Their Accessories.[S.l.]: IEEE, 1995: 1-20.
- [6] BOYEGO K, HYVONEN P, MARTTI A, et al. Selectivity of damped ac(DAC)and VLF voltages in after-laying tests of extruded MV cable systems[J]. IEEE Trans. on D & EI, 2003, 5(10):874-882.
- [7] UCHIDA K, TANAKA H, HIROTSU K. Study on detection for the defects of XLPE cable limes[J]. IEEE Trans. on PWRD, 1996, 2(11):668.
- [8] GULSKI E, WESTER F J, SMIT J J, et al. Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(2):17-25.
- [9] 杨连殿,朱俊栋,孙福,等. 振荡波电压在XLPE电力电缆检测中的应用[J]. 高电压技术,2006,32(3):27-30.
YANG Liandian, ZHU Jundong, SUN Fu, et al. Use of oscillating wave voltage in the measurements of XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3):27-30.
- [10] 夏荣,赵健康,欧阳本红,等. 阻尼振荡波电压下110 kV交联电缆绝缘性能检测[J]. 高电压技术,2010,36(7):1753-1760.
XIA Rong, ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, et al. Dielectric property detection of 110 kV XLPE power cables using damped AC voltages[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7):1753-1760.
- [11] 熊俊,宁宇,黄慧红,等. 振荡波电压法检测交联聚乙烯电缆中间接头新缺陷的试验与仿真[J]. 现代电力,2011,28(2):7-11.
XIONG Jun, NING Yu, HUANG Huihong, et al. Experiment and simulation on PD detection of middle joint in XLPE power cables based on oscillating wave test system[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2):7-11.
- [12] GULSKI E, WESTER F J, SMIT J J, et al. PD knowledge rules for insulation condition assessment of distribution power cables[C]//5th Volta Colloquium on Partial Discharge Measurement, PD Measurements in the Field. Alkmaar, Netherlands:[s.n.], 2005: 1-9.
- [13] PETZOLD F, GULSKI E, SEITZ P P, et al. Advanced solution for on-site diagnosis of distribution power cables[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing:[s.n.], 2008: 1-4.
- [14] 陈温良,董燕,贾华. 对金属化电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(1):31-36.
CHEN Wenliang, DONG Yan, JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1):31-36.
- [15] 李雯,李成岭,李润沁. 电力电缆振荡波局放检测技术初探[J]. 科技创新导报,2016(35):61-62.
LI Wen, LI Chengling, LI Runqin. Preliminary study on the detecting technology of power cable oscillating wave[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016(35):61-62.
- [16] 刘鸿,刘磊,林圣,等. 电缆局放检测振荡波测试系统仿真与开发[J]. 电子测量技术,2016,39(11):6-10.
LIU Hong, LIU Lei, LIN Sheng, et al. Simulation and development of oscillating wave test system for cable PD testing[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11):6-10.
- [17] 董雪松,胡伟,曹俊平. 中低压电缆振荡波局部放电的现场测试[J]. 浙江电力,2012,31(12):15-17.
DONG Xuesong, HU Wei, CAO Junping. Field test of partial discharge of oscillatory wave in middle and low voltage cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(12):15-17.
- [18] 余英,薛荣,黄荣辉,等. 10 kV电缆振荡波局放测试的理论分析与试验研究[J]. 高压电器,2014,50(7):88-93.
YU Ying, XUE Rong, HUANG Ronghui, et al. Theoretical and experimental study on partial discharge test of 10 kV cable with oscillating voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7):88-93.

(下转第272页)

- 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.
- [5] 李德军, 沈威, 郭志强. GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 99-103. LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [6] REN Ming, DONG Ming, REN Zhong, et al. Transient earth voltage measurement in PD detection of artificial defect models in SF₆[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(8): 2002-2008.
- [7] JENNINGS E, COLLINSON A. A partial discharge monitor for the measurement of partial discharges in a high voltage plant by the transient earth voltage technique[C]//in Proc. IEEE Int. Conf. Partial Discharge. Canterbury, U.K.: IEEE, 1993: 90-91.
- [8] 李继胜, 赵学风, 杨景刚, 等. GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2440-2445. LI Jisheng, ZHAO Xuefeng, YANG Jinggang, et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2440-2445.
- [9] KANE C, BLOKHINTSEV I, GOLUBEV A. Measurement and analysis of partial discharges in switchgear[C]//IEEE EIC. [S.l.]: IEEE, 2005: 203-210.
- [10] ZHAO X F, YAO X, GUO Z F, et al. Partial discharge characteristics and mechanism in voids under impulse voltage[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(35): 704-710.
- [11] DAVIES N, JONES D. Testing distribution switchgear for partial discharge in the laboratory and the field[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 2008: 716-719.
- [12] LUNDGAARD L E, RUNDE M, SKYBERG B, et al. Acoustic diagnosis of gasinsulated substations: A theoretical and experimental basis[J]. IEEE Trans. Power Del., 1990, 5(4): 1751-1759.
- 王流火(1985—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事高压电气设备绝缘诊断及局部放电检测技术研究。
- 吕 鸿(1982—), 男, 电力工程师, 工学硕士, 从事高压开关设备试验及绝缘诊断技术研究工作。
- 王增彬(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高压开关设备局部放电在线监测技术研究。
- 谭令其(1991—), 男, 助理工程师, 工学硕士, 从事高压开关设备试验研究工作。
- 吴 吉(1988—), 男, 工程师, 工学硕士, 从事高压开关设备试验研究工作。

(上接第264页)

- [19] 杨荣凯. XLPE电缆线路局部放电量指标的分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 27-28. YANG Rongkai. Analysis of PD level of XLPE insulation cable[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 27-28.
- [20] KOO J U, KIM J T, LEE J S, et al. A study on the oscillating wave voltage test as an after-laying test for distribution power cables[C]//IEEE Annual Report-conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1997: 334-337.
- 李 旭(1987—), 男, 工程师, 工学学士, 主要从事电力电缆运维检测技术研究工作。