

基于超高频法的典型 GIS 局部放电检测

孙曙光^{1,2}, 陆俭国¹, 俞慧忠², 沈建位², 金少华¹

(1. 河北工业大学, 天津 300130; 2. 浙江开关厂有限公司, 衢州 324000)

摘要: GIS 局部放电检测是 GIS 绝缘状态监测的一种科学有效的方法。笔者构建了 GIS 实验模型以及基于超高频法的局部放电在线检测系统, 对 GIS 中典型的几种局部放电特征进行了研究, 采用基于相位的分析模式详细分析了不同放电类型在不同电压条件下的放电特征, 并结合常规局部放电测试仪, 对 UHF 信号的放电电量进行估计, 为进一步进行放电类型的智能模式识别及研究超高频信号与放电电量关系提供了试验依据, 以提高 UHF 局部放电检测的工程实用性。

关键词: GIS; 局部放电; 超高频; 相位分析; 放电电量

中图分类号: TM56

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0007-06

Detection of Typical GIS Partial Discharge Based on UHF Method

SUN Shu-guang^{1,2}, LU Jian-guo¹, YU Hui-zhong², SHEN Jian-wei², JIN Shao-hua¹

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Zhejiang Switchgear Factory Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: GIS partial discharge detection is a scientific and effective way for insulation condition monitoring. A GIS model and the detection system based on UHF method has been set up. Several typical GIS partial discharge is studied and using power phase analysis a detailed analysis of characteristics under different voltage is made; Combined with conventional partial discharge detection method, the partial discharge quantity estimation of UHF signal is also made. All of these lay a foundation for the study of partial discharge intelligent recognition and the relationship between UHF signal and partial discharge quantity to improve the engineering utility of UHF partial discharge detection.

Key words: gas insulated switchgear; partial discharge; UHF; power phase analysis; discharge quantity

0 引言

气体绝缘变电站由于其占地面积小、安装方便、受外界干扰少等优点被广泛应用于高压输变电系统中。其中绝缘缺陷与绝缘故障是影响 GIS 安全稳定运行的最大威胁^[1-3], 例如 2009 年 8 月 11 号成都双流机场发生大面积停电导致机场被迫部分关闭, 从现场抢修情况判断, 此次停电是由于机场内部的主变电站母联开关严重烧毁造成, 再者 2008 年 3 月 21 日, 北京电网 220 kV 草桥变电站发生停电事故, 造成多处重要用户无法正常用电, 最终发现是高压开关设备关键环节安装不当引发了这起停电事故^[4]。

而局部放电信号包含了丰富的绝缘状态信息, 不仅能检测到 GIS 制造与安装过程中引入的缺陷, 而且实行在线监测能有效检测出绝缘故障的发生及严重程度, 是 GIS 绝缘状态监测的一种科学有效的方法^[5-6]。基于超高频法的局部放电测量原理就是使用 UHF 天线来检测 GIS 局部放电产生的电磁波, 能有效地避开实际应用中常见的电磁干扰, 因而抗干扰能力强, 并能够根据电磁波从放电源到不同传感器的时间差对放电源进行定位^[7-9], 因此笔者采用该种方式实现 GIS 局部放电信号的测量。

基于超高频法的局部放电检测有两个很关键的问题, 一是要研究不同放电类型的超高频信号特征, 另一是研究超高频信号与视在放电电量之间的关系^[10-11], 因此笔者构建了 110 kV GIS 实验模型, 利用设计的

收稿日期: 2011-11-26; 修回日期: 2011-12-11

基金项目: 浙江省科技计划项目(2010C31098); 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(10962126D)。

Project Supported by the Science and Technology Agency Project of China Zhejiang Province(2010C31098), Focused Basic Research Project of China Hebei Province Applying Basic Research Plan(10962126D).

基于超高频法的 GIS 局部放电在线检测系统,对 GIS 中几种典型的局部放电特征进行了深入分析,并结合常规局部放电测试仪,对超高频信号所对应的视在放电量进行了估计,为进一步进行局部放电类型的智能识别以及研究超高频信号与视在放电量之间的关系打下了基础。

1 实验系统

1.1 实验装置与局放源

实验模型由 110 kV ZFW-126 型 GIS 实际部件构成,见图 1。

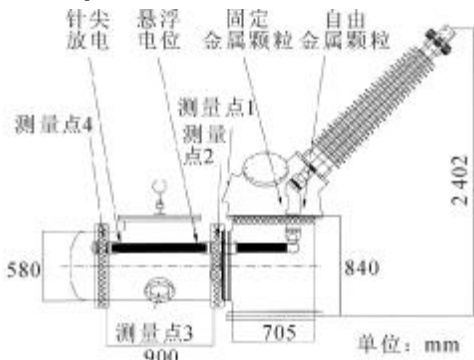


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

该试验装置模型整体呈 L 型结构,三相共箱式设计,经蛇皮管及高压套管给中间相 A 相加高压, B、C 两相及 GIS 外壳可靠接地。装置中有 3 个非气隔盘式绝缘子,共构成 4 个大小不等的气室,各气室充以 0.2 MPa 的 SF_6 气体作为绝缘介质,超高频传感器的安装采用外置式,一种为安置在盘式绝缘子的外侧浇铸孔处,如测量点 2、4;另一种在 GIS 腔体开孔,并采用环氧树脂做成的盖子进行封闭,如测量点 1、3,通过实验验证测量点 2、4 对电磁波的衰减相对于测量点 1、3 要大的多,因此文中的超高频信号均为从测量点 1、3 获取的信号。文中共设计了 3 种典型的局部放电源模型:

1) 高压导体上的金属尖刺放电^[12]。尖刺为直径 0.5 mm 的单根铜丝,与筒体壁的间隙为 20 mm,铜丝由螺丝固定在高压导体上,并紧密接触。

2) 悬浮电位。当 GIS 屏蔽罩松动时,常会变成悬浮体而产生局部放电^[13],采用一个不锈钢螺母来模拟这种放电,由于当悬浮电极的接触电阻很大时,并不会产生持续的局部放电^[14],因此利用绝缘胶带将螺母垫起,螺母与高压导杆的间隙为 0.1 mm。

3) 绝缘子表面的固定金属颗粒^[15-16]。绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电缺陷的放电模型为长度 5 cm、直径 1 mm、平行于电场方向固定放置的单根铜

丝,上端部位于绝缘子与高压导杆连接点 1 cm 处。

1.2 检测装置

在实验过程中,试验回路见图 2。无晕实验变压器为 380 V/300 kV, C_x 为相应的试验模型的等效电容; C_0 为 300 kV、400 pF 高压电容器,用于耦合 C_x 放电时产生的脉冲电流信号,因超高频法不能直接测量试品的视在放电量,所以配备 1 台常规局放仪以实现放电量的标定; Z_m 为 XD2102 型局部放电检测仪的检测阻抗;文中所设计的超高频局部放电在线检测系统的硬件主要由超高频传感器^[17]、内置 PCI-9812 数据采集卡^[18]的工控机、示波器以及工频电压同步数字触发电路构成^[19],所采用的超高频传感器内置有天线、滤波器、放大器和检波器,具有射频和检波两路输出。检波输出为在超高频信号基础上进行包络检波之后得到的信号,其频率较低,该传感器的检波脉宽为 200 μs ^[20],有利于使用高速采集卡进行信号采集,天线采用平面等角双臂螺旋结构,工作频带 1 200~1 500 MHz,这是由于当 GIS 内部发生局部放电时,能激励起 1.2 GHz 以上的超高频电磁信号。由于 GIS 具有同轴谐振腔结构,使得超高频电磁波信号在 GIS 内部传播时衰减较小^[21],因此可以方便的用超高频探头接收^[22],由于 GIS 外壳良好的屏蔽作用,外部信号很难进入 GIS 内部,即使少量的干扰信号进入 GIS,其频率也远低于超高频的范围,因此此种传感器的抗干扰性非常好,另一路为射频输出,即原始的 UHF 信号,接至示波器,用于实现基于超高频法的局部放电量标定,示波器的型号为泰克 TDS3034B。局部具有明显的随机性,所以采用基于相位的分析模式,即由工控机对 100 个工频周期内的放电信号进行统计分析,得到局部放电的各种分布谱图,包括有二维 $U_{\max}-\varphi$ 、 $N-\varphi$ 谱图与三维 $N-\varphi-U$ 谱图,谱图主要是描述局部放电发生的工频相位、放电幅值和放电次数的关系^[23]。

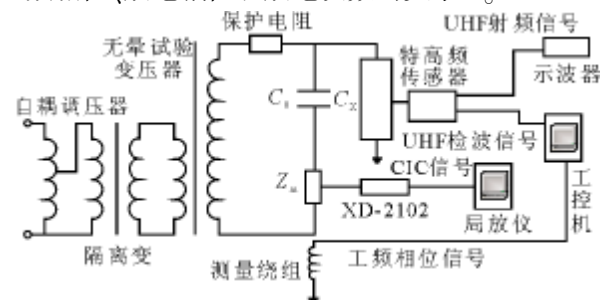


图2 实验连接图

Fig. 2 The connection diagram of experiment

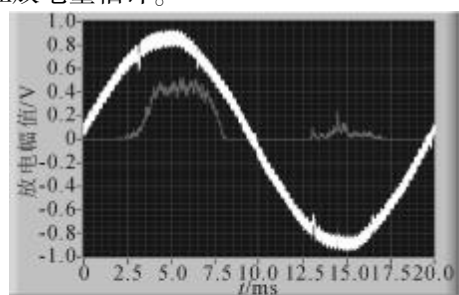
2 GIS 局部放电测量

对于所设计的 3 种放电类型的实验分析,均采用

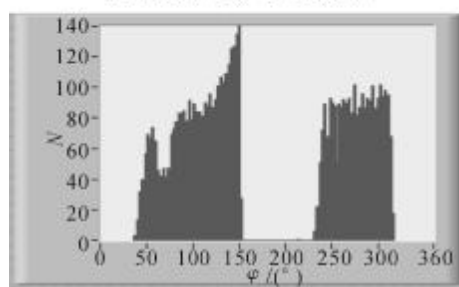
用了以下的方式,对每种放电类型在电压为零时以 10 kV 作为一个等级,开始逐步升压,记录下每种放电类型开始出现局部放电的电压值,并以此电压为基准,在每个电压等级下加压等长时间间隔直至电压升至 100 kV 后再将电压降至零。在此过程中局部放电在线检测系统记录下不同电压等级下的放电波形、局部放电的谱图统计以及整个过程中局部放电发生的次数和最大放电值随时间变化的趋势。同时在每种电压等级下通过示波器记录 10 组 UHF 信号峰值,并通过常规局放仪记录 10 组放电量 pC 值,分别求取均值,绘制超高频信号峰值与视在放电量的对应关系图,实现由 UHF 信号对视在放电量进行估计。

2.1 金属尖刺放电分析

高压导体金属尖刺开始出现局部放电所施加的电压为 30 kV,以此电压为基准,开始逐步升压直至 100 kV,每种电压等级下持续 30 s 的时间。图 3 为在 90 kV 电压下检测到的局部放电的一个工频周期内的放电检波波形与 100 个工频周期内的 $N-\varphi$ 二维统计谱图,检波波形为实时测量信号,笔者采用基于相位的分析模式,所以在检波波形显示中加入了试验模型高压端的电压波形,如图 3 中正弦波所示,以便实时观测检波信号与电压信号的相位关系。表 1 为根据 $N-\varphi$ 统计测得的 30~100 kV 的局部放电信号分布区间,即在一个工频周期 0~360°内放电出现的区间,图 4 为此过程中局部放电幅值与放电次数发展的趋势图,图 5 为尖刺放电超高频信号的视在放电量估计。



(a) 局部放电信号检波波形



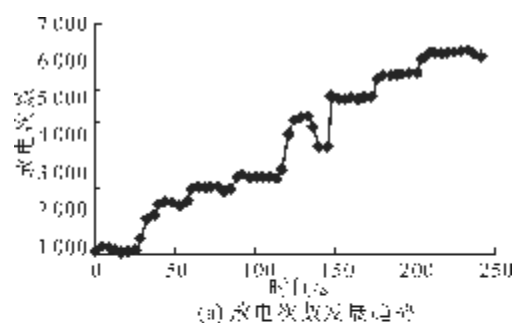
(b) $N-\varphi$ 统计

图 3 尖刺局部放电在线检测系统测量结果

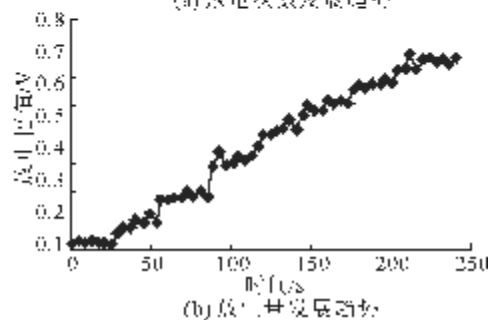
Fig. 3 The detection result of corona discharge

表1 针尖放电分布区间

电压/ kV	放电区间 1/(°)	放点区间 2/(°)
30	90~130	-
40	75~150	-
50	60~150	260~290
60	60~150	250~310
70	50~150	230~320
80	50~150	230~320
90	40~160	225~325
100	30~160	225~330



(a) 放电幅值发展趋势



(b) 放电量发展趋势

图 4 尖刺局部放电发展趋势

Fig. 4 The trend of corona discharge

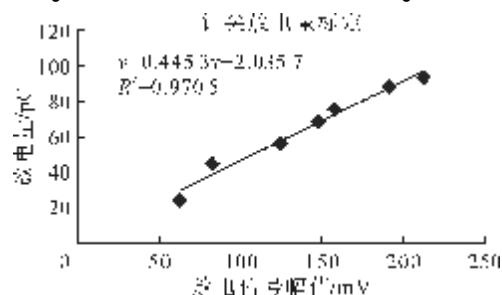


图 5 尖刺放电超高频信号放电量估计

Fig. 5 The discharge quantity estimation of corona discharge

由图 3 与表 1 不难看出此种类型的局部放电单个工频周期内的放电次数多,放电信号相互交叠,首先出现在工频电压正半周的峰值附近,50 kV 后负半周才开始出现局部放电,但小于正半周的放电幅值,随着施加电压的增大以及时间的延长,放电次数与放电幅值均显著增加,前后差异明显,由图 5 可以发现针尖放电所激发的电磁波峰值与其视在放电量之间存在一定的线性关系,可据此对视在放电量进行估计。

2.2 悬浮电位放电分析

高压悬浮体开始出现局部放电所施加的电压为 70 kV, 相对于针尖放电的起始电压要高出许多, 以此电压为基准, 开始逐步升压直至 100 kV, 每种电压等级下持续 60 s 的时间。图 6 为检波波形与 $N-\varphi$ 二维统计谱图, 电压等级为 90 kV。表 2 为根据 $N-\varphi$ 统计测得的 70~100 kV 的局部放电信号分布区间, 图 7 为此过程中局部放电放电幅值与放电次数发展的趋势图, 图 8 为悬浮电位放电超高频信号的视在放电量估计。

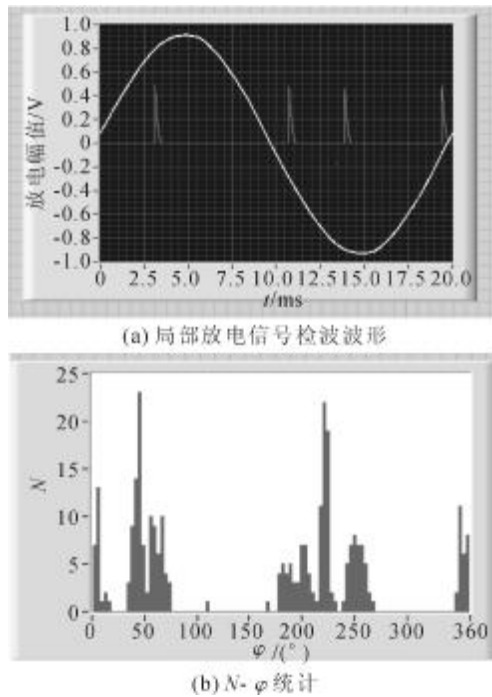


图 6 悬浮电位放电在线检测系统测量结果

Fig. 6 The detection result of suspension discharge

表2 悬浮电位放电分布区间

Tab. 2 The distribution of suspension discharge

电压/kV	放电区间 1/(°)	放电区间 2/(°)	放电区间 3/(°)
70	50~60	240~260	-
80	40~60	220~260	-
90	10~75	190~270	-
100	0~80	180~270	350~360

由图 6 与表 2 可看出, 此种类型的局部放电在一个工频周期内的放电次数少, 但只要发生放电, 放电幅值就比较明显, 工频正负半周的放电信号基本成对出现, 放电相位也基本对称, 随着施加电压的增大以及时间的发展, 放电次数增加比较明显但放电幅值变化不是很大, 由图 8 可以发现悬浮电位放电所激发的电磁波峰值与其视在放电量之间的线性关系不是很明显。

2.3 绝缘子表面固定金属颗粒放电分析

绝缘子表面固定金属颗粒开始出现局部放电

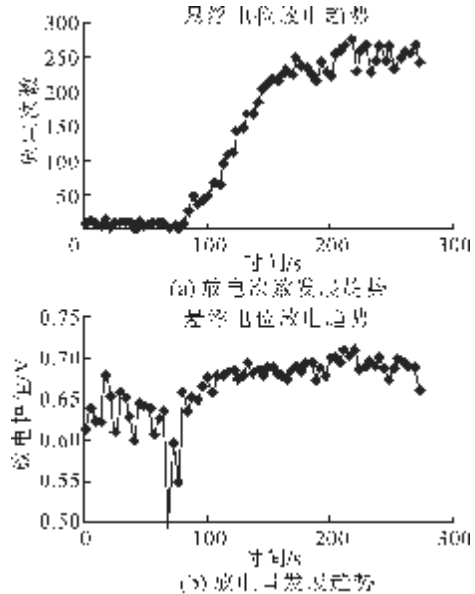


图 7 悬浮电位放电发展趋势

Fig. 7 The trend of suspension discharge

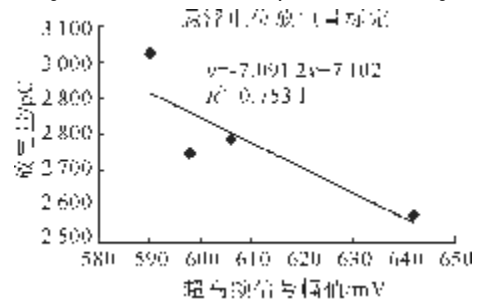


图 8 悬浮电位放电超高频信号放电量估计

Fig. 8 The discharge quantity estimation of suspension discharge

所施加的电压为 70 kV, 以此电压为基准, 开始逐步升压直至 100 kV, 每种电压等级下持续 60 s 的时间。图 9 为检波波形以及 $N-\varphi$ 二维统计谱图, 电压等级 90 kV。表 3 为根据 $N-\varphi$ 统计测得的 70~100 kV 的局部放电信号分布区间, 图 10 为此过程中局部放电幅值与放电次数发展的趋势图, 图 11 为绝缘子表面固定金属颗粒放电超高频信号的视在放电量估计。

由图 9-10、表 3 可看出, 此种类型的局部放电在一个工频周期内的放电次数多但幅值大小不一, 负半周的放电次数要明显多于正半周的放电次数, 随着施加电压的增大以及时间的发展, 放电次数稳步增加, 放电幅值变化虽在局部区间内没有规律性, 但在整体区间内是呈现增大的趋势, 由图 11 可以发现, 固定金属颗粒放电所激发的电磁波峰值与其视在放电量之间存在一定的线性关系, 可据此对视在放电量进行估计。

3 结语

文中对 GIS 中几种典型的局部放电特征进行

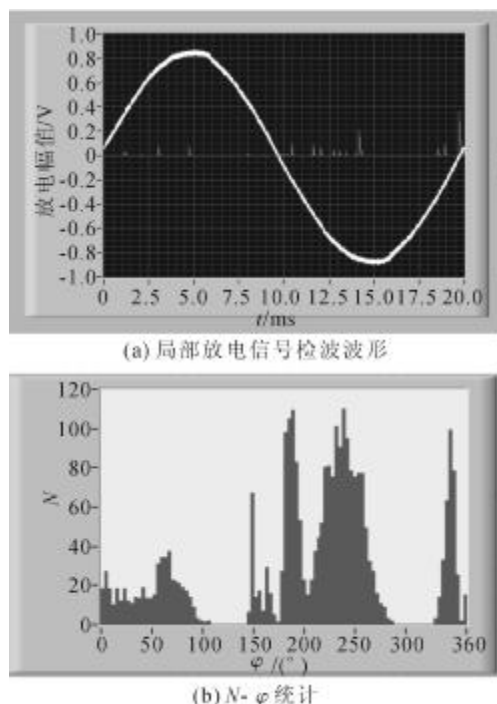


图 9 绝缘子表面金属颗粒放电在线检测系统测量结果

Fig. 9 The detection result of metal partial discharge

表 3 固定金属颗粒放电分布区间

Tab. 3 The distribution of metal particle

电压/kV	放电区间 1/(°)	放电区间 2/(°)	放电区间 3/(°)
70	0~110	150~280	340~360
80	0~120	140~280	330~360
90	0~120	140~300	325~360
100	0~120	140~300	325~360

了深入研究分析,结果表明,不同类型的放电波形及其发生放电的相位模式存在一定的区别;对超高频信号所对应的局部放电量进行了估计,对于某些放电类型其存在一定的线性关系,以上均为进一步进行局部放电放电类型的智能识别以及研究超高频信号与放电量之间关系打下了基础。

参考文献:

- [1] 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 De-jun, SHEN Wei, GUO Zhi-qiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 99-103.
- [2] 卞 超,陈少波. 基于脉冲电流波形的 GIS 局部放电检测抗干扰技术研究[J]. 高压电器,2010,46(5):30-33.
BIAN Chao, CHEN Shao-bo. Study on anti-interference technique used in PD detection for GIS based on pulse current waveshap[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 30-33.
- [3] 李立学,黄成军,曾 奕,等. GIS 局部放电包络信号噪

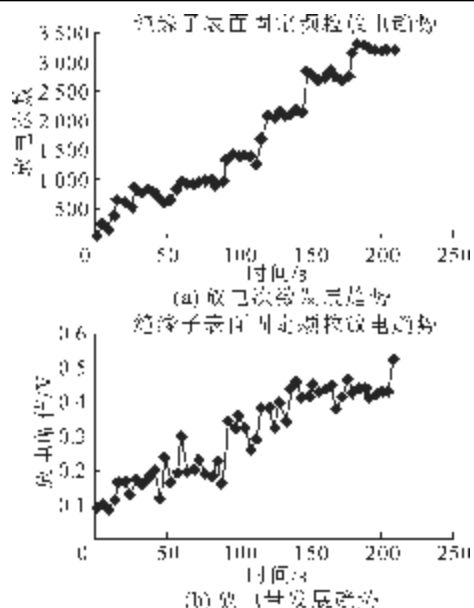


图 10 固定金属颗粒放电趋势

Fig. 10 The trend of metal particle discharge

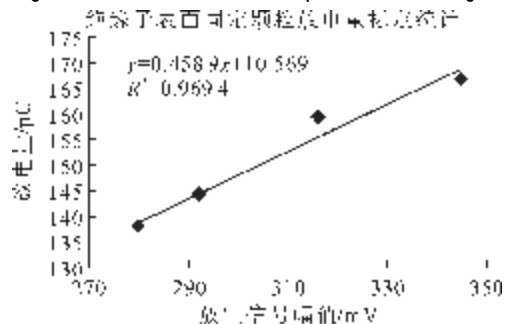


图 11 固定金属颗粒放电超高频信号放电量估计

Fig. 11 The discharge quantity estimation of metal particle discharge

声抑制的小波方法[J]. 高压电器,2009,45(1):38-40.

LI Li-xue, HUANG Cheng-jun, ZENG Yi, et al. Noise reduction using wavelet for envelope signal of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 38-40.

- [4] 袁大陆,李岩军,和彦森. 3.21 北京电网 220 kV 草桥变电站停电事故调查分析[J]. 电网技术,2008,32(18):92-95.
YUAN Da-lu, LI Yan-jun, HE Yan-miao. Analysis on blackout of 220 kV Caoqiao substation of Beijing power network in China on march 21[J]. Power System Technology, 2008, 32 (18): 92-95.
- [5] 李继胜,赵学风,杨景刚. 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 Ji-sheng, ZHAO Xue-feng, YANG Jing-gang. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2440-2445.
- [6] 印 华,方 志,张小勇. 根据 UHF 信号特征的 GIS 局部放电模式识别[J]. 高压电器,2005,41(1):19-23.
YIN Hua, FANG Zhi, ZHANG Xiao-yong. Partial discharge

- pattern recognition of GIS based on the UHF signal characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 19-23.
- [7] 吴张建, 李成榕, 齐波. GIS局部放电检测中特高频法与超声波法灵敏度的对比研究[J]. 现代电力, 2010, 27(3): 31-36.
- WU Zhang-jian, LI Cheng-rong, QI Bo. Partial discharge detection for GIS: a comparison of sensitivity between UHF and ultrasonic methods[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(3): 31-36.
- [8] 李梅. 油纸绝缘局部放电超高频检测方法的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 38-42.
- LI Mei. Ultra-high frequency detection technique for partial discharge in oiled-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 38-42.
- [9] 王江, 钱勇, 刘君华, 等. GIS中局部放电与超高频电磁波关系的仿真研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 456-459.
- WANG Jiang, QIAN Yong, LIU Jun-hua, et al. Simulating the relationship between PD waveform and UHF electromagnetic wave in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 456-459.
- [10] 李信. GIS局部放电特高频检测技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- LI Xin. Research on UHF detection for partial discharge in GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [11] 唐炬, 吴建蓉, 卓然, 等. 针-板局部放电UHF信号与放电量之间的等量关系[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1083-1089.
- TANG Ju, WU Jian-rong, ZHUO Ran, et al. Relationship between UHF signals and discharge magnitude of partial discharge from needle plate electrode[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1083-1089.
- [12] 蒋建玲. 用超高频法研究GIS中局部放电的特征[M]. 北京: 华北电力大学, 2003.
- JIANG Jian-ling. Measurement of the characteristics of partial discharge in GIS insulated substations by UHF detecting technique[M]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [13] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92.
- JIN Li-jun, ZHANG Ming-rui, LIU Wei-dong. Examination and research on the partial discharge fault diagnostics in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 88-92.
- [14] 段大鹏. 基于UHF方法的GIS局部放电检测与仿生模式识别[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- DUAN Da-peng. GIS partial discharge detection and biomimetic pattern recognition based on UHF method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [15] 齐波, 李成榕, 郝震. GIS绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011(31): 101-108.
- QI Bo, LI Cheng-rong, HAO Zhen. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011(31): 101-108.
- [16] 金立军, 刘卫东, 黄家旗. GIS金属颗粒局部放电的试验研究[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 10-13.
- JIN Li-jun, LIU Wei-dong, HUANG Jia-qi. Examination and research on the partial discharge of metallic particles in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 10-13.
- [17] 胡迪军, 陈杰华, 李忠, 等. 一种用于GIS局部放电检测的新型特高频传感器[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 26-28.
- HU Di-jun, CHEN Jie-hua, LI Zhong, et al. A new ultra high frequency sensor for detection of partial discharge for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 26-28.
- [18] 刘云鹏, 律方成, 李燕青. 变压器局部放电信号实时数据采集系统的设计[J]. 变压器, 2003, 40(12): 25-27.
- LIU Yun-peng, LÜ Fang-cheng, LI Yan-qing. The real-time data acquisition system design of discharge in transformer[J]. Transformer, 2003, 40(12): 25-27.
- [19] 刘云鹏, 王会斌, 王娟. 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(2): 15-17.
- LIU Yun-peng, WANG Hui-bin, WANG Juan. Research on on-line partial discharge UHF monitoring system for high voltage switchboard[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 15-17.
- [20] 李立学, 黄成军, 曾奕, 等. GIS局部放电信号超高频包络检波电路的研制[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 406-408.
- LI Li-xue, HUANG Cheng-jun, ZENG Yi, et al. Ultra-high frequency envelope detection circuit for GIS partial discharge signal[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 406-408.
- [21] 袁鹏, 史文, 杨景刚, 等. 基于超高频窄带法的GIS局部放电的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 40-43.
- YUAN Peng, SHI Wen, YANG Jing-gang, et al. Study of partial discharge in GIS based on narrow band UHF[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 40-43.
- [22] 张小勇, 贾申利, 王建生, 等. 基于超高频法GIS局部放电监测技术的研究[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 179-181.
- ZHANG Xiao-yong, JIA Shen-li, WANG Jian-sheng, et al. Study on the monitoring technique of partial discharge of GIS by UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 179-181.
- [23] 李信, 李成榕, 丁立健. 基于特高频信号检测GIS局放模式识别[J]. 高电压技术, 2003, 9(11): 26-29.
- LI Xin, LI Cheng-rong, DING Li-jian. Identification of PD patterns in GIS based on UHF signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 9(11): 26-29.
- 孙曙光(1979—), 男, 回族, 博士后, 讲师, 主要从事GIS局部放电在线检测。