

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.003

GIS 套管对平面电磁波耦合特性的仿真分析

陈 晔¹, 叶兆平¹, 郑书生²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 变电站放电产生的电磁波进入 GIS 设备内部, 严重干扰了局部放电特高频 (ultra-high-frequency, UHF) 检测。研究干扰电磁波进入设备的传播特性对于抗干扰技术的提升意义重大, 但是目前尚无此方面的研究工作报道。套管是外部电磁波干扰进入设备的主要通道之一, 利用时域有限差分方法仿真分析了电磁波经过套管进入 GIS 设备的传播特性。首先, 建立了 252 kV 套管与 GIS 腔体仿真模型, 在模型侧面设置了平面电磁波源, 在 GIS 内部设置了电场强度点探针; 其次, 计算了电磁波传播过程中仿真实间内各点的场强及其动态变化, 展示了电磁波进入套管与 GIS 的动态画面; 最后, 分析了进入 GIS 内部的电磁波信号的强度、频谱分布特征及其与外部平面电磁波源极化方向的关系。仿真结果表明: 套管中心的导杆在电磁波耦合过程中起到了主要作用, 当平面波电场方向平行于导杆时 GIS 内部电磁波干扰信号最强, 谐振电磁波的波长大于等于导杆长度的 2 倍。研究结果对于查找与排除 UHF 干扰源具有重要的指导意义。

关键词: GIS; 套管; 局部放电; 特高频 (UHF); 干扰; 极化

Simulation and Analysis of Coupling Characteristics of GIS Bushing to Plane Electromagnetic Waves

CHEN Ye¹, YE Zhaoping¹, ZHENG Shusheng²

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The electro-magnetic waves, which radiated from discharge in the substation, come into GIS instruments and affect partial discharge ultra-high-frequency (UHF) detection badly. The study on the propagation of electro-magnetic waves through the GIS is of great importance for improving Anti-jamming technology. However, there is still no report on this research work. Bushing is one of the main path for electro-magnetic waves going into the GIS. Therefore, the propagation of electro-magnetic wave going through bushing and into GIS is simulated and analyzed by using the method of finite difference in time domain. Firstly, the simulation models of 252 kV bushing and GIS are set up, the plane electro-magnetic wave sources are set on the side of model, and three probes are set in the model to detect the electric field. Secondly, the electric fields at every points in the simulation space during the propagation are calculated and presented as a series of graph changed along the time. Lastly, the relationships between the amplitude, power spectrum of electro-magnetic wave and the polarizations of plane waves are analyzed. As the results, the conductor rod in the bushing plays the most important role in coupling electro-magnetic wave. When the polarization of plane wave is parallel to the conductor rod, the electro-magnetic wave going into the GIS will be the most strong. The wavelengths of the resonant electro-magnetic wave is equal to or more than twice of the conductor rod length. These conclusions are instructive for finding and eliminating the UHF interferences.

Key words: GIS; bushing; partial discharge (PD); ultra-high-frequency (UHF); interference; polarization

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-12-15

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目 (52130417000N)。

Project Supported by Science and Technology Project of Sate Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. (52130417000N).

0 引言

GIS局部放电特高频(ultra-high-frequency, UHF)带电检测或在线监测技术是在事故发生之前发现绝缘缺陷的重要手段^[1]。自21世纪初以来,中国电力高校与科研部门针对UHF信号产生机理、传播过程、检测与诊断方法等方面开展了大量的技术与开发工作^[2-6],极大推动了UHF检测与诊断技术的发展。UHF检测技术已广泛应用于工程实践,提前发现了许多起GIS局部放电缺陷,为保障设备安全可靠运行做出了巨大贡献^[7-8]。

然而,变电站现场存在大量电磁波干扰^[9-10],造成了一系列UHF检测装置误报警、漏报警问题。大量测试与统计分析结果表明,移动通讯信号和变电站设备外部的放电是主要的电磁波干扰源,通讯信号主要位于0.8~1 GHz和1.8~2 GHz频带内,脉冲型干扰频谱分布一般小于900 MHz^[11]。国内外在UHF电磁波干扰屏蔽、滤波、以及数字信号处理等方面开展了大量工作。为了屏蔽电磁波干扰,提倡采用内置式UHF传感器,或者利用屏蔽材料包覆外置传感器及盆式绝缘子。但是,这些措施无法屏蔽经过套管进入GIS的干扰信号。在滤波方面,通常采用硬件带通滤波器滤除电晕干扰与通讯干扰,也可通过对比选择信噪比高的窄频带进行检测^[12]。在数字信号处理方面,针对UHF原始波形的小波分析方法开展了大量研究工作^[13-16]。目前,在通讯干扰的滤波、识别方面取得了显著成效,但是对于变电站内广泛存在的放电类干扰仍然难以避免。

变电站内广泛存在放电干扰源,包括:金属部件接触不良放电、悬浮电位放电、线路绝缘子沿面放电等。这些干扰信号的功率谱分布、相位统计特征与局部放电相似^[11]。一旦被UHF检测系统探测到,这些干扰的识别与排除将异常困难。为了屏蔽外部干扰信号,主要采用屏蔽布、屏蔽胶带等材料包裹盆式绝缘子及UHF传感器。然而,GIS套管的导杆与屏蔽罩之间有大尺寸空隙,这也可能成为外部电磁波干扰进入GIS内部的重要途径。目前尚且没有电磁波在GIS套管中传播特性的研究报道。

文中将采用时域有限差分(FDTD)方法仿真干扰电磁波经过GIS套管进入设备内部的传播过程。在此方法中可以用清晰的图像将每个时刻电磁场空间分布特征展现出来,便于理解电磁波传播过程;还可以提取空间中任意位置的场强信号时域波形及其傅里叶变换,用以分析电磁波信号的时频域特征。针对套管结构及其对电磁波耦合的特点,重

点分析外部电磁波极化方式对传播特性或GIS内部干扰信号时频域特征的影响。

1 套管内电磁波传播仿真模型与设置

1.1 时域有限差分电磁波仿真方法

求解电磁场问题的时域有限差分(以下简称为FDTD)方法是基于在时间和空间域中对Maxwell旋度方程的有限差分离散化,以具有两阶精度的中心有限差分格式来近似地代替原来微分形式的方程。在此方法中,采用Yee提出在空间和时间都差半个步长的网格结构,通过类似蛙步跳跃式的步骤用前一时刻的磁、电场值得到当前时刻的电、磁场值,并在每一时刻上将此过程算遍整个空间,于是可得到整个空间域中随时间变化的电、磁场值的解。XFDTD软件是Remcom公司开发的基于FDTD方法的三维电磁波仿真软件,已被广泛应用于局部放电UHF电磁波传播过程的仿真分析。

1.2 套管与GIS仿真模型

按照225 kV GIS与套管的结构尺寸建立全尺寸仿真模型,见图1。模型包括气体绝缘套管、GIS壳体、导杆、盆式绝缘子。套管由瓷套、导杆、桶状屏蔽罩等主要部件组成。套管导杆的直径为70 mm,由屏蔽筒向外伸出的长度为1 990 mm;屏蔽罩的内径为250 mm,高度为400 mm;GIS壳体内径为360 mm,套管下部的竖直GIS过渡气室的高度为427 mm;经过T型三通腔体后,GIS转为水平布置,长度为5 000 mm。在套管、过渡气室、三通腔体、水平腔体之间分别设置实际尺寸的252 kV盆式绝缘子。将导杆、屏蔽罩、壳体等金属部件材料设置为理想导体;瓷套相对介电常数设置为6.0,电导率设置为 1×10^{-12} S/m;盆式绝缘子介电常数取3.9,电导率设置为 6.5×10^{-15} S/m,GIS内SF₆气体与外部的空气的相对介电常数设置为1。

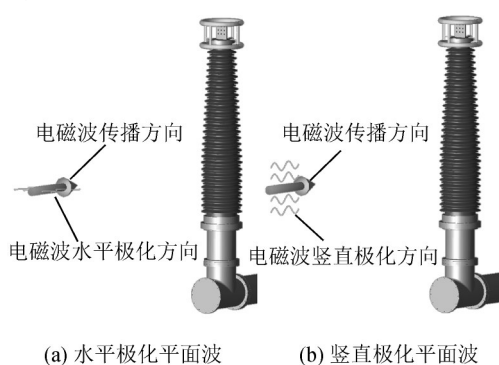


图1 GIS与套管仿真模型

Fig. 1 Simulation model of GIS and bushing

1.3 平面电磁波辐射源的方向性与时频域波形

变电站内空间开阔,电磁波干扰源与套管之间的距离远大于套管高度,电磁波到达套管时近乎于平面波。因此,采用设置在套管侧面的平面电磁波源作为入射波,入射波方向指向套管。为了便于分析套管对耦合入射电磁波的耦合特性,采用两种极化方向的电磁波:一种为水平极化,电场方向平行于地面、同时垂直于传播方向与套管;另一种为竖直极化,电场方向垂直于地面与传播方向,同时平行于套管导杆。见图2。



(a) 水平极化平面波 (b) 竖直极化平面波

图2 平面电磁波的传播方向与极化方向

Fig. 2 The propagation direction and polarization direction of the electromagnetic plane wave

变电站存在的干扰源主要包括窄带通讯干扰、宽带放电性干扰。平面电磁波的时域波形设置为高斯脉冲,可在宽频带内分析套管耦合特性。高斯脉冲的时域形式为

$$E(t) = E_0 \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (1)$$

式(1)中: E_0 为脉冲幅值; τ 为常数,决定了高斯脉冲的宽度;在 $t = t_0$ 时脉冲峰值出现。 E_0 的大小对于电磁波耦合特性分析无影响,为了便于对比分析,将 E_0 设置为10 V/m。脉冲宽度越小,其频域波形的上限频率越高。为了分析UHF检测频率范围内的干扰信号,将脉宽设置为1 ns,使得在脉冲频谱波形中DC-1.5 GHz频段内的幅值波动范围不超过3 dB。平面波电场强度的时、频域波形见图3。

1.4 仿真空间与观测点设置

仿真空间尺寸大小为:6 m×1 m×6 m,仿真空间侧面、顶面为PML(perfectly matched layer)匹配层。仿真计算中所用最高频率(f)设置为6 GHz,利用式(2)确定胞元尺寸

$$L_{\max} = c/(10 \times f) \quad (2)$$

式(2)中: $L_{\max}$ 为最大胞元的尺寸; c 为光速, 3×10^8 m/s; f 为激励最高频率。因此,最大胞元尺寸 $L_{\max}$ 为5 mm。一个完整的胞元尺寸为 $(5 \times 5 \times 5)$ mm³,剖分

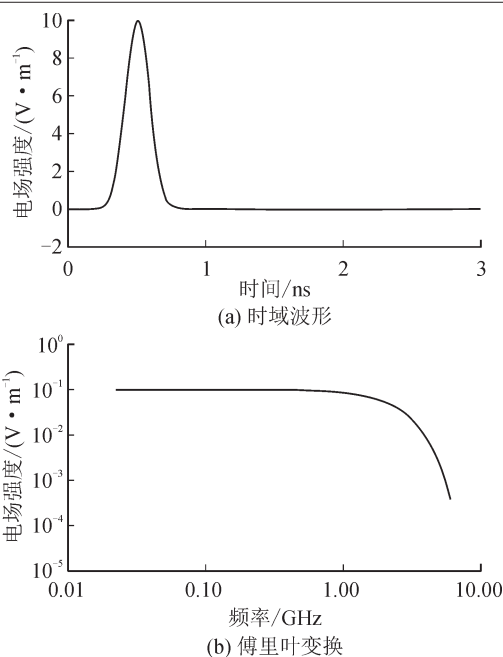


图3 平面波电场强度时频域波形

Fig. 3 Time and frequency domain waveforms of the plan wave electric field

所需内存大小为30 GB。

在套管与壳体内典型部位设置点探针,探测同轴结构内半径方向的电场强度。第1个探针设置在屏蔽罩内表面中间高度位置,第2个探针设置在套管下部过渡气室壳体内表面中间高度位置,第3个探针设置在水平气室壳体内表面距离盆式绝缘子1 m处。

2 套管对电磁波耦合过程

2.1 极化方向垂直于导杆时的波过程

观测GIS与套管纵切面上各点的电场强度,以色度表示场强值的大小,可以形成每个时刻的电场强度平面分布图。6个时间节点的场强值分布色度图见图4。在1.21 ns,电磁波到达瓷套表面;在2.22 ns,电磁波经过瓷套到达导杆,同时部分电磁波从屏蔽罩端口的左侧进入;在2.32 ns,电磁波到达屏蔽罩中下部,先到达中部的电磁波强度(-60 dB)明显弱于上部(-25 dB);在4.14 ns,电磁波到达过渡腔体,腔体内的电场强度分布基本呈现轴对称分布;在9.09 ns,电磁波到达三通腔体,此时腔体内的电场强度仅为-65 dB,远低于GIS外部电磁波传播的波头部分(-10 dB),在套管周围空间内形成了微弱的二次电磁波发射;在25.27 ns,电磁波到达水平GIS腔体末端,内部电场强度在-65~-45 dB之间,GIS外部空间的电场强度逐渐减弱,套管周围依然存在以此为中心的电磁波辐射。

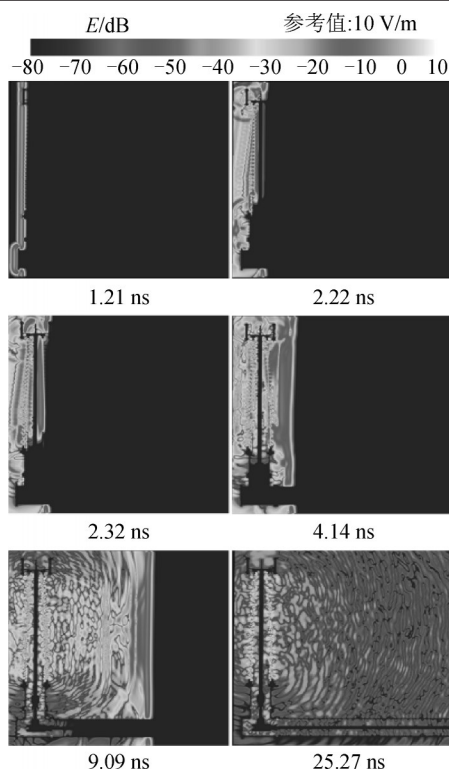


图4 平面波极化方向垂直于导杆时的电强分布图

Fig. 4 The electric field distribution when the polarization direction of plane wave is vertical to the conductor rod

2.2 极化方向平行于套管导杆时的波过程

提取6个时间节点的电场强度分布图见图5。在1.21 ns,电磁波到达瓷套表面;在2.22 ns,电磁波经过瓷套到达导杆,并进入屏蔽罩端口;在2.32 ns, GIS外部的电磁波到达瓷套的右侧,在套管内部传播到达屏蔽罩中部,此处的电磁波强度约-25 dB;在3.53 ns时刻,电磁波进入GIS过渡腔体,电场分布基本呈现轴对称分布,过渡腔体内的电场强度低于屏蔽罩内;在8.69 ns时刻,电磁波到达GIS三通腔体,同时在套管周围形成了多个不同圆心弧线状的电磁波辐射场;在23.75 ns时刻,电磁波到达水平GIS腔体末端,电场强度呈现轴对称分布,套管外部的场强逐渐减弱,仍然可以清晰地看到几个不同圆心弧线状的电磁波辐射场。

可见,当GIS外部平面波极化方向不同时,套管对平面波的耦合结果差异很大。当极化方向平行于套管时,套管耦合到的能量更强,且在GIS外部形成了若干个以套管某点为中心的弧线状电磁波辐射场。套管导杆在耦合及二次辐射过程中起重要作用。

3 GIS内部的电场强度时频域特征

3.1 极化方向对时域波形幅值的影响

为了定量分析平面波极化方向对套管耦合能

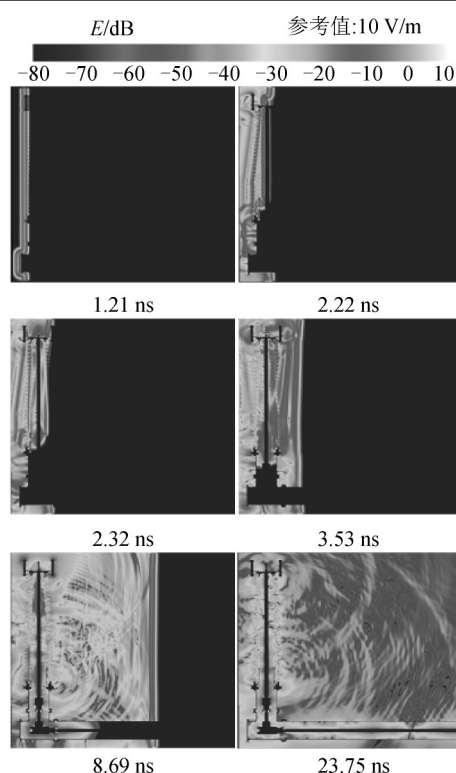


图5 平面波极化方向平行于导杆时的电强分布图

Fig. 5 The electric field distribution when the polarization direction of plane wave is parallel to the conductor rod

力的影响,提取了2.4节所述3个观测点的电场强度时域波形。见图6。随着传播位置的深入,电磁波传播路径不断发生变化,信号强度逐渐衰减。屏蔽罩与GIS壳体直径不同,高次模波的截止频率不同,因此电磁波由屏蔽罩进入过渡腔体时会发生衰减,最大幅值的衰减为原来的70%。电磁波经过GIS三通结构时,结构的变化引起了信号的严重衰减,最大幅值衰减了50%。

从图6中可以明显看出,平面波极化方向对进入GIS的电磁波强度的影响。极化方向垂直于导杆时,屏蔽罩中间的最大电场强度幅值为0.005 V/m;极化方向平行于导杆时,屏蔽罩中间的最大电场强度幅值为3 V/m;后者相当于前者的600倍。极化方式对GIS内电场强度的时域波形也有明显的影响,极化方向平行于导杆时,时域波形存在低频振荡。

3.2 极化方向对频谱分布的影响

图7(a)、(b)分别是在平面波垂直极化与平行极化两种情况下,3个观测点频域波形。在5 MHz~6 GHz频率范围内,平行极化平面波进入GIS的信号强度均远高于垂直极化平面波。

当平面波极化方向平行于导杆时,屏蔽罩内的电场强度在5~75 MHz频段范围内达到最强。与此频段相对应的电磁波波波长范围为60~4 m。套

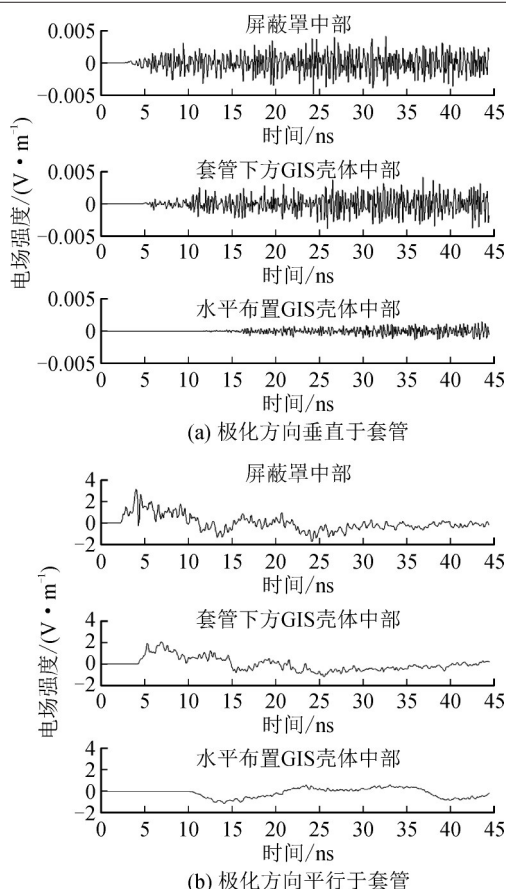


图6 GIS与套管屏蔽罩内电场强度的时域波形

Fig. 6 Time domain waveforms of electric field in the GIS tank and bushing shield

管导杆长度约为2 m,相当于强电磁波波长的1/30~1/2。因而,套管可认为是单极子天线,对于波长大于等于其两倍长度的电磁波具有良好的耦合与辐射作用。

根据单极子天线理论,当天线长度等于信号波长的1/2时,其耦合或发射能力最强。因此,套管长度不同,耦合到干扰信号的频率也将发生变化。额定电压为126、252、550 kV GIS套管的高压导杆的长度依次为:1.3、2.0、4 m,它们耦合到的干扰信号的中心频率将是:115、75、37.5 MHz。

4 结语

套管导杆与屏蔽罩构成的同轴结构是外部电磁波干扰进入GIS的重要通道。在电磁波耦合过程中,套管导杆将起到了天线接收作用。干扰信号的强度与频率范围与套管的方向、导杆长度相关。当外界电磁波极化方向平行于导杆时,套管将耦合到更多的能量,从而引入很强的UHF干扰信号。进入GIS的干扰信号的频率范围包含了UHF检测频带,即:300 MHz~1.5 GHz。其中心频率对应的波长约为GIS套管导杆长度的两倍。

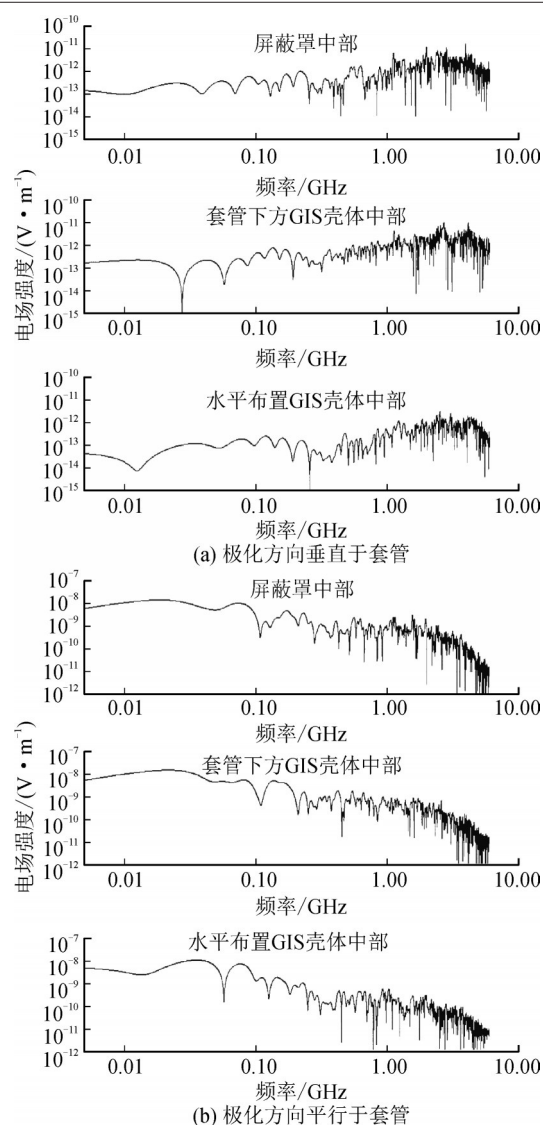


图7 GIS与套管屏蔽罩内电场强度频域波形

Fig. 7 Frequency domain waveforms of electric field in the GIS tank and bushing shield

参考文献:

- [1] CIGRE WG D1. 33. Guidelines for unconventional partial discharge measurements[R]. Paris, France: CIGRE, 2010: 10.
- [2] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流GIS绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [3] XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of sub-millimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [4] 陶诗洋, 冯 义, 蔡宏伟, 等. 1100 kV GIS UHF在线监测装置传感特性实证研究[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 8-12.
- [5] TAO Shiyang, FENG Yi, GAI Hongwei, et al. Empirical study on the sensing characteristics of 1100 kV GIS UHF online monitoring instruments[J]. High Voltage Apparatus,

- 2017, 53(7): 8-12.
- [4] 周洁睿, 任 明, 李金忠. 冲击电压下GIS局部放电检测方法的对比研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(12): 64-71.
ZHOU Jierui, REN Ming, LI Jinzhong. Comparative study on partial discharge detection methods under impulse voltages for GIS[J]. Insulating Materials, 2017, 50(12): 64-71.
- [5] 刘弘景, 李 伟, 任志刚, 等. GIS不同绝缘缺陷的局放检测有效性对比研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(9): 53-60.
LIU Hongjing, LI Wei, REN Zhigang, et al. Comparative study on partial discharge test effectiveness of different insulation defects in GIS[J]. Insulation Materials, 2018, 51(9): 53-60.
- [6] 任志刚, 李 伟, 徐兴全, 等. 不同电压等级GIS局部放电UHF信号传播特性仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 88-93.
REN Zhigang, LI Wei, XU Xingquan, et al. Simulation on propagation characteristics of UHF signals of partial discharge in different voltage levels GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 88-93.
- [7] 国家电网公司运维检修部. 高压开关设备典型故障案例汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
State Grid Corporation Operation and Maintenance Department. High-voltage switchgear typical fault case compilation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [8] 国家电网公司生产技术部. 电网设备状态检测技术应用典型案例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
State Grid Corporation Operation and Maintenance Department. Grid equipment condition detection technology application case [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [9] 唐志国, 蒋佟佟. 变电站特高频局放监测的电磁干扰特征影响因素[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1350-1358.
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong. Research on influencing factors of electromagnetic interferences for UHF PD detection in substations[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1350-1358.
- [10] 赵林杰, 季洪鑫, 齐 波, 等. ± 800 kV换流变压器现场局部放电试验的干扰监测[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 27-33.
ZHAO Linjie, JI Hongxin, QI Bo, et al. Measurement and laboratory simulation of site jamming signal in ± 800 kV converter station[J]. High Voltage Engineering, 2014, 8(6): 27-33.
- [11] 唐志国, 蒋佟佟, 叶会生, 等. 变电站局放检测中的电磁干扰统计特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2998-3006.
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong, YE Huisheng, et al. Statistical characteristics of electromagnetic interferences for partial discharge detection in substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2998-3006.
- [12] 黄江岸. GIS混频周期性窄带干扰的抑制及局放源定位研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
HUANG Jian'an. Suppression of the periodic narrow-band noise with mixed frequencies in partial discharge on-line monitoring and PD location of GIS[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [13] 唐 炬, 许中荣, 孙才新, 等. 应用复小波变换抑制GIS局部放电信号中白噪声干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 30-34.
TANG Ju, XU Zhongrong, SUN Caixin, et al. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise interference in GIS PD signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 30-34.
- [14] 王 辉, 吴晓春, 姚林朋, 等. 多尺度形态滤波算法在GIS局部放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1747-1752.
WANG Hui, WU Xiaochun, YAO Linpeng, et al. Application of multi-scale mathematical morphology filter algorithm to partial discharge signal detection for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1747-1752.
- [15] 王昇凡, 朱冠霖, 王兆强, 等. 基于改进小波阈值的GIS局部放电在线监测白噪声干扰抑制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 37-43.
WANG Yifan, ZHU Guanlin, WANG Zhaoqiang, et al. Research on white noise interference suppression of GIS partial discharge on-line monitoring based on improved wavelet threshold[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 37-43.
- [16] 张宇辉, 段伟润, 李天云. 局部放电信号中抑制周期性窄带干扰的逆向分离方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 232-239.
ZHANG Yuhui, DUAN Weirun, LI Tianyun. A reverse separation method of suppressing periodic narrowband noise in partial discharge signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 232-239.
- 陈 晔(1988—), 男, 工程师, 工学硕士, 从事高压设备带电检测技术研究工作。
- 叶兆平(1984—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 长期从事变电设备状态检修、诊断工作。
- 郑书生(1979—), 男, 高级工程师, 工学博士, 从事高压设备状态监测及绝缘老化状态评估研究。