

330 kV超高压GIS开关动作VFTO辐射电场的测量与分析

郭飞^{1,2}, 孔旭¹, 吴旭涛², 郭俊¹, 刘青¹, AINIZIO A F¹, 谢彦召¹

(1. 西安交通大学电气工程学院电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750001)

摘要: 笔者对GIS断路器与隔离开关动作时所产生的VFTO辐射场进行了测量与分析。首先研制了一套基于光纤传输的VFTO辐射电场测量系统,并对该测量系统进行了标定实验,结果显示该测量系统具有响应频带宽、抗干扰能力强和传输距离远的特点。然后选取了典型的330 kV超高压GIS变电站,应用光纤测量系统对其开关正常动作时所引发的VFTO辐射场信号进行了测量。比较了断路器与隔离开关动作所产生的VFTO辐射场之间的差异,分析了差异产生的机理。同时也比较分析了相同开关的不同操作所产生VFTO辐射场之间的差异和机理。结论显示开关电弧放电位置与其引起的辐射场信号的频谱幅值分布具有紧密的联系。文中的研究成果对GIS变电站的在线监测提供了测量手段与依据。

关键词: GIS; 光纤; 电小天线; VFTO; 辐射场; 测量

中图分类号: TM595

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0119-07

Measurement and Analysis of the Radiated Electric Field Excited by Switching Operation of 330 kV GIS

GUO Fei^{1,2}, KONG Xu¹, WU Xutao², GUO Jun¹, LIU Qing¹, FINIZIO A F¹, XIE Yanzhao¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Electric Power Research Institute of Ningxia Electric Power Company of State Grid Corporation

of China, Yinchuan 750001, China)

Abstract: To realize on-line monitoring of GIS, the radiation field, excited by very fast transient overvoltage (VFTO) during the operation of the breakers and the disconnecting switches, was measured and analyzed. First, a measuring system for the radiation field excited by VFTO was developed, and calibration results show that this measuring system has the features of anti-interference and wide-band response. Second, the system was applied to measure the radiation field excited by VFTO in a 330 kV GIS, and the results indicate that there is a significant difference between the radiation fields due to the operations of breaker and disconnecting switch. Even for same switch, different operation causes different radiation field. Analysis reveals a close relation between the discharge position and the energy distribution of the discharge-induced frequency spectrum.

Key words: GIS; fiber; electrically small antenna; very fast transient overvoltage (VFTO); radiation field; measurement

0 引言

GIS变电站与传统的敞开式变电站相比具有占地面积小、运行安全以及与周围环境隔绝等诸多优点,在中国的应用日益广泛,对其GIS的运行维护与检修工作也日益重要^[1-7]。以宁夏电网在运GIS为

例,截止至2013年12月,110 kV及以上电压等级的间隔数达到345个,而大约占总量15%的GIS运行时间在5年以上,需要进行重点检测,因此开展GIS的在线检测研究具有重要的意义。

GIS内部断路器与隔离开关的开、合操作或局部放电可形成快速暂态过电压(VFTO),而VFTO在传播过程中遇到GIS外壳不连续和外引线接口等阻抗不连续点时会由波的折反射引发瞬态电流在

外壳和外引线的传播,从而在空间激发强烈的瞬态电磁场^[8-14]。VFTO 信号一般为典型的纳秒级脉冲信号,且 GIS 运行现场的电磁环境极为复杂,这就对测量系统的采集、传输特性提出了很高的要求^[15-19]。传统的基于电缆传输方式的 VFTO 检测系统容易受到电磁干扰与远距离传输过程中信号衰减的影响,因此笔者提出了基于光纤传输的 VFTO 辐射场测量系统,提高了测量系统的抗干扰能力和传输距离。

笔者利用宁夏电网 330 kV 凯歌变电站(GIS 变电站) 停电检修的机会对其 VFTO 辐射场进行了实测,分别在时域和频域分析了不同的开关操作所产生的辐射场信号之间的差异,并分析了产生差异的机理,结果表明,VFTO 辐射场信号是由发生放电的位置和 GIS 的结构决定的,与 GIS 的运行状态有着紧密的联系。研究结果为通过 VFTO 辐射场来判断 GIS 中放电的位置与情况提供了理论依据,对 GIS 进行非接触式的运行状态监测有一定指导意义。

1 基于光纤传输的 VFTO 辐射场测量系统

光纤测量系统由电场传感器与光接收机组成,系统原理框图见图 1。现场测试实验表明,采用光纤作为信号传输媒质的测量系统相比采用电缆传输测量系统具有抗干扰能力强、传输距离远的优点。由棒状电小天线感应的电信号经电场传感器中的电光转换模块调制为光强度信号输出,光信号经光纤传输至远端的光接收机并转换为电信号输入示波器中。

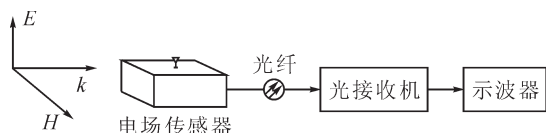


图 1 测量系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system

电场传感器包括棒状电小天线与电光转换模块两部分。当天线的电尺寸远远小于被测电磁波波波长时天线就是电小天线,棒状电小天线具有响应频带宽、制作简单的优点,且可以通过改变天线的长度来方便的调节探头的量程,其等效电路图见图 2。

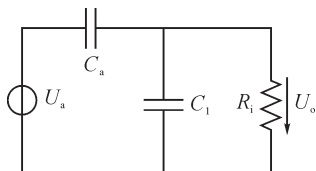


图 2 电小天线等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of the electrical small monopole antenna

等效电路是天线等效电压源 U_a 与天线等效电容 C_a 的串联的形式, C_1 代表分压电容, R_1 代表后端运算放大器的等效输入阻抗。天线的感应电压为 $U_a = E \times L_a$, E 代表入射的电场强度, L_a 代表天线的有效高度, U_o 表示输入到后端运放的电压。运放的输入阻抗很高,在频率较低的情况下可近似等效为开路,可得系统的传递函数为

$$U_o = \frac{C_a}{C_a + C_1} \cdot U_a = \frac{C_a}{C_a + C_1} \cdot L_a \cdot E. \quad (1)$$

可见棒状电小天线输出的电压信号与被测电场强度信号呈线性关系。

在电光转换模块中利用运放搭建的电压跟随器来接收棒状电小天线的输出信号,并将该信号调制在激光器上输出到远端的光接收机。

采用铝盒作为电光转换模块的屏蔽外壳,同时其上表面也是棒状电小天线的镜像平面。为了减小传感器对被测场的扰动,对其进行了紧凑型设计,将其体积压缩至最小,传感器的实物图见图 3。

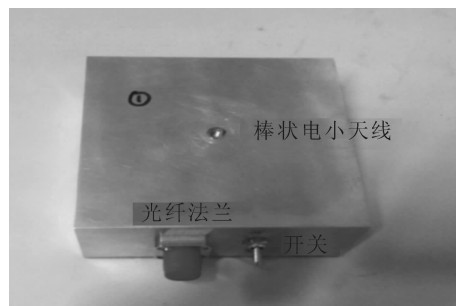


图 3 电场传感器

Fig. 3 E-field sensor

基于方波脉冲发生器和 TEM 小室搭建了相应的标定系统并对所研制的光纤测量系统进行了标定实验,标定系统见图 4。

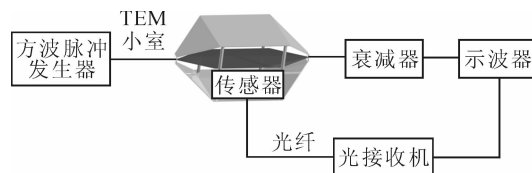


图 4 标定系统原理图

Fig. 4 Schematic figure of the calibration system

利用方波脉冲发生器产生脉冲方波信号,该方波信号通过 TEM 小室就会在 TEM 小室中产生相应的平面电磁波。将电场传感器放入 TEM 小室中测量其中的电场信号,标定结果见图 5。其中实线代表脉冲发生器输出电压的归一化波形,虚线代表电场测量得到的归一化波形。可见测量所得波形的上升时间小于 3 ns,且二者一致性较好。由经验公式^[20]可以

估算出传感器的上限截止频率(MHz)为

$$f_h = 350 / \sqrt{3^2 - 1^2} = 124. \quad (2)$$

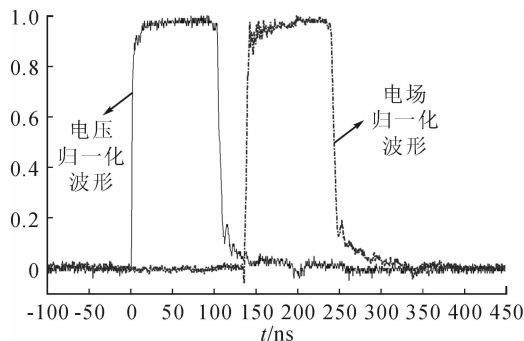


图 5 电场测量系统测试波形

Fig. 5 Test results of the E-field measuring system

2 330 kV GIS 变电站 VFTO 辐射场测试实验

为了了解 GIS 周边所产生的 VFTO 辐射场信号分布及特点, 该次实验选取宁夏中卫市的 330 kV 凯歌变电站的 330 kV 等级 GIS 设备进行了测量, 利用变电站主变间隔停电检修的机会研究了其断路器与隔离开关正常分合闸操作时的 VFTO 辐射场信号特点。

2.1 实验配置

该变电站 330 kV 等级接线为双母线接线方式, 其 330 kV 主变间隔进线部分整体实物图见图 6, 330 kV 的电力线通过绝缘套管引入母线中, 经隔离开关和断路器再通过绝缘套管出线接入后方的主变压器中。母线、隔离开关与断路器均密闭在 SF₆ 气体中, 其中断路器与隔离开关实物图见图 7。



图 6 凯歌 330 kV 变电站

Fig. 6 330 kV substation of Kaige

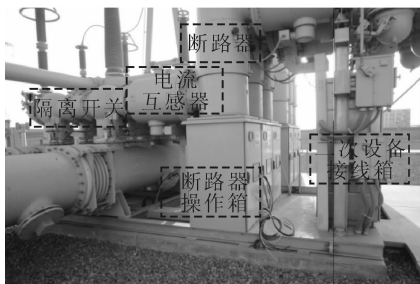


图 7 断路器与隔离开关实物图

Fig. 7 Breakers and disconnectors

在变电站主变间隔停电检修的过程中需要与主变压器相连的断路器与隔离开关进行分合闸操作, 选取需要进行分合闸操作的断路器与隔离开关的近场位置作为测点, 在地面上布放电场探头对其 VFTO 辐射电场进行了测量, 测量了隔离开关与断路器闭合、断开时的电场信号。实验配置示意图与实物图分别见图 8、9。

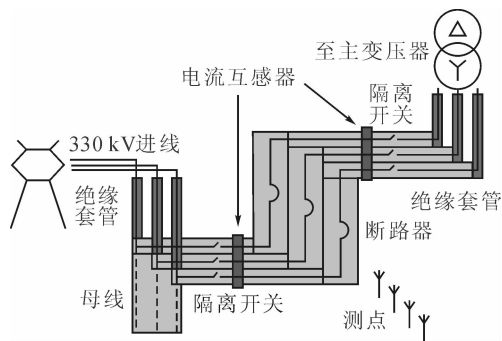


图 8 实验配置示意图

Fig. 8 Schematic figure of the testing experiment



图 9 实验配置实物图

Fig. 9 Photo of the testing experiment

2.2 VFTO 辐射场近场区测量

首先在距离断路器操作箱 1、3、4 m 处沿母线方向放置 3 个电场探头, 测量隔离开关闭合时水平方向的电场分量, 其测量结果图见图 10。

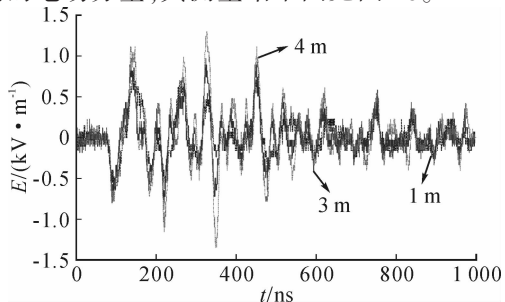


图 10 断路器操作箱近场区电场信号

Fig. 10 E-field signal near the operation cabinets of the breakers

图 10 中虚线、实线和点划线分别代表距离断路器操作箱 1、3、4 m 处 3 个测点处测得的电场波形。从测量结果可以看出, 由隔离开关闭合操作所

产生的 VFTO 辐射电场信号呈振荡衰减状且 3 个测点的电场信号波形趋势基本相同,最大幅值可达 1~1.3 kV/m。从图 9 可见,测点与母线筒、断路器操作箱等金属物体之间的距离很近,这些金属物体的散射作用使得 VFTO 辐射场分布规律非常复杂。下一步可增加实验的测点,并测量距离 GIS 更远处的辐射场,进一步分析场分布规律。

对上述测量信号进行傅里叶分析,得频谱图见图 11。

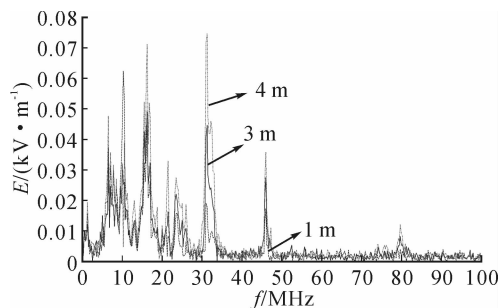


图 11 断路器操作箱近场区电场信号频谱图

Fig. 11 Spectrogram of the E-field signal near the operation cabinets of the breakers

图 11 中虚线、实线和点划线分别代表距离断路器操作箱 1、3、4 m 处所测得的电场波形的频谱图。从频谱图上可见,3 个测点的电场信号波形的频谱分布基本相同,幅值主要分布在 50 MHz 以下,且集中分布在某几个特征频率上,包括 6、10、16、23、31、46 MHz,幅值在 80 MHz 上也有少量分布。

2.3 操作断路器的 VFTO 辐射场测量

在距离断路器操作箱 3 m 处放置电场探头,测量断路器分合闸时的 VFTO 辐射电场信号,其测量结果见图 12。

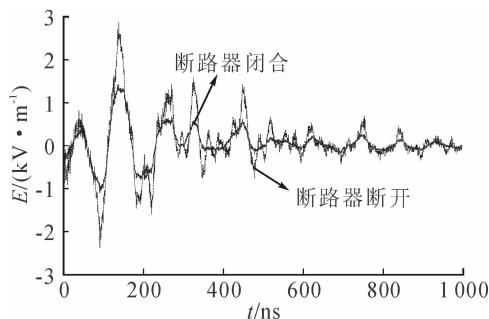


图 12 断路器操作引起的辐射电场信号

Fig. 12 Radiated E-field signal excited by the operation of the breakers

图 12 中实线和虚线分别代表断路器闭合与断开时所测得的电场波形,可以看出,两者的电场波形趋势基本相同且呈振荡衰减状。由断路器断开所产生的辐射电场峰值可达 2.6 kV/m,而闭合时所产

生的辐射电场峰值可达 1.3 kV/m。

为了从频域进行分析,对上述测量信号进行傅里叶分析,得频谱图见图 13,进一步通过短时傅里叶变换可得时频谱图见图 14、15。

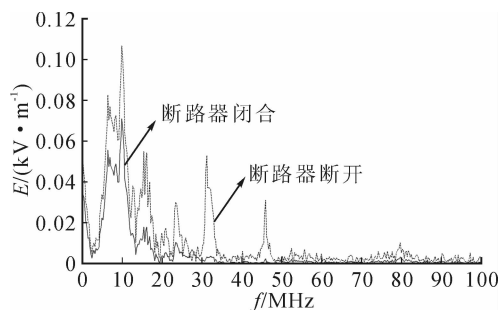


图 13 断路器操作引起的电场信号频谱图

Fig. 13 Spectrogram of the E-field signal excited by the operation of the breakers

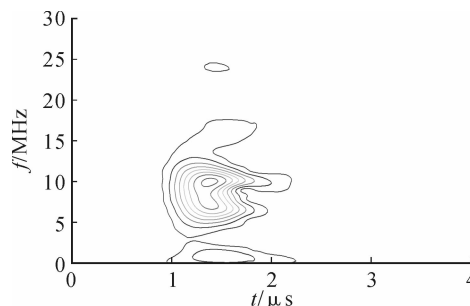


图 14 断路器闭合时辐射电场信号时频谱图

Fig. 14 Time-frequency spectrogram of the E-field signal excited by the closure of the breakers

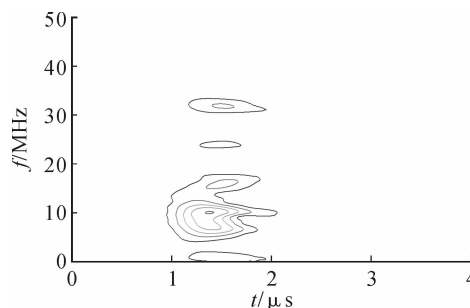


图 15 断路器断开时辐射电场信号时频谱图

Fig. 15 Time-frequency spectrogram of the E-field signal excited by the opening of the breakers

图 13 中实线和虚线分别代表断路器闭合与断开时所引起辐射场的频谱图。可以看出,断路器断开引起的辐射电场幅值主要分布在 50 MHz 以下,且集中分布于 6、10、16、23、31、46 MHz 的特征频率上,而断路器闭合时引起的辐射电场幅值主要分布在 30 MHz 以下,且集中分布与 6、10、16、23 MHz 的特征频率上,与断开时相比所产生的辐射电场高频成分降低了。其原因在于断路器在两种操作下触头间发生击穿时的间距不同,这种差别反映在辐射场幅值的频率分布上。图 14 和图 15 分别代表断路器

闭合与断开时辐射电场的时频谱图, 可见当 VFTO 辐射场信号发生时对应于图 15 上各个特征频率上的波形几乎同时被激发出来, 随着信号的振荡而逐渐衰减。

2.4 操作隔离开关的 VFTO 辐射场测量

同样在距离断路器操作箱 3 m 处放置电场探头, 测量隔离开关分合闸时的 VFTO 辐射电场信号, 其测量结果见图 16。

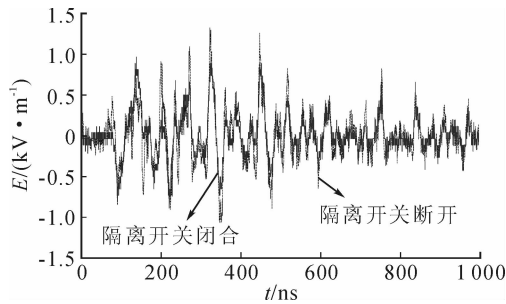


图 16 隔离开关操作引起的辐射电场信号

Fig. 16 Radiated E-field signal excited by the operation of the disconnectors

图 16 中实线和虚线分别代表隔离开关闭合与断开时所测得的电场波形, 可以看出, 两者的电场波形趋势基本相同且呈振荡衰减状。由隔离开关断开所产生的辐射电场峰值可达 1.3 kV/m, 而闭合时所产生的辐射电场峰值可达 0.9 kV/m。

对上述测量信号进行傅里叶分析, 得频谱图见图 17; 进一步通过短时傅里叶变换可得时频谱图 18、19。

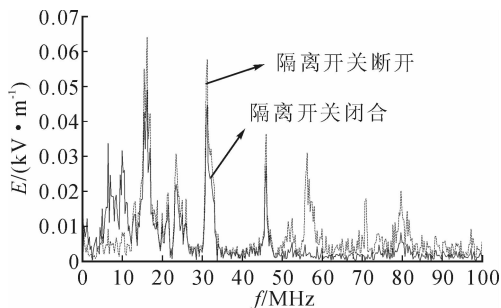


图 17 隔离开关操作引起的电场信号频谱图

Fig. 17 Spectrogram of the E-field signal excited by the operation of the disconnectors

图 17 中实线和虚线分别代表隔离开关闭合与断开时所引起辐射场的频谱图。可以看出, 隔离开关断开引起的辐射电场幅值主要分布在 80 MHz 以下, 且集中分布于 16、23、31、46、56、80 MHz 的特征频率上, 而隔离开关闭合时引起的辐射电场幅值主要分布在 50 MHz 以下, 且集中分布与 6、10、16、23、31、46 MHz 的特征频率上, 相比断开时所产生的辐

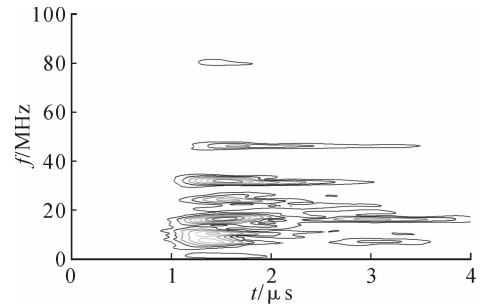


图 18 隔离开关闭合时辐射电场信号时频谱图

Fig. 18 Time-frequency spectrogram of the E-field signal excited by the closure of the disconnectors

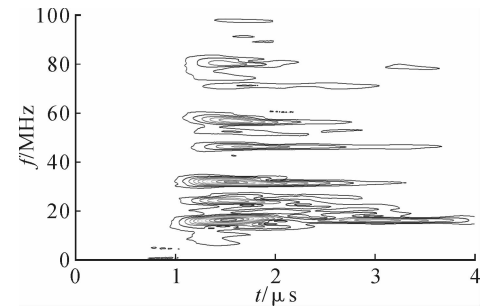


图 19 隔离开关断开时辐射电场信号时频谱图

Fig. 19 Time-frequency spectrogram of the E-field signal excited by the opening of the disconnectors

射电场高频成分降低了, 而低频成分有所提高, 这点与前述断路器操作的规律和机理相同。图 18 和图 19 分别代表隔离开关闭合与断开时辐射电场的时频谱图, 可见当 VFTO 辐射场信号发生时对应于图 17 上各个特征频率上的波形几乎同时发生, 随着信号的振荡而逐渐衰减。

3 实验结果分析

从上述实验结果可以看出, 断路器、隔离开关在闭合与断开时所产生的辐射场信号存在明显的差异, 总结测试实验结果可得以下 5 点结论:

1) 330 kV GIS 变电站断路器与隔离开关动作所引起的 VFTO 能够在其周围引起高频辐射场信号, 其电场强度幅值可达 1~3 kV/m。

2) 从频谱图上分析断路器和隔离开关动作时的电场信号, 可见信号的幅值主要分布在某些特征频率上, 且开关不同的工作状态的辐射电场对应着不同的频率分布。

3) 从频谱图上可以看出, 隔离开关无论是断开还是闭合比之断路器动作所产生的辐射电场在高频上具有更大的幅值分布, 而在低频上其幅值分布则相对较小。前者的幅值主要分布在 50 MHz 以下, 而后的幅值主要分布在 80 MHz 以下。造成这种区别的原因是开关内部的不同结构所引发的电弧

放电的不同抑或是开关所处的不同位置引起在 GIS 外壳上的波过程的不同还需要进一步的仿真与试验研究^[12-14]。

4)相同开关的不同操作产生的辐射电场的频谱分布是不同的。从图 13、17 可以看出,无论是断路器与隔离开关,开关在闭合时产生的电场比其断开时产生的电场在高频都有较大的幅值分布。在开关的动作过程中,随着工频电压的变化触头间电弧会发生多次重燃,因此辐射场呈现振荡脉冲群的形式,而各个振荡脉冲之间大概相隔毫秒级的时间间隔,大概为工频周期的一半即 10 ms,由于所使用示波器存储深度的限制,实验过程中只能捕捉到脉冲群中的一个。从李小建、张卫东等人的研究成果^[2-3]可以看出,开关动作时随着触头间距的变化所产生的辐射脉冲群的幅值是变化的,而触头间距的变化也会引起开关处阻抗变化的不同,从而反应在辐射电场频谱分布的不同。

5)受到测试对象与实验器材的限制,该次试验的测点数量和实验数据都比较有限,为了能够更全面的分析 VFTO 辐射场的规律与其作用机理还需要进一步的试验与仿真研究。

4 结论

笔者研制了基于光纤传输的 VFTO 辐射电场测量系统,测试实验表明,该测量系统具有响应频带宽、抗干扰能力强和传输距离远的优点,可用于 VFTO 所产生的纳秒级脉冲信号的测量。

通过对 330 kV GIS 的断路器与隔离开关动作时产生的辐射场的测量与分析,结果表明,不仅断路器与隔离开关操作产生的 VFTO 辐射场具有不同的频谱幅值分布,而且相同开关的闭合与断开所产生的辐射场也具有不同的频谱幅值分布。因此可以通过 VFTO 辐射场的频谱幅值分布来区分 GIS 的开关正常操作与故障状态下局部放电,这为下一步对 GIS 变电站进行在线状态监测提供了试验依据。

下一步可研究 GIS 变电站的局部放电所引起的辐射场,比较变电站在不同工作状态下产生辐射场的异同,为 GIS 变电站的状态在线监测提供方法与依据。

参考文献:

- [1] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transient electromagnetic interference in substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1869-1884.
- [2] 李小建, 钟尧, 王任, 等. 超高压系统隔离开关操作电磁骚扰的时频特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(11):

2889-2898.

LI Xiaojian, ZHONG Yao, WANG Ren, et al. Time-frequency domain characteristics of electromagnetic disturbance in extra high voltage system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2889-2898.

- [3] 张卫东, 陈沛龙, 陈维江, 等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 对二次电缆骚扰电压的实测与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 187-196.
ZHANG Weidong, CHEN Peilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by VFTO in UHV GIS substation on the secondary cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 187-196.
- [4] 黄辉敏. 特高压 VFTO 对二次设备电磁骚扰的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
HUANG Huimin. Research on electromagnetic disturbance of UHV VFTO for secondary equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [5] 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.
- [6] 许杨, 陈小军, 李锋锋, 等. 550 kV 断路器典型故障分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 80-87.
XU Yang, CHEN Xiaojun, LI Fengfeng, et al. Typical faults analysis for 550 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 80-87.
- [7] 牛文军, 魏俊梅, 张铎, 等. 550 kV SF₆/N₂ 充气母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 77-80.
NIU Wenjun, WEI Junmei, ZHANG Duo, et al. Insulation performance of 550 kV SF₆/N₂ busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 77-80.
- [8] 张重远, 梁贵书, 崔翔. GIS 电站内传导干扰计算模型的建立[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 11-13.
ZHANG Chongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang. A conductive coupling model in gas insulated substation[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 11-13.
- [9] 张重远, 梁贵书, 崔翔, 等. GIS 隔离开关操作对二次设备的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 5-7.
ZHANG Chongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. The effects of operations of the disconnector switch on the secondary circuits in gas insulated substations[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7.
- [10] 梁樑. 500 kV 钱江 GIS 变电站 VFTO 过电压研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
LIANG Liang. Disquisition of very fast transient overvoltage in Qianjiang substation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [11] 张重远. 气体绝缘变电站开关操作产生的电磁干扰问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.

- ZHANG Chongyuan. Research on the electromagnetic interference due to switching operation in gas insulated substation[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2004.
- [12] 张重远, 梁贵书, 崔 翔, 等. 气体绝缘变电站内辐射干扰的建模与计算[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 22-25.
- ZHANG Chongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. Modeling and calculation of radiant interference in gas insulated substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(4): 22-25.
- [13] 冉慧娟. 气体绝缘变电站外壳辐射场的计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- RAN Huijuan. Calculation of transient radiation field from enclosure of gas insulated substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [14] 梁贵书, 冉慧娟, 吉长祐. 矢量匹配结合递归卷积法计算 GIS 外壳辐射场[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 678-682.
- LIANG Guishu, RAN Huijuan, JI Changhu. Calculation for transient radiation field from metallic enclosure of GIS based on vector fitting and recursive convolution[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 678-682.
- [15] 梁振光, 董 霞, 郑 路, 等. 500 kV 变电站工频电场的测量与分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 81-83.
- LIANG Zhenguang, DONG Xia, ZHENG Lu, et al. Measurement and analysis of power frequency electric field in a 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 81-83.
- [16] 王会广. 变电站二次电缆宽频网络参数提取与暂态计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- WANG Huiguang. Extraction of the wide-band network parameters and transient simulation of the secondary cable in the substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [17] 舒胜文, 黄道春, 阮江军. 真空开关电弧开断过程的数值仿真方法研究进展[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 131-138.
- SHU Shengwen, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun. Review of numerical simulation methods of arc interruption process of vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 131-138.
- [18] 黄子璇, 席黎明, 樊梦旭, 等. 特高压交流输电线路电晕放电对工频电场的影响[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 6-11.
- HUANG Zixuan, XI Liming, FAN Mengxu, et al. Influence of corona discharge on power frequency electric field underneath UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 6-11.
- [19] 李 辉, 陈江波, 张 曦, 等. 变压器局放用 UHF 传感器的校准方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 7-13.
- LI Hui, CHEN Jiangbo, ZHANG Xi, et al. Calibration of UHF sensor for detection of partial discharge in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 7-13.
- [20] BOGATIN E. 信号完整性分析[M]. 李玉山, 李丽平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- BOGATIN E. Signal integrity: Simplified[M]. LI Yushan, LI Liping, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

郭 飞(1981—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电网运行维护与技术监督工作。

(上接第 118 页)

- period[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 16-21.
- [23] 田 庆, 原敏宏, 王志平. 交流特高压试验示范工程电容器保护配置、整定及应用原则探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 68-71.
- TIAN Qing, YUAN Minhong, WANG Zhiping. Configuration, setting and application of capacitor protection in UHV pilot project[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 68-71.
- [24] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- LIU Zhenya. Study special for UHVDC technology(2005)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [25] ABB Company. Main circuit parameters, Three gorges-Shanghai ± 500 kV DC transmission project[K]. Switzerland: ABB, 2004.
- 胡学兵(1982—), 男, 工程师, 从事高压直流技术运行管理。
- 张正茂(1986—), 男, 助理工程师, 工学硕士, 从事高压直流技术研究。
- 雷 鸣(1971—), 男, 高级工程师, 从事高压直流技术管理。