

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.026

GIS断路器动作产生辐射电场的测量研究

刘青¹, 王乐¹, 刘鹏²

(1. 西安科技大学控制与工程学院, 西安 710054; 2. 青岛供电公司, 青岛 266000)

摘要: GIS内开关操作产生的快速暂态过电压(VFTO)在传播过程中会诱发瞬态辐射电场,并通过传导或耦合影响变电站二次设备的正常工作,甚至造成设备永久性损坏,研究辐射电场特征规律对变电站二次设备电磁防护具有一定的指导意义。文中研制了一套适用于强电磁环境下电场测量的光纤测量系统,并在TEM小室中进行了标定实验。利用测量系统测量了某1 100 kV和550 kV单相GIS断路器操作产生的辐射电场,分析了电场的时频特性。测量及分析表明:电压等级越高,GIS断路器动作产生的辐射电场脉冲幅值越高、个数越多、衰减越迅速,主频范围分布更广,且多以特定脉冲形式出现。550 kV GIS辐射电场幅值最高可达0.13 kV/m, 1 100 kV等级幅值最高可达0.75 kV/m;550 kV等级主频主要分布在5 MHz以下,1 100 kV等级主频主要分布在100 MHz以下。

关键词: GIS断路器; 光纤测量系统; 辐射电场; 时频域分析; VFTO

Measurement of Radiation Electric Field Produced by Action of GIS Circuit Breaker

LIU Qing¹, WANG Le¹, LIU Peng²

(1. Control and Engineering Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266000, China)

Abstract: Operations of switches in GIS will cause very fast transient overvoltage(VFTO), which can induce transient radiation electric field. By the mode of conduction or radiation, the secondary equipment may be disturbed or even permanently damaged. In order to find the different characteristics of E-field amplitude and frequency of different voltage, a set of fiber measurement system meeting the required is built up and the calibration test is carried out. The E-fields caused by one 1 100 kV and one 550 kV single-phase GIS breaker are measured. The result shows: the higher the voltages level, the higher the radiation electric field pulse amplitudes, and the more pulse numbers. The amplitudes of 550 kV GIS and 1 100 kV GIS are 0.13 kV/m and 0.75 kV/m respectively. The main frequency distribution range is widened with the voltage increase.

Key words: GIS circuit breaker; fiber measuring system; radiation electric field; time-frequency analysis; VFTO

0 引言

与传统的敞开式变电站 AIS 相比, GIS 变电站具有占地面积小、运行安全、维护方便、受外界环境影响较小等众多优点。但是, GIS 内开关操作会产生快速暂态过电压(VFTO), VFTO 在传播的过程中会在波阻抗不连续的地方进行折反射进而诱发瞬态辐射电磁场^[1]。瞬态辐射电磁场会影响电子元器件的正常工作^[2-5], 使变电站二次系统设备误动或拒动, 影响电力系统的安全性和可靠性。因此, 对 GIS 内开关动

作产生的瞬态辐射电场进行测量和分析对变电站二次设备的电磁防护具有重要的现实意义^[6-8]。

目前国内对于瞬态电磁辐射研究的方法主要有: 实验室物理模拟、数值预测、现场实测^[9]。就已建成的 GIS 变电站来讲, 其布线复杂, 相较于前两种方法, 现场实测法研究更为准确。而现场实测的优劣关键在于所采用的测量系统能否不失真的对电磁辐射信号进行采集、传输等工作。基于这点, 国内很多大学跟研究机构做了大量的研究, 也取得了一些成果, 如文[10]研制了基于场效应管加载的光纤传输式电场传感器测量系统; 文[11-12]研制了一套

用于小空间电磁脉冲测试的光纤电磁脉冲一、三维电场传感器测量系统;文[13-14]分别基于光纤传输理论研制了一维和三维瞬态电场传感器测量系统。

由于实验条件跟环境的限制,国内现存的对于 GIS 的相关研究,多以单电压等级为例,对于多电压等级下 GIS 横向比较的研究则较少。因此笔者借西安高压电器研究所特高压实验室对不同产品试验检测的机会,对某 1 100 kV 和 550 kV GIS 内部断路器合关试验产生的瞬态电场进行了实测,随后对实验数据进行了时域和频域的分析,得到了其暂态波形、幅值、脉冲个数和频率等主要信息,并进一步对两种电压等级的波形特征进行了横向比较^[15-16]。

1 光纤测量系统的研制及实验布置

1.1 光纤测量系统的研制

辐射电场测量系统原理框图见图 1, 系统主要由 3 部分组成:电小天线传感器、光接收机、数字示波器。传感器将采集到的电信号转化为光信号,经光纤传输给光接收机,再实现光电转换,将转换后的电信号输出给示波器完成信号显示及保存^[17]。鉴于光纤具有抗扰能力强、传输距离远、性能稳定等众多优点,各部分之间以光纤连接传输信号。

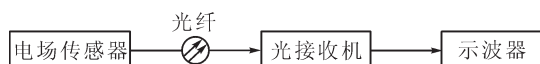


图 1 辐射电场测量系统原理框图

Fig. 1 The principle diagram of E-field measurement system

电场传感器实物图见图 2,外壳为金属铝制成,表面可以看成是电小天线的镜像平面;电小天线是半径为 1 mm,长为 25 mm 的螺丝状的铜制小棒,而螺母跟接收电路固定在一起,且螺母深 10 mm,这样电小天线可以在 10~20 mm 之间进行切换,实现传感器测量范围的可调性,其等效电路图见图 3。



图 2 电小天线电场传感器

Fig. 2 E-field sensor of electrical small antenna

图 3 中: U_0 是电小天线感应电势,且 $U_0 = E \times L$, E

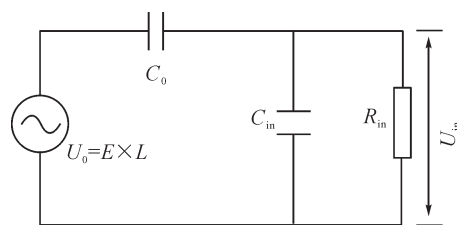


图 3 电小天线等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of electrical small antenna

是入射电场强度, L 是电小天线有效长度; C_0 、 C_{in} 分别为电小天线等效电容和分压电容; U_{in} 为电小天线输出电压。如若后端阻抗匹配电路的输入阻抗很高,则系统的传递函数为: $U_{in} = \frac{C_0}{C_0 + C_{in}} \times U_0 = \frac{C_0}{C_0 + C_{in}} \times EL$ 。

由传递函数可以看出,电小天线的输出电压跟被测电场的场强呈线性关系。当棒状电小天线接收到来自被测场的脉冲信号后,经传感器内部的电光转换模块调制后,通过光纤将信号输出给远端的光接收机。

在实际测量之前,通常要在 TEM 小室(横向电磁场室)中对测量系统进行标定实验,以得到测量系统的标定系数、测量精度以及大致测量范围。系统标定实验原理图见图 4,利用方波脉冲器产生方波信号,经过 TEM 小室产生相应的平面电磁波,将平面电磁波跟方波脉冲器产生的电压方波分别经光纤和同轴电缆一同输入示波器显示^[18]。

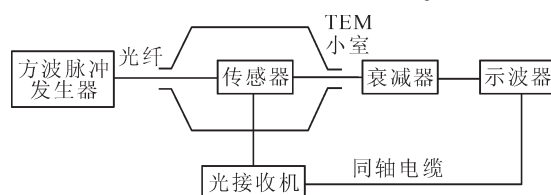


图 4 标定实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of calibration test

标定实验结果归一化波形图见图 5, 已知脉冲发生器产生的电压方波上升沿为 1 ns, 而测得的电场波形的上升沿约 2 ns 左右,可见二者具有良好的—致性。

测试结果表明,电小天线传感器的测量范围为 800 V/m~50 kV/m,频带宽可以达到 10 kHz~400 MHz,可以满足极大多数辐射电场的测量试验。而标定系数由 $\alpha = E(\text{kV/m})/U_0(\text{V})$ 计算得出。其中 E 为电场强度, U_0 为输出电压。

除此之外,为了减小传感器对被测电场的畸变,应采用合理的设计减小传感器的体积。

与传统的电场测量系统相比,该测量系统适用

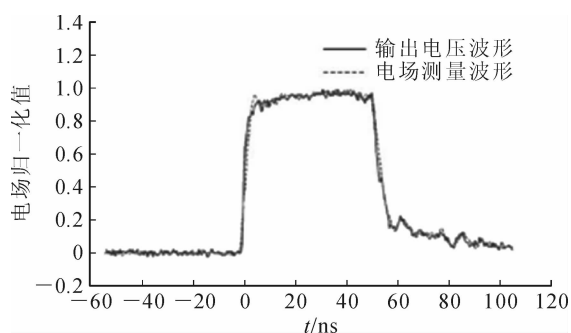


图5 系统标定实验测试波形

Fig. 5 The waveform of calibration test

于脉冲前沿较陡的波形测量,测量距离更远,抗干扰能力更强,便于携带、安装,可在较恶劣的电磁环境下使用。

1.2 实验布置

某所特高压实验室内,对于被测试品检测的电路图见图6,其中 S_1 为被测GIS断路器^[9]。某550、1100 kV GIS断路器实物图分别见图7、8。

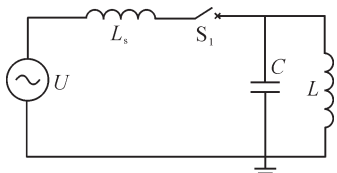


图6 检测断路器等值电路图

Fig. 6 The detection circuit of breaker



图7 550 kV GIS 断路器实物图

Fig. 7 The photo of 550 kV GIS breaker



图8 1100 kV GIS 断路器实物图

Fig. 8 The photo of 1100 kV GIS breaker

在进行现场测量时,需要对GIS断路器的分合闸操作产生的辐射电场进行测量,需要将传感器布置在断路器的近场区^[20]。现场测点布置示意图见图9。

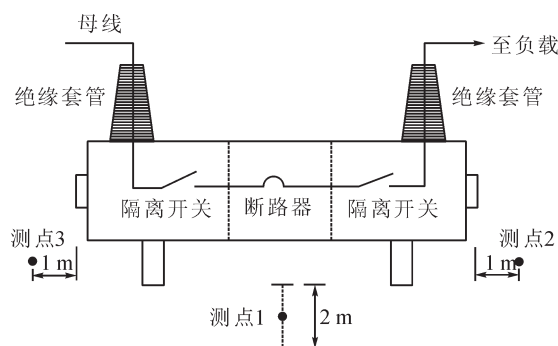


图9 现场测点布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of arrangement of measuring points

该次测量实验选取了3个不同地点作为测量点,如图9所示测试点1、2、3,基于对称性,最终在测点1、2处进行了现场实测,多次比较1、2点辐射电场特征量,发现测点1处的特征量幅值更高,频率更丰富,所以下文中关于辐射电场的所有结论,全部是基于测点1的基础上进行的。现场实测时,传感器通常被放置于半米高的木板凳上,起与大地绝缘的作用,现场布置图见图10。

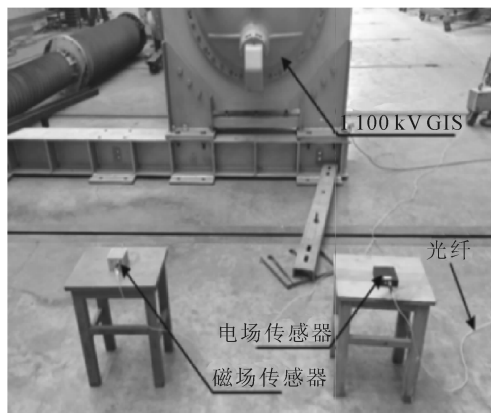


图10 现场测量布置图

Fig. 10 The arrangement picture of testing experiment

由于光接收机和示波器属于弱电设备,易受电磁干扰的影响,从而致使其出现非正常工作状态,所以现场实测时通常将这二者置于特制屏蔽柜中,且由不间断电源CPS供电。

2 实验结果的时域波形分析

距被测试品1.5 m测点处测得的1100、550 kV GIS断路器动作产生的辐射电场波形图分别见图11、12。

从图11、12中可以看出,在整个GIS断路器动

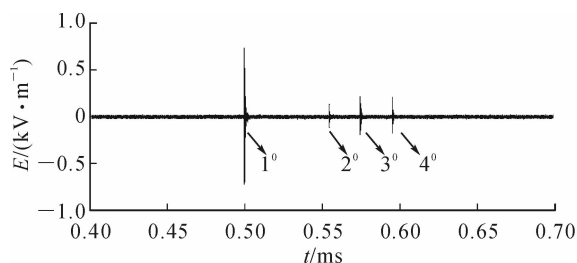


图 11 1100 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场波形

Fig. 11 The radiation E-field wave of 1100 kV GIS breaker action

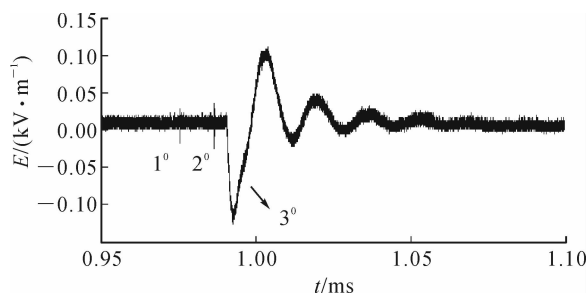


图 12 550 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场波形

Fig. 12 The radiation E-field wave of 550 kV GIS breaker action

作过程中,辐射电场均以毫秒级的脉冲群形式出现,这与断路器动作过程中电弧的反复的重燃紧密相关。其中,1100 kV GIS 有 4 次干扰脉冲出现,脉冲最大幅值为 0.75 kV/m;550 kV GIS 有 3 次干扰脉冲出现,脉冲最大幅值为 0.13 kV/m,可见 GIS 电压等级越高,产生辐射电场的幅值越大,脉冲个数越多。

分别对图 11 中的 1° 号脉冲和图 12 中 3° 号脉冲进行局部放大处理,见图 13、14。从图 13、14 中可以看出,二者同为双极性衰减振荡脉冲,不同之处在于,前者初期高频幅值更大,衰减振荡频率更高,持续时间 2 μs,而后者的持续时间则为 0.07 ms。

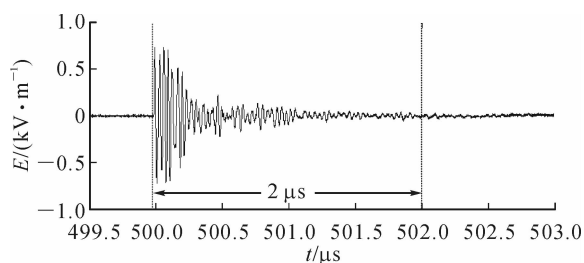


图 13 1100 kV GIS 1° 号脉冲局部放大图

Fig. 13 The detail figure of 1° of 1100 kV GIS

3 实验结果的频域波形分析

为进一步了解不同电压等级下 GIS 断路器动作产生辐射电场脉冲频率的差异,对图 11、12 脉冲

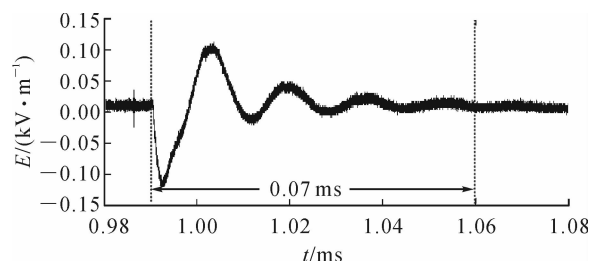


图 14 550 kV GIS 3° 号脉冲局部放大图

Fig. 14 The detail figure of 3° of 550 kV GIS

进行傅里叶分解得其频谱图,见图 15、16。从频谱图 15、16 中可以看出,1100 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场频谱主要分布在 100 MHz 以下,且集中分布在 34、42、62.5、83 MHz 几个特定频率附近;550 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场频谱则主要分在 5 MHz 以下,集中分布在 0.83、1.7、2.5、3.4、4.2 MHz 等几个特定频率附近。

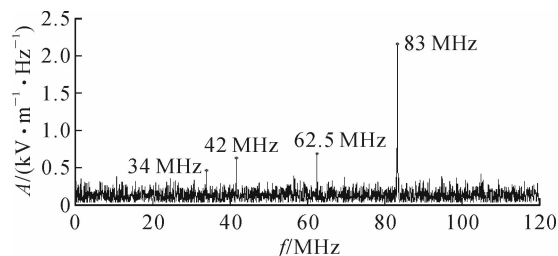


图 15 1100 kV GIS 断路器动作产生辐射电场频谱图

Fig. 15 The spectrum figure of radiation E-field of 1100 kV GIS breaker

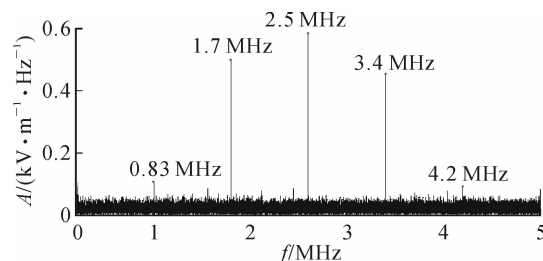


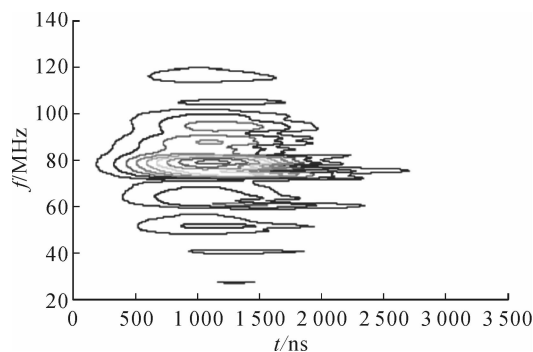
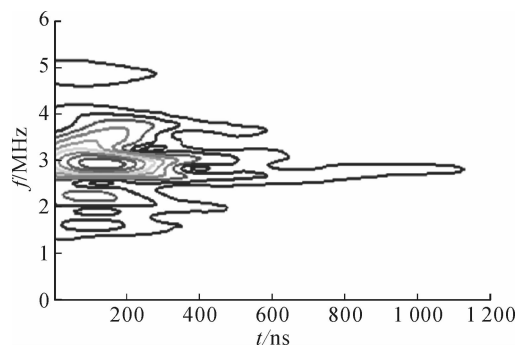
图 16 550 kV GIS 断路器动作产生辐射电场频谱图

Fig. 16 The spectrum figure of radiation E-field of 550 kV GIS breaker

由此可见,随着电压等级的升高,GIS 断路器动作产生的辐射电场的频谱范围更广,高频成分比重增加,产生干扰脉冲的特定频率个数有所减少。

进一步对图 11、12 中的 1° 和 3° 脉冲进行短时傅里叶变换,可以得到其时-频谱图,反映了信号频率随时间变化的特性,见图 17、18。

从图 11、12 中可以看出,当 GIS 断路器动作时,在某些特定频率上产生的辐射电场波形几乎同时被激发出来,并且随着时间的推移而衰减振荡;从图 17、18 中也可以更加明显地观察到,GIS 断路

图 17 图 11 中 1⁰ 脉冲的时—频谱图Fig. 17 The time-frequency figure of 1⁰ pulse of Fig.11图 18 图 12 中 3⁰ 号脉冲的时—频谱图Fig. 18 The time-frequency figure of 3⁰ pulse of Fig.12

器动作产生的辐射电场的频率呈正态分布状,相较于中间频率,低频、高频持续时间更短,衰减速度更快,分布更稀疏。如 1 100 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场频率主要分布在 40~120 MHz,在 80 MHz 附近频率最为密集,而 550 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场频率主要分布在 1~5 MHz,在 2~4 MHz 之间频率最为密集。

4 结论

通过对某 1 100 kV 和 550 kV GIS 断路器动作产生的辐射电场进行测量和分析,可以总结得以下结论:

1)对比脉冲波形图可知,电压等级越高的 GIS 断路器,其动作产生的辐射电场脉冲幅值越高,550 kV 可达 0.13 kV/m,1 100 kV 可达 0.75 kV/m。

2)电压等级越高,GIS 断路器动作产生的辐射电场脉冲个数越多,脉冲振荡越剧烈,衰减速度越快。

3)对比辐射电场频谱图可知,GIS 断路器动作产生的辐射电场,其幅值主要分布在某些特定频率上,且电压等级越高,频率分布越广,高频分量越多。1 100 kV GIS 断路器,主频主要分布在 100 MHz 以下;550 kV GIS 断路器,主频主要分布在 5 MHz 以下。造成这种差异的原因可能是 GIS 断路器电压

等级越高,重燃次数更多所致。

4)对比辐射电场时—频谱图可知,GIS 断路器动作产生的辐射电场频率呈正态分布状,中间频率较两边频率分布更密集、持续时间更长;且随着电压等级的升高,其频率分布会有一个数量级的提升,持续时间也会成倍增加。

从以上 4 点结论可以了解到,GIS 断路器动作产生的辐射电场是一组宽频带的干扰脉冲波。虽然幅值不是非常高,但其高频率、宽频带的特点可能对二次通信设备带来潜在威胁,这一点是需要引起注意的。另外,测量 GIS 开关操作产生的辐射电场幅值的变化,也可以诊断 GIS 内绝缘中是否存在缺陷。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 巩学海,何金良,李雨,等. 变电站瞬态电磁环境分析[J]. 高压电器,2009,45(5):39-43.
GONG Xuehai, HE Jinliang, LI Yu, et al. The transient electromagnetic environment analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):39-43.
- [4] 黄益庄. 变电站智能电子设备的电磁兼容技术[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(15):6-9.
HUANG Yizhuang. EMC technology for IED in substations[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15):6-9.
- [5] 张丽伊. 如何提高综合自动化变电站的抗电磁干扰能力[J]. 电力与能源,2011(29):369-370.
ZHANG Liyi. How to improve the ability to resist electromagnetic interference of integrated automation substation[J]. Power and Energy, 2011(29):369-370.
- [6] KONG Xu, LIU Haojun, XIE Yanzhao, et al. High-voltage circuit breaker insulation fault diagnosis in synthetic test based on noninvasive switching electric field pulses measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1168-1175.
- [7] KONG Xu, LI Keji, GUO Jun, et al. A wide-band elec-

- trooptical E-field probe for electromagnetic pulse measurement[C]//presented at the Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics. Shanghai, China: [s.n.], 2012:6-9.
- [8] IEC Standard 62271-101—2012 High-voltage switchgear and controlgear-Part 101:Synthetic testing[S].2012.
- [9] 张卫东. 变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究[D]. 北京:华北电力大学,2003.
- ZHANG Weidong. Substation switching transient electromagnetic interference problem research[D]. Beijing:North China Electric Power University,2003.
- [10] 刘卫东,刘尚合,魏明,等. 光纤传输式瞬态脉冲电场传感器分析与设计[J]. 微波学报,2011,27(1):78-82.
- LIU Weidong,LIU Shanghe,WEI Ming,et al. Characteristics analysis and design of fiber-optical E-field sensor for transient electromagnetic field measurement[J]. Journal of Microwaves,2011,27(1):78-82.
- [11] 司荣仁,石立华,陈锐,等. 球形光纤传输三维电场传感器[J]. 强激光与粒子束,2012,24(12):2930-2934.
- SI Rongren,SHI Lihua,CHEN Rui,et al. Three-dimensional electric-field sensor for spherical fiber transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams,2012,24(12):2930-2934.
- [12] 石立华,司荣仁,李炎新,等. 微型化光纤传输电磁脉冲传感器研究[J]. 电波科学学报,2012,27(6):1152-1171.
- SHI Lihua,SI Rongren,LI Yanxin,et al. Miniaturization of optical fiber transmission electromagnetic pulse sensor [J]. Waves Scientific Journals,2012,27(6):1152-1171.
- [13] 孔旭,谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电、磁场测量系统[J]. 高电压技术,2015,41(1):339-345.
- KONG Xu,XIE Yanzhao.Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology [J]. High Voltage Engineering,2015,41(1):339-345.
- [14] 任晓明,傅正财,黄晓红,等. 脉冲磁场测量系统的研制和标定[J]. 上海交通大学学报,2010,44(7):980-983.
- REN Xiaoming,FU Zhengcai,HUNAG Xiaohong,et al. Development and calibration of an impulse magnetic field measurement system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2010,44(7):980-983.
- [15] 康兵,关向雨,舒乃秋,等. 几种视频分析方法在VFTO频谱分析中的应用[J]. 高电压技术,2015,41(2):680-686.
- KANG Bing,GUAN Xiangyu,SHU Naiqiu,et al. Several kinds of video analysis method in the application of VFTO spectrum analysis[J]. High Voltage Engineering,2015,41(2):680-686.
- [16] 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.
- [17] 张卫东,崔翔. 光纤瞬态磁场传感器的研究及应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):87-92.
- ZHANG Weidong,CUI Xiang. Optical fiber research and application of the transient magnetic field sensor[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):87-92.
- [18] 郭飞,孔旭,吴旭涛,等. 330 kV超高压GIS开关动作VFTO辐射电场的测量与分析[J]. 高压电器,2014,50(9):119-125.
- GUO Fei,KONG Xu,WU Xutao,et al. 330 kV EHV GIS switch action VFTO radiation electric field measurement and analysis[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(9):119-125.
- [19] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 第2版.北京:机械工业出版社,2011.
- LIN Xin. The second edition of the modern high voltage electrical technology [M]. 2nd ed..Beijing:China Machine Press,2011.
- [20] 蔡元纪,童悦,刘杉,等. 气体绝缘开关设备中的特快速暂态电流测量[J]. 高压电器,2016,52(9):34-39.
- CAI Yuanji,TONG Yue,LIU Shan,et al. Measurement of very fast transient current generated in gas-insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(9):34-39.
- 刘青(1978—),女,副教授,从事电力系统电磁暂态分析方面的教学与科研工作。
- 王乐(1990—),男,硕士研究生,主要电磁兼容、电磁测量方面的研究。