

GIS 开关操作瞬态辐射场模拟装置研制及其应用

张鸿业^{1,2}, 谢彦召^{1,2}, 周 熠^{1,2}, 仇杨鑫^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 西安交通大学瞬态电磁环境与应用国际联合研究中心, 西安 710049)

摘要: 随着气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS)的数字化和智能化不断深入,在线监测装置等二次设备被下放到开关场中,较易受到开关操作瞬态辐射场的干扰。为了明确在线监测终端器件对高频阻尼振荡电场的抗干扰度,完善GB/T 17626.10—2017中的在线监测试验项目,文中研制出GIS开关操作瞬态辐射场环境的模拟装置,并基于此测试平台对PCB级数字终端和CAN总线进行了辐射效应实验,证明了GIS开关操作瞬态辐射场可能会对在线监测数字终端产生较强的电磁干扰。研究结果为完善在线监测设备的入网测试平台提供了一定的借鉴意义。

关键词: 在线监测; 数字终端; GIS; 开关操作瞬态辐射场; PCB; CAN总线; 多等级效应

Development and Application of Simulator for Transient Radiation Field of GIS Switching Operation

ZHANG Hongye^{1,2}, XIE Yanzhao^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2}, QIU Yangxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. National Center for International Research on Transient Electromagnetic Environments and Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the digitization and intellectualization of gas insulated substations (GIS), secondary device such as online monitoring digital terminals are put into the switchyard and can possibly be influenced by the transient radiation field of GIS switch operation. In order to clarify the immunity of online monitoring digital terminals to transient radiation field of GIS switch operation, and to improve the online monitoring testing project in GB/T 17626.10—2017, this paper developed a simulator for transient radiation field environment of GIS switch operation. Then, based on this experiment platform, a radiation effect experiment was conducted on the PCB-level digital component and CAN bus, which proved that the radiation field of GIS switch operation could cause strong electromagnetic interference to online monitoring digital terminal device. The research results provide a reference for improving the test platform for the access of online monitoring equipment.

Key words: online monitoring; digital; terminals; GIS; transient radiation field of switching operation; PCB; CAN bus; multi-level effect

0 引言

随着中国变电站智能化和数字化进程的不断深入,数字终端电子器件在GIS数据监测方面得到大力发展^[1-3]。GIS由于体积小,一次设备与二次设备距离很近,开关操作所产生的瞬态辐射场容易对

在线监测数字终端器件造成电磁干扰,威胁其正常运行;很多在线监测器件故障被认为与开关操作瞬态辐射场紧密相关^[4-8]。

目前,变电设备在线监测装置在线监测试验项目包含阻尼振荡磁场抗扰度实验及对策,主要模拟中压和高压变电站中产生的阻尼振荡磁场骚扰对

收稿日期:2019-08-07; 修回日期:2019-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51677148)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51677148),

监测装置的影响,试验依据为GB/T 17626.10—2017,测试条件中只规定了磁场的强度^[9]。然而,开关暂态辐射场中的高频成分衰减较快,在可测量区电场与磁场并不满足远场辐射模式,只采用磁场骚扰的方式考核在线监测装置不够全面;最重要的是,用于考核二次设备抗干扰性能的阻尼振荡磁场抗扰度标准试验波形振荡频率不能覆盖特高压变电站实际骚扰频率范围。因此,在标准GB/T 17626.10—2017之外,应针对在线监测数字终端研制基于GIS开关暂态辐射电场特征的抗干扰度考核装置。

文中首先针对不同电压等级的GIS开关操作瞬态辐射场进行分析,总结给出其典型波形特征,并基于这些特征参量利用集总元件开关振荡电路原理研制出GIS开关操作瞬态辐射场环境模拟装置;而后,基于此试验平台,对PCB级数字终端和CAN总线(USB TO 串口)进行了多等级效应试验,结果表明,GIS开关暂态辐射场可能会对在线监测数字终端器件中模拟信号和数字信号的传输过程产生电磁干扰。

1 GIS开关操作瞬态辐射电场特征提取

文中采用文[10]中基于电小天线原理与光纤传输技术所研制的电场测量系统,对不同电压等级的GIS开关操作瞬态辐射场进行了测量。以220 kV高桥变电站所测三相断路器关合操作过程中所产生暂态辐射电场脉冲为例进行分析,所测得幅值最大的电场脉冲 P_{A4} 的波形、时频谱分析结果见图1。

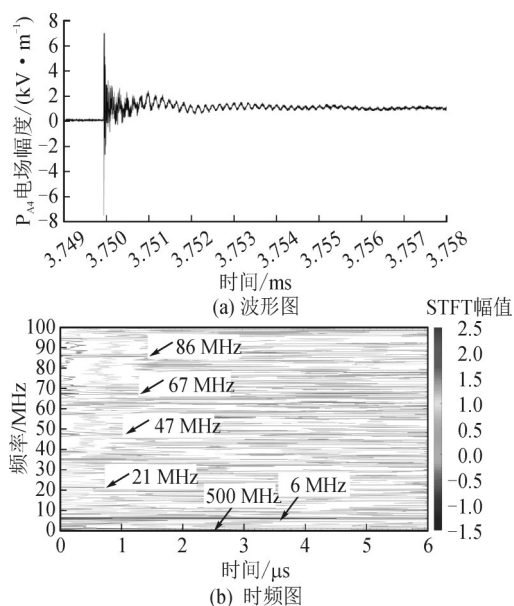


图1 断路器闭合操作瞬态辐射电场脉冲 P_{A4} 波形、频谱和时频域分析结果

Fig. 1 Time domain and frequency domain analysis of the switching E-field pulse P_{A4} due to closing operations of the circuit breaker

由图1可以看出,GIS开关暂态辐射电场脉冲 P_{A4} 最高幅值约为7.7 kV/m,前沿40 ns,持续时间为微秒量级;此电场脉冲的频率分量均分布于100 MHz以下,其中6 MHz处的短时傅里叶变换(STFT)幅值最高,且随时间衰减最慢,表明6 MHz为振荡中心频率。开关暂态辐射电场脉冲时域波形呈现指数衰减正弦振荡的特征,所以该研究提出用式(1)来表征辐射电场脉冲的波形函数,即

$$E(t) = Ce^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式(1)中: δ 定义为阻尼因子; C 表示与初始振荡幅值相关的常数; ω 是由振荡主频决定的角频率; φ 代表初相位。

2 GIS开关操作瞬态辐射场环境模拟装置研制

文[11]与IEC 61000-4-12—2017中推荐变电站开关操作瞬态电压模拟波形的中心频率为1 MHz,但开关操作瞬态辐射场实测波形高于1 MHz频段的能量仍占有相当大的比重,这与文[12]中的结论一致。因此,为了增强试验模拟的有效性,文中建议将GIS开关操作瞬态辐射场典型试验波形的振荡频率提高到6 MHz。鉴于开关暂态辐射电场脉冲的峰值场强随着GIS电压等级的升高呈明显上升趋势^[13-20],文中的GIS开关暂态辐射场模拟装置所产生的电场脉冲幅值应具有可调性,从几个千伏每米变化到几十个千伏每米。由前述分析可知,文中GIS开关暂态辐射场模拟器需要实现的电场脉冲波形函数如式(1)所示,其中, E_0 的变化范围应该从几个千伏每米到几十个千伏每米;中心频率 f_c 为6 MHz(频率可调),持续时间应微秒量级。装置由开关振荡电路与TEM小室组成,见图2。

该模拟装置的基本工作原理为:首先,高压直流源对电容器 C 进行充电;当 C 的储能达到一定阈值其两端电压达到某一水平 U_0 时,高压开关击穿,高压直流源与保护电阻 R_s 所在支路被短路,并且电感器 L 、 C 与TEM小室负载电阻 R 三者组成串联谐振回路; L 与 C 形成不断的充放电过程,并因为 R 的存在使其谐振电流不断衰减,直至为零;该回路的谐振电压作用于TEM小室的芯板与上下底板之间,从而在此上下区域内产生均匀的随时间成指数衰减的正弦振荡电磁波。

2.1 开关振荡电路参数计算

当开关振荡电路独立串联谐振时,满足以下条件

$$U_R + U_L + U_C = 0 \quad (2)$$

式(2)中

$$U_R = i \times R \quad (3)$$

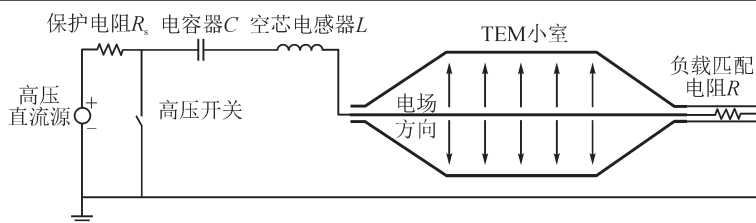


图2 GIS开关操作瞬态辐射场模拟装置原理图

Fig. 2 Diagram of the radiated switching transient simulator of GIS

$$U_L = L \times \frac{di}{dt} \quad (4)$$

$$i = C \times \frac{dU_C}{dt} \quad (5)$$

由(2)-(5)可知

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \times \frac{di}{dt} + i = 0 \quad (6)$$

求解式(6)可知

$$i = [A \times \sin(bt) + B \times \cos(bt)] \cdot e^{at} \quad (7)$$

式(7)中

$$\begin{cases} a = -\frac{R}{2L} \\ b = \frac{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}}{2L} \end{cases} \quad (8)$$

作用于TEM小室上的电压为

$$U_{TEM} = \frac{U_0 R_{TEM}}{Lb} \times \sin(bt) \times e^{at} \quad (9)$$

TEM小室上极板与中板之间的距离用 H 来表示,则TEM小室内的电场为

$$E_{TEM} = \frac{U_0 R_{TEM}}{LbH} \times \sin(bt) \times e^{at} \quad (10)$$

对比式(1)与式(10),可得

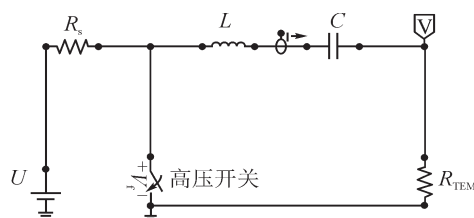
$$\begin{cases} a = \delta \\ b = 2\pi \cdot f_r \\ \frac{U_0 R_{TEM}}{LbH} = E_0 \end{cases} \quad (11)$$

TEM小室的特性阻抗为 50Ω ,芯板与底板之间的距离 $H=15 \text{ cm}$;设计目标 $f_r=6 \text{ MHz}$, E_0 最低值为 5 kV/m , $\delta=6.2 \times 10^5$ 。代入式(11)后解得: $L=40.32 \mu\text{H}$; $C=17.45 \text{ pF}$; $U_0 \geq 32 \text{ kV}$ 。

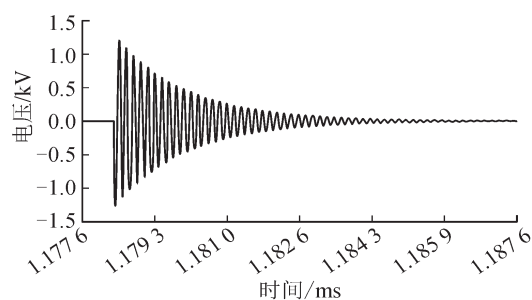
2.2 开关振荡电路仿真模拟

基于ATP电路仿真软件,对开关振荡电路进行仿真模拟,仿真电路图与负载电压处电压波形见图3。TEM小室上的负载电压呈现指数衰减的正弦振荡特征;其最大电压幅值约为 1.2 kV ,对应于底板与芯板之间区域的最大电场脉冲幅值 8 kV/m ,满足 $>5 \text{ kV/m}$ 的设计条件;其振荡周期约为 $1.6 \mu\text{s}$,说明仿真电压波形的振荡频率约为 6.25 MHz ,与 6 MHz 的中心振荡频率基本契合;其持续时间为微秒量级,符合设计要求;其前沿约为 40 ns ,符合真实的断

路器暂态辐射场的前沿特点。



(a) 仿真电路



(b) 仿真波形

图3 TEM小室负载电压仿真电路图与仿真波形图

Fig. 3 Switching oscillating electric circuit and the voltage waveform of the TEM load

2.3 在线监测智能终端EMC考核试验平台搭建

为实现良好的实验结果,回路中的高压开关选取尤为重要。为了产生较为理想的断路器暂态辐射场波形,需要实现纳秒级的击穿时间。因此,高压开关选取充入高压气体($0.1 \sim 1.0 \text{ MPa}$)的双电极气体开关;另外,双电极气体开关还具有结构简单的特点。

TEM小室采用 2 mm 不锈钢板加工,总体尺寸 $1\,000 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),其中有效工作区域: $424 \text{ mm} \times 384 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。小室设计传输阻抗为 50Ω ,高压电磁脉冲引入小室采用电缆头连接,负载电阻均采用 50Ω 阻抗匹配,阻抗匹配减少了电场畸变。TEM小室实物图见图4。



图4 TEM小室实物图

Fig. 4 Photo of the TEM cell

空芯电感器由55匝标称截面积为 2.5 mm^2 的BV线缆绕制而成,螺线管长度为 10 cm ,直径为 4 cm 。结构电容采用平行板电容器的设计方案,平行板材料使用黄铜。为了改善两平行板之间的电场均匀程度,平行板制作成圆饼状;平行板之间填充介质为蓖麻油,其相对介电常数为 $\epsilon_r=4.7$ 。平行板半径为 49 mm ,电极间距为 30 mm 时,电容值为 17.40 pF ;并且此时,其耐压值远大于 100 kV ,无绝缘隐患。

当双电极开关击穿电压为 31 kV 时,所测得TEM小室内所产生的暂态辐射电场波形图与时频谱图见图5。图5中的辐射电场的峰值约为 6.5 kV/m ;可以看出其主振荡包含 4 MHz 与 6.5 MHz 。此装置能够产生最大电场幅值从 4.8 kV/m 变化到 30 kV/m ,持续时间不低于 $1\text{ }\mu\text{s}$,且整体呈现正弦衰减振荡波形特征的开关暂态模拟辐射场;通过调节电容器两极板之间的距离,可以改变开关振荡电路的谐振频率,从而在一定范围内调节该开关操作暂态辐射场模拟装置的中心频率,使其覆盖 $250\text{ kHz}\sim 80\text{ MHz}$ 。综上,该模拟装置可以作为在线监测数字终端器件对GIS开关操作瞬态辐射场抗干扰度的研究测试装置。

3 GIS开关暂态辐射场对智能终端设备的多等级效应研究

文中选择数据传输中的PCB电光转换模块以及CAN总线(USB-T0数据传输串口,RS232转RS485)作为主要的研究对象,分别在模拟信号层面以及数字信号方面探究GIS开关暂态辐射场对其多等级辐射效应。

3.1 PCB电光转换模块的GIS开关暂态辐射场效应试验研究

任意波形发生器实时产生方波信号模拟通信

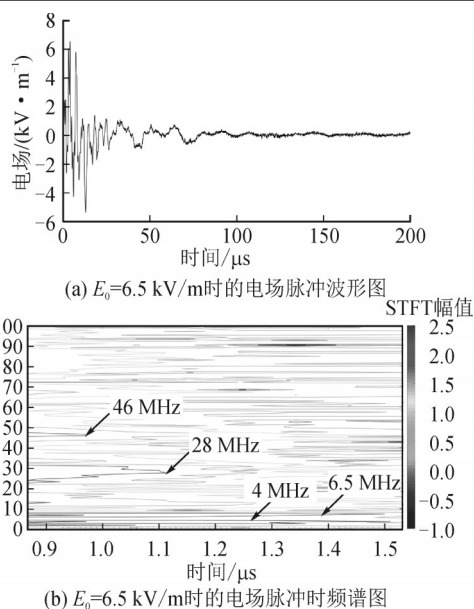


图5 GIS开关暂态辐射场模拟装置所产生电场脉冲
 $E_0=6.5\text{ kV/m}$ 时的波形与时频谱图

Fig. 5 Time domain and frequency domain analysis of the switching E-field pulse when $E_0=6.5\text{ kV/m}$

线路中所传输的有用信息,并通过PCB电光转换模块传输到示波器中;通过外加GIS开关暂态模拟辐射场后,研究此辐射场对PCB电光转换模块的辐射耦合效应。电光转换模块PCB板被放置于TEM小室工作区域内,由 $\pm 5\text{ V}$ 直流电源供电,其电路原理图见图6。任意波形发生器在TEM小时外部产生峰值 4 V 、重频为 2 MHz 的方波信号,并通过屏蔽线缆传输到电光转换模块电路板上;之后电信号被转换为光信号经光纤传输到TEM小室外的光接收机中,再由光接收机将光信号还原为电信号传输到示波器中。在同样的实验配置下,不断增加GIS开关暂态模拟辐射场的电场强度,经PCB电光转换模块所传送的方波信号所受到的电磁干扰见图7。

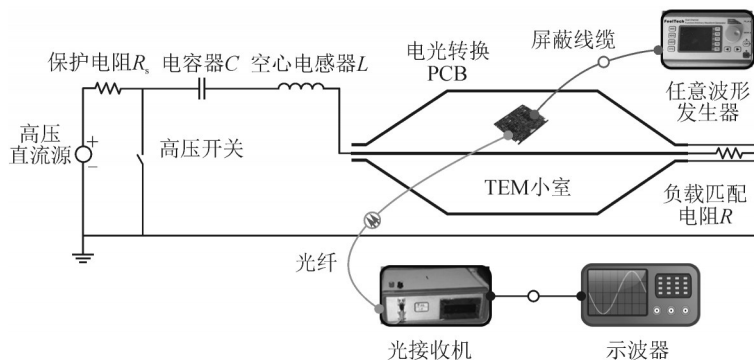


图6 实验配置图

Fig. 6 Experiment setup

对比图7中6个子图,可以得出:随着GIS开关暂态模拟辐射场的峰值不断增加,其对PCB电光转换模块的耦合效应不断增强。当辐射电场峰值从

5.2 kV/m 变化到 10 kV/m 时,PCB电光转换模块上的辐射效应电压峰值从 3.8 V 逐渐变化到 8.5 V ;除此之外,PCB电光转换模块受干扰的时间也随着辐射场

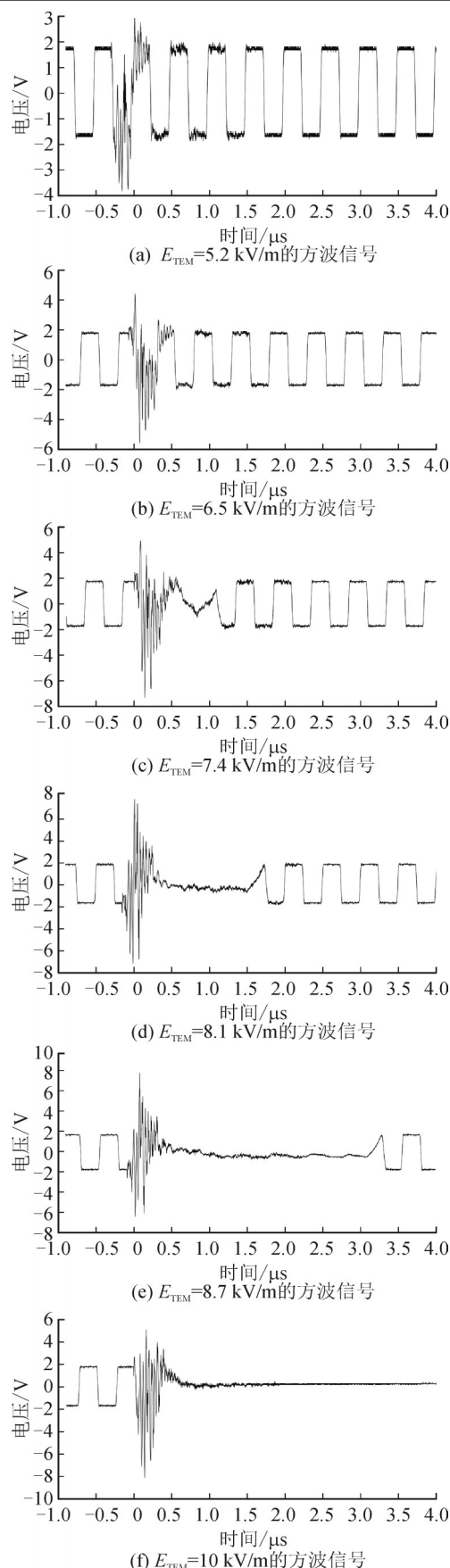


图7 不同强度GIS开关暂态模拟辐射场影响下信号传输受干扰波形图

Fig. 7 Disturbed square wave signal under the interference of simulated switching field of different amplitude

强的增强而不断增加,从接近 $1 \mu\text{s}$ 逐渐变化为 $4 \mu\text{s}$ 以上。

3.2 USB-TO数据传输串口的GIS开关暂态辐射场效应试验研究

基于串口调试助手软件平台,计算机通过USB串口转换器以一定的速率和频率给自己发送数据;在USB-TO数据传输过程中,对串口转换器的信号线缆施加GIS开关暂态模拟电磁环境的辐射,以探究开关暂态辐射场对数字信号传输的辐射效应。数据传输参数选为波特率9 600 bit/s,每个字节含有8个bit,而每一个字节可以表达一个ASCII码,因此9 600波特率的信道每秒可以传输9 600/8个英文字母的数据量,也就是1 200个字节。数据传输的起始位默认为0,停止位设为1,未设置校验位,传输字符为111111。整个实验装置的结构示意图见图8。

3.2.1 数据发送间隔时间对数字信号传输辐射效应的影响

在TEM小室内辐射电场强度 $E_{\text{TEM}} = 5 \text{ kV/m}$,传输数据发送间隔为1 000 ms的情况下,USB-TO数据传输串口工作正常;当不断缩小数据传输时间间隔时,数据传输屏幕显示见图9。

综上,可以得出结论:在外加辐射场不变的情况下,随着数据发送时间间隔变小,数字信号传输过程越容易出现错误,且错误类型与严重程度不断增加,总结见表1。

3.2.2 辐射场强对数字信号传输辐射效应的影响

保持数据发送时间间隔为1 000 ms不变,改变TEM小室内的电场强度,研究不同强度的GIS开关暂态模拟辐射场对USB TO数据传输的影响。试验结果总结见表2,当 $E_{\text{TEM}} = 5.2 \text{ kV/m}$ 时,USB串口调试程序均报错,且界面崩溃,无法自动恢复,只能手动强制退出;当 $E_{\text{TEM}} > 6 \text{ kV/m}$ 时,此时发现重启串口调试软件已无法继续USB TO数字信号传输工作,串口无法识别,此时需要将电脑与USB串口转换器断开再重新连接,才能使串口调试程序恢复正常。USB-TO数据传输显示界面见图10。

4 结语

文中基于实测GIS开关操作瞬态辐射电场数据分析,研制出符合真实波形特征的GIS开关操作瞬态辐射场环境模拟装置,并提出考核在线监测装置对阻尼振荡电场骚扰的抗干扰度,对完善GB/T 17626.10—2017中在线监测设备的电磁兼容入网测试和进一步开展变电设备在线监测试验项目等具有一定的借鉴意义。文中研究基于此试验平台,对

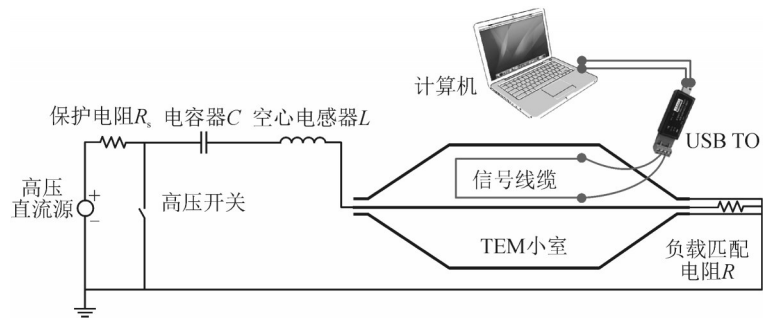


图8 实验配置图

Fig. 8 Experiment setup

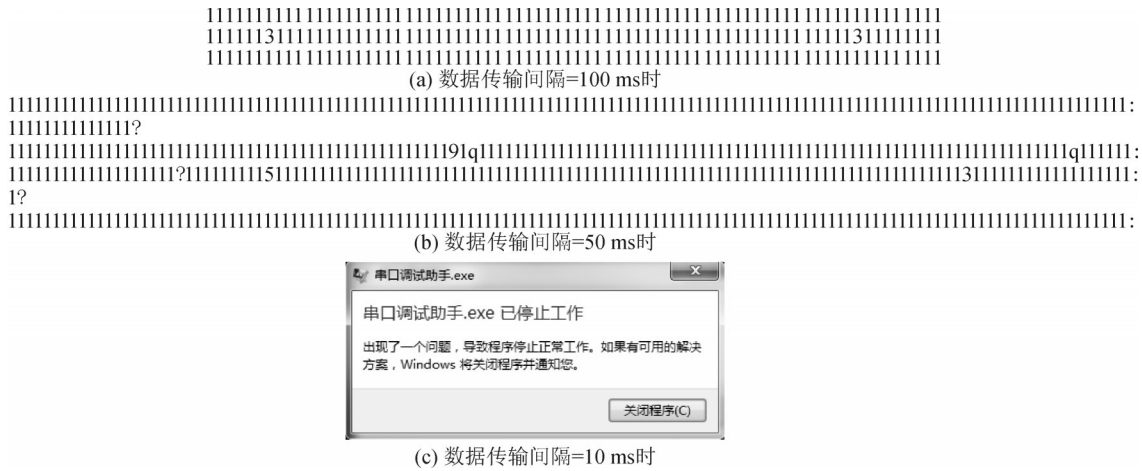


图9 不同发送时间间隔情况下数据传输在 GIS 开关暂态模拟辐射场影响下效应图

Fig. 9 Data transmission disturbed by simulated switching field of different sending intervals

表 1 数据发送间隔时间对数字信号传输辐射效应的影响

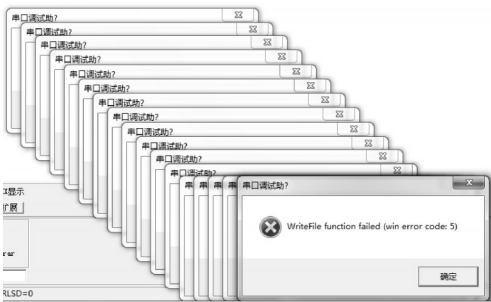
Table 1 Data transmission disturbed by simulated switching field of different sending intervals

$E_{\text{TEM}}/$ ($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	数据发送 间隔/ms	数字信号 传输错误	描述
0	1 000	无	传输正常
5	1 000	无	传输正常
5	100	误码	“3”
5	50	乱码、误码、 数据丢失	“?”; “q”; “L”等
5	10	串口调试 窗口崩溃	强制退出, 重启正常

表 2 辐射电场强度对数字信号传输辐射效应的影响

Table 2 Data transmission disturbed by simulated switching field of different amplitude

$E_{\text{TEM}}/$ ($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	数据发送 间隔/ms	数字信号 传输错误	描述
5	1 000	无	传输正常
5.2	1 000	串口调试 窗口崩溃	强制退出, 重启正常
> 6	1 000	串口无法 识别	强制退出, 无法重启



(a) $E_{\text{TEM}} = 5.2 \text{ kV/m}$ 时显示界面



(b) $E_{\text{TEM}} > 6 \text{ kV/m}$ 时显示界面

图10 不同开关暂态辐射电场强度下 USB-TO 数据传输显示界面

Fig. 10 Interface display under different switching E-field amplitude

PCB板级数字终端和CAN总线(USB TO 串口)进行了辐射效应试验,揭示了GIS开关暂态辐射场不仅

会使传输的模拟信号发生波形畸变、失真,也会使数字信号的传输过程产生误码、乱码、数据丢失等错误,甚至造成软件崩溃;为变电站的稳定运行和电网的安全运作提供了一定的警示意义。

由上述可知,为保证在线监测装置于变电站开关操作瞬态辐射场环境中稳定工作,应当采取有效的屏蔽措施在数据源头对数字终端进行电磁防护。作者未来将对变电站在线监测装置的电磁防护方法开展相应的研究工作。

参考文献:

- [1] QIANG G, GU W C, WANG C G, et al. High voltage equipment online monitoring system of smart substation[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Tianjin: IEEE, 2012: 1-5.
- [2] 孙晓明. 智能变电站二次设备在线监测与智能诊断[J]. 电工电气, 2016(9):51-54.
SUN Xiaoming. On-line monitoring and intelligent diagnosis of secondary equipment in smart substations[J]. Electrician and Electrical Engineering, 2016(9):51-54.
- [3] 吴旭涛, 李军浩, 张亮, 等. 振荡型冲击电压下局部放电的检测及干扰分析[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 92-97.
WU Xutao, LI Junhao, ZHANG Liang, et al. PD detection and interference analysis under oscillating impulse voltage [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 92-97.
- [4] 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. Measurement and analysis of the radiated electric field excited by switching operation of 330 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9):119-125.
- [5] 陈维江, 颜湘莲, 王绍武, 等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31):1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent progress in investigations on very fast transient over-voltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31):1-11.
- [6] NISHIWAKI S, NOJIMA K, TATARA S, et al. Electromagnetic interference with electronic apparatus by switching surges in GIS-cable system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, 10(2):739-746.
- [7] 张荐, 焦重庆, 李顺杰, 等. 某 500 kV GIS 变电站断路器操作对智能组件 CT 端口电磁骚扰的实测与分析[J]. 高压电器, 2016, 52(8):29-36.
ZHANG Jian, JIAO Chongqing, LI Shunjie, et al. Measurement and analysis of electromagnetic disturbance in the CT port of intelligent component of a 500 kV GIS substation breaker operation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8):29-36.
- [8] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transient electromagnetic interference in substations[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9(4):1869-1884.
- [9] 王茂军, 高 强, 耿宝宏. 变电设备在线监测装置电磁兼容试验与研究[J]. 东北电力技术, 2014, 35(9):14-16.
WANG Maojun, GAO Qiang, GENG Baohong. Electromagnetic compatibility test and research of online monitoring device of substation equipment[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(9):14-16.
- [10] KONG X, LIU H J, XIE Y Z, 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.
- [11] 500 kV 变电所保护和控制设备抗扰度要求:DL/Z 713—2000[S].2000.
Immunity requirements for protection and control equipment for 500 kV substations:DL/Z 713—2000[S].2000.
- [12] 张卫东. 变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2003.
ZHANG Weidong. Research on transient electromagnetic interference in switching operation in substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [13] ZHANG H, XIE Y, YI T, et al. Fault detection for high-voltage circuit breakers based on time - frequency analysis of switching transient E -fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 29(13):61.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] SHENG B. L, VAN DER SLUIS L. Comparison of synthetic test circuits for ultra-high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4):1810-1815.
- [17] 卢斌先, 王泽忠, 李成榕, 等. 500 kV 变电站开关操作瞬态电场测量与研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4):133-138.

- (3): 806-814.
- [16] GREENWOOD A. Electrical transients in power systems [M]. New York: Wiley Interscience, 1971: 94-116.
- [17] YU Y X, WANG J H, YANG H, et al. Asymmetrical AC field emission current characteristics of vacuum interrupters subjected to inrush current[J]. IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 49-57.
- [18] ZHANG Y Y, YANG H, WANG J H, et al. Influence of high-frequency high-voltage impulse conditioning on back-to-back capacitor bank switching performance of vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(3): 321-330.
- [19] YANG H, GENG Y S, LIU Z Y, et al. Capacitive switching of vacuum interrupters and inrush currents[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 159-170.
- [20] DELACHAUX T, RAGER F, GENTSCH D. Study of vacuum circuit breaker performance and weld formation for different drive closing speeds for switching capacitive current [C]//24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig: [s.n.], 2010: 241-244.
- [21] GRIOT S, MOREAU A. Vacuum circuit breaker's electrical life for shunt capacitor switching[C]//24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig: [s.n.], 2010: 194-197.
- [22] GENTSCH D, GORLT K. Welding behavior of vacuum interrupters equipped with CuCr contact material caused by making and breaking operations under short circuit current interruption[C]//25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tomsk: [s.n.], 2012: 213-216.
- [23] High voltage alternating current circuit breakers: IEC 62271-100—2008[S]. 2008.
- [24] Synthetic testing of high voltage alternating current circuit breakers: IEC 62271-101—2012[S]. 2012.
- 王昊晴(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压开关设备运行和试验检测技术以及真空开断技术方面的研究。
-
- (上接第 178 页)
- LU Binxian, WANG Zezhong, LI Chengrong, et al. Measurements and research of switching operation transient electric field in 500 kV substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 133-138.
- [18] WIGGINS C M, NICKEL F S, HANEY A J, et al. Measurement of switching transients in a 115 kV substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 4(1): 756-769.
- [19] RAO J V. High frequency magnetic and electric field measurements and simulation of a 245 kV GIS[C]// International Conference on High Voltage Engineering and Application. [S.l.]: IEEE, 2010: 252-255.
- [20] SMEETS R P, LINDEN W A, ACHTERKAMP M, et al. Disconnecter switching in GIS: Three-phase testing and phenomena[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 122-127.
- 张鸿业(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事电网暂态电磁环境的模拟仿真及试验研究工作。
- 谢彦召(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高功率电磁学、多导体传输线的暂态分析、暂态电磁环境的模拟和测量等方面的研究工作(通讯作者)。
- 周 熠(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率电磁环境等效注入实验方面的研究工作。
- 仇杨鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事UWB天线等方面的研究工作。