

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.002

一二次融合配电开关辐射磁场规律及其对智能传感器影响分析

路文超¹, 段建东¹, 成林², 郭琳云³, 李再男¹

(1. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710052; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100;
3. 西安兴汇电力科技有限公司, 西安 710116)

摘要: 一二次融合技术使得配电开关中二次智能传感单元近距离布置于一次高压电磁环境, 配电开关因为电磁干扰产生大量故障。文中利用可控电弧放电原理, 针对某型号 10 kV 一二次融合配电开关搭建了暂态电磁干扰模拟试验平台, 获得了该户外一二次融合配电开关干扰信号, 其中重点研究了智能传感器附近空间磁场规律; 对配电终端(FTU)进行了屏蔽效能分析, 计算了传感器合并单元电源线受扰情况。结果表明: 一二次融合配电开关中智能传感器可能在持续强暂态电磁骚扰下发生严重故障, 文中所研究的电磁暂态模拟试验系统可对智能传感器抗强电磁干扰能力进行考核, 现有标准不能满足一二次融合结构下智能传感类设备抗强电磁干扰能力检测需求。

关键词: 一二次融合; 电磁干扰; 球隙击穿; 智能传感器

Law of Radiation Magnetic Field of Primary and Secondary Fusion Distribution Switch and Analysis of Its Influence on Intelligent Sensor

LU Wenchao¹, DUAN Jiandong¹, CHENG Lin², GUO Linyun³, LI Zainan¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710052, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 3. Xi'an Xinghui Electric Power Technology Co., Ltd., Xi'an 710116, China)

Abstract: The primary and secondary fusion technology makes the arrangement of secondary intelligent sensor unit in the distribution switch close to the primary high-voltage electromagnetic environment, and the distribution switch has a large number of faults due to electromagnetic interference. In this paper, based on the principle of controlled arc discharge, a transient electromagnetic interference simulation test platform for a 10 kV primary and secondary fusion distribution switch is set up, and the interference signal of the outdoor primary and secondary fusion distribution switch is obtained, in which the law of spatial magnetic field near the intelligent sensor is mainly studied. The shielding effectiveness of the distribution terminals(FTU) is analyzed, and the interference of power line of the sensor merging unit is calculated. The results show that the intelligent sensor in the primary and secondary fusion distribution switch may have serious fault under the continuous strong transient electromagnetic disturbance. The electromagnetic transient simulation test system studied in this paper can check the anti-strong electromagnetic interference ability of intelligent sensor, and the existing standards cannot meet the detection requirements of anti-strong electromagnetic interference ability of intelligent sensor equipment under the primary and secondary fusion structure.

Key words: primary and secondary fusion; electromagnetic interference; sphere gap breakdown; intelligent sensor

收稿日期:2023-10-05; 修回日期:2023-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(U1866201,51877174)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U1866201,51877174).

0 引言

一二次融合配电开关中智能传感器等二次设备更靠近高压一次侧, 成为一个更加集成化、标准化的智能单元^[1-4]。随着一二次融合智能开关在配电网中的广泛应用, 以及融合程度的不断加深, 电磁干扰问题日趋严重^[5-7]。据统计, 自正式应用以来, 由电磁干扰引起的智能传感器故障已经在许多变电站和配网台区发生^[8-9]。但目前没有与现场实际工况一致的相关标准, 且一二次融合配电开关二次侧的抗干扰特性无法通过相应指标来确定^[10], 因此开展一二次融合配电开关强电磁骚扰及其试验方法研究具有重要理论和应用价值。

近年来, 国内外对一二次融合配电开关电磁干扰测试方法的研究, 主要集中在传导干扰, 研究结果难以反映空间中复杂电磁辐射信号的直接耦合叠加。根据文[11]的研究, 电弧燃弧对开关二次回路的电磁干扰非常严重。相关学者对变电站的一些智能组件也进行过电磁干扰测试, 但大多只测量了电磁场强度^[12-13]。为此, 有研究者提出了利用隔离开关分合模拟干扰源的智能传感器抗扰度试验方法^[14], 证明了该试验过程中智能传感器受到强烈干扰。文[15-16]分别分析了配电开关和开关柜分合闸时电流传感器的输出和控制单元的输入、输出电流信号, 得到了电磁干扰的主要频率分布; 文[17]对传感器二次侧和配电终端(FTU)输入端的传导干扰信号进行了测量, 并对一二次融合配电开关进行了抗雷电冲击电路优化; 文[18]测量了断路器投入电容器组时, 涌流产生的空间磁场, 得到了电磁脉冲的主要分布范围。目前, 针对一二次配电开关电磁辐射干扰的研究比较局限, 辐射传播路径和影响方式、程度仍不明晰, 因此急需对一二次融合开关智能传感器在辐射电磁场下的受扰情况进行研究。

文中首先建立了基于电弧放电原理的模拟试验平台, 通过控制球隙击穿间距实现对一二次融合配电开关进行放电, 测量了试品开关传感器附近空间磁场, 并利用电磁场时域有限积分法(FITD)对三维磁场信号进行验证; 在辐射信号下对二次回路进行建模, 计算了二次智能组件屏蔽体的屏蔽效能及传感器核心组件合并单元的差模电磁干扰信号。通过文中研究, 有助于推动配电开关智能传感器的受扰情况分析以及进一步防护技术研究。

1 试验平台设计

1.1 一二次融合配电开关试品

一二次融合配电开关结构示意图见图1。与传统配电开关相比, 被测开关采用LPCT电子式电流传感器和电容式电压传感器的组合, 电流、电压传感器与断路器集成。被试配电开关配置分相传感器和二次端子控制箱(FTU)。电流传感器并联安装在开关出口处。

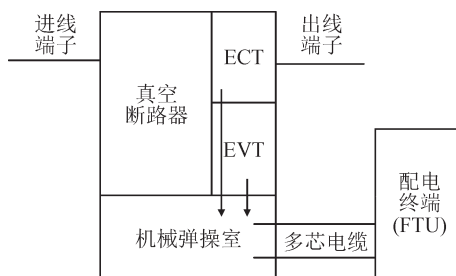
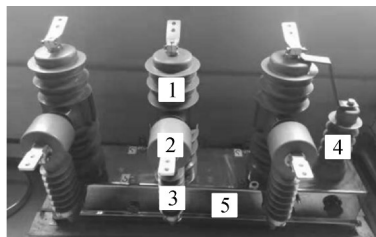


图1 一二次融合配电开关结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of primary and secondary integration distribution switch

本试验试品ZW32E-12户外高压真空配电开关实物图见图2。



1—真空断路器; 2—低功耗电子式电流互感器, 变比为600 A:1 V; 3—电容分压电子式电压传感器, 变比为10 kV:3.25 V; 4—电容取电装置; 5—机械弹操机构。

图2 ZW32E-12 真空断路器实物

Fig. 2 ZW32E-12 vacuum circuit breaker

1.2 试验原理与方法

试验电路见图3。该方法由于可控性强, 干扰信号分散性小, 为目前电子式互感器暂态干扰的主流试验方法^[19-26], 文中在其之上进行简化设计。T为试验变压器, 用于为试验回路提供电源; R为试验变压器保护电阻; C_1 为电源侧电容, 用于模拟实际系统中开关电源侧分布电容(5 nF); B为被试开关, 其通过分、合闸控制球隙电弧过程中电磁脉冲的产生, 分合闸时间即为暂态电磁骚扰的持续时间; D为试验球隙; C_2 是负载侧电容(3 300 pF), 用于为试验系统暂态过程提供电磁能量。

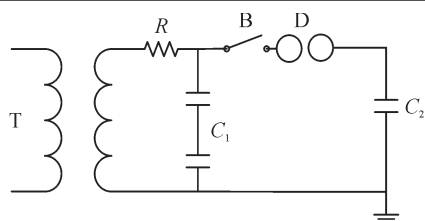


图3 试验回路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of test circuit

试验接线见图4。使用文[27]中的光纤测量装置测量智能传感器的二次电流及空间磁场信号, Picoscope6404d示波器记录暂态波形。为排除传导干扰影响暂态电流测量,尽可能还原一次电流,互感器二次电缆不与FTU进行连接,而是从电缆电流端子直接引出测量点,采用光纤传输。磁场探头为B-dot天线,变比为 $1\text{ V}:10^5\text{ A/m}$,理论测量带宽可达99.56 MHz。

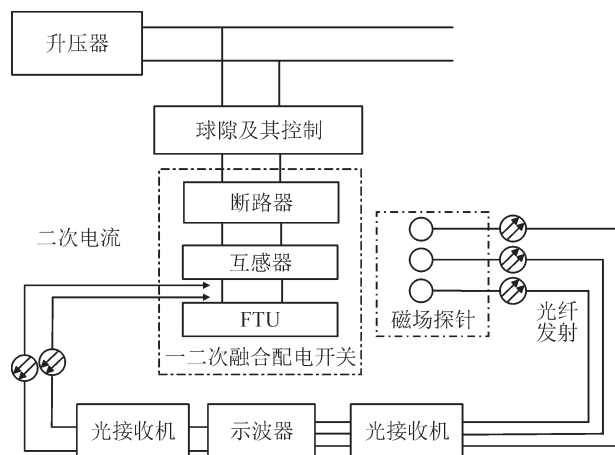


图4 试验接线图

Fig. 4 Test wiring diagram

测试前控制调整球隙间距为1 mm,被试开关B断开。测试开始后,首先闭合被试开关,利用升压变压器逐步提高球隙两端电压;当球隙击穿时,记录升压变压器高压侧的电压;球隙放电时间达到预设值时,分开被试开关,试验结束。采集电流传感器二次侧输出暂态电流及磁场强度。之后,将球隙间距调整为2、3 mm,重复之前试验步骤。每种间隙下进行10次试验。试验现场接线图见图5。

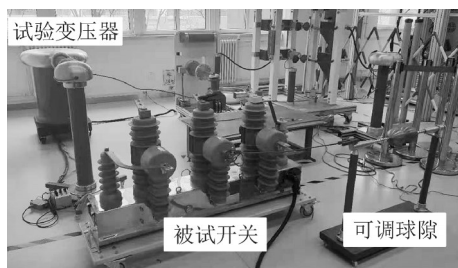


图5 现场接线图

Fig. 5 Field wiring diagram

考虑到安全绝缘距离和测量端口的抗干扰性

能,磁场探头不宜离开出线端子太近。因此,测点的 (x, z) 坐标与B相电流互感器中心重合,考虑到探针与导体安全绝缘距离及测量准确度, y 方向水平距离为50 cm。磁场测量位置示意图见图6。图6中:左图为磁场测量位置示意图;右图为实际放置情况。

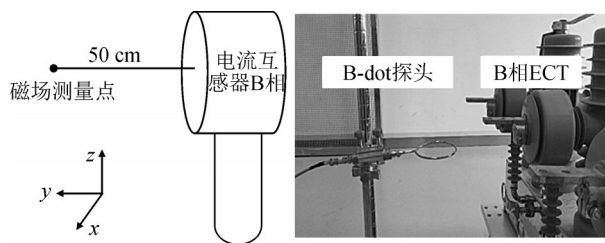


图6 磁场测量位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic field measurement position

2 试验结果

当球隙断口两端电压达到击穿电压时,断口击穿,形成导通的电弧间隙,断口间压差几乎为零,电磁干扰脉冲达到峰值,之后电弧熄灭,发生多次重燃。单次击穿的电流互感器电流和测点的三维磁场波形见图7、8。

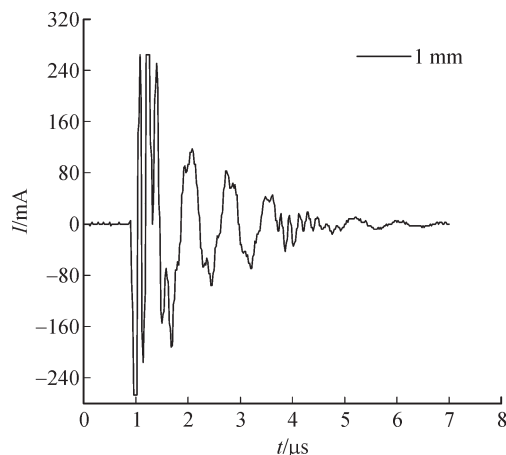


图7 智能传感器二次侧电流(3 mm球隙距离)

Fig. 7 Current at secondary side of sensor (3 mm sphere gap distance)

升压变压器测量端记录的击穿电压平均值及经换算得到的一次电流幅值与球隙间距关系见表1。与磁场波形和击穿电压统计结果相比,随着球隙距离的增大,测量点的合成磁场强度也随之增大。

3 电磁场仿真原理及结果对比

文中,一二次融合开关智能传感器的干扰源主要是球隙击穿产生的干扰信号。信号沿着导线向外传播。携带高频信号的导线形成天线,向四周辐

射,可能影响二次设备的正常工作。

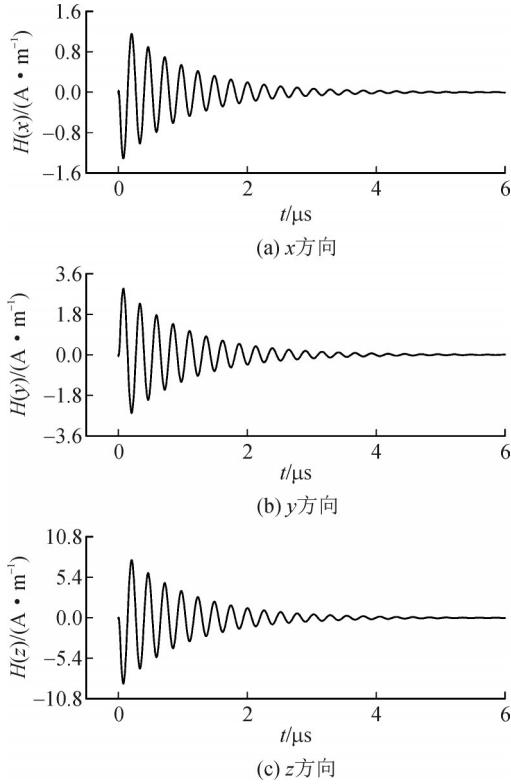


图8 三维磁场波形(1 mm 球隙)

Fig. 8 Three dimensional magnetic field waveform (1 mm sphere gap)

表1 球隙间距与击穿电压的关系

Table 1 Relationship between gap spacing and breakdown voltage

球隙间距/mm	平均击穿电压/kV	平均一次脉冲电流幅值/A
1	2.44	160.62
2	4.64	203.25
3	7.62	254.82

为验证试验的有效性和测量的准确性,文中对空间辐射磁场进行了仿真计算和验证。作为激励的干扰源主频约为1 MHz,可以认为模拟配电开关的分合闸干扰属于小尺寸的近场问题。因此,文中认为配电开关空间测点的电场与电压有关,磁场与电流有关。基于以上分析,采用时域计算方法进行计算。

3.1 时域有限积分法

直接采用时域法,可以一次获得时域响应,大大提高了计算效率。有限积分时域法(FITD)中对于各向同性线性介质,磁场强度 H 与磁通量 B 的关系见式(1)^[28]

$$B = \mu H \quad (1)$$

式(1)中, μ 是介质的磁导率。

在电磁仿真中,网格平面的磁通量 B 分布在主

网格上,而磁场强度 H 则定义在子网格上,子网格的每个顶点都定义在主网格的范围内

$$\hat{h} = \int_{\hat{l}_i} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

式(2)中: $\hat{h}$ 是定义的磁压; $\hat{l}_i$ 是网格的边缘; l 是积分环路。

因此,式(2)的积分表达式可以转化为网格式(3)

$$\sum_k \tilde{C}_{ik} \hat{h}_k = \frac{d}{dt} \hat{d} + \hat{j} \quad (3)$$

式(3)中: $\tilde{C}_{ik}$ 是子网对应的旋量算子; $\hat{h}_k$ 是对应网的磁压; $\hat{d}$ 是电通量; $\hat{j}$ 是电流算子。

3.2 辐射磁场的仿真计算

利用电磁场仿真软件对一二次融合配电开关建立电磁模型。激励信号依照试验中智能传感器二次侧采集电流,端口分别设在B相进出口。仿真过程中,依照试验环境对各参数进行设置。在B相传感器附件按照实际探头位置设置场监视器。1 mm 球隙间距击穿瞬态电流下三维磁场计算结果见图9。

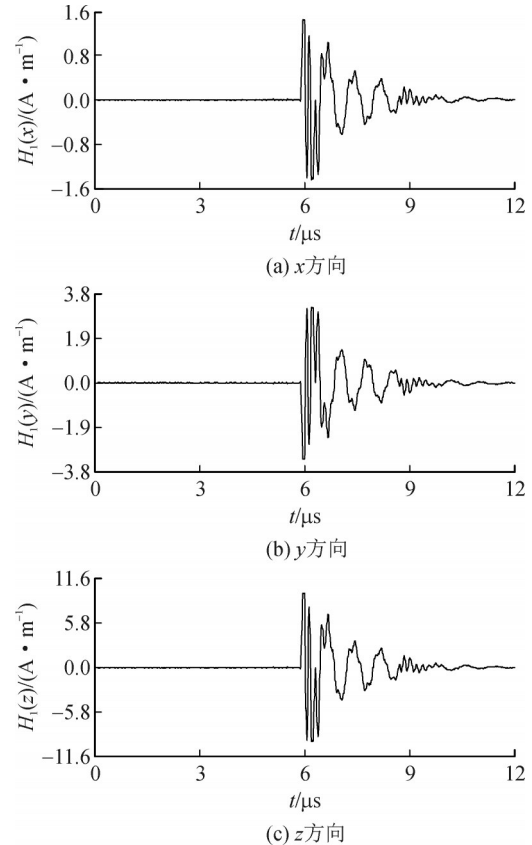


图9 仿真B相传感器侧三维磁场波形(1 mm)

Fig. 9 Simulation of three dimensional magnetic field waveform of B-phase sensor side (1 mm)

从图9可以看出,各方向磁场信号在幅值和频率上较实测数据拟合度较高。智能传感器侧测量的 y 和 z 方向上的磁场强度相对较大,这是由电流互感器附近的出线端子平行于计算空间 x 轴引起的。

可以认为 y 和 z 是测点的主极化方向。

利用式(1)对测点的三维磁场进行合成^[29]

$$H_{\text{Abs}} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (4)$$

然后利用三维磁场合成原理对3个方向的磁场数据进行合成,即得到主极化方向的磁场强度。采用同样的方法,将测得的2、3 mm球形间隙放电电流信号导入模型进行计算,得到的磁场见图10。

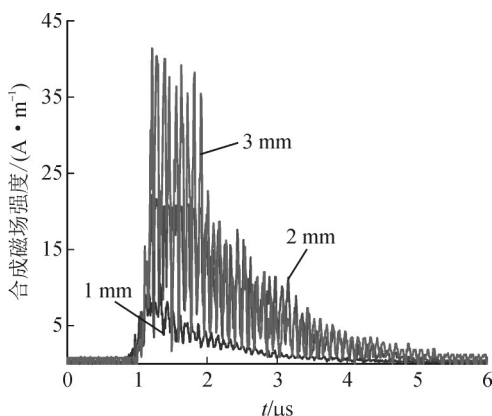


图10 合成磁场强度

Fig. 10 Synthetic magnetic field strength

对图10中的合成磁场波形进行三维时频分析,得到的功率谱密度(PSD)图见图11。

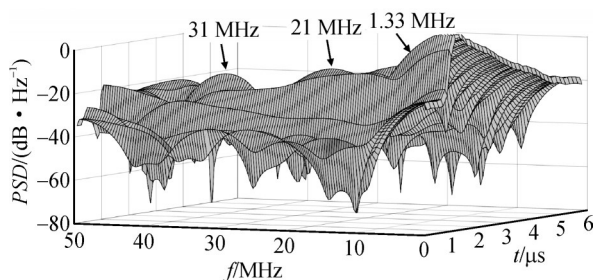


图11 三维磁场强度功率谱

Fig. 11 Power spectrum of simulated magnetic field intensity

根据图11中峰值波头的标度定位,特征频率约为1.33、21、31 MHz等,特征频率下能量较高。高频分量衰减快,持续时间短,特征频率下的PSD值较小,能量较弱。

4 辐射磁场对智能单元的影响分析

球隙击穿时暂态电流信号产生的空间辐射磁场必然对智能传感器合并单元产生影响,但是否会影响传感器正常工作,甚至毁坏器件,仅依靠空间磁场强度是难以衡量的^[30]。文中进一步对被试一二次融合开关在工程应用中使用的智能组件部分进行了研究分析。

4.1 配电终端(FTU)屏蔽效能分析

屏蔽效能指金属导体对入射干扰信号存在折

反射现象,最终降低金属导体所保护部分接受到的干扰分量。定义磁场屏蔽效能 SE_H 表达式为^[31]

$$SE_H = 20 \lg(H_1/H_2) \quad (5)$$

式(5)中: H_1 为未加屏蔽前的磁场强度; H_2 为屏蔽后的磁场强度。

目前工程中的智能单元普遍安装于FTU内部,依照现场安装标准,FTU通常随柱上开关安装,距开关净空距离不小于2 m^[32],文中研究使用开关与FTU的安装距离按照实际应用电缆长度分为1、3、6、9 m 4种,考虑到实际杆塔高度和干扰最恶劣情况,选择在柱上开关下方1 m处对FTU进行实体建模。箱体大小为50 cm×30 cm×20 cm,厚度为2~4 mm。具体布置结构见图12。

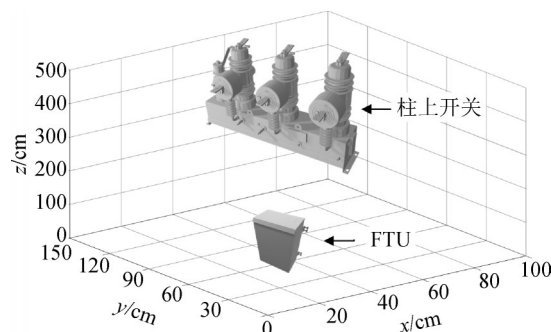


图12 含FTU的配电开关仿真模型

Fig. 12 Simulation model of distribution switch with FTU

计算屏蔽效能的测量点位于FTU对应位置的几何中心,相当于实物中传感器合并单元板卡所在位置。计算时设置频率为10 Hz~100 MHz,以1 mm球隙击穿电流为激励,得到其屏蔽效能见图13。

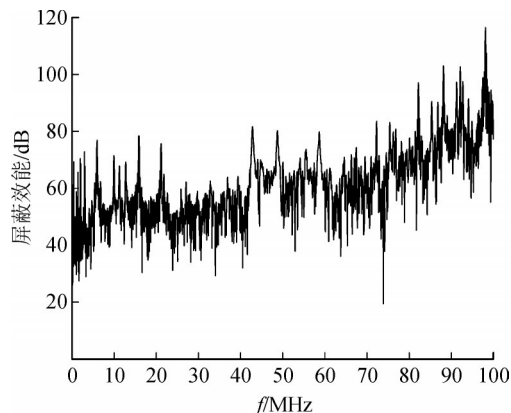


图13 FTU壳体屏蔽效能

Fig. 13 Shielding effectiveness of FTU shell

根据图13结果,以60 dB以上为屏蔽效能优良区间,一二次融合配电开关对于频率为78~100 MHz的辐射信号磁场屏蔽效能较好,最高可达118.5 dB,对于78 MHz以下的信号屏蔽效能波动较大。根据图11的频谱分析结果,干扰信号能量主要分布于1~30 MHz左右,现有工程设备使用的屏蔽体对于球隙

干扰信号防护效果不能达到较理想状态。

4.2 合并单元差模干扰计算

通用的智能传感器结构包括一次转换、二次转换、合并单元3部分。其中,合并单元位于FTU箱体内部,承担互感器信号采集、处理等功能,是智能传感器的中枢结构,然而在实际应用中,合并单元因电磁干扰导致的故障占据了较大比重。合并单元局部模型见图14。实际工程中应用的合并单元多为FPGA^[33-35]核心处理器,见图14中的白框,其模拟、数字信号走线较为复杂。辐射信号通过箱体孔缝进入,对合并单元的信号采集可能产生影响。文中选取某主流一二次融合开关产品的合并单元板卡进行三维建模,芯片驱动电源由供电模块提供3.3 V,见图14中白粗线。

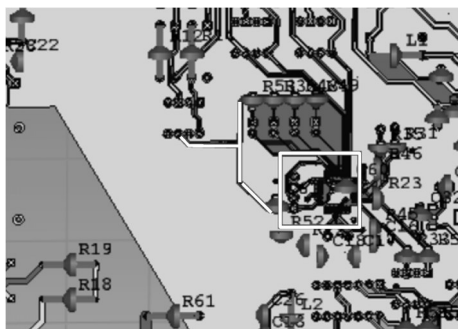


图14 合并单元局部模型

Fig. 14 Local model of merging unit

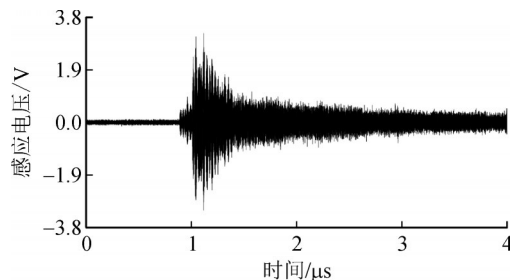
将合并单元模型匹配到FTU壳体内和柱上开关进行系统级电磁干扰仿真。对合并单元电源网格采用离散端口供给工作电压。计算其在不同球隙间距电流信号下的受扰情况,采集频段为10 Hz~100 MHz。不同球隙间距下3.3 V端口电压波形见图15,感应电压峰值分别可达3.26、6.14、7.62 V。查阅配电开关常用芯片手册和相关标准,芯片3.3 V电源线最大额定电压在5~7.5 V之间^[36]。根据前文模拟骚扰试验平台进行智能传感器强电磁干扰考核时,持续时间内包括数十个脉冲,若受到负载影响,电弧可能持续燃烧无法熄灭,在这样直接耦合电磁骚扰作用下,很可能造成量测误差或者损坏芯片。

不同球隙下3.3 V电源线感应出的电压频率呈现出多个特征频点,强度与球隙间距大小呈正相关,见图16。

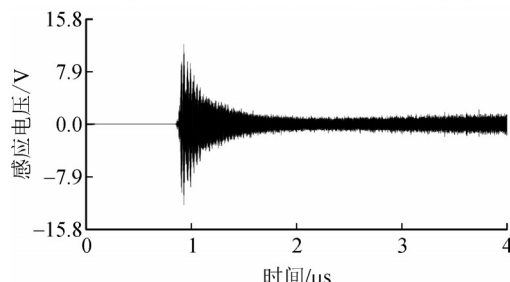
对干扰信号进行频域分解,不同间隙下频带分布大致相同,特征频率在5、10、43、16.8、80 MHz左右。相较于脉冲电流的功率谱密度分布,其高频分类更为丰富。

5 结论

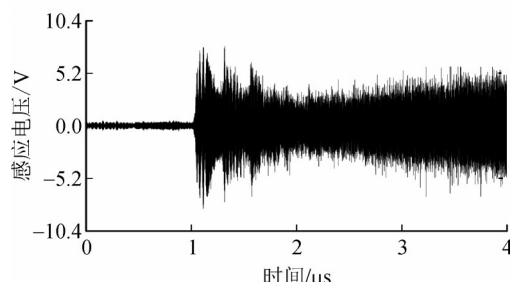
文中对一二次融合配电开关智能传感器辐射



(a) 1 mm球隙间距下3.3 V端口电压波形



(b) 2 mm球隙间距下3.3 V端口电压波形



(c) 3 mm球隙间距下3.3 V端口电压波形

图15 3.3 V电源线感应电压波形

Fig. 15 Induced voltage of 3.3 V power line

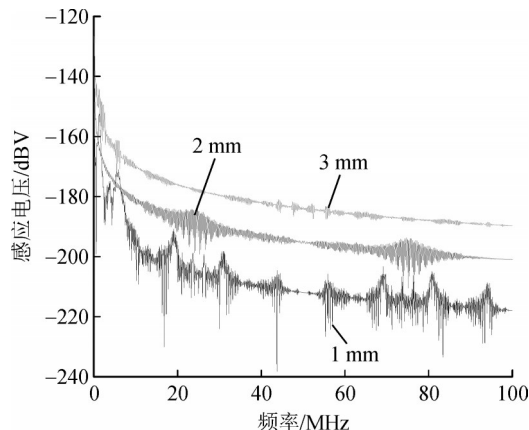


图16 3.3 V电源线感应电压频域分布

Fig. 16 Frequency domain distribution of induction voltage in 3.3 V power line

磁场干扰进行了研究,通过试验和仿真对空间磁场进行了测量验证,并针对实际电子式电流互感器智能组件进行了屏蔽效能和耦合干扰计算和分析。主要结论如下:

1)利用球隙电弧模拟电磁骚扰试验对一二次融合开关中电子互感器抗强电磁骚扰能力考核是可行、有效的。

2)模拟电磁骚扰试验方法可模拟配网系统中的弧光短路故障,与现场实际工况等效一致。在强电磁骚扰作用下,智能传感器附近的磁场强度超出现有标准范围,最大磁场强度可达50 A/m。频率方面,1 MHz以上高频分量较为丰富。

3)针对智能传感器合并单元的防护体进行屏蔽效能分析,发现其屏蔽作用具有局限性,78 MHz以下屏蔽效能相对较弱;空间辐射磁场在合并单元电源线上产生差模电压最高可达7.62 V,该干扰极有可能导致智能传感器产生测量误差,长期作用可能损坏芯片。

参考文献:

- [1] 席禹,陈波,朱昌勇,等.智能柱上开关一二次融合关键技术[J].中国科技信息,2019(18):92-94.
XI Yu, CHEN Bo, ZHU Changyong, et al. Key technologies of primary and secondary integration of intelligent pole switch[J]. China Science and Technology Information, 2019(18):92-94.
- [2] 辛明勇,徐长宝,田兵,等.基于阵列式磁传感器的电力设备接地网定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(8):95-101.
XIN Mingyong, XU Changbao, TIAN Bing, et al. Power equipment grounding grid location method based on array magnetic sensor[J]. Smart Power, 2022, 50(8):95-101.
- [3] 李澍森,孙志英.12 kV配电柱上开关一二次融合关键技术之交流电压传感器[J].高电压技术,2019,45(9):2818-2826.
LI Shusen, SUN Zhiying. Key technology of primary and secondary fusion of AC voltage sensor on overhead pole mounted switch in 12 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9):2818-2826.
- [4] 雷杨,杨帆,沈煜,等.基于一二次深度融合的多智能体FTU研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(9):152-162.
LEI Yang, YANG Fan, SHEN Yu, et al. A multi-agent FTU based on deep-merging of primary and secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9):152-162.
- [5] 童悦,张勤,叶国雄,等.智能传感器电磁兼容性能分析[J].高电压技术,2013,39(11):2829-2835.
TONG Yue, ZHANG Qin, YE Guoxiong, et al. Electromagnetic compatibility performance analysis of electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11):2829-2835.
- [6] 李振华,于洁,李振兴,等.智能传感器电磁兼容性能研究现状分析[J].高压电器,2017,53(4):220-226.
LI Zhenhua, YU Jie, LI Zhenxing, et al. Analysis on research status of electromagnetic compatibility of electronic transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4):220-226.
- [7] 牛博,刘健,申巍,等.配网柱上开关容性关合过程中电磁辐射干扰测试与仿真[J].高压电器,2020,56(8):11-16.
NIU Bo, LIU Jian, SHEN Wei, et al. Test and simulation of electromagnetic radiation interference during capacitive closing process of pole-mounted switch in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):11-16.
- [8] 赵军,陈维江,边凯,等.特高压GIL管廊短路故障条件空间磁场分布特性[J].高电压技术,2021,47(5):1866-1871.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, BIAN Kai, et al. Spatial magnetic field distribution characteristics of UHV Gil pipe gallery under short circuit fault condition[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1866-1871.
- [9] 孙义,刘景晖,郑昕雷,等.特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压的影响[J].电力工程技术,2022,41(5):240-245.
SUN Yi, LIU Jinghui, ZHENG Xinlei, et al. Influence of UHV GIL access on transient recovery voltage of circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):240-245.
- [10] 周倩,甄建辉,甘兴林,等.高频传导干扰对配电网智能柱上开关保护的影响仿真研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):164-170.
ZHOU Qian, ZHEN Jianhui, GAN Xinglin, et al. Simulation study on effect of high frequency conducted interference on intelligent switch protection on column of distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):164-170.
- [11] BURGER D, TENBOHLEN S, KÖHLER W, et al. Impact of multiple restrikes at vacuum circuit breakers on the EMC of medium voltage switchgear[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. Rome, Italy: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] LIU Yiyong, REN Wenzhu, FENG Jianqiang, et al. Research on electromagnetic compatibility test port model of smart high voltage equipment[C]//2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM). Shanghai, China: IEEE, 2012: 381-383.
- [13] WU Hengtian, JIAO Chongqing, CUI Xiang, et al. Transient electromagnetic disturbance induced on the ports of intelligent component of electronic instrument transformer due to switching operations in 500 kV GIS substations[J].

- IEEE Access, 2017(5):5104-5112.
- [14] CHENG Lin, YU Huaxing, LIU Zirui, et al. Study on electromagnetic interference of electronic transformer under operation of 330 kV GIS disconnecter[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-4.
- [15] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 柱上开关开断对二次智能设备的电磁干扰研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 27-37.
LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. The EMI study of pole-mounted switch's breaking on its secondary smart devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 27-37.
- [16] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 10 kV 开关柜开断对二次智能设备的电磁干扰[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 110-117.
LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Electromagnetic interference on secondary smart devices caused by breaking 10 kV switch cabinet[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 110-117.
- [17] 贺翔, 赵海洋, 程显, 等. 雷电冲击电压对配电一二次融合成套设备测量准确度的影响[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 214-219.
HE Xiang, ZHAO Haiyang, CHENG Xian, et al. Impact of lightning impulse voltage on measuring accuracy of primary and secondary integration-set of distribution equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 214-219.
- [18] 范闻博, 吴燕, 赵轶民, 等. 一种适用于配电开关辐射场仿真分析方法[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 11-16.
FAN Wenbo, WU Yan, ZHAO Yimin, et al. Simulation method for calculating radiation field of distribution circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 11-16.
- [19] 肖智宏. 电子式互感器原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
XIAO Zhihong. Principle and practical technology of electronic transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [20] 李光竹, 詹坤, 高广德, 等. 基于 PWM 自适应稳压电流互感器的取电电源设计方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 57-63.
LI Guangzhu, ZHAN Kun, GAO Guangde, et al. Design method of draw-out power supply based on PWM adaptive voltage-stabilized current transformer[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 57-63.
- [21] 王振华, 牟涛, 周东杰, 等. 基于电子式互感器的分布式行波测距装置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 139-144.
WANG Zhenhua, MU Tao, ZHOU Dongjie, et al. Distributed traveling wave ranging device based on electronic transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 139-144.
- [22] 童涛, 徐碧川, 袁思凡, 等. 一起电容式电压互感器二次电压异常事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 98-104.
TONG Tao, XU Bichuan, YUAN Sifan, et al. A CVT secondary voltage abnormal accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 98-104.
- [23] 王强, 达建朴, 刘民慧, 等. 特高压直流互感器大挠度绝缘子弹性支撑设计及研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 197-204.
WANG Qiang, DA Jianpu, LIU Minhui, et al. Design and research on flexible support for large deflection insulator of UHV DC transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 197-204.
- [24] 郭贤珊, 张民, 陈争光, 等. 基于故障树分析法的全光纤电流互感器可靠性研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 201-210.
GUO Xianshan, ZHANG Min, CHEN Zhengguang, et al. Reliability research of fiber optical current transformer based on fault tree analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 201-210.
- [25] 陈艳, 范娟, 王欢. 发电机出口侧电压互感器绝缘性能在线监测方法[J]. 变压器, 2022, 59(8): 64-68.
CHEN Yan, FAN Juan, WANG Huan. On-line monitoring method of PT insulation performance at generator outlet side[J]. Transformer, 2022, 59(8): 64-68.
- [26] 赵铁羽. 通过等效电路转换法分析电压互感器介质损耗测量误差[J]. 变压器, 2022, 59(8): 69-71.
ZHAO Tieyu. Analysis of measurement error of dielectric loss of voltage transformer by equivalent circuit conversion method[J]. Transformer, 2022, 59(8): 69-71.
- [27] 成林, 张鸿业, 伊同强, 等. 基于 3D 电场时频分析的隔离开关绝缘缺陷检测方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1417-1423.
CHENG Lin, ZHANG Hongye, YI Tongqiang, et al. Insulation defect detection method for disconnecting switches based on time-frequency analysis of 3D electric fields[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1417-1423.
- [28] AZPÚRUA M A, POUS M, SILVA F. Decomposition of electromagnetic interferences in the time-domain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(2): 385-392.
- [29] 陈维江, 李志兵, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 38-47.

- CHEN Weijiang, LI Zhibing, SUN Gang, et al. Experimental research on the characteristics of very fast transient over-voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 38-47.
- [30] MINGOTTI A L P, TINARELLI R. Effects of multiple influence quantities on Rogowski-coil-type current transformers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4827-4834.
- [31] 李婵娥, 余占清, 曾 嵘, 等. 冲击电场作用下屏蔽体屏蔽效能实验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2849-2854.
- LI Chanxiao, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Experimental research of shielding effectiveness against impulse electric field for shielding enclosure[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2849-2854.
- [32] 配电自动化智能终端技术规范: GB/T 35732—2017[S]. 2017.
- Technical specification for intelligent remote terminal unit of distribution automation: GB/T 35732—2017[S]. 2017.
- [33] LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. EM measurements between MV switching sources and colocated sensitive circuit[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(3): 513-521.
- [34] POUS M, AZPÚRUA M A, SILVA F. Measurement and evaluation techniques to estimate the degradation produced by the radiated transients interference to the GSM system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6): 1382-1390.
- [35] 赵 军, 陈维江, 高 飞, 等. 变压器雷电冲击试验空间磁场对智能组件影响的计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3981-3990.
- ZHAO Jun, CHEN Weijiang, GAO Fei, et al. Calculation and analysis of the impact of lightning impulse test space magnetic field on intelligent components in transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3981-3990.
- [36] Telecontrol equipment and systems - Part 2: Operating conditions - Section 1. Power supply and electromagnetic compatibility: IEC 60870-2-1: 1995[S]. 1995.
- 路文超(1995—), 男, 博士, 主要研究方向为电力设备电磁兼容(通信作者)(E-mail: 13369250535@163.com)。
- 段建东(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统优化调度、新能源发电及并网技术。
- 成 林(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压技术、智能传感器等。
- 郭琳云(1973—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网继电保护等。
- 李再男(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统直流继电保护、电磁兼容技术。

(上接第7页)

- Simulation and experimental of matching characteristics of vacuum circuit breakers with double-break[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 57-65.
- [22] 廖敏夫, 卢 刚, 葛国伟, 等. 不同灭弧室串联的双断口真空断路器分压特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 112-118.
- LIAO Minfu, LU Gang, GE Guowei, et al. Research on voltage distribution characteristics of double-break vacuum circuit breakers with different interrupters in series[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 112-118.
- [23] 蒋 原, 李 擎, 夏丽娜, 等. 中频条件下真空灭弧室的纵向磁场仿真[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2424-2432.
- JIANG Yuan, LI Qing, XIA Lina, et al. Simulation of axial magnetic field in vacuum arc interrupters at intermediate frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2424-2432.
- [24] 董华军, 温超阳, 孙 鹏, 等. 基于正交实验新型真空灭弧室触头磁场仿真与参数优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5598-5606.
- DONG Huajun, WEN Chaoyang, SUN Peng, et al. Simulation and optimization of the contact magnetic field of a new type of vacuum interrupter based on orthogonal experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5598-5606.
- [25] 耿英三, 陈榆秀, 孙 超, 等. 40.5 kV 投切电容器组用双断口真空断路器的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 24-28.
- GENG Yingsan, CHEN Yuxiu, SUN Chao, et al. Research on 40.5 kV two-break vacuum circuit breaker for switching capacitor banks[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 24-28.
- [26] LIAO Minfu, GE Guowei, DUAN Xiongying, et al. Influence of the AMF arc control on voltage distribution of double-break VCBs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 2455-2461.
- [27] 贾申利, 史宗谦, 王立军. 真空断路器用于直流开断研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 12-16.
- JIA Shenli, SHI Zongqian, WANG Lijun. Review on the research of vacuum circuit breaker for DC breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 12-16.
- 郑 伟(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备运行分析、电工材料研发与应用研究(E-mail: 24140806@qq.com)。
- 孙 英(1984—), 女, 工程师, 主要从事电工材料研发及电气设备检测研究。
- 廖敏夫(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究(E-mail: LMF@dlut.edu.cn)。