

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.09.010

基于时域有限积分法的一二次融合配电开关雷击磁场分析

张志华^{1,2}, 路文超², 李再男², 段建东²

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710110; 2. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710048)

摘要: 一二次融合配电开关屡次出现因各种电磁干扰导致的二次回路信号误差,甚至开关误动或拒动的现象,而目前仅考虑了设备正常运行状态下电磁干扰。文中首先阐述一二次融合配电开关的电磁干扰机理,选择时域有限积分法进行开关电磁场分析;搭建大电流暂态发生装置模拟配电网雷电冲击下的电磁干扰,获取稳定的干扰信号;这些干扰信号用于电磁仿真软件CST MWS建模,分析某型号10 kV户外配电开关在电磁干扰下柱上开关和二次回路周围的磁场分布。仿真结果表明,在所提出的冲击干扰下,配电开关互感器侧瞬时磁场强度可达1 300 A/m,FTU附近的瞬时磁场强度可达108.5 A/m,远超相关行业标准的规定值,在实际中极有可能造成二次设备出现故障。

关键词: 一二次融合配电开关;电磁干扰;直击雷;时域有限积分法

Magnetic Field Analysis of Lightning Strikes for Primary and Secondary Fusion Distribution Switch Based on FITD

ZHANG Zhihua^{1,2}, LU Wenchao², LI Zainan², DUAN Jiandong²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710110, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The primary and secondary fusion distribution switch has repeatedly appeared secondary circuit signal error due to various types of electromagnetic interference and even the situation of mal-operation or refusal operation. At present, the electromagnetic interference under the normal operating condition is only considered. The electromagnetic interference mechanism of primary and secondary fusion distribution switch is firstly described in this paper. The finite integration time domain (FITD) is used for the analysis of electromagnetic field of the switch. A large current transient generating device is set up to simulate the electromagnetic interference of the distribution network at lightning impulse and obtain stable interference signal. These interference signals are used for the modeling of electromagnetic simulation software CST MWS, and the magnetic field distribution around the pole switch and the secondary circuit of certain type of 10 kV outdoor distribution switch under electromagnetic interference is analyzed. The simulation results show that under the proposed impulse interference, the transient magnetic field strength at the instrument transformer side of distribution switch can reach 1 300 A/m and that near the FTU can reach 108.5 A/m, which is far beyond the specified value of the relevant industry standards and, in practice, likely causes the fault of the secondary equipment.

Key words: primary and secondary fusion distribution switch; EMI; direct lightning; finite integration time domain (FITD)

收稿日期:2021-03-03; 修回日期:2021-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51877174);国网陕西省电力公司科技项目(5226KY16000M)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51877174), State Grid Shaanxi Electric Power Company Science and Technology Project(5226KY16000M).

0 引言

在国家智能电网建设推进的过程中,一次设备与二次设备之间已经没有了明显的界限,传统的一次开关设备与电子式互感器等二次设备封装在一起,融合成了更加集成化、标准化的智能单元,不仅具备传统功能,而且采样线性度更好,范围更大,节约空间,还具备电量记录等功能^[1-8]。

目前,随着一二次融合智能配电开关的大范围推广使用,以及一二次融合程度的进一步加深,电磁干扰的问题逐渐凸显^[9-10]。然而有关一二次融合开关的电磁干扰标准尚未出台,二次侧的抗干扰特性无法通过相关指标进行确定,也未有相应的测试方法^[11]。因此,为了更好地确保一二次融合智能配电开关的运行,防止因为电磁干扰影响二次设备的正常使用,有必要对一二次融合智能开关的电磁干扰特性展开研究。

近年来,一些学者对一二次融合智能配电开关电磁干扰的测试方法开始探索,但大多都还局限于正常工作情况下的电磁场分析;或者是对智能开关设备中的单个器件进行独立的研究,一般仍采取针对传统配电开关使用的研究方法,其结果难以反映实际运行时的复杂环境。据调查统计,一二次融合智能配电开关应用以来,在多个变电站出现了由于电磁干扰导致的电子式互感器故障^[12]。文[13]研究认为开关设备开断燃弧时对二次设备的电磁干扰十分严重。为此,陕西省电科院有关研究人员提出了隔离开关模拟骚扰源的电子式互感器抗扰度试验^[14],证明在该试验中电子式互感器受到了强烈干扰。文[15-16]分别对柱上开关和开关柜开断燃弧时电流互感器输出信号,FTU 控制器输入和输出电流信号进行时频分析,得到了干扰的主要分布特征。文[17]对一二次融合配电开关合闸涌流时产生的辐射磁场进行了实际测量,提出了一种较为精准的辐射磁场测量方法。雷电冲击是配电网发生故障的主要原因之一,然而目前有关雷电直击配电线路,对一二次配电开关产生电磁干扰的研究仍存在空缺。因此,针对一二次融合开关在雷击时的干扰信号所引发的磁场干扰进行研究是很有必要的。

文中首先对一二次融合智能配电开关的干扰机理进行了分析,给出时域有限积分法(finite integration time domain, FITD)分析其电磁干扰。搭建了模拟干扰实验平台,获取较为典型的一二次融合智能开关在雷电冲击下的干扰信号。借助电磁仿真软件 CST MWS,对一二次融合智能开关进行了

干扰信号下的磁场分析。

1 一二次融合配电开关中的干扰机理

1.1 一二次融合配电开关

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,电流互感器及电压互感器与柱上开关被融合在一起,测量装置通过联络线就近装置。研究所用智能柱上开关为户外高压真空断路器,带有分相式互感器及二次终端控制箱。被试开关所配互感器为 LCPT 型电子式电流互感器和电容分压型电子式电压互感器组合,电流互感器并联安装在开关出线端。

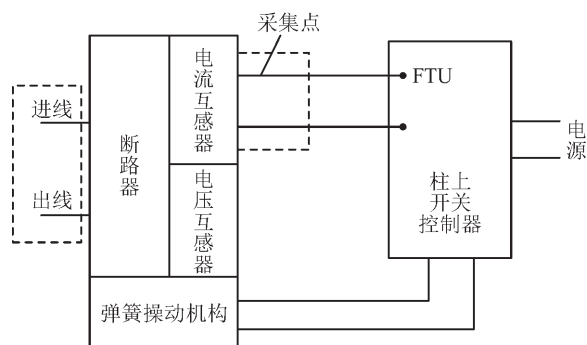


图1 一二次融合配电开关结构示意图

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

1.2 干扰机理分析

在进行电磁干扰问题的分析时,首先应明确分析三要素,即:敏感源(受干扰设备)、耦合路径以及干扰源^[18-20]。在一二次融合智能配电开关中,敏感源主要指二次回路相关设备;耦合路径可以认为是通过空间辐射进入;而配电网中的干扰主要可能来自开关分合、雷电冲击、线路故障等多个方面。在本文研究中,干扰源主要是配电开关在遭受雷电直击时产生的雷电流信号,该信号沿导体向外传播,传播的高频信号以导体形成天线向周围发出辐射干扰,这可能会影响电子式二次设备的正常工作^[21-25]。

根据观测点与激励的波长大小之比,可以将电磁干扰问题所分析的场域划分为近场区, Fresnel 区和远场区,当观测点距离小于激励源波长时,则认为所分析问题是近场的。已有研究表明,配电开关在雷电冲击下的干扰信号一般为微秒级,因此一二次融合配电开关的电磁干扰属于近场问题。

2 开关电磁场分析的时域有限积分法

电磁学的数值计算方法分为时域方法(time domain, TD)和频域方法(frequency domain, FD)两大

类。时域方法对麦克斯韦方程按时间步进后,求解有关场量,具有可靠的精度,更快的计算速度,并能够真实地反应电磁现象的本质。频域方法是基于时谐微分、积分方程,通过对 N 个均匀频率采样值的傅里叶逆变换得到所需的脉冲响应,使用这种方法,每次计算只能求得一个频率点上的响应。当要获取复杂结构时域超宽带响应时,如果采用频域方法,则需要在很大带宽内的不同频率点上的进行多次计算,然后利用傅里叶变换来获得时域响应数据,计算量较大;如果直接采用时域方法,则可以一次性获得时域超宽带响应数据,大大提高计算效率。

电磁场理论计算的核心公式为麦克斯韦方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho_f \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

时域有限积分法(FITD)对麦克斯韦方程组的积分形式进行离散化,而不是其差分形式

$$\begin{cases} \oint_{\partial A} E ds = -\int_A \frac{\partial B}{\partial t} dA \\ \oint_{\partial A} H ds = -\int_A \left(\frac{\partial D}{\partial t} + J \right) dA \\ \oint_{\partial V} D dA = \int_V \rho dV \\ \oint_{\partial V} B dA = 0 \end{cases} \quad (2)$$

为得到该方程的数值解,时域有限积分法会定义一个有限的计算域,将需要求解的对象封闭在计算域之中,再创建一个合适的网格分割策略去将该计算域划分成许多小的网格单元。以正交六面体网格系统为例,主网格的剖分视图在软件中是可视觉化的,但是亚网格的设置是不可见的,它们被设置为与主网格正交,时域有限积分法所使用的积分形式麦克斯韦方程组的空间离散化工作正是在这两组相互正交的网格上进行的。引入亚网格的做法使得场域的剖分更加智能。

在电磁场仿真中,网格的电压 e 和平面磁通量 b 在主网格上进行分配,而电通量 d 和磁场强度 h 则被定义在亚网格上。如图2所示,在每个网格的平面上重复图中的运算步骤并将所有的计算过程以矩阵的形式表示,再引入拓扑矩阵 C 作为主网格上的空间离散化的旋量算子。得到了计算拓扑矩阵后便可以由计算机开始解决空间电磁场问题。

图2中: C 为旋量算子; e_k 、 e_j 、 e_i 、 e_l 分别为对应网格上棱角的电压; b 为对应平面磁通量; d 为电通量; h 为磁场强度。

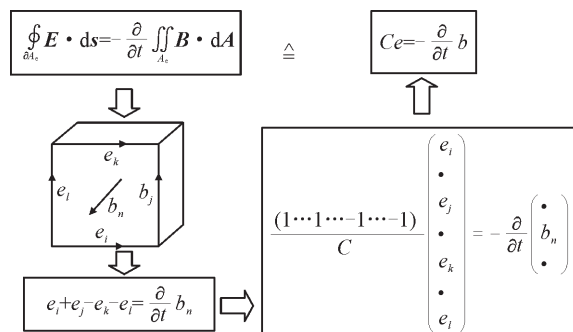


图2 同一平面内电压与磁通量的关系及运算

Fig. 2 Relationship between voltage and magnetic flux in the same plane

根据对一二次融合配电开关干扰机理的分析,已经认定雷击配电开关产生干扰属于电小尺寸的近场问题,那么可以认为对配电开关的测量点处电场与电压有关,磁场与电流有关;同时,由于一二次融合智能开关内部设备高度集成,零件繁多,结构配合复杂,决定了其所使用的分析算法应在保证计算准确度的前提下,还可以针对不同部件的细节特征进行精细化网格处理。综合以上分析,文中利用时域有限积分法对所研究问题进行电磁场仿真分析。

3 干扰信号研究

虽然在实际应用中,配电网发生雷电直击的概率并不大,但是其耐受直击雷的能力却很差,据不完全统计,大自然中的雷电流幅值最高可达150 kA^[26]。一旦发生雷电击中相导线事故,极易造成开关出现故障,而配电网遭受直击雷冲击时,其流过避雷器的电流、线路上的电流都会随着雷电流幅值的增大而增大,尤其是流过配电开关时,对于二次回路的影响是难以评估的。因此采用一种脉冲电流发生装置,用来模拟雷电绕过避雷线直击到配电开关附近线路导体上产生雷电流的方法,有助于针对性地分析信号特性。试验示意图及回路原理见图3、4。

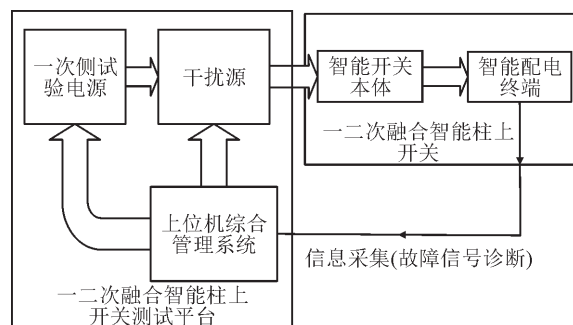


图3 模拟雷电冲击试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of simulated lightning impulse test

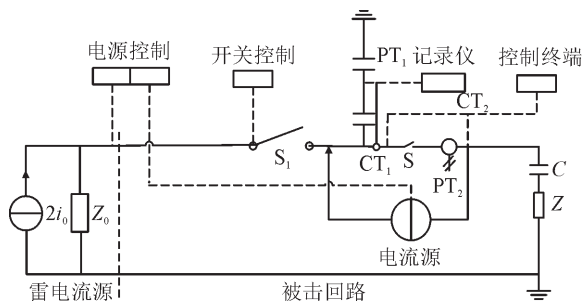


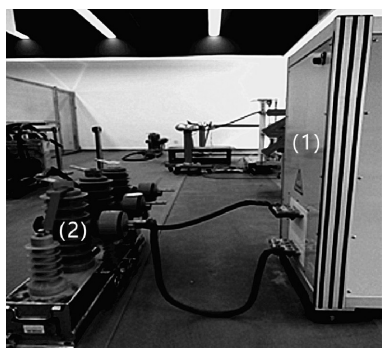
图4 模拟雷电冲击试验回路原理图

Fig. 4 Circuit schematic diagram of simulated lightning impulse test

图4中: S_1 为真空断路器; S 为被试开关; C 为负载侧等效电容; Z 为 $20\ \Omega$ 的负载; CT_1/PT_1 为高频测量装置; CT_2/PT_2 为被试开关互感器。模拟雷电流干扰源一次设备主要包括雷电流源(Z_0 为雷电通道波阻抗,根据雷电通道波阻抗 Z_0 与雷电流幅值的关系,为 $2\ 500\ \Omega$)^[26]。二次回路包括电源控制台、开关控制信号、高频信号记录仪和被试开关二次控制终端,开关两侧未加装避雷器。

用于模拟雷电冲击试验的电源为SKS-40kVA/8000A冲击大电流发生器,额定输出电流8000 A可调。试验所用一二次融合配电开关柱上部分为ZW32E-12型户外高压真空断路器,由安装在附近的控制终端对其进行就地控制,信号通过同轴电缆输送,系统中的干扰信号可能通过电磁辐射对二次控制终端产生干扰,可能会引起互感器或控制终端出现故障,影响开关的正常工作。

所搭建试验平台见图5,试验高频信号采集测量使用 CT_1/PT_1 为光纤式等电位暂态测量系统,电流信号通过罗氏线圈测量,检测信号通过光电转换、光纤传输到记录装置。



(1)—雷电流冲击发生器;(2)—被试开关。

图5 模拟雷电冲击试验平台

Fig. 5 Test platform for simulating lightning shock

中国有关雷击的规程GB/T 50064—2014中曾指出,大部分地区的雷电流幅值的概率计算应按照式(3)规定

$$P = 10^{-\frac{i}{88}} \quad (3)$$

式(3)中: P 为雷电流幅值大于 i 的概率; i 为对应雷电流幅值,kA。

根据式(3)可得到雷电流概率密度见图6,最大概率密度对应雷电流幅值约为31.4 kA,鉴于试验装置本身放电最高幅值为8 kA及实验条件的限制,为了在可控范围内最大限度进行雷电直击下“最恶劣”情况的模拟,利用试验发生装置通过一段很短的电缆直接连接配电开关进线端子,相当于雷直击位置位于开关附近相导线,冲击电流峰值选择8 kA。试验时开关内断路器处于闭合状态。对配电开关中A相进行放电冲击,所得雷电流波形见图7,还原信号可近似为幅值8 kA,2/30 μ s的雷电流脉冲波形。

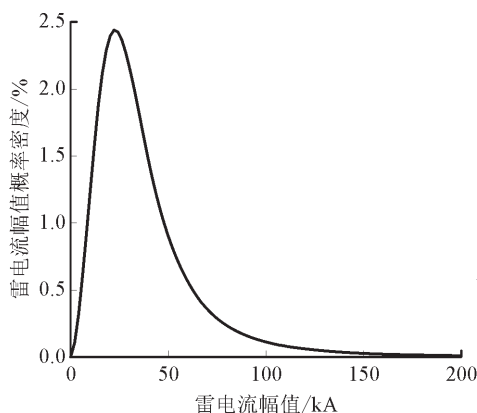


图6 雷电流幅值概率密度曲线

Fig. 6 Lightning current amplitude probability density curve

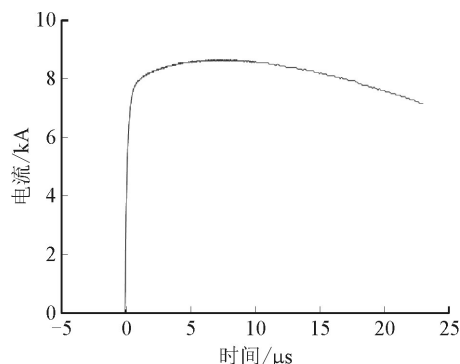


图7 模拟雷电流试验波形

Fig. 7 Test waveform of lightning current simulation

4 一二次融合配电开关磁场计算与分析

在模拟雷电流冲击干扰试验之后,得到模拟雷电流冲击下的雷电流信号波形,为了深入分析该信号对配电开关的影响,需要借助CST MWS软件仿真计算10 kV智能配电开关及其二次控制柜附件的磁场分布,该软件内部提供了FITD方法,在时域下计算

分析时,采用FITD对模型进行网格划分和计算,计算方便且收敛速度快。

4.1 模型建立

由于配电开关内部设备零件繁杂,结构复杂,首先借助建模性能优良且能与CST MWS软件衔接的solidworks软件对ZW32E-12型户外高压真空断路器进行模型建立。研究所使用的配电开关实物见图8(图中①~⑤为图9中组成部件),在CTS MWS中建立的实体模型见图9,该模型主要由:①真空灭弧室;②LCPT型电子式电流互感器;③电容分压型电子式电压互感器;④电容取电装置;⑤机械弹簧操动机构组成。在不影响仿真结果的前提下适当对模型中的部件进行了简化,保证最大程度的还原。在进线端口和出线端口分别设置了激励端口,断路器内部动静触头互相接触,使其在电磁模型中保持连通状态。

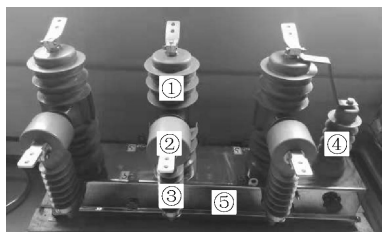


图8 ZW32E-12型配电开关

Fig. 8 ZW32E-12 distribution switch circuit breaker

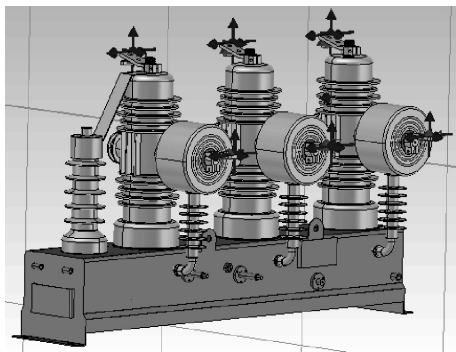
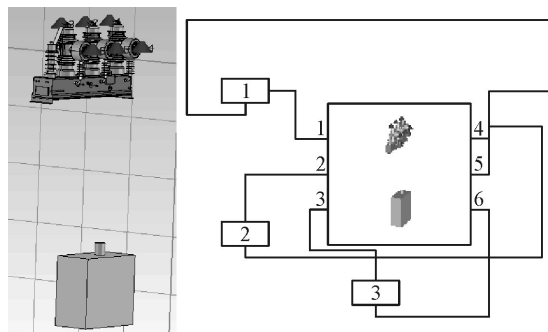


图9 ZW32E-12开关3D模型

Fig. 9 3D model of ZW32E-12 switch

在搭建好柱上断路器模型之后,为了研究其在

遭受雷电流冲击下,对于二次控制装置FTU的电磁干扰,查阅配电开关安装相关标准^[27],在柱上开关下方2 m处,用一组合体模型等效替代二次控制箱,这样能够在最大程度减少网格划分以减小计算时间,但又能够保证计算结果的精度,使得建模工作与仿真结果的可信度达到互相平衡。整体模型及封装示意图见图10。



1、2、3—配电开关上A、B、C相的入线端口;4、5、6—开关三相的出线端子;①、②、③—施加在A、B、C相的激励,可以是电压或电流信号。

图10 整体模型及封装示意图

Fig. 10 Overall model and package schematic

如图10左图所示,将柱上开关与FTU模型整体包覆于空气介质中,在CST软件的前处理操作界面DS中,可将设计的设备模型封装化。图10右图所示即为添加激励源回路设备模型封装图。

4.2 仿真计算

仿真引入激励源时,将真空断路器的3个入线端口和3个出线端作为进出端口。利用CST MWS软件可以将激励数据从外部直接完全导入的功能,可将试验所得雷电流波形(如图7所示)直接导入A相入线端口作为激励源。由于激励信号近似为 $2/30 \mu\text{s}$ 的脉冲电流,考虑到计算速度和实际干扰的带宽情况,因此将计算频率上限设置为300 kHz。在进行时域仿真时,网格的剖分方法使用正六面体,仿真前对模型各组件材料进行了准确设置。具体仿真条件见表1。

表1 计算条件的设置

Table 1 Calculation conditions settings

计算条件					网格剖分					
频率范围/kHz	边界设定	对称条件	边界材料	网格形状	最大网格/mm	最小网格/mm	X方向 网格数	Y方向 网格数	Z方向 网格数	总网格数
0~300	开放边界	无	空气	正六面体	33.17	2.07	105	152	255	3 163 338

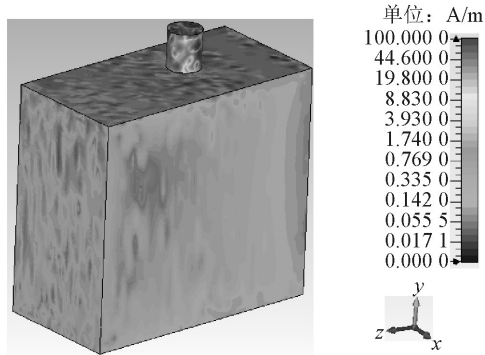
4.3 结果分析

仿真计算完成后,可查看磁场监视器和探针处的计算结果。

磁场监视器给出的暂态过程中柱上开关和FTU的磁场分布示意图见图11,三相出线端口处的磁场强度曲线见图12。



(a) 柱上开关磁场分布图



(b) FTU磁场分布图

图 11 柱上开关及FTU磁场分布图

Fig. 11 Magnetic field distribution of switch and

FTU on column

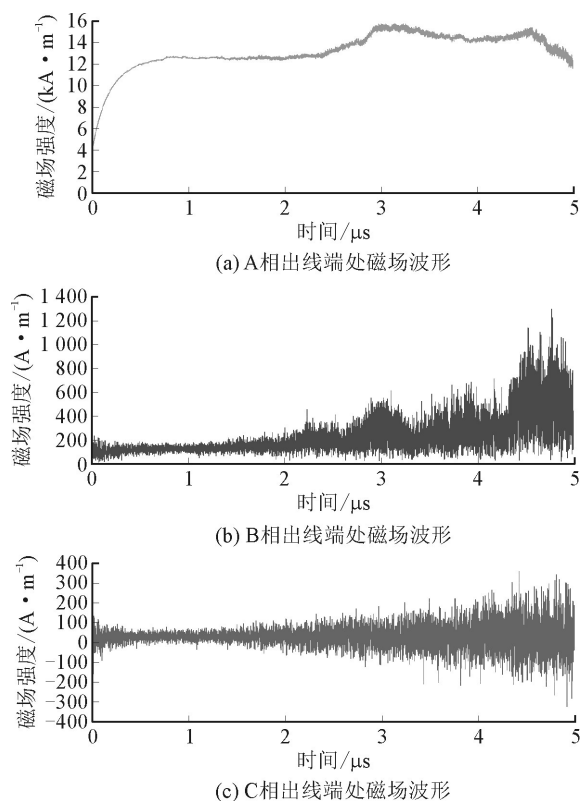


图 12 三相出线端处磁场变化波形图

Fig. 12 Magnetic field waveform at the three-phase outlet end

从图 12 中可以看出,在激励源出线端处近互感

器侧的磁场强度较大,尤其是A相遭受雷击后,B、C两相出线端口磁场变化趋势与激励源基本一致,且最大可达 1 300 A/m。关于电子式互感器的相关标准进行查阅,对电子式互感器的磁场抗扰度试验水平应为按 GB/T 20840.8—2007 磁场抗扰度标准进行试验^[27],试验水平 5 级:严酷的工业环境,试验磁场强度峰值为 1 000 A/m,以计算的结果和该标准值对比之下,该磁场强度值远远超出了该试验规定的水平。因此在额定工作状态下,安装在一二次融合配电开关出线端附件的电子式互感器可能会出现电磁兼容问题。

借助施加在 FTU 航插附近的探针,得到了模型在 FTU 附近的磁场波形以及频谱曲线分别见图 13、14。根据图 7 及图 14:首先从强度而言,当雷电流上升到 4.5 μs 以后,磁场强度最高可达 108.5 A/m,超过了 GB/T 17626.9—2011 中 3 级试验水平的规定^[28];其次,从脉冲干扰持续时间而言,2/30 μs 的脉冲电流相比于标准规定 6.4/16 μs 的脉冲电流,上升陡度大,能量高。根据图 14 可以认为在 FTU 附近干扰信号主频率在 205 kHz 左右,幅值大约在 -115 dB 左右,且中心频率较为明显。

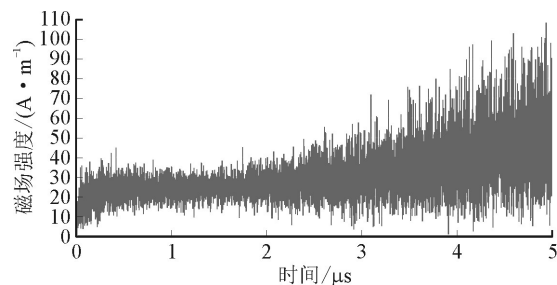


图 13 FTU 航插附近磁场变化波形

Fig. 13 Magnetic field waveform near the aviation plug of FTU

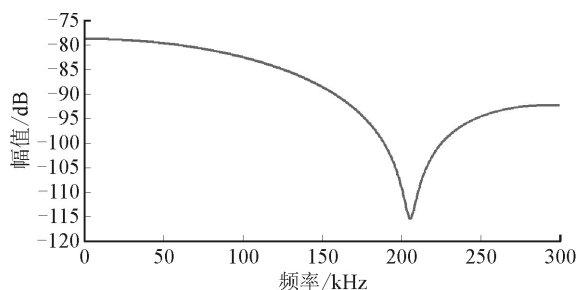


图 14 磁场波形频谱图

Fig. 14 Spectrum diagram of magnetic field waveform

5 结论

文中对一二次融合智能配电开关的电磁干扰机理进行了分析研究,利用时域有限积分法,借助雷电冲击下的典型信号对其进行磁场分析。

1)利用冲击电流发生器模拟雷击干扰的方法,通过进行试验,得到了一二次融合配电开关发生直击雷时,近似幅值为8 kA,2/30 μ s的雷电流干扰信号;

2)对ZW32E-12型户外智能配电开关及其FTU构建3D模型,进行了电磁场时域仿真,显示在对应强度的模拟雷电流干扰下,配电开关出线端处近互感器侧的磁场强度最高可达1 300 A/m,FTU处的暂态磁场强度最高可达108.5 A/m,信号主频率在205 kHz左右;

3)在雷电冲击干扰下,一二次融合配电开关所处工作环境十分恶劣,相应的电子式互感器以及FTU附近的磁场强度及干扰耐受时间超过相关标准界定,极有可能是造成工程中配电开关因为电磁干扰出现故障的重要原因。

志谢:

本文的部分实验工作得到了西安交通大学与西安兴汇电力有限公司的大力支持,在此向他们表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 李清泉,李彦明,牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术,2001,27(4):35-37.
LI Qingquan, LI Yanming, NIU Yamin. The transient electromagnetic fields caused by the operation of disconnector in substation and protection[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 35-37.
- [2] 钱远驰,周 斌,熊江咏,等. 滞留电荷对智能配电设备一二次融合的影响与对策[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):123-128.
QIAN Yuanchi, ZHOU Bin, XIONG Jiangyong, et al. Influence and countermeasures on detention charge on primary & secondary fusion of intelligent distribution equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 123-128.
- [3] 程 湘,田 昊,周 群,等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(6):48-55.
CHENG Xiang, TIAN Hao, ZHOU Qun, et al. Control strategy of intelligent commutation switch considering phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 48-55.
- [4] 胡列翔,王 蕾,郑伟民,等. 基于网架结构综合分析的开关布点优化规划[J]. 电网与清洁能源,2019,35(1):28-35.
HU Liexiang, WANG Lei, ZHENG Weimin, et al. Optimal planning of switch points based on comprehensive analysis of grid structure[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 28-35.
- [5] 熊江咏,杨桂平,郭 毅,等. ECT与EVT在智能配电设备一二次融合中相融性分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):108-114.
XIONG Jiangyong, YANG Guiping, GUO Yi, et al. Compatibility analysis of ECT and EVT in primary & secondary fusion of intelligent power distribution equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 108-114.
- [6] 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 overvoltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.
- [7] 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 overvoltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 38-47.
- [8] 赵 军,陈维江,张建功,等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术,2015,41(5):1687-1695.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [9] HEYDARI H, ABBASI V, FAGHIHI F. Impact of switching-Induced electromagnetic interference on low-voltage cables in substations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(4): 937-944.
- [10] BURGER D, TENBOHLEN S, KÖHLER W, et al. Impact of multiple restriks at vacuum circuit breakers on the EMC of medium voltage switchgear[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. Roma, Italy: IEEE, 2012: 1-6.
- [11] 成 林,周传明,卢江平,等. 隔离开关模拟骚扰源研制及应用[J]. 高压电器,2016,52(2):166-173.
CHENG Lin, ZHOU Chuanming, LU Jiangping, et al. Development and application of isolated disturbance simulating source[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 166-173.
- [12] 童 悦,张 勤,叶国雄,等. 电子式互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 of electronic transformers[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2829-2835.

- [13] 闫 格, 吴细秀, 田 芸, 等. 开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 119-130.
YAN Ge, WU Xixiu, TIAN Yun, et al. Review on the research of electromagnetic transient interference caused by arc discharge due to switchgear operation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 119-130.
- [14] 诸 磊, 饶旭妮, 成 林, 等. 110 kV AIS 隔离开关操作产生的瞬态电场模拟实验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 85-90.
ZHU Lei, RAO Xuni, CHENG Lin, et al. Simulated experimental study on transient electric field of 110 kV AIS disconnector during opening and closing operation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 85-90.
- [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] 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.
- [18] 张 亮. 电磁兼容(EMC)技术及应用实例详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
ZHANG Liang. Electromagnetic compatibility (EMC) technology and application examples[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014.
- [19] LU Tiebing, CUI Xiang, YIN Haoli, et al. Time-domain analysis of transient electromagnetic field generated by aerial busbars above lossy soil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 773-776.
- [20] LIU Y, REN W, FENG J, et al. Research on electromagnetic compatibility test port model of smart high voltage equipment[C]//2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM). [S.l.]: IEEE, 2012: 381-383.
- [21] 辛伟峰, 王 栋, 寇晓适, 等. 暂态电磁干扰通过电子式互感器的传导耦合效应研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 164-170.
XIN Weifeng, WANG Dong, KOU Xiaoshi, et al. Study on the conducted coupling effect way through the electronic transformer under transient electromagnetic interference[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 164-170.
- [22] 徐含乐, 祝小平, 周 洲, 等. 左手材料数值模拟与散射特性研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(3): 52-55.
XU Hanle, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Investigation of LHM numerical simulation and scattering property[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(3): 52-55.
- [23] 成 林, 郭安祥, 齐卫东, 等. 复杂电磁环境下电子式电流互感器输出特性研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 64-69.
CHENG Lin, GUO Anxiang, QI Weidong, et al. Study on output characteristics of electronic current transformer in complex electromagnetic environment[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 64-69.
- [24] 焦宇峰, 饶旭妮, 成 林, 等. 110 kV AIS 隔离开关操作产生的瞬态磁场特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 15-20.
JIAO Yufeng, RAO Xuni, CHENG Lin, et al. Research on characteristic of transient magnetic field generated by 110 kV AIS disconnecting switch's operation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 15-20.
- [25] JAKEL B W, MULLER A B. Switching transient levels relevant to medium voltage switchgear and associated instrumentation electromagnetic compatibility[C]//International Conference and Exhibition on EMC. New York: IEEE, 1999: 35-40.
- [26] 吴耀辉. 基于 FDTD 的雷击杆塔瞬态响应仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
WU Yaohui. Simulation study on transient response of lightning striking tower based on FDTD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [27] 互感器 第 8 部分: 电子式电流互感器: GB/T 20840.8—2007[S]. 2007.
Instrument transformers - Part 8: Electronic current transformers: GB/T 20840.8—2007[S]. 2007.
- [28] 电磁兼容 试验和测量技术: 脉冲磁场抗扰度试验: GB/T 17626.9—2011[S]. 2011.
Electromagnetic compatibility - testing and measurement techniques - Pulse magnetic field immunity test: GB/T 17626.9—2011[S]. 2011.

张志华(1987—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为配电网及其自动化技术(E-mail: zzhtsky123@163.com)。

路文超(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电设备电磁兼容(通信作者)(E-mail: 278846759@qq.com)。

李再男(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统直流继电保护技术(E-mail: 961026889@qq.com)。

段建东(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电器设备在线监测、新能源发电及并网技术(E-mail: duanjd@xaut.edu.cn)。