

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.032

电子式互感器工程应用抗干扰的研究及防护

白世军, 曾林翠, 李 毅, 张春基, 贾 乐

(西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710016)

摘要: 基于110 kV某智能化变电站投运中隔离开关DS在分合过程中电子式互感器采集卡工作异常导致保护误动的现象,深入分析探讨了导致采集卡工作异常的原因,并给出了提高GIS本体电子式互感器采集卡抗干扰能力的具体措施方法,通过该方法成功解决了投运现场出现的干扰问题。

关键词: 快速暂态过电压; 电子式电流电压互感器; 瞬态地电位升高

Anti-interference Measures Research and Protection of Electronic Transformer Applied in Engineering

BAI Shijun, ZENG Lincui, LI Yi, ZHANG Chunji, JIA Le

(Xi'an XD High Voltage Switchgear Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The phenomenon that acquisition card of electronic transformer works abnormally which leads to malfunction when the disconnecting switch operating in an 110 kV intelligent substation is studied. The reasons of the acquisition card malfunction are analyzed in this paper. The measures are given to improve the anti-interference ability of the acquisition card of the electronic transformer in GIS ontology, which can successfully solve the interference problems during the operation in field.

Key words: very fast transient overvoltage (VFTO); electronic current/voltage transformer (ECVT); transient ground potential rise (TGPR)

0 引言

智能化变电站内强电设备和弱电设备并存的事实导致了其电磁兼容的复杂性。变电站内的电磁干扰主要来自于3方面:高压开关操作、雷击线路故障和系统短路故障。其中以高压开关操作产生的瞬态电磁场引起的干扰最为典型^[1]。

智能化变电站一次侧含有大量的隔离开关和高压断路器。在电力系统运行或维护时,开关操作十分频繁,例如:隔离开关切合空载母线、断路器切合高压线路、断路器投切电容器组及电抗器的投切等。进行这一系列的操作时,将在开关断口处出现几十次乃至几百次重复的断弧及燃弧,在断开的线路上不断的折反射,形成特快速暂态过电压(VFTO)^[2-4],产生的暂态电压波和电流波会通过多种方式影响二次设备的正常工作。暂态电磁波会通过空间电磁辐射对二次电缆和智能组件柜的电源信号、通讯信

号产生影响。高频电压波和电流波会通过互感器(CT、PT等)的耦合作用感应到二次回路中,抬升的地电位(TGPR)可以耦合到二次侧,造成电网保护误动或损坏。

电子式互感器安装于GIS本体^[5],距离隔离开关、短路器等设备比较近,隔离开关操作时,电磁干扰特别严重,造成电子式互感器采集卡工作异常的现象比较常见,笔者针对工程实践中出现的该现象进行了深入分析探讨,给出了解决该问题的思路和方法并在智能化变电站现场经过了验证。

1 电子式互感器及合并单元的配置

110 kV某智能化变电站站内主变压器容量为2×50 MVA,110 kV出线2回,采用单母分段接线,配电装置采用智能化GIS。与传统变电站相比较,由电子式互感器代替传统电磁互感器,由光缆及通信线组成数字化网络取代常规电缆,使110 kV智能变电站具有绿色环保、节能降耗、系统运行稳定、自

动化程度高等特点。

110 kV 线路间隔按 A、B、C 相配置 3 台 GIS 电子式电流电压互感器 (ECVT), 母联间隔配置 3 台 ECT, 1M 和 3M 间隔配置 3 台电子式电压互感器 (EVT)。其中 ECT 包含两个 5TPE 的 Rogowski 线圈和一个 0.2S 级的测量 LPCT, 分别满足双重化保护

的要求以及测量和计量的要求。EVT 包含满足双套保护用的 0.2/3P 传感器低功耗电流互感器用于保护和计量。对于保护电流和电压由两路独立的双 A/D 采集系统进行采样, 进入同一个合并单元中。

每个间隔配置 2 台合并单元, 每个合并单元负责接入本间隔的电流、电压采样信号, 配置见图 1。

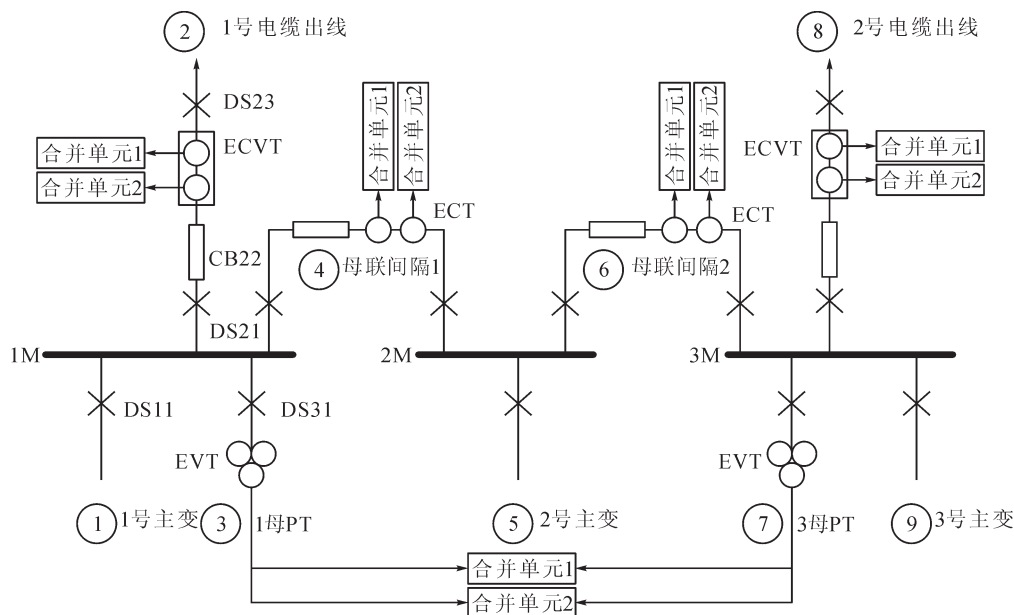


图 1 110 kV 电子式互感器及合并单元配置

Fig. 1 110 kV electronic transformers and merging units configuration

2 工程投运电磁干扰现象及原因分析

该站于 2013 年 10 月 22 日送电, 在合 2 间隔 1 号电缆出线开关 DS 23 时, 主变差动保护装置差动速断动作, 8 间隔 2 号电缆出线也出现相同情况。投运操作停止, 查看故障录波仪合并单元的输出数据, 见图 2、3。

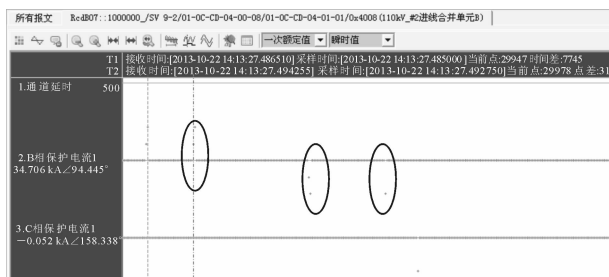


图 2 合 DS 23 隔离开关时合并单元录波输出

Fig. 2 The record wave output of merging unit when the DS 23 switching

从录波数据来看, 在合 DS 23 隔离开关过程中, 保护电流通道出现了瞬时离散超大电流值, 其中瞬时值最大已经达到了 34.706 kA, 达到了额定电流 800 A 的 30 倍远远超过了保护的整定值, 离散点的

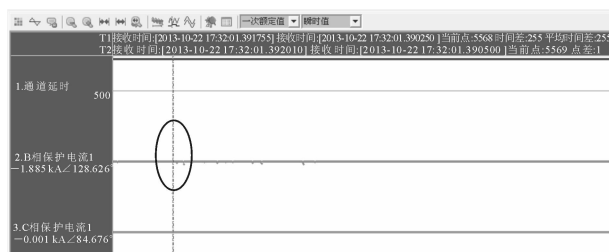


图 3 分 DS 23 隔离开关时合并单元录波输出

Fig. 3 The record wave output of merging unit when the DS 23 separating

持续时间大约在 300~400 ms 之间。在分 DS 23 隔离开关过程中, 保护电流通道同样出现了瞬时离散超大电流值, 其中瞬时值最大已经达到了 -1.885 kA。在分合隔离开关时合并单元保护电流输出的瞬时值是导致保护误动的原因所在。电缆出线间隔智能化 GIS 见图 4, 采集箱和 ECVT 一体化设计, 安装于距离地面 2.14 m 高的 ECVT 的罐体旁边, 整个 GIS 通过专用的金属导体接地, DS 23 隔离开关和 ECVT 距离较近。

该工程所用的电子式互感器一体化设计在 GIS 罐体中, 特别是将微型化、数字化的采集卡安装在 GIS 设备本体中, 使其处于强电磁干扰场, 带来了新



图4 电缆出线间隔智能化GIS

Fig. 4 Cable wire spacing intelligent GIS

的电磁兼容(EMC)问题^[6]。自建设智能化变电站以来,电子式互感器在投运运行过程中出现不少故障问题^[7]。隔离开关(DS)和断路器(CB)的操作会在GIS内产生高达数百兆赫的特快速暂态过电压(VFTO)^[8],并引起暂态地电位升高(TGPR),1983年CIGRE调查表明有半数以上的电站发生TGPR引起的事故,TGPR主要来自DS操作,其次为CB操作、电力电缆通过接地开关放电和变电站外部的雷电波,接地网和接地电阻不能阻止高达数百兆赫的TGPR导致的故障。文[7]将VFTO对二次设备的耦合方式分为传导和辐射两种形式。GIS与架空线和电缆以及互感器在外壳连接处接合,在此处波传到金属外壳外部。虽然电极和接地电阻的阻抗值 L_r (它们是感性阻抗)在工频时可以忽略,但随着频率的增加而迅速增大。因此,千伏等级的VFTO在金属壳与地之间感应出数十千伏的电压TGPR,尽管衰减很快,但是其对二次有源设备的影响还是非常大。

安装在GIS上的ECVT和采集箱系统,隔离开关操作时产生的强电磁干扰进入采集箱有传导和辐射两种,见图5。一般通过信号线、电源线和空间辐射3种途径。通过以上分析可知,操作隔离开关时候会产生VFTO,由VFTO带来高频电压波和电流波会通过电子式互感器感应到二次采集回路中,暂态电磁波会通过空间辐射对小模拟信号传输和采集箱产生影响,抬升的TGPR会表现在采集卡的电源线上,而且由此引起的干扰往往是破坏性的,TGPR会在瞬间击穿采集卡的供电电源或入口处的电子元器件,更严重者可击穿远方的供电系统。接地电抗 L_r 的存在导致隔离开关开合时产生GIS外壳上TGPR^[9-11],理想情况下, L_r 阻抗为0,GIS外壳 E 上电位为0,不会有TGPR。频率越高, L_r 阻抗越大,

E 点电位就越高,采集箱上耦合到的电磁干扰就越大,故而VFTO是引起采集卡工作异常的根源。

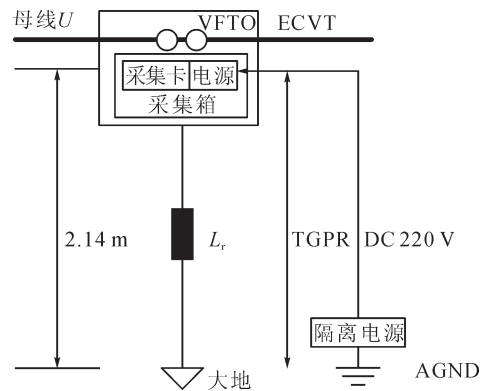


图5 VFTO对GIS设备的影响

Fig. 5 The influence of VFTO on GIS

3 采集箱抗干扰的抑制

为了能很好地解决由VFTO引起的这些问题,笔者对采集箱的安装位置、接地方式、信号端口、电源端口、软件、结构设计和屏蔽等多方面进行了优化设计,详细介绍如下。

3.1 采集箱安装位置及接地方式

采集箱对立就地安装图见图6。当操作隔离开关产生的VFTO沿着母线传播到GIS与高压套管的连接处,造成壳体地电位TGPR升高,壳体电位突变主要表现在采集卡的电源线上,由于TGPR几千伏甚至几十万伏,而由此引起对开关电源的干扰是破坏性的。为了解决TGPR带来的干扰,将采集箱的安装位置由电子式互感器罐体旁下移2.14 m到地面EARTH,降低了隔离开关和采集箱体之间的寄生电容,可以减小壳体TGPR对电源线的破坏性干扰。同时给采集箱体提供了独立接地线,按接地线大面积,近距离的原则进行了处理,避免了采集箱体受TGPR和地电位跳变的影响。

3.2 信号端口的抗干扰设计

隔离开关操作时产生的过电压感应电子式互感器时会通过绕组间杂散电容传入低压二次侧并进入采集卡前端模拟调理电路,其在采集卡信号入口处表现为快速脉冲群EFT/B的干扰^[9]。而EFT/B^[12]干扰的能量主要集中在40 MHz以下的频段;40~400 MHz频段内EFT/B骚扰的幅值衰减不大,能量仍然较大;400 MHz以上频段的EFT/B干扰的幅值衰减很快,到1 GHz基本衰减为零,此频段内干扰能量较小。基于隔离开关操作带来的EFT/B干扰不但频率高而且幅值大的特点,研制了DC-M无源低通信号滤波器(独立安装于采集卡前端),其可滤除



图 6 采集箱对立就地安装

Fig. 6 Collector oppositely being local installed

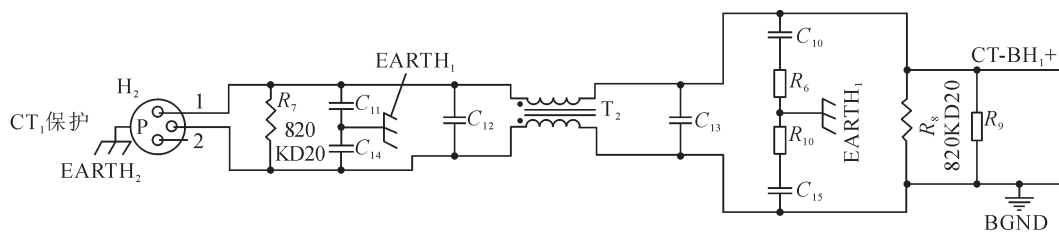


图 7 DC-M 信号滤波器原理图

Fig. 7 The principle diagram of the DC-M signal filter

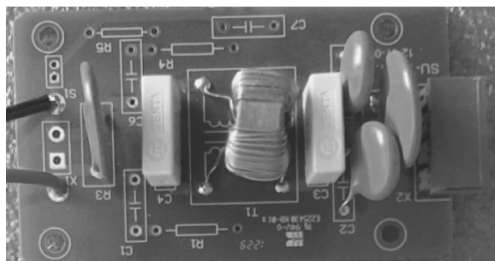


图 8 DC-M 信号滤波器实物图

Fig. 8 The picture of the DC-M signal filter

在选定差模电容值 C_x 之后,差模电感值可通过式(2)计算出所需差模电感量为

$$L_D = \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \frac{1}{C_x} \quad (2)$$

3.3 电源端口的抗干扰设计

针对投运过程中录波数据来看,采集卡出现了短时中断超过 50 ms 导致采集卡停止工作的情况,其主要原因是由于隔离开关操作过程中 TGPR 和谐波、脉冲群、间歇震荡和浪涌等形式的干扰造成的。采集卡整体下移放置到地电位后 TGPR 的影响很小了,主要考虑的是电源输入端口的 EMI 干扰,这种传导干扰可能是差模传导干扰,也可能是共模传导干扰,只能从设计的角度来同时抑制差模和共模传

的瞬间干扰信号高达数千伏,频率覆盖到 100 MHz。其原理见图 7、8。

L_1 和 L_2 可组成共模电感, L_3 和 L_4 是独立的差模抑制电感, L_1 和 C_y , L_2 和 C_y 分别构成 1-EARTH 和 2-EARTH 两对对立的低通滤波器,用来抑制信号线上存在的共模干扰。 L_3 和 L_4 与 C_x 电容组成 1 和 2 独立端口间的低通滤波,用来抑制信号线上的差模干扰。

在计算共模元器件参数时,由于共模电容 C_y 受安规限制(不能大于 0.1 μF),其值不能太大,应选择符合安规的最大值^[13]。选择共模电容 C_y 后,根据要求覆盖的最大截止频率 f ,可以通过下式计算得共模电感量为

$$L_c = \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \frac{1}{2C_y} \quad (1)$$

导骚扰^[14-15]。采集卡的供电电源来自远方的直流 220 V,开关电源的工作电压范围为 DC 90~370 V。

按照以上的分析,新设计了 EMI 电源滤波器,见图 9,滤波器是由 8.5 mH 的共模电感 L_c 与一定值的 Y 电容 (C_{y1} 1 000 pF, C_{y2} 2 200 pF) 及 X 电容 (C_x 0.33 μF) 组成的低通滤波器。 C_{y1} 、 C_{y2} 和 L_c 一起滤除共模干扰; C_x 和 L_c 所产生的漏感一起滤除差模干扰。该滤波器的插入损耗见图 10。

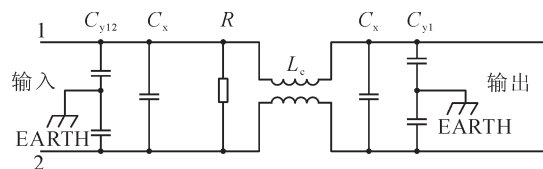


图 9 EMI 电源滤波器原理

Fig. 9 The principle diagram of the EMI power filter

3.4 软件滤波抗干扰设计

针对隔离开关切合空载母线、线路带电时分合线路侧隔离开关、断路器切合高压线路、断路器投切电容器组及电抗器的投切操作等产生的暂态电压波和电流波会通过电子式电流、电压互感器耦合作用感应到二次采集器的信号输入端进入 AD 采样回路,文中在软件上采用中位值滤波法对快速秒冲

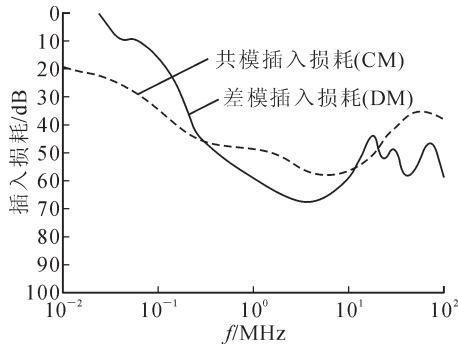


图 10 EMI 电源滤波器共差模插入损耗

Fig. 10 The cm and dm insertion loss of EMI power filter

群进行了滤波处理, 见图 11。 T_0 表示采样间隔 ($4 \text{ k}/250 \mu\text{s}$)^[16-20], x_0, x_1, x_2 为具体发送的采样点, $N\Delta T$ 表示每个点连续等值间隔采样 N 次 (N 取奇数), 通过计算得出该点采样值为 $f[(N-1)/2]$, 该算法较好的对偶然出现的脉冲性干扰进行了抑制, 消除了由于脉冲干扰所引起的采样值瞬时超大现象。

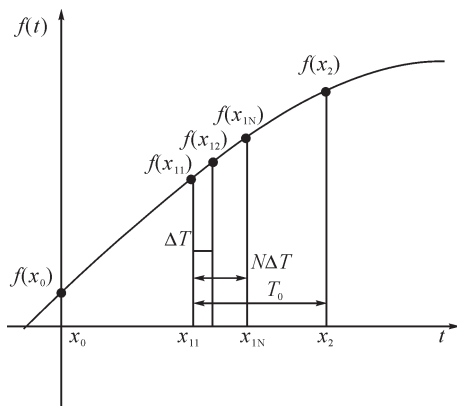


图 11 中位值滤波算法

Fig. 11 Median filtering algorithm

具体程序实现如下:

```
#define N 11 /* N 值可根据实际情况调整 */
char filter()
{
    char f[N]; // 采样值存放数组
    char count, i, j, temp;
    for (count=0; count<N; count++)
    {
        f[count] = get_ad(); // 实时采样值
        delay(Delta T); // 等值采样
    }
    for (j=0; j<N-1; j++) // 对采样值进行大小排序
    {
        for (i=0; i<N-1-j; i++)
        {
            if (f[i]>f[i+1]) // 当前采样值和上一点采样
```

值大小比较

```
{
    temp = f[i];
    f[i] = f[i+1];
    f[i+1] = temp;
}
}
Return f[(N-1)/2]; // 当前上送采样值
}
```

3.5 产品结构和屏蔽的抗干扰设计

用双层全密封屏蔽采集箱将采集卡、电源、接线端子等进行屏蔽, 防止干扰进入。采集卡的机箱选用了铸铝材料重点屏蔽电场, 采集箱体选用了高导磁率的电工软铁板材料重点屏蔽空间磁场。为了减少空间电磁场对电子式 CT 线圈输出信号的辐射干扰, 采用金属软管将小模拟信号通过双层屏蔽电缆沿 GIS 行线槽传输至下置的采集箱。屏蔽电缆侧内、外屏蔽层压接在航空插头外壳上通过外壳接地。在采集箱内部专门设置接线点将所有分立部分连接起来。从结构设计上保证了几个部分之间有良好的电气连接, 使其形成一个封闭的金属整体。通过单点的可靠接地, 保证了小模拟信号的准确传输和采集卡的正确采集见图 12、13。

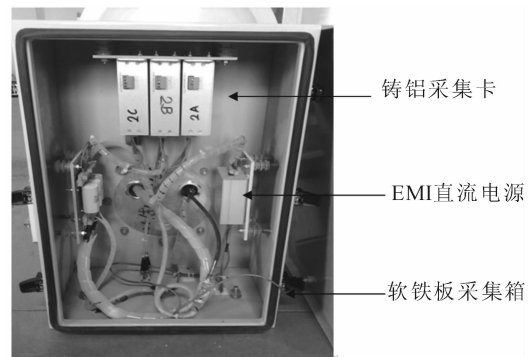


图 12 改进后的采集箱布置

Fig. 12 The improved layout of collector

4 现场试验结果

2013 年 12 月 13 日完成了现场的整改工作, 重新启动了送电, 先从 2 间隔 1 号电缆进线送电整条母线带电, 合分 DS 时一切正常, 间隔合并单元电压通道输出见图 14、15, 保护电流通道输出见图 16、17。主变差动保护装置未发出跳闸报警; 再从 8 间隔 2 号电缆出线间隔送电整条母线, 主变差动保护装置未发出跳闸报警, 至此整站送电成功, 该智能化变电站成功投运。

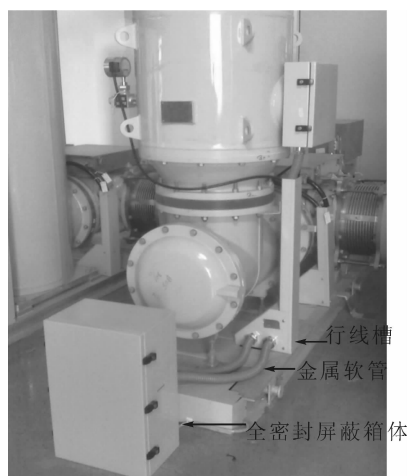


图 13 落地安装的全密封屏蔽箱体

Fig. 13 The full-sealed shield box with floor installation

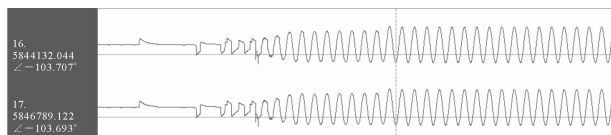


图 14 合 DS 23 隔离开关时合并单元电压信号录波输出

Fig. 14 The record wave output of merging unit's voltage signal when the DS 23 closing

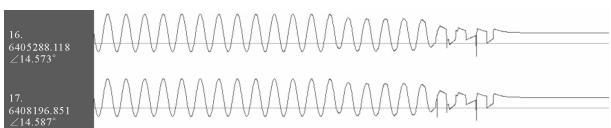


图 15 分 DS 23 隔离开关时合并单元电压信号录波输出

Fig. 15 The record wave output of merging unit's voltage signal when the DS 23 opening

图 16 合 DS 23 隔离开关时合并单元
保护电流信号录波输出Fig. 16 The record wave output of merging unit's
protection current signal when the DS 23 closing图 17 分 DS 23 隔离开关时合并单元
保护电流信号录波输出Fig. 17 The record wave output of merging unit's
protection current signal when the DS 23 opening

5 结语

以 110 kV 某智能化变电站投运过程中电子式互感器采样异常导致保护误动为研究点,经查阅相关资料和现场试验得出其原因是由于在拉合隔离开关时 GIS 本体产生的快速暂态过电压 (VFTO)对采集卡的干扰所造成的。分析清楚原因的同时,提出了电子式互感器采集箱的安装位置、接地方式、信号端口防护、电源端口防护、软件滤波、结构和屏蔽等多方面的解决办法。最后通过现场的多次试验验证证明了以上方法的合理性,同时解决了隔离开关操作时电子式互感器采样数据异常,出现个别离散点导致保护误动的问题。为目前智能变电站内 GIS 用电子式互感器的可靠运行和进一步推广提供了一些思想和方法。

参考文献:

- [1] 邹岸新,徐禄文.特高压交流输电线路工频电场的计算与分析[C]//中国电机工程学会电磁干扰专业委员会第十四届学术会议论文集.南宁:中国电机工程学会,2014: 22-29.
ZOU Anxin, XU Luwen. Calculation and analysis of power frequency electric field of UHV AC transmission line [C]// Chinese Society of Electrical Engineering. Proceedings of the Fourteenth Academic Conference of the Specialized Committee on Electromagnetic Interference. Nanning: CSEE, 2014: 22-29.
- [2] De ABREU S C. Electromagnetic environment measurement under steady-state conditions in utility substations[C]//Transmission & Distribution Conference and Exposition. Lati, USA: IEEE/PES, 2006: 1-6.
- [3] 钟连宏,欧世尧,周红霞. GIS 中快速暂态过电压的分析及计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60-62.
ZHONG Lianhong, OU Shiyao, ZHOU Hongxia. Analysis and calculation of very fast transient overvoltage in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 60-62.
- [4] 史保壮,李智敏,张文元,等. 超高压 GIS 中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
SHI Baozhuang, LI Zhimin, ZHANG Wenyuan, et al. analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300 kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3.
- [5] 闫少俊. GIS 智能变电站电子式互感器技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
YAN Shaojun. Technology of electronic transformer in GIS smart substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [6] 徐大可,赵建宁,张爱祥,等. 电子式互感器在数字化变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 78-82.

- XU Dake, ZHAO Jianning, ZHANG Aixiang, et al. Application of electronic transformers in digital substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 78-82.
- [7] 国家电网公司. 关于印制 2011 年变电站智能化改造工程建设运作工作总结报告的通知[Z]. 北京: 国家电网公司, 2012.
- State Grid Corporation of China. Notice on the summary report of the operation of the intelligent reconstruction project in 2011[Z]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [8] FUJIMOTO N, DICK E P, BOGGS S A, et al. Transient ground potential rise in gas insulated substations experimental studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, PAS-101(10): 3603-3609.
- [9] 冯利民, 王晓波, 姜欣, 等. 超高压变电站 GIS 电磁兼容建模研究[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 97-101.
- FENG Limin, WANG Xiaobo, JING Xin, et al. Research on the EMC modeling within the GIS in the EHV substations[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 97-101.
- [10] 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 disconnecter switch on the secondary circuits in gas insulated substations[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7.
- [11] 朱文立. 快速瞬变脉冲群测试的失败原因及对策[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(1): 5-10.
- ZHU Wenli. Cause analysis of EFT/B test failure and countermeasures[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2007, 25(1): 5-10.
- [12] 梁志成, 傅静波, 李富同, 等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 65-68.
- LIANG Zhicheng, FU Jingbo, LI Futong, et al. Electrical fast transient burst immunity of protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 65-68.
- [13] 柳春, 朱学军, 张逸成, 等. 基于合成扼流圈的开关电源 EMI 滤波器设计[J]. 电气传动, 2008, 38(1): 27-30.
- LIU Chun, ZHU Xuejun, ZHANG Yicheng, et al. EMI filter design of SMPS based on integrated choke[J]. Electric Drive, 2008, 38(1): 27-30.
- [14] 郑军奇. EMC 电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- ZHENG Jun-qi. EMC design and testing analysis(Second Edition)[M]. 2nd ed.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [15] 冯利民. 电力电子系统中数字控制器 EMC 设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- FENG Limin. Design of power electronic systems digital controller EMC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [16] 黄灿英. 基于 IEC 61850 标准的合并单元的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- HUANG Canying. Research of merging unit based on IEC 61850 standard[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [17] 张亚东. 电力系统微机型产品的电磁兼容设计[J]. 广东电力, 2002, 15(3): 45-48.
- ZHANG Yadong. The EMC design of microprocessor-based products of power system[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(3): 45-48.
- [18] 朱文月. EMI 典型案例分析报告[J]. 安全与电磁兼容, 2005(1): 50-52.
- ZHU Wenyue. EMI analysis of typical case[J]. Safety & EMC, 2005(1): 50-52.
- [19] 莫世禹. 通信及控制系统设备中的电磁兼容设计方法[J]. 环境技术, 2008, 26(6): 50-55.
- MO Shiyu. Design method of communications and control systems and equipment on EMC[J]. Environmental Technology, 2008, 26(6): 50-55.
- [20] 汪东艳, 张林昌. 电力电子装置电磁兼容性的研究进展[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 47-51.
- WANG Dongyan, ZHANG Linchang. A review of EMC in power electronic devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 47-51.
- 白世军(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站电磁兼容及电力设备故障诊断与状态评估。
- 曾林翠(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电子式互感器及智能电网。
- 李毅(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。