

VFTO 对电子式互感器及采集装置的影响及控制措施

邬小坤¹, 牛 静¹, 赵武智¹, 胡继华²

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳, 550002
2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京, 海淀, 100085)

摘 要:为了探索解决智能变电站 GIS 隔离开关操作对电子式互感器及采集装置的影响问题。本文首先通过分析 GIS 隔离开关操作过程中 VFTO 产生的机理及对电子式互感器的影响。然后采用 EMTP 仿真软件对隔离开关操作过程中 VFTO 的产生过程进行仿真,对软件仿真结果进行了详细分析,得出了隔离开关操作过程中 VFTO 的分布规律。针对仿真得出的分布规律,提出了通过在电源端口增加过电压抑制设计、信号端口采用三级防护电路、优化机箱结构与屏蔽设计、优化数据采集及控制算法等防范措施进行抑制的解决方案,仿真结果表明,该方案能有效抑制隔离开关操作过程中 VFTO 的产生,最大限度减小 VFTO 对电子式互感器及采集装置的影响,减轻现场运维工作量,提高智能变电站电子式互感器的运行可靠性。

关键词:智能变电站;电子式互感器;控制措施

文章编号:2096-4633(2018)12-0032-05 **中图分类号:**TM45 **文献标志码:**B

随着光纤传感技术、通信技术的飞速发展,光电技术在电力系统中的应用越来越广泛^[1]。电子式互感器由于具有体积小、重量轻、绝缘性好、频带响应宽、无饱和现象等诸多优点,在数字化变电站中被广泛应用^[2]。电子式互感器一般由高压侧的 Rogowski 线圈、采集器和低压侧合并单元三部分组成,其功能上可分为信号处理和数字通信两大子系统^[3]。电子式互感器采用新型原理,从本质上克服了电磁式互感器的固有缺点,其光纤数字式输出,适应了变电站数字化需求的发展,其性能对变电站自动化系统的影响是当前国内外研究的热点^[4]。通常用于 GIS 智能站,结构图如图 1 所示。

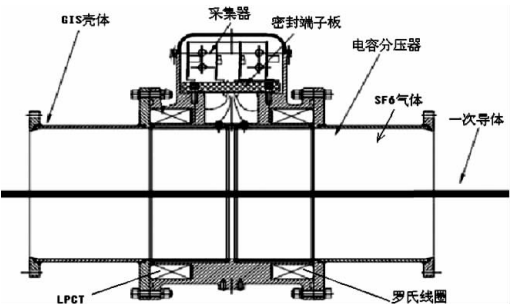


图 1 GIS 电子式电流电压互感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of GIS electronic current and voltage transformer

目前,数字化变电站在贵州电网已运行多年,其

中包括使用电子式互感器的变电站。运行实践表明,电子式互感器及其配套采集装置越接近一次本体,受站内电磁干扰影响越强,尤其是隔离开关操作产生的 VFTO 的影响^[5]。GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 对二次设备的影响主要表现在三个方面。一是操作引起壳体地电位抬升,对电子式互感器及采集装置的信号侧及电源侧造成干扰;二是操作隔离开关产生的 VFTO 引起一次回路暂态大电流,幅值最高可达几千安,引起电流信号突变以及强烈的电磁干扰;三是 VFTO 高频振荡所带来的一次过电压对绝缘产生危害。

1 VFTO 产生的机理及影响分析

1.1 GIS 隔离开关操作引起暂态干扰的原因

在高压系统中,快速暂态过电压(VFTO)主要是由隔离开关断口的电弧重燃引起的^[6]。变电站在倒母、断路器检修、投运时必然带来隔离开关操作,隔离开关操作分合容性负载时,交流电弧在电流过零时熄灭,电压滞后于电流 90 度,负载本身残余有反相峰值负电荷,在下一次重燃弧过程中,电源侧电位与电容电位相反,容性负载能量重新分配及系统固有振荡共同作用产生瞬时高频过电压,在分合闸过程中引起电弧多次重燃,每次重燃都可能引起

高频振荡,这一暂态过电压的产生称之为 VFTO^[7]。此行波沿一次导体与壳体之间传播,传播至波阻抗突变处,引起波的折反射经过耦合传至外壳处,沿着外壳逐渐传播,遇到波阻抗突变处再次折反射,每次折反射均会引起能量损耗,故距离越远壳体电位抬升越低。

1.2 地电位抬高及电磁干扰机理分析

壳体地电位升高(TEV)由两个因素共同决定,一是行波传播过程中阻抗突变处耦合折反射传递;二是操作过电压产生的过电流引起^[8]。隔离开关操作时行波在波阻抗传播过程中遇到波阻抗突变会引起折反射,对于 AIS 而言,没有壳体,行波折反射到大地中极速衰减,到互感器外壳处几乎没有影响。而 GIS 壳体地电位抬高由上述两个因素共同作用,故 GIS 外壳地电位抬高受隔离开关操作影响更大。地电位抬高对电子式互感器及采集装置危害极大,反复冲击可能造成硬件板卡烧毁,采样突变。

气体绝缘开关设备中隔离开关操作产生的 VFTO 具有幅值高、陡度高、频率高等特点,不仅会威胁 GIS 本体及邻近设备的安全,同时还容易引发二次设备误动、拒动甚至故障^[9]。目前,国内外针对 VFTO 的危害程度、抑制措施开展了大量的工作,普遍采用仿真计算模拟的方式进行研究。

2 VFTO 仿真分析

VFTO 的分布取决于内部导体与母线筒之间的行波阻抗、变压器及无功补偿等参数^[5]。本文采用 EMTF 软件仿真分析 GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 分布规律,主接线如图 2 所示(220 kV 变电站),包括两台主变、两回出线及一个母联。

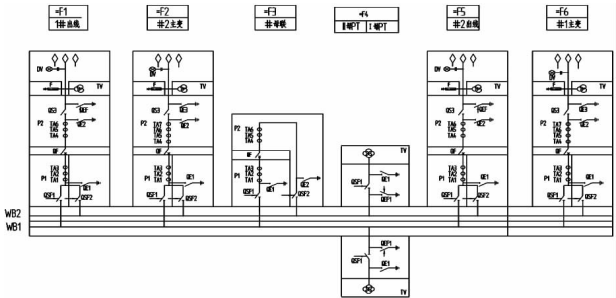


图 2 某变电站主接线图

Fig. 2 diagram of transformer substation main wiring

EMTF 整体建模等效电路如图 3 所示,以主变间隔为例分析,电源侧加载额定相电压 1 pu(127 kV),断路器 QF 处于分闸状态下,其余隔离开关处于合闸

状态。分合母线侧隔离开关 QS2,计算从套管开始各节点 VFTO 电位分布,主要分析高频暂态振荡,其中隔离开关电弧采用分段电弧模型^[10],分别模拟电弧的预击穿阶段、稳定燃弧阶段及熄弧阶段。电弧模型可用时变电阻指数变化的经典模型模拟,见公式(1)所示。

R(t) = r_0 + R_0 e^{-t/\tau}

式中 r_0—静态的电弧电阻, r_0 = 0.5 \Omega; R_0—隔离开关在起弧前的电阻, R_0 = 10^{12} \Omega, \tau—时间常数, \tau = 1 ns。

将 GIS 壳体等效为波阻抗,接地点等效为电感,大地设定为良导体,电源等效为雷电冲击波形^[11]。

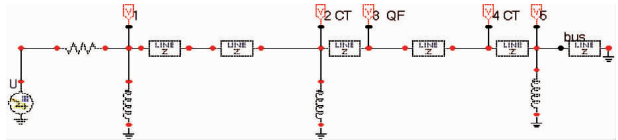


图 3 雷电冲击下回路壳体电位抬升仿真电路

Fig. 3 Simulation circuit for potential rise of loop case under lightning impact

V1 点为套管入口电位, V2 点为高位电流互感器 CT 入口电位, V3 为断路器 QF 入口电位, V4 为低位电流互感器 CT 入口电位, V5 为母线入口电位。通过仿真各节点电位波形如图 4 所示。

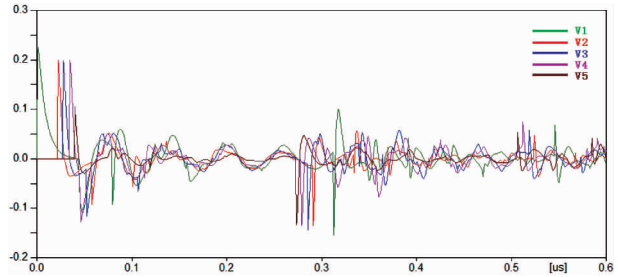


图 4 雷电冲击下回路壳体电位抬升分布波形图

Fig. 4 Waveform diagram of potential rise distribution of loop case under lightning impact

各节点电位峰值如表 1 所示。

表 1 雷电冲击下各点 VFTO 分布情况表

Tab. 1 Distribution of VFTO at various points under lightning impact

位置	V1	V2	V3	V4	V5
电压值(pu)	0.224 8	0.2	0.198	0.199	0.104 8

仿真结果表明,电位最高点是在套管底部高达 0.224 8 pu,然后依次减小,最小在母线侧可达 0.104 8 pu。这是因为 QS1 隔离开关在分合闸过程中电弧反复重燃,击穿次数较多,隔离开关断口后面

主回路会产生暂态过电压,此暂态过电压行波沿母线传播至主变间隔及出线间隔处,然后在套管软接线端子处折反射,耦合至外壳,此时套管下端外壳地电位升高最强,沿套管外壳回传,套管下端接地,波阻抗变化再次折反射,一部分能量沿接地点传递,每增加一个接地点,能量会减少一部分。因此,从高位到低位传递过程中外壳地电位逐渐下降,母线侧最低。

由仿真结果可见,壳体电位抬升最高可达28 kV ($127\text{ kV} \times V1$) 在套管底部,最低也有 13 kV ($127\text{ kV} \times V5$),如此高的地电位对电子式互感器及采集装置的影响是致命的,可能会引起采集装置信号突变,甚至造成板卡烧毁。所以,对 VFTO 的抑制至关重要,本文将从两方面角度进行研讨分析抑制,一方面加强对电子式互感器部件的防护及屏蔽,强化过程抑制,另一方面则在隔离开关侧采取一定的抑制措施,从源头上降低 VFTO 的影响。

3 控制措施

3.1 电源端口增加过电压抑制设计。

因采集装置就地化安装在 GIS 用的电子式互感器本体上,通过上文仿真,壳体引起地电位的抬升可能高达数十千伏,造成采集装置的地电位与远端供电电源参考地之间有一定的电压差,引起电源波动。因此可采用由压敏电阻和共模电感组成的过电压抑制器,如图 5 所示,该结构对采集装置的电源端口和远端电源都有很好的防护作用。

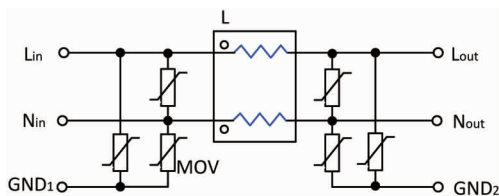


图 5 过电压抑制器结构

Fig. 5 Suppressor structure of overvoltage

工作原理:电源输入端和输出端,使用压敏电阻钳位电源与 GND 之间的共模电压,输入端与输出端的参考地电位 GND1 与 GND2 之间的电压差主要由共模电感隔离。

3.2 信号端口采用三级防护电路 + EMI 滤波对共模干扰和差模干扰进行抑制

电路原理图如图 6 所示,在信号入口侧采用三级防护电路 + EMI 滤波共同作用,在信号侧将高频 VFTO 滤掉^[12]。如图 7 所示,VFTO 的频率达到几

十 MHz,通过调节滤波器参数使得信号侧 VFTO 的干扰波形完全被滤掉。

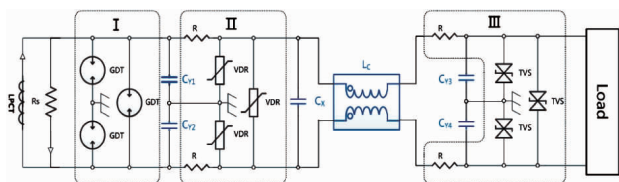


图 6 总体防护电路原理图

Fig. 6 General schematic diagram of protection circuit

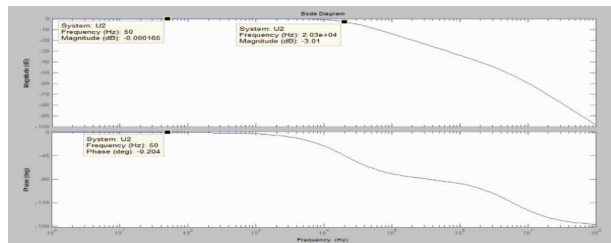


图 7 防护电路伯德图

Fig. 7 Byrd diagram of protection circuit

具体实现方式:由气体放电管(GDT)、金属氧化物压敏电阻(MOV)、瞬态抑制二极管(TVS)组成三级防护,如下图 8 所示:采用最快的 TVS(pS)管在最后级,首先动作,但是通流能力有限不能持久,电流较大达到 nS 后,通流能量较大的压敏电阻动作,TVS 退出防护;最后到 uS 时,能量最大的气体放电管动作,压敏电阻退出防护;充分利用三种防护元件的优点,相互配合不让任何一种防护器件过载,能快速有效的对干扰信号进行抑制^[13]。

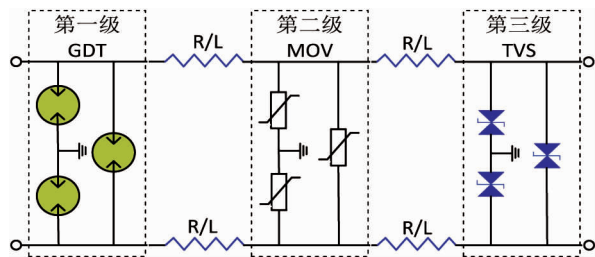


图 8 三级防护电路保护器原理图

Fig. 8 Schematic diagram of three stage protection circuit protector

3.3 优化机箱结构与屏蔽设计。

二次设备机箱采用外层铸铝材料和内层高导磁率的铁质材料设计,将二次板卡、电源、接线端子等进行屏蔽,防止干扰信号进入^[14]。其中铸铝材料重点屏蔽电场,高导磁率的电工软铁板材料重点屏蔽空间磁场。信号线双层屏蔽电缆侧内、外屏蔽层通过外壳接地。在采集装置内部设置专门接线点,将所有分离部分采用单点接地连接起来。这样从结构设计上保

证了各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,保证模拟信号的准确传输^[15]。

3.4 优化数据采集及控制算法。

隔离开关分合空载母线、线路带电时分合线路侧隔离开关、断路器分合高压线路、电容器组及电抗器操作等产生的暂态电压波,通过电流电压互感器及电缆耦合到电子式互感器采集装置。软件上采用优化数据采集及滤波算法,对由快速脉冲群干扰产生的数据进行了滤波处理,可以消除由于脉冲干扰所引起的采样值瞬时异常现象,避免保护误动^[16-18]。

除以上控制措施外,还可以通过在隔离开关处并联阻尼电阻进行抑制。因为阻尼电阻可以消耗掉隔离开关断口之间的电场能量,降低系统振荡。理论上希望阻尼电阻越大越好,但是随着系统的导通电阻将会被短接,同时如果电阻过大,将会引起系统电压发生较大突变,系统将会发生新的震荡,电阻的取值取决于系统的容量及线路的长短,但在工程上隔离开关不可能依据系统容量配置不同的合闸电阻,一般参照相应电压等级断路器合闸电阻进行设计。

4 结束语

电子式互感器与传统互感器相比,在绝缘、动态范围、饱和性能等方面具有较大优势,目前已普遍运用在 GIS 智能变电站中,但运行中易受 VFTO 的影响。本文通过分析 VFTO 产生的机理,用 EMTP 软件仿真分合隔离开关过程中 VFTO 的大小及分布规律;针对仿真得出的分布规律,提出通过在电源端口增加过电压抑制设计、信号端口采用三级防护电路、优化机箱结构与屏蔽设计、优化数据采集及控制算法等防范措施进行抑制,另外也可以通过在隔离开关处并联阻尼电阻进行抑制。实践运行表明,以上方案能有效抑制隔离开关操作过程中 VFTO 的产生,最大限度减小 VFTO 对电子式互感器及采集装置的影响,减轻现场运维工作量,提高智能变电站保护装置现场运行可靠性。

参考文献:

- [1] 陈维江,王浩,王赞基,等. 特高压气体绝缘开关设备中电磁式电压互感器耐受特快速暂态过电压的特性分析[J]. 高电压技术, 2013,39(06):1402-1410
- CHEN Weijiang,WANG Hao,WANG Zanji,et al. Withstand characteristics analysis of inductive voltage transformer in UHV gas insulated

- switchgear under very fast transient overvoltage[J]. High Voltage Engineering,2013,39(06):1402-1410.
- [2] JASMIN S,WALTER H,JADRAN K,et al. 3D full-maxwell simulations of very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(05):1514-1517.
- [3] 詹花茂,赵承楠,段韶峰,等. 气体绝缘开关设备的隔离开关分合空载短母线时特快速暂态过电压及特快速暂态电流测量田[J]. 高电压技术,2013,39(06):1317-1323
- ZHAN Huamao, ZHAO Chengnan, DUAN Shaofeng, et al. Measuring of very fast transient over-voltage and very fast transient current generated by disconnector in gas insulated switchgear switching on/off short buses with no load [J]. High Voltage Engineering,2013,39(06):1317-1323.
- [4] 陈维江,李志兵,孙岗,等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速暂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.
- [5] 张璐,张乔根,殷禹,等. 特快速暂态过电压和雷电冲击下 SF6 长间隙伏秒特性[J]. 高电压技术,2013,39(06):1396-1401
- ZHANG Lu, ZHANG Qiaogen, YIN Yu, et al. Voltage-time characteristics of long SF6 gap under VFTO and lightning impulse [J]. High Voltage Engineering,2013,39(06):1396-1401.
- [6] 陈珉,马国明,李成榕,等. 气体绝缘开关设备介质窗口式特快速暂态过电压测量用传感器研制[J]. 高电压技术,2014,40(03):897-903
- CHEN Min,MA Guoming,LI Chengrong,et al. Dielectric window sensor development for very fast transient overvoltage measurement in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering,2014,40(03):897-903.
- [7] 张璐,张乔根,刘石,等. 特快速暂态过电压和雷电冲击作用下特高压 GIS 绝缘特性[J]. 高电压技术,2012,38(02):335-341.
- ZHANG Lu,ZHANG Qiaogen,LIU Shi,et al. Insulation characteristic of UHV GIS under VFTO and lightning impulse [J]. High Voltage Engineering,2012,38(02):335-341.
- [8] 陈维江,颜湘莲,王绍武,等. 气体绝缘开关设备中特快速暂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. Experimental research on very fast transient overvoltage in gas-insulated switchgear [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):1-11.
- [8] 胡庆春. 电流互感器二次侧开路故障分析[J]. 电力大数据, 2017,20(11):6-7.
- HU Qingchun. Fault analysis of secondary side opening circuit of current transformer [J]. Power Systems and Big Data. 2017, 20(11):6-7.
- [10] JASMIN S,WALTER H,JADRAN K,et al. 3D full-maxwell simulations

- of very fast transients in GIS[J]. IEEE Transients on Magnetics,2011, 47(05):1514 – 1517.
- [11] YONGGANG GUAN,GONGCHANG YUE,WEIJIANG CHEN,et al. Experimental research on suppressing VFTO in GIS by magnetic rings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013, 28(04):2558 – 2565.
- [12] GONGCHANG YUE,WEIDONG LIU,WEIJIANG CHEN,et al. Development of full frequency bandwidth measurement of VFTO in UHV GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(04):2550 – 2557.
- [13] 刘青. 隔离开关不同操作方式产生的快速暂态过电压[J]. 高压电器,2011,47(04):17 – 22.
- LIU Qing. Very fast transient overvoltage caused by different switching modes of disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(04):17 – 22.
- [14] 罗彦,段雄英,邹积岩,等. 电子式互感器中数字同步和数字通信技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(04):77 – 81.
- LUO yan, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Digital synchronization and communication technology for electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(04):77 – 81. in Digital Substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(07):94 – 97.
- [15] 胡榕,崔翔,陈维江,等. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5244 – 5257.
- HU Rong, CUI Xiang, CHEN Weijiang, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5244 – 5257.
- [16] 关永刚,郭瑕琪,陈维江,等. 铁氧体磁环抑制 252 kV GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高电压技术,2014,40(07):1977 – 1985
- GUAN Yonggang, GUO Peiqi, CHEN Weijiang, et al. Test study oil suppressing VFTO in 252 kV GIS by ferrite magnetic rings [J]. High Voltage Engineering,2014,40(07):1977 – 1985.
- [17] 易斌,潘峰,林国营,等. 电子式互感器校验技术综述[J]. 广东电力,2016,29(02):1 – 8.
- YI Bin, PAN Feng, LIN Guoying, et al. Summary on calibration technology for electronic transformer [J]. Guangdong Electric Power,2016,29(02):1 – 8.
- [18] 高帅,徐占河. 智能变电站电子式互感器现场校验分析[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(05):53 – 56.
- GAO Shuai, XU Zhanhe. Field calibration analysis of electronic instrument transformers in intelligent substation [J]. Inner Mongolia Electric Power,2017,35(05):53 – 56.

收稿日期:2018 – 11 – 08

作者简介:



郭小坤(1988),男,硕士,工程师,主要从事继电保护运行与管理。

(本文责任编辑:范斌)

Impact and control measures of VFTO on electronic transformers and acquisition devices

WU Xiaokun¹, NIU Jing¹, ZHAO Wuzhi¹, HU Jihua²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of Guizhou Electric Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002 Guizhou, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Haiding, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to explore and solve the problem of influence of GIS disconnector operation on electronic transformer and acquisition device in intelligent substation, Firstly, the paper analyzes the mechanism of VFTO in the operation of GIS disconnector and its influence on electronic transformer, Then, EMTP simulation software is used to simulate the generation process of VFTO during the operation of disconnector. The software simulation results are analyzed in detail, and the distribution rule of VFTO during the operation of disconnector is obtained. According to the distribution rule obtained by simulation, this paper puts forward the solution of suppression by adding overvoltage suppression design in power port, adopting three-level protection circuit in signal port, optimizing box structure and shield design, optimizing data acquisition and control algorithm, etc. . Simulation results shows that the scheme can effectively restrain the VFTO generation during the operation of disconnector, minimize the influence of VFTO on electronic transformer and acquisition device, reduce the workload of maintenance, and improve the reliability of electronic transformer in intelligent substation.

Key words: intelligent substation; electronic transformer; control measures