GIS 开关操作对二次设备骚扰抑制措施研究

邹志杨[1,2]，夏 雨[1,2]，周华良[1,2]，吴 敏[1,2]，缪家森[1,2]，徐 政[1,2]

（1. 南瑞集团公司（国网电力科学研究院），南京 211106；
2. 国电南瑞科技股份有限公司，南京 211106）

摘要：为研究气体绝缘变电站（gas insulated substation，GIS）隔离开关操作引发特快速暂态过电压（very fast transient overvoltage，VFTO）对就地二次设备影响及抑制措施，本文介绍了 GIS 隔离开关操作对就地二次设备骚扰的测试方法，针对 VFTO 骚扰特性重点阐述了就地二次设备主回路抑制 VFTO 骚扰的设计实现方法，提出了就地二次设备加强互感器绝缘强度、机箱分区屏蔽设计、电源多级滤波等措施，通过 VFTO 电磁暂态试验平台验证了抑制措施的有效性。

关键词：电气工程；隔离开关；特快速暂态过电压（VFTO）；VFTO 骚扰特性；就地二次设备；端口测试

中图分类号：TM762　　**文献标识码：**A

文章编号：1674-2850(2023)01-0021-08　　**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

DOI：10.3969/j.issn.1674-2850.2023.01.003

Research on suppression measures of disturbance to secondary equipment by GIS switch operation

ZOU Zhiyang[1,2], XIA Yu[1,2], ZHOU Hualiang[1,2], WU Min[1,2], MIAO Jiasen[1,2], XU Zheng[1,2]

(1. *NARI Group Corporation* (*State Grid Electric Power Research Institute*), *Nanjing* 210006, *China*;
2. *NARI Technology Development Co*., *Ltd*., *Nanjing* 211106, *China*)

Abstract: In order to study the influence and suppression measures of very fast transient overvoltage (VFTO) caused by disconnector operation in gas insulated substation (GIS) on local secondary equipment, this paper introduces the test method of disturbance from GIS disconnector operation to local secondary equipment, and focuses on the design and implementation method of suppressing VFTO disturbance in the main circuit of local secondary equipment according to the characteristics of VFTO disturbance. The measures such as strengthening the insulation strength of transformer, partition shielding design of chassis and multi-level filtering of power supply for local secondary equipment are proposed. The effectiveness of the suppression measures is verified by VFTO electromagnetic transient test platform.

Key words: electrical engineering; isolating switch; very fast transient overvoltage (VFTO); VFTO disturbance characteristics; local secondary equipment; port test

0 引言

随着智能变电站与能源互联网的持续发展，越来越多不同用途的二次设备安放于 GIS 本体或近 GIS 本体，如高压侧集成安装的电子式互感器采集单元、传感采集模块，以及控制柜中安装的智能终端、合并单元，GIS 特高频局部放电检测、开关在线监测系统等[1]。就地二次设备由于贴近一次设备安装，与安装在控制室内相比，其运行环境发生了巨大变化，电磁环境更加严酷与复杂，特别是 GIS 隔离开关操作时不仅在一次主回路中产生操作过电压[2]，还会引起 VFTO 电磁骚扰，产生的电磁骚扰会通过一次设

作者简介：邹志杨（1980—），男，高级工程师，主要研究方向：继电保护设备的电磁兼容
通信联系人：缪家森，助理工程师，主要研究方向：继电保护设备电磁兼容测试. E-mail: 605836211@qq.com

备的电流互感器（current transformer，CT）、电压互感器（potential transformer，PT）、断路器等互连电缆传导耦合至就地二次设备的弱电输入输出端口与电源输入端口[3~5]。由于就地二次设备具有电子化、数字化、集成化和微型化等特点，设备对强电磁干扰较为敏感，VFTO 电磁骚扰可能会引起装置绝缘下降、采样数据异常、通信误码、电源中断、甚至死机闭锁等问题，严重时会引发硬件电路元器件烧毁、装置误动作等异常，影响电力系统安全稳定运行[6~7]。因此，研究 VFTO 电磁骚扰对就地二次设备骚扰测试评估方法，并针对 VFTO 骚扰影响提出相应的抑制措施，对提高就地二次设备的运行可靠性，深入解决 GIS 变电站隔离开关操作引发的电磁兼容问题尤为重要。

1　VFTO 电磁骚扰测试

为研究 VFTO 电磁骚扰对就地二次设备的影响，本文试验依托武汉特高压交流基地的 VFTO 电磁暂态试验平台，该平台结合就地二次设备运行特征，在 VFTO 特性试验的典型回路基础上增加 CT、PT 等一二次互连设备[8]，在典型安装位置设置就地二次端子箱、试验场布置了电缆沟、设置控制室等。VFTO 电磁暂态试验平台一二次设备布置如图 1 所示，GIS CT 布置于两个隔离开关之间，GIS PT 布置于分支母线末端，1 000 kV 交流电源接入左侧套管，右侧套管连接直流高压发生器[9~12]，就地端子箱设置有两处，可提供就地二次设备的安装与电缆电气连接。

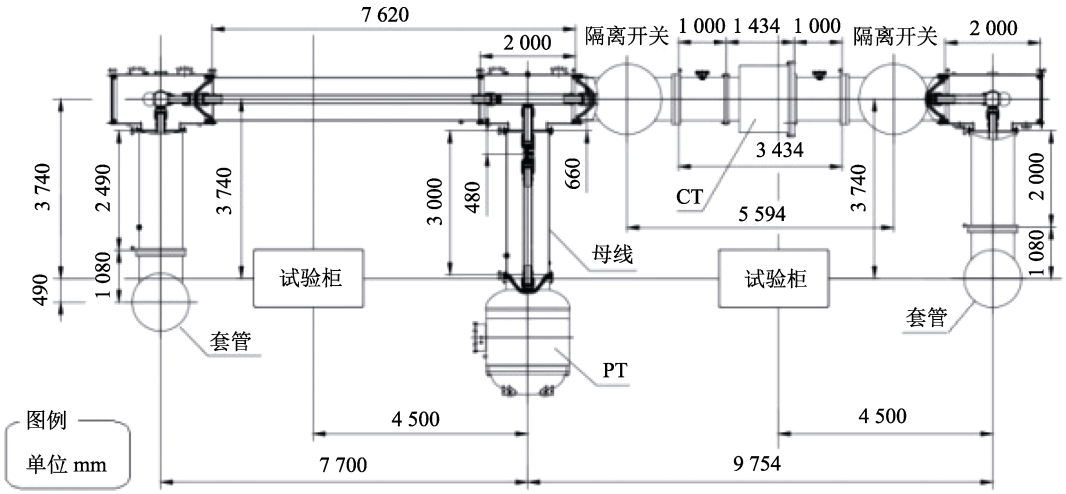


图 1　一二次设备布置

Fig. 1　Layout of primary and secondary equipment

VFTO 电磁骚扰试验与就地二次设备连接方式如图 2 所示，从试验平台的 GIS 一次 CT、PT、隔离刀闸等出线端通过控制电缆与就地端子箱连接，就地端子箱起转接信号、固定安装二次设备等作用，端子箱再通过电缆、光缆与就地二次设备相连接，控制室设置有直流电源屏、继电保护测试仪、录波器等，电源屏提供直流电源，继电保护测试仪提供电压电流源，录波、网分等辅助设备对试验过程数据进行存储与分析。就地二次设备采用最小和典型定值进行整定，选择设备功能中最灵敏（保护动作速度最快）的功能模块进行评估。

试验评估步骤如下：GIS 试验平台接地开关处于分闸状态，隔离开关处于可操作状态，进行隔离开关分、合闸操作，试验次数各为 10 次，试验间隔为 60 s，就地二次设备需在每次 VFTO 试验后进行相关功能验证，查看装置运行报告，分析通讯状态。同时通过特快速电磁暂态（very fast electromagnetic transient，VFT）传感器测量 VFTO 幅值，10 次合闸 VFT 幅值平均值为 1.4 p.u.以上与 10 次分闸 VFTO

幅值平均值为 1.4 p.u.以上视为 VFTO 分合闸试验有效值，若低于该值，需增加试验次数[13~14]。

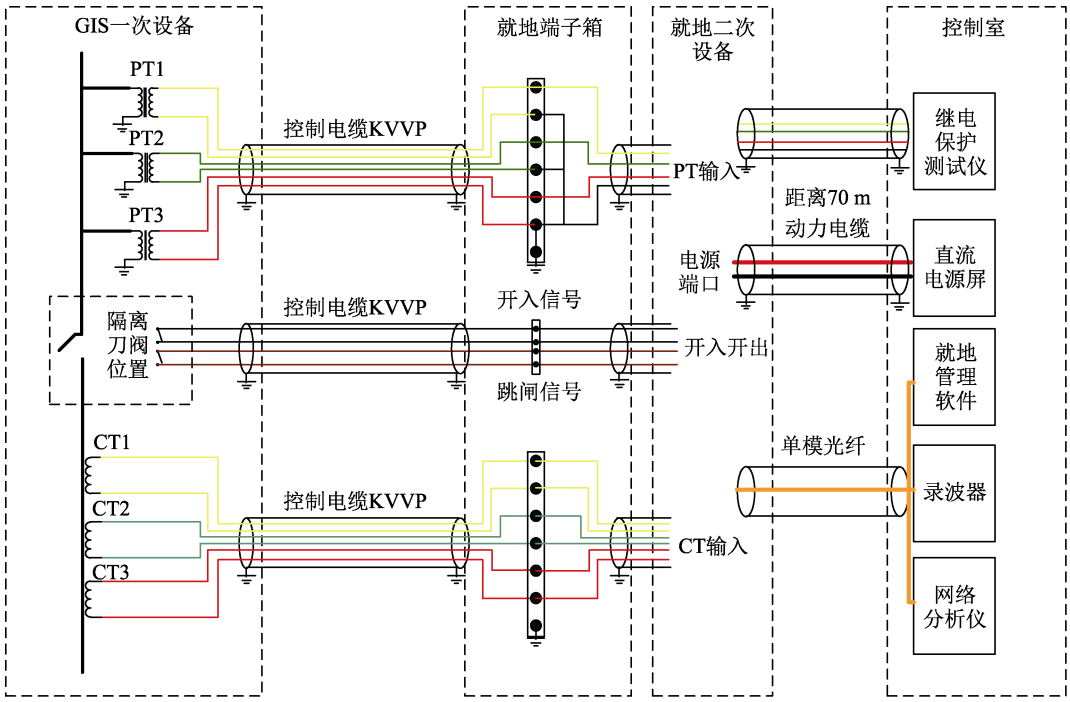


图 2 就地二次设备接线

Fig. 2 Connection of local secondary equipment

对就地二次设备装置在 VFTO 电磁暂态试验平台进行拉合刀闸试验，全面验证设备的最小定值与典型定值在 VFTO 电磁骚扰情况下的各项性能，在测试过程中发现就地二次设备出现交流电压输入端口对地绝缘电阻下降、装置出现丢包、通讯中断等现象。同时试验过程中还发现 VFTO 干扰对辅助设备影响严重，如继电保护测试仪在拉合刀闸中出现死机、通讯出错、输出波形畸变、控制室内直流电源屏掉电等问题。

2 就地二次设备抑制措施

基于 GIS 电磁暂态试验平台拉合刀闸试验对就地二次设备的骚扰结果，对试验过程中出现的电压互感器绝缘下降、装置通讯丢包、中断等问题进行了详细的分析，并开展了就地二次设备端口骚扰实测，通过加强 PT 互感器绝缘、机箱分区屏蔽设计、电源端口钳位滤波等措施，抑制了 VFTO 骚扰对就地二次设备影响。

2.1 加强 PT 互感器绝缘

针对试验过程中电压端口对地绝缘下降问题，对问题电压互感器进行了拆解分析，发现互感器输入线圈绕组、磁芯与屏蔽层脚管之间均存在漏电碳化起痕现象，从而导致电压互感器绝缘电阻下降。采用示波器测量交流电压输入端口波形，发现在进行 GIS 电磁暂态试验平台拉合刀闸试验时，PT 端口骚扰电压的峰峰值超过 10 kV，波形如图 3 所示，二次设备用电压互感器一次绕组对地的工频耐压要求为 2 kV，冲击耐压要求为 5 kV，现测量端口电压远高于现互感器耐压标准要求等级，导致互感器绕组与地之间存在闪烙放电痕迹，放电致使材料表面碳化起痕，造成对地的绝缘电阻下降。

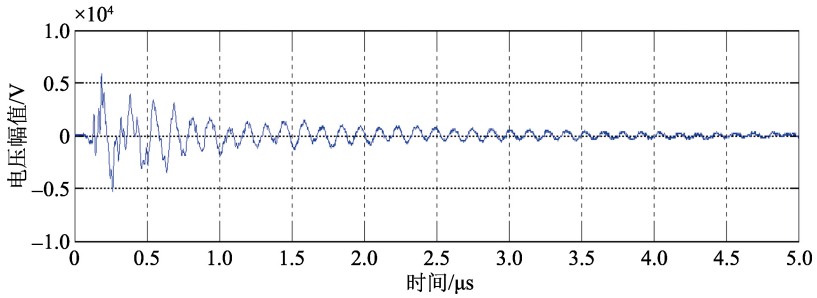


图 3　PT 端口骚扰电压

Fig. 3　PT port disturbance voltage

PT 是一种小型的降压变压器，主要起强弱电隔离、电压变换的作用，它主要由硅钢片、绕组线圈、屏蔽层、绝缘骨架等构成。由于互感器体积较小，它的绝缘主要通过绕制一到二层绝缘胶带进行处理，存在屏蔽层、互感器铁芯与原边输入线圈邻近且外层绝缘胶带未完全覆盖缝隙的问题。因此在电压过高情况下，易产生放电击穿现象，导致互感器出现原边输出端绝缘下降甚至断线等情况。

互感器高压下出现绝缘下降问题采取的措施如下。绕制 PT 采用原副边带隔离墙骨架，如图 4 所示，原边线圈绕制于骨架上层，并从上端引出一次绕组接线，副边线圈绕制于骨架下层。相对于无分隔的工型骨架，改进后的 PT 从原边输出端到屏蔽地管脚之间的物理爬电从 2 mm 增加至 12 mm。根据 GB/T 14598.3—2006 电气继电器 第五部分中电气继电器的绝缘试验标准中所给出的最小间隙与耐受电压关系中可知：耐压从 2 kV 提高至 12 kV，对地耐压能力显著增大；电压互感器磁芯与原副边线圈之间绝缘胶带绕制增加至 5 层，绝缘胶带介质强度约为 2 kV，增加绕制层数后其冲击耐压提高至 10 kV，是普通互感器耐压的 3～4 倍；同时为了稳定互感器高耐压水平，增加真空浸染与灌胶工艺，保证了原边圈线与铁芯之间无死角全覆盖，有效提升电压互感器的绝缘能力。

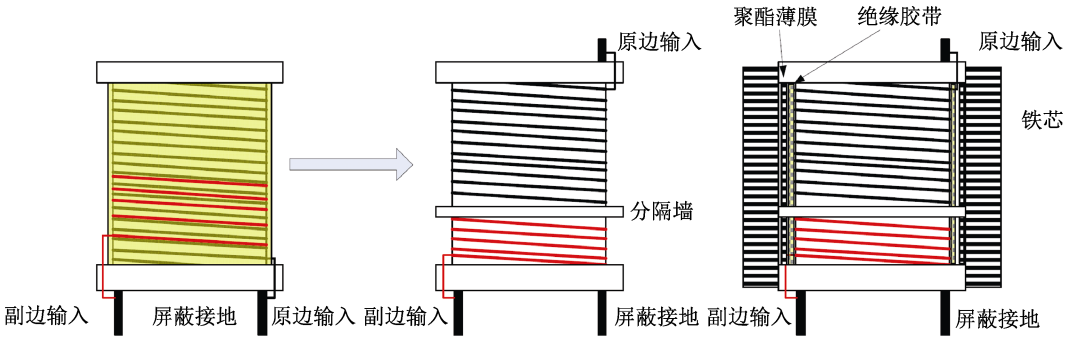


图 4　PT 加强绝缘

Fig. 4　PT reinforced insulation

改进后的 PT 采用浪涌冲击耐压测试仪进行了 10 kV 冲击耐压的验证，试验结果表明 PT 各绕组对地、各绕组之间均未出现击穿、绝缘电阻下降等情况。采用加强绝缘 PT 互感器的就地二次设备在 VFTO 电磁暂态试验平台现场进行了实测，试验结果表明，实施改进措施后的就地二次设备在近百次拉合隔离刀闸过程中，未出现电压互感器绝缘下降问题。

2.2　机箱分区屏蔽设计

电磁屏蔽是通过金属包围体使电磁波衰减，主要用于减少骚扰源产生的电磁场对其设备内部的影响，屏蔽是抑制电磁干扰的重要手段之一。就地二次设备机箱一般采用铝合金材料设计，电源、信号输入采

用屏蔽电缆，屏蔽层通过外壳接地。经现场实地测量，设备安装点附近地面电场 20～40 kV/m，地面磁场 30～50 A/m。就地二次设备箱体及屏蔽设计完全满足电场与磁场干扰强度要求。通过端口骚扰测试专用设备，用示波器对各端口骚扰进行测量，测量发现就地二次设备 VFTO 骚扰以传导干扰方式为主，各端口骚扰为宽频干扰，骚扰电压较高，PT、CT、开出端口骚扰电压尤为突出。

就地二次设备输入端口采用隔离设计，PT、CT、开出等信号考虑到回路安全一般不采用滤波回路，VFTO 电磁骚扰通过这些端口在机箱内部形成强干扰源，直接干扰设备内部弱电回路，对装置可靠运行造成严重影响。因此，对设备内部强干扰源进行分区隔离、屏蔽等措施异常重要。采用电磁仿真计算软件仿真 VFTO 电磁波信号通过 CT、PT 线缆芯进入就地化机箱内部，分析对 CPU 板的影响，设置干扰源为频带宽度 0～100 MHz 的高斯信号，通过计算 CPU 板表面的电场分布，分析对比就地化设备分区屏蔽前后电磁场的衰减效果。仿真模型与实物图尺寸一致，在无金属屏蔽隔板结构时，CPU 板上表面电场强度分布如图 5 所示，CPU 板上表面电场强度极大值出现在与干扰源信号输入端口位置相对应处，最大值为 52.3 V/m。

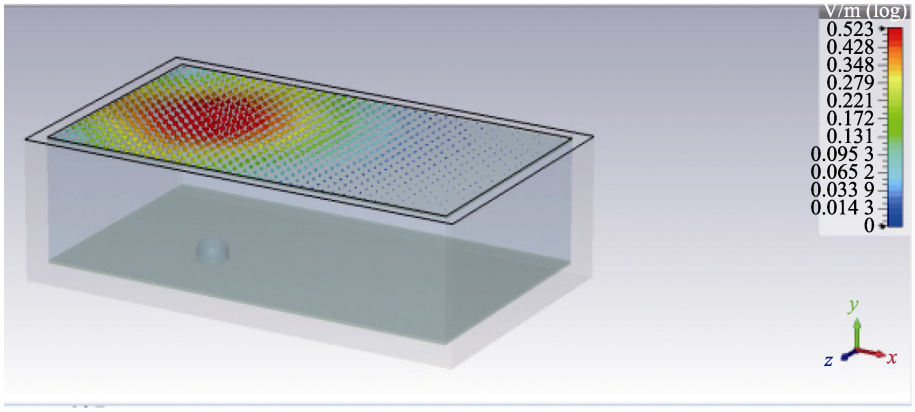


图 5 未加屏蔽时 CPU 板电场强度

Fig. 5 Electric field strength of CPU board without shielding

有金属屏蔽隔板结构时，CPU 板上表面电场强度分布如图 6 所示，CPU 板上表面电场强度极大值出现在与金属屏蔽隔板过孔位置相对应处，最大值为 0.027 5 V/m。仿真结果表明，当干扰源为频带宽度 0～100 MHz 的高斯信号时，金属屏蔽隔板对干扰信号屏蔽效果明显，与不加屏蔽结构相比，设备机箱内部 CPU 板上表面最大电场强度值下降约 65 dB。

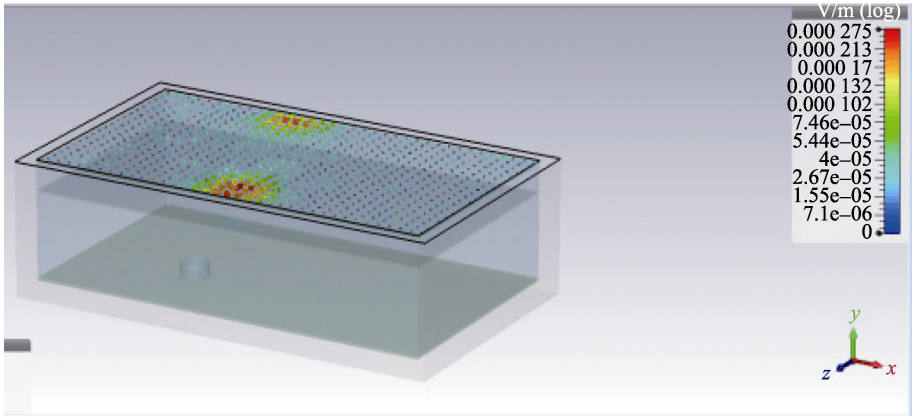


图 6 增加屏蔽时 CPU 板电场强度

Fig. 6 Electric field strength of CPU board with shielding

采用快瞬变干扰对就地化机箱分区屏蔽效果进行对比试验，未分区屏蔽，在交流回路施加干扰时，装置会出现死机、复位等异常情况，增加措施后，大大提升了装置抗干扰性能，未发现装置运行异常。通过 VFTO 试验平台现场实测，增加分区屏蔽措施后，在拉合隔离刀闸过程中未出现装置死机、复位等异常现象。

2.3　电源端口钳位滤波

就地二次设备在拉合刀闸试验过程出现采样值（sampled value，SV）通讯丢包问题，该 SV 通讯数据主要用于故障录波、站域保护等应用，出现丢包表明就地二次设备内部信号受到干扰，现场采取了去线排除法，即逐一去除与装置互连电缆，最终定位为电源端口问题，采用示波器测量电源端口输入波形，发现在进行拉合刀闸试验时，端口骚扰电压的峰峰值超过 6 kV，干扰波形为阻尼振荡波，主频在 7.7 MHz 左右，在幅值与频率上，电磁骚扰水平高于 IEC 61000-4-18 标准的试验等级要求。电源端口通常设计有电磁干扰（electromagnetic interference，EMI）滤波回路，EMI 滤波是一种抑制瞬态脉冲干扰，减少电源传导发射的有效措施可以滤除多种传导干扰。EMI 滤波电路设计在开关电源的输入端，由多个滤波电容与共模扼流圈等器件构成，就地化装置采用了一级滤波方式，由于 VFTO 电磁骚扰频宽干扰幅值大，电源一级滤波未能有效抑制，通过电源高频变压器耦合电容传导到内部 5 V 电源端，影响高速通讯模块引发装置丢包。

对装置的 SV 丢包问题采取以下措施，电源端口采用多级滤波防护电路设计，如图 7 所示，其中第一级为高压钳位电路，第二级为单极型滤波器，第三级为加强滤波器。

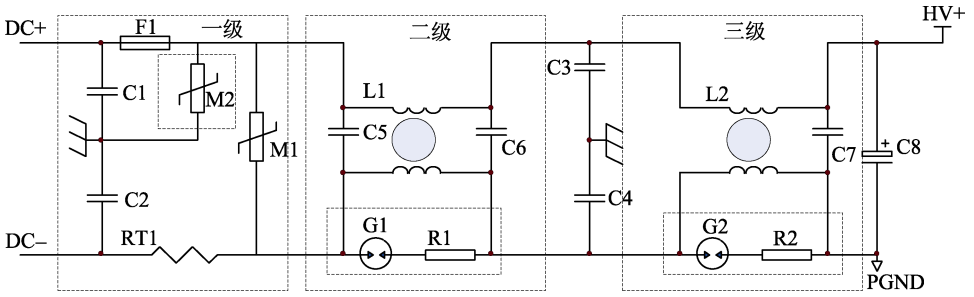


图 7　多级滤波防护

Fig. 7　Multistage filter protection

多级滤波防护电路第一级由热敏电阻 RT1，Y 电容 C1、C2，压敏电阻 M1、M2 以及保险丝 F1 构成，RT1 与 M1 配合使用能抑制电源端口差模过电压，电源端口共模电压被 M2 钳位，同时共模干扰信号经过 Y 电容泄放。高压钳位电路可以防止电源端口 VFTO 电磁骚扰过电压。第二级由 X 电容 C5、C6，共模扼流圈 L1 和与其并联的气体放电管 G1、电阻 R1 构成，L1 不影响电源回路中的差模信号，在共模电流流经 L1 时表现为高阻抗，对共模电流具有衰减作用。X 电容可有效提高电源的 EMI 和电磁敏感度（electromagnetic susceptibility，EMS）性能，G1 和 R1 可有效限制 L1 两端在电流快速变化时引起的电压抬升。第三级同样由共模扼流圈 L2 和气体放电管 G2、电阻 R2 构成，通过对共模干扰信号进行再次抑制，减小干扰对后级电路的影响。

对滤波器进行仿真，仿真结果如图 8 所示，三级加强滤波器的截止频率为 10 kHz，而 VFTO 电磁骚扰主频率在 0.1 Hz～20 MHz 之间，该回路可有效滤除 VFTO 电磁骚扰。通过 VFTO 试验平台现场实测，电源端口实施改进措施后，在拉合隔离刀闸过程中装置未出现通讯丢包问题，达到了预期效果。

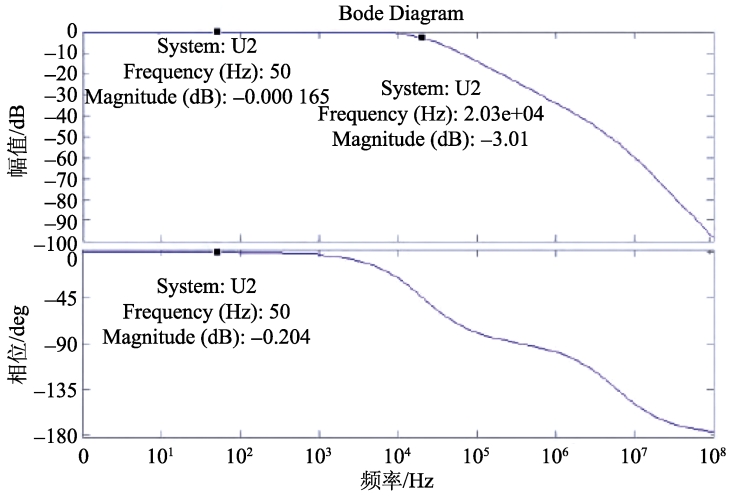


图 8 滤波特性仿真

Fig. 8 Simulation of filtering characteristics

3 结论

GIS 电磁暂态试验平台试验结果表明，拉合隔离刀闸引发 VFTO 不仅会影响一次设备绝缘，对就地二次设备端口也会造成严重电磁骚扰，本文阐述了 VFTO 电磁骚扰就地二次设备影响机理，明析 VFTO 试验平台就地二次设备影响评估试验方法，试验过程中发现 VFTO 骚扰主要以传导干扰方式为主，就地二次设备的 PT、CT、开出等信号回路没有采用滤波措施，因此骚扰电压较高。强干扰引入设备内影响弱电回路需予以重视，对试验过程中出现的问题采取了三种抑制措施并通过试验平台验证，为工程化解决 GIS 变电站就地二次设备抗 VFTO 电磁骚扰提供新的解决思路。

[参考文献] (References)

[1] 罗伟明，张弛，曾林. 智能变电站中 VFTO 对继电保护的影响研究[J]. 广西电力，2016，39（4）：1-5，25.
LUO W M, ZHANG C, ZENG L. Study on influence of VFTO to relay protection in smart substation[J]. Guangxi Electric Power, 2016, 39(4): 1-5, 25. (in Chinese)

[2] 段韶峰，李志兵，詹花茂，等. 252 kV GIS 特快速瞬态试验回路研究[J]. 高压电器，2016，52（2）：28-34.
DUAN S F, LI Z B, ZHAN H M, et al. Research on very fast transient test circuit for 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 28-34. (in Chinese)

[3] 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 F, KONG X, WU X T, 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. (in Chinese)

[4] 李红兵，张展华. 变电站微机保护测控装置的电磁兼容及应对措施[J]. 船电技术，2010，30（1）：58-60.
LI H B, ZHANG Z H. EMC and countermeasures in microprocessor protection and supervision equipment of transformer substation[J]. Shipbuilding Technology, 2010, 30(1): 58-60. (in Chinese)

[5] 巩学海，何金良. 变电所二次系统电磁兼容抗扰度指标分析[J]. 高电压技术，2008，34（11）：2412-2416.
GONG X H, HE J L. Analysis on electromagnetic compatibility immunity indexes for secondary systems of substation[J]. High Voltage Technology, 2008, 34(11): 2412-2416. (in Chinese)

[6] 巩学海，何金良，李雨. 变电所的瞬态电磁环境分析[J]. 高压电器，2009，45（5）：39-43.

GONG X H, HE J L, LI Y. Analysis on transient electromagnetic environment of substations[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 39-43. (in Chinese)

[7] 张晓莉，刘慧海，刘伟，等. VFTO 对就地化保护装置的影响分析及改进措施[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32（7）：137-144.
ZHANG X L, LIU H H, LIU W, et al. Analysis of influences of VFTO on on-site protection of secondary equipment and the corresponding improvement measures[J]. Journal of power system and automation, 2020, 32(7): 137-144. (in Chinese)

[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 J, CHEN W J, ZHANG J G, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(5): 1687-1695. (in Chinese)

[9] 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 W D, CHEN P L, CHEN W J, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by VFTO in UHV GIS substation on the secondary cables[J]. Acta Electrical Engineering Sinica, 2013, 33(16): 187-196. (in Chinese)

[10] XIANG H J, CHANG S H, ZOU J, et al. Substation switching electromagnetic transient analysis using the time do-main integral equation with a high order implicit scheme[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. NewYork: IEEE, 2012.

[11] BAJRAMOVIC Z, CARSIMAMOVIC S, VELEDAR M, et al. Influence of substation's elements on electromagnetic transient occurrences caused by disconnector switching[J]. Electric Power Components & Systems, 2011, 39(2): 113-127.

[12] 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.

[13] 吴恒天，崔翔，焦重庆，等. GIS 变电站二次设备端口电磁骚扰测量系统的研制及应用[J]. 高压电器，2017，53（10）：68-75.
WU H T, CUI X, JIAO C Q, et al. Development and application of electromagnetic disturbance measurement system for secondary equipment port of GIS substation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 68-75. (in Chinese)

[14] 刘家芳，李敏，饶章权，等. 500 kV 变电站隔离开关操作 PT 二次侧干扰信号的研究[J]. 高压电器，2005，6（7）：423-424.
LIU J F, LI M, RAO Z Q, et al. Research on disturbance in the secondary side of PT during disconnector switching in 500 kV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 6(7): 423-424. (in Chinese)