

采用智能采样接口的安全稳定控制系统半实物仿真技术与应用

李 阳

(星德科包装技术(杭州)有限公司,浙江 杭州 310018)

摘 要:安全稳定控制系统是电力系统“第二道防线”的主要组成部分,是保障区域电网安全稳定运行的关键系统。围绕传统大电网稳控策略和安全稳定控制系统的工程验证方法存在接线复杂、设备冗余、配置复杂、验证周期长等问题,文中提出一种基于实时数字仿真系统(real time digital simulation system,RTDS)的安全稳定控制系统半实物仿真验证技术,重点设计了一种智能采样接口,支持智能变电站 IEC-61850 协议下的采样测量值(sample value,SV)和面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event,GOOSE)报文,通过网络直接与安全稳定控制系统建立点对点通信,避免仿真验证过程对合并单元、智能终端、功率放大器等设备的过度依赖。通过电厂外送安全稳定控制系统仿真测试,结果表明该技术能够快速准确地对安全稳定控制系统的故障识别、方式判断、控制策略及闭锁逻辑执行等进行模拟验证,设计的智能采样接口能够显著降低半实物仿真验证平台构建的复杂度,提升仿真验证测试效率,拓展应用性能。

关键词:RTDS;安全稳定控制系统;半实物仿真验证;智能采样接口

中图分类号:TM 743 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0016-06

0 引言

随着新型电力系统的建设发展步伐,电网结构日益复杂,安全稳定控制系统在保障电网安全稳定运行中发挥着关键核心作用^[1-2]。通过多个厂站间安全稳定控制装置协同工作,实时识别电网运行方式、监测关键断面潮流,并在故障发生时采取切机、切负荷等控制措施,防止系统失稳^[3]。然而,安全稳定控制系统覆盖范围广、控制层级复杂、站点众多、控制策略多样,给半实物仿真验证带来了巨大挑战。

传统的半实物验证手段多依赖辅助设备搭建测试环境,接线繁琐、调试周期长^[4-5],尤其系统中同时存在常规采样与智能采样装置时,智能采样装置采集 SV、GOOSE 报文的通道配置相对复杂^[5-6],制约着半实物仿真验证效率。目前通常采取两种方案,进行 RTDS 仿真数据转换为 SV 报文输出以及 GOOSE 报

文的输出和采集。

第一种方案是利用功率放大器,将电压、电流仿真数据按 PT、CT 变比模拟放大为实际二次值,然后接入合并单元,由合并单元进行同步采样、模数转换,按照 IEC 61850-9-2 协议,生成电压、电流 SV 报文,通过光纤点对点接入智能采样装置^[4];利用 GTFPI 或 GTDO/GTDI 开关量输出/输入板卡^[2,4,7-9],经“开入开出”面板将断路器位置状态、跳闸信号等数据放大为 220 V 直流操作电源下的硬接点开入开出信号,然后接入智能终端,由智能终端生成 GOOSE 报文,通过光纤传输至智能采样装置,智能终端同时接收智能采样装置下发的切机/切负荷 GOOSE 报文,将其转换为开出信号,驱动断路器模型或实际执行回路动作,从而完成控制策略的验证。该方案引入了合并单元和智能终端,不同元件间通过直观明确的电缆线和光纤点连接匹配。由于安全稳定控制系统通常涉及多座厂站,需要采集多个线路或主变间隔的电压、电流及断路器位置等信息,

收稿日期:2026-01-12

作者简介:李阳(1994),女,硕士,工程师,从事电力系统继电保护、智能变电站及电网运行控制研究。

为此,文中提出一种基于RTDS的安全稳定控制系统半实物仿真验证技术,重点设计了一种在工作站可直观简便进行通道配置的智能采样接口,能够在不依赖额外辅助设备的情况下,直接为智能采样装置接入准确的SV、GOOSE报文。通过电厂外送安全稳定控制系统的半实物仿真试验,验证了文中所提半实物仿真技术和智能采样接口设备的有效性和实用性。

2026年第2期/总第278期 17

2 智能采样接口

2.1 智能采样接口硬件结构

文中设计了图2所示的新型智能采样接口,采用了基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)+高频中央处理器(central processing unit, CPU)的架构。

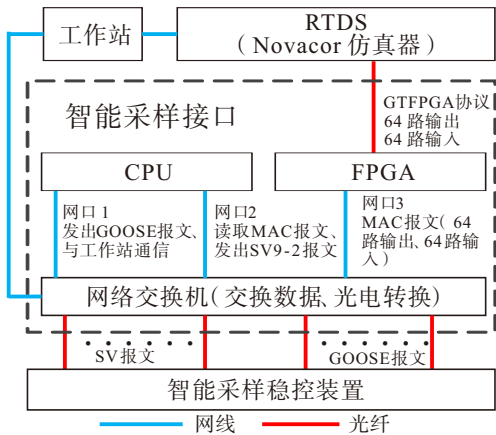


图2 智能采样接口硬件结构

RTDS的NovaCor仿真器在每个仿真步长输出指定协议的线路电压、电流,断路器位置等仿真数据,典型输出步长为50 μs,使用的协议为GTFPGA^[14],物理连接为千兆光纤。

使用大容量FPGA对RTDS NovaCor光纤协议解码,其中包含64个int32(32位整型数据)输出和64个int32输入,将64个输出打包为MAC报文从千兆网线发出。

高频CPU接收到MAC报文后,重新按智能采样接口通道配置打包成多个IEC 61850 SV报文和GOOSE报文,SV报文具有不同VLAN分组,从千兆网线发送到网络交换机。

低延迟网络交换机支持多厂站并行接入,根据SV报文的VLAN对报文进行分组,点对点应用时每个百兆光口输出一个合并单元报文。GOOSE报文由于数据量较小,采用全量分发方式,由交换机传输至安全稳定控制系统智能采样装置。

2.2 RTDS与智能采样接口通道设置

在RTDS中建立NovaCor仿真数据与智能采样接口装置数据传输通道,需要添加图3所示同步计数器和GTFPGA元件。GTFPGA元件共有64路输出和64路输

入,输出通道中的第一个通道(out1)用于智能采样装置的同步标志,由于RTDS仿真数据在每个整秒时刻^[9]经GTFPGA元件送到智能采样接口,为保证整秒内各采样点报文同步,需要利用同步计数器,为同一采样点的每帧报文打上相同的同步标志(图3中out1),不同仿真步长需要对应修改同步计数器A端子输入值(图3中绿色框)。对于50 μs的典型仿真步长,整秒内共有20 000个采样点(1 s/50 μs=20 000),同步标志out1从0计数到19 999,设置同步计数器A端子输入值为19 999;同理,若RTDS仿真步长为62.5 μs,需要设置同步计数器A端子输入值为15 999(1 s/62.5 μs=15 999)。

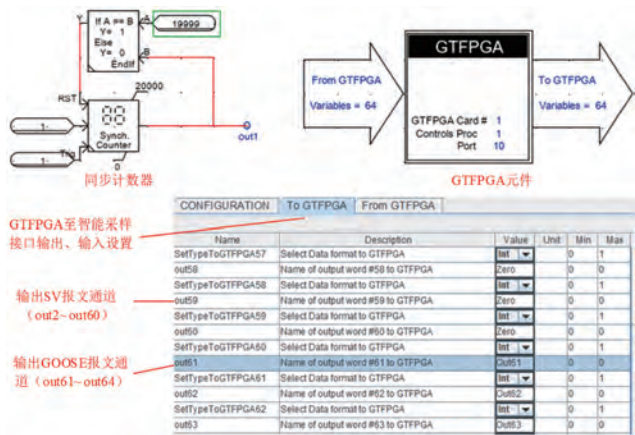


图3 RTDS与智能采样接口间通道设置示意图

GTFPGA中的通道out2、out3、…、out60被设定为输出模拟量,最多可以输出59个电压、电流信号,将处理为整型数据的电压、电流仿真数据填入相应通道,不输出的通道赋值为0;通道out61、out62、out63、out64被设定为输出开出量,每个通道输出的是一个32位整型数据,当输出双点数据(断路器位置)时,低位为跳位,高位为合位;当输出单点数据(跳闸信号)时,高位为有效位,低位为0,因而一个通道可以输出16个开出量,4个通道最多可以输出64个双点或单点信号;将准备好的开出量输出填入相应通道中,不输出的通道赋值为0;此时,RTDS与智能采样接口间通道设置完毕。

2.3 智能采样接口与智能采样装置通道配置

在实际运行中,智能采样装置需要根据合并单元或智能终端的CID/ICD文件,识别所采集的电气信息量^[5]。在半实物仿真测试中,为快速实现智能采样装置与智能采样接口的双向通信,使用安装于工作站的专用配置工具,通过解析智能变电站配置文件(substation configuration description, SCD),灵活匹配智能采样装

置所需合并单元或智能终端的装置模型及其所需通道。

如图4所示,建立配置工具与智能采样接口的网络连接,设置与RTDS一致的仿真步长,导入安全稳定控制系统部署的智能变电站SCD文件,配置工具自动解析SV报文输出和GOOSE报文输出、输入的装置模型,根据智能采样装置实际采样需求,选中需要的数据集,关联在RTDS的GT-FPGA元件中设置的输出、输入通道。

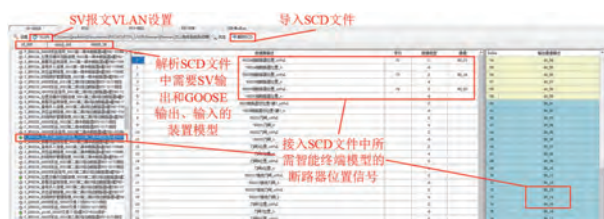


图4 智能采样接口与智能采样装置通道配置示意图

对于SV报文输出,在输出通道描述中选中AO_01、AO_02、…、AO_59通道,应注意电压、电流为双AD采样,每组ABC三相,共支持59个电压、电流信号SV输出,即支持19组三相电压、电流信号SV报文输出。由于RTDS输出的是PT、CT模型测量的二次值,需要添加对应的变比作为通道系数,随后还原的一次值数字量由交换机传输至智能采样装置。在SV报文输出时,应设置需要输出模拟量的VLAN,分组编号与交换机光口关联SV的VLAN ID一致,这样即可实现SV报文的点对点传输。

对于GOOSE报文输出、输入,应注意与RTDS的GT-FPGA元件设置输出输入量在通道上保持一致,GT-FPGA输出out61对应通道名DO_01、DO_02、…、DO_16,共16位;out62对应通道名DO_17、DO_18、…、DO_32,共16位;out63对应通道名DO_33、DO_34、…、DO_48,共16位;out64对应通道名DO_49、DO_50、…、DO_64,共16位。需要注意GOOSE输出通道是全量输出,即RTDS中GT-FPGA元件out61~out64当中任意一个输出通道非0,则RTDS输出的32位整型数据每一位都必须有值(1或0),即使该位并未用于表示实际信号也应赋0。

2.4 智能采样接口特点

相较传统方案,文中的系统设计具备以下优势:

1) 无需合并单元和智能终端,仿真数据直接转换为符合DL/T 860标准的SV、GOOSE报文。

2) 支持多厂站同时接入。SV报文通过VLAN分组即可实现多路报文点对点独立输出。

3) 通道配置灵活。通过工作站即可完成RTDS、智能采样接口、智能采样装置间的通道配置和交换机VLAN分组设置。

4) 成本低、部署快。单一接口替代传统针对各个间隔配置合并单元、智能终端或者GTNET固件、光电转换等辅助设备,简单直观的通道配置替代ICD文件虚端子连接再重新下装的复杂流程,显著降低系统复杂度,提升半实物仿真效率。

3 应用验证

3.1 安全稳定控制系统结构及策略

为验证文中的半实物仿真验证技术的准确性和有效性,搭建包含1个主站、1个信息子站、1个执行站的电厂外送安全稳定控制系统半实物仿真平台。主站采用国电南自公司SSC-510UMA-DA-G型装置,包括主机、从机各1台;信息子站采用国电南自公司SSC-510USA-DG-G型装置,包括主机、从机各1台;执行站采用长园深瑞公司QWD-MEA-G型主机和QWD-SEA-G型从机,配套通信接口若干。电厂外送一次系统及安全稳定控制系统结构如图5所示。

在实际工程中,除了控制策略需要仿真验证,安全稳定控制系统的闭锁逻辑和功能也需要测试。其中,线路PT/CT断线闭锁逻辑设置为:当智能站A主站检测到线路2、线路3的PT、CT回路异常,收到火电厂执行站上送的1号机组高压侧PT、CT回路异常信号,收到智能站B信息子站上送的线路4的PT、CT回路异常信号时,闭锁控制策略;通道异常闭锁逻辑设置为:智能站A主站与智能站B信息子站通道异常、智能站A与发电厂执行站通道异常时,闭锁控制策略。

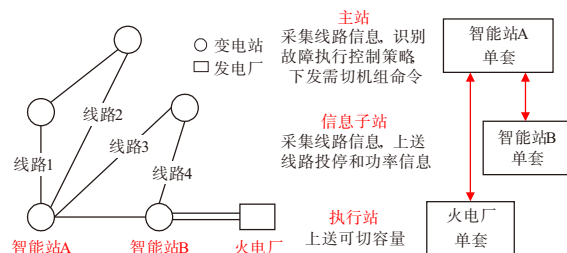


图5 电厂外送一次系统及安全稳定控制系统结构

文中测试的安全稳定控制系统主要解决图5中火电厂1号机组投产后,线路4检修方式下,发生线路2和线路3的N-2故障,智能站A送出断面存在暂态

及热稳定问题,控制策略如表1所示。

表1 安全稳定控制系统控制策略表

运行方式	故障元件	故障类型	检测断面	断面潮流	控制措施
线路4检修	线路2、线路3	N-2故障	智能站A送出断面	智能站A送出断面功率 $P > P_{mk}$	切火电厂1号机组

表注: P_{mk} 是N-2故障断面功率门槛定值

3.2 数据采集与接入通道配置

根据图5所示电厂外送安全稳定控制系统结构,智能站A主站和智能站B信息子站采用SV、COOSE报文接入,火电厂执行站采用常规模拟量接入;智能站A主站装置采集线路1三相电压、电流,线路2和线路3三相电压、电流和断路器三相位置接点,共接入18路SV报文输出和6路GOOSE报文输出;智能站B信息子站采集线路4三相电压、电流,共接入6路SV报文输出;火电厂执行站采集1号机组高压侧三相电压、电流,共接入6路常规模拟量接入。整个电厂外送安全稳定控制系统的数据采集、数据接入装置及通道配置情况见表2。

表2 安全稳定控制系统的数据采样与接入通道情况

运行方式	采样间隔	数据类型	接入装置	接入通道名
智能站A主站	线路1(三相)	电压、电流	智能采样接口	out2~out7 (AO_01~AO_06)
	线路2(三相)	电压、电流	智能采样接口	out8~out13 (AO_07~AO_12)
	线路2(三相)	断路器位置接点	智能采样接口	out61 (DO_01~DO_03)
	线路3(三相)	电压、电流	智能采样接口	out14~out19 (AO_13~AO_18)
	线路3(三相)	断路器位置接点	智能采样接口	out61 (DO_04~DO_06)
智能站B子站	线路4(三相)	电压、电流	智能采样接口	out20~out25 (AO_19~AO_24)
火电厂执行站	1号机组高压侧	电压、电流	功率放大器	U1~U3、I1~I3

3.3 定值设置

保持线路PT、CT变比与RTDS仿真模型一致,设置智能站A主站的N-2故障断面功率门槛定值为500 MW,N-2相继跳闸时间间隔为5 s。其他的装置定值,如线路投运电流、功率,启动电流、功率等,均采用相同的出厂参数。

3.4 仿真测试

搭建满足安全稳定控制系统结构、数据采集与接入通道配置、试验定值设置要求的半实物仿真测试平台,如图6所示。基于提出的控制逻辑和闭锁逻辑,设置表3所示11个故障场景,开展仿真测试,涵盖正常方式、检修方式、PT/CT断线、通道异常等典型工况,监测的断面功率均调整为550 MW。



图6 半实物仿真测试平台示意图

表3 仿真测试场景及策略动作正确情况

运行方式	场景	试验工况	动作情况	是否正确
正常方式	1	线路2、线路3无故障跳闸	不动作	正确
线路4检修(闭锁策略验证)	2	线路2、线路3智能站A侧无故障跳闸	切火电厂1号机组	正确
	3	线路2、线路3对侧无故障跳闸	不动作	正确
	4	0 s线路3相间故障,3 s线路2相间故障	切火电厂1号机组	正确
	5	0 s线路2相间故障,7 s线路3相间故障	不动作	正确
	6	线路1智能站A侧CT断线,线路2、线路3同时相间故障	切火电厂1号机组	正确
	7	线路2智能站A侧CT断线,线路2、线路3同时相间故障	不动作	正确
	8	线路4智能站B侧PT断线,线路2、线路3同时相间故障	不动作	正确
	9	火电厂1号机组高压侧CT断线,线路2、线路3同时相间故障	不动作	正确
	10	智能站A主站与智能站B子站通道中断(智能站B发智能站A收),线路2、线路3同时相间故障	不动作	正确
	11	智能站A主站与火电厂执行站通道中断(火电厂发智能站A收),线路2、线路3同时相间故障	不动作	正确

表3中正常运行方式下,线路2、线路3同时发生N-2无故障跳闸,安全稳定控制系统不动作;图7所示场景2的仿真功率曲线下,故障前断面(线路1+线路2+线路3)功率为550 MW大于门槛定值,线路2、线路3跳闸(突变量启动)40 ms后,主站判别N-2故障,2 ms后主站发出动作命令,由于仿真测试中执行站与主站通过短光缆直连,通道传输和执行站动作延时近于为0,最终执行站正确动作切火电厂1号机组;而在场景3下系统不动作,这表明智能站A主站能够正确采集线路2、线路3的电压、电流并结合本侧断路器位置状态综合判断线路2、线路3本侧是否跳闸,智能站B信息子站能够正确采集线路4的电压、电流判断线路4处于检修方式,由此验证了安全稳定控制系统满足表1所示控制策略要求,同时说明采用智能采样接口接入SV、GOOSE报文的正确性。

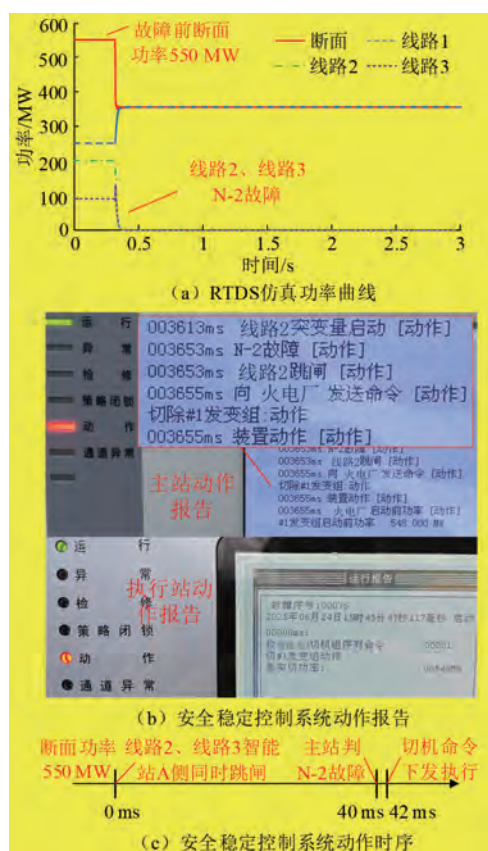


图7 场景2仿真功率曲线及安全稳定控制系统动作报告

结合场景6—9可知,安全稳定控制系统能够正确识别线路2、线路3、线路4、火电厂1号机组高压侧的PT、CT断线信息,正确执行闭锁策略;结合场景10、11可知,安全稳定控制系统能够正确识别智能站A主站与智能站B信息子站、智能站A主站与火电厂执行站间的通道中断信息,正确执行闭锁策略。

以上11个场景的仿真测试分析表明,安全稳定控制系统的控制策略和PT/CT断线、通道异常下的闭锁策略得到验证,文中提出的半实物仿真验证技术能够快速准确地进行故障识别、运行方式判断、控制策略及闭锁逻辑的仿真验证,设计的智能采样接口可以为智能采样装置提供所需的GOOSE报文和点对点传输SV报文。

4 结语

文中提出的安全稳定控制系统半实物仿真验证技术,重点设计了通道配置直观便捷的智能采样接口,实现了RTDS仿真数据快速转换为SV、GOOSE报文并通过特定的通道进行分发,避免了传统方法对

合并单元、智能终端或者GTNET固件、光电转换等辅助设备的使用,特别是无需进行智能采样装置ICD文件的重新配置与下装流程。通过电厂外送安全稳定控制系统的半实物仿真测试,证明了该技术在系统功能验证、策略执行、异常闭锁等方面的准确性和可靠性。文中提出的半实物仿真技术显著降低了验证平台的构建复杂度和测试成本,具有较强的工程实用价值,可以推广应用于智能变电站其他二次系统装置的半实物仿真测试。

参考文献:

- [1] 汤涌.电力系统安全稳定综合防御体系框架[J].电网技术, 2012,36(08):1-5.
- [2] 郭琦,韩伟强,曾勇刚,等.电网安全稳定控制技术实时仿真试验研究平台(一)架构与特征[J].电力系统自动化, 2012,36(20):1-5.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.电力系统安全稳定控制系统技术规范:GB/T 40587-2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [4] 高振孔,孔凡强,路昱,等.基于RTDS的区域保护系统动模试验研究[J].东北电力技术,2014,35(12):43-46.
- [5] 杨洪涛,杨洪清,杨佳,等.基于RTDS-GTNET的智能电子装置测试技术[J].广西电力.2020,43(02):1-8.
- [6] 朱云峰,胡宝,朱军红,等.RTDS-GTNET打包SV报文的延时特性测试技术[J].电力系统保护与控制,2018,46(09):110-115.
- [7] 刘一欣,郭力,李霞林,等.基于实时数字仿真的微电网数模混合仿真实验平台[J].电工技术学报,2014,29(02):82-92.
- [8] 付磊,李卫良.特高压直流配套稳控系统的典型试验方法与应用[J].电网技术,2018,42(12):3850-3856.
- [9] 郭琦,韩伟强,贾旭东,等.云广直流输电工程安稳装置的RTDS试验方法研究[J].南方电网技术,2010,4(02):43-46.
- [10] 张武洋,黄未,王同,等.一种基于RTDS稳控系统性能测试试验方法的研究[J].东北电力技术,2020,41(06):1-4.
- [11] 国家能源局.电力自动化通信网络和系统第1部分:概论:DL/Z 860.1-2018[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [12] 孙志媛,刘默斯,覃志军.电网稳控系统集成式RTDS仿真模型开发[J].电力科学与技术学报,2016,31(01):103-109.
- [13] 郭琦,夏尚学,朱益华,等.大电网大规模稳控系统广域测试接口装置的设计与应用[J].电力工程技术,2019,38(03):74-79.
- [14] 郭琦,贾旭东,伍文聪,等.基于FPGA技术的外部主站与RTDS高速通信系统[J].南方电网技术,2015,9(06):61-67.