

基于 RTDS 与 QualNet 的电网和通信网半实物联合仿真系统

童和钦^{1,2,3}, 倪明^{1,2,3}, 李满礼^{1,2,3}, 司庆华^{1,2,3}, 缪源诚⁴, 龚鹏⁵

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏省南京市 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106;

4. 国家电网公司华东分部, 上海市 200120; 5. 北京理工大学机电学院, 北京市 100081)

摘要: 在智能电网和能源互联网中,通信的中断、延时和误码等因素会对电网安全稳定造成影响,因此有必要研究通信系统和电力系统的交互作用,而半实物仿真技术是研究其交互影响的有效手段。在对支撑电网稳控业务的同步数字体系(SDH)通信网络的特点和动态特性分析的基础上,提出了基于实时数字仿真器(RTDS)与 QualNet 的电网和通信网半实物联合仿真系统的整体框架,并开发了可以实现电力二次控制设备和通信 SDH 设备实物接入的电网和通信网半实物联合仿真系统,用于研究通信对电网稳控系统的影响。最后,对联合仿真系统的固有延时进行了测试,证明了其可靠性,并以华东频率协控系统闭环仿真为算例,利用该联合仿真系统验证了通信通道误码率增大对稳定控制装置功能和控制效果的影响。

关键词: 半实物联合仿真; 电网和通信网联合仿真; 同步数字系统网络; 稳控系统

0 引言

随着特高压交直流电网的发展及电网智能化建设,电网对电力通信网的基础支撑需求更加显著。电力系统已经逐渐发展成为由电力系统和通信系统相互耦合的网络系统^[1]。通信系统的丢包、延时增加或者故障等不确定性都会对电力系统造成影响,有可能会使电力系统的运行可靠性、控制的有效性达不到设计或规划的水平,甚至导致大规模停电事故的发生。因此研究这种电网和通信网的复杂耦合系统就有着重要的现实意义,而仿真技术是定量分析研究这种耦合网络的关键技术^[2]。

国内外已有诸多针对电网和通信网构成的复杂耦合系统的仿真方法,这些方法可大致分为:纯数字仿真和半实物仿真。其中数字仿真包括以下几项。

1) 联立仿真:将电网和通信网的仿真模型和方法集成到同一仿真平台上,但采用这种方法无法准确反映出复合系统的动态特性^[2]。

2) 非实时联合仿真:如电力和通信同步仿真

(EPOCHS)和全局事件驱动混合仿真(GECO),电网和通信网仿真分别采用各自成熟的仿真软件。但在用于电力系统动态问题仿真(如稳定控制、广域监测)时,仿真时间难以精确同步,难以及时响应电力或通信事件,从而影响仿真结果的精确性^[3]。

3) 实时联合仿真:电网和通信网仿真都采用实时仿真软件,并进行实时数据交互。如文献[3]采用 OPAL-RT 和 OPNET 构建了实时联合仿真平台,实现了广域智能负荷控制的分析。但该方法存在一些所有纯数字仿真方法存在的共性缺点,包括:难以准确描述所有电力二次设备的特性,难以准确描述电力通信设备的多样性以及通信规约和网络的多样性等。

上述几种纯数字建模的数字仿真方法,能对易于建模的电力控制和通信设备的功能进行仿真,但对难以建模的电力控制和通信设备的性能无法准确模拟;另外,电力通信系统中采用了大量特殊的、专用的电力通信规约,而这些通信规约难以通过纯数字方法建模。因此,当需要准确模拟设备性能或设备间通信性能时,就要将部分物理设备接入计算机仿真回路,构建半实物仿真系统,实现更接近于实际情况的仿真^[4]。如文献[5]中,介绍了一种用于分析网络攻击对电网影响的半实物仿真系统;文献[6]中,介绍了一种用于分析电网需求响应的半实物仿

收稿日期: 2017-08-11; 修回日期: 2017-12-06。

上网日期: 2018-03-06。

江苏省经信委项目“电网和通信网联合仿真平台关键技术研究及产业化”;国家电网公司科技项目“电网和通信网联合仿真技术基础研究”。

真系统。现有的电网和通信网半实物仿真主要面向基于以太网技术的配电网侧业务,还没有面向基于同步数字体系(SDH)通信网络的保护稳控业务的半实物仿真系统。

由于 SDH 通信网络采用了同步传输、时隙复用的数据传输机制,相较于以太网的分组传输机制,其传输的复杂程度、实时性要求、安全可靠性能要远高于以太网技术。另外,SDH 传输的连续码流以帧为单位,读取数据帧中的有效数据需要实现精准的时隙同步;而以太网传输数据为非连续码流,读取数据包有效数据无需采用精准同步方式。因此,实现 SDH 通信网络的半实物仿真往往无法利用商业化的网络设备,而需要根据业务类型和仿真目标独立开发相关的网络设备,其复杂度和难度要远大于基于以太网的半实物仿真。

另外,目前没有能够准确反映保护、安全稳定控制装置(简称稳控装置)性能的仿真模型,同时也没有反映保护稳控通信规约的模型,因此要实现稳控系统在通信中断、误码等故障情况时的精确仿真,就需要设计包括保护稳控装置实物和与保护稳控系统相关的通信设备实物的半实物仿真系统。由此本文提出了一种基于实时数字仿真器(RTDS)与 QualNet 的电力和通信半实物联合仿真系统,实现了 SDH 等通信设备、稳控装置及其他电力二次控制设备实物的接入。

1 电网和通信网半实物联合仿真系统的架构

在电网的保护稳控系统中,一般采用基于 SDH 的专网点对点的通信方式。SDH 为各保护稳控业务分配 2 Mbit/s 的业务通道,根据 SDH 数据的传输特性,该通道为点对点的专线通道,带宽固定,通信数据流量固定,当通信业务确定后,在通信正常时其延时和误码指标变化小。

通信通道的状态决定了电力系统控制信号的传输状态。例如:通信通道中断时,控制信号随之中断或延时增大(有备用通道时);通信通道延时增大,控制信号的控制延时也会增大;通信通道误码率增大,导致电力设备的丢包率相应增加(主动丢弃含误码的数据包),造成控制延时增大的可能性变大^[7]。

根据 SDH 传输的特性,以及通信通道状态对电力系统控制的影响方式,本文提出了基于 RTDS 和 QualNet,并能允许 SDH 设备实物和电力二次控制设备实物接入的电网和通信网半实物联合仿真系统的整体架构,如图 1 所示。

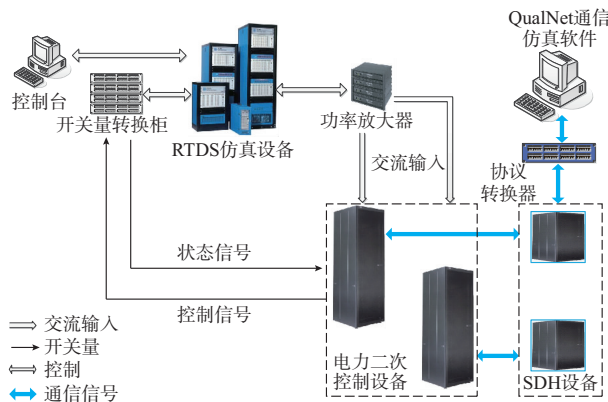


图 1 半实物联合仿真系统架构
Fig.1 Architecture of hardware-in-the-loop co-simulation system

图 1 中主要包括通信系统仿真环境(QualNet 仿真软件)、电网仿真环境(RTDS)、SDH 设备实物、通信协议转换器和电力二次设备单元(如保护和稳控装置)等五部分。半实物仿真系统采用实时同步,设备间的数据交互应满足实时性要求,设备的数据包处理能力可以达到每 0.833 ms 处理一个数据包(电力系统采样频率为 1 200 Hz)。

上述半实物仿真系统框架不仅可以对电力系统和通信系统的复合故障进行连续的联合仿真,还可以用于对电网的控制策略有效性分析和修正,更可用于电力或通信设备的检测和对通信协议的分析校验。

2 电网和通信网半实物联合仿真的接口设计

半实物仿真一般采用实时仿真技术,即仿真模型的事件标尺和自然事件标尺相同。这就要求实物与仿真系统间的接口数据处理的高效和实时性,并能够完成实物设备信号到仿真数据的变换功能。在电网和通信网半实物仿真系统中,实物与通信仿真软件的接口类型主要有 3 种:基于模拟与仿真的高层体系架构(HLA)接口^[8-9]、基于仿真软件实时数据接口(SITL)^[10]和基于外部系统访问的自定义半实物仿真接口^[11]。

在本文提出的电网和通信网半实物联合仿真系统中,由于稳控装置间的信息传输通道为基于 SDH 的 E1 通道,传输的数据进行了扩频编码,数据帧格式为高级数据链路控制协议(HDLC),而非标准的传输控制协议/网际协议(TCP/IP)数据格式,因此不能简单采用 HLA 接口和 SITL 接口模式,而需要基于电力二次设备的数据输入输出格式自定义半实物仿真接口。

2.1 自定义半实物仿真系统接口设计

自定义的半实物仿真接口主要包括两部分:基于物理通信通道的协议转换器(通信通道接口)和仿真软件的网络接口(SITL 接口)。

1) 协议转换器

基于物理通信通道的协议转换器可以根据需要转换的数据类型和编码方式灵活选择,包括:路由器、E1 转以太网协议转换器等。其中,路由器可以实现一般通用的编码方式和广泛使用的标准协议的协议转换,如 TCP/IP 协议、HDLC 协议、X.25 协议、帧中继协议、点到点协议(PPP)、综合业务数字网(ISDN)协议等,通过桥接、隧道等模式可以实现真实网络和虚拟网络间的数据互通。

而对于与以太网数据传输方式完全不同的 SDH,则需要设计相应的 E1 转以太网协议转换器,实现将 SDH 的 E1 通道的数据帧转换成计算机网卡可以接收的以太网数据包。由于计算机不能直接接收处理具有严格时隙同步要求,以及非 TCP/IP 数据包格式的 E1 数据帧,同时稳控装置输出的 E1 通道数据格式依据了国家电网公司的 Q/GDW 11356—2014《电网安全自动装置标准化设计规范》的要求定义的私有通信协议,并进行了线路扩频编码,难以与其他商用网络设备兼容,因此应根据现有的用于稳控系统 E1 通道通信的通信设备设计协议转换器。该协议转换器包括 HDB3 物理层编码/解码、1B4B 扩频编码/译码装置,以及 IP 数据包封装传输装置(2 MB/以太网光电转换装置),实现稳控 E1 通道规约到 IEC 60870-5-104 规约的协议转换。首先使用设备时钟与输入的码流对时,实现时隙同步;然后经过 HDB3 物理层解码后,由现场可编程门阵列(FPGA)芯片解码器对扩频编码进行解码,恢复 HDLC 数据帧;通过高速 CPU 芯片读出数据帧中的有效数据并进行差错校验;将合格的有效数据重新封装为符合 IEC 60870-5-104 的 IP 数据包,以 SOCKET 用户数据报协议(UDP)模式输出。

2) 仿真软件的网络接口

仿真软件的网络接口采用 SITL 接口技术,通过仿真计算机网卡接收/发出真实 IP 数据包,其工作流程如图 2 所示。在仿真软件中设置虚拟网络节点,该节点用于连接外部真实网络节点。当真实节点输出的标准 IP 数据包通过仿真计算机网卡输入通信仿真软件时,形成真实节点 IP 与虚拟节点 IP 的映射,通过对数据包进行捕获、转换、重构,实现将真实网络节点数据注入通信仿真软件。当仿真软件中的虚拟节点输出数据包时,通过对数据包转换,由仿真计算机网卡输出到真实网络节点。

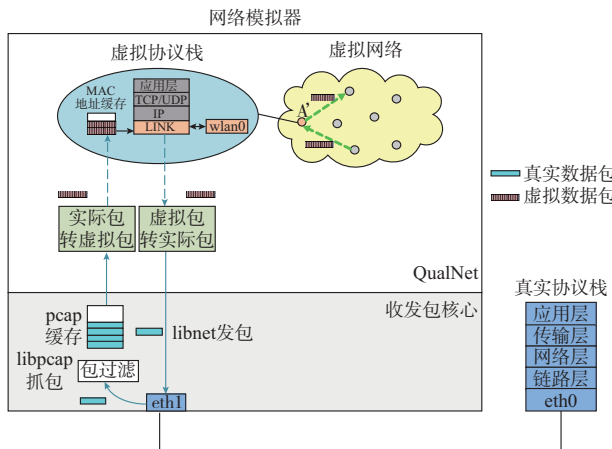


图 2 通信仿真软件的半实物接口工作流程
Fig.2 Procedure of hardware-in-the-loop interface for communication simulator

2.2 半实物仿真系统固有延时分析

由于半实物仿真系统要实现的是实时仿真,因而仿真系统的固有延时会对仿真系统的可靠性、准确性有较大的影响。半实物仿真系统的固有延时主要来自自定义半实物仿真系统接口。自定义半实物仿真系统接口由协议转换器和仿真软件的网络接口两部分组成,所以半实物仿真系统的固有延时也是由这两部分的延时组成的。

1) 协议转换器的延时

E1 转以太网协议转换器会有一个转换延时(设为 T_c)。当数据包输出为 48 B 时,对应扩频后的数据流量为 1 536 bit,考虑到传输通道带宽为 2 Mbit/s,因此,协议转换器接收一个完整数据包的时间小于等于 0.768 ms;另外,稳控数据包的发送频率为 0.833 ms/包,为避免出现稳控数据包丢包,以及数据包在协议转换器上的堆积现象发生,协议转换器的转换延时应小于 1.667 ms(对应于 1 个数据包在接收缓冲器,1 个数据包在发送缓冲器)。综上所述,协议转换器的延时应在 0.768~1.667 ms 之间。

2) 仿真软件的网络接口的延时

网络中真实的数据包通过 SITL 接口转换成虚拟通信网的数据包时会有一定的转换延时(设为 T_i)。该延时与数据包的大小密切相关。由于稳控装置输出的数据包数据量很小,不超过 48 B,通过实测,不同大小数据包的网络接口转换延时见表 1。

3) 固有延时的计算

考虑到信号需要从实物到通信仿真软件,然后从通信仿真软件输出到实物,因此半实物仿真系统的固有延时 T_{total} 的计算公式为:

$$T_{total} = 2T_i + 2T_c$$

表 1 通信仿真软件的接口延时
Table 1 Interface latency of communication simulation software

序号	数据包长度/B	接口延时/ms
1	24	0.65
2	48	1.00

因此,通过计算,当稳控数据包大小为 48 B 时,半实物仿真系统的固有延时 T_{total} 在 3.536 ~ 5.334 ms 之间。

3 电网和通信网半实物联合仿真系统的实现

半实物仿真系统所采用的通信仿真软件为 QualNet。QualNet 是一款高性能的网络模拟系统,可用于模拟分析无线网络、有线网络、混合网络及网络设备的性能;能够实现实时仿真、实现并行计算;支持多种并行计算环境;能实现真实数据包在虚拟网中传输;能实现预优化的协议模型等^[10]。像所有的通信仿真软件一样,QualNet 也没有 SDH 模型。为了实现保护和稳控的通信功能的仿真,通过在 QualNet 上进行二次开发,设计了 SDH 网络模型,可以进行基于光纤网络的 SDH 仿真,实现自愈环保护、通信故障模拟功能,提供各通信通道的延时和状态信息等。

半实物仿真系统所采用的电力仿真工具为 RTDS。RTDS 是一种纯数字连续实时电力仿真系统,通过大量的输入/输出(I/O)接口可以实现高速的数模转换,从而使得实际的保护设备、控制设备、测量设备等电力二次设备可以与 RTDS 中仿真的虚拟电力系统进行交互;RTDS 输出的微弱模拟信号通过功率放大器放大后,变成可以由稳控装置采样的模拟信号;RTDS 输出的状态量通过开关量转换柜转换成稳控装置能采样的状态量,而稳控装置输出的控制信号也通过开关量转换柜转换成 RTDS 的数字输入信号^[12]。

硬件设备包括:保护、稳控装置等电力二次控制设备;SDH、路由器等通信设备;协议转换装置等。

下面以实现稳控系统闭环控制联合仿真功能的平台为例,介绍具体的仿真流程(如图 3 所示)。

在半实物仿真过程中,RTDS 输出的电压、电流、频率等模拟信号;稳控装置配置有离线或在线追加制定的控制策略,稳控装置主站通过采样、分析 RTDS 输出的模拟信号,与预先存储在稳控装置的运行方式进行比对,匹配到相应的离线或在线追加控制策略,并向控制子站发出相应的控制指令(如切机指令、切负荷指令等);控制指令通过 E1 通道经由 SDH 设备实物后输出到协议转换器;控制指令

通过协议转换器译码和封装后,以 SOCKET UDP 数据包形式发送给通信仿真系统;通信仿真系统采用隧道模式将数据包输入虚拟仿真网络中;由通信仿真的控制平台管理通信仿真,包括:通信故障的设置、通信误码的生成等;经过通信延时、误码等仿真后的数据包经网卡输出,再由协议转换器重新转换后,加载到 E1 数据帧中,通过 E1 通道发送给控制子站,并由控制子站执行,执行的结果反馈回 RTDS。最后形成一个完整的包括电网和通信网的闭环控制仿真。

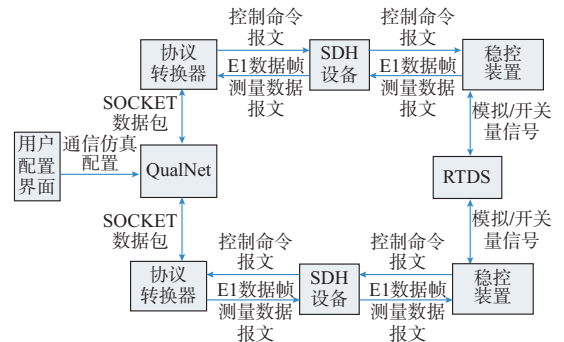


图 3 闭环控制的半实物联合仿真
Fig.3 Hardware-in-the-loop co-simulation by closed-loop control

4 半实物仿真系统测试和算例分析

4.1 半实物仿真系统测试

本文实现的联合仿真系统在电网侧仿真和通信侧仿真分别采用了商用的 RTDS 和 QualNet 仿真工具,因而其准确性是有保障的。平台可以实现实物电力二次控制装置(如保护和稳控装置)和实物通信装置(如 SDH、路由器)的接入,因而可以达到比纯数字仿真更好的仿真精度。由于半实物仿真系统要实现的是实时仿真,因而仿真系统的固有延时会对其仿真系统的可靠性、准确性有较大的影响,为确保半实物仿真系统准确性和有效性,需要对仿真系统的固有延时进行测试。为此,将该平台与一个简化的真实网络做通信延时的对比验证,系统拓扑如图 4 所示。由全球定位系统(GPS)校时的稳控装置发送指令,对比指令在真实网络和半实物仿真网络中的传输延时,两者的延时差就是仿真系统的固有延时。

其中真实网络场景是:用很短的尾纤直接连接 SDH 的光口,测试系统的整体延时。半实物仿真网络场景是:在 QualNet 仿真软件中建立相应的接口直连链路,并通过协议转换器与 SDH 设备连接,测试半实物仿真系统的整体延时。表 2 中分别列出稳控输出 24 B 和 48 B 数据包时,半实物仿真网络场景和真实网络场景的延时差。测试共进行了 3 次。

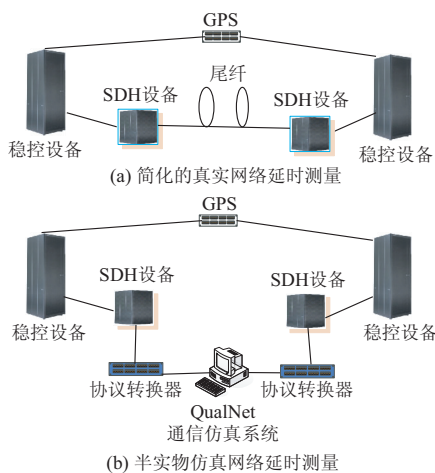


图4 半实物联合仿真系统固有延时测试
Fig.4 Inherent time-delay testing for hardware-in-the-loop co-simulation system

表2 半实物仿真系统的固有延时测试结果
Table 2 Testing results of inherent time-delay for hardware-in-the-loop simulation system

序号	半实物仿真网络固有延时/ms	
	24 B 数据包	48 B 数据包
1	3.20	5.05
2	3.08	5.12
3	3.10	4.91

由对比结果可知,根据稳控数据包的大小不同,半实物仿真系统的接口固有延时在 3~5 ms 之间。由于实际系统中,稳控系统的动作时间超过 200 ms,因此半实物仿真系统接口延时对控制结果的影响可以忽略。另外,考虑到在稳控数据包大小相同时,半实物仿真系统的固有延时变化不大,因此可以通过在 RTDS 中调整断路器的动作时间来补偿半实物仿真系统的固有延时,从而获得更好的仿真结果。

4.2 算例分析

4.2.1 算例简介

为研究通信误码对稳控系统的影响,本文采用该电网和通信网半实物联合仿真系统对华东频率协控系统(以下简称“协控系统”)进行了闭环仿真,并分析了通信误码对稳控装置及系统的影响。

通信网采用 SDH 通信方式,SDH 光纤通信网以环形拓扑为主,部分区域的通信拓扑如图 5 所示,电力设备通过 E1 通道接入 SDH 网络。SDH 设备实物为烽火的 IBAS-180(传输速率 622 Mbit/s)。协议转换装置是为将 E1 数据帧转换为以太网数据包以实现半实物联合仿真而专门开发的网络设备。

协控系统架构如图 6 所示。稳控装置分别采用了 SCS-500E 分布式稳定控制装置和 PCS-992 稳定控制装置。

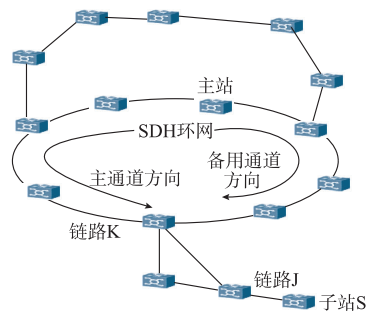


图5 SDH 通信网拓扑
Fig.5 Topology of SDH communication network

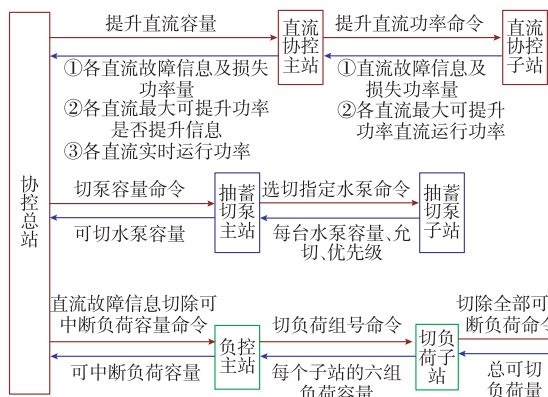


图6 华东协控系统架构
Fig.6 Framework of East China frequency coordinated control system

4.2.2 结果分析

结合上述仿真模型,可以验证通信误码率对稳控装置及电力系统的影响。

仿真的场景包括电力故障和通信故障。通信故障场景为子站 S 连接 SDH 环网的链路 J 误码率增大(根据 ITU-T G.821 标准的定义“严重误码秒”事件为:如果 1 s 的时间周期内误码率大于等于 1×10^{-3} ;如果连续出现 10 个严重误码秒(SES)事件,则 SDH 不可用秒(UAS)事件发生^[13]),见图 5。

电力故障场景为:宾金直流双极闭锁,直流最大提升 2000 MW,抽蓄最大可切量 5 829 MW,负荷不可切。根据通信故障场景中误码率的不同分别对应 3 种仿真场景,分别为:①场景 1——宾金直流双极闭锁,链路 J 通信正常情况(误码率为 7×10^{-7});②场景 2——宾金直流双极闭锁,链路 J 通信误码率异常(误码率为 1.25×10^{-3});③场景 3——宾金直流双极闭锁,链路 J 通信误码率异常(误码率为 $1.564 8 \times 10^{-3}$)。

在 3 种仿真场景下,有 4 个仿真结果。其中对应场景 2,有两种不同的仿真结果。结果如下。

1)结果 1(对应场景 1):电力系统功率损失 7 439 MW,直流提升 2 000 MW,切抽蓄

3 939 MW。

2)结果 2(对应场景 2):直流协控主站与直流协控子站间通信通道异常,功率损失 7 442 MW,提升直流 0 MW,切抽蓄 5 829 MW。

3)结果 3(对应场景 2):直流协控主站与直流协控子站间通信通道无异常,功率损失 7 442 MW,直流提升 2 000 MW,切抽蓄 3 942 MW。

4)结果 4(对应场景 3):直流协控主站与直流协控子站间通信通道异常,功率损失 7 440 MW,提升直流 0 MW,切抽蓄 5 829 MW。

上述 4 种情况下的 RTDS 仿真的频率响应曲线如图 7 所示。

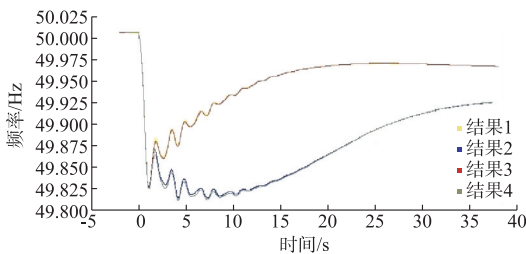


图 7 通信误码下的仿真频率响应曲线
Fig.7 Simulation frequency response curves of communication bit-errors

直流执行站记录的直流动作情况如下。

1)结果 1:直流提升动作时间为 1 133.44 ms。

2)结果 2:误码引起数据传输中断(非链路中断,因此未进行通道切换,和直接中断不同),无直流提升动作信号。

3)结果 3:数据传输未中断,直流提升动作时间为 1 232 ms。

4)结果 4:子站 S 稳控装置显示设备通信异常,无直流提升动作信号。

通过分析仿真结果,可以看出:从仿真结果的频率曲线上看,通信通道的误码率增大,频率控制的延时增大,从而造成对频率动态响应的影响增大;当误码率达到一定值时,会造成控制的不确定性。例如:当链路 J 通信误码率为 1.25×10^{-3} 时,出现了直流提升能动作和不能动作两种控制结果;通信通道误码率越大,出现电力设备间通信通道异常的概率越大,引起策略失效的概率越大。

由于半实物联合仿真系统中接入了电力二次设备实物,相较于数字模型,其具体的性能参数可以在半实物仿真过程中精确模拟出来。通过仿真,可以精细化确定不同通信误码率对频率控制的影响,以及发现误码率的变化对稳控装置实物、稳控策略选取,以及稳控策略的执行效果的影响。例如,在链路误码率为 1.25×10^{-3} 时,稳控装置出现了控制不确定的现象,而这种与物理设备性能密切相关的现象

是纯数字仿真无法实现的。

5 结语

本文提出了一种基于 RTDS 与 QualNet 的电网和通信网半实物联合仿真方法和总体框架,开发了面向 SDH 网络半实物仿真的软件接口和通信协议转换器,并基于该框架用 RTDS、稳控装置、SDH 设备实物、通信协议转换器和通信仿真软件 QualNet 开发用于电网稳控系统仿真的电网和通信网半实物联合仿真系统,研究了通信通道误码对电网稳控系统的影响。采用该半实物仿真系统框架,不仅能基于输配电网不同的分析和控制功能及不同的通信方式(SDH、EPON、无线等),实现多种电力设备和通信设备的灵活搭配组合,满足不同仿真场景的需求,还可基于现有半实物仿真系统实现以下用途。

1)可以实现电力系统和通信系统的复合故障的连续联合仿真,研究连锁故障的演化过程,为系统安全控制策略研究提供有效的校验和测试工具。

2)可用于电力或通信设备的校验和检测。通过半实物仿真系统,模拟真实的设备运行环境,使设备能在满足系统整体性能指标的环境中得到检验,提高设备设计的可靠性和研制质量。

3)可以用于新的通信协议和应用的分析检验,为新的电力业务的设计开发提供真实的网络和设备环境。

4)可用于操作演练和培训,使被培训人员获得更直观的感受,并不损害电力系统的条件下,使其获得相应的操作经验。

5)可用于网络安全的评估和测试,实现数字仿真所无法实现的真实网络攻击行为的攻防演练,以及评估网络的安全性。

考虑到目前的半实物仿真系统框架中,协议转换器和仿真网络接口在进行数据转换时还存在一定的延时,在后续的工作中,将研究开发更高效的专用协议转换器,实现不同通信规约数据的高效转换,以及优化仿真网络接口,实现数据包高速缓存和低延时传输。

参考文献

- [1] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J].电力系统自动化,2011,35(16):1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [2] 汤奕,王琦,倪明,等.电力和信息通信系统混合仿真方法综述[J].电力系统自动化,2015,39(23):33-42. DOI: 10.7500/AEPS20150331035.

- TANG Yi, WANG Qi, NI Ming, et al. Review on the hybrid simulation methods for power and communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 33-42. DOI: 10.7500/AEPS20150331035.
- [3] 汤奕,王琦,郇伟,等.基于 OPAL-RT 和 OPNET 的电力信息物理系统实时仿真[J].电力系统自动化,2016,40(23):15-21.DOI: 10.7500/AEPS20160515020.
- TANG Yi, WANG Qi, TAI Wei, et al. Real-time simulation of cyber-physical power system based on OPAL-RT and OPNET [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 15-21. DOI: 10.7500/AEPS20160515020.
- [4] OGAN R T. Hardware-in-the-loop simulation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 12(1): 73-89.
- [5] LIU R, VELLAITHURAI C, BISWAS S S, et al. Analyzing the cyber-physical impact of cyber events on the power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(5): 2444-2453.
- [6] LUO Z, ALAM M, HONG S H, et al. A hardware-in-the-loop simulator for demand response energy management in industrial facilities[C]// 2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems, 2015, Piscataway, NJ, USA: 1-6.
- [7] 童和钦,倪明,李悦岑,等.电网和通信网综合仿真研究[J].南方电网技术,2016,10(5):117-122.
- TONG Heqin, NI Ming, LI Yuecen, et al. Study on hybrid simulation of power system and communication network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 117-122.
- [8] JABLKOWSKI B, SPINCZYK O, KUECH M, et al. A hardware-in-the-loop co-simulation architecture for power system applications in virtual execution environments [C]// IEEE Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems, 2014, Berlin, Germany: 1-6.
- [9] PALENSKY P, MEER A V D, LOPEZ C, et al. Applied co-simulation of intelligent power systems: implementing hybrid simulators for complex power systems [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(2):6-21.
- [10] HAGELSTEIN B, ABOLHASAN M, FRANKLIN D, et al. Analytic performance model for state-based MAC layer cooperative retransmission protocols[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(1): 32-44.
- [11] YANG J, LI Y. Hardware-in-the-loop simulation of communication networks[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(3): 96-101.
- [12] ZHANG C, VIJAPURAPU V K, SRIVASTAVA A K, et al. Hardware-in-the-loop simulation of distance relay using RTDS [C]// Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference, July 16-19, 2007, San Diego, CA, USA: 149-154.
- [13] International Telecommunication Union. Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an integrated services digital network: ITU-T G.821[S]. 2003.

童和钦(1975—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统通信、电网信息物理系统等。E-mail: tongheqin@sgepri.sgcc.com.cn

倪明(1969—),男,通信作者,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析及控制、电网信息物理系统等。E-mail: ni-ming@sgepri.sgcc.com.cn

李满礼(1989—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制、电力信息物理系统。E-mail: limanli@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

Hardware-in-the-loop Co-simulation System for Power Grid and Communication Network Based on RTDS and QualNet

TONG Heqin^{1,2,3}, NI Ming^{1,2,3}, LI Manli^{1,2,3}, SI Qinghua^{1,2,3}, MIAO Yuancheng⁴, GONG Peng⁵

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

4. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China;

5. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As the factors of interruption, latency and bit-error-rate (BER) of the communication play a very important role in the security and stability control of power system for the smart grid and the Energy Internet. So it is important to study the interaction between the power system and the communication network, and the hardware-in-the-loop co-simulation is a very useful tool for this kind of study. Based on the analysis of dynamic features and the characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) network, a framework of a hardware-in-the-loop co-simulation system for power system and communication network using the real time digital system (RTDS) and QualNet are introduced. Then, a hardware-in-the-loop co-simulation system for the power system and communication network with power system secondary control equipment and SDH equipment is developed to study the impact of communication failure on the power stability control system. Tests are done to measure the inherent latency of the developed co-simulation system to verify the reliability. Finally, the frequency coordinated control system in East China grid territory is used as an example, and a close-loop simulation is performed in the co-simulation system to validate the impact of the communication BER on the functions of the stability control system and the control effect.

This work is supported by Jiangsu Economic and Information Technology Commission and State Grid Corporation of China.

Key words: hardware-in-the-loop co-simulation; power grid and communication network co-simulation; synchronous digital hierarchy network; stability control system