



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111190357 A

(43)申请公布日 2020.05.22

(21)申请号 202010030932.6

(22)申请日 2020.01.13

(71)申请人 东南大学

地址 211189 江苏省南京市江宁区东南大学路2号

(72)发明人 吴在军 茅明明 成晟 全相军
胡秦然 窦晓波

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 王安琪

(51)Int.Cl.

G05B 17/02(2006.01)

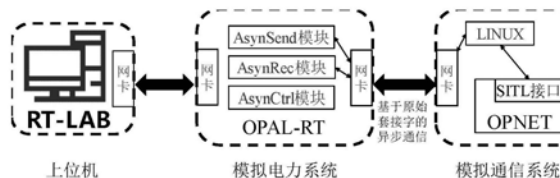
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,包括如下步骤:(1)采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信系统进行建模,构建实时混合仿真架构;(2)遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制;(3)构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延。本发明基于原始套接字的异步通信数据交互机制,能够减小仿真平台的固有时延。



1. 一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信系统进行建模,构建实时混合仿真架构;

(2) 遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制;

(3) 构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延。

2. 如权利要求1所述的基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,其特征在于,步骤(1)中,采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信系统进行建模,构建实时混合仿真架构具体包括如下步骤:

(11) 在实时仿真器OPAL-RT的上位机软件RT-LAB中搭建基于Simulink的电力系统电磁暂态模型,OPAL-RT以异步通信的方式通过以太网与OPNET主机交互数据,异步通信功能由RT-LAB模型库的三个子模块实现,分别是负责数据控制的OpAsyncCenCtrl模块、负责数据接收的OpAsyncRecv和负责数据发送的OpAsyncSend模块;

(12) 于LINUX操作系统中,在OPNET软件中从信息网络的进程层、节点层和网络层这三个层次对电力通信网络进行分层建模;根据IEC61850标准,对信息网络中的不同IED节点进行基于C语言的详细建模,利用SITL接口模块作为OPNET主机与OPAL-RT的交互接口;SITL接口模块在内存上开辟缓存区用于缓冲数据,它的时延由队列时延和转换时延两部分组成;OPNET在LINUX操作系统上运行能够准确地模拟电力系统和通信系统的交互作用;

(13) 电力信息物理系统仿真平台存在固有时延;固有时延T与平台的硬件设备有关,表示为:

$$T = t_{proc} + t_{line} + t_{queue} + t_{trans} + t_s$$

其中, t_{proc} 表示数据处理时延, t_{line} 表示线路时延, t_{queue} 表示操作系统时延、 t_{trans} 表示SITL队列时延, t_s 表示SITL转换时延。

3. 如权利要求1所述的基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,其特征在于,步骤(2)中,遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制具体包括如下步骤:

(21) IEC61850标准中以OSI参考模型作为通信协议的基础,以SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文在发布者/订阅者机制下进行数据交换,从应用层直接映射数据链路层;

(22) 采用原始套接字SOCK_RAW构建实时保证的通信服务映射机制,原始套接字接收网卡上的数据帧;应用层使用SOCK_RAW和AF_PACKET类型的协议族直接从用户空间映射到网络空间的网络核心,用于收发二层报文,与SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文通信协议相符;

(23) 对OPNET主机进行设置,关闭防火墙并禁用其他网络适配器。

4. 如权利要求1所述的基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,其特征在于,步骤(3)中,构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延具体包括如下步骤:

(31) 遵循IEC61850标准,构建基于原始套接字的异步通信数据交互机制;OPAL-RT与OPNET之间的数据交互采用IEEE802.1Q协议,通过原始套接字socket(AF_PACKET, SOCK_

RAW,int protocol),直接控制网络核心收发数据包,将电力系统数据发送至OPNET所在主机的网卡;OPNET主机关断防火墙和其他网络适配器,网卡收到的真实数据包经过操作系统,传输至SITL接口进行检测/转换,变成虚拟的数据包,在OPNET主程序中进行仿真;

(32) 编写并在异步通信控制模块OpAsyncCenCtrl模块中调用基于原始套接字socket(AF_PACKET,SOCK_RAW,int protocol)的可执行文件,包括C源代码、h头文件和makefile编译文件;其中,C源代码用于实现自定义异步程序所需的特定算法,包括初始化、发送循环、接收循环和关闭四个部分;h头文件用于定义GOOSE、SV等报文结构与其他预处理块;Makefile编译文件用于将C源代码转换为OPAL-RT能执行的可编译文件。

一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力信息物理系统技术领域,尤其是一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法。

背景技术

[0002] 随着相量测量单元(PMU/ μ PMU)、变电站自动化、数据采集和监视控制系统(SCADA)、广域测量系统(WAMS)以及高级测量装置(AMI)等大量先进技术的快速发展和广泛应用,以及电力系统和信息系统日益复杂的耦合作用,传统电力系统已经逐渐发展为一种新型的电力信息物理系统(Cyber Physical Power System, CPPS),系统感知能力和控制能力得到增强,但通信网络存在的固有脆弱性也引入了风险:通信系统存在时延、误码和丢包等固有缺点,可能导致电力系统的扰动无法及时反馈,影响电力系统的可靠运行,甚至导致故障情况下系统状态恶化;通信网络提供了网络攻击的途径,攻击者可以通过坏数据注入攻击、拒绝服务攻击等恶意行为,破坏电力系统的稳定运行,如2015年乌克兰电网遭受网络攻击发生的特大停电事故。

[0003] 为了探索电力系统和信息系统的交互影响机理、研究电力信息物理系统安全问题,需要构建一个实时仿真平台,以提供真实可靠的仿真环境,在此平台上开发、验证相适应的建模和分析方法。

[0004] 考虑到电力系统仿真连续性和信息系统仿真离散型的异构特征,国内外学者提出了多种电力信息物理系统混合仿真平台,对于集群控制算法验证、大电网协调控制系统仿真等时效性要求低的场景,仿真效果良好。但是这些仿真平台存在较大的固有时延,在时效性要求高的场景(如智能变电站的过程层-间隔层通信)中不能忽略;并且这些平台没有考虑电力通信标准的限制。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题在于,提供一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,能够减小仿真平台的固有时延。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台的实现方法,包括如下步骤:

[0007] (1) 采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信系统进行建模,构建实时混合仿真架构;

[0008] (2) 遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制;

[0009] (3) 构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延。

[0010] 优选的,步骤(1)中,采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信

系统进行建模,构建实时混合仿真架构具体包括如下步骤:

[0011] (11) 在实时仿真器OPAL-RT的上位机软件RT-LAB中搭建基于Simulink的电力系统电磁暂态模型,OPAL-RT以异步通信的方式通过以太网与OPNET主机交互数据,异步通信功能由RT-LAB模型库的三个子模块实现,分别是负责数据控制的OpAsyncCenCtrl模块、负责数据接收的OpAsyncRecv和负责数据发送的OpAsyncSend模块;

[0012] (12) 于LINUX操作系统中,在OPNET软件中从信息网络的进程层、节点层和网络层这三个层次对电力通信网络进行分层建模;根据IEC61850标准,对信息网络中的不同IED节点进行基于C语言的详细建模,利用SITL接口模块作为OPNET主机与OPAL-RT的交互接口;SITL接口模块本质上是一个队列模块,在内存上开辟缓存区用于缓冲数据,它的时延由队列时延和转换时延两部分组成,受机器CPU利用率、外部数据包长度因素影响,无法避免,在高效要求的仿真场景中也不能忽略;OPNET在LINUX操作系统上运行性能比Windows好,具有更小的SITL接口时延,和更小的操作系统数据映射时延,因此可以更准确地模拟电力系统和通信系统的交互作用;

[0013] (13) 电力信息物理系统仿真平台存在固有时延;固有时延 T 与平台的硬件设备有关,无法避免,由五部分组成,表示为:

$$[0014] \quad T = t_{\text{proc}} + t_{\text{line}} + t_{\text{queue}} + t_{\text{trans}} + t_s$$

[0015] 其中, t_{proc} 表示数据处理时延, t_{line} 表示线路时延, t_{queue} 表示操作系统时延、 t_{trans} 表示SITL队列时延, t_s 表示SITL转换时延。

[0016] 优选的,步骤(2)中,遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制具体包括如下步骤:

[0017] (21) IEC61850标准中以OSI参考模型作为通信协议的基础,为满足电力信息物理系统对通信系统时效性、安全性的特殊需求,以SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文在发布者/订阅者机制下进行数据交换,从应用层直接映射数据链路层,避免TCP、IP、TCP/IP等报文格式的封装和解封;

[0018] (22) 采用原始套接字SOCK_RAW构建实时保证的通信服务映射机制;和标准套接字不同,原始套接字接收网卡上的数据帧:应用层使用SOCK_RAW和AF_PACKET类型的协议族直接从用户空间映射到网络空间的网络核心,用于收发二层报文,与SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文通信协议相符;

[0019] (23) 为更好地保证通信服务映射机制的实时性能,需要对OPNET主机进行设置,关断防火墙并禁用其他网络适配器;一方面,IEC61850标准下,智能变电站过程层-间隔层通信一般不经过防火墙过滤,这样设置更接近真实场景;另一方面,普通防火墙不一定兼容仿真中数据包所遵循的工业协议,关断防火墙、禁用其他网络适配器,避免仿真平台的不稳定性引入的数据包拦截情况。

[0020] 优选的,步骤(3)中,构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延具体包括如下步骤:

[0021] (31) 遵循IEC61850标准,构建基于原始套接字的异步通信数据交互机制;OPAL-RT与OPNET之间的数据交互采用IEEE802.1Q协议,通过原始套接字socket (AF_PACKET, SOCK_RAW, int protocol),直接控制网络核心收发数据包,将电力系统数据发送至OPNET所在主机的网卡;OPNET主机关断防火墙和其他网络适配器,网卡收到的真实数据包经过操作系

统,传输至SITL接口进行检测/转换,变成虚拟的数据包,在OPNET主程序中进行仿真;

[0022] (32) 编写并在异步通信控制模块OpAsyncCenCtrl模块中调用基于原始套接字socket(AF_PACKET,SOCK_RAW,int protocol)的可执行文件,包括C源代码、h头文件和makefile编译文件;其中,C源代码用于实现自定义异步程序所需的特定算法,包括初始化、发送循环、接收循环和关闭四个部分;h头文件用于定义GOOSE、SV等报文结构与其他预处理块;Makefile编译文件用于将C源代码转换为OPAL-RT能执行的可编译文件。

[0023] 本发明的有益效果为:本发明基于原始套接字的异步通信数据交互机制,能够减小仿真平台的固有时延;基于LINUX系统减小操作系统时延、SITL队列时延 t_{trans} 和SITL转换时延 t_s ,利用OPAL-RT多以太网口避免引入设备时延并减小线路时延 t_{line} ,基于原始套接字的数据交互机制减小数据处理时延 t_{proc} ,从而减小整个平台引入的固有时延;并且本发明遵循IEC61850标准,仿真环境更加真实可靠,可以用于模拟智能变电站过程层-间隔层通信等时效性较高的场景,研究电力-信息动态耦合作用,分析时延、丢包、误码等对电力系统运行的影响等。

附图说明

[0024] 图1为本发明的基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台架构示意图。

[0025] 图2为本发明实时保证的通信服务映射机制示意图。

[0026] 图3为本发明的实时仿真数据交互过程和平台固有时延构成示意图。

[0027] 图4为本发明的基于原始套接字的异步通信方式配置示意图。

具体实施方式

[0028] 本发明提供一种基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台,遵循IEC61850标准建立电力信息系统的信息模型和通信服务模型,并采用实时保证的通信服务映射机制和基于原始套接字的异步数据交互机制,减小电力信息混合仿真系统固有时延,提供更加真实可靠的电力信息物理系统仿真环境。仿真平台的架构如图1所示,实现方法具体包括如下步骤:

[0029] 步骤1:采用实时仿真器OPAL-RT和OPNET软件分别对电力系统和通信系统进行建模,构建实时混合仿真架构,具体包括如下步骤:

[0030] (1) 在实时仿真器OPAL-RT的上位机软件RT-LAB中搭建基于Simulink的电力系统电磁暂态模型。OPAL-RT以异步通信的方式通过以太网与OPNET主机交互数据,异步通信功能由RT-LAB模型库的三个子模块实现,分别是负责数据控制的OpAsyncCenCtrl模块、负责数据接收的OpAsyncRecv和负责数据发送的OpAsyncSend模块。

[0031] (2) 于LINUX操作系统中,在OPNET软件中从信息网络的进程层、节点层和网络层这三个层次对电力通信网络进行分层建模。根据IEC61850标准,对信息网络中的不同IED节点进行基于C语言的详细建模,利用SITL接口模块作为OPNET主机与OPAL-RT的交互接口。SITL接口模块本质上是一个队列模块,在内存上开辟缓存区用于缓冲数据,它的时延由队列时延和转换时延两部分组成,受机器CPU利用率、外部数据包长度等因素影响,无法避免,在高时效性仿真场景中也不能忽略。OPNET在LINUX操作系统上运行性能比Windows好,具有更小的SITL接口时延,和更小的操作系统数据映射时延。

[0032] (3) 电力信息物理系统仿真平台存在固有时延。固有时延 T 与平台的硬件设备有关,无法避免,由五部分组成,表示为:

[0033] $T = t_{proc} + t_{line} + t_{queue} + t_{trans} + t_s$

[0034] 其中, t_{proc} 表示数据处理时延, t_{line} 表示线路时延, t_{queue} 表示操作系统时延、 t_{trans} 表示SITL队列时延, t_s 表示SITL转换时延。

[0035] 本发明的基于原始套接字的电力信息物理系统实时仿真平台架构,利用实时仿真器OPAL-RT的两个网络适配器,分别与上位机RT-LAB和OPNET数据交互,以避免为使用交换机以分发数据包过程引入的时延误差;避免数据全部通过一个网络适配器带来的数据拥堵等影响。

[0036] 步骤2:遵循IEC61850标准的智能变电站过程层-间隔层通信机制,构建仿真架构中实时保证的通信服务映射机制,具体包括如下步骤:

[0037] (1) IEC61850标准中以OSI参考模型作为通信协议的基础,为满足电力信息物理系统对通信系统时效性、安全性的特殊需求,以SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文在发布者/订阅者机制下进行数据交换,从应用层直接映射数据链路层,避免TCP、IP、TCP/IP等报文格式的封装和解封。

[0038] (2) 采用原始套接字SOCK_RAW构建实时保证的通信服务映射机制。如图2所示,左侧标准套接字的通信服务映射机制,右侧为原始套接字的通信服务映射机制。原始套接字可以读取、接收网卡上的数据帧,应用层使用SOCK_RAW和AF_PACKET类型(链路层套接字)的协议族可以直接从用户空间映射到网络空间的网络核心,用于收发二层报文,与SV报文、GOOSE报文为代表的快速报文通信协议相符。

[0039] (3) 为更好地保证通信服务映射机制的是实时性能,需要对OPNET侧计算机进行设置,关断防火墙并禁用其他网络适配器。一方面,IEC61850标准下,智能变电站过程层-间隔层通信一般不经过防火墙过滤,这样设置更接近真实场景;另一方面,普通防火墙不一定兼容仿真中数据包所遵循的工业协议,关断防火墙、禁用其他网络适配器,可以避免仿真平台的不稳定性引入的数据包拦截等情况。

[0040] 步骤3:构建基于原始套接字的异步数据交互机制,减小实时混合仿真平台的固有时延,具体包括如下步骤:

[0041] (1) 遵循IEC61850标准,构建基于原始套接字的异步通信数据交互机制,如图3所示。OPAL-RT与OPNET之间的数据交互采用IEEE802.1Q协议,通过原始套接字socket(AF_PACKET,SOCK_RAW,int protocol),直接控制网络核心收发数据包,将电力系统数据发送至OPNET所在计算机的网卡;OPNET侧计算机关断防火墙和其他网络适配器,网卡收到的真实数据包经过操作系统,传输至SITL接口进行检测/转换,变成虚拟的数据包,在OPNET主程序中进行仿真。

[0042] (2) 编写并在异步通信控制模块OpAsyncCenCtrl模块中调用基于原始套接字socket(AF_PACKET,SOCK_RAW,int protocol)的可执行文件,包括C源代码、h头文件和makefile编译文件,如图4所示。其中,C源代码用于实现自定义异步程序所需的特定算法,包括初始化、发送循环、接收循环和关闭四个部分。h头文件用于定于GOOSE、SV等报文结构与其他预处理块。Makefile编译文件用于将C源代码转换为OPAL-RT能执行的可编译文件。

[0043] 本发明构造的信息物理系统实时仿真平台,基于原始套接字的异步通信数据交互

机制,能够减小电力的固有时延。基于LINUX系统减小操作系统时延、SITL队列时延 t_{trans} 和SITL转换时延 t_s ,利用OPAL-RT多以太网口避免引入设备时延并减小线路时延 t_{line} ,基于原始套接字的数据交互机制减小数据处理时延 t_{proc} ,从而减小整个平台引入的固有时延。并且本发明遵循IEC61850标准,仿真环境更加真实可靠,可以用于模拟智能变电站过程层-间隔层通信等时效性较高的场景,研究电力-信息动态耦合作用,分析时延、丢包、误码等对电力系统运行的影响等。

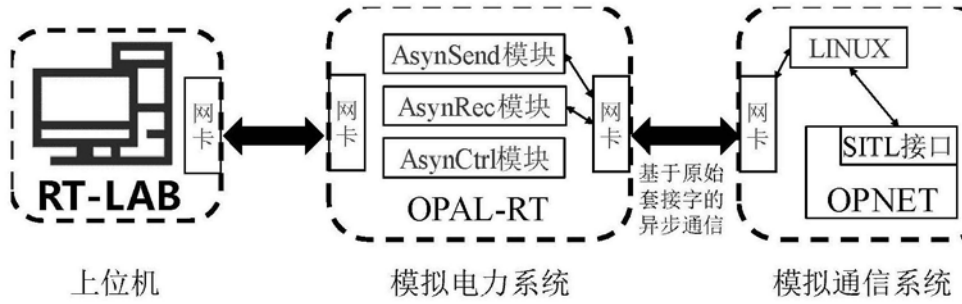


图1

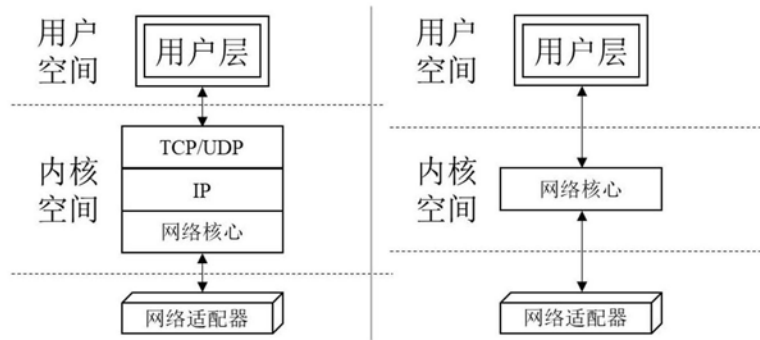


图2

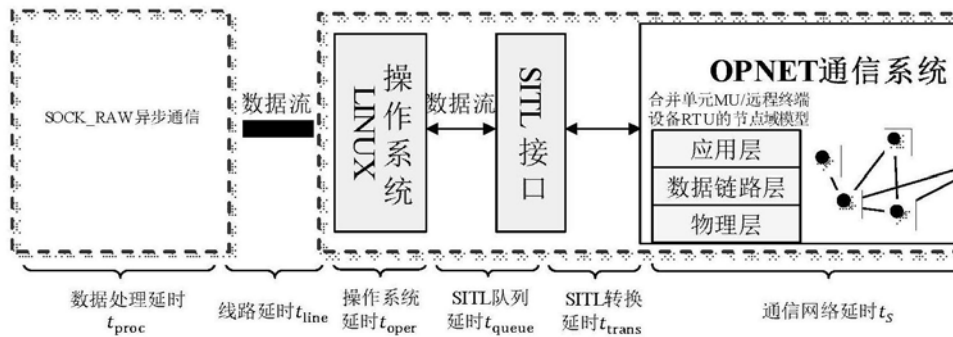


图3

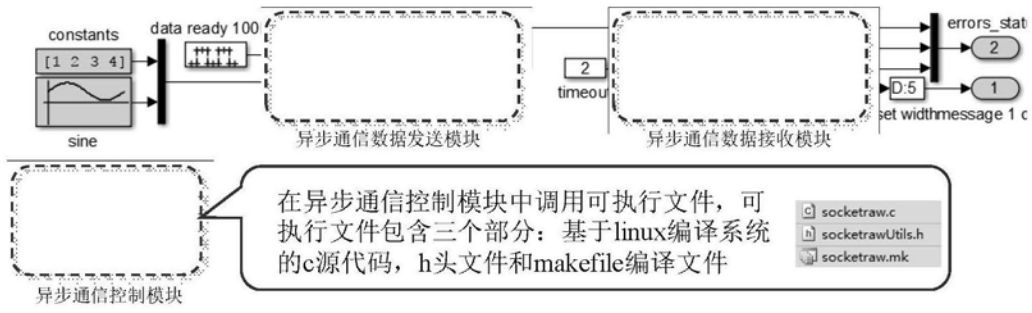


图4