

基于 HLA/Agent 的广域后备保护仿真平台设计

陈国炎, 张哲, 尹项根

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Design of Wide-area Backup Protection Simulation Platform Based on HLA/Agent

CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: To evaluate the performance of a wide-area backup protection algorithm and its influence on power systems after protection operation under a wide-area telecommunication network environment, a synchronous co-simulation platform called WAPSS (wide area protection synchronizing simulator) associated with OPNET and PSCAD/EMTDC was presented based on high-level architecture (HLA) and Agent. The structure of WAPSS platform, the function of important components and the multi-agent design method were discussed. A simulation example was implemented to verify the correctness and availability of the platform. The proposed WAPSS provides an effective simulation tool for engineering implementation of wide-area backup protection.

KEY WORDS: wide-area backup protection; high-level architecture (HLA); synchronous co-simulation; multi-agent system

摘要: 为检验广域后备保护算法在广域通信网络环境下的保护性能和保护动作后对电力系统运行的影响, 开发了一套基于高层体系结构(high-level architecture, HLA)和 Agent 的 OPNET 和 PSCAD/EMTDC 联合同步仿真平台 WAPSS(wide area protection synchronizing simulator)。论述了 WAPSS 平台的总体结构、各重要组成部分的功能和接口方式以及多 Agent 的设计, 最后以一仿真实例验证了平台的正确性和有效性。保护和通信的联合同步仿真平台 WAPSS 为广域后备保护工程实现提供了有效的仿真工具。

关键词: 广域后备保护; 高层体系结构; 联合同步仿真; 多 Agent 系统

0 引言

近年来, 随着广域通信和同步测量技术的迅速

发展, 基于广域信息的新型后备保护的研究受到了广泛关注^[1-7], 已成为智能电网继电保护技术的重要发展方向。广域后备保护(wide area backup protection, WABP)利用电网多点信息进行故障元件的定位和综合跳闸决策, 有助于从根本上解决传统后备保护存在的适应电网复杂运行工况能力差、整定配合困难、动作速度慢、在大负荷转移情况下可能发生连锁动作等技术难题。

广域后备保护系统是由多个变电站的众多智能电子设备通过通信、交互、协作、协同共同完成一次设备的后备保护功能的分布式系统。在构建模式、决策原理和实现技术等方面远较传统后备保护复杂, 特别是涉及广域范围的网络通信, 使得对其进行物理模拟实验研究和性能评估非常困难。因此, 根据广域后备保护的结构和运行特点, 构建集电网故障暂态仿真、网络通信仿真和保护决策算法于一体的联合同步仿真分析平台, 对推动广域后备保护的研究及工程化应用具有非常重要的意义。

迄今, 针对广域后备保护仿真平台已有学者开展了相关研究工作。文献[8-11]开发了一套基于 Agent 的电力系统电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 和机电动态软件 PSLF、通信网络软件 NS2 的集成仿真环境 EPOCHS 平台, 并在 EPOCHS 平台上检验了广域后备保护算法和跳闸策略的正确性。文献[12]从软件技术、应用和引擎性能等 3 个方面对 NS2 和 OPNET 进行了详细的对比, 分析指出: 1) 在技术方面, OPNET 模型库、网络协议等较 NS2 要丰富许多, 方便用户使用; 2) 在应用方面, NS2 较缺乏用于网络建模的图形用户界面(graphical user interface, GUI), 用户的学习周期长且使用中代码

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002, 50877031)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China
(50837002, 50877031).

工作量繁重，不利于用户的二次开发；相比之下，OPNET 图形界面丰富，网络模型全面，且建模所需手动编写的代码量少；3) 在引擎性能方面，随着网络中节点数逐渐增加，OPNET 引擎并行仿真能力发挥效力，其模拟性能的优越性逐渐显现，而 NS2 在大型网络仿真方面的性能却差强人意。WABP 系统的通信包括变电站网络和电力通信网，涉及的网络设备和通信协议众多；OPNET 相对 NS2 在用户使用、二次开发和仿真性能等方面均能更好地适应 WABP 保护仿真研究。

OPNET 提供了 2 种与其他软件实现联合同步仿真的方法，即：1) 调用联盟模块 Cosim；2) 采用 HLA。前者适合于一对一的联合同步仿真，后者适合于一对多的联合同步仿真。为适应将来对广域保护的深入研究及相应功能的仿真软件方便地接入平台，本文研究基于 HLA 体系结构的仿真平台的设计。

软件的开发大多是基于开放式架构，能够不断地更新和演进，以容纳新的模块和组件，满足软件功能研究的需要；同时，也鉴于 WABP 系统的复杂性，采用面向 Agent 的软件开发技术比传统的结构化或面向对象的开发技术更能适应 WABP 的开发需求。毕竟，基于 Agent 的架构提供了一个开放的、不断发展的体系结构，并且 Agent 具有自治性、社会性、反应性和能动性等 4 个典型特征，能够感知环境变化而修改自身的行为，由多个 Agent 之间的通信、协调、协商与协作，达到问题的逐步求解。设计通用的 Agent 主体模型，方便用户将新的 Agent 研究成果^[9-11]快速地移植到仿真平台加以验证和完善，是基于 Agent 软件开发的重要组成部分。

因此，本文采用面向 Agent 的软件设计思想，开发了一套基于 HLA/Agent 体系结构的 OPNET 和 PSCAD/EMTDC 联合同步仿真平台 WAPSS。仿真平台提供了 WABP 设备的动态行为、电网电气量的变化情况和通信网络性能评估等功能，为广域通信环境下 WABP 算法的优劣、通信网络的设计提供了一个有效的仿真工具。

1 WAPSS 平台的总体结构

WAPSS 平台总体结构如图 1 所示，由运行时间支撑环境(runtime infrastructure, RTI)、与 RTI 数据交互的 RTI 代理网关软件、网络仿真软件 OPNET Modeler，以及电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC

以下简称 PSCAD)等 4 部分组成。在 PSCAD 中仿真电力系统一次设备，通过 C 对外接口模块与外部软件实现信息交互。在 OPNET 中仿真电力系统二次设备和通信网络，为每个二次设备设计一个 Agent 实体模型，从而构建多 Agent 分布式智能系统。图 1 中：合并单元(merging unit, MU)接收 PSCAD 的采样值信息；智能终端(smart terminal, ST)接收 PSCAD 的断路器位置信息和向断路器发送控制指令。

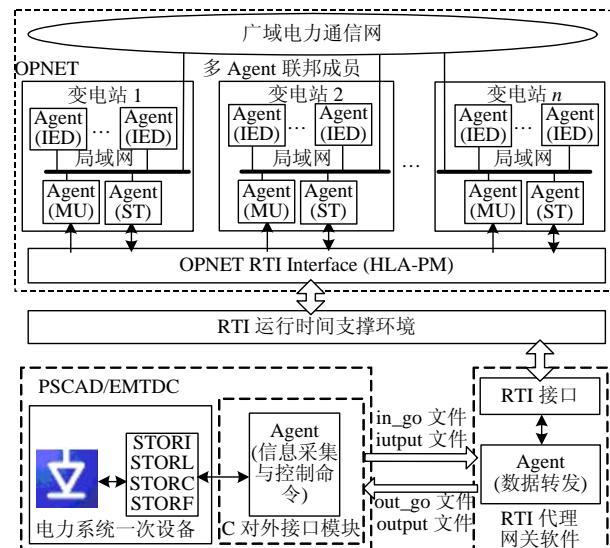


图 1 WAPSS 平台总体结构

Fig. 1 Overall structure of WAPSS platform

C++语言的 RTI 代理网关软件是 PSCAD 和 RTI 间信息交互与时间同步的桥梁。OPNET 上层程序通过调用自带的 RTI 接口模块 HLA-PM，实现 OPNET 和 RTI 间的信息交互以及维护时间的同步。RTI 是 WAPSS 的核心，协调 RTI 代理网关和 HLA-PM 之间的信息交互和时间同步，从而达到 PSCAD 和 OPNET 的联合同步仿真的目的。

2 HLA 功能简介与实现

HLA 是美国国防部颁布的建模与仿真领域的通用高层体系结构。它可以在多个不同的仿真系统之间提供通用的、相对独立的支撑服务，将具体的仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信三者分开，实现多个仿真软件之间的互操作。

一个基于 HLA 的仿真系统可由一个或多个联邦和若干个成员构成。联邦是指用于达到某一特定仿真目的的分布式仿真系统，它由若干个相互作用的联邦成员构成。所有参与联邦运行的应用程序都可以称为联邦成员。图 1 中建立联邦 WAPSS 和

2个联邦成员(即 RTI 代理网关和 OPNET), 联邦成员间的信息交互通过底层 Socket 通信实现。对象是联邦成员的重要组成元素。Agent 实体对象则是构成 Agent 联邦成员的基本单元; 依据建模粒度划分, Agent 联邦成员由不同个数的 Agent 实体对象模型组成。对联邦成员的设计归结为仿真系统中各种实体对象模型的设计。HLA 的主要功能就是为联邦、联邦成员和对象的描述以及彼此的交互提供统一的标准。

HLA 接口标准由 RTI 实现。RTI 为仿真应用提供通用、独立的支撑服务, 包括联邦管理、声明管理、时间管理、对象管理、所有权管理、数据分发管理等, 共涉及包括创建联邦、联邦成员加入或退出联邦执行、联邦成员同步等等 101 个方法^[13]。这些功能接口规范为仿真过程的交互提供了标准。

3 WAPSS 平台各组成部分及其接口的设计

3.1 仿真软件与 RTI 接口的方法

文献[14]提供了 4 种仿真软件与 RTI 的接口方法, 包括: 1) 开发者修改原仿真软件的原代码, 增加 RTI 接口函数, 使其接入 RTI; 2) 如果原仿真软件提供 RTI 接口函数, 开发者可开发新模块或动态链接库调用 RTI 接口函数, 使其接入 RTI; 3) 通过外部的接口程序, 间接接入 RTI; 4) 增加一个 RTI 代理网关软件, 原仿真软件与代理网关可通过文件或 socket 通信等方式交互信息, 间接接入 RTI。

本文借鉴以上 4 种接入 RTI 的方法, 实现了 PSCAD 与 OPNET 接入 RTI。PSCAD 的原代码用户无法修改, 并且该软件不支持 C++语言, 因此采用方法 3)、4) 间接实现接入 RTI。PSCAD 通过 C 对外接口程序, 采用文件的方式与 RTI 代理网关通信(方法 3)); RTI 代理网关遵循 HLA 接口标准实现与 RTI 的通信(方法 4))。OPNET 是开源的程序, 支持 C 和 C++语言的扩展, 提供了与 RTI 接口的模块 HLA-PM; 因此采用开发新模块(方法 2)), 调用 HLA-PM 的 RTI 接口函数, 从而接入 RTI。

3.2 PSCAD/EMTDC 接口程序设计

传统的继电保护仿真多采用离线分析法, 保护的动作行为不返回到电网模型中。由于电网模型与保护的动作行为相分离, 无法全面反映保护动作后对电力系统运行的影响, 也难以对复杂运行工况下保护装置的动作行为进行准确的评估。WAPSS 平台解决了以上问题, 图 1 中 OPNET 仿真继电保护

装置模型与 PSCAD 仿真一次设备模型, 实现了动态闭环控制仿真系统。如图 1 中 C 对外接口模块借助 PSCAD 提供的 4 个公用数据(STORI、STORL、STORC、STORF)从 PSCAD 中获取采样值和断路器位置等信息并将其传送给 OPNET, 以及 RTI 代理网关接收 OPNET 的保护跳闸指令并将其传送给 PSCAD, 从而达到了保护装置获取电网一次设备信息以及将保护跳闸指令反馈给断路器的动态闭环控制的目的。

PSCAD 是单线程软件, 通过 C 对外接口模块可实现 PSCAD 程序的挂起与运行, 这为 PSCAD 和 OPNET 的同步仿真提供了可能。实现方法是: C 对外接口程序进入自循环占据 PSCAD 程序线程, 即可挂起 PSCAD, 当接收到退出自循环事件, 则退出自循环, PSCAD 程序恢复正常, 继续向前运行。

3.3 RTI 代理网关软件的设计

RTI 代理网关软件是遵循 HLA 接口标准开发的程序, 实现 PSCAD 与 RTI 之间的信息交互。RTI 代理网关主要功能模块包括:

1) RTI 接口模块。实现与 RTI 的信息交互, 具体包括创建联邦、加入或退出联邦、联邦执行管理、联邦成员间的同步、时间管理策略的设置及联邦成员逻辑时间推进, 声明 PSCAD 产生的交互类, 定购 OPNET 返回的交互类, 发送交互类实例, 接收已定购的交互类实例等。

2) 数据转发 Agent 模块。①实现与 C 对外接口模块的信息交互。与 C 对外接口通信有文件读写方式和 socket 网络通信方式 2 种方式; 由于文件方式可靠且易于实现, 平台采用文件读写方式, 如图 1 中的 4 个文件。②数据接收和发送模块。实时扫描文件信息是否更新, 并调用 RTI 接口模块的发送函数; 接收 RTI 信息, 并更新文件信息。③程序处理模块, 完成数据格式转换。将接收到的文件字符串格式转换为 HLA 格式; 将接收的 RTI 交互类实例的 HLA 格式转换为字符串格式。

3.4 OPNET 接口程序设计及模型扩展

3.4.1 OPNET 与 HLA 间的接口

OPNET 提供了与 HLA 的接口结点 HLA-PM, 通过这个中间件, 使得 OPNET 成为联邦的一员, 实现与 RTI 的通信。HLA-PM 提供通用的 RTI 六大类服务以及其他一些接口服务(包括 OPNET 时间管理、数据映射、仿真模块管理、OPNET 的挂起与运行等)^[15]。本文使用 HLA-PM 接口实现的功能主

要有：1) 时间管理使得 OPNET 仿真可以和其他联邦成员时间同步及逻辑时间推进；2) 将 OPNET 发来的数据包根据数据映射文件*.map 转换为 HLA 中的交互类实例，发送给 RTI；将收到的 HLA 交互类实例映射为 OPNET 中的包格式，分发到相应的 OPNET 进程模型。

3.4.2 OPNET 模型扩展

在 OPNET 中仿真变电站二次设备，与 PSCAD 中一次设备的数据交互通通过 MU 模型和 ST 模型实现。MU 从 PSCAD 获取采样值信息，ST 获取断路器位置信息以及向断路器发送跳闸指令。这 2 个模型需实现与 HLA-PM 间的数据交互功能。同时 MU 和 ST 还需分别完成向站内其他相关二次设备发送 SV 报文和 GOOSE 报文(遵循 IEC 61850 的 3 层式网络结构：应用层、数据链路层和物理层)，以及接收同步报文、参数配置等 MMS 信息(TCP/IP 协议栈)的功能。选择 OPNET 中 ethernet_server_adv 模型，并进行功能扩展，MU 模型如图 2(a)所示。图 2(a)中通过 MU(Agent)模块与 HLA-PM 接口交互，获取 PSCAD 的采样值数据。ST 模型则将图中的 MU 模块替换为断路器 BK 模块，通过与 HLA-PM 交互通接断路器位置信息和发送保护跳闸指令。

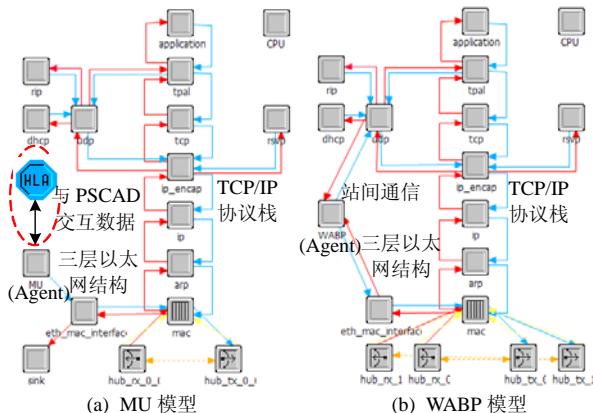


图 2 广域后备保护 OPNET 模型扩展

Fig. 2 OPNET extended model for WAPSS

广域后备保护系统需在每变电站内增加 WABP 设备，用于搜集站内一次设备的采样值信息、断路器位置和向智能终端发送保护动作指令，并且具有接收同步报文、参数配置等功能。因此，也应具有 3 层式网络结构和 TCP/IP 完整协议栈。同时 WABP 设备需实现站间的广域信息采集和发送控制指令，但目前 IEC 61850 还未对站间通信进行规范，为实现智能变电站设备间的互操作，采用

采样值(sampled value, SV)传输模型传输电气量和断路器位置信息(一个数据包)，并采用通用面向对象的变电站事件(Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE)传输模型传输断路器跳闸信息。目前 OPNET 广域通信不支持 3 层式网络结构，本文采用传输性能相近的 UDP(User Datagram Protocol)协议实现站间通信，WABP 设备模型如图 2(b)所示。图 2(b)中 WABP (Agent)模块的程序设计与 WABP 保护系统结构和 WABP 保护算法直接相关，应具有 WABP 保护相关信息采集与处理、保护算法和综合决策跳闸策略等功能。

过程层和间隔层的其他设备模型应具备与 MU 或 ST 模型通信的能力，因此其模型可参考图 2(a)的 MU 模型予以修改。站控层设备只需传输制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)信息，直接使用 ethernet_server_adv 模型即可，限于篇幅，此处不作详述。

3.5 WAPSS 平台的时间管理

PSCAD 和 OPNET 之间的联合同步是 WAPSS 平台的关键和难点，涉及到平台的时间管理，主要包括联邦成员的时间管理策略、消息传递机制、联邦成员的时间同步和逻辑时间推进 4 个方面。HLA 中联邦成员的时间管理策略描述了联邦成员的逻辑时间推进与其他联邦成员的逻辑时间推进之间的关系，分为时间控制和时间受限。将 OPNET 和 RTI 代理网关分别设置为“时间控制”方式和“时间受限”方式，在 RTI 的协调配合下，OPNET 的逻辑时间推进控制着 RTI 代理网关的逻辑时间向前推进。

HLA 消息的传递机制包括 2 个方面：一是消息传输方式；二是消息传递顺序。消息的传输方式分为“reliable”和“best effort”2 种。前者采用 TCP/IP 协议，后者采用 UDP/IP 协议^[13]。TCP 提供了面向连接的服务，在信息传输的可靠性方面要优于 UDP 协议，为保证 PSCAD 和 OPNET 间的数据可靠交互，WAPSS 平台采用“reliable”方式。

HLA 支持 2 种消息传递顺序：接收顺序(receiving order, RO)和时戳顺序(time stamp order, TSO)。因 TSO 消息只能在时间推进期间由时间控制成员传递给时间受限成员，所以 RTI 代理网关必须采用 RO 顺序。RO 顺序没有时间戳，不受仿真时间推进的影响。RTI 代理网关通过 enableAsynchronousDelivery()服务打开 RO 消息的

异步传输状态, 在其进程中调用 tick() 函数使 RTI 获得程序的控制权, 就可以向其他联邦成员分发数据。OPNET 联邦成员也采用 RO 消息发送交互类消息。

WAPSS 平台时间同步和推进, 如图 3 所示。PSCAD 仿真起始时刻为 0 s, 由于 OPNET 中网络设备初始化过程需一段时间, 为保证网络协议完成初始化, 设置 OPNET 和 RTI 代理网关同步后的第 120 s 为联合仿真的零时刻, OPNET 所有业务在 120 s 开始。

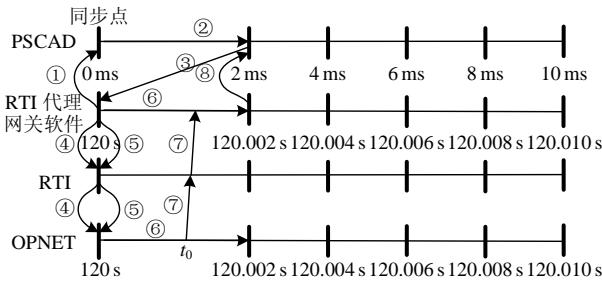


图 3 WAPSS 平台时间同步和推进

Fig. 3 Time synchronization and advance of WAPSS platform

仿真开始后, PSCAD 首先处于挂起状态。2 个联邦成员先后加入联邦, 并进行交互类和时间管理等相关 RTI 服务的注册后, 进入同步点交互过程。当 2 个联邦成员达到同步点后, RTI 将通过回调函数 federationSynchronized() 通知 2 联邦成员已同步。然后 2 联邦成员将时间推进至 120 s(步长为 120 s), RTI 代理网关输出 out_go 文件告知 PSCAD 解除挂起状态(如图 3 步骤①), PSCAD 扫描到 out_go 文件, 解除挂起状态。

然后 PSCAD 和 OPNET 进入基于保守的时间步长推进(仿真步长设置为 2 ms), 保守的时间步长推进仿真是指: 联邦成员的逻辑时间是以时间步长为单位向前推进。详细步骤如下:

- 1) PSCAD 向前仿真 2 ms 后(步骤②), 产生标志文件 in_go 和向 input 文件输入采样值和断路器位置信息, 然后处于挂起状态(步骤③)。
- 2) 当 RTI 代理网关扫描到 in_go 文件, 说明 PSCAD 已完成 2 ms 步长推进。当扫描到 input 文件, 则读取 input 文件内容, 随后采用“reliable+RO”方式向 OPNET 发送交互类数据。RO 消息到达 RTI 时被简单地放到队列中, 并立即向 OPNET 发送(步骤④, RO 消息是按 FIFO 方式发送)。
- 3) 当 RTI 代理网关的交互类信息发送完成后,

向 OPNET 发送逻辑时间向前推进消息(步骤⑤)。

4) 当 OPNET 收到逻辑时间向前推进消息并确认完成 input 文件接收后, 向 RTI 发送逻辑时间向前推进 2 ms 的请求。随后在 RTI 的协调下, 2 个联邦成员进入时间推进状态(步骤⑥)。

5) 假设在 t_0 时刻, WABP 保护动作向断路器发送跳闸指令, 则 OPNET 采用“reliable+RO”方式向 RTI 代理网关发送跳闸指令交互类(步骤⑦)。

6) 当 OPNET 收到 RTI 的回调函数 TimeAdvanceGrant() 并调用后, 说明时间推进过程成功完成, 进入初始的时间批准状态。

7) RTI 代理网关确认 2 ms 时间步长推进完成后, 将收到的断路器跳闸指令交互类转换为字符串格式并写入 output 文件, 以及生成 out_go 文件(步骤⑧)。

8) 当 C 对外接口实时扫描到 out_go 文件, 说明联邦已完成了 2 ms 的时间推进。如果扫描到 output 文件, 则读取文件中的交互类事件, 随后解除 PSCAD 挂起状态。

至此完成 2 个联邦成员的一个逻辑时间步长推进。当 PSCAD 进入下一个逻辑时间步长推进时, 立即运行刚刚接收到 output 文件中的断路器跳闸指令, 切除故障的一次设备。

从以上时间推进过程可以看出, PSCAD 和 OPNET 间的信息交互只有在仿真步长的结束点时进行(如图 3 步骤④⑤⑧)。因此, 如果设置仿真步长过大, 将影响仿真的精度; 但设置过小, 将影响仿真的速度。用户可根据实际工程情况进行设置。

3.6 *.fed 文件和*.map 文件的配置

WAPSS 平台的 2 个重要文件是*.fed 和*.map。*.fed 文件描述了 HLA 仿真所用到的交互类, 本文定义 2 个交互类: 1) pscad_to_opnet, 用于传输 PSCAD 的采样值和断路器位置信息, 分别对应 2 个参数成员变量 sv 和 bk_status; 2) opnet_to_pscad, 用于传输 OPNET 的断路器跳闸指令, 对应参数成员变量 bk_trip。*.map 文件定义了 OPNET 数据包与*.fed 文件中交互类的对应关系, 数据包与交互类一一对应, 数据包的相关包域对应交互类的参数成员变量。

根据仿真的电网规模不同, PSCAD 和 OPNET 之间交互的信息量也会有所不同。为了便于二次开发, 不修改 RTI 代理网关和 HLA-PM 中复杂的 HLA 接口规范, 每个交互类参数成员变量类型都采用字

字符串(string)，扩展信息可直接添加在此参数成员变量的字符串后。由于 HLA-PM 对于复杂的数据类型 string 不做处理直接发往上层应用，因此对应*.map 文件的数据包中的各包域应定义为 structure 类型。RTI 代理网关软件和 HLA-PM 只实现数据转发，解析分别在 C 对外接口和 OPNET 中实现。

3.7 WAPSS 平台仿真流程

在完成 PSCAD 和 RTI 以及 OPNET 和 RTI 的接口连接后，通过 RTI 代理网关、HLA-PM 和 RTI 实现 PSCAD 与 OPNET 的时间同步与数据交互，WAPSS 平台的整个仿真流程如图 4 所示。

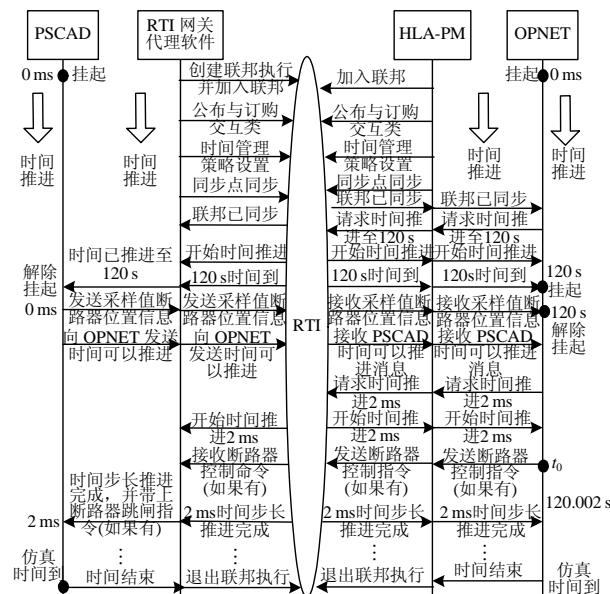


图 4 WAPSS 平台仿真流程

Fig. 4 Procedure of WAPSS platform simulation

仿真开始时，PSCAD 和 OPNET 进入挂起状态，RTI 代理网关创建联邦执行，并和 HLA-PM 分别代替 PSCAD 和 OPNET 加入联邦。随后完成时间管理策略注册和*.fed 和*.map 文件的发布、订购交互类后，将逻辑时间直接推进至 120 s。然后 WAPSS 平台进入基于保守的步长逻辑时间推进仿真。当到达仿真时间后，2 联邦成员申请并退出联邦执行，RTI 撤消联邦执行，至此完成 WAPSS 平台仿真。

4 Agent 的设计

前文详细论述 WAPSS 平台的基本框架及其各组成部分和接口的设计，下文分析 Agent 的设计。Agent 的定义目前还没有公认的标准，一般认为，Agent 是一种处于一定环境下包装的计算实体，为实现设计目的，它能感受环境并作用于自身和环境，在环境下灵活地、自主地活动。

Agent 的主体结构可分为反应型、慎思型和混合型 3 类^[16]。对于 Agent 的主体结构的选择应根据设备或软件功能的需求。例如：MU(Agent)模块只是获取 PSCAD 的采样值信息，经 IEC 61850 采样值格式封装后向站内相关 Agent 设备转发，无需推理能力，因此采用反应型结构即可；而 WABP (Agent)模块不仅需具备简单地、快速地向站间 WABP 设备转发采样值(或相量值)和断路器位置信息，而且应具备电力系统故障元件识别和综合跳闸决策等智能推理能力，因此宜采用混合型结构。

虽然许多方面 Agent 之间的结构是不同的，但存在一些相同的特性，如通信方式、执行机、心智状态的表示等方面。因此，定义一个 Agent 的通用模型，使得与设计目的相关的决策方法、功能模型等以“插件式”方便地联结到 Agent 通用模型上，图 5 所示为 Agent 主体结构的通用模型。

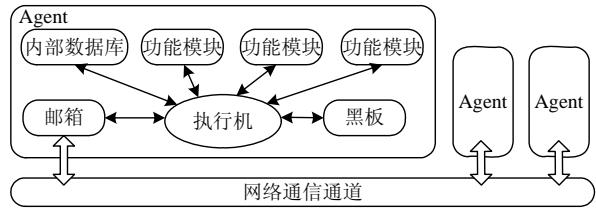


图 5 Agent 主体结构的通用模型

Fig. 5 Universal model of agent entity structure

每个 Agent 由一个通用的 Agent 模型和许多功能模块构成。Agent 通用模型由内部数据库、邮箱、黑板、执行机等部分组成。其中：内部数据库包含 Agent 自身的信息、目标集合、世界的模型等信息；邮箱提供 Agent 和环境以及其他 Agent 的通信；黑板提供 Agent 内部各个功能模块间的通信；执行机则完成消息分派、功能模块的调度控制等。各个功能模块，如感知、行为、反应、建模、规划、通信、决策等模块都是相对独立的实体，通过黑板协调工作和执行机的调度控制。利用该通用模型，可方便地实现以上 Agent 的 3 种主体结构，而且也便于用户将新设计的 Agent 主体结构加入 WAPSS 平台，加以仿真检验其性能。

广域后备保护系统是由分布在多个变电站内的众多智能电子设备(Agent)共同交互、协作完成的多 Agent 系统。多 Agent 系统的体系结构可分为从结构、对等结构和混合结构 3 种，对应目前提出的 3 种广域保护系统结构。

主从结构对应有限区域集中式的广域保护系统^[7]，按功能不同将 Agent 分为主导 Agent 和从属

Agent。主导 Agent 为系统主站的 WABP 设备, 负责数据分析处理、统一调配、保护决策和指令发布; 从属 Agent 为各子站的 WABP 设备, 一般不具备决策权, 主要进行数据收集和校验主站的指令并执行等工作。对等结构对应分布式广域保护系统^[3], 所有 Agent 在交互时具有同等的地位和权限, 因此所有的 Agent 都具有决策权, 具备独立处理数据的能力。混合结构则是上述 2 种结构进行组合而衍生出的一种结构形式, 对应分布集中式广域保护系统^[17]; 当子站与主站通信正常时, 采用主从结构; 当子站与主站通信故障时, 采用对等结构, 能自主地与相邻变电站 Agent 建立通信, 由本站和相邻变电站的信息共同完成广域后备保护功能。

5 仿真实例

5.1 仿真模型的构建

本文以 IEEE 39 节点 330 kV 变电站模型, 采用有限区域集中式 WAPS 结构和广域电流差动保护^[1-2]为例, 在 OPNET 中观察 WABP 保护性能、信息动态交互过程、网络延时, 以及在 PSCAD 中观察电网电气量变化和断路器动作情况, 验证 WAPSS 平台的正确性和有效性。

在 PSCAD 中构建 IEEE 39 节点 330 kV 变电站电网模型, 仿真运行时间为 1 s, 设置母线<1>与<39>间线路 L₂ 中点在 0.3 s 时发生 A 相接地故障, 断路器总动作时间为 70 ms, 采样频率为每周波 20 个点, 仿真步长为 2 ms。广域电流差动保护采用基于稳态量的相量差动算法, 动作方程为

$$\begin{cases} I_{CD\phi} > 0.75I_{R\phi} \\ I_{CD\phi} > I_H \\ \Phi = A, B, C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{CD\phi}$ 为差动电流, $I_{CD\phi} = I_{M\phi} + I_{N\phi}$ 表示两侧电流矢量和的幅值; $I_{R\phi}$ 为制动电流, $I_{R\phi} = I_{M\phi} - I_{N\phi}$ 表示两侧电流矢量差的幅值; I_H 取 4 倍的实测电容电流值, 本文线路 L₂ 的 $I_H = 0.4684$ kA。

电力通信网光纤通常沿着电网线路铺设, 因此在 OPNET 中构建 IEEE 39 节点电网的网络通信模型, 如图 6 所示, 图 6 中将位于同一变电站的所有节点合并为一个节点表示。以节点 16 为主站, 其他节点为子站。子站 MU 的发送周期为 1 ms/packet。站间通信遵循 IEC 61850 标准, 采用 IEC 61850-9-2 标准的 SV 模型传输线路电流相量值和断路器位置信息, 采用 GOOSE 传输保护跳闸信息。

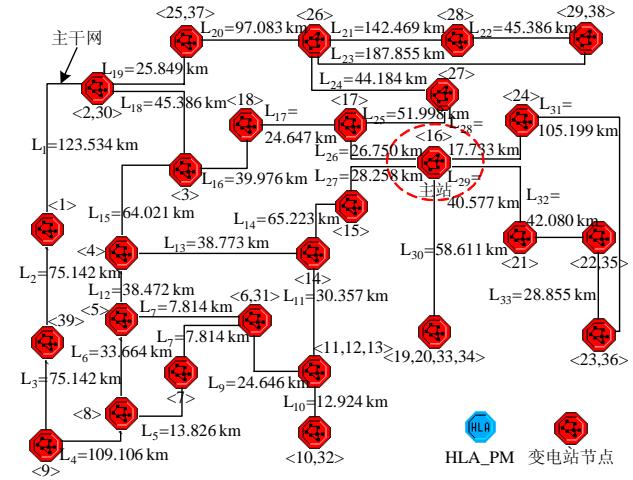


图 6 IEEE 39 节点 OPNET 通信网络模型

Fig. 6 Communication network model of IEEE 39-node in OPNET

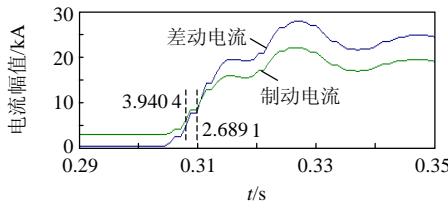
对于变电站站内网络通信仿真, 采用文献[18]提出的全站统一式网络拓扑结构, 并运用文献[19]提出的站内各类典型的数据流模型进行仿真。同时将 WABP 设备接入间隔层的公共交换机, 实现与站内的所有二次设备通信, 并且单独接入路由器的一个以太网口, 进入电力通信主干网。

OPNET 网络性能仿真参数设置为接近于实际变电站网络和电力通信网性能参数: 站内以太网通信链路带宽为 100 Mbit/s, 子站和主站接入主干网带宽分别为 E_1 (2 Mbit/s)、 $E_1 \times 26$ (子站个数为 26), 主干网分配 $E_1 \times 26$ 带宽用于 WABP 保护, 光在光纤中传播速率设置为 5 μs/km, 站内以太网传输采用 802.1p/Q VLAN 和优先级协议, 广域网传输采用 OSPF 协议, 其他参数采用 OPNET 默认参数。

广域电流差动保护必须保证采样值数据的同步。PSCAD 仿真本身保证了电流、电压互感器的同步采样。OPNET 中所有 MU 模块同时接收到 HLA-PM 转发的 PSCAD 采样值信息, 并经站内以太网向子站 WABP 设备发送。由于存在网络时延不确定, WABP 设备则根据采样值报文中采样计数器(SmpCnt), 经 4 个采样点计算一次相量值, 并向主站发送。广域通信也存在报文网络传输时延的不确定, 主站 WABP 设备根据相量值报文中的 SmpCnt 字段, 实现同一 SmpCnt 值的相量差动。采用以上方式, 实现了广域电流差动保护各子站的采样同步。

5.2 仿真结果

在 PSCAD 中观察线路 L₂ 两端的 A 相差动电流和制动电流值, 如图 7 所示。由图 7 可知, 0.308 s

图 7 线路 L₂ 的 A 相差动电流和制动电流Fig. 7 A-phase differential current and braking current of line L₂

时线路 L₂ 两端的 A 相的制动电流和差动电流分别为 3.940 4、2.689 1 kA，可见电流差动保护不满足式(1)，而在 0.310 s 时满足式(1)。在 OPNET 中，子站 WABP 设备每收到 4 个采样点后计算一次电流相量值并上传主站，即 0.308 s 和 0.312 s 时为子站 WABP 设备上传主站电流相量值的时刻。因此，当主站接收到 0.312 s 时刻的线路 L₂ 两端的电流相量值时，广域电流差动保护应动作。

在 OPNET 中观察子站<1>和<39>及主站<16>的 WABP 保护整个过程中各相关设备端到端(end to end, ETE)时延情况，如图 8 所示(为方便说明，横坐标时间为相对 120 s 的时间，即减去 120 s)。

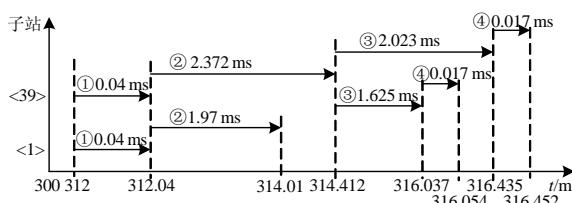


图 8 WABP 保护整个过程中各相关设备之间 ETE 时延

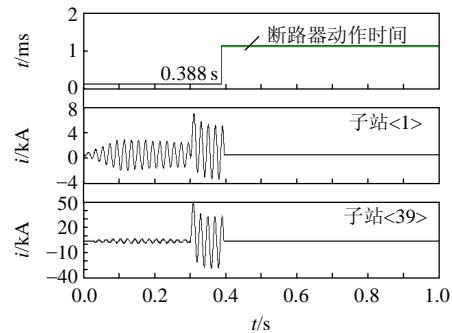
Fig. 8 Each ETE delay of related devices throughout the whole process of WABP

图 8 中：阶段①，合并单元的采样值上传，并到达子站 WABP 设备；阶段②，子站计算线路电流相量值并上传，到达主站 WABP 设备；阶段③，主站 WABP 设备接收到线路两端的电流相量值后运行广域电流差动保护算法，检测到线路 L₂ 故障，发送跳闸指令并到达子站 WABP 设备；阶段④，子站 WABP 设备发送保护跳闸指令至智能终端。

从仿真开始到 312 ms，PSCAD 完成了 156 个仿真步长(312 个采样点)，则 OPNET 在第 157 个步长开始后(312 ms 时)，MU 即刻向子站 WABP 发送第 312 个采样值，子站 WABP 于 312.04 ms 接收到，此刻正好到了相量值计算周期，计算电流相量值并上传主站。主站 WABP 在 314.412 ms 时收到线路 L₂ 两端子站的相量值信息后运行广域电流差动保护，检测到线路 L₂ 故障，则向 2 个子站发送断路器

跳闸指令。从图 8 中可以看出，从线路 L₂ 故障到智能终端 ST 接收到主站 WABP 保护故障切除指令，子站<1>和<39>分别用时 16.054 2、16.452 ms，且都在第 159 个仿真步长推进过程中发送给 PSCAD。

在 PSCAD 中观察线路 L₂ 两端子站<1>和<39>的 A 相电流和断路器动作情况，如图 9 所示。PSCAD 于 318 ms 收到断路器跳闸指令，并在下一个仿真步长开始后立即向线路 L₂ 两端子站<1>和<39>的断路器发送跳闸指令。经断路器动作时间 70 ms 延时后，都于 0.388 s 切除了故障线路 L₂ 的 A 相。

图 9 线路 L₂ 两端 A 相电流和断路器动作情况Fig. 9 A-phase current and breakers' action status of line L₂

WAPSS 平台的仿真误差如图 10 所示。由图 10 可知，理论上 PSCAD 应在 316.054 和 316.452 ms 分别收到 OPNET 子站<1>和<39>的断路器跳闸指令并延时 70 ms 后跳闸，但由于 PSCAD 此刻已运行了 318 ms，因此与理论上断路器跳闸时刻误差分别为 1.946 和 1.548 ms。

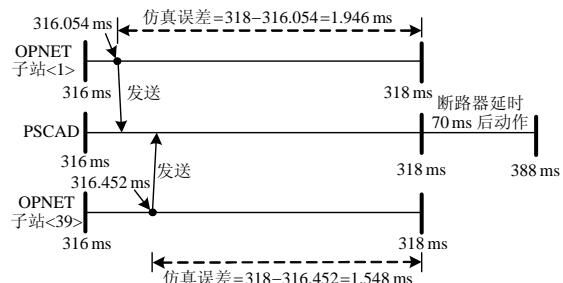


图 10 WAPSS 平台仿真误差示意图

Fig. 10 WAPSS platform simulation error schematic

需要指出的是：1) 仿真误差只影响 PSCAD 中断路器的跳闸时刻，而 OPNET 能精确地检验 WABP 算法、观察信息交互动态过程和 Agent 的性能等等；2) 由图 10 可知，仿真误差必小于所采用的仿真步长。鉴于智能变电站中，IEC 61850 对 GOOSE 报文的网络时延约束为小于 3 ms，故在实际仿真中，

若要实现 PSCAD 和 OPNET 的闭环控制仿真, 观察断路器动作后电力系统的运行情况, 建议仿真步长不大于 3 ms, 本文中采用的仿真步长为 2 ms。

6 结论

为了全面分析评估 WAPSS 保护在网络通信环境下的总体性能, 本文开发了一套基于 HLA/Agent 的 OPNET 和 PSCAD/EMTDC 的联合同步仿真平台 WAPSS, 详细论述了各组成部分的功能、接口方法和 Agent 的设计。WAPSS 平台具有以下特点:

- 1) 采用 HLA 体系结构实现平台的联合同步仿真的基本框架。将电力系统一次设备和二次设备分离, 在 PSCAD 中构建电网一次设备模型, 在 OPNET 中实现二次设备和通信网络, 并且采用基于步长的时间推进策略实现联合同步仿真, 仿真精度高。

- 2) 采用 C 对外接口和 HLA-PM 接口实现了 PSCAD 和 OPNET 的外部数据交互, 并且数据交互的参数成员变量都采用 string 类型, 屏蔽了用户复杂的 HLA 接口规范的再开发。

- 3) 遵循 IEC 61850 标准对变电站二次设备的 OPNET 模型进行了相应扩展, 各仿真功能进行了模块化设计, 并采用面向 Agent 的软件开发技术, 提供了一个开放的、通用的 Agent 主体结构, 能够根据用户的仿真需求, 可不断地更新和演进。

- 4) 由于采用标准的 HLA 规范, WAPSS 平台具很强的扩展性, 在此平台上可进一步扩展 Matlab、PSLF 等软件的联合同步仿真, 能够为广域保护提供全面的(继电保护、安全稳定控制与网络通信等)仿真技术手段, 对广域保护的性能评估和将来的工程实现具有重要的意义。

参考文献

- [1] Serizawa Y, Myoujin M, Kitamura K, et al. Wide-area current differential backup protection employing broadband communication and time transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1046-1052.
- [2] 丛伟, 潘贞存, 赵建国, 等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 91-95.
Cong Wei, Pan Zhencun, Zhao Jianguo, et al. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 91-95(in Chinese).
- [3] 童晓阳, 王晓茹, 汤俊. 电网广域后备保护代理的结构和工作机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 91-98.
Tong Xiaoyang, Wang Xiaoru, Tang Jun. Study on the structure and working mechanisms of wide-area backup protection agents for power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 91-98(in Chinese).
- [4] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.
Cong Wei, Pan Zhencun, Zhao Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14(in Chinese).
- [5] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 87-93.
Yang Zengli, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 87-93(in Chinese).
- [6] Stahlhut J, Browne T, Heydt G. Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 84-91.
- [7] 尹项根, 汪旸, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.
Yin Xianggen, Wang Yang, Zhang Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7(in Chinese).
- [8] Hopkinson K, Wang Xiaoru, Giovanini R, et al. EPOCHS: a platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 548-558.
- [9] Borowski J, Hopkinson K, Humphries J, et al. Reputation-based trust for a cooperative agent-based backup protection scheme[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 287-301.
- [10] Tong Xiaoyang, Wang Xiaoru, Hopkinson K. The modeling and verification of peer-to-peer negotiating multiagent colored Petri nets for wide-area backup protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 61-72.
- [11] Giovanini R, Hopkinson K, Coury D, et al. A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, , 2006, 21(3): 61-72.
- [12] 王波, 周志伟. 网络模拟软件 NS2 与 OPNET 的剖析比较[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(6): 90-95.
Wang Bo, Zhou Zhiwei. Comparative analysis on network

- simulation software NS2 and OPNET[J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(6): 90-95(in Chinese).
- [13] 周彦, 戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 16-54.
- Zhou Yan, Dai Jianwei. HLA emulation programming [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 16-54(in Chinese).
- [14] Strassburger S. On the HLA-based coupling of simulation tools[C]//In Proceedings of the 1999 European Simulation Multiconference . Warsaw : SCS Europe Publishing House, 1999: 45-51.
- [15] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 294-300.
- Chen Min. OPNET network simulation[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2004: 294-300(in Chinese).
- [16] 史忠植. 智能主体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 30-37.
- Shi Zhongzhi. Agent and its application[M]. Beijing: Science Press, 2000: 30-37(in Chinese).
- [17] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.
- Li Zhenxing, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide area protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 95-103(in Chinese).
- [18] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络的组建与冗余方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 38-42.
- Dou Xiaobo, Hu Minqiang, Wu Zaijun, et al. Configuration and redundancy of communication networks in digital substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 38-42(in Chinese).
- [19] 张志丹, 黄小庆, 曹一家, 等. 基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 204-209.
- Zhang Zhidan, Huang Xiaoqing, Cao Yijia, et al. Comprehensive data flow analysis and communication network simulation for virtual local area network-based substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 204-209(in Chinese).

收稿日期: 2012-07-18。

作者简介:

陈国炎(1980), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及智能变电站网络通信技术, fzu_electric@163.com;

张哲(1962), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及高压输电线路故障定位、超导电力新技术等, zz_mail2002@163.com;

尹项根(1954), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、故障状态监测等, xgyin@mail.hust.edu.cn。



陈国炎

(责任编辑 刘浩芳)