

电力和信息通信系统混合仿真方法综述

汤 奕¹, 王 琦¹, 倪 明², 薛禹胜²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106)

摘要:智能电网是电力系统与信息通信系统深度融合的时空多维异构系统。通信系统中事件的离散特性和电力系统中时间的连续特性使得对电力通信复合系统的问题研究更为复杂。目前对某个系统进行简化,采用单一仿真工具研究电力通信复合系统的研究方法,其准确性和实用性值得商榷。因此混合仿真方案成为近年来研究热点。文中针对电力通信复合系统的复杂动态行为混合仿真问题进行了分析,从联立仿真、非实时和实时混合仿真方案3个方面,对建模工具、系统架构和数据同步等问题相关的研究成果进行了归纳分析,指出复合系统的时间同步问题是混合仿真的关键问题之一,并提出了一种基于状态缓存的电力与信息通信混合仿真平台时间同步方法,为后续相关研究提供了解决思路。

关键词:智能电网; 电力通信复合系统; 混合仿真; 时间同步

0 引言

随着智能电网新技术的迅速发展,传统电网已经逐步演变成一个日趋复杂的网络,这也给电力系统安全稳定运行带来新的挑战^[1]。发电侧具有随机性、间歇性和波动性的可再生能源的大规模接入^[2],输电侧特高压交直流混联输电方式、柔性交流输电系统^[3]和同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)^[4]的引入,以及负荷侧分布式能源^[5]、智能负荷^[6]和电动汽车^[7]的普及,使得电力系统正在从传统电源跟踪负荷变化进行调整的运行模式转变到“源-网-荷”柔性互动的运行模式^[8]。这一切都将依赖信息技术(information and communication technology, ICT)^[9]。高速、安全和可靠的信息通信网络将为未来广域电力系统的可观性和可控性提供重要的技术支撑,这也是“智能电网”的“智能”之所在。

国内外诸多学者针对通信-电力交互的信息物理系统(cyber physical system, CPS)展开了研究。

1) 电力通信网络可靠性研究:基于通信网络结构和组成元件的可靠性,评估电力通信网络,如广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)和广域保护系统(wide-area protection

system, WAPS)所依托通信网络的有效性^[10-11]。这类研究通常简化或忽略电力网络部分,重点考虑通信网络的构成。

2) 通信故障对电力系统的影响研究:考虑某些通信故障,如延时、误码和中断等,研究其在低频振荡^[12-13]、负荷调度^[14-16]和电能供需优化^[17-18]等方面对智能电网调度和稳定运行控制带来的影响,并提出解决方案或新的控制系统设计方法以减小负面影响^[12-13, 19]。这部分研究通常详细考虑电力系统的运行和控制方式,而将通信系统简化为固定的延时或中断事件。

3) 电力通信复合系统研究:将电力系统和通信系统考虑成耦合和相互依存的复合系统,应用复杂网络理论对其特性进行研究,从宏观层面揭示连锁故障的演化机理^[20-21]。这类研究重点考虑网络结构,而忽略了两个系统的物理特性,因此暂时还不能用于指导实际系统的运行与控制。也有研究考虑了两个系统的物理特性,评估复合系统整体的脆弱度,如考虑信息安全层面的数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)脆弱度评估^[22]和考虑通信网络稳定性的微网运行性能评估^[23]。这部分研究通常假设信息物理系统中任一系统的故障会导致对应系统相关单元的完全瘫痪,即直接信息物理依赖网络(direct cyber-power interdependencies, DCPI)^[23]。

电力系统的电力流和信息通信系统的信息流存在本质上的区别^[24]。在信息流中,对于特定的信息

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-06-22。

国家自然科学基金资助项目(51577030); 国家电网公司千人计划资助项目“考虑通信信息系统风险的电网安全稳定防御关键技术研究”。

可以指定接受者,并调度其传送路径。然而在电力流中,同一电网中电源的注入功率与用电设备的消耗功率之间在任何时间断面上都是平衡的。电功率在电网中的流动则服从基尔霍夫定律,即每一个电气节点上的输入与输出在任意时刻平衡,没有缓冲、存储或滞后的可能。即使在电网不正常的状态下,上述平衡关系仍然严格存在,只不过此时的平衡伴随着电能质量降低、设备过载,负荷被迫退出,或电网解列直至崩溃。不平衡功率只会发生在发电机转子节点上的机械输入功率与电磁输出功率之间,并引起同步稳定性问题。然而传统电力系统研究与信息系统研究在理论和方法上基本是割裂的,在现有理论方法框架下难以深入分析信息系统对电力系统运行与控制的影响^[1]。在现有研究中将二者作为复合系统时,时间同步性、两个系统结构的异构性、元件组成和动态响应的差异性使得研究人员不得不对其中某一部分进行简化考虑,这也给研究结果的准确性和实用性带来一定影响。

因此,迫切需要一个能够深入分析复杂的电力通信系统的平台工具,为相关理论和应用问题的深入研究提供仿真、测试和验证支撑。美国国土安全部于2008年发布的报告《全美电网仿真工具性能:需求和相关问题》^[25]中提出未来的电网仿真工具应当能够对多种电网外部扰动事件进行建模,以分析电力系统与通信系统等关键设施之间的交互行为。近年来,电力和信息通信系统混合仿真逐渐成为国际上电力行业的研究重点,已有多家研究机构提出了各自的解决方案。而国内该领域研究才刚起步,且鲜有高效的解决方案。本文对现有电力和信息通信混合仿真平台进行总结,对其性能优劣进行分析,并提出一种新的混合仿真平台架构,为我国电力行业混合仿真领域研究提供参考。

1 电力和信息通信系统仿真方法概述和分类

在智能电网环境下,不同位置、不同电压等级电网的各类量测信息(如电压、频率等)和其他附加信息(如气象信息,智能家电和电动汽车等可控智能负荷用户设定信息等)将被源源不断的传送到电网集中控制中心或区域控制器,以用于监测、调控和保护等应用。对于电网调控和保护应用,控制指令信息将会被传送到相应的控制器和继电保护装置。这种广域监控保护和控制(wide-area monitoring, protection and control, WAMPAC)^[26]系统对信息通信系统提出了高要求。因此,分析智能电网各种先进解决方案的关键就在于,在进行动态或静态电

力系统仿真时能融合完整的信息通信过程与应用。

作为两个独立系统,电力系统和信息通信系统都拥有各自专业的截然不同的仿真工具。电力系统动态行为在时间上是连续的,可用一组微分代数方程来表示^[27]。通常这类微分代数方程组只能通过数值方法求解,因此电力系统仿真工具采用离散时步对系统当前状态进行相对精确的估计。而信息通信系统本身就是离散系统,因此可以通过离散事件仿真(discrete event-based simulations, DESs)工具对其进行建模,采用离散状态模型对网络在离散参数(如数据队列长度)和离散事件(如数据包的传输)下进行描述,而将复杂的通信过程转化为具体的事件队列。

近年来,为了将两种类型的仿真方法结合以研究智能电网相关特性,研究人员提出了以下3类解决方案^[9]:①联立仿真方案;②非实时混合仿真方案;③实时混合仿真方案。本文将分别对这3种解决方案进行详细介绍,并针对关键问题进行分析。

2 联立仿真方案

联立仿真方案的主要思想是在单一仿真工具(电力系统仿真工具或通信系统仿真工具)中建立一个复杂的电力和信息通信复合系统模型。这种方法的关键在于在电力(或通信)系统仿真工具中搭建通信(或电力)系统模型。其优势在于,由于是在同一个仿真工具中运行,两个系统模型处于同一时间域,因此不需要额外的时间同步工作。该类方案通常:①在电力系统仿真工具中对通信环节进行简化建模,如引言中所述。该方式缺少动态内存管理、动态链接等离散事件系统模型构建的基本元素,因此无法精确模拟通信环节动态过程;②将电力系统仿真程序以模块的形式插入通信仿真系统,如比利时根特大学 Kevin Mets 所在研究小组于2011年提出的采用 OMNeT++ 的联立仿真方案^[28]。该方案将 MATLAB 程序模块集成进 OMNeT++,主要针对静态潮流计算问题,适用于需求响应通信相关问题研究。虽然这类方案不需要面对时间同步问题,但无法处理微分代数方程系统复杂的时间连续的动态问题建模及机电特性仿真。

3 非实时混合仿真方案

电力通信复合系统仿真的另一个解决方案是采用混合仿真。两个系统的建模工作仍采用其各自的专业仿真软件完成,通过时间同步方法使两个软件能够运行于同一时间域。这也是当前电力和信息通信复合系统仿真平台的主要研究方向。通过成熟仿

真工具丰富的元件库和已有的计算方法,最大程度保持系统的全面性和准确性。而软件接口、数据交换和仿真时间同步等问题将是这类解决方案的重点研究内容。

混合仿真又可以分为非实时混合仿真和实时混合仿真。实时混合仿真方案在系统结构和平台搭建成本上与前者有明显的区别,因此将在第 4 节单独介绍。由于各类非实时混合仿真方案采用平台、数据同步方法和应用领域等均有各自特点,本节将根据方案提出的时间顺序进行总结和分析。

3.1 PSCAD/EMTDC & Java^[29]

北卡罗来纳大学 Mesut Baran 于 2002 年提出了采用 PSCAD/EMTDC 和 Java 编写的通信模块组成的混合仿真方案。虽然 Java 并不是严格意义上的专业通信仿真软件,但与第 2 节联立仿真方案中将 MATLAB 模块嵌入 OMNeT++ 软件不同,该方案首次提出了时间连续系统和事件触发系统混合仿真思想,其结构如图 1 所示。该方案采用 PSCAD/EMTDC 的用户自定义模型构建了与外部模型的数据通信接口,通过 Java 丰富的编程环境构建独立的通信管理和控制模型,同时采用数据队列的存储方式完成两个系统信息交互的过程。

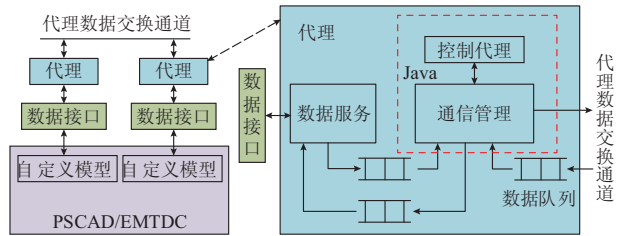


图 1 PSCAD/EMTDC & Java 方案混合仿真结构
Fig.1 Architecture of hybrid simulation platform in PSCAD/EMTDC & Java hybrid simulation platform

仿真时间同步问题是混合仿真平台的关键。该方案所提出仿真流程如图 2 所示:①采用 PSCAD/EMTDC 的仿真步长作为全局时步($T=t_6$),在每一个仿真步长开始时(t_0),PSCAD/EMTDC 将上一步计算结果中的相关量测和状态信息通过自定义接口传送至 Java 通信管理模块($t_0-t_1-t_2$),作为其输入量;②Java 通信模块对输入信息按队列顺序进行模拟传输和处理(t_2-t_3),并将处理结果(保护开关信号等)通过自定义接口返回至 PSCAD/EMTDC($t_3-t_4-t_5$);③PSCAD/EMTDC 根据返回信号修改初始量,并进行计算(t_5-t_6)。该方法在每步长的总仿真时间等于电力系统仿真工具步长(t_5-t_6)、信息通信系统仿真工具处理时间(t_2-t_3)和 4 次数据交换时间($t_0-t_1-t_2$ 和 $t_3-t_4-t_5$)之和。

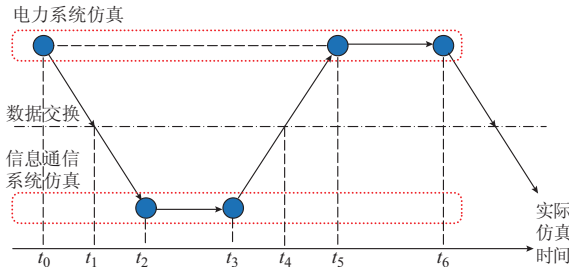


图 2 PSCAD/EMTDC & Java 方案时间同步方法流程
Fig.2 Time synchronization method in PSCAD/EMTDC & Java hybrid simulation platform

由于在每一全局时步内都需要数据交换,因此该方案的计算效率受到较大限制。同时,由于 Java 平台并不是专业的通信系统仿真工具,其建模精确性和扩展性也存在一定不足。当然这些并不妨碍其在电力与信息通信混合仿真领域的开创性贡献,引领了后续诸多研究。

3.2 EPOCHS^[30] 和 VPNET^[31-32]

美国空军技术学院 Kenneth Hopkinson 领导的研究团队于 2006 年提出了电力和通信同步仿真工具(EPOCHS)。该仿真方案也被认为是第一个基于多专业仿真工具实现的混合仿真平台。EPOCHS 采用高级体系架构(high-level architecture, HLA)模块支持多仿真器的联合运行,每个仿真器只需要模拟单个复杂系统的某个方面。采用了 3 种独立仿真工具:PSCAD/EMTDC 用于电力系统电磁暂态过程仿真;PSLF 仿真软件用于机电暂态过程仿真;NS2 用于通信网络建模与仿真。同时,设计了运行支撑环境(runtime infrastructure, RTI)作为各独立仿真器之间的接口,负责同步混合仿真平台仿真时间和数据传输。

该方案采用的时间同步方法如图 3 所示:①由用户根据仿真精度和仿真效率需求设定全局同步时间间隔($T=t_2$);②每一步长内,各仿真器独自运行(其中电力系统仿真器每次只调用一个),所产生的数据交换需求则被缓存在缓冲区内;③到达数据同步点(t_1),两个仿真器都暂停,进行统一的数据交换,并将交换数据作为下一个步长的初始数据。该方案每个仿真步长 T 由若干个电力系统仿真工具步长(t_0-t_1)和一次的数据交换时间(t_1-t_2)组成。仿真器到数据缓冲区的数据传输在系统仿真步长内同时进行:PSCAD/EMTDC 或 PSLF 每步长计算结果的相关量测和状态信息在计算步后传输至数据缓冲区,而 NS2 根据上一次数据交换得到的数据进行事件驱动仿真,并将结果传输至数据缓冲区。显然,在选取合适的全局仿真步长的情况下,该方案能

够大大缩短数据交换时间,系统的运行时间主要取决于两个仿真工具中处理速度较慢的一个(通常是电力系统仿真工具)。然而两个系统的数据同步需求难以预测,当处理某些需要在电力和通信系统之间进行大量数据交换的问题时,电力数据的不及时更新和信息通信系统事件延时处理将会严重影响仿真精度。

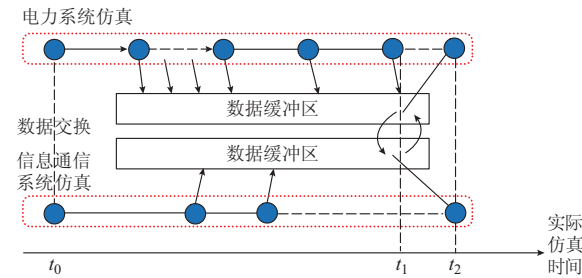


图3 EPOCHS 方案时间同步方法流程
Fig.3 Time synchronization method in EPOCHS hybrid simulation platform

采用同样时间同步方法的还有德国亚琛工业大学 Weilin Li 等人于 2011 年提出的一种采用虚拟测试平台(virtual test bed, VTB)和 OPNET 的混合仿真方案,主要用于研究电力系统中的远程控制电力电子器件的性能。

3.3 PowerWorld Server & RINSE^[33] 和 TASSCS^[34]

伊利诺伊大学香槟分校 C. M. Davis 等人于 2006 年提出了一种专门用于 SCADA 系统信息安全测试的混合仿真平台。采用 PowerWorld Server 作为电力系统建模仿真平台以产生静态数据,实时网络安全模拟环境 RINSE 作为信息通信网络建模仿真平台以分析网络传输和受到攻击的响应行为。该方案的提出重点是评估网络攻击下电力通信设施脆弱度,因此没有时间同步相关问题。类似的,亚利桑那大学 Malaz Mallouhi 等人于 2011 年提出了采用 PowerWorld 和 OPNET 的 SCADA 控制系统安全分析测试平台 TASSCS。

3.4 adevs & NS2^[35-36]

美国橡树岭国家实验室 James Nutaro 所在研究小组于 2007 年提出了根据离散事件系统规则搭建的电力和信息通信系统混合仿真平台。采用离散事件仿真工具(a discrete event system simulator, adevs)对电力系统进行建模仿真,NS2 对通信系统进行建模仿真。adevs 中的仿真控制器 API 提供了以单线程离散事件方式处理底层模型的功能;NS2 在运行时通过设定的事件规则调用 adevs 组件。作者希望通过将电力系统动态过程转换成离散事件,

采用 adevs 这一专门为离散事件系统仿真设计的软件,解决两个软件的时间同步问题。从时间同步性和仿真效率上,该方案略优于 3.1 和 3.2 节中所述方案。但是 adevs 并非专业电力系统仿真工具,需要用户根据离散事件系统规则对电力系统动态响应过程进行单独编程,从而限制了电力系统模型的可靠性和混合仿真平台的扩展性。

3.5 MATLAB/Simulink & OPNET^[37]

瑞典皇家理工学院 Kun Zhu 等人于 2011 年提出了一种采用 MATLAB/Simulink 和 OPNET 组成的混合仿真方案。该方案主要用于研究 ICT 结构对 WAMS 稳定性的影响。作者在 OPNET 中对 ICT 网络中关于相位数量采集的相关设施进行了详细的分层建模,并对基于 PMU 的相关电力系统应用的网络延时进行了评估。作者对其所采用平台的数据交换、时间同步和仿真接口等问题并没有详细说明。

3.6 PowerNet^[38-39]

美国凯斯西储大学 Vincenzo Liberatore 的研究小组于 2007 年提出名为 PowerNet 的混合仿真方案,采用 Modelica 软件作为大型电力系统仿真工具,NS2 作为信息通信系统仿真工具。该方案对时间同步问题的处理为:①NS2 和 Modelica 在某时间点都处于停止状态;②NS2 根据先前从 Modelica 得到的采样数据进行通信仿真,进行到需要与 Modelica 通信的事件时停止,并进行交换数据;③Modelica 根据这些数据初始化后仿真至 NS2 停止时间;以此循环。该时间同步方案由 NS2 决定通信时间,Modelica 不能决定何时向 NS2 通信,因此只能用于纯粹的通信事件触发下的电力系统仿真研究,而无法用于电力系统保护、控制等方面研究。作者与 2012 年对该方案进行了改进,在采用 Modelica 进行仿真时,同样可以决定是否有必要与 NS2 进行通信。然而实际电力系统的广域数据采集是周期性的,通信与否并不由电力系统本身决定,因此该方案的应用范围较为有限。

3.7 GECO^[40-42]

美国弗吉尼亚理工大学 Hua Lin 等人于 2011 年全局事件驱动混合仿真(Global Event-Driven Co-Simulation, GECO)方案。其采用了与 3.2 节类似的系统结构,PSLF 作为电力系统仿真工具,NS2 作为通信系统仿真工具;而时间同步问题处理方法则和 3.1 节中所提方案类似,采用了一个全局事件管理模块来决定当前仿真单元(电力或通信)。作者将所提方案运用到了通信影响下广域电

力系统分析的多个方面,验证了其平台的适用性。

作者通过一个基于通信的电力系统距离后备保护案例,在仿真精度上将该 GECO 与 EPOCHS 进行了比较。由于 GECO 平台和 EPOCHS 平台可以分别作为基于全局事件时间同步方法(图 2)和基于全局仿真步长时间同步方法(图 3)的典型代表,因此它们之间的比较对未来研究有较强的指导意义。从仿真结果来看,GECO 仿真精度有着明显的优势;EPOCHS 的全局时间步长由用户决定,步长越短精度越高,当该步长接近电力系统仿真软件仿真步长时,其精度可达到接近 GECO 的程度。但是由于 EPOCHS 数据交换时需要经过缓冲区,因此在精度接近的情况下,其仿真效率理论上不如 GECO (GECO 的研究人员并未对两个平台的仿真时间进行比较);而在全局步长较大时,其仿真效率会大大提高。因此,在对精度要求不高的电力和信息通信复合系统仿真研究中可选用基于全局仿真步长时间同步方法以提高仿真效率;反之则可以采用基于全局事件时间同步方法最大化提高仿真精度。

3.8 OpenDSS & OMNeT++^[43], OpenDSS & OPNET^[44], EMTP-RV & OPNET^[45]

加拿大国家科学研究学会 Martin Lévesque 等人、清华大学 Xinwei Sun 等人和意大利博洛尼亚大学 Riccardo Bottura 等人分别与 2012—2014 年提出了采用 OpenDSS 和 OMNet++, OpenDSS 和 OPNET 以及 EMTP-RV 和 OPNET 的混合仿真平台。这 3 个平台主要针对配网通信环境下需求响应、电动汽车接入和新能源接入等研究问题,均属于静态分析范畴。

3.9 INSPIRE^[46]

德国多特蒙德工业大学 Hanno Georg 等于 2012 年提出了采用 DiGSILENT PowerFactory 和 OPNET 的用于实时评估的电力和信息通信系统混合仿真方案(integrated cosimulation of power and ict systems for real-time evaluation, INSPIRE)。该方案采用了层次化的整合方案:网络层(用以接入电力系统和通信系统仿真工具)、仿真核(用以处理时间同步问题和事件管理问题)和管理层(用以接入各类分析工具),该层次化结构增强了平台的扩展性和应用范围。采用和 EPOCHS 类似的时间同步方法,主要应用于研究含多种通信方式(光纤、WiMAX、TDMA 和 GSM 等)的通信系统对电力系统监控的影响。

INSPIRE 的作者在考虑时间同步方式时,提及了优化时间同步方法,虽然因软件支持和平台搭建复杂度原因没有采用,但是为未来的混合仿真方案

提供了一个新思路。本文将基于该思想在第 5 节提出了一种新的混合仿真平台时间同步方法。

3.10 非实时混合仿真方案系统架构总结

在非实时混合仿真中,系统架构方式决定了电力系统仿真器和信息通信系统仿真器的数据交互方式。典型的系统架构方式主要有以下两种^[9]。

1)主从方式:采用其中某一仿真器为主平台(通常选取信息通信系统仿真器),将混合仿真控制逻辑嵌入主平台,如图 4(a)所示。3.1、3.4、3.6 和 3.7 节中所述仿真方案均采用这种架构方式。这种方式存在着两个潜在的不足:主从结构导致从平台无法主动向主平台推送信息,只能被动接受控制;主从平台无法并行运行,即只可以采用图 2 所示的时间同步方式,步进式完成两个平台间数据交换。

2)独立数据交互和控制方式:采用一个独立组件连接电力系统仿真器和信息通信系统仿真器,由该组件完成二者数据交互,如图 4(b)所示。同时,独立的交互组件也为控制逻辑提供了统一的接口。这种架构方式的另一个优点就是可以进行分布式或并行计算。相应的,额外增加的独立数据交互和控制单元也增加了系统构建和程序设计的复杂度。3.2、3.3、3.8 和 3.9 节中所述的仿真方案采用了上述架构方式。

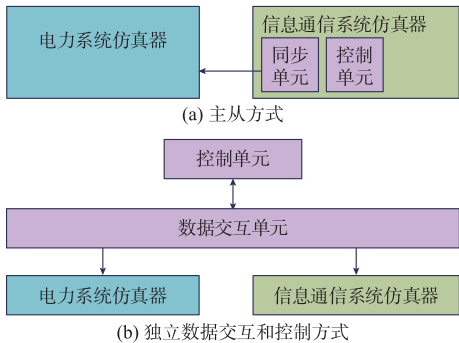


图 4 非实时混合仿真方案典型系统架构
Fig.4 Typical architecture of non-real time hybrid simulation platform

4 实时混合仿真方案

在处理信息通信相关的电力系统静态问题(如需求响应配置、无功优化等)时,现有的非实时混合仿真方案已经能够较好地实现两个系统的交互过程。然而当面对电力系统动态问题(如稳定控制、广域监测)时,非实时混合仿真方案的最大挑战来自时间同步问题。而在电力和通信部分均构建实时仿真单元,并采用实时数据交换则可以避免时间同步的问题。

瑞典皇家理工学院 Mikel Armendariz 等人和

弗吉尼亚理工大学 Saifur Rahman 教授领导的研究小组于 2014 年分别提出并实现了类似的实时混合仿真平台^[47-48]。本文以后者为例,介绍该平台的实现方法。

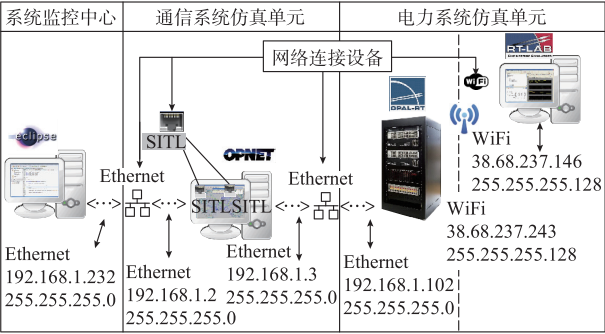


图5 实时混合仿真方案系统架构和连接方式
Fig.5 Architecture of real-time hybrid simulation platform with detailed IP and subnet mask

如图 5 所示,电力与信息通信复合系统实时仿真平台由 4 部分构成:电力系统实时仿真单元、通信系统实时仿真单元、系统监控中心和网络连接设备。

1)电力系统实时仿真单元:RT-LAB 和 OPAL-RT。电力系统仿真工具是制约整个混合仿真平台速度的主要因素。由于一般商用和开源软件面向个人电脑(personal computer,PC),无法并行计算,因此很难满足实时仿真要求;符合这一要求的仿真工具包括:RTDS^[49], HYPERSIM^[50] 和 OPAL-RT^[51]。该方案采用 OPAL-RT eMEGAsim 仿真器和一台安装了 RT-LAB 实时仿真平台软件包的 PC 作为电力系统实时仿真单元。RT-LAB 软件完全集成 MATLAB/Simulink,同时其也提供了大量模块化的电力系统元件模型。用户可以在 Simulink 完成电力系统模型搭建和离线调试,并将模型上载至 OPAL-RT eMEGAsim 仿真器。

2)通信系统仿真单元:OPNET。实时混合仿真平台对通信单元的要求是:具备在仿真循环中加入硬件(hardware-in-the-loop simulation,HILS)的能力,对实际通信系统中各类组件细节建模的能力,高精度计算能力和扩展能力。因此,通过对比已有的主要通信系统建模软件 OPNET^[52],OMNeT++^[53] 和 NS2^[54],该方案选择了第一个。OPNET 软件中的 SITL(system-in-the-loop)^[55] 模块提供了与其他在线软硬件模块的网关或接口,通过以太网连接,在实时仿真时与外部进行实时数据交换。

3)系统监控中心:Java Eclipse。该方案采用一台安装了 Java Eclipse 的 PC 作为系统的监控中心。通过编程实现对通信网络所传输电力数据的监视和控制决策的制定。

4)网络连接设备。该方案采用 OPNET 的 SITL 模块和若干外接网卡,通过以太网实现其和 OPAL-RT 以及 Java Eclipse 的连接。RT-LAB 软件和 OPAL-RT 采用 WiFi 连接。具体的 IP 和子网掩码设置如图所示。该方案数据交换采用用户数据报协议(user datagram protocol,UDP)。

该平台可以完成考虑信息通信最多 900 电力节点的高精度电磁暂态仿真以及多达 240 000 电力节点的广域电力系统监控仿真。

5 非实时混合仿真平台优化时间同步方法

现有非实时混合仿真平台采用如图 2 或图 3 所示的时间同步方法,仿真精度和效率均有一定限制。信息通信系统和电力系统的数据交互行为包括电力数据上传(监视)和控制信号下发(控制)。在大部分考虑通信的电力系统广域稳定控制和继电保护相关问题中,通信系统对电力系统处于监视状态,无紧急事件时并不进入控制状态,因此数据交互仅限于电力数据上传。本文基于此,考虑通过减少非必要的信息通信系统仿真平台到电力系统仿真平台的数据传输时间,提出一种优化时间同步方法,如图 6 所示。该方法流程如下(以基于响应的广域安全稳定控制仿真^[56]为例辅助说明)。

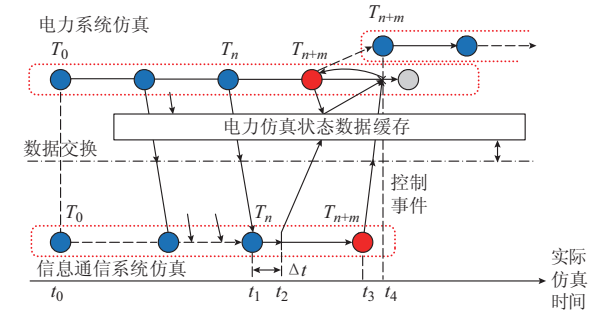


图6 基于状态缓存的电力与信息通信混合仿真平台时间同步方法

Fig.6 Time synchronization method based state cache

步骤 1:电力系统仿真工具和信息通信系统仿真工具于 t_0 同时开始(t 为物理时间, T 为仿真系统时间)。

步骤 2:电力系统仿真工具按照设定步长进行连续仿真,数据交换接口采集其每一步仿真结束后的量测和状态相关数据(如 PMU 测量数据),并传输至信息通信系统,同时将状态数据打上时标 T 存储进电力仿真状态数据缓存区(简称缓存区)。

步骤 3:信息通信系统仿真工具在接收到每一批数据后进行离散事件仿真,耗时 Δt (一般远小于电力系统仿真工具步长)。在广域安全稳定控制仿

真中,离散事件仿真过程包括根据网络状态模拟传输延时、误码和中断情况,并根据接收信息输出控制信号等。若无需下发控制信号,则不向电力系统仿真工具传输数据,否则进入步骤 4。同时缓存区更新带时标的电力系统状态数据(只保存最近若干仿真步内的状态数据)。

步骤 4:信息通信系统仿真工具在接收到某次数据(此时物理时间为 t_1 ,仿真系统时间为 T_n),通过离散事件仿真后(t_2),需要向电力系统仿真工具下发控制信号(如广域切负荷信号),此时进行两个操作:设定事件“在 T_{n+m} 时刻向电力系统仿真工具下发控制信号”,其中($T_{n+m}-T_n$)为根据通信网络状态和控制策略计算延时得到的电力系统控制延时;向电力系统状态数据缓存区发送数据调用请求,由缓存区向电力系统仿真工具传输相应时标(T_{n+m})的电力状态数据。由于信息通信系统仿真得到的控制信号延时一般大于电力系统仿真步长,因此当控制信号下发时,电力系统仿真已经前进了若干步。

步骤 5:电力系统仿真工具在接收到控制指令和状态数据后(t_4),中断当前进程,返回时标(T_{n+m})所标识的状态初值,并根据控制信号进行新一轮仿真(切除负荷后继续仿真)。

该方法在无控制事件发生时,所需要的仿真时间和电力系统仿真时间相同,而只有在有控制事件时增加指令下发时间和缓存调用时间。因此对于控制事件较少的电力和信息通信复合系统可以大大提高仿真效率。由于增加了缓存区和数据回滚功能,其仿真精度可以达到最优水平。该方法的应用效果将在未来工作中体现,但可以预计无论从精度还是效率,它都优于之前的两种非实时混合仿真时间同步方法。

6 结语

本文总结了国内外现有电力与信息通信系统的主要研究方案(见附录 A),对联立仿真、非实时混合仿真和实时混合仿真 3 类方案进行了介绍,并对其关键的系统架构、时间同步方法等问题进行了分析,提出了一种新的基于状态缓存的电力与信息通信混合仿真平台时间同步方法。

现有研究集中于混合仿真平台的搭建,所解决电力和信息通信系统相关问题还较简单,且未形成具有绝对优势的构建方案。提高混合仿真平台运行效率,满足复杂电力系统通信业务仿真需求可以从以下几点着手。

1)应基于电力系统不同时间尺度的通信业务需

求,考虑电力和信息通信系统交互影响,建立合适的混合仿真系统简化模型。

2)针对不同电力通信业务需求,探讨更为高效的数据交换机制。

3)结合在中国已经成熟应用的电力系统仿真软件(如 BPA,PSASP 和 FASTEST 等),研究并开发与信息通信系统仿真软件的数据交互模块和核心功能软件,构建适合中国电网应用的混合仿真平台。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

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,陈宁,等.采用功率预测信息的风电场有功优化控制方法[J].中国电机工程学报,2012,32(34):1-7.
TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning. An optimal active power control method of wind farm based on wind power forecasting information[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 1-7.
- [3] LI Canbing, XIAO Liwu, CAO Yijia, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [4] 毕天姝,刘灏,杨奇逊.PMU 算法动态性能及其测试系统[J].电力系统自动化,2014,38(1):62-67.
BI Tianshu, LIU Hao, YANG Qixun. Dynamic performance of PMU algorithm and its testing system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 62-67.
- [5] LI Yunwei, NEJABATKHAH F. Overview of control, integration and energy management of microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 212-222.
- [6] SMITH R, MENG Ke, DONG Zhaoyang, et al. Demand response: a strategy to address residential air-conditioning peak load in Australia[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(3): 223-230.
- [7] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等.电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J].电力系统自动化,2011,35(14):2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.
- [8] 姚建国,杨胜春,王珂,等.智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化,2012,36(21):1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept

and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.

[9] METS K, OJEA J A, DEVELDER C. Combining power and communication network simulation for cost-effective smart grid analysis[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1771-1796.

[10] WANG Y, LI W, LU J. Reliability analysis of wide-area measurement system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1483-1491.

[11] DAI Z, WANG Z, JIAO Y. Reliability evaluation of the communication network in wide-area protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2523-2530.

[12] ZHANG S, VITTAL V. Design of wide-area power system damping controllers resilient to communication failures[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(4): 4292-4300.

[13] MOKHTARI M, AMINIFAR F, NAZARPOUR D, et al. Wide-area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communication delays[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(2): 1997-2005.

[14] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Assessing the effect of failures in the information and communication infrastructure on power system reliability[C]// Proceedings of 2011 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, March 20-23, 2011, Phoenix, USA: 7p.

[15] RAHNAMAY-NAEINI M, WANG Z, MAMMOLI A, et al. Impacts of control and communication system vulnerabilities on power systems under contingencies[C]// Proceedings of 2012 IEEE PES General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 7p.

[16] AMINIFAR F, FOTUHI-FIRUZABAD M, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of WAMS malfunction on power system reliability assessment[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1302-1309.

[17] NIYATO D, DONG Q, WANG P, et al. Optimizations of power consumption and supply in the smart grid: analysis of the impact of data communication reliability[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 21-35.

[18] FALAHATI B, KARGARIAN A, FU Y. Impacts of information and communication failures on optimal power system operation [C]// Proceedings of 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), February 24-27, 2013, Washington, USA: 6p.

[19] WANG S, MENG X, CHEN T. Wide-area control of power systems through delayed network communication[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2011, 20(2): 495-503.

[20] GAO J, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Networks formed from interdependent networks[J]. Nature Physics, 2012, 8(1): 40-48.

[21] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.

[22] TEN C, LIU C, MANIMARAN G. Vulnerability assessment of cybersecurity for SCADA systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(4): 1836-1846.

[23] FALAHATI B, FU Y, WU L. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1515-1524.

[24] XUE Yusheng. Energy internet or comprehensive energy network?[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 297-301.

[25] US Dept. Homeland security, national power grid simulator workshop report[R]. 2008.

[26] JOHNSON A, WEN J, WANG J, et al. Integrated system architecture and technology roadmap toward WAMPAC[C]// Proceedings of 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Jan 17-19, 2011, Anaheim, USA: 5p.

[27] 盛成玉, 高海翔, 陈颖, 等. 信息物理电力系统耦合网络仿真综述及展望[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 100-105.

SHENG Chengyu, GAO Haixiang, CHEN Ying, et al. Summary and prospect of cyber physical power system simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 100-105.

[28] METS K, VERSCHUEREN T, DEVELDER C, et al. Integrated simulation of power and communication networks for smart grid applications[C]// Proceedings of 2011 IEEE 16th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), June 10-11, 2011, Kyoto, Japan: 5p.

[29] BARAN M, SREENATH R, MAHAJAN N R. Extending EMTDC/PSCAD for simulating agent-based distributed applications[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12): 52-54.

[30] HOPKINSON K, WANG X, GIOVANNINI R, et al. EPOCHS: a platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 548-558.

[31] LI W, MONTI A, LUO M, et al. VPNET: a co-simulation framework for analyzing communication channel effects on power systems[C]// Proceedings of 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), April 10-13, 2011, Alexandria, USA: 7p.

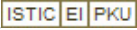
[32] 李伟林, 张晓斌, 董延军. 电力系统综合仿真方法研究(一): VPNET[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 95-102.

LI Weilin, ZHANG Xiaobin, DONG Yanjun. Study of co-simulation methods applied in power systems (Part I): VPNET[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(13): 95-102.

[33] DAVIS C M, TATE J E, OKHRAVI H, et al. SCADA cyber security testbed development[C]// Proceedings of 38th North American Power Symposium, September 17-19, 2006, Carbondale, USA: 483-488.

- [34] MALLOUHI M, AL-NASHIF Y, COX D, et al. A testbed for analyzing security of SCADA control systems (TASSCS)[C]// Proceedings of 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 17-19, 2011, Anaheim, USA; 7p.
- [35] NUTARO J, KURUGANTI P T, MILLER L, et al. Integrated hybrid-simulation of electric power and communications systems [C]// Proceedings of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, USA; 8p.
- [36] NUTARO J. Designing power system simulators for the smart grid: combining controls, communications, and electro-mechanical dynamics[C]// Proceedings of 2011 IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 24-29, San Diego, USA; 5p.
- [37] ZHU K, CHENINE M, NORDSTROM L. ICT architecture impact on wide area monitoring and control systems' reliability [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2801-2808.
- [38] AL-HAMMOURI A T, LIBERATORE V, AL-OMARI H, et al. A co-simulation platform for actuator networks [C]// Proceedings of 2007 ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 4-9, 2007, Sydney, Australia; 2p.
- [39] LIBERATORE V, AL-HAMMOURI A. Smart grid communication and co-simulation[C]// Proceedings of 2011 IEEE Energytech, May 25-26, 2011, Cleveland, USA; 5p.
- [40] LIN H, SAMBAMOORTHY S, SHUKLA S, et al. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications [C]// Proceedings of 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 17-19, 2011, Anaheim, USA; 6p.
- [41] LIN H, VEDA S S, SHUKLA S, et al. GECO: global event-driven co-simulation framework for interconnected power system and communication network[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.
- [42] DENG Yi, LIN H, SHUKLA S. Co-simulating power systems and communication network for accurate modeling and simulation of PMU based wide area measurement systems using a global event scheduling technique[C]// Proceedings of 2013 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSPES), May 20, 2013, Berkeley, USA; 6p.
- [43] LÉVESQUE M, XU D, MAIER M. Communications and power distribution network co-simulation for multidisciplinary smart grid experimentations[C]// Proceedings of 2012 45th Annual Simulation Symposium, March 26-29 2012, Orlando, USA; 7p.
- [44] SUN X, CHEN Y, LIU J, et al. A co-simulation platform for smart grid considering interaction between information and power systems[C]// Proceedings of 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), February 19-22, 2014, Washington, USA; 6p.
- [45] BOTTURA R, BORGHETTI A, NAPOLITANO F, et al. ICT-power co-simulation platform for the analysis of communication-based volt/var optimization in distribution feeders[C]// Proceedings of 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), February 19-22, 2014, Washington, USA; 5p.
- [46] GEORG H, MULLER S C, DORSCH N, et al. INSPIRE: integrated co-simulation of power and ict systems for real-time evaluation [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 21-24, 2013, Vancouver, USA; 6p.
- [47] ARMENDARIZ M, CHENINE M, NORDSTROM L, et al. A co-simulation platform for medium/low voltage monitoring and control applications [C]// Proceedings of 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), February 19-22, 2014, Washington, USA; 5p.
- [48] BIAN D, KUZLU M, PIPATTANASOMPORN M, et al. Real-time co-simulation platform using OPAL-RT and OPNET for analyzing smart grid performance[C]// 2014 IEEE PES General Meeting.
- [49] RTDS Technologies. RTDS simulator overview [EB/OL]. [2014-02-11]. <http://www.rtds.com/wp-content/uploads/2014/09/RTDS-Simulator-Overview.pdf>.
- [50] OPAL-RT Technologies. HYPERSIM power system real-time digital simulator [EB/OL]. [2015-02-11]. http://www.opal-rt.com/sites/default/files/Download/Hypersim_brochure_lores.pdf.
- [51] OPAL-RT Technologies. eMEGAsim powergrid real-time digital hardware in the loop simulator [EB/OL]. [2014-02-11]. http://www.opal-rt.com/sites/default/files/OPB1_emegasimbrochure_DA14_hires.pdf.
- [52] Riverbed Technology, Riverbed Modeler [EB/OL]. [2014-02-11]. <http://www.riverbed.com/>.
- [53] What is OMNeT++ [EB/OL]. [2015-02-11]. <http://www.omnetpp.org/intro>.
- [54] The network simulator-ns-2[EB/OL]. [2015-02-11]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [55] Riverbed Technology. Introduction to SITL[EB/OL]. [2014-02-11]. https://support.riverbed.com/bin/support/static/doc/opnet/17.5/A/online/modeler_17.5_PL5/Tutorials/wwhelp/wwhimpl/common/html/wwhelp.htm#href=sitl_tut_1.html&single=true.
- [56] 汤涌.基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5041-5050.
TANG Yong. Response-based wide area control for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5041-5050.
- [57] ANDERSON K, NARAYAN A. Simulating integrated volt/var control and distributed demand response using GridSpice [C]// Proceedings of 2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS), October 17,

电力和信息通信系统混合仿真方法综述

作者：[汤奕](#)，[王琦](#)，[倪明](#)，[薛禹胜](#)，[TANG Yi](#)，[WANG Qi](#)，[NI Ming](#)，[XUE Yusheng](#)
作者单位：[汤奕, 王琦, TANG Yi, WANG Qi \(东南大学电气工程学院, 江苏省南京市, 210096\)](#)，[倪明, 薛禹胜, NI Ming, XUE Yusheng \(南瑞集团公司 国网电力科学研究院, 江苏省南京市, 211106\)](#)
刊名：[电力系统自动化](#) 
英文刊名：[Automation of Electric Power Systems](#)
年，卷(期)：2015 (23)

引用本文格式：[汤奕](#). [王琦](#). [倪明](#). [薛禹胜](#). [TANG Yi](#). [WANG Qi](#). [NI Ming](#). [XUE Yusheng](#) [电力和信息通信系统混合仿真方法综述](#) [期刊论文] - [电力系统自动化](#) 2015 (23)