

面向能源互联网的电力-通信联合仿真平台设计

宋晓健¹, 喻洁², 张俊芳¹, 倪明³, 孙旻⁴

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 4. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006)

摘要:随着能源互联网概念的提出和发展, 电力业务中的通信环节承担起越来越重要的角色, 有必要研究通信系统和电力系统的协同作用。在分析了能源互联网通信需求的基础上, 提出了电力网和通信网联合仿真平台的总体框架和关键技术, 并采用仿真软件 Matlab 和 OPNET 设计了电力-通信联合仿真平台, 以研究通信对电力系统运行的影响。最后, 以能源互联网分布式电源(DER)参与系统调频为仿真算例, 验证了联合仿真平台的可行性和有效性。

关键词:能源互联网; 电网; 通信; 联合仿真

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)03-0044-06

0 引言

为了应对能源危机, 新能源技术得以快速发展, 能源互联网应运而生。能源互联网是建立在现有的能源系统与配电网的基础上, 通过先进的信息技术和电力电子技术, 实现能量和信息双向流动。高速、安全和可靠的信息通信网络将为能源互联网的可行性和可控性提供重要的技术支撑, 通信的重要性大大提升^[1-4]。因此, 电力系统与其通信系统之间的联合仿真具有重要的现实意义。

电力系统和通信仿真领域分别有各自的仿真软件, 如今的仿真分析也基本局限于自身框架, 对于将通信环节加入到电力系统仿真, 并考虑通信中断、延时、误码等情况对电力系统运行影响的研究很少。文献[5]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, 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。文献[6]提出了一种面向同步数字体系通信的电网和通信网综合仿真方法, 以研究通信对电网稳定系统的影响。文献[7, 8]提出了电力信息物理融合系统的基本架构, 建立了其稳态与动态模型。但这些文献多偏于理论性研究与信息物理层面上的初步探索, 未能具体实施并实际应用。

本文构建了一套基于 Cosim 接口进行 Matlab 与 OPNET 联合仿真系统, 实现了电力业务仿真平台与通信网络仿真平台间的数据交互和仿真进度的协同管理。仿真过程中能够根据实验需要灵活调整电力业务数据收发数量和仿真进度推进步长, 并借

助通信网络的仿真, 对电力通信网的相关网络通信协议机理和传输过程进行模拟, 考察网络性能指标, 最终将相关反馈结果作为衡量电力业务传输效果的预测及评估依据。

1 面向能源互联网的电力-通信联合仿真平台的提出

1.1 能源互联网的电力通信需求

能源互联网各能源节点之间进行信息交互, 依照 IEC 61850 标准, 分布式可再生能源入网作为特殊汇聚节点, 入网位置比较灵活, 考虑入网对电能质量、孤岛问题和继电保护的影响, 需要满足非常高的遥控、遥信和遥测要求。

结合各类通信方式的性能和优缺点, 能源互联网的通信方式分为有线通信方式和无线通信方式。有线通信方式包括光纤通信、电力线通信(PLC)、以太网无源光网络(EPON)等, 无线通信方式包括 GPRS、3G/4G、WiMAX 等方式^[9-13], 各种通信方式比较见表1。各能源节点发电系统内部通信业务量小、距离短, 优选现场总线、PLC 等传统的、经济性较好的通信方式; 入网点信息量较大, 对传输的实时性和可靠性要求高, 优选光纤通信和 2G/3G/4G 移动通信方式。

1.2 联合仿真平台的功能和架构的提出

由于能源互联网中的分布式可再生能源出力小、数量多且分布广而不均, 基于上文能源互联网的电力通信需求分析, 能源互联网各环节之间的通信链路将会错综复杂, 通信的安全稳定显得尤为重要。

在电力系统中, 各联络线路上的控制信号和数

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407030)

表 1 各种通信方式比较

Table 1 Comparison of various communication methods

通信方式	传输距离/km	传输速率/(Mb·s ⁻¹)	优点	局限性
光纤通信	0.55~100	<10	传输距离长,速率快,抗干扰	建设成本高
PLC	1~3	2~3	传输距离长	依赖于已有电力线路,抗干扰能力差
EPON	20	1250	传输速率快,组网灵活	初期投资高,不易扩散
GPRS	1~10	0.17	传输距离远,成本低	传输速率低,安全性差
WiMAX	1~5	>75	建设成本低,覆盖面积广	没有广泛应用,信号易受干扰
3G/4G 移动通信	-	20	速率快,通信质量好	结构复杂,费用高

据信息是由通信通道传输,所以通信通道的延时、误码及中断会直接导致电力系统信息的延时、错误甚至中断。因此,根据分布式电源(DER)接入的特点,以及通信通道状态对电力系统控制的影响方式^[14-17],本文提出了电力-通信分布式联合仿真平台的整体框架,如图 1 所示。

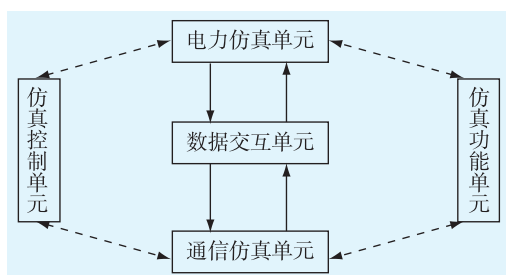


图 1 联合仿真平台功能架构

Fig.1 Function diagram of the joint simulation platform

该联合仿真平台框架中主要包括电力仿真单元、通信仿真单元、数据交互单元、仿真控制单元以及仿真功能单元,各部分协调运作,实现电力与通信的联合仿真。

其中,电力仿真单元包含电力仿真软件及其用于数据输入、输出的接口设计,以及电力系统运行的状态与事件的设定,如发电机出力、负荷、电压的状况,切机、切负荷情况以及输电线路的通断等。

通信仿真单元包含通信仿真软件及其用于数据输入、输出的接口设计,以及通信状态与事件的设定,如通信延时、中断等。

数据交互单元包含电力仿真接口与通信仿真接口的连接,实现电力仿真软件与通信仿真软件间的数据交互。

仿真控制单元是平台总体的控制部分,包含了电力仿真环境的设定、通信仿真环境的设定、数据交互控制、仿真同步以及时间推进等控制。电力仿真环境的设定包括电力系统故障类型、故障时间、切除时间等。通信仿真环境的设定包括通信网络拓扑结构的构造、通信链路的传输时间设定以及通信故障类型^[18]等。

仿真功能单元包含对仿真事件的分析与策略研

究,如状态评估、稳态控制、自动发电控制(AGC)等。

2 电力-通信联合仿真平台的实现

研究通信网络性能的方法主要有 3 种:实测、数学分析和仿真建模。鉴于数字变电站的通信网络复杂且具不确定性,对其实测和进行精确的数学分析非常困难,因此,仿真建模是较为理想的方法。OPNET 是一种主流的通信网仿真软件,支持面向对象建模,包含现有的各种网络设备和协议。所以本文选用通信仿真平台 OPNET 与常用的电力业务仿真软件 Matlab 构建联合仿真系统,并基于开放式的交互接口实现不同平台间的数据交互和联合仿真。

2.1 联合仿真平台的具体实施

联合仿真平台具体实施的总体框架如图 2 所示。该平台中,电力通信网络和电力系统业务分别由 OPNET 平台与 Matlab 平台来承担相应的仿真任务,其中,OPNET 平台用于构建电力系统通信网络模型,并对网络的通信协议、传输流程和网络性能进行仿真。Matlab 平台的 Simulink 模块用于构建生成电力系统的数据业务,通过 Simulink 模块建立电力业务数学模型,生成电力业务数据。2 个平台间的数据交互通过外部 C 程序控制台实现,外部 C 程序控制台与 Matlab、OPNET 分别以开放式接口 Socket 接口、Cosim 接口连通,从而实现 Matlab 与 OPNET 数据的双向传输和仿真进度的控制管理。

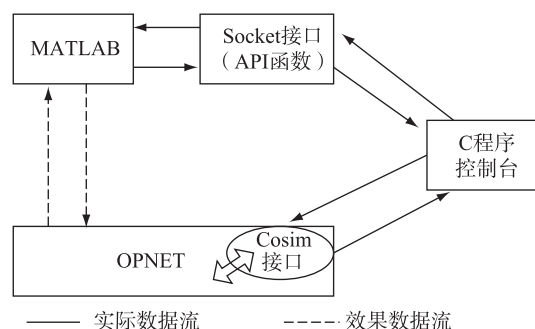


图 2 联合仿真平台总体实施架构

Fig.2 General implementation framework of joint simulation platform

其中,Matlab 平台与 C 程序控制台通过“套接

字”(Socket)方式互通,如图3所示。Matlab作为服务端,通过调用API接口函数对外发送数据,控制仿真时间进度,等待反馈结果;C程序控制台作为客户端,监听与Matlab通信的Socket端口,接收Matlab通信数据及仿真进度推进指令。

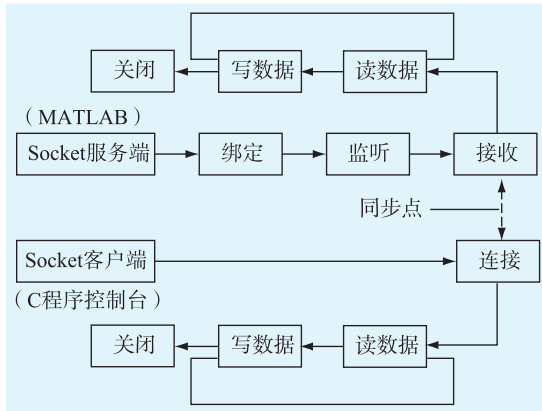


图3 使用套接字的连接通信方式

Fig.3 Connection communication using socket

C程序控制台与OPNET之间通过后者内部的Cosim接口进行连通,针对该接口模块进行设计建模,主要包括接口交互数据的定义和进程模型的编码。C程序控制台将接收到的Matlab通信数据及仿真进度推进指令进行转换,向Cosim接口模块发送,并监听Cosim接口模块的数据,依次接收OPNET反馈的数据内容;OPNET在其建立的通信网络拓扑中传输接收到数据,并将传输结果通过Cosim接口反馈给C程序控制台。

2.2 联合仿真平台的数据交互

联合仿真平台的数据交互过程如图4所示。

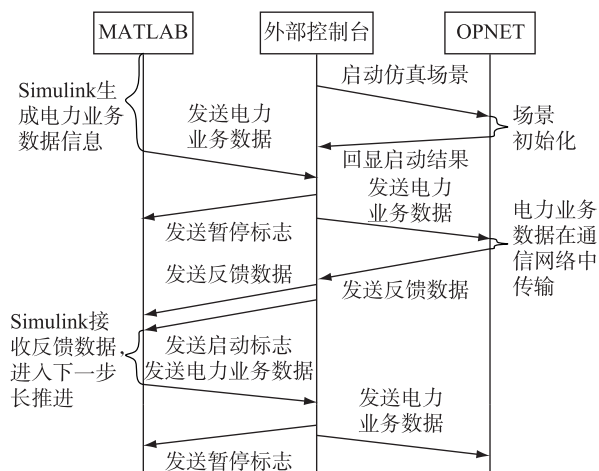


图4 联合仿真平台的数据交互时序

Fig.4 Data interaction timing diagram of the joint simulation platform

一次交互的过程如下。

首先,启动C程序,完成初始化。由于C控制台

程序与OPNET中对应的网络仿真场景混编在一起,因此,C程序控制台启动后同时启动了OPNET中对应的仿真场景程序,并回显当前场景的初始化结果,包括OPNET内部Cosim接口名称、数量和OPNET内部当前所停滞的仿真时间。

再者,启动Matlab,将台站通信数据送至C控制台,同时C控制台给Matlab发送一个暂停标志。

然后,C控制台将Matlab传来的数据业务传给Cosim接口,通信数据进入到OPNET内部后,在内部进行传输。传输情况如下:(1)OPNET Cosim接口把接收的数据分别派发至对应的源站点;(2)完成从源站点到目的站点的数据传输模拟和结果计算;(3)目的站点将接收的通信信息和统计结果发送至OPNET的Cosim接口。

最后,C控制台接收来自OPNET Cosim接口的反馈数据,并向Matlab发送反馈数据,包括源站点、目的站点ID、通信统计结果(时延等)、数据业务内容。Matlab实时接收反馈数据并在本地显示。

2.3 联合仿真平台仿真进程的协调控制

由于Simulink仿真进程为一个连续性事件,若要做到包含多次迭代的电力仿真与通信的数据交互,则需要实现对Simulink模型仿真进程的控制,即控制其启动与暂停以传出、传入数据。本文以set_param函数来控制模型仿真过程,set_param函数是Simulink模型、模块及参数配置交互设定中非常实用的API函数,可以应用set_param函数进行模型仿真的细微控制,如“start”(启动)、“pause”(暂停)、“step”(单步)、“continue”(继续)和“stop”(停止)。在通信方面,电力的多次迭代只需多次调用cosim接口,无需间断OPNET的时间进程,而在电力仿真时OPNET处于“闲置”状态。实现过程如图5所示。

3 算例仿真与分析

采用本文开发的平台对能源互联网中的分布式电源参与电网调频进行仿真,以验证该平台在电力业务仿真中的有效性。

算例包括1个调度中心、2台用来模拟系统的发电机和能源互联网中10个用来调节系统频率的分布式电源,当电力系统存在大量功率缺额,以至于超出系统AGC机组的频率调节能力范围时,将通过协调分布式电源共同出力平衡功率。利用该联合仿真平台建立如图6所示的仿真模型,其中,在Matlab的Simulink模块中建立电力系统仿真模型,用以制定调频策略和产生数据信息;在OPNET中

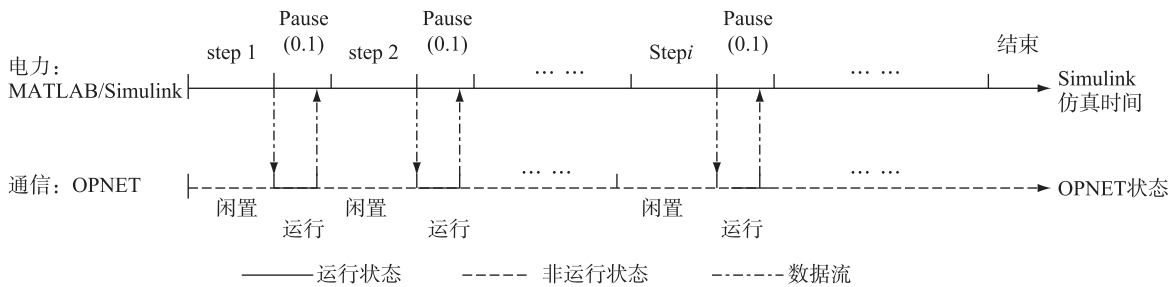


图5 基于 set_param 函数的联合仿真协调控制过程

Fig.5 Joint simulation coordination control process based on set_param function

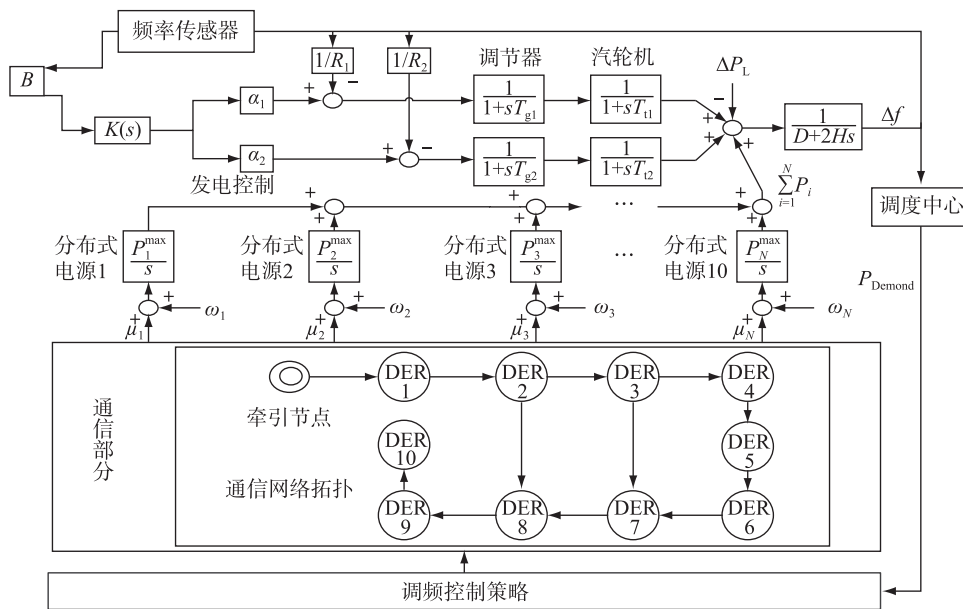


图6 分布式电源调频仿真模型

Fig.6 Simulation model of distributed power in frequency modulation

构建分布式电源连接网络所对应的通信网络拓扑结构,用以 10 个分布式电源之间的信息传递。

假设电力系统在某一时刻遇到阶跃扰动强度为 $\Delta P_{demand} = 0.8$ p.u. (800 MW) 的阶跃扰动,一共有 10 个分布式电源节点,每个节点的最大调节能力为 {300, 310, 290, 400, 480, 270, 200, 180, 270, 300} MW。采用分布式一致性协调控制策略,使得各节点调节量与自身最大调节能力的比率最终趋于一致性的理想结果。

仿真中电力与通信的数据交互过程如图 7、图 8。图 7 和图 8 为该仿真中数据在联合仿真平台上交互的部分截图,以其中某一次迭代、节点 1 与节点 2 的通信连接为例,二者分别展示了电力数据进入 OPNET 通信与 OPNET 通信结束后向外部控制台反馈结果的过程。

仿真结果如图 9,实线代表 DER 不参与调频的系统频率变化,虚线代表 DER 参与调频的系统频率变化,由此对比可以看出:基于本文所提出的电力-

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
***** 外部控制台接收来自MATLAB的数据【开始】 *****
***** 外部控制台完成MATLAB数据接收【结束】 *****
Cosim接口ID: 1182186
Cosim接口接收的数据维度: 30
***** OPNET Cosim接口接收来自外部控制台的数据【开始】 *****
Cosim接口ID: 1182185

各节点接收信息如下:
第[0]个节点的source_id = 1
第[0]个节点的sink_id = 2
第[0]个节点的condition = 1
第[0]个节点的数据 =
0.128416      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
0.000000      0.000000      0.000000      0.000000      0.000000
    
```

图7 电力数据传入到 OPNET 通信

Fig.7 Introduction of power data to OPNET

通信分布式联合仿真平台,DER 通过分布式控制参与调频可以有效减小系统的频率波动,同时也验证了该平台的可行性。

此外,基于该联合仿真平台,还可在 OPNET 中设置改变通信线路的时延或断开某通信线路,研究通信延时、中断对电力仿真的影响,这相对于非电力-通信联合仿真而言,具有实际应用上的优势。

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
***** OPNET Cosin接口向外部控制台发送数据【开始】 *****
source_id = 1 sink_id = 2 delay = 0.000753
***** OPNET Cosin接口完成向外部控制台发送数据【结束】 *****

***** 外部控制台接收来自OPNET的数据【开始】 *****
从OPNET Cosin接口接收的信息如下:
Source ID = 1 Sink ID = 2 Delay = 0.000753
Data =
0.128416 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
    
```

图8 OPNET 向外传出反馈结果
Fig.8 OPNET outgoing feedback results

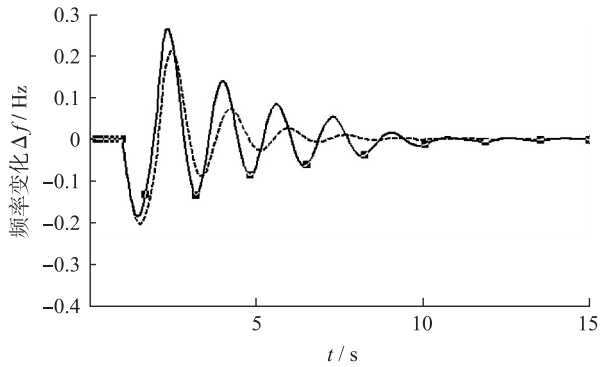


图9 DERs 参与调频与不参与调频的频率变化对比
Fig.9 Comparison of the frequency variation with or without DERs in frequency modulation

4 结语

在论述能源互联网的发展过程中信息通信对于电力系统越发重要的基础上,提出了一种电力-通信联合仿真平台的总体架构,构建了一套基于Cosim 接口进行 Matlab 与 OPNET 联合仿真的系统,为电力系统中考虑通信传输环节的仿真研究提供了一个平台,有利于能源互联网的发展。在该平台的实现过程中,主要克服了 MATALB 与 OPNET 的接口设计、电力仿真软件与通信仿真软件间总体进程的控制协调 2 个难点。但该平台尚不可仿真通信误码的情况,有待以后进一步研究。

参考文献:

[1] 邬捷龙,杨 健. 能源互联网技术的现状及发展趋势研究 [J]. 电网与清洁能源,2016,32(3) :8-12.
WU Jielong, YANG Jian. Research on the current situation and development trend of the technology of energy internet [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3) :8-12.

[2] 邹 宁,方存洋,刘育鑫,等. PSCAD/EMTDC-MATLAB 联合仿真技术在 SVC 控制系统仿真建模中的应用[J]. 江苏电机工程,2012,31(5) :40-44.
ZOU Ning, FANG Cunyang, LIU Yuxin, et al. Application of

PSCAD/EMTDC-MATLAB co-simulation technology in SVC control system simulation modeling [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5) :40-44.

[3] HUANG A Q. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system; the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1) :133-148.

[4] KATZ R H. An information centric energy infrastructure; the berkeley view [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 1(1) :7-22.

[5] 汤 奕. 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) :33-39.
TANG Yi. Power and information communication system simulation method on [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (23) :33-39.

[6] 童和钦. 电网和通信综合仿真研究 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(5) :117-122.
TONG Heqin. Research on the integrated simulation of power system and communication [J]. China Southern Power Grid Technology, 2016, 10 (5) :117-122.

[7] 赵俊华,文福栓,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) :1-7.
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) :1-7.

[8] 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. Review and prospect of the coupling network simulation of the physical power system [J]. Power System Technology, 2012, 36 (12) :100-105.

[9] 沈 洲. 能源互联网的发展现状 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1) :82-83.
SHEN Zhou. Development and suggestion of the energy-internet [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1) :82-83.

[10] 李国清. 分布式电源接入配电网的通信方式研究 [J]. 现代电力, 2011, 28(2) :79-83.
LI Guoqing. Research on communication modes for distributed generation access to distribution network [J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2) :79-83.

[11] 曹建权. 电力系统通信技术的发展 [J]. 江苏电机工程, 2004, 23(4) :68-70.
CAO Jianquan. Development of communication technology in the electric power system [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23(4) :68-70.

[12] 陈树勇. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(8) :1-7.
CHEN Shuyong. Overview of smart grid technology [J]. Power System Technology, 2009, 33 (8) :1-7.

[13] 王欣宇. 含分布式电源的配电通信方案与评价模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014, 42-49.
Wang Xinyu. Study on the communication scheme and evalua-

- tion model of DER connected distributed grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [14] YU Hang, SUN Ying, NIU Xiaona, et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30 (5): 104-108.
- [15] VERMESAN O. Internet of energy-connecting energy anywhere anytime [C]//Advanced Microsystem for Automotive Applications. Berlin Germany, 2011: 33-48.
- [16] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75,88.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system [J]. Power System Technology, 2003,27 (12):71-75,88.
- [17] SCHNEIDER K, LIU Chencheng, PAUL J P. Assessment of interactions between power and telecommunications infrastructures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (3): 1123-1130.
- [18] LIN Hua, VEDA S S, SHUKLA S S, et al. GECO: global event-driven co-simulation framework for interconnected power system and communication network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.

作者简介:



宋晓健

宋晓健(1991—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制;

喻洁(1975—),女,江苏南京人,博士,副教授,研究方向为电力系统运行分析与技术支持;

张俊芳(1965—),女,江苏南京人,副教授,研究方向为电力系统分析、运行与控制;

倪明(1969—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统规划、电力系统稳定控制、电力物理信息系统等研究工作;

孙旻(1970—),男,江西南昌人,高级工程师,从事配电网技术工作。

Design of Power Communication Simulation Platform for Energy Internet

SONG Xiaojian¹, YU Jie², ZHANG Junfang¹, NI Ming³, SUN Min⁴

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. NARI Technology

Incorporation, Nanjing 211106, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: With the emergence and development of the concept of energy Internet, the communication is playing an increasingly important role in the power system. It is necessary to study the synergy of communication system and power system. Based on the analysis of the demand of energy Internet communication, the general framework and key technologies of the simulation platform of power grid and communication network are put forward. The co-simulation platform of power grid and communication network is designed by using Matlab and OPNET to study the influence of communication on the operation of power system. Finally, a simulation example that distributed powers in energy Internet participate in the frequency modulation of power system is given to demonstrate the feasibility and effectiveness of the co-simulation platform.

Key words: energy internet; power grid; communication; co-simulation

(编辑 刘晓燕)

(上接第 32 页)

Control Strategy of Static Synchronous Series Compensator to Improve Power System Stability

ZHU Xinyao¹, ZHAO Jingbo¹, ZHOU Qian¹, LIU Jiankun¹, JIN Meng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103 China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: Wind power and UHVDC (Ultra-High Voltage Direct Current Transmission) have been widely used in China. Safety and stability of the power system are threatened by uncontrollable power flow transferring, which is caused by the fluctuation of bulk wind power or UHVDC blocking. Hence, it is of great significance for improving the stable of the power system by developing efficient power flow control devices. To solve the uncontrollable power flow transferring problem, control strategy of SSSC (Static Synchronous Series Compensator) is deduced, and electromagnetic transient model of SSSC is constructed as well. Results of the simulations show that the designed control strategy regulates the DC voltage effectively, and can control the power flow accurately and rapidly. This study is supposed to be helpful for the controller design of SSSC, and to be useful for the operating and power flow control of the power system with bulk new energy or UHVDC integrated.

Key words: static synchronous series compensator (SSSC); power flow control; DC voltage control; electromagnetic transient

(编辑 徐林菊)