

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.030

# OPNET 在微网通信系统仿真中的应用\*

韦幸幸, 张有兵\*, 谢路耀, 杨晓东  
(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**针对微网通信系统存在的实时性问题,将变电站自动化系统的全球通信标准 IEC61850 应用到微网通信系统中。建立了基于 IEC61850 标准的 3 层微网通信结构,并对微网中的通信业务进行了分析和建模,提出了利用网络仿真软件 OPNET 对微网通信系统的实时性进行仿真的方法。在 OPNET 网络仿真平台上,以系统的整体通信延时、保护和控制业务延时和不同节点的延时为研究对象,对采用两种不同链路速率(10 Mbit/s、100 Mbit/s)的微网通信延时进行了试验。研究表明,10 Mbit/s 的链路带宽基本能满足微网通信系统的整体实时性能要求,但在网络业务流增多时某些业务易出现延时发散,而采用 100 Mbit/s 的通信链路能较好地全面满足微网通信系统的实时性要求,为微网通信系统带宽的选择以及其他业务的建模提供了一定的参考。

**关键词:** OPNET; 微网; 业务流; 延时

中图分类号: TM63; TP933

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)03-0404-05

## Application of OPNET in microgrid communication system simulation

WEI Xing-xing, ZHANG You-bing, XIE Lu-yao, YANG Xiao-dong

(Information Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of real-time performance in a microgrid communication system, IEC61850, the global communication standard for substation automation systems was applied for microgrid communication system. A three-layer microgrid communication structure was built based on IEC61850, while the communication traffic in microgrid was analyzed and modeled, a method was presented to simulate the microgrid real-time performance using network simulation software OPNET. Taken bandwidth of 10 Mbit/s and 100 Mbit/s as communication link, the global delay of microgrid communication network, the protection and control traffic delay, the delay of different nodes were tested on OPNET. The results indicate that the 10 Mbit/s bandwidth can basically meet the global real-time performance requirements, however, the delays will spread when the traffic flow increases. The 100 Mbit/s communication link is preferred, which can well meet the real-time requirements of the microgrid in all-round way. Some references were provided to choose bandwidth and model other traffics in building microgrid communication system later.

**Key words:** OPNET; microgrid; traffic flow; delay

## 0 引 言

清洁无污染的可再生能源的使用在一定程度上能缓解由于能源短缺和气候变暖等带来的一系列问题,微网作为发展可再生能源的有效形式以及建设智能电网的有效组成部分已经引起学术界的广泛关注。

微网的通信系统是支撑微网正常运行的必要条件,在微网运行过程中会产生各种通信业务,随着微网规模的扩大化和结构的复杂化,各种业务会交叉融合,势必会影响微网的性能,因此,微网的通信系统性能能否满足微网的要求成为亟待研究的问题。

一般情况下,研究网络性能的方法有 3 种<sup>[1]</sup>: 基于

收稿日期: 2013-09-16

基金项目: 浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1110893); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12E07005)

作者简介: 韦幸幸(1988-), 女, 河南洛阳人, 主要从事智能电网及微网方面的研究. E-mail: wx881021@yeah.net

通信联系人: 张有兵, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

实际测量的方法、基于数学理论分析的方法和基于网络仿真分析的方法。目前基于网络仿真来验证网络性能的研究已有很多,这些研究多集中在变电站和配电网等领域<sup>[2-4]</sup>,对微网通信网性能的研究相对比较少。研究中使用较多的仿真软件是 OPNET (Optimized Network Engineering Tool),利用该软件能对微网的通信网络、通信设备以及通信业务等进行研究,从而可快速、直观地对网络的性能及各种业务流的性能作出评价。本研究对 OPNET 软件特点和通信业务建模流程进行简要介绍,阐述微网的概念,基于 IEC61850 标准分析其结构以及微网中的通信业务,利用 OPNET 搭建微网通信网仿真模型,并对微网主要通信业务进行仿真实现及分析。

## 1 OPNET 仿真软件

### 1.1 OPNET 介绍

OPNET 是由美国 MIL3 公司开发的商用网络仿真软件,现在包含 Modeler、IT Guru、SP Guru 和 WDM Guru 等产品,而 OPNET Modeler 是其核心产品。OPNET Modeler 提供 3 层建模机制,分别为进程级 (Process Level)、节点级 (Node Level) 和网络级 (Network Level),3 层模型与实际的协议、设备和网络完全对应,来全面反映网络的相关特性。通过采用离散事件驱动 (Discrete Event Driven) 的仿真机理,基于事件触发的有限状态机 (Finite State Machine, FSM) 来帮助用户完成建模和仿真。OPNET 的一般建模步骤如下<sup>[5]</sup>:

- (1) 构建通信网拓扑;
- (2) 为拓扑中的每个节点加载通信业务;
- (3) 选择相应的统计参数;
- (4) 设置仿真参数,运行仿真;
- (5) 统计与分析结果。

### 1.2 OPNET 业务建模方法

OPNET14.5 提供的业务建模方法有两种:明确业务建模和背景业务建模<sup>[6-7]</sup>。

#### 1.2.1 明确业务建模

明确业务建模是以数据包为单位模拟每个包的相关事件,精确到每个包的业务建模为仿真网络行为提供了非常精确的结果。明确业务建模能在应用层、网络层和底层 3 个层次上进行业务配置。OPNET 提供了 8 种标准的端到端业务,如 Email 和 Video Conferencing 等,配置标准的端到端业务依据以下步骤进行:

- (1) 定义应用;
- (2) 设定业务主询;

(3) 配置服务器支持的应用;

(4) 设定客户端业务主询。

当 OPNET 提供的 8 种标准的端到端业务不能满足要求时,用户也可以根据需求自定义业务,这种自定义业务的建模方式是最有用和灵活的建模方式,但是相对比较复杂。配置自定义业务根据以下步骤进行:

- (1) 利用 Task Definition 分阶段来定义业务;
- (2) 把定义好的业务添加到 Application Definition 中;
- (3) 设定业务主询;
- (4) 配置服务器支持的应用;
- (5) 设定客户端业务主询。

#### 1.2.2 背景业务建模

在利用背景业务进行建模的时候,背景业务流不会产生离散的仿真事件,但是会以延时的形式来影响实际业务的性能,进而影响统计结果以体现背景业务对网络的影响。配置背景业务一般通过以下两种方式进行:

(1) 设置链路背景负载的方式。通常在某两个节点之间的链路上设置背景负载,在具体应用时以背景利用率 Traffic Mix (%) 的形式给出,背景利用率代表流量占链路总带宽的百分比,若 Traffic Mix (%) 设定为 All Background,则全部为背景流量,若 Traffic Mix (%) 设定为 40%,则 40% 是背景流量,而剩余的 60% 则作为精确流量从应用层发送出去。

(2) 采用应用需求/业务流的方式。利用 OPNET 中提供的 Application Demand/Traffic Flow 对象连接网络拓扑中的任意两个节点,从而来模拟这两个节点之间的背景业务流。

## 2 微网的概念及结构

### 2.1 微网概念

微网是本世纪初提出的一个新概念,到目前为止,美国电气可靠性技术解决方案联合会 (CERTS, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) 和欧盟微网项目 (European Commission Project Microgrids) 等机构以及日本、加拿大等国都对其作出了定义<sup>[8-10]</sup>,概括来说,微网是集可再生能源、负载、储能装置和控制系统的小型发配电系统,其能够实现自我控制、保护和管理,既能与上级大电网并网运行,也可以在发生故障时孤岛运行,它可作为配电网的电源和负荷,是智能电网的重要组成部分。

### 2.2 微网的基本结构

微网的基本结构如图 1 所示<sup>[11]</sup>。图 1 中,微网通

过变压器与配电网相连,微网采用分层的方式运行, RMU 为远端管理单元, MGCC 为微网中央控制器, MC 为微电源控制器, LC 为负荷控制器, SC 为储能装置控制器。DG 为分布式电源,可以是太阳能光伏电池、风力发电机、微型燃气轮机、燃料电池等,储能单元可以是蓄电池、超级电容器和超导储能等,负荷可以是电动机负荷和热负荷等。各个单元通过电力电子接口分别接入微网。图 1 中有 3 条馈线 A、B 和 C,呈放射状结构,馈线 A 和馈线 C 上安装有多个重要负荷、DG 和储能单元等,馈线 B 上为非重要负荷,特殊情况下可以将其切断,停止对非重要负荷供电。

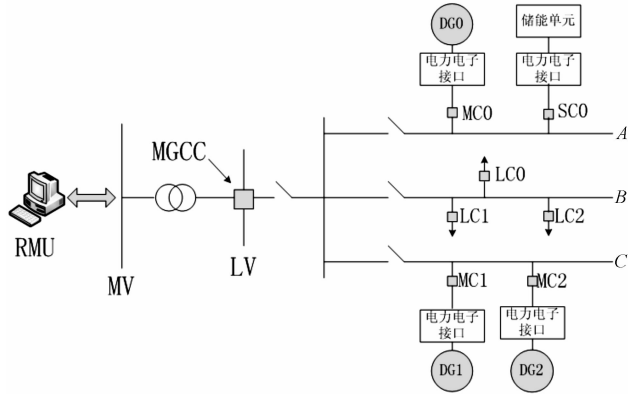


图 1 微网基本结构

### 2.3 微网通信业务分析

IEC61850 根据变电站自动化系统需要实现的控制、保护和监控功能将其分为变电站层、间隔层和过程层,微网中的通信业务也大致分为保护和控制业务等,目前已有关于基于 IEC61850 的微网的研究<sup>[12-14]</sup>,本研究依据 IEC61850 对变电站的分层将微网通信系统分为 RMU、MGCC 和 MC/LC/SC 3 层,变电站与微网通信映射图如图 2 所示。

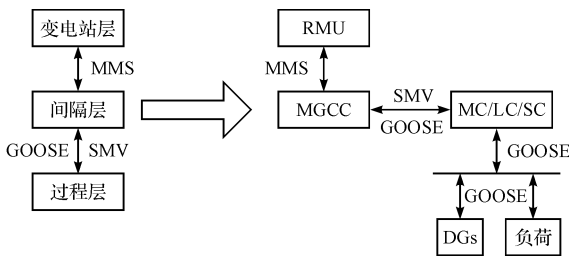


图 2 变电站与微网通信映射图

图 2 中, RMU 与 MGCC 之间依据制造报文规范 (MMS, Manufacturing Message Specification) 通信,涉及的通信业务主要是文件传输业务; MGCC 与 MC/LC/SC 之间采用面向对象的通用变电站对象事件 (GOOSE, Generic Object Oriented Substation Event) 或者采样值 (SMV, Sampled Measured Value) 通信,涉及

的通信业务主要是保护和控制业务; MC/LC/SC 与 DG 和负荷之间采用 GOOSE 通信,通信业务主要是事件报告报文。

## 3 OPNET 在微网通信业务仿真中的应用

### 3.1 微网的 OPNET 建模

在利用 OPNET 对微网进行建模时, RMU 选用 ethernet\_server\_adv, MGCC 和各种控制器 (LC、MC 和 SC) 选用 eth4\_slip\_multihomes\_server, 负荷、DG 以及储能单元选用 ethernet\_station\_adv, 所有交换机都选用 ethernet16\_switch\_adv。

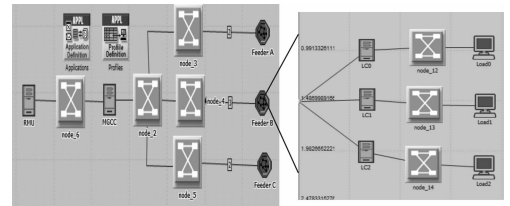


图 3 微网 OPNET 网络模型

### 3.2 微网中通信业务建模

微网的文件传输业务采用 FTP 业务建模,其数据长度为 512 KB,数据到达间隔为 360 s<sup>[15]</sup>。保护和控制业务报文长度为 100 Bytes,报文到达间隔为 2 ms;事件报告报文长度为 230 Bytes,报文间隔为 1 ms<sup>[3]</sup>,保护和控制业务是双向流动的业务,采用双向 Video Conferencing 业务建模,时间报告采用单向 Video Conferencing 业务建模。分别设置保护和控制业务、事件报告以及文件传输业务的优先级为 7、3 和 0,数值越大优先级越高。以保护和控制业务为例,Video Conferencing 主要参数配置如下:

Incoming Stream Interarrival Time (seconds): constant (0.002)

Outgoing Stream Interarrival Time (seconds): constant (0.002)

Incoming Stream Frame Size (bytes): constant (100)

Outgoing Stream Frame Size (bytes): constant (100)

Type of Service: Reserved (7)

Traffic Mix (%): 50%

微网中涉及的业务远远不止保护和控制业务、文件传输和事件报告 3 种,其他的通信业务可以采用背景业务建模的方式来模拟,本研究采用加载应用需求的方式。其参数配置如下:

Start Time (seconds): uniform (100,110)

End Time (seconds): constant (600)

Request Parameters:

Size (bytes): exponential (256)

Rate (requests per hour): exponential (20)

Type of Service: Best Effort (0)

Response Parameters:

Size (bytes): exponential (1024)

Traffic Mix (%): 50%

Transport Protocol: UDP

### 3.3 运行结果及仿真分析

依据 IEC61850 标准,跳闸命令报文属于快速报文,其传输延时不得超过 3 ms;事件报告报文属于中速报文,其传输延时不得超过 100 ms,一般情况下都可满足需要;文件传输报文的传输延时则不做要求<sup>[16]</sup>。文中保护和控制业务属于快速报文,因此本研究只考察保护和控制业务的延时是否满足要求。在微网中,网络的整体通信性能、某一种重要业务的响应时间以及某个节点的延时等都是比较重要的统计指标,因此本研究设置的统计量有:

(1) Global Statistics—Ethernet—Delay (sec)

Global Statistics—Video Conferencing—Packet End-to-End Delay (sec)

(2) Node Statistics—Ethernet—Delay (sec)

本研究设定仿真时间为 600 s,前 100 s 作为设备初始化时间,所有的业务都在 100 s ~ 110 s 之间加载,微网的链路采用 10 Mbit/s 和 100 Mbit/s 两种。微网的通信延时、保护和控制业务延时分别如图 4、图 5 所示。

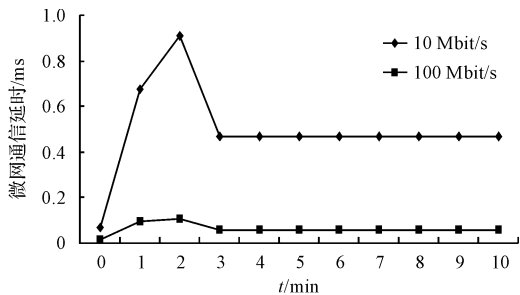


图 4 微网通信延时时图

由图 4 可以看出,链路带宽为 10 Mbit/s 时微网最大的整体延时仅为 0.9 ms,完全满足系统的实时性要求,链路带宽提高到 100 Mbit/s 时其性能更好。

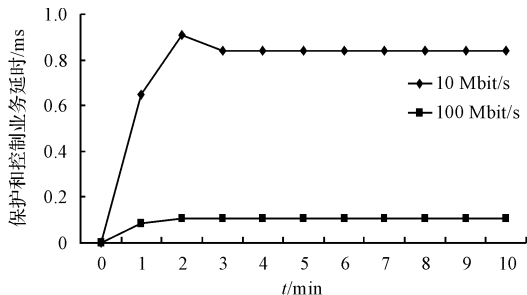


图 5 保护和控制业务延时时图

由图 5 可知,链路在带宽为 10 Mbit/s 时保护和控制业务的最大延时接近 1 ms,虽然其延时没有超过极限 3 ms,但在仿真中发现当微网中业务流增加到一定程度时,其延时可能会发散,链路采用 10 Mbit/s 将会影响其通信的性能,而链路带宽升级至 100 Mbit/s 时最大延时不足 0.2 ms,因此,在实际应用中针对本研究规模的微网宜采用速率为 100 Mbit/s 的带宽。

在微网中,分布式发电单元、储能单元和负荷等节点的延时也是比较重要的统计指标,本研究选取馈线 A 的储能单元、馈线 B 的 Load2 和馈线 C 的 DG2 作为研究对象来统计延时情况,结果如图 6 所示。

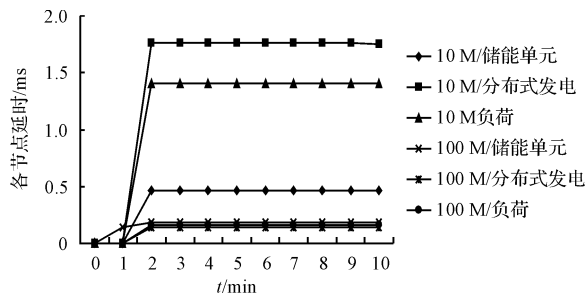


图 6 各节点延时时图

由图 6 可知,在链路带宽为 10 Mbit/s 时分布式发电设备的延时达到了 1.8 ms,在突发情况或者数据流增大时可能不能满足微网通信延时的要求,这种情况下带宽为 100 Mbit/s 时节点的实时性能更好,相对能满足通信需求。

## 4 结束语

本研究对 OPNET 软件及其业务建模的步骤作了简要介绍,阐述了微网的概念,构建了微网的基本结构,并把变电站自动化系统的 IEC61850 标准应用到微网中来分析微网的通信业务,然后利用 OPNET 构建微网的拓扑结构,采用明确业务和背景业务建模相结合的方式对微网中的主要通信业务进行建模,并分析了微网的整体延时、保护和控制业务延时以及各节点的延时,仿真结果表明,在链路带宽为 100 Mbit/s 时微网的全局实时性能、保护和控制业务以及各节点的实时性能都比较理想,这对微网通信系统带宽的选择以及其他业务的建模提供了一定的参考。

### 参考文献 (References):

[1] 吴迪. 基于网络仿真技术的网络性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 2006.  
 [2] 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.

[3] 窦晓波,胡敏强,吴在军,等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术,2008,32(17):98-104.

[4] 童晓阳,廖晨淞,周立龙,等. 基于 IEC61850-9-2 的变电站通信网络仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):69-74.

[5] 高 嵩. OPNET Modeler 仿真建模大解密[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

[6] 杨光敏,蔡光卉,常 俊,等. 基于 OPNET 的智能配网 AMR 业务建模及仿真[J]. 电力系统通信,2012,33(240):82-87.

[7] Riverbed Technology. OPNET Modeler-OPNET Technologies [EB/OL]. [2012-12-29]. <http://www.opnet.com>.

[8] 鲁宗相,王彩霞,闵 勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.

[9] LASSETTER R, AKHIL A, MAMAY C, et al. The CETRIS Micro-grid Concept [EB/OL]. [2008-10-08]. <http://certs.tbl.gov/pdf/50829.pdf>.

[10] 王成山,杨占刚,王守相. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):99-105.

[11] 袁新喜,谈志远,陶维青. IEC61850 标准在微电网中的应用探讨[J]. 电测与仪表,2012,49(7):49-53.

[12] ALVAREZ A R, SUBIRACHS A C. Design, management and comissioning of a utility connected microgrid based on IEC 61850[J]. **IEEE ISGT Europe**,2010(1):1-7.

[13] YOO B K, YANG S H. Communication architecture of the IEC61850-based micro grid system[J]. **Journal of Electrical Engineering & Technology**,2011,6(5):605-612.

[14] 邓 卫,裴 玮,齐智平. 基于 IEC61850 标准的微电网信息交互[J]. 电力系统自动化,2012,36(7):1-6.

[15] 韩小涛,聂一雄,尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术,2005,29(6):67-71.

[16] IEC. IEC61850 Communication networks and systems in substations[S]. IEC,2003.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

韦幸幸,张有兵,谢路耀,等. OPNET 在微网通信系统仿真中的应用[J]. 机电工程,2014,31(3):404-408.

WEI Xing-xing, ZHANG You-bing, XIE Lu-yao, et al. Application of OPNET in microgrid communication system simulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(3):404-408. 《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>

(上接第 403 页)

## 6 结束语

本研究结合实际工程项目,详细介绍了 Flash 头文件烧写法,其中包括 Flash 擦除程序、烧写程序以及头文件的生成方法,该方法简单易懂,且程序代码量非常小,对不同型号的 Flash 芯片只需修改指令字,具有很强的通用性。通过对 TMS320DM642 的程序加载机制和加载方法研究,成功编写了具有项目针对性的二级 Bootloader 程序。最后,通过简单的方波测试程序进行了方案验证。研究结果表明,Flash 头文件烧写法和二级 Bootloader 程序具有正确性和可行性。

### 参考文献 (References):

[1] 许永辉,杨京礼,林连雷. TMS320DM642 DSP 原理与应用实践[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.

[2] 韦金辰,李 刚,王臣业. TMS320C6000 系列 DSP 原理与应用系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[3] Texas Instruments. TMS320C6000 EMIF to External Flash Memory (SPRA568A)[Z]. Texas Instruments,2002.

[4] 王跃宗,刘京会. TMS320DM642 DSP 应用系统设计与开发[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.

[5] Adanced Micro Devices. Am29LV033C Datasheet[Z]. Advanced Micro Devices,2003.

[6] 李方慧,王 飞. TMS320C6000 系列 DSPs 原理与应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社. 2005.

[7] 曾昭健,毛 韬,朱善安,等. 串行引导加载技术在 DSP 网络实验系统中的应用[J]. 机电工程,2007,24(8):17-19.

[8] 韩 飞,胡春海,李 伟. TMS320C6000 系列 DSP 开发应用技巧[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[9] Texas Instruments. TMS320C6000 DSP/BIOS Users Guide (SPRU423E)[Z]. Texas Instruments,2004.

[10] Texas Instruments. Creating a Second-Level Bootloader for FLASH Bootloading on TMS320C6000 Platform With Code Composer Studio (SPRA999A1)[Z]. Texas Instruments, 2006.

[11] 田黎育,何佩琨,朱梦宇. TMS320C6000 系列 DSP 编程工具与指南[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[编辑:李 辉]