

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.013

# 基于 OPNET 的数字化变电站 通信网络仿真建模及应用\*

谢 栋<sup>1</sup>, 李 勇<sup>1</sup>, 章坚民<sup>2\*</sup>, 朱 玛<sup>1</sup>, 王 珍<sup>2</sup>, 侯连全<sup>2</sup>

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对数字化变电站通信网络仿真问题, 首先在对数字化变电站站控层、间隔层、过程层三层数据流的特点分析基础上, 根据 OPNET 网络仿真软件的模型要求, 提出了变电站数据流的相应数学模型, 分别从节点、网络、业务 3 个方面对变电站通信网络建立了相应的 OPNET 模型以及配置方案。绍兴某变电站的网络通信性能仿真结果表明, 所提出的 OPNET 模型及配置方案具有正确性和有效性。

**关键词:**数字化变电站; 通信网络; 数据流; OPNET; 网络性能仿真

中图分类号: TM4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)03-0313-06

## OPNET based digital substation communication network simulation modeling and application

XIE Dong<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, ZHANG Jian-min<sup>2</sup>, ZHU Ma<sup>1</sup>, WANG Zeng<sup>2</sup>, HOU Lian-quan<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaoxing Electric Power Supply Company, Shaoxing 312000, China;

2. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the simulation of communication network of digital substation, mathematical models applicable for OPNET communication simulation software were built based on the data flow analysis of three layers of digital substation, i. e., station layer, bay layer, and process layer; further, in order to fit into the requirements of OPNET, the communication network of digital substation was modeled from views of node, network and business, together with the OPNET configuration scheme. The results of real application of a substation in Shaoxing grid indicate the proposed model as well as the configuration methods are correct and effective.

**Key words:** digital substation; communication network; data flow; OPNET; communication behavior simulation

## 0 引 言

变电站是电力输变配系统中最关键的环节。变电站通信网络与系统 IEC61850 国际标准加快了全球数字化变电站技术与推广<sup>[1]</sup>, 基于工业以太网技术的变电站通信网络越来越复杂, 对其实时性、安全性等关键性能的认识尚不足<sup>[2-4]</sup>, 因此对数字化变电站通信网络性能以及网络信息安全的仿真研究<sup>[5-6]</sup>, 不仅

具有理论价值, 而且更具现实意义。

成熟的通信网络仿真工具并不多见, 其中 OPNET 是得到应用最为广泛的优秀仿真软件; OPNET 在智能变电站也得到了初步应用, 包括过程层<sup>[7]</sup>, GOOSE 网络<sup>[8]</sup>, 继电保护<sup>[9-10]</sup>等; 这些研究均没有从变电站通信网络全局出发, 揭示 OPNET 在变电站通信网络仿真的系统方法和过程, 缺乏工程应用的普遍指导意义。

利用某种通信网络仿真软件来进行变电站网络通

收稿日期: 2015-11-23

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E07001); 国网浙江省电力公司科技项目(ZBGW15-011-007-83)

作者简介: 谢 栋(1971-), 男, 浙江绍兴人, 工程师, 主要从事继电保护管理运行方面的研究. E-mail: XIED@163.com

通信联系人: 章坚民, 男, 浙江杭州人, 教授. E-mail: zhangjmhzen@hdu.edu.cn

信仿真,不仅需要详细掌握该仿真软件对通信过程的数学建模原理和应用要求,也需要对变电站网络通信的特点有深入了解,才能实现对变电站网络通信的仿真建模,使其能最好地映射到仿真软件所定义的通信模型中去,使得基于仿真软件的仿真与真实网络系统一致。

本研究尝试基于 OPNET 的变电站通信网络仿真工程应用的系统建模方法,首先对数字化变电站的站控层、间隔层、过程层 3 层数据流进行分析,并给出 OPNET 所适应的数学建模,并分别从节点、网络、业务 3 个方面对变电站网络进行系统性建模;针对真实的变电站通信网络,提出完整的基于 OPNET 的仿真参数配置,可用于 OPNET 进行变电站通信性能仿真。

## 1 OPNET 仿真软件

OPNET 由麻省理工(MIT)信息决策实验室开发,目前被广泛应用在计算机网络、通信以及国防等领域,是业界公认的通信网络、协议、设施的优秀建模与仿真工具<sup>[11]</sup>;其中 OPNET Modeler 是进行网络仿真最常用的模块<sup>[12]</sup>。OPNET Modeler 采用模块化以及层次化的建模方式,具体包括以下 4 种编辑器<sup>[13]</sup>:

(1) 进程编辑器(Process Editor):对节点内功能模块中的各个事件之间的控制流进行定义;

(2) 节点编辑器(Node Editor):对节点中硬件以及软件模块之间的数据流进行描述,并对网络中的节点结构进行定义。利用(1)的进程编辑器创建的进程模块为各个模块定义一个功能;

(3) 网络编辑器(Network Editor):利用节点的构建对现实当中的网络拓扑进行模型的搭建。用户可以在网络编辑器中通过拖放操作进行网络拓扑的建立,并设置各个元件的属性。

(4) 探针编辑器(Probe Editor)对内置的统计数据收集。

## 2 基于 OPNET 的变电站数据流的分析与建模

### 2.1 数字化变电站网络报文分析

IEC61850 标准中对通信报文的类别以及传送的时间做出了详细严格的规定。根据所要实现的各个功能的要求,网络中传输的通信报文分为以下几种:快速、中速、低速、原始数据、文件传输、时间同步以及存取控制命令 7 种类型,每种类型的报文都定义了其传输时间的要求。从时域的角度来分析,数字化变电站

的数据流可以分为突发性数据流、随机性数据流以及周期性数据流 3 种类型<sup>[14]</sup>,本研究从模型简洁高效的角度出发,按它 3 种类型进行变电站数据流的建模。

### 2.2 突发性数据流分析与建模

变电站发生电气类故障时,间隔层设备会上报开关变位数据、保护动作信息以及时间顺序记录信号;这类数据所用的传输时间很集中,长度比较短,具有突发性的特点,因此将其划分为突发性数据流。突发性的数据流的到达概率会受到前一段时间数据到达情况的影响,并不是以一定的概率  $\tau$  出现,即当网络接收到信息的时候,突然会持续一段时间的报文发送;当没有数据到达的时候又会持续一段空闲时间,突发性数据表现出共同的自相似性特点<sup>[14]</sup>。

突发性数据接收与发送,可以最简单的 ON/OFF 模型模拟:当数据以一定的速率产生时,处于 ON 状态;没有任何数据产生时,处于 OFF 状态;数据 ON 期间服从的分布函数与 OFF 期间的分布函数可以相同,也可以不同,且两部分叠加之后的数据相关性由分布函数决定。

把单个数据源 ON 状态的持续时间设为  $\tau(i)$ ,服从重尾分布函数:

$$P(\tau > t) : t^{-\alpha} t \rightarrow \infty, 1 < \alpha < 2 \quad (1)$$

其均值是有限的,方差是无限的,即  $\alpha_i = E(\tau) < \infty$ 。

而 OFF 状态服从的分布函数是持续时间为  $\theta(i)$ ,采用传统泊松过程当中的负指数分布:

$$P(\tau > t) : e^{-\lambda t} t \rightarrow \infty \quad (2)$$

只要 ON 或 OFF 期间的时间长度所服从的分布函数当中之一为重尾分布,那么将这种类型的无数多个 ON/OFF 数据进行相加,就会形成具有自相似这种特性的突发性数据流<sup>[15]</sup>,且满足下式:

$$\begin{cases} \beta = \alpha - 1 \\ H = 1 - \frac{\beta}{2} = \frac{3 - \alpha}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $H$ —自相似程度参数 Hurst; $\beta$ —自相关函数  $r(k) = E[(x_i - u)(x_{i+k} - u)]/\sigma^2 \sim k^{-\beta}$  的系数,并且  $\beta$  的约束条件是  $0 < \beta < 1$ 。

一般情况下  $H$  范围是  $0.5 < H < 1.0$ ,其含义是:当数据在前一段时间处于突发状态时,后一时间段持续这种突发状态的可能性大小。

### 2.3 随机性数据流分析与建模

数据传输过程中,数据发送不定时且没有规律可循的数据,划分为随机性数据;包括以下两种类型:

(1) 一些长度较短,主要负责传输变电站保护功

能的报文,例如:保护功能联锁、开关操作命令等快速报文。

(2)一些实时性要求比较低的数据,例如文件传输、保护定值修改等数据,这些数据的尺寸相对较长一些。

随机性数据是由变电站事件触发的报文。数据接收有如下特征:在任何一个时间段内,数据的出现是随机的,假设报文分组出现的概率为  $P$ ,其与时间没有任何关系,且前后报文的到达情况也不相关;假设报文的平均到达率为  $\lambda$ ,报文到达的个数为  $k$ ,则在时间  $t$  的间隔里,有  $k$  个报文到达的概率服从参数为  $\lambda$  的泊松 Poisson 分布<sup>[16]</sup>,即对任意的  $s, t \geq 0$  有:

$$P\{N(t+s) - N(s) = k\} = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (4)$$

## 2.4 周期性数据流分析与建模

变电站正常运行时,往往只有周期性的数据报文,可划分为两种类型:①间隔层的 IED 按固定的时间间隔发送到站控层设备的模拟量数据以及开关的状态信息;②过程层电压互感器、电流互感器所采集到的数据,传递给间隔层 IED 的采样值。这类周期性数据,

对时间要求比较严格,数据也比较多,通信网络时延是其关键的影响因素。周期性数据的报文尺寸,一般情况下长度是固定的,属于定时发送或时间驱动的数据;所以研究者可以采用长度固定、到达时间间隔为周期的数据来进行模拟<sup>[17]</sup>。

本研究定义周期数据报文  $i$  的长度是  $L_i$ ,  $C_i$  是报文在传输过程当中的排队时延、传播时延以及传输时延的总和,  $P_i$  是数据产生的周期,或者是数据所到达的时间间隔,  $D_i$  是数据包  $i$  从产生到达目的地这段时间的最大时延。因此,周期性数据流  $M_i$  可以表示为:

$$M_i = (L, P_i, C_i, D_i) \quad (5)$$

根据 61850 的标准规定,不同类型的数据包在网络传输的过程当中都有一个所允许的最大时延,所以周期性的数据包在传输的过程当中需要满足下面的约束条件(其中  $T_i$  为数据包  $i$  的端到端时延):

$$T_i < D_i \quad (6)$$

## 3 基于 OPNET 变电站通信网络建模的应用案例分析

绍兴某变电站的网络结构如图 1 所示。

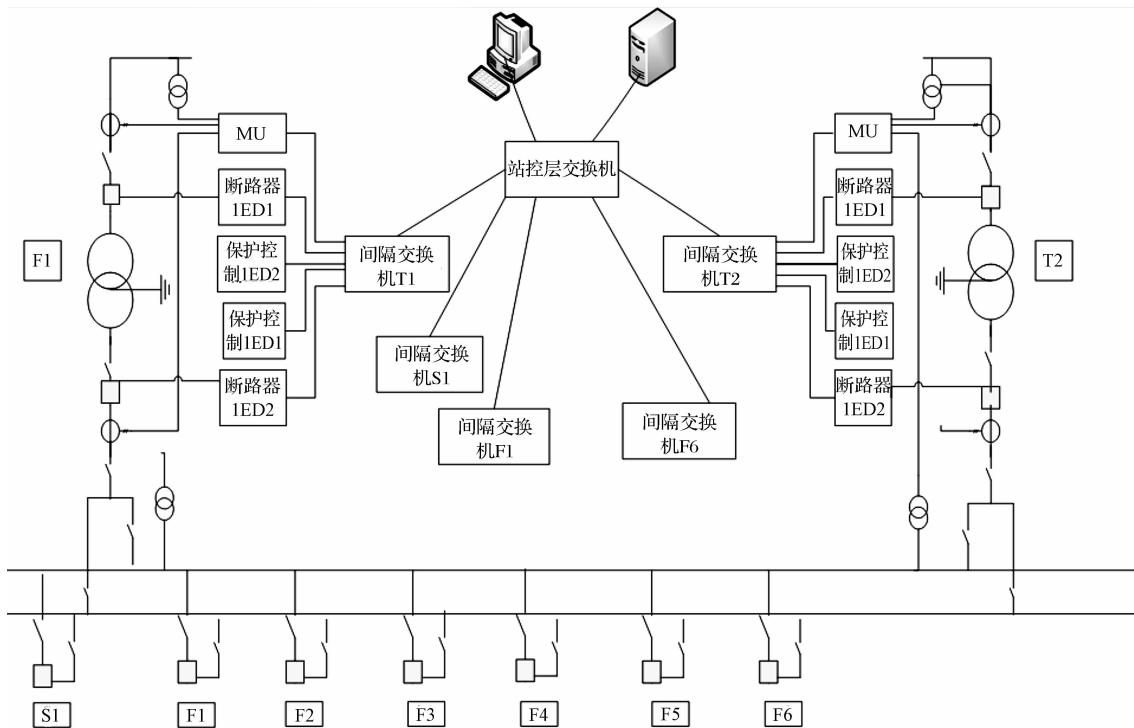


图 1 某数字化变电站网络结构模型图

### 3.1 节点建模

变电站通信网络节点建模是指在 OPNET Modeler 中对功能可以替代变电站通信实际功能的模型进行选取,并根据自己的需要对节点中的进程层进行改进,达到与实际网络模型的一致。数字化变电站通信网络模

型,包括站控层的服务器、监控主机,间隔层的保护装置以及智能断路器,过程层的合并单元等。

网络节点可以分成以下两类:①交换节点,用来完成数据的转发与交换;②终端节点,产生、处理以及接收数据。OPNET Modeler 节点域对网络层以及进程层

的中间层进行连接,采用基于节点模块的建模方法,其中节点行为的某一个方面是由节点模块进行实现,功能完整的节点是由几个节点模块进行组合来实现的,一个节点可能包含几十个甚至上百个节点模块,大部分节点使用 TCP/IP 或者是 OSI 参考模型,或者是按照协议的层次分成互不相同的模块。

OPNET Modeler 仿真软件所选用的网络是以太网 Ethernet,网络节点所采用的是 TCP/IP 协议栈模型,仿真所模拟覆盖自最顶层即应用层,到 Ethernet 的所有协议层。根据变电站通信网络中不同 IED 设备发送数据类型的不同,选择对应的模型。

根据对数字化变电站数据流的流向以及数据模型的建立与分析,对于保护控制 IED、智能断路器、合并单元 MU 等智能电子设备 IED,本研究选择 OPNET Modeler 当中的 ethernet\_wkst\_adv 模型来进行模拟,ethernet\_wkst\_adv 的节点模型如图 2 所示。从下至上总共有 8 层,分别是发信机 hub\_tx\_0\_0 和收信机 hub\_rx\_0\_0、数据链路层 mac、arp、ip、ip\_encap、传输层 tcp、适配层 tpal、应用层 application,其中 arp、ip、ip\_encap 是属于网络层,模型中的各层协议栈只和它的上、下层协议栈产生关联。其中接收机 hub\_rx\_0\_0 是用来对数据进行接收, hub\_tx\_0\_0 用来对数据进行发送;MAC 层是用来对以太网 MAC 层的协议以及各种算法的实现;网路层所划分的 3 个层次的功能是:arp 层是对和地址有关的信息进行处理,ip 层是对网络的性能进行统计,ip\_encapd 的操作主要是面向数据包的;TCP 层的协议主要有 TCP、UDP,主要是进行面向非连接或是连接的服务;tpal 为 application 与各种不同的 tcp 进程之间提供统一的接口;application 处理来自客户端的

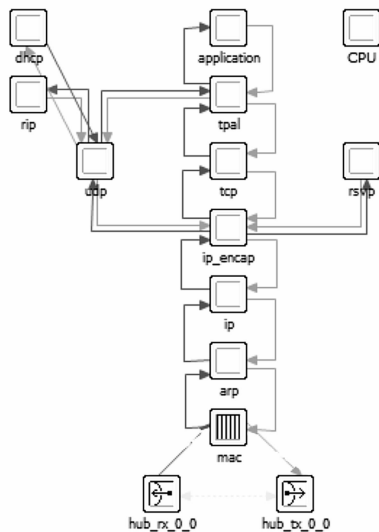


图 2 ethernet\_wkst\_adv 的节点模型

请求并产生请求。该以太网模型能够满足实际变电站分层通信的仿真模型要求。

### 3.2 网络拓扑结构建模

变电站网络模型由通信链路、子网以及通信节点 3 个主要模块组成,其中网络中级别最高的是子网,它可以封装其他网络层对象,例如交换机、IED 设备等。该变电站包括 9 个间隔(变压器间隔 T1、T2,馈线间隔 F1 - F6,母线间隔 S),一个变电站监控主机,一个节点服务器。利用 OPNET Modeler 中的节点模型来对变电站中站控层以及间隔层之间的通信进行仿真。间隔层的 9 个间隔封装成为 9 个子网,每个子网里面的交换机与变电站层交换机相连,然后再与监控主机及服务器相连,链路带宽为 10 BaseT,最后形成星型网络拓扑结构,如图 1 所示。站级网络模型以及子网模型如图 3、图 4 所示。

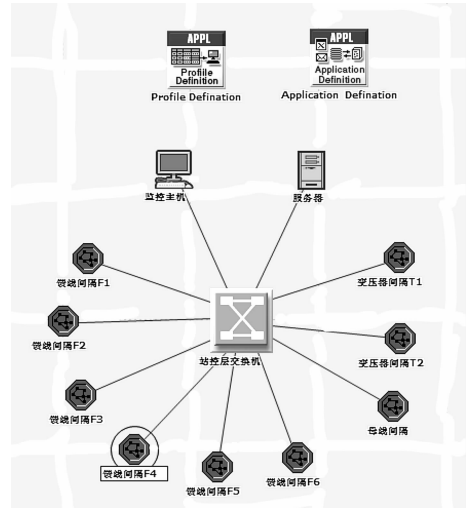


图 3 站级网络模型

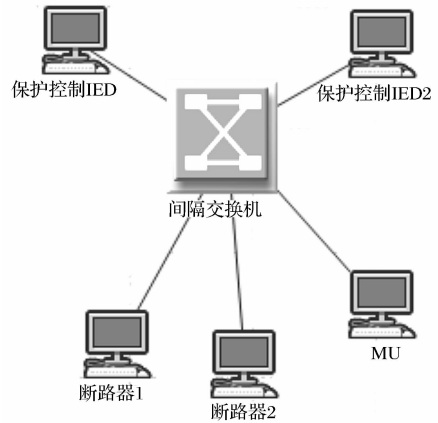


图 4 子网模型

### 3.3 业务建模数据流量的配置

数字化变电站通信网络的过程层、间隔层、站控层

3个层次之间数据流的流向以及数据的类型分析如下:

#### (1) 合并单元 MU 到保护控制 IED 数据流分析。

在过程层, MU 是很重要的设备, 每一个间隔内保护控制 IED 按一定的频率接收同一个间隔内的 MU 发送来的周期性数据, 即采样值报文 SMV, 发送方式为广播方式。报文 SMV 的最大长度为 159 byte, 然后再加上 12 byte 的帧间隔字, 一共是 171 byte 即 1 368 bit, 采样的频率设为 80 点/周期, 所以总的流量是  $80 \times 50 \times 1\ 368 = 5.472$  Mbps。在仿真时, 这种类型的数据业务建模命名为 SMV 业务, 使用的链路带宽为 10 BaseT, 报文大小设定为 180 bytes。

#### (2) 保护控制 IED 以及断路器 IED 到达服务器的数据流向分析。

位于间隔层的保护控制 IED 以及断路器 IED 向站控层的服务器传送间隔层和过程层设备的状态信息, 传送的信息为周期性数据, 发送的时间间隔为 20 ms, 数据的大小为 256 bytes, 数据流量计算得  $50 \times 256 \times 8 = 102.4$  kbps。仿真时, 这种类型的数据业务建模命名为 IED\_status 业务, 设定报文的大小为 256 bytes, 发送和接收时间间隔分别服从  $t = 0.02$  的常数分布。

#### (3) 保护控制 IED 到断路器 IED 数据流向分析。

在变电站出现故障时, 间隔层中的保护控制 IED 会向本层子网内的断路器传送跳闸命令, 这种报文的大小为 16 byte, 是随机性发生的; 从随机性数据流的分析可知, 随机性数据的发送与接收时服从泊松分布的。仿真时, 这种类型的数据业务建模命名为 trip\_message 业务, 设定报文的大小为 16 bytes, 发送和接收时间间隔分别服从  $\lambda = 0.02$  的泊松分布。

#### (4) 断路器 IED 到保护控制 IED 数据流向分析。

此时产生的报文为 GOOSE 报文; 其报文尺寸为服从 16 bytes 的常数分布; 出现故障时, 保护控制 IED 会将跳闸命令的报文传送给断路器 IED, 在第一次发送完成后, 会继续以 2 ms, 4 ms... 这样的时间间隔进行顺序的重新发送。为了更能突出仿真环境的恶劣, 本研究将这类报文在仿真的过程当中设置成时间间隔为 2 ms 周期性进行发送, 在仿真的时候, 报文的大小为 16 bytes 即 128 bit。

#### (5) 服务器到变电站站控层主机数据流向分析。

在仿真时, 本研究把站控层服务器设置成支持 FTP(file transfer protocol) 业务, 站控主机对 FTP 服务器传输来的大型文件进行接收, 仿真的时候设定其文件大小为 1 M。

### 3.4 业务建模配置过程

OPNET 提供的是一种端到端的业务, 相当于 IEC61850 通信模型中的客户/服务器模型, 并且 OPNET 已经编写好了常用的协议并形成模块, 按流程配置即可, 业务建模的流程可以分 4 步:

#### (1) 配置应用定义 (Application Definition)

该流程步骤是指对客户或者客户组所有可能开展的业务进行定义, 参数包括所发间隔概率、数据包尺寸等。有 9 种应用已经在 OPNET 软件中被定义, 本研究中所要用到的应用主要有两种: FTP 以及 Video Conference, 可以通过不同链路以及不同节点的数据流量的配置, 比较便捷直观的仿真出报文端到端的时延等参数。

#### (2) 定义应用业务规格配置全局对象

在应用业务定义好之后, 要进行配置应用业务规格 (Profile Definition), 用来描述 Application Definition 中定义的各种数据流的行为, 例如开始的时间是多少, 报文持续的时间是多少等等。

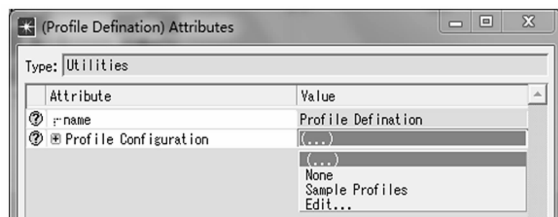


图5 Profile Definition 参数设置界面

Profile Definition 的设置方法是对 Profile Config 模块的属性进行业务的设置, 设置的流程如图 5 所示。业务主调参数设置如图 6 所示, 图 6(a) 第一列为业务名称, 第二列为业务的 Applications 属性设置, Start Time 列是对业务开始的时间进行设置, 在进行设置的时候, 三种业务的开始时间最好分别设置在不同的时间开始。Duration 代表的是业务的持续时间。图 6(b) 的 Start Time offset 一栏中设置的时间加上图 6(a) 的 Start Time 才是仿真真正开始的时间。

Profile Name	Applications	Operation Mode	Start Time (seconds)	Duration (seconds)
SMV SMV	(...)	Serial (Ordered)	constant (100)	End of Simul
IED_status IED_status	(...)	Serial (Ordered)	constant (100)	End of Simul
trip_message trip_message	(...)	Serial (Ordered)	constant (100)	constant (10)
GOOSE GOOSE	(...)	Serial (Ordered)	constant (100)	End of Simul
FTP FTP	(...)	Serial (Ordered)	constant (100)	constant (10)

(a) 业务主调参数设置 Start Time 定义页面

Name	Start Time Offset (seconds)	Duration (seconds)	Repeatability
SMV SMV	constant (0)	End of Profile	Unlimited

(b) Start Time offset 定义页面

图6 业务主调参数设置界面

### (3)对服务器应用业务的配置

只要在 Application Definition 和 Profile Definition 中定义好的应用,服务器都可以支持,但还需要按照通信网络需求对服务器所支持的应用类型进行设置。由于服务器用于接收设备的状态信息,支持 Video Conference 服务。具体配置方法是在服务器属性里对 Supported Services 栏里进行设置,服务器应用业务的配置如图 7 所示。

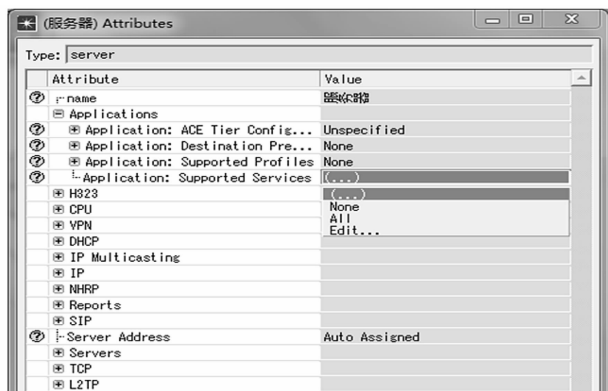
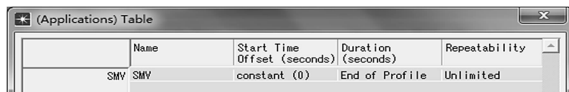


图 7 服务器应用配置界面

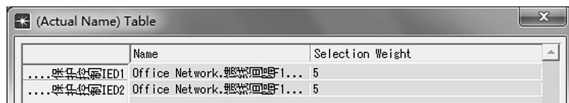
### (4)客户应用业务的配置

在完成以上服务器以及应用业务的配置之后,接下来要对网络中各个子网中的节点进行支持业务以及

发送与接收对象的配置。这些节点所需要配置的业务是在(1)(2) Application 和 Profile 中已经设定好的业务主询。一个节点可以支持多种业务主询。电压互感器和电流互感器上传的周期性数据流 SMV 报文,上传到 MU,所以 MU 是 SMV 报文的发送源,MU 上传到保护控制 IED,支持 SMV 业务。断路器 IED 负责控制断路器的开闭,并监测断路器的状态,在故障情况下它接收来自保护控制 IED 的跳闸命令,同时通过过程总线,发送状态变化信息至保护控制 IED,所以它支持 IED\_statu 以及 GOOSE 业务;保护控制 IED 位于每个间隔单元当中负责接收采样值报文的同时发送跳闸命令,设定保护控制 IED 支持 trip\_message 以及 IED\_statu 业务。在站控层,服务器向监控主机传送文件,设置服务器支持 FTP 业务。业务建模所需参数如表 1 所示。



(a) 支持业务配置



(b) 目标设备配置

图 8 MU 设置

表 1 OPNET 中业务建模参数列表

业务名称	发送/接收时间间隔/s	报文优先级	报文大小/byte	开始时间/s	结束时间/s
SMV	0.00001	4	180	100s	300s
IED_statu	0.02	2	256	100s	300s
Trip_message	Possion(0.002)	5	16	100s	130s
GOOSE	0.002	5	128	100s	130s
FTP	突发	1	1000000	100	130s

以配置合并单元 MU 为例,支持业务配置和目标设备配置如图 8(a)、8(b)所示。建立仿真模型并且选取统计量之后,需要对仿真环境进行设置,通过 File - DES - Configuration/Run Simulation (Advanced) 进入如图 9 所示的界面进行仿真环境设置。仿真的时间设置为 300 s,其中前 100 s,是软件初始化的时间,所以真正仿真开始的时间是从 100 s 开始的。随机数种子保持缺省值 128;每次统计的收集值设置为 100;每隔 500 000 个事件输出仿真值,进行更新。

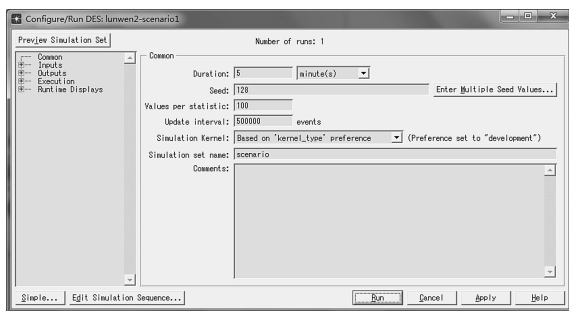


图 9 OPNET 仿真参数设置

(下转第 372 页)

#### 本文引用格式:

谢 栋,李 勇,章坚民,等.基于 OPNET 的数字化变电站通信网络仿真建模及应用[J].机电工程,2016,33(3):313-318,367.

XIE Dong, LI Yong, ZHANG Jian-min, et al. OPNET based digital substation communication network simulation modeling and application[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):313-318,367.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>