

DOI: 10.7667/PSPC161375

基于 OPNET 的广域测量系统仿真与通信延时性能分析

潘天亮, 蔡泽祥, 席禹, 龙翩翩, 陈天

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 广域测量系统对实时性要求严格, 而通信延时是影响实时性的重要因素。通信延时作为广域测量系统延时的重要组成部分, 带有不确定性, 因此成为其通信性能研究的重点和难点。对广域测量系统的通信设备、通信业务和通信网络拓扑进行建模, 并依此对电力系统稳态工况、故障工况和网络设备故障工况三类场景进行仿真。由此得到在不同工况下广域测量系统的通信延时大小, 从而评估分析该系统的现状和瓶颈。为广域测量系统的研究分析提供了新方法, 同时为其规划与建设提供了参考意见。

关键词: 广域测量系统; 通信延时; OPNET; 性能仿真

Simulation of WAMS and performance analysis of communication delay based on OPNET

PAN Tianliang, CAI Zexiang, XI Yu, LONG Pianpian, CHEN Tian

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Wide area measurement system (WAMS) is strict with real-time performance, and communication delay has great impact on real-time performance. Communication delay is an important part of WAMS delay. Its indeterminacy makes it important and difficult to study communication performance of WAMS. This paper establishes models of communication equipment, communication services and communication network topology of WAMS. According to these models, this paper gives three types of scene simulation, including static operating condition of power system, fault operating condition of power system and fault operating condition of network equipment. From this, the paper gets communication delay of WAMS in different operating condition to evaluate and analyze the current situation and bottleneck of WAMS. All above not only provide new method to research and analyze WAMS, but offer reference opinion to planning and construction of WAMS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577073) and Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2016A030313476).

Key words: wide area measurement system (WAMS); communication delay; OPNET; performance simulation

0 引言

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)对实时性的严格要求使得通信延时需要控制在 20 ms 以内^[1]。WAMS 通信延时因受多因素影响而具有不确定性, 这给研究分析带来困难。现时对 WAMS 通信延时的研究分析手段主要是网络设备性能测试, 然而这种方法难以构造复杂场景, 评估规模偏小, 缺少数学模型的构建。

随着 OPNET 等网络仿真软件功能的完善, 它

们已能够满足网络通信研究分析中多场景大规模定量化的需求。文献[2-4]利用 OPNET 依据业务特点分别建立 SCADA 与继电保护的精细业务模型, 从而定量分析相关的网络流量或通信延时问题。文献[5]使用 OPNET 比较了在共享网络和专用网络中 WAMS 通信延时; 文献[6]使用 OMMNET++研究了 WAMS 通信延时、流量、丢包率等网络性能指标, 但是这两文献既缺少对 WAMS 业务精细建模, 也没有考虑其他业务流量对 WAMS 业务的影响。

因此为解决以上问题, 本文的工作是定量精确地建立基于 OPNET 的 WAMS 设备、业务等仿真模型, 并考虑其他业务流量影响的情况下研究分析广域测量系统的网络性能。

1 广域测量系统结构与仿真思路

从数据传输的主体来看，广域测量系统主要包括三个部分：调度中心的主站端，电力调度数据网的网络，厂站的子站端^[7]。广域测量系统的架构及其设备如图 1 所示。

对 WAMS 通信延时研究时，本文考虑因素包括自身业务特点、其他业务流量、设备性能、所在场景和传输路径影响。WAMS 业务的交互过程和数据传输速率的特点明显有别于通用网络业务，要研究

WAMS 通信延时就必须根据其传输协议建立相应的业务模型。非 WAMS 业务在电力调度数据网传输数据时会占用网络资源，必然影响 WAMS 通信延时。设备性能体现硬件的约束，直接影响通信延时。所在场景对通信延时的影响是由 WAMS 在电力系统稳态工况或故障工况中的不同行为特征所致。另外，网络设备故障导致 WAMS 业务传输路径从正常状态的主路径切换至异常状态的备用路径对 WAMS 通信延时有巨大影响^[8]。因此本文仿真需在综合考虑以上因素的基础上建立模型和仿真场景。

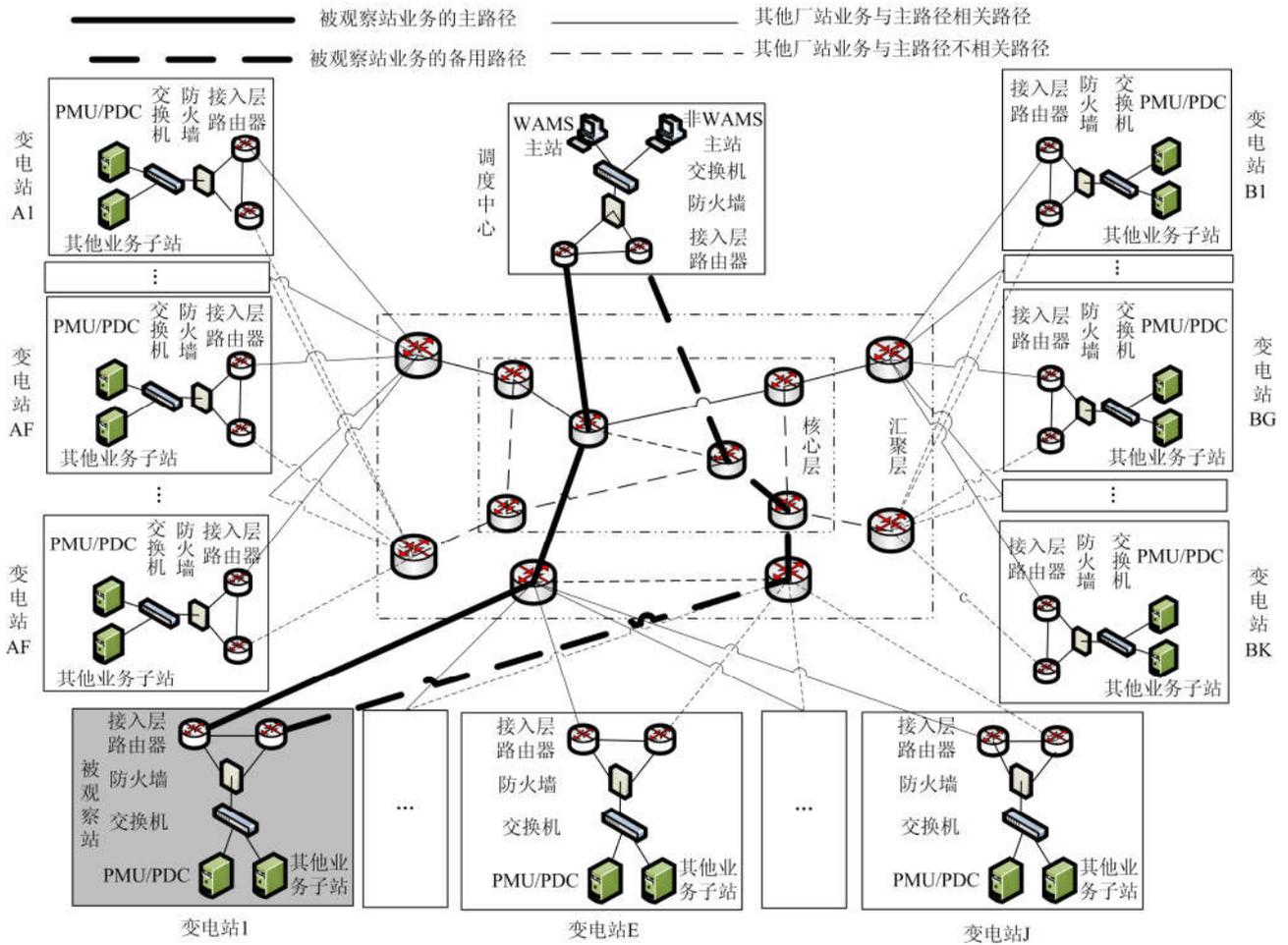


图 1 广域测量系统的组成及其业务传输路径

Fig. 1 Composition of WAMS and the transmission path of its services

2 基于 OPNET 的 WAMS 建模

OPNET Modeler 仿真软件建有丰富的通信设备模型并具有强大的自定义扩展建模能力，但缺少现成的 WAMS 模型。因此本文需要利用自定义建模和参数整定的方法建立 WAMS 的设备、业务和拓扑模型。建模对象分类及方法如表 1 所示。

2.1 实体设备建模

1) PMU/PDC 和 WAMS 服务器建模

在研究广域测量系统的网络延时、网络流量，子站与主站的建模需求主要包括协议中定义的业务交互方式(如问答次数，数据发送频率)，数据单元大小等内容。

表 1 建模对象及方法

Table 1 Modeling objects and methods

类别	建模对象	建模方法
实体设备	PMU/PDC	参数整定
	WAMS 服务器	参数整定
	交换机	参数整定
	防火墙	参数整定
	路由器	参数整定
业务数据	链路	参数整定
	WAMS 业务数据	自定义建模
	非 WAMS 业务数据	参数整定
网络拓扑	电力调度数据网	参数整定及自定义建模
	电力系统稳态工况运行场景	参数整定及自定义建模
仿真场景	电力系统故障工况运行场景	参数整定及自定义建模
		参数整定及自定义建模
	网络故障场景	参数整定及自定义建模

通过在 OPNET 自带的工作站模型中封装广域测量系统的通信业务模型从而建立 PMU/PDC 模型, 该模型能够根据通信业务模型的规则生成和处理数据。WAMS 服务器模型则是以 OPNET 自带的服务器模型为基础配置正确的端对端服务响应, 体现主站的控制和数据汇聚的特点。

2) 交换机建模

交换机模型在 OPNET 自带模型的基础上稍作参数整定即可满足建模需求, 主要需要整定的参数为 VLAN 配置、转发速率和报文优先级, 整定如表 2 所示。

表 2 交换机的整定参数

Table 2 Parameters setting of switch

VLAN 配置	转发速率/(万包/s)		报文优先级
相同业务划分在 相同 VLAN 中	子站 50	主站 3000	全部相同

3) 防火墙建模

针对防火墙设备进行数据过滤分析产生延时的后果建模。

防火墙模型对数据包的分析过滤方法采用代理服务的手段实现, 该方法能够对数据包设定过滤处理延时。防火墙模型选用 ethernet8_slip2_firewall_adv, 设置为具有四核配置的高性能防火墙模式。防火墙对 WAMS 业务中高频传输的实时数据过滤会带来毫秒级的延时, 本文设定防火墙放行 WAMS 通信业务数据, 并对该业务设置 1 ms 的基础过滤延时, 而在防火墙过滤数据量突增时还会增

加该业务的排队过滤延时。

4) 路由器建模

路由器根据路由协议提供的转发路径对延时和网络中流量分布具有重要的影响。

路由器模型选用 OPNET 自带的 ethernet4_slip8_gtwy 路由器, 该型号路由器模型满足路由协议和数据转发速率等需求, 适用于本网络仿真。电力调度数据网路由器应该在正常工况下能够根据链路负载状态而选择传输路径, 并在网络设备故障时能迅速完成路由收敛工作, 因此为了满足这些要求并符合实际工程的惯用路由方式, 本文选择 OSPF 路由协议并整定路由器转发速率为 3000 万包/s。一般汇聚层路由器节点连接接入层链路数不大于 20, 而子站交换机的转发速率设置在 50 万包/s, 路由器的转发能力为其 30 倍, 因此路由器转发速率能够满足现时工程要求。

5) 网络链路及拓扑建模

链路建模主要关注的参数是带宽和长度, 网络拓扑模型依照图 1 建立。

厂站内设备统一采用带宽 100 Mbps 的光纤连接, 而调度中心主站内的链路则使用千兆光纤。电力调度数据网三层结构设计, 层间连接链路带宽不尽相同^[9]。现时经过技术改造升级的 500 kV 变电站和直调电厂在接入层与汇聚层的路由器连接链路都使用带宽为 100 Mbps 的光纤。这种技术改造是普遍趋势, 因此本文的被观察站选择也使用 100 Mbps 光纤作为厂站接入层路由器与电力调度数据网汇聚层路由器的连接链路。汇聚层与核心层的路由器连接采用带宽为 155 Mbps 的链路, 核心层中与调度中心相连的两个核心路由器采用千兆光纤相连, 而核心层内的其他路由器之间则采用带宽为 622 Mbps 的链路相连。

链路的延时组成除了数据包的基本排队外还有基于距离的延时, 一般认为 1 km 光纤产生的传播延时约为 $5 \mu\text{s}$ ^[10]。在图 1 搭建的仿真网络拓扑中, 本文的主子站的链路长度为 280 km, 因此认为链路长度造成的延时为 1.400 ms。

2.2 WAMS 通信业务建模

WAMS 通信业务用于刻画广域测量系统通信业务的交互规律, 规定传输的数据大小。广域测量系统的数据传输协议《GBT 26865.2-2011 电力系统实时动态监测系统第 2 部分: 数据传输协议》(以下简称协议)定义了其业务的交互规律, 数据大小, 因此根据该协议能够精细地建立广域测量系统的通信业务模型。

业务模型在 OPNET 中建模分为三个层次。里

层是基于任务定义(Task Definition)的信息交互过程与数据大小的配置；中层是基于应用定义(Application Definition)的任务组合配置；外层是基于业务简档(Profile Definition)的应用组合配置，业务触发时间和重复周期的配置，框架如图 2 所示。



图 2 通信业务模型配置框架

Fig. 2 Configuration structure of communication services models

协议为 WAMS 业务规定了数据传输的起止、问答方式、数据包大小、频率等特征，本文依据此等特征在 OPNET 中建立 WAMS 业务模型。下面以 WAMS 业务中的“下传 CFG-2 文件”业务为例详细说明如何在 OPNET 中建立通信业务模型。

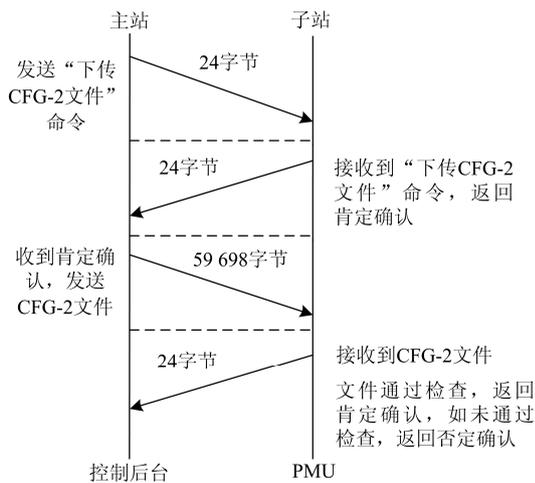


图 3 下传 CFG-2 文件交互过程图

Fig. 3 Interactive process diagram of downloading CFG-2 file

图 3 为“下传 CFG-2 文件”业务的交互过程图。第一阶段，建立从主站到子站发送“下传 CFG-2 文件”命令的传输过程，发送大小为 24 字节的数据。第二阶段，子站接收到“下传 CFG-2 文件命令，返回肯定确认”，发送大小为 24 字节的数据到主站。第三阶段，主站收到肯定确认，以规定格式发送 CFG-2 文件到子站，大小根据参数配置而定。第四阶段，子站接收到 CFG-2 文件，在通过了有效性检验后，子站发送肯定确认到主站，若无法通过有效性检验，子站发送否定确认到主站，数据大小都是 24 字节。由此完成任务定义的交换过程与数据大小配置。

在定义所有任务建立后，根据业务建模需要，它们组合封装为对应的应用，使得应用成为实际意义的业务类型，形成应用定义与通信业务模型的映射关系。通过对应用定义的组合，组建一个业务简档，业务简档等价于通信业务的实际使用方法和过程，它定义了业务触发时间和重发周期参数。本文对协议中定义的 WAMS 业务在仿真中的启动触发流程和重发周期设置如图 4 所示。

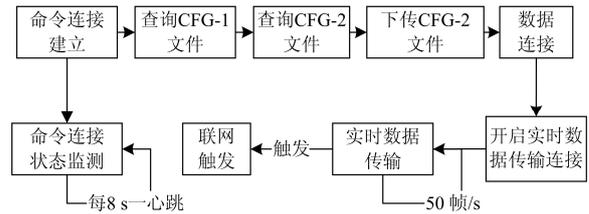


图 4 WAMS 业务启动流程及重发配置

Fig. 4 Starting process of WAMS services and its repeatability configuration

2.3 仿真场景建模

WAMS 通信业务通信延时与电力调度数据网其他业务的流量大小相关，本文利用等值流量方法来模拟其他业务流量对 WAMS 业务的影响。

通过在电力系统稳态运行工况下测量被观测站 WAMS 系统实时数据传输业务流量大小，以此作为厂站“单位等值流量”。其他厂站的等值流量分为 WAMS 业务等值流量和非 WAMS 业务等值流量。其他厂站 WAMS 业务流量用“单位等值流量”根据厂站数量以 1:1 的方式等值。对于其他厂站的非 WAMS 业务等值流量，由于缺乏可靠参考资料，并考虑到非 WAMS 业务的发送周期普遍较长(大于秒级)，数据一般不大(小于 256 kB)，本文认为其平均流量大小为单位等值流量的 60%。另外被观察站内的非 WAMS 业务流量分为平稳型和突发型两类等值，其中平稳型的流量大小设为单位流量的 50%，突发型流量大小与单位流量大小相同^[11-12]。为增大网络传输压力，突发型非 WAMS 业务流量设置在电力系统故障的时间点上。

本文在电力系统稳态运行工况场景中对被观察站进行 WAMS 实时数据传输的流量大小和通信延时考察。

本文在电力系统故障运行工况场景中，WAMS 业务用主路径传输时被观察站进行 WAMS 实时数据传输的流量和通信延时考察。电力系统故障发生在该场景仿真时间的 90 s，此时实时数据传输速率升为 100 帧/s，持续 1 min，并触发联网启动业务。网络故障场景是在电力系统稳态运行时或发生

电力系统故障的情况下, 对电力调度数据网设备进行“N-1”校验的场景。此时 WAMS 业务数据自动切换至备用路径传输, 对被观察站进行 WAMS 实时数据传输的通信延时考察。网络故障设置在仿真时间的 90 s, 对电力调度数据网中设备逐一设置失效故障进行“N-1”校验。

3 广域测量系统通信网络性能仿真

3.1 仿真变电站规模

本文设某 500 kV 变电站, 进出线数共为 10 回, 采用一台半断路器主接线方式下, 10 回线共配置 2 台 PMU, 在监控对象为这 10 回线的条件下, 则 10 回线相量个数共 60 个(包括 10 回线的三相电压、电流), 开关量个数为 110 个(线路带出线隔离开关), 由每个相量 4 个字节, 每个开关量 2 个字节, 根据协议的帧格式规定可确定实时数据帧大小为 954 字节, 配置帧大小为 59 698 字节。

3.2 单位等值流量

在稳态场景中, 变电站 WAMS 子站实时数据传输的平均流量大小作为单个变电站的单位等值流量, 以此作为其他场景中厂站等值流量基础。由图 5 可以得出 PMU 子站实时数据传输业务上送主站流量处于稳态水平, 流量平均值为 415.32 kbps。

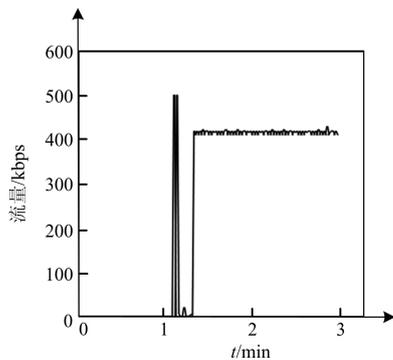


图 5 PMU 子站上送流量

Fig. 5 Uploading traffic of PMU slave station

3.3 电力系统稳态工况运行场景仿真

用单位等值流量作为流量等值的基准等值多个厂站的 WAMS 业务流量和非 WAMS 业务流量。被观察站业务数据使用主路径传输。参考某省电力调度数据网汇聚层和核心层 220 kV 及以上电压等级的厂站连接数量进行等值。

从表 3 可以得知, 被观察变电站到主站的平均通信延时在 5.3 ms 以内, 最大通信延时在 9.4 ms 以内, 符合小于 20 ms 的实时数据传输延时要求。这说明现有的网络性能在满足主路径上现有 133 个

变电站或发电厂的 WAMS 业务需求的情况下还有相当的厂站业务流量接入裕度。

表 3 稳态场景中子站到主站通信延时

Table 3 Communication delay from slave station to master station in stability scene

汇聚层等值 厂站数量/个	核心层等值厂 站数量/个	平均通信 延时/ms	最大通信 延时/ms
37	96	5.233	9.380

3.4 电力系统故障工况场景仿真

故障场景模拟了本变电站或具有联网触发业务关联的变电站发生电力系统故障时, WAMS 系统的通信行为。

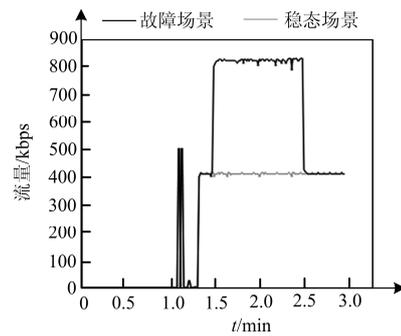


图 6 PMU 子站上送流量对比

Fig. 6 Comparison in uploading traffic of PMU slave station

结合图 6、图 7 可知, 仿真开始后 90 s 为电力系统故障发生时刻, PMU 数据输出速率从 50 帧/s 提升到 100 帧/s, 时间持续 1 min。这使得在此阶段子站向主站传输的实时数据平均流量从 415.32 kbps 上升到 822.25 kbps, 流量比稳态场景增加了 98%。

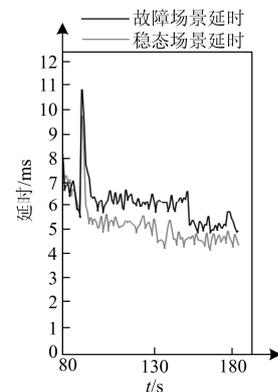


图 7 子站到主站通信延时对比

Fig. 7 Comparison in communication delay from slave station to master station

另外从图 6、图 7 可知: 在 PMU 实时数据输出

速率上升瞬间, 子站到主站通信延时明显的升高, 从 9.380 ms 上升到 10.750 ms, 由此可知在 PMU 数据输出速率上升瞬间容易造成子站到主站通信延时越限, 此时刻是通信延时越限的焦点所在。

表 4 故障场景中值厂站数量上限

Table 4 Quantity ceiling of equivalence substation in fault scene

汇聚层等值厂站 数量/个	核心层等值厂站 数量/个	最大通信 延时/ms
94	96	19.583
95	96	20.299
37	112	19.807
37	113	20.31

表 4 数据说明: 从流量等值的角度看, 汇聚层网络比核心层网络具有更大的网络性能裕度, 汇聚层可接入更多的厂站业务流量。但是实际上汇聚层流量必然经过核心层网络, 因此网络性能瓶颈会首先出现在核心层。网络业务的随机性会造成的突发流量, 它会对 WAMS 业务造成较大的延时, 因此实际等值厂站数量上限必须乘以一个小于 1 的可靠系数。当从某个变电站为出发点观察等值的厂站数量接近该实际上限时就需注意网络性能对该站 WAMS 业务的影响。

3.5 网络设备故障场景

对稳态场景和故障场景中的被观察站在仿真时间为 90 s 时设置一处网络主路径设备故障, 观察此时 WAMS 业务传输路径被迫切换时的路由收敛时间和通信延时变化。网络设备“N-1”校验结果如表 5 所示。

表 5 网络主路径设备“N-1”的测试

Table 5 “N-1” test of network equipment in main path

网络 设备	平均通信延时/ms		最大通信延时/ms		路由收敛 时间
	稳态 场景	故障 场景	稳态 场景	故障 场景	
接入层 主链路	5.632	7.157	9.946	11.448	20 ms 内
汇聚层 主链路	5.816	7.011	13.113	15.286	8 s
汇聚层 路由器	5.324	5.566	6.273	10.864	63 s
核心层 主链路	5.385	6.501	9.647	10.958	20 ms 内
核心层 路由器	4.523	4.631	5.170	4.873	63 s

从仿真结果得出:

- 1) 无论是稳态场景还是故障场景下的网络设备“N-1”校验都不会使通信延时超出 20 ms 的上限。
- 2) 链路的“N-1”校验中, 接入层链路和核心

层链路路径的重收敛耗用时间在 20 ms 以内, 但是汇聚层链路路径的重收敛用时则达到了 8 s。而路由器故障则需要经过长达 63 s 才完成路径的路由重收敛。在达到秒级的路由路径重收敛中, WAMS 业务将会丢失大量的观察数据, 导致该部分厂站不可观测。需要注意的是, 路由器故障情况中通信延时减小是由于部分其他厂站等值业务流量被甩开导致的结果, 并不真正意味着此时被观察站通信延时变小, 但被观测站的路由收敛时间并不受其他厂站业务影响, 因此结果依然具有参考意义。

因此, 对于路由收敛时间较长的网络设备故障应该注意选用可靠性高的网络设备, 加强日常维护工作, 在条件允许的情况下配置双套设备。

4 结论

为定量分析广域测量系统的通信延时问题, 本文首先以 OPNET 为工具建立了定量、精确的设备模型、业务通信模型, 并以“单位等值流量”的方式对其他厂站业务流量等值。仿真结果给出了电力系统稳态运行工况和故障运行工况下, WAMS 的网络性能表现, 并找出了在故障运行工况场景下 WAMS 可接纳的等值厂站数量边界。最后对 WAMS 主路径上的网络设备进行“N-1”测试, 考察路由收敛时间和通信延时的变化情况, 综合以上工作为现有 WAMS 的研究分析与规划建设提供新思路 and 参考意见。

参考文献

- [1] 罗红. WAMS广域通信业务的有效性建模与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
LUO Hong. Modeling and investigation of communication service availability in WAMS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 胡春潮, 侯艾君, 马凯, 等. 基于OPNET的电网SCADA系统通信建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 54-59.
HU Chunchao, HOU Aijun, MA Kai, et al. Communication modeling and simulation of SCADA system of power grid based on OPNET[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 54-59.
- [3] 黄明辉, 邵向潮, 张弛, 等. 基于OPNET的智能变电站继电保护建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 144-149.
HUANG Minghui, SHAO Xiangchao, ZHANG Chi, et al. Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 144-149.

- [4] 王海柱, 蔡泽祥, 邵向潮, 等. 智能变电站过程层网络关键对象建模与仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(6): 80-84. WANG Haizhu, CAI Zexiang, SHAO Xiangchao, et al. Key object modeling and performance simulation of process level networks in smart substation[J]. Electric Power, 2013, 46(6): 80-84.
- [5] CHENINE M, KARAM E, NORDSTROEM L. Modeling and simulation of wide area monitoring and control systems in IP-based networks[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting-PESGM, 2009: 2514-2521.
- [6] CHENINE M, AL KHATIB I, IVANOVSKI J, et al. PMU traffic shaping in IP-based wide area communication[C] // 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), 2010.
- [7] 黄飞, 王晓茹, 董雪源, 等. 基于EPOCHS平台的智能配电网通信系统仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 81-86. HUANG Fei, WANG Xiaoru, DONG Xueyuan, et al. A simulation for smart distribution grid communication system based on EPOCHS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 81-86.
- [8] 王益民. 国家电力调度数据网的设计与实施[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 1-6. WANG Yimin. Design and implementation of state grid dispatching digital network[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 1-6.
- [9] WANG Yang, LI Wenyuan, LU Jiping. Reliability analysis of wide-area measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1483-1491.
- [10] 李振兴, 张腾飞, 王欣, 等. 考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 130-136. LI Zhenxing, ZHANG Tengfei, WANG Xin, et al. Circuitous communication channel reconstruction of wide area protection considering delay and balance of flow[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 130-136.
- [11] 陈桥平, 陈志光, 黄勇, 等. 智能变电站过程层网络报文与流量分布计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 117-121. CHEN Qiaoping, CHEN Zhiguang, HUANG Yong, et al. Calculation of distribution of message and traffic load for process bus network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 117-121.
- [12] ZHAO Jinquan, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 10pp. DOI 10.1186/s41601-016-0013-1

收稿日期: 2016-08-24; 修回日期: 2016-11-28

作者简介:

潘天亮(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: psine9@163.com

蔡泽祥(1960—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师主要从事高压直流输电、电力系统保护控制与自动化研究; E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

席禹(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护、控制与自动化。E-mail: 506727835@qq.com

(编辑 姜新丽)