

基于 EPON+的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究

凌光, 许伟国, 王志亮, 金乃正

(国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 基于智能变电站的网络通信需求, 把在以太无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)技术基础上开发的高可靠性固定时延网络(以下简称 EPON+)应用到智能变电站内的网络组建中。准确定义了变电站内 EPON+的通信业务及服务质量(Quality of Service, QoS), 包含实时性和可靠性方面的要求, 并对 EPON 技术作出针对性修改。软件方面, 通过改变注册方式、带宽分布算法以及采用延时等待算法, 确保了报文传输的快速性和均匀性。再通过硬件上的双重化配置, 使报文可靠性要求得以满足。最后结合 220 kV 永宁变的工程实例, 测试基于 EPON+的报文传输性能, 结果证明 EPON+技术适用于变电站的组网应用。

关键词: 智能变电站; EPON+; IEC 61850; 实时性; 可靠性

Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+

LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, JIN Naizheng

(State Grid Shaoxing Power Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Based on the communication demand of smart substation, a new kind of communication architecture named EPON+, which is developed on the basis of EPON (Ethernet Passive Optical Network) and has the character of high reliability and fixed latency, is proposed as the desired one to establish the network in substation. Then the type and the quality of service (QoS) of EPON in substation, including the requirement of real-time and reliability, can be defined precisely. To satisfy the QoS, some modifications are made on EPON technology, which go as follows. In the software aspects, not only the manner of register and the bandwidth allocation algorithm are changed, but the “delay-waiting” algorithm also is deployed, so that the packets can be transmitted fast and smoothly. Then with the duplicate configuration in hardware, the reliability of communication can be ensured. Finally, the performance of EPON+ based network is tested in 220kV Yongning Substation. The results show that EPON+ can meet the requirement of substation, therefore testify the feasibility of deploying EPON+ in substation communication architecture.

Key words: smart substation; EPON+; IEC 61850; real-time; reliability

0 引言

变电站通信标准 IEC 61850 有效解决了不同设备间的互操作问题, 因而正受到越来越广泛的关注^[1-3]。以太网被 IEC 61850 推荐作为变电站网络实现技术^[4], 但由于以太网是一种面向非连接的网络, 其行为缺乏可控性, 很难满足继电保护信号的实时性和可靠性传输要求^[5], 所以目前智能变电站继电保护系统普

遍采用“直采直跳”模式^[6-7]。这在很大程度上仍然沿用了传统的设计思路, 使网络结构趋于复杂, 不易维护。另一方面, 国内智能变电站大量采用工业以太网交换机来进行过程层组网设计, 仅工业交换机的成本几乎和整个变电站二次保护控制设备成本相当^[8]。因此, 寻求一种更易于维护、更经济实用、更适应光纤通信的网络实现技术, 显得十分必要。

EPON 是一种基于以太网协议的无源光网络应用技术, 它天然具有光纤通信速度快、容量大、带宽高、抗干扰能力强等优点, 同时很好地继承了以

太网技术的全部优点，能实现用户端到主干网的无缝对接，已成为目前最有前景的接入网技术^[9]。EPON 在电力系统领域的应用尚处于起步阶段，目前国内主要应用于配网自动化领域^[10]，而国外已有基于 EPON 的变电站站际通信体系构建的成功应用案例^[11]；但缺少变电站内网络体系构建方面的实践，原因是常规的 EPON 技术无论是在硬件上还是软件算法上，都很难满足变电站过程层网络的通信要求^[8]。文献[12]对基于 EPON 的智能变电站内以及站际网络架构设计进行了研究，提出了一种面向服务类型的设计方案，满足了 GOOSE 报文通信要求，但文中并未就占据大部分网络负载的 SV 报文进行研究。本文基于新型 EPON+设备，提出了一种适用于智能变电站内部通信的网络体系架构设计，从硬件配置和软件算法两方面着手，使网络各项通信指标能满足 IEC 61850 标准的要求。最后结合 220 kV 永宁变工程实例，对 EPON+的性能进行测试，测试结果证明了该设计方案的可行性。

1 智能变电站报文分类及性能要求

IEC61850 标准提出了智能变电站的“三层两网”结构^[13]：即变电站层、间隔层和过程层，以及站控层网络和过程层网络。对于这两种网络内传输的报文，IEC 61850-5 根据功能和性能要求差异共分为七类，如表 1 所示，表中 P₁是指用于配电间隔，P₂和 P₃是指用于输电间隔。

表 1 报文分类

Table 1 Classification of packet

类型	特征及性能要求
1) 快速报文	1A P ₁ <10 ms, P ₂ 或 P ₃ <3 ms, 不丢包
	1B P ₁ ≤100 ms, P ₂ 或 P ₃ <20 ms, 不丢包
2) 中速报文	≤100 ms, 不丢包或丢包重传
3) 低速报文	<500 ms, 丢包重传
4) 原始数据报文	P ₁ <10 ms, P ₂ 或 P ₃ <3 ms, 不丢包
5) 文件传输报文	无时延限制, 丢包重传
6) 时间同步报文	最高对时精度为 1 μs
7) 访问控制命令报文	基于类型 3, 安全要求较高

为实现变电站内针对各种类型报文的传输服务，IEC 61850-8 给出了变电站服务在经典网络模型中的协议集映射结果，如图 1 所示。注意到 SV 和 GOOSE 报文为保证传输的快速性，应用层经表示层直接映射到数据链路层传输。

由图 1 可知，按照采用的通信协议，基于 IEC 61850 标准的智能变电站通信服务可以分为以下三类：第一种是基于多播机制的快速传输服务，这类

服务适用于采用以太网协议集的 SV 和 GOOSE 报文传输，该类报文的传输延时不应大于 3 ms，且 SV 报文的发送间隔离散度应不大于±10 μs；第二种是基于客户端-服务器机制的可靠传输服务，用于映射在 TCP/IP 协议集的 MMS 报文传输；第三种是映射在 UDP/IP 协议集上的同步对时服务。由于第一种服务的通信质量要求是最高的，所以本文重点关注基于 EPON 的通信服务能否满足 SV 和 GOOSE 报文的 QoS 要求。

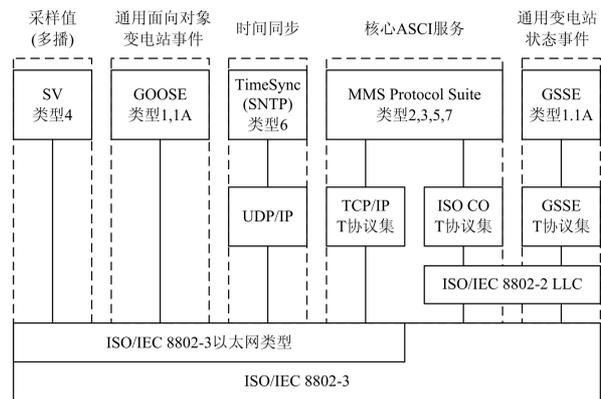


图 1 IEC 61850 中功能与协议集概述

Fig. 1 Protocol stack used in IEC 61850

2 EPON 在智能变电站中的应用难点

EPON 在链路层采用以太网协议，在物理层采用光纤介质，是一种点到多点的网络通信技术，目前常采用树形拓扑结构。网络体系由光线路终端 (Optical Line Terminal, OLT)、分光器 (Optical Distribution Node, ODN) 和光网络单元 (Optical Network Unit, ONU) 组成。

所有的数据传输都发生在 OLT 和 ONU 之间，数据的上行和下行采用不同的通信原理。在上行方向，即 ONU 向 OLT 传输数据，是基于时分多址复用 (TDMA) 原理的，如图 2 所示。一个轮询周期被分割成若干个时隙，每个时隙分配给对应的 ONU，ONU 只能在被授权的时隙内才能向 OLT 发送数据。一个轮询周期结束后，各个 ONU 上传的数据组成一个时分复用帧经 ODN 上传至 OLT。

在下行方向，即 OLT 向 ONU 传输数据，根据光传输特性，是基于广播机制的，如图 3 所示。

OLT 向下发送的也是时分复用帧，各个 ONU 根据目的地址，获取属于自身的帧而丢弃其余帧。为节省成本，上行和下行共用一根光纤，通过采用波分复用 (WDM) 技术来共享传输介质而不互相干扰，通常分别采用上行 1 310 nm、下行 1 550 nm 波长的光信号。

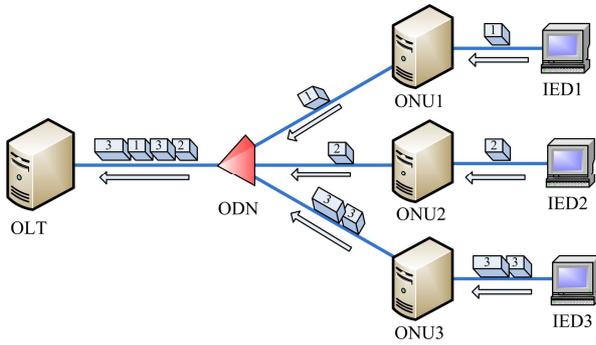


图 2 EPON 数据上行原理

Fig. 2 Upstream transmission in EPON

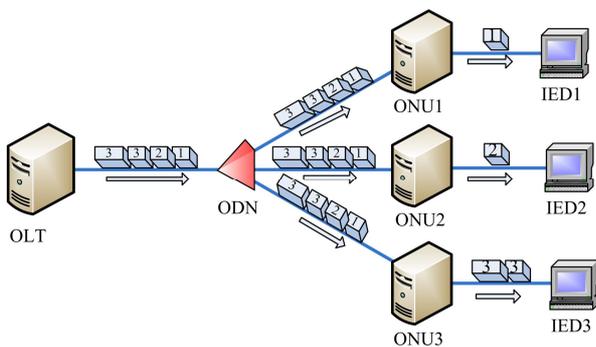


图 3 EPON 数据下行机制

Fig. 3 Downstream transmission in EPON

若将 EPON 技术直接应用到智能变电站组网, 是不能够满足 SV 和 GOOSE 报文的 QoS 要求的^[6], 主要有以下两个原因。一是数据传输延时和离散度难以保证, 因为这要求 OLT 的轮询周期小于 SV 报文的传输间隔 250 μs, 硬件性能要求较高; 另一方面, 由于采用了“网采网跳”的物理结构, 交换机传输延时不定, 使报文离散度变差。二是数据传输可靠性难以保证, 以太网链路层协议是一种无连接的协议, 本身不能保证数据一定可靠传输, 只是“尽最大能力交付”。

3 适用于智能变电站的 EPON+设计

本部分将阐述经过改进后的 EPON+设计, 使其能真正适用于智能变电站的组网。首先通过深入分析 EPON 数据传输机理, 探究不能满足报文实时性要求的本质原因, 并提出改进措施; 而后估算 ONU 之间数据传输的延时, 在满足延时性能要求前提下, 采用合理算法保证传输延时的稳定性; 最后从软硬件配置着手, 来保证数据传输的可靠性。

3.1 基于 MPCP 协议的 EPON 数据传输

由于 EPON 在物理上是点到多点的结构, 为了实现点到点数据传输, IEEE 802.3ah 协议中定义了多点控制协议(Multi-Point MAC Control, MPCP)。

MPCP 定义了两个工作过程(注册和数据传输)和五种控制帧。在初始化过程中, 所有 ONU 要在 OLT 内注册, 目前常用自动发现注册机制, 注册过程如图 4(a)所示。

MPCP 在自动发现过程中, 存在随机延时, 而且可能存在多个 ONU 竞争注册的问题, 导致传输延时增大; 同时为保证在 OLT 内注册的 ONU 是有效的, OLT 需要定期或不定期地检查网络状态, 增加了延时开销。为此, EPON+应用于智能变电站时采用了“点名注册”的机制, 即 OLT 轮流给指定的 ONU 注册窗口, 避免了 ONU 之间的竞争; 而且一旦所有的 ONU 注册完成, OLT 不再分配注册窗口, 这也节省了延时开销, 注册过程如图 4(b)所示。

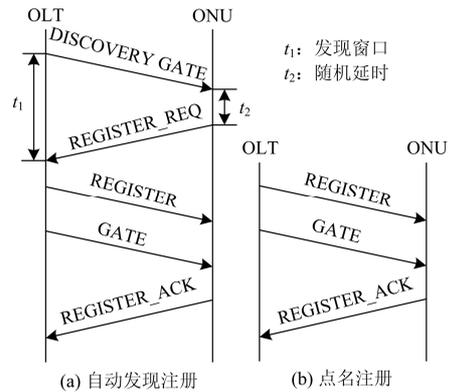


图 4 ONU 的两种注册机制

Fig. 4 Two mechanisms of ONU's register

一个轮询周期由一个注册时间段和一个传输时间段组成。注册完成之后, 便可以开始数据传输过程, 假设三个 ONU 向 OLT 传输数据, 如图 5 所示。

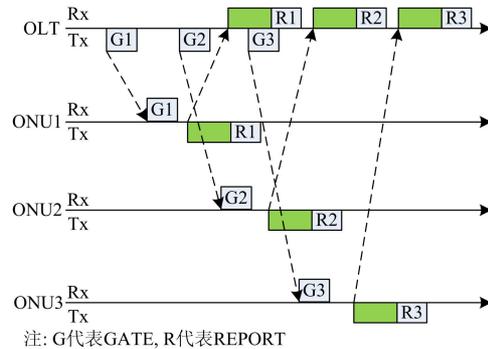


图 5 EPON 数据传输过程

Fig. 5 Data transmission process of EPON

图中 GATE 帧用于给 ONU 分配时隙、授权传输, REPORT 帧用于把时戳和带宽需求等信息传输给 OLT, 以便 OLT 动态分配带宽(DBA)。DBA 算法可以动态分配和回收带宽, 提高上行链路的利用

率。但无论何种 DBA 算法，都是基于“请求-分配”的握手机制，而这会造成上行业务很大的延迟。因而在智能变电站的应用中，不需要握手机制的静态带宽分配(FBA)是一种更合适的选择。传输原理和图 5 所示一致，只是每个 GATE 帧发送的时间间隔是一致的，REPORT 帧的功能只是说明该 ONU 数据传输完毕。

3.2 数据传输延时估算

基于传统交换技术的“网采网跳”模式，最大的问题在于报文传输的延时不可控。EPON 由于采用了 TDMA 技术，避免了数据上行过程中的冲突，再配合高性能交换机以及优秀的算法设计，就能做到传输延时可控，使“网采网跳”的实现成为可能。记软件设定的统一延时为 T_D ，显然 T_D 要大于同类报文实际传输所需的最大值，因而要首先估算两个智能电子设备(IED)之间报文传输所需最大延时 T_d 。

任意两个 IED 间的报文传输延时、传输路径如图 6 所示，此处以合并单元传输数据为例。报文由合并单元产生，经百兆口传入 ONU；在 ONU 内打上标签、封装私有字段后传输给 OLT；再经过中心交换机后，由相应的 OLT 口广播至对应的 ONU，完成到保护装置的传输。

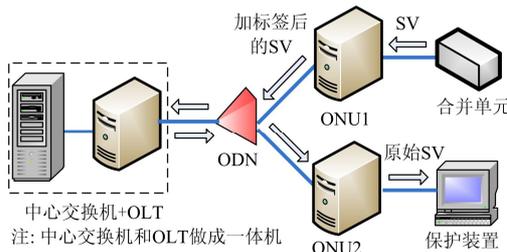


图 6 SV 报文传输路径及机制

Fig. 6 Transmission path and mechanism of SV packet

从报文传输流程可以发现，传输延时应包含两部分：一是物理传输延时，包含 SV 报文在网上串行位串的传输时间 T_{d1} 和光纤物理信号传输时间 T_{d2} ；二是软件算法延时，包含 ONU 报文修改时间 T_{d3} 、OLT 延时 T_{d4} 以及 OLT 轮询周期延时 T_p ，总延时应为

$$T_d = T_{d1} + T_{d2} + 2T_{d3} + T_{d4} + T_p$$

以下分别计算，按最长的以太网报文 1 518 字节估算，那么 SV 报文串行位传输时间为

$$T_{d1} = 1518 \times 8 \text{ bit} / 100 \text{ Mbps} \approx 121 \mu\text{s}$$

光在光纤中的传播速度约为 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，传输的物理路径按最长 2 km 计算，那么光信号传输延时 T_{d2} 约为 $10 \mu\text{s}$ ；ONU 报文修改时间 T_{d3} 在 $1 \mu\text{s}$ 以内。OLT 的传输延时与其中心交换设备的 OLT 传输性

能有关，经国网电科院检测，在负载为 95% 时测试 60 s，测试结果如图 7 所示，传输延时在 $10 \mu\text{s}$ 以内。

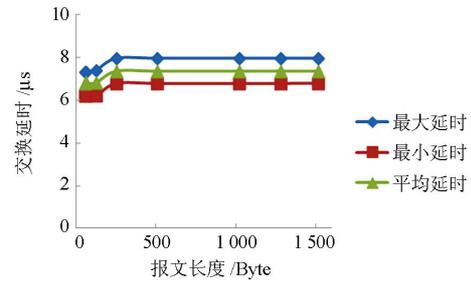


图 7 中心交换设备报文交换延时测试结果

Fig. 7 Test result of central switch's latency

轮询周期 T_p 也要被计入延时之中，原因是若 ONU 接收到 SV 报文时正在传输数据，而剩余时间不足以传输完整报文，如图 8 所示。

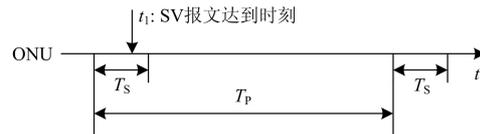


图 8 SV 报文延迟一个轮询周期示意

Fig. 8 SV packet is put off for one polling period

图中 T_s 为分配给 ONU 数据传输的时隙，显然该报文要等到下一轮询周期内才能传送，此时 SV 报文要经历 T_p 的延时。轮询周期的设定，既要考虑报文产生速率(如轮询周期应小于 SV 报文产生周期 $250 \mu\text{s}$)，又要保证分配时隙内能传输完整报文。轮询周期由 N 个时隙组成(N 为分光器分支数目)，ONU 与 ODN 接口的数据传输速率为 1 Gbps，按报文最长长度 1 518 字节计算，每个时隙时间 T_s 应满足：

$$1 \text{ Gbps} \times T_s > 1518 \times 8 \text{ bit}$$

于是有 $T_s > 12.2 \mu\text{s}$ ，考虑到安全裕度， T_s 取 $15 \mu\text{s}$ 。本工程应用中 N 取 8，所以一个轮询周期 T_p 为 $8T_s = 120 \mu\text{s}$ 。同样考虑到安全裕度，我们选 $125 \mu\text{s}$ 作为 T_p 值。经过以上分析，我们可以得到实际 SV 报文传输所需要的时间 T_d 为

$$T_d = 121 + 10 + 2 \times 1 + 10 + 125 = 268 \mu\text{s}$$

所以软件设定的 SV 报文统一延时 T_D 应大于 $268 \mu\text{s}$ ，才能保证所有 SV 报文可靠传输。注意到两个轮询周期刚好等于 SV 报文发送周期，所以对于 GOOSE 报文，即便第一个轮询周期内无法上送，在第二个轮询周期里，由于没有新的 SV 报文产生，GOOSE 报文即可上送。因而理论上，GOOSE 报文的传输延时至少增加一个轮询周期 T_p ，即 $393 \mu\text{s}$ 。两种报文延时远小于 IEC 61850 标准规定的 3 ms，

因此基于 EPON+技术传输 SV/GOOSE 报文的实时性是可以保证的。“等待-延时”算法的具体实现并不难,在接受报文的 ONU 侧,当有报文到达时,记录报文到达时间,与发送时间相减就可以得到报文实际传输时间 T_d 。接下来 ONU 只需要等待 $T_W=T_D-T_d$ 后,将报文发出即可。

3.3 数据传输可靠性保证

影响数据传输可靠性体现为无丢包传输。为此,采用“1+1 网络路径”保护模式:ONU 上增设一个镜像口复制报文,双 OLT 分别接收来自原始口和镜像口的报文,从而构建了两条独立的传输路径,如图 9 所示。图中虚线所示为备用路径,主路径发生故障时可以无缝切换到备用路径,从而保证了数据传输的可靠性。此外,通过按交换机端口划分 VLAN 的方式,有效隔离了无关数据流,也加强了数据传输的安全性。

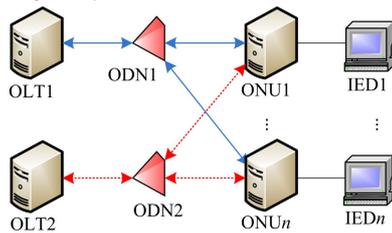


图 9 “1+1 网络路径”保护模式

Fig. 9 “1+1 network path” protection mode

4 工程测试结果

220 kV 永宁变是国内首个把 EPON+技术应用到变电站组网的智能变电站,在物理上采用了“网采网跳”的结构。根据国网公司标准,220 kV 保护采用双重化配置。作为应用试点,永宁变 220 kV 第二套保护的过程层组网采用了 EPON+技术。220 kV 包含了 4 个线路间隔,两个主变间隔和一个母联间隔。由于 MMS 报文传输要求较低,本文重点测试 SV 和 GOOSE 报文的传输性能。

EPON+同时传送 SV、GOOSE 和 MMS 三种业务,延时分别设定为 $346 \mu\text{s}$ 、 $2000 \mu\text{s}$ 和 $4050 \mu\text{s}$ 。首先测试各种业务单独发送时的报文延时,方法是利用网络测试仪模拟线路合并单元、智能终端在对应口发送报文,分别测试不同帧长度时的延时,测试时间是 60 s,网络中加入 50 Mbps 的背景广播流量,测试结果如图 10 所示。

从上述测试结果可以看到,实际延时与设定延时基本一致。SV 报文的传输延时稳定性很好,抖动不超过 $1 \mu\text{s}$,符合性能要求。当网络中存在负载流量时,再测试目标报文的传输性能。由于在 ONU

入口处已自动过滤其余报文,网络中只可能存在 SV/GOOSE/MMS 三种报文,而且每种业务都被设定 20 Mbps 的上限。为此,我们测试各种负载下各报文的性能,包括延时、抖动和丢包率。测试报文的长度均为 512 Byte,测试时间为 60 s,测试结果如图 11 所示。

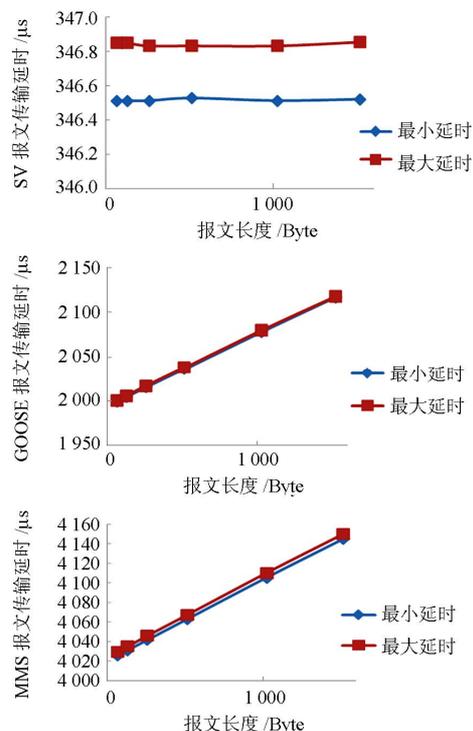


图 10 各报文单独传输时的延时

Fig. 10 Packets delay of each kind when transmitted individually

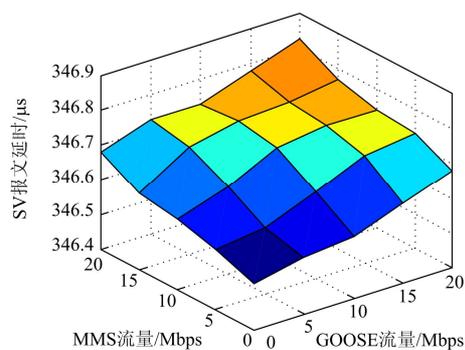


图 11 网络负载影响下的 SV 报文传输延时

Fig. 11 SV packets delay with the influence of load

由图 11 可知,即便在较重的网络负载下,SV 报文传输延时和抖动性能仍能满足要求。同时测试在以上各情景中的 SV 报文丢包率,测试结果皆为 0,因而 SV 报文的可靠传输是可以保证的。用相同的方法测试 GOOSE 报文在以 20 Mbps 速率发送时的延时

和丢包率, 结果丢包率都为 0, 延时测试结果如图 12 所示。GOOSE 报文延时分布在 2 035~2 050 μs 之间, 由于 GOOSE 报文只有延时 3 ms 以内的要求, 并无离散度要求, 因而图中的测试结果是满足智能变电站应用需求的。

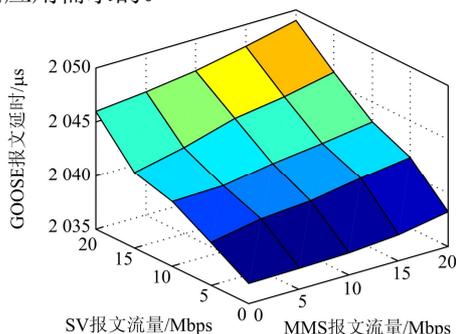


图 12 网络负载影响下的 GOOSE 报文传输延时

Fig. 12 GOOSE packets delay with the influence of load

从以上测试结果可以看出, 基于 EPON+构建的智能变电站网络在传输 SV 和 GOOSE 信号时能满足其实时性和可靠性要求, 因此 EPON+技术可以用于智能变电站的网络组建。

5 结论

EPON 是一种结合了光纤通信和以太网协议的新型接入网技术, 在电力系统内的应用尚处于起步阶段。本文根据 IEC 61850 的变电站内通信系统的要求, 准确定义出智能变电站的通信业务需求, 特别关注 SV 和 GOOSE 报文的实时性和可靠性要求。在此基础上, 深入分析 EPON 的通信机制, 针对智能站的应用需求, 修改若干技术后形成“EPON+”; 同时双重化配置也进一步提高了可靠性, 从而使 EPON+能真正满足智能变电站的应用需求。最后结合 220 kV 永宁变的工程实践, 对相关的网络性能指标进行了测试, 测试结果表明, EPON+能应用于智能变电站内的网络组建。应用 EPON+组网的 220 kV 永宁变于 2015 年 3 月份投产, 运行情况良好。

参考文献

- [1] 何磊. IEC61850 应用入门[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 刘井密, 李彦, 杨贵. 智能变电站过程层交换机延时测量方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 111-115.
LIU Jingmi, LI Yan, YANG Gui. Design of delay measurement switch in intelligent substation process level[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 111-115.
- [3] 李忠安, 王娇, 张惠刚, 等. IEC61850 过程层网络通信分析诊断工具设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 93-97.
LI Zhong'an, WANG Jiao, ZHANG Huigang, et al. Design of process layer network communication fault diagnosis and analysis tool based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 93-97.
- [4] RAZA A, ULLAH K, AHMED S, et al. Gigabit Ethernet based substation under IEC61850 standard[C] // IEEE 2nd International Conference on Computer, Control and Communication, 2009: 1-6.
- [5] 王海柱, 蔡泽祥, 张延旭, 等. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 156-162.
WANG Haizhu, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu, et al. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 156-162.
- [6] Q/GDW 441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [7] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [8] 魏勇, 宋小会, 许伟国, 等. 智能变电站过程层网络采用 EPON 技术实用性研究[J]. 电气技术, 2011(10): 15-19.
WEI Yong, SONG Xiaohui, XU Weiguo, et al. Practical research on EPON technology applied in process level network of smart substation[J]. Electrical Engineering, 2011(10): 15-19.
- [9] 郎为民, 郭东生. EPON/GPON 从原理到实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [10] 郑毅, 甘志洲, 陈激. 配电网 EPON 通信接入与分区自治[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 114-118.
ZHENG Yi, GAN Zhizhou, CHEN Lian. EPON communication network and its regional autonomy in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 114-118.
- [11] RAZA A, ULLAH K, AHMED S, et al. Baseline efficiency in EPON based architecture to inter-network Substations[C] // IEEE International Conference on Computer, Control and Communication, February, 2009: 1-6.
- [12] TAKAGIWA K, KUBO R, ISHIDA S, et al. Feasibility study of service-oriented architecture for smart grid communications[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), May, 2013: 1-7.
- [13] Communication networks and systems in substation[S]. International Standard IEC61850, 2004.

收稿日期: 2015-08-10; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

凌光(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护与智能变电站研究工作。E-mail: lingguang86@163.com

(编辑 魏小丽)