

## 分组传送技术在智能配用电通信网的应用探讨

汪强<sup>1</sup>, 朱延章<sup>1</sup>, 葛光胜<sup>1</sup>, 徐小兰<sup>2</sup>, 张剑<sup>1</sup>

(1. 许继昌南通信设备有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对智能配用电通信网中多业务承载、业务IP化、网络融合化的需求, 提出采用分组传送技术进行通信的解决方案。介绍了配电网分层分布式架构和配用电的主要业务需求, 分析了现有通信技术的特点, 从多业务承载技术、QoS机制、生存性技术、OAM技术、同步技术等方面探讨分组传送技术在配用电通信网的应用可行性, 并提供了一种应用模式。该探索研究为分组传送技术在配用电通信网的应用奠定了基础。

**关键词:** PTN; 通信网络; 智能配电; 智能用电; 多业务; IP化; 网络融合

### Application discussion of packet transfer technology for smart power distribution and utilization networks

WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHU Yan-zhang<sup>1</sup>, GE Guang-sheng<sup>1</sup>, XU Xiao-lan<sup>2</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

(1. XJ Changnan Communication Equipment Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement such as multi-service transport, IP-based services and network convergence for smart power distribution and utilization networks, this paper proposes a solving scheme for packet transfer technology. It introduces the hierarchical distributed architecture for smart power distribution and utilization networks and the key services requirement, analyzes the characteristics of existing communication technologies, discusses the application of packet transfer technology from the aspects such as multi-service transport, quality of service (QoS), survivability technology, operation administration and maintenance (OAM) and synchronous technology, and offers an application model for packet transfer technology. This research provides an application basis of packet transfer technology in smart power distribution and utilization networks.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China.

**Key words:** PTN; communication network; smart power distribution; smart power consumption; multi-service; IP-based; network convergence

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)09-0139-08

## 0 引言

智能配用电通信网作为智能配用电网的重要信息支撑平台, 是智能配用电系统得以实现的关键所在, 是电力骨干通信网的向下延伸<sup>[1-6]</sup>。智能配用电通信网具有点多面广、终端设备种类繁多、承载业务类型丰富多样、多种接入技术混合应用并独立组网运行、现场应用环境恶劣等特点。

随着智能配用电网的建设和通信接入新理论新技术的不断推出, 在智能配用电通信网采用了多种通信技术。文献[7-13]分析了工业以太网交换机、EPON、电力线载波、无线等技术在配电自动化、

用电信息采集等系统的组网模式、应用场景和工程实施等方面的情况; 文献[14-16]提出融合通信技术在配用电通信网的应用情况, 给出了应用模型及设计方案。在智能配用电网分层分布式网架结构下, 现有通信技术已经或者即将无法满足业务IP化、多业务承载、多种网络应用融合传输和统一维护管理的需求<sup>[17-19]</sup>, 亟需一种新的通信技术来建立统一通信接入平台。分组传送技术(PTN)是一种面向连接的、基于分组的、端到端的通信技术, 其不仅具有组网灵活、扩容方便、统计复用等特性, 而且能承载基于IP协议的多种业务, 还能整合不同的业务系统到同一平台, 故探索PTN技术在配用电通信接入网的应用具有现实意义。本文的研究为PTN技术在配用电领域的应用奠定了一定的基础。

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(配用电通信综合接入与网络管理技术研究及应用)

### 1 智能配用电通信网的网络架构

智能配用电通信网是电力通信网的重要组成部分，包括 10 kV 通信接入网（配电通信网）、0.4 kV 通信接入网（用电通信网）和用户室内网，如图 1 所示<sup>[20]</sup>。通过这三个平面组成配用电通信网的分层分布式网络架构，每个平面既接入其覆盖的配用电终端，又实现对上层平面的连接和对下层平面的数据汇聚。

10 kV 通信接入网主要实现开关站、配电室、环网柜、柱上开关、分布式能源站点、配电线路等的通信覆盖，向下延伸用于接入 0.4 kV 通信接入网和用户室内网的业务，主要承载配电自动化接入层、用电信息采集系统远程通道、智能小区上联通道的信息通信业务。

0.4 kV 通信接入网主要实现配变至用户表计、电动汽车充电桩等的通信覆盖，主要承载用电信息采集本地通道、智能小区等业务。

用户室内网连接各种智能家居使用的智能终端设备，用于实现双向互动用电服务、家电智能控制及增值业务等一系列智能家居通信的功能。

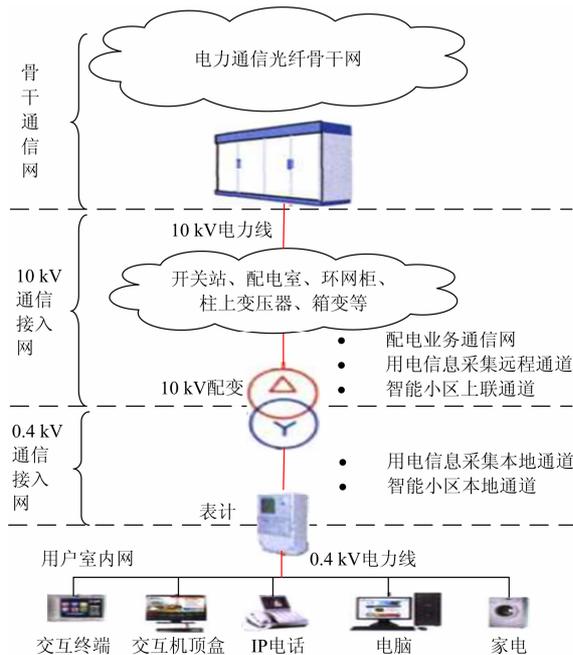


图 1 配用电通信网的分层网络架构图

Fig. 1 Layered structure of power distribution and utilization communication network

### 2 智能配用电主要业务需求分析

#### 1) 配网自动化

配网自动化通过对配电开关、环网柜、箱变、

柱上开关等设备的信息采集和控制，实现对配电网网络的监控，提高配电网的可靠性。按照 DL/T 814-2002 规范的要求，开关变位信息要求在 5 s 以内传送到主站，综合考虑一个馈线监控终端传输所有信息，每个终端至主站（或子站）需要 2.4 kbps 全双工通道。

#### 2) 用电信息采集

通过对公变、低压工商户、低压用户的用电信息采集，实现线损考核、预付费业务管理等功能。根据《电力用户用电信息采集系统设计导则》的相关规定，用电信息采集系统要求的系统响应速度分别是：主站巡检终端重要信息时间小于 15 min；系统控制操作响应时间小于 5 s；常规数据召测和设置响应时间小于 15 s；历史数据召测和设置响应时间小于 30 s；计算机远程网络通信中实时数据传送时间小于 5 s。

#### 3) 负荷管理

通过对专变用户用电情况进行监视，实现有序用电管理及用电信息自动采集的功能。国网公司“电力用户用电信息采集系统建设”相关研究表明，如果每一个专变用户的用电信息在 15 min 内采集完成，每个终端至主站（或子站）需要 1.2 kbps 全双工通道。

#### 4) 智能电网用户服务

将通信网络延伸到用户家庭，实现用户用电信息、电力交易信息发布及用户用电智能管理等用户服务功能，需要为每个用户提供 0.3 kbps 通信带宽。

#### 5) 配电监控运行业务

为了满足对重要节点、移动资产等的运行和监控需求，需要配置视频监控、通信信道和语音业务等，这样得为每条配电线路提供约为 4.480 Mbps 的通信带宽。

#### 6) 分布式电源控制

根据国网公司“电力用户用电信息采集系统建设”相关研究表明，为满足对分布式电源点的控制需求，每个终端到主站（或子站）需要 18.944 kbps 全双工通道。

通过上述分析，不难看出这些业务对通信的实时性、可靠性和带宽等都有很高的要求，需要采用适当的通信技术才能满足业务的需求。

### 3 现有智能配用电通信网的技术体制

#### 3.1 现有配用电通信技术分析

智能配用电通信网建设的通信方式现在主要有：光纤通信技术<sup>[7-8]</sup>、中/低压电力线载波通信技

术<sup>[9]</sup>、无线通信技术<sup>[10-14]</sup>等。

工业以太网技术是应用于严苛工业现场的光纤网络技术,具有较高的实时性、可靠性和高宽带,组网灵活,在环形组网时具有较强的自愈特性和较短的恢复时间。但其也有不足之处:由于采用非面向连接技术,传输时延没法保障;在流量处理中采用每跳行为,传输质量不可控;泛洪学习机制引发的瞬时广播影响了实时性和安全性;多业务支持能力不足等。

无源光网络技术以 EPON 和 GPON 为典型代表,具有抗单/多点故障能力、即插即用、组网灵活等特点,适用于分支较多、以星/树型组网的配用电网络。EPON 技术成熟,标准完善,已在用电信息采集和配用电通信网中部署应用。GPON 是新一代无源光接入技术,具有较强的多业务支持和网络管理功能,但设备成本较高,标准有待完善。受无源光网络技术数据处理机理限制,其带宽利用率不高、多业务支持能力不强、QoS 机制不完善等。

中/低压电力线载波通信是电力系统特有的通信方式,路由合理,无需关心线路建设投资,具有易于维护、成本低等特点。但是其间歇性噪声大、信号衰减严重、线路阻抗经常波动、大规模组网应用比较困难,通常应用在实时性、可靠性不太高的系统,在智能配用电通信中作为一种补充手段。

无线专网技术是电力系统结合自身特色组建的专用通信网络。WiMAX 是宽带无线接入技术,技术成熟、标准完善、支持厂商多。McWILL 是一种具有国内自主知识产权的宽带无线接入技术,核心技术被少数厂家掌握,应用受到限制。TD-LTE 是一种新兴宽带技术,具有网络容量大、动态组网模式、扁平化的网络架构等特点,处于试点阶段,标准不完善,还需要实验验证。

无线公网技术是利用公网运营商通信通道来进行信息传送的技术。其建设周期短、成本低,但安全性、可靠性无法保证,租赁费用高。

无线通信技术受频点资源短缺、覆盖范围有限等的影响,在配用电通信中仅作为一种补充手段,且多用在不需要遥控的场所。

由于智能配用电通信网所管辖设备数量大、种类多、业务需求多样化,使得其是一个适用于不止一种通信技术的复杂通信网,并且每一种通信技术都有其相应承担的业务和适用场景。

### 3.2 现有配用电通信技术体制的挑战

随着配电自动化、用电信息采集系统的推广建设和配用电业务的大量呈现,智能配用电通信技术面临以下挑战:

#### 1) 业务多样化

智能配用电通信网中包含有多种多样的业务,如语音业务、数据业务、多媒体业务、视频业务等,其中既有实时业务、准实时业务,还存在普通的数据业务,且各种业务具有不同的性能需求:有些对时延敏感如配用电自动化;有些对通信容量要求高如视频监控业务;有些对可靠性要求高如智能配用电自动化和分布式电源控制,需要配备通道保护和通信负载控制等功能;等。随着智能配用电网络的建设,业务多元化发展势在必行。

#### 2) 业务 IP 化

智能配用电通信网中各种业务,数据业务占据了绝大部分,在各类数据业务中,IP 数据业务占据了主导地位。IEC61850/IEC61968/IEC61970 标准都是基于以太网标准的,并采用 TCP/IP 协议,随着智能配用电网络的建设,IP 数据业务将会越来越多,可以预见配用电网中的 ALL IP 时代即将到来。

#### 3) 网络融合化

目前,在智能配用电网中,各种通信业务都是单独组网,独自运行,如配电自动化系统、用电信息采集系统、能效管理系统等都有一套独立的通信网络。业务多样化的发展,使得网络的种类越来越多,不利于集中管理。对于不同的以及新出现的业务,不应该用新增加网络的办法来处理问题,同时为了统一管理维护,有必要采用一套统一的综合配用电通信系统,对整个配用电领域的通信网络进行管理。网络的融合在配用电网中已成必然趋势。

综上所述,这些新的需求使得目前的配用电通信技术捉襟见肘,有必要探讨一种新型的通信技术来构建一个高效的多业务统一承载通信平台。PTN 技术顺应了配用电业务多样化、IP 化、宽带化的发展趋势,将会成为一种新型配用电通信技术。

## 4 PTN 及关键技术分析

PTN 是新一代的面向连接的传送技术,以分组作为传送单位,并以分组业务为核心,支持多业务的统一承载。PTN 技术融合了 IP/MPLS、以太网和传送网三种技术的优势,支持端到端的通道管理、OAM 操作维护和电信级的网络保护倒换以及恢复机制;提供灵活的 QoS 机制及 SLA;具有完善的时钟同步技术和良好的网络扩展性;配备了灵活的动态控制平面,不仅能实现业务的兼容,还能实现网络性能和管理维护的兼容。PTN 技术已经在电力传输网中有应用<sup>[21-23]</sup>,但在配用电领域还未见有关文献报道。

### 4.1 多业务承载技术 (PWE3)

PTN 采用 PWE3 (Pseudo Wire Emulation Edge to Edge 端到端的伪线仿真) 技术承载各种业务 (如 Ethernet、TDM、ATM、FR 等), PWE3 是一种在分组交换网络 (PSN-Packet Switch Network) 上模拟各种端到端的二层业务机制。PWE3 的工作原理如图 2 所示, 不同的业务由不同的伪线 PW (Pseudo Wire) 来承载, 可以根据需要对每个 PW 进行设置, 如带宽、QoS、保护等, 多个 PW 封装到一个通道 LSP (Label Switch Path) 里面, 并由其实现业务的端到端传送。PW 所承载的数据业务对 PTN 网络是不可见的, 利用 PWE3 的目的是希望以尽量少的功能, 按照给定业务的要求仿真线路。

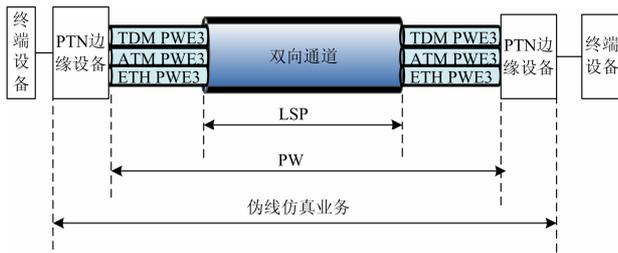


图 2 PWE3 工作原理示意图  
Fig. 2 Principle diagram of PWE3

### 4.2 服务质量 QoS 机制

针对网络中各种业务的不同需求, PTN 提供了完善的 QoS 方案。PTN 支持的 QoS 功能包括: 流分类和流标记 (Classing)、流量监管 (Policing)、拥塞管理、流量整形 (Shaping) 和队列调度等, 如图 3 所示。

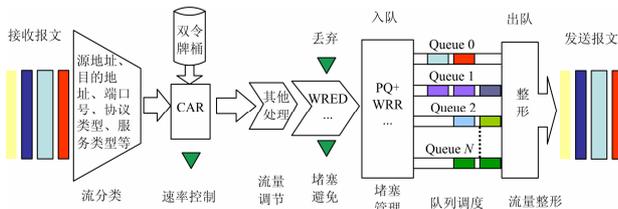


图 3 QoS 应用模型  
Fig. 3 Application model of QoS

流量分类针对不同种类的业务报文采用不同的控制策略, 如基于以太网业务、目的地址等。

流量监管 (速率控制) 是对业务进行带宽限制, 防止超过指定带宽对其他业务造成影响。PTN 支持双速率三色标记算法。

流量整形是对输出报文速率控制, 使报文以均匀的速率发送。

队列调度对不同优先级的报文进行分级处理, 提供不同业务的质量保证, 采用的方法有先进先出

(FIFO)、严格优先级 (SP)、加权轮询 (WRR) 和加权公平 (WFQ) 等。

拥塞避免通过监控网络流量的负载情况, 尽力在网络拥塞发生之前预计并且避免拥塞的发生, 支持尾丢弃 (Tail Drop) 和加权随机早期检测 (WRED) 策略。

现有配用电通信网采用的工业以太网技术和 xPON 技术都是一种无连接的分组交换技术, 通信网中的每个节点均需根据传输业务的 QoS 信息进行重新调度, 并且无资源预留, 对超出带宽请求的通信业务进行简单的丢弃, 故不能实现基于业务的端到端的 QoS 保障传输。

### 4.3 OAM 技术

根据网络运行管理的实际需要, PTN 将网络的管理工作分为三大类: 操作 (Operation)、管理 (Administration)、维护 (Maintenance), 简称 OAM。ITU-T 对 OAM 功能进行了定义, 主要有故障管理、性能检测以及保护倒换等。PTN 的 OAM 是基于硬件实现的, 通过在管理实体间发送 OAM 报文完成相应的功能。

PTN 的 OAM 机制采用分层架构, 如图 4 所示。通过传送通道 TMC (Transmission Channel)、传送通路 TMP (Transmission Path) 和传送段 TMS (Transmission Section) 三个层次的 OAM 机制, 实现对 PTN 网络的分层监管、快速故障检测和故障定位、保护倒换等功能, 同时通过与接入链路 OAM 机制和业务层 OAM 机制的协同工作, 实现 PTN 网络的端到端的电信级操作维护管理。

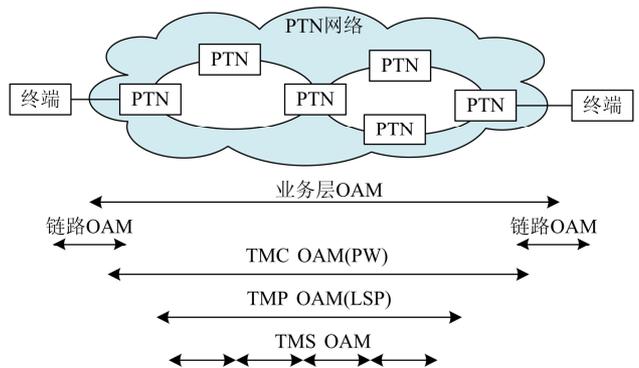


图 4 OAM 的分层架构  
Fig. 4 Layered structure of OAM

### 4.4 生存性技术

PTN 的生存性是一个重要的网络性能指标, 主要包括基于传输平面的保护倒换技术和基于控制面的恢复技术。基于传输平面的保护技术有: 线性保护、子网连接 (SNCP) 和环网保护。线性保护遵循 G.8131 标准, 支撑多层 (PW、LSP 以及链路) 保

护倒换。倒换可以由管理平面发起,也可以在设备检测到故障后由故障指示信号发起。环网保护应用比较广泛,不仅有利于网络资源的充分利用,而且有利于现有传送网络的平滑过渡。环网保护遵循 G.8132 标准,提供 Wrapping 和 Steering 两种成熟的保护机制来支撑点到点、点到多点的连接应用。PTN 能够实现小于 50 ms 的电信级保护倒换。

基于控制平面的恢复主要是在控制平面的参与下,采用基于 GMPLS/ASON 的分布式技术,在错误发生前,预先计算保护路径,或在错误发生后,重新计算保护路径。

#### 4.5 同步技术

在 PTN 网络中,同步技术主要采用同步以太网 G.8261 和 IEEE1588 精确时间同步协议<sup>[22]</sup>。同步以太网只支持频率同步,不支持时间同步;IEEE1588 既支持频率同步又支持时间同步,且对时精度达到亚微秒级。国内外著名的芯片公司先后开发了支持 IEEE1588 的软硬件平台和对 IEEE1588 在实际环境中的应用展开了大量的研究。

IEEE1588 是一种包级 (packet) 网络时间同步技术,同步信息 (又称时间戳) 被封装在数据报文里并以标准的以太网数据进行传输,适用于对同步要求高的测量、控制、自动化以及电力系统等。IEEE1588 集成了网络通信技术、计算机技术和分布式对象等技术,支持所有点对点、多点 (如多播、组播) 通信的分布式系统,特别适合于以太网,但不限于以太网,通常基于 UDP/IP。IEEE1588 能够使异构系统中各类不同精确度、分辨率和稳定性的时钟同步起来,有效解决了分布式系统的实时性问题,从而使整个系统的时钟精度得到提高。

在 IEEE1588 应用中,当主时钟或通信网故障时,为保证时钟同步精度,通过冗余配置 IEEE1588 时钟设备,可以有效保障网络的实时性。

### 5 PTN 技术的应用模型分析

智能配用电网覆盖范围广,设备类型多,业务种类多,配用电通信技术需要为其提供一个一体化的信息处理平台。PTN 技术具有优异的网络通信品质:通过 PW 和 LSP 技术能够承载配用电中的多种业务,结合 QoS 技术能够保障不同业务的可靠传输和实时性;为每种业务分配不同的承诺带宽/超额带宽 (CIR/EIR),利用 EIR 和超额利用比例来实现空闲带宽的统计复用,从而实现面向连接的柔性传输通道的管理,有效提高带宽的利用率;每种业务具有确定的通道,能够实现业务在物理层上的隔离,避免不同业务之间的干扰;保护方式多样,不仅能

提供网络以及子网的保护,还能针对不同业务进行保护,提供小于 50 ms 的电信级保护倒换;完善的 QoS 机制,能够为不同业务提供优质的服务质量和快速传输,能针对不同的业务流进行可靠的端到端传送;层次化的 OAM,为通信网的故障检测和预防提供了强有力的工具,并能实现网络的全面管理;良好的时钟同步技术 (IEEE1588 的支持),为网络中的各种业务提供精确时钟,保证业务实时性;等等。因此在智能配用电通信网中应用 PTN 技术能满足其业务多样化、全 IP 化、宽带化等的发展趋势。

根据某地试点工程的需要,组建了一个由 PTN 设备承载配用电业务的试验网,其模型设计如图 5 所示。该网络架构分为三层:骨干层、配电接入层和用电接入层。骨干层采用 3 台 PTN 设备,2 台设备既作为骨干层设备同时也作为配电层设备,而且 2 台互为热备份,一是为了汇聚配电层的业务,二是为了备份配电层的业务,提高通信的可靠性,汇聚后的业务传输给另一台 PTN 设备,由其将业务接收处理判决后传送给主站系统。配电层由 7 台 PTN 设备组成,由其承担数据的汇聚和传输。用电层使用 3 台 PTN 设备作为接入点与多套宽带/窄带载波设备集中器、GPRS 无线集中器和视频设备相连接,载波集中器、无线集中器通过相关设备连接到各自的采集器,实现对终端设备的连接。

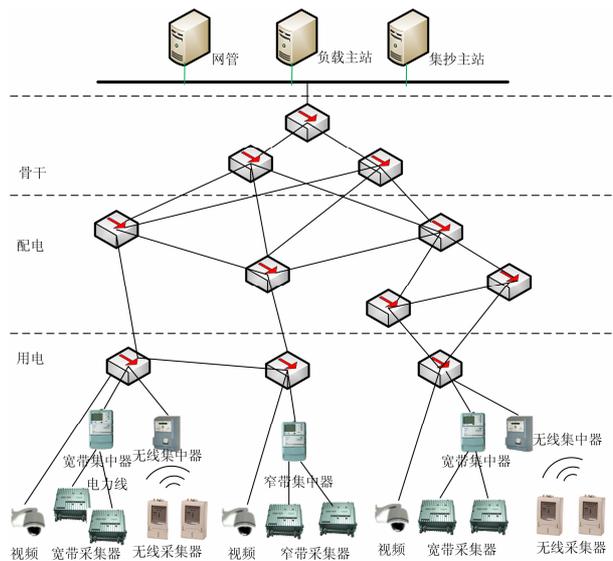


图 5 应用试验模型

Fig. 5 Application test model

在试验中,对配用电通信网比较关注的时延、吞吐量、生存性、业务隔离等指标进行了测试,同时对由工业以太网交换机组成的相同网络的对应指标进行了对比测试。

### 1) 吞吐量测试

如图 6 所示, 在相同通信工况的条件下, 相对于工业以太网交换机, PTN 设备具有更大的网络吞吐量。

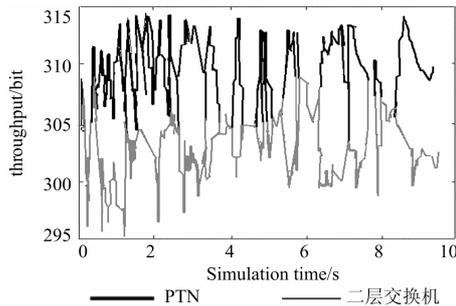


图 6 吞吐量测试结果

Fig. 6 Test result of throughput

### 2) 时延测试

如图 7 所示, 在相同通信工况的条件下, 相对于工业以太网交换机, PTN 设备传输时间更短。

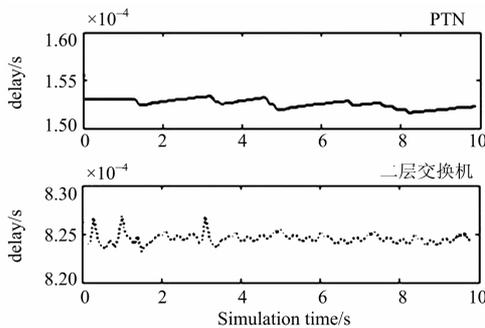


图 7 时延测试结果

Fig. 7 Test result of time delay

### 3) 生存性测试

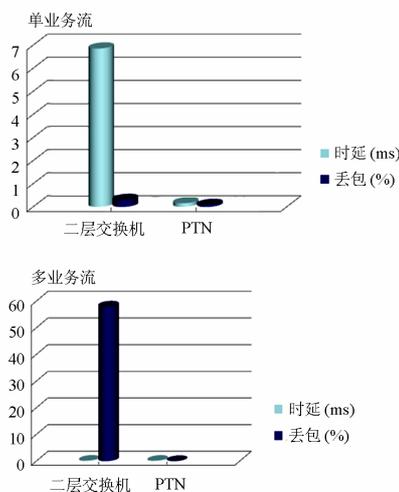


图 8 生存性测试结果

Fig. 8 Test result of protection

如图 8 所示, 在链路发生故障时, PTN 设备比工业以太网交换机具有更快的倒换速度, 更小的丢包率。

### 4) 业务隔离测试

如图 9 所示, PTN 设备应用了 LSP 和 PW 技术, 对不同的业务类型提供较好的隔离, 相比以太网交换机在通道隔离方面有较大优势。

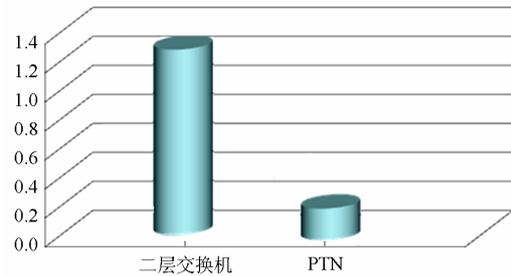


图 9 业务隔离测试结果

Fig. 9 Test result of isolation

通过上面几个指标的测试, PTN 设备在多业务的可靠实时传输、实现业务间的通道安全隔离以及环网自愈等方面具有较大的优势, 在配用电通信网领域应用有较强的优越性。

## 6 结语

随着智能配电网建设的逐步推进, 配用电通信网成为保障配电网安全可靠运行的重要基础, 通信技术的不断提升和通信理论的完善, 使得新型通信技术不断推出。PTN 作为一种电信级城域网技术, 借鉴其在运营商方面的成熟应用经验, 探讨其在配用电通信网中的应用具有十分重要的意义。本文在配电网分层分布式架构的框架下, 讨论了在该领域的现有通信技术, 探讨了 PTN 的关键技术在配用电领域的应用可行性, 并提出一种应用模式, 为 PTN 在配用电通信网的应用奠定了基础。PTN 在智能配用电的应用是一个循序渐进的过程, 相关的针对电力环境的技术研究工作将是我们接下来的研究目标。

### 参考文献

[1] 国家电网公司. 国家电网公司“十二五”通信网发展规划[R]. 2010.  
State Grid Corporation of China. The “12th five-year” communication network program of the State Grid Corporation of China[R]. 2010.

[2] 盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 智能配电环境感知融合网络的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24):

- 127-131.  
SHENG Jie, TANG Liang-rui, HAO Jian-hong. Research of ambient composite networks towards the smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 127-131.
- [3] 吴国沛, 刘育权. 智能配电网技术支持系统的研究应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 162-166.  
WU Guo-pei, LIU Yu-quan. Research and application of technology support system for smart distribute grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 162-166.
- [4] 韩国政, 徐丙垠, 索南加乐. 基于 IEC6185 的配网自动化通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 62-66.  
HAN Guo-zheng, XU Bing-yin, SUONAN Jia-le. Communication technology for distribution automation based on IEC61850k[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 62-66.
- [5] 杨毅, 韦钢, 周冰. 基于模糊期望值模型的配电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 200-205.  
YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing. Distribution network planning based on fuzzy expected value model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 200-205.
- [6] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.  
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [7] 高强. 工业以太网交换机在配网中的性能分析与应用. 电力系统通信, 2009, 30(9): 46-52.  
GAO Qiang. Performance analysis of industrial Ethernet exchange and its application in power distribution network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(9): 46-52.
- [8] 尹向东. EPON 技术在用电信息采集远程通信中的应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(9): 36-40.  
YIN Xiang-dong. The application of EPON technology in remote communication of electricity utilization information collection[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(9): 36-40.
- [9] 郭以贺, 谢志远. 配电网载波通信信道的分析和建模[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 49-52.  
GUO Yi-he, XIE Zhi-yuan. Analysis and modeling of distribution line carrier communication channel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 49-52.
- [10] 李文伟, 陈宝仁, 吴谦, 等. TD-LTE 电力无线宽带专网技术应用研究[J]. 电力系统通信, 2012, 33(11): 82-87.  
LI Wen-wei, CHEN Bao-ren, WU Qian, et al. Applied research of TD-LTE power wireless broadband private network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(11): 82-87.
- [11] 林添顺. 基于 GPRS 的新型配电网自动化通信系统设计及应用性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 44-47.  
LIN Tian-shun. A new kind of communication system based on GPRS for power distribution and analysis of its practicability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 44-47.
- [12] 江华, 孙圆圆. McWILL 技术在银川配电网通信网中的应用[J]. 电力系统通信, 2011, 32(10): 21-25.  
JIANG Hua, SUN Yuan-yuan. The application of McWILL technology in Yinchuan distribution communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(10): 21-25.
- [13] 姚虹春, 郭经红. WiMAX 技术发展及其在配电网通信中的应用[J]. 电力系统通信, 2007, 28(1): 1-5.  
YAO Hong-chun, GUO Jing-hong. The application of WiMAX in distribution network communication[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2007, 28(1): 1-5.
- [14] 赵丙镇, 刘建明, 栗宁, 等. 智能用电交互服务中的融合通信技术[J]. 电力系统通信, 2011, 32(10): 1-5.  
ZHAO Bing-zhen, LIU Jian-ming, LI Ning, et al. Converged communication technology in smart power consumption interactive service[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(10): 1-5.
- [15] 张军, 郜士其, 胡阳, 等. 配电通信接入网中混合通信组网的研究[J]. 电力系统通信, 2011, 32(9): 36-40.  
ZHANG Jun, GAO Shi-qi, HU Yang, et al. Study on mixed communication networking in power distribution access network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(9): 36-40.
- [16] 李信, 金葵, 于然, 等. EPON 与载波通信在配网自动化中的应用[J]. 电力系统通信, 2012, 33(11): 7-10.

- LI Xin, JIN Shen, YU Ran, et al. Application of mixed communications based on EPON and PLC in distribution automation system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(11): 7-10.
- [17] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
- SHEN Bing-bing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.
- [18] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 76-80.
- CAO Jin-ping, LIU Jian-ming, LI Xiang-zhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 76-80.
- [19] 徐焜耀, 徐鑫, 候兴哲. 构建新一代智能配用电通信网建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 1-5.
- XU Kun-yao, XU Xin, HOU Xing-zhe. Suggestions on next generation communication network for smart distribution and consumption network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 1-5.
- [20] 国家电网公司. 终端通信接入网建设指导意见[R]. 2011.
- State Grid Corporation of China. The guiding opinions of communications terminal access network construction[R]. 2011.
- [21] 刘平心, 宋杰, 谢妮娜. PTN 及电信级以太网在电力系统通信中的应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(5): 25-31.
- LIU Ping-xin, SONG Jie, XIE Ni-na. Application of PTN and carrier-class Ethernet in power communication system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(5): 25-31.
- [22] 贾小铁, 雷学义, 吴云峰, 等. PTN 为智能电网提供理想的信息通信平台[J]. 电力系统通信, 2010, 31(7): 20-23.
- JIA Xiao-tie, LEI Xue-yi, WU Yun-feng, et al. PTN provides an ideal information communication plat for smart grid[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(7): 20-23.
- [23] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
- XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.

收稿日期: 2013-12-13; 修回日期: 2014-03-18

作者简介:

汪强(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事电力通信技术研究; E-mail: wangqiang8139@163.com

朱延章(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力通信技术研究;

葛光胜(1975-), 男, 工程师, 主要从事电力通信技术研究与应用。