

GPON 在智能配电网中的应用及其带宽分配^①

解基源^{②*} 王建中^{**} 李 彬^{***}

(* 中北大学 信息与通信工程学院 山西太原 030051)

(** 中北大学 理学院 山西太原 030051)

(*** 华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206)

摘 要 从智能配电网的承载系统出发,研究了基于千兆位无源光网络(GPON)的智能配电网监测网络架构及标准体系。结合目前的配电网自动化系统分析了配电网采集终端的业务特性,并通过附带业务解析功能的带宽分配方案,实现了多种业务等级的配电网业务接入。此外,针对配电网终端数量众多的特点,设计了分级业务调度的方案,通过光网络单元(ONU)间与 ONU 内部数据调度相结合的方式,实现不同类型的业务接入控制,以适应未来大规模智能配电网的新业务应用。

关键词 无源光网络(PON),配电网自动化,带宽分配,运行监测,智能电网

0 引 言

随着光纤逐步替代现有的铜缆基础设施,下一代智能电力信息网络中可启用新型宽带服务。无源光网络(passive optical network, PON)中的常见基础设施主要包括光纤和分路器,目前应用较多的 PON 主要有千兆位无源光网络(Gigabit-capable PON), GPON 以及 XGPON(10 千兆系统)。通常 PON 系统的传输距离受限于链路衰减,因此 GPON 系统中的损耗预算显得尤为重要^[1]。对于部署在中心局的设备(OLT)与客户终端(ONT)之间的设备不能超出 G.984.x 和 G.987.x 的相关技术规范标准要求^[2-7]。在光纤到户(fiber to the home, FTTH)场景中,GPON 系统衰减测量必须包括从内部网络到用户光缆终止位置的设备。在操作过程中,光线路监督单元(OLS)持续监测系统运行参量(G.984.2 Amd2 中规定),并产生相应的报警监测和处理。在单光纤故障的情况下,系统须支持额外的故障定位,可通过启用每个中心局所放置的波分复用(WDM)滤波器,提供接入的 GPON 系统的波长。T-CONT1 为固定带宽分配业务类型,也是唯一动态带宽分配(DBA)算法不参与的容器类型。T-CONT2 专用于可变比

特率(VBR)业务类型,其带宽可由服务水平协议(SLA)保障,具有较高的优先级。T-CONT3 的等级比尽力而为(BE)类型的业务略高,可为业务提供最小的保障速率,剩余的带宽则仅在网络空闲容量较大时才提供备用。T-CONT4 仅用于 BE 类型的业务,不具有任何带宽保障措施^[8]。配电主站通过配电接入网络对各级配电子站进行监控,根据所采集的现场数据分析系统的运行状态,同时协调各子站、终端之间的关系,对整个系统进行有效的监控和管理。配电网监控子站主要负责终端设备的数据集中和转发,将配电终端的数据汇聚后通过本地通信网络上传至主站。配电终端与具体的设备直接相连,主要采集支线开关、开闭所、箱式变等设备的数据,同时接收来自主站的控制指令^[9,10]。

配电网自动化系统对于提高配电网运行管理的自动化水平、提高供电设备利用率、降低运行维护费用具有重要的意义,能够最大限度地提高企业经济效益。本文从 GPON 监测系统解决方案的测量点部署出发,对基于 PON 的智能配电网监测网络进行分析,提供低时延、高质量的监控服务,以保证具有成本效益的网络运营。从目前业界的应用上来看,所采用 GPON 设备应根据配电网的实际情况量身定做,提供具有工业级的高可靠性,实现全网双纤保

① 国家科技重大专项(2010ZX03006-005-001),国家自然科学基金(51307051)和中央高校基本科研业务费专项(12QN10)资助项目。

② 女,1980 年生,博士;研究方向:下一代光网络与传感技术;联系人,E-mail:13911777033@163.com

(收稿日期:2012-12-25)

护。通常 PON 系统设计将分光器内置于光网络单元(optical network unit,ONU)中,同时提供以太网接口和 RS-232/485 接口,为电力线路提供可靠的通信保障。

1 配电自动化系统组网设计

1.1 配网监测对象分析

在 FTTx 系统中可采用波分复用(WDM)技术,通过外置合波器将配网采集数据与公务电话以及其它辅助监测数据复用在同一根光纤中进行传输,从而实现智能配网中的统一的业务传输平台^[11]。典型的 OLT 设备接口包括以太无源光网络(EPON)、GPON 等用户接口,同时还支持 10GE 以太网上联光接口以及 GE、STM-1、E1 传输接口。为维护方便,设备一般还预留了 FE 接口或 RJ45 接口等用于 GUI 在本地的带内、带外管理维护调试。

配电自动化系统(DAS)包括配电主站、配电子站、通信系统等,其中涉及的配电自动化终端主要包括馈线终端单元(FTU)、配电终端单元(DTU)、变压器终端单元(TTU)等。通过 DAS 系统中的智能终端向远端控制中心传送负荷开关、断路器等配电设备的运行状态信息,通过远方控制中心直接实施远程控制开关操作。表 1 给出了 DAS 系统中的典型监控对象。

表 1 DAS 系统监测设备对象

设备对象	缩写	安装位置
远方终端单元	RTU	变电站、开闭所
馈线终端单元	FTU	线路环网柜、柱上开关
变压器终端单元	TTU	配电变压器

在适配子层,异步转移模式(ATM)和 GPON 封装方法(GEM)、服务数据单元(SDU)在各自的适配子层转换为 ATM 和 GEM(协议数据单元,PDU),其中包括 ONT 管理控制接口(OMCI)通道数据(如图 1 所示)。在成帧子层,由 ATM 块、GEM 块、嵌入操作管理和维护(OAM)和物理层操作管理和维护(PLOAM)形成 GPON 传输汇聚层(GTC)帧^[12]。嵌入 OAM 信息直接嵌入 GTC 帧头,对该层进行控制,并在该层终结。PLOAM 作为该层的业务在 GTC 帧中被分配专门的 PLOAM 块,而 GTC 成帧子层对所有的数据传输均全局可见。在配电主站侧,OLT 的

GTC 成帧子层与所有 ONU 的 GTC 成帧子层直接对应。

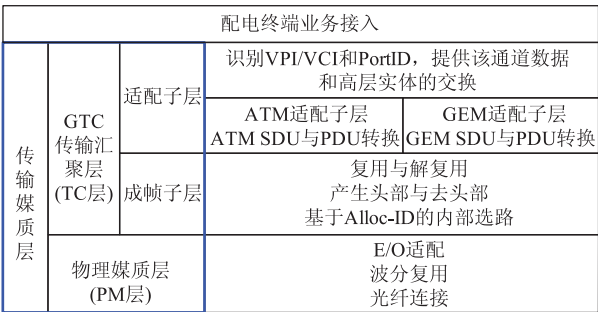


图 1 基于 G.984.3 的配电业务接入模型

1.2 智能配电光纤网络架构

在配电终端侧的 ONU 设备会选择接收 OLT 发送的广播数据,并响应 OLT 发出的测距及功率控制命令。对于配电终端采集的数据首先通过 ONU 内部缓存,等待 OLT 的调度指令进行传输^[13]。与输电网络不同的是,配电网络的电压等级较低,采用辐射型网络拓扑结构。所需采集和监测的设备数量庞大,然而每个终端所采集的信息相对较少。主站与子站之间的网络大都采用光纤环网的形式,馈线自动化设备则通过 ONU 等终端设备将所监视的馈线开关状态、电压、电流传输,同时还接收来自 OLT 的合闸、分闸指令,通常要求能够适应恶劣的室外运行环境。对于电网发生的瞬时故障,可通过馈线上的重合器与分段器消除,隔离故障。对于非紧急性故障,可通过将采集的数据送到控制中心后,由远方遥控实现故障隔离或供电恢复。

对于智能配电主站,可选用大容量无阻塞的 FTTTH 平台。以 MA5680T 设备为例,该设备采用 400Gbps 交换矩阵,具有 800G 业务槽位带宽的背板容量,其中单个业务槽位可支持 10GE 带宽,单个上行槽位可支持 20GE 的带宽容量。目前,大多 GPON 设备支持 GPON、EPON、P2P 单板混插,能够满足无阻塞交换的业务需求。如图 2 所示,一个典型的

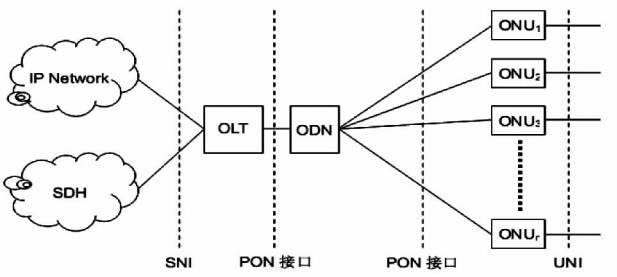


图 2 PON 系统网络架构

PON 网络主要由 OLT、光配线网络 (ODN) 和 ONU 组成,拓扑结构为点到多点结构,即一个 OLT 通过 ODN 连接多个 ONU 设备。OLT 到 ONU 的传输(下行方向)采用时分复用(TDM)广播方式,连续不断将信息传输给每一个 ONU,各 ONU 通过标识符判断,从中提取发送给自己的信息。而 ONU 到 OLT 的传输(上行方向)采用时分多址(TDMA)方式,各 ONU 在 OLT 分配给对应的时隙内将信息传输至 OLT。

系统带宽分配采用静态带宽分配(SBA)+DBA 的双重模式,通过 SBA 确保 ONU 的固定带宽分配,DBA 则在 SBA 的基础上针对每个配电终端的流量进行动态带宽分配。通常带宽分配的粒度以 64kb/s 通道为基准单位,DBA 的调节精度不超过 5%。在采用全新的 GEM 封装协议后将全部采用 125 μ s 的定长帧结构,具有更高的传输效率。在配电终端如需接入新的电力监测业务时,可进一步采用不同的虚拟局域网(VLAN)对不同的业务流进行区分,通过映射到相同的逻辑链路标识(LLID)中,实现业务流的控制与传输。在多 GEM 端口方案中,根据 VLAN ID 以及 802.1p 或者不同的物理端口将不同的业务映射到不同的 GEM 端口上进行处理。注意,GEM 端口为虚拟的划分端口,而并非实际的物理端口,仅为方便业务分流实现而定义的虚拟逻辑标识。

2 基于 GPON 的配网自动化系统中的带宽分配模型

电力系统新出现的业务需求不断,对接入网络的带宽需求逐步增加。现有的铜线电缆基础设施的带宽和传输距离是有限的,将逐步被大容量光纤管道所代替。在过去几年的接入网络建设主要以光纤到楼(FTTB)及 FTTN 为主,采用点到多点的树型拓扑提供光纤基础通道设施公用的网络架构。GPON 与 XGPON 运行在相同的光纤网络上,通过光时域反射计监测信号质量,分析安装在光纤基础设施的损失和纤维断裂。GPON 系统中最主要的功率损耗来自于分光设备,利用光时域反射仪(OTDR)可以区分所有配电终端的操作和故障定位。

图 3 给出了从配电主站到子站 OLT 各配线终端的 PON 网络连接。PON 系统参数之间并非孤立无联系的,分光比越高,PON 所能接入的终端设备越多,平均到每个配电终端的可用带宽越低。然而,

过高的分光比也会限制从中心局到配电终端的传输距离。1310nm 的波长在光纤中传输只有 0.36dB/km,另外附加 0.1dB 的接头衰减,而对于 1:32 的分光设备,所引入的功率衰减高达 17.5dB。

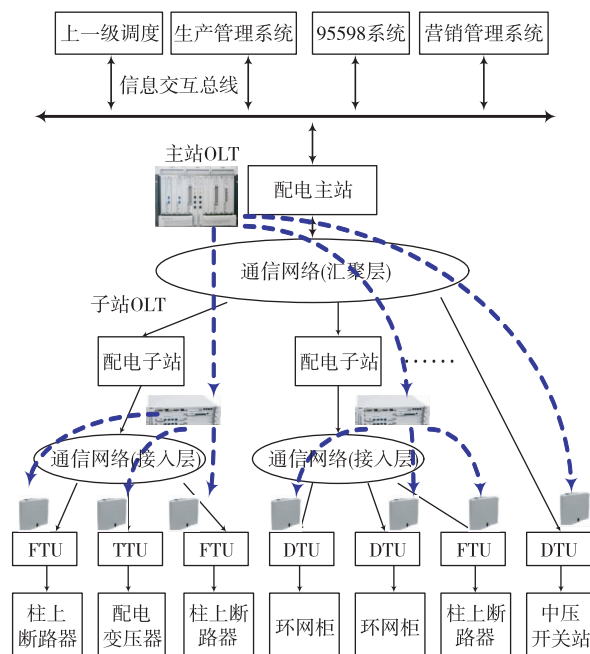


图3 配电网监控终端组网示意图

目前,城市配电网大都采用手拉手结构,由双电源供电开环运行。对于新建站点基本都敷设了光纤管道,具备实现配网自动化的前提条件。OLT 设备组成主要包括主控板、业务板、以太网业务级联板、上行接口板、电源接口板、通用接口板几部分,一般采用直流供电方式。ONU 则为光接入网提供直接用户或者远端用户侧接口,其主要功能是终结来自 ODN 的光缆和处理光信号,并为多个用户提供业务接口。由于 ONU 的网络侧为光接入口,而用户侧为电接口,因此 ONU 应有光/电和电/光转换功能。

3 实验结果分析

针对上述组网方案,本研究搭建了 GPON 配电网网络系统进行测试,如图 3 所示。其中,系统下行链路速率 622Mb/s,波长 1550nm,线路编码选用不归零(NRZ)编码,消光比 15dB。从配电终端到主站的上行链路波长为 1310nm,其它参数与下行链路相同。每个 ONU 中的业务被划分为 4 个不同的等级,其中最高级别的业务对时延和抖动均具有严格的要

求,需要通过 OLT 对 ONU 上报的数据进行分析和解析,以确定每个 ONU 所承载的数据类型,并根据 ONU 的 Report 帧向 OLT 申请带宽。OLT 收到 ONU 申请后,根据预设的优先级处理方法,通过上行时隙的划分,利用 Gate 帧进行授权,从而完成一次上行发送数据。

假定已知第 n 个周期之前的前 k 个周期的等待时隙中实际接收到业务数据量大小序列 $Q_{i,n-1}^c, Q_{i,n-2}^c \cdots Q_{i,n-k}^c$ 与对应的等待时隙长度序列 $T_{i,n-1}^{\text{wait}}, T_{i,n-2}^{\text{wait}} \cdots T_{i,n-k}^{\text{wait}}$, 根据配网业务预测模型可得到第 n 个周期中在等待时间内 ONU i 收到的业务长度为

$$P_{i,n}^c = \sum_{m=1}^J \left(\frac{T_{i,n-m}^{\text{wait}}}{\sum_{k=1}^J T_{i,n-k}^{\text{wait}}} Q_{i,n-m}^c \right) \quad (1)$$

其中, $Q_{i,n}^c$ 表示 ONU i 在第 n 个周期的等待时间里接收到的编号为 C 的业务量, J 为累计统计的周期数目。

由图 4 可知,主站 OLT 的中心波长位于 1490nm,输出功率约为 -17dBm,其 20dB 带宽约为 0.015nm,在偏离 0.05nm 处的光功率已经下降到 -85dB 左右,足以满足配电终端的通信质量要求。

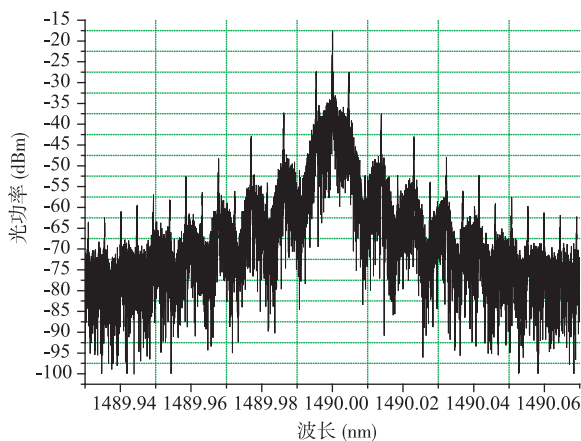


图 4 主站 OLT 光信号波测试(NRZ 编码)

归零(RZ)编码传输后需要归零,所以在配电子站在信号归零后进行采样即可,无需单独的时钟信号。虽然 RZ 编码把时钟信号用归零编码在数据之内,可以实现自同步、节省时钟数据线,但是也伴随着大量的带宽浪费。NRZ 编码需要额外的同步信号,却是效率比较高的编码,其每一位数据编码均占用全部码元宽度,如图 5 所示。

图 6 给出了配电主站侧的 OLT 采用 RZ 编码的

信号测试波形。考虑 GPON 系统中高阶物理媒质相关(PMD)的影响,经补偿后 NRZ 码的补偿效果优于 RZ 码,可考虑进一步引入偏振度作为反馈信号,建立自适应的补偿方案。单极性 NRZ 信号的功率谱仅有连续谱和直流分量,而单极性 RZ 信号的功率谱除连续谱外还包括在基频整数倍的离散谱。通过分析随机脉冲序列的功率谱,可确定配电网络中的信号功率分布,从而优化设计信道带宽及传输网络等。

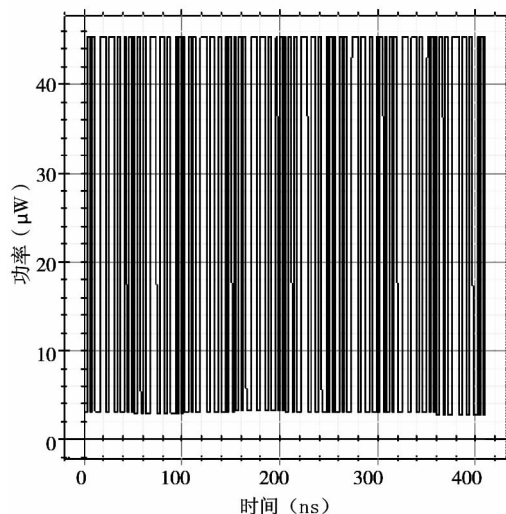


图 5 配电终端下行信号时域波形

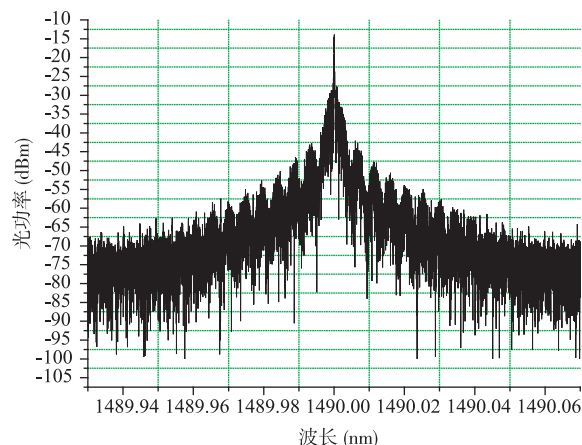


图 6 主站 OLT 光信号波测试(RZ 编码)

从表 2 可以看出,该系统能够针对不同类型的业务接入数据进行区分,当不同网络负载情况下的业务性能。随着配电网络的数据业务负载加大,网络所接入业务的延时逐步增高。其中变化最大的是 T-CONT3 与 T-CONT4 两种,业务延时增长近 3 倍。另外,从不同的业务优先级来看,T-CONT4 由于未

采用任何带宽保障措施,所传递的业务通常不具有硬性 QoS 保障,仅用于传送一些低等级、非关键性的业务。另外,在进行配电终端带宽分配算法设计时,应当在满足算法公平性的前提下,尽可能提高重要业务的性能,并且能够保证低优先级业务的性能。对于小电流接地系统,当发生瞬时性故障时,短路点可自行灭弧恢复绝缘,而不必立即跳闸,可以通过远程控制主站决定该条线路的操作。

表 2 不同带宽分配容器中的配电业务时延比较 (ms)

负载系数	T-1	T-2	T-3	T-4
0.5	1.05	1.72	3.31	16.8
1	1.51	2.15	8.92	47.6

T-CONT 业务的帧时间间隔分布服从指数分布,ONU 与 OLT 之间距离从 5km 到 40km 进行测试。整个实验过程从设备冷启动开始,平稳运行后,OLT 端开始收集配电终端的采集信息,直到系统收敛为止。由图 7 可知,随着传输距离加大,系统性能逐渐恶化,在最佳抽样点处的 BER 从 5km 的 -46dB 上升至 40km 的 -2dB,已经无法满足系统的要求。随着配电网的快速建设,所采集数据信息量逐渐增大,线路速率越来越高,采用 TDM 方式的接入系统对于对时的要求越来越高,因此在实际系统中建议将下行传输距离限制在 10km 范围内,以保障系统的通信质量。

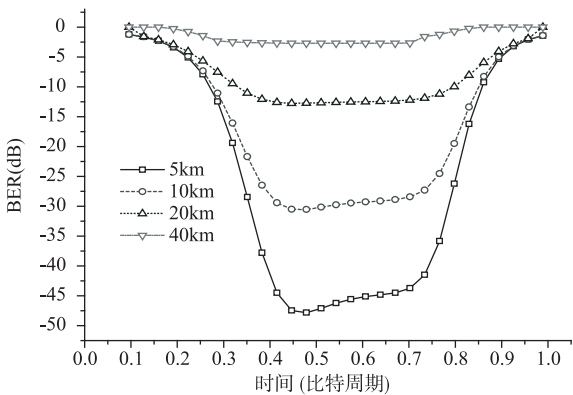


图 7 不同传输距离下的 BER 性能分析

4 结 论

配电自动化系统是未来智能配电网的发展方向,除在旧城区改造工程中可能会采用无线专网技

术外,新建城区大多采用 PON 系统提供通信通道。通过带宽分配调度,能够满足不同业务优先级的 ONU 下的业务性能需求,各业务之间的带宽分配由 OLT 进行控制。由于配网的终端数量众多,通常 ONU 可能会接入多种不同类型的终端,此时在不同业务之间的带宽分配可以由 OLT 下放至各个 ONU 来完成。通过 ONU 内部的带宽分配和调度,满足不同配电终端侧的业务接入性能要求。未来智能配电网系统可以建设成开放式系统平台,能够提供多种类型的业务接入,采集现场运行数据,提供多种新型接入业务,如配网线路检测、智能安防、分布式电源调度等业务。

参考文献

[1] 杨乐祥. PON 技术在配网自动化通信系统中的应用. 电力系统通信,2010,31(209):26-30

[2] ITU-T Recommendation G. 984. 1, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics, 2003

[3] ITU-T Recommendation G. 984. 2, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2003

[4] ITU-T Recommendation G. 984. 3, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence (TC) layer specification, 2004

[5] ITU-T Recommendation G. 984. 4, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): ONT management and control interface (OMCI) for GPON, 2004

[6] ITU-T Recommendation G. 984. 5, Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band, 2007

[7] ITU-T Recommendation G. 984. 6, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Reach extension, 2008

[8] Chen B, Chen J J, He S L. Efficient and fine scheduling algorithm for bandwidth allocation in Ethernet passive optical networks. *IEEE Communication Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12 (4) : 21-27

[9] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述. 电力系统自动化, 2009, 33 (17) : 10-15

[10] 徐艺, 李武杭, 侯雅林. 无源光网络技术在配网自动化中的应用. 电网技术, 2008 (8) : 95-96

[11] 冯利伟, 马永红, 王一蓉. EPON 在配网自动化系统中的应用. 电力系统通信. 2010, 31 (210) : 24-27

[12] 余天威. Ethernet PON 上行接入技术与动态带宽分配算法的研究: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006. 19-20

[13] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化. 电力系统自动化, 2009, 33 (17) : 38-42

Application of GPON in distribution network and corresponding bandwidth allocation

Xie Jiyuan^{*}, Wang Jianzhong^{**}, Li Bin^{***}

(^{*} School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

(^{**} School of Science, North University of China, Taiyuan 030051)

(^{***} School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract

The bearing system of intelligent power distribution networks is paid great attention, and a monitoring network architecture based on the standard gigabit-capable passive optical network (GPON) system is presented. An acquisition device in distribution automation systems is analyzed together with the associated service characteristics, meanwhile, a service oriented bandwidth allocation scheme is presented to achieve a variety of service-level distribution service access. In addition, according to the large amount of distribution network terminals, differential service scheduling programs are designed through a combination of inter-ONU (optical network unit) and internal-ONU scheduling, and different types of service access controlling are investigated to adapt to future large-scale smart distribution network applications.

Key words: passive optical network (PON), distribution automation, bandwidth allocation, operation monitoring, smart grid