

智能电网的电力光纤入户技术及其应用

范宏¹,高亮¹,周利俊²,李露莹²,张鑫²

(1. 上海电力学院 电气工程学院,上海 200090;

2. 上海浦海求实电力新技术有限公司,上海 200090)

摘要: 介绍了电力光纤入户技术的实现目标和以太无源光网络(EPON)的网络结构。给出了电力光纤到楼的 2 种通信建设方案:一种是集中器与主站通信的远程信道采用光纤通信,本地信道使用低压电力线载波、RS-485、短距离无线通信的方式;另一种是光纤采集器与主站经光纤网络直接通信的方式。提出一种电力光纤入户系统的通信建设方案,即采用光纤电能表与主站经光纤网络直接通信的方式。根据上述建设方案进行了合理的设备配置,以某大楼为例详细说明了电力光纤入户技术设计方案。最后,介绍了南桥智能小区试点的电力光纤入户技术。

关键词: 智能电网; 通信; 无源光网络; 以太网; 电力光纤入户; 智能小区

中图分类号: TN 929.11

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.026

0 引言

智能电网是未来电网的发展方向,各国的专家学者已经开始对智能电网的各个方面展开研究^[1-5]。通信技术是智能电网研究中的关键技术之一,电力光纤入户(PFTTH)技术使电网具备了通信功能,为电网智能化发展奠定了坚实的基础。

电力光纤入户是指在低压通信接入网中采用光纤复合低压电缆(OPLC),将光纤随低压电力线敷设,实现到表到户,配合无源光网络(PON)技术,承载用电信息采集、智能用电双向交互、三网融合等业务^[6-9]。该技术解决了信息高速公路的末端接入问题,满足智能电网用电环节信息化、自动化、互动化需求,而且还可以实现网络基础设施的共建共享,大幅降低“三网融合”实施成本,提高网络运营效率,具有节能环保的优势。光纤复合电缆技术实现了电力光纤入户,支持多种智能电网应用及三网融合。该技术将原来多条通信通道合并为 1 条,避免了光纤重复敷设,节省了通信通道,免去了重复开挖施工,减少了后期的运行维护成本,解决了通信网络中的“最后一公里”难题,是实现智能电网和三网融合的必然选择^[10-12]。

国务院出台加快推进“电信网”、“广播电视网”和“互联网”三网融合的政策之后,国家电网公司也明确提出充分利用电力通信网络的优势,支撑三网融合建设^[13-14]。上海市电力公司已在多个小区全面实施了电力光纤入户试点,实现了多网融合。

1 电力光纤入户技术目标

基于光纤复合电缆的电力电缆通信接入可以实

现多网融合,解决通信网络“最后一公里”的难题;为配电自动化系统、用电信息采集系统、智能用电等电力通信系统提供通信通道,并实现三网融合,同时实现水、电、煤三表集中采集。

2 电力光纤入户技术

电力光纤入户网络一般处于电力通信网络变电站到用户端的接入层网络中,其在整个电力通信网络中的位置如图 1 所示。电力光纤入户接入网通过业务节点接口(SNI)与核心网相连,通过用户网络接口与终端用户相连。



图 1 PFTTH 网络在电力通信网络中的位置

Fig.1 Location of PFTTH network in power communication network

PON 技术是最新发展的点到多点的光纤接入技术,主要包含 ATM 无源光网络(APON)、以太无源光网络(EPON)、千兆无源光网络(GPON)3 类,其中 EPON 以商用较早、核心芯片量产大和设备成本低的显著优势得到广泛应用^[8]。本文的电力光纤入户技术基于以太网方式的 EPON 网络,采用点到多点结构、无源光纤传输,在以太网之上提供多种业务,在物理层采用了 PON 技术,在链路层使用以太网协议,利用 PON 的拓扑结构实现了以太网的接入。

EPON 结构主要由局端的光线路终端(OLT)、用户侧的光网络单元(ONU)和光分布网络(ODN)组成,如图 2 所示。其中,OLT 是提供语音、数据、视频业务网络的互联接口,可实现网络管理的主要功能;ODN 负责连通 OLT 与所属的 ONU;ONU 负责向终端用户提供所需的业务接口。

收稿日期:2012-05-30;修回日期:2013-05-15

基金项目:上海市教育委员会重点学科建设项目(J51303)

Project supported by the Shanghai Municipal Education Commission(J51303)

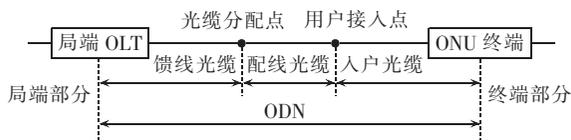


图 2 PFTTH 网络的结构

Fig.2 Structure of PFTTH network

电力光纤入户网络的局端是 ODN 网络的起始点,通常设置在小区 10 kV 配电室或 110 kV 变电站;光缆分配点是多个用户接入点靠近 OLT 局端的光纤集中汇聚点,通常设置在楼宇配电间;用户接入点是多个用户的光纤集中汇聚点,通常设置在楼宇单元内;终端是 ODN 网络的终点,在此连接终端设备,通常设置在楼宇单元内(连接智能电能表等)和用户家庭内部(连接电话机、电视机、计算机等)。因此电力光纤入户网络的 ODN 网络可分为 3 段:从局端机房到光缆分配点的馈线段;从光缆分配点到用户接入点的配线段;从用户接入点到终端的入户段。

2.1 电力光纤到楼

电力光纤到楼有 2 种方式。

a. 集中器与主站通信的远程信道采用光纤通信,集中器通过 FE 口接入 ONU 设备,可实现与主站经光纤网络通信;本地信道仍使用低压电力线载波、RS-485、短距离无线通信等方式。该方式适用于采集系统比电力光纤到楼先建设的情况,系统示意图如图 3 所示。

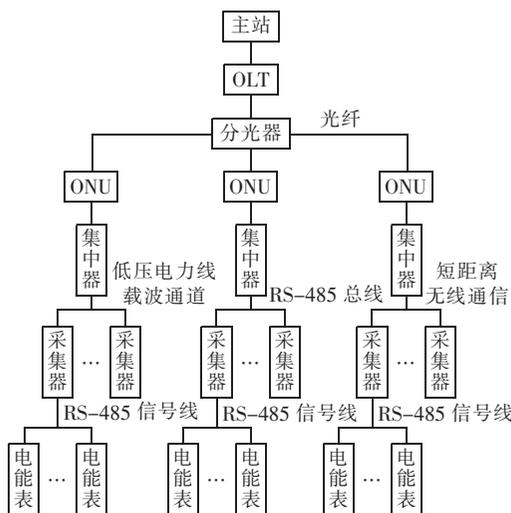


图 3 方案 1

Fig.3 Scheme 1

b. 使用光纤采集器实现与主站经光纤网络直接通信,中间省去集中器设备,光纤采集器与电能表通信仍采用 RS-485 方式。该方式适用于采集系统与电力光纤到楼同步建设和采集系统改造时的情况,用光纤采集器替换原有采集器,并接入 ONU 设备。系统示意图如图 4 所示。

2.2 电力光纤入户

电力光纤入户方案不安装采集系统设备,直接

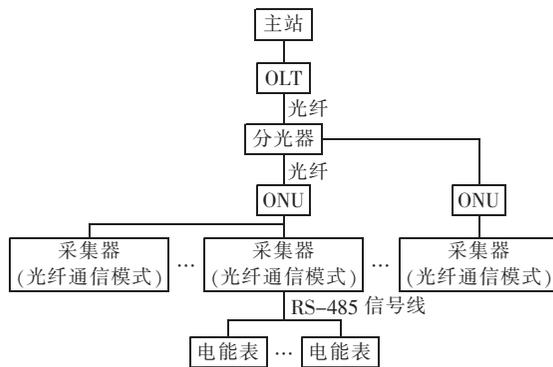


图 4 方案 2

Fig.4 Scheme 2

采用光纤电能表,每块电能表都是光纤网络的单元,分配有单独的 IP 地址,可经光纤网络与主站直接通信。该方式适用于采集系统与电力光纤到楼同步建设的情况,系统示意图如图 5 所示。

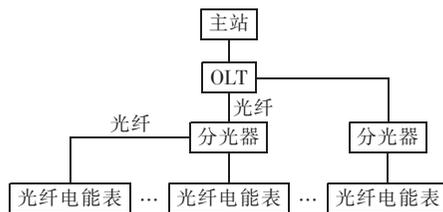


图 5 电力光纤入户系统的通信建设方案

Fig.5 Communication construction scheme of PFTTH system

3 电力光纤入户方案设计

3.1 分光结构选取

a. 中心分光结构。

每个用户均有专用的光路由用户端连接到局端,每个用户的专用光路在网络接入点通过连接或者熔接的方式连接到分配光缆,分配光缆在本地接入点通过连接或熔接连接到干线光缆,干线光缆可以用同样的方式连接到中心交换点。在这种结构中本地集中点和网络接入点仅作为网络合并点,且低芯数的光缆合并到大芯数光缆里。按照点到点的关系,每个用户连接到局端有源设备或在局端进行分光。

b. 本地集中分光结构(即中心分光)。

本地集中分光结构提供每个用户由用户端到本地集中点的专用光路,每个用户的专用光路在网络接入点及分配光缆都为专用,这些专用光缆被连接到本地集中点。在这种结构中,每个网络接入点仅提供光纤合并功能,本地集中点具有分光功能。在干线光缆和分配光缆之间使用无源分光器创造点到多点的关系,分配比例最高可达 1:32。

c. 分布式分光结构。

分布式分光结构利用分光器在网络接入点和本地集中点进行分光。在这种结构中,客户仅有的专用光路由用户端到网络接入点的引入光缆。每个

用户的专用引入光缆连接到网络接入点的分光器(分光比率通常是1:4或1:8),一条小芯数的分配光缆将网络接入点的分光器连接到本地集中点的分光器。这种层叠式的分光方法在干线光缆和分配光缆中制造了一个点到多点的体系结构。

3.2 OPLC的选取

电力光纤入户系统组网设计还应规划网络连接各节点线缆,重点考虑线缆的种类、线缆容量(芯数)、线缆路由、施工工艺。依据节点和ODN网络基本结构,电力光纤入户系统网络线缆可分为馈线光缆、配线光缆和入户光缆3段。

电力光纤入户系统中,馈线光缆是指小区10 kV配电室至楼宇光缆分配点(楼宇配电间)处的光缆,其选用OPLC,由小区10 kV配电室低压侧沿电缆沟、槽敷设至楼宇光缆分配点(楼宇配电间)处;光缆芯数应按所带楼宇最大用户容量进行配置,并为新业务开展预留20%的冗余,为光纤备份保护预留20%冗余,总计预留40%的冗余。

电力光纤入户系统中配线光缆是指楼宇光缆分配点至用户接入点处的光缆^[15-16]。电力光纤入户系统中,当连接的用户接入点与楼宇单元内配电电缆连接的节点位置相同时,配线光缆应选用OPLC,否则应选用普通垂直光缆。光缆由楼宇配电间沿楼宇强电井槽敷设至用户接入点处;光缆芯数应按所带用户接入点处最大用户容量进行配置,并为新业务开展预留20%的冗余,为光纤备份保护预留20%冗余,总计预留40%的冗余。

电力光纤入户系统中,入户光缆是指从用户接入点至用户终端处的光缆,宜选用皮线光缆。在楼宇电表集中安装且施工条件适合的情况下,可选用OPLC入户。入户端宜采用埋管、线槽方式入户,光缆芯数可选择单芯。

3.3 设备的配置

电力光纤入户系统网络主要设备包括OLT、ONU和光分路器(OBD),3种设备均可分为电力系统相关业务类和三网融合类。

3.3.1 OLT

a. 电力系统相关业务类PON规划数量为电力系统相关业务部署的ONU数除以32后向上取整。

b. 三网融合类PON规划数量为最大用户数除以32后向上取整。

c. PON口规划数可再预留5%的配置冗余数。

d. 上述PON口规划数仅作为电力光纤入户系统规划用途。在工程实施时OLT设备采购部署应根据用户实际开通率进行配置,以保障设备投资。

3.3.2 ONU

a. 电力系统相关业务类ONU,用于连接智能电

能表、配电自动化终端、分布式电源控制器、电动汽车有序充电控制器等终端。三网融合类ONU用于连接用户家庭内部电话、电视、计算机等信息设备。

b. 用于用电信息采集、配电自动化、分布式电源控制器、电动汽车有序充电控制器等电力系统相关业务的ONU,用户侧接口应配置RS-485和FE接口,其中用电信息采集ONU单个RS-485接口上串接的智能电能表不应超过32块。

c. 三网融合类ONU,用户侧接口应配置FE接口,并可依据实际需求选配POTS、CATV等接口。

3.3.3 OBD

a. 电力系统相关业务类OBD,采用一级的集中分光,集中部署在小区10 kV配电室。

b. 三网融合类OBD,根据实际需要可选择一级分光或二级分光模式,优先选用一级分光;在用户数比较分散,最大分光端口无法有效利用时,宜采用二级分光的模式。

3.4 节点位置选取

电力光纤入户系统组网设计应首先规划网络关键节点的位置。网络关键节点包括局端、光缆分配点、用户接入点和终端。

3.4.1 局端

电力光纤入户系统的局端为OLT设备的部署位置。OLT设备为大容量设备,适合集中部署,可为一片区域内的多个小区提供服务,便于设备的集中管理,同时提高设备利用率,减少设备和局端节点的数量,有效降低后期运行维护工作量。电力光纤入户系统一个局端覆盖的规划距离宜取3~5 km左右。

a. 在110 kV或35 kV变电站至规划区域中压通信接入网已建成的情况下,宜将规划区域的电力光纤入户的局端设置在110 kV变电站,此局端为整个110 kV变电站供电区域提供电力光纤入户接入。

b. 在110 kV或35 kV变电站至规划区域中压通信接入网未建成的情况下,宜将电力光纤入户系统的局端设置在小区的10 kV配电室,待中压通信接入网建成后,可将其上移至变电站。

c. 若小区用户数较多(1万户以上),宜将电力光纤入户系统的局端设置在小区的10 kV配电室。

d. 电力光纤入户系统的局端应配置光纤配线架(ODF)设备,实现OLT设备和馈线光缆的联接。

3.4.2 光缆分配点

光缆分配点是指馈线光缆和配线光缆之间的衔接的节点,可依据小区配电电缆交接点进行选择。

a. 光缆分配点宜选择在楼宇的配电间处。

b. 光缆分配点亦可承担用户接入点的功能,即由光缆分配点直接连接入户光缆实现就近用户的接入。

c. 光缆分配点处应安装光缆交接箱,在作为馈线光缆和配线光缆的 OPLC 中完成光电分离的光纤接入,并完成馈线和配线光缆的连接。

3.4.3 用户接入点

用户接入点较为靠近用户,是配线光缆和入户光缆之间的衔接的节点,可依据楼宇单元内配电电缆交接点进行选择。

a. 用户接入点宜选择在楼宇单元配电电缆连接的节点处,但不是楼宇单元内每个配电电缆连接的节点处都要设置用户接入点。

b. 一个用户接入点所带用户数量不宜超过 64 户,所带楼层范围不宜超过 10 层。当楼宇单元内一个配电电缆连接的节点所带用户或范围超过上述容量时,应在合适楼层增加相应的用户接入点,此时用户接入点将不在楼宇单元内配电电缆连接的节点处。

c. 用户接入点可完成本层及上下几层用户的接入。

d. 用户接入点处应安装光纤分纤箱,在作为配线光缆的 OPLC 中完成光电分离,并完成配线光缆和入户光缆的连接。

3.4.4 终端

电力光纤入户系统的终端为 ONU 设备的部署位置,依据 ONU 用途可分为用电信息采集类和三网融合类。

a. 用电信息采集类 ONU 终端位置应选择在楼宇单元用户接入点处。

b. 三网融合类 ONU 终端位置应选择在楼宇单元用户家庭内部。

4 案例

以规划区域楼层高度为 18 层,每层户数为 8 户的高层住宅为例进行电力光纤入户设计。

4.1 节点位置设计

4.1.1 光缆分配点

光缆分配点设置在楼宇地下室的楼宇配电间,在配电间处配置 1 个光缆交接箱。

4.1.2 用户接入点

楼宇 1 个供电区域覆盖用户数为 72 户。根据用户接入点规划原则应设置 2 个用户接入点。第 1 个用户接入点设置在低压楼宇配电间,与光缆分配点重合,用户接入点的光纤分纤箱可与光缆交接箱共用;第 2 个用户接入点设置在第 10 层配电电缆连接节点处,并配置 1 个光纤分纤箱;第 1 个用户接入点容量设计为 32 户,覆盖第 1~8 层用户;第 2 个用户接入点容量设计为 40 户,覆盖第 9~18 层用户。

4.1.3 设备配置

光分路器配置如下。

a. 用电信息采集光分路器采用一级分光,使用集中部署在小区 10 kV 配电室配置的 1:32 光分路器;三网融合光分路器依据用户接入点的设置和容量进行配置。

b. 用户接入点 1 的容量为 32 户,因此设置 1 个 1:32 光分路器,采用一级分光;用户接入点 2 容量为 40 户,因此设置 1 个 1:32 光分路器作为一级分光和 1 个 1:8 光分路器作为二级分光。其中 1:8 光分路器为第 2 级,将与部署在小区 10 kV 配电室的 1:4 光分路器构成二级分光结构。

ONU 终端配置如下。

a. 用电信息采集 ONU 配置:楼宇 1 个供电区域覆盖用户数为 72 户,按 72 块电能表计算,需要配置 3 个 ONU。用户接入点 1 放置 1 个 ONU,串接第 1~8 层的电表;用户接入点 2 放置 2 个 ONU,分别串接第 9~10 层和第 11~18 层的电表。

b. 三网融合 ONU 配置:楼宇 1 个供电区域覆盖用户数为 72 户,需要配置 72 个 ONU,放置在用户户内。

PON 口配置如下:

用电信息采集业务占用 3/32 个 PON 口;三网融合业务应用占用 3/25 个 PON 口。

4.2 线缆

a. 馈线光缆。馈线光缆为小区 10 kV 配电间到楼宇配电间的光缆,采用三相 OPLC 中纤芯。由小区 10 kV 配电间沿电缆沟、槽敷设至楼宇地下间的低压配电间;用于承载用电信息采集纤芯数为 3 根,承载三网融合业务纤芯数为 3 根,并同时考虑 40% 的冗余,则纤芯数为 8.4 根,参考 OPLC 纤芯规格,可配置 12 芯 OPLC。

b. 配线光缆。配线光缆为楼宇配电间到用户接入点之间的光缆。用户接入点 1 在楼宇配电间,与光缆分配点重合,由光缆分配点直接连接入户光缆实现就近用户的接入;用户接入点 2 在第 10 层配电电缆连接节点处。因此配线光缆采用三相 OPLC 中纤芯。

c. 入户光缆。入户光缆为用户接入点到 ONU 终端的光缆。用户接入点 1 采用 32 根单芯皮线光缆,实现第 1~8 层用户的光纤入户;用户接入点 2 采用 40 根单芯皮线光缆,实现第 9~18 层用户的光纤入户。

5 南桥智能小区的电力光纤入户

南桥智能小区已实现电力光纤入户,其智能用电服务小区通信方式采用 EPON 技术,在用户室内配置 ONU 终端,与智能交互终端、智能交互机顶盒、固定电话等设备连接,实现语音、数据、有线电视的信息接入,试点整体结构如图 6 所示。

新建小区采用光纤至电能表箱的方式实现了用

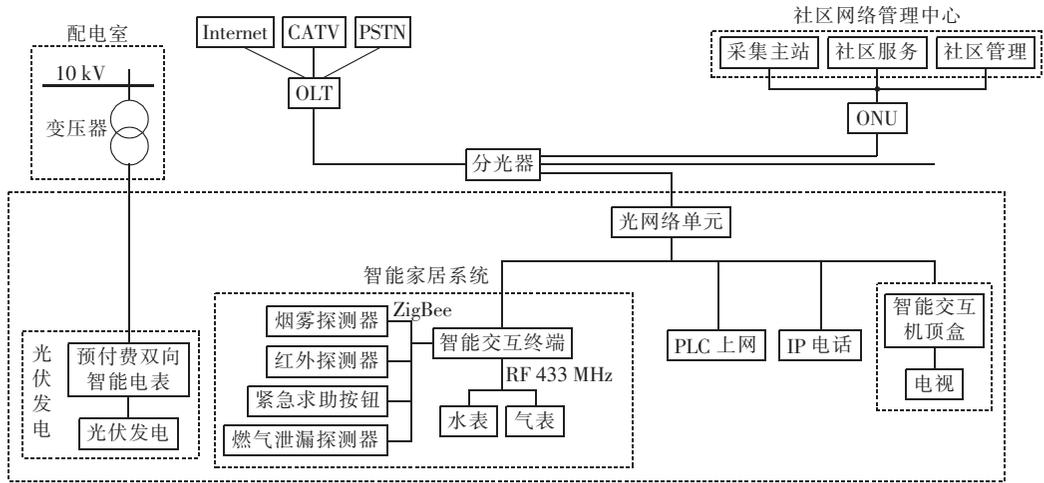


图 6 南桥智能小区试点的 PFTTH 系统结构

Fig.6 Structure of PFTTH system for Nanqiao smart community

电信息采集,再进一步将光纤延伸至用户家中,开展智能用电小区和“多网融合”业务。该小区从配电变压器至楼宇配电箱敷设三相四线 OPLC;从楼宇配电箱至楼层电能表箱敷设单相两线 OPLC;从电能表至用户户内闸箱敷设皮线光缆,并将各段光纤连接,实现了电力光纤入户。

6 结语

智能电网中的电力光纤入户技术是目前是智能电网的一个重要研究方向,为智能电网的建设起到积极的推动作用,该技术具有潜在的商业价值,但仍需要进一步改进和成熟。

参考文献:

[1] U.S. Department of Energy Office Electric Transmission and Distribution. GRID 2030:a national vision for electricity's second 100 years[R]. New York,USA:U.S. Department of Energy,2003.

[2] IBM Corporation. Smart grid method and model[R]. Beijing, China:IBM Corporation,2010.

[3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源,2009,25(1):7-11.
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart grid[J]. Power System and Clean Energy,2009,25(1):7-11.

[4] 张文亮,刘壮志,王明俊,等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术,2009,33(13):1-10.
ZHANG Wenliang,LIU Zhuangzhi,WANG Mingjun,et al. Research status and development trend of smart grid[J]. Power System Technology,2009,33(13):1-10.

[5] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong,SONG Shufang,LI Lanxin,et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology,2009,33(8):1-7.

[6] 梁甜甜,高赐威,王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):81-85.
LIANG Tiantian,GAO Ciwei,WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Autom-

tion Equipment,2012,32(5):81-85.

[7] 孙强,葛旭波,刘林,等. 国内外智能电网评价体系对比分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(6):105-110.
SUN Qiang,GE Xubo,LIU Lin,et al. Review of smart grid comprehensive assessment systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA,2011,23(6):105-110.

[8] 国家电网公司. Q/GDW553.1—2010 基于以太网方式的无源光网络(EPON)系统第一部分:技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[9] 刘建明,王继业,范鹏展,等. 电力光纤到户在智能电网中的应用[J]. 电力系统通信,2011,32(9):1-5.
LIU Jianming,WANG Jiye,FAN Pengzhan,et al. The application of PFTTH in the smart grid[J]. Telecommunications for Electric Power System,2011,32(9):1-5.

[10] 郝芸霞,金耀星. 国内外三网融合发展现状研究及分析[J]. 信息技术,2011,5(3):51-55.
HAO Yunxia,JIN Yaoping. Research and analysis of triple play at home and abroad [J]. Information and Communications Technologies,2011,5(3):51-55.

[11] 温建伟,王厚芹. 国际三网融合进程评价与启示[J]. 电视技术,2010,34(6):113-115.
WEN Jianwei,WANG Houqin. Evaluation and enlightenment of international trinetworks integration[J]. Vedio Engineering,2010,34(6):113-115.

[12] 袁超伟,张金波,姚健波. 三网融合的现状和发展[J]. 北京邮电大学学报,2010,33(6):1-8.
YUAN Chaowei,ZHANG Jinbo,YAO Jianbo. Present status and development of network convergence[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications,2010,33(6):1-8.

[13] 朱向庆,陈志雄. 多网融合的环境状况远程实时监测系统的设计[J]. 电子技术应用,2010,36(7):90-93.
ZHU Xiangqing,CHEN Zhixiong. Design of remote real-time environmental condition monitoring system based on multi-network convergence[J]. Application of Electronic Technique,2010,36(7):90-93.

[14] 黄俊华,张建明,季忠. OPLC 结构和应用的探讨及光纤后安装方案[J]. 电力系统通信,2011,32(11):70-76.
HUANG Junhua,ZHANG Jianming,JI Zhong. Discussion on structure and application of OPLC and later fiber installation scheme

- [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(11):70-76.
- [15] 丁慧霞, 滕玲, 许高雄, 等. 用于电力光纤到户的光纤复合低压电缆接续技术研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11):222-227.
- DING Huixia, TENG Ling, XU Gaoxiong, et al. Splicing technology of optical fiber composite low-voltage cable for fiber to the home[J]. Power System Technology, 2011, 35(11):222-227.
- [16] 杨乐祥. PON 技术在配网自动化通信系统中的应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(11):26-30.

YANG Lexiang. Application of PON in communication system of power distribution automation[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(11):26-30.

作者简介:

范 宏(1978-), 女, 湖北恩施人, 讲师, 博士, 从事智能电网技术方面的研究工作(E-mail: fan_honghong@126.com);

高 亮(1960-), 男, 山西太原人, 教授, 从事智能电网技术方面的研究工作。

Application of PFTTH technology in smart grid

FAN Hong¹, GAO Liang¹, ZHOU Lijun², LI Luying², ZHANG Xin²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Puhai Qiushi Electric Power High Technology Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: The implementation objective of PFTTH(Power Fiber To The Home) technology and the structure of EPON(Ethernet Passive Optical Network) are introduced. Two communication construction schemes of PFTTB(Power Fiber To The Building) are given. The first one adopts optical fiber communication for the remote channel between concentrator and master station and low-voltage power line carrier, RS-485 and short distance wireless communication for the local channels. The other one adopts the direct communication between fiber collector and master station via optic-fiber network. A communication construction scheme of PFTTH is proposed, which adopts the direct communication between optic-fiber power meter and main station via optic-fiber network. Equipments are rationally configured for these schemes, which are explained in detail with an example. The pilot project, application of PFTTH technology to Nanqiao smart community, is introduced.

Key words: smart grid; communication; passive optical network; Ethernet; PFTTH; smart community

(上接第 143 页 continued from page 143)

Current-carrying capacity calculation based on coupling fields for cable in ventilated trench and its influencing factors

YANG Yongming¹, CHENG Peng¹, CHEN Jun², YANG Fan¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Grid Maintenance Branch Company, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400015, China)

Abstract: For the flow-heat coupling analysis, a 3-D model of cable trench ventilation system is established according to the characteristics of air flow and heat transfer, based on which and with the corresponding boundary conditions and assumptions, the finite element method is applied to calculate the coupling between fluid field and thermal field and the fluid velocity distribution in cable trench and the temperature distribution on cable surface are obtained. Its accuracy is thus verified. Based on the calculated highest temperature of cable surface, the cable-area equivalent thermal circuit method and the numerical iterative method are applied to calculate the cable current-carrying capacity. The influence of different factors on cable current-carrying capacity is investigated by case simulation and results indicate that, the capacity increases along with the increase of inlet air velocity; the capacity decreases about 5.6 A per 1 K increase of inlet air temperature; and the capacity decreases along with the increase of cable trench length.

Key words: current-carrying capacity; forced ventilation; finite element method; equivalent thermal circuit method; numerical iterative method; cables