

无源光网络在海岛配电自动化中的应用研究

为了解决海岛配电网故障时快速恢复和自治的问题，对比分析了配电自动化系统常用通信方式，根据海岛电网的特点，提出了海岛配电自动化对通信的要求。介绍了EPON技术基本原理，总结了其组网优势。针对使用集中式纵联方向保护的海岛配电网馈线自动化方案，进行了EPON通信系统应用于海岛配电网馈线自动化的研究和试验，并结合浙江省南麂岛海岛微电网配电网示范工程给出了典型应用。结果表明，EPON系统可以满足海岛配电网馈线自动化的应用要求，为EPON通信系统在海岛配电自动化中的应用提供了经验和参考。

谢卫华¹ 张 用² 毋炳鑫¹/1.许继集团研发中心 2.国网山东省电力公司电力科学研究院

0 引言

目前，海洋经济在全国国民经济体系中的地位日益提高，正在成为全球经济新的重要增长点。而由于海岛供电具有输电距离远、输电成本高的特点，极大地限制了我国海洋经济发展战略的实施。众多海岛远离大陆，海缆敷设及运行维护难度较大，采用大陆联网供电方式会使经济效益降低。目前分布式发电与微电网技术日趋成熟，偏远海岛电力解决模式较为可行的方案是“以新能源开发为核心，构建风、光、柴、储互补独立型海岛微电网”，同时建有输配电设备^[1-2]。

由海岛本身的地理环境所决定，发电、变电、输电、配电和用电必然依势而建，具有海岛地理位置特征，分布于海岛各处^[3]。配电网自动化通信技术是配

电网自动化的关键技术，决定着配电网的智能化程度^[4]。根据配电网自动化对通信的可靠、实时、双向和灵活等的实际需求，光纤通信技术是配电网通信最佳承载解决方案^[5]。现阶段配电网光纤通信采用工业交换机通过光纤互联组网，随着网络规模的扩大和智能配电网的实施，该解决方案已经不适应需求，成熟、商用的以太网无源光网络（Ethernet Passive Optical Network, EPON）技术将是今后主流的配电网通信技术^[6]。

1 传统配电网通信方式介绍

整体而言配电网通信技术按照通信介质可分为有线通信和无线通信。其中，有线通信主要包括“光猫”通信、以太网交换机通信和载波通信，无线通信主要包括230 MHz数传电台通信、GPRS通信等。下面就传统的几种配电网通信方案进行归纳总结^[7-8]。

1.1 基于“RS 232/485光猫”的光通信

采用“RS 232/485光猫”组网主要是利用光电转换设备将RS 232/485信号进行长距离延伸，从而将配电自动化终端以RS 232/485总线方式连接起来，通过协议转换设备在通信子站进行汇聚。

“RS 232/485光猫”组网简单、成本低廉、配置灵活。但这种组网模式具有以下缺点：与子站之间增加协议转换设备将增加潜在故障点；通信速率低，适合小规模部署，不适合大规模组网；通信线缆和电力线缆同路径铺设，易产生感应电流，抗电磁干扰能力差。



谢卫华/工程师

关键词/Keywords

无源光网络 ·
海岛 ·
配电网 ·
微电网 ·
配电自动化 ·

国家电网公司科技项目《交直流混合微电网设备研制》（SGSDDK00KJJS1500184）。

1.2 基于工业以太网交换机的光通信

工业级以太网交换机是配电网通信中常见的组网形式。通过在配电网中各个监测点布放工业交换机，进行光纤连接组建光纤以太环网。

工业以太网交换机在电力通信网络中有着较为良好的应用基础。具备高带宽、环网保护和工业化标准设计等电力配电网通信所要求的优点。但在配电系统中面对“点到多点”组网结构、扩容经济性等要求有一定的难度，且组网成本较高。

1.3 基于电力载波的有线通信

电力线载波通信是电力系统特有的通信方式，使用电力线作为载波信号的传输介质，在配电网通信建设中是唯一不需要线路投资的有线通信方式。其优点是可用现有的配电线路传输不需另铺线路，而且便于管理。缺点是数据传输速率较低，容易受到干扰、非线性失真和信道交叉调制的影响，并且与其他通信方式兼容性不好。

1.4 基于GPRS的无线通信

采用这种方式组成数据传输网络需要租借无线运营商网络，所有数据业务经无线运营商的通道传输至电力调度机房进行汇聚。其优点就是配电网通信组网灵活，省去了建设、维护费用。但RPRS所提供的带宽较低，容易受到电力高压线路的干扰，实际运用中“双向通信能力”较差，不满足主站下发遥控、遥调的可靠性要求。

2 海岛配电自动化对通信的要求

海岛电网一般是离网型电网，相对于坚强的大电网，其系统容量小、相对脆弱且抗干扰能力差，在独立海岛电网任一点发生故障，都可能引起全网系统电压下降，如果不能及时切除故障，将可能扩大故障范围，这就要求其具有快速恢复能力和自治能力；海岛又有高温、高湿和高盐的环境，对设备的可靠性也提出了更高的要求。要实现海岛的配电自动化，通信是一个关键环节。海岛电网的特性对通信的实时性与可靠性要求更高，当微电网出现故障或发生问题时，能够迅速切除故障并且将负荷切换到可靠的电源上，及时

提供来自故障部分的核心数据，减少海岛电网在出现故障时的恢复时间。

1) 可靠性。配电终端大部分常常暴露于室外，工作环境恶劣、电磁干扰大且对于重要配电站所、配电线路要求实施通信链路冗余保护。

2) 实时性。海岛电网要求具备快速恢复能力和自治能力，这要取决于通信系统具备相对较高的速率和实时性。

3) 适应性。通信设备布放位置最终与配电变压器自动化终端趋于一致，这就要求通信线路敷设尽可能沿用原有配电线路的管道资源，避免过多的重新开掘管道。随着当地经济发展，网架结构也在不断地调整，要求通信系统能够适应配电网末端线路变化、不影响通信网络主架构。

4) 经济性。由于海岛配电网中自动化终端数量多、信息采集量大且位置相对分散，要求通信建设能够在保障业务运行正常的基础上，最大程度地节省通信线路资源的投入成本。

3 EPON无源光网络技术

基于以太网无源光网络（光的传输及分配无需电源）是一种采用一点到多点（P2MP）结构的单纤数据双向传输的光纤通信技术^[9-11]。EPON通信技术属于PON系列技术应用最广泛的一种，由IEEE 802.3提出，其将以太网技术与PON技术结合起来，物理层采用PON技术，链路层采用以太网协议，利用PON的拓扑结构实现了以太网的接入。EPON系统主要由光线路终端（Optical Line Terminal, OLT）、光网络单元（Optical Network Unit, ONU）和光分配网络（Optical Distribution Network, ODN）3部分组成^[12]，如图1所示。

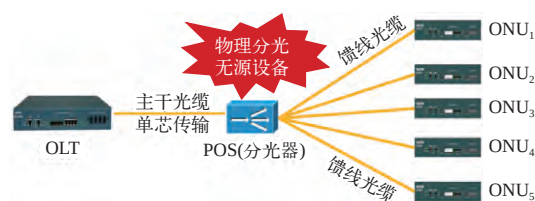


图1 EPON的典型结构

采用“单纤双向”技术，主干线路只需要一

芯光纤，通过无源分光设备，最大可以辐射出64路光信号。上行数据流采用TDMA（时分复用）技术，波长为1 490 nm，按照时隙传递，互不干扰，如图2所示；下行数据流采用广播方式发送，波长为1 310 nm，通过DBA技术进行动态带宽调整，最大限度地利用光纤资源，如图3所示。各ONU通过各自特定的数据标识接收数据，具有实现简单，易于扩展和维护，与现有的以太网兼容、管理方便等优点^[13]。

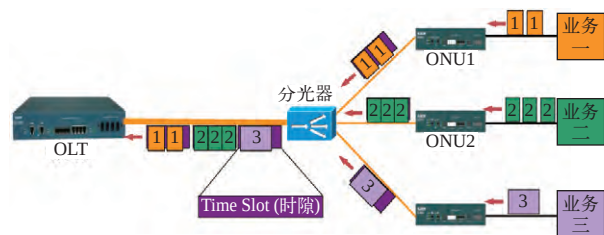


图2 EPON上行通信示意图

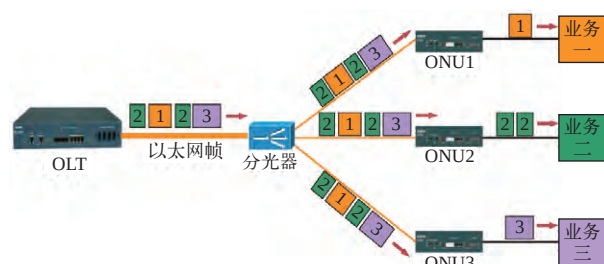


图3 EPON下行通信示意图

EPON组网优势如下。

1) 网络可靠性高。EPON系统中各个ONU是并联关系，任何一个ONU或多个ONU故障，不会影响其他ONU及整个通信系统的稳定运行。

2) 维护简单。EPON在光纤传输中不需要额外电源，免维护、环境适应能力强，工作稳定且不容易损坏。随着接入节点的增加，只需要相应增加分光器和ONU即可。

3) 网络覆盖范围大。EPON作为一种点到多点技术，可以利用局端OLT设备上单个光模块及光纤资源，接入大量电力通信终端设备，覆盖半径可达20 km。

4) 简化网络层次。EPON通过使用分光设备，简化了中继传输系统，使网络结构更加简单明晰。

5) 组网灵活。EPON可以组成星形、链形、

环形、树形和混合形等网络结构。

4 EPON在海岛微电网的应用分析

集中式纵联方向保护的馈线自动化方案故障隔离快、不需要多次重合，非常适合海岛电网脆弱的环境，但对通信系统要求较高。为了验证EPON通信平台是否适用于海岛配电自动化通信网络，针对使用集中式纵联方向保护的馈线自动化组网模式，进行EPON系统应用于海岛配电网馈线自动化的性能测试。

测试设备包括FTU（IDP-831配电网保护测控终端）一台，集中式纵联方向保护装置（IDP-801配电网集中式保护装置）一台，EPON设备一套，工业以太网交换机两台，中元华电网络报文记录及分析仪一套。

4.1 工业以太网交换机通信时延测试

首先，测试单帧GOOSE报文经工业以太网交换机后的通信时延，测试方案如图4所示。IDP-831发出GOOSE报文，同一帧GOOSE报文经一级工业以太网交换机后一分为二，一路直接接入网络报文记录及分析仪A口，另一路经第二级工业以太网交换机后接入网络报文记录及分析仪B口。报文被网络报文记录及分析仪分别从A、B两个网口捕获，并打时间标签，一帧变位GOOSE报文测试时间标签的差，如表1所示。根据表1可知，工业以太网交换机的GOOSE传输偏差值大致为6.4 μs。

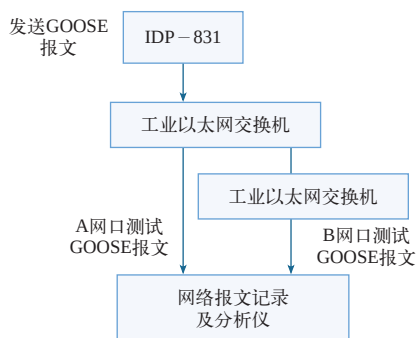


图4 工业以太网交换机通信时延测试接线

4.2 EOPN网络通信时延测试

接下来测试同一帧GOOSE报文经工业以太网

表1 工业以太网交换机的数据传输时延

序号	Stmun	Sqnum	A口捕获GOOSE 报文时刻	B口捕获GOOSE 报文时刻	时刻 差值/ μ s
1	5	0	432 139	432 145	6
2	5	1	442 301	442 308	7
3	5	2	449 239	449 246	7
4	5	3	469 644	469 650	6
5	5	4	500 916	500 922	6
平均传输时延为6.4 μ s					

交换机和EPON网络后的通信时延,测试方案如图5所示。

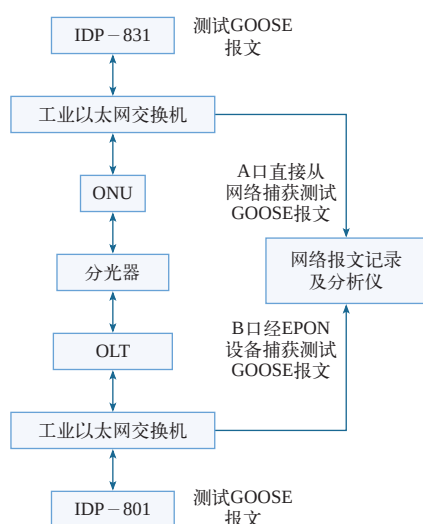


图5 EPON网络通信时延测试接线

(1) 上行传输时延

通过IDP-831发出GOOSE报文,同一帧GOOSE报文直接经工业以太网交换机后一分为二,一路直接接至网络报文记录及分析仪A口,一路GOOSE报文经过EPON网络接至网络报文记录及分析仪B口,网络报文记录及分析仪捕获报文并打时间标签。根据表2可知,EPON设备上行数据传输时延大致为1 308.2 μ s。

表2 EPON网络上行数据传输时延

序号	Stmun	Sqnum	A口捕获GOOSE 报文时刻	B口捕获GOOSE 报文时刻	时刻 差值/ μ s
1	8	10	273 257	274 474	1 217
2	8	11	274 451	275 505	1 054
3	8	12	276 280	277 537	1 257
4	8	13	277 166	278 659	1 493

5	8	14	278 080	279 600	1 520
平均传输时间: 1 308.2 μ s					

(2) 下行传输时延

通过IDP-801发出GOOSE报文,同一帧GOOSE报文直接经工业以太网交换机后一分为二,一路直接接至网络报文记录及分析仪B口,一路GOOSE报文经过EPON网络接至网络报文记录及分析仪A口,网络报文记录及分析仪捕获报文并打时间标签。根据表3可知,EPON设备下行数据传输时延大致为41.6 μ s。

表3 EPON网络下行数据传输时延

序号	Stmun	Sqnum	A口捕获GOOSE 报文时刻	B口捕获GOOSE 报文时刻	时刻 差值/ μ s
1	91	391	955 493	955 451	42
2	91	392	955 538	955 496	42
3	91	393	955 583	955 541	42
4	91	394	955 628	955 587	41
5	91	395	955 673	955 632	41
平均传输时间为41.6 μ s					

5 工程应用

图6为国家863项目南麂岛微电网配电网示范工程的配电网接线图,为架空线路辐射网,共有10 kV线路2条,长度分别为8.561 km、8.381 km,电源装机容量:柴油机发电为1.6 MW、风力发电为1 MW、光伏发电为660 kW;储能系统包括:6套500 kW储能变流器PCS,4套500 kW $\times$ 2 h锂电池,2套500 kW $\times$ 15 s超级电容。由FTU与一套集中式纵联方向保护通过EPON通信实现馈线自动化的保护。

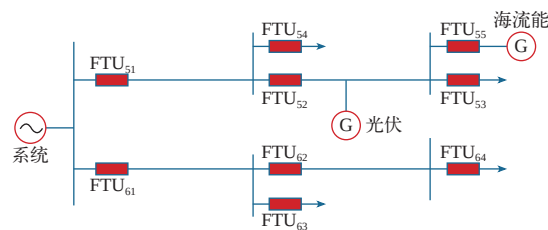


图6 南麂岛示范工程中配电网接线图

在配电网分段、分界处配置FTU(内置ONU),FTU分散就地采集分段和分界开关处电流、电压

信息,通过GOOSE传输机制发送过电流和方向信息。集中式纵联方向保护连接OLT,根据FTU上送信息按配电网网络拓扑结构定位故障位置并发令隔离。图7为利用EPON通信的集中式纵联方向保护实现馈线自动化。

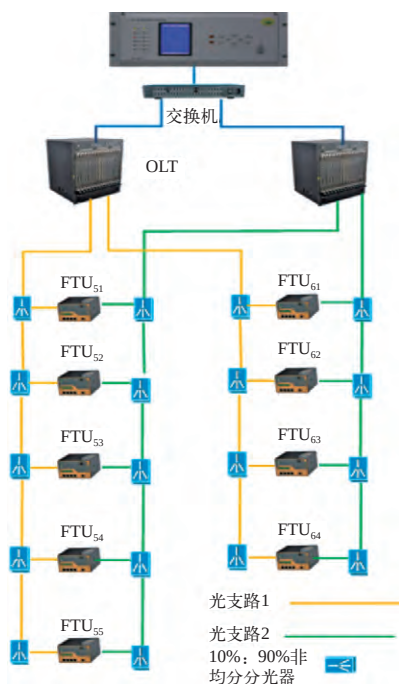


图7 南麂岛馈线自动化网络接线

在南麂岛工程应用中,电压采用V/V接线方式,电流采用A、C两相接线方式,集中式保护装置为了增加配电保护的可靠性在保护判别时增加35 ms功率倒方向延时及GOOSE消抖延时,实际测试中集中式纵联方向保护整组动作时间约为70 ms,满足海岛电网迅速切除故障要求。试验动作波形如图8所示。

6 结束语

海岛电网系统容量小、抗干扰能力差,又具有高温、高湿和高盐的环境,对通信的实时性与可靠性提出了很高的要求。在系统分析常用配电自动化通信技术的基础上,根据海岛微电网的特殊问题,提出了海岛配电自动化对通信的要求;针对使用集中式纵联方向保护的海岛配电网馈线自动化方案,进行了EPON通信系统应用的研究和试验;结合南麂岛微电网配电网示范工程,介

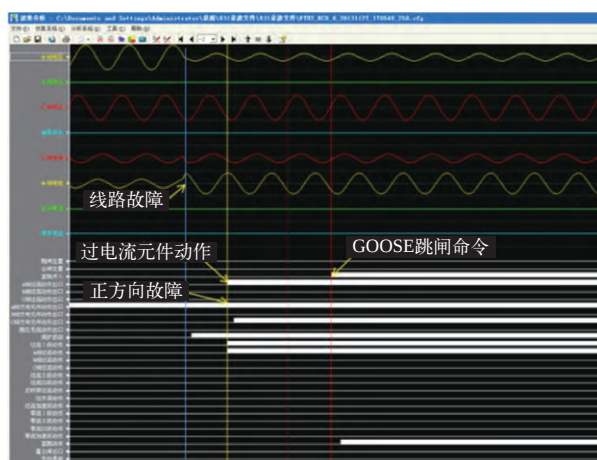


图8 试验动作波形

绍了EPON通信在实际工程中的应用方案。结果表明,EPON技术作为一种点到多点结构的无源光纤接入技术,具有实现简单、易于扩展和维护、高带宽、长距离传输和环境适应性强等特性,能够较好地满足海岛配电自动化对通信的要求。

参考文献

- [1] 李富生,李瑞生,周逢权,等.微电网技术及工程应用[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [2] 李瑞生.一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):70-75.
- [3] 田盈,孟赛,邹欣洁,等.兆瓦(MW)级海岛微电网通信网络架构研究及工程应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(19):112-117.
- [4] 周逢权,毛建容,马红伟,等.含高渗透分布式电源的独立海岛供电系统稳定控制探讨[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):84-90.
- [5] 李瑞生.微电网关键技术实践及实验[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):73-78.
- [6] 张新昌.微电网运行控制解决方案及应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(10):141-146.
- [7] 刘健,沈兵兵,赵江河,等.现代配电自动化系统[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [8] 张淦.配电网自动化通信系统研究及应用[D].郑州:郑州大学,2011.

(下转第95页)

以及虚回路输入、输出数据的对应关系,可实现二次设备虚回路的自动校核和二次系统网络的故障定位,从而提高虚回路调试、校验和故障排查效率。

4 技术应用效果

工厂化、一体化及自动化调试技术在新一代智能变电站示范工程调试中进行了工程应用,并在后续智能变电站的调试中得到推广。

根据2013年新一代智能变电站首批示范工程和2015年新一代智能变电站扩大示范工程的实际应用情况分析,通过充分的联调提资、工作任务分解及多单位一体化调试,能够将40%以上的现场二次设备调试任务量转移至厂内;通过使用自动化调试技术,厂内联调的效率提高了约50%。经统计,对于集成商而言,一个中等规模的智能变电站现场服务需要约100人/天,而采用工厂化、一体化和自动化调试技术后,厂内调试人员投入没有增加,现场服务只需约50人/天,明显提高了整个变电站的建设质量和效率,降低了现场服务成本。

5 结束语

工厂化、一体化及自动化调试技术解决了智能变电站调试工作量大、效率低、周期长和质量差等问题,提高了建设效率,符合新一代智能变电站的建设理念,不仅适用于新一代智能变

站,而且适用于其他智能变电站。随着国内智能变电站建设工作的不断推进,变电站调试工作任务日益繁重,该技术将得到广泛的推广和应用。

参考文献

- [1] Q/GDW 396—2009 IEC 61850工程继电保护应用模型[S]. 2009.
- [2] 宋旋坤,李敬如,肖智宏,等.新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 1-6.
- [3] 刘强兴,田家运.新一代智能变电站二次设备与系统优化集成探讨[J]. 电力系统装备, 2015, 1(6): 53-55.
- [4] 辛培哲,闫培丽,肖智宏,等.新一代智能变电站通信网络技术应用研究[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 17-23.
- [5] IEC 61850 Communication Networks and Systems in substations[S]. 2004.
- [6] 郑文彬,王瑞彪.智能变电站虚端子导入导出方法研究[J]. 华电技术, 2015(2): 16-20.
- [7] 赵子涵.智能变电站二次系统调试技术探讨[J]. 四川电力技术, 2013, 36(1): 70-80.
- [8] 王进虎,杨威,王娜,等.新一代智能变电站站域保护调试技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(7): 17-20.

(收稿日期:2016-07-14) EA

(上接第90页)

- [9] 高洪雨,陈青,徐丙垠,等.一种馈线自动化仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 131-136.
- [10] 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(3): 26-30.
- [11] 殷志锋,周雅,张元敏.基于EPON的电力自动化信息传送平台[J]. 电力系统保护与控制, 2014,

42(2): 111-115.

- [12] 孙中伟,马亚宁,王一蓉,等.基于EPON的配电网自动化通信系统及其安全机制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 72-75.
- [13] 梁芝贤,王剑,唐万理.智能配电网EPON 技术应用研究及网络设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(2): 85-90.

(收稿日期:2016-09-13) EA