

配电自动化 EPON、交换机混合组网方案及相关技术研究

沈超, 过峰

(无锡供电公司, 江苏无锡 214000)

摘要: 总结 EPON 和交换机多种组网方案, 针对配电网以及电力通信网的特殊性, 分析混合组网的优势, 建立 EPON、交换机混合组网的网络结构。介绍 EPON、交换机的网络保护技术, 结合混合组网方案, 选择 EPON、交换机各自合适的保护技术, 并针对混合组网中 EPON 通道切换时延较大的问题提出相应的解决方案。

关键词: EPON; 交换机; 配网自动化

0 引言

我国推动生态文明建设、能源结构转型, 国家电网公司深化“两个转变”战略, 对电网科学发展提出更高要求。转变电网发展方式, 关键是解决特高压和配网“两头薄弱”问题。因此, 必须将“一流配电网”建设放在突出重要位置。配电网主网架, 下联千家万户, 供电可靠性直接为客户感知, 与安全生产和优质服务息息相关^[1]。

配电自动化的实现是建立在配电系统信息化基础上的, 配电网自动化系统需要借助于有效的通信手段, 将控制中心的控制命令准确地传送到为数众多的远方终端, 并且将反映远方设备运行状况的数据信息收集到控制中心。通信系统设计的合理性直接影响配电自动化系统的成败。因此, 配电自动化通信系统是配网自动化系统中非常重要的环节, 是配电网自动化的神经系统。

随着通信技术的发展, 目前可选用的通信手段很多, 有光纤专网、电力线载波、无线专网、无线公网等多种通信方式。在实际应用中, 由于需要考虑现场情况、应用需求、经济成本等因素, 因此没有哪一种通信方式可以完全解决配电自动化系统中的通信全覆盖等问题。需要根据配电通信网实施的具体情况, 采用不同的通信方式, 通过利用不同通信方式的优势, 实现配电自动化系统通信^[2]。光纤专网、无线专网以及电力线载波这几种通信方式的混合组网其必要性已经得到充分的论证^[3], 而且在实际中也获得较为广泛的应用, 本文仅讨论光纤专网中的 EPON 技术和交换机技术混合组网的优势及必要性, 并针对其中的关键技术进行探讨。

1 EPON、交换机接入网方案

1.1 EPON 组网方案

EPON (以太无源光网络) 是一种新型的光纤接入网技术, 它采用点到多点结构、无源光纤传输, 在以太网之上提供多种业务。它在物理层采用了 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。目前 EPON 在实际工程中的典型组网方式有以下几种: 树形结构、树形冗余保护网、全链路保护手拉手环网^[4]。

树形结构是 EPON 接入网中最常见的结构, 采用 2: N 分光器, 实现终端多个 ONU 的接入。OLT 上双 PON 口实现骨干光纤“1+1”冗余保护功能, 其结构如图 1 所示。

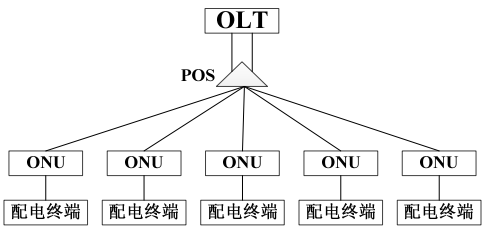


图 1 EPON 树形结构

树形冗余保护网是从 EPON 的点到多点树形结构衍生而来, 采用 1: N 的分光器和具有双 PON 的 ONU 形成具有冗余保护功能的树形网络。如图 2 所示, 配电子站 OLT 的 2 个 PON 口分别连接两个 1: N 分光器, 每个 ONU 的一个 PON 口连接至分光器 1, 另一个 PON 口连接至分光器 2, 从而实现通信网络的冗余保护功能。

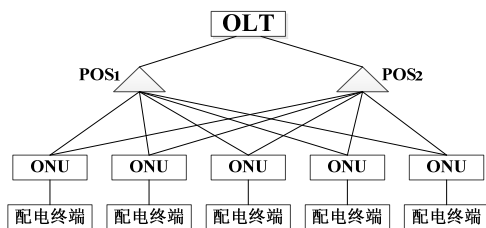


图2 树形冗余保护网

全链路保护手拉手环网组网结构如图3所示。

OLT1和OLT2分别设立在两个配网子站,每个OLT下采用90:10分光器级联,10%的光用于连接ONU终端,90%的光用于级联下级分光器。ONU仍然通过双PON分别连接不同方向的分光器实现环网冗余保护功能。

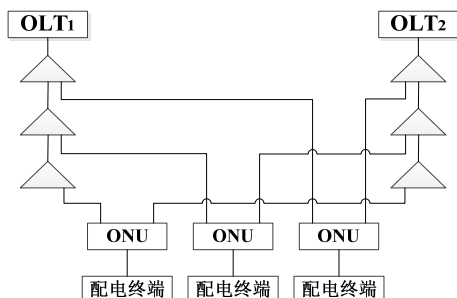


图3 全链路保护手拉手环网

对比以上三种典型组网方案,方案1虽然经济,但是仅具有骨干光纤冗余保护,无法实现终端ONU上行光纤的保护,不符合电力通信网的要求。方案2和方案3都具有全网络保护功能,根据研究分析,方案2树形冗余保护网的系统可用度和性价比略高于方案3全链路保护手拉手环网。但是结合配电通信网的特点,配电通信接入网铺设光纤一般是沿配电线路架设在电力导线下方,光缆的布放沿着配电电缆的走向施工。根据配电网规划,电缆在网络拓扑上主要呈现链状结构,依照光缆施工原则,光缆的布放也呈链状,更适合全链路保护手拉手环网组网方式,而树形冗余保护更适用于点到多点、配电终端呈星形分布的网络结构。因此,配电通信网采用EPON组网时,可以综合考虑系统可用性以及配电网采集终端结构来选择组网方式。

1.2 以太网交换机组网方案

以太网交换机技术通过MAC地址识别,能够完成数据帧封装、转发功能。配电网采用以太网交换机组网时多采用环状拓扑结构。环上节点的工业以太网交换机布放在开关站、开闭所等位置,并通过以太网接口和配电终端连接;上联节点的交换机一般配置在变电站内,负责收集环上所有通信终端的业务数据,并接入骨干层通信网络

以太网交换机典型组网结构如图4所示,图中配电终端接入设备采用工业级设备,满足较恶劣的现场运行环境,工业以太网交换机配置在环网柜、柱上开关上,实现相关设备信息上传至变电站;汇聚交换机配置在变电站内,在环境温度湿度条件允许的条件写可以采用三层商用设备,实现变电站信息汇集上传至主站。

在许多配电通信网建设的参考文献中,在介绍工业以太网交换机组网时提到如图5所示相交环、相切环的组网方式。但是在实际工程中,这种组网方式较少,因为采用相交环或者相切环时,环中所有交换机都在同一个广播域中,如果产生广播风暴,将会导致所有配电终端都受到影响,而且广播风暴产生后很难排查故障原因,抑制措施也较少,所以在组网时必须严格控制广播域的范围。虽然交换机有很多防止广播风暴的机制,但是端口单向故障、受到ARP攻击导致报文阻塞等都是不可测因素,因此并不建议在实际应用中采用相切环或相交环的方式进行以太网交换机组网,也可以采用在相切环的切点或相交环的交点放置三层交换机的方式来隔离广播,起到分割广播域的作用。

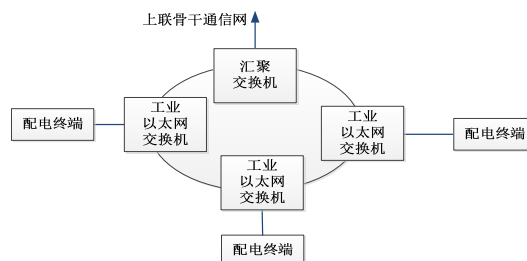


图4 以太网交换机环形组网结构

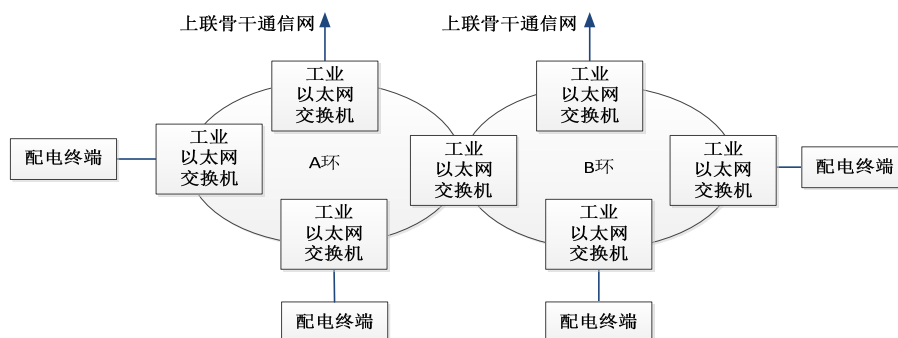


图 5 工业以太网交换机组网-相切环设计

1.3 混合组网方案

目前，以太网交换机和 EPON 都具有统一的标准、成熟的技术和完整的产业链，可以通过网络冗余保护实现较高的可靠性，也可以通过数据加密机制实现通信的安全性，被认为是解决配电网自动化 10kV 及以下至用户通信系统的光纤技术，但它们各有优缺点和适用范围，应根据实际情况选择合适的技术。

在组网经济性方面，EPON 系统除了 OLT 价格偏高外，所用 ONU 和分光器价格均比较低，在终端设备较多的情况下，系统造价低于交换机组网。EPON 采用 WDM 方式在 1490nm 和 1310nm 波长上传输，为单纤双向系统，占用纤芯数较少，能有效利用光缆资源。在采用全链路保护手拉手环网时，能够抗多点失效，即在多个 ONU 出现故障的情况下不影响其他终端通信。但是由于分光器插入损耗较大（1:64 分光器插入损耗达到 19~20dB），采用全链路保护手拉手组网时，分光器的多级串联会使损耗快速增加，为保证 ONU 的收光功率，需要严格计算网络中分光器串联个数以及传输距离，一般来说，EPON 系统光纤传输最大距离在 20km 左右，远小于以太网交换机。由于在全链路保护手拉手环网中采用 1:2 分光器，当系统中需要新增站点时，

无法直接接入原有的 EPON 网络，必须开断原有光缆，新增或更换原有分光器，而新增的分光器可能会导致光纤损耗增大超过门限值，影响整个串联网络。因此 EPON 组网采用全链路保护手拉手方式时，要求尽量做到整个区域站点、光缆的统一规划。

配电网中大部分配电终端工作环境比较恶劣，要求交换机具有宽温、防水防尘等功能，而大部分厂家的工业以太网交换机价格较高，从而导致交换机组网成本上升。但是交换机采用全双工通信，实时性较高，且快速环网冗余协议支持设备在 50ms 内进行通道倒换，而 EPON 通道倒换时间为秒级。采用交换机组网时，每台交换机都可以看做是光中继器，能够对信号进行整形再生，因此光纤传输距离较长，最长可达 100km。在交换机网络中新增配电站点时，无需对原有网络结构进行修改，可以通过光纤直接接入原有站点，降低了初期配电通信网规划的难度。

因此针对不同的区域的特点或同一区域不同配电终端的特点，可以考虑采用 EPON 和交换机混合组网的方式：对能够统一规划、且满足 EPON 系统衰耗的站点采用 EPON 组网方式；对初期规划不明确、实时性要求高的站点采用以太网交换机进行组网，混合组网的典型方案如图 6 所示。

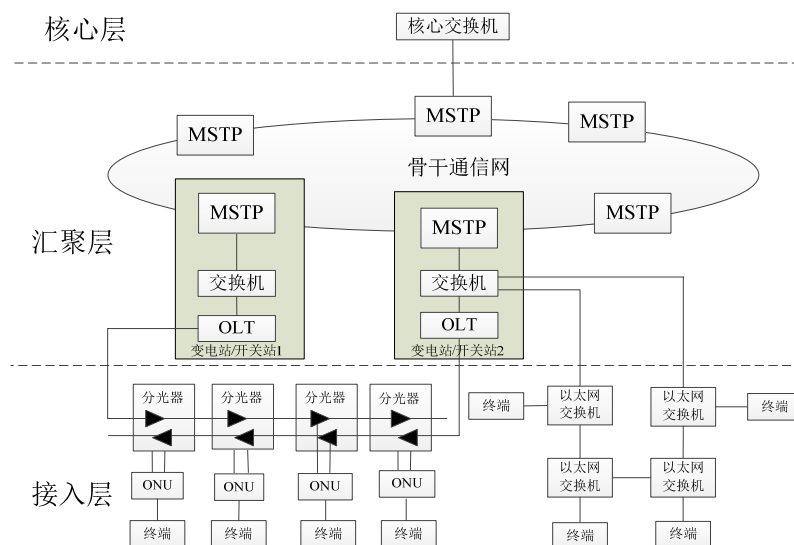


图 6 工业以太网交换机、EPON 混合组网方案

2 EPON、交换机混合组网环网冗余保护技术

2.1 交换机环网冗余协议

工业以太网交换机支持冗余环路保护，即通过一定的算法实现路径冗余，同时将环路网络修剪成无环路的树型网络，从而避免报文在环路网络中的增生和无限循环，避免广播风暴；同时若发生单点链路故障或设备失效，数据自动从反方向传输，实现自愈。IEEE 关于环网冗余协议的标准有 STP、RSTP、MSTP 三种，其中 STP 为早期协议，收敛速度较慢；RSTP 是在 STP 基础上发展出来的快速生成树协议，从理论上来说收敛速度较快，但是在网络中设备较多，网络规模较大的情况下，收敛速度依然不理想；MSTP 为针对多 vlan 的生成树协议。各厂家的工业以太网交换机都支持生成树(STP)和快速生成树(RSTP)协议，可以组建冗余环网拓扑，防止网络中存在回路。

802.1D 协议中 RSTP 收敛速度虽然较快，可以用作配电通信网环网保护协议，但原则上采用 RSTP 协议环网中交换机数量不宜太多，否则影响 RSTP 收敛速度，华为交换机推荐网络直径最大为 7。交换网络的直径值来源于网络中两个距离最远的终端之间间隔的交换机数目。当网络的直径值越大，用于稳定网络的拓扑的时间就越长，RSTP 的性能也越差。针对开放协议 RSTP 的缺点，许多工业交

换机厂家结合工业级环网保护收敛时间要求，研发出私有环网冗余协议使保护倒换时间大大缩小，例如 DRP、SW-Ring、Turbo Ring 等，都能在环网站点数达到 100 个的情况下，环网冗余协议收敛时间小于 100ms。不过私有协议的要求环网区域内所有设备必须为同一品牌，否则私有协议失效，这对设备采购提出了较大的要求。

2.2 EPON 工作方式

采用全链路保护手拉手环网组网方式时，正常工作情况下 ONU 同时在两个 OLT 上注册，避免了光纤倒换后 OLT 重新测距和 ONU 重新注册的过程，减少了保护倒换时间。在全链路保护手拉手组网方式下，ONU 常用的工作方式有两种：双发选收和双归属。

双发选收即 ONU 两个 PON 口均处于工作状态，分别向两台 OLT 上传数据，一个方向通道断开后，主站可以从另一个方向 OLT 上接受数据。双发选收方式通道倒换速度最快，理论上可以实现无丢包切换，但是这种方式这种要求配电采集终端有两个以太网口，并配置两个不同的 IP 地址，分别从 ONU 的两个 PON 口向 OLT 传送数据。主站前置机同时接受两个 IP 地址的报文，并选择其中一个进行数据分析，当有通道断开时，主站无法接收该通道承载业务 IP，转而从另一个 IP 地址接收数据进行

分析，如图 7 所示。

大部分采集终端仅具有一个以太网口，只能配置一个 IP 地址，这时候无法采用双发选收的工作模式，只能配置双归属模式，双归属模式在实际应用中更加广泛。在双归属工作模式下，ONU 的两个 PON 口有主用、备用之分，正常工作时仅有一个主用 PON 口传输业务，另一个备用 PON 口虽然在 OLT 上注册，但是不传输业务，当主用 PON 口和 OLT 之间链路断开时，业务迅速切换至备用 PON 口，通过备用 PON 口传输业务，业务倒换过程如图 8 所示。

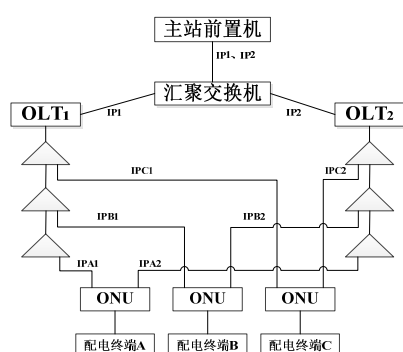


图 7 EPON 双发选收工作模式示意图

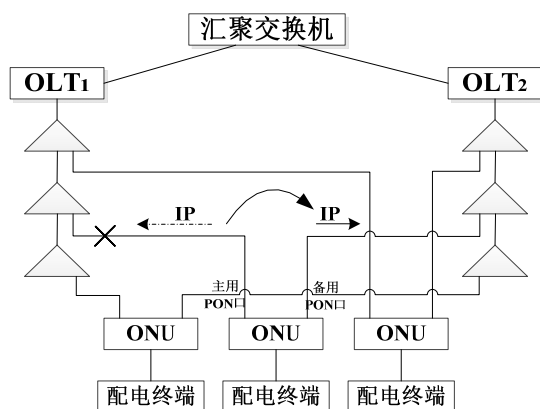


图 8 EPON 双归属工作模式示意图

2.3 优化保护通道切换时延

当 ONU 工作在双归属模式下，进行主备用通道切换时发现业务中断时间较长，切换时延会达到 10min，甚至更长，这个是由 OLT 和以太网交换机的工作特性共同决定的。

OLT 上的端口分为上行网络接口 (NNI) 和下行业务接口 (UNI)，NNI 接口学习 MAC 地址的优先级高于 UNI 接口，即如果一个 MAC 在 NNI 上被学习到，

那即使下一刻这个 MAC 地址又在 UNI 接口被学习到，OLT 的 MAC 表也不会进行更新，直到这个地址因为到达 MAC 地址表老化时间而消失，该 MAC 地址才能在 UNI 接口被学习到。从图 8 可以看到，ONU 的两个 PON 口分别连接至不同的 OLT，然后由 OLT 连接至汇聚交换机的两个不同端口。正常工作时，终端的 MAC 地址在 OLT₁ 的 UNI 接口被学习到，但是由于 EPON 网络是纯二层网络，MAC 地址学习具有穿透效应，OLT₂ 的 NNI 接口也能学习到终端的 MAC 地址，而当主用通道断开后，终端 MAC 地址应该转移至 OLT₂ 的 UNI 接口，但是受制于端口优先级，OLT 的 MAC 地址表无法更新，必须在达到 MAC 地址表老化时间后才能进行重新学习。

从前面的介绍可知，以太网交换机是根据 MAC 进行数据转发的，当主用通道正常时，配电终端的 MAC 地址被交换机学习到，并建立相应的 MAC 地址表和 ARP 表，数据能够正确转发；当主用通道断开，业务切换至备用通道时，配电终端的 MAC 地址从交换机的另一个端口学习到，交换机 MAC 地址表立即被刷新，但是 ARP 表仍然是原先的 ARP 表项，这就出现了同一个终端在交换机中 MAC 地址表对应出接口和 ARP 表对应出接口不一致的情况，可能造成数据无法正常转发，必须等待 ARP 表老化时间到达，或者手动清除 ARP 表才会恢复正常。

针对第一个问题，可以采取以下三种方法解决：1、修改 UNI、NNI 接口 MAC 地址学习优先级，使 UNI 和 NNI 接口具有相同的优先级，从而使 MAC 地址能够被顺利更新；2、在 OLT₁ 和 OLT₂ 的 UNI 接口上静态绑定 MAC 地址，是 NNI 接口不会学习到终端的 MAC 地址；3、在上层交换机上做端口隔离，即交换机连接 OLT 的两个端口属于同一个 Vlan，但是无法互通，这样 OLT 的 NNI 接口也无法学到终端的 MAC 地址。

针对第二个问题，有两种方法可以选择：1、设置交换机 ARP 表老化时间，但是如图 6 所示，汇聚交换机下还有以太网交换机网络，如果 ARP 表的老化时间被大量缩短 (默认为 5min)，汇聚交换机将会在短时间内广播出大量的 ARP 查询报文，最终可能引起报文堵塞甚至广播风暴；2、较为合理的方法是在汇聚交换机上配置 MAC 地址和 ARP 表的联动功能，即 MAC 地址的出接口更新后，无需等待 ARP 表老化时间，自动刷新 ARP 对应表项。

3 实际组网应用

3.1 实际 EPON、交换机混合组网方案

2013 年无锡市开展配网自动化建设，根据设计院通信规划，其东亭片区采用 EPON+以太网交换机混合组网模式，在片区内 6 个变电站设置汇聚交换

机，用于汇聚路由，上传业务，片区内 FTU 终端采用 EPON 通信方式，开闭所和环网柜采用以太网交换机通信方式。实际组网如图 9 所示，图中仅列出杨亭变和大坝变两个汇聚站点及站点下所连接配电终端。

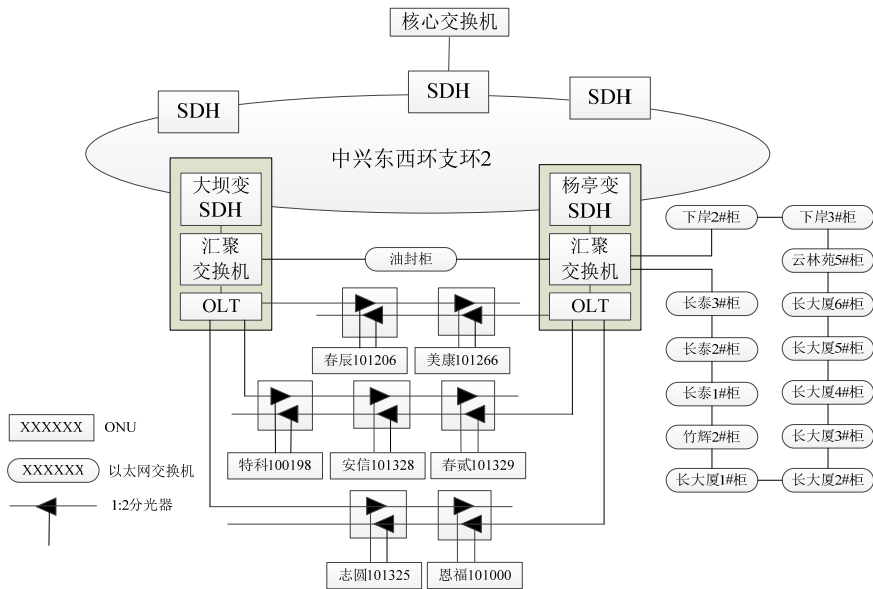


图 9 无锡市东亭片区 EPON、交换机混合组网示意图

3.2 保护通道切换时间测试

从图中可以看出，EPON 系统全链路手拉手环网保护方式，其中 ONU 终端工作在双归属模式；以太网交换机采用环形拓扑，运行 DRP 环网冗余协议。由于实时性要求较高，对网络的保护通道切换时间进行测试。

环网冗余协议采用随机断开互联光纤的方法进行测试，测试结果如表 1 所示，由于缺乏专业软件进行时延测试，测试仅依据切换过程中主站丢包数衡量切换时延。结果中可以看出运行 DRP 环网冗余协议的交换机环网收敛速度较快，整个通道切换过程仅丢失 1 包(时延<1s)，能够保证通信的高可靠性。

表 1 以太网交换机环网冗余协议测试结果

| 开断光纤两端站点名称 | 通道倒换过程主站 ping 包丢失数 |
|----------------|--------------------|
| 下岸 2#柜——下岸 3#柜 | 1 |
| 长泰 3#柜——长泰 2#柜 | 1 |

| | |
|------------------|---|
| 长大厦 4#柜——长大厦 3#柜 | 1 |
|------------------|---|

全链路手拉手环网保护协议采用在主用 OLT 下线 ONU 终端的方法进行测试，即强制性使 ONU 通过备用 OLT 上传业务，测试结果如表 2 所示。从表中可以看出，经过 2.3 节优化措施后，EPON 系统保护切换时延大大减低，但仍然大于以太网交换机，切换过程平均丢包数量为 8~9 个(时延<10s)。

表 2 EPON 全链路手拉手环网保护测试结果

| 进行主备用通道倒换 ONU 名称 | 通道倒换过程主站 ping 包丢失数 |
|------------------|--------------------|
| 春辰 101206 | 8 |
| 特科 100198 | 8 |
| 志圆 101325 | 9 |

4 结论

EPON 和工业以太网以高带宽、高可靠性等优点适用于配电网通信中，为配电网自动化提供可靠的故障信息、控制信息的传输，从而达到减少停电时间、提高供电可靠性的目的，带来可观的社会效

益和经济效益。本文所做的工作只是提出了一个配电通信网 EPON 和交换机混合组网的方案,并进行了初步的应用研究,但是要将 EPON 和工业以太网技术进一步融合应用到配电网自动化工程中,还必须继续深入研究和解决信息传送的安全性及通信规约、系统的兼容性问题。

参考文献:

- [1] 蔡万升,汤辉. 基于 EPON 技术的配电自动化通信系统[J]. 电力系统通信, 2010, 31(12): 11-15.
- [2] 唐琳.配电自动化通信系统的设计与实现[J].电力系统通信,2003,(12):45-47,54.
- [3] 孙晓霞. xPON 和工业以太网技术在配电网中的应用研究[D]. 华北电力大学.2010
- [4] 鲍兴川. 配电通信网接入层 EPON 保护组网可靠性与性价比分析[J]. 电力系统自动化. 2013,37(8).

- [5] 罗鹏程,金光,周经伦,等.通信网可靠性研究综述[J].小型微型.计算机系统,2000,21(10):1073-1077.
- [6] 格伦.克雷默.基于以太网的无源光网络[M].北京:北京邮电大学出版社,2007.
- [7] 中华人民共和国信息产业部.YD-T1771-2008.接入网技术要求-EPON 系统互通性[S].北京,2008-03-13.
- [8] 中华人民共和国信息产业部.YD-T1809-2008.接入网设备测试方法-以太网无源光网络(EPON)系统互通性

作者简介:

沈 超(1987-)男,江苏无锡人,助理工程师,电力系统信息通信。

过 烽(1981-)男,江苏无锡人,工程师,电力系统信息通信

作者联系方式:(沈超, 18961792908, rolevererzm@gmail.com, 江苏省无锡市五爱路 202 号, 214000)