

EPON 手拉手保护在配电通信网的应用及优化

沈超, 徐俊, 刘佳诞
(无锡供电公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:基于以太网原理对以太网无源光网络(EPON)的手拉手保护倒换特性进行详细的分析,以电力系统中实际 EPON 组网方案为模型,通过企业网络仿真平台(eNSP)模拟手拉手保护倒换过程中交换机、光线路终端(OLT)以及光网络单元(ONU)的网络行为。针对现网中 EPON 手拉手组网业务倒换速度过慢的情况给出合理的解释,在不改变 EPON 协议栈的情况下,采用端口隔离和免费地址解析协议(ARP)2 种辅助功能对 EPON 手拉手保护倒换进行优化,实现业务倒换速度在毫秒级别,并采用实际系统进行验证。

关键词:EPON;手拉手保护;端口隔离;免费 ARP

中图分类号:TP391

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)03-0041-05

目前, 配电通信网主要采用以太网无源光网络(EPON)技术进行组网,EPON 技术结合了以太网技术和无源光网络(PON)技术,在多个城市配电自动化建设中得到了广泛应用^[1-3]。为满足电力配电网对系统可靠性的特殊要求,EPON 厂家提出了手拉手组网保护机制,采用主备冗余的思想确保通信系统在故障状态下的可靠运行^[4,5]。随着 EPON 技术的深入应用,部分城市在组建配电通信网 EPON 网络中发现,当 EPON 主用线路发生故障或主用 OLT 发生故障后,手拉手保护并不能及时将业务倒换至备用线路,业务倒换时间为数分钟至数十分钟,严重影响了系统的实时性和可靠性。文中以 EPON 中的以太网技术为基础,采用仿真软件企业 eNSP 对手拉手保护过程中光线路终端(OLT)、光网络单元(ONU)的网络行为进行模拟,分析了业务倒换时间过慢原因,并采用端口隔离、免费地址解析协议(ARP)的方法对手拉手保护机制进行优化。

1 EPON 组网分析

配网自动化组网中支持多种 PON 组网保护方案,包括 Type B 保护、EPON Type D 保护(GPON Type C 保护)和独立上行保护,其中 GPON Type C 保护和 EPON Type D 保护原理相同。

电力系统中通常所说的手拉手保护是在 EPON Type D 保护基础上发展而来^[6]。EPON Type D 保护分为单归属和双归属,配电通信网中通常采用的是双归属模式,即上行冗余 PON 口分别在 2 台 OLT 上,如图 1 所示。在双归属的组网场景中,ONU 具有双 PON 口,ONU 与 OLT 之间的 2 条 PON 线路处于主备状态,正常工作状态下,ONU 仅能通过主用线路 PON 口转发报文,备用 PON 口在备用 OLT 上注册信息,但不能用于转发报文。当主用线路中的某器件发生故障导

致主用线路中断时,ONU 可快速切换到备用 OLT。

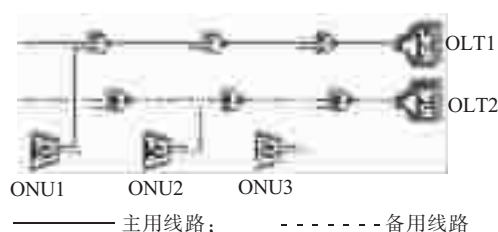


图 1 Type D 保护双归属模式

在配电网实际组网应用中,EPON 手拉手组网比图 1 所示网络复杂,整个网络可以分为核心层、汇聚成、接入层 3 个层面,如图 2 所示。核心层包括设置在主站的核心交换机,用于快速转发数据;汇聚层包括位于变电站内的 OLT、汇聚交换机以及传输设备 SDH/MSTP,OLT 将数据传送至汇聚交换机,进行数据汇聚、安全控制、流量控制等处理后通过骨干通信网传输至核心交换机;接入层包括放置在环网柜/开闭所/柱上开关的 ONU、分光器和配电终端设备,ONU 通过主备用 2 条光纤线路分别连接至不同变电站的 OLT。

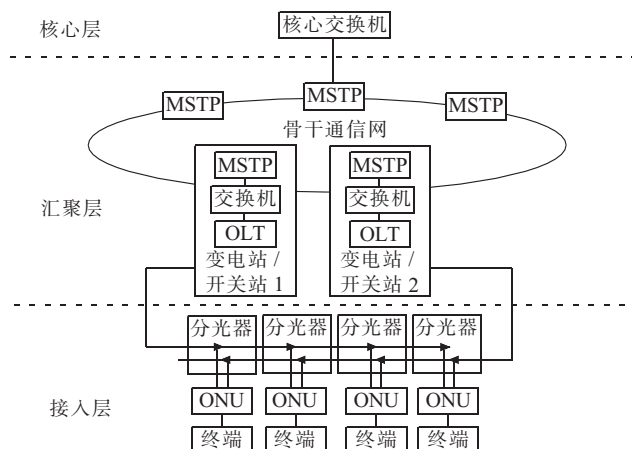


图 2 配电通信网 EPON 组网方案

2 手拉手保护倒换网络特性分析

在大部分企业测试环境中,通常采用图 1 的网络

拓扑对手拉手保护功能进行测试^[7,8],测试结果表明在主用线路发生故障的情况下,业务能够很快地倒换至备用线路,整个倒换大约在 50 ms。但是在实际生产环境中,主用线路发生故障后,往往需要数分钟甚至更多时间,业务才能够倒换成功。

对比测试环境拓扑和实际组网环境拓扑,发现测试环境和实际组网的差别在于实际环境比测试环境多了汇聚层和核心层交换机,为研究交换机对 EPON 手拉手保护特性的影响,采用仿真软件 eNSP 模拟手拉手倒换过程中 OLT、ONU、交换机的网络行为。不考虑 PON 的物理特性,OLT、ONU 的网络交换特性可以等效成以太网 2 层交换机,因此在仿真中采用 2 层交换机模拟 OLT 和 ONU,仿真拓扑如图 3 所示。

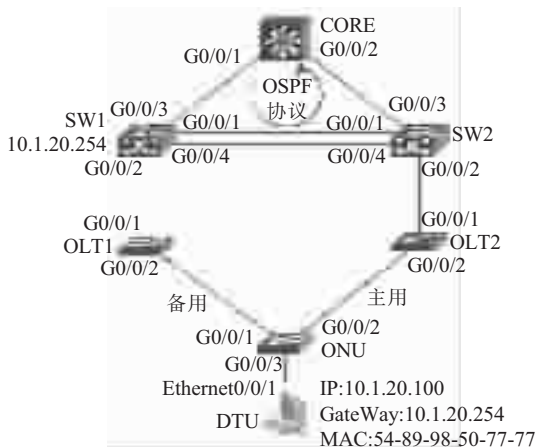


图 3 实际组网仿真拓扑

图中 CORE 模拟主站核心交换机,SW1 和 SW2 模拟变电站汇聚交换机,SW1 的 g0/0/1 与 SW2 的 g0/0/1 之间采用 3 层通道互联,CORE 与 SW1、SW2 之间运行 OSPF 协议;OLT 和 ONU 均由 2 层交换机模拟,SW1、SW2、OLT1、OLT2 以及 ONU 之间均用二层链路连接,其中 SW1 的 g0/0/4 与 SW2 的 g0/0/4 之间采用 2 层通道互联;配电终端设备(DTU)用 PC 进行模拟,IP 地址为 10.1.20.100,在 SW1 设置 DTU 网关 10.1.20.254。仿真过程中通过控制 ONU 上联端口 g0/0/1 和 g0/0/2 的开关状态模拟主用 PON 链路故障后的倒换动作。在 DTU 上使用命令“ping 1.1.1.1 -t”来模拟实时遥测信息,1.1.1.1 为 CORE 环回口地址。

2.1 稳态运行

稳态运行情况下,ONU 的 g0/0/1 端口被关闭,主用 PON 链路为 ONU—OLT2。通过命令在所有设备上查看实际物理地址(MAC)表,列出与 DTU 的 MAC 相符合的表项,结果如表 1 所示。

在 SW1 上查看 DTU 对应 IP 地址 10.1.20.100 的 ARP 表项,发现其对应 MAC 地址为 5489.9850.7777,对应出接口为 g0/0/4。

通过抓包分析可知 DTU 向 CORE 上传数据路

表 1 正常工作时 MAC 地址

设备	MAC 地址	学习 MAC 地址端口
OLT1	5489.9850.7777	G0/0/1
OLT2	5489.9850.7777	G0/0/2
SW1	5489.9850.7777	G0/0/4
SW2	5489.9850.7777	G0/0/2

径:DTU—ONU—OLT2—SW2—SW1—CORE,CORE 向 DTU 下发数据路径:CORE—SW1—SW2—OLT2—ONU—DTU,此时 DTU 能够持续连通 CORE,表明系统能够正常工作。

2.2 故障倒换

将 ONU 的 g0/0/2 关闭,并打开 ONU 的 g0/0/1,模拟主用 PON 链路失效后数据从备用 PON 链路进行发送,发现 DTU 无法连通 CORE,连接中断。通过命令在所有设备上查看 MAC 地址表,列出与终端 DTU 的 MAC 相符合的表项,结果如表 2 所示。

表 2 发生保护倒换后 MAC 地址

设备	MAC 地址	学习 MAC 地址端口
OLT1	5489.9850.7777	G0/0/1
SW1	5489.9850.7777	G0/0/4
SW2	5489.9850.7777	G0/0/2

在 SW1 上查看 10.1.20.100 的 ARP 表项,发现结果与正常运行时相同,对应出接口仍为 g0/0/4。

由表 2 可知,当备用的链路被启用时,除了 OLT2 丢失 DTU 的 MAC 地址表项外,OLT1、SW1、SW2 的 MAC 地址表项均未发生变化,而且 SW1 的 ARP 表项也未发生变化。抓包分析显示,DTU 上传的信息直接在 OLT1 处即被丢弃,无法上传至 SW1 和 CORE。等待 5 min 后再次查看 MAC 表,结果如表 3 所示。

表 3 保护倒换 5 min 后 MAC 地址

设备	MAC 地址	学习 MAC 地址端口
OLT1	5489.9850.7777	G0/0/2
SW1	5489.9850.7777	G0/0/2

此时在 SW1 上查看 10.1.20.100 的 ARP 表项,发现结果与正常运行时相同,10.1.20.100 对应出接口仍为 g0/0/4。结果表明,此时 MAC 地址表已经被正确学习,但是由于 SW1 关于 10.1.20.100 的 ARP 表项仍然存在错误,故 DTU 无法恢复与 CORE 的通信。

抓包分析发现,DTU 发往 CORE 的数据已经被 CORE 正确接收,但 CORE 向 DTU 发送的回复报文全部被 SW1 通过 g0/0/4 接口发送出去,从而导致 DTU 无法接收到回复报文,与 CORE 的连接关系建立失败。再等待 20 min 后,发现 DTU 和 CORE 的连接恢复,此时查看 MAC 表和 ARP 表,发现均学习正确,SW1 关于 10.1.20.100 的 ARP 表项对应出接口已从 g0/0/4 更新至 g0/0/2。

2.3 原因分析

在手拉手倒换过程中,限制业务进行快速倒换的原因主要有二:(1) OLT1 的 MAC 地址表项没有及时更新;(2) 当 OLT1 和 SW1 的 MAC 地址表项更新后,SW1 的 ARP 表项没有及时更新。分别采用 MAC 地址漂移和 ARP 更新原理对上述现象进行解释。

2.3.1 MAC 地址漂移

MAC 地址漂移是指某个端口的源 MAC 地址老化之前,设备从另一个端口学习到该源 MAC 地址,并刷新 MAC 地址表中源 MAC 地址和物理端口的对应关系,这就好像是 MAC 地址从一个端口漂移到另一个端口。为应对恶意用户利用 MAC 地址漂移原理仿冒其他用户或上层设备的 MAC 地址,OLT 支持防御 MAC 地址漂移特性,简称防 MAC 漂移。实现原理是从端口 A 接收到某个源 MAC 地址的报文后,设备会检查 MAC 地址表中是否已存在该 MAC 地址。如果 MAC 地址表中记录端口 B 对应该 MAC 地址,则设备根据主控板、端口类型等判断是否允许该 MAC 地址从端口 B 漂移到端口 A。对于禁止漂移的情况,在 MAC 地址老化之前,设备会丢弃从端口 A 接收到的含有该源 MAC 地址的报文。

在 EPON 系统中,OLT 默认开启防 MAC 地址漂移功能,OLT 网络侧接口(NNI)MAC 地址优先级为 1,用户侧接口(UNI)MAC 地址优先级为 0,因此当 OLT 网络侧接口学习到某个 MAC 地址后,即使该 MAC 地址立刻从 UNI 被学习到,该 MAC 仍然不会被覆盖,而从用户侧发来的带有该源 MAC 地址的报文会被全部丢弃。

对应仿真拓扑,OLT1 的 NNI 接口为 g0/0/1,UNI 接口为 g0/0/2,在稳态运行情况下,OLT1 从 NNI 接口学习到了 DTU 的 MAC 地址 5489.9850.7777,当备用 PON 线路备启用后,OLT1 又从 g0/0/2 学习到 5489.9850.7777,但由于 g0/0/2 的 MAC 地址优先级低于 g0/0/1,该 MAC 地址无法被正确学习,因此表 2 中 OLT1 关于 DTU 的 MAC 地址 5489.9850.7777 对应接口仍然是 g0/0/1。这种情况会持续到 OLT1 中该 MAC 地址表项老化时间结束,当该 MAC 地址在老化时间达到后仍然无法被刷新,OLT1 丢弃这个 MAC 地址,开始接收 g0/0/2 的 MAC 地址学习。MAC 地址的老化时间默认为 5 min,因此等待 5 min 后,表 3 中 MAC 地址被正确学习。

2.3.2 ARP 更新原理

ARP 用于确定对应 IP 地址的网卡物理地址。在实际环境中,只有同时满足以下 2 个条件时,设备的 ARP 表项才会更新:(1) 设备收到来自某 IP 的 ARP 请求包或免费 ARP 包;(2) 设备现有 ARP 表项中已

经存在该 IP 对应的 ARP 表项。其他非 ARP 报文不会对设备的 ARP 表项产生影响。

以仿真系统为例,系统刚开始运行时,DTU 不知道网关 10.1.20.254 对应的 MAC 地址,则会发送 ARP 请求,SW1 以自身 MAC 地址回应,DTU 收到 ARP 回复后即在 ARP 表中保存相应的 ARP 表项,同样 SW1 中也会保存关于 DTU 的 ARP 表项。当发生故障倒换后,DTU 无法感知上层网络变化,仍然采用原 ARP 表项封装数据包,并不会发送 ARP 请求或免费 ARP 报文,因此虽然网络拓扑发生变化,但是 SW1 由于没有收到 DTU 的 ARP 请求或免费 ARP,SW1 中关于 DTU 的 ARP 表项仍不会更新。因此,即使倒换后 SW1 能正确学习关于 DTU 的 MAC 地址(如表 3),由于不满足 ARP 更新的 2 个条件,当 CORE 发往 DTU 的数据经过 SW1 时,SW1 仍会按照原 ARP 表项中的对应接口 g0/0/4 将数据发送出去,从而导致 DTU 与 CORE 建立连接失败,这种情况会持续到 ARP 老化时间到达。当 DTU 的 ARP 表项老化时间达到后,SW1 会发送一个 ARP 探测确定原 ARP 对应 DTU 主机是否存活,由于 DTU 上联通道已经连接至 OLT1,SW1 自然无法从 g0/0/4 获取 ARP 探测的回应,尝试数次仍无法得到回应后,SW1 会删除相应 ARP 表项。此时若有 CORE 发往 DTU 的流量,SW1 会发出 ARP 广播,请求 DTU 的 MAC 地址,从而获取正确的 ARP 表项。

需要注意的是,在 Cisco 设备中 ARP 表项只起到 IP 地址和 MAC 地址互相转换的功能,具体数据发送则会查找相应的 MAC 地址表项。国内大部分厂家在优化 ARP 表功能时,在 ARP 表中添加了出接口一项,虽然减少了查找多个表项带来的延迟,但是也带来了 MAC 表和 ARP 表无法同步刷新而导致数据被错误转发的问题。

3 倒换机制优化

根据上述分析可知,当 EPON 手拉手保护从主用 PON 链路切换到备用 PON 链路过程中,倒换延迟主要体现在 MAC 地址老化时间和 ARP 表项老化时间两方面。MAC 地址老化时间默认为 5 min,ARP 表项老化时间默认为 20 min,远超过了网络故障自动恢复的允许时间,影响了电力系统的实时性和可靠性。通过减少 MAC 表和 ARP 表的老化时间可以缩短保护等待时间,然而多次尝试发现,如果将老化时间略减少后,对手拉手保护倒换的提升效果非常有限;但是如果将老化时间大幅减少(5 s),整个网络内会产生大量的 ARP 报文,在网络结点数量较多的情况下有可能产生报文堵塞,影响整个网络的正常运行,产生的后果比倒换失败更加严重。

通过研究 MAC 表和 ARP 表的更新机理,采用以下 2 种方式对手拉手保护倒换机制进行优化:(1) 在网关交换机上配置端口隔离功能,避免 OLT 在 NNI 接口学习到终端 DTU 设备的 MAC 地址,解决防端口漂移带来的问题;(2) 在发生主备 PON 链路倒换时,ONU 通过备用 PON 链路同步发送免费 ARP 报文,主动更新网关交换机的 ARP 表,解决 MAC 地址表和 ARP 地址表无法同步更新的问题。

3.1 端口隔离

端口隔离是为了实现报文之间的 2 层隔离而产生的高级功能,正常情况下,同 1 个 VLAN 内所有的设备均属于同 1 个广播域,同 1 个广播域中设备的 MAC 地址、IP 地址可以被同 1 个广播域中另外 1 台设备学习。采用端口隔离特性,可以实现同 1 个 VLAN 内端口之间的隔离,用户只需要将端口加入到隔离组中,就可以实现隔离组内端口之间 2 层数据的隔离,使用隔离技术后隔离端口之间不会产生单播、广播和组播。采用端口隔离,不但增强了网络的安全性,提供了灵活的组网方案,同时节省了大量的 VLAN 资源。

在 EPON 手拉手保护网络的网关交换机上部署端口隔离,即可保证主用 PON 链路上的 OLT 和备用链路上的 OLT 均不可能从 NNI 学习到终端设备的 MAC 地址,不但保留了 OLT 防 MAC 地址漂移的安全功能,而且解决了保护倒换过程中 MAC 地址老化的等待时间。以仿真系统为例,在 SW1 上部署端口隔离,将 g0/0/2 和 g0/0/4 放入一个隔离组。在稳态运行情况下,OLT1 的 g0/0/1 不会从 SW1 学习到 DTU 的 MAC 地址,在发送故障倒换后,OLT2 的 g0/0/1 也不会从 SW2 学习到 DTU 的 MAC 地址,如图 4 所示。

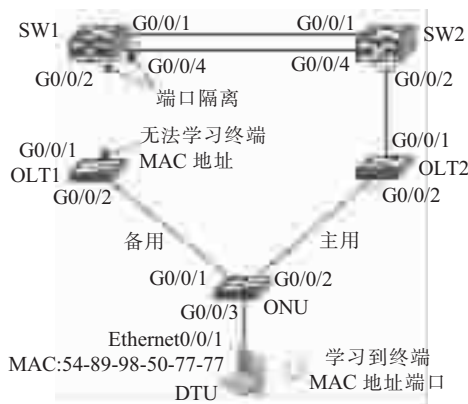


图 4 稳态运行下端口隔离功能

3.2 免费 ARP

免费 ARP 报文是一种特殊的 ARP 报文,该报文中携带的发送端 IP 和目标 IP 地址都是本机 IP 地址,报文源 MAC 地址是本地 MAC 地址,报文的目的地 MAC 地址是广播地址。设备通过对外发送免费 ARP 报文来实现以下功能:(1) 确定其他设备的 IP 地址是

否与本机 IP 地址冲突。当其他设备收到免费 ARP 报文后,如发现报文中的 IP 地址和本机 IP 地址相同,则给发送免费 ARP 报文的设备返回一个 ARP 应答,告知该设备 IP 地址冲突。(2) 设备改变了硬件地址,通过发送免费 ARP 报文通知其他设备更新 ARP 表项。

免费 ARP 具有更新其他设备 ARP 表项的功能。在 EPON 手拉手组网中,利用该特性即可实现主备 PON 链路倒换过程中汇聚交换机 ARP 表项主动更新功能。具体思路如下:在正常工作状态下,ONU 设备会保存终端设备的 ARP 表项。当 ONU 监测到主用 PON 链路发生故障后,将业务导向备用 PON 链路时,同步发送一个免费 ARP 报文,该报文中携带的发送端 IP 地址和目标 IP 地址都是终端设备 IP 地址,报文源 MAC 地址是终端设备的 MAC 地址,报文的目的地 MAC 地址是广播地址。当备用 OLT 和汇聚交换机收到该免费 ARP 报文后,会立即更新本地的 ARP 表和 MAC 地址表,无须再等待相应表项的老化时间。

以仿真系统为例,正常运行时 ONU 会保存 DTU 的 ARP 表项 IP:10.1.20.100—MAC:5489.9850.7777,当 ONU 检测到主用 PON 链路故障后,会主动通过备用 PON 链路发送免费 ARP,免费 ARP 的源 IP 地址和目的 IP 地址均为 10.1.20.100,源 MAC 地址为 5489.9850.7777,目的 MAC 为广播地址。虽然此时 DTU 本身没有发出 ARP,但是 SW1 仍然可以从 g0/0/2 接口接收到免费 ARP 报文,从而更新本地的 ARP 表项,确保倒换过后系统正常运行,如图 5 所示。

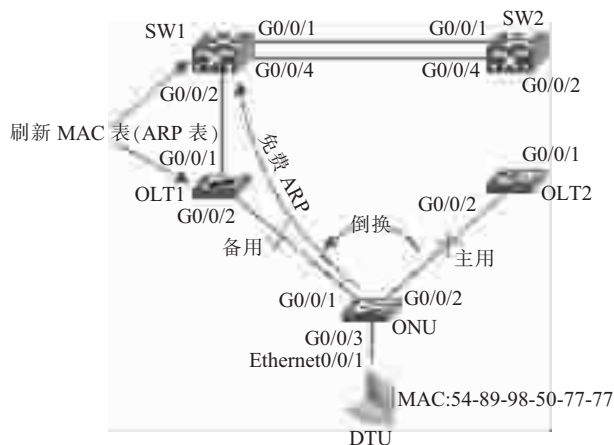


图 5 故障倒换后 ONU 主动发送免费 ARP 更新 MAC 表和 ARP 表

4 实际系统仿真验证

以无锡地区配电自动化 EPON 网络为验证对象,诚飞、灰凌、仕途、竹辉路为某条线路上 4 个馈线终端设备(FTU),各 FTU 所连 ONU 以 EPON 手拉手保护方式组网,主备用链路分别连接至杨亭变 OLT 和商贸变 OLT,如图 6 所示。设备地址规划如表 4 所示。

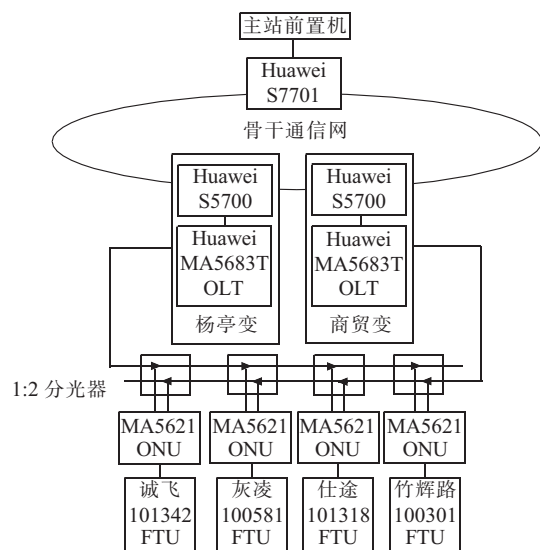


图 6 无锡配电通信网 EPON 手拉手保护组网拓扑

表 4 EPON 手拉手组网地址规划

变电站设备	ONU 名称	ONU 管理 IP	FTU 业务 IP	OLT 链路状态
杨亭变	诚飞	10.X.33.20	10.X.20.36	Active
	灰凌	10.X.33.21	10.X.20.37	Active
	仕途	10.X.33.22	10.X.20.38	Active
	竹辉路	10.X.33.23	10.X.20.39	Active
商贸变	诚飞	10.X.33.20	10.X.20.36	Standby
	灰凌	10.X.33.21	10.X.20.37	Standby
	仕途	10.X.33.22	10.X.20.38	Standby
	竹辉路	10.X.33.23	10.X.20.39	Standby

在主站前置机通过输入命令“ping 10.X.20.36 - t”,长时间观察诚飞 FTU 终端的在线情况,在核心交换机通过输入命令“ping - m 10 - c 50000 10.X.20.36”观察诚飞 FTU 终端的在线情况。

优化前,断开诚飞 ONU 与杨亭 OLT 直连光纤,启用商贸变备用 PON 链路,倒换后主站前置机与核心交换机一直处于丢包状态,且主站前置机产生告警信息,显示诚飞 FTU 离线,等待约 20 min 后诚飞 FTU 恢复在线,告警消失。实施优化措施后,断开诚飞 ONU 与杨亭 OLT 直连光纤,启用商贸变备用 PON 链路,核心交换机显示丢包数为 2,表明业务倒换延迟在 50 ms

以内,主站前置机未显示丢包,同时无告警产生。

5 结束语

EPON 手拉手保护组网方式提高了 EPON 网络的可靠性,但大部分厂家在研发、测试手拉手保护功能时,仅考虑 EPON 光路的倒换时间,并未结合实际业务和全局拓扑进行考虑,导致手拉手保护在应用中存在较多的问题。文中结合真实 EPON 系统,从以太网分析角度提出了端口隔离、免费 ARP 的优化策略,缩短了手拉手保护的倒换时间,提高了配电通信网网络自愈功能。文中所做优化均基于华为的 EPON 产品,多品牌 EPON 设备互联互通、协议的兼容性以及手拉手保护倒换测试的标准还需进一步规范、完善。

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,2003,24(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].北京:华北电力大学硕士毕业论文,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):96-100.
- [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,2007:20-25.
- [7] 工业和信息化部.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[S].北京:北京邮电大学出版社,2008.
- [8] 工业和信息化部.YD-T1771—2008 接入网技术要求—EPON 系统互通性[S].北京:人民邮电出版社,2008.

作者简介:

- 沈超(1987),男,江苏无锡人,工程师,从事电力系统通信研究工作;
- 徐俊(1978),男,江苏江阴人,工程师,从事电力系统通信研究工作;
- 刘佳颖(1975),男,江苏无锡人,高级工程师,从事电力系统通信研究工作。

Application and Optimization of EPON Hand-in-hand Protection in Distribution Communication Network

SHEN Chao, XU Jun, LIU Jiadan

(Wuxi Power Supply Company,Wuxi 214061,China)

Abstract: This paper presents a method to improve the EPON hand-in-hand protection in event failure. The simulation mode of power distribution communication network in EPON is established, which is applied in analyzing the network characteristics of OLT, ONU and Switch under hand-in-hand protection. Based on Ethernet principles, two assistive functions, port-isolated and gratuitous ARP, are proposed for the optimization of hand-in-hand protection. The switching delay less than 50 microseconds is achieved. Effectiveness of the proposed method is verified by a real system.

Key words: EPON; hand-in-hand protection; port-isolated; gratuitous ARP