

智能变电站过程层交换机设计及实现

杨 贵¹, 高红亮², 彭 安¹, 张喜铭², 李 莉¹, 潘 磊¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663)

摘要:从智能变电站过程层网络传输报文的特点出发,对交换机的传输带宽、存储转发延时、强电磁干扰下的零丢包、采样同步、流量控制、配置管理等方面进行需求分析,提出了一种适用于智能变电站过程层网络交换机的整体研制方案,并对交换机的测试情况和试点运行情况进行了分析介绍。

关键词:过程层;交换机;延时累加;离线配置;流量控制

中图分类号:TM769;TP393

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)05-0128-08

0 引言

目前,智能变电站中的继电保护普遍采用“直采直跳”方式^[1],即保护装置与合并单元采用点到点的方式,这种方式较为可靠,但接线较复杂且信息不能共享,存在智能电子设备(IED)光口数量多导致发热量大等问题。智能变电站要求全站信息数字化、通信平台网络化、信息平台共享化。因此,采用网络传输方式实现智能变电站过程层组网是发展的必然趋势^[2]。

现有智能变电站采用两层网络通信架构,即过程层网络和站控层网络。过程层网络连接间隔层设备和过程层设备,站控层网络连接站控层设备和间隔层设备。继电保护的网络化,即“网采网跳”,可以实现网络信息的共享,简化光纤接线,提高调试效率,节约建设成本^[3]。但要实现继电保护的网采网跳,对网络数据传输的实时性、采样同步可靠性、数据传输时延确定性、通信网络的可靠性和网络设备配置管理方便性等方面提出新的要求。因此研制符合智能变电站过程层应用的交换机,适应智能变电站过程层网络的应用需求十分必要。

1 智能变电站的网络架构

目前,国家电网和南方电网分别进行了智能变电站的网络化三层两网^[4]、三网合一^[5]的试点建设。在三层两网情况下,过程层网络逐步由原来的面向通用对象的变电站事件(GOOSE)、取样值(SV)分别组网^[6],向GOOSE、SV共网传输方向发展;三网合一实现了GOOSE、SV和制造报文规范

(MMS)报文的共网传输,大大节省了网络设备的投入。

但是网络化在推广过程中发现如下问题尚待解决:

(1) 未统一建模。由于交换机在IEC 61850规范中未进行建模工作,无法实现对交换机运行状态的有效监管^[7]。

(2) 配置工作量大。由于GOOSE、SV为组播传输报文,过程层网络为了实现GOOSE、SV报文的传输路径管理,防止网络报文发送到不需要的IED设备中,需要进行虚拟局域网(VLAN)、静态组播等配置工作^[8],该工作由于缺乏IEC 61850建模和离线配置工具,必须通过手工方式进行逐台配置,配置工作量大且易反复。

(3) 传输可靠性难以保证。过程层网络的每路GOOSE、SV报文均采用组播的方式进行传输,目前采用VLAN或静态组播的方式进行报文传输管理^[9],该方式无法解决单路GOOSE或SV发生风暴时过程层网络整体受到影响的问题。

(4) 采样同步。为了满足继电保护装置采样同步的要求,目前智能变电站采用B码对时或精准时间协议(PTP)对时等方式实现采样同步^[10],但当外部时钟源出现异常而导致假同步等异常现象出现时,无法保证继电保护高可靠性要求^[11]。

2 智能变电站过程层网络报文分析

过程层网络传输SV、GOOSE报文类型均为二层组播报文,为了合理规划智能变电站网络需要了解各种报文的特点。当采用网络PTP对时模式时,PTP报文同样采用二层组播报文方式进行传输。

2.1 SV报文分析

SV报文为合并单元发送给保护、测控等装置

收稿日期:2017-04-29;修回日期:2017-05-28

基金项目:中国南方电网公司重点科技项目(ZDKJQQ-00000016)

的原始采样电压电流信息值,每个周波采样点数为 80 点,每帧 SV 报文长度一般在 200 字节左右,SV 流量计算公式为:200 byte \times 8 bit \times 4000 帧=6.4 Mbps。因此,每路 SV 报文流量大概在 5~10 Mbps 之间^[12]。

采用组网方式传输 SV 报文情况下,由于交换机间存在级联,而通过级联端口的 SV 报文同样存在拥塞现象^[13]。目前为了有效的解决交换机间级联的带宽问题,普遍采用千兆光纤端口。

在正常组网情况下,线路保护仅接收一路 SV 报文,而母差保护需要同时接收多路 SV 报文,在母差保护的 SV 输入光纤端口上,存在 SV 报文拥塞情况。这种情况下无法通过增加端口速率来减小拥塞带来的延时,因此,无法达到或者逼近直采直跳方式的延时要求,必须通过一定的方式来解决传输延时不确定问题。

2.2 GOOSE 报文分析

GOOSE 报文主要用来传输状态变位信息或控制命令等信息。平时在网络上的报文流量很小,基本可以忽略,但是发生故障时将出现短暂的流量突增,最大总流量可达到 30 Mbps 的突发流量,每路 GOOSE 报文流量小于 2 Mbps。突发 GOOSE 报文的流量计算公式为:报文长度 \times 8 bit \times 5 帧,当 GOOSE 报文长度为 1.5 kbyte 时突发流量为 0.6 Mbps,突发流量为 GOOSE 报文本身,没有时序的要求,因此,对组网带来的延时抖动并不敏感。为了确保 GOOSE 突发时报文能够有效传输到接收端,需要确保网络具有足够的带宽能够传输报文而不产生报文丢失。

为了确保 GOOSE 报文突发流量的可靠传输,在组网时应保证网络预留足够的带宽来确保突发时的流量要求。

2.3 PTP 报文分析

PTP 报文包括发布报文(announce)、同步报文(sync)、同步跟随报文(sync followup)、对等延时请求报文(pdelay request)、对等延时应答报文(pdelay reply)等几种报文。按照 GBT 25931—2010 精确网络时间同步协议要求,以上报文的发送间隔均为 1 s。其中 announce 报文用于通知网络设备当前的主时钟信息,为主时钟定时发送的组播报文,在网络上全网发送;sync 报文和 sync followup 报文由主时钟定时发送,用于为网络设备提供精确的时间,在网络上全网发送;pdelay request、pdelay reply 报文在互联的两个网络端口上进行链路延时测量,仅出现在互联的两个端口上,不进行全网广播。从以上分

析来看 PTP 报文不具备突发机制,均采用定时发送机制,不会对网络带来冲击。

3 智能变电站过程层对交换机需求

3.1 基本需求

3.1.1 电源

智能变电站中一般采用直流电源,交换机需要适应智能变电站的电源供电方式。由于在智能变电站中一台交换机要连接多个间隔,其电源故障将导致多个间隔的网络中断,所以交换机需要提供双电源,双电源热备用方式同时工作,从而保证任何一路电源掉电时交换机不间断地正常运行。

3.1.2 存储转发时延

在继电保护点对点传输模式下,跳闸保护信号通过电缆传送,基本不存在延时。在采用网络传输模式下,GOOSE、SV 报文均通过过程层网络进行传输,交换机的转发延时直接影响 GOOSE、SV 报文的传输时间,从而导致跳闸命令和采样值接收时间受到影响,最终使得保护动作时间受到影响。因此,网络传输时间应越短越好,网络设备的存储转发延时应小于 10 μ s,以满足过程层报文传输需求。

3.1.3 温度范围

智能变电站交换机一般安装于小室或箱变中,通常都有空调来调节环境温度,正常情况下不需要交换机具有宽温的工作范围。但是,交换机作为过程层网络的重要组成部分,其可靠性直接影响保护动作的可靠性,因此,必须考虑空调失效等极端情况下的交换机运行可靠性。交换机在高温下运行时,其相关元器件的老化速度加快,将严重影响其性能和使用寿命,需采用适当的无风扇自冷散热技术,使得交换机能够在-40~+85 $^{\circ}$ C 的温度范围内长期可靠的工作。

3.1.4 吞吐量

智能变电站过程层网络化后,过程层网络上传输报文的字节长度各有不同。例如跳闸 GOOSE 报文、SV 报文等,交换机需要对任何字节长度的报文的吞吐量都能达到 100%。有些交换技术对某一字节长度的报文的吞吐量达不到 100%,会导致该长度的报文的传输可靠性下降,影响变电站的正常运行。

3.1.5 强电磁干扰下的零丢包技术

电力系统,特别是变电站,在正常和异常运行状况下都会产生和遭受各种电磁干扰。例如高压电气设备的操作,低压交直流回路内电气设备的操作,短路故障等产生的瞬变过程,电气设备周围的

静电场和磁场、雷电、电磁波辐射,人体与物体的静电放电等。这些电磁干扰会对交换机的通信数据的转发产生影响,导致交换机转发的报文中某些字节出错,使得链路层的 FCS(帧校验序列)校验出错,从而丢失整帧报文。报文的丢失会导致模拟量采样出错、开关量丢失、跳闸延时,严重影响变电站的可靠安全运行。在强电磁干扰的情况下交换机必需实现零丢包技术,以满足过程层网络化的需求^[14]。

3.1.6 流量分类控制

在智能变电站之中,本间隔的保护测控装置往往只关心本间隔的数据,例如线路保护装置,交换机采用 VLAN 技术或者静态组播、动态组播管理协议(GMRP)等技术,将不同间隔的数据进行隔离十分必要。另外交换机也需要支持优先级技术,保证重要数据的实时性。

3.2 研制需求

3.2.1 交换机建模

对于通信设备普遍采用简单网络管理协议(SNMP 协议)进行监控管理^[15],在智能变电站中则统一采用 IEC 61850 模型进行监管。在智能变电站中采用 IEC 61850 对交换机进行监视相比于采用传统的 SNMP 协议具有以下优势:

(1) 保证全站通信协议的统一性,符合智能变电站的设计理念。如果应用 SNMP 协议,将导致智能变电站监控网内同时出现两种通信协议、两套监控系统,不符合“一个世界,一种技术,一种标准”的理念。

(2) 可以方便地在后台机上对交换机、保护、测控等设备同时进行监控,符合电力系统操作习惯,方便用户使用。如果应用 SNMP 协议,需要设立单独的网络安全与监管(NSM)服务器作为监控设备,增大投资,且用户需要同时监控两套系统,不便于使用。

(3) 可以通过变电站配置描述(SCD)工具^[16]实现对全站的 IED 设备(包括交换机)进行统一配置管理,实现源端统一配置,有效解决目前过程层交换机配置工作量大、易反复的问题。

3.2.2 SCD 离线配置

智能变电站 SCD 中已有 GOOSE、SV 报文的订阅关系信息^[17],但是由于交换机未进行 IEC 61850 建模,无法用于生成交换机配置,导致目前智能变电站交换机重复配置、配置难度大、正确性难以保证,在交换机建模的基础上通过 SCD 离线配置工具可有效解决该问题。

利用智能变电站 GOOSE/SV 订阅关系和网络拓扑关系,通过 SCD 工具生成交换机配置文件,实现交换机的源端统一配置。交换机的配置文件用符合 IEC 61850 标准的变电站配置描述语言(SCL)描述变电站中过程层网络的拓扑关系。SCD 离线工具解析 SCD 文件中 IED 设备的订阅关系,生成交换机的配置文件,配置文件中应包括 VLAN 或静态组播配置,下装到交换机完成配置,并归档,如图 1 所示。

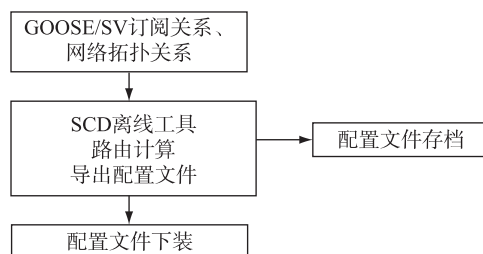


图 1 交换机离线配置

Fig.1 Switches offline configuration

3.2.3 流量精确控制

智能变电站过程层网络中不同报文控制块的 GOOSE/SV 报文在相同的网络上传输,不可避免地存在不同路 GOOSE/SV 之间的报文干扰问题,当某路报文发生风暴等情况时,必然导致过程层网络正常报文传输发生拥塞、丢包等异常情况。

为了提升 GOOSE、SV 报文传输可靠性,避免一路 GOOSE 或 SV 报文故障导致整个过程层网络异常的情况发生,提出了针对每路 GOOSE 和 SV 报文分别进行流量控制的技术,确保发生风暴的 GOOSE、SV 报文仅占用网络传输带宽的一小部分,其他网络带宽仍然能够正常传输 GOOSE、SV 报文,有效解决过程层网络报文相互干扰问题。

3.2.4 传输延时测量

目前智能变电站继电保护采用网采模式最大的障碍在于采样报文在交换机内的传输延时是不确定的,所以跨间隔保护需依赖于外部时钟,以保证采样数据的同步性,当失去外部时钟或外部时钟出现故障时,跨间隔保护将退出运行。

通过交换机报告传输延时的方法可以彻底解决这个问题,即精确计算报文在交换机内的转发延时 ΔT 并写入 SV 报文内,多个交换机级联情况下可以累积报文传输延时。如图 2 所示,延时可测交换机的时标测量精度不低于 100 ns,完全可以满足各种保护的应用需求。

保护装置依赖本地时间基准,利用 MU(合并单元)额定延时和链路传输总延时 ΔT 还原收到的各

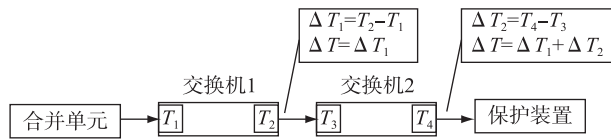


图2 传输延时测量示意图

Fig. 2 Delay measurement schematic diagram

间隔MU的采样时刻(相对直采方式,只是增加了 ΔT 的补偿),完成采样值的差值同步处理,其原理基本等效直采模式,从而实现网采方式不再依赖同步时钟,即:

保护装置时间基准上的合并单元采样时刻为MU采样数据到达时标-MU额定延时-链路传输总延时 ΔT 。

为了确保延时值的正确性,每台交换机均对延时值的有效性进行判别,当延时值异常时置无效标志,接收设备判别标志位状态,无效状态的报文将被丢弃处理。

通过上述方法完成合并单元采样时刻处理后,保护装置针对MU采样数据的处理方式完全等同于直采模式,对等效的合并单元采样时刻进行合理性校验:当时标抖动时间超过 $10\ \mu\text{s}$,装置将报“间隔帧通道抖动异常”,同时置该合并单元数据无效,闭锁相关的保护功能,实现对交换机转发延时正确性的校验。当交换机转发延时错误时,保护装置感受到的MU发送时标将出现抖动,通过快速闭锁保护可以避免可能因此产生的保护误动。

数据到达时刻打时标技术在保护直采方式下已经广泛使用,所以交换机延时可测技术实现门槛并不高。基于交换机延时可测的方案原理简单可靠,保护程序改动很小。

4 交换机的整体方案

4.1 型号设计

智能变电站中一般采用星型网,主控室配置千兆中心交换机,继电保护小室配置百兆交换机,千兆中心交换机和百兆交换机之间通过光纤相连。千兆中心交换机位于星型网根部,数据交换量大,交换速率要求高,百兆交换机负责本小室的数据交换,数据量较小。因此交换机系列考虑两种类别:千兆中心交换机,位于星型网的中心位置,速率为1000 M,负责接入站控层设备和百兆交换机的组网;百兆交换机,位于星型网外围节点位置,速率为100 M,通过1000 M级联端口连接主交换机。文中将详细介绍千兆中心交换机的设计实现,如图3所示。

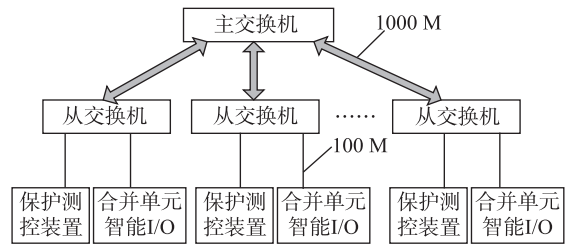


图3 智能变电站过程层网络

Fig.3 Smart substation process layer network diagram

4.2 硬件方案

交换机的硬件架构由CPU管理模块、数据交换模块、延时累加模块、物理接口模块、电源模块和复位模块及其他一些外围电路构成。基本框架如图4所示。

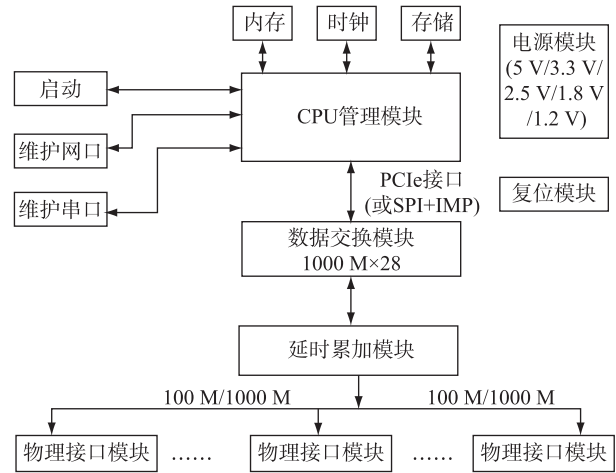


图4 硬件设计框图

Fig.4 Hardware design block diagram

4.2.1 CPU 管理模块

CPU管理部分是管理型以太网交换机不可缺少的部分。CPU通过数据交换模块的汇流排(PCIe)或串行外设接口(SPI)完成对数据交换模块的初始化配置和后续管理。存储芯片采用64 MB存储空间的并行闪存(NAND flash)和2 MB的串行闪存(NOR flash)构成。双倍速率同步动态随机存储器(DDR)由多片DDR芯片并行工作构成32 bit的数据宽度。使用CPU芯片自带的网口和通用异步收发传输器(UART)串口构成交换机的CONSOLE维护口。实时时钟(RTC)模块与CPU之间通过I2C总线进行通信,为交换机提供时间信息。

CPU:CPU具有高速的处理速度并提供了丰富的外围接口,提供32位的DDR存储器控制器、PCIe接口、I2C接口、介质无关接口(MII)、外部扩展总线接口、SPI接口、通用输入/输出(GPIO)等。

存储:CPU管理部分包含3种存储芯片:DDR、NOR flash和NAND flash。DDR为系统运行内存,

flash 芯片存放固化的软件系统和 Boot 启动系统。其中,NOR flash 存放系统的引导代码,系统从这里启动;NAND flash 存放系统的主程序,同时存放系统配置文件、日志文件等。

CONSOLE(调试端口):CPU 芯片集成了 MII 接口和 UART 接口,UART 接口通过外接串口芯片实现 RS232 接口,为交换机通过串口管理端口,MII 接口通过外接物理接口模块实现交换机的带外管理网口。

RTC:RTC 通过 I2C 总线方式与 CPU 进行通信,为交换机提供时间值,用于事件记录,信息上送打时标等。

4.2.2 数据交换模块

数据交换模块是构成交换机的核心器件,报文转发、转发规则、VLAN、静态组播、镜像、优先级、端口管理等功能均由该模块实现。数据交换模块为了达到全部端口线速转发的要求,全部采用硬件电路实现,数据交换模块与 CPU 管理模块配合实现快速生成树协议(RSTP)、GMRP、VLAN 注册协议(GVRP)、互联网组播协议规则(IGMP Snooping)、链路层发现协议(LLDP)、端口安全等高级功能。数据交换模块的性能直接影响到交换机性能,选型时必须特别注意。

4.2.3 延时累加模块

为了精确测量报文经过交换机的转发时间,硬件设计时在物理接口模块和数据交换模块之间加入了延时累加模块,该模块用于实时记录每帧报文的端口输入时间和端口输出时间,并将转发时间在 SV 报文传输过程中直接插入到 SV 报文的特定字段中,该特定字段可以选择报文的 reserver(保留)字段等实现,从而实现交换机传输时间的准确测量。当 SV 报文经过多级交换机时,传输延时可累加记录。

4.2.4 物理接口模块

用于实现交换机内部的数字信号到物理链路模拟信号转换,同时用于实现 RJ45 电口和 Fiber 光口,百兆/千兆口。

4.2.5 电源模块

为交换机提供供电电源,实现外部 220 VDC/AC 电源向内部芯片和电路使用的 5 V,3.3 V,2.5 V,1.8 V 等电压的转换,同时,提供电压监视电路,方便电压检测管理。

4.2.6 复位模块

为交换机提供内部电路复位电路,确保交换机在冷启动、软件复位、硬件复位等情况下实现交换

机的复位功能。

4.3 软件方案

4.3.1 软件架构

该交换机的软件整体结构分为操作系统、SAL(系统抽象层)、API(交换模块的操作接口层)、基本功能模块、高级功能模块、配置管理模块、日志告警模块等几部分,如图 5 所示。

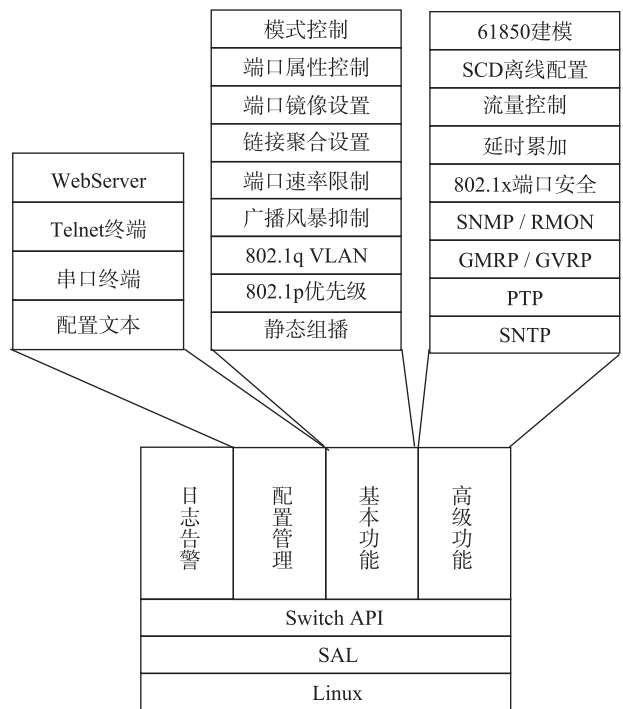


图 5 软件架构

Fig.5 Software architecture diagram

4.3.2 操作系统和 SAL 及 API 模块

综合考虑系统稳定性、高效性和可扩展性等因素,交换机的操作系统采用了 Linux。

SAL 为系统抽象层,提供通用的系统函数封装接口,使得上层的应用程序与操作系统无关,确保程序具有良好的可移植性,为今后 CPU 或操作系统升级提供了良好的可扩展性。

Switch API 层封装了应用功能对交换模块的操作,包括修改端口属性、读写交换芯片各寄存器等,为上层应用提供了简明清晰的操作手段。增加 API 层使得上层应用程序独立于交换芯片存在,便于上层应用程序的改进和移植,提高了本方案的可扩展性,也便于在今后开发同类产品时应用模块和代码复用。

4.3.3 配置管理模块

该模块负责所有参数的显示、配置,可以通过 Web、telnet、命令行接口(CLI)对交换机进行访问和维护,以满足在不同场合和条件下用户对交换机配

置和管理的需要。

4.3.4 基本功能模块

该模块主要包括对端口模式、属性的控制管理等。通过改变 SWITCH 和物理接口模块上相关寄存器的内容设置端口的各项属性,以适应应用需求。

该模块接收来自配置管理模块的功能控制命令,对物理接口模块和数据交换模块的工作模式做设置。同时该模块与日志告警模块接口,对常规配置操作和系统运行异常等情况进行记录。

该模块内部各子模块之间为平行关系,独立运行,可分为以下模块。

(1) PHY 模式控制:控制 PHY 工作模式,包括端口的工作速率、全双工/半双工模式、自动协商模式控制和网线自动交叉识别等。

(2) 端口属性控制:控制端口属性,包括端口使能,网络报文控制等。

(3) 端口镜像设置:用于将某一个或几个端口上的所有流量复制到另外一个或几个端口上,用于侦测或调试。

(4) 端口聚合设置(trunk):用于将多个端口聚合成一个数据通道,该通道被视作单个逻辑连接,以便扩展交换机级联带宽或增加级联冗余度。

(5) 端口速率限制:控制每个端口输入、输出流量速率,可同时对端口速率和端口瞬时风暴进行设置。

(6) 网络风暴抑制:用于抑制广播、多播或未知单播的网络风暴。

(7) 802.1q VLAN:用于实现虚拟局域网功能,将交换机划分为多个虚拟交换机。

(8) 802.1p 优先级:控制报文在交换机中的发送顺序,支持严格优先级和权重优先级两种模式,高优先级报文具有优先发送的权利。

(9) 静态组播:在交换机上设置指定组播地址报文的转发路径。

4.3.5 高级应用模块

该模块提供管理型交换机的各项高级应用功能,包括流量远程监控和统计、定时/组播报文管理、IEC 61850 建模、SCD 离线配置、流量精确控制、延时累加等。

该模块接收来自配置管理模块的功能控制命令,设置物理接口模块和数据交换模块的工作模式。同时该模块与日志告警模块接口,对常规配置操作和各项高级功能在运行过程中的异常情况或重要事件进行记录。

该模块内部各模块为平行关系,独立运行,可

以独立打开和关闭,为用户提供了灵活的应用方式,如图 5 所示。

(1) IEC 61850 建模:该模块实现了 MMS 通信机制,通过 IEC 61850 通信方式实现对交换机的监管,解决了交换机无法纳入到 61850 体系的问题,实现了全站统一监管。IEC 61850 模型应包括交换机的物理端口状态、端口统计信息、装置主板的温度、电压等监视信息、光口监视信息(包括温度、收发光功率等),满足交换机的监视需求。

(2) SCD 离线配置:将交换机的模型纳入到 SCD 中进行统一配置管理,在 SCD 中实现网络物理拓扑连接和虚链路的订阅关系连接,从 SCD 中导出每台交换机的配置文件,通过工具下装到交换机中实现交换机的同源配置,SCD 导出的交换机配置仅限于过程层组播 MAC 地址转发表等密切相关的部分。

(3) 流量控制:通过对每个组播 MAC 地址的流量进行配置,限制每个组播 MAC 地址的最大数据流量,实现报文间的有效隔离,解决了报文传输可靠性问题。

(4) 延时累加:通过对每帧 SV 报文进行交换机传输延时测量,并将测量值实时插入到 SV 报文的保留字段的方式,解决保护功能依赖外部时钟问题,提升继电保护功能的可靠性。

(5) SNMP 和 RMON(远程监视):该模块可以通过响应管理站查询提供整个网络的拓扑、交换机端口各项流量统计指标、端口状态、历史数据统计;通过预设条件产生的告警和日志,可以主动上送 trap 信息。该项功能为智能变电站通信网络的监控和分析提供了丰富的数据来源,在智能变电站内有着广阔的应用前景,并且目前已经在示范站中开始采用,使得用户可以在后台机(管理站)实时了解站内各交换机的工作情况和网络状态。

(6) GMRP 和 GVRP:GMRP 是一种基于以太网链路帧的自动多播配置方案,由于 VLAN 和多播管理信息未能在 IEC 61850 模型文件中进行规范表达,为了解决此问题,建议通过 GMRP 或者 GVRP 实现 IED 和交换机的互动,由装置告诉交换机多播报文的转发范围,达到动态优化网络流量的目的,省去了配置静态 VLAN 的繁琐,并且可以动态应对网络结构的改变。

(7) PTP 对时:交换机作为 PTP 的 TC 时钟工作,为保护等 IED 设备提供高精度的对时信息,每级交换机的对时精度应不低于 200 ns。

(8) SNTP(简单网络时间协议):通过 SNTP 客

户端模块访问时钟源以便同步内部时钟。

5 实验及测试

智能变电站过程层交换机研制成功后,经过了严格的验收测试、仿真测试等厂内测试,并通过了国家电网公司和南方电网公司的 A 类测试认证,各项过程层定制功能和常规功能性能优越。延时累加精度优于 100 ns,组播流量控制精度优于 0.1%,组播地址表容量达到 512 K 条目,PTP 对时精度优于 50 ns。

6 试点及运行

广州知识城变电站是广州第一座 220 kV 智能变电站,该站终期规模为 4 台主变,6 回 220 kV 出线,一次设备全部为室内 GIS(空气绝缘开关),20 kV 出线 64 回,全部带光纤差动保护。该站是国内首座 20 kV“花瓣型”配电网的主供电电源变电站。全站所有保护、综合自动化、智能终端、合并单元、区域稳控系统、在线监测综合处理单元全部采用了国产化产品。其中过程层网络中心千兆光口交换机采用 PCS-9882GD,百兆交换机采用 PCS-9882SD,其过程层组网如图 6 所示。

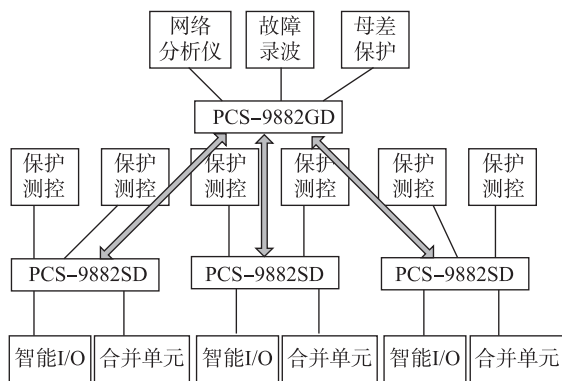


图 6 过程层组网示意图

Fig.6 Software architecture diagram

该站交换机采用 SCD 离线配置方式实现同源配置,有效降低了配置难度,提升配置可靠性;同时采用了延时累计技术提升继电保护可靠性;采用流量控制技术,对每路 GOOSE 报文限制流量为 2 Mbps,对每路 SV 报文限制流量为 15 Mbps,极大提升过程层网络传输可靠性。

以上技术的采用实现了智能变电站网络设备 IEC 6850 建模;提升了智能变电站过程层网络和继电保护的可靠性;解决了交换机配置工作量大和保护采样依赖外部时钟等问题;同时通过流量控制管理等技术解决网络传输可靠性问题。目前该站正

式投入运行。

7 结语

交换机作为智能变电站过程层网络的核心设备,其电源的可靠性、存储转发性能、强电磁干扰下的零丢包能力、-40~+85℃温度范围内长期可靠运行能力是其必须达到的关键指标。为了满足过程层网络对交换机的特殊需求,定制开发了 IEC 61850 建模、SCD 离线配置、流量控制、延时累加等功能。目前智能变电站过程层网络化已经逐步展开,但是由于定制开发功能推广时间较短,尚需加大推广力度,通过新技术的推广来提升智能变电站过程层网络的整体水平。

参考文献:

- [1] 陈宏,夏勇军. 过程层网络与继电保护直采直跳配接方案探讨[J]. 湖北电力,2010,34(s1):68-69.
CHEN Hong, XIA Yongjun. Process and relay protection layer network straight mining straight jump matching scheme[J]. Hubei electric power,2010,34(s1):68-69.
- [2] 王文龙,陈韶伟,徐广辉. 数字化变电站中 MMS 网和 GOOSE 网共网方案探讨[J]. 电网技术,2009(s).
WANG Wenlong, CHEN Shaowei, XU Guanghui. Research on the shared-network of MMS and GOOSE in digital substation[J]. Power System Technology,2009(s).
- [3] 刘永欣,易永辉,陶永健,等. 智能变电站过程层网络同步对时方案优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):112-116.
LIU Yongxin, YI Yonghui, TAO Yongjian, et al. Synchronous optimization scheme of smart substation process level network[J]. Automation of Electric Power System,2015,39(10):112-116.
- [4] 王松,陆承宇. 数字化变电站继电保护的 GOOSE 网络方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):51-54.
WANG Song, LU Chengyu. A GOOSE network scheme for relay protection in digitized substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):51-54.
- [5] 刘昊昱,浮明军,左群业,等. 基于三网合一过程层的变电站集中式保护采样和网络方案研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(21):141-146.
LIU Haoyu, FU Mingjun, ZUO Qunye, et al. Research on sampling and network scheme of centralized protection based integration in process layer[J]. Power System Protection and Control,2013,41(21):141-146.
- [6] 李兆祺,杨贵. 智能变电站通信网络架构研究[J]. 东北电力技术,2014,35(4):27-30.
LI Zhaoqi, YANG Gui. Research on intelligent substation communication network architecture[J]. Northeast Electric Power Technology,2014,35(4):27-30.
- [7] 刘明慧,胡绍谦,王文龙,等. 智能变电站交换机 IEC 61850 信息建模[J]. 电气技术,2012(1):30-35.

- LIU Minghui, HU Shaoqian, WANG Wenlong, et al. The IEC 61850 modeling of the switch used in smart substation[J]. Electrical Engineering, 2012(1):30-35.
- [8] 王达伟, 曹 政, 刘新春, 等. 高性能互联网络交换机研究与设计[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(12):69-77.
- WANG Dawei, CAO Zheng, LIU Xinchun, et al. Research and design of high performance interconnection network switch. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(12):69-77.
- [9] 汪 强. 基于 IEC 61850 的光纤工业以太网交换机的设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13):113-115.
- WANG Qiang. Design and application of fiber industrial Ethernet switch based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13):113-115.
- [10] 高吉普, 徐长宝, 张道农, 等. 智能变电站通信网络时间性能的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16):144-148.
- GAO Jipu, XU Changbao, ZHANG Daonong, et al. Discussion on time performance of intelligent substation communication network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16):144-148.
- [11] 吕 航, 陈 军, 杨 贵, 等. 基于交换机数据传输延时测量的采样同步方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9):124-128.
- LYU Hang, CHEN Jun, YANG Gui, et al. Synchronous sampling method based on measurement of switch data transmission delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9):124-128.
- [12] 王同文, 谢 民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6):58-66.
- WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6):58-66.
- [13] 徐成斌, 孙一民. 智能变电站 SV 网数据交换装置设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13):99-102.
- XU Chengbin, SUN Yimin. Design for SV network data exchange devices of smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13):99-102.
- [14] 杨 贵, 王文龙, 熊慕文, 等. 千兆交换机在智能变电站的应用探讨[J]. 电气技术, 2010(8):129-132.
- YANG Gui, WANG Wenlong, XIONG Muwen, et al. Discuss about 1000M switch application in the intelligent substation. Electrical Engineering, 2010(8):129-132.
- [15] 高 翔, 杨漪俊, 姜健宁, 等. 基于 SCD 的二次回路监测主要技术方案介绍与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15):149-154.
- GAO Xiang, YANG Yijun, JIANG Jianning, et al. Analysis of secondary circuit monitoring methods based on SCD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15):149-154.
- [16] 秦贵锋, 王 明, 张 进. 智能变电站自适应自投应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6):111-115.
- QIN Guifeng, WANG Ming, ZHANG Jin. Application of adaptive automatic switchover devices in smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6):111-115.
- [17] 高东学, 智全中, 朱丽均, 等. 智能变电站保护配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1):68-71.
- GAO Dongxue, ZHI Quanzhong, ZHU Lijun, et al. Research on protection scheme of intelligent substation. Power System Protection and Control, 2012, 40(1):68-71.

作者简介:



杨 贵

杨 贵(1976—),男,吉林通化人,硕士,高级工程师,从事通信技术、传输技术、时间同步技术和变电站自动化系统研究工作(E-mail: yangg@nrec.com);

高红亮(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士,工程师,从事电力系统自动化研究工作(E-mail: gaohl@csg.cn);

彭 安(1983—),男,湖南汨罗人,硕士,助理工程师,从事配电自动化系统、变电站自动化系统研究工作(E-mail: Penga@nrec.com);

张喜铭(1980—),男,吉林九台人,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化研究工作(E-mail: zhangxm@csg.cn);

李 莉(1985—),女,陕西省西安人,硕士,工程师,从事变电站自动化通信研究工作(E-mail: Lili1@nrec.com);

潘 磊(1989—),男,河南洛阳人,硕士,工程师,从事智能变电站通信研究工作(E-mail: Panlei2@nrec.com)。

Design and Implementation of Smart Substation Process Layer Switch

YANG Gui¹, GAO Hongliang², PENG An¹, ZHANG Ximing², LI Li¹, PAN Lei¹

(1. Nanjing NARI-relays Electric Co., Ltd., Nanjing, 211102, China;

2. Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou, 510663, China)

Abstract: Based on the smart substation process layer according to the characteristics of the network transmission message, this paper analyzes the requirements of the switch's transmission bandwidth, storage and forwarding delay, zero loss packet under the strong electromagnetic interference, sampling synchronization, flow control, configuration management and so on. A method is presented for the smart substation process layer network switches the overall development scheme, and the switch test and pilot operation were introduced and analyzed.

Key words: process layer; switch; delay accumulation; offline configuration; flow control

(编辑 方 晶)