

面向智能变电站三网合一网络的 PRP/HSR 实现方案

周华良^{1,2,3}, 郑玉平^{1,3}, 杨志宏^{1,2,3}, 谢黎^{1,2}, 姜雷^{1,2}, 王凯^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:分析了智能变电站站控层制造报文规范(MMS)网络、过程层面向通用对象的变电站事件(GOOSE)网络、过程层采样值(SV)网络三网合一的网络应用现状,针对目前三网合一网络应用中存在的通信实时性和可靠性的问题,提出了一种基于 IEC62439-3 并行冗余协议/高可用性无缝环网冗余(PRP/HSR)的智能变电站三网合一网络实现方案,总结了关键设备的研制要点。试验与测试结果验证了所提方案的可靠性。最后对基于 HSR 双向环网模式下实现分布式母差保护进行了应用设计与分析探讨。

关键词:三网合一;智能变电站;PRP/HSR;双网冗余;无缝恢复

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.034

0 引言

当前,随着 IEC61850 标准在智能变电站的应用日益深入,智能变电站网络应用正在从面向过程层的面向通用对象的变电站事件(GOOSE)、采样值(SV)网络共享,向面向全站的制造报文规范(MMS)、SV、GOOSE 三网融合^[1-3]的方向发展。面向智能变电站全站的三网合一通过将 MMS、GOOSE、SV 这 3 种数据流接入变电站智能二次设备的同一物理网口中来实现。三网合一的应用使得智能变电站的光纤以太网交换机及电力二次设备通信口的光模块数量大幅减少,网络架构更加简单清晰,实现了全站信息高度共享。

目前智能变电站内网络通信的实时性^[4]主要通过划分虚拟局域网(VLAN)和优先级标签技术来保障,即将同一工作属性的智能电子设备(IED)或分组数据源划分在同一个 VLAN 中,隔离不相关 IED 之间的数据通信。文献[2]详细分析了 VLAN 技术在智能变电站过程层三网合一中的应用,VLAN 技术在一定程度上降低了智能变电站通信网络的延时,减少了广播风暴的影响范围,但其也存在着 VLAN 数目有限、生成树拓扑管理复杂、路由负担重、维护工作量大等局限性。

当前智能变电站内网络通信的可靠性通过采用双网冗余或者环网的运行方式来保障。双网冗余一般采用基于 2 个独立介质访问控制(MAC)的双星形网络结构实现网络冗余,通过中央处理器(CPU)软件进行管理,而环网则采用基于以太网交换机的快速生成树协议(RSTP)来实现。这 2 种基于网络结构实现的冗余方式都具有一定的网络故障自愈功

能,但也存在着网络故障恢复时间长、容易丢失报文的问题。

此外,目前国内典型配网及典型测的智能变电站三网合一网络架构多数是全站采用 2 个独立单网结构,即 1 个 MMS 站控层网络加 1 个 MMS/GOOSE/SV 三网合一网络^[5]组成,此类三网合一典型应用按照间隔组网,结构清晰,维护方便。但单源 GOOSE/SV 数据在网络中未完全实现双重化传输,存在着由于报文偶发丢失导致保护测控设备可能无法进行准确运算与控制的风险。也有专家提出在此基础上将独立的单 MMS 站控层网络也扩展成三网合一网络,GOOSE 和 SV 报文的选择应用基于保护测控装置中的软件程序代码来实现,软件根据逻辑判断进行双重化 A/B 网切换的操作,此种方法实现了 SV 和 GOOSE 等重要数据的双重化,但由于实现复杂度较高,非常依赖于软件程序的可靠性,在当前多数智能变电站中难以应用,而且同样也可能存在丢失报文或数据短时中断的风险,这些都对全站保护功能的可靠运行带来较大风险。

IEC62439-3 规定的并行冗余协议(PRP)和高可用性无缝环网冗余协议(HSR)在网络节点上实现了数据在链路层上的冗余,从原理上避免了报文丢失问题,且此网络具有故障恢复零延时、报文无缝恢复等特性^[6-10],具有很高的实时性和可靠性。目前,国外 ABB 公司研制的新一代 REF620 系列馈线保护装置已经推出了支持 PRP 或 HSR 规约的无延时冗余以太网功能,但仅局限于站控层 MMS 网络;近年来,国内开始有设备制造厂家开展基于 HSR 实现设备过程层网络的应用研究,但还未见与智能变电站工程直接相关的融合组网应用。而随着智能变电站中 MMS、GOOSE、SV 三网合一应用的持续推进,现有变电站中网络数据流变得高度集中,网络报文流量增大,网络负荷加重,增加了网络故障、网络堵塞

收稿日期:2017-10-10;修回日期:2018-08-06

专利:中华人民共和国发明专利(ZL201210559437.X,20151-0772847.6,201510543264.6,201610902400.0,201610673971.1)

及网络风暴的可能性,因此,研究一种能够进一步提升三网合一网络通信实时性和可靠性^[11-12]的有效方法,对工程实际应用具有非常重要的意义。本文探索性地提出了基于千兆以太网和 PRP/HSR 实现智能变电站单数据源情形下的三网合一网络通信解决方案,并总结了关键技术及设备的研制要点,陈述了相关的试验验证与测试结果。此外还提出基于现场可编程门阵列(FPGA)技术实现 HSR 环网报文的快速实时转发机制,使环网报文在单结点设备中的总体驻留延时相对存储转发模式有明显技术优势。

1 PRP/HSR 技术原理简述

2008 年 IEC SC65 WG15 发布了 IEC62439 高可用性自动化网络协议,其中的 IEC62439-3 规定了 PRP 和 HSR,技术原理^[6]如下。

PRP 通过网络结点中而非网络结构实现网络冗余,使用遵从 PRP 的双连接节点(DANP)执行冗余。图 1 是 PRP 典型冗余网络架构图,DANP 被连接到 2 个拓扑相似且并行运行的独立局域网,2 个局域网分别命名为 LAN_A 和 LAN_B,目标结点从 2 个局域网分别接收数据帧,基于丢弃算法选取首先到达的数据帧。

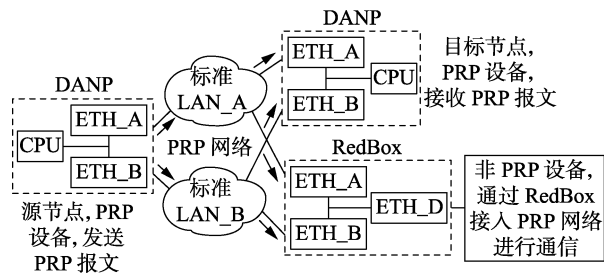


图 1 PRP 典型冗余网络架构

Fig.1 Typical redundant network structure of PRP

HSR 使用遵从 HSR 的双连接节点(DANH)执行冗余。一个简单的 HSR 网络由 DANH 组成,每个节点有 2 个环形链接端口,由全双向链路连接,形成环形拓扑,如图 2 所示。目标 DANH 接收来自环网

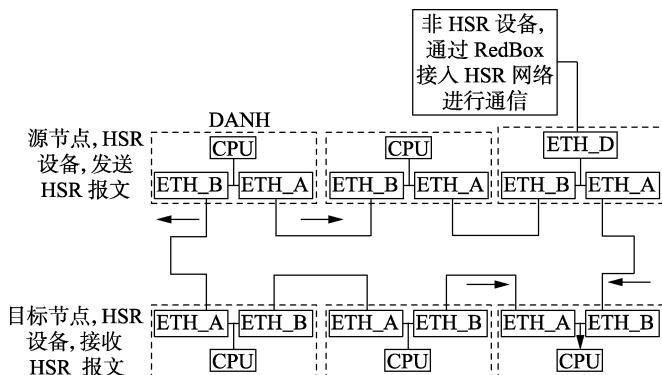


图 2 HSR 典型冗余网络架构

Fig.2 Typical redundant network structure of HSR

2 个端口的数据帧,利用丢弃算法,选取首先到达的数据帧。非目标 DANH 接收来自环网某个端口的数据帧后,直接从另外一个端口转发出去。

支持 PRP/HSR 协议的装置提供 2 个并行的以太网适配器(端口 A 及端口 B)连接到冗余网络中,端口 A 和端口 B 使用相同的 MAC 地址,这 2 个以太网适配器通过链路冗余体(LRE)模块连接到上层模块。双连接节点(DAN)的结构如图 3 所示。

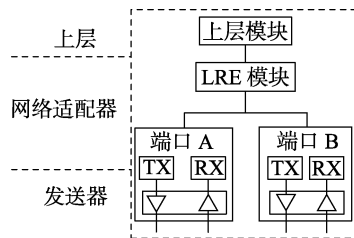


图 3 DAN 结构

Fig.3 Structure of DAN

对于高性能网络而言,网络报文的传输延时是衡量 PRP/HSR 网络实时性的重要指标,延时指标的大小及测量的精度对 PRP/HSR 网络在智能变电站内的可靠应用有着重要的意义。本文中的 PRP/HSR 网络传输延时包含报文在节点内部的驻留时间和报文在节点之间传输的路径延时 2 个部分,如附录中的图 A1 所示。报文在节点内部的驻留时间即报文在某一设备节点内部停留的时间,其包含了报文在节点内部接收缓存时间、查找表时间、从接收缓存搬运到转发缓存时间等内部处理时间,以及可能存在的排队等待时间。报文在节点之间传输的路径延时即为报文在 PRP/HSR 网络节点之间传递时的物理链路延时,其值是通过节点之间收发延时测量请求报文及响应报文进行计算。

2 基于 PRP/HSR 的三网合一网络实现方案

2.1 系统实现方案

针对目前智能变电站三网合一的应用现状,结合 IEC62439-3 标准,本文提出了一种基于 PRP/HSR 协议的智能变电站三网合一网络实现方案,对 110 kV 智能变电站三网合一典型网络架构进行探索性优化如图 4 所示。系统网络架构由现阶段独立的单 MMS 网络和单 MMS/GOOSE/SV 网络组合调整为 2 个基于 PRP 的完全并行冗余的 MMS、GOOSE、SV 共网网络 A 和 B。

保护、测控、合智一体、故障录波和对时等双连接节点设备通过装置 CPU 硬件板卡自带的 PRP 网络端口 A 和端口 B 直接连接到冗余网络中。合智一体装置的 SV 报文通过内部的 PRP 模块复制成完全相同的 2 份报文并添加 PRP 标识,分别从端口 A 和端口 B 发送到冗余双网中。保护装置作为 SV 数据传输的目标结点,从冗余双网中接收 2 个 SV 数据

帧,基于装置内部 PRP 模块的丢弃算法,选取最先到达的数据帧,丢弃后到的数据帧,并去掉数据帧的 PRP 标识,将正确的报文发送给上层应用进行运算处理。

监控设备和打印机等单连接节点(SAN)设备可通过冗余盒 RedBox (Redundant Box) 接入 PRP 网络。当监控系统执行打印命令时,监控设备下发一份打印命令报文,RedBox 的设备端口(DEV)接收到报文之后,通过 PRP 模块从端口 A 和端口 B 分别向外发送。当与打印机连接的 RedBox 接收到 2 份报文之后,利用丢弃算法,将最先到达的报文传送给打印机。

和传统组网方式相比,该组网模式在没有明显增加网络建设成本的前提下,实现了 MMS 网络、

GOOSE 网络和 SV 网络的三网合一,且为完全支持无缝恢复的数据冗余双网,显著提高了网络的整体可靠性。同时由于网络结构的统一化,有效降低了工程应用时交换机配置管理及维护的复杂度。当本网络中任一设备发生故障时,对于其他发送和接收节点而言,总有 1 份有效报文被发送出去或接收下来,消除了传统 GOOSE 和 SV 单网模式下发生网络故障时的固有缺陷,并解决了传统双网网络故障切换恢复时间较长导致的短时通信中断或数据丢失问题,进一步提高了全站保护功能的可靠性。

2.2 关键技术及设备研制

变电站内支持 PRP/HSR 协议的二次典型设备装置的原理框图如图 5 所示。研制此系统的关键在于采用 FPGA 实现 PRP/HSR 冗余网络通信功能,主

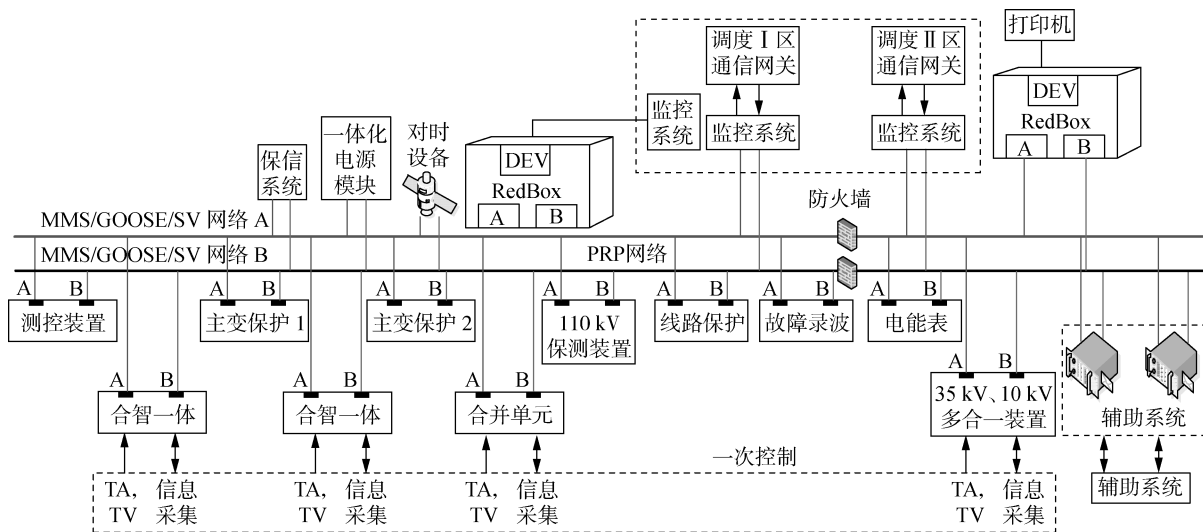


图 4 基于 PRP 的三网合一网络结构图

Fig.4 Structure of three-in-one network based on PRP

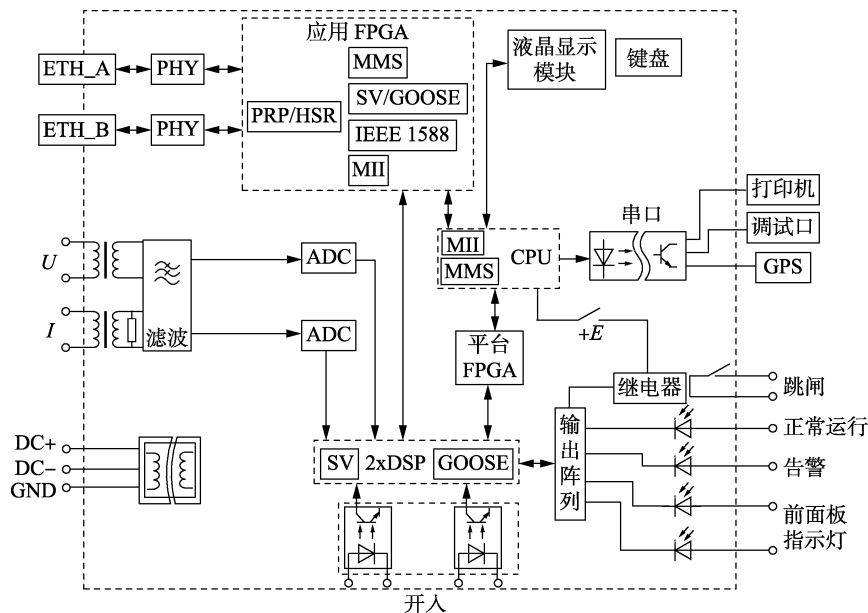


图 5 典型设备原理框图

Fig.5 Principle diagram of typical device

要包括以太网 MAC 开发、PRP/HSR 查找表、丢弃算法设计和网络风暴抑制模块等。

MMS、GOOSE 和 SV 报文通过网络端口 A 和端口 B 进入应用 FPGA 后,内部 PRP/HSR 协议模块只接收先到达的报文,通过网络风暴抑制模块^[13]、网络报文分组^[13]模块将各类正常报文分别传送到 CPU、数字信号处理器(DSP)模块进行处理。MMS 报文由应用 FPGA 通过以太网 MII 接口传给通信 CPU,CPU 根据报文内容完成相应信息的上送和下发。SV、GOOSE 报文由应用 FPGA 通过高速通信通道传送给 DSP 进行运算,保护跳闸动作可由 DSP 启动元件和 DSP 动作元件共同配合完成;GOOSE 实时报文^[14]由 DSP 将数据发送给应用 FPGA,应用 FPGA 通过 PRP/HSR 模块将 GOOSE 报文复制为 2 份后同时向端口 A、端口 B 发送。在报文优先级管控方面,按业务优先级等级顺序处理 SV 报文、GOOSE 报文、MMS 报文及其他报文。在基于 PRP 的模式下,三网共口发送时,为满足 SV 报文发送离散度指标要求,需要优先等间隔、周期性地发送 SV 报文,在端口发送报文的时间间隙优先发送 GOOSE 报文后再发送其他报文;在 HSR 模式下,三网共口发送时,为保证 SV 报文的实时性,优先转发环网及本节点中的 SV 报文,以减少本帧报文的整体延时。

为满足单连接节点设备接入冗余网络的需要,本文同时研制了 RedBox 设备,其典型硬件原理框图如图 6 所示。系统采用 FPGA 实现 PRP/HSR 功能,FPGA 通过 MAC_A 和 MAC_B 扩展 2 个以太网口 ETH_A 和 ETH_B 用于接入 PRP/HSR 网络中,通过 MAC_DEV_A 扩展端口 DEV_A 连接单节点设备。

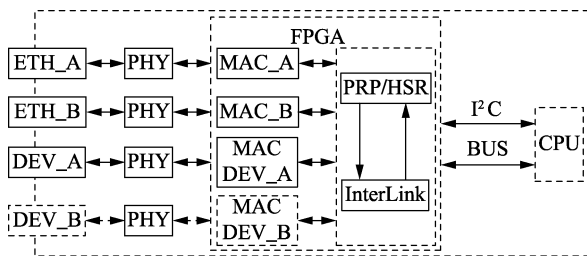


图 6 RedBox 硬件原理框图

Fig.6 Hardware diagram of RedBox

在星形组网模式下,RedBox 基于 PRP 运行。发送报文时,RedBox 将报文复制为 2 份分别向端口 A 和端口 B 发送;在接收报文时,RedBox 接收端口 A 和端口 B 中先到的报文,从端口 DEV_A 发送给设备。

在环形组网模式下,RedBox 基于 HSR 运行。源节点设备发送报文时,RedBox 将 1 帧报文复制为 2 份,分别从以太网口 ETH_A 和 ETH_B 向外发送,非目标节点设备的 RedBox 将 1 个端口接收到的报文转发到另一个端口,目标节点设备的 RedBox 接收

到报文后仅把先到达的报文发送给目标节点设备。RedBox 可以通过扩展端口 DEV_B 升级为四端口冗余盒(QuadBox),不同的 HSR 环网可通过 QuadBox 进行级联。

2.3 功能实现及软件配置

本文所述的 DAN 设备和 RedBox 的 PRP/HSR 均由 FPGA 实现,PRP/HSR 模块的参数配置和工作状态信息读取由管理 CPU 实现。

2.3.1 基于 FPGA 的 PRP/HSR 实现方案

本文设计的基于 FPGA 的 PRP/HSR 实现方案中,数据链路层 MAC、接收转发存储控制模块、PRP/HSR 查表模块、丢弃算法模块以及网络报文分组处理、报文优先级调度、风暴过滤模块等网络报文管控模块^[13]等都基于 FPGA 以 IP 核的形式实现,上层报文(如 MMS 报文、GOOSE 报文、SV 报文以及传输控制协议/因特网互联协议(TCP/IP)协议栈等)的协议处理通过 CPU/DSP 软件代码实现,其基本工作原理如图 7 所示。

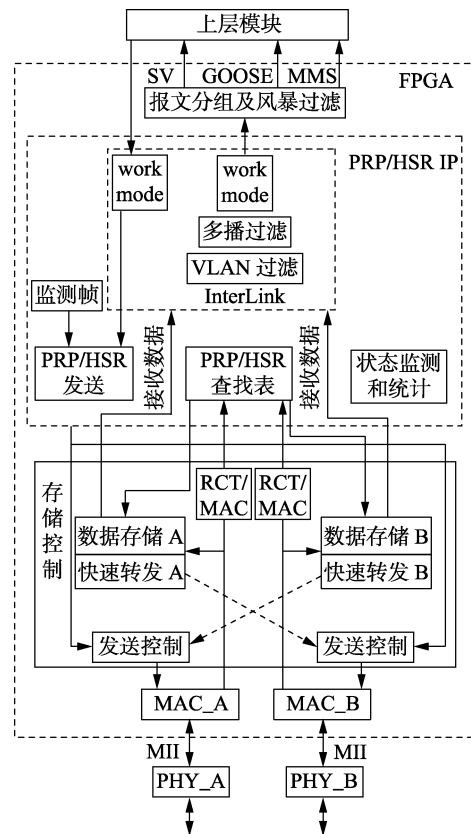


图 7 双网冗余功能的实现

Fig.7 Implementation of dual network redundancy

2.3.2 报文快速实时转发实现方案

PRP 模式下的报文接收流程如下:当模块接收外部报文时,物理层双路 PHY 芯片接收比特流并通过 MII/GMII 接口传输至 FPGA 芯片,FPGA 中的 MAC 模块完成链路层数据校验,并识别 PRP 报文类型、报文 MAC 地址以及冗余控制尾缀(RCT)标识等

信息,存储控制模块将完整接收到的报文放入接收缓存,然后根据 MAC 提供的 PRP 信息,向 PRP/HSR 查找表模块提交查询请求,PRP/HSR 查找表模块根据 PRP 查找表算法返回的结果确定端口 A 或者端口 B 接收缓存的有效性,最终决定将哪一份报文发送至上层模块。

PRP 模式下的发送流程如下:发送模块接收上层模块的报文,增加 PRP 报文 RCT 标识等信息,将报文同时拷贝到端口 A 和端口 B 的存储控制模块发送缓存中,并由 MAC 控制器完成报文发送。

HSR 模式下,本文将报文转发延时定义为 FIFO (头进头出),即从输入帧的第 1 个比特到达输入端口开始,直至在输出端口上检测到输出帧的第 1 个比特为止的时间间隔,以报文帧首定界符(SFD)域的最后一位为准。第 2 版 HSR 规定 HSR 标识在以太网报文的源地址之后^[6],如图 8 所示,则在报文未完整接收时即可获取 HSR-tag 信息。

preamble	destination	source	VLAN tag	HSR-tag	LSDU	FCS
8 Byte	6 Byte	6 Byte	4 Byte	6 Byte	46~1494 Byte	4 Byte

图 8 HSR 报文帧格式

Fig.8 Format of HSR message frame

本文利用上述特点实现了报文快速实时转发的技术机制,即 DANH 的某一端口(比如端口 A)接收到 HSR 报文标识后,立即启用丢弃算法来判断是否需要从另外一个端口(端口 B)转发此报文,避免了通过完整接收、存储整帧报文后再进行处理的情况,有效缩短了报文转发延时,如图 9 所示。

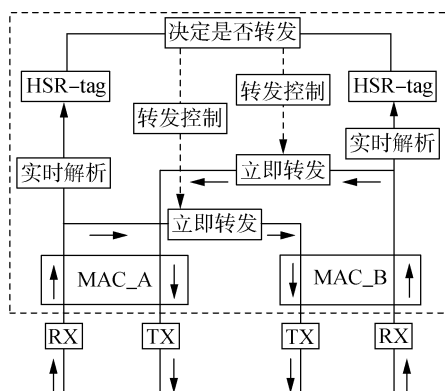


图 9 HSR 快速实时转发原理

Fig.9 Principle of fast real-time forwarding of HSR

FPGA 中的 MAC 控制器模块在接收报文过程中同时完成数据帧校验,并识别 HSR 报文类型,存储控制模块将接收到的报文同时拷贝到接收缓存和转发缓存,PRP/HSR 查表模块提前获取来自 MAC 控制器模块的 HSR-tag 信息并返回结果,从而决定端口 A 或者端口 B 接收缓存和转发缓存的有效性。

对于需要转发的报文,存储控制模块立即开始向另外一个端口转发此报文,此时 2 个端口的状态是边接收边转发。当报文转发时,若链路被占用,则

会出现排队现象,并且这个排队延时是不固定的,与等待报文的长度及通信实际传输速率有关。

本节点需要正确接收的报文将被完整存储并通过报文过滤、报文分组分别存入不同的应用缓存区供上层模块使用。当本节点向外部发送 HSR 报文时,本模块在发送报文中增加 HSR 及 RCT 标识等信息,将报文同时拷贝到端口 A 和端口 B 的存储控制模块发送缓存中,如果端口没有被转发占用,则立即由 MAC 完成发送,如果端口被转发占用,则待排队延时后再发送。

2.3.3 工作参数配置以及状态获取

双连接节点和 RedBox 的运行参数由管理 CPU 配置,配置接口可采用 LocalBus 并行总线,或者 I²C、串行外设接口(SPI)等串行总线接口。CPU 软件对 PRP/HSR 设备的配置内容主要有两方面:配置 PRP 或 HSR 工作模式;配置端口 A、端口 B 为同一通信速率模式。

CPU 软件可分别读取设备端口 A 和端口 B 各自的状态监测和统计信息,包括:

- 报文统计信息,包括正确报文数量、错误报文数量等;
- 结点信息表,包括远端结点地址、接收报文数量、最后报文接收时间等;
- 故障指示信息,包括网络 A、B 速率不匹配和网络断链等。

3 延时分析、性能测试与验证

本文分别通过典型测试系统在不同背景流量下对单结点的定量测试来验证 PRP/HSR 对三网合一网络通信的可靠性和实时性的影响。

3.1 单节点驻留延时测试

为更好地测试单节点设备网络延时的性能,本文采用如附录中图 A2 所示的测试系统,其中 RedBox 为本文所述的支持 PRP/HSR 功能的典型单节点设备,测试设备为 SPIRENT 公司的 TestCenter 网络数据测试仪。考虑到实际工程应用的网络带宽适应性,测试中所有网络端口的通信带宽均配置为 1 000 Mbit/s。

在 PRP 模式下,网络报文只在 DEV 端口和 A/B 端口之间进行转发,通过网络测试仪向 RedBox 的 DEV 端口施加报文流量,这些报文经过一段延时后从端口 A、B 转发出来。本文测试 PRP 模式下 DEV 端口和测试端口 A、B 在不同报文流量下的转发延时和丢包率,测试结果如表 1 所示。

由表 1 可见,PRP 模式下,DEV 端口与端口 A、端口 B 之间的转发延时和报文实际长度所需传输时间呈正相关。其原因是 DEV 端口与端口 A、端口 B 之间的以太网数据交换采用存储转发机制,即完整

表 1 PRP 模式下的测试结果

Table 1 Testing results under PRP mode

测试报文 长度/Byte	DEV 端口报文 流量/(Mbit·s ⁻¹)	转发延时/ μ s			丢包 率/%
		最小	最大	平均	
70	100	1.84	2.16	1.85	0
	500	1.85	2.17	1.85	0
512	100	6.47	6.78	6.47	0
	500	6.47	6.79	6.47	0
1 518	100	17.02	17.46	17.05	0
	500	17.04	17.48	17.05	0

地接收存储报文后才开始转发,而且 PRP 模式下端口 A 和端口 B 之间无报文转发。

在 HSR 模式下,端口 A 或 B 发送的报文既有从端口 B 或 A 转发过来的,也有从 DEV 端口转发过来的,本文通过网络测试仪在 RedBox 的端口 A 施加报文流量,同时在 RedBox 的 DEV 端口施加不同的背景流量,测试在不同报文流量及背景流量下报文从端口 A 转发至端口 B 时的转发延时及丢包率情况,测试结果如表 2 所示。

表 2 HSR 模式下的测试结果

Table 2 Testing results under HSR mode

测试报文 长度/Byte	DEV 端口背 景流量/ (Mbit·s ⁻¹)	端口 A、B 网络流量/ (Mbit·s ⁻¹)	转发延时/ μ s			丢包 率/%
			最小	最大	平均	
70	0	100	1.25	1.85	1.28	0
		500	1.26	1.85	1.28	0
	20	100	1.25	2.57	1.40	0
		500	1.25	2.57	1.48	0
	100	100	1.25	2.58	1.47	0
		500	1.25	2.57	1.53	0
512	0	100	1.25	1.85	1.28	0
		500	1.26	1.85	1.27	0
	20	100	1.25	5.51	1.68	0
		500	1.25	5.51	1.77	0
	100	100	1.25	5.51	1.70	0
		500	1.25	5.52	1.79	0
1 518	0	100	1.25	1.85	1.28	0
		500	1.26	1.85	1.28	0
	20	100	1.26	14.15	1.87	0
		500	1.25	14.16	1.90	0
	100	100	1.26	14.15	1.88	0
		500	1.26	14.16	1.92	0

由表 2 可得出如下结论。

a. HSR 模式下,网络带宽固定(本文为 1 000 Mbit/s)时的端口 A 与端口 B 之间的最小转发延时和报文长度无关。其原因是在 HSR 模式下端口 A 与端口 B 之间的以太网报文传输采用快速实时转发机制,即其中 1 个端口接收到 HSR 报文标识后,FPGA 如判断此报文需要转发,则立即选择从另外 1 个端口开始转发此报文。最小转发延时是在无 DEV 端口插队报文时产生,因此不同长度的报文的最小转发延时指标基本一致。

b. HSR 模式下,在 DEV 端口有背景流量输入时,端口 A 与端口 B 之间的最大转发延时和 DEV 端

口的输入报文长度正相关,这是因为端口 A 与端口 B 之间的报文转发可能被 DEV 端口报文插队,插队等待时间和 DEV 端口输入报文长度正相关。

c. HSR 模式下,DEV 端口输入报文流量对端口 A 与端口 B 之间的最大转发延时和最小转发延时无影响,但对平均转发延时有影响,分析原因是 DEV 端口施加的报文流量越大,越容易导致端口 A 与端口 B 之间报文转发频繁排队等待的情形发生。

3.2 基于 PRP 的智能变电站系统测试

本文在辽宁电科院采用 PRP 网络进行了智能变电站典型系统的网络性能摸底测试,测试系统如图 10 所示。测试典型装置由 110 kV 保护装置、110 kV 测控装置、15 台合智一体装置、故障录波器装置等组成,网络采用千兆光纤以太网,测试过程施加一定干扰的网络报文流量,测试结果如表 3 所示。

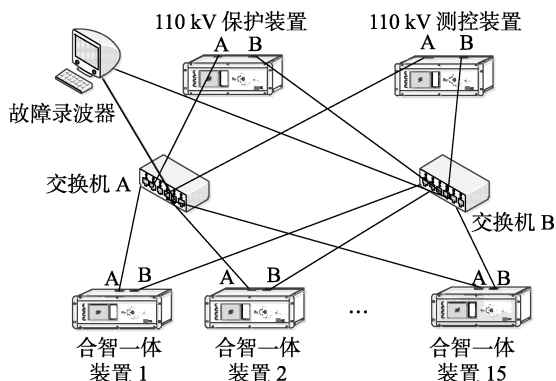


图 10 基于 PRP 的智能变电站系统测试

Fig.10 Test of smart station system based on PRP

表 3 智能变电站系统 PRP 网络性能

Table 3 Performance of smart substation based on PRP network

网络背景流量/ (Mbit·s ⁻¹)	保护动作时间/ms			丢包率/%
	最小	最大	平均	
100	15.395	15.419	15.405	0
500	15.420	15.437	15.423	0
700	15.425	15.439	15.430	0

表 3 所示的测试结果表明:

a. 基于 PRP 架构的智能变电站系统的保护最大动作时间为 15.439 ms,平均动作时间约为 15.430 ms,与常规网络情况下保护平均动作时间基本相同;

b. 在网络中加入 10%~70%的背景流量(网络带宽为 1 000 Mbit/s),当背景流量达到 70%时,故障录波装置仍然能够正常记录报文并进行流量过负荷告警,保护装置仍能够正确动作。

4 基于 HSR 双向环网的分布式母线保护应用分析

传统分布式母线保护的主机由于光通信端口数量较多,存在设备发热量大、数据计算处理相对集中、运行负荷重的情况。本文设计并探讨了一种基于千兆 HSR 双向环网的分布式母线保护实现方案,

如图 11 所示。母线保护主机与子机装置均配置支持 HSR 的网络端口 A、端口 B,采用千兆光纤以太网实现 GOOSE 网、SV 网、管理报文网三网合一的集成应用。该方案大幅减少了母差主机设备的光口数量,使保护及计算功能的分布更加自由,各间隔支路数量的扩展也更加灵活。

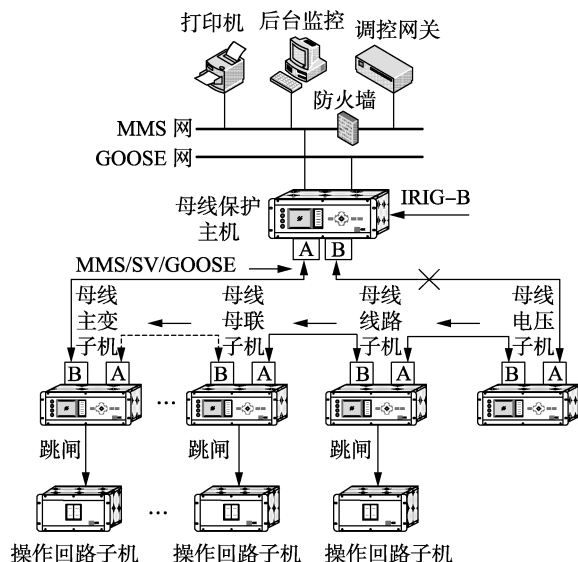


图 11 基于 HSR 双向环网的分布式母线保护方案

Fig.11 Distributed bus protection Based on HSR ring network

系统中主机的 HSR 网络端口接收来自子机的 GOOSE、SV 报文,完成数据同步,实现保护逻辑,并向子机发送 GOOSE 报文;主机提供独立对外的 MMS、GOOSE 网络端口、IRIG-B 对时输入等接口。其使用独立 MMS 网络端口与后台进行 MMS 网络通信,并通过独立 GOOSE 网络端口与其他保护交互失灵启动、失灵联跳等信息。主机通过对时输入接口实现装置时间与全球定位系统(GPS)的同步功能,并向子机广播对时报文,实现环网系统内各子机在世纪秒的时间同步。

母线保护子机装置主要实现采集检修压板、断路器位置、刀闸位置、手合信号等开入信息以及电压、电流等模拟量信息,以 GOOSE 报文和 SV 报文方式发送到 HSR 环网网络^[15]中;子机同时接收环网外部接口的 GOOSE 报文实现跳闸操作;子机通过管理报文接收主机的配置管理,上传本地运行状态信息。

本系统的模拟量采样与同步不依赖于外部 GPS/北斗卫星导航系统(BDS)时钟,实施方案采用基于 FPGA 的环网报文延时测量及补偿方法对 SV 报文的延时值进行实时修正,存储在当前帧报文内容中,当主机获得所有子机的 SV 报文(含延时信息)后,进行模拟量数据的重采样同步处理。

在本系统的千兆 HSR 双向环网中,假设出现母线电压子机与母线保护主机直接连接的网线发生中

断,此时母线电压子机发送的报文需要从环网左边路径经过所有子机逐个转发后才能到达母线保护主机,报文所经历的延时即为网络报文的最大延时时间。子机数量和网络报文长度不同的情况下,报文最大延时值的测试结果如表 4 所示。由表 4 可见,网络报文满足传输延时不超过 1 ms 的技术要求。

表 4 网络报文最大传输延时

Table 4 Maximum transmission delay of network packet

报文长度/Byte	最大传输延时/ μ s		
	8 个子机	16 个子机	32 个子机
70	21.24	42.87	87.76
512	45.36	90.92	182.03
1 518	109.08	218.16	436.48

基于 HSR 双向环网的分布式母线保护在初始设计阶段,主机可按照远期规划进行配置,实际运行中将备用间隔对应的 SV、GOOSE 软压板退出。在进行间隔扩建时,按照主机和子机的映射关系,设置子机的地址,短时断开单向光纤回路后将扩建间隔的子机接入环网,主机重新投入间隔相关软压板即可完成扩建。实际运行过程中如出现单台子机失电或其他异常情况时,母差子机会通过内部集成的光纤环路自适应旁路模块继续保持光纤双向环网的可靠通信,严格保证了单一元件故障不影响其他保护运转的功能。

5 结语

在智能变电站三网合一网络中采用 PRP/HSR 技术,解决了三网合一应用中面临的网络通信实时性和可靠性问题,满足了智能变电站自动化系统的要求,简化了智能变电站的网络架构。由于 HSR 环网非对称路径延时不一致,基于 HSR 环网中的 IEEE1588 PTP 协议的网络对时实现更为复杂,因此,研究基于 HSR 组网条件的 IEEE1588 对时应用与实现是下一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱全聪,苏杰,赵永辉,等. 智能变电站三网合一的网络架构分析与研究[J]. 机电信息,2012(36):142-143.
ZHU Quancong, SU Jie, ZHAO Yonghui, et al. 3-in-1 network structure analysis and research of smart substation[J]. Mechanical and Electrical Information, 2012(36):142-143.
- [2] 胡建斌,常晓杰,黄荣辉,等. 智能变电站过程层“三网合一”组网方案及 VLAN 划分[J]. 电工技术,2011(9):10-13.
HU Jianbin, CHANG Xiaojie, HUANG Ronghui, et al. 3-in-1 network scheme and VLAN divide[J]. Electric Engineering, 2011(9):10-13.
- [3] 樊陈,倪益民,窦仁辉,等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network

- scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [4] 秦川红. 智能变电站通信网络实时性与安全性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- QIN Chuanhong. Research on real-time and security of communication network in smart substation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [5] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范: Q/GDW 441—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] IEC. High availability automation networks-part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR): IEC 62439-3-2010[S]. [S.L.]: IEC, 2010.
- [7] 程子敬, 李富, 李周. 一种高可靠并行环网的研究与实现[J]. 电子设计工程, 2011, 19(23): 99-101.
- CHENG Zijin, LI Fu, LI Zhou. Research and implementation of a high available parallel ring ethernet[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(23): 99-101.
- [8] 陈原子, 徐习东. 基于并行冗余网络的数字化变电站通信网络构架[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 105-108.
- CHEN Yuanzi, XU Xidong. Communication network structure of digital substation based on parallel redundancy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 105-108.
- [9] 谢志迅, 邓素碧, 臧德扬. 数字化变电站通信网络冗余技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 100-103, 120.
- XIE Zhixun, DENG Subi, ZANG Deyang. Redundancy technique of digital substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 100-103, 120.
- [10] 陈福锋, 俞春林, 张尧, 等. 变电站继电保护就地化整体解决方案研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 204-210.
- CHEN Fufeng, YU Chunlin, ZHANG Yao, et al. Research on integrated solution of on-site substation relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 204-210.
- [11] 卢岩, 宋玮, 于同伟, 等. 智能变电站过程层数据共网可靠性研究[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(6): 51-55.
- LU Yan, SONG Wei, YU Tongwei, et al. Research on reliability of the process layer data in one network on smart substation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(6): 51-55.
- [12] 李俊刚, 宋小会, 狄军峰, 等. 基于 IEC62439-3 的智能变电站通信网络冗余设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 70-73.
- LI Jungang, SONG Xiaohui, DI Junfeng, et al. Communication network redundancy design of intelligent substation based on IEC62439-3[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.
- [13] 周华良, 郑玉平, 姚吉文, 等. 面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 96-100, 131.
- ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YAO Jiwen, et al. Network packet control technology for secondary equipments in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96-100, 131.
- [14] 范荣全, 肖红, 李琪林. 智能变电站 GOOSE 通信网实时性分析[J]. 计算机科学, 2011, 38(b10): 444-446.
- FAN Rongquan, XIAO Hong, LI Qilin. Real-time performance analysis of GOOSE communication network in smart substation[J]. Computer Science, 2011, 38(b10): 444-446.
- [15] 许铁峰, 徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.
- XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.

作者简介:



周华良

周华良(1980—),男,江苏吴江人,高级工程师,硕士研究生,研究方向为电力二次设备共性平台技术(E-mail: zhouhualiang@sgepri.sgcc.com.cn);

郑玉平(1964—),男,福建莆田人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

杨志宏(1968—),男,江苏南京人,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化。

Implementation scheme of three-in-one network based on PRP/HSR in smart substation

ZHOU Hualiang^{1,2,3}, ZHENG Yuping^{1,3}, YANG Zhihong^{1,2,3}, XIE Li^{1,2}, JIANG Lei^{1,2}, WANG Kai^{1,2}

(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: The application status of three-in-one network, which integrates MMS (Manufacturing Message Specification) network of station level, GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) network and SV (Sampling Value) network of process level in smart substation, is analyzed. Aiming at the problems of real-time performance and reliability of network communication, an implementation scheme of three-in-one network based on PRP/HSR (Parallel Redundancy Protocol/High-availability Seamless Redundancy) protocol in IEC62439-3 standard for smart substation is proposed, and the key development points of key equipments are summarized. The experimental and testing results verify the reliability of the proposed scheme. The application design and analysis of distributed bus differential protection based on HSR ring network are carried out.

Key words: three-in-one network; smart substations; PRP/HSR; dual-network redundancy; seamless recovery

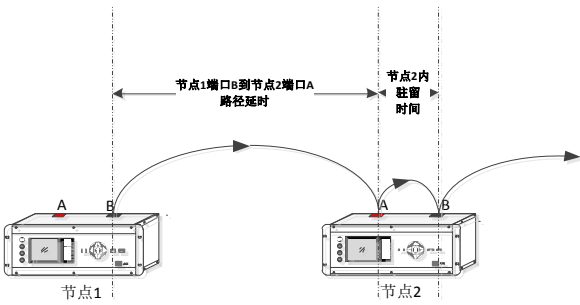


图 A1 传输时延示意图

Fig.A1 Schematic diagram of transmission delay

图中，节点 1 为报文数据源结点，节点 2 为报文转发的单结点（可能是支持 PRP/HSR 的一台网络交换机或其他双结点设备等）。

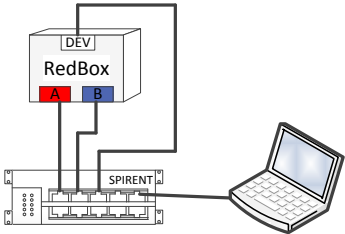


图 A2 基于 RedBox 的 PRP/HSR 网络测试示意图

Fig.A2 Schematic diagram of test based on RedBox for PRP/HSR network