

# HSR 在第三代智能站中的实现技术<sup>\*</sup>

杨世皓<sup>1</sup>, 邹晓峰<sup>1</sup>, 陈玉峰<sup>2</sup>, 文博<sup>3</sup>

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 湖北电力公司, 武汉 430000)

**摘要:** 现有智能变电站的网络冗余方案多采用 A/B 网方案, 底层链路与服务协议耦合较深, 难以通过标准硬件模块进行通用处理, 并且带来了系统负荷较重、成本高昂、网络可靠性过度依赖核心交换机设备等各种问题。IEC 62439-3 标准中, 提供了 PRP 和 HSR 的方案, 分别在星型网络和环网网络结构中有效解决了这些问题。文中主要以 HSR 方案和实现技术为对象, 研究第三代智能变电站就地模块基于 IEC 62439-3 标准的 HSR 组网实现技术, 主要包括基于软件底层驱动和 FPGA 交互的互联实现技术、IEEE 1588 对时标准在 HSR 环网的实现技术和基于延时可测技术的 HSR 环网时间敏感数据同步方案。该项技术为就地模块的高可用性环网实现提供了技术支持。

**关键词:** 智能变电站; 网络冗余; 时间同步; 风暴抑制

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2019.022.009

**中图分类号:** TM933

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-1390(2019)22-0051-07

## Implementation technology of HSR in the third generation smart substation

Yang Shihao<sup>1</sup>, Zhou Xiaofeng<sup>1</sup>, Chen Yufeng<sup>2</sup>, Wen Bo<sup>3</sup>

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200000, China.

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China. 3. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The existing network redundancy schemes of smart substation mostly adopt A/B network scheme. The underlying links are deeply coupled with service protocols, which make it difficult to use standard hardware modules for general processing. It also brings various problems such as heavy load, high cost and dependence of network reliability on core switch equipment. In IEC 62439-3 standard, PRP and HSR are provided to solve these problems effectively in star network and ring network structure respectively. This paper focuses on HSR standard and implementation technology, and studies the implementation technology of HSR networking based on IEC 62439-3 standard for the local module of the third generation smart substation. It mainly includes the interconnection technology based on software bottom driver and FPGA interaction, the implementation technology of IEEE 1588 pair-time standard in HSR loop network, and time-sensitive data synchronization scheme for HSR ring network based on delay measurement technology. This technology provides technical support for the implementation of high availability ring network of local module.

**Keywords:** smart substation, network redundancy, time synchronization, storm suppression

### 0 引言

2009年起, 国家电网公司启动智能变电站试点建设, 2011年全面推广建设智能变电站, 2012年提出研究与建设新一代智能变电站。目前智能站采用“三层两网”结构, 由站控层、间隔层、过程层及站控层网络、过程层网络组成, 具有“一键操作、智能决策、主动预

警”等功能。智能变电站经过一系列的建设工作, 通信网络在网络结构和性能指标等方面都得到了改善<sup>[1-2]</sup>, 但是目前仍然面临一些问题:

#### (1) 网络传输延时问题

变电站系统要求的数据实时性和可靠性远超传统网络, 甚至超过了常见的实时自动化网络。其中对采样数据同步的要求低于一微秒, 总体最高采样延时要求低于 2 ms<sup>[3]</sup>。而普通以太网媒体访问控制采用二

<sup>\*</sup> 基金项目: 国网公司科技项目(52090018002D)

进制指数退避的载波帧多路接入机制,信息传递时延具有无法预测的随机性,数据同步无法满足要求。

(2) 交换机的通信瓶颈和设备成本问题

适用于变电站严苛环境的工业以太网交换机价格昂贵,且光口密集、发热量大,从而造成装置寿命和可靠性下降,同时网络通信状态严重依赖于交换机通信性能的优劣,从而加重了变电站的投资成本。

(3) 冗余标准缺失

目前站内网络冗余多数采用 A/B 网应用于数据双通道发送与接收识别,应用层按照报文序号等双方约定的应用信息进行数据处理。IED 设备之间如何协调配合、是否会对互操作造成影响,存在不确定性。同时冗余的实现难以标准化,往往以牺牲性能为代价,得不偿失。

(4) 组网数据可靠性严重依赖系统对时

IEC 61850 的 SV 数据同步依赖报文序号,也就是数据的采样时间。当整站同步系统不可靠时,不同来源的数据没有统一时间基准,完全不可用。

为解决智能变电站当前存在的问题,进一步推进变电站“更安全、更可靠、更智能”<sup>[4]</sup>,国网公司开展了第三代智能变电站技术研究及试点示范建设,采用新的网络方案重新构建智能变电站的整体网络架构,为智能变电站网络的架构更加合理清晰,网络设备更加可靠,成本有效降低打下技术基础。

1 HSR 技术简介

网络出现网络故障并恢复的时间要小于系统的宽限时间。国际电工委员会第 57 技术委员会 TC57 定义了系统各种工况下网络恢复时间,智能变电站中,各类应用的网络恢复时间要求见表 1,其它领域的宽限时间要求见表 2。

为建设高度有效的自动化网络,国际电工标准委员会 IEC SC65 第 15 工作组推出了 IEC 62439 标准,全称“高可用性自动化网络”。主要内容是使用冗余技术设计基于以太网的高可用性自动化网络,将实现重点聚焦在物理层和数据链路层的故障探测和恢复上。其中,IEC 62439-3<sup>[5]</sup>部分面向工业通信网络(Industrial Communication Network)提供了高可靠性冗余网络的方案,其中 PRP(Parallel Redundancy Protocol,并行冗余协议)和 HSR(High-availability Seamless Redundancy,高可用无缝冗余环网)因其结构清晰,易于互联且能够较好的兼容传统标准,得到了较多的支持 and 应用<sup>[6-9]</sup>。

表 1 IEC 61850 要求的网络恢复时间

Tab. 1 Recovery time of network required by IEC 61850

| 通信组件  | 服务            | 应用容<br>许时间 | 要求通信<br>恢复时间 |
|-------|---------------|------------|--------------|
| SCADA | IEC 61850-8-1 | 800 ms     | 400 ms       |
| 联锁    | IEC 61850-8-1 | 12 ms      | 4 ms         |
| 闭锁    | IEC 61850-8-1 | 12 ms      | 4 ms         |
| 保护跳闸  | IEC 61850-8-1 | 8 ms       | 4 ms         |
| 母线保护  | IEC 61850-9-2 | < 1 个采样间隔  | 0            |
| 采样值   | IEC 61850-9-2 | < 1 个采样间隔  | 0            |

表 2 各类网络实时宽限要求对比

Tab. 2 Comparison of real-time grace requirements  
for various networks

| 应用     | 宽限时间     |
|--------|----------|
| 非自动化系统 | < 10 s   |
| 统通用自动化 | < 1 s    |
| 工业自动化  | < 100 ms |
| 实时自动化  | < 10 ms  |

HSR 基本传输模式见如下:源节点内部业务部分发出标准以太网报文(C 帧)到 HSR 模块,负责转发的源节点 HSR 模块在标准以太网帧中插入 HSR 字段,并重新计算 FCS,形成 HSR 的帧结构(A 帧和 B 帧),分别从 A 口和 B 口发出。

单播模式下:环网中非目标 DANH 接收到其它节点的单播报文后,直接转发,自身不进行处理。目标 DANH 收到环网中源 DANH 的单播报文后,将先到报文中的环网标记删除后传输至本机应用层,丢弃后到的报文,不对环网中的单播报文进行转发。见图 1。

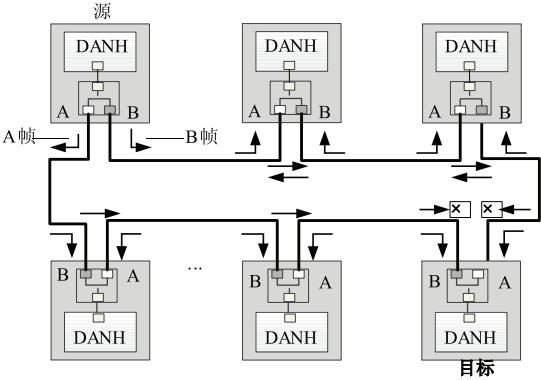


图 1 单播模式的报文转发

Fig. 1 Message forwarding in uni-cast mode

组播/广播模式下:非源发 DANH 收到其它节点的

组播或者广播报文后,直接转发。如果该组播/广播报文已经在本节点注册,则提交应用进行处理。源发 DANH 收到自身发出的组播报文后,停止转发,见图 2。

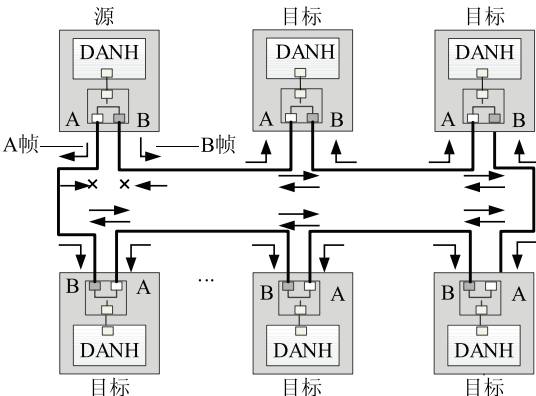


图 2 组播/广播模式的报文转发

Fig. 2 Message forwarding in multicast/broadcast mode

从上面的传输过程可以看到:任意两个节点之间,报文有两条路径可以到达,一条路径中断后,另外一个路径可以正常传输数据,实现了数据的冗余高可用性。报文的两条路径没有主备关系,采用先到有效后到丢弃的原则,因此一条路径中断时,有效数据的采用无需根据路径进行切换,从而达到了零切换时间的效果。采用 HSR 环网方案,与星型双网进行对比,主要有以下特点,如表 3 所示。

表 3 当前变电站冗余方式和 IEC 62439-3 的比较  
Tab. 3 Redundancy mode comparison of current substation and IEC 62439-3

| 项目    | 当前变电站                               | IEC 62439-3                   |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 冗余方式  | 当前变电站冗余方式                           | HSR                           |
| 冗余标准  | 私有协议,面向业务                           | 标准协议                          |
| 通信协议  | 仅支持约定方式                             | 可承载所有协议                       |
| 业务实现  | 需根据业务数据的专有字段和时序状态进行判断,与业务耦合紧密,实现难度大 | 仅需按照单网进行报文收发,无需关心底层的双网备份及容错机制 |
| 处理效率  | 实现方式非标准化,多为软件实现,效率低                 | 较多采用硬件或 FPGA 实现,效率高           |
| 切换延时  | 20 ms 左右                            | 0 ms                          |
| 网络故障  | 丢失数据                                | 不丢数据                          |
| 资源占有率 | 高                                   | 低                             |
| 实现难度  | 面向业务,难度大                            | 面向标准,难度低                      |

HSR 技术的实现意味着电力行业一直渴望的环网冗余的零倒换时间和真正意义上的零丢包在技术上具备了可行性。从表 4 可见,结合各个因素分析,在保证速动性和同步性的前提下,考虑到设备投资、维护方便、功耗等方面的因素,HSR 是一种较为理想的组网方案。

表 4 HSR 环网与星型双网对比表  
Tab. 4 Contrast of HSR ring network and star double network

| HSR 环网     |                                                      | 星型双网                                                                                                                    |
|------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 转发时延(8 节点) | 99.5 $\mu$ s ~ 102.4 $\mu$ s(百兆)                     | 26.1 $\mu$ s ~ 28.2 $\mu$ s(百兆)                                                                                         |
| 网络数据可靠性    | 均为冗余网络,单节点故障不影响数据业务数据的完整性。均可无缝切换,无切换时间               |                                                                                                                         |
| 交换机        | 无需交换机                                                | 每个环要配置两台交换机。每个百兆口光交换机价格至少 1 万元以上                                                                                        |
| 附加设备(成本)   | 光模块<br>每个网络节点 2 个光口<br>光缆(收发一对)<br>光缆数与就地模块个数相同,接线简单 | 每个就地模块两个光口,与之对应的交换机所需的光口需要相同的个数。对于 15 个模块的最大配置,增多 30 个光模块。每个光模块成本价格 100 元左右<br>光缆个数为就地模块个数 $\times$ 2,交换机接线密集,在就地安装操作不易 |
| 功耗         | 就地模块本身功耗                                             | 模块功耗 + 两台交换机功耗。(根据目前交换机使用的情况,每台 16 口交换机功耗约 20 W)                                                                        |
| 数据同步性保证    | 就地模块需要传输 SV 等时间敏感报文,需要对网络时延字段进行修正,自带延时修正功能           | 标准的工业交换机设备不支持延时修正功能,需要使用针对智能变电站专用的具备延时修正功能的交换机,成本高昂,降低了可靠性                                                              |

## 2 IEEE 1588 在 HSR 环网中的实现

IEEE 1588<sup>[10]</sup>的主要原理是通过同步信号,使基于以太网的分布式系统达到同步,具有容易配置、快速收敛以及对网络带宽和资源消耗少等特点,可以达到亚微秒级别时间同步精度。IEEE 1588 通常用于本地化局域网,要求网络环境稳定、安全,并且网络拓扑结构越稳定,精度越高。变电站自动化领域为其典型适用领域:封闭、层次少、拓扑结构简单,固定,精度要求高。IEEE 1588 精度<sup>[11]</sup>(V1 可以提供 100 ns 的时间精确度,对于 V2 版本可达到亚纳秒级精度),取决于协议软硬件的实现层面。实现亚微秒精度时,硬件上要求每个网络节点必须有一个包含实时时钟的网络接口部件,可以实现基于 PTP 协议栈的相关服务。

由于面向的是工业自动化网络,对实时性要求较高,IEC 62439 选择了 IEEE 1588V2 作为 HSR 网络中时钟同步方案。IEC 62439-3 的附录 A 部分,对 IEEE 1588 在 IEC 62439-3 规定的网络(包括 PRP 和 HSR)中的使用方法进行了规定。

如前所述的 HSR 环网中,两帧报文(A 帧和 B 帧)除了路径,其它部分内容是一样的。但由于在环的顺时针和逆时针传输数据的延时是不同的,导致部分 PTP 报文消息中时延相关的内容已经被中间传输节点修改过了,意味着 DANH 在两个端口接收到报文内容不同,因此标准的 HSR 操作模式不适用于 PTP 帧。

针对不同的硬件实现,标准规定了一步法和两步法两种方案。

(1) 对于一步操作,每个 DANH 实现了一步的同步和延时请求报文传输,按照图 3 所示方式交互信息;

(2) 针对没有硬件修改报文能力的环网节点设备,作为另外的选择,可以用两步法来操作修正,按照图 4 所示。

从变电站的应用场景来看,报文转发必须通过 FPGA 实现来保证实时性,也就是设备已经具备了 FPGA 在线实时修正延时的能力。而采用两步法,就需要软件修改报文后重新发送,影响转发规则。如果此时有非 PTP 报文通过节点转发,会导致报文序号混乱。因此在具备硬件条件的实现方案中,一步法实现更具优势。

## 3 时间敏感数据的网络延时修正

在变电站环网中,大量传输的是 SV 和 Goose 报文,为保证采样数据精度要求,对报文时间同步要求达到 1  $\mu$ s。

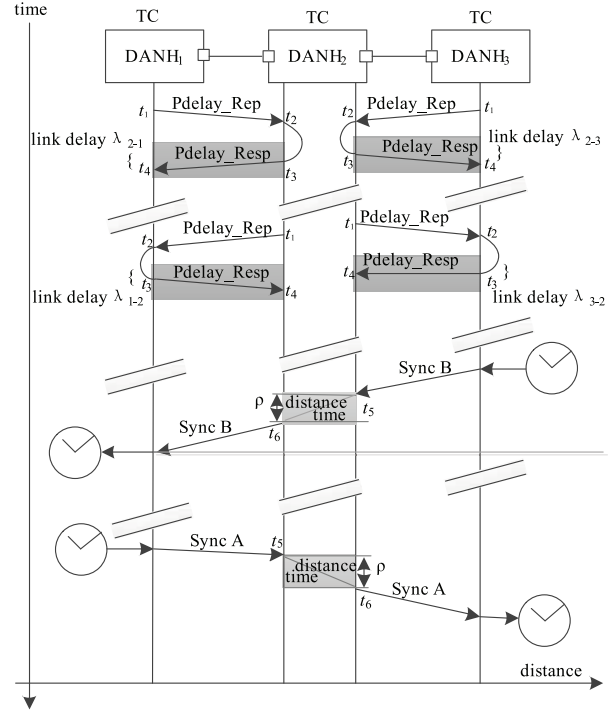


图 3 HSR 环网中 1588 的一步法实现时序

Fig. 3 PTP messages sent and received by an HSR node 1-step

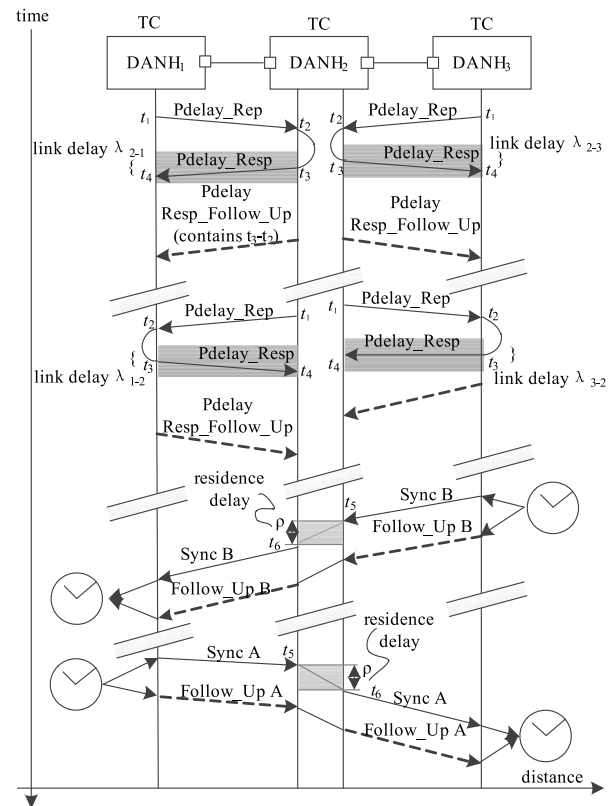


图 4 HSR 环网中 1588 的两步法实现时序

Fig. 4 PTP messages sent and received by an HSR node 2-step



存储转发模式下,报文在通过每个节点进行转发时都会带来一定延时。延时由两部分组成,一部分为转发时间,一部分为报文内容产生时间。

对于本地数据和转发数据同时需要发送的情况,SV 等对同步性能要求高的数据的最大转发延时就会超出同步精度要求,原报文透明转发无法满足要求。

为解决这一问题,文中在 HSR 环网中引入报文延时修正域 (FTCF) 的概念,由报文本身携带其延时时间。利用延时修正域传输报文延时,每经过一个节点修正一次,直到所有节点传输结束,再利用接收时刻与该延时进行修正处理,获得报文数据实际采样时刻。报文从节点到节点,其延时计算公式如式(1)所示。

$$\tau_{mn} = \sum_{i=n+1}^m \tau_{\text{link}_{in}} + \sum_{i=n}^m \tau_{\text{stay}_i}, \quad (m > n) \quad (1)$$

式中  $\tau_{\text{link}_{in}}$  表示节点间链路传输时间;  $\tau_{\text{stay}_i}$  表示节点驻留时间。从节点 1 传递至节点 2 其示意如图 5 所示。

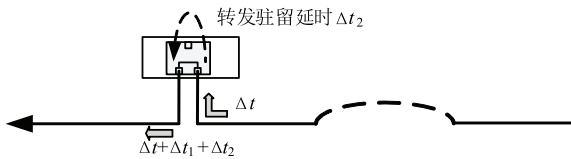


图 5 报文延时修正域维护示意图

Fig. 5 Maintenance diagram of message delay correction domain

节点 1 的采样到节点 2 的总延时包括节点 1 采样延时,报文在节点 1 的驻留时间,计入延时修正域,节点 2 得到节点 1 的延时修正域再加上报文在节点 1、2 间的传输延时即为节点 1 报文到达节点 2 的总延时。

帧传输延时修正域 FTCTF (Frame Transmit Correction Field) 字段值为报文经过该节点的驻留时间,为 32 位字段,其中最高位代表有效性标志,1 代表 FTCTF 无效,0 代表 FTCTF 有效;FTCTF 单位为纳秒。

当报文从环网中某一节点发出时,最高位字段为 0,之后报文经过环网中的每一个节点,该字段增加的值为报文经过该节点的驻留时间。

若报文经环网的某一个节点,增加的驻留时间导致 FTCTF 有效范围溢出,可将有效性标志置无效。

为保证数据发到环外时报文延时的兼容性和有效性,兼容国网延时可测交换机的延时累加字段。

交换延时累加功能遵循以下规定:

交换延时累加值 (ART) 的分辨率为 8 ns,字长为 24 bit,最大值为 0xFFFFF (134 217 720 ns);

交换机仅对符合 DL/T 860 规定的 SV 数据帧进行

交换时延的累加;

默认情况下,溢出标志位 (OVF) 置为 0;

当交换机检测到累加本机交换延时会后导致 ART 值的溢出,或交换机由于硬件故障等原因无法完成交换延时累加功能时,将 OVF 标志位置 1,ART 值保持不变;

由于交换延时累加功能和 IEC 62351-6<sup>[12]</sup>、IEC 62351-7<sup>[13]</sup> 都使用 SV 数据帧的保留字段,出于兼容性考虑,当使用 IEC 62351 功能时,交换机将 OVF 标志位置 1,保留字段保持不变;

交换机检测到 OVF 标志位为 1 时,保持 SV 数据帧的保留字段不变;

SV 数据帧长度为 70 ~ 1524 字节,交换机端口线速转发时,交换延时累加功能正常工作。

#### 4 可靠性传输和风暴抑制策略

变电站的业务场景报文类型基本确定,且环网相对封闭,因此对业务报文转发采用了白名单机制,白名单以外的数据直接被丢弃,保证环网内只传输规定的业务报文。总体处理流程见图 6。

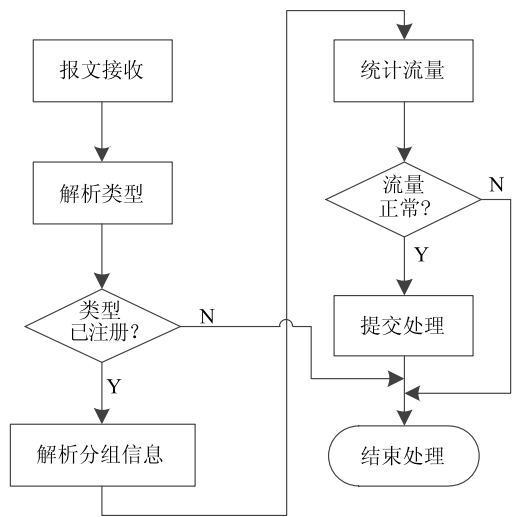


图 6 异常报文处理流程

Fig. 6 Processing flow of exception message

针对外部异常报文注入或环网节点故障产生的业务报文网络风暴,采用了精确流量抑制功能,针对每个节点和每组 SV/Goose 进行最大流量设置,当该组数据流量超过阈值时不再进行转发,避免异常报文占用带宽影响正常报文传输。

#### 5 软件 + FPGA 交互的 HSR 网络基本功能实现

目前的自动化通信市场上,支持 HSR 的产品和模块正在逐步增加,为网络设备提供了 HSR 的环网接入能力。但是这些模块主要采用面向通用通信业务的技

术方案,重点主要放在互联互通的标准协议实现上,对报文延时补偿、网络风暴、电力系统个性化业务需求没有涉及。为降低存储转发带来的延时,一些解决方案转发采用 CUT-THROUGH 模式,数据的完整性和安全性难以保证。

文中选择了 Zynq7000 作为硬件实现平台,该 SOC 采用双核 ARM Cortex-A9 MPCore + FPGA 的架构,结合低功耗 28 nm 工艺技术,以实现高度的灵活性、强大的配置功能和高性能。

具体实施采用了软件 + FPGA 的混合实现方案。这种方案能够把环网实现的不同模块在 FPGA 和软件中灵活部署,对需要实时处理的部分,部署在 FPGA 中。对于逻辑较为复杂的实现,部署在软件中。图 7 所示环节部署和实现方案如表 5 所示。

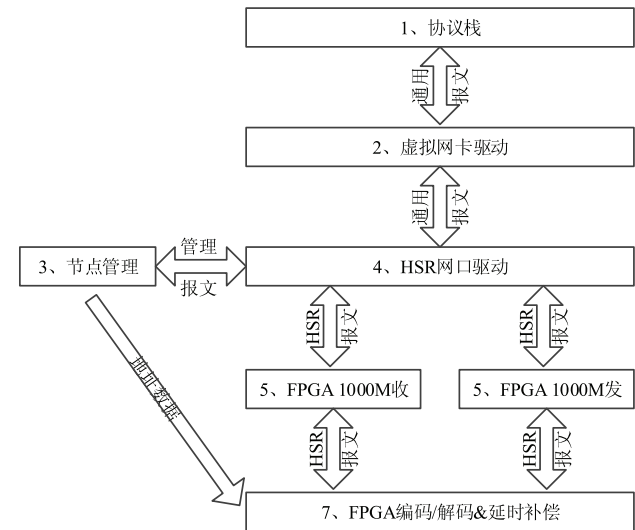


图 7 软件 + FPGA 架构层次

Fig. 7 Architectural level of soft and FPGA

表 5 部署和实现说明  
Tab. 5 Deployment and implementation instructions

| 环节编号 | 部署位置 | 实现说明                                                   |
|------|------|--------------------------------------------------------|
| 1    | 软件   | 原有协议栈软件功能,不用修改。保证对外接口的兼容性                              |
| 2    | 软件   | 协议栈驱动,把直接对 FPGA 的独立网口的操作改为对 HSR 配对网口的操作,通过映射调整         |
| 3    | 软件   | 新增功能,进行网络节点配置管理,包括管理报文的收发和网络节点地址                       |
| 4    | 软件   | 通过映射把虚拟网口报文复制为两份,提交给 FPGA 发送;把 FPGA 接收报文进行过滤,提交到虚拟网口接收 |
| 5、6  | FPGA | 1000 M 网口的收发实现,FPGA 保证                                 |
| 7    | FPGA | 根据本地地址实现报文编解码和延时补偿                                     |

6 试验分析

按变电站中测控子机和就地模块的组网规模进行分析,在 8 个就地模块的情况下,考虑 Goose 报文 300 个字节的典型情况,测控子机 A 发送数据理论最大延时:进出延时 + 拥塞延时 + 转发延时 =  $300 \times 8 \times 4 + (1000 + 200 \times 6 + 300 \times 2 + 300) \times 8 + 2000 \times 8 = 50400 \text{ ns} = 50.4 \mu\text{s}$ 。

图 8 为上文所述的变电站就地模块与测控组成的典型 HSR 环网,对于 300 字节的 Goose 报文,实测最大延时小于  $100 \mu\text{s}$ ,满足变电站内数据传输系统延时要求。

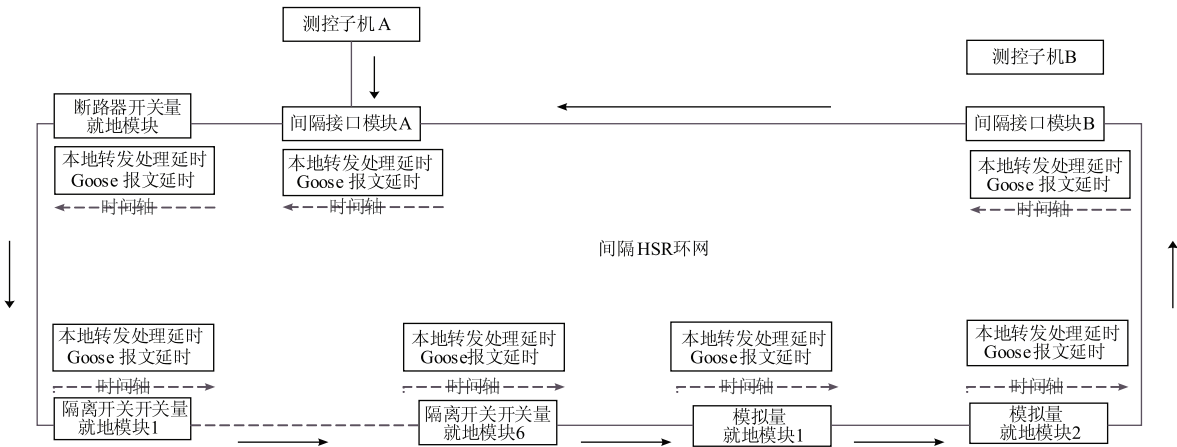


图 8 第三代智能站典型 HSR 环网测试网络

Fig. 8 Typical of HSR for third generation smart substation

## 7 结束语

文中方案采用基于 IEC 62439-3 标准以及 IEEE 1588 定时标准对 HSR 环网的实现技术进行了设计实施,采用了基于延时可测技术的 HSR 环网时间敏感数据同步方案,通过软件底层驱动和 FPGA 结合的实现方式保证了部署的灵活性,业务实现的实时性。经试验结果分析,业务应用延时可满足系统要求。该方案不但解决了现有智能变电站网络通信现存的一些问题,也为高可用性环网的实现提供了理论依据和试验依据。

## 参考文献

- [1] 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.  
Xin Peizhe, Yan Peili, Xiao Zhihong, et al. Application of communication network technology in new generation smart substation [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 17-23.
- [2] 白静芬, 林繁涛, 徐英辉, 等. 新一代智能变电站数字化计量系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 40-45, 52.  
Bai Jingfen, Lin Fantao, Xu Yinghui, et al. Digital metering system of new generation smart substation in China [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(17): 40-45, 52.
- [3] 陶文伟, 高红亮, 杨贵, 等. 智能变电站过程层冗余组网模式及网络延时累加技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 124-129.  
Tao Wenwei, Gao Hongliang, Yang Gui, et al. Research on redundant networking mode and network delay accumulation technology of smart substation process layer [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 124-129.
- [4] 朱小红, 王利平, 杨琪, 等. 基于 Markov 的智能变电站二次系统间隔层和过程层可靠性评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 73-80.  
Zhu Xiaohong, Wang Liping, Yang Qi, et al. The reliability evaluation of bay level and process level in smart substation secondary system based on Markov [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 73-80.
- [5] IEC 62439-3-2016, Industrial communication networks-High availability automation networks-Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR)[S].
- [6] 周华良, 郑玉平, 杨志宏, 等. 面向智能变电站三网合一网络的 PRP/HSR 实现方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 216-223.  
Zhou Hualiang, Zheng Yuping, Yang Zhihong, et al. Implementation scheme of three-in-one network based on PRP/HSR in smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 216-223.
- [7] 施寅跃, 付艳兰, 李琳玮, 等. 基于 PRP 和 HSR 冗余协议的智能变电站网络组网研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(5): 52-57.  
Shi Yanyue, Fu Yanlan, Li Linwei, et al. Research on Network Construction of Intelligent Substation Based on PRP and HSR Redundancy Protocol [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(5): 52-57.
- [8] 梁武民, 周水斌, 潘静, 等. 一种高压设备即插即用传感器实现方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 133-136.  
Liang Wumin, Zhou Shuibin, Pan Jing, et al. A plug and play sensor design method of high voltage equipment [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 133-136.
- [9] 黄德文, 姚明. HSR 技术在智能变电站过程层网络的应用探讨[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(4): 35-38.  
Huang Dewen, Yao Ming. Application of HSR technology in the intelligent substation process layer network [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2014, 12(4): 35-38.
- [10] IEC 1588-2008, IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems [S].
- [11] 刘妹佩. IEEE 1588 协议在 HSR 冗余网络中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Liu Shupai. Research on the application of IEEE 1588 in high-availability seamless redundancy [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] IEC/TS 62351-6-2007, Industrial communication networks-High availability automation networks-Part 3: Parallel redundancy protocol (PRP) and High-availability seamless redundancy (HSR) [S].
- [13] IEC/TS 62351-7-2010, Power systems management and associated information exchange-Data and communication security-Part 7: Network and system management (NSM) data object models [S].

## 作者简介:



杨世皓(1984—),男,高级工程师,从事电力系统自动化保护与通讯研究。Email:sallyboy1999@sina.com

邹晓峰(1985—),男,高级工程师,从事电力系统自动化保护与控制研究。

陈玉峰(1975—),男,工程师,从事电力系统自动化保护与控制研究。

文博(1986—),男,硕士研究生,高级工程师,从事电力系统自动化保护与控制研究。

收稿日期:2019-09-18;修回日期:2019-10-19

(王克祥 编发)