基于HSR的智能变电站过程层通信网络

李仲青[1]，蒋 帅[1]，杜 宇[2]，郭雅蓉[1]

（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；2. 北京四方继保自动化股份有限公司，北京 100085）

摘要：研究了智能变电站保护等装置过程层组网的一种新模式——基于HSR（High-availability Seamless Redundancy）的过程组网，阐述了智能站过程层间隔内设备支持HSR技术，组成HSR环网的技术方案，以及跨间隔的设备通过使用HSR交换机实现数据交互的方案。针对影响智能变电站继电保护跨间隔数据同步的问题，提出了一种基于HSR的智能变电站数据延时可测方法，间隔内SV报文通过一定的延时补偿，摆脱对时钟的依赖。最后对基于HSR的过程层组网方案的技术优势及未来的适应性进行了分析，方案适应智能变电站过程层多元化的通信要求。

关键词：智能变电站；保护；HSR；网络架构

Process communication network for intelligent substation based on HSR

LI Zhongqing[1], JIANG Shuai[1], DU Yu[2], GUO Yarong[1]

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A new mode of process network architecture for intelligent substation protection is considered, network based on HSR (High-availability Seamless Redundancy). HSR is required for all devices inside a bay. And devices in a bay are all in a HSR loop network. Information is shared by HSR switch between bays. To the problem of the data synchronization in different space for relay protection in intelligent substation, a method of data delay measurement based on HSR for intelligent substation is proposed. The SV message is compensated by certain delay to get rid of the dependence on the clock. Finally, the technical advantages and future adaptability of the process network scheme based on HSR are analyzed, which adapts to the multiplex communication requirement in intelligent substation.

Key words: intelligent substation; protection; HSR; network architecture

0 引言

智能变电站中继电保护等二次设备，采用了符合IEC 61850 标准的过程层SV（Sample Value）和GOOSE（Generic Object Oriented Substation Event）通信代替了传统模拟量和开关量信号，过程层通信成为二次系统极为重要的环节之一，其可靠性对变电站系统稳定有重要作用。目前在智能变电站的设计中，国内外对过程层通信的可靠性如何保证并没有统一的标准，不同的国家、不同的地区以及不同的企业对此也有不同的理解和不同手段。例如SV直采GOOSE直跳的模式，

国家电网公司科技项目(B71-16-008)《智能变电站保护装置对布置方式适应性分析及措施研究》的外委项目《智能变电站就地化保护装置网络跳闸可靠性与实时性研究》

即光缆代替电缆不经过交换机，以及网采网跳模式、直采网跳模式[1]。

为避免网络故障对系统通信安全的影响，网络冗余设计显得非常必要，如针对设备冗余配置问题，电网用户做如下规定，对于220 kV及以上电压等级设备，采用配置双套保护，每套保护组单网模式，而110 kV电压等级则采用配置单套保护，组同源双网模式。目前，国内智能变电站普遍采用了比较保守的星形网络结构，冗余主要是通过设备双重化或网络双重化来实现。

智能变电站过程层网络采用双网架构，IED设备的处理器需同时处理双网数据，存在处理器负荷高的问题；过程层网络采用SV报文结合光纤直连传输方式，存在布线复杂，IED设备光口多，成本高，装置发热量大，信息共享困难，链路无法监视等各种问题；过程层GOOSE报文采用网络传输方式，过程层网络与光纤直连方式并存，结构不清晰[2-3]。

这些问题造成智能变电站网络设备多、调试复杂等问题，网络冗余是以设备的增加或网络的增加为代价的，同时目前的SV网采模式高度依赖对时，对可靠性以及互操作性造成了潜在的危害。

本文着重研究基于HSR的过程层网络通信以及网络架构，实现数据的无缝切换，大大提高了网络采样系统的运行可靠性，同时解决了由于大量使用交换机导致变电站建设成本较高的问题。解决智能变电站间隔内保护装置数据交互以及跨间隔保护数据交互。本方法可用于对现有智能站网络系统的改造，提高系统运行可靠性。对于新一代智能变电站中的二次设备就地下放或敞开式安装情况，基于分布式综合布线模式的HSR技术的优势将更加突出。

1 HSR技术

IEC委员会SC65 WG15 2012年发布的IEC 62439高可靠的自动化网络（High Availability Automation Networks）”标准体系中提到了HSR技术。基于智能变电站未来的发展趋势，IEC 61850将HSR网络冗余模式补充到第二版中。该网络冗余方式适用于未来二次设备下放需求，简化网络设计，提高系统可靠性。

HSR采用节点冗余技术[4]，终端节点通过两 个端口连接到两个独立的网络，即在链路层上实现报文的“双发双收”，网络故障时实现零切换时间，满足IEC 61850 网络通信可靠性要求。HSR 环网的通信过程和原理如图1所示，环形拓扑实现了双端口节点设备间的信息交互。

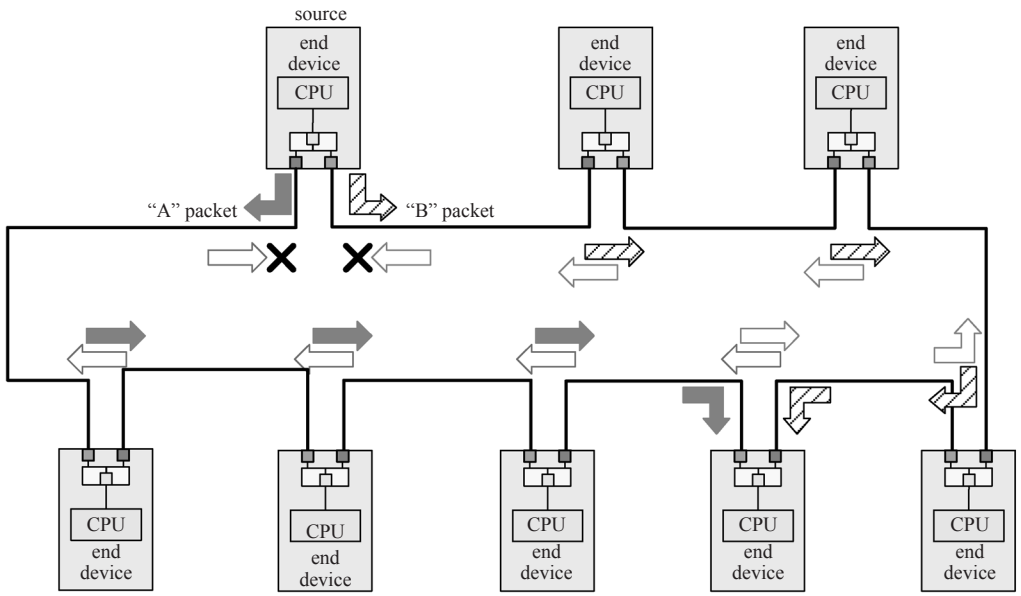

图1 HSR环网的通信原理

Fig. 1 Communication principle of HSR

2 基于HSR的智能变电站过程层组网方案

2.1 网络总体方案

智能变电站过程层间隔内需要通信的设备种类不多，如保护、合并单元以及智能终端等，一般在3～5种，针对不同保护类型的不同功能需求，设置基于HSR环网的合理的信号接入方式，从而简化网络结构和优化保护设计，以提高系统运行可靠性。

采用基于HSR的智能变电站过程层通信，这些装置本身可构成HSR环网，此时要求装置支持HSR功能，间隔内无须交换机。通过一定的延时补偿解决间隔采样值数据，解决高度依赖时钟的问题。

需要跨间隔传输的采集数据，通过HSR交换机完成。总体上比现有的星形以太网冗余可以大量节省使用的交换机数量，并且实现了数传输冗余通道的无缝切换，提升可靠性和实时性。

2.2 间隔内设备组成HSR环形网络

智能变电站中，通常一个间隔，如线路间隔或者变压器间隔，包括间隔层设备继电保护装置、测量控制装置、过程层设备合并单元及智能终端等装置。考虑到保护布置在间隔小室，在不同的小室内单独构成HSR环网。

（1）基于HSR技术的间隔层设备

由于间隔内的智能设备过程层通信基于HSR环形网络，同时不通过交换机，因此要求间隔内的保护装置、测控装置、合并单元及智能终端等采用支持HSR技术的网络数据处理模块。通过在智能设备的数据接收插件前端增加HSR冗余处理模块，实现HSR网络冗余处理。间隔内HSR环形网络上的每一个HSR节点有两个网口。这两个网口对于上层协议栈而言地址是相同的，就如同一个网口，即每一个HSR节点有两个端口同时运行。发送节点将一个以太网帧从两个网络端口分别按照顺时针和逆时针两个方向发送报文。每个HSR节点都可能从两个方向接收到相同的2帧报文，处理其中1帧，丢弃另1帧。同时将接收到并且未被丢弃的报文继续转发给相邻节点。这种机制使得如果出现物理链路损坏或某个网络节点故障，信息可以从另一方向传输，达到了无缝切换的冗余效果。

（2）间隔内冗余采用HSR环网

间隔内的智能设备保护、测量控制装置、合并单元及智能终端等设备采用支持HSR技术的设备，不经过交换机组成独立的HSR环网。各类设备的信息交互关系为：合并单元发出SV采样数据，保护、测控等接收SV采样数据；智能终端发出GOOSE开入数据，保护、测控等接收GOOSE开入数据；保护、测控等发出GOOSE跳闸命令，智能终端接收GOOSE跳闸命令。

间隔内的智能设备过程层通信基于HSR环形网络，该通信架构下，间隔内的HSR环网节点数较少，通常为3～4个节点。合并单元发出的SV报文的网络延时可通过延时补偿进行处理[5]。保护等智能设备处理SV报文采用网络直采方式，不依赖外部对时，提高了可靠性。

2.3 跨间隔设备数据交互通过HSR交换机

母线差动保护、站域保护等保护装置需要跨间隔通信采集多个间隔SV数据，即跨多个HSR环网采集多个间隔环网的采样值数据。每个保护小室构成一个HSR环网，每个小室的HSR环网通过HSR交换机组成一个跨间隔通信的网络。

（1）支持HSR技术的交换机

保护小室间隔环网通过交换机实现联网，要求交换机支持HSR技术，现阶段通用工业以太网产品采用私有环网保护技术，在网络发生故障后均需要一定时间（几十毫秒以上）完成故障恢复。而对于可靠性、实时性要求高的变电站过程层通信，对数据传输实时性的要求为毫秒级。而PRP（Parallel Redundancy Protocol）和HSR是目前市面上唯一可以实现真正零丢包、零切换的网络冗余保护技术，但PRP的经济性则不如HSR。

（2）间隔间设备数据交互通过HSR交换机

间隔装置组成HSR环网通过RedBox（Redundant Box）接到HSR交换机，跨间隔的智能设备采用HSR交换机获取数据。母线差动保护、站域保护等跨间隔保护与线路HSR环、变压器HSR

环均有数据交互，通过HSR交换机获取线路间隔、变压器间隔数据。因此，本着简单、可靠的原则，母线差动保护、站域保护装置采用网络采样的方式。

测控、相量测量和计量等装置，可直接组装在独立的间隔HSR环网中，此时智能设备处理SV报文采用网络直采方式，也可通过HSR交换机获取间隔独立组网的HSR环网数据，此时智能设备处理SV报文采用网络采样方式。网络架构图如图2所示。

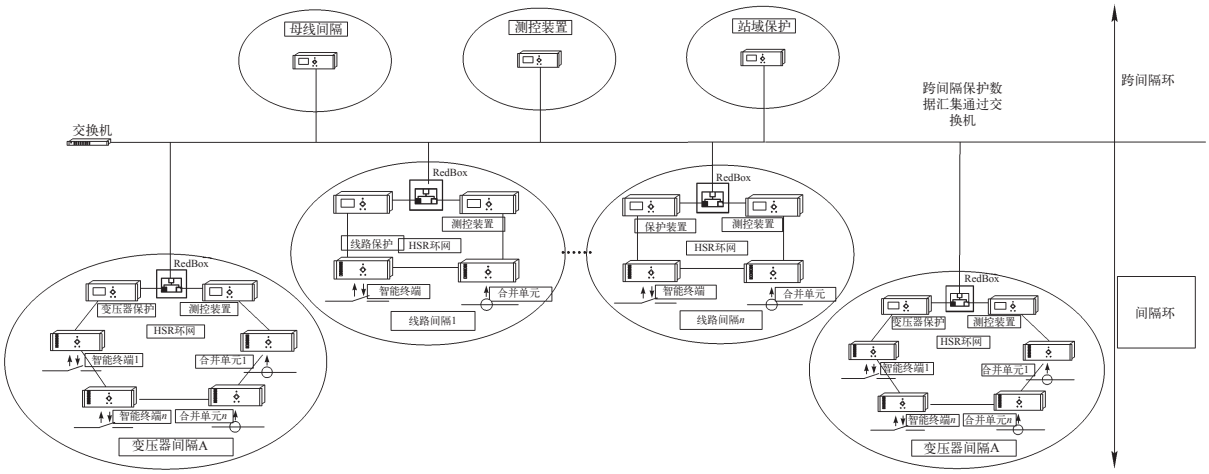

图2　基于HSR的智能变电站网络架构图

Fig. 2 Intelligent substation network architecture based on HSR

2.4　间隔内采样值数据延时补偿

目前，智能变电站继电保护采用“网采网跳”模式最大的障碍在于母线差动等跨间隔保护必须依赖于外部时钟，当失去外部时钟或外部时钟出现故障时，需要数据同步的跨间隔保护将退出运行。

本文提出基于HSR的延时可测方法，精确计算报文经过每个HSR节点的驻留延时并进行累加计算，保护装置依赖本地时间基准，利用MU固有延时和链路驻留总延时，能够还原收到的多个间隔的采样数据的发生时刻，完成采样值的同步处理，体现了采样数据“谁使用谁同步”的基本原则。

计算每条报文在HSR环上设备的进出延时差，并累加填写进过程层报文的保留字段，当报文沿着HSR环节点到达目的地，其途经的所有节点的时间延时即通过累加计算得到。具体实施流程如图3所示。

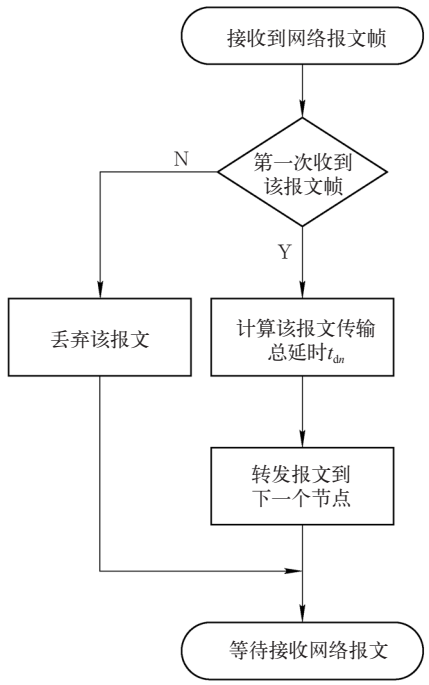

图3　基于HSR的延时补偿技术流程图

Fig. 3 Flow chart of time delay compensation technology based on HSR

初始情况第0个节点（即报文发出节点）的累计延时为T_{d0}=0，第1个接收节点接收报文的本地时间为T_{l1}，第1个节点转发报文的时间为T_{l2}，第1个节点的进出延时差ΔT_1，第1个网络节点累加延时为T_{d1}。

第1个接收节点接收报文时，$T_{d1}=T_{d0}-T_{11}$；第1个接收节点转发报文时，$T_{d1}=T_{d0}-T_{11}+T_{12}=T_{d0}+(T_{12}-T_{11})=T_{d0}+\Delta T_1$。

第n个接收节点接收报文的本地时间为T_{n1}，第n个节点转发报文的时间为T_{n2}，第n个节点的进出延时差ΔT_n，第n个网络节点延时为T_{dn}。

第n个接收节点接收报文时，$T_{dn}=T_{dn}-1-T_{n1}$；第n个接收节点转发报文时，$T_{dn}=T_{dn}-1-T_{n1}+T_{n2}=T_{dn}-1+(T_{n2}-T_{n1})=T_{dn}-1+\Delta T_n$。

把每条报文在交换设备的进出延时差ΔT_n即时填写报文保留字段，供后续环节解析加工。假设前面传输环节的延时$T_{dn}-1$，保存在SV报文的reserve字段，本节点接收到报文的本地时标为T_{n1}，发送时的本地时标为T_{n2}。在输入端口，用$T_{dn}-1-T_{n1}$替换reserve字段；在输出端口，用$T_{dn}-1-T_{n1}+T_{n2}$替换reserve字段，实现HSR端口处理转发报文的延时计算并嵌入报文。

报文从第n个节点发出时，总体网络延时为$t_{dn}=t_{dn}-1+(T_{n2}-T_{n1})$（单位为ns）。相对于网络节点转发处理延时，报文在网络中传输的延时非常小，可忽略不计。则对于第n+1个节点接收到报文时的网络总延时为t_{dn}。保护装置读取经过HSR节点的网络延时为t_{dn}，与MU额定延时进行累加，获取SV数据链路传输总延时，保护装置采用“点对点”原理实现跨间隔数据同步，仍采用“谁使用谁同步”的方法，解决对外部同步时钟的依赖问题。

3 结束语

针对间隔内和跨间隔不同保护类型的不同功能需求，设计了基于HSR环网的合理的信号接入方式，从简化网络结构和优化保护设计方面出发，以提高系统运行可靠性为目的，提出完善的网络配置方案。

变电站继电保护小室间隔内设备支持HSR，组成小室环网，在通过HSR交换机实现间隔间网络连接，该模式每个小时HSR环上的节点为3～5个，与整体组建HSR环网相比降低了每个HSR环上的设备数量，每个环上的数据传输延时可控并且可补偿。

目前，智能变电站继电保护采用“网采网跳”模式最大的障碍在于跨间隔保护必须依赖于外部时钟，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，本方案通过一定延时补偿，解决了过程层设备高度依赖时钟的问题。该组网模式，网络架构清晰，数据流简单，简化了智能变电站过程层网络设计压力以及施工成本，同时为变电站其他应用提供了可靠的数据流，而在跨间隔数据交换方面使用HSR交换机，降低了组网成本。该解决方案将有效提高系统运行的可靠性、安全性。

如未来对间隔内网络通信冗余提出更高的要求，可在小室间隔内或一次设备厂采用HSR环网方案的双网冗余方式，如对跨间隔通信冗余提出更高的要求，可采用双套HSR交换机跨间隔通信等方式。在网络架构上，本文提出的网络架构具备多种扩展方式，适应智能变电站过程层日益多元化的通信要求。

参考文献

[1] 刘玮，王海柱，张延旭. 智能变电站过程层网络报文特性分析与通信配置研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(6)：110-115.
LIU Wei，WANG Haizhu，ZHANG Yanxu. Study on message characteristics and communication configuration of process layer network of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control，2014，42(6)：110-115.

[2] 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)：125-129.
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)：125-129.

[3] 张卅，张惠刚，李忠安. 智能变电站并行冗余网络的研究与实现[J]. 电气技术，2018，19(8)：109-113.
ZHANG Sha，ZHANG Huigang，LI Zhongan.

Research and implementation of a parallel redundancy network in intelligent substation[J]. Electrical Technology, 2018, 19(8): 109-113.

[4] 李忠安，迟翔，张惠刚，等．基于虚拟网桥原理的PRP/HSR网络接口设计[J]．智能电网，2016，4(6)：582-586.
LI Zhongan, CHI Xiang, ZHANG Huigang, et al. Design of PRP/HSR network interface based on virtual bridge[J]. Smart Grid, 2016, 4(6): 582-586.

[5] 李强，窦晓波，吴在军，等．数字化变电站通信网络规划与实时特性改进[J]．电力自动化设备，2007，27(5)：73-77.
LI Qiang, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Communication network of digital substation and improvement of real-time performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 73-77.

[6] 于军，熊小伏，张媛．数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]．电网技术，2009，33(4)：28-33.
YU Jun, XIONG Xiaofu, ZHANG Yuang. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 28-33.

[7] 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]．电力系统通信与技术，2014，12 (4)：35-38.
HUANG Dewen, YAO Ming. Application of HSR technology in the intelligent substation process layer network[J]. Electric Power ICT, 2014, 12 (4): 35-38.

[8] 张延旭，蔡泽祥，竹之涵，等．基于传输延时补偿的继电保护网络采样同步方法[J]．电力系统自动化，2015，39(18)：81-85.
ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, ZHU Zhihan, et al. Network sampling synchronization of relay protection based on transmission delay compensation[J]. Automation Electric Power System, 2015, 39(18): 81-85.

[9] LI Zhongqing, LIU Kaibo, LI Xiao, et al. Sampled data synchronization scheme for relay protection in smart substation[C]. 2014 International Conference on Power System Technology, 2014: 1778-1784.

作者简介

李仲青（1978－），男，硕士研究生，教授级高工，主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期：2018－12－08)EA

李仲青

(上接第 37 页)

2010, 44(7): 73-75.
YANG Zijing, LU Qiwei, WANG Dolun, et al. Development of digital control power supply based on DSP [J]. Power Electronics Technology, 2010, 44(7): 73-75.

[3] 余飞．一种用于智能电器的低成本小功率开关电源的研制[J]．电气技术，2018，19(3)：95-99.
YU Fei. Development of a low-cost low-power switching power supply for intelligent electrical appliances [J]. Electrical Technology, 2018, 19(3): 95-99.

作者简介

陈哲军（1991－），男，硕士研究生，主要从事变电继电保护检修工作。

(收稿日期：2018－11－16)EA

陈哲军