

DOI: 10.7667/PSPC170592

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

陶文伟¹, 高红亮¹, 杨贵², 张喜铭¹, 彭安²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 当前智能变电站过程层采用双网架构, IED 设备的处理器同时处理双网数据, 存在处理器负荷高的问题。SV 采用光纤直连传输方式, 存在布线复杂、IED 设备光口多、成本高、装置发热量大、信息共享困难及链路无法监视等各种问题。同时 GOOSE 采用网络传输方式, 过程层网络与光纤直连方式并存, 结构不清晰问题。针对高可靠性无缝冗余协议(High Reliability Seamless Redundant Protocol, HSR)和并行冗余协议(Parallel Redundant Protocol, PRP)的智能变电站过程层组网进行了研究, 并基于该组网基础上进行了 HSR 和 PRP 的延时累加技术研究及测试。该研究为将来在国内智能变电站进行推广应用此技术提供了坚实的理论分析和测试结果参考数据。

关键词: 智能变电站; 延时累加; HSR; PRP; 过程层

Research on redundant networking mode and network delay accumulation technology of smart substation process layer

TAO Wenwei¹, GAO Hongliang¹, YANG Gui², ZHANG Ximing¹, PENG An²

(1. Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: The current smart substation process layer adopts dual-network architecture and IED processor processes dual-network data simultaneously, which causes the problem of high processor load. SV uses the mode of directly connected through optical fiber transmission, in which exists complex wiring, multi port of IED equipment, high cost, high heating of equipment, difficulties in information sharing, and the issues that links can not be monitored, etc. At the same time, GOOSE adopts network transmission mode, the process layer network and optical fiber connection mode coexist, so the structure is not clear. The process network of smart substation of HSR (High Reliability Seamless Redundant Protocol) and PRP (Parallel Redundant Protocol) is studied, and the delay accumulation technology of HSR and PRP is studied and tested on the basis of the network. It provides a solid theoretical analysis and test result reference data for the future popularization and application of smart substation in China.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZDKJQQ00000016).

Key words: smart substation; delay accumulation; HSR; PRP; process layer

0 引言

随着智能变电站的不断推广应用, 普遍推广光纤直连采样和网络跳闸的组网模式^[1-2], 该组网模式是综合现有技术水平、可靠性、经济型等各方面因素的结果。该组网方案在以下方面有待提升。

1) 当前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。

2) 过程层网络采用 SV 报文结合光纤直连传输

方式^[3], 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。

3) 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^[4], 结构不清晰。

4) 当前智能变电站的组网方案尚无有效手段解决 IED 双网数据处理的规范性问题, 双网数据在 IED 设备的处理器中进行双网冗余处理, 各厂家的实现方案尚未统一。

因此本文拟研究采用网络采样、网络跳闸方式实现过程层组网^[5]。当采用网络采样、网络跳闸组网模式时, 当前已有技术解决了报文传输可靠性问

基金项目: 中国南方电网公司重点科技项目 (ZDKJQQ00000016)

题, 但网络采样方式传输延时不固定导致必须依赖外部时钟实现采样同步问题尚无有效手段解决。同时 IED 处理双网数据尚无统一的规范处理手段, 各厂家处理方式依然存在差异。随着 IEC61850 技术的推广应用, IEC 组织积累了各国多年的 IEC61850 变电站建设经验并结合通信技术的新发展推出了 IEC61850 E2 版本。其中, IEC61850-90-4 针对变电站的组网方式进行了详尽的描述。该标准引入了 IEC62439-3 制定的并行冗余协议(Parallel Redundant Protocol, PRP)、高可靠性无缝冗余协议(High Reliability Seamless Redundant Protocol, HSR), 并给出了推荐的组网方式, PRP 和 HSR 协议有效地解决了双网数据的处理方法。由 ABB、Siemens 等公司主导的 HSR、PRP 组网方案已在国外开始尝试进行变电站组网建设, 南瑞继保等公司率先在国内尝试将 IEC62439-3 与变电站二次设备相结合并在海外变电站进行了推广应用, 目前已有变电站投入运行, 但由于国内外的应用场景差异, 国外的应用经验并不适合直接拿来在国内推广。

为了提升国内智能变电站的整体水平, 解决现有变电站中存在的薄弱环节, 同时解决各厂家双网报文处理不规范问题。迫切需要研究 IEC62439-3 规范在国内智能变电站应用的可行性。同时, 为解决网络采样同步必须依赖外部时钟问题, 需要研究基于 IEC62439-3 的同步解决方案。

1 组网模式

IEC61850-90-4 只是示意性地给出了 HSR、PRP 的组网方案, 并没有明确规定如何进行组网, 同样地也没有对组网方式进行深入比较。本文将智能变电站过程层网络为基础进行组网架构研究。PRP 和 HSR 的特点请参照文献[6], 这里不再赘述。

智能变电站过程层网络由保护、测控、合并单元、智能终端和交换机等设备构成^[7], 根据不同的变电站装置配置情况, 可能存在保护、测控一体装置; 合并单元、智能终端一体装置; 甚至四种装置合一的四合一装置, 因此, 根据不同的装置配置, 研究不同的组网方案。

1.1 PRP 组网模式

如图 1 所示, 装置通过 PRP 协议接入到过程层双星型网络中。在该组网模式下, 需要的交换机数量与当前智能变电站网络需要的交换机数量相同, 但 PRP 可实现 IED 设备的双网报文处理, 通过在 LRE 实现双网报文的规范处理, 在降低处理器的负荷的同时规范了双网数据的处理。

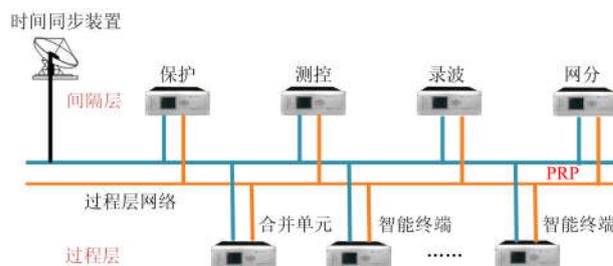


图 1 PRP 网络结构

Fig. 1 PRP architecture

1.2 HSR 组网模式

1) HSR 单环网

通过 HSR 技术进行过程层组网有两种方案: 方案一, 装置间构成 HSR 环网, 装置本身支持 HSR 功能; 方案二, 交换机间构成 HSR 环网, 设备通过交换机接入 HSR 环网。

方案一组网架构图如图 2 所示, 过程层设备构成一个大的环网结构, 由于智能变电站过程层网络传输流量较大, 每路 SV 报文流量一般在 5~10 Mbps, 过程层报文流量一般会超过百兆, 对于间隔数量较多的变电站报文流量可达到 500 Mbps 以上^[8], 因此, 采用 HSR 技术构成环网架构应采用千兆端口实现 HSR 功能, 用以满足带宽要求。该结构的特点是, 网络上的设备构成一个大环网, 每个设备都是一个 HSR 节点, 对于设备安装在同一位置且装置数量不多的变电站来讲比较适合该组网方式。

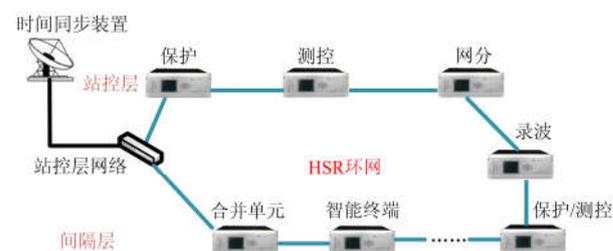


图 2 按装置构成 HSR 环网架构

Fig. 2 HSR ring architecture according to device

但是, 当保护、测控、合并单元、智能装置安装于不同的变电站小室内时, 采用图 2 的环网结构存在网络混乱等现象。因此, 过程层设备安装于不同小室时, 应考虑在不同的小室内单独构成 HSR 环网, 并通过两台 Quadbox 实现各小室间的设备构成 HSR 相切环网架构, 网络结构图如图 3 所示。

母差、网分、主变等设备与每个 HSR 环上的两个 Quadbox 构成一个公共的 HSR 环网。每个小室构成一个 HSR 环网, 每个小室与公共 HSR 环之间通过两个 QuadBox 构成相切的 HSR 环网架构。该结构的特点是, HSR 环之间通过两个 Quadbox 连接,

结构较为清晰；通过 Quadbox 连接，降低了每个 HSR 环上的设备数量，组网成本紧张的变电站应用该方案比较有优势。

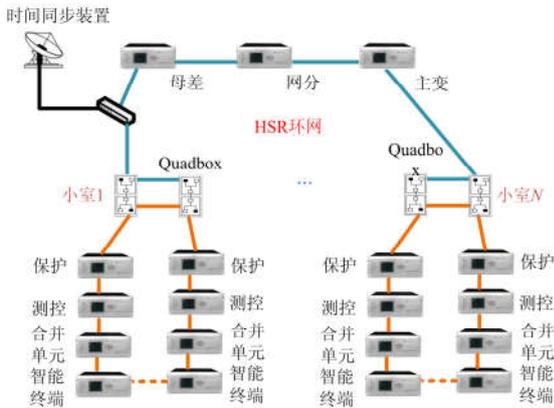


图 3 按小室构成装置 HSR 环网架构

Fig. 3 HSR ring architecture according to cabin

方案二组网架构如图 4 所示，过程层网络交换机构成一个大的环网结构，保护、测控、合并单元、智能终端等接入到交换机上，交换机构成 HSR 环网。该结构的特点是，由交换机构成 HSR 环网，装置不需要支持 HSR 功能，对于设备安装在同一位置的变电站来讲，比较适合该组网方式。

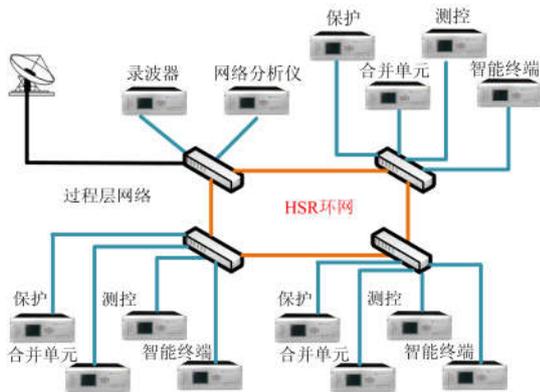


图 4 构成交换机 HSR 环网结构

Fig.4 HSR ring architecture of switch

当保护、测控等装置安装于不同的变电站小室内时，采用图 4 的环网结构将存在组网混乱等现象。因此，过程层设备安装于不同小室时，应考虑在不同的小室内单独构成 HSR 环网，并通过两台 Quadbox 与主控室内的设备构成 HSR 相切环网架构，网络结构图如图 5 所示。

母差、主变和网分等所在 HSR 环网与每个小室相连的两个 Quadbox 构成公共 HSR 环网。每个小室通过交换机构成一个 HSR 环网，每个小室与公共

HSR 环网之间通过两个 QuadBox 构成相切的 HSR 环网架构。该结构的特点是，HSR 环网之间通过两对光纤连接，结构清晰；HSR 环网之间通过 Quadbox 连接，通过交换机组网进一步降低了环上设备的数量，在组网成本和组网可靠性综合考虑的场景可尝试使用该组网方案。

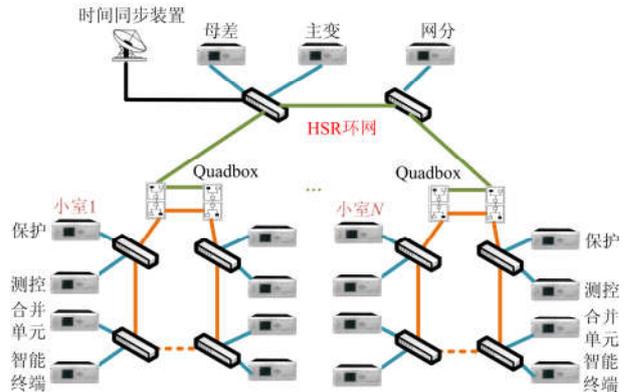


图 5 按小室构成交换机 HSR 环网结构

Fig. 5 HSR ring architecture of switch according to cabin

2) HSR 双环网

该组网方案是对 HSR 单环网方案的双网实现方式。在网络架构上从单网角度上看是完全一样的。该组网方案具有可靠性提升的优点，但是对于装置实现 HSR 环网方式需要装置同时支持两路 HSR 环网功能，实现难度较大。对于交换机实现 HSR 环网方式需要成倍地提供交换机和 Quadbox，在成本上会有所增加。

在该组网模式下，装置可通过 PRP 协议接入，具有使网络同时获得 PRP 和 HSR 的双重优点。但是，需要考虑环网上节点过多会导致传输时间变长和更容易出现 N-2 故障等情况。因此，网络拓扑的最终选择需要综合考虑各种应用需求，从前面分析来看，过程层网络的报文流量较大，采用 HSR 环网必须采用千兆端口，实现难度大，因此，在当前技术条件下不建议采用 HSR 环网结构。

1.3 PRP、HSR 混合组网模式(图 6)

HSR 按照间隔进行组网、每个间隔内的保护、测控、合并单元和智能终端构成一个 HSR 环网，通过合并单元和智能终端分别接入到过程层 PRP 网络的 A 网和 B 网上面。合并单元和智能终端需要支持跨接 HSR 和 PRP 网络的 Redbox 功能。母差、录波、主变、网分等跨间隔接收 SV、GOOSE 信息的设备直接接入到 PRP 网络上，该组网方式具有结构清晰、交换机使用数量少等优点。

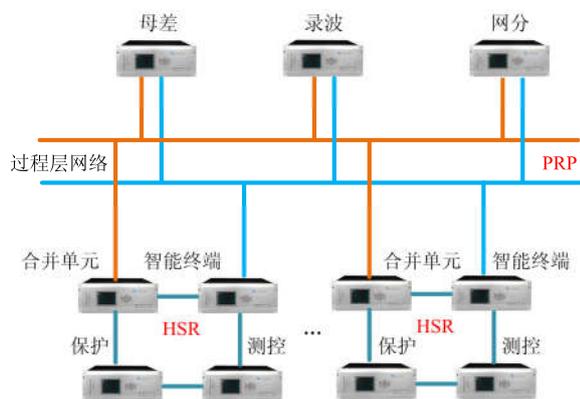


图6 HSR/PRP 网络结构

Fig. 6 HSR/PRP network architecture

网络上的母差、录波、网分等装置支持 PRP 协议；合并单元、智能终端支持 HSR 协议，并支持

1.3 节描述的 Redbox 功能；保护、测控装置支持 HSR 功能。

1.4 五种组网模式比较

以上五种组网方案及传统双网架构模式的比较如表 1。

从比较结果来看，HSR、PRP 混合组网模式具有较高的可靠性，成本较低，且结构合理，易扩建，运维方便等优点；PRP 组网模式在成本上比 HSR、PRP 混合组网模式方案高；HSR 环网架构整体评价结果差；现有的组网方式存在兼容性差、IED 设备处理器负荷高等缺点。因此，在智能变电站的推广应用推荐根据间隔内装置的配置情况选用 HSR+PRP 和 PRP 两种组网方案。当间隔内的装置未做二合一或四合一采用 HSR、PRP 组网方案，否则采用 PRP 组网方案。

表 1 各种组网模式比较

Table 1 Comparison of various networking modes

比较项目	现有双网架构	HSR 单环架构	HSR 双环架构	PRP 网络架构	HSR/PRP 网络架构
可靠性	高，双网	低，易发生 N-2 故障	高，双环网	高，双网	高，双接入点+双网
组网成本	高，交换机多	低，节省交换机	高，装置成本上升多	高，交换机多	较低，较 PRP 网络低
结构合理性	高，组网规则明确	低，组网规则不明确	低，组网规则不明确	高，组网规则明确	高，组网规则明确
可扩展性	高，易扩展	低，扩建困难	低，扩建困难	高，易扩建	高，易扩建
可运维性	高，运维方便	低，运维困难	低，运维困难	高，运维方便	高，运维方便
兼容性	低，私有实现方式	高，国际规约	高，国际规约	高，国际规约	高，国际规约
CPU 使用率	高，处理双网数据	低，处理单网数据	低，处理单网数据	低，处理单网数据	低，处理单网数据

2 网络延时累加技术

目前智能变电站普遍采用 IRIG-B 码对时方式实现过程层网络同步^[9-10]，保护可靠动作依赖外部时钟的可靠性。延时累加技术有效解决了目前智能变电站组网模式下的网络采样依赖外部时钟的问题。本文拟借鉴这一思路解决 HSR、PRP 混合组网模式下的网络采样的可靠性，但要考虑到 HSR、PRP 混合组网模式与现有组网模式在硬件实现上存在较大差异，HSR、PRP 增加了 LRE(链路冗余实体)处理模块，因此在进行延时累加处理时必须考虑该部分对精度的影响。

2.1 PRP 实现延时累加

PRP 的延时累加实现逻辑框图如图 7 所示，A、B 网的双网冗余报文分别进入到 PORTA 和 PORTB 端口，并在位置①和②打上报文进入的时间值 T_0 和 T'_0 。两帧报文分别通过位置③和④进入 LRE 中，LRE 通过报文进入的先后顺序进行报文丢弃处理，先到的报文通过位置⑤打上时间戳 T_1 并计算 ΔT 后进入应用层进行处理，如果报文从位置①进入应用层，

那么 $\Delta T = T_1 - T_0$ ，如果从位置②进入应用层， $\Delta T = T_1 - T'_0$ 。后到达 LRE 的报文丢弃处理，不再通过位置⑤打时间戳和进入应用层，确保应用层处理一帧报文。由于 LRE 中存在排队等候、查表、标签剔除等不确定延时事件处理，因此，为了确保延时累加的处理精度，必须在端口的输入端和 LRE 之后进行延时值测量，确保测量精度。

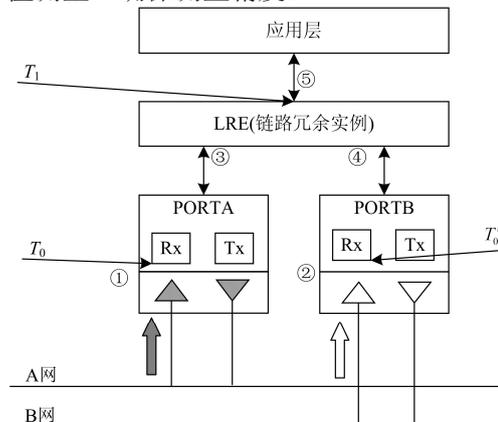


图 7 PRP 延时累加实现框图

Fig. 7 Realization diagram of PRP delay accumulation

同样地，应用层发送报文从位置⑤进入 LRE，通过 LRE 进行报文复制、标签插入等处理后分别通过 PORTA 和 PORTB 的发送端口输出。延时测量需分别计算并回插到报文中，用于后续传输设备继续计算传输累加延时。

2.2 HSR 实现延时累加

HSR 的延时累加实现逻辑框图如图 8 所示，图中以一个方向进入的报文为例进行说明，默认该方向的报文优先进入 HSR 节点，反方向报文进入 HSR 节点后将被丢弃。

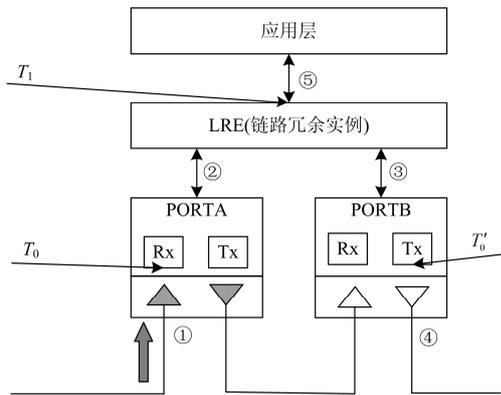


图 8 HSR 延时累加实现框图

Fig. 8 Realization diagram of HSR delay accumulation

报文从位置①进入到 HSR 节点并打上进入时刻的时间戳，通过位置②进入 LRE 实例后，根据 LRE 的判别决定是否转发报文给应用层和通过位置④发送到环网。通过位置⑤发送到应用层的报文在 LRE 进行排队、去标签等处理后打上时间戳 T_1 ，并计算延时值 $\Delta T = T_1 - T_0$ 。通过位置③发送到位置④的报文打上时间戳 $\Delta T' = T'_0 - T_0$ ，并将 $\Delta T'$ 与报文原有延时累加值进行累加，获得新的延时累加值，并发送报文到 HSR 环网上。

2.3 延时累加测试

通过以上方式实现的基于 PRP 和 HSR 的延时累加技术需要在网络的每个节点上均实现延时累加功能，按照变电站组网级联不超过三级的要求^[11]，每个节点的延时累加精度应优于 200 ns^[12]。HSR 环网的级联次数略多于现有的三级级联，根据推荐的组网方案，最大级联次数将可能达到七级，那么，HSR 的每级延时累加精度应优于 150 ns。

通过搭建物理实验环境，分别测试了 PRP 网络、HSR 网络和 PRP+HSR 网络情况下的延时累加准确性，包括单台装置、三级级联、七级级联等情况下的无背景流量、10%背景流量、90%背景流量等不同运行状态。

表 2 PRP、HSR 网络架构下的延时累加测试
Table 2 Delay accumulation test under PRP and HSR

network architectures			
HSR 网络测试背景流量			
	0%	10%	90%
单台	48 ns	46 ns	59 ns
三级级联	95 ns	102 ns	97 ns
七级级联	169 ns	183 ns	209 ns
PRP 网络测试背景流量			
	0%	10%	90%
单台	37 ns	53 ns	46 ns
三级级联	106 ns	103 ns	108 ns
七级级联	212 ns	195 ns	234 ns
PRP、HSR 混合网络背景流量			
	0%	10%	90%
单台	42 ns	41 ns	49 ns
三级级联	94 ns	98 ns	95 ns
七级级联	229 ns	216 ns	193 ns

测试结果表明，基于 HSR 和 PRP 的延时累加精度不依赖于外部网络环境，每级级联的精度优于 100 ns。基于 HSR、PRP 网络的延时累加技术可以满足智能变电站过程层采样同步精度要求。

3 总结

本文针对 HSR 和 PRP 的智能变电站过程层组网进行了研究，并在该组网基础上进行了 HSR 和 PRP 的延时累加技术研究及测试。为将来在国内智能变电站进行推广应用此技术提供了坚实的理论分析和测试结果参考数据。

参考文献

- [1] 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 Systems, 2015, 39(10): 112-116.
- [2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [3] 王晓晨, 黄继东. 基于直采直跳模式的智能变电站的母线保护应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 150-154.
WANG Xiaochen, HUANG Jidong. Practical research on point-to-point model of bus protection in smart substation[J].

- Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 150-154.
- [4] 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, 96.
ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, ZHU Zhihan, et al. Network sampling synchronization of relay protection based on transmission delay compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 81-85, 96.
- [5] 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.
- [6] Industrial communication networks – high availability automation networks – part 3: parallel redundancy protocol (PRP) and high-availability seamless redundancy (HSR): IEC62439-3[S].
- [7] 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.
- [8] 陈桥平, 陈志光, 黄勇, 等. 智能变电站过程层网络报文与流量分布计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 117-121.
CHEN Qiaoping, CHEN Zhiguang, HUANG Yong, et al. Calculation of distribution of message and traffic load for process bus network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 117-121.
- [9] 石光, 赵勇, 杨经超, 等. 一种光 IRIG-B/FT3 码自适应技术及其在智能变电站测试仪器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 110-115.
SHI Guang, ZHAO Yong, YANG Jingchao, et al. Adaptive technique for optic IRIG-B/FT3 codes and its application in handheld test device for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 110-115.
- [10] 冯自权, 李茗宇, 李绅, 等. 时钟管理系统中继电保护 B 码对时研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(18): 124-128.
FENG Ziquan, LI Mingyu, LI Shen, et al. Research on IRIG-B time relay protection codes in clock management system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(18): 124-128.
- [11] 牛占平. VLAN 技术在智能化变电站网络中的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 75-78.
NIU Zhanping. Application of VLAN technology in the intelligent substation network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 75-78.
- [12] 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. Time performance discussion for smart substation communication network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 144-148.

收稿日期: 2017-04-22; 修回日期: 2017-05-28

作者简介:

陶文伟(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力自动化研究与技术管理工作; E-mail: taoww@csg.cn

高红亮(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力自动化研究与技术管理工作; E-mail: gaohl@csg.cn

杨贵(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为通信技术、传输技术、时间同步技术等研究工作和变电站自动化系统。E-mail: yangg@nrec.com

(编辑 周金梅)