

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180839

一种智能变电站新型双网冗余设备及实现

谢黎¹, 周华良¹, 于同伟², 夏雨¹, 王凯¹, 徐建松¹

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

2. 国网辽宁电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 为了解决当前智能变电站自动化系统内网络冗余存在的问题, 提出了一种变电站内新型网络冗余的设备(双网冗余接口盒及双网冗余接口卡)软硬件实现方法, 将变电站内部保护测控等装置通过双网冗余接口设备接入符合 IEC62439-3 规范的 PRP/HSR 网络实现新型双网冗余。采用 FPGA+CPU 的硬件构架, 通过利用在 FPGA 设计出以太网通信控制 MAC 模块、PRP/HSR 模块、存储控制模块、多路报文转发控制模块协同完成变电站系统内以太网报文冗余处理。试验证明, 所研制的冗余设备满足电力系统保护装置对于速动性的要求, 在智能变电站自动化系统内具有较好的实用性。

关键词: 智能变电站; 自动化系统; 网络冗余; FPGA; PRP/HSR; 保护测控装置

A new network redundancy device for smart substation and its implementation

XIE Li¹, ZHOU Hualiang¹, YU Tongwei², XIA Yu¹, WANG Kai¹, XU Jiansong¹

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

2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to solve the problem of network redundancy in substation automation systems, a new network redundancy device (double network redundant interface box and double network redundant interface card) is proposed to implement. The devices of the substation internal protection and control are connected to the PRP/HSR network which conform to IEC 62439-3 specification through the redundancy connection equipment. By using the hardware architecture of FPGA+CPU, the Ethernet communication control MAC module, PRP/HSR module, storage control module and multiple message forwarding control module are designed by using the Ethernet communication control module, and the redundant processing of Ethernet message in the substation system is completed. The test proves that the redundant equipment developed meets the requirements of the power system protection device for quick action, and has good practicability in smart substation automation systems.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. JBB17201500229) "Research on Smart Substation Network High Reliability Redundancy and Relay Protection Network Communication Routine Auto-generation Technique".

Key words: smart substation; automation system; network redundancy; FPGA; PRP/HSR; protection and control device

0 引言

当前电力系统变电站自动化系统二次设备(保护、测控等装置)之间的通信大部分都已经采用工业

以太网技术, 为保证通信的可靠性, 对 220 kV 及以上电压等级的变电站自动化系统多配置为双网^[1-5], 双网内的通信数据完全一样, 保护、测控装置接收到双网数据后, 由装置 CPU 系统(或 DSP)对双网数据进行甄别处理。在当前的智能电网的应用模式下, 网络上的数据流量越来越庞大^[6-9], 因此对装置 CPU 的运算处理能力要求越来越高, 而选用高运算处理能力的 CPU 会大大增加装置成本, 增加了整个装置的功耗, 降低了装置运行的可靠性。随

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(JBB17201500229) “智能变电站网络高可靠性冗余技术及继电保护的网通信路径自动生成技术研究”; 相关技术已获发明专利授权(专利号: CN201410415974.6)

随着网络冗余协议 IEC62439-3^[10](PRP/HSR)的颁布, 由于其具有单网故障时双网切换零延时、不丢包的特点, 国外在变电站内部网络组网中已经广泛应用, 国内对 IEC62439-3 协议应用于变电站网络也做了相关的研究^[11-16]。本文利用 FPGA 独有的并行及高速处理的特点, 提出了一种基于 CPU 系统+FPGA 架构实现的网络冗余设备(双网冗余接口盒 RedBox 及双网冗余接口卡)的软硬件的技术方案, 将变电站内部原有的保护测控等装置通过双网冗余接口卡或者接口盒接入符合 IEC62439-3 规范的 PRP/HSR 网络实现新型双网冗余。在 FPGA 内部通过设计出 MAC 以太网通信模块、1588 对时模块、PRP&HSR 模块、报文存储控制模块、多路报文转发控制模块来完成自动化变电站系统内以太网报文的收发、双网冗余处理、报文的存储转发控制、风暴过滤及报文的分类传送功能, 大大降低了对 CPU 的运算处理需求, 提高了变电站保护测控装置运行的可靠性。

1 网络冗余设备的硬件与软件实现

1.1 硬件实现

智能变电站 PRP/HSR 网络中需要进行网络冗余的设备包含双连接节点(DAN)和单连接节点(SAN), 其中双连接节点自身就有支持 PRP/HSR 协议的网络接口卡, 而单连接节点需通过支持 PRP/HSR 协议的网络接口盒(RedBox)接入 PRP/HSR 冗余网络中。某基于 PRP 双网冗余的 110 kV 智能变电站网络结构图如图 1 所示。

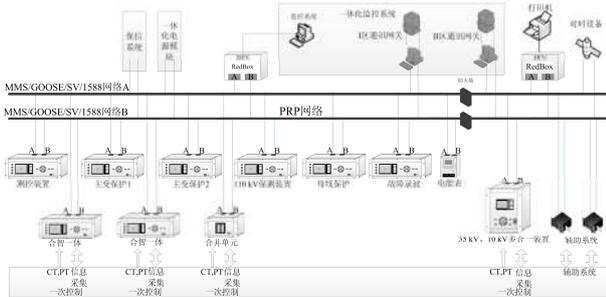


图 1 基于 PRP 双网冗余的变电站结构图

Fig. 1 Structure of hybrid network based on PRP

图 1 所示的变电站自动化系统保护测控装置通过双网冗余接口卡直接接入 PRP/HSR 网络中的 A、B 网, 监控系统、打印机则是通过冗余接口盒(RedBox)接入。

本文所研制的双网冗余设备(冗余接口盒及接口卡)的硬件原理框图如图 2 所示, 采用 FPGA+CPU 的硬件构架, 其中网络冗余功能主要由 FPGA 完成, CPU 负责 FPGA 功能的配置及收发以太网报文的解

帧及组帧。FPGA 通过内部 MAC_A 和 MAC_B 控制两个以太网口 ETH_A 和 ETH_B, 对于网络冗余接口盒则通过 MAC_DEV 扩展 DEV 端口连接打印机、监控系统等单节点设备, 网络冗余接口卡则不存在 DEV 端口。

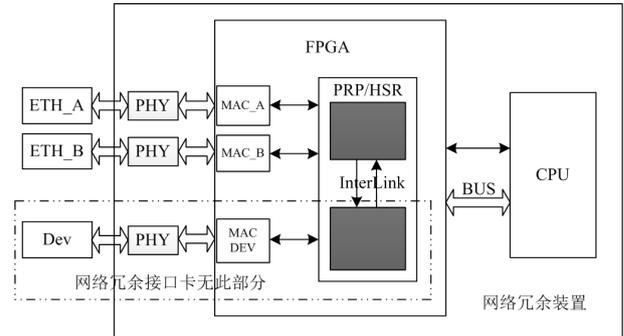


图 2 冗余设备硬件原理框图

Fig. 2 Hardware schematic diagram of redundant device

冗余设备的工作参数和状态由 CPU 进行配置和管理, 对外连接端口支持光电模式自适应, 光口模式下根据应用数据流量的不同可选择配置百兆或千兆模式, 系统支持光模块光功率的在线采集和监测。

1.2 软件实现

冗余装置的 FPGA 软件本文进行了四个方面的设计: MAC 以太网通信控制模块、存储控制模块、PRP&HSR 模块、报文分组转发模块。如图 3 所示。

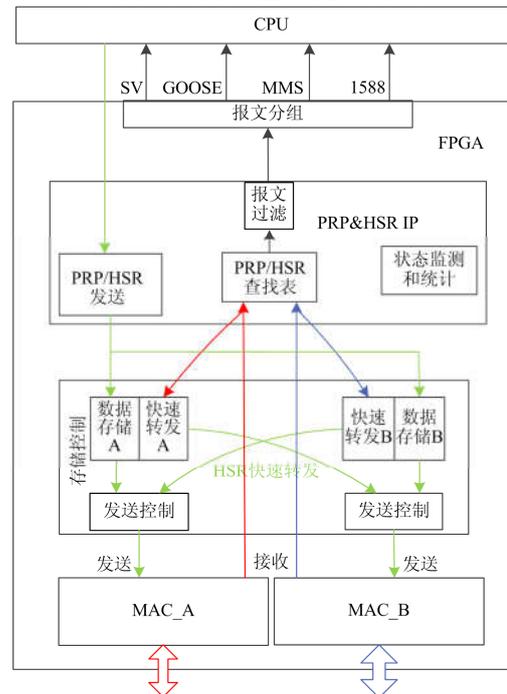


图 3 冗余装置的 FPGA 软件实现

Fig. 3 Implementation of FPGA software for redundant devices

FPGA 软件的实现流程如图 4 所示。

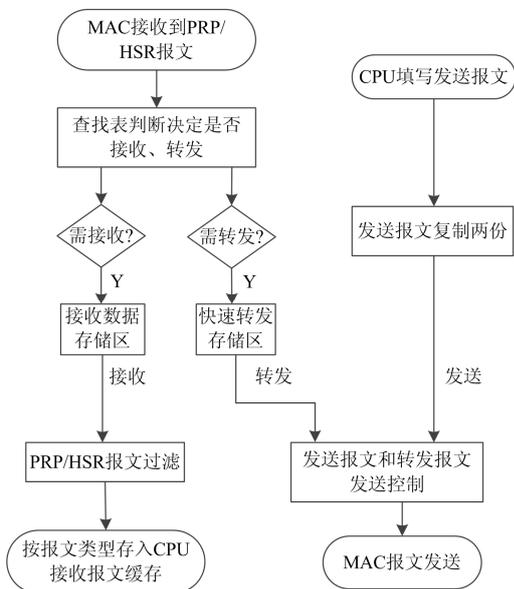


图 4 FPGA 软件流程

Fig. 4 Software process of FPGA

MAC 以太网通信控制模块在通用 MAC 功能的基础上, 将接收到的报文分类, 并且填写相应的描述符寄存器, 供后级的 FPGA 分类处理报文使用; 在报文的尾部加上时标, 供 CPU 处理报文使用; 并且在报文是 1588 报文的时候, 会在报文的尾部再追加 1588 时标。

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, 然后根据 MAC 提供的 PRP/HSR 信息, 向查表模块提交查询请求, 查表模块根据 PRP/HSR 查表算法返回的结果决定 A 路或者 B 路接收缓存和转发缓存的有效性, 对需要转发的报文, 存储控制模块可在接收到 HSR 标识时启动数据转发, 以减少转发报文的驻留时间。对需要接受的报文进行必要的过滤, 报文分组模块识别 SV、GOOSE、MMS、1588 报文, 分别存入不同的缓存区。

PRP/HSR 模块处理了 MAC 端的双网数据, 其利用 IEC62439-3 的 PRP/HSR 协议对两个网口接收的报文进行分析处理。当接收报文为非 PRP/HSR 报文时, 只接收, 不转发; 当接收报文目的地址符合本节点接收条件, 且源地址不为本节点源地址时, 同时接收和转发; 当源地址为本节点地址时, 不接收也不转发, 同时利用报文丢弃算法使得两个网口接收的冗余报文只保留一份。PRP/HSR 协议的丢弃算法, 基本原理是首先根据接收报文建立源设备的 MAC、报文序列号、接收时间等节点信息, 然后根据报文中 PRP/HSR 标识的序列号, 接收先到的报

文, 丢弃后到的报文, 最后再更新源设备节点信息。由于 A、B 端口始终同时处于接收报文状态, 在其中一个端口发生通信故障时, 另一个端口仍然正常实时接收报文, 使得基于 PRP/HSR 实现的冗余网络具有故障恢复零延时、故障不丢帧等优点。同时从 PRP/HSR 模块和 CPU 的接口来看, 始终是提供一份处理过的报文, 此模块优化了 FPGA 内部模块构架, 也大大减轻了 CPU 数据处理的负担。

对于 HSR 协议, 除了上述的两个网口接收的报文利用丢弃算法只送一份到 CPU 以外, 还需通过查找表确定当前网口收到的报文是否要通过另外一个网口转发出去。对需要转发的报文, 存储控制模块在接收到 HSR 标识时立即启动数据转发, 以减少转发报文的驻留时间。当 CPU 发送报文和转发报文同时出现时, 可通过发送控制模块选用转发优先控制策略优先进行报文转发。

FPGA 根据报文的类型和通道, 分类上送 SV、GOOSE、1588 及 MMS 报文。接收报文时, 根据 MAC 提供的描述符, 将 SV、GOOSE、1588 和 MMS 报文传送给相应 CPU; 发送报文时, MAC 根据描述符, 发送相应的报文。通过多路报文转发控制, 数据流更加明晰, 能很好地提高系统的可靠性与可扩展性。

2 网络冗余设备的工作流程

2.1 以太网报文发送流程

当网络冗余设备向外部发送报文时, PRP/HSR 中的发送模块接收上层应用的报文, 并根据 PRP/HSR 模式配置参数, 增加报文标志、RCT 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, 在控制模块判断链路可用时, 将报文发送至 MAC, 最终由 PHY 发送出去。

2.2 以太网报文接收流程

当网络冗余设备接收外部报文时, 设备的物理层双路 PHY 芯片接收比特流并通过 MII 接口传输至 FPGA 芯片, FPGA 中的 MAC 模块完成网络链路层数据校验, 并识别 PRP/HSR 报文类型、报文 MAC 地址以及 RCT 等信息, 存储控制模块将按过滤规则^[17-19]过滤之后所接收到的报文同时拷贝到接收缓存和转发缓存, 然后根据 MAC 控制模块提供的 PRP/HSR 信息, 向查表模块提交查询请求, 查表模块根据 PRP/HSR 查表算法返回的结果决定 A 路或者 B 路接收缓存和转发缓存的有效性, 对需要转发的报文, 存储控制模块可在接收到 HSR 标识时启动数据转发, 以减少转发报文的驻留时间。对需要接受的报文上送至 InterLink 模块, 进行报文目的地

址进行多播的 HASH 及 VLAN 过滤。报文分组模块识别 SV、GOOSE、MMS、1588 报文，分别存入不同的缓存区转发。各自送入对应的处理器。

3 网络冗余装置功能的实验验证

3.1 测试系统搭建

为验证本文所实现的双网冗余设备的性能，在某省电力科学研究院利用本文所设计的网络冗余接口盒将原有的合智一体装置、母线集中式保护搭建成站级规模网络测试系统，进行了智能变电站网络动模实验测试，并将相应的测试结果与常规网络的结果进行了对比分析。对 PRP 冗余技术，过程层网络采用树形网络结构；对 HSR 冗余技术，网络采用环网结构。本次测试进行了过程层网络性能测试，保护装置采用母差保护，使用的冗余盒(Redbox)采用了千兆网口，试验组网中最大接入间隔数量为 13 个，经交换机级联组网，网络测试仪也通过 Redbox 接入 PRP/HSR 网络，通过网络测试仪施加背景流量。PRP 和 HSR 网络测试系统分别如图 5 和图 6 所示。

3.2 PRP/HSR 网络传输对保护动作时间影响测试

由于单个冗余盒的传输延时约为微秒量级，冗余盒的接入对并行网络影响较小；对 HSR 网络，多级装置串级形成环网时其交换延时为所有 RedBox 中传输时间之和，同时由于 HSR 网络中 RedBox 承担了对各装置上送报文数据的转发交换功能，装置运行压力较 PRP 网络大，对环网报文传输的交换时间问题也会产生一定影响，因此测试主要针对 HSR 环网结构进行。由于变电站系统内网络通信延时的抖动性以及保护逻辑的分散性，单次保护动作的时间具有一定的离散性，本文针对常规网络组网和图 5 所示 HSR 网络组网分别进行了十次保护动作试验，并对这十次保护动作时间做统计分析对比。

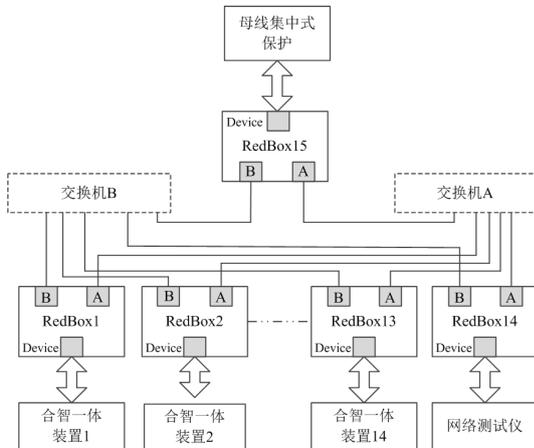


图 5 PRP 冗余网络测试系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of PRP redundant network test system

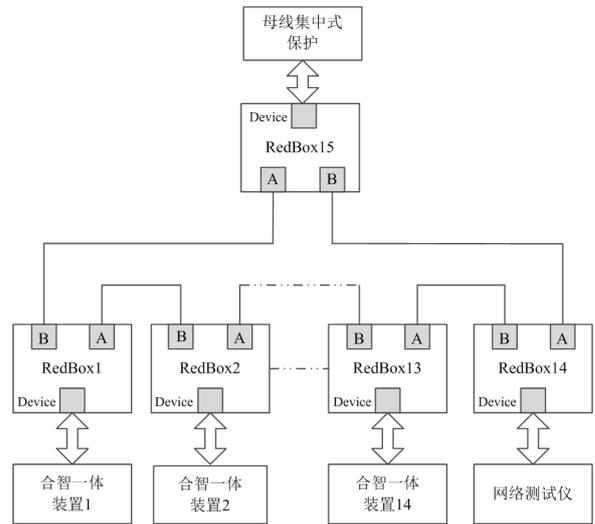


图 6 HSR 冗余网络测试系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of HSR redundant network test system

实验结果对比如表 1 所示。

表 1 HSR 环网与常规网络保护动作时间对比

Table 1 Protection action time comparison between HSR and conventional network

序号	动作时间	
	HSR 网络/ms	常规网络/ms
1	15.20	17.50
2	14.00	13.00
3	12.85	13.80
4	15.00	16.70
5	13.60	15.75
6	17.40	15.85
7	14.85	17.00
8	17.55	14.05
9	14.90	16.00
10	18.70	12.70
平均	15.4	15.2
最大	18.70	17.5

根据表 1 中的 HSR 环网中保护动作时间与常规网络的保护动作时间对比，采用 HSR 网络十次动作的平均时间要比常规网络的十次动作的平均时间慢 0.2 ms，采用 HSR 网络十次动作的最大延时时间为 18.7 ms，常规网络的十次动作的最大延时为 17.5 ms，采用 HSR 网络最大延时慢了 1.2 ms。可见在 HSR 环网采用千兆网通信速率和环网中级联装置数量有限时，由于网络传输引起的延时对于保护整组动作时间的影响可以忽略，能够满足电力系统主保护对于速动性的要求。

3.3 网络压力测试

网络中不同报文的发送频率及报文帧长均会对

数据传输情况造成影响,智能变电站自动化系统过程层网络中对带宽占用最高的主要为SV报文,网络压力测试主要模拟系统中存在大量SV报文的情况。通过网络测试仪对发送报文的MAC地址、以太网类型、VLAN Tag、APPID、报文长度、发送频率等参数进行配置,在冗余网络中注入定制的类型SV报文帧格式的背景流量报文,验证PRP/HSR网络在大量数据交换压力下的性能,试验结果分别如表2和表3所示。

表2 PRP 网络压力测试

Table 2 Network pressure test based on PRP

背景流量/%	网络总流量/%	保护动作情况
0	8.61	正常
10	18.67	正常
20	28.82	正常
30	38.69	正常
40	48.61	正常
50	58.54	正常
60	68.35	正常
70	78.95	正常

表3 HSR 网络压力测试

Table 3 Network pressure test based on HSR

背景流量/%	网络总流量/%	保护动作情况
0	8.54	正常
10	18.31	正常
20	28.26	正常
30	38.24	正常
40	48.72	正常
50	58.54	正常
60	68.08	正常
70	79.14	正常

上述实验结果表明,PRP和HSR网络在注入背景流量达到千兆网口70%带宽的情况下数据交换情况正常,按现有报文分析仪定值规定在流量较大时报过负荷告警,在网络压力未触发系统故障时保护能正确动作。

3.4 网络故障切换测试

冗余网络技术通过实时的双重链路冗余保证了冗余网络单网故障后报文的零丢失和切换的零延时,通过在冗余网络运行中设置各种链路中断情况测试冗余网络的通信路径切换性能。根据IEC 62439-3协议,冗余网络协议在严格保证网络切换过程中报文不丢包的情况下可能出现单个报文重复上送的情况,通过网络报文分析仪对网络切换过程报文的的上送情况分析冗余网络在系统故障中链路切换的性能。

在PRP和HSR冗余网络中各自进行20次网络切换测试,A网中断切换至B网单独运行后恢复,试验过程中出现了5次单个报文重复上送的情况,但未出现丢帧和不完整帧现象。测试结果表明本文所设计的网络冗余装置达到了冗余网络单网故障链路中断后报文的零丢失和网络切换的零延时的效果。

4 结语

本文基于IEC62439-3规范研制的智能变电站双网冗余装置,在智能变电站网络是基于PRP/HSR的冗余网络架构时,实现了冗余网络单网故障恢复零延时、单网故障时不丢帧,完全满足当前智能变电站的应用要求。基于PRP/HSR的冗余网络架构是将来智能变电站内部组网的趋势。随着SOC芯片在电力系统开始广泛使用,本文所采用的CPU+FPGA实现的硬件构架可以用SOC芯片替代,达到更低的硬件成本及更好的系统性能。本文所研制的双网冗余装置中的双网冗余接口卡已成功应用于变电站二次设备就地化系统^[20]。

参考文献

- [1] 杨凯,余高旺,宋勇辉,等.智能变电站冗余数据处理方案的研究与应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):150-154.
YANG Kai, YU Gaowang, SONG Yonghui, et al. Research and application of redundant data processing scheme for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 150-154.
- [2] 张颖,曾翔,文明,等.数字化变电站通信冗余实施方案的改进及可靠性分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):124-128.
ZHANG Ying, ZENG Xiang, WEN Ming, et al. Improvement of redundant communication in digital substation and its reliability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 124-128.
- [3] 郑飞,路建涛,高莉,等.基于IEC60870-5-103规约的保护装置冗余网络通信设计[J].电力系统保护与控制,2010,38(24):168-171,194.
ZHENG Fei, LU Jiantao, GAO Li, et al. Design of redundant network communication of microcomputer-based relay protection devices based on IEC60870-5-103 transmission protocol[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 168-171, 194.
- [4] 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.
- [5] 胡道徐,李广华.IEC 61850通信冗余实施方案[J].电力系统自动化,2007,31(8):100-103.

- HU Daoxu, LI Guanghua. Application of redundant communication using IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 100-103.
- [6] 余越, 周春霞, 詹荣荣, 等. 智能变电站继电保护装置网络压力产生原因及测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 156-162.
- YU Yue, ZHOU Chunxia, ZHAN Rongrong, et al. Research on network stress causes and test method of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 156-162.
- [7] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96.
- ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.
- [8] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, 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.
- [9] 吴在军, 胡敏强, 杜炎森. 变电站通信网络实时性能仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 45-49.
- WU Zaijun, HU Minqiang, DU Yansen. Analysis of realtime performance of communication network in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 45-49.
- [10] High availability automation networks-part 3: parallel redundancy protocol (PRP) and high-availability seamless redundancy (HSR) IEC 62439-3—2010[S].
- [11] 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.
- [12] 张宪军, 刘颖, 余华武, 等. IEC62439 PRP 冗余丢弃算法设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 110-115.
- ZHANG Xianjun, LIU Ying, YU Huawu, et al. IEC62439 PRP redundancy discard algorithm design[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 110-115.
- [13] 李俊刚, 宋小会, 狄军峰, 等. 基于 IEC 62439-3 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 IEC 62439-3[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.
- [14] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络的组建与冗余方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 38-43.
- DOU Xiaobo, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Establishment and redundancy scheme of communication network in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 38-43.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 杨贵, 吕航, 袁志彬, 等. 智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 70-74.
- YANG Gui, LÜ Hang, YUAN Zhibin, et al. Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 70-74.
- [19] 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.
- [20] 郑玉平, 吴通华, 戴魏, 等. 变电站二次设备就地化系统网络架构探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 20-26.
- ZHENG Yuping, WU Tonghua, DAI Wei, et al. Discussion on network architecture of outdoor installation protection system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 20-26.

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-10-10

作者简介:

谢黎(1978—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子与电力系统控制保护硬件平台。

E-mail: xieli@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)