

DOI: 10.7667/PSPC170803

基于 EPON 技术的智能变电站通信方案优化应用研究

朱 玛¹, 杜振华², 章立宗¹, 李 勇¹, 金乃正¹

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 分析了现有智能变电站通信网络存在的问题。基于智能变电站的网络通信发展需求, 以以太无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)技术为基础, 研究高可靠性自适应网络技术(简称改进 EPON 技术)。改进 EPON 技术优化了传统 EPON 的通信业务及服务质量(Quality of Service, QoS), 利用变电站配置描述文件(SCD)改进网管功能, 通过优化网络延时测量方案, 实现延时精确控制及可追溯, 同时引入并行冗余网络(PRP)技术, 满足智能变电站对实时性、易用性和可靠性的需求。提出基于改进 EPON 技术的通信方案, 通过仿真验证, 证明该方案适用于智能变电站, 并在具体工程中得到应用。

关键词: 智能变电站; IEC 61850; SV; GOOSE; SCD; PRP; OLT; ONU

Research on optimization of communication scheme for smart substation based on improved EPON technology

ZHU Ma¹, DU Zhenhua², ZHANG Lizong¹, LI Yong¹, JIN Naizheng¹

(1. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: The existing problems of communication network in smart substation are analyzed. Based on the development of network communication in smart substation, a high reliability adaptive network technology is developed based on Ethernet Passive Optical Network (EPON) technology (hereinafter referred to as improved EPON technology). The improved EPON technology improves the traditional EPON communication service and Quality of Service (QoS). The network management function is improved by using the Configuration Description File (SCD). By optimizing the network delay measurement scheme, the precise control and traceability of the delay can be realized, and the Parallel Redundant Network (PRP) technology is introduced, in order to meet the demand of smart substation in real-time, usability and reliability. A communication scheme based on improved EPON technology is proposed, the simulation results show that the proposed scheme is suitable for smart substation and has been applied in specific projects.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGZJ0000 and No. BGJS1600324).

Key words: smart substation; IEC 61850; SV; GOOSE; SCD; PRP; OLT; ONU

0 引言

变电站自动化系统按照 DL/T 860 通信标准, 在功能逻辑上由站控层、间隔层、过程层三层组成。三层之间采用分层、分布、开放式网络系统实现连接, 整个体系结构为“三层两网”结构^[1-2]。通信网络基于工业以太网技术构建, 具有很高的灵活性,

方便设备接入, 但资源竞争问题、业务相互影响, 通信稳定性等多个方面无法满足继电保护应用需求; 随着智能变电站的发展, 保护、自动化、视频监控、安防、消防和管理等业务需求不断增加, 未来的智能变电站网络必须是安全的、可靠的和自适应的, 能承载多业务接入的坚强的通信网络^[3]。

EPON技术具有网络拓扑灵活、可靠性高、扩容灵活方便和数据安全性高等特点, 在电力抄表、配电自动化及电力智能家庭等领域广泛应用, 但这些领域对通信实时性要求不高^[4]。而智能变电站对

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGZJ0000, BGJS1600324)

数据传输质量和实时性却有很高要求,因此EPON应用于智能变电站领域需对其通信服务质量进行改进^[5]。

本文基于EPON技术研究高可靠性自适应网络技术(改进EPON技术),改进EPON技术通过数据路由及通道时隙自动分配技术,合理分配带宽,提高通信效率;数据延时自适应控制技术解决网络采样时数据同步对外部时钟的依赖问题;高可靠性网络冗余技术,实现从设备到网络的冗余功能,提高系统可靠性。改进EPON技术具有很强的通信业务及服务质量管理(QoS)功能,保证数据传输延时、抖动及可靠性等满足继电保护需求。

1 基于改进 EPON 技术的变电站通信方案

1.1 现有智能变电站通信方案分析

目前国内智能变电站通信网络都是基于工业以太网构建,以太网技术是一种存在一定程度资源竞争的通信技术,目的是为了最大限度地提高通信资源的利用效率,具有很强的组网灵活性^[6]。但在提高通信效率的同时,却在通信的严格性和资源有序分配方面做了一些牺牲。以太网技术在智能变电站的应用过程中暴露出了一些问题,主要有如下几个方面:

- 1) 由于通信资源竞争存在的不确定性,无法保证智能变电站设备对数据传输时延、可靠性和稳定性的极高要求;
- 2) 继电保护装置的数据传递要求时延短且稳定,而以太网技术在通信稳定时延方面存在问题;
- 3) 为了保证通信的可靠性,继电保护装置不允许通道之间相互影响,而以太网技术组成的通道之间存在相互影响的现象^[7]。

另外,智能变电站网络设置复杂,通信节点较多,为快速、准确地将数据传递到目的节点,必须采用技术手段对网络进行有效管理。VLAN(虚拟局域网)和 GMRP(GARP 组播注册协议)是较为常用的两种网络管理技术手段。GMRP 由于在正常运行时需要报文交互,存在较高的不可控性,可靠性较低,从安全性、可管理性方面考虑,一般采用 VLAN 技术进行网络流量控制,但在工程应用过程中,VLAN 的划分人工参与度较高,需要对每台交换机进行设置,工作量大。

1.2 基于改进 EPON 技术的通信方案

针对 1.1 节分析的以太网技术存在的资源竞争、通信稳定性差、业务相互干扰等问题,在具体应用中做了一些变通,如采用“直采直跳”方式解决面向非连接的资源竞争问题,但带来了光纤数量

多、数据共享性差、网络设计复杂、装置发热严重和可靠性降低等一系列问题。同时“三层两网”架构也使建设成本高,网络管理复杂。

基于改进 EPON 技术的智能变电站通信网络,主要解决目前变电站通信存在的突出问题:

- 1) 通信结构复杂,简化为“三层一网”;
- 2) 网络时延不可控,通过优化的数据延时字段存储方式,可追溯每一级网络传输设备的附加时延信息,方便事故追忆,做到延时精确控制;
- 3) 网络管理复杂,将网管设备引入智能变电站,结合 SCD 文件实现数据路由及通道时隙自动分配,提高通信效率;
- 4) 网络可靠性差,PRP 终端接收模块及 ONU 模块都集成到装置内部,实现了端到端的 1+1 保护,有效提高了系统的可靠性。

如图1所示,基于改进EPON技术的通信网络,承载MMS、SV、GOOSE、IEEE1588多业务合一传输^[8],提供了一种更加扁平化、更经济适用、便于维护的智能变电站网络方案。

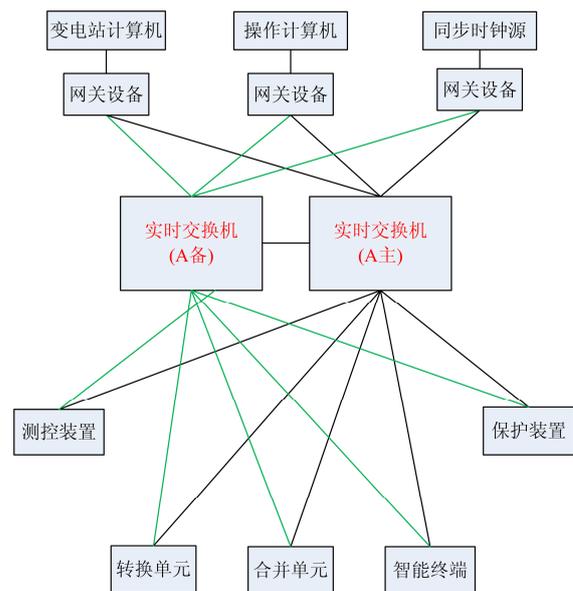


图 1 基于改进 EPON 技术的网络示意图

Fig. 1 Network sketch map based on improved EPON technology

1.3 构建改进 EPON 通信网络的关键技术研究

1.3.1 数据路由及通道时隙自动分配技术

将网管系统引入智能变电站,结合现有通信系统管理技术,设计开发一种更有效的智能网络集中管控平台,提供完善的基于端到端的网络管理,大大提高了设备运维效率,降低了用户的运维成本。

网管平台解析 SCD 文件,获取保护装置的 CABLE 信息,可以找到连接到 OLT 的端口号,同

时通过订阅的 SV 报文的 APPID, 找到发布方的 IED 信息, 通 CABLE 信息可以找到连接到 OLT 的端口号, 从而建立两个设备连接到 OLT 的端口之间的连接关系, 完成数据的自动路由分配, 同时 OLT 根据注册 IED 终端数量, 自动完成带宽时隙分配。

网管平台连接关系如图 2 所示, 业务配置流程如下:

1) 网管平台导入 SCD 文件, 解析出 IED 装置间基于 APPID 的 SV、GOOSE 点到点、点到多点业务流;

2) 根据 OLT 的出厂默认 IP 地址, 在网管上创建中心网元 OLT0 和 OLT1;

3) 在网管上打开 OLT 对应端口的注册使能;

4) ONU 注册请求上报网管平台, 网管平台根据 ONU MAC 地址进行人工确认授权, 并分配带宽;

5) ONU 将用户口收到的未知 APPID 上报给网管, 网管根据收到的 APPID 号来自动学习 IED 装置与 ONU 的用户口的对应关系;

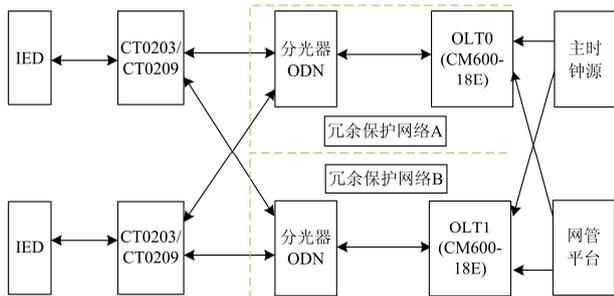


图 2 网管平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of network management platform

6) 根据自动学习到的端口对应关系, 结合 SCD 文件, 网管自动计算出业务流的配置文件;

7) 网管将相应的配置分发给 OLT 和各自的 ONU。

整个配置过程人工干预度很小, 对于完全静默的 IED(只有数据接收, 没有数据发送的 IED)需要手动添加路由关系。自动分配过程是在上电初始化时在线生成, 离线运行, 很好地解决了 VLAN 配置的复杂性和 GMRP 在线运行导致的不稳定性。

1.3.2 基于延时可测的数据延时自适应控制技术

保护装置采用“网采网跳”模式最大的障碍在于跨间隔保护必须依赖外部时钟, 当外部时钟异常时, 跨间隔保护将退出运行, 风险很高。

数据延时自适应控制技术, 精确计算 SV 报文在交换设备内的驻留延时 ΔT 并写入 SV 报文中, 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 ΔT , 还原采样数据的发生时刻, 通过插值法实现同步, 其原理等效“直采”模式, 体现了采样数据“谁使用谁同步”的基本原则。延时可测实现原理如图 3 所示。

对于延时字段存储位置, 常用的方案有表 1 中的两种, 但都存在一些缺点, 后续应用推广存在潜在风险。

改进的延时字段存储位置方案在 SV 原始报文后附加字段存储时延 ΔT , 如图 4 所示, CRC0 为原始 SV 报文中自带的以太网 CRC 校验结果, CRC1 为添加时延附加字段后重新对整帧报文进行以太网 CRC 校验的结果。

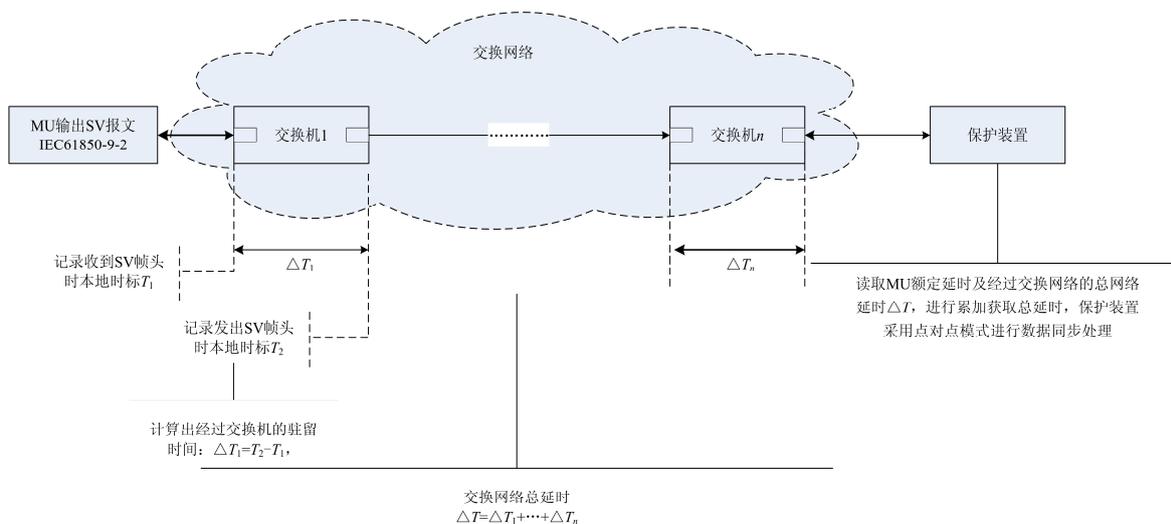


图 3 延时可测实现原理图

Fig. 3 Schematic diagram of time delay measurement

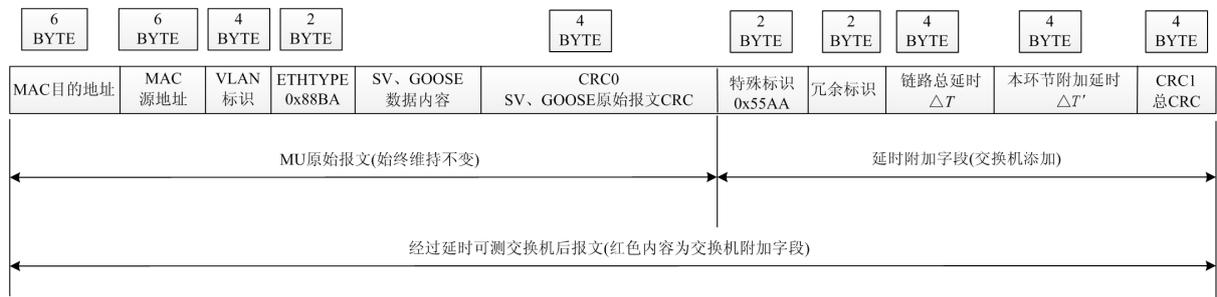


图 4 改进延时字段存储位置示意图

Fig. 4 Diagram of improved delay field storage location

表 1 延时字段存储位置方案

Table 1 Delay field storage location scheme

方案	延时字段存储位置	缺点
方案 1	占用 IEC 61850-9-2 报文的两个保留字 Reserved1、Reserved2 中的低 30 位	IEC 61850 标准将保留字的低 28bit 作为 IEC/TS 62351-6 安全性使用。方案的推广与应用存在潜在风险
方案 2	驻留延时叠加到 MU 固有延时的品质位	存在延时叠加问题，对于录波及事故追忆带来一定难度

本方案具有如下优点：MU 发出的 SV 原始报文内容不变，保护装置使用 CRC0 可进行二次校验，如果误改 SV 原始报文中的采样值，保护装置能立即识别，防止误动；在附加延时字段中可存储多个 ΔT 信息，可追溯每一级网络传输设备的附加延时信息，方便事故追忆。

数据延时自适应控制技术应用于智能变电站，物理网络结构采用网络方式，数据同步则采用点对点直接采样原理，有效解决网采模式下保护装置对

外部时钟的依赖，同时数据实现共享，方便实现高级应用及系统改扩建。

1.3.3 应用到 PRP 的实现方式

IEC61850 ED2.0 基于 IEC 62439(High Availability Automation Networks)标准，推荐了 PRP(Parallel Redundancy Protocol)并行网络冗余协议。并行网络冗余技术应用到变电站通信系统，在保护覆盖范围、保护切换方式方面有重大突破^[9]。

变电站配置两台实时交换设备(OLT)，每台实时交换设备接入 PRP 网络的一个网络，实现 PRP 网络冗余功能^[10]。如图 1 所示，两台实时交换机相互独立，一台故障不影响另一台的正常运行，满足 $N-1$ 故障需求。

保护装置、智能终端、合并单元等二次设备内部集成 PRP 接收模块，每个装置设置 2 个 PRP 冗余口，分别接入实时交换机(A 主)和实时交换机(A 备)。冗余数据进入装置后经 PRP 模块后输出标准业务报文。如图 5 所示，CPU1 和 CPU0 间的数据

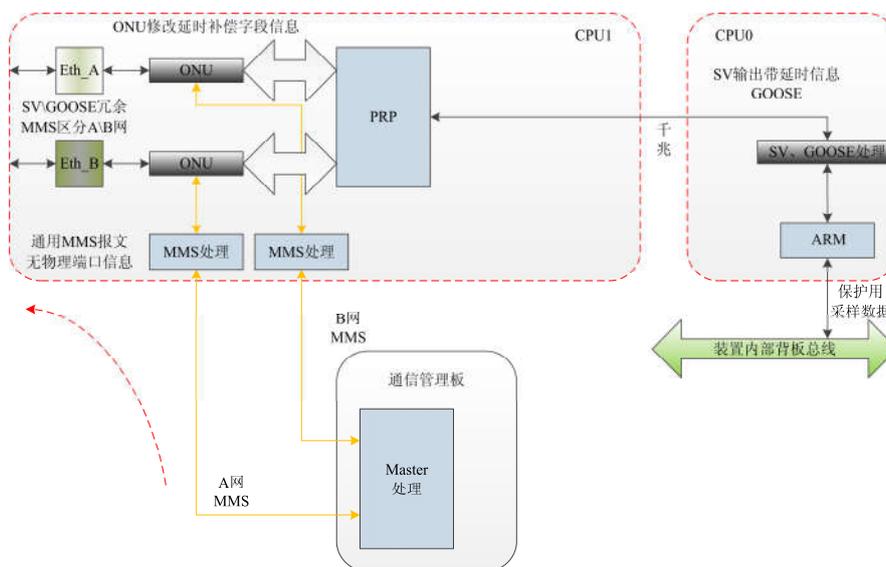


图 5 EOPN 数据通信插件原理图

Fig. 5 Schematic of the EPON data communication plug-in

通信为标准报文;同时,装置内部设计 ONU 模块,替代外置 ONU 应用,简化工程设计环节,提高装置可靠性,同时达到二次设备即插即用、免维护的目的^[11],对于分布式母差及保护就地化分散安装的网络实现有重要参考意义^[12-13]。

2 仿真验证

2017 年 3 月,在泰尔实验室对通信系统进行了全面测试,由于 MMS 报文对实时性要求不高^[14-15],因此重点验证 GOOSE、SV 报文的传输性能^[16-17]以及 PRP 网络冗余功能。验证系统如图 6 所示。

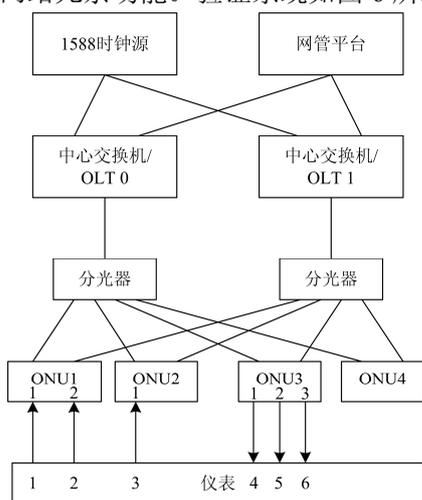


图 6 测试系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test system

1) GOOSE 业务报文的时延验证。仪表口 1 发送 10 M、20 M、40 M、80 M、100 M 的 GOOSE 业务报文,持续 1 min,检查仪表口 4 收到 GOOSE 业务报文的时延在 350 μ s 以内^[18]。

2) SV 业务报文的时延、抖动验证。仪表口 1 发送 10 M SV 业务报文,持续 1 min,检查仪表口 4 收到 SV 业务报文的时延;仪表口 2 发送 10 M、20 M、40 M、80 M、100 M 的 MMS 背景流量,持续 1 min,检查仪表口 4 收到业务报文的时延;停仪表口 2,仪表口 3 发送 10 M、20 M、40 M、80 M、100 M 的 MMS 背景流量,持续 1 min,检查仪表口 4 收到业务报文的时延;实测 SV 报文的时延在 350 μ s 左右,抖动不超过 1 μ s。

3) PRP 冗余功能验证。验证步骤如下。

a) 拔 ONU1 的 PON1 口光纤,插回。检查仪表口 4 是否有丢包。

b) 拔 ONU1 的 PON2 口光纤,插回。检查仪表口 4 是否有丢包。

c) 将中心交换机/OLT 0 掉电重起,检查仪表口

4 是否有丢包。

d) 等中心交换机/OLT 0 重起完毕后,将中心交换机/OLT 1 掉电重起,检查仪表口 4 是否有丢包;经多次测试,均无丢包情况发生,PRP 冗余功能对数据进行了可靠保护。

实测 SV 报文在各种背景流量下抖动都小于 1 μ s,SV、GOOSE 报文时延在 350 μ s 左右,性能指标优于传统以太网,PRP 冗余功能对传输数据进行了可靠保护,测试结果满足智能变电站应用需求。

3 工程应用

2017 年 5 月浙江 220 kV 永宁变 A 套保护改造完成并投产,改造方案如图 7 所示,全站采用“三层一网”的双星型网络拓扑结构,MMS、SV、GOOSE、IEEE 1588 等多业务实现共网共口、分层传输。

1) 实时交换设备,部署两台,一主一备,实现 PRP 网络冗余功能;

2) 保护装置、智能终端、合并单元的 1 口和 2 口为冗余口,经分光器(ODN)分别接到实时交换设备 OLT 主 A 和 OLT 备 A,通过 PRP 网络完成 SV、GOOSE 信息交换;

3) 站控层设备,经外置 ONU 实现与实时交换设备的数据交换。

投运以来,各装置状况良好,网络通信稳定,无报文丢包等异常发生,运行可靠^[19-20]。

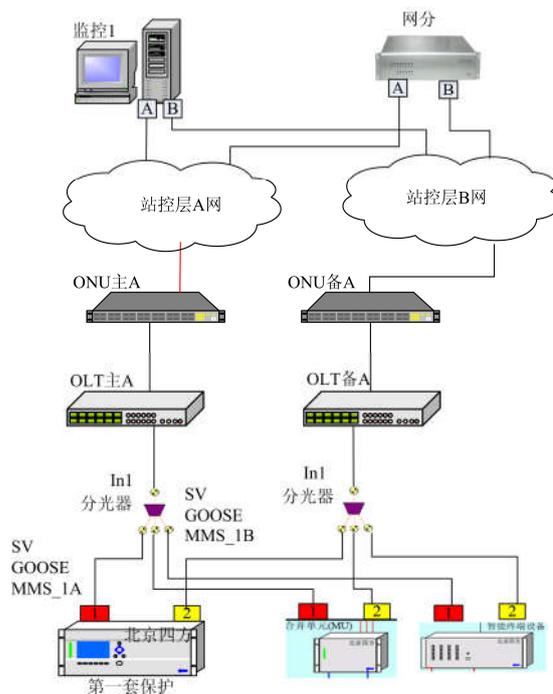


图 7 永宁变改造方案

Fig. 7 Transformation scheme of Yongning substation

4 结论

非连接的以太网技术应用于智能变电站存在资源竞争、通信稳定性差和业务相互干扰等问题,传统 EPON 技术应用在智能变电站为满足高实时性和高可靠性需求,也需要改进。本文提出基于改进 EPON 技术的通信方案架构,实现路由及带宽的自动分配,有效改善了通信业务及服务质量(QoS);多业务共网共口、分层隔离传输,简化了网络架构;结合延时可测技术、PRP 冗余技术,解决了网络采样对同步时钟的依赖问题,提高了网络可靠性。经过仿真验证,结果证明网络通信性能指标均优于传统以太网,并在浙江 220 kV 永宁变工程应用,运行情况良好。

参考文献

- [1] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-88.
YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al. Research and implementation of the communication of process bus based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-88.
- [2] 董红, 马冠雄, 翟世涛, 等. 广州 220 kV 电网典型网架结构选择初步探讨[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 7-10, 16.
DONG Hong, MA Guanxiong, ZHAI Shitao, et al. Discussion on selection for typical grid structure of guangzhou 220 kv power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 7-10, 16.
- [3] 孙一民, 李延新, 黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 90-93.
SUN Yimin, LI Yanxin, LI Qiang. A grading solution for building digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 90-93.
- [4] 凌光, 许伟国, 王志亮, 等. 基于 EPON+ 的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 89-94.
LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, et al. Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 89-94.
- [5] 金乃正, 朱玛, 马平, 等. 基于 EPON 通信技术的智能变电站保护控制技术研究[J]. 数字技术与应用, 2013(1): 36-38.
JIN Naizheng, ZHU Ma, MA Ping, et al. Research on relay protection and control technology in smart substation based on EPON communication technology[J]. Digital Technology and Application, 2013(1): 36-38.
- [6] 俞辰颖. 智能变电站网络技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
YU Chenying. The application of network technology in smart substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [7] 魏勇, 宋小会, 许伟国, 等. 智能变电站过程层网络采用 EPON 技术实用性研究[J]. 电气技术, 2011(10): 15-20.
WEI Yong, SONG Xiaohui, XU Weiguo, et al. Practical research on EPON technology applied in process level network of smart substation[J]. Electrical Engineering, 2011(10): 15-20.
- [8] 梅军, 徐迅, 钱超, 等. 应用于配电网的时钟偏移估计的 IEEE1588 改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 83-89.
MEI Jun, XU Xun, QIAN Chao, et al. An improved IEEE 1588 synchronization scheme on the clock offset estimation applied in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 83-89.
- [9] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [10] 詹智华, 詹荣荣, 陈争光, 等. 基于 EPON 网络的智能变电站继电保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 102-107.
ZHAN Zhihua, ZHAN Rongrong, CHEN Zhengguang, et al. Research of relay protection technology smart substation based on EPON network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 102-107.
- [11] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [12] 裘瀚涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [13] 张小易, 彭志强. 智能变电站站控层测试技术研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 88-94.
ZHANG Xiaoyi, PENG Zhiqiang. Research and

- application on substation level test technology of smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 88-94.
- [14] 窦晓波, 周旭峰, 胡敏强, 等. IEC 61850 快速报文传输服务在 VxWorks 中的实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 41-47.
DOU Xiaobo, ZHOU Xufeng, HU Minqiang, et al. Realization of fast message transmission services based on IEC 61850 in VxWorks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 41-47.
- [15] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 91-94.
XU Chengbin, SUN Yimin. A communication solution of process layer GOOSE in digitized substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 91-94.
- [16] 李晓朋, 赵成功, 李刚, 等. 基于 IEC 61850 的数字化继电保护 GOOSE 功能测试[J]. 继电器, 2008, 36(7): 59-61.
LI Xiaopeng, ZHAO Chenggong, LI Gang, et al. GOOSE test of digital relays based on IEC 61850[J]. Relay, 2008, 36(7): 59-61.
- [17] 李滨, 杜孟远, 祝云, 等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 34-44.
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [18] 王杨, 谢开贵, 胡博, 等. 基于时序模拟的离网型微网可靠性分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 206-210.
WANG Yang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Reliability analysis of islanded microgrid based on sequential simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 206-210.
- [19] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed nenergy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [20] 胡波, 顾正萌, 郝佳, 等. 统一虚拟 DCS 仿真平台[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 118-121.
HU Bo, GU Zhengmeng, HAO Jia, et al. A unified virtual DCS simulation platform[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 118-121.

收稿日期: 2017-05-28; 修回日期: 2017-10-25

作者简介:

朱 玛(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护和智能变电站技术研究; E-mail: Zhuma1201@sina.com

杜振华(1974—), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统数字化微机保护装置研发; E-mail: duzhenhua@sf-auto.com

章立宗(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护和智能变电站技术研究。

(编辑 葛艳娜)