

用于就地化保护关键技术的 SoC 设计

于同伟¹, 丁岳², 李良², 王峥²

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110000; 2. 北京智芯微电子科技有限公司
(国家电网公司重点实验室、电力芯片设计分析实验室), 北京 100192)

摘要: 为解决变电站继电保护中存在因多个功能芯片导致的系统可靠性降低、运维难度增大为目的, 提出了基于双核 Cortex-A9 的自研智能就地化保护 SoC 芯片。该芯片通过采用基于节点冗余算法的 HSR 环网结构, 确保环内任何一个元件或链路阻塞时, 报文均能沿另一方向传递至主机。使用多采样率多通道的动态可重构 ADC 采集模块, 使芯片可以根据不同实时性要求进行软件修改。采用时钟数据恢复对 FT3 码流进行处理, 以提高信息传输的可靠性。在 UMC55 工艺下, 完成了该芯片的版图设计, 芯片面积为 5.3×5.3 mm, 主时钟频率可达到 500 MHz。仿真结果验证了所提出芯片的可行性和先进性。

关键词: 智能变电站; 就地化保护; SoC; HSR 环网; 可重构 ADC; 时钟数据恢复

SoC design for key technologies of outdoor installation protection

YU Tongwei¹, DING Yue², LI Liang², WANG Zheng²

(1. Electrical Power Research Institute of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China;
2. State Grid Key Laboratory of Power Industrial Chip Design and Analysis Technology,
Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the deterioration in system stability and the increase in difficulty of operation and maintenance caused by multiple functional chips in substation relay protection, this paper proposes a self-developed SoC chip for intelligent outdoor installation protection based on a dual-core Cortex-A9. First, the chip adopts the HSR ring network structure based on the node redundancy algorithm to ensure that when any component or link in the ring is blocked, message will still be transmitted to the host in another direction. Then, with a multi-rate multichannel dynamic reconfigurable ADC acquisition module in the chip, the software of chip can be modified according to different real-time requirements. Besides, clock data recovery is used to process FT3 code stream to improve the reliability of information transmission. The floorplan and layout design of chip are presented through UMC55 CMOS process. The total area is 5.3×5.3 mm and the main clock frequency can reach 500 MHz. The proposed chip is verified to be feasible and advanced through simulation results.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5222LK17001F).

Key words: intelligent substation; outdoor installation protection; SoC; HSR net; reconfigurable ADC; clock data recovery

0 引言

2009年, 国家电网公司在“2009特高压输电技术国际会议”上提出“坚强智能电网”^[1]发展规划。智能化变电站作为“坚强智能电网”的重要组成部分, 以设备全智能化和测控全智能化为基础, 通过保护装置就地化, 将分散的保护、监测、控制、计

量连接网络, 实现电网实时自动控制、智能调节、协同互动等功能^[2-5]。

智能化变电站的终端设备采用就地汇控柜的安装方式, 易受到恶劣天气和电磁干扰的影响, 因此保护装置不仅要具有良好的通信性能, 还要具备更高的可靠性。在 IEC62439 标准^[6]中定义了高可用无缝环网协议(HSR), HSR 结构在遇到故障时具有零恢复时间的特点, 且设备硬件支出较少, 适用于多种网络结构, 得到了广泛的使用。文献[7-12]对 HSR

环网中的保护装置相关技术实现进行了说明。

就地化保护装置可通过集成的解决方案, 将合并单元功能、保护功能、通信功能等功能使用片上系统(SoC)芯片技术集成起来, 功能融合后的实现对硬件资源和软件资源占用得到简化。文献[13]提出了基于分立板件的集成设备设计方案。文献[14]提出了基于 SoC 芯片实现的纵向就地化保护系统架构。文献[15]提出了一种在 SoC 中实现的采用 HSR 通信接口的网络物理生产系统网关的体系结构。文献[16]基于 ZYNQ 芯片阐释了嵌入式小型化继电保护平台的设计方法。文献[17]介绍了基于 ARM 核心主控芯片的 ADE7880 芯片在智能电表中的应用。文献[18]提出了以 ARM 为主芯片的智能检测单元。

本文针对就地化保护中所面临的稳定性问题, 在传统节点冗余算法 HSR 环网的设计中, 增加端口交换模式控制与端口冲突仲裁的逻辑, 确保当环网中任何一个元件或链路故障致使某个方向阻塞时, 报文均能沿另一方向传递至主机。在采集模块的设计中, 针对固定采样率与不同业务对采样差异化需求的适应性问题, 设计使用多采样率多通道的方案, 使保护芯片可以根据系统实时性要求, 配置修改 ADC 通道。在 LVDS 板间通信模块中, 采用时钟数据恢复技术对 FT3 码流进行处理, 保障高速率信息传输的稳定性。最后, 完成芯片的版图设计, 结果显示芯片主时钟频率可达到 500 MHz。

1 关键技术

1.1 HSR 环网

本文所述就地化保护芯片采用高可靠无缝冗余(HSR)环网技术。保护主机与保护子机采用接入双向串行网络拓扑结构的组网, 如图 1 所示。

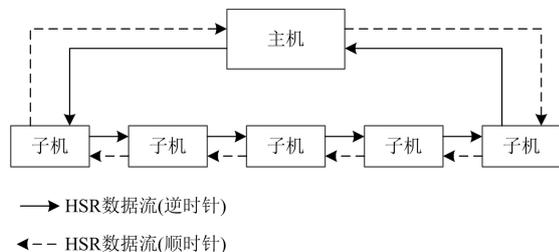


图 1 主机子机的 HSR 数据流

Fig. 1 Data stream in host and terminal

HSR 协议基于节点冗余算法, 环网中的主机和子机节点通过 2 个端口连接到 2 个独立网络。HSR 环网内部进行通信时, 发送端将报文复制成 2 份发送至两个网络, 网络中的节点采用“接收先到报文,

丢弃后到报文”的通信协议, 收到报文信息后, 沿相同方向进行转发, 目标节点根据两个网络报文的到达顺序, 接收先到报文, 丢弃后到报文, 报文信息最终沿顺时针和逆时针方向的环内节点传递至主机。

由于网络中每一个节点的两个端口均处于报文接收状态, 当环网内任何一个元件或链路故障致使某个方向阻塞时, 另外一个端口依然可以接收到从另一网络传输的报文^[19]。因此 HSR 环网具有零恢复时间、不丢帧的优异性能, 确保了高速通信的可靠性。

本文所述的就地化保护芯片通过 4 个千兆以太网口连接到 HSR 环网, 如图 2 所示。在就地化保护芯片内部, 4 个千兆以太网口通过 FPGA 实现互通。针对具体使用中网口传输冲突情况, 做出以下设计:

1) 端口数据交换。A、B、C、D 四个端口均支持发送和接收, 任意两个端口可作为一个网络的发送接收端接入, 有 3 种端口数据交换支持模式 AB||CD、AC||BD、AD||BC。子机节点可同时接入两个网络, 因此信息报文可通过子机节点在多层网络进行跳转。

2) 端口数据寄存。A、B、C 和 D 端口数据可以独立经过 AXI 总线接口传送到 DDR 存储器。

3) 端口冲突仲裁。通过配置寄存器列表可更改端口数据交换模式, 可根据命令队列对数据端口冲突进行仲裁。本地数据帧发送设置最高优先级, 当不同发送报文阻塞发送端时, 可根据优先级将后发送报文暂存在寄存器中, 随后进行发送。

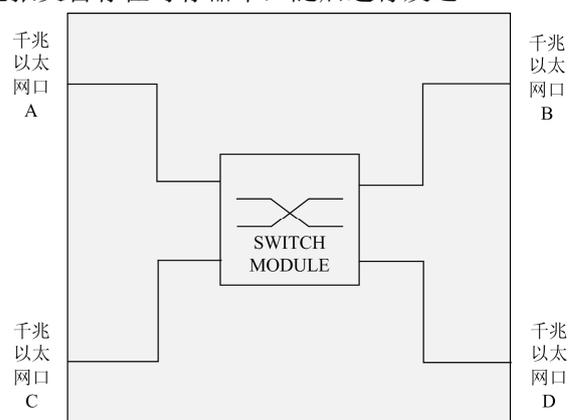


图 2 以太网口连接

Fig. 2 Connections of Ethernet ports

1.2 动态可重构 ADC 采集模块

就地化保护装置中涉及对变电站中数据采集与监控(SCADA)系统的稳态数据、保护及故障录波的暂态数据及相量测量单元(PMU)的动态数据采集。

如图 3 所示，在传统的采集设备中，每一种数据采用不同的电压、电流互感器和独立的速率，因此在设备的设计及实际使用中具有较高复杂度。

为减少测控设备数量，降低使用成本，可使用三态测控装置对三种采样功能进行整合^[20-21]，如图 4 所示。

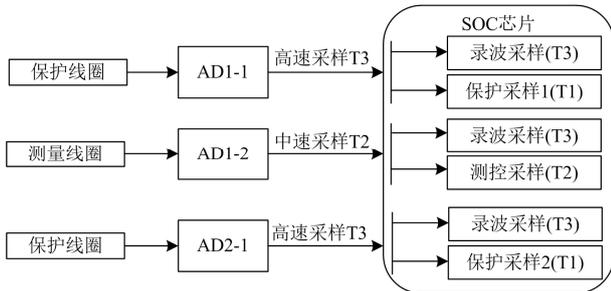


图 3 常规互感器采样控制

Fig. 3 Sampling controller of conventional mutual inductor

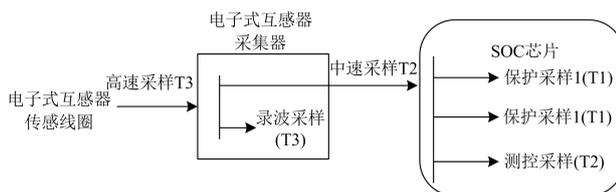


图 4 电子互感器采样控制

Fig. 4 Sampling controller of electronic transformer

在本文所述的就地化保护芯片中，ADC 采集模块设计有 16 组 ADC 输入，可通过寄存器配置生成不同采样率时钟实现多采样率多通道的设计。提供高速采样类、稳态测控类、暂态控制类三个不同的差异化采样速率。采样数据帧的长度可以根据系统实时性要求，将各个 ADC 通道配置成不同点数 80、96、256 等。

1.3 时钟数据恢复

时钟数据恢复(CDR)技术是高性能系统的一个关键性能^[22]。FPGA 具有高速的逻辑性能，因此对设备之间建立高速数据传输的可靠性提出了更高的要求。

在本文所述芯片中，设有 6 端 LVDS 差分信号输入，用于接收光口 FT3 码流。如图 5 所示，在通信中采用同步解耦的设计：

1) 按时钟源对授时的终端进行分组，将不同组的终端进行同步解耦。

2) 设置两套采样控制系统，一套以本站时钟同步采样，一套以对站时钟同步采样，并将采样值数据送出。

3) 终端通过接收的其他终端采样值，监视判断其他终端是否与自己同步。如果判断结果为失步，

终端将根据同步方案改变为插值重采样。

在这样的设计下，针对主时钟间失步、主时钟故障、终端假同步等不同问题，就地化保护芯片均能保证同步系统的可靠性。

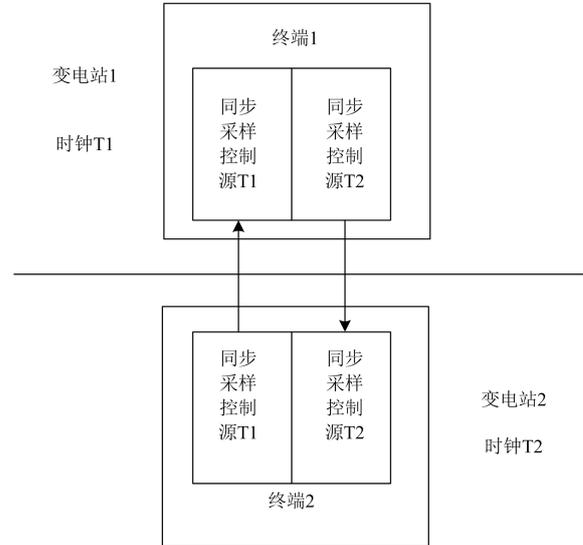


图 5 时钟数据恢复

Fig. 5 Clock data recovery

2 总体方案

本文所设计的就地化保护芯片主要由双核系统架构、网口模块、ADC 模块和 FT3 解码模块几部分组成，如图 6 所示。

就地化保护设备数据的读取和发送具有较高的实时性要求，因此双核系统架构 CPU 采用双核 Cortex-A9，AXI 总线接口带宽大于 500 MB/s。

网口模块由 4 个千兆以太网口组成，4 个网口作为输入输出端接入 HSR 环网进行数据交换，将接收数据送到系统内部 AXI 总线。多个终端网口共同组成一体化通信架构，终端间采用直接互联，4 个终端间直连的千兆以太网口支持两对 HSR 环网。通过对双向环网进行拓展，打通线路对侧与站内通信通道，实现在网络中将终端的采样值信息、隔离开关及断路器位置信息、动作及告警信息三类信息发送给以其为中心的一级区域内终端。

ADC 模块有 16 组多采样率多通道输入，用于连接电磁式互感器数据源。通过使用差异化的采样设计，以高速率进行采样，对高速采样结果进行抽点得到中低速采样，以满足不同采样速率的需求。

FT3 解码模块数据源接口为 6 个光口，用于采样电子式互感器和电磁式互感器，分别为 3 路电压 3 路电流。

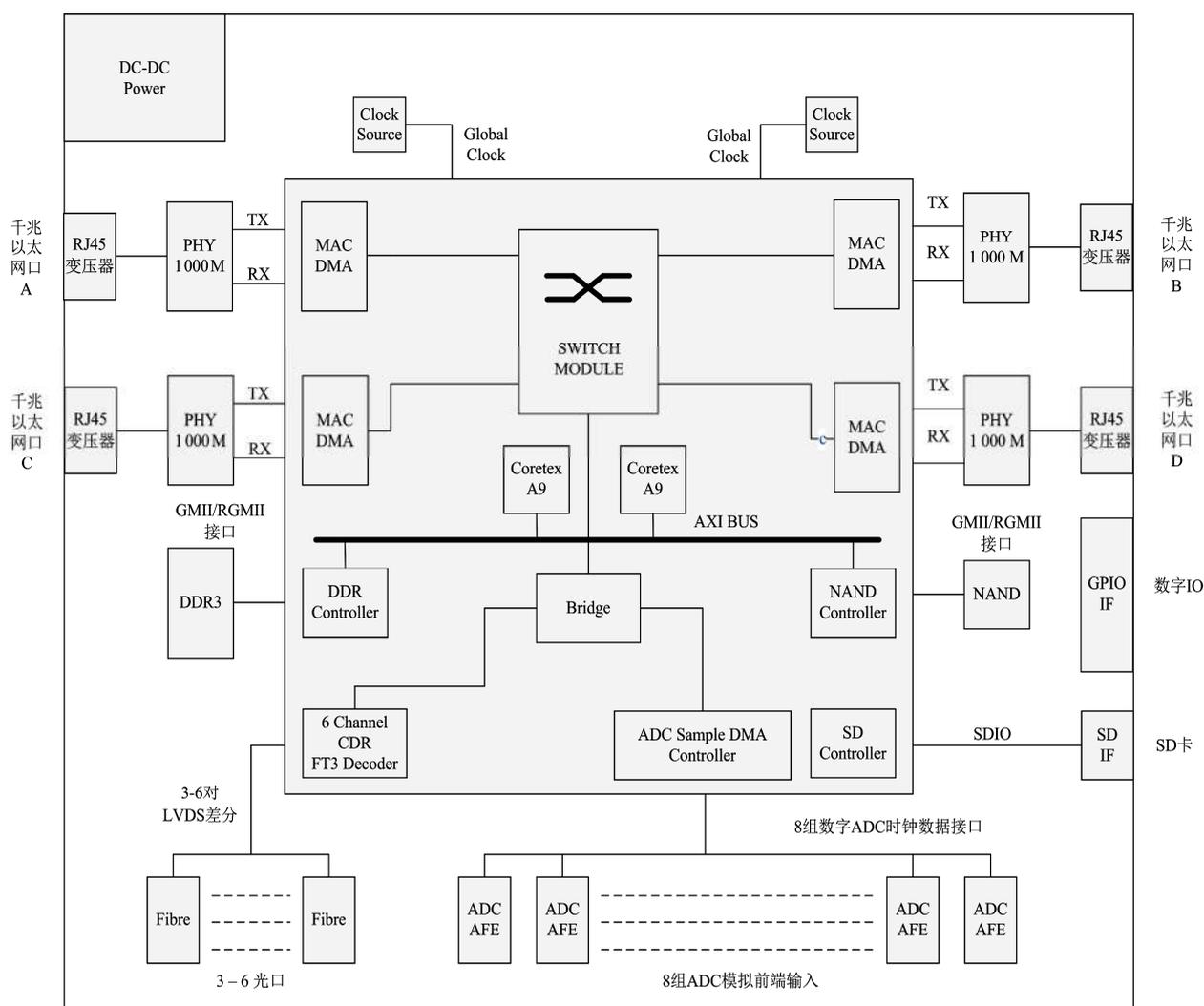


图 6 就地化保护 SoC 设计框架

Fig. 6 SoC design framework of outdoor installation protection

除此之外, 芯片设有全局时钟接口^[23]、内存控制接口、闪存控制接口、SD 控制接口等用于满足不同的时钟和数据存取需求。

3 设计结果

在 UMC55 工艺下, 完成了该芯片的版图设计, 芯片基本参数如表 1 所示, 芯片版图如图 7 所示。根据实际测试结果, 芯片面积为 $5.3 \times 5.3 \text{ mm}$, 主时钟频率可达到 500 MHz, 动态功耗为 212.316 9 mW, 漏电功耗为 59.639 8 mW。

相比于传统多芯片系统, 本文设计的就地化保护装置采用 SoC 技术, 使集成度进一步提高, 具有体积小、功耗低、成本低的特点。通过功能融合, 简化硬件资源和软件资源, 解决了实际使用中可靠性低、运维难度大等问题。

表 1 基本参数

Table 1 Basic parameters

Performance	Content
Design Hierarchy	Flat run
Process	UMC 55SP 1P7M0T1F + AL_RDL
Voltage	Core: 1.0 V, I/O: 2.5~3.3 V
Area	$5\ 300 \times 5\ 300 \mu\text{m}$
Instances Count	1 185 828
Memory Count	110
IP Number	1
Pins/Pads	108
Cell/Chip Utilization	73.57%
Main Clock Freq	500 MHz (clk_asicclk_500 M @wc)

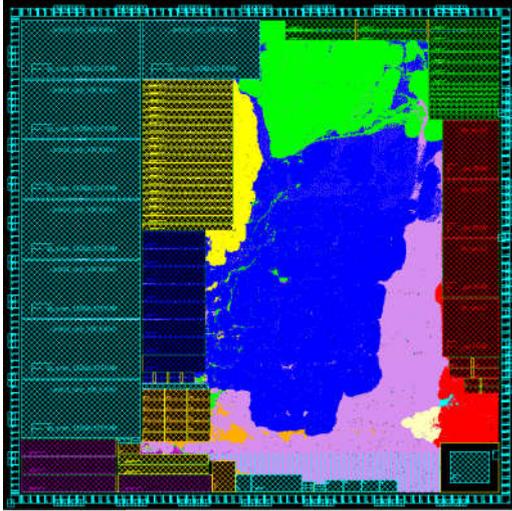


图 7 芯片版图设计

Fig. 7 Floorplan of layout

4 结语

本文使用 SoC 技术设计出用于智能变电站终端的就地化保护芯片，支持差异化采样、功能融合、同步解耦和监测等功能。根据版图设计结果，芯片主时钟频率可达到 500 MHz，具有良好的速率、面积和功耗性能，能够满足智能变电站终端保护装置所需功能的使用需求，相比传统嵌入式设计方案降低了设计使用成本。在此基础上，未来将进一步开展就地化保护装置专用芯片技术在小型化、低功耗、模块通用化等方面的研究。

参考文献

- [1] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xingyuan, WEI Wei, WANG Yuhong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [2] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62.
- [3] 安永帅, 李刚, 樊占峰, 等. 新一代智能变电站控制保护一体化智能终端研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 138-146.
AN Yongshuai, LI Gang, FAN Zhanfeng, et al. Research and development on intelligent terminal units incorporated with control and protection functions in new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 138-146.
- [4] BO Z, LIN X, WANG Q, 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.
- [5] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] ARAUJO J, LAZARO J, ASTARLOA A, et al. PRP and HSR version 1 (IEC 62439-3 Ed. 2), improvements and a prototype implementation[C] // IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 10-13, 2013, Vienna, Austria.
- [7] 裘愉涛, 徐凯, 陈福锋, 等. 基于双向环网的变压器保护就地化实现方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 41-45.
QIU Yutao, XU Kai, CHEN Fufeng, et al. Implementation scheme of outdoor installation transformer protection based on bidirectional ring network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 41-45.
- [8] 何周, 袁端磊, 史皓然, 等. 基于环网冗余网络的智能化变电站通信网络研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 25-29.
HE Zhou, YUAN Duanlei, SHI Haoran, et al. Research of substation communication network based on high availability seamless ring[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(18): 25-29.
- [9] 王德林, 郑玉平, 周华良, 等. 基于多 HSR 环网的分布式母差平台及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 27-34.
WANG Delin, ZHENG Yuping, ZHOU Hualiang, et al. Platform and key technology for distributed bus protection based on multi-HSR network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 27-34.
- [10] 周小波, 汪思满, 吴正学, 等. 环网分布式母线保护装置就地化实现探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 104-108.
ZHOU Xiaobo, WANG Siman, WU Zhengxue, et al. Local placing implementation research of distributed HSR busbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 104-108.
- [11] 邓茂军, 樊占峰, 倪传坤, 等. 就地化分布式变压器保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 95-100.
DENG Maojun, FAN Zhanfeng, NI Chuankun, et al. Research on scheme of outdoor installation distributed transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 95-100.

- [12] 周小波, 唐治国. 基于 MapReduce 架构的就地化分布式母线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 128-135.
ZHOU Xiaobo, TANG Zhiguo. Research on outdoor installation distributed busbar protection based on MapReduce architecture[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 128-135.
- [13] 倪益民, 杨宇, 樊陈, 等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 194-199.
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary devices in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-199.
- [14] 吴通华, 郑玉平, 周华, 等. 基于功能纵向集成的无防护安装就地化线路保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 46-52.
WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHOU Hua, et al. Vertically integrated outdoor installation line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 46-52.
- [15] URBINA M, ASTRALOOA A, JESUS L, et al. Cyber-physical production system gateway based on a programmable SoC platform[J]. IEEE Access, 2017, 5: 408-417.
- [16] 任华锋, 王晋华, 孙振华. 基于 ZYNQ 嵌入式小型化继电保护平台设计实现[J]. 电子产品世界, 2016, 23(12): 68-70.
REN Huafeng, WANG Jinhua, SUN Zhenhua. Embedded miniaturization of relay protection platform based on ZYNQ[J]. Outlook of Electronic Technology, 2016, 23(12): 68-70.
- [17] 韩媛媛, 周皓, 陈金辉, 等. 基于 STM32F103 的光伏电站智能直流汇流箱监测单元的研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(6): 73-77.
HAN Yuanyuan, ZHOU Hao, CHEN Jinhui, et al. Study on monitoring device of intelligent dc junction box in photovoltaic power station based on STM32F103[J]. Smart Power, 2017, 45(6): 73-77.
- [18] 招景明, 黄伟, 谢晓华, 等. 电能计量芯片 ADE7880 在智能电表中的应用研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 72-77.
ZHAO Jingming, HUANG Wei, XIE Xiaohua, et al. Application of energy metering ic ade7880 in smart meter[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 72-77.
- [19] 罗振威, 杨贵, 欧郁强, 等. 区域保护控制系统站间通信组网方案研究[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 172-178.
LUO Zhenwei, YANG Gui, OU Yuqiang, et al. Networking scheme for communication between stations in regional protection and control system[J]. Smart Grid, 2016, 4(2): 172-178.
- [20] 吉安强. 适用于多标准无线终端的可重构流水线 ADC 研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
GU Anqiang. Study on reconfigurable pipeline ADC for multi-standard wireless terminals[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [21] 黄国方, 徐石明, 周斌, 等. 新型变电站综合测控装置优化设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 77-79.
HUANG Guofang, XU Shiming, ZHOU Bin, et al. Optimization design of a new synthesized measuring and control device for substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 77-79.
- [22] 尹晶, 曾烈光. 一种快速同步的时钟数据恢复电路的设计实现[J]. 光通信技术, 2007, 31(1): 52-54.
YIN Jing, ZENG Lieguang. Design and implementation of a rapid synchronous clock and data recovery circuit[J]. Optical Communication Technology, 2007, 31(1): 52-54.
- [23] 朱永峰, 陆生礼, 茆邦琴. SoC 设计中的多时钟域处理[J]. 信息化研究, 2003, 29(11): 60-63.
ZHU Yongfeng, LU Shengli, MAO Bangqin. Multi-clock domain handling in SoC design[J]. Informatization Research, 2003, 29(11): 60-63.

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-01-04

作者简介:

于同伟(1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为智能电网保护与控制; E-mail: Yu_twei@163.com

李良(1982—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力物联网技术。E-mail: liliangbj@163.com

(编辑 魏小丽)