

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240684

一种高压直流输电保护与控制国产化硬件平台的功能研究与实现

蒋冠前¹, 傅亚光², 刘威鹏², 胡欢², 张健², 罗磊², 郝俊芳²

(1. 许昌开普电气研究院有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为提升高压/特高压直流输电保护与控制设备的国产化水平, 设计与研制了自主可控的国产化保护与控制硬件平台。该平台基于高压直流输电保护与控制硬件平台架构和应用功能, 采用国产元器件与国产嵌入式实时操作系统(real-time operating system, RTOS), 结合高速串行背板总线技术、高速时分复用通信技术(high-speed time division multiplexing communication, FTDM)与图形化编程等技术, 具备高性能的采集测量、计算处理、控制输出与高速率通信连接能力。与国外企业采用的高压直流输电保护与控制硬件平台以及国产现有平台的性能指标进行了对比, 并进一步介绍了平台级、装置级、系统级数字动模试验验证与工程应用情况。结果表明, 所研制的国产化保护与控制硬件平台工作稳定可靠, 可满足高压/特高压直流输电工程应用需求。

关键词: 高压/特高压直流输电; 控制保护平台; 国产化; RTOS; FTDM

Research and implementation of domestic hardware platform functionality for protection and control in HVDC transmission systems

JIANG Guanqian¹, FU Yaguang², LIU Weipeng², HU Huan², ZHANG Jian², LUO Lei², HAO Junfang²

(1. Xuchang KETOP Electrical Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to improve the the domestic technology level of HVDC/UHVDC transmission protection and control equipment, an autonomous and controllable domestic protection and control hardware platform is designed and developed. This platform is based on the architecture and application functions of HVDC transmission protection and control hardware platform, adopts domestic components and domestic embedded real-time operating system (RTOS), and combines with high-speed serial backplane bus technology, high speed time division multiplexing communication (FTDM) technology and graphical programming technology, possessing the capabilities of high-performance acquisition and measurement, calculation and processing, control output and high-speed communication connection. The performance indexes of the platform proposed are compared with that of foreign enterprises' HVDC transmission protection and control hardware platforms and the domestic existing platform. Digital dynamic simulation test verification and engineering application from platform level, device level, and system level are further introduced. The results show that the developed platform works stably and reliably, and can meet the requirements of engineering applications of HVDC/UHVDC transmission.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202155031A-0-0-00).

Key words: HVDC/UHVDC; control and protection platform; domestic technology; RTOS; FTDM

0 引言

高压/特高压直流输电技术(HVDC/UHVDC)是

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5100-202155031A-0-0-00)

我国强国战略中一项重点推进的技术, 其在推动能源变革转型、经济高质量发展中的作用凸显^[1-3]。直流保护装置和控制设备是保障直流输电线路与高压换流站安全运行的重要环节, 对保证电力大动脉的安全运行、财产安全乃至人身生命安全至关重要^[4-6]。近二十年前我国的高压/特高压直流保护技

术通过技术引进, 实现了国产化制造、规模化工程应用与技术升级, 功能与技术已处于世界先进水平。在紧张的国际形势下, 我国电网的自主可控能力与电网系统电力安全遭遇重大挑战。因此, 研究实现基于“国产芯”技术高压直流保护与控制硬件平台的任务就尤为重要与迫切^[7]。

针对进口元器件国产化的替代问题, 已有学者在重要电力装备领域对关键设备、关键元件的替代工作进行了探讨与研究^[8-13]。虽然我国国产元器件例如中央处理器、现场可编程门阵列(FPGA)与存储器等元器件在制成技术、芯片设计、性能指标以及软件支撑上和国外厂商普遍存在一定差距, 但也具备一定的技术和产业基础。

由于高压直流输电工程直流控制保护系统实现功能的多样性与技术复杂性, 要求高压直流保护与控制硬件平台应具备多主处理器并行运行、高性能采集处理、高速率通信以及快速控制与响应能力, 并支持实现数字化模拟量与常规电模拟量采集、状态量输入输出、触发脉冲控制、调制波输出、冗余通信与冗余系统切换等基本功能。另外为了快速实现不同对象、不同通信架构及多类型直流控制与保护功能应用程序的开发, 还需提供图形化、可视化的应用编程工具以支持通过硬件组态与图形化编程实现高效的应用设计开发。

1 硬件平台架构及功能模块设计

国产化平台设计体系架构上遵循分层、模块化的设计原则, 将系统设计分为硬件层(包含模块化插件与机箱)、软件层(包含运行时系统、功能块库及硬件驱动)与工具软件层。如图 1 所示, 各层之间界限清晰, 功能内聚, 相互之间耦合度低。分层架构与模块化设计便于开发人员任务分工, 降低开发风险, 更容易保证各层的设计质量与鲁棒性, 从而提高系统整体可靠性。

作为一种通用型的高压直流控制保护硬件设备, 为了实现产品标准化和工程可维护性, 平台将机箱、处理器、I/O、通信及电源等功能单元进行模块化与插件化设计, 即按照功能类型不同划分为机箱、处理器模块(CPU)、I/O 模块、通信模块以及冗余电源模块等几类。其中, 机箱及其背板提供了一个集成化与标准化的连接接口和数据交换通道, 主处理器模块提供平台核心的数据处理、算法控制与通信处理功能, I/O 模块提供与现场设备间的状态信息采集输入接口或控制信号输出接口, 通信模块实现与外部设备的数据交互, 冗余电源模块则提供

稳定的基础电源供给。同时, 通过高速串行背板总线及共享内存技术, 平台可实现多 CPU 模块并行运行以及与各功能模块之间数据与命令的高速实时交互。通过高速时分复用通信总线技术(high-speed time division multiplexing communication, FTDM), 平台可实现电参量与状态量基于光介质与吉比特速率的高速同步采集与控制。基于上述功能特点并结合图形化的应用编程工具, 平台可满足直流控制保护系统复杂架构与功能应用需要, 例如交直流站控冗余、三取二保护、双重化冗余保护、冗余通信与换流站分层控制等。

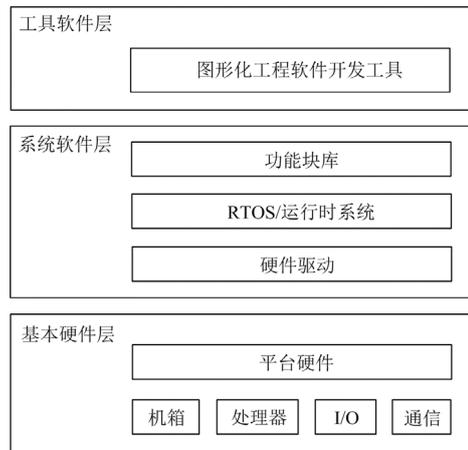


图 1 硬件平台体系架构

Fig. 1 Hardware platform architecture

以目前比较成熟的基于进口芯片的直流保护装置平台硬件方案为参考, 结合特高压工程、多端及柔性输电技术发展方向与工程应用新需求, 采用全国产芯片的控制保护硬件平台功能应用架构如图 2 所示。

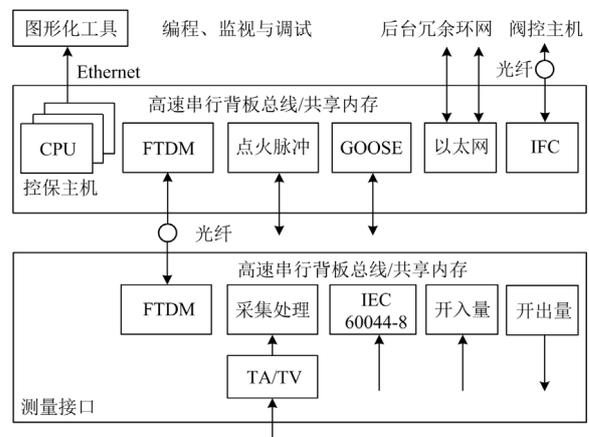


图 2 平台功能应用架构

Fig. 2 Functional application architecture of platform

1.1 主处理器(CPU)模块设计

主处理模块作为平台最为关键和核心的部件，一方面要完成与外部设备的高速通信，另一方面要完成与多个内部模块间的数据传输采集与复杂算法计算，对系统的整体性能与运行可靠性至关重要。

图3为平台CPU模块的硬件构成示意图，其中核心处理器为国产双核或四核多线程处理器，主频可达2.6 GHz，支持高速L3缓存，支持单精度、双精度浮点运算指令和向量处理指令。处理器每个核心都拥有独立的运算和缓存，支持同时处理多个任务与并行计算，可充分提升平台算力并有效降低CPU负荷率^[14]。同时，结合大容量DDR4存储、内存纠错(ECC)、吉比特速率FPGA信号处理与高速串行背板总线技术，使得模块具备强大的采集计算、控制处理与多通道实时通信能力。

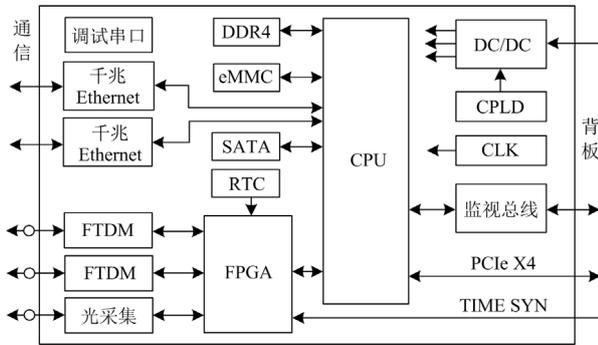


图3 CPU模块硬件构成框图

Fig. 3 Block diagram of CPU module hardware composition

图4展示了模块的系统构成框架，该模块基于AMP多核架构，并集成了嵌入式实时操作系统(RTOS)、运行时系统、任务调度与设备驱动等关键功能单元。其中，CPU处理器的Core0与Core1通过共享内存进行交互。据此，实际应用中可根据系统任务或功能需要为两个内核安装一套实时操作系统或分别安装各自独立的实时操作系统^[15]。嵌入式实时操作系统采用如图5所示内核自主化率达100%的嵌入式实时操作系统SylixOS^[15-16]，其是一款基于开源的操作系统，具备丰富的开源工具、软件库、丰富的系统组件与强大的网络支持，可提供标准socket通信接口与多种网络协议栈。同时，SylixOS系统也支持国标可信计算以确保信息系统的安全。

依赖SylixOS系统的硬实时内核、实时进程机制和先进高效调度算法(优先级抢占式任务调度、中断嵌套等)，结合双核多线程处理器技术可确保CPU处理单元满足特高压直流制保护平台多任务运行下的实时性、高可靠性、高稳定性与负荷率限制需求，实际测试实现的最小任务执行周期低至50 μs，最小

任务中断周期低至20 μs，可满足特高压直流输电与常规柔直高速计算、处理与低延迟采集控制的需要。另外，实际测试实现的最小内置故障录波周期低至50 μs，支持的最大录波点数为50 000个，同样满足特高压与柔性直流高速录波与故障数据回放需要。

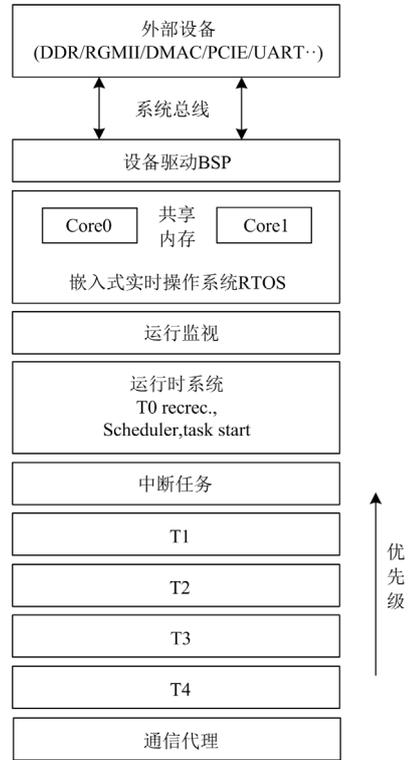


图4 处理器模块系统构成框架

Fig. 4 Framework of processor module system composition

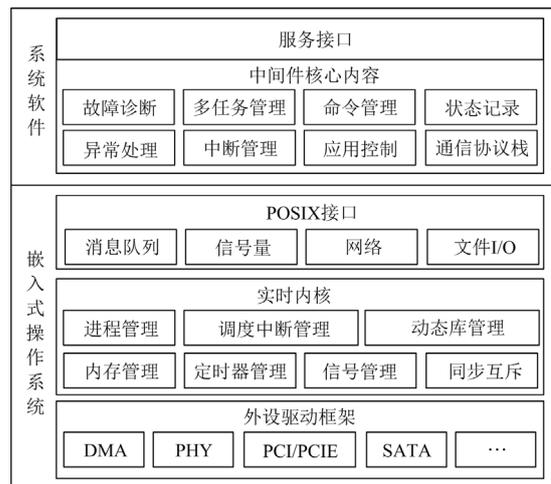


图5 实时操作系统组成

Fig. 5 Composition of real-time operating system

依赖于模块的多核架构、多任务实时操作、先进任务调度系统与时间管理机制，主处理模块可支

持 2.5 GHz 频率背板总线多节点交互、两组光接口 FTDM、一组电子互感器光采集与两个千/百兆以太网通信, 并支持基于 IEC 61850-GOOSE 的实时通信, 可充分满足直流控制保护主机的实时性采集处理与高速数据及命令的通信交互所需。

另外, 主处理器模块还负责管理和配置机箱板卡, 通过一种高速串行总线寻址方法来获取功能模块的总线访问地址信息并实现高效子板寻址, 方便不同功能模块的配置、应用编程与自检的实现。

1.2 高速背板总线与共享内存设计

高速背板总线是确保 CPU 模块之间或 CPU 与各子模块间数据交互实时性的关键技术。共享内存则是 CPU 模块与各模块之间实现数据共享的关键技术, 用以实现多个设备或进程可高速率共享同一片物理内存, 减少内存重复分配以优化系统资源, 从而降低 CPU 负载并提高系统性能。为确保各模块间数据交互的实时性, 高速背板总线的传输技术与架构实现至关重要。

图 6 为本平台基于国产 PCIe 2.0 交换芯片和可编程器件 FPGA 设计的高速串行背板总线的构成框架。CPU 与 CPU 间或功能模块间通过多端口交换芯片进行高速数据交换或共享内存空间的数据读取。具体采用 PCIe 2.0 x1 lane 模式, 可实现 4 Gbps 的有效数据传输速率。同时, 该框架也支持向更高带宽 PCIe 3.0 及更高模式的端口兼容与技术升级开发。

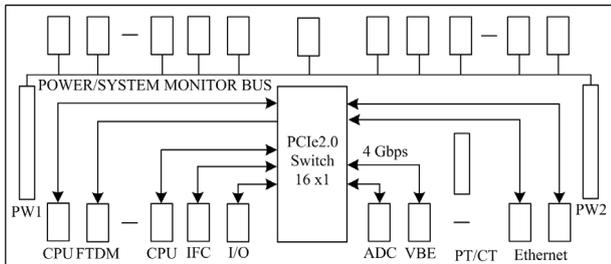


图 6 高速串行背板总线构成框架

Fig. 6 Framework of high-speed serial backplane bus composition

PCIe 的交换是一种采用了点对点串行连接方式且高效可靠的数据传输机制, 主要分为物理层(接口形态/收发器/串化解串/编码)、链路层(点对点可靠传输/流控/死锁避免)与传输层(IO 事务语义)^[17], 其通过点对点连接和数据包传输的方式, 实现了多设备同时传输数据, 避免带宽争抢, 并通过流控制和带宽管理的机制保证了数据的可靠传输和带宽分配。同时它还具备错误检测和纠正的功能, 提高了数据传输的可靠性。PCIe 这种机制可以确保 CPU 模块与通信模块、I/O 模块、触发脉冲模块等之间

高速稳定的数据与命令传输。

通过对 PCIe 交换机及其端点地址空间分配方法的深入研究, 并结合直流控保机箱功能插件配置的实际需求, 本平台在国产化软硬件基础上实现了一种 PCIe 交换机及其端点地址空间分配方法, 可实现系统中端点数目、类型和位置不同但 PCIe 交换机各下层空间起始地址均固定不变, 解决了目前自动分配 PCIe 外设地址造成的统一编程困难、系统外设地址访问出错与内存篡改等隐患问题^[18]。图 7 为基于 PCIe Switch 与该方法实现的处理器系统拓扑结构示意图。

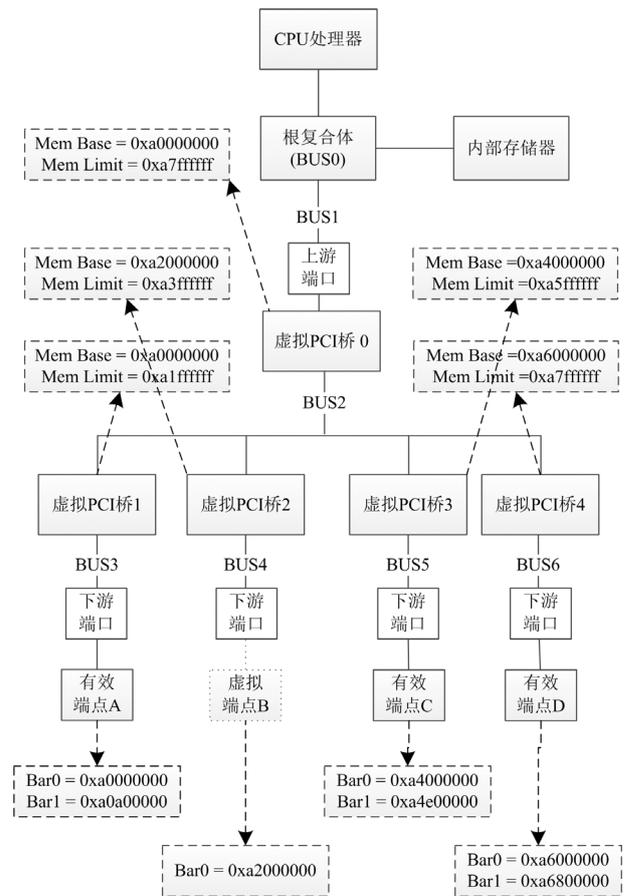


图 7 基于 PCIe Switch 的处理器系统拓扑结构

Fig. 7 Topology structure of processor system based on PCIe Switch

如图 8 所示, 通过在系统拓扑结构中设计及增加虚拟端点, 可以确保每个下游虚拟 PCIe 桥下均有设备(有效端点或者虚拟端点)信息位于设备 ID 表内。同时, 为拓扑结构中的所有有效端点及虚拟端点分配地址空间, 使得系统可以使用固定地址实现 PCIe 外设端点的读写操作, 因而可去掉上层应用程序获取端点 Bar 地址空间的环节, 可实现各节点空

间起始地址的固定不变, 并可根据有效端点的 Bar 配置自动调整固定间隔的大小, 从而降低系统复杂性并简化应用编程。

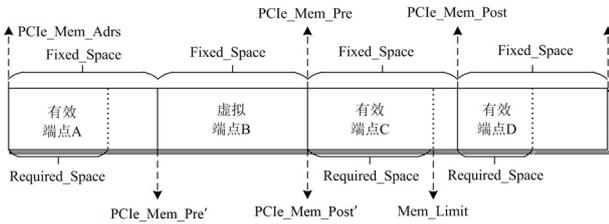


图 8 外设地址空间的固定分配

Fig. 8 Fixed allocation of peripheral address space

本文基于 PCIe 2.0 交换芯片与 FPGA 内存映射技术设计的多主交换式高速互联串行背板总线, 可优化总线结构, 实现多主处理器阵列并行计算架构, 解决常规共享型总线不支持并发访问、常规互联型总线结构复杂且不利于灵活组态和扩展问题, 从而有效提升总线吞吐率与增大总线带宽, 极利于多主处理器的阵列运行与算力聚合的实现, 进而提高计算效率与资源利用率, 并便于系统灵活组态^[19]。

1.3 超高速 FTDM 总线模块设计

FTDM 超高速总线模块采用超高速双向光纤化通信, 提供符合高速时分复用通信 FTDM 总线协议的高速串行通信总线接口, 用于实现一体化的电参量采集与状态量输入输出功能。板载高性能 FPGA 电路, 支持吉比特速率的链路数据解包与多节点精准同步, 用以满足数据与命令的高实时性传递需要。

直流输电传统常用的 TDM 通信总线用来上送交流模拟量采样波形, 传输速率仅 10 Mbps, 且不能传送其他量类, 性能低且功能单一^[20]。本平台基于国产 FPGA 器件与光模块设计的 FTDM 总线则有更高的带宽与通信速率, 传输的种类多(模拟量/开入/开出)、容量大并支持双向传输, 传输速率可达 2.5 Gbps。同时, 如图 9 所示, FTDM 总线拓扑既支持通信的菊花链方式链接, 也支持点对点的星型方式链接。为确保高速率下的传输质量, 光信号的发送功率也需要严格满足, 本平台光发射功率设计在 -9~ -3 dBm 之间, 光接收端灵敏度则为 -11 dBm。

1.4 快速控制总线模块设计

快速控制总线模块集成 6 个 IFC 总线光纤接口, 可同时与 6 个外部对象或设备进行高速状态量数据传输, 传输速率为 40 Mbps。模块内部包含高速率 FPGA 电路, 支持链路数据解包与状态量实时传递, 提供了与外部控制主机通过传统 IFC 总线进行远端点对点快速通信与数据交换的通道。基于光

纤连接的快速报文传输机制, 可用于传输实时性状态量类信号, 例如开关位置、闭锁信号和跳闸命令等, 主要用于控保主机与三取二装置或阀控主机间高速实时的状态信号交互。

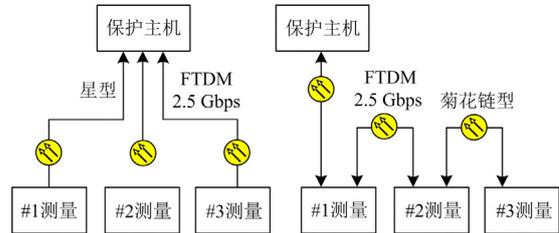


图 9 FTDM 总线的两种应用连接方式

Fig. 9 Two application connection methods of FTDM bus

1.5 触发脉冲控制/光调制波模块设计

触发脉冲控制模块产生和输出有时序要求的 Y 桥或 D 桥触发脉冲至阀基电子设备(valve base electronics, VBE)系统, 用于控制可控硅阀的有序、快速与可靠导通, 从而达到平稳的整流或逆变控制目的。触发脉冲的产生及触发时刻要求模块具备高实时性测量计算处理与低延迟脉冲输出能力, 因此模块采用了国产 SoC+ FPGA 集成电路技术与超低延时光介质接口来实现触发脉冲信号的有序产生与低延时实时传输。

模块具备 12 路输出脉冲通道与 12 路回报脉冲通道, 支持 12 脉动换流阀控制, 其触发脉冲特征为控制脉冲宽度为 120°且经 1 MHz 频率调制的脉冲信号, 其中触发脉冲通道之间不平衡度控制在 ±0.02° 以内。

模块同时设计有换流阀系统脉冲丢失及脉冲误触发检查功能, 检测结果送主处理器, 主处理器根据故障等级进行系统切换或者功能跳闸, 同时进行故障诊断及事件告警。

光调制波接口则设计 6 路控制光发送与 6 路状态光接收。每路光信号都经过脉冲调制且调制波频率可调(1 MHz/10 kHz 或 5 MHz/50 kHz)。

1.6 模拟量采集模块

模拟量采集模块板载具备高速数字处理技术内核的高速 FPGA 芯片与多片高速 ADC 模数转换器, 主要实现多通道电模拟量信号的高精度、高同步采集和快速数字化处理与上送。来自交流二次电压/电流变换模块的 -10 V~+10 V 电压范围的差分信号经低通滤波器连接至高采样率与低延迟模数转换器, FPGA 再将转换后的测量值经高速背板总线上送至 FTDM 总线并最终传递到控保主机。设计的模拟量输入通道数为 24 路, 最大采样率 100 kHz, 转

比率差动动作方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_{op} > I_{cdqd}, & I_{res} \leq I_{res0} \\ I_{op} > I_{cdqd} + K \times (I_{res} - I_{res0}), & I_{res} > I_{res0} \end{cases} \quad (1)$$

式中： I_{op} 为差动电流； I_{cdqd} 为差流启动定值； I_{res} 为制动电流； I_{res0} 为最小制动电流，固化为差动保护的额定电流 I_c ； K 为斜率，固化为 0.5。

差动速断动作方程如式(2)所示。

$$I_{op} > I_{cdsd} \quad (2)$$

式中， I_{cdsd} 为差流速断定值。

I_{op} 与 I_{res} 计算分别如式(3)、式(4)所示。

$$I_{op} = |\dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dots + \dot{i}_k| \quad (3)$$

$$I_{res} = |\dot{i}_1 - \dot{i}_2| / 2 \quad (4)$$

式中， $\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dots, \dot{i}_k$ 分别为差动保护所用各侧电流互感器电流。各侧电流方向都以指向换流变为正方向。

小差保护特性如图 11 所示，保护逻辑如图 12 所示。

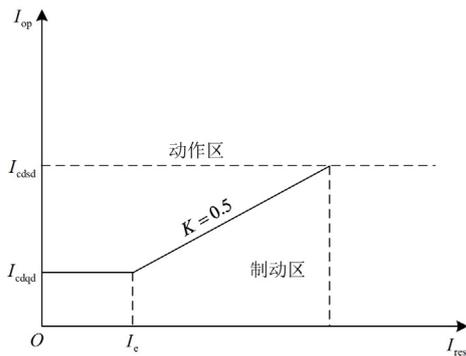


图 11 小差保护特性

Fig. 11 Characteristic of small differential protection

保护动作结果为保护动作跳交流断路器、保护动作锁定交流断路器、保护动作启动交流断路器失灵保护和闭锁。

2 与国外平台技术对比

对比两家跨国厂商采用的保护与控制硬件平台及现有的保护与控制硬件平台，本国产化平台在重要设计参数指标上，已完全对标国际先进特高压直流保护硬件平台，具备配置灵活、高性能、高可靠性、高实时性与可视化图形编程等特点，相关的部分技术指标对比见表 1 所示。

和国际先进产品平台技术指标对比，本文所研制的国产化硬件平台在关键技术(例如 CPU 主频、最大采样率、最小任务周期与任务切换时间)上完全不低于国外厂商直流控保平台的技术水准，而在通



图 12 小差保护逻辑图

Fig. 12 Logic diagram of small differential protection

表 1 技术指标对比

Table 1 Comparison of technical indicators

指标	国外 厂商一	国外 厂商二	已有 平台	本平台
主频/GHz	1.3	2.4	1	2.6
背板总线架构	多主	多主	多主	多主
最小任务周期/ μ s	100	50	200	50
任务切换时间	<7 us	<5 μ s	<20 μ s	<5 μ s
最大采样率/kHz	10	20	6.4	100
测量准确度	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.2\%$
通信能力	1 Gbps/ 100 Mbps	1 Gbps/ 100 Mbps	100/ 10 Mbps	1 Gbps/ 100 Mbps
图形化编程	支持	支持	支持	支持

信能力、测量准确度和图形化编程功能上则与国外企业能力相当。另外，本平台除满足与国外产品相同的检验项目例如安全、绝缘、振动与湿热等测试要求外，在电磁兼容试验通过了 14 项，可进一步保证本平台产品更广的适用性与可靠性。

3 验证与检验

为验证本国产化平台的实用性，特通过独立的第三方检测平台进行硬件平台型式试验、保护装置型式试验与系统级数字动模试验。其中，硬件平台型式试验包括基本功能、电气性能、安全、电磁兼容与环境影响等试验内容^[23]。保护装置型式试验除重点验证保护功能外，同时也要对电气性能、电磁兼容等再次进行检测验证。系统级数字动模试验则是依托 RTDS 实时数字仿真装置模拟高压

直流输电换流站电力系统实际运行中的各种运行工况在线进行功能性能考核, 以检验功能设计正确性与可靠性^[24]。

3.1 平台级型式试验

对于平台级与装置级检验, 搭建了如图 13 所示国产化平台的多功能测试系统。该系统不但可支持测量采集、控制输出与通信等基础输入输出功能测试, 也可以测试验证各种静态保护功能。

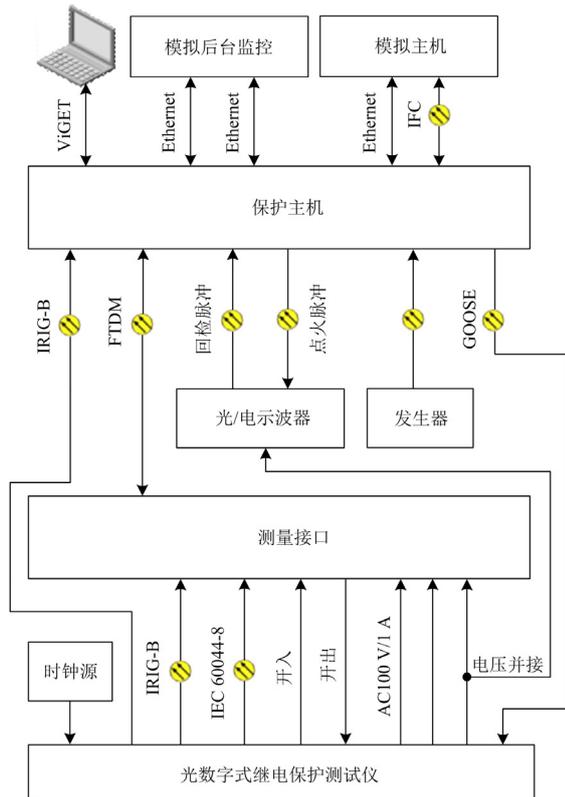


图 13 试验系统构成

Fig. 13 Composition of test system

测试系统内的辅助测试设备包括光/电数字式继电保护测试仪、同步时钟源、光电示波器、模拟监控后台与模拟保护主机。光电数字继电保护测试仪可输出三相电流电压信号、符合 IEC60044-8 扩展 FT3 格式测量值, 可提供高速开入量、高速开出量接口与 GOOSE 跳闸接口, 同时可输出时间同步对时信号。光电数字继电保护测试仪可将自己输出的信号与获得的输入反馈信号进行监视对比, 可以快速判断保护动作信号的正确性, 同时通过光电高速示波器将输入波形与触发脉冲进行对比。

3.1.1 基本功能检验

基本功能试验主要针对平台所具备的基本功能及性能进行试验检测, 包括多主处理器并行运行、AMP 多核机制、FTDM 总线通信、以太网通信、IFC 快

速控制总线通信、交直流模拟量采集、IEC60044-8 接口、IEC 61850-GOOSE 通信、状态量输入、状态量输出、换流阀触发脉冲、同步对时, 以及故障录波、图形化编程、自诊断与自监视等基本功能。

3.1.2 测量处理能力检验

测量处理能力是硬件平台的重要指标之一, 是设备测控性能高低优劣的重要体现, 本国产化平台装置的检验结果完全达到预定目标, 具体检测数据如表 2 所示。

表 2 测量与处理能力

Table 2 Measurement and processing capabilities		
检验项目	指标要求	检验结果
最小任务执行周期/ μs	50	50
最小中断任务周期/ μs	20	20
最大采样率/kHz	100	100
最小内置故障录波周期/ μs	50	50

3.1.3 测量准确度检验

依照高压直流换流站保护系统或控制系统相关技术规范与标准要求, 保护或控制装置的模拟量测量准确度应满足不同应用对象(保护或监视控制)的功能性能要求, 例如大组或小组交流滤波器保护、换流变压器保护及差动保护、直流站控等测量准确度要求, 针对此本平台包括实验室环境与高低温 ($-10\sim 55^{\circ}\text{C}$) 环境影响量的检验完全满足高压直流输电控制保护系统测量性能的要求, 其中实验室环境下的准确度检验结果见表 3。

表 3 模拟量测量准确度

Table 3 Measurement accuracy of analog quantity

电量类	规定误差	试验结果(最大误差)	%
直流模拟量	± 0.5	0.19	
交流电压量(测量型)	± 0.2	0.11	
交流电压量(保护型)	± 1	-0.56	
交流电流量(测量型)	± 0.2	0.10	
交流电流量(保护型)	± 5	-2.6	

3.1.4 电磁兼容检验

电磁兼容检验主要包括抗扰度试验、辐射发射限值检验与传导发射限值检验。抗扰度试验包括射频电磁场辐射抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度、浪涌抗扰度、静电放电抗扰度、射频场感应的传导骚扰抗扰度等 14 项抗扰度试验, 试验结果均满足国标与行标要求。其中衡量设备在无线电频率范围内通过空间辐射和沿导线传导的电磁干扰水平辐射发射与传导发射满足 A 级限值要求, 两项的检验结果如图 14、图 15 所示。

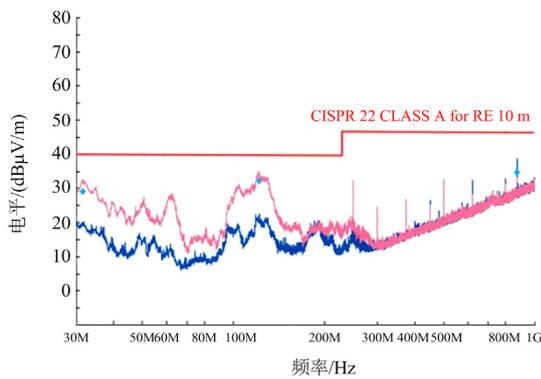


图 14 辐射发射测试波形

Fig. 14 Test waveform of radiation emission

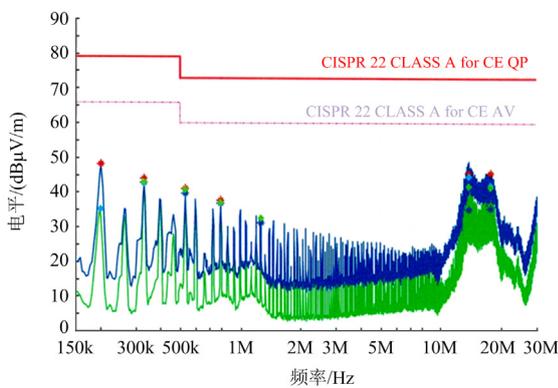


图 15 传导发射测试波形

Fig. 15 Test waveform of conducted emission

对于国产元器件而言，通过严苛的电磁兼容性试验，意味着它们在设计、材料选择和生产过程中都达到了高标准，在各种应用环境中性能稳定。

3.2 装置级保护功能试验

参照本文图 13 的试验系统构成，对换流器保护装置、极保护装置进行了整机保护功能静态试验。

针对换流器保护装置进行了包括阀短路保护、换相失败保护、换流器过流/差动/直流过电压/谐波保护、换流变中性点偏移/网侧与阀侧绕组差动/引线差动保护、换流变网侧零序差动/零序过流保护、换流变大差/小差保护等近 30 项换流器保护功能试验，保护动作精准快速，检验结果合格。其中针对本文 1.9 节中利用图形化编程工具实现的换流变小差保护一项功能检测数据见表 4 与表 5 所示。

针对极保护装置进行了包括极母线差动保护、极差动保护、阀组连接线差动保护、直流过电压/低电压/谐波保护、中性母线差动/开关过流/冲击电容器过流/接地开关保护、金属回线接地/横差/纵差/转换开关/转换开关过流保护、大地回线转换开关/转换开关过流保护、接地极线开路/过负荷/不平衡/差动

保护、纵差保护等 30 余项极保护功能试验，检验结果全部合格。其中针对极母线差动保护一项功能的检测数据如表 6 所示。

表 4 Y/Y 小差保护试验数据

Table 4 Y/Y small protection test data

检验项	激励范围	误差要求	试验结果(最大误差)
电流动作	0.2~1.5 A	±5%	1.00%
速断动作	2~5 A	±5%	-0.46%
比例制动	1~3.5 A	±5%	-0.60%
动作时间	2 倍动作值	≤40 ms	26.3 ms
速断动作时间	2 倍动作值	≤40 ms	17.6 ms

表 5 Y/D 小差保护试验数据

Table 5 Y/D small protection test data

检验项	激励范围	误差要求	试验结果(最大误差)
电流动作	0.2~1.5 A	±5%	1.00%
速断动作	2~5 A	±5%	-0.2%
比例制动	1~3.5 A	±5%	-0.60%
动作时间	2 倍动作值	≤40 ms	26.2 ms
速断动作时间	2 倍动作值	≤40 ms	18 ms

表 6 极母线差动保护试验数据

Table 6 Pole bus differential protection test data

检验项	激励范围	误差要求	试验结果(最大误差)
I 段电流动作	0.05~2 p.u.	±5%	0.17%
II 段电流动作	0.1~0.9 p.u.	±5%	-0.17%
比率系数	1~3.5 A	±5%	-0.05%
I 段延时时间	0.01~10 s	≤40 ms	1.7 ms
II 段延时时间	0.001~1 s	≤40 ms	2.4 ms

3.3 RTDS 数字动模试验

系统级数字动模试验则是依托 RTDS 设备上搭建的模拟特高压直流输电仿真试验系统。该系统可模拟高压直流输电系统实际运行中的各种运行工况与故障状态，从而对设备在工程运行中保护功能、控制功能与各种动态反应正确性进行考核。

图 16 为基于±800 kV 直流输电工程系统拓扑结构与 RTDS、I/O 模拟装置等设备构建的系统额定功率为 8000 MW 的特高压输电控制保护仿真试验系统，送端接入 725 kV 交流工频电网，送端接入 525 kV 交流工频电网，通过该系统对国产化平台构成的保护控制设备进行了系统级的功能试验验证^[25]。

该仿真试验系统整体采用分层分布式体系结构，分为运行人员控制层、控制层与现场层。基于国产芯保护控制平台组成的保护控制设备位于控制层，包括交流站控、极控、换流器控制、极保护与换流器保护等。RTDS 用于模拟直流一次系统，直流仿真接口装置(DC simulated substation device, DCSIM)用于完成对一次开关设备的模拟与控制，

高压直流仿真测量接口装置(HVDC simulated measurement interface device, HSMD)用于模拟现场层 I/O 设备。

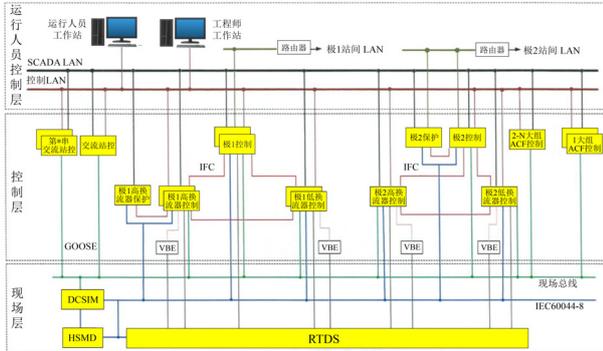


图 16 特高压直流输电控制保护仿真试验系统

Fig. 16 Simulation test system for UHVDC transmission control and protection

通过该仿真试验系统进行了近 30 个项目的功能性能检验, 涵盖了控制主机系统切换、启停/功率升降、电压平衡控制、阀组及滤波器在线投退、过负荷限制、一次线路及设备故障保护和网络风暴等多项测试项目, 试验结果全部满足要求。

图 17—图 19 显示了 3 种控制与保护系统试验的结果波形。其中, 图 17 为功率正送与有通信及全压 C26 模式下起动波形, 图 18 为功率正送与 C26 小功率逆变侧极 1 高端换流器阀接地故障波形, 图 19 为逆变侧大功率运行方式下网侧 1% 匝间短路发展为 5% 匝间短路故障的换流变保护波形, 波形记录准确, 相关控制或保护功能动作与反应均正确无误。

4 结论

高压/特高压直流输电是我国重要的战略关键技术, 因此实现核心控制保护平台的“国产芯”研

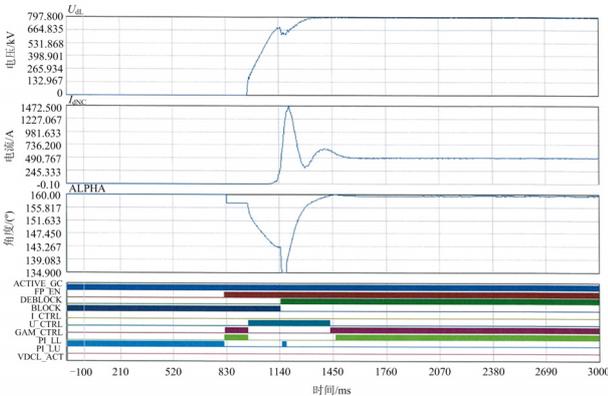


图 17 功率正送与有通信及全压 C26 模式下起动波形

Fig. 17 Start waveform of forward power, communication and full-voltage C26 mode

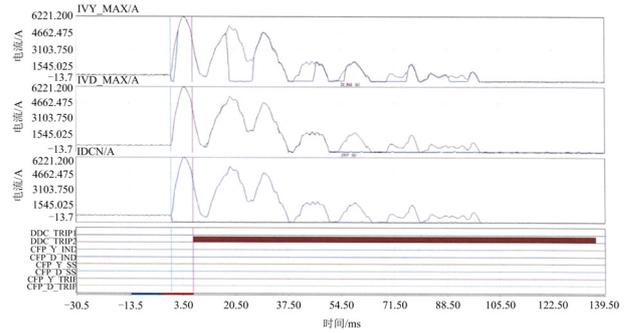


图 18 功率正送与 C26 小功率模式下逆变侧极 1 高端换流器阀接地故障波形

Fig. 18 Valve ground fault waveform of power forward and C26 low power mode on inverter side pole 1 high-end converter

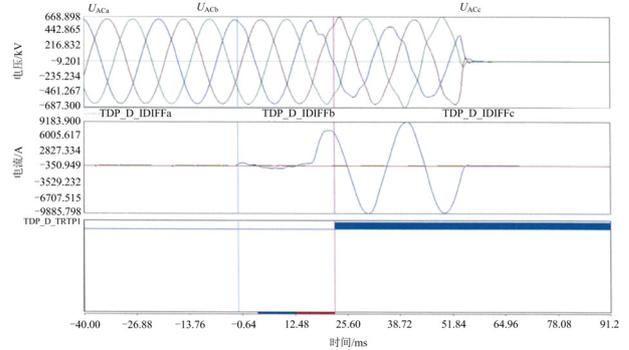


图 19 网侧 1% 匝间短路发展为 5% 匝间短路故障时的换流变保护波形

Fig. 19 Converter protection waveform when 1% on grid side develops into 5% inter turn short circuit fault

制具有重要的战略和现实意义。本文介绍的特高压直流保护控制硬件平台在开发、设计过程中严格执行电力标准, 充分调研工程需求并对标国际先进平台系统, 是一个采用全国产化元件、满足自主可控直流工程建设需要、功能完善、技术先进和应用开发简捷高效的通用型保护与控制硬件平台。本国产化平台在重要技术指标上已完全对标国外先进高压直流控保硬件平台, 具备高性能、高实时性、高可靠性与可视化图形编程等特点。基于此平台设计的特高压直流保护控制系统即将应用于陇东—山东 ±800 kV 特高压直流输电工程(位于送端的甘肃庆阳换流站), 前期已成功完成 FPT 工厂性能试验并出厂, 目前正在北京特高压直流成套设计研发(试验)中心进行业主的总体验收试验, 验收试验情况良好。本文设计基于“国产芯”高压直流保护与控制硬件平台, 对于高压直流输电技术的自主可控与确保国家电网的安全稳定将起到有力推动和促进作用。

参考文献

- [1] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于PI控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 66-72.
GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for uhvdc with secondary frequency modulation based on PI control[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 66-72.
- [2] 刘洪波, 阎禹同, 王曦, 等. 多馈入交直流混联系统小干扰稳定研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 565-575.
LIU Hongbo, YAN Yutong, WANG Xi, et al. A review of small signal stability studies of multi-infeed AC-DC hybrid system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 565-575.
- [3] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [4] 汤未, 于溯, 郑涛, 等. 基于交直流保护协同配合的交直流碰线保护新方案[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 41-50.
TANG Wei, YU Su, ZHENG Tao, et al. A novel protection scheme of AC and DC line-touching based on coordination of AC and DC protection[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 41-50.
- [5] 朱益华, 郭琦, 李威. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-25.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-25.
- [6] 庄俊, 王德顺, 盖晨昊, 等. 基于约束共识和差分进化的多直流馈入电网紧急控制协调优化[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 40-50.
ZHUANG Jun, WANG Deshun, GAI Chenhao, et al. Coordinative optimization of emergency control based on constraint consensus and differential evolution in multi-DC infeed power grid[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 40-50.
- [7] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [8] 廖勇, 袁圆. 进口元器件自主可控的风险分析及对策建议[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(6): 14-18.
LIAO Yong, YUAN Yuan. Risk analysis and countermeasure of independent controllability of imported components[J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(6): 14-18.
- [9] 胡志强. 电力基于自主可控技术的国产化替代综述[J]. 网络空间安全, 2018, 9(8): 90-97.
HU Zhiqiang. Review on domestic production based on the self-controlled technology[J]. Cyberspace Security, 2018, 9(8): 90-97.
- [10] 汤成俊, 李洪池, 纪陵, 等. 电力系统自主可信网络安全主动防御体系建设[J]. 电工技术, 2023(12): 149-151.
TANG Chengjun, LI Hongchi, JI Ling, et al. Construction of independent and trusted network security active defense system for power system[J]. Electric Engineering, 2023(12): 149-151.
- [11] 王舜, 刘明星, 刘滨, 等. 核电厂 DCS 元器件国产化替代问题探讨[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(增刊1): 24-28.
WANG Shun, LIU Mingxing, LIU Bin, et al. Discussion on localization of DCS components in nuclear power plant[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(S1): 24-28.
- [12] 沈天骄, 仲浩, 王永平, 等. 自主可控特高压直流控制保护系统设计与研发[J]. 电气技术, 2022, 23(3): 50-56.
SHEN Tianjiao, ZHONG Hao, WANG Yongping, et al. Design and development of autonomous and controllable UHVDC control and protection system[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(3): 50-56.
- [13] 仲伟, 王仲, 陶保震, 等. 新一代自主可控保护装置硬件平台技术[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 135-140.
ZHONG Wei, WANG Zhong, TAO Baozhen, et al. Software and hardware platform technology of an independent controllable relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 135-140.
- [14] 刘威鹏, 郝俊芳, 李跃鹏, 等. 基于 AMP 模式多核处理器的可信节点构建方法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(12): 37-44.
LIU Weipeng, HAO Junfang, LI Yuepeng, et al. Method of trusted node implementation based on AMP mode multicore processor[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(12): 37-44.
- [15] 李孝成. SylixOS 大型实时操作系统实时性分析[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(4): 14-17.
LI Xiaocheng. Real-time performance analysis of SylixOS

- large real-time operating system[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2021, 21(4): 14-17.
- [16] 李孝成. SylixOS 支持的安全容器功能概述[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(6): 7-10.
LI Xiaocheng. Overview of SylixOS safety container[J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2021, 21(6): 7-10.
- [17] PCIExpress® Base Specification. Revision 2.0. PCI-SIG, December. 20, 2006
- [18] 张健, 刘威鹏, 李跃鹏, 等. 一种基于虚拟端点的 PCIe 交换机地址分配方案[J]. 电子技术应用, 2023, 46(9): 103-108.
ZHANG Jian, LIU Weipeng, LI Yuepeng, et al. A PCIe switch address allocation scheme based on virtual endpoints[J]. *Application of Electronic Technique*, 2023, 46(9): 103-108.
- [19] 张健, 李跃鹏, 刘威鹏, 等. 基于 VxWorks 的 PCIe 多路传输系统驱动设计[J]. 电工技术, 2023(17): 173-175.
ZHANG Jian, LI Yuepeng, LIU Weipeng, et al. Driver design for VxWorks-based PCIe multiplexer system[J]. *Electric Engineering*, 2023(17): 173-175.
- [20] 蒋大海, 李宝香, 杨敏, 等. TDM 总线在高压直流输电中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 238-240.
JIANG Dahai, LI Baoxiang, YANG Min, et al. Application of TDM bus in HVDC power transmission[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(23): 238-240.
- [21] 常勇, 沈志刚, 张鹏. 换流变套管末屏电压采集器铁磁谐振机理分析及抑制[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 81-85.
CHANG Yong, SHEN Zhigang, ZHANG Peng. Analysis on ferromagnetic resonance mechanism of voltage divider of the converter transformer bushing and its suppression[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(5): 81-85.
- [22] 岳亚菲, 胡欢, 于海, 等. 基于图形化编程的 HVDC 以太网 103 双网通信设计[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 192-199.
YUE Yafei, HU Han, YU Hai, et al. Design of Ethernet 103 dual network communication in HVDC based on graphical programming[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(3): 192-199.
- [23] 中国电器工业协会. 量度继电器和保护装置 第 26 部分: 电磁兼容要求: GB/T 14598.26—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
China Electrical Equipment Industry Association. Measuring relays and protection equipment—part 26: electromagnetic compatibility requirements: GB/T 14598.26—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [24] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-5.
TAO Yu, MA Weimin, MA Yulong, et al. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(22): 1-5.
- [25] 苏进国, 李泰, 张爱玲, 等. 基于工程平台的直流控制保护系统全数字仿真建模与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 180-187.
SU Jinguo, LI Tai, ZHANG Ailing, et al. Full-digital simulation modeling and application for control and protection system based on HVDC project platform[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 180-187.

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-08-16

作者简介:

蒋冠前(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统保护控制技术研究和标准研究工作; E-mail: guanqianj@dlwg.net

傅亚光(1972—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 从事高压直流输电控制保护平台硬件开发工作; E-mail: xjhvdc_fyg@163.com

刘威鹏(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流输电控制保护平台软硬件开发工作。E-mail: liuweipeng_xjgc@163.com

(编辑 张颖)