

DOI: 10.7667/PSPC160098

基于 VME 总线的柔性直流输电系统阀控系统的设计

王小强, 罗海云, 涂小刚, 王晓刚

(西安西电电力系统有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为实现对基于 MMC 拓扑结构的高电压大容量柔性 HVDC 换流器的有效控制和监视, 设计了一种采用基于 VME 总线的主从式系统架构的柔性直流输电阀控系统。该系统选用 MVME6100 作为 VME 主处理器, 外部使用 SPARTAN-6 和 VIRTEX-6 系列高性能 FPGA 板卡作为 VME 从处理单元, FPGA 板底层实现了 VME 从板协议、Aurora 和 IEC60044-8 通信协议。该系统采用 VxWorks 硬实时操作系统开发应用程序, 并实现了最近电平逼近调制算法和环流抑制功能, 可实现对换流器中上千个功率模块进行百微秒级周期的实时控制和监视。经过 RT-LAB 仿真试验验证, 系统满足 200 电平系统的数据传输速率需求和控制规范要求。

关键词: 柔性直流输电; 阀控系统; VxWorks; VME64X 总线; 最近电平逼近调制

Valve control system based on VME bus of flexible HVDC system

WANG Xiaoqiang, LUO Haiyun, TU Xiaogang, WANG Xiaogang
(Xi'an XD Power System Company Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To achieve effective control and monitoring of flexible HVDC converter based on MMC topology at a high voltage large capacity, this paper designs a flexible HVDC valve control system based on VME master-slave bus architecture. The system selects the MVME6100 as main VME processor, and uses boards based on the SPARTAN-6 and VIRTEX series high performance FPGA as VME slave processing unit. The slave processing boards accomplish VME slave communication protocol, Aurora protocol and IEC60044-8 protocol as underlying communication mechanisms. This system adopts the VxWorks hard real-time operating system development application, and implements the Nearest Level Modulation algorithm and circulating current suppressing functionality, which can realize control period up to a hundred micro-seconds and can meet the real-time control and monitoring requirement of modules up to thousands in the converter. After RT-LAB simulation test, the system meets the requirements of data transfer rate of 200 levels system and the system control specification.

Key words: HVDC flexible; valve control system; VxWorks; VME64X bus; NLM

0 引言

柔性直流输电系统在风电和光伏发电接入、交流电网互联、孤岛供电等领域有广泛应用。区别于传统的半控型器件-晶闸管换流器 HVDC 系统, 基于全控型器件的电压源换流器 VSC-HVDC 直流输电系统(国内简称“柔性直流输电”)以自关断器件和脉宽调制(PWM)技术为基础, 文献[1-2]对基于 MMC 拓扑新型输电技术的特点进行了分析。

在基于 MMC 的高压大容量的柔性直流输电系统中, 换流器基本构成单元为模块化的功率模块, 无需功率器件的直接串联, 系统拓扑不随系统容量和电压等级的提升而变化, 便于应用实施; 系统具

有输出电压谐波畸变率低、系统响应速度快的特点, 无需交流滤波装置, 可以实现有功和无功功率的独立调节, 诸多特征符合智能电网发展要求。

VME 总线是一种主从结构的异步通信总线。伴随着 VME 总线从 VME 到 VME64X 的发展, 其通信速率可达 500 Mbps, VME64X 有: 采用独立的地址总线和复用的数据总线的并行总线结构, 地址总线宽度支持 16、24、32、40 或 64 位, 数据总线宽度支持 8、16、24、32、64 位; 支持多主设备的并行运行, 多主设备间通过系统控制器集成的总线仲裁机制进行总线资源分配; 具有基于优先级的中断处理系统, 中断响应时间可达微秒级; 具有良好的热稳定性, 适应苛刻的工作环境条件, 并形成了工

业标准等特点^[3]。

本文设计的阀控系统采用 VME 总线架构的硬件系统、实现了基于 MMC 换流器的调制算法, 完成对每桥臂 220 个功率模块(20 个冗余模块), 即换流器中共 1 320 个功率模块的触发控制和保护。

1 阀控系统总体设计

阀控系统采用完全双重化设计, 是基于工业单

板计算机(SBC)、冗余的免维护系统, 其中一套工作, 另一套热备用。根据高压直流输电系统的层级划分^[4], 阀控系统处于极控制和保护系统(以下简称为控保系统)的下一层, 直接实现换流器的控制与保护。阀控系统根据控保系统提供的解锁信号和参考电压等信号, 控制换流器的运行模式和工作状态, 并提供换流器级的保护功能。阀控系统与控保、测量系统及换流器的连接见图 1。

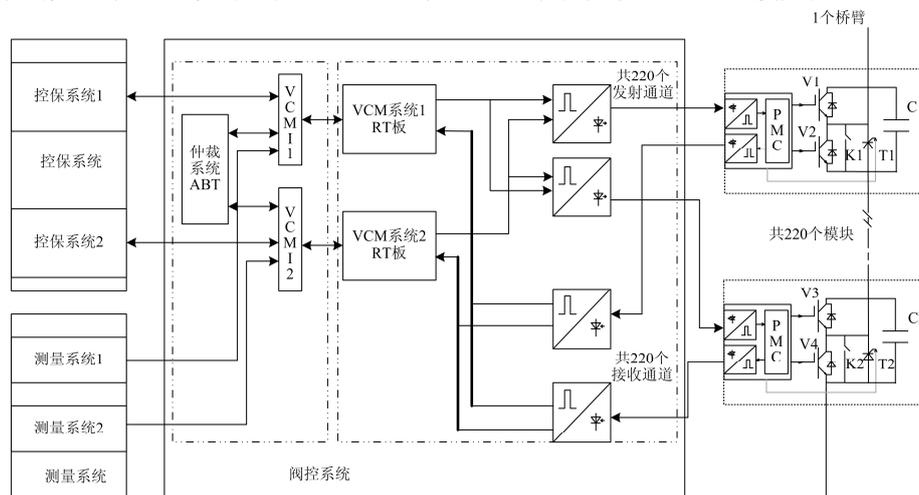


图 1 阀控系统与控保和测量系统及换流器的连接

Fig. 1 Connection between valve control system and control and protection and measurement systems as well as inverter

阀控系统的基本功能如下:

- 1) 产生功率模块的投入、切除命令;
- 2) 监测功率模块电容电压、温度及其控制电路的工作状态;
- 3) 实现冗余功率模块在故障状态下的切换;
- 4) 在严重故障, 例如正负极双极短路时通过控制功率模块导通晶闸管对功率模块的保护;
- 5) 实现阀控系统的自检。

阀控系统共设计了 7 面屏柜: 其中 6 面 VCM 屏柜, 每面屏柜对单桥臂的功率模块进行控制和监视; 另有一面 VCM I 接口屏柜, 完成 VCM 运行系统的切换、控制、与外部其他相关设备的接口。

为了便于向更多模块数的扩展, 阀控系统选用基于标准化 VME 总线的主从式架构。目前市场提供多种高性能的基于 VME 总线的板卡和机箱, 其数据传输速率可达吉比特。搭配实时操作系统 VxWorks, 针对更多功率模块数需求, 在核心功能和算法设计保持稳定的前提下, 对外围 VCM 扩展后即可满足单桥臂上千只功率模块的控制与监视需求。阀控系统框图见图 2。

整个阀控系统设计分为硬件系统、阀控接口和软件系统 3 部分。

1.1 阀控系统硬件设计

阀控系统选用 6U 工业标准 VME 机箱, 机箱内板卡之间通过 VME 总线 P1 口或 P2 扩展接口通信。操作人员可以在线更换部分故障部件(链接板除外, 链接板与模块一对一连接)而不影响系统正常运行。

VCM I 屏柜包含两个机箱, 分别为仲裁(ABT)机箱和 VCM 接口(VCM I)机箱。仲裁机箱为双电源、3 冗余配置, 功能为检测极控系统发来的值班信号, 并采集 VCM I 机箱和 VCM 屏柜各机箱的健康状态, 传递给仲裁板处理。为了提高系统的可靠性, 值班信号分别下发到 VCM I 机箱和 VCM 机箱。

VCM I 机箱为阀系统的核心功能部分。核心 CPU 板为基于 VME 的工业高性能 SBC, 文献[5]分析了 I/O 存储空间采用 MMIO(Memory Mapped IO)机制。内部运行的基于 VxWorks 实时操作系统的应用程序, 实现微秒级的控制算法(主要是最近电平逼近调制算法和环流抑制功能)。基于 CPU 板卡集成的以太网开发了 IEC60870-5-104 协议接口。同时本机箱实现阀控系统同步、与外部的接口、与 VCM 屏柜机箱间的功率模块控制和状态信息的交换等功能, 实现吉比特级的信息传输。其他板卡为基于 FPGA 的板卡。

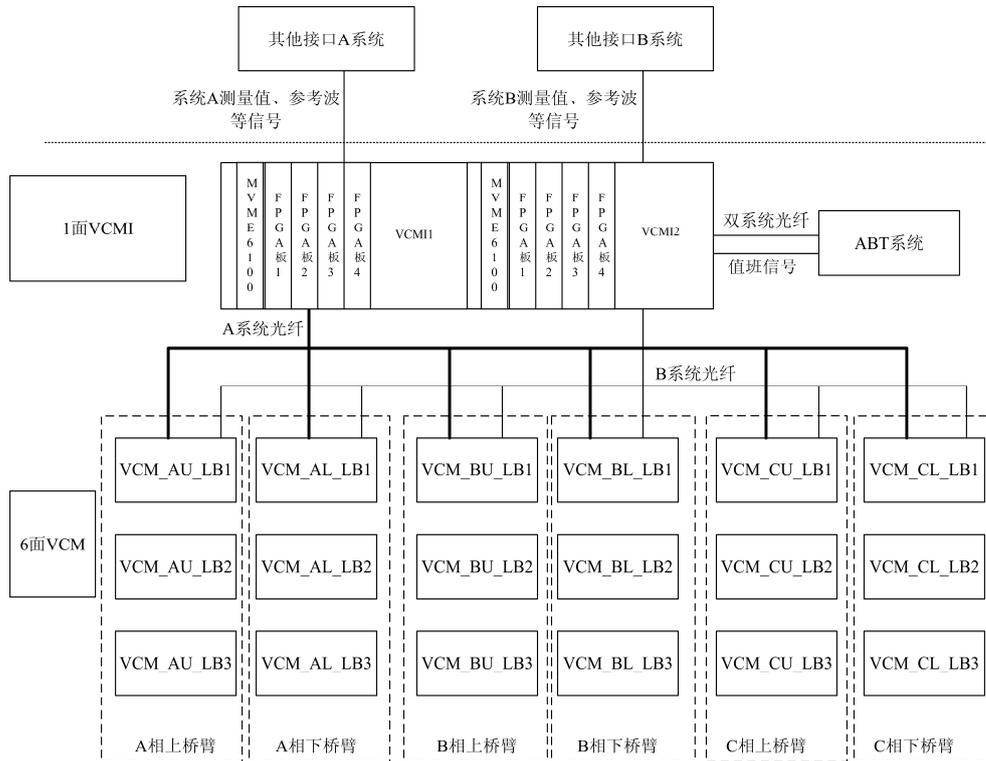


图2 阀控系统框图

Fig. 2 Valve control system chart

每面 VCM 屏柜有 3 台 VCM 机箱。主要实现功率模块控制和状态信息的交换、与功率模块内的功率单元控制器(PMC)通信，一一对应。链接板配置取决于功率模块的数量。

上述板卡中，除 CPU 板卡外其余均为基于高性能 CPLD/FPGA，可满足软件定制的功能要求。

1.2 阀控系统接口

阀控系统按照冗余运行设计，包括 VCM1-1 和 VCM1-2 两套接口系统。这两套系统对外接口包括：

1) 与控制保护系统的 IEC60044-8 通信，通信周期 100 μs。它主要完成系统启停、系统切换、跳闸、参考电压等信号的传输。其中：值班信号的频率为 1 MHz、备用信号为 10 kHz 的方波信号，占空比 50%。

2) 与测量装置的 IEC60044-8 通信，通信周期 20 μs。它主要完成桥臂电流、直流母线电压等数字量的传输。

3) 与 TFR 录波设备的 IEC60044-8 通信主要完成故障录波信号的传输。

4) SCADA 设备的 IEC60870-5-104 通信，通信周期 1 ms。它主要完成模块状态信号、阀控系统运行状态等信号的传输。

5) GPS 设备的 IRIG-B PPS 通信主要完成事件

信息中时间同步信号的提取。

1.3 阀控系统软件设计

阀控系统按功能可分为触发控制功能和监视保护功能两部分。根据系统仿真结果，阀控系统运行周期定为 100 μs。基于 VME 总线的 CPU 板控制整个阀控系统的运行，软件工作流程如图 3 所示。

1) 若极控系统 1 和 2 下发的两路值班信号为一主一备，则 ABT 机箱发送板向阀控 A、B 系统下发的值班信号与极控系统信号一致；

2) 若极控系统下发的值班信号同时为主或者为备，则 ABT 机箱发送板向阀控 A、B 系统下发的值班信号维持原主备状态不变，同时阀控系统向极控上报 TRIP 请求；

3) 若阀控主系统内部发生故障，阀控主系统向极控发送切换请求，直到极控下发的主备值班信号切换后阀控系统才能进行主备切换；

4) 若切换请求发出 700 ms 后极控系统的值班信号仍未切换，则阀控主系统向极控系统发送跳闸请求。

对于冗余运行的阀控系统而言，首先需要确定当前的值班系统，它是通过仲裁机箱值班信号生成逻辑来实现的。值班信号生成逻辑输入为极控发来的值班信号和 VCM1 提供的系统健康信号，具体的处理逻辑为：

图 4 中： i_{nj} 、 i_{pj} 为第 j 相下桥臂和上桥臂电流； $T_{abc/dq}$ 为 $abc-dq$ 变换； I_{2fdref} 、 I_{2ffref} 为二倍频电流参考值； I_{2fd} 、 I_{2ff} 为二倍频电流变换值； $T_{dq/abc}$ 为 $abc-dq$ 反变换； u_{diffj_ref} 为第 j 相电压修正值(调节器系数 K_p 、 k_i 在仿真调试时确定)。

VCM 机箱采集测量系统的桥臂电流值，内部进行二次分量提取，送入环流抑制计算任务。当环流抑制功能投入时，该任务完成桥臂电压修正值计算，并与极控的桥臂电压参考值修正后形成桥臂调制电压，经屏柜间 Aurora 通道传入 VCM 机箱 1，参与最终的功率模块的开通、关断脉冲生成逻辑。调节器各参数在仿真试验期间整定。

根据桥臂调制电压、电流方向和电压排序的结果，VCM 机箱 1 功率模块开关脉冲生成逻辑产生 IGBT 的开关信号，其流程如图 5。

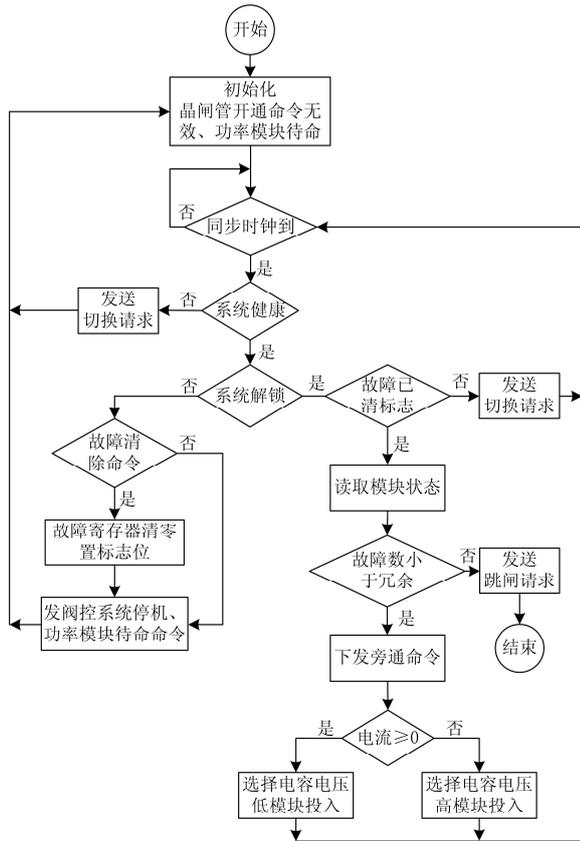


图 5 功率模块开关信号产生流程图

Fig. 5 Flow chart of switch signal on power submodule

生成开关信号经 PMC 转换、传递到 IGBT 驱动模块，控制对应模块的投入和切出，从而将对应模块的电容电压控制在合理的范围内。

阀控系统的监视功能则是 VCM 机箱中链接板通过 HFBRX4XX 系列光链路连接对应桥臂的所有

功率模块的 PMC 板，接收的返回信息包括：

- 1) IGBT 故障，包括脉冲丢失等；
- 2) 电容电压异常、模块温度异常；
- 3) 下行光纤故障、旁路开关驱动故障、晶闸管驱动故障、PMC 故障等。

每块链接板接收每个组件内功率模块的故障状态，组合为一个 16 位的数据，汇总后形成桥臂中 220 个功率模块(20 个冗余)的故障状态信息，传给对应 VCM 存储。CPU 板接收 VCM 上传至 VCM 屏柜的状态信息，根据处理结果产生不同的保护动作和事件记录：

- 1) 换流器桥臂过流或过压等情况下，产生跳闸请求信号；
- 2) 保护功率模块，触发旁路开关动作；
- 3) 产生事件信息，通过 IEC60870-5-104 接口上传至站控 SCADA 系统；
- 4) 故障条件触发的录波信息传至 TFR。

CPU 板实现了 IEC60870-5-104 远动通信规约接口，文献[14]对该接口在电力系统的应用进行了分析。本实现采用基于 SOCKET 应用程序 TCP/IP 通信方式。VxWorks 操作系统提供 TCP/IP 协议栈和库函数，调用 socket、bind、listen 等函数创建并监听连接请求，通过 read、write 等函数向套接字读取或写入信息完成数据的通信，与 Windows 环境下的 Internet 网络应用编程方法相近。

此外，阀控系统还产生一个心跳信号，用于监视系统中各板卡的运行状态。一旦某块板卡的心跳信号故障，则向控保系统发起一个系统切换请求信号，使备用系统投入运行状态。

2 基于 RT-LAB 的阀控系统性能试验

设计的阀控系统在基于 RT-LAB 的实时数字仿真环境进行了 3 端系统 FPT 和 DPT 试验。该 3 端系统的 3 个站中，站 1 和站 2 为全数字系统，站 3 为纯物理实现的控保系统和阀控系统。每站的换流器的每个桥臂均有 220 个子模块。RT-LAB 向站 3 提供一次系统的电压、电流测量值，阀控系统则根据极控系统通过 IEC60044-8 规约下发的参考波，经过内部算法处理后，产生开关脉冲送至 RT-LAB，控制模块的投入和切出，从而达到对子模块电容电压和换流器输出交流电压的控制。下面以站 3 阀控系统稳态运行性和功率升降过程为例，检验阀控系统稳态时电压、电流的稳定性和动态响应的平稳性。

2.1 稳态特性

试验条件：3 端交直流稳定运行，其中站 1 工作在逆变状态，采用定直流电压和定无功功率控制

方式, 直流电压参考值为 320 kV, 无功功率参考值为 0 Mvar; 站 2、3 工作在整流状态, 采用定有功和定无功功率控制方式, 其中站 2 有功功率参考值为 50 MW, 无功功率参考值为 0 Mvar, 站 3 有功功率参考值为 100 MW, 无功功率参考值为 0 Mvar。启动录波并将所有波形在 195.3~95.8 s 展开显示, 下面均以站 3 为例, 其网侧和阀侧三相交流电压、直流母线电压、电流如图 6 所示。



图 6 3 端交直流稳定运行直流电压、电流波形

Fig. 6 DC Voltage and DC current in 3 terminals steady mode of AC and DC mixture

从上述仿真结果可以看出: 正负极直流电压稳定在 160 kV, 波动不超过 $\pm 1\%$, 直流电流保持在 157 A, 波动不超过 $\pm 2\%$ 。交流电压运行保持稳定。

为了观测调制策略的效果, 从单桥臂 220 个模块中抽取监视其中的 16 个子模块的电容电压, 在 RT-LAB 观测到的波形如图 7。

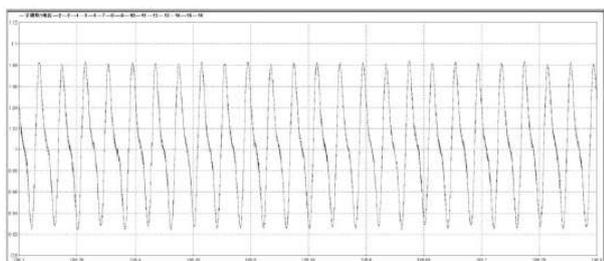


图 7 子模块电容电压分布

Fig. 7 Voltage distribution on sub-modular capacitors

可见各子模块的电容电压在额定值 8% 范围内波动, 电压的波动范围满足设计规范的要求。

基于 MMC 柔性直流输电系统具有输出电压谐波及其电压畸变率较低的优势, 在上述实验条件下, 系统对应的网侧、阀侧交流电压谐波分析如图 8。

计算出的网侧和阀侧总谐波含量均在 1% 以下, 满足设计规范的要求(不超过 2%)。

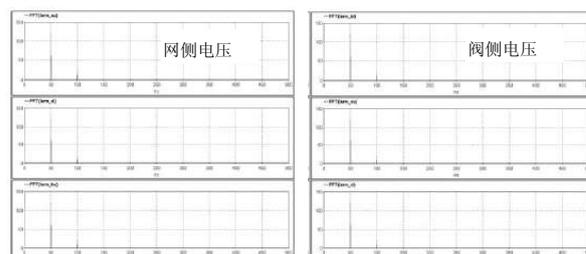


图 8 网侧、阀侧交流电压 FFT 分析图

Fig. 8 FFT analysis of AC voltage in grid and valve sides

2.2 动态响应

试验条件: 站 1 与站 3 两端稳定运行, 站 1 工作在逆变状态, 采用定直流电压和定无功功率控制方式, 其中直流电压参考值为 320 kV, 无功功率参考值为 0 Mvar; 站 3 工作在整流状态, 采用定有功功率和定无功功率控制方式, 其中有功功率参考值为 50 MW, 无功功率参考值为 0 Mvar。站 3 设置无功功率参考值 Q_{ref} 从 0 Mvar 上升为 25 Mvar, 上升速度为 5 Mvar/s, 并启动录波, 对两站所有录波波形在 169~176 s 展开, 站 3 波形如图 9 所示。图中左侧为网侧和阀侧三相交流电压波形, 右侧为有功功率(标号 1)、无功功率(标号 2)波形。

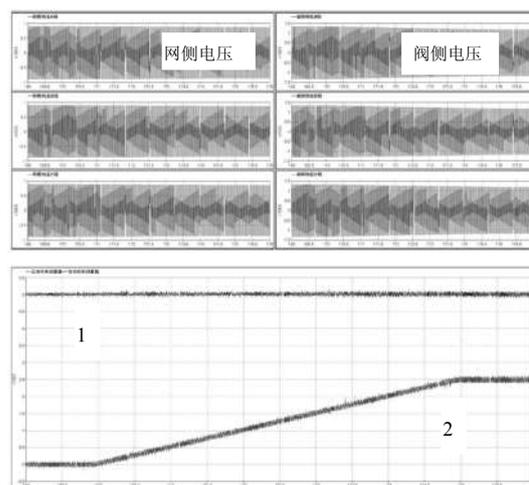


图 9 两端系统无功功率提升

Fig. 9 Reactive power rise in two terminals system

根据上述波形可知, 在功率升降期间变化过程波形均正常, 交流侧电压平稳变化, 功率波动范围不大于 $\pm 2\%$, 符合设计规范要求。

3 结束语

本系统采用了 VME 标准总线, 便于系统的升级和标准化。工业标准高性能单板计算机, 采用 Tornado 进行 VxWorks 实时应用开发, 可实现微秒级控制周期的算法。系统采用的高性能 FPGA 协处

理板, 实现了 VME 通信和基于 Aurora 协议的吉比特高速通信, 并可方便地开发各种自定义功能软件, 保证了本硬件平台具有极强的通用性和扩展性。

阀控系统采用最近电平逼近调制算法和环流抑制算法, 通过了基于 RT-LAB 平台的 FPT 试验和 DPT 试验验证, 系统的动态性能及其他参数均满足规范书的要求, 已应用于样机生产。

参考文献

- [1] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.
- [2] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [3] ANSI/VITA 1.1-1997 American national standard for VME64 extensions[S].
- [4] 胡静, 赵成勇, 赵国亮, 等. 换流站通用集成控制保护平台体系结构[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 133-140, 8.
HU Jing, ZHAO Chengyong, ZHAO Guoliang, et al. System architecture of a universal integrated control and protection platform for converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 133-140, 8.
- [5] 王林, 雷革, 马力. EPICS在VxWorks操作系统下访问VME设备的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(12): 1317-1320, 1344.
WANG Lin, LEI Ge, MA Li. EPICS application for accessing VME devices on VxWorks[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(12): 1317-1320, 1344.
- [6] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [7] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国机电工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [8] 楚遵方, 李耀华, 王平, 等. 柔性直流输电系统中模块化多电平变流器的直流侧充电策略分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 136-142.
CHU Zunfang, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Analysis of charging strategy by DC Grid of modular multilevel converter in high voltage direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 136-142.
- [9] 袁义生, 朱本玉. 一种基于耦合电感的模块化多电平变流器控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 216-224.
YUAN Yisheng, ZHU Benyu. Control strategy of a modular multilevel converter based on coupled inductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 216-224.
- [10] 黄守道, 彭也伦, 廖武. 模块化多电平型变流器电容电压波动及其抑制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 62-71.
HUANG Shoudao, PENG Yelun, LIAO Wu. Study of capacitor voltage fluctuation and its suppression for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 62-71.
- [11] 邵顺增. 稳定快速排序算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(7): 263-266.
SHAO Shunzeng. Study on stable and quick sort algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(7): 263-266.
- [12] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7.
LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.
- [13] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器新型桥臂环流抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 73-80.
ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.
- [14] 梁竹靛, 韩兵, 彭永. IEC60870-5-104规约在分布式电力监控系统中的应用[J]. 继电器, 2011, 39(4): 124-127.
LIANG Zhuliang, HAN Bing, PENG Yong. Application of IEC60870-5-104 protocol in distributed electric supervisory control system[J]. Relay, 2011, 39(4): 124-127.

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-02-16

作者简介:

王小强(1972-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 现主要从事高压直流输电控制保护设备的研发。E-mail: wangxq@xdps.com.cn

(编辑 周金梅)