

柔性直流换流阀控制系统架构与通信 安全性设计^{*}

毕文瑾, 李亚龙

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 柔性直流输电技术在国内国际上应用越来越广泛, 柔性直流输电系统的规模和容量逐步提高。文中针对柔性直流输电控制系统, 论述了控制系统各层级的功能, 详细阐述了换流阀控制系统复杂的硬件架构和功能。针对阀控系统安全稳定运行问题, 论述了阀控设备在功能架构、冗余备份、故障监视等方面的安全性设计方案。考虑到阀控系统复杂的硬件配置, 重点研究了阀控设备内部的通信问题; 在阀控设备多层级间、多CPU间, 除配置有实现上下级间数据信息交互的基本通信链路之外, 增设专用的通信校验监视通道, 实时监视通信内容的正确性; 将阀控内部的关键通信故障问题与阀控设备故障相关联, 避免因通信故障导致更加严重的故障发生, 为柔性直流换流阀安全可靠运行提供了保障。

关键词: 柔性直流输电; 模块化多电平; 阀控设备; 安全可靠

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.017.005

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)17-0026-05

Research on architecture and communication security design of flexible DC converter valve control system

Bi Wenjin, Li Yalong

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and
Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Flexible DC transmission technology is widely used in domestic and international applications, and the scale and capacity of flexible DC transmission systems are gradually increasing. For the flexible DC transmission control system, the functions of each level of the control system are discussed, and the complex hardware architecture and functions of the converter valve control system are elaborated in detail. Aiming at the safe and stable operation of the valve control system, the safety design scheme of valve control equipment in functional architecture, redundant backup, fault monitoring and other aspects is discussed. Considering the complex hardware configuration of the valve control system, the internal communication problem of valve control equipment is mainly studied. In addition, the basic communication links between the multi-level and multi-CPU of the valve control equipment, a dedicated communication verification monitoring channel is added to monitor the correctness of the communication content in real time; the key communication fault within the valve control is associated with the fault of the valve control equipment, so as to avoid more serious faults caused by communication fault, which provides a guarantee for the safe and reliable operation of the flexible DC converter valve.

Keywords: flexible DC transmission, modular multi-level, valve control equipment, safety and reliability

0 引言

柔性直流输电技术在可再生能源发电并网、城市

中心负荷供电^[1]、区域电网互联^[2]、构建直流电网^[3]等领域展开了应用和探索, 柔性直流输电线路的数量和输电容量一步步提高。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607106)

近年来,国内柔性直流输电工程得到了极大发展,据统计,随着柔性直流输电工程电压等级和容量的提高,换流阀子模块数量也不断增多^[4-5]。2011年建成的上海南汇示范工程中单桥臂运行子模块48个^[6],2013年建成的南澳多端柔直工程中单桥臂子模块数多达200个^[7],2016年建成的云南鲁西背靠背直流异步联网工程中单桥臂子模块数为310个^[8],即将投运的渝鄂背靠背联网工程中单桥臂子模块数达500个^[9]。换流阀控制设备作为换流阀子模块的直接控制设备,是整个柔直换流阀的控制中枢,需要协调控制大量的子模块在不同工况条件下长期、稳定运行。控制系统的复杂性和控制精度的严苛性对阀控设备提出了新的更高的要求。文章从阀控架构入手,介绍了阀控系统内复杂的硬件结构,针对阀控设备运行安全性问题,重点研究了阀控设备内部通信的安全可靠性设计,通过校验和监视机制,保证了阀控数据的正确收发,为柔性直流换流阀安全可靠运行提供了保障。

1 换流阀控制系统功能架构

1.1 整体控制架构

与常规直流输电控制系统类似,柔性直流输电控制系统采用分层架构^[10]。从控制功能角度划分,自顶而下分为系统控制设备层、极控制设备层、换流阀控制设备层和子模块控制层,如图1所示。

系统控制设备层依据电网调度指令,实现对换流站的运行模式、启动、停运的控制及有功/无功类系统参数调节;极控制设备层监测换流阀及辅助设备工作状态,基于系统控制设备层下发的运行方式、功率指令等,生成换流阀的控制指令及桥臂电压参考值;换流阀控制设备层作为上层控制层与换流阀子模块的中间枢纽,基于极控层下发的控制信息,经过环流抑制控制、子模块均压控制等,最终生成针对各子模块的控制保护指令;子模块控制层接收阀控层下发的指令,完成对子模块的状态监测、投切操作及故障处理。

1.2 阀控系统功能设计

与极控制设备相对应,换流阀控制设备配置有完全独立的A/B两套控制系统硬件,仅最终与子模块控制器接口的通信部分共用,任意一套均可完成对换流阀的全部控制保护功能。阀控系统通过完全冗余的硬件配置,提高了控制的安全可靠性,当某一套阀控设备自身出现故障时,可及时地向极控申请切换到另一套系统运行,避免因单一阀控设备问题导致换

流阀故障、停运。换流阀控制设备的硬件配置如图2所示。

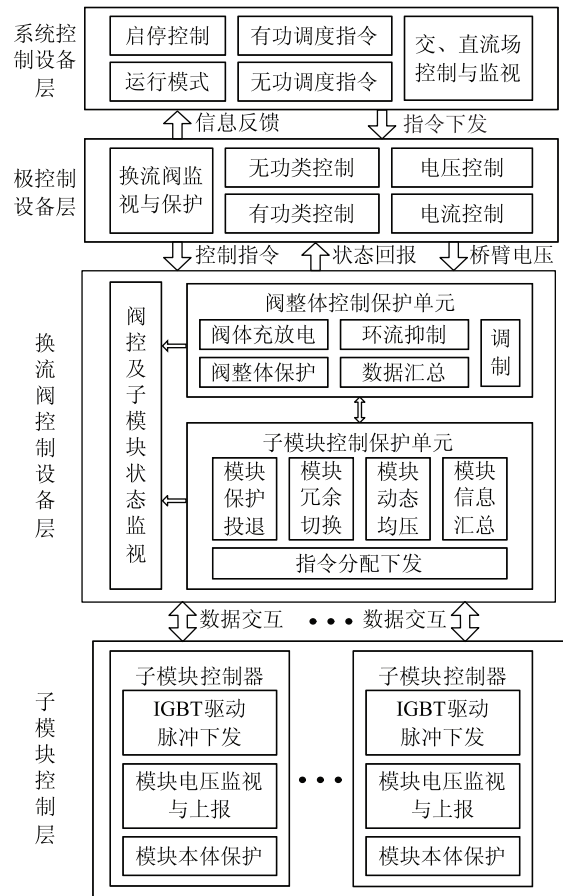


图1 柔性直流控制系统分层架构

Fig. 1 Hierarchical architecture of flexible DC control system

阀系统内部按功能可分为阀整体控制保护单元和6个桥臂子模块控制保护单元两部分。阀整体控制保护单元对上直接与极控系统数据进行通信(接收桥臂电压参考值及控制指令,上传换流阀运行状态及桥臂电压信息等),基于换流阀运行信息计算电流平衡控制量并修正桥臂电压参考值,实现环流抑制,生成各桥臂子模块投入数并下发至桥臂级控制单元。子模块控制保护单元是阀控与各桥臂众多子模块的接口单元,其依据阀整体控制保护单元发送的桥臂子模块投入数,执行子模块电容电压控制,生成针对该桥臂各子模块具体的投切指令并下发,基于收到的子模块状态信息完成子模块的故障监视和处理。

阀控系统中配置有独立的监视后台,监视并存储阀控内部各设备参数及阀控系统收到的所有子模块信息和外部数据。

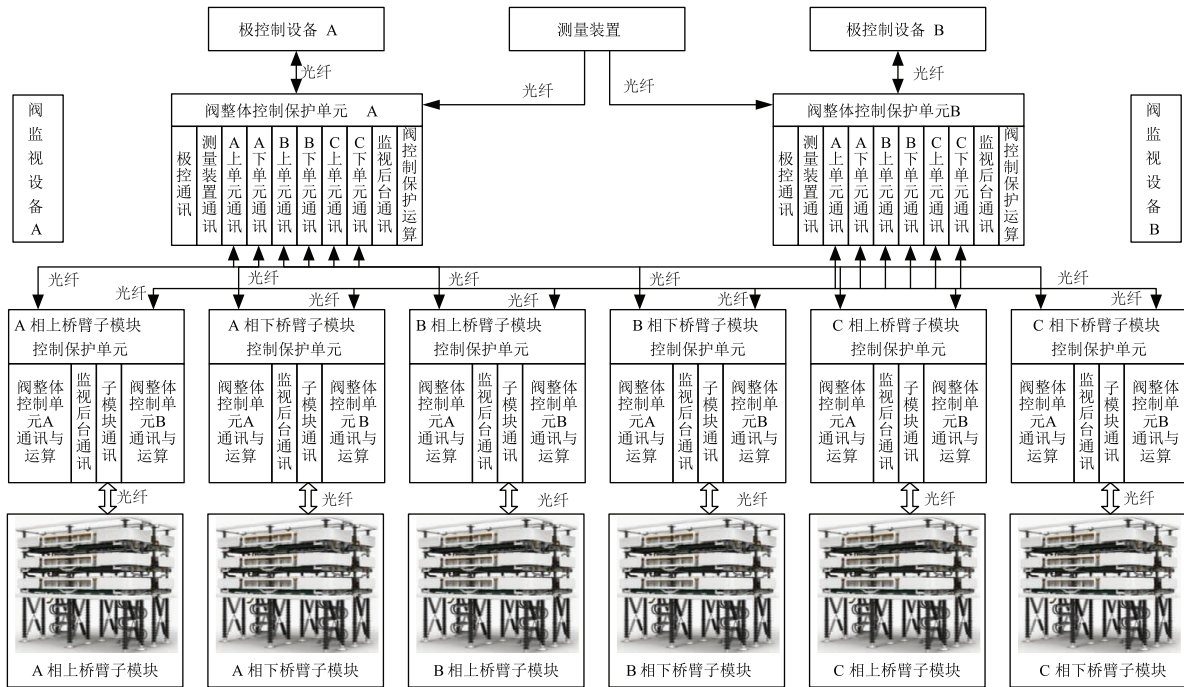


图 2 换流阀控制设备冗余硬件配置

Fig. 2 Redundant hardware configuration of converter valve control equipment

2 阀控架构的安全性设计

柔直阀控系统在传统直流输电经验基础上,充分考虑了运行安全性,进行了如下设计:

(1)控制硬件的冗余设计:如 1.2 节所述,阀控系统配置有完全双冗余的硬件电路,两套阀整体控制保护单元通常独立组屏,实现了硬件电路上的完全隔离;子模块控制保护单元中主体控制电路也实现两套系统分离运行,极大地规避了硬件无备份的危险;

(2)工作电源的安全设计:阀控设备的供电均采用完全独立的双路电源供电,当一路电源出现故障后,不影响阀控系统的正常运行,阀控通过监视后台报警,以提醒运行人员尽快处理电源问题;

(3)保护电路的安全设计:双冗余的保护电路同时工作,主、备控制保护系统同时接收保护电路上传的信号和上报的信息。当主、备系统都工作正常时,上级设备只有同时收到主、备系统发送的请求跳闸信号才进行跳闸操作。当仅有一套系统工作正常时,控制保护系统收到正常工作系统的跳闸请求时,即进行跳闸操作;

(4)子模块的冗余设计:柔直换流阀通常配置有处于热备用状态的子模块,当某一子模块出现故障后,热备用的子模块立即代替故障子模块参与换流阀运行。阀控中设计有冗余子模块的热备用策略,确保按照额定投入数运行的同时,实现冗余子模块和工作子模块

的动态电压均衡;

(5)换流阀运行状态监视:实时监测换流阀关键特性,如子模块容值、开关频率、阀冷水温等,评估换流阀运行状态,为换流阀计划检修提供数据依据。

3 阀控通信安全性设计

阀控设备内部层级和功能划分明确,但其硬件系统庞大,各设备间需要通过大量的通信接口完成数据的交互,从而构建协同工作的控制中枢。通常阀控设备由若干插卡箱组成,每个插卡箱又包含一块用于连接、固定板卡的背板、供电回路和若干控制板卡。各层级间、各 CPU 间需进行大量的光纤通信或背板总线通信,其通信可靠性极大地影响了阀控系统的运行安全。随着电压等级的提高、模块数的增多和对阀控控制速率要求的提高,阀控系统的硬件配置越来越密集化,对通信可靠性要求越来越高。为保证通信的安全性,在阀控设备内部通信链路之外,增加一条独立的故障监视通道,实时监视通信的正确性。

3.1 阀整体控制保护单元通信安全性

阀整体控制保护插卡箱由两类控制板卡组成。通信管理板卡主要实现与外部设备的通信,完成控制命令和测量数据的收发;运算板卡主要是实现阀控逻辑的处理,其在阀控控制周期内,将通信管理板收到的数据分类解析,完成相应的处理后,生成对阀的控制指

令,再将指令下发给通信管理板向下级设备传输。

阀整体控制保护单元与外部设备间的通信链路可划分为光纤通信部分和通信管理板至运算板通信两部分,通过在通信的各个环节增加监视通道,甄别通信数据的正确性。阀整体控制保护单元内以 FPGA 搭建底层通信信道,通信故障监测逻辑示意图如图 3 所示。

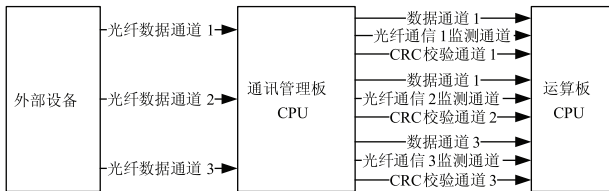


图3 阀整体控制保护单元通信监测逻辑

Fig.3 Communication monitoring logic of valve integrated control protection unit

光纤插入通信管理板的光接收器中,通信管理板CPU从光接收器处读取光通信数据,并通过背板传输至运算板,构成数据传输通道。在通信管理板至运算板之间还设计有专用的通信监测通道,针对每一光纤通道,通信管理板收到数据后,按照通信协议完成链路层CRC校验,若校验通过,则认为数据传输无误;若未收到有效帧头或CRC校验不通过,则认为通信故障,通信管理板将光纤通信故障信息上报给运算板。通信管理板针对每个光接收器均配置通信故障位,运算板在读取数据通道信息时,首先检索各通信监测通道的数据,判断是否存在通信故障信号,从而判断对应光口是否存在通信问题,并根据故障严重性做出响应。如:当阀整体控制保护单元接收极控光纤通信指令时,检测到极控下发指令的光纤通道存在故障,阀控上报故障并请求切换到备用系统运行。针对光纤通信的故障监测可有效检测因外部设备故障、光纤损坏或插入不良等导致的通信异常问题,为定位故障原因提供依据。

通信管理板与运算板间总线通信同样影响着通信的可靠性,仅通过上述通信管理板内配置的通信故障监测已无法检测到该问题。由于通信管理板在解析各光口发送的光纤通信数据后,会将数据打包发送至运算板,针对每个数据传输通道,将该通道内的数据逐字进行CRC运算,将生成的CRC校验码由独立的通信故障通道传输,运算板在收到每帧数据后,先进行数据校验,校验通过的数据用于控制逻辑运算,否则认为通信管理板至运算板间通信数据异常,上报故障,通过在通信管理板与运算板间的通信故障通道中配置专用的CRC校验位,实现了板卡间通信监测功能。

3.2 子模块控制保护单元通信安全性

子模块控制保护单元插卡箱由两类板卡组成:子模块通信板卡主要实现与子模块的通信;A/B两块控制板卡分别与两个系统的阀整体控制单元通信,根据两套系统的主备状态决定实际进行子模块控制的板卡。

子模块的通信通道监测逻辑与阀整体控制保护单元类似,子模块通信板CPU从光接收器处读取光通信数据,按照通信协议完成链路层CRC校验,若校验通过,则认为数据传输无误,数据通过背板传输至两块控制板;若未收到有效帧头或CRC校验不通过,则认为通信故障,在子模块通信板至控制板之间设计专用的通信故障上报通道,上报给运算板光纤通信故障。针对子模块通信板至控制板之间的通信监测问题,仍采用类似的CRC校验机制。但由于换流阀子模块很多,如果针对每一个子模块均配置独立的通信监测通道,占用了过大的硬件资源。此外,不同于阀控设备其他板卡,当单个子模块通信板卡故障后,仅与其相连的子模块会因通信故障而退出,远小于子模块设计冗余数,此时换流阀仍可正常运行。因此每个子模块通信板卡配置一路通信故障监测通道,针对一个板卡的所有子模块进行CRC校验,若运行期间某一块子模块通信板与控制板通信异常,将作出相应响应,避免更严重问题发生。子模块控制保护单元通信故障监测逻辑示意图如图4所示。

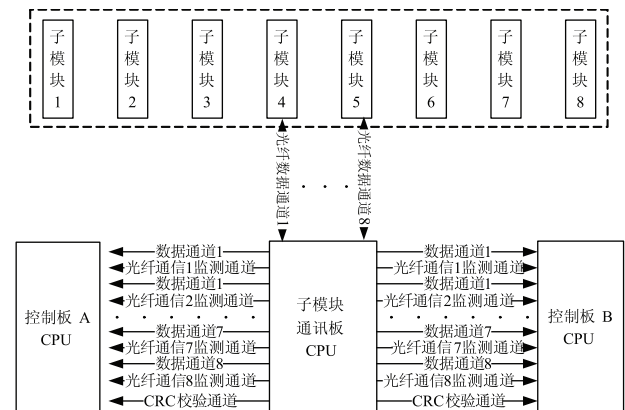


图4 子模块控制保护单元通信监测逻辑

Fig.4 Communication monitoring logic of sub-module control and protection unit

子模块控制保护单元与阀整体控制保护单元间的光纤通信由两块控制板卡实现,其板卡内部也配置有光纤通信故障校验机制,保证了通信的安全性。

4 结束语

针对柔性直流输电换流阀控制系统,在详细分析其复杂的设备架构和控制功能后,重点着眼于阀控设备安全运行问题,提出了针对柔直阀控设备的通信安全性设计,针对阀控设备多CPU架构,不仅研究了设备间通信安全性问题,同时还考虑了设备内CPU间的通信安全性,为阀控设备安全可靠工作提供了新的思路。如此复杂的阀控系统,其安全性问题直接决定了柔性直流换流阀运行的可靠性,其安全稳定运行问题是柔性直流换流阀产品成熟化的关键。

参考文献

- [1] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 1-6.
Tang Guangfu. Research and development of core technology and engineering of HVDC transmission equipment[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(1): 1-6.
- [2] 葛梦昕, 傅裕斌, 等. 采用异步联网限制短路电流的实际应用和分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 40-47.
Ge Mengxin, Fu Yubin, et al. Practical application and analysis of using asynchronous networking to limit short-circuit current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 40-47.
- [3] 郭贤珊, 周杨, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
Guo Xianshan, Zhou Yang, et al. Zhangbei Rouzhi power grid construction and characteristics analysis[J]. Power Grid Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [4] 王坤, 刘开培, 等. 基于快速排序算法的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 1-7.
Wang Kun, Liu Kaipei, et al. A capacitor voltage balancing strategy based on quicksort algorithm for modular multilevel converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 1-7.
- [5] 刘追, 刘振兴, 李翠. 一种基于最近电平调制方式的MMC电压均衡改进方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24): 87-93.
Liu Chui, Liu Zhenxing, Li Cui. An improved MMC voltage balancing method based on the nearest level modulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(24): 87-93.
- [6] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.
- Qiao Weidong, Mao Yingke. Overview of Shanghai Flexible Direct Current Transmission Demonstration Project[J]. East China Power, 2011, 39(7): 1137-1140.
- [7] 张祖安, 黎小林, 陈名, 等. 应用于南澳多端柔性直流工程中的高压直流断路器关键技术参数研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2417-2422.
Zhang Zuan, Li Xiaolin, Chen Ming, et al. Study on key technical parameters of HVDC circuit breaker applied in multi-terminal flexible DC project in South Australia[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(8): 2417-2422.
- [8] 李家羊, 岑韬, 张磊, 等. 提高柔性直流输电换流阀控系统性能的方法研究[J]. 电气技术, 2017(12): 152-156.
Li Jiayang, Cen Tao, Zhang Lei, et al. Study on the method of improving the performance of the valve control system of converter valve in flexible HVDC transmission[J]. Electrical Technology, 2017(12): 152-156.
- [9] 李晋. 大容量多端柔性直流系统换流站布置方案研究[D]. 华北电力大学(北京), 2017.
Li Jin. Research on the layout scheme of converter station for large capacity multi-terminal flexible DC system[D]. North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [10] 胡四全, 吉攀攀, 俎立峰, 等. 一种柔性直流输电阀控测试系统设计与实现[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 112-116.
Hu Siqian, Ji Panpan, Zu Lifeng, et al. Design and implementation of a flexible HVDC valve-controlled test system[J]. China Electric Power, 2013, 46(9): 112-116.

作者简介:



毕文瑾(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制。Email:wenj_bi@163.com

李亚龙(1985—),男,博士,讲师,研究方向为电力系统控制与分析。

收稿日期:2019-06-21;修回日期:2019-07-09
(田春雨 编发)