

基于辅助电压判据的柔性直流换流阀子模块 旁路拒动策略

张国华¹, 刘卓锟¹, 李军¹, 郑维高^{1,2}

(1. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052; 2. 江苏省电力有限公司
超高压分公司, 江苏 南京 211102)

摘要:为解决柔性直流输电换流站换流阀子模块旁路开关拒动导致直流闭锁, 首先, 开展了旁路开关动作原理和动作过程力学分析; 接着, 从现场检查、故障录波和旁路开关合闸故障复现试验3个方面, 深入分析某换流阀子模块旁路拒动事件的故障原因。然后, 针对无转折晶闸管子模块设计的在运工程, 提出基于辅助电压判据的旁路开关拒动改进设计策略; 最后, 根据4种不同运行工况分别开展改进设计策略试验验证。结果表明, 所提改进设计策略具有可靠性和有效性, 该策略实施后避免了旁路开关拒动导致换流阀子模块炸裂和换流阀闭锁, 进一步提高了在运柔性直流输电工程换流阀子模块运行可靠性。

关键词:换流阀子模块; 旁路开关拒动; 合闸试验; 改进策略; 辅助电压判据

中图分类号: TM 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)04-0091-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.202404014

Bypass Switch Rejection Strategy of Sub-module in Flexible DC Converter Valve Based on Auxiliary Voltage Criterion

ZHANG Guohua¹, LIU Zhuokun¹, LI Jun¹, ZHENG Weigao^{1,2}

(1. DC Technology Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China;
2. State Grid Jiangsu Extra High Voltage Company, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the problems of flexible DC blocking caused by the failure of bypass switch of sub-module in flexible converter stations, the action principle and force analysis of bypass switch action process are carried out. Next, from three aspects, that is, on-site inspection, fault recording and the recurrence test of bypass switch closing fault, the fault causes for bypass failure event of a flexible DC sub-module is analyzed in depth. And then, an improved design strategy for bypass switch rejection based on auxiliary voltage criteria is proposed for the non-turning thyristor module. At the last, the effectiveness and reliability of the improved strategy is verified through experiments under four different operating conditions, which avoids the sub-module cracking and converter valve blocking, and further improves the reliability of sub-module operation in flexible HVDC engineering in operation.

Key words: sub-module; bypass switch rejection; closing test; improved strategy; auxiliary voltage criterion

0 引言

由于新能源消纳、城市供电、区域联网等日益增加的输电需求^[1-2], 柔性直流输电技术作为新型直流输电技术取得了快速发展^[3-4], 尤其在送受端弱

电网系统中, 国内先后有厦门、渝鄂、乌东德、张北、白江等多个柔性直流输电工程投运^[5-6]。随着柔性直流输电关键设备国产化推进和柔性直流输电技术优势凸显, 特高压柔性直流输电技术将进一步发展^[7-8], 未来藏东南、沙戈荒等送端弱电源系统接入均有可能采用柔性直流输电送出方案。

柔性直流换流阀子是柔性直流输电技术的核心

设备之一,其子模块故障类型主要包括绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transient, IGBT)故障、板卡类故障、旁路开关故障、通信故障^[9]等。当柔性直流换流阀子模块故障时,中控板主动下发旁路命令合旁路开关,将故障子模块从桥臂回路中切除,但是出现“黑模块”或旁路开关拒动时,故障子模块不能及时被切除,将导致子模块电容过压或旁路开关拒动保护动作,继而引起设备损坏、换流阀闭锁^[10]。在运柔性直流工程中已出现多起子模块旁路开关拒动、电容过压事件,如渝鄂背靠背换流站单元 I 子模块故障炸裂^[11]、鲁西背靠背柔性直流换流站广西侧换流单元子模块旁路开关拒合跳闸事件^[12]等。国内外研究对此提出了旁路转折晶闸管^[10,13-15]、双驱动旁路开关^[16]等子模块可靠性提升措施,以及 IGBT 开路故障滑模观测法诊断^[17]、微分欠压检测^[18]等检测手段和测试装置^[19]。对于新增转折晶闸管和双驱动旁路开关设计,在新建柔性直流输电工程中已采用,而重新改造在运工程的无转折晶闸管设计的柔性直流换流阀子模块不具有经济性和可行性,因此迫切需要研究旁路开关拒动的应对策略。

下面依托某柔性直流换流站子模块旁路开关拒动导致直流闭锁的故障,深入分析此次故障原因,并提出旁路开关拒动辅助电压判据的改进策略,在不改变在运子模块结构设计情况下,通过软件策略有效地解决了在运工程子模块旁路开关拒动时导致子模块炸裂起火、换流阀闭锁的问题,进一步通过测试系统验证所提改进设计策略的可靠性和有效性,对于提升换流阀子模块安全运行具有重要意义。

1 工作原理

1.1 取能电源工作原理

换流阀子模块取能电源从直流电容器取电,经降压隔离后输出 15 V 和 400 V 电源。15 V 电源输出 1 为子模块的中控板、驱动板供电;400 V 电源输出 2 为旁路开关储能电容器供电,如图 1 所示。

取能电源对两路输出电压有监测功能,输出异常判据为:15 V 输出电压过压故障旁路定值为 16 V,欠压定值为 14 V;400 V 输出电压过压故障旁路定值为 440 V,欠压定值为 360 V。当输出电压超出正常范围会上报故障至中控板,中控板判定“取能电源

故障”并触发旁路开关合闸。

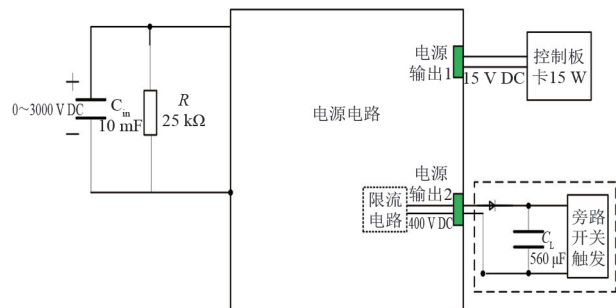


图 1 取能电源工作原理

1.2 旁路开关工作原理

旁路开关是将故障子模块从桥臂回路切除的关键设备,旁路开关主要结构包括主触头、真空灭弧室、动磁铁、合闸线圈、辅助接点等。中控板收到故障信息后下发旁路开关合闸指令,储能电容器通过合闸线圈和晶闸管放电,旁路开关合闸动作^[20]。

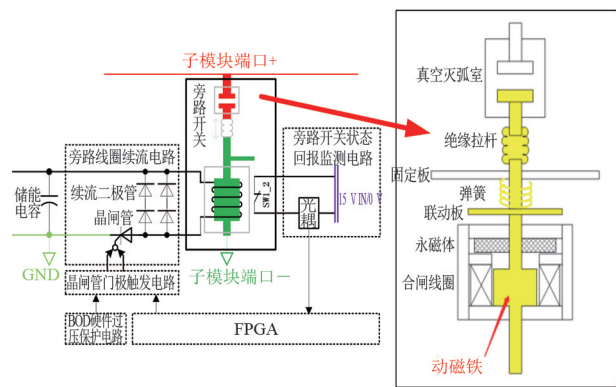


图 2 子模块旁路开关原理

所用旁路开关原理如图 2 所示,储能电容器给合闸线圈通电,动磁铁被磁化,在永磁体磁场的作用下,向上带动灭弧室完成合闸动作。分闸过程依靠分闸弹簧实现分闸位置保持,合闸过程依靠永磁体实现合闸位置保持。合闸过程中,分闸弹簧处于压缩状态,需要克服弹簧弹力才能合闸成功。

正常情况下,旁路开关接到旁路指令后 3 ms 内主触头闭合,12 ms 内上送合闸辅助位置接点信号给中控板,一般采用常闭辅助触点作为反馈监测信号。当旁路开关主触点合闸运动到半程时,带动辅助触点由闭合状态变为打开状态,中控板检测到辅助触点电位变化持续 200 μs 后,中控板判断旁路开关合闸成功,之后不再监测辅助触点状态。如果在触发旁路开关后 12 ms 中控板未判定旁路开关合闸成功,则判定为旁路开关拒动。

旁路开关拒动常见原因包括中控板故障、取能

电源回路异常、开关本体故障、光纤回路异常、辅助接点异常等,任一元件故障都影响旁路开关动作的可靠性,导致旁路开关拒动^[10]。

1.3 旁路开关动作理论分析

为深入研究旁路开关拒动机理,对旁路开关运动机构动磁铁进行受力分析。正常分闸状态,动磁铁受到永磁体电磁吸力 F_1 及分闸弹簧力 F_2 ,动磁铁合成力 F_N 为

$$F_N = F_2 - F_1 \quad (1)$$

当分闸弹簧力 F_2 大于永磁体电磁吸力 F_1 时,旁路开关可靠保持分闸状态。

中控板下发旁路开关合闸命令,储能电容器给合闸线圈通电,动磁铁产生合闸力 F_3 ,合闸力与通电电流 I 、线圈匝数 N 、电磁综合系统 K 密切相关,计算公式为

$$F_3 = K (NI)^2 \quad (2)$$

此时动磁铁合成力 F_N 为

$$F_N = F_1 + F_3 - F_2 \quad (3)$$

合闸瞬间,合闸线圈产生的动磁铁合闸力约为 4500 N,动磁铁合成力约为 3500 N,动磁铁快速与永磁体吸合,旁路开关合闸。合闸后,永磁体电磁吸力 F_1 变大,大于分闸弹簧力 F_2 ,旁路开关可靠保持合闸状态。

永磁体电磁吸力 F_1 、分闸弹簧力 F_2 、动磁铁产生合闸力 F_3 、储能异常时动磁铁产生的合闸力 F'_3 随着主触头开距变化的受力曲线如图 3 所示。旁路开关主触头总开距为 3 mm,主触头合闸过程从分闸状态运动至合闸状态。当出现储能电源异常时,动磁铁产生的合闸力 F_3 显著等比例降低,如图 3 中 F'_3 曲线所示。此时旁路开关主触头合闸过程会经历临界状态,即动磁铁合成力 F_N 等于 0;越过临界状态后动磁铁合成力 F_N 将小于 0,旁路开关合闸过程将停止并接着转向分闸状态,旁路开关合闸失败。

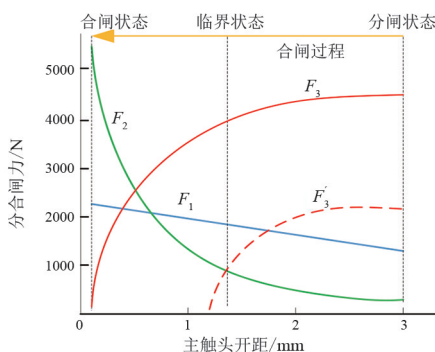


图3 旁路开关受力-开距曲线

2 故障分析

2.1 故障案例概述

2023年6月25日,某柔性直流换流站极Ⅱ阀厅火灾报警请求跳闸,闭锁极Ⅱ直流。故障前该换流站双极功率为300 MW,闭锁后功率成功转至极Ⅰ,无功功率损失。相关事件记录如表1所示。

表1 故障时刻事件记录

事件时间	事件等级	故障设备	事件描述
05:40:07:638	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段3子模块16取能电源故障
05:40:07:642	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段3子模块16子模块判定旁路开关闭合
05:40:07:643	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段3子模块16VBC判定子模块旁路
05:41:17:208	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段2子模块46取能电源故障
05:41:17:210	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段2子模块46子模块判定旁路开关闭合
05:41:17:211	轻微	极ⅡA系统A相下桥臂(VM1)	分段2子模块46VBC判定子模块旁路
05:44:25:225	紧急	S2P2PCP1(A)	阀厅火灾报警请求跳闸出现
05:44:25:226	紧急	S2P2PCP1(A)	保护出口闭锁换流阀出现

2.2 现场检查

极Ⅱ闭锁后烟火自动熄灭。进入阀厅检查发现起火范围仅限于子模块16。子模块16外观有灼烧痕迹,旁路开关、上管IGBT均已烧毁,下管IGBT有烧黑痕迹,子模块内部上管IGBT冷却水管有漏水痕迹,水管接头松动,未断裂。极Ⅱ换流阀A相下桥臂分段2子模块46位于子模块16正下方,该子模块旁路开关已闭合。子模块外观及内部均有明显水渍。

经检查分析,子模块46旁路原因为上方子模块16故障漏水造成其取能电源故障。同时故障子模块下方5个子模块外壳有明显水渍,内部轻微进水,其余子模块外观均正常。测量子模块16旁路开关回路阻抗为无穷大(未合闸),储能电容器电容值为0。进一步解体子模块检查,发现上、下管IGBT均已失效,旁路开关主触头未闭合,辅助接点处于打开

状态(表示上送合位状态),旁路开关储能电容器失效,储能电容器电解液析出,如图 4 所示

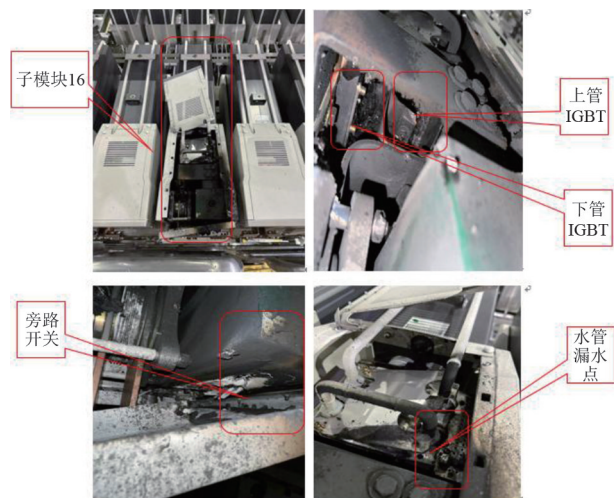


图 4 子模块故障情况

2.3 故障录波分析

故障时刻阀控分段 3 子模块 16 的录波如图 5 所示,故障过程如下。

1) T1 时刻:子模块取能电源故障,中控板发出子模块旁路开关闭合命令,子模块导通状态 SM_sta 为 0,表示子模块进入闭锁状态(上、下管 IGBT 关断),子模块可在电流大于 0 时通过上管二极管给电容器充电。

2) T1—T2 时段:旁路开关收到合闸指令动作,辅助触点动作反馈合闸成功,动、静触头尚未接触,此时电容器电压持续上升。

3) T2—T3 时段:旁路开关处于闭合状态,子模块上、下管 IGBT 均处于关断状态,此时子模块电容与主回路隔离,子模块电压保持不变。

4) T3—T4 时段:从波形看,子模块电压有逐步升高趋势,当桥臂电流大于 0 时,子模块电容器充电,电容器电压上升;桥臂电流小于 0 时,子模块电容器电压保持不变。可推断该子模块旁路开关实际未可靠合闸。子模块电压持续上升,T4 时刻子模块电压为 3294 V,达到 IGBT 最大承受电压,导致上、下管 IGBT 先后击穿,电容器通过上、下管直通放电,电压瞬间下降至 0。电容器和上、下管组成的放电回路直通短路电流较大,导致 IGBT 烧损开路,使系统电压加在旁路开关和上、下管两端,最终导致放电起火。

通过故障事件、录波情况和现场检查结果,分析判断本次故障的子模块 16 未报旁路开关拒动故障,可以推测是辅助触点反馈了合闸信号,导致阀控系统误判旁路开关已合闸。

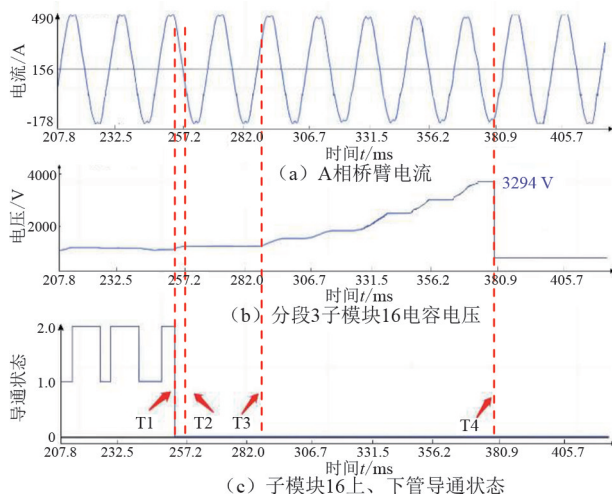


图 5 子模块 16 故障录波

2.4 旁路开关合闸试验

为了进一步查找旁路开关拒动原因,搭建了旁路开关合闸测试平台,模拟旁路开关电解储能电容器短路失效造成电压降低的情况。将现场返回的储能电容器完好的子模块旁路开关安装至子模块测试平台,通过旁路开关触发板为并联 $150 \mu\text{F}$ 干式储能电容器充电,充电至 400 V,触发旁路开关合闸,再逐步减小充电电压值,直至旁路开关合闸不成功;然后,记录此时储能充电电压值,同时观察旁路开关回报节点信号。若回报信号正常,继续减小充电电压值,直至旁路开关合闸失败同时回报信号消失,记录此时充电电压值。

试验记录如表 2 所示,当储能电容器电压下降至 30~91 V 之间,主触头不能可靠闭合,但是辅助接点会正常回报合闸信号,复现了现场故障现象,进一步验证了是电解电容器短路失效引起储能电容器电压降低,最终导致旁路开关拒动。分析原因为储能电容器电压低于 91 V 时,旁路开关线圈电流产生的合闸力较小,合闸运行过程中动磁铁合磁力逐渐减小直至负值,分闸弹簧力阻碍了动磁铁与永磁体吸合。

表 2 旁路开关合闸试验情况

序号	储能电容器电压/V	主触头合闸情况	辅助接点回报信号
1	200	合闸成功	显示
2	100	合闸成功	显示
3	92	合闸成功	显示
4	91	未合闸成功	显示
5	60	未合闸成功	显示
6	32	未合闸成功	显示
7	30	未合闸成功	未显示
8	28	未合闸成功	未显示

储能电容器电压下降至 91 V 时,旁路拒动时刻辅助接点回报信号如图 6 所示:旁路开关未能可靠合闸,但是微动开关已经动作到位,回报旁路开关合闸成功。分析原因为:旁路开关储能电容器失效过程会释放能量导致合闸电压降低,造成取能电源故障并触发旁路开关,但是储能电容器剩余能量无法保证旁路开关主触头可靠合闸,而此时的运动距离足以保证微动开关动作并回报合闸信号,使得中控板判定旁路开关已合闸。

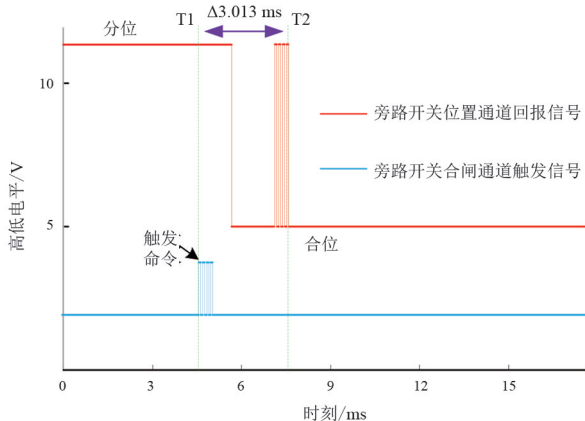


图 6 旁路开关拒动时刻辅助接点回报信号

2.5 故障原因分析

通过故障报文和试验分析,造成故障的原因是原电解电容器在失效过程中,电解液外溢导致正负极间形成放电通路,快速拉低取能电源 400 V 电压,导致上报取能电源故障,触发旁路开关。然而由于旁路开关储能电容器故障,导致储能电容器能量被释放,400 V 电源电压被拉低(低于主触头合闸最低合闸电压 92 V),电容器剩余能量不能满足旁路开关可靠闭合要求,导致旁路开关未合闸到位,而此时开关回报节点已变为高阻态($>100 \Omega$)并反馈给中控板,中控板误判定旁路开关已处于合闸位置,因此未上报旁路开关拒动故障,导致直流电容器持续充电超过 IGBT 耐受电压,造成上、下管先后被击穿放电起火,最终导致阀厅火灾报警跳闸,引起故障子模块水管漏水,相邻子模块受漏水影响相继旁路。

3 改进策略设计

3.1 辅助电压判据

考虑在运工程换流阀子模块未设计转折晶闸管,原设计结构已固定,新增转折晶闸管实施难度大,不具有经济性。故在不改动子模块结构设计情况下,新增软件判据策略,即在不变动中控板程序前

提下,修改阀控程序:在保留原阀控判定子模块旁路拒动的逻辑基础上,同时新增一个旁路开关拒动的辅助电压判据,在子模块旁路命令发出后持续监视子模块电压,若子模块出现过压,立即主动闭锁换流器。

设计原则为:增加一个旁路拒动的辅助判据,在原来没有子模块过压的条件下,当子模块旁路开关闭合后开始判断;如果阀控收到中控板的子模块过压标记置位且持续 6 ms 以上,则判定该子模块旁路开关拒动,阀控系统请求跳闸闭锁。

判据逻辑流程如图 7 所示,修改阀控系统分段核心板程序,增加辅助电压判据逻辑如下。

1) 启动条件:子模块旁路开关闭合位为 01(表示开关闭合),且过压标志位为 0,连续 2 个单帧无通信故障。

2) 判据逻辑:出现过压标志位有效且延续超过 6 ms,则核心板现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)将子模块直传上来的旁路开关拒动数据位置成 01(表示旁路拒动),上传核心板处理器,保持 5 ms 后复归。

3) 退出条件:若出现 2 个及以上单帧通信故障,结束判据。

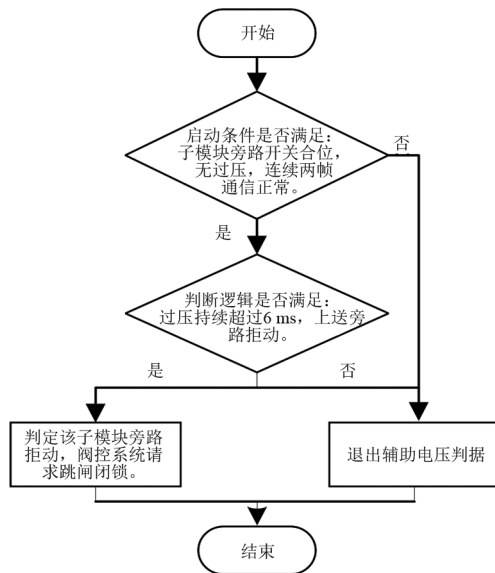


图 7 辅助电压判据逻辑

3.2 试验验证

为了进一步验证在运柔性直流换流阀增加旁路开关拒动的辅助电压判据的正确性和可靠性,搭建了测试系统,如图 8 所示。子模块故障模拟通过中控板或接口机箱实现,阀控监控后台显示所有状态、动作和故障事件信息,汇总调试窗口主要完成报文信号抓取、录波等功能。

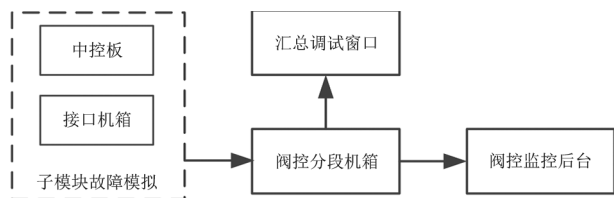


图 8 测试系统

3.2.1 验证改进设计策略不影响原旁路开关正常拒动逻辑

试验步骤为:

1) 运行至自主均压工况,模拟子模块旁路开关拒动故障,使用中控板或接口机箱认为模拟 SM 旁路开关拒动;

2) 运行至解锁状态,再次模拟子模块旁路拒动故障,使用中控板或接口机箱认为模拟子模块旁路开关拒动。

试验结果为:子模块旁路开关拒动发生 1 ms 后,阀控系统判定旁路开关拒动并申请跳闸,阀控监控后台无其他异常信号。

3.2.2 验证改进设计策略启动条件执行逻辑

试验步骤为:

1) 打开阀控分段核心板 FPGA 逻辑分析仪,准备抓取改进设计策略启动信号;

2) 使用中控板认为模拟子模块旁路开关闭合,无过压标志且无通信故障。

试验结果为:逻辑分析仪中改进设计策略启动逻辑正确动作,阀控监控后台无其他异常信号。

3.2.3 验证改进设计策略动作逻辑正确性

试验步骤为:

1) 使用中控板或接口机箱模拟子模块旁路开关闭合状态,无过压标志位且无通信故障;

2) 子模块旁路后使用中控板模拟子模块出现过压标志位,且延续超过 6 ms;

3) 在主动均压和解锁 2 种工况分别进行试验。

试验结果为:主动均压和解锁 2 种工况分段机箱辅助电压判据均正确动作,阀控监控后台报旁路开关拒动动作并执行跳闸闭锁,汇总调试窗口正确抓取旁路开关拒动跳闸状态字。进一步开展原正常旁路逻辑试验和新增辅助电压判据逻辑启动条件、退出条件等试验,试验结果均正确。

3.2.4 验证子模块过压旁路不会引起改进设计策略误动

试验步骤为:

1) 运行至自主均压工况;

2) 使用中控板或接口机箱模拟子模块过压故障和子模块旁路开关闭合,两者同时报出或子模块过压故障先报出。

试验结果为:阀控监控后台报“子模块过压故障、旁路开关闭合”,无旁路开关拒动故障产生,表明改进设计策略未误动。

经过 4 项试验验证,结果表明所提改进设计策略能够可靠动作,不影响原旁路开关正常拒动逻辑,且子模块过压旁路也不会引起改进设计策略误动。

4 结 论

上面首先介绍了取能电源和旁路开关工作原理以及旁路开关动作过程力学分析,从现场检查、录波分析和旁路开关合闸试验 3 个方面深入分析了某柔性直流换流站典型旁路开关拒动案例的故障原因;并进一步针对无转折晶闸管子模块设计的在运工程,提出了基于辅助电压判据的柔性直流换流阀子模块旁路拒动策略,在不改变在运子模块结构情况下,有效解决了在运工程子模块旁路开关拒动时导致子模块炸裂起火、换流阀闭锁的问题。通过搭建测试系统开展了不影响拒动、启动条件、动作逻辑、不影响误动 4 项试验,验证了所提改进设计策略的可靠性和有效性。

参考文献

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
- [2] 刘泽洪,郭贤珊.含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J].电网技术,2020,44(9):3595-3603.
- [3] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
- [4] 陈堃,宋宇,代维谦,等.高压直流输电技术发展及其工程应用[J].湖北电力,2018,42(4):1-6.
- [5] 高强,林焯,黄立超,等.舟山多端柔性直流输电工程综述[J].电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.
- [6] 潘尔生,乐波,梅念,等.±420 kV 中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计[J].电力系统自动化,2021,45(5):175-183.
- [7] 徐文哲,张哲任,徐政.适用于大规模纯新能源发电基地送出的混合式直流输电系统[J].中国电力,2023,56(4):17-27.
- [8] 吴康,任丽霜,李大伟.柔性直流输电技术的现状与展

望[J].电工技术,2023(13):115-119.

- [9] 张隆恩,韩鸿凌,朱帅,等.一起高压大容量柔性直流输电换流器子模块故障分析[J].湖北电力,2022,46(4):75-81.
- [10] 胡雨龙,周竞宇,任成林,等.±800 kV 柔性换流阀子模块旁路保护方案[J].电力电子技术,2022,56(11):30-32.
- [11] 彭雨田,宋宇,陈海健,等.柔性直流背靠背换流站子模块炸裂故障分析[J].湖北电力,2022,46(3):66-72.
- [12] 谢保鸡,张宇.鲁西背靠背柔性直流广西侧功率模块过压跳闸分析研究[J].电工技术,2019(24):96-98.
- [13] 王振,肖凯,谢文杰,等.过压击穿晶闸管的柔直“黑模块”解决方案[J].电力电子技术,2023,57(2):133-136.
- [14] 徐攀腾,朱博,喻文翔,等.特高压柔性直流 MMC 故障子模块的高可靠旁路方法[J].电工技术,2022(8):119-124.
- [15] 敬华兵,年晓红,龚芬.MMC 子模块元件短路故障机理及其新型保护策略[J].电工技术学报,2015,30(3):21-27.
- [16] 段军,谢晔源,朱铭炼,等.模块化多电平换流阀子模块旁路方案设计[J].电力工程技术,2020,39(4):207-213.

- [17] SHAO S, WHEELER P W, CLARE J C, et al. Fault detection for modular multilevel converters based on sliding mode observer[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(11):4867-4872.
- [18] 姜斌,龚雁峰,李岩.模块化多电平换流器子模块短路故障分析、检测与定位方法[J].南方电网技术,2019,13(3):73-78.
- [19] 陈小平,王何飞,罗远峰,等.柔性直流输电换流阀子模块现场测试装置设计[J].电力电子技术,2022,56(3):27-29.
- [20] 刘泽洪,郭贤珊.高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用[J].电网技术,2020,44(9):3604-3613.

作者简介:

张国华(1979),男,博士,高级工程师,从事直流输电技术研究;

刘卓琨(1992),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电技术研究;

李军(1987),男,高级工程师,从事特高压直流输电技术研究;

郑维高(1987),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电技术研究。(收稿日期:2023-10-27)

(上接第64页)

- [8] CASTELLO P, LAURANO C, MUSCAS C, et al. Harmonic synchrophasors measurement algorithms with embedded compensation of voltage transformer frequency response[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70:9001310.
- [9] 雷可君,李明皓,汪旭明,等.基于 Rife-Vincent 自乘-卷积窗三谱线插值的电力谐波参数估计[J].江苏大学学报(自然科学版),2022,43(5):547-553.
- [10] 谭保华,张文字,黄程旭,等.基于全相位 FFT 三谱线校正的电网谐波与间谐波检测算法[J].华中师范大学学报(自然科学版),2021,55(6):1044-1050.
- [11] 赵晓东.基于加窗插值 apFFT 的电力谐波和间谐波检测算法研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [12] JIN T, ZHANG W F. A novel interpolated DFT synchrophasor estimation algorithm with an optimized combined cosine self-convolution window [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70:9000610.
- [13] CHEN Q M, YANG X, WANG X M, et al. Complex harmonic detection based on MSLD self-multiplication-convolution window [C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 14-16, 2023, Tianjin, China. IEEE, 2023:1453-1457.
- [14] 吴静,赵伟.一种用于分析电网谐波的多谱线插值算

法[J].中国电机工程学报,2006,26(8):55-60.

- [15] 赵帅旗,肖辉,李文俊,等.基于多谱线插值法和复调制细化法的电力系统谐波分析[J].电测与仪表,2019,56(18):10-15.
- [16] 林申力.频率动态过程中基于 FFT 的电力谐波测量研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [17] 陈至豪,王立德,王冲,等.基于组合余弦优化窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J].电网技术,2020,44(3):1105-1113.

作者简介:

申杰(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信与电力计量;

李方硕(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信与电力计量;

陈伯朗(1975),男,高级工程师,从事电力通信与电力计量研究;

屈鸣(1979),男,硕士,高级工程师,从事电力通信与电力计量研究;

王韬(1982),男,高级工程师,从事采集技术、智能计量设备检测技术研究;

李锐超(1990),男,硕士,工程师,从事电气仪表和电能计量及其检测技术研究;

李林欢(1991),女,硕士,工程师,从事电力通信技术应用方面的研究。(收稿日期:2023-10-23)