

柔性直流输电工程系统调试技术应用、分析与改进

胡文旺,唐志军,林国栋,石吉银,邹焕雄

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院,福建 福州 350007)

摘要: 系统带电调试试验是确保柔性直流输电工程在实际应用中安全稳定运行的一个关键环节。为了避免现场有源初次启动过程中因故障、阀组触发相序错误等问题导致换流阀设备的损坏,结合厦门真双极柔性直流输电工程,提出了初次完整启动前开展换流阀无源逆变试验的安全控制策略,很好地满足了设备安全性的要求。对实验室系统联调及现场试验过程中发现的主要问题进行了分析总结并提出了改进措施,满足了系统安全稳定运行的要求。

关键词: 柔性直流输电; 换流变压器; 换流阀; 无源逆变; 解锁

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.030

0 引言

随着全控型电力电子器件的发展,基于电压源换流器和脉宽调制控制技术的电压源型高压直流输电技术得以实现,该项技术在中国被统称为柔性直流输电(Flexible HVDC)^[1-2]。作为新一代直流输电技术,与传统直流输电技术相比,其具有有功功率和无功功率独立控制、向无源网络供电、不会出现换相失败等诸多优势,并在风力发电并网、分布式发电并网、异步联网、孤岛供电、城市直流配电网构筑等领域得到了广泛应用^[2-9]。

自 1997 年 ABB 公司首次实现了世界上首个柔性直流输电工程——Hellsjon 示范工程投入运行以来,柔性直流输电技术的工程化应用在世界范围内呈现了快速发展趋势^[3],仅在“十二五”期间中国便成功投运 5 个柔性直流工程,分别为 2011 年上海南汇柔性直流输电示范工程及中海油两电平柔性直流输电系统、2013 年南澳三端柔性直流输电工程、2014 年浙江舟山多端柔性直流示范工程以及 2015 年底投运的厦门 ±320 kV 柔性直流输电科技示范工程。此外,2015 年 6 月开工的云南鲁西背靠背直流异步联网工程也于 2016 年 6 月 30 日投入运行。

目前关于实际柔性直流输电工程的研究主要集中在工程方案设计^[10-11]、工程运行方式和控制模式介绍^[12-13]、控制系统接口设计^[1,14]、控制系统性能验证^[15-16]等方面,对于柔性直流输电工程系统带电调试中关乎换流站设备安全的重要试验安全策略却鲜有文献进行介绍和研究,对于系统调试过程中出现的主要问题也未见相关文献进行分析总结并提出改

进措施,未能为后续工程的调试提供参考借鉴和有益指导。

系统带电调试试验是保证柔性直流输电工程安全稳定运行的最关键环节,安全控制策略是否正确完备直接关乎设备的安全问题。为了验证阀组触发相序的正确性,避免换流阀首次有源解锁出现大电流损坏换流阀,本文结合厦门柔性直流输电真双极拓扑结构,提出了系统初次启动前开展换流阀无源逆变试验的安全控制策略以确保极控制系统、阀控制系统以及换流阀之间工作的正确性,最后对实验室系统联调和现场试验中遇到的主要问题进行了分析总结并提出了相应的改进措施,确保了系统的安全稳定运行。所提安全控制策略及调试问题的改进措施为柔性直流输电现场带电调试提供了参考借鉴和有力技术支撑。

1 厦门真双极柔性直流系统概况

厦门柔性直流输电科技示范工程是世界上第一个采用真双极接线方案,输送电压和容量最大的柔性直流输电工程,其直流输送容量为 1 000 MW,直流电压为 ±320 kV,直流电流为 1 000 A,该工程由浦园换流站、鹭岛换流站和直流线路 3 个部分组成,直流线路全长 10.7 km,全线采用电缆,每站新建 2 组容量为 530 MV·A、额定变比为 230 kV/166.57 kV 的换流变压器,一端系统(鹭岛站)的一次系统接线如图 1 所示,其一次设备除直流电缆、换流变压器外还包括交流进线电缆、充电电阻、桥臂电抗器、换流阀、平波电抗器以及相关的隔离刀闸、交直流断路器。

真双极接线方案的优势在于:2 个极是独立调节和工作的,当一极发生故障时,只需停运故障极,另一极仍可输送至少 50% 容量(约为 500 MW)的电力,工程的投运有效增强了厦门电网结构,有力提高了供电可靠性和稳定运行水平,为厦门经济社会的发

收稿日期:2016-07-07;修回日期:2017-08-08

基金项目:国家电网公司科技项目(高压大容量柔性直流输电运行与检修策略研究)(52130415000U)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Study on Operation and Maintenance Strategy of Large-capacity Flexible HVDC)(52130415000U)

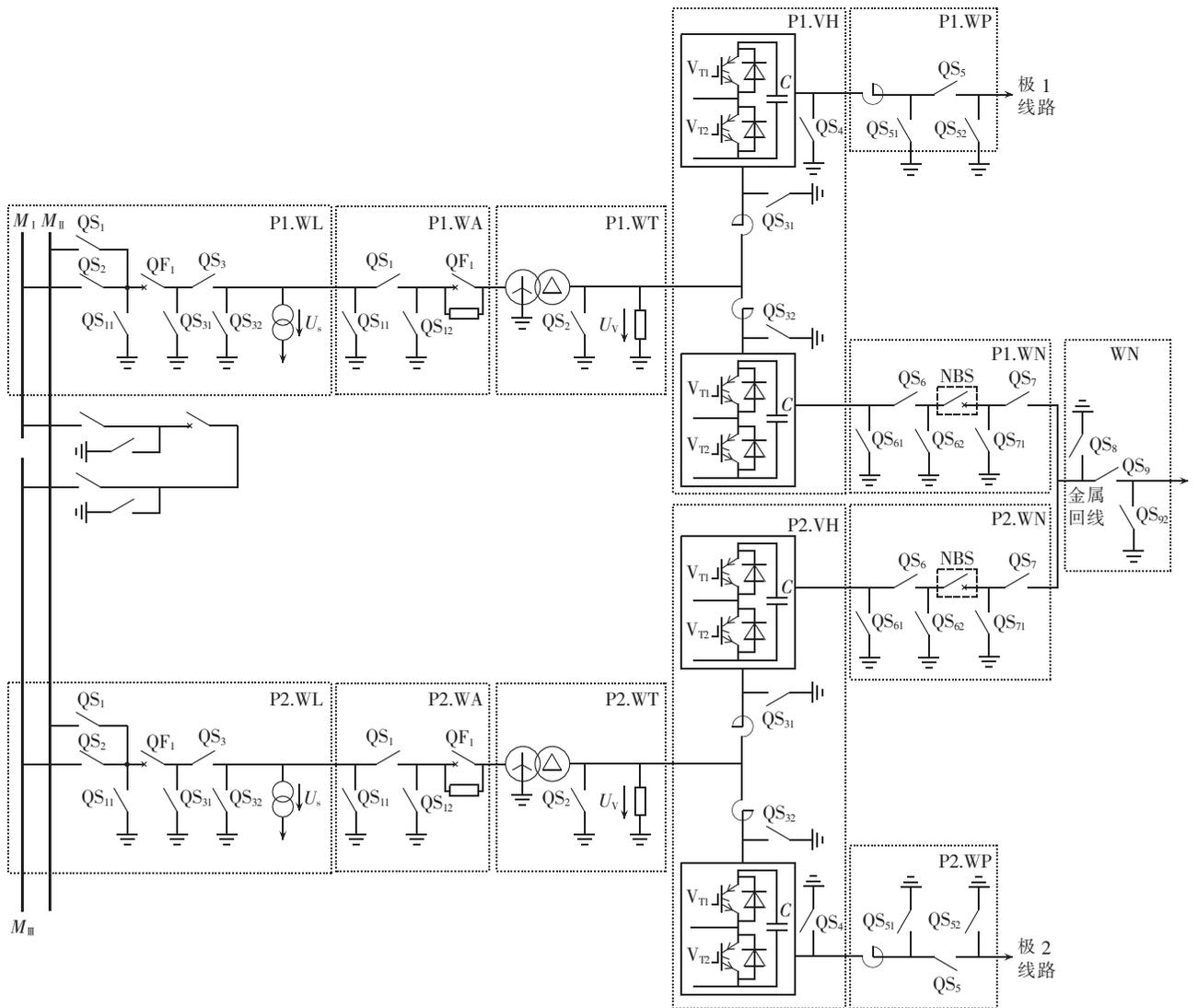


图 1 鹭岛换流站一次系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of primary system of Ludao converter station

展提供坚强可靠的电力保障^[17]。

2 系统启动安全控制策略

一、二次电气设备安装调试工作完成且验收合格具备投运条件,征得启委会批准后可以启动系统带电调试。启动试验前需要根据可能出现的预想故障,如设备故障、接线错误、阀组触发相序错误等,制定系统启动的安全控制策略,以避免过电流损坏换流站设备。

换流阀是柔性直流输电工程的核心设备,其价值昂贵,约占换流站成套设备总价的 22%~25%,因此试验过程中必须确保换流阀设备的安全。极控制系统、阀控制系统及换流阀之间若是不能正确工作而出现阀组触发相序错误或是控制系统延时未得到完全补偿,在换流阀首次有源解锁时就可能出现大电流而损坏换流阀,因此有必要在系统初次完整启动前开展换流阀无源逆变试验,这样既可以验证阀组

触发相序的正确性,也可以根据试验结果对控制系统延时进行补偿。

以鹭岛站极 1 为例,图 2 为试验示意图。极控制系统执行无源逆变试验需要控制电压 U_s ,由于对应电压互感器安装在交流进线开关 WL.QF₁ 后端,在开关断开后极控制系统失去控制电压,未能进行试验。厦门柔性直流输电工程为真双极结构,2 个极控制系统控制电压为同源电压,因此可以在未试验极极隔离状态下合上对应交流进线开关使得该极电压互感器带电,并通过电缆将该极控制系统二次电压 U_s 作为试验极极控制系统的控制电压。

无源逆变试验流程如图 3 所示,其中设定解锁时间 200 ms 能够获得 10 个周期质量较好的逆变波形,足以用于核相。为了延迟直流低电压保护 I 段动作,需要将该保护动作时间定值改为大于 200 ms。此外,Db_{ack_en} 为起保护阀子模块作用的信号,为了避免大量的子模块旁路,需要设定控制系统在交

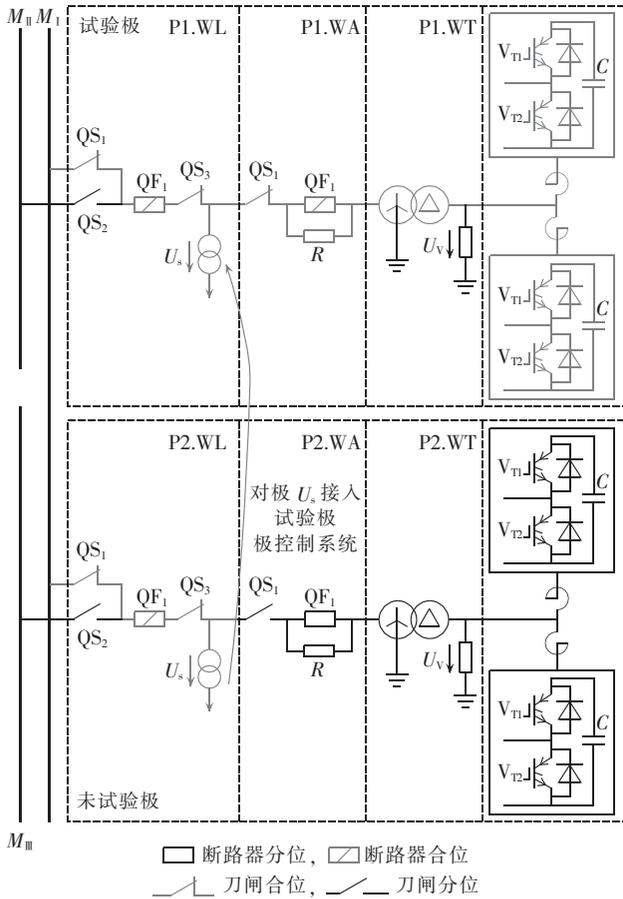


图 2 无源逆变试验主接线

Fig.2 Main wiring of passive inverter test

流进线开关断开 1 s 后撤销该命令。

不控充电状态下,对阀侧电压 U_v 进行核相,结果如表 1 所示。

鹭岛换流站极 1 无源逆变试验波形如图 4 所示。

图 4 中以网侧电压 U_s 的 A 相为基准,对无源逆变后阀侧电压 U_v 进行核相,测试超前相,结果如表 2 所示。

表 2 数据结果表明逆变后阀侧电压 U_v 与网侧电压 U_s 的相位关系满足换流变接线组别为 YD7 的相角关系,且为正序,这一结果证明了极控制系统、阀控制系统与换流阀之间工作的正确性,确保了阀组触发相序的正确性和换流阀的安全。

比较表 2 和表 1 的数据可以发现,无源逆变下阀侧电压 U_v 与不控充电方式下阀侧电压 U_v 对应相角差存在差异,这主要是由控制系统在采集、锁相、生成参考波等环节存在延时造成的,因此可以根据 2 种方式下的相角差完成控制系统延时的测试及补偿,具体方法如下:

a. 不控充电方式下阀侧电压 U_v 与网侧电压 U_s A 相相角时间差定义为 Δt_1 ;

b. 无源逆变方式下阀侧电压 U_v 与网侧电压 U_s A 相相角时间差定义为 Δt_2 ;

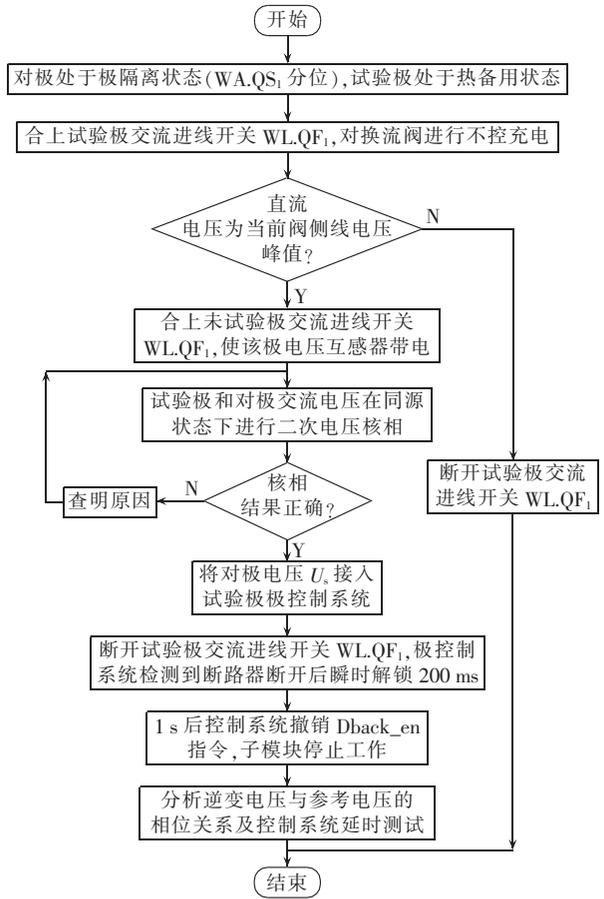


图 3 无源逆变试验流程图

Fig.3 Flowchart of passive inverter test

表 1 换流阀不控充电状态下阀侧电压核相结果

Table 1 Checking phase result of valve-side voltage,converter valves in charging state without control

相别	$\Delta t / \text{ms}$	U_v 相位/ $^\circ$
A	8.16	146.9
B	1.48	26.6
C	14.87	267.7

注:换流变压器接线组别为 YD7,阀侧电压 U_v 相位以网侧电压 U_s A 相相位为基准,测试超前相,后同。

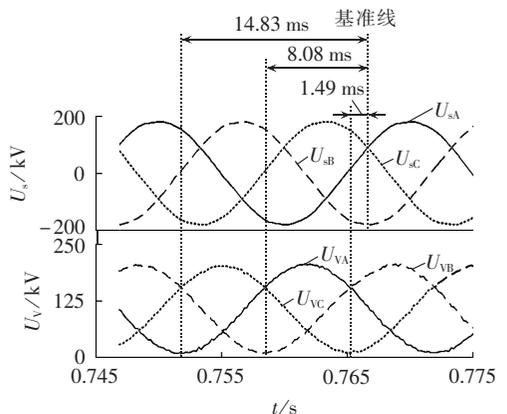


图 4 无源逆变试验电压波形

Fig.4 Voltage waveforms of passive inverter test

表 2 换流阀无源逆变阀侧电压核相结果

Table 2 Checking phase result of valve-side voltage, with passive inverter test in converter valves

相别	$\Delta t / \text{ms}$	U_V 相位/ $^\circ$
A	8.08	145.4
B	1.49	26.8
C	14.83	266.9

c. 计算 $\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_2$, 根据 Δt 的数值在控制系统中通过移动输出参考波的相角实现控制系统的延时补偿, 使得 $\Delta t = 0$ 。

阀组正确触发相序及控制系统延时的补偿避免了在有源状态下首次解锁出现大电流而损坏换流阀的情况。

3 系统调试主要问题分析及改进措施

系统调试分 2 个阶段进行, 分别为实验室联调和现场调试, 前者是在实验室基于 RTDS 或者 RTLAB 等实时仿真平台完成一次系统的建模, 并通过协议转换装置及功率放大器转换设备完成与控制保护系统之间的接口, 该阶段的调试可以模拟现场因安全问题所不能开展的试验(如不同位置、不同类型的短路故障), 实现了控制保护系统在故障期间控制保护功能的验证; 后者是在现场结合实际一次设备开展的调试工作, 实地检验控制保护系统是否满足现场的安全稳定运行要求、是否满足设计规范要求, 该阶段的试验可以完成实验室无法开展的试验(如阀冷系统冗余切换、检验大负荷试验条件下的子模块工作稳定性等)。2 个阶段的试验既完成了互相校验也实现了互补。现对两阶段系统调试中遇到的主要问题及其改进方法进行总结, 为类似工程中的类似问题提供参考借鉴。

3.1 实验室联调

3.1.1 功率振荡

a. 问题描述。

单站静止同步补偿器(STATCOM)运行方式下, 系统解锁后无功功率大约 2~3 s 会发生一次振荡, 振幅约为 8 Mvar。

b. 原因分析。

极控制系统控制周期为 $100 \mu\text{s}$, 阀控制系统以 $125 \mu\text{s}$ 的周期执行一次整体控制指令, 包括子模块电容电压排序、环流控制、子模块投切等。两者控制周期的不一致导致存在丢弃指令的现象, 如图 5 所示, 假设 $0 \mu\text{s}$ 极控制系统和阀控制系统处于同步阶段, 随着时间的增长, 阀控制系统均能接收并处理前 $300 \mu\text{s}$ (含 $300 \mu\text{s}$) 的极控制系统指令, 而在 $500 \mu\text{s}$ 时刻阀控制系统还来不及处理极控制系统 $400 \mu\text{s}$ 发送的指令即收到极控制系统 $500 \mu\text{s}$ 发送的指令,

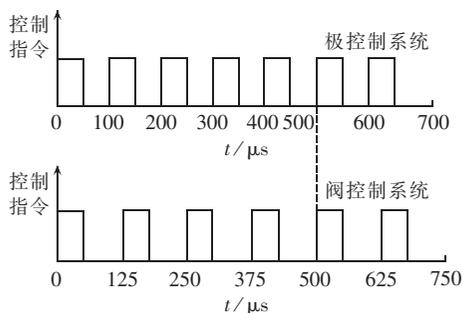


图 5 控制系统执行周期差异示意图

Fig.5 Schematic diagram of execution cycle difference of control systems

这种情况下阀控制系统在程序设计上只能处理最新指令而丢弃前一个指令。

实际上阀控制系统运算板卡硬件本身存在固有的晶振温漂现象, 这导致每个周期的步长在 ns 级别上产生微小的变化。经过一定数量周期, 晶振总时间累积达到一个极控制系统的步长后, 阀控制系统丢掉的数据发生改变, 迁移到下一个周期, 反映到无功功率波形上为振荡现象。

若振荡的周期为 2 s, 则在每个振荡周期内, 阀控制系统计算了 $2 \text{ s} / 125 \mu\text{s} = 16000$ 次, 16000 次晶振累积到一个极控制系统控制步长的时间。实际上不同装置的晶振温漂现象会有所差异, 其表现出的无功功率振荡周期也是变化的。

c. 解决方案。

理论上可以通过修改极控制系统或者阀控制系统的执行周期完成同步, 但因涉及到诸多装置接口及硬件的修改, 同时时钟晶振的差异也不能消除, 因此该方案在执行上不可行。经过论证, 每 $500 \mu\text{s}$ 中固定丢弃 $400 \mu\text{s}$ 时刻的指令对功率波动并没有太大影响, 于是本文提出了一种定期的外部中断控制策略, 通过修改阀控制系统程序, 每 $500 \mu\text{s}$ 运算周期与极控制系统同步一次, 采用极控制系统下发指令来开始阀控制系统新的执行周期, 从而消除晶振温漂现象导致的累积误差, 通过试验论证, 无功功率振荡现象消失。

3.1.2 故障极隔离方案

(1) 问题描述。

系统处于双极金属回线运行方式, 额定功率运行水平, 在浦园换流站极 1 设置阀侧单相接地故障, 如图 6 所示, 故障发生后极 1 直流保护动作, 闭锁换流阀, 600 ms 后极 2 双极中性母线差动保护动作, 极 2 闭锁停运。

(2) 解决方案。

厦门柔性直流输电工程采用真双极拓扑结构, 为了充分发挥该接线方式的优越性, 当单极发生故障时, 另外一极在允许的条件下尽量保持运行, 因此需要将故障停运极与运行极进行电气隔离。结合直流

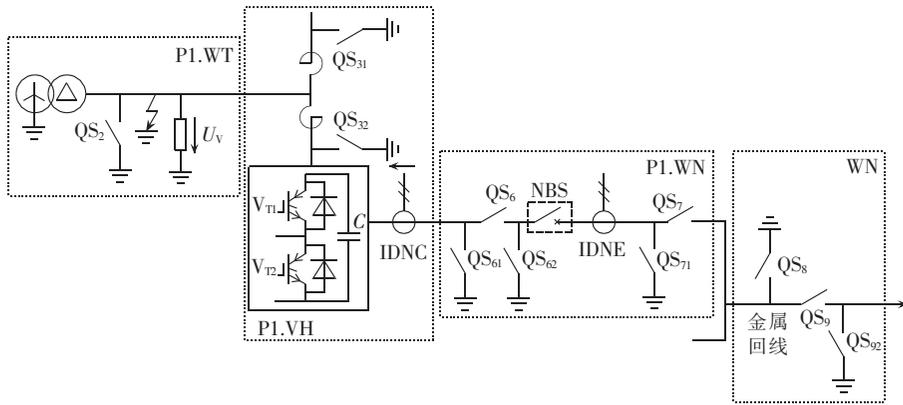


图 6 故障示意图

Fig.6 Schematic diagram of fault

断路器 NBS 1800 A 的开断能力并且考虑一定的裕度,经多方论证,制定了故障停运极的隔离方案。

a. 保护或极控制系统因故障动作,极控制系统闭锁换流阀,三取二装置和极控制系统均向交流进线开关发跳闸命令。

b. 极控制系统检测到交流进线开关处于分位情况下,判断 IDNE 与 IDNC 电流均小于 1000 A,延时 20 ms 跳开本极 WN.NBS 开关。

c. 极控制系统判断 WN.NBS 处于分位且 IDNE 与 IDNC 电流小于 20 A,拉开隔刀 WN.QS₆、WN.QS₇ 完成“中性母线隔离”,使故障极与正常运行的极隔离。

d. 放电完毕后,由运行人员执行顺控隔离逻辑,使系统转入隔离状态。

3.2 现场调试

3.2.1 阀控制系统双主机错误

(1) 控制系统配置及接口。

极控制系统主机采用完全冗余的双重化配置,通过光纤连接完成系统间的通信,实现运行状态的实时跟踪以及故障状态下主从系统间的自动切换。阀控制电流主机配置及通信方式与极控制主机一样。

极控制系统和阀控制系统通过 3 根上下行光纤直连,实现参考电压、值班信号、解闭锁信号、请求切换、跳闸信号等交互信息的传输功能,这些功能直接决定了柔性直流输电系统的动态性能。

(2) 问题描述。

开展“极控制系统 A、B 套间系统通信故障”试验,其具体步骤如下:

a. 启动直流系统,系统稳定运行;

b. 拔除极控制系统 A 套至极控制系统 B 套的一路光纤;

c. 再拔除极控制系统 A 套至极控制系统 B 套的另一路光纤,2 套系统均处于值班状态;

d. 恢复极控制系统 A、B 套间通信光纤。

试验过程中,拔除 A、B 套系统间 2 路通信光纤后,系统运行平稳,没有扰动,而在恢复通信光纤时,

直流系统出现较大的扰动,试验波形如图 7 所示。

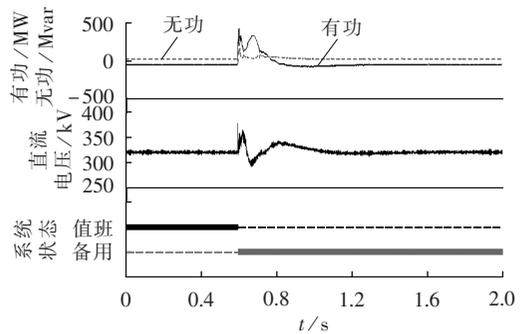


图 7 系统间通信恢复时的试验波形

Fig.7 Test waveforms when system communication recovers

(3) 原因分析。

系统间通信故障情况下控制系统正确工作状态分析如下。

a. 拔光纤前,极控制系统 A 套为值班系统,B 套为备用系统。

b. 拔除光纤后,失去了系统间的通信,极控制系统 A、B 套均认为自己为单系统运行,均是独立发出参考波,A、B 系统均处于值班状态(主系统),因此阀控制电流机箱 A、B 系统均收到主动信号,判别之后认定 B 系统为后主,阀控制电流机箱 B 转为值班出口。

c. 恢复极控制系统 A、B 套间光纤通信之后,因 B 系统后为主,因此极控制系统 B 套为值班系统,阀控制电流机箱仍执行 B 系统。理论上,在系统间失去通信后,建立双主过程中控制系统的切换会带来直流扰动,而在恢复通信双主消失时,由于没有发生系统切换,因此不会发生明显扰动。

查看阀控制系统接口板 FPGA 程序,发现存在如下逻辑缺陷:

a. 当出现双主时,接口板的主从执行“先主听后主”的逻辑,将后为主系统认定为新主;

b. 当出现双主时,程序会反复认为此时要执行“先主听后主”的切换;

c. 主从逻辑切换的周期为 1/40 MHz,偶数次时

返回原主,类似地未切换系统;

d. 阀控制系统的执行周期为 $125\ \mu\text{s}$, 为 $1/80\ \text{MHz}$ 的偶数倍, 故向换流阀下发的命令仍然为原值班系统的命令, 从外特性上表现为未进行系统切换。

不考虑本次试验的异常情况下, 系统正常工作的逻辑如下: 极控制 A、B 系统间通信断开时, B 系统变为主, 阀控制 B 系统遵循“后主为主”的原则, 升级为值班系统, 此时 A 系统变成备用系统; 由于极控制 A 系统仍认定自身状态为值班系统, 继续采集网侧电压和网侧电流, 并通过生成参考波达到功率指令值, 即把网侧电流 I_d 、 I_q 控制到指令值; 但实际控制系统为 B 系统, 网侧电流 I_d 、 I_q 是按照 B 系统指令跟随的, 而 A 系统并没有形成闭环控制, 在内环电流控制中, I_d 、 I_q 一直存在 ΔI_d 、 ΔI_q , 在积分环节上持续累加, 使生成的调制波不断地畸变; 当极控制 A、B 系统间通信恢复后, A 系统退为备用系统, 跟随 B 系统的调制波刷新调制波, 使调制波恢复正常。

然而在此次试验的异常情况下, 极控制 A、B 系统间通信断开后, B 系统上升为值班系统, 由于阀控制系统接口板 FPGA 程序逻辑的缺陷, 实际上执行控制命令的还是 A 系统, 未发生系统切换, 而极控制 B 系统没有形成闭环控制, 导致 B 系统产生的参考波在积分环节中持续累积, 参考波畸变, 当系统间通信恢复后, 极控制 B 系统升为值班系统, 阀控制 B 系统执行错误的调制波, 出现系统的扰动。

(4) 解决方案。

修改阀控制系统接口板程序: 当主从命令发生变化时才执行主从状态判定, 保证出现双主时, 系统只执行一次“先主听后主”的逻辑切换。

按照上述方案升级程序后, 重新“模拟极控制系统间通信故障”试验, 通信恢复时功率和电压未出现扰动, 图 8 所示试验波形表明了该问题得到解决。

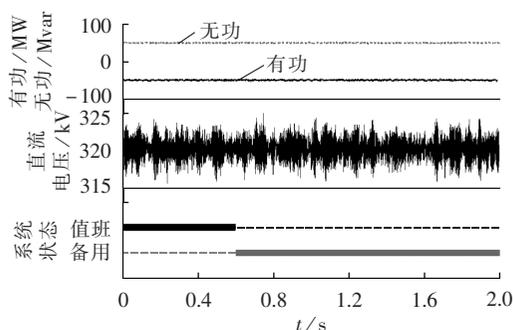


图 8 升级后系统间通信恢复时波形

Fig.8 Waveforms when system communication recovers after update

3.2.2 撤 Dback_en 时延导致阀控制系统误报 Trip

(1) 问题描述。

试验结束执行断交流进线开关时, 阀控制主系

统正常执行极控制值班系统下发的撤 Dback_en 信号, 换流阀进入自然放电模式而停运, 但阀控制从系统有时会向极控制系统上报 Trip 请求, 误导运行人员认为换流阀出现故障。上报后台的 SOE 报文为: 17:02:42.766, WL.QF₁(231)断开; 17:02:42.781 阀控系统 VBC 请求跳闸出现。

查看直流故障录波和阀基监视系统, 发现主、从系统撤 Dback_en 时间分别为 564 ms、582 ms, 主系统早于从系统。

(2) 原因分析。

a. 2 套极控制系统为异步系统。

极控制 A、B 系统为异步运行, 值班系统和非值班系统按照各自的周期运行, 没有进行同步处理。

极控制系统检测交流进线开关位置的运行周期约为 20 ms, 因此交流进线开关跳开后, 2 套系统检测到辅助节点位置的时间差有可能相差 20 ms, 从而导致 2 套阀控系统接收到撤 Dback_en 命令时间不一致。

b. Dback_en 作用。

Dback_en 信号的状态与交流进线开关的分合息息相关: 交流进线开关合位对应 Dback_en=1, 分位对应 Dback_en=0。当 Dback_en=1 时, 换流阀判断自身故障, 并向阀控系统回报信息, 同时阀控系统也检测换流阀故障状态; 当 Dback_en=0 时, 换流阀既不检测自身状态, 也不向阀控系统回报信息, 阀控系统也不检测换流阀故障状态。

换流阀接收的 Dback_en 命令由阀控制主系统下发, 即极控制值班系统下发。

c. 2 套极控制系统向对应阀控系统下发撤 Dback_en 时间不一致, 有可能导致阀控制从系统上报 Trip 请求: 当值班系统检测到交流进线开关断开的时间滞后时, 阀控制从系统先得到 Dback_en=0 的信号而不检测换流阀故障状态; 当值班系统检测到交流进线开关断开的时间超前时, 阀控制主系统先行撤 Dback_en, 换流阀不向阀控系统回报信息, 但此时阀控制从系统 Dback_en=1, 依然检测换流阀与阀控系统间的通信状态, 连判后 (1 ms) 则认为换流阀通信故障而旁路子模块, 由于极控制对应一个阀厅的换流阀, 故阀控制从系统在一个周期内检测到全部换流阀故障, 认为旁路数过多而申请 Trip。

(3) 解决方案。

由于极控制系统检测交流进线开关位置的运行周期最快只能到 12 ms 级, 无法满足阀控系统运行周期要求, 因此, 需要在阀控制系统上进行逻辑修改, 解决方案如下:

a. 阀控制电流机箱的 A、B 系统间有信息交互, 主系统撤 Dback_en 的信号告知从系统;

b. 当极控制从系统撤 Dback_en 滞后时, 阀控制从系统跟随阀控主系统撤 Dback_en 的时间;

c. 当极控制从系统撤 Dback_en 超前时, 阀控制从系统执行本身接收到的 Dback_en=0。

程序升级后主从系统在撤 Dback_en 过程中系统误报 Trip 请求信号未再出现。

4 结语

系统带电调试试验是保证柔性直流输电工程正常投入运行的最关键环节, 目前鲜有文献对系统带电调试试验过程中的关键技术环节和遇到的主要问题进行研究和介绍, 不利于技术的推广。

本文结合厦门真双极柔性直流输电示范工程, 为避免系统启动初期可能出现的大电流对换流站设备造成损坏, 提出了在初次完整启动前开展换流阀无源逆变试验的安全控制策略, 并在现场得到成功应用, 确保了设备的安全性。此外还对实验室联调试验和现场试验过程中遇到的主要问题进行了分析总结并提出了改进措施, 确保了系统的安全稳定运行。所提安全控制策略及问题的改进措施为柔性直流输电现场带电调试提供了参考借鉴和有力技术支撑。

参考文献:

- [1] 涂小刚, 罗海云, 程晓绚, 等. 多端柔性直流输电工程控保系统接口设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 124-128.
TU Xiaogang, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Control and protection system interface design for multi-terminal HVDC flexible project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 124-128.
- [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] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [4] MITRA P, ZHANG L D, LENNART H. Offshore wind integration to a weak grid by VSC-HVDC links using power-synchronization control: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 453-461.
- [5] 王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3351-3360.
WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3351-3360.
- [6] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 4-13.
- [7] 文安, 邓旭, 魏承志, 等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 99-106.
WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 99-106.
- [8] 马为民, 吴方劼, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [9] 管敏渊, 徐政. MMC 型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 1-5.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 1-5.
- [10] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [11] 蒋晓娟, 姜芸, 尹毅, 等. 上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1132-1139.
JIANG Xiaojuan, JIANG Yun, YIN Yi, et al. A demonstration project of flexible DC power transmission in Shanghai Nanhui wind power station[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1132-1139.
- [12] 赵岩, 郑斌毅, 贺之渊. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 6-10.
ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 6-10.
- [13] 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.
GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.
- [14] 宋平岗, 李云丰, 王立娜, 等. 模块化多电平换流器效率优化控制器设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2730-2736.
SONG Pinggang, LI Yunfeng, WANG Lina, et al. Efficiency optimized controller designing for modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2730-2736.
- [15] 何大清, 蔡旭. 模块化多电平变流器的限幅控制和混合调制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 63-66.
HE Daqing, CAI Xu. Limitation control and hybrid modulation of modularized multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 63-66.
- [16] 魏伟, 许树楷, 李岩, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 73-77.
WEI Wei, XU Shukai, LI Yan, et al. The system commissioning of Nanao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 73-77.
- [17] 严有祥, 方晓临, 张伟刚, 等. 厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1147-1153.
YAN Youxiang, FANG Xiaolin, ZHANG Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen ±320 kV flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153.

XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.

作者简介:

陈福锋(1979—),男,江苏宜兴人,高级工程师,硕士,主要从事继电保护及智能变电站等方面的研究开发工作;

俞春林(1978—),男,江苏南通人,工程师,主要从事机械结构及产品工艺等方面的研究与开发工作;



陈福锋

张尧(1984—),男,陕西商洛人,工程师,硕士,主要从事继电保护及智能变电站等方面的研究与开发工作;

李玉平(1978—),男,湖南郴州人,工程师,主要从事继电保护及智能变电站等相关方面的研究与开发工作;

董贝(1982—),男,陕西宝鸡人,工程师,硕士,主要从事通用平台技术及智能变电站运维等方面的研究与开发工作。

Research on integrated solution of on-site substation relay protection

CHEN Fufeng^{1,2}, YU Chunlin^{1,2}, ZHANG Yao^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, DONG Bei^{1,2}, CHEN Qi^{1,2},

XUE Mingjun^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}, CHEN Xinzhi^{1,2}, ZHAO Qian^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China;

2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: The development of relay protection technology for intelligent substation in the past ten years is reviewed, the overall configuration of the on-site substation relay protection is introduced, including the on-site implementation technology of transmission line protection, bus-bar protection, main transformer protection, substation area protection and other bay-level devices. Key problems of on-site relay protection such as climate environment adaptability, electromagnetic environment adaptability, secondary circuit reliability, and field installation of cross-cell relay protection devices are introduced, and the corresponding countermeasures are proposed. Considering the particularity of the operation and maintenance of on-site relay protection, a management mode of operation and maintenance mainly based on automatic detection and intelligent monitoring is proposed to realize the “plug and play” target covering the whole life cycle. The possible development direction in the future of on-site relay protection is prospected.

Key words: intelligent substation; relay protection; on-site; operation and maintenance

(上接第203页 continued from page 203)

1147-1153.

作者简介:

胡文旺(1987—),男,福建龙岩人,工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电技术、继电保护及电网分析计算(E-mail: huwenwang126@126.com);

唐志军(1973—),男,福建莆田人,高级工程师,硕士,主



胡文旺

要研究方向为柔性直流输电技术、继电保护及自动化技术的试验与研究(E-mail: 499345970@qq.com);

林国栋(1975—),男,福建福州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为柔性直流输电技术、继电保护及自动化技术的试验与研究(E-mail: 609026603@qq.com)。

Application, analysis and improvement of system commissioning technology for flexible DC transmission project

HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, SHI Jiyin, ZOU Huanxiong

(Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Provincial Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: The system live commissioning test is a key process to ensure the secure and stable operation of flexible HVDC power transmission project in its practical application. In order to avoid the damage of converter valves caused by faults and trigger phase sequence errors of valve groups in the initial active start-up process and combined with the Xiamen real bipolar flexible HVDC power transmission project, a security control strategy for passive inverter test of converter valves before the initial total start-up is proposed to meet the safety requirement of equipments. The major issues found in the lab system alignments and field tests are analyzed and summarized, and the improvement measures are put forward to meet the requirements of safe and stable operation of the system.

Key words: flexible HVDC power transmission; converter transformers; converter valves; passive inverter; deblocking