

柔性直流输电舟洋换流站无源 HVDC 启动试验中 典型故障分析

吴俊, 方芳, 赵晓明

(国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 介绍了舟山多端柔性直流输电工程舟洋换流站无源 HVDC 启动时的两起典型故障, 分别为无源 HVDC 方式下直流控制保护系统手动切换试验失败、模拟阀控系统故障冗余切换试验失败。对故障原因进行了深入分析, 并提出了解决方案。解决方案经试验验证有效, 可作为后续柔性直流输电工程控制保护系统设计的参考。

关键词: 柔性直流输电; 启动试验; 典型故障; 无源 HVDC; 冗余切换

中图分类号: TM721

文献标志码: B

文章编号: 1007-1881(2016)01-0006-04

Analysis on Typical Faults in Passive HVDC Startup Tests in Zhouyang VSC-HVDC Converter Station

WU Jun, FANG Fang, ZHAO Xiaoming

(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Two typical faults occurred during the passive HVDC (high-voltage direct current) startup tests in Zhouyang VSC-HVDC (voltage source converter based high-voltage direct current) converter station are described in this paper. One is the failure of manual DC control and protection system switching and the other is redundancy switch test due to failure of simulated valve control system. The fault courses are deeply analyzed and the solutions are proposed. The solutions are validated and can be the reference of control and protection system design of follow-up VSC-HVDC projects.

Key words: VSC-HVDC; startup test; typical faults; passive HVDC; redundancy switch

舟山多端柔性直流输电工程是目前为止世界上第 1 个 5 端柔性直流输电工程。工程于 2012 年投资建设, 2014 年 7 月投入运行。舟山多端柔性直流输电示范工程由舟定、舟岱、舟衢、舟泗和舟洋换流站 5 个直流换流站和多段直流电缆构成。工程在系统试验期间, 舟洋换流站 110 kV 交流进线尚不具备供电条件, 采取无源 HVDC(高压直流输电)启动方式, 充分发挥了柔性直流输电向远距离无源网络供电的技术优势^[1-6]。舟洋换流站主接线如图 1 所示。

舟洋换流站控制保护系统主要由直流控制保护 PCPA/B 系统、换流阀控制保护 VBCA/B 系统组成, 正常运行时 A 与 B 系统一套为运行系统, 一套为备用系统, 当运行系统故障时自动切换至备用系统。无源 HVDC 启动期间, 交流侧采用定电压控制模式, 直流侧采用定功率控制模式。

在整个启动试验期间, 直流控制保护系统和阀控系统等多次故障和缺陷。以下就一些典型缺陷进行分析, 对直流控制保护系统在无源 HVDC 工作方式下的一些控制和冗余切换策略提出了建议。

1 直流控制保护系统手动切换试验失败原因分析

1.1 故障现象

控制系统手动切换试验主要目的, 是验证运行系统与备用系统之间的手动切换功能是否正常, 切换前后系统是否能平稳运行。

手动切换试验前, 直流控制保护系统 PCPA 为运行状态, PCPB 为备用状态。在将直流控制保护系统由 PCPA 运行切换至 PCPB 运行的手动切换试验中, 发现切换过程中系统有较大扰动, 换

流变阀侧出现了较大电流，其中 B 相电流峰值达到了 330 A，控制系统未能平稳切换，试验失败。从录波波形中可以看出，电流波形包含有很大成分的非周期分量，电流偏于时间轴的一侧；包含有大量的高次谐波分量，并以二次谐波为主；波形之间出现间断，符合励磁涌流的特点，波形如图 2 所示。

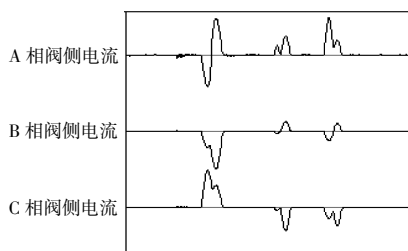


图 2 手动切换时出现扰动的波形

1.2 原因分析

在有源 HVDC 运行方式下，运行直流控制保护系统与备用系统都跟踪换流变阀侧电压，并以此为基准生成调制波发送给阀控系统，阀控系统再根据调制波和控制目标将交流电压整流为直流电压。理论上 2 套系统的调制波是相同的，直流控制保护系统切换时可以保证系统平滑切换无扰动。而在无源 HVDC 运行方式下，直流控制保护系统的调制波是系统根据控制目标内部计算产生的，阀侧电压由阀控系统根据调制波控制换流阀逆变产生。

运行直流控制保护系统和备用直流控制保护系统各自独立计算，由于内部晶振频率的差异，2 套控制系统的调制波经过一段时间后相位会不

一致。而调制波相位不一致会导致控制系统切换时换流变阀侧电压相位发生突变，造成主变出现励磁涌流。切换时 2 套控制系统调制波见图 3。

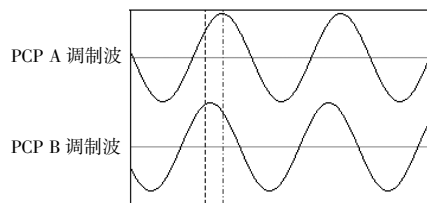


图 3 手动切换失败时 PCPA 与 PCPB 调制波

1.3 解决方案

从以上分析得知，故障原因在于系统切换时主备控制系统各自独立计算的调制波相位不一致。解决方法为：修改无源 HVDC 方式下，非运行控制系统调制波获取方式，使其能跟踪运行控制系统调制波。

在本工程中采用备用控制系统跟踪阀侧电压产生调制波的方式，同时考虑到换流阀逆变及控制系统切换所需的时间，适当调整备用控制系统调制波相角，保证切换后主变阀侧电压无突变。在舟洋换流站启动试验中，经过程序修改和参数调整，最终实现直流控制保护系统手动切换过程中系统基本无扰动，最大相电流约为 6 A，切换正常时阀侧电压及电流如图 4 所示。

2 模拟阀控系统故障冗余切换试验失败分析

2.1 故障现象

模拟阀控系统故障冗余切换试验的主要目

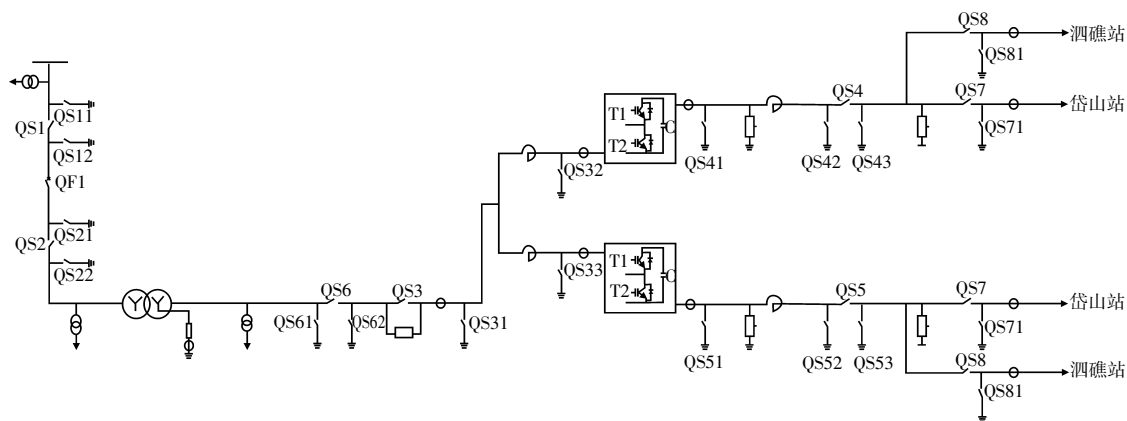


图 1 舟洋换流站一次接线

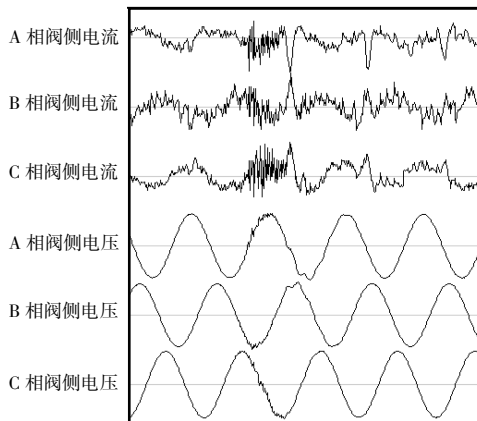


图 4 控制系统手动切换试验成功波形

的,是检验在运行阀控系统发生故障时能否平稳地切换到备用系统,同时检验直流控制系统自监视功能和事件记录功能是否正常。

在模拟运行阀控系统故障前,阀控及直流控制保护系统均正常工作,A套运行,B套备用;拉开阀控A相下桥臂控制器A机箱电源,模拟阀控VBCA故障请求切换,PCPA与VBCA退出运行,降为服务状态,PCPB与VBCB升级为运行系统;2 min后恢复A相下桥臂控制器A机箱电源,VBCA与PCPA恢复备用;手动切换PCPA为运行,PCPB自动降为备用;运行约1 min后换流变阀侧突然出现较大电流,阀控桥臂过流保护动作跳闸。

2.2 缺陷分析

基于MMC(模块化多电平换流器)型的VSC(电压源换流器)电路结构^[7]如图5所示。图中 U_s 为电网侧相电压; U_c 为VSC换流器交流侧相电压; I 为流经电抗器的相电流; R_x, L_x 为交流侧变压器等效阻抗与换流器系统等效阻抗和; u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 分别为三相交流系统三相电压瞬时值; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 分别为换流器交流输出端相电压瞬时值; i_a, i_b, i_c 分别为交流侧三相线电流瞬时值; I_{dc} 为直流侧从换流器流出的电流; I 为从换流器流入到直流输电线路的电流。交流侧三相动态微分方程写成向量形式为:

$$U_{cabc} = U_{sabc} - R_x i_{abc} - L_x \frac{di_{abc}}{dt} \quad (1)$$

式(1)是在三相静止坐标系下的系统模型,其电压和电流都是正弦形式的交流量,不利于控制器设计。为了得到易于控制的直流量,常用方法

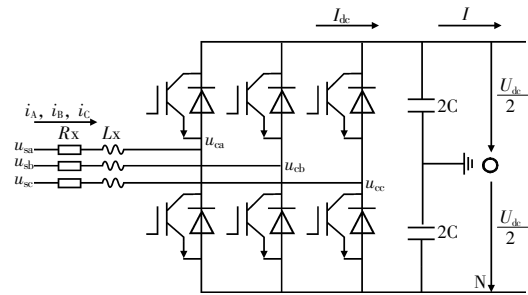


图 5 VSC 换流器电路结构

是对式(1)施加dq坐标变换(Park变换),可以将三相静止坐标系下的交流量变换到两相旋转坐标系下的直流量^[8]。在三相对称系统中,没有零序分量,由式(1)可得^[8]:

$$u_{cd} = u_{sd} - (L_x \frac{di_d}{dt} + R_x i_d) + \omega L_x i_q \quad (2)$$

$$u_{cq} = u_{sq} - (L_x \frac{di_q}{dt} + R_x i_q) + \omega L_x i_d \quad (3)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 分别为电网侧d轴、q轴电压; u_{cd}, u_{cq} 分别为VSC换流器阀侧d轴、q轴电压。

MMC无源供电控制器设计有2个基本要求^[9]:

(1)稳态情况下MMC能够提供波形稳定的交流电压。

(2)交流故障情况下MMC能够控制故障电流。

无源供电控制模式下,MMC网侧交流电压的频率和相位可由参考相位直接控制,其网侧交流电压幅值 U_s 可通过设定 u_{sref} 直接控制,从而实现了MMC交流侧电压频率、相位和幅值的独立控制。正常运行时无源HVDC运行状态采用交流侧定电压控制方式,设置电网侧电压d轴分量为1(标么值),q轴分量为零即可以实现交流侧额定电压运行的目标。

在本次故障中,A相下桥臂控制器A机箱断电后VBCA上送的该桥臂的电压和为0,该条件会复归1个RS触发器,导致PCPA由运行状态变为闭锁状态,由本文第1部分可知,此时非运行系统PCPA的调制波不再自产,而是跟踪外接阀侧电压;当A相下桥臂机箱电源恢复正常工作后,PCPA由闭锁状态升级为备用状态,继续跟踪阀侧电压产生调制波。而当手动将PCPA切换为运行系统时,PCPA从备用系统升级为运行系统,其调制波需从跟踪外接阀侧电压切换为系统

自产,切换逻辑为运行控制系统(PCPA)检测阀侧电压的d与q分量,在q分量为零时将调制波由跟踪阀侧电压产生改为内部计算产生。

由无源HVDC控制原理可知,此种切换逻辑有一问题,即未判断切换时d轴分量,当q分量为零时,d轴分量可能等于1也可能等于-1,如果是前者切换能平稳实现,如本试验中第1次由阀控故障请求的切换过程成功(PCPA切换为PCPB)以及本文第1部分的控制系統手动切换试验成功即对应于该情况;如果是后者则会导致调制波出现180°翻转,造成主变阀侧电压突变,产生较大励磁涌流,引起阀控过流保护动作。保护动作时刻调制波波形与阀侧电压突变波形如图6所示。

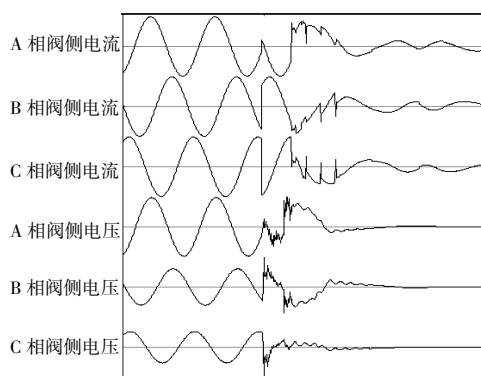


图6 调制波电压突变波形

2.3 解决方法

从以上分析得知,在阀控系统故障冗余切换试验完成,正常运行约1 min后突然出现故障的原因在于备用系统切换为运行系统后,调制波获取方式切换的判据不充分,导致阀侧电压突变,解决方法为,修改该判据为:当外接阀侧电压的直轴分量约等于1并且交轴分量约等于0时,将调制波由跟踪阀侧电压产生切换为内部计算产生。修改程序后,经过多次模拟阀控系统故障冗余切换试验,切换均成功。

3 结语

柔性直流输电直流控制保护系统在无源HVDC运行方式下,备用控制系统调制波需跟踪运行控制系统调制波,否则可能导致主备系统调制波不同步,切换过程出现较大扰动。在本工程中采用备用控制系统跟踪阀侧电压产生调制波的方案实现运行、备用控制系统调制波的同步。当

备用系统切换为运行系统后,继续跟踪阀侧电压产生调制波会导致控制系统控制量与目标量重合,系统不能长期稳定运行,需要尽快将运行系统调制波由跟踪阀侧电压产生切换为内部计算产生。采用两相旋转坐标系直流量进行控制时需要考虑切换时的判据,当外接阀侧电压的直轴分量约等于1并且交轴分量约等于0的时候才将调制波由跟踪阀侧电压产生切换为内部计算产生,以保证调制波在切换前后无相位幅值突变,切换过程平稳过渡。

参考文献:

- [1] 徐政,陈海荣.电压源换流器型直流输电技术综述[J].高电压技术,2007,33(1):1-10.
- [2] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等.电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J].电网技术,2008,32(22):39-45.
- [3] FLOURENTZOU N,AGELIDIS V G,DEMETRIADES G D.VSC-based HVDC power transmission systems:an overview [J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(3):592-602.
- [4] 张文亮,汤广福,查鲲鹏,等.先进电力电子技术在智能电网中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(4):1-7.
- [5] CHUCO B E,WATANABE H.Comparative study of dynamic performance of HVDC system based on conventional VSC and MMC-VSC [J].Bulk Power System Dynamics and Control,2010,1(6):12-17.
- [6] 李懿,马振会.浅谈柔性直流技术在海岛输电中的推广应用[J].浙江电力,2011,30(7):26-29.
- [7] 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.
- [8] 姚为正,邓祥纯,易映萍,等.基于dq0同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(22):71-76.
- [9] 王珂,骆健,杨胜春,等.向无源网络供电的VSC-HVDC启动控制研究[J].中国电机工程学报,2011(1):277-281.

收稿日期:2015-06-09

作者简介:吴俊(1980),男,高级工程师,现从事继电保护工作。

(本文编辑:杨勇)