

特高压锦屏换流站因雷击造成双极闭锁故障分析

禹佳 孙文 闫礼阳

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

摘要: 依据2015年9月特高压锦屏换流站因雷击造成双极闭锁故障的事故,结合极控故障录波及极保护动作情况,理论分析故障原因,提出在特高压换流站直流分压器二次放电间隙处串联压敏电阻的反措建议,有利于直流系统的可靠稳定运行。

关键词: 特高压直流; 互联电网; 压敏电阻; 直流分压器

Abstract: According to bipolar block faults caused by lightning stroke happened in Jinping UHV converter station in September 2015 and combined with the fault wave recorder and the protective actions of pole control, the fault reasons are analyzed theoretically, and the suggestions for anti-accident measures are put forward, that is, the varistor is in series connection at secondary discharge gap of DC voltage divider in UHV converter station, which is good for the stable and reliable operation of DC system.

Key words: UHVDC; interconnected power grid; varistor; DC voltage divider

中图分类号: TM72 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2016)06-0065-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.06.015

0 引言

特高压直流输电系统是中国西电东送战略的大动脉,其安全稳定运行直接关系到区域电网之间的稳定性,因此特高压直流换流站的安全对互联电网而言至关重要。经过多年的技术开发和运行经验积累,中国在超特高压直流输电技术领域已经达到国际领先水平。然而,在直流输电系统设计、设备制造和控制保护系统性能等方面仍然存在部分缺陷,对直流输电系统安全运行造成威胁,甚至成为两端交流电网安全运行的隐患^[1-5]。

直流分压器是直流输电系统控制保护及测量录波系统采集电压量的重要设备,装设在直流极母线以及直流中性母线上,用以测量直流母线电压。由于其测量结果直接作用于直流系统控制闭环,因此直流分压器的运行状态与直流输电运行的可靠性密切相关。

2015年9月19日,特高压锦屏换流站监视系统由于直流分压器异常,发出“线路故障欠压保护 Init Down”告警,异常引发了±800 kV锦苏特高压直流极I直流线路保护再启动逻辑跳闸,极II直流线路保护再启动逻辑跳闸,极I、极II相继闭锁。

下面对闭锁事件的过程进行了梳理,并对波形进行了分析,得到了事故发生的原因,并提出相关建议。

1 事故前电网运行状态及事故发生过程

2015年9月19日锦苏直流极I双阀组、极II高端阀组大地回线全电压5400 MW运行,各阀组的阀水冷却主循环泵运行正常。周边500 kV月锦I线、月锦II线、西锦I线、西锦II线、西锦III线、东锦I线、东锦II线运行正常;500 kV 1号母线、500 kV 2号母线运行正常;500 kV变压器511B、512B运行正常,站用电I、II回运行正常,III回备用正常;61 M、62 M、63 M、64 M母线运行正常,所有小组交流滤波器和低压电抗器正常。

事故发生过程如下:

21:58:00:206 OWS报“线路故障欠压保护 Init Down”;

21:58:00:233 极I直流线路保护再启动逻辑跳闸;

21:58:00:247 极II直流线路保护再启动逻辑跳闸,极I、极II相继闭锁。

2 故障检查及原因分析

2.1 极控制故障录波分析

极 I、极 II 的极控制主机 P1PCPB1 及 P2PCPB1 波形图分别如图 1、图 2 所示。

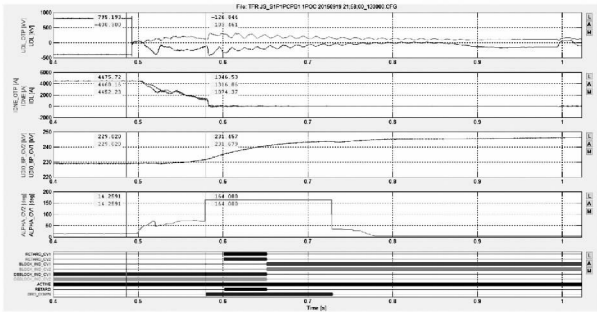


图 1 P1PCPB1 控制主机故障录波图

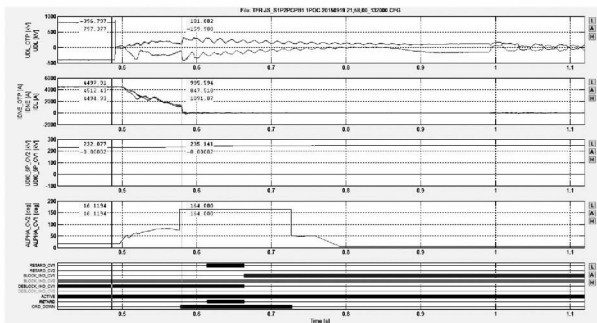


图 2 P2PCPB1 控制主机故障录波图

查看图 1、图 2 故障录波发现极 I、极 II 直流电压瞬时降为 0，随后直流电压进入暂态恢复过程。直流电压降落约 4 ms 后低压限流功能使 α 角增大，直流电流减小，持续约 80 ms 后直流欠压保护动作。

2.2 极保护动作情况分析

这次事件中，直接导致特高压锦苏直流双极闭锁保护的是直流线路欠压保护，该保护的原理简述如下：

当直流线路发生故障时，会造成直流电压无法维持。通过对直流电压的检测，如果发现直流电压低持续一定的时间，同时没有发生交流系统故障，也没有发生换相失败，判断为直流线路故障。

其具体判据为

$$|U_{DL}| > U_{DL_set}$$

U_{DL_set} 全电压时为 0.35 p.u. 降压时为 0.25 p.u.。

由于直流线路欠压保护为后备保护，因此动作前需延时 80~90 ms(具体延时由国调保护处下达)。

根据直流控保逻辑，直流线路欠压保护的動作结果是启动线路重启逻辑，触发录波。

图 3 所示是极 I 保护 A 套录制的波形。在这次事件中，由波形可知，整流侧直流电压跌落至 0.35 p.u. 后一直没有恢复，而直流线路欠压保护动作事件在整流侧电压突变后 90 ms 与保护逻辑相符。

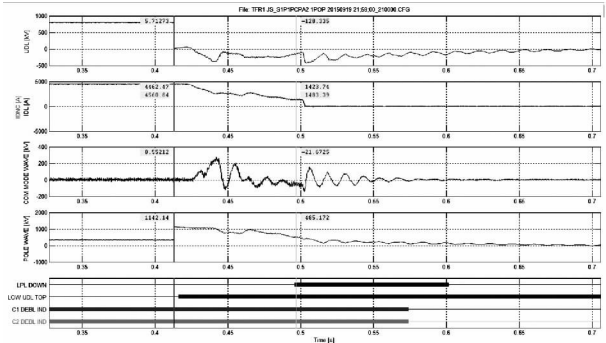


图 3 P1PCPA2 保护主机故障录波图

2.3 再启动逻辑动作情况

锦苏直流的再启动逻辑如图 4 和图 5 所示。再启动跳闸逻辑中，当一极存在再启动信号时，闭锁对极再启动功能 5 s，同时该信号送至对极再启动跳闸逻辑，如此时对极出现再启动信号则立即闭锁。查看软件主程序，本逻辑执行周期为 6 ms，而双极电压在同一时刻(同一毫秒级)故障。

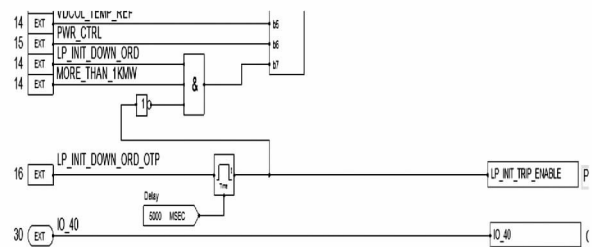


图 4 双极直流线路先后故障闭锁再启动逻辑

由于 order down 命令是双极同时相互传递，如果极 I、极 II 同时出现 order down 命令，则会出现双极同时满足再启动跳闸逻辑条件，见图 5 所示。

通过事件记录和故障录波可知，极 I、极 II 直流欠压保护同时动作，同时发出 order down 命令，则满足再启动跳闸逻辑，极 I、极 II 先后闭锁。

2.4 直流分压器检查情况

现场检查极 I、极 II 直流分压器设备外观正常，分压回路接线盒内无异常。

现场检查直流分压器分压回路，在施加 250 V 电压时，分压回路压敏电阻(保护分压回路测量分

压元件) 过压导致绝缘击穿(动作电压 230 V); 在施加 50 V、100 V 电压时, 分压回路压敏电阻绝缘正常。

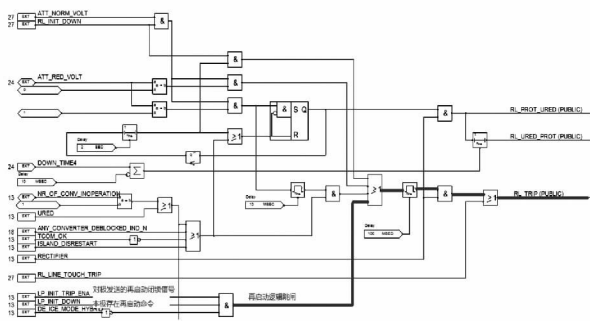


图 5 再启动跳闸逻辑

2.5 换流站内接地装置电气一次设备试验情况

查看换流站内接地装置电气一次设备调试报告, 所有项目符合国家标准和技术规范以及设计要求, 试验结果合格。

3 直流分压器等效电路及暂态响应特性^[6]

3.1 直流分压器结构及等效电路

特高压直流换流站直流电压分压器结构如图 6 所示。

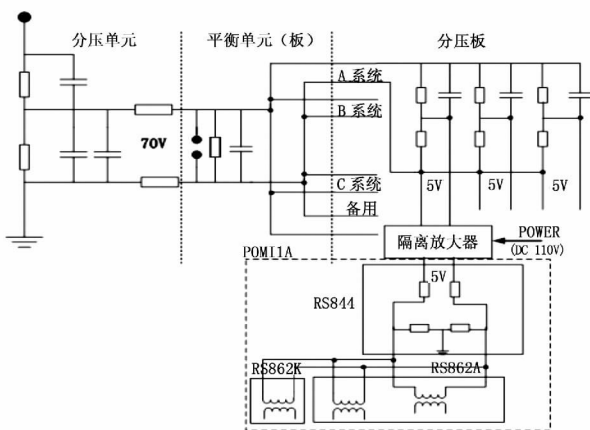


图 6 特高压直流输电工程直流分压器结构

由图 6 可知, 直流分压器利用阻容分压的原理实现双级变压, 第一级将 800 kV 一次电压降低至 70 V 并引入平衡模块。平衡模块中装设了气体放电管, 对二次系统进行保护。在后续分压模块中, 70 V 输入电压又将变化至 5 V, 并经过隔离放大器后输入控系统。

通过对锦苏直流整流侧使用的直流分压器的实际参数进行梳理, 可以得到锦苏直流工程直流分压器的等效电路如图 7 所示。

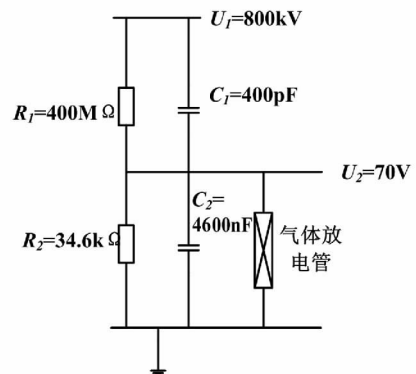


图 7 特高压直流输电工程直流分压器等效电路

从图 7 可知, 直流分压器高压臂的集中参数电阻为 400 MΩ, 集中参数电容为 400 pF。低压臂等值电阻为 34.6 kΩ, 等值电容约为 4 600 nF。利用该分压原理可以实现将一次系统 800 kV 的额定直流电压降低至 70 V。同时, 由于高低压桥臂的电阻、电容间满足如式 (1) 所示的匹配原则, 可保证直流分压器的阶跃暂态响应时间。

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

3.2 直流分压器气体放电管击穿后暂态响应特性

利用基尔霍夫定律对图 7 所示的直流分压器等效电路进行分析, 可以得到输出 U_2 与直流电压 U_1 间的微分方程关系为

$$(C_1 + C_2) \frac{du_2}{dt} + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right) u_2 = C_1 \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1} \quad (2)$$

对式 (2) 进行拉普拉斯变化, 可得到直流分压器的传递函数为

$$U_2(s) = \frac{(C_1 s + \frac{1}{R_1}) U_1(s) + (C_1 + C_2) u_{20} - C_1 u_{10}}{(C_1 + C_2) s + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} \quad (3)$$

式中 u_{10} 、 u_{20} 分别为 U_1 、 U_2 在 0 时刻的初始值。

由于低压臂短路, U_2 在 0 时刻的初始值满足 $u_{20} = 0$, 但一次系统电压 0 时刻的初始值却等于直流系统额定电压 $u_{10} = V_D$ 。考虑整个过程中, U_1 维持幅值为 V_D 的直流电压, 由此可以得到在此过程中, U_2 的暂态响应满足:

$$U_2(t) = \frac{R_2 V_D}{R_1 + R_2} [1 - e^{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} t}] \quad (4)$$

由式(4)可知,在直流分压器低压臂短路恢复瞬间,由于低压臂电容的充电过程, U_2 的电压依然保持为0,即

$$U_2(0_+) = 0 \quad (5)$$

该初始电压通过一阶动态响应,逐渐变化至稳态值:

$$U_2(\infty) = \frac{R_2 V_D}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

由式(4)可知,该分压器回路的时间常数满足:

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = 159 \text{ ms} \quad (7)$$

由此可见,在直流分压器低压臂短路恢复后,即使一次侧直流电压维持不变,电压测量值恢复到0.35 p.u.、0.7 p.u.直至结束过渡过程也需要相当长的时间。

4 事故原因分析

4.1 事故原因分析^[7]

根据直流分压器气体放电管击穿后暂态响应的动态响应特性,可以初步得到事故发生的原因如下:

故障发生时,锦屏换流站内持续雷电暴雨天气,故障初始时刻极 I、极 II 直流电压均出现突降,但电流没有变化,据此推断并非线路故障。故障后,换流站内组织对双极直流分压器及其二次回路进行了检查:一次设备外观无异常,没有闪络放电痕迹;双极分压器二次回路及测量板卡各自独立,无公共部分;分压回路保护用压敏电阻动作电压与标称值一致,且动作后能够正常复归。

检查站内工业视频录像显示故障时刻直流线路杆塔附近有一道闪电,通过对照可以判断雷击点为极 I 直流线路第一基杆塔到换流站内龙门架间的避雷线。初步分析为直击雷导致两极极母线直流分压器二次回路扰动,极母线直流电压测量值瞬间跌落至0,双极同时发生直流欠压保护动作并发出闭锁另一极的再启动信号,导致两极同时闭锁。

锦屏站近区遭受雷击,雷电流通过主接地网泄流,导致站内直流电压分压器与接地网连接处电压

升高,电压波形类似雷电过电压,同时造成极 I、极 II 直流分压器二次回路过压保护装置击穿,测量电压快速跌落,进而引起直流线路欠压保护动作。两极互相闭锁另一极的再启动逻辑,导致同时停运。

4.2 系统主保护未误动原因分析

另外,与直流电压相关的保护还包括电压突变量保护,但在这次事件中该保护并未动作。现将电压突变量保护行为分析如下。

电压突变量保护的原理是检测直流线路的直流电压和直流电流,直流线路接地故障的一个特征是直流电压以相对较高的速率下降到一个较低值(突变量)。突变量部分是非常快速的,提供了2~3 ms内的故障检测。突变量检测是由一个微分电路构成,与两个参考值进行比较。较小的突变量参考值用于启动检测电路,如果突变量超过较大的参照值,则达到突变量动作标准。

为了区分换流站内故障和直流线路故障,采用电压时间微分(dU/dt)的测量与直流线路中的电流时间微分(dI/dt)相结合。一个高的正 dI/dt (在正常电流方向的电流增加)表明故障位于 I_{DL} 测量互感器的线路侧,而一个高的负 dI/dt 表明故障在直流场内。要完全筛选突变量部分,也必须检测直流低电压。较高的突变量参考值和低电压部分都需要持续满足延时,以避免因为电压暂态变化导致意外动作。

图8为特高压直流电压突变量保护的原理图。

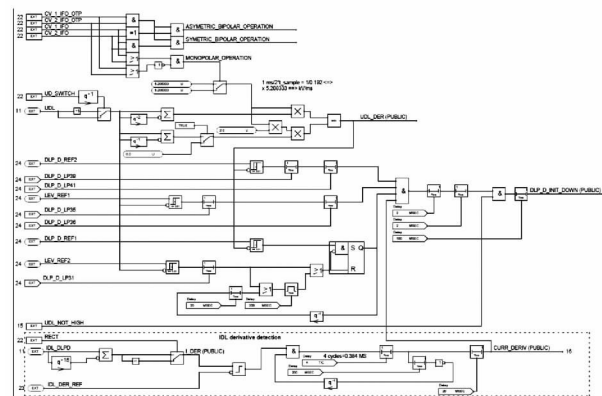


图8 直流电压突变量保护原理图

图中,直流线路额定电压: $U_{DL_NOM} = 800 \text{ kV}$ (2个换流器全压运行); $U_{DL_NOM} = 560 \text{ kV}$ (2个换流器降压运行); $U_{DL_NOM} = 400 \text{ kV}$ (仅1个换流器正常运行)。

由图8可知,直流电压突变量保护的主要判据为:

$$U_{DL_DER} < -0.95 \times U_{DL_NOM} \text{ 延时 } 0.1 \text{ ms 后展宽 } 2 \text{ ms};$$

$$\text{且 } U_{DL_SW} < 0.55 \times U_{DL_NOM} \text{ 延时 } 0.2 \text{ ms};$$

$$\text{且 } U_{DL_DER} < -0.7 \times U_{DL_NOM};$$

且 $I_{DL} - I_{DLq-15} \geq 4000 \times I_{DER_REF}$ 然后展宽 2 ms 后延时 2 ms 此时若 $U_{DL_SW} < U_{DL_NOM} \times 0.7$ 展宽 20 ms, 电压突变量保护启动。

上述判据中:

U_{DL_DER} 为直流线路电压突变量;

$U_{DL_SW q-n}$ 为 n 个采样周期前的直流线路电压;

I_{DLq-15} 为 15 个采样周期前的直流线路电流;

电流突变量参考值 $I_{DER_REF} = 0.1$ (2 个换流器正常运行) $I_{DER_REF} = 0.05$ (2 个换流器未正常运行)。

简言之,直流电压突变量保护采用 4 个判据,综合判断两段电压突变量、电压跌落以及电流突变量 4 个判据均满足后再出口前辅助直流线路低电压判据。

在“9·19”锦苏直流双极闭锁事件中,从故障录波上看,直流电流 I_{DL} 在电压突降后也开始下降(如图9所示)。此时 dI/dt 是一个负值或是一个较小的正值,所以不满足突变量动作的要求。

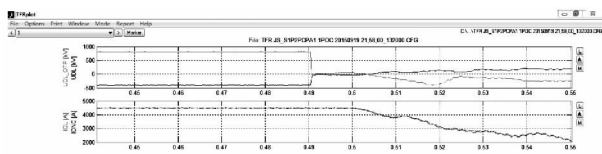


图9 锦苏直流事件中电压电流波形

5 结论及反事故措施建议^[7]

分析表明,导致此次事件最直接的原因是由于整流侧直流分压器二次侧短路后,低压臂电容充电时间过长。特别是当放电管击穿,低压臂残压降为 0 后,分压器需要 477 ms 后才能恢复正常测量功能。过长的充电时间,导致直流电压长时间错误测量,并引发控制保护系统误动。

基于此分析,做出如下反事故措施建议:

1) 在直流分压器二次放电间隙处串联压敏电阻。因为当发生雷电冲击的动作时:在正极性雷电冲击下,由于残压与工作电压的极性相同,极I残压值可以保持在线路低压保护动作定值之上,保护不会动作,

但是极II残压极性与工作电压相反,线路低电压保护将会动作,触发极II再启动逻辑;同理,在负极性雷电冲击下,两极情况相反,仅极I发生再启动。

2) 仿真计算雷击换流站站内(全站范围内)及线路(交直流线路,包括站用电外接电源线路)靠近换流站近区避雷线或避雷针时,雷电流通过主接地网泄流引起的接地网电位升高,分析在遭受直击雷情况下,换流站内二次回路接地侧与主接地网直接连接的测量设备的连接点地网电位升高情况,确定全站测量设备二次回路耐压水平要求。

参考文献

[1] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.

[2] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.

[3] IEEE PES Transmission and Distribution Committee. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-circuit Capacities [R]. New York: IEEE, 1997.

[4] 韩昆仑,蔡泽祥,贺智,等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.

[5] 李少华,刘涛,苏匀,等. ±800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84-87.

[6] 邱关源,罗先觉. 电路(第5版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[7] 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

作者简介:

禹佳(1983),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

孙文(1980),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

闫礼阳(1968),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2016-08-02)