

Analysis the Control and Protection Strategies of DC Line Fault for Xiluodu-Guangdong HVDC Project

Xianwu Cao

China Southern Power Grid Co., LTD. Extra-High Voltage Power Transmission Company Qujing Branch, Qujing
Email: caoxianwu@ehv.csg.cn

Received: Dec. 18th, 2012; revised: Jan. 9th, 2013; accepted: Jan. 27th, 2013

Abstract: Great changes have taken place in the inductance and capacitance of double-circuit transmission line on the same tower compared with conventional HVDC project, then electric parameter also changed. This paper analyzed the fault characteristics and usual fault of double-circuit transmission line on the same tower, and compared with conventional DC engineering, this paper also introduces the DC protection strategy and its failure recovery strategy of Xiluodu-Guangdong HVDC project, some suggestions are given about protection criterion selection and setting value set of double-circuit transmission line on the same tower.

Keywords: Direct Current Transmission; Double-Circuit Transmission Line on the Same Tower; Line Fault; Control and Protection

溪洛渡送电广东直流输电工程直流线路故障时的控制保护策略分析

曹显武

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司曲靖局, 曲靖
Email: caoxianwu@ehv.csg.cn

收稿日期: 2012年12月18日; 修回日期: 2013年1月9日; 录用日期: 2013年1月27日

摘要: 与常规直流输电工程相比, 同塔双回线路的电感电容参数发生了较大变化, 从而导致故障时的电气量也发生了变化。文章分析了同塔双回直流输电线路故障特点及其常见故障, 与常规直流工程进行了对比, 介绍了溪洛渡送电广东直流输电工程直流保护策略及其故障时的恢复策略, 给出了同塔双回直流工程在保护判据选取和定值设定方面的一些建议。

关键词: 直流输电; 同塔双回; 线路故障; 控制保护

1. 引言

与常规 ± 500 kV 线路相比, ± 500 kV 同杆并架线路的极间电感电容以及对地电感电容有明显的变化; 同杆并架直流线路发生故障时, 直流电压和直流电流的变化过程与常规直流有所不同。因此, 有必要深入研究同塔双回直流输电系统直流线路故障, 针对同杆并架系统的特点采取适宜的直流线路保护配置和故

障恢复策略, 确保灵敏可靠地检测到各种可能的故障, 为同杆并架直流系统的有效实施和安全稳定运行奠定基础。

2. 同塔双回直流线路故障特点

架空线路最常见的故障是线路对地闪络。在同塔双回直流输电系统中, 各极导线相互之间通常有相当

大的距离，各极导线之间的闪络实际上可不予考虑。造成同杆并架架空线路故障的主要原因有：雷击；被盐、工业污染物、灰尘和烟尘等污秽；由于故障、控制系统失灵等造成的过电压；倒杆塔；火灾、碰树、冰雪破坏、风灾；上下层极线碰线故障等。

绝大多数直流线路故障是暂时的，即在故障清除后，故障处的绝缘几乎总能恢复到故障前的水平。同时由于平波电抗器的作用，直流故障电流比较小，通常不会造成线路导体和绝缘子明显损坏。这些考虑意味着在绝大多数情况下，直流线路故障可以很快恢复正常运行。

直流线路故障是直流输电系统最常见的故障之一，如果不积极采取措施切除直流电流源，其熄弧是非常困难的，这将对一次设备和系统稳定运行带来极大的危害。为了既能迅速切除直流电流源、帮助熄弧，又尽可能地避免直流输电系统不必要的停运，配置直流线路重启动功能，对整个电网的正常运行起着至关重要的作用。

直流线路故障发生后系统的电流、电压等各种电气量将会有很大的变化，同时控制系统也会有相应的响应，这主要表现在以下几个方面：

(1) 相对于交流系统故障，直流线路故障时，因为直流输电控制系统反应快速，能在较短时间内限制和消除故障电流，所以故障电流较小；而且直流平波电抗器能限制故障电流的增长速度。

(2) 在直流控制系统的作用下，故障电流的稳态值是不大的，但在故障初始阶段，故障电流会有较大的过冲，同时由于触发脉冲是离散的，直流控制不可能瞬时起到作用，而且直流线路电容放电也增加了故障电流。

(3) 故障后故障电流和整流侧直流电流大幅上升，在定电流控制的作用下，极控系统迅速增大故障极触发角，直流电压下降，从而稳定直流电流，直流电流能在较短的时间内回到整定值或回到由整流侧电流控制器的低压限流控制功能或其他控制功能决定的较低的值。故障电流将继续流动，直到被控制功能清除为止。

(4) 故障极的直流电压突然降低很多，电压变化率 du/dt 较大。

与常规 ± 500 kV 直流系统相比，同塔双回直流线

路故障主要特点有：

(1) 同塔双回 4 极线路中，某一极或多个极产生线路接地故障时，接地点产生的电压跳变将会在其他各极线路同位置感应出一定量级的电压跳变。

(2) 同塔双回直流线路故障时，直流电压的变化率 du/dt 和直流电流的变化率 di/dt 的数值与常规直流稍有不同。

(3) 同塔上层线路由于断线、联吊、外物短接等原因可能和下层线路碰线。

3. 直流线路保护配置策略

溪洛渡送电广东直流输电工程直流线路保护区包括整个直流线路。每极都配置了功能完善的双重化直流线路保护装置，在同塔双回直流系统各种可能的运行方式下，均能够检测到保护区内任何一点发生的金属接地、高阻接地、断线、碰线等故障，并及时启动相应的故障恢复顺序。其配置遵循以下原则：

(1) 采用行波保护和电压突变 (du/dt) 保护作为线路主保护。保护的判据和定值保证故障极的行波保护和 du/dt 保护检测到故障并启动该极的故障恢复顺序控制，通过控制作用使故障极的极线电流过零，等待一段时间用于空气去游离，然后自动地试图恢复该极的输送功率。对于通过控制作用清除不了的持续故障，应将故障极停运。

(2) 行波保护和电压突变保护的定值应针对同塔双回系统的特点进行设定。同塔双回直流线路故障时，直流电压的变化率 du/dt 和直流电流的变化率 di/dt 的数值与常规直流稍有不同，因此对相应的定值进行了针对性的设定。

(3) 能快速反应直流线路碰线故障。同塔双回直流系统中，上下层线路碰线故障属于严重的直流线路故障，当发生直流线路碰线故障时，保护动作启动直流线路故障恢复顺序或碰线两极紧急停运。

(4) 配置一些保护(如纵差保护、低电压运行保护)来检测行波保护和电压突变保护等高速主保护检测不到的持续性故障。

(5) 在直流场范围内发生接地故障，包括直流滤波器接地故障时，直流线路保护装置不应动作。同样，直流线路故障，直流场内有关的保护也不应误动。其它极线上发生故障时，本极线的直流线路保护装置不

应动作。

(6) 在由于交流系统扰动引起的直流欠压情况下，直流线路保护装置或者相关的直流欠压保护都不应动作。这些扰动包括延时清除的换流母线单相金属对地短路故障，以及按正常时序清除的换流母线金属性三相对地短路故障。此外，不管在与哪个换流站相连的交流系统中发生上述交流故障，且不论两换流站之间的通信系统是否退出运行，上述保护要求都应当适用。

(7) 对于直流线路与其它交流线路之间发生的碰线故障，直流线路保护应能正确响应。在这种情况下，直流线路保护应能识别发生了碰线故障，并应在两换流站将受影响的换流极停运并隔离。

(8) 当某一极按金属回线方式运行时，应有保护来尽可能地保护作为金属回线导体的本极直流线路。

(9) 直流线路开路情况下，若运行人员意外地启动相应的阀组，设备将遭受直流过电压。应配置适当保护，以在这种事件中保护设备免遭受直流过电压。此保护也应对直流线路在运行中开路故障进行保护。

(10) 直流线路纵差保护应采用独立通道。直流线路纵差保护不能和极控系统共用保护通道，应采用独立的 2 M 通讯口与对侧站的保护进行通信。

4. 直流线路故障恢复策略

直流线路故障恢复主要通过直流线路重启动功能实现。该功能主要用于直流架空输电线路瞬时性故障后迅速清除故障、恢复送电，最大限度地确保直流系统的正常运行^[1-6]，相当于交流输电线路的重合闸功

能。

4.1. 直流线路故障重启功能的基本原理

通常直流线路故障重启过程为：当直流保护检测到线路故障以后将信号传送到极控，由极控系统立即强制整流器的触发角移相至 120°~150°，使整流器转为逆变器运行。经过一定的放电时间直流电流降到零后，再按照一定的速度减小整流器触发角，使其恢复整流运行，当并快速调整直流电压和电流至故障前状态，以尽快恢复直流系统的运行，最大限度地确保直流系统的正常运行^[7]。

4.2. 直流线路故障重启动功能的启动条件

溪洛渡送电广东直流输电工程直流线路故障重启动功能的启动条件主要有以下三个：

(1) 本侧保护装置检测到直流线路故障后，将信号送至极控系统，由极控系统执行重启动命令，能够出口启动直流线路故障重启动功能的保护如表 1 所示，其中：IdEE1、IdEE2、IdLH、UdL 为图 1 所示直流分流器/分压器所取电流/电压，_set 表示对应变量的定值，b(t)为反向行波，Com_b(t)表示共模行波，Diff_b(t)表示线模行波，delta(.)表示微分计算，integ(.)表示积分计算，_Fosta 表示对站，_Op_Fosta 表示对站另一极。

(2) 当故障点过于靠近某一站时，可能出现对站保护检测不到该故障的情况，若此时站间通信正常，则会收到对站线路重启动信号，该信号传至极控并出口启动直流线路故障重启动顺序。为保证两站重启动

Table 1. DC protection functions for DFRS
表 1. 具备直流线路故障重启动功能的直流保护

序号	保护名称	保护定值	出口时间	动作后果
1	接地极电流不平衡保护(60EL)	$ IdEE1 - IdEE2 > I_{set}$	400 ms	直流线路重启动
2	直流线路行波保护(WFPDL)	$b(t) = Z * \delta(IdLH(t)) - \delta(UdL(t))$ $\delta(Com_b(t)) > Com_dt_set$ $integ(Diff_b(t)) > Dif_int_set$ $integ(Com_b(t)) > Com_int_set$	0 ms	直流线路重启动
3	直流线路突变量保护(27du/dt)	$\delta(UdL(t)) < dU_set$ $ UdL < U_set$	0 ms	直流线路重启动
4	直流线路低电压保护(27DCL)	$ UdL < U_set$	120 ms	直流线路重启动
5	直流线路纵差保护(87DCLL)	$ IdLH - IdLH_Fosta > I_{set} + k_set * IdLH$	1000 ms	直流线路重启动
6	金属回线纵差保护(87MRL)	$ IdLH_Op - IdLH_Op_Fosta > I_{set} + k_set * IdLH_Op$	500 ms	直流线路重启动

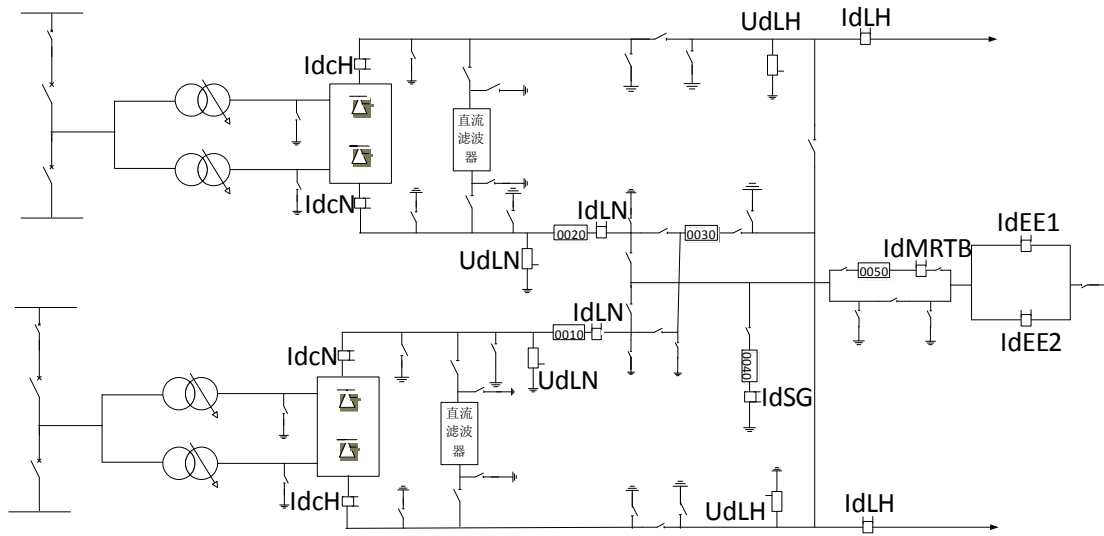


Figure 1. Measuring point of DC area for Xiluodu-Guangdong HVDC project
图 1. 溪洛渡送电广东直流输电工程直流场测点

次数一致，在本站检测到重启动信号时，不会通过对站信号出口重启动，仅在本站未检测到重启动信号时才由对站重启动信号出口。

(3) 极控系统中配置了直流线路故障检测功能，当线路重启后 75 ms 直流电压仍低于 0.1 p.u.，极控系统会再次启动直流线路故障重启动顺序^[8-13]。

4.3. 直流线路故障重启功能的控制策略

溪洛渡送电广东直流输电工程双回直流系统 4 个极都具备直流线路故障再启动功能，其逻辑图如图 2 所示。

其中 t' 、 t'' 、 t''' 如式(1)~(3)所示

$$t' = \sum_{i=1}^N (T_i + S_{i-1}) + \sum_{j=1}^M (t_j + S_{j-1}) \quad (1)$$

$$t'' = \sum_{i=1}^N (T_i + S_{i-1}) \quad (2)$$

$$t''' = \sum_{i=1}^N (T_i + S_{i-1}) + t_1 \quad (3)$$

式中 T_i 为第 i 次原压去游离时间， t_j 为第 j 次降压去游离时间， S_{i-1} 和 S_{j-1} 分别为对应的原压和降压重启动时间， S_0 为零值。

在整流侧，当检测到直流线路故障后，设置输入到低压限流环节的直流电压为零，启动交直流系统故障恢复的暂态电流控制，极控系统 will 触发角移相到 120°，当直流电流降低到零时将角度设定到限制值。

这个过程虽然类似于移相闭锁，但控制系统触发脉冲一直使能，所以极解锁信号一直存在。经过一定的放电时间后，直流系统按设置的电压等级自动重启。如果重启以后直流线路故障消失，则系统继续运行；如果重启后直流线路故障依然存在，控制系统再次重复先前的移相动作，同时计算重启次数，当重启次数达到运行人员设定值时，控制系统将启动闭锁顺序；在

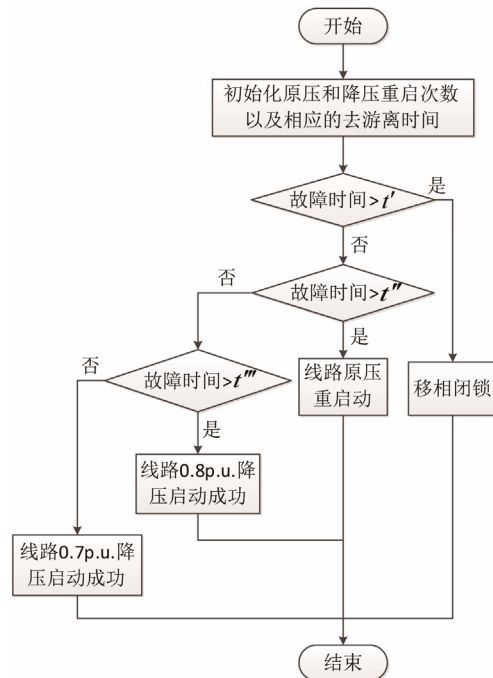


Figure 2. Restart logic for DC line fault
图 2. 直流线路故障重启动逻辑

逆变侧，当检测到直流线路故障后设置熄弧角实际值为零使触发角向 120° 的方向移动使直流电压降低，当电流重新建立后，再释放触发角限制重新控制电压。

如果通讯故障，在整流侧检测到直流线路故障，整流侧将直流电流降为最小并经过放电时间后重启，如果重启次数达到了，则整流侧按闭锁顺序闭锁，逆变侧由直流低电压保护动作闭锁；而在逆变侧检测到直流线路故障时则不会启动直流线路故障重启，最后整流侧和逆变侧均由直流低电压保护闭锁。

每个极直流线路故障重启次数(0~5 次)、每次重启的放电时间(100~500 ms)以及每次重启时的电压等级(100%、80%、70%)均可在运行人员工作站分别设置。如果故障前的电压参考值大于设置值，则系统重启后的电压参考值会被设置为运行人员设置的值。通讯正常时，整流侧的放电时间以及重启次数会更新逆变侧的相应值，逆变侧的重启电压参考值会更新整流侧的相应值。通讯故障时只能通过手动方式将以上数值调节一致。

因直流线路较多，出现线路故障的几率也较大一些，为了避免一个极故障重启期间或者重启不久后，

其他极又出现线路故障并重启，对交流系统产生过大的冲击，影响其他正常极的稳定运行，各极的直流线路故障再启动功能做了如下限制：在一个极事故闭锁(含紧急停运、线路故障再启动不成功闭锁)后，一定时间(可调整)内本回另外一极和另一回的两极均禁止重启功能；任一极重启期间，禁止本回另外一极和另一回的两极的直流线路故障重启功能；任一极重启成功以后，一定时间(可调整)内，禁止本回另外一极和另一回的两极的直流线路故障重启功能。

5. 试验分析

5.1. 闭锁重启成功 15 分钟内线路故障

试验模拟在站间通信正常情况下，直流双回四极 6400 MW 功率运行，直流 II 回双极闭锁，15 分钟内直流 I 回极 1 线路故障，故障持续时间 100 ms，得到的波形如图 3~6 所示。其中重启定值设置为：原压 1 次(去游离时间为 250 ms)，降压 2 次(第一次 80%，去游离时间为 300 ms；第二次 70%，去游离时间为 250 ms)。

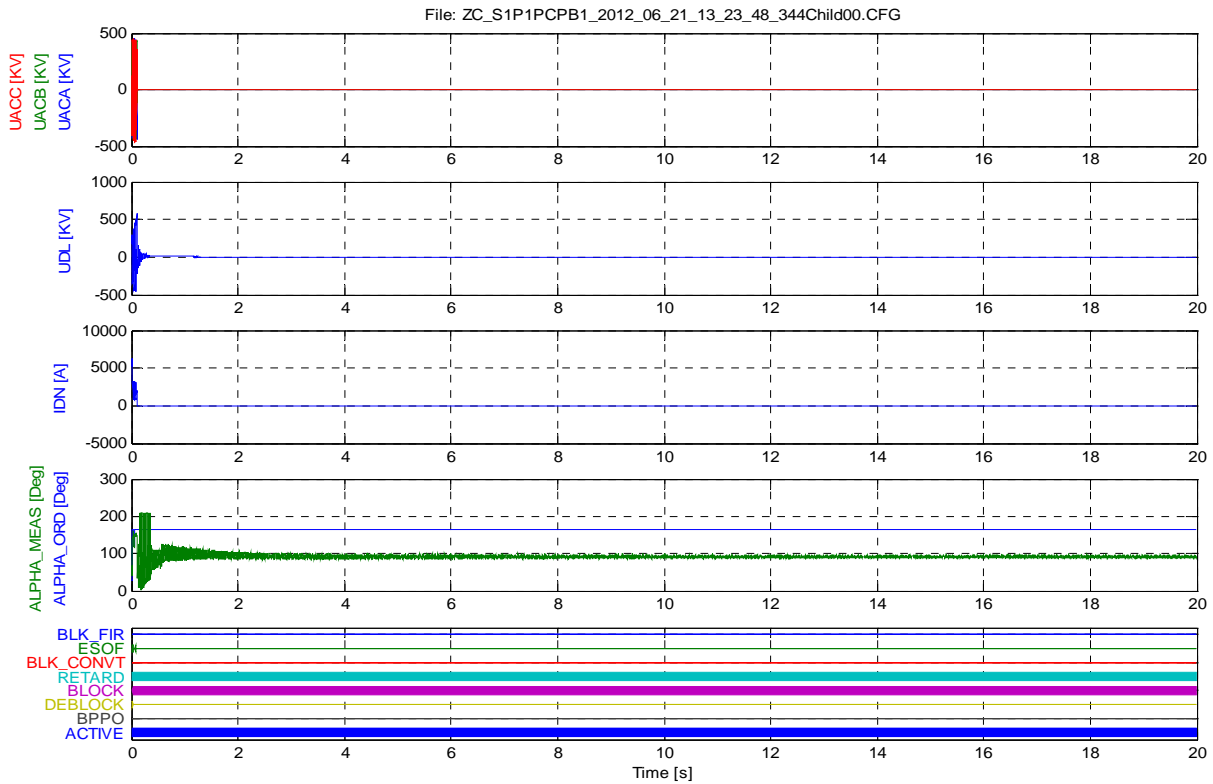


Figure 3. Rectifier station DC I pole 1 pole control B system wave record
图 3. 整流站直流 I 回极 1 极控 B 录波

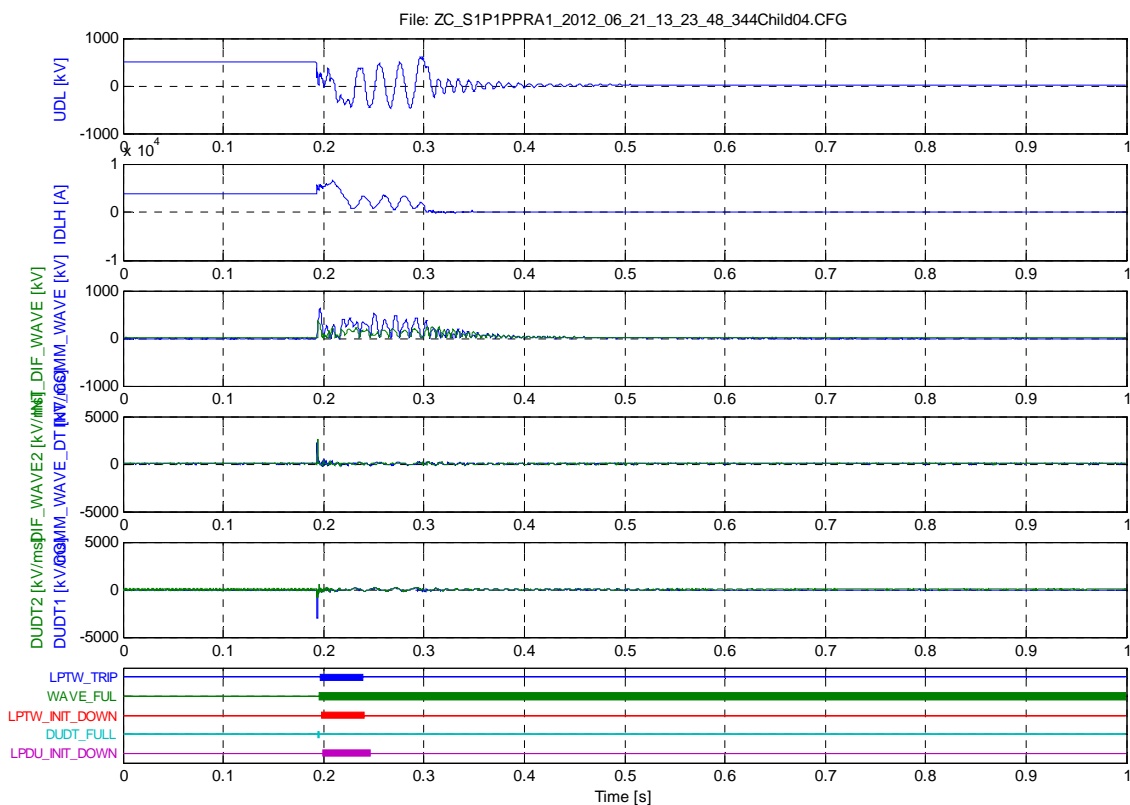


Figure 4. Rectifier station DC I pole 1 pole protection A system wave record
图 4. 整流站直流 I 回极 1 极保护 A 录波

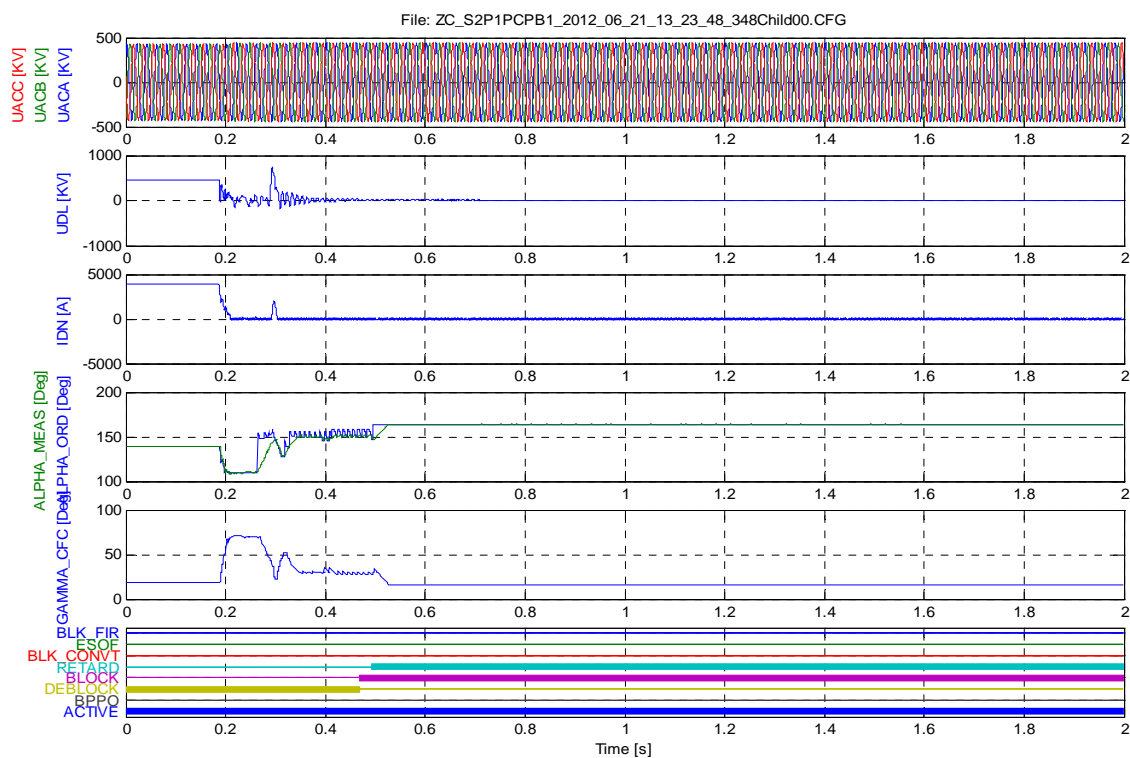


Figure 5. Inverter station DC I pole 1 pole control B system wave record
图 5. 逆变站直流 I 回极 1 极控 B 录波

溪洛渡送电广东直流输电工程直流线路故障时的控制保护策略分析

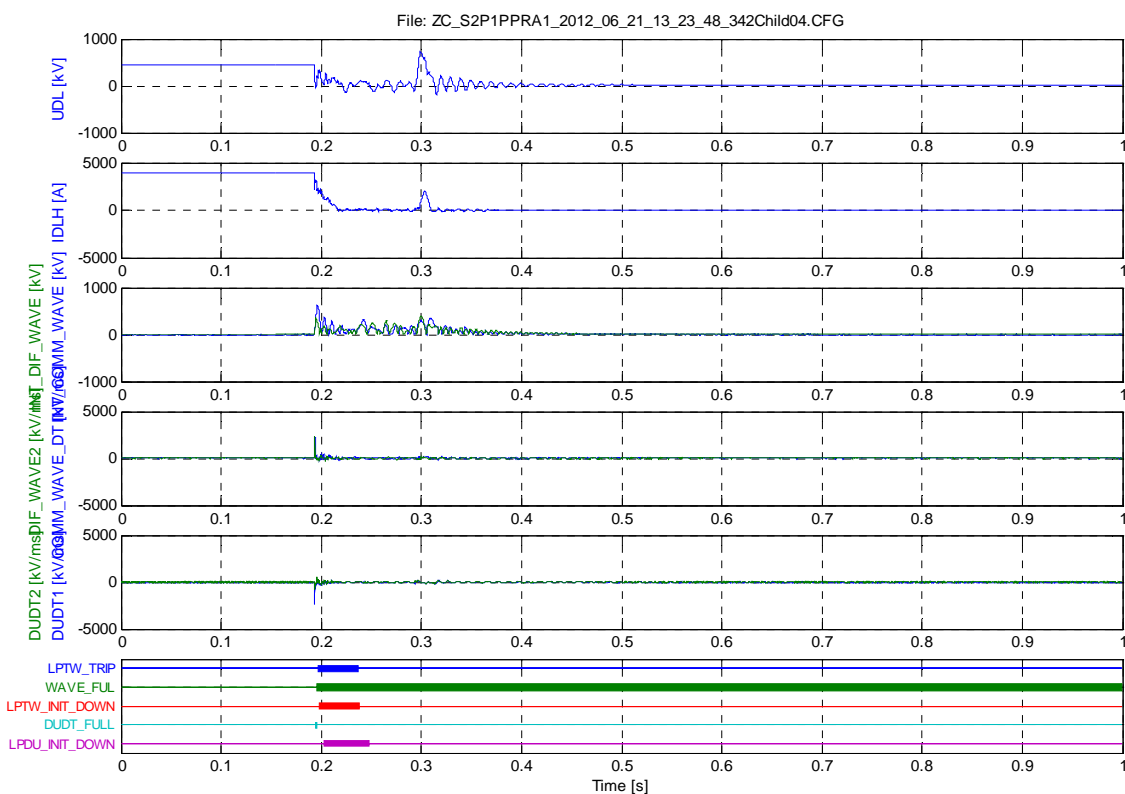


Figure 6. Inverter station DC I pole 1 pole protection A system wave record
图 6. 逆变站直流 I 回极 1 极保护 A 录波

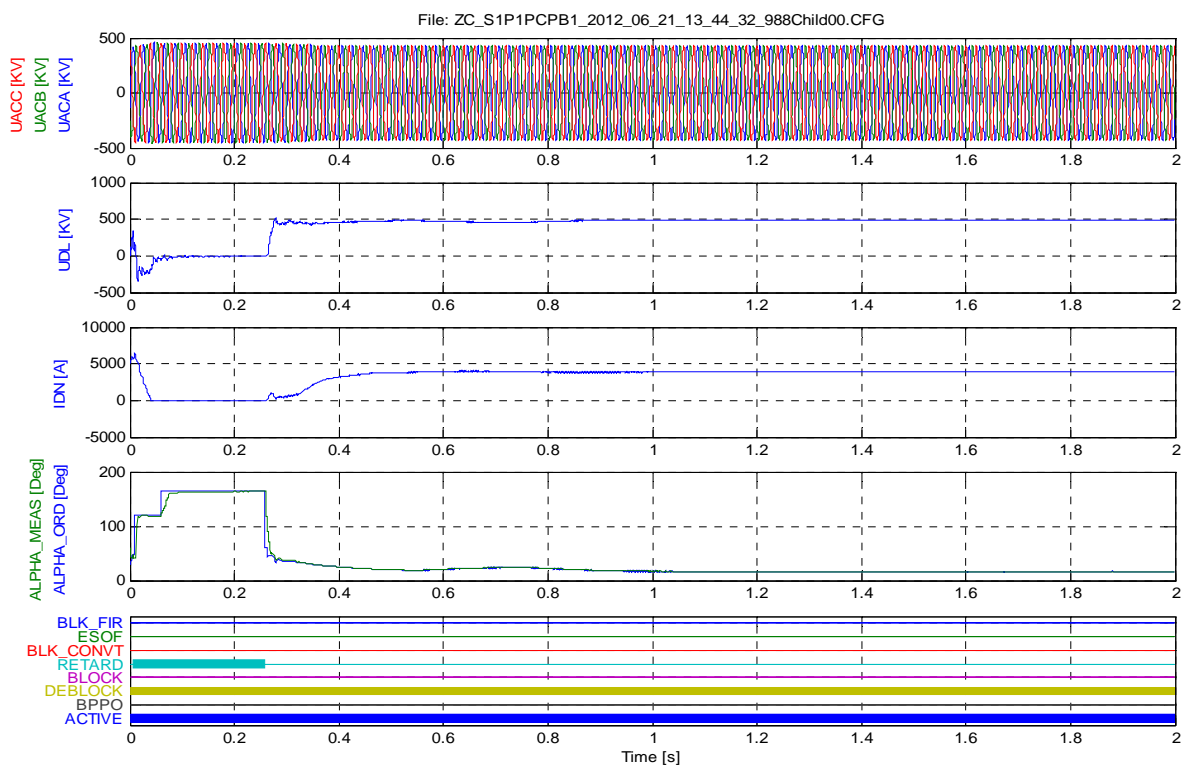


Figure 7. Rectifier station DC I pole 1 pole control B system wave record
图 7. 整流站直流 I 回极 1 极控 B 录波

溪洛渡送电广东直流输电工程直流线路故障时的控制保护策略分析

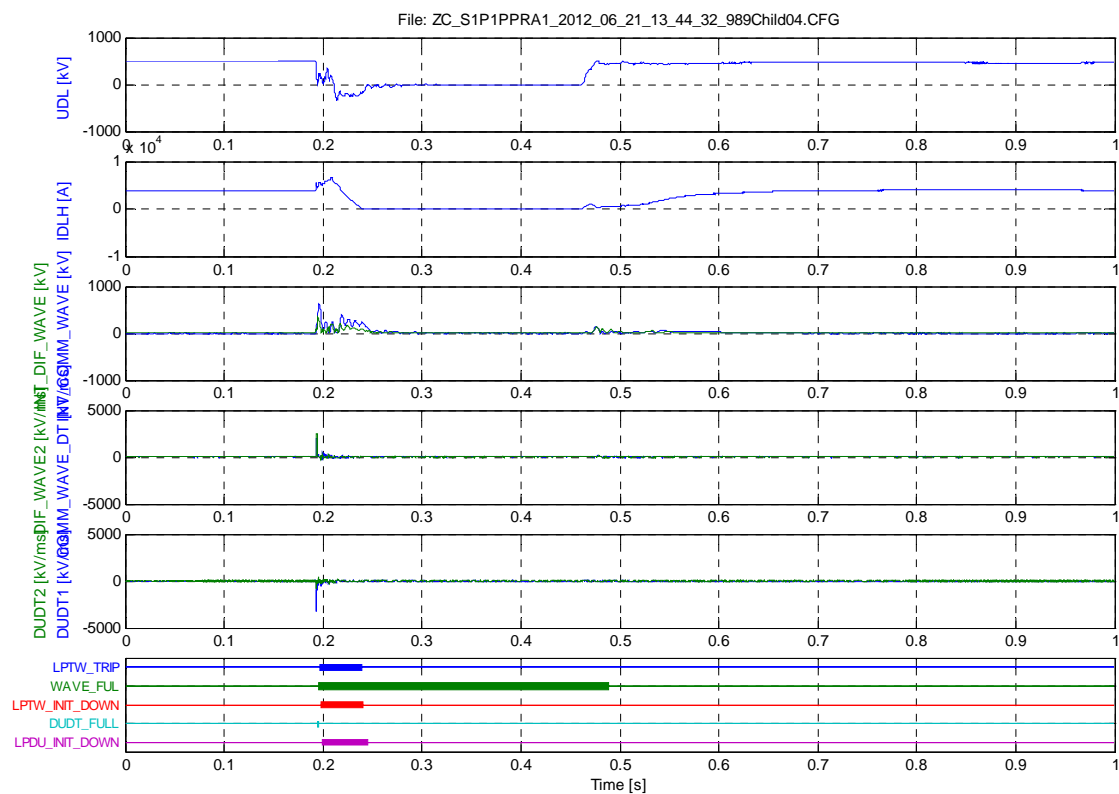


Figure 8. Rectifier station DC I pole 1 pole protection A system wave record
图 8. 整流站直流 I 回极 1 极保护 A 录波

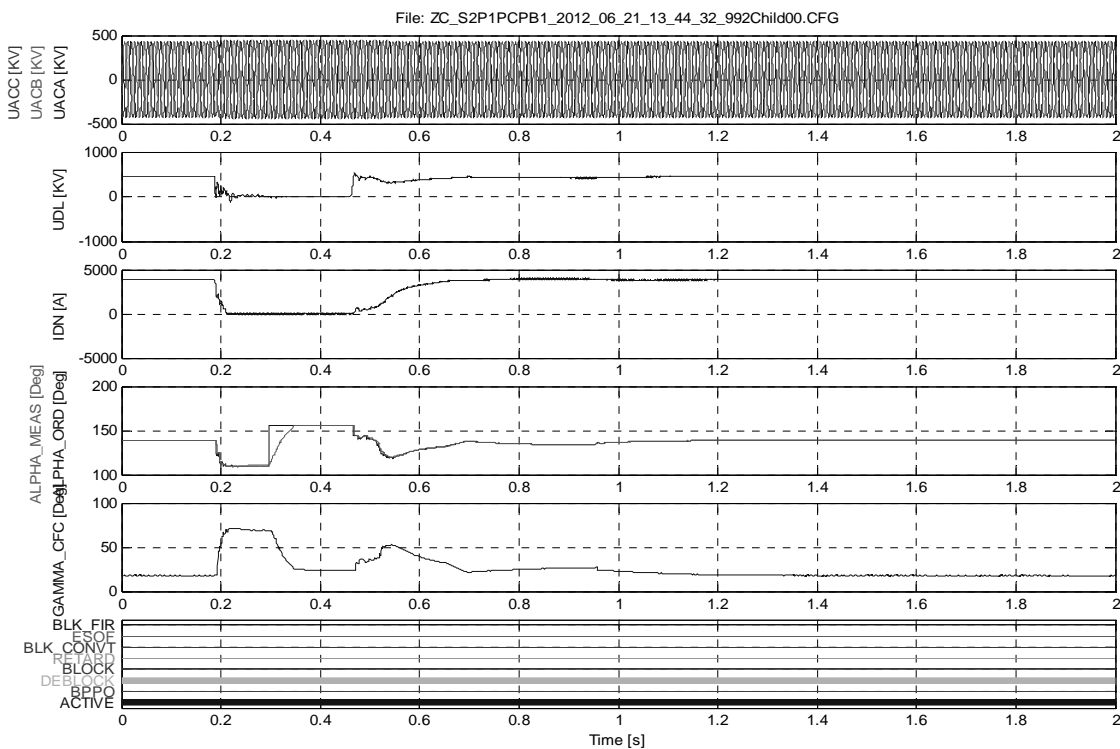


Figure 9. Inverter station DC I pole 1 pole control B system wave record
图 9. 逆变站直流 I 回极 1 极控 B 录波

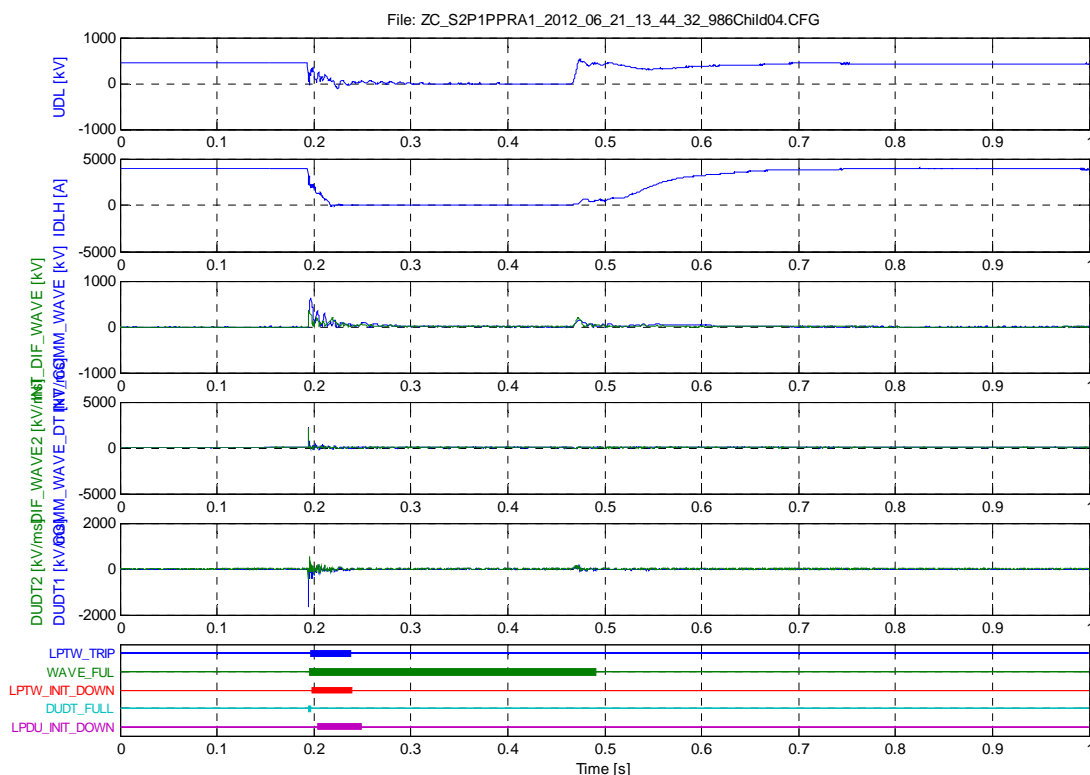


Figure 10. Inverter station DC I pole 1 pole protection A system wave record
图 10. 逆变器站直流 I 回极 1 极保护 A 录波

在试验过程中整流站线路行波保护和线路突变量保护动作，直流线路保护重新启动逻辑跳闸；逆变器站线路行波保护动作，收到对站 ESOF 信号。从录波可以看出，当直流系统发生事故闭锁重新启动成功 15 分钟内再出现任一极线路故障，则会闭锁该极的线路故障重新启动功能。

5.2. 闭锁重启成功 15 分钟后线路故障

试验模拟在站间通信正常情况下，直流双回四极 6400 MW 功率运行，直流 II 回双极闭锁，15 分钟后直流 I 回极 1 线路故障，故障持续时间 100 ms，得到的波形如图 7~10 所示。定值设置同 5.1。整流站线路行波保护和线路突变量保护动作，直流线路保护重新启动逻辑重启成功；逆变器站线路行波保护和线路突变量保护动作。从录波可以看出，当直流系统发生事故闭锁重新启动成功 15 分钟后再出现任一极线路故障，则此时该极的线路故障重新启动逻辑可以重启成功。

6. 结论

本文分析了直流线路故障的特点、直流线路保护

的配置策略和方案，以及和直流线路故障相关的直流线路故障重新启动逻辑，得出以下结论：(1) 两回直流系统一回发生直流线路故障，系统故障及故障重新启动过程中，直流协调控制功能起作用，损失的直流功率由健全系统进行补偿，故障重启成功之后，系统能够恢复故障前的运行状态；(2) 两回直流系统同时发生同极性直流线路中点接地故障，电压和电流的变化不能满足常规直流工程的线路保护定值，不能启动直流线路故障重新启动逻辑功能，需对保护定值进行优化；(3) 两回直流系统发生异极性直流线路故障时，直流线路保护可以正确动作；(4) 直流系统双导线并联运行，直流保护可以正确检测到直流线路各种故障；(5) 常规直流保护方案不能检测出两回直流系统同极性直流线路碰线故障，同塔双回工程需针对同极性直流线路故障完善保护判据。

参考文献 (References)

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 浙江大学发电教研组. 直流输电(第二版)[M]. 北京: 水利电

- 力出版社, 1985.
- [3] 李峰, 管霖, 钟杰峰等. 广东交直流混合电网运行稳定性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 1-4.
- [4] 刘红超, 李兴源, 王路等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
- [5] 毛晓明, 管霖, 张尧等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.
- [6] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [7] 中国南方电网超高压输电公司. 高压直流输电现场实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [8] 王明新, 谢国平. 高压直流输电开路试验原理的讨论[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 11-14.
- [9] 杨秀, 陈陈. 直流输电系统故障对发电机轴系扭振的影响[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 6-10.
- [10] 李金丰, 李广凯, 赵承勇等. 三相电压不对称时带有电压源换流器的 HVDC 系统的控制策略[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 16-20.
- [11] 王雁凌, 任震, 王官洁. 静止无功补偿器在高压直流系统中的应用[J]. 电网技术, 1996, 20(12): 9-13.
- [12] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
- [13] 朱艺颖, 曾南超, 王明新等. 葛南直流输电改造工程控制系统静态特性的试验研究[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 1-6.