

# 交流系统故障导致直流线路保护动作的分析

余江, 周红阳, 黄佳胤, 王斌

(中国南方电网电力调度通信中心, 广州 510623)

**摘要:** 利用直流保护的数字式波形回放系统, 分析了2008年6月18日广东电网罗洞变电站发生500 kV电流互感器爆炸事故期间高坡站的直流线路行波保护和直流线路电压突变量的保护动作行为。按照直流保护动作原理和逻辑, 直流保护的动作为符合设计逻辑, 但违背了交流系统故障期间直流保护应可靠地不动作的设计规范, 并就直流线路电压突变量保护提出了改进方案。所提出的增加保护动作延时的措施已用于天广、高肇、兴安直流工程。

**关键词:** 电流互感器; 电压突变量保护; 行波保护; 谐波; 动作延时; 定值

## Analysis on HVDC Line Protection Action due to AC System Fault

YU Jiang, ZHOU Hong-yang, HUANG Jia-yin, WANG Bin

(CSG Power Dispatching & Communication Center, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** With digital fault record replayer of HVDC protection, the article analyzes the tripping of DC line voltage deviation protection in Gaopo Station of Guangdong Power Grid, which occurred due to the blast of 500 kV TA at Luodong Station on June 18, 2008, pointing out that in the situation  $27du/dt$  worked in agreement with the protection logic, but this breached the crucial design principle that HVDC line protection function should not release during AC system faults. Certain measures for enhancing  $27du/dt$  protection are presented, and the measure to increase time delay of  $27du/dt$  has been adopted in the TSQ, GG1 and GGII projects.

**Key words:** current transformer; undervoltage sensing protection; wavefront protection; harmonic; time delay; threshold

### 1 交流系统故障致直流线路保护动作情况

2008年6月18日8时19分广东电网罗洞变电站5033断路器W相电流互感器(TA)发生爆炸, 造成500 kV 2号母线、3号主变压器跳闸, 500 kV罗北乙线L1相跳闸重合成功。高肇直流高坡整流站双极3套低电压保护动作, 双极降压70%再启动成功。故障前高肇直流系统运行方式为双极大地回线模式, 直流功率1900 MW。

根据现场故障勘察结果, 并结合录波数据、SOE等信息, 整个故障过程可以分为3个阶段。

第一阶段: 5033断路器W相TA接地故障, 3号主变压器差动保护动作, 跳开5032和5033断路器, 隔离故障TA。

第二阶段: 5033断路器W相TA故障后778 ms, 5033断路器VW相接地故障, 2号母线差动保护正确动作, 切除故障。与此同时, 高肇直流高坡整流站线路低电压保护动作。肇庆逆变站无保护动作。

第三阶段: 5033断路器W相TA故障后1683

ms, 罗北乙线L1相发生瞬时接地故障, 两侧线路保护正确动作, 两侧断路器重合闸成功。

交流系统故障期间, 直流线路电流及直流线路电压波形中电压、电流出现扰动, 时间与交流系统故障间隔时间基本吻合。极II和极I的直流线路电压、电流波形以及回放结果相似。以极I录波数据为例进行分析显示, 直流线路行波保护未动作, 符合规范书中“交流系统故障直流线路保护应可靠不动作”的要求。

### 2 直流线路保护分析

#### 2.1 直流线路电压突变量保护定值及判据

直流线路电压突变量保护( $27du/dt$ )的动作方程为  $U_{dl} < \Delta$  after  $du/dt > \Delta$ 。保护出口方式是进入再启动顺序操作。高肇直流目前直流线路电压突变量保护定值如表1。

3次故障中各判据的响应情况如表2所示。高坡站第1、第3次故障中直流线路电压变化率均未达到定值, 低电压保护不动作; 第2次故障中  $U_{dl}$

和  $du/dt$  两个元件都动作, 低电压保护经 20 ms 延时出口启动直流线路再启动。肇庆站 3 次故障中直流线路电压变化率均未达到定值, 低电压保护不动作。

表 1 直流线路电压突变量保护定值表

Tab. 1 Setting of Undervoltage Sensing Protection (27du/dt)

位置	$(du/dt) / (kV \cdot ms^{-1})$	$U_{dl} / kV$	动作延时 / ms
整流侧	42.5/0.15	125	20
逆变侧	42.5/0.15	125	20

表 2 高坡极 I 的 27du/dt 保护各判据动作情况

Tab. 2 Values of each Criteria of 27du/dt of Pole 1

换流站名	故障次序	电压变化率元件		低电压元件		保护动作行为
		$(du/dt)_{max} / (kV \cdot ms^{-1})$	达到定值时间 $t/ms$	$U_{dl,min} / kV$	达到定值时间 $t/ms$	
高坡	1	25 / 0.15		1.6	-768	不动作
	2	44 / 0.15	34	0	22	动作
	3	21 / 0.15		94	947	不动作
肇庆	1	30.7 / 0.15		2.4	-772	不动作
	2	23.7 / 0.15		0	18	不动作
	3	24.5 / 0.15		69.5	943	不动作

注: 表中时间标尺以 5033 断路器发生 VW 相接地故障为零时刻。

## 2.2 直流线路电压突变量保护存在问题

虽然根据录波分析, 高坡站双极直流线路电压突变量保护 (27du/dt) 的动作符合软件设计逻辑, 却违背了交流系统故障期间, 在确保直流设备安全的前提下直流保护应可靠不动作的设计原则。由此暴露出直流线路电压突变量保护还存在问题。

1) 躲暂态过程能力差。交流系统发生故障时, 尤其是发生不对称故障时, 会导致直流线路电压的暂态过程比较复杂, 而直流线路电压突变量保护仅采用电压变化率元件和低电压元件, 在某些直流线路电压畸变比较严重的测量点判据容易满足, 可能导致直流线路电压突变量保护动作出口。第二次故障初期直流线路电压降低的变化率最大值只有 23.6 kV / 0.15 ms, 小于保护定值 42.5 kV / 0.15 ms, 但在故障后 34 ms 电压变化率达到保护定值。

图 1 是第 2 次故障前及故障后 28 ms 时, 极 I 换流变压器交流系统侧的母线电压以及直流线路电流、电压的谐波频谱分析图。图中纵坐标  $U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}$  分别为交流母线 L1, L2, L3 三相电压的二次值,  $I_{DL}, U_{DL}$  分别表示直流线路的电流和电压的一次值, 横坐标为基波和各次谐波频率。可以看出, 无论是

交流侧还是直流侧, 电压都含有丰富的谐波成分。

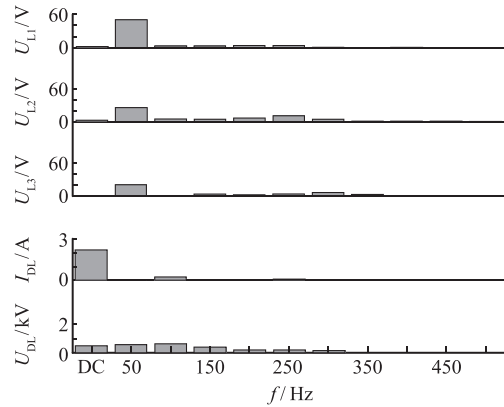


图 1 交、直流两侧的谐波电压、谐波电流频谱  
Fig 1. Harmonic Spectra for Voltage and Current at Both Sides of AC and DC

除交流系统的谐波干扰外, 长距离的直流线路发生故障时两侧感受到的线路电压变化波形不同步, 高频部分的波传导过程十分复杂, 而且, 如果直流线路电流中的谐波恰好在直流线路的固有谐振频率附近, 会导致直流线路谐波电压幅值放大<sup>[1]</sup>。

2) 电压变化率定值选取困难。计算直流线路保护中的电压变化率定值时, 应满足以下条件: 要求躲过交流系统故障时直流线路中的扰动; 保证线路末故障时有足够灵敏度。

受上述两个条件限制, 保护定值的取值范围很小。以高肇直流为例加以说明。根据 PSCAD/EMTDC 仿真计算结果, 交流系统故障时的高坡站感受的电压变化率最大值为 28 kV/0.15 ms, 肇庆站感受的电压变化率最大值为 40 kV/0.15 ms; 直流线路肇庆站出口故障时高坡站感受的电压变化率最小值为 45 kV/0.15 ms, 直流线路高坡站出口故障时肇庆站感受的电压变化率最小值为 48.5 kV/0.15 ms, 目前取值 42.5 kV/0.15 ms。

## 3 直流线路电压突变量保护改进方案

直流输电系统中的各电气量是通过定值保证选择性的。在直流线路保护原理未有重大突破的现阶段, 可以考虑采取适当的闭锁条件, 避免在交流系统故障持续期间直流线路保护误动作。

### 3.1 采取适当的闭锁条件改进保护

#### 3.1.1 几种闭锁方案

1) 利用交流母线电压闭锁。当交流电压明显

低于正常运行值时(例如 0.8 p.u.), 直流线路电压突变量保护以较长延时(例如 0.4 s)出口, 动作长延时要考虑主保护动作时间、断路器断开时间、失灵保护动作延时和上一级断路器断开时间。当交流电压高于某一数值时(例如 0.8 p.u.), 直流线路电压突变量保护以较短延时出口, 短延时要躲过对侧交流系统电压判别时间和传输延时, 防止  $27du/dt$  保护在判断出交流系统故障之前动作出口。为保证故障点距离换流站比较近时可以快速动作, 可以考虑增加一快速段, 当电压变化率比较高时不再判断交流系统是否有故障。

6月18日罗洞变电站断路器 W 相 TA 爆炸的 3 个故障阶段, 换流母线的最小值(取 L1, L2, L3 三相最小值)分别为 120 kV, 130 kV 和 143 kV, 均不足 0.8 p.u., 而且三个故障阶段的持续时间均不足 100 ms。如果按照交流电压低于 0.8 p.u.,  $27du/dt$  的动作延时自动切换到 0.4 s, 可以避免 6 月 18 日故障中  $27du/dt$  保护误动作。

2) 利用极控信息量闭锁。逆变站交流系统故障时, 逆变站换流母线电压下降, 有可能导致换相失败。除了利用交流母线电压, 直流极控中也有一些信息量可以间接反映交流系统故障, 例如逆变侧的换相失败信号。保护动作延时要考虑判别时间及通道传输延时。

3) 差流闭锁。直流线路发生故障, 整流侧直流线路电流上升, 逆变侧直流线路电流下降, 两侧的电流差值较大; 交流系统发生故障时, 两侧的直流线路电流同步增大或减小。然而两侧直流线路电流响应特性不一致, 动作延时必须大于交流系统故障时直流线路中差流持续时间。

4) 100 Hz 分量闭锁。交流系统发生不对称故障时, 会在换流母线上产生负序电压, 从而导致直流线路电压、电流中出现 100 Hz 分量。采用 100 Hz 作为闭锁条件的优点在于可以仅采用本站的信息量, 不依赖于通道, 缩短闭锁时间。

### 3.1.2 闭锁方案的可行性分析

上述各方案中, 利用极控信息量闭锁的方案仅适用于逆变站交流系统故障, 只有在逆变站交流系统故障极控才发换相失败信息, 整流侧交流系统故障时暂未找到合适的信号。交流系统故障时两站的直流线路电流差值存在时间可长达一百多毫秒<sup>[2]</sup>, 采用差流闭锁的方案将使得保护动作时间过长。100

Hz 分量闭锁方案的不足之处在于 100 Hz 的判据定值的确定没有依据。综合考虑各方面因素, 利用交流母线电压闭锁较为可行。

## 3.2 改进保护可考虑的临时措施

考虑到直流线路保护逻辑改进需要经过大量的仿真实验验证, 实施周期比较长。在具体方案完善前, 可以考虑采取增加延时和提高动作门限值的临时措施。

### 3.2.1 增加延时

换流站交流母线电压降低时直流线路电压也会受到影响, 而当交流系统故障清除之后, 换流站交流母线电压和直流线路电压同时恢复正常, 此时直流线路电压突变量保护中的低电压元件不再满足。可以考虑通过直流线路电压突变量保护的動作延时躲过交流系统故障的暂态过程, 避免交流系统故障持续期间直流线路电压突变量保护动作。

### 3.2.2 提高动作门限值

提高  $27du/dt$  保护和行波保护中的直流线路电压变化率判据定值, 保证直流线路上任一点故障时, 至少一侧的  $27du/dt$  保护和行波保护可以动作。或者直流线路电压突变量保护 ( $27du/dt$ ) 和行波保护中的直流线路电压变化率判据采用不同的原则整定, 对于直流线路电压突变量保护 ( $27du/dt$ ) 中的直流线路电压变化率判据, 优先考虑可靠躲过 500 kV 交流系统故障时的扰动整定; 行波保护中的直流线路电压变化率判据则优先保证直流线路故障时有足够灵敏度。

## 3.3 最终选定的临时措施

经过分析, 提高动作门限值的思路存在以下不足: 保护定值与交直流系统参数、极控系统以及故障暂态过程有关, 定值的选取十分困难, 此次故障中电压变化率元件在故障后 34 ms 才动作, 而且仅一个尖峰脉冲满足条件; 直流线路末端故障时灵敏度不足。最终选定的临时措施主要考虑合理延长  $27du/dt$  保护动作延时。

图 2 显示直流线路电压突变量保护的部分逻辑。图中 UVP10.X1 是电压变化率元件定值, UVP30.T 是电压变化率条件满足后的展宽时间, UVP40.ML 是低电压元件定值, UVP75.T 是保护动作延时。根据逻辑图, 当交流系统故障清除后, 直流线路电压恢复至管脚 UVP40.X2 所给参数时,  $27du/dt$  保护通过 UVP70 模块瞬时复归。可以考虑

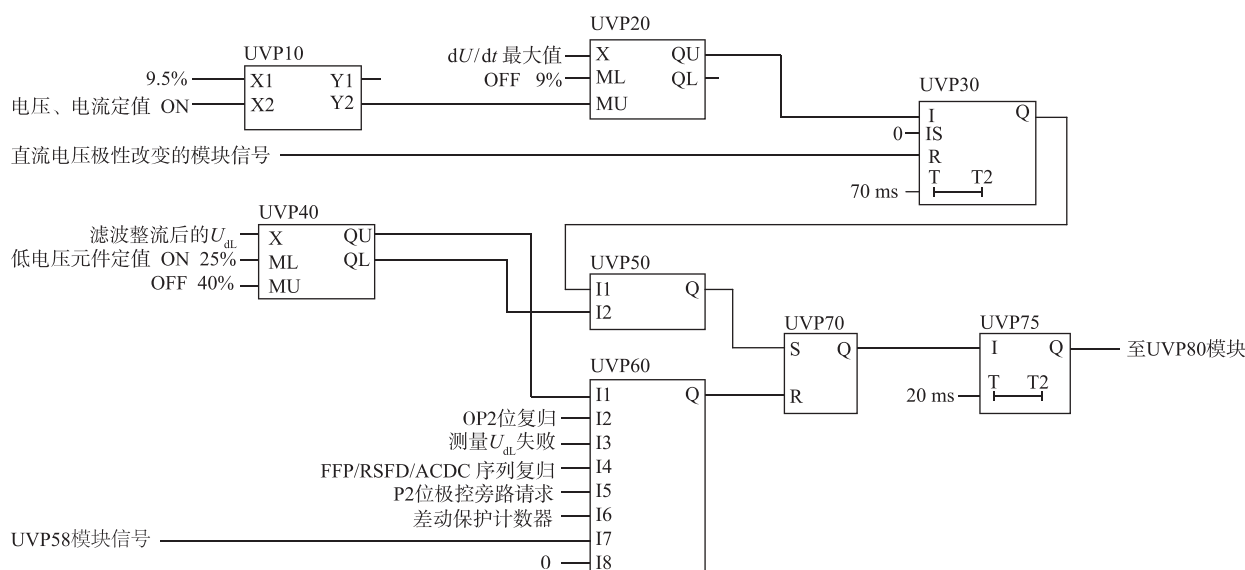


图2 27du/dt保护逻辑图(部分)

Fig. 2 Logic of 27du/dt (a Part)

27du/dt 的动作延时与交流系统主保护动作、清除故障的时间相配合。具体措施如下:

1) 27du/dt 的动作延时由 20 ms 延长至 110 ms, 与交流系统主保护的動作、清除故障时间、以及直流线路故障后的去游离时间相配合;

2) 电压突变量满足动作条件后的展宽由 70 ms 延长至 160 ms, 与 27du/dt 保护动作延时相配合, 确保直流线路故障时保护可以动作出口。展宽时间必须大于行波保护动作后的复位延时。

经过仿真试验验证, 采用该措施可以避免“6·18”故障中直流线路保电压突变量保护误动, 而且基本上不会对直流线路故障时直流线路保护的整体动作行为产生不良影响<sup>[3]</sup>。目前该措施已在天广、高肇、兴安直流工程实施。

## 4 结 语

在 2008 年 6 月 18 日罗洞变电站发生 500 kV 电流互感器爆炸事故过程中, 高肇直流高坡站直流线路电压突变量保护动作。经过录波分析, 保护动作符合软件设计逻辑, 但违背了交流系统故障期间直流保护应可靠不动作的设计规范。为了提高直流线路电压突变量保护躲交流系统暂态过程的能力, 提出可以利用交流母线电压、极控信息量或者直流线路差流作为附加判据, 在交流系统故障持续期间闭锁直流线路电压突变量保护。初步分析表明, 利用交流母线电压的方案最为合理。

考虑到保护软件改进实施周期较长, 提出基于现有保护逻辑, 通过增加延时或提高动作门限值的临时措施, 避免交流系统故障期间直流线路电压突变量保护动作。经过试验验证, 增加延时的方案较为可靠, 已在天广、高肇、兴安直流工程中采用。

## 参考文献:

- [1] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 南方电网直流 100 Hz 保护的改进措施研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 96-100.  
ZHOU Hong-yang, YU Jiang, HUANG Jia-yin, et al. Study on Improvements of Performance of 100 Hz Protection in China Southern Power Grid [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2007, 27(12): 96-100.
- [2] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 17-21.  
ZHOU Hong-yang, YU Jiang, HUANG Jia-yin, et al. Issues over DC Line Differential Protection [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.
- [3] 郭琦, 韩伟强, 黄立滨, 等. 直流低电压保护延时定值校核 RTDS 仿真研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 32-34.  
GUO Qi, HAN Wei-qiang, HUANG Li-bin, et al. RTDS Simulation on Evaluation of Delay Time Settings of DC Under-Voltage Protection [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 32-34.

收稿日期: 2008-12-01

作者简介:

余江(1975-), 女, 湖北宜昌人。高级工程师, 从事继电保护运行管理及研究工作。E-mail: yujiang@csg.cn。

周红阳(1969-), 男。高级工程师, 从事继电保护生产运行管理及研究工作。

黄佳胤(1978-), 男。工程师, 从事继电保护生产运行管理及研究工作。