

天广直流输电系统线路高阻接地故障研究

朱韬析¹, 彭武²

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 湖北省黄冈电力勘测设计院, 湖北 黄冈 438000)

摘要: 基于天广直流输电工程直流线路保护和低压限流功能, 结合事故实例, 对不同接地阻抗值的线路高阻接地故障的过程和保护动作情况进行了分析; 最后, 针对某些情况下, 后备保护会先于线路高阻接地主保护——线路差动保护动作、直接闭锁直流系统的缺陷, 提出了改进建议。

关键词: 直流输电; 线路高阻接地; 直流线路保护

Research on high impedance earth fault of Tian-Guang HVDC transmission project

ZHU Tao-xi¹, PENG Wu²

(1. GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China;
2. Huanggang Electric Power Exploration and Design Institute, Huanggang 438000, China)

Abstract: Based on the DC line protection and VDCL(voltage dependent current limit) function and combined with examples occurred in Tian-Guang HVDC transmission project, high-impedance earth faults of different impedance are analyzed. At the end of this paper, aiming at the deflection that sometimes backup protections would act and block DC system before DC line differential protections act and initialize DFRS, some useful suggestions are proposed.

Key words: HVDC; high-impedance earth faults; DC line protection

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)23-0137-04

0 引言

直流输电具有传送功率大、线路造价低、控制性能好等优点, 是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段^[1]。近年来, 随着天广、贵广直流输电系统的相继投产, 直流输电工程在我国南方电网发挥了越来越重要的作用。但是, 直流线路距离长、跨越地区的情况复杂, 运行经验证明, 属于较易出现故障的设备。因此, 直流线路保护的正确动作与否, 对于整个电网的正常运行起着非常重要的作用^[2]。

直流线路的保护通常设有行波保护、低电压保护、差动保护^[3]等, 对于直流线路发生的各种故障能够快速准确反应。由于线路故障大多是瞬时的, 所以控制系统中通常会设置线路故障重启动功能(DFRS)——相当于交流线路的故障跳闸与自动重合闸^[4], 如果线路上发生的是永久性故障, 则在重启动后故障检测和控制系统再次动作, 闭锁相应极; 在大多数情况下, 线路故障重启动能获得成功, 恢复正常送电。

天广±500 kV直流输电工程全长960 km, 额定容量为双极1 800 MW, 自2001年6月双极投运以来,

输送电量累计超过300亿度, 为西电东送发挥了重要而积极的作用^[5]。据统计, 自2004年至今, 天广直流系统共发生20次线路故障, 其中重启动成功14次, 数据表明, 直流线路故障重启动功能可以在线路发生故障的情况下, 最大限度地保证系统的稳定。

近两年来, 天广直流输电系统发生数次由山火等原因引起的高阻接地故障, 每次故障发生后, 在配置的线路高阻接地主保护——线路差动保护动作、启动线路故障重启动过程之前, 均有其他后备保护先动作而导致直流系统直接闭锁, 对系统造成了一定的冲击。针对这一情况, 本文首先简介了天广直流输电线路保护以及VDCL(低压限流)功能的原理, 然后在事故实例的基础上, 对不同接地阻抗值的线路高阻接地故障的过程和保护动作情况进行了分析, 最后还探讨了如何针对上述缺陷改进天广直流线路保护。

1 线路主要保护配置简介

1.1 行波保护

行波距离保护采用故障后的行波, 使保护具有超高速动作特性, 而且利用行波折反射的特点可精确计算出故障距离, 同时兼作保护动作判别量和测

距输出结果，集保护和测距于一体^[1]，正因为拥有这些优点，天广直流输电系统选用了行波保护作为线路的主保护^[2,6]。

行波保护动作原理^[7,8]为：

$$dU/dt > 0.583 \text{ kV}/\mu\text{s};$$

$$\Delta U > 0.4 \text{ p.u.};$$

$\Delta I_{dL} > 0.15 \text{ p.u.}$ （整流侧）、 $\Delta I_{dL} > 0.4 \text{ p.u.}$ （逆变侧）。

其中： U 为高压直流线路电压， I_{dL} 为直流线路电流。

动作后果：启动直流线路故障重启动，两次重启动不成功后将闭锁相应极。

在双极运行时，由于抗干扰的原因，逆变侧行波保护退出运行^[6]。

1.2 低电压保护

低电压保护作为行波保护的后备保护，其动作原理^[7,8]为：

$$dU/dt > 0.583 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

$$U_{dL} < 0.25 \text{ p.u.}$$

动作延时：50 ms

动作后果：启动直流线路故障重启动，两次重启动不成功后将闭锁相应极。

1.3 直流线路差动保护

由于直流线路保护中的行波保护和低电压保护不能灵敏地反映线路高阻抗接地故障，直流线路差动保护是切除线路高阻故障的重要手段^[7,9]。其动作原理^[7,8]为：

$$|I_{dL} - I_{dL, \text{other station}}| > 0.05 \text{ p.u.}$$

式中： I_{dL} 为本站直流线路电流； $I_{dL, \text{other station}}$ 为对站直流线路电流。天广直流输电系统中线路差动保护动作的出口时间设置为 500 ms。

天广直流工程投运初期，采用的是载波通信，由于考虑到通信通道的不可靠，保护设计时采取了许多相应的线路保护闭锁的措施^[6]，如“传输同步故障延时”功能：在故障开始后如果65 ms内本站直

流线路电流的变化大于210 A，会认为是传输同步故障而闭锁直流线路差动保护600 ms，以防止在线路主保护动作或其它线路电流快速变化的情况下，线路两侧电流不同步导致线路差动保护误动^[9]。

所以，天广直流线路差动保护的動作延时实际为500 ms + 600 ms = 1.1 s。

动作后果：启动直流线路故障重启动，两次重启动不成功后将闭锁相应极。

1.4 极控低电压保护

在极控系统中还设置了低电压保护作为各种线路保护的后备保护，其动作原理^[7,10]为：

$$U_{dL} < 0.1 \text{ p.u.}$$

其中： U_{dL} 为本站直流电压，满足延时条件（整流侧300 ms，逆变侧6 s）后，闭锁相应极。

1.5 触发角过大保护

触发角过大保护是设置于极控系统内的附加后备保护之一，其动作原理为：

$$60^\circ < \alpha < 120^\circ$$

$$I_{dH} > 0.08 \text{ p.u.}$$

其中： α 为触发角， I_{dH} 为高压直流母线电流。满足延时时间1 s后，闭锁相应极。

2 VDCL（低压限流）功能简介

VDCL 功能是为了保证直流线路短路故障时两侧换流器仍能保持适当的电流，消耗一定的无功功率，使换流站不至于有过多的剩余无功功率（由无功补偿设备产生）流入交流系统，保持交流电压在允许范围内。这个特点对弱交流系统特别重要^[4]。

天广直流工程是通过如下方法实现这一功能^[7,11]：

将 U_{act} 除以 U_{ref} ，再根据如图 1 所示的曲线决定对应的直流电流值，然后和 I_{ref} 进行比较，选择较小的作为最后进行控制的 I_{ref} 。

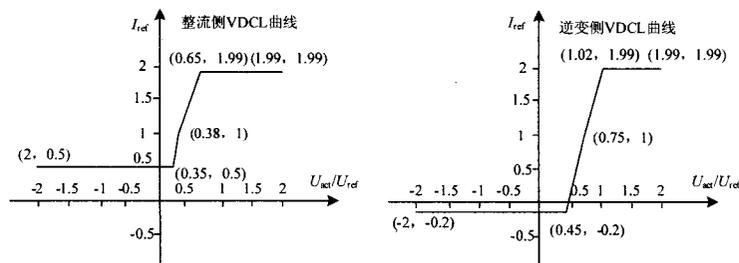


图 1 VDCL 功能曲线

Fig.1 VDCL curve

其中： U_{act} 为实际直流电压， U_{ref} 和 I_{ref} 分别为直流电压和直流电流的设定值。

3 高阻接地故障分析

天广直流线路距离长、跨越地区的情况复杂, 较易发生因线路对周围树枝、毛竹放电以及火烧山火焰对线路放电造成的高阻接地故障。结合故障录波, 对不同接地阻抗值的直流线路高阻接地故障, 分析如下 (在此, 不妨假定直流输电系统双极满负荷运行):

(1) 接地电阻较小, 约在 55 Ω 以下:

2007 年 05 月 09 日, 天广直流极 I 便发生了一次这样的高阻接地故障, 故障录波图如图 2 所示。

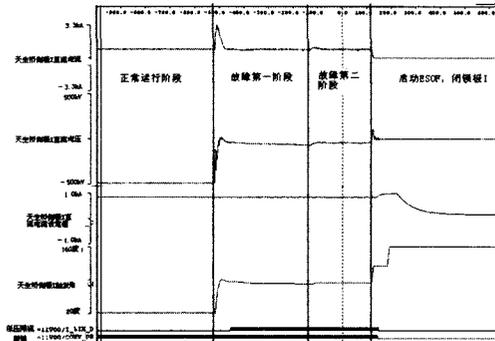


图 2 整流侧事故暂态录波图
Fig.2 Recorded curves in rectifier station

根据暂态录波图分析如下:

故障发生后, 整流侧 (天生桥站) 线路电流大幅上升, 在定电流控制的作用下, 极控迅速增大触发角 α ; 与此同时, 电压大幅下降, 因此, VDCL (低压限流) 动作, 根据上文所述的原理, 将极 I 直流电流参考值设定为 0.5 p.u. (900 A);

由于接地电阻约为 55 Ω 左右, 所以, 整流侧在定电流控制的作用下, 能基本稳定在线路电压约为 -50 kV、直流电流约为 900 A、触发角约为 80° 的运行状态。

如图 2 所示的故障的第一阶段, 接地阻抗可能略大于 55 Ω, 所以直流电压绝对值也略高于 50 kV; 而在故障的第二阶段, 接地电阻有所下降, 低于 55 Ω, 导致直流电压绝对值小于 50 kV, 满足如上文所述的极控直流低电压保护的延时条件 (0.3 s) 后, 闭锁了相应极。

所以, 较低阻抗的高阻接地故障, 可能会躲过灵敏度不够的行波保护、线路低电压保护; 满足极控低电压保护的动作条件后, 它会先于线路差动保护和触发角过大保护动作, 闭锁直流系统。

(2) 接地电阻稍大, 约为 100 Ω 左右:

2006 年 11 月 01 日, 天广直流极 I 便发生了一次这样的高阻接地故障, 故障录波图如图 3 所示。

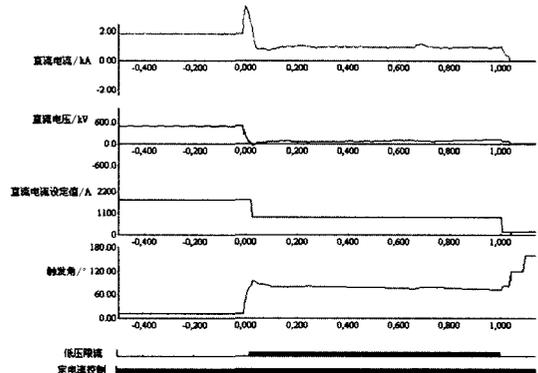


图 3 天生桥侧极 II 整流侧事故暂态录波图
Fig.3 Transient waveform in rectifier side of Tianshengqiao

根据暂态录波图分析如下:

同样, 故障发生后, 整流侧 (天生桥站) 线路电流大幅上升, 在定电流控制的作用下, 极控迅速增大触发角 α ; 与此同时, 电压大幅下降, 因此, VDCL (低压限流) 动作, 将极 I 直流电流参考值设定为 0.5 p.u. (900 A);

由于接地电阻约为 110 Ω 左右, 所以, 整流侧在定电流控制的作用下, 基本稳定在直流线路电压约为 100 kV、直流电流约为 900 A、触发角约为 70° 的运行状态; 持续 1 s 后, 达到触发角过大保护的動作时限, 从而启动闭锁。

这种情况下的低阻接地故障, 躲过灵敏度不够的行波保护、线路低电压保护后, 由于接地电阻相对较大, 所以直流电压并不满足极控低电压保护的動作条件; 但是, 触发角过大保护仍会先于线路差动保护动作, 闭锁直流系统。

(3) 接地电阻较大, 大于 100 Ω:

天广直流输电系统投运以来, 并未发生过这类故障, 所以只能根据控制和保护原理定性分析:

故障发生并启动 VDCL 后, 由于接地电阻太大, 整流侧将在定电流控制的作用下减小触发角、升高直流电压; 一方面, 触发角可能减小到一定程度后无法再降低; 另一方面电压升高后, 可能会转为定电压控制, 从而又降低电压。但是总的来说, 此时只涉及到控制方式的转化, 暂不会导致保护动作。

此时, 逆变侧电流同样会有大幅下降, 因此满足延时条件后, 直流线路差动保护动作, 启动线路故障重启动。如果线路重启动不成功, 闭锁直流系统。

这种情况下, 直流线路差动保护也可以可靠动作。

4 结论

本文根据天广直流输电系统的控制和保护原

理, 结合实际故障录波, 对不同接地阻抗值的线路高阻接地故障的过程及保护动作情况进行了分析。运行经验和分析结果表明, 天广直流输电工程的保护系统, 能比较准确地检测线路高阻接地故障, 有效地保护了一次主设备。

但由于行波保护和线路低电压保护灵敏度不够, 往往无法判别出高阻接地故障; 而直流线路差动保护动作时延太长^[6], 发生部分高阻接地故障时, 在线路差动保护动作、启动线路故障重启之前, 后备保护如极控低电压保护、触发角过大保护已经动作、直接闭锁了直流系统, 丧失了通过线路故障重启、可能恢复正常运行的机会, 对整个系统带来了一定的冲击。

对此, 可以考虑采取以下改进措施:

(1) 取消直流线路差动保护的“传输同步故障延时”功能

天广直流工程投运初期, 采用的是载波通信, 由于考虑到通信通道的不可靠, 保护设计时采取了许多相应的线路保护闭锁的措施, 如“传输同步故障延时”功能, 导致动作延时过长。在天广光纤工程投产后, 所有保护信号均走光纤通道, 大大提高了通信通道的可靠性^[12]。因此, 可以在软件设计上适当优化, 减少不必要的闭锁措施, 提高线路差动保护的灵敏性。改善直流线路差动保护的动作延时条件^[6]。

(2) 改善直流线路差动保护的动作延时

直流线路差动保护采用延时 500 ms 出口, 在采取光纤通信通道后, 完全可考虑缩小延时, 以充分发挥直流线路差动保护对高阻抗接地故障的相对灵敏优势^[6]。

(3) 优化直流线路主保护和后备保护的配合

可以通过改善触发角过大保护、极控低电压保护与线路差动保护的配合, 如适当调整动作时间、增加合理的闭锁条件, 以保证保护动作的可靠性和准确性。

参考文献

- [1] 金玉生, 李学鹏, 马彦伟. 基于小波变换的 HVDC 线路行波距离保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (18): 52-56
QUAN Yu-sheng, LI Xue-peng, MA Yan-wei. Distance Protection Scheme with Traveling Wave for HVDC Line Based on Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (18): 52-56.
- [2] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (14): 96-99.
- [3] 天广直流输电工程极控维护手册[Z]. 1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Maintenance Manual of Pole Control[Z]. 1999.
- [4] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [5] 丁钊, 韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-54.
DING Zhao, HAN Wei-qiang. Summary of Bipolar Operation Situation of Tian-Guang DC Power Transmission System[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-54.
- [6] 刘东, 吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1 (5): 57-60.
LIU Dong, WU Ze-hui. Analysis on the Tian-Guang DC line Protection Against High-impedance Ground Faults[J]. Southern Power System Technology Research, 2005, 1 (5): 57-60.
- [7] 天广直流输电工程直流保护维护手册[Z]. 1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Maintenance Manual of DC Protection[Z]. 1999.
- [8] 天广直流输电工程直流保护软件设计手册[Z]. 1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Software Design Report of DC Protection[Z]. 1999.
- [9] 黄佳胤, 周红阳, 余江. “3.21”天广直流线路高阻抗接地故障的分析与仿真[J]. 广东电力, 2005, 18 (11): 15-17.
HUANG Jia-yin, ZHOU Hong-yang, YU Jiang. Analysis and Simulation on “3.21” High Impedance Earth Fault of Tian-Guang HVDC Project[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18 (11): 15-17.
- [10] 天广直流输电工程极控软件设计手册[Z]. 1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Software Design Report of Pole Control[Z]. 1999.
- [11] 朱韬析, 王超. 浅析天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 录用.
ZHU Tao-xi, WANG Chao. Analysis of the Basic Control Technique Used in Tian-Guang HVDC Transmission System[J]. Power System Technology, Processed.
- [12] 洪丹轲. 天广直流通信通道改造对直流系统运行优化的分析[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (2): 75-78.
HONG Dan-ke. Analysis on the Optimization of Modified Tianguang HVDC System Communication Channels[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26 (2): 75-78.

收稿日期: 2008-11-15

作者简介:

朱韬析(1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

彭武(1973-), 男, 高级工程师, 研究方向为继电保护与自动化。