

# 天广高压直流输电线路保护系统综述

邓本飞

(中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400)

**摘要:** 天广直流作为一个长距离输电系统, 在长达 1000 km 的线路上发生各类故障的可能性及绝对数量都很高, 因而直流线路保护对系统的安全运行非常重要。对天广直流系统采用的直流线路保护配置原则以及具体配置进行了介绍, 重点讲述了配置每个保护的目及其保护原理的特性分析; 更进一步的, 对于直流线路保护与交流线路保护的不同进行了分析总结。

**关键词:** 天广直流; 高压直流线路; 行波; 保护; 故障恢复顺序

## HVDC line protection summary of Tian-Guang project

DENG Ben-fei

(Tianshengqiao Bureau, China Southern Power Grid Co.,Ltd, Xingyi 562400,China)

**Abstract:** The Tian-Guang HVDC project is a long distance power transmission system. The possibility and quantity of fault happening on the 1000km line are very high. Consequently, the DC line protections are crucial to system operation safety and devices security. This paper summarizes this project's HVDC line protection configuration, introduces the principles of each protection and its target fault. Furthermore, this paper tries to outline the difference of DC line and AC line protection. As a typical HVDC project, the protection configuration of Tian-Guang system is also typical. It is wished that this paper may contribute to the development of HVDC in China and provide some technical reference.

**Key words:** Tian-Guang project; HVDC line; traveling wave; protection; fault resume sequence

中图分类号: TM72; TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)19-0071-04

## 0 引言

天广直流工程是一个高电压长距离的直流输电系统; 两换流站间由架空线相连, 由西向东, 长达 1000 km, 中间经过的地理、气候条件复杂, 变化大。在这么长的架空线路上, 发生各种故障, 如接地、短路、开路、雷击、污闪、输电线路下方明火闪络等的可能性很大, 故障的绝对数量也大。为了保证直流系统的安全稳定运行与设备的安全, 对直流线路进行完善的保护, 快速地隔离故障, 以及故障消除后快速地恢复送电是非常重要和必要的。

本文对天广直流系统采用的直流线路保护配置原则以及具体配置进行了介绍, 重点讲述了配置每个保护的目及其保护原理的特性分析; 更进一步的, 对于直流线路保护与交流线路保护的不同进行了分析总结。天广直流作为一个典型的 HVDC 工程, 其保护配置有典型性, 希冀本文的综述能够为业界同行提供一些参考并推动 HVDC 在中国的发展。

## 1 直流线路保护的配置

### 1.1 配置原则

与交流电网保护的目和原则相同, 保护的作是为了迅速准确地检测到各种已发生的故障, 并采取相应的措施, 消除和隔离故障; 并保护电力一次设备不受损坏或减少设备损坏程度, 尽量保持整个电网的稳定运行。通常, 各保护的覆盖范围相互重叠, 各保护功能之间互相配合, 完成对整个系统的覆盖, 不产生保护盲区, 并考虑冗余及后备。

在天广直流工程的直流线路保护中, 保护系统独立于其它的设备。即与控制设备的硬件有物理和电气隔离并单独组屏。其中, 只是直流保护的一些功能需要与控制系统配合, 比如直流线路故障恢复顺序要由控制系统完成, 这类似但有别于交流系统的自动重合闸。

天广直流工程的直流线路保护均采用德国 SIEMENS 公司的 SIMADYN D 系统, 是一种信号多微处理器 DSP 系统, 是当今最快的一种保护硬件

实现方式。天广直流工程的直流线路保护采用完全冗余的方案，用三套完全相同的保护系统对每一回线路进行保护；并且测量回路、工作电源完全独立。每套保护系统分为主、后备保护，保护出口回路采用三取二的方式，即至少有两套系统动作才输出，并形成双出口回路，提高了保护的可靠性。

### 1.2 实际配置

极一和极二直流线路分别采用三套完全相同的保护系统，每套系统构成一块屏，均配置以下 5 种保护，并配套了配置了直流线路故障恢复顺序 (DLFRS) 功能。

- 1) 行波保护 (WFPDL)
- 2) 直流欠电压保护 (27du/dt)
- 3) 交流-直流导线碰线保护 (81-I&U)
- 4) 直流线路差动保护 (87DCL)
- 5) 金属回路导线保护 (87EB)

图 1、图 2 是直流线路的保护配置和原理框图和 3 取 2 出口逻辑原理图。

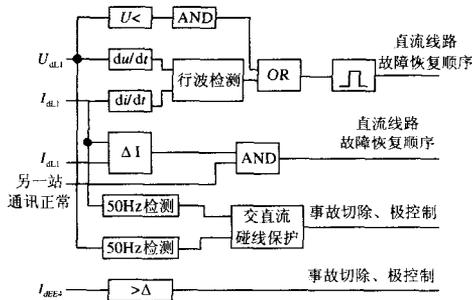


图 1 直流线路保护的配置原理

Fig.1 Configuration and principle of DC line protection

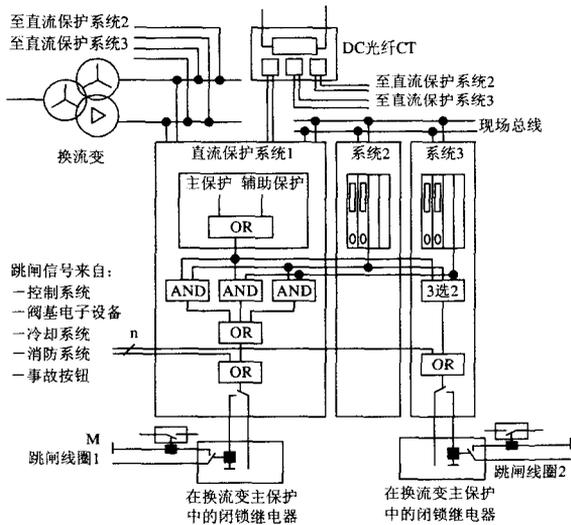


图 2 出口 3 取 2 逻辑原理

Fig.2 Tripping principle

在图 1 中， $U_{dl1}$  为极 1 直流线路电压， $I_{dl1}$  为极 1 直流线路电流， $I_{dl1}$  另一站为对站的极 1 直流线路电流。 $I_{dEE4}$  为流过站内高速接地开关 HSGS 的直流电流。通讯正常表示两个换流站之间的远程控制通讯是否正常。

### 2 主保护的特性分析

行波保护 (WFPDL) 是直流线路的主保护，检测直流线路故障，检测范围从整流器端的平波电抗器的线路侧到逆变器端的平波电抗器线路侧之间的直流线路。当直流线路上出现接地故障的情况下，会有放电波从发生故障的位置向两个站传播。行波保护通过对直流线路电压和电流的相对时间的变化率进行计算，如果电压的变化率以及电压的变化幅度 (电压的变化量/在大于扫描时间的一个固定时间间隔) 超过整定限值，则保护系统开始对电流梯度进行评价。如果电流梯度也超过限值，则将启动直流线路故障恢复顺序。如果启动的次数超过预先整定的次数，该极将被闭锁。

直流线路发生故障时，由于高压直流系统的电流调节器的调节速度很快，短路点的故障电流稳态值是不大的，在故障的开始瞬间，暂态电流的幅值也并不象交流线路那样大。理论和实际试验表明在电流调节器的作用之下一般短路电流增量的峰值与正常的额定电流大致相等，即整流器总电流的峰值等于正常的额定电流的 2 倍。因此要想比较线路在正常与故障时的稳态电流的大小来判别故障与否，是很困难的。目前公认的做法是借助电流的暂态分量或借助电压的变化量来识别直流线路故障。

另外，还需要考虑直流线路故障保护的动作的正确性与唯一性。在高压直流系统中，当逆变器发生一次换相失败故障时，直流线路将通过逆变器的一对同相阀形成短路。而这种“短路”和直流线路末端短路相比，只相差一个逆变器的平波电抗器。对于稳态的直流短路电流来说，这一差别几乎无法将两种故障区别开来，但是又不能将这两种情况混淆处理。因为一般的换相失败故障在经历 6.7 ms (1/3 工频周期) 之后就能自行恢复；而在直流线路发生故障后，必须使线路储存的能量全部释放，线路故障处的电弧才能熄灭，然后才能将线路投入运行。根据理论研究分析和实际经验，由于平波电抗器的存在，直流线路短路故障开始时的线路始端电压变化率比逆变桥换相失败故障时的线路始端电压变化率大得多。

天广直流输电工程采用的行波保护的原理即是检测直流线路基于时间的电压的变化率以及电压的

变化幅度是否超过整定限值,同时保护系统开始对电流梯度进行评价,不依赖通讯通道。并且,采用DSP信号处理器,在故障发生的开始阶段即可检测到故障,从而迅速切除故障。因此,天广直流输电工程采用的行波保护能够胜任保护直流线路免遭损坏的重任。这从上面的实际动作结果和曲线可以看得很清楚,行波保护在故障发生后的20ms内即可作出响应,借助直流故障恢复顺序功能可以在300ms内恢复直流系统的运行。

### 3 后备保护的配置原理及其特性分析

从理论上讲,如果直流线路通过高阻抗短路时,直流电压将以较慢的速度下降,行波保护的电压的变化率元件可能不会启动。近几年的实际运行中,已经发现两套行波保护有时只有一套动作。当测量到的电压的变化率处于行波保护的门槛临界值附近,就可能出现行波保护无法动作的情况。这时,需要针对这种边界情形配置后备保护。根据高压直流系统的特点,由于线路电容放电和定电流调节器调节的作用,将使最终直流电压水平降低,因此,直流欠电压保护(27du/dt)的电压水平单元可以胜任这个任务。

在高压直流系统以单极金属回线方式运行时,运行极的直流线路有本极的直流线路保护的后备保护。但是,另一极的直流线路充当金属返回回路,它自己的线路保护已经退出。如果这时金属返回回路上出现接地故障,在运行极的电压和电流没有任何变化,保护不会作出任何响应。这种故障,虽然不会对高压直流的设备造成损坏。但是这时将会有很大的直流电流流经站内接地网,将对站内接地网造成严重的电解破坏作用,危及站内设备的安全运行(比如增加变压器的损耗),并且可能造成交流保护误动。金属回路导线保护(87EB)正是针对这种情况,根据站内接地点上出现的电流判定发生了故障,从而作出正确的响应。

#### 3.1 直流欠电压保护(27du/dt)

直流欠电压保护作为行波保护的后备保护。该保护对欠电压以及直流线路电压的变化率进行评价。它检测直流线路电压的幅值是否低于定值且电压的变化率是否大于设定值。

当它检测到欠电压的持续时间超过电源系统故障的持续时间,或者逆变器换相失败的持续时间,并且从欠电压开始时就检测到有一个高的电压变化率(在平波电抗器后,靠近换流器侧发生故障时,直流线路电压的变化率则较小,即陡度小),则将启动直流线路故障恢复顺序。如果启动的次数超过

预先整定的次数,该极将被闭锁。

#### 3.2 直流线路差动保护(87DCL)

直流线路差动保护用作行波保护、欠电压保护,尤其是高阻抗线路故障的后备保护。该保护对来自两个站的直流线路电流进行比较( $I_{dl} - I_{dl,另一站}$ )。直流线路电流通过两个换流站之间的远程控制通讯链路相互传输。如果电流差值超过设定的门槛值,将启动直流线路故障恢复顺序。如果启动的次数超过预先整定的次数,该极将被闭锁。当没有远程控制链路通讯时,或者通讯暂时中断,则直流线路差动保护将被闭锁。

直流线路通过高阻抗短路时,线路差动保护也可作出正确的判断。同时,在发生交流电压降低时,直流侧的电压也会成比例的下降,但由于直流平波电抗器限制了直流线路释放能量的速度,直流电压下降的速度较慢,所以基于电压导数单元的行波保护的检测单元不会误动。但基于电压水平的直流欠电压保护(27du/dt)可能误动作(需要引进交流侧电压降低的信号来闭锁,逆变器侧故障还需要将信号传递到整流站侧来实现闭锁)。逆变器发生换相失败等故障时,也可能造成直流电压降低,欠电压保护(27du/dt)也可能误动作。

线路差动保护只检测两端的直流电流,进行比较,所以不需要这些闭锁。因此,直流线路差动保护具有很大的优势。但是,直流线路差动保护具有天生的缺陷性,由于需要对端的直流线路电流,所以得依靠通讯通道。然而,通讯通道的不可靠性,常导致直流线路差动保护的功能闭锁失去。在天广直流工程中,实际采用了三套保护共用一个信号的配置方案,即一端在一个时刻只有一套保护采集的直流线路电流送到对站,曾出现收到超出逻辑范围的错误的广州站直流线路电流信号,导致天生桥站三套直流差动保护动作的事故。主要的问题在于通讯通道的不可靠,如果采用光纤通讯,一方面通讯可靠性提高,另一方面通讯通道容量增加,可以每套保护分采用不同的通讯通道,应该是可以很好解决这个问题。

现在,天生桥换流站的直流线路差动保护采用延时500ms出口,正常情况基本上不会动作。如果在通讯通道的问题得以解决后,是完全可以缩短其延时,发挥直流线路差动保护的对高阻抗接地故障的灵敏优势。

#### 3.3 交流-直流导线碰线保护(81-1&U)

交流-直流导线碰线保护的运行采用基频保护原理,是对用于保护这类故障的主要直流线路保护的补充。它检测直流线路的线路电流和电压中的基

分量,当 50 Hz 的分量大于设定值时,保护动作。如果该保护动作,将启动极控制的事故切除顺序,从而使该极停运。另外,直流线路的接地开关将闭合以确保可靠地清除在这类故障过程中产生的电弧。

### 3.4 金属回路导线保护 (87EB)

直流线路的接地故障将由接地极母线差动保护进行检测。该保护的判据为:  $|I_{dEE4}| > \Delta$ 。在金属返回运行方式下,只在其中一个站接地(逆变站的站内接地)。在这种情况下,正常运行时无直流电流流入大地,上面的判据可以对直流电流进行评价。如果在金属回路导线上发生接地故障,将产生流入大地的直流电流。该电流也出现在接地站的接地极线路和高速接地开关上,并被接地极母线差动保护检测到,从而导致上式不成立。如果本保护动作,则将启动极控制的闭锁顺序,从而使该极停运。

### 3.5 直流线路故障恢复顺序 (DLFRS) 功能

高压直流系统的线路上发生的故障,与交流线路一样,绝大多数即 85% 以上的故障是瞬时故障。瞬时故障在经过熄弧(去游离)之后,可以继续送电。直流线路故障恢复顺序即相当于交流的自动重合闸,能够提高线路的输电可靠性。

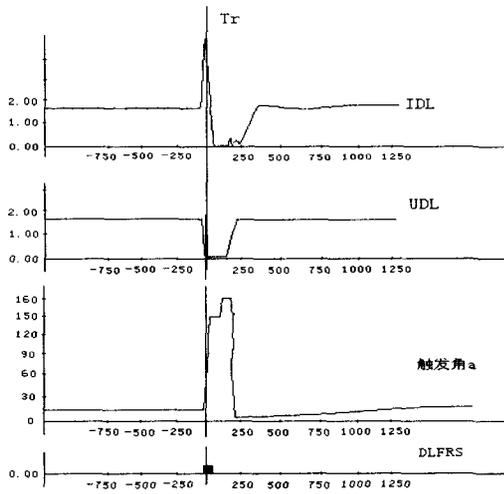


图3 一起事故的录波图  
Fig.3 DFR wave of a fault case

天生桥换流站的直流线路故障恢复顺序就是针对直流线路上出现的瞬时故障的几率很大的情况而设置的。它在直流线路保护检测到线路故障以后,立即将触发角  $\alpha$  移至  $120^\circ$ , 约 100 ms 后将触发角  $\alpha$  移至  $160^\circ$ , 约 150 ms 后,重新触发,整个过程大约 300 ms。从几年的运行情况来看,直流线

路故障恢复顺序的运行情况很好,多次在直流故障后将直流系统重新启动成功,极大地提高了高压直流输电的可靠性和连续性。

### 3.6 动作实例

2002 年 5 月 20 日天生桥换流站极 2 直流线路由于发生雷击形成瞬时短路故障,极 2 的三套行波保护动作,同时启动直流线路故障恢复顺序,成功重新启动。图 3 为当时的实际录波图。

## 4 结语

天广高压直流工程的直流线路保护根据其原理和具体配置,以及几年来的运行实际经验可见,是基本可靠、完善和实用的,已经完全适用于商业运行。并采用了直流光纤 PT 和 CT,采用高速 DSP 信号处理器,采用 3 取 2 出口逻辑等先进的技术和方案。

当然,仍有改进的地方。比如直流欠电压保护 ( $27du/dt$ ) 并没有采取用对站信号闭锁的方案,而是采用 0.25 pu 的低定值躲过交流系统故障和逆变器换相失败造成的低电压,降低了保护的灵敏性,以及前面提到的直流差动保护的通信通道的可靠和独立问题等。

## 参考文献

- [1] 浙江大学直流.高压直流输电[Z].1986. Zhejiang University HVDC Group.HVDC Transmission[Z].1986.
- [2] Siemens.天广直流保护维护手册[Z].2000. Siemens. Tian-Guang HVDC Protection Maintenance Manual[M].2000.
- [3] 刘敏,张楠,邹卓霖,等. 直流保护系统 CT 饱和引起直流工程桥差保护误动分析及改进措施[J]. 继电器,2007,35(21).  
LIU Min, ZHANG Nan, ZOU Zhuo-lin, et al. Analysis of a Unwanted Trip of the Bridge Differential Protection Caused by CT Saturation State and Its Improved Ways[J]. Relay, 2007,35(21).
- [4] 张海凤,朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响[J]. 继电器,2007,31(15).  
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Influence of Rectifier AC Fault on HVDC Transmission System[J]. Relay,2007,31(15).
- [5] 黄莹,徐政,贺辉. 电力系统仿真软件 PSS/E 的直流系统模型及其仿真研究[J]. 电网技术,2004,28( 5).

(下转第 80 页 continued on page 80)

参考文献

[1] 顾拥军, 皮卫华, 杨承胜, 等. 变电站防误闭锁应用分析[J]. 继电器, 2005,33(2):66-70.  
GU Yong-jun, PI Wei-hua, YANG Cheng-sheng, et al. Application Analysis of Anti-mistake Defense System in Substation[J]. Relay, 2005,33(2): 66-70.

[2] 王玉秋. 微机防误装置的改进[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 45-46.  
WANG Yu-qiu. Propositions to Microcomputer Misoperation-Prevent Device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 45-46.

[3] 王晴. 微机防误闭锁装置运行分析与探讨[J]. 中国电力, 1996, 29(1): 62-64, 70.  
WANG Qing. Analysis and Discussion on Microcomputer Based Anti-maloperate Blocking Device[J]. Electric Power, 1996, 29(1): 62-64, 70.

[4] 徐明. 220kV 变电站无人值班改造中相关技术问题的探讨[J]. 继电器, 2005, 33(1): 73-76.  
XU Ming. Discussion on the Technical Problems for 220kV Unattended Modification[J]. Relay, 2005, 33(1): 73-76.

[5] 孙一民, 侯林, 揭萍, 等. 间隔层保护测控装置防误操作实现方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11):81-85.

SUN Yi-min, HOU Lin, JIE Ping, et al. Implementation of Mal-operation Proof on Platforms of Relay and Control Units between Bays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11):81-85.

[6] 周敬嵩, 周敬尧. 一种新型变电站防误系统的设计[J]. 继电器, 2005, 33(22): 72-74.  
ZHOU Jing-song, ZHOU Jing-yao. A New Design of Substation Preventing Wrong Operation System[J]. Relay, 2005, 33(22): 72-74.

[7] 陈志军, 李剑刚, 高宏伟. 500kV 综合自动化变电站的防误闭锁应用[J]. 继电器, 2006, 34(18): 69-71.  
CHEN Zhi-jun, LI Jian-gang, GAO Hong-wei. Application of Mistake Proof and Lock Installation in 500kV Comprehensive Automatic Substation[J]. Relay, 2006,34(18): 69-71.

收稿日期: 2007-12-11; 修回日期: 2008-03-24

作者简介:

刘雪飞(1982-), 男, 大学本科, 主要从事电力系统自动化设备的运行和维护工作; E-mail:liuxuefei2000@163.com

刘国亮(1981-), 男, 大学本科, 主要从事电力系统自动化设备的运行和维护工作。

(上接第 74 页 continued from page 74)

HUANG Ying, XU Zheng, HE Hui. HVDC Models of PSS/E and Their Applicatbility in Simulations[J]. Power System Technology, 2004,28(5).

[6] 艾琳,陈为化. 高压直流输电线路保护的探讨[J]. 继电器, 2004,32(4).  
AI Lin, CHEN Wei-hua. Discussion on Line Protection of HVDC Transmission Line[J]. Relay, 2004,32(4).

[7] 董新洲,葛耀中,贺家李,等. 输电线路行波保护的现状与展望[J]. 电力系统自动化,2000,24(10).

DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, HE Jia-li, et al. Status Quo and Prospect of Travelling Waves Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(10).

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-02-18

作者简介:

邓本飞(1972-), 男, 工程师, 学士, 主要从事高压直流输电系统运行维护管理工作。E-mail:dengbenfei@163.com

(上接第 76 页 continued from page 76)

2.3 解决办法

把南瑞 RCS931A 保护屏单跳及三跳启动重合闸错位的二次线互换, 经南瑞、四方保护及 5042 断路器保护电流回路串联起来模拟各种短路故障, 保护均正确动作出口。

3 结语

相隔一年, 两起同样事故, 都是 5042 断路器在线路单相瞬时接地故障时未重合, 都是二次回路接线错误。由此可知, 我们一方面要加强二次回路设计的审查工作, 以及基建或改造工程的验收工作, 防止将重大遗漏缺陷带入运行, 给电网的安全稳定运行带来隐患; 另外, 作为运行单位, 以模拟实际故障为出发点, 针对不同设备的二次回路特点, 制

定更加合理的超高压变电站二次回路检验方法尤为重要, 可以在投运验收和定检测试中最大限度地避免出现检测死角。

参考文献

[1] DL/T 995-2006, 继电保护和电网安全自动装置检验规程[S].

[2] 四方公司 CSI 121A 数字式重合闸及断路器控制装置使用说明 V3.00 200207[Z].

收稿日期: 2007-12-27

作者简介:

吴珂(1974-), 男, 工程师, 本科, 长期从事继电保护维护、检修及技术管理工作; E-mail:wukecc@126.com

彭淑明(1973-), 男, 工程师, 大专, 长期从事继电保护维护、检修及技术管理工作。