

高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析

李爱民¹, 蔡泽祥¹, 任达勇², 李晓华¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州省兴义市 562400)

摘要: 直流输电线路保护中, 以电压变化率为动作判据的线路行波保护和低电压保护难以检测出线路高阻接地故障, 线路差动保护需要通过闭锁躲避区外故障而使动作延时较长, 从而难以起到后备作用。同时, 直流控制系统环节对线路保护的动作特性也有很大的影响, 小负荷水平下将导致线路电流波动而导致差动保护拒动。结合某一直流线路实际参数, 基于真实的直流控制保护模型与参数的 EMTDC 仿真平台, 采用实际故障录波分析和仿真分析相结合的手段, 系统分析了线路保护不正确动作的机理以及直流系统控制环节对线路保护的影响, 并提出了解决方案。

关键词: 直流线路保护; 直流控制; 直流线路故障; 动态响应特性

中图分类号: TM773

0 引言

直流输电线路长, 输电走廊情况复杂, 极易导致直流线路故障。南方电网的几条直流输电线路都接近 1 000 km, 对天广直流 2001 年—2007 年故障统计显示, 线路故障占直流系统故障的 50%^[1-3]。而直流线路故障后线路保护正确动作切除故障只占 50%, 大量直流线路故障是由直流控制系统响应动作, 造成直流闭锁, 引起不必要的直流停运。

直流线路故障时, 不同故障条件导致控制保护系统的响应差异性很大, 反映出直流线路故障的复杂性, 也反映出直流控制保护对于线路故障进行保护的不明确性。因此, 研究控制保护对于线路故障的响应特性, 分析评估现行线路保护和控制保护之间的相互影响是十分必要的。

文献[4-6]对直流线路行波保护的判据和动作行为特点进行了较为详尽的研究分析, 指出行波保护无法检测高阻接地故障, 进而提出了基于小波分析的行波保护新原理。文献[7-9]介绍了实际直流线路保护配置并针对典型故障进行了分析, 但是全面考虑几种线路保护的配合和故障过程中控制系统对保护系统的影响还有待进一步研究。

本文系统研究了现行直流线路保护的原理和配置, 指出了存在的问题。结合南方电网某一实际直流线路参数, 基于含 SIMENS 真实直流控制保护模型和参数的 EMTDC 仿真平台, 着重分析了高阻接地故障情况下直流线路控制保护系统的动作特性和

相互影响, 并对存在的问题提出了初步解决方案。

1 直流线路保护对线路故障的响应特性

直流线路故障的最主要特点就是一旦发生故障形成短路回路, 如果没有将电流降为 0 且去游离, 线路故障将发展为永久性故障而导致直流闭锁。针对直流输电线路故障, 主要配置的保护包括: 行波保护、低压保护和差动保护。

1.1 行波保护

线路故障后, 故障点产生的行波向两侧传播, 行波从故障点到保护安装处只需要 2 ms~3 ms, 不受定电流控制的影响, 因此行波过程体现了线路故障的本质特性。

行波保护判据如下^[9]:

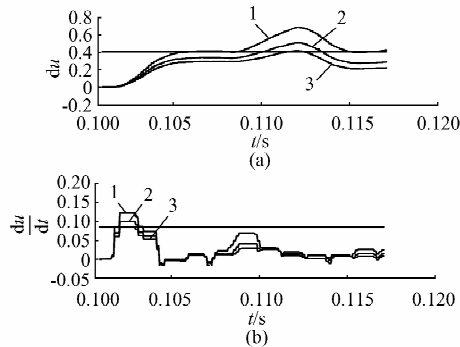
$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial u}{\partial t} > \Delta_1 & \text{上升沿展宽 6 ms} \\ \Delta u > \Delta_2 & \\ \frac{\partial i}{\partial t} > \Delta_3 & \text{整流侧} \\ \frac{\partial i}{\partial t} < \Delta_4 & \text{逆变侧} \end{array} \right. \quad (1)$$

该保护同时检测电压变化率 $\partial u / \partial t$ 和电压行波量 Δu , 二者同时满足定值才能启动检测电流变化率 $\partial i / \partial t$, Δ_i 是各个条件的定值。图 1 是线路中点经不同过渡电阻故障时的电压变化量和变化率波形。

不同过渡电阻时行波保护的电压变化率条件在故障后 2 ms 即可达到定值, 而电压行波达到定值分别为 5 ms, 11 ms 和 12 ms, 电压变化率上升沿展宽 6 ms, 可知只有过渡电阻 10 Ω 时, 行波保护动作。表 1 为行波保护拒动时的过渡电阻临界值。

经较大过渡电阻接地故障时, 行波保护拒动, 主

要原因有 2 个:电压变化率上升沿宽度不足;电压变化率不能达到定值。可见,行波保护难以检测到高阻接地故障,因此必须配置后备保护。



曲线 1, 2, 3 分别对应过渡电阻为 10 Ω, 50 Ω, 85 Ω

图 1 不同过渡电阻时行波保护动作特性
Fig. 1 Operation characteristic of travelling wave protection under different fault resistance

表 1 行波保护拒动原因分析
Table 1 Analysis on refusal-operation of travelling wave protection

故障位置	临界过渡电阻/Ω	拒动原因
整流侧出口	113	电压变化率上升沿展宽不足
线路中点	25	电压变化率上升沿展宽不足
逆变侧出口	18	电压变化率不足

1.2 线路低压保护

线路低压保护判据如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} > \Delta_1 & \text{上升沿拓展 20 ms} \\ u < \Delta_2 \end{cases} \quad (2)$$

线路低压保护电压变化率定值与行波保护电压变化率定值取相同值,但电压变化率上升沿延时为 20 ms(行波保护 6 ms),因此低压保护在行波保护退出运行或者由于电压变化率上升沿宽度不足时可以起到后备作用,但是由于高阻接地故障导致的电压变化率不足时,低压保护也不能起到后备作用。仿真分析结果如表 2 所示。

表 2 线路低压保护拒动分析
Table 2 Analysis on refusal-operation of under-voltage protection

故障位置	临界过渡电阻/Ω	拒动原因
整流侧出口	70	电压变化率上升沿展宽不足
线路中点	70	电压变化率上升沿展宽不足
逆变侧出口	18	电压变化率不足

从表 2 可知,低压保护拒动的主要原因与行波保护基本一致,主要是电压变化率和低电压条件不能同时满足;在远距离故障时,电压变化率条件本身就不满足。只有在线路中点故障,过渡电阻在 25 Ω~70 Ω 之间时,低压保护才起到行波保护的后备作用。

备作用。

1.3 线路差动保护

鉴于行波保护和低压保护都无法检测到线路高阻接地故障,配置了线路差动保护作为后备保护,动作判据为:

$$| I_{dLrec} - I_{dLin} | > I_{zd} \quad (3)$$

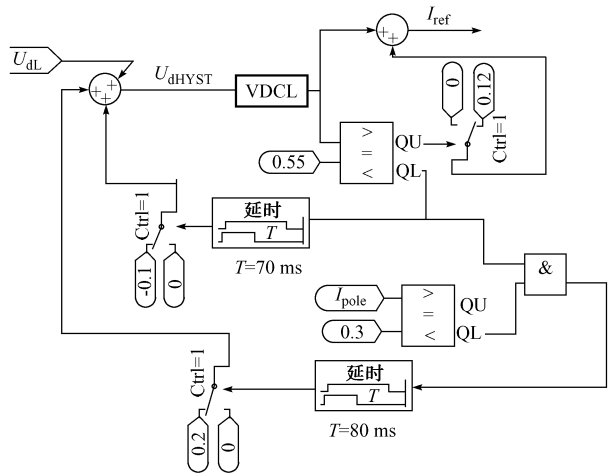
式中: I_{dLrec} , I_{dLin} 分别为整流侧和逆变侧的线路电流; I_{zd} 为整定值。

直流线路差动保护需要躲避区外故障引起的线路电压变化而导致的线路对地分布电容充放电电流造成的误动作。直流线路差动保护采取以下 2 个手段来避免差动保护误动作:检测本站电流在 65 ms 内的变化如果大于一个定值,即将差动保护闭锁 600 ms;延时出口 500 ms 以躲避区外故障。这样的差动保护原理的最大问题在于区内线路故障时,同样存在对地电容充放电电流从而将差动保护闭锁,再加上出口延时,差动保护闭锁最短为 1.1 s,此时整流侧极控中的低压保护或者最大触发角保护动作将故障极闭锁,因此差动保护也没有对高阻接地故障起到后备作用。

2 直流控制系统对线路故障的响应特性

线路故障后,主要需要考虑的是极控中换流器层控制环节的响应特性^[10]。

图 2 给出了整流侧低压限流和暂态电流控制环节的简要逻辑图。



U_{dHYST} 为低压限流环节(VDCL)的输入电压; U_{dL} 为线路电压; I_{pole} 为根据输电功率计算得出的初始负荷电流; I_{ref} 为经过暂态电流控制环节后的参考电流

图 2 低压限流和暂态电流控制环节逻辑
Fig. 2 Logic diagram of VDCL and transient current control

当负荷水平不同时,低压限流环节和暂态电流控制环节的动作特性有很大差异,尤其是小负荷水

平下发生高阻接地线路故障时,由于整流侧低压限流输入电压被修正,可能导致暂态电流控制环节不断动作而导致电流参考值发生波动,进而导致线路电流发生波动。如图 3 所示。

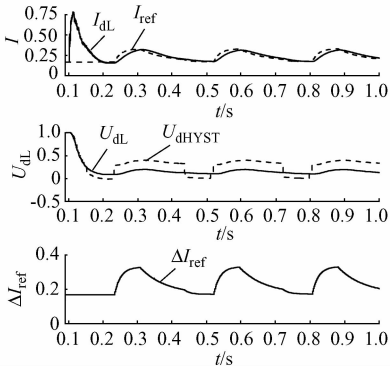


图 3 控制环节引起的直流线路电流波动
Fig. 3 DC line current fluctuation caused by the control system

由图 3 可以看出,初始负荷水平为 0.17,线路故障后线路电流 I_{dL} 迅速上升,然后在定电流控制下下降且不断波动。由于高阻接地故障后,直流电压 U_{dL} 下降,此时低压限流输入电压 U_{dHYST} 是实际电压再减去 0.1,延时一段时间后为加快故障恢复速度,使 U_{dHYST} 又增加了 0.2,导致低压限流释放,暂态电流控制环节动作,使参考电流 I_{ref} 增加 ΔI_{ref} ,但是此时直流电压 U_{dL} 未恢复,因此低压限流再次动作又将电流参考值降低,周而复始,这样就导致了电流参考值不断波动而使线路电流不断波动。可见,控制系统根据线路故障条件不同的动作特性也不同,对电气量的影响也有很大的差异,在小负荷水平和高阻接地故障条件下,可能导致线路电流发生持续波动。

3 控制保护系统对线路故障综合响应特性

3.1 对实际故障录波数据的分析

2005 年 3 月 21 日 17:09,天广直流系统极 2 线路高阻接地故障,线路保护拒动,极控最大限制角保护闭锁极 2。实际录波数据以及线路保护动作分析如图 4 所示。

线路高阻接地故障后,行波保护和线路低压保护由于电压变化率条件不满足而拒动,差动保护由于电流波动而闭锁超过了 1.7 s,由于线路保护不能快速检测出故障导致触发角长期处于 80° 左右,而使极控保护中的最大限制角监测保护动作闭锁故障极。

根据实际录波数据可以得出以下结论:

1)线路高阻接地故障后,行波和线路低压保护

由于电压下降率较低而无法检测出线路故障。

2)差动保护由于线路电流产生波动而闭锁,没有对线路高阻接地故障起到后备作用。

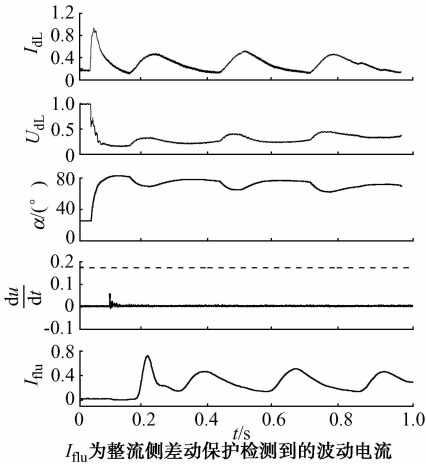
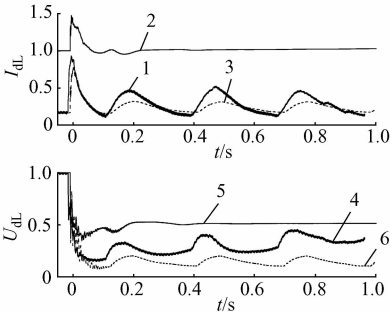


图 4 直流线路保护动作特性
Fig. 4 Operation characteristic of DC line protection

3.2 基于 EMTDC 的仿真分析

为了寻求解决方案,本文在 EMTDC 仿真平台上重现了上述故障。

初始负荷水平分别设置为 0.17 和 1,线路中点经 $100\ \Omega$ 接地故障,仿真波形和实际录波图形比较如图 5 所示。



曲线 1, 2, 3 分别表示实际录波、负荷水平为 1 和负荷水平为 0.17 的线路电流波形; 4, 5, 6 为相应的电压波形

图 5 录波图形与仿真波形对比
Fig. 5 Comparison of waves from fault recording and simulation

可见,小负荷水平下发生高阻接地故障的电流、电压波形与实际录波图形基本一致,都发生了由低压限流环节和暂态电流控制环节引起的电流波动现象。额定负荷水平下不存在电流波动现象,这是由于低压限流的输入电压修正环节只有在负荷水平小于 0.3 时才起作用。

行波保护和线路低压保护都是由于高阻接地故障后电压变化率条件不足而拒动,控制系统的动作特性主要是对差动保护有影响。

针对差动保护延时较长的特点,可以增大极控保护的延时以使差动保护有足够的时间动作;针对整流侧低压限流环节和暂态电流环节造成的电流波动,由于电压修正环节只是为了加快小负荷水平下故障恢复速度,对直流系统而言只是辅助功能,而其对保护的负面影响却很大,因此可以取消将小负荷水平下对于低压限流环节输入电压的修正。

在 EMTDC 平台上对上述 2 个措施进行验证,结果如图 6 所示。

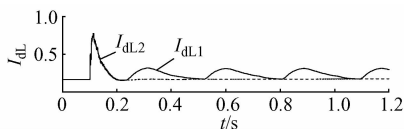


图 6 改进措施后的电流波形

Fig. 6 Current after the improvement measures

可见,只增加极控保护延时后,整流侧线路电流 I_{dL1} 仍然波动而导致整流侧差动保护拒动,而逆变侧差动保护动作;修改极控系统后,整流侧电流 I_{dL2} 不再波动,整流侧差动保护动作。

4 结语

行波保护采用电压变化率 $\partial u / \partial t$ 启动元件,其动作特性取决于故障回路的电阻,因此难以检测到高阻接地故障和远距离的线路故障;线路低压保护存在同样的问题。

直流线路差动保护动作延时较长,当与极控保护延时配合失当时将丧失后备保护的作用。因此,适当延长极控保护延时以给线路差动保护足够时间动作。

极控系统的低压限流环节和暂态电流控制环节对线路故障后的电气量影响最大,小负荷水平下可能导致线路电流波动进而使差动保护拒动。鉴于此,修改整流侧低压限流环节的输入电压修正环节以避免其不断动作。

低压保护与行波保护在启动元件上取同一定值使低压保护起不到后备作用,因此有必要研究低压保护与行波保护的定值配合,将直流线路电压引入到线路差动保护中作为制动量可望改善现有差动保护的動作性能。

参考文献

- [1] NNAIDOO D, IJUMBA N M. HVDC line protection for the proposed future HVDC system// Proceedings of IEEE PowerCon Conference on Power System Technology: Vol 2, 2004, Singapore: 1327-1332.
- [2] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-176.

- REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC Project. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-176.
- [3] 高翔, 高伏鹰, 杨增辉. 华东电网因直流故障的频率事故分析. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 102-107.
GAO Xiang, GAO Fuying, YANG Zenghui. Frequency accident analysis in East China grid due to DC line fault. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 102-107.
- [4] 艾琳, 陈化为. 高压输电线路行波保护判据的研究. 继电器, 2003, 31(10): 41-44.
AI Lin, CHEN Huawei. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission line. Relay, 2003, 31(10): 41-44.
- [5] 周翔胜, 林睿. 高压直流输电线路保护动作分析及校验方法. 高电压技术, 2006, 32(9): 33-49.
ZHOU Xiangsheng, LIN Rui. Analysis of relay protection action for HVDC line and testing method. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 33-49.
- [6] 赵自刚, 黄少锋. 扩充微机继电保护装置功能. 电力系统自动化, 1998, 22(4): 61-63.
ZHAO Zigang, HUANG Shaofeng. Extension to the functions of microcomputer-based protective relay. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(4): 61-63.
- [7] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.
GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis on the operation of DC transmission line protection. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.
- [8] 庄侃沁, 武寒, 黄志龙, 等. 龙政直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 101-104.
ZHUANG Kanqin, WU Han, HUANG Zhilong, et al. Analysis of frequency characteristics in East China due to Long-Zheng DC bi-polar block fault. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 101-104.
- [9] 胡宇洋, 黄道春. 葛南直流输电线路故障及保护动作分析. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 102-107.
HU Yuyang, HUANG Daochun. Faults and protection analysis of Gezhouba-Nanqiao DC transmission line. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 102-107.
- [10] 杨卫东, 薛禹胜, 荆勇. 直流系统控制策略对南方电网暂态稳定性的影响. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 68-72.
YANG Weidong, XUE Yusheng, JING Yong. Influence of DC system's control strategy on the transient stability of South China Grid. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 68-72.

李爱民(1981—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统控制保护及其自动化。E-mail: liaimin4u@163.com

蔡泽祥(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与控制、电力系统稳定分析与控制。E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

任达勇(1974—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:直流系统运行与维护。

(下转第 93 页 continued on page 93)

Analysis on the Dynamic Performance Characteristics of HVDC Control and Protections for the HVDC Line Faults

LI Aimin¹, CAI Zexiang¹, REN Dayong², LI Xiaohua¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Tian-Shengqiao Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Grid, Xingyi 562400, China)

Abstract: The traveling wave protection and under-voltage protection which are initiated by the voltage derivative can not detect the high impedance fault, and the long operation time of differential protection required to avoid external faults makes it hard to be the back-up protection. Furthermore, the HVDC control system has a great influence on the performance of the DC line protection, especially at the low load level. The differential protection will fail to action due to the current fluctuation caused by the control system. Based on the actual HVDC line parameters and the EMTDC simulation platform, the current DC line protection and the influence of the control system is evaluated, in connection with the fault records and the simulation results. An improvement scheme is proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807017).

Key words: HVDC line protection; HVDC control; HVDC line fault; dynamic performance characteristics