

高压直流双线并联运行故障选线策略

张 栋, 杨建明, 卢 宇, 吴林平, 赵文强
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:针对高压直流输电工程中双线并联运行方式,在总结了交流小电流接地选线经验的基础上,分析了已投运直流输电工程线路故障的特征,提出了双线并联运行故障选线策略,并将其分为与行波保护及电压突变量保护相配合的暂态故障选线策略和与线路低电压及线路纵差保护相配合的整流侧稳态故障选线策略以及逆变侧稳态故障选线策略三部分,阐述了上述三部分故障选线策略的逻辑,RTDS仿真模型验证了高压直流双线并联运行故障选线策略的正确性。

关键词:高压直流; 并联运行; 线路故障特征; 故障选线

中图分类号: TM733

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2015)01-0025-05

高压直流输电的运行方式一般有双极大地回线方式、金属回线方式、单极大地回线方式^[1,2]。某些特殊的工程前期只建设了1个极的换流阀设备却具备2条直流输电线路。此时为了节省直流输电线路的线损,会产生2条直流输电线路并联的单极大地回线运行方式。在高压直流双线并联运行方式线路保护动作时,运行人员不能识别接地故障发生在哪条直流输电线路。虽然每条直流输电线路分别配置1台线路故障定位装置能解决此问题,但不仅增加投资成本,而且由于高压直流并联运行方式设2台线路故障定位装置要求将专用的电流互感器分别安装在2条直流输电线路上,也给现场安装带来了困扰^[3,4]。针对此情况,在总结交流不接地系统的小电流接地选线经验的基础上^[5-8],提出了双线并联运行故障选线策略。

1 高压直流输电运行方式

1.1 双极大地回线方式

如图1所示的双极大地回线运行方式是高压直流输电系统最常用的运行方式之一。其中极一直流线路对地电压为正值,极二直流线路对地电压为负值。直流电流的流向为:整流侧极一换流阀——极一直流线路——逆变侧极一换流阀——逆变侧极二换流阀——极二直流线路——整流侧极二换流阀——整流侧极一换流阀。两站的接地极没有电流流过,这种方式输送功率大,对环境影响小而被广泛采用。

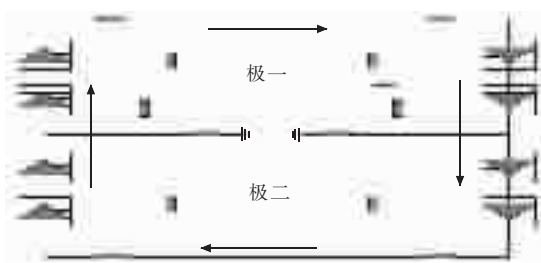


图1 双极大地回线运行方式

1.2 金属回线方式

如图2所示的金属回线运行方式是在接地极发生故障的情况下使用。其一极处于闭锁状态,另外一极处于运行状态。极一运行的电流回路为:整流侧极一换流阀——极一直流线路——逆变侧极一换流阀——极二直流线路——整流侧极一换流阀。

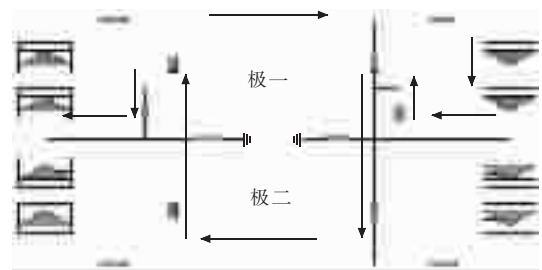


图2 金属回线运行方式

1.3 单极大地方式

如图3所示的极一单极大地回线运行方式是在极二因故障停运的情况下而经常采用的方式。其电流回路为:整流侧极一换流阀——极一直流线路——逆变侧极一换流阀——大地——整流侧极一换流阀。

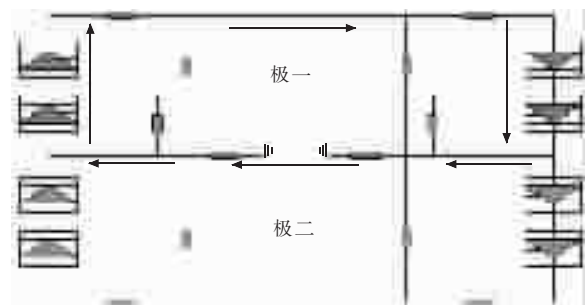


图3 单极大地回线运行方式

在极二换流阀设备未建设但是直流线路已经架设好的情况下,为了节约线路损耗会出现如图4所示的高压直流双线并联运行方式。其电流回路为整流侧极一换流阀——极一直流线路和极二直流线路——逆变侧极一换流阀——大地——整流侧极一换流阀。

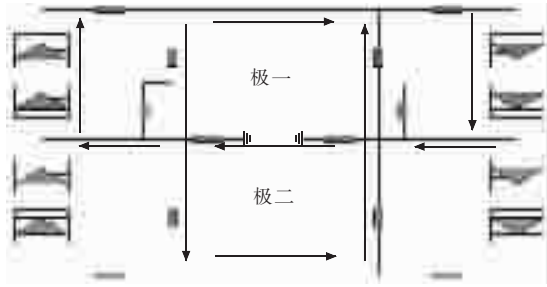


图4 高压直流双线并联运行方式

2 不同故障位置的故障特征

高压直流双线并联运行的线路测点及故障点如图5所示。其中： F_1 为直流线路1靠近整流侧接地故障； F_2 为直流线路1靠近逆变侧接地故障； F_3 为直流线路2靠近整流侧接地故障； F_4 为直流线路2靠近逆变侧接地故障； U_{DL} 为直流线路电压； I_{L1} 为线路1电流； I_{L2} 为线路2电流；线路电流 I_{L1} 以及 I_{L2} 旁边的箭头表示电流的极性。假定正常运行时，整流侧和逆变侧两端直流电压和直流电流极性都为正方向。

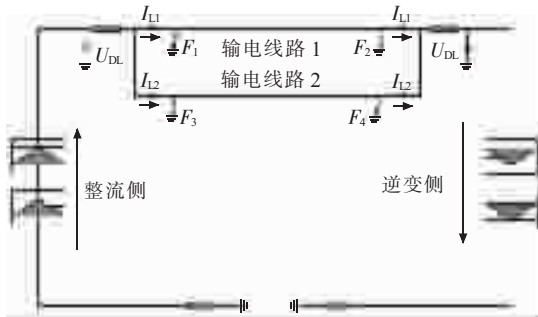


图5 直流线路测点及故障点

当 F_1 故障永久发生时，故障开始瞬间，故障点的行波沿着线路向线路两端传播，在故障波第一次到达线路一测点处，其电压和电流的关系符合式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_{DL}}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 U_{DL}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 I_{L1}}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I_{L1}}{\partial t^2} \end{cases} \quad (1)$$

在后续的暂态过程中，受极母线对故障波的反射以及从逆变侧通过线路2传回来的故障波的影响，线路1上呈现复杂的叠加过程。因为 F_1 故障点接近整流侧，所以采集直流电路电压的直流分压器相当于直接接地短路，其稳态电压值直线下降至零并且不会出现正负极性的变化；由于整流侧直流电压的下降，控制系统的低压限流环节起作用将线路1电流的大小稳定在低压限流环节所设定的参考值^[9,10]，此低压限流环节在故障发生瞬间所起的作用不大，主要是控制故障持续期间的稳态故障电流。至于直流线路2，其等价于一个在正常运行时已经充电的电容器， F_1 故障发生时，线

路2电容对故障点放电，因此整流侧线路2电流在故障一开始立马反向，经历振荡之后线路2电容放电完毕时下降至零。逆变侧在 F_1 故障开始瞬间，故障的入射波和反射波叠加产生直流电压和直流电流的振荡。从逆变侧沿着2条直流线路到 F_1 故障点的距离接近，因此逆变侧2条线路的电流对故障点的响应基本一致。2条线路放电完毕之后，逆变侧2条线路的电流也消失，逆变侧直流电压由于线路接地其最终也会减小至零。 F_1 故障具体波形如图6所示。

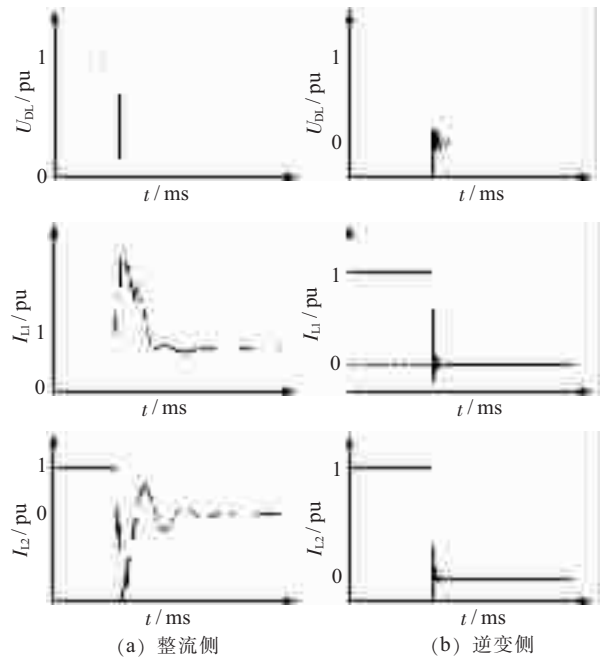
图6 F_1 接地故障特征

图6显示， F_1 故障时逆变侧2条线路电流的故障特征极其相似，无法根据逆变侧2条直流线路电流来识别故障线路，故只能依赖整流侧2条直流线路电流的差别来识别。

当 F_2 故障永久发生时，如果直流线路保护不动作，整流侧直流电压的下降触发控制系统的低压限流环节起作用，将2条直流线路电流之和稳定在低压限流环节所设定的参考值。由于故障靠近逆变侧，从整流侧沿着2条直流线路到 F_2 故障点的距离相近， I_{L1} 和 I_{L2} 的故障响应差别很小，因此无论是暂态过程还是故障后的稳态过程，2条线路电流的变化趋势与大小及其相似，最终每一条线路承担低压限流环节设定故障稳态电流参考值的一半。对于逆变侧因为直流线路1发生了永久接地故障，切断了整流侧通过直流线路1传输电流的通道，所以直流线路1的电流不可能从整流侧传输至逆变侧。线路1电流急剧减小并反向。然而直流线路2完好无损，从整流侧传输过来的电流通过逆变侧直流线路2再经过直流线路1流入 F_2 故障点。因此处于稳态后，逆变侧 I_{L1} 为负值， I_{L2} 为正值，流电压 U_{DL} ，两者稳定后的大小相等并且都等于整流侧直流线

路2的稳态电流。逆变侧的直流线路电压从1标么值减小至零。对于 F_2 故障发生时,整流侧和逆变侧的直流电流和直流电压响应如图7所示。

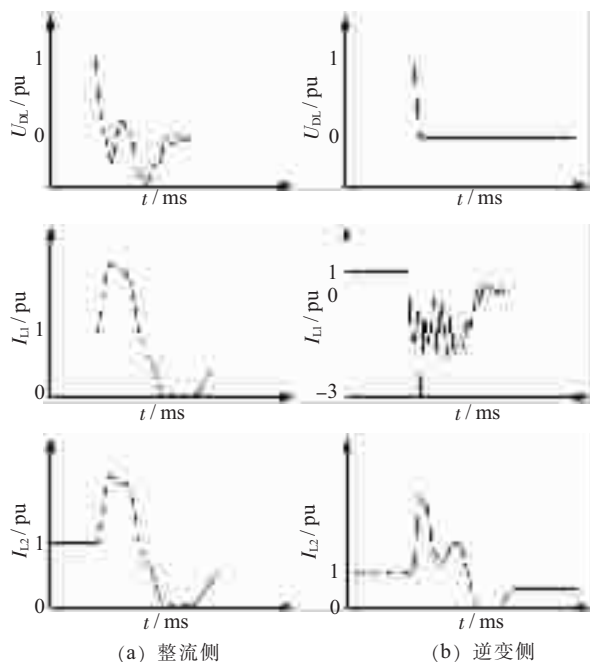


图7 F_2 接地故障特征

图7显示, F_2 故障时整流侧的2条线路电流的故障特征极其相似,无法根据整流侧2条直流线路电流来识别故障线路,只能依赖逆变侧2条直流线路电流的差别来识别。

由于直流线路2与直流线路1的等价关系, F_3 处发生故障时,直流电压的特征与在 F_1 发生故障时的直流电压特征相似,线路1电流的特征与在 F_1 发生故障时线路2电流的特征相似,线路2电流的特征与在 F_1 发生故障时线路1电流的特征相似。 F_4 处发生故障时,直流电压的特征与在 F_2 发生故障时的直流电压特征相似,线路1电流的特征与在 F_2 发生故障时线路2电流的特征相似,线路2电流的特征与在 F_2 发生故障时线路1电流的特征相似。

3 双线并联运行故障选线策略

目前研究和应用高压直流输电线路保护主要包含2类:一是利用电压电流暂态量特征设置的不带延时的主保护,例如行波保护和电压突变量保护^[11-13];另一是利用电压电流稳态量特征构建的延时较长的后备保护,例如线路低电压保护和线路纵差保护^[14]。主保护一般在线路金属接地时动作,后备保护一般在线路高阻接地时以及永久金属接地故障时后续动作。考虑到2种保护动作时间和故障特征上的差异以及稳态故障电流在整流侧和逆变侧表现的不同特征,文中将高压直流故障选线逻辑细化成高压直流暂态故障选线逻辑,整流侧稳态故障选线逻辑以及逆变侧稳态故障选

线逻辑3个子逻辑。

3.1 高压直流暂态故障选线策略

高压直流暂态故障选线逻辑与利用电压电流暂态量特征设置的不带延时的线路主保护相配合。在主保护动作时,高压直流暂态故障选线逻辑零延时动作,其实现步骤如下。

采集本条直流线路电流之后,先计算其 T_0 时间内本条直流线路电流的变化率平均值 dU/dT_0 ,然后整流侧将 dU/dT_0 直接送入比较器分别与电流方向定值(I_{set})及其相反数进行比较,而逆变侧将 dU/dT_0 取反后再送入比较器分别与 I_{set} 及其相反数进行比较。整流侧当 dU/dT_0 大于 I_{set} 并且持续时间大于时间 T_1 ,则判定本条直流线路电流的变化方向为正;当 dU/dT_0 小于 I_{set} 的相反数并且持续的时间大于时间 T_1 ,则判定本条直流线路电流的变化方向为负。逆变侧当 dU/dT_0 的相反数大于 I_{set} 并且持续时间大于时间 T_1 ,则判定本条直流线路电流的变化方向为正;当 dU/dT_0 的相反数小于 I_{set} 的相反数并且持续的时间大于时间 T_1 ,则判定本条直流线路电流的变化方向为负。

其次计算本条直流线路电流的变化幅度,当前时刻本条直流线路电流的值减去时间 T_{02} 之前本条直流线路电流的值即为本条直流线路电流的变化量(ΔI)。整流侧本条直流线路电流的变化幅度等于本条直流线路电流的 ΔI ,逆变侧本条直流线路电流的变化幅度等于本条直流线路电流的变化量的相反数 $-\Delta I$ 。

高压直流暂态故障选线逻辑(如图8所示)如下:(1)本条直流线路电流的变化方向为正;(2)本条直流线路电流在时间 T_{02} 内的变化幅度大于变化幅度定值;(3)从时间 T_s 前到当前时刻,本条直流线路电流的变化方向没有出现负值;(4)另外一条直流线路的高压直流暂态故障选线逻辑没有满足条件(1)、(2)、(3);(5)上述(1)、(2)、(3)、(4)4个条件都满足并且持续时间不小于时间 T_2 ;(6)高压直流暂态故障选线逻辑接收到暂不带延时的主保护动作信号。

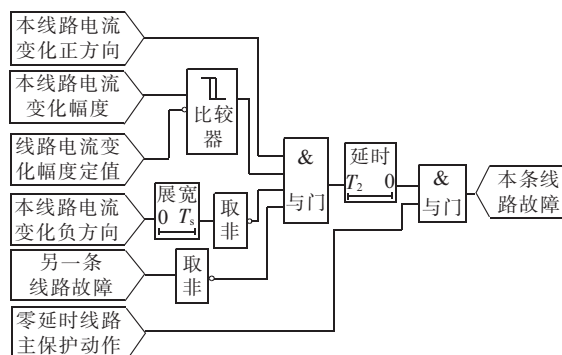


图8 暂态故障选线逻辑

3.2 整流侧稳态故障选线策略

整流侧稳态故障选线逻辑(如图9所示)如下:(1)本条直流线路电流减去另外一条直流线路电流的差值

大于差值定值;(2) 功率正送时直流线路电压小于电压定值或者功率反送时直流线路电压的相反数小于电压定值;(3) 本条直流线路电流大于电流下限定值;(4) 本条直流线路电流小于电流上限定值;(5) 上述(1)、(2)、(3)、(4)4个条件都满足并持续时间不小于时间 T_3 ;(6) 整流侧稳态故障选线逻辑接收到延时较长的后备保护动作信号。

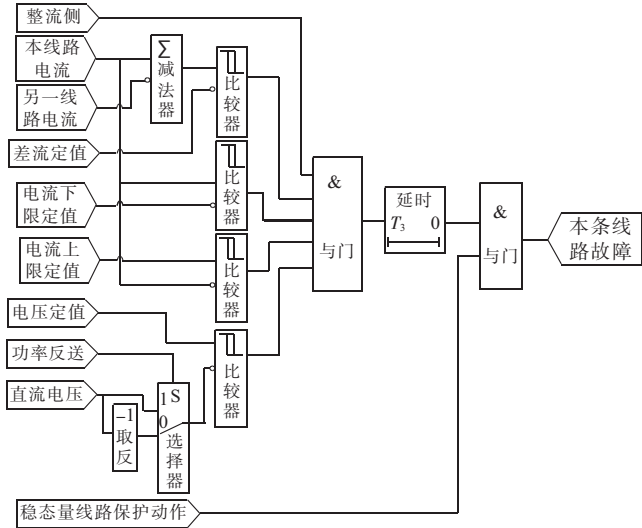


图9 整流侧稳态故障选线逻辑

3.3 逆变侧稳态故障选线策略

逆变侧稳态故障选线逻辑(如图10所示)如下:
 (1) 功率正送时直流线路电压小于电压定值或者功率反送时直流线路电压的相反数小于电压定值;(2) 另外一条直流线路电流大于电流正向定值;(3) 本条直流线路电流小于电流负向定值;(4) 上述(1)、(2)、(3)3个条件都满足并且持续的时间不小于时间 T_4 。

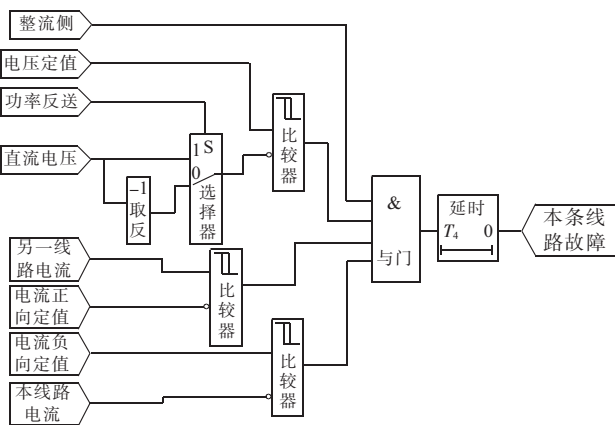


图10 逆变侧稳态故障选线逻辑

4 仿真

为了验证所提出的故障选线策略的正确性,搭建了RTDS数字仿真模型,并在投入线路重启动功能之后模拟如图5所示的 F_1 、 F_2 故障,得到故障选线试验结果如图11和图12所示。

从图11可以看出,在 F_1 故障永久发生时,高压直

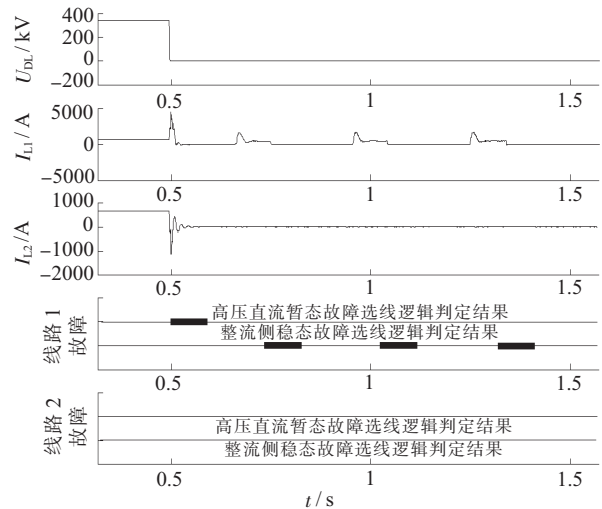


图11 发生 F_1 故障时选线策略结果

流暂态故障选线逻辑配合瞬时性的主保护准确动作识别故障线路。在后续直流线路重启动过程中,整流侧暂态故障选线逻辑配合延时较长的后备保护动作识别故障线路。

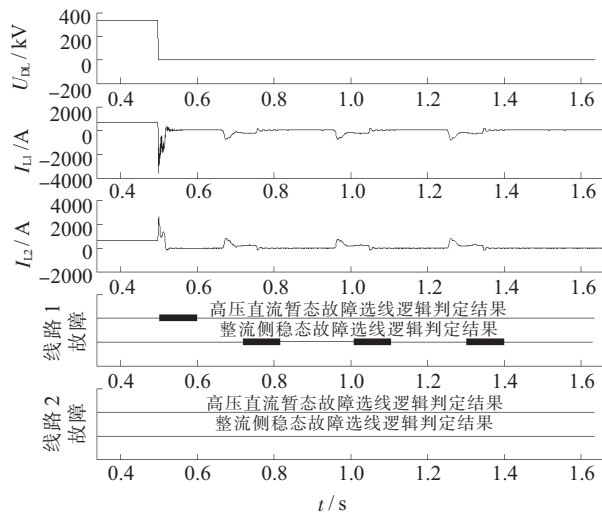


图12 发生 F_2 故障时选线策略结果

从图12可以看出在 F_2 故障永久发生时,高压直流暂态故障选线逻辑配合瞬时性的主保护准确动作识别故障线路。在后续直流线路重启动过程中,逆变侧暂态故障选线逻辑配合延时较长的后备保护动作识别故障线路。

5 结束语

综上所述,文中设计的故障选线策略可用于高压直流双线并联运行方式中。故障选线策略的应用解决了运行人员只知道发生了线路故障但不能识别故障线路的问题。通过分析线路故障特征将选线逻辑分成高压直流暂态故障选线逻辑、整流侧稳态故障选线逻辑以及逆变侧稳态故障选线逻辑,搭建RTDS数字仿真系统验证了改故障选线策略的正确性,并成功地应用于海外某直流输电工程。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:71-75.
- [2] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京:水利电力出版社, 1990:133-138.
- [3] 谢菁,陈平. 直流输电线路行波故障测距系统[J]. 山东理工大学学报, 2006, 20(3):47-50.
- [4] 宋国兵,周德生,焦在滨,等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24):57-61.
- [5] 陶利国,许云峰. 采用数字技术的小电流接地选线和故障定位装置[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7):86-90.
- [6] 许小兵,董丽金,袁栋. 智能变电站小电流接地选线装置的研究与实现[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5):55-58.
- [7] 任建文,孙文武,周明,等. 基于数学形态学的配电网单相接地故障暂态选线算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1):70-75.
- [8] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4):1-6.
- [9] 付颖,罗隆福,童泽,等. 直流输电控制器低压限流环节的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6):1110-1114.
- [10] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性与整定研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1):255-260.
- [11] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22):123-129.
- [12] 陈仕龙,张杰,毕贵红,等. 基于小波分析的特高压直流输电线路双端电压暂态保护[J]. 电网技术, 2013, 37(10):2720-2725.
- [13] 于洋,刘建,哈恒旭,等. 双极高压直流输电线路行波差动保护原理及方案[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2):40-44.
- [14] 雒铮,朱韬析. 直流线路后备保护研究[J]. 广东输电与变电技术, 2010, 12(6):1-6.

作者简介:

张栋(1977),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统及自动化研究工作;

杨建明(1984),男,湖南茶陵人,工程师,从事高压直流输电系统控制保护研究工作;

卢宇(1979),男,湖北荆州人,高级工程师,从事高压直流输电系统控制保护研究工作;

吴林平(1980),男,安徽安庆人,高级工程师,从事高压直流输电系统控制保护研究工作;

赵文强(1985),男,湖北鄂州人,工程师,从事高压直流输电系统控制保护研究工作。

The Fault Line Selection Strategy for HVDC Parallel Line

ZHANG Dong, YANG Jianming, LU Yu, WU Linping, ZHAO Wenqiang

(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to decrease transmission losses, double-line parallel operation mode is adopted in some high voltage direct transmission (HVDC) projects. However, only one line fault locator is configured due to the investment consideration and the limit of mounting position. Aiming at solving this problem, a fault line selection strategy is proposed based on the AC fault line selection experience and the analysis of the characteristic of DC line fault. The strategy is divided into transient fault line selection, rectifier steady fault selection and inverter steady fault selection. The proposed strategy is validated by real-time digital simulator (RTDS) system.

Key words: high voltage direct transmission; double-line parallel operation; characteristic of DC line fault; fault line selection

(上接第 24 页)

周强(1979),男,湖北武穴人,工程师,从事嵌入式平台软件研发工作;

姜健宁(1955),男,山东潍坊人,高级工程师,从事继电保护运行管理工作;

熊蕙(1977),女,湖北武汉人,工程师,从事嵌入式平台工具软件研发工作;

潘武略(1981),男,山东烟台人,工程师,从事继电保护运行管理工作。

Design and Application of Relay Protection On-line Monitoring System in the Intelligent Substation

WEN Jifeng¹, SHENG Haihua², ZHOU Qiang¹, JIANG Jianning², XIONG Hui¹, PAN Wulue²

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the development of computer and communication technology, investigation of on-line monitoring for relay protection system has made important progress, and could solve the over-maintenance problem caused by the traditional time-based maintenance approach. The paper promotes system-level solutions for on-line monitoring of relay protection system and related device in the intelligent substation, defines state-detecting information of protecting device and corresponding transmission mode, and designs on-line monitoring scheme for physical link and logic link of secondary circuit in relay protection system. Finally, engineering application of on-line monitoring for relay protection system in the intelligent substation shows that the solution can accomplish on-line monitoring on relay protection device and secondary circuit, which effectively increases the reliability of relay protection system.

Key words: intelligent substation; relay protection; secondary circuit; on-line monitoring