

±800 kV 宾金直流接地极线路电流不平衡异常分析

雷潇 崔涛 曾宏

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,其安全稳定运行对整个系统的可靠性至关重要。然而,近年来国内接地极线路多次发生故障,成为薄弱环节。2016年4月16日±800 kV 宾金直流输电工程的极Ⅱ线路遭受雷击后绝缘击穿。极Ⅱ线路在直流控保的作用下全压再启动两次成功。在极Ⅱ线路第2次再启动过程中,接地极引线不平衡保护动作。通过故障录波分析和登塔检查,发现宜宾换流站接地极线路一侧导线绝缘在极Ⅱ线路接地故障后发生过电压击穿,在重启过程中持续流过直流续流。基于此次故障,详细分析了目前接地极线路多次故障的原因,提出通过改进接地极建立绝缘配合解决此类问题。

关键词: 特高压直流输电; 接地极线路; 招弧角; 绝缘配合

Abstract: Safe and stable operation of electrode line is important to the reliability of UHVDC transmission system. However, electrode line fails repeatedly in recent years, which made it a weak part. On April 16, 2016, the pole II line of ±800 kV UHVDC Binjin transmission project failed because of lightning stroke. Under the control of protection system, pole II restarted successfully in the second time. During the restart procedure, unbalanced protection of electrode line was triggered. Fault records were analyzed and fault tower was checked. It is found that one of the two electrode lines was breakdown under over-voltage. DC on the fault place continued during the whole restart procedure. Based on this fault analysis, the causes of most electrode line faults are analyzed in detail, and solutions based on insulation coordination are presented.

Key words: UHVDC transmission; earthed electrode line; arcing horn; insulation coordination

中图分类号: TM721 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2017)02-0016-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.004

0 引言

接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,其安全稳定运行对整个系统的可靠性至关重要^[1-4]。然而,近年来接地极线路多次发生故障,引起关注。如国家电网公司2012年7月6日±500 kV 呼伦贝尔—辽宁直流输电工程接地极线路绝缘子炸裂、导线脱落^[5],南方电网公司2012年12月15日±800 kV 云广直流输电工程接地极线路绝缘闪络引起极Ⅱ强制移相重启^[6]。

特高压直流系统的直流套管与极线发生接地故障后,会在接地极线路引发过电压而击穿绝缘。由于击穿点流过的是直流续流,电弧难以熄灭,绝缘子和金具在持续电弧的烧蚀下损毁,导致掉串和断线等事故。单极大地运行时发生雷击接地极线路也会导致此类事故。接地极线路的典型设计为两根双分裂导线并列,绝缘击穿通常只会发生

在其中一根。根据此特征,国内换流站对接地极线路设置了电流不平衡保护以监测接地故障。该保护出口一般为极平衡控制或闭锁,虽然在一定程度上可减少绝缘损伤的程度,但没有从根本上解决问题。

下面对2016年4月16日±800 kV 宾金直流输电工程的一起故障进行详细分析,阐明目前接地极线路多次故障的根本原因,提出通过改进接地极建立绝缘配合解决此类问题。

1 故障与重启过程

2016年4月16日3时49分,±800 kV 宾金直流输电工程宜宾换流站站极Ⅱ电压突变量保护、行波保护动作,极Ⅱ直流线路全压再启动两次成功。在极Ⅱ线路第二次再启动过程中,接地极引线不平衡保护动作。整个过程保护动作时序如表1所示。

表1 保护动作时序

时间	主机	事件
03:49:04:389	极II极保护系统C	行波保护动作
03:49:04:390	极II极保护系统A	行波保护动作
03:49:04:390	极II极保护系统B	行波保护动作
03:49:04:403	极II极保护系统B	电压突变量保护动作
03:49:04:404	极II极保护系统A	电压突变量保护动作
03:49:04:404	极II极保护系统C	电压突变量保护动作
03:49:04:412	极II极控系统A(主)	线路故障再启动动作、极保护启动 线路重启
03:49:04:423	极II极控系统B(从)	线路故障再启动动作、极保护启动 线路重启
03:49:04:898	极I极极保护A、B、C	接地极引线不平衡保护平衡双极运行(双极运行)
03:49:04:898	极II极极保护A、B、C	接地极引线不平衡保护平衡双极运行(双极运行)
03:49:04:898	极I极极保护A、B、C	极保护启动 双极平衡运行
03:49:04:898	极II极极保护A、B、C	极保护启动 双极平衡运行
03:49:04:930	极I极控系统A(主)	保护降电流限制 直流电流
03:49:04:932	极I极控系统A(主)	保护降电流限制 直流电流

2 接地极线路电流不平衡原因分析

2.1 登塔检查

故障发生后,四川公司对宜宾换流站接地极线路开展巡线,并对近区杆塔作登塔检查。发现4号



图1 4号塔左侧导线大号侧招弧角的电弧烧蚀痕迹

塔左侧导线大号侧招弧角有电弧烧蚀痕迹,如图1所示。招弧角上电极和下电极中部的镀锌层被烧蚀,且烧蚀部分已经起锈。

2.2 故障录波分析

图2为极II直流线路发生接地故障后故障录波记录的宜宾换流站中性极母线电压波形。电压在起始阶段持续上升,频率约为75 Hz,峰值104 kV。达到峰值后,电压衰减振荡,频率约为530 Hz。由此可判断,接地极线路的绝缘在峰值104 kV时刻发生击穿,导致频率突变。

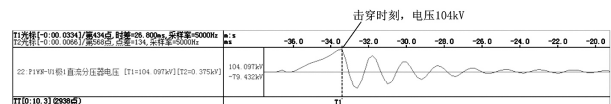


图2 中性极母线电压波形

极II线路接地故障后约10 ms,极II线路执行3次再启动逻辑,并在第2次重启成功。第1次重启等待时间为150 ms,重启过程150 ms;第2次重启等待时间200 ms。整个重启过程中,接地极线路左、右导线的电流波形如图3所示。

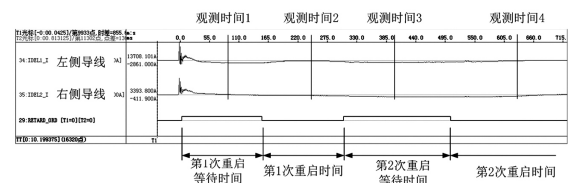


图3 接地极线路电流波形

接地极线路左右两侧电流波形分为4个阶段:

1) 在第1次重启等待时间内,接地极线路左右两导线的电流进入稳态过程后,出现明显不平衡。在观测时刻1,左侧导线电流1 910 A,右侧导线电流7.3 A。

2) 在第1次重启时间内,极II直流线路电流开始恢复,接地极线路总电流减小。在观测时刻2,左侧导线电流331 A,右侧导线电流112 A。

3) 在第2次重启等待时间内,极II直流线路电流为0,接地极线路总电流重新增大。在观测时刻3,左侧导线电流1 445 A,右侧导线电流359 A。

4) 在第2次重启时间内,极II直流线路电流逐渐恢复,接地极线路左右两导线电流逐渐减小,最终为0。在观测时刻4,左侧导线电流249 A,右侧导线电流249 A。

根据上述的接地极线路左右导线电流变化情况,可以判断在两次重启过程中,接地极线路击穿点

电弧未熄灭。

接地极线路不平衡保护的逻辑为:不平衡保护动作值 679 A,在双极运行时延时 200 ms 进行极平衡。从进入第 2 次重启等待时间算起,不平衡电流超过 679 A 后 200 ms,不平衡保护动作,进行了极平衡操作。极平衡操作过程发生在第 2 次重启过程中,系统会根据当前电流刷新参考值,使极线电流值存在一定扰动,如图 4 所示。

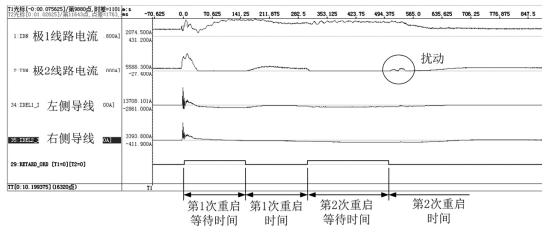


图 4 接地极线路电流扰动波形

3 接地极线路绝缘配合分析

为论证极线故障后产生的接地极线路过电压是否能导致宜宾侧接地极线路杆塔绝缘闪络,对带招弧角的绝缘子串开展了操作冲击和工频耐受试验,如图 5 所示。试品的绝缘结构与宾金直流接地极线路的杆塔一致,招弧角的上电极与下电极之间的空气间隙为 200 mm,绝缘子为 U160BP/170H 型陶瓷绝缘子,结构高度为 170 mm。试验结果表明,工频、操作冲击的击穿电压分别为 109 kV、149.4(+) / 150.0(-) kV,闪络路径为招弧角空气间隙。

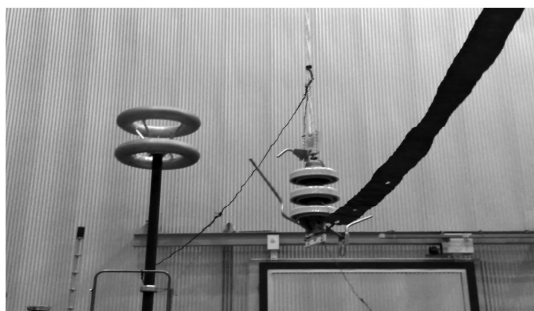


图 5 招弧角击穿试验形

故障过电压为 104 kV,主频为 75 Hz 左右,与招弧角工频击穿电压接近,考虑到试验环境和现场环境的差异,招弧角的安装偏差以及高压试验本身的离散性,招弧角在此故障过电压下击穿属于正常现象。

接地极线路绝缘击穿后,因流过的是直流续流,电弧难以熄灭。本次故障中,直流电弧在第 2 次重

启时熄灭,持续时间超过 600 ms,因系统并未满功率运行,最大电流为 2 000 A。若系统满功率运行,电弧更难以熄灭,考虑到电弧对招弧角烧蚀作用,很可能发生招弧角烧断、绝缘子串掉串的严重后果。通过提高接地极线路的绝缘强度以避免在过电压下击穿是目前解决该问题的主要方法。为此,可通过调整招弧角间隙距离以配合过电压。

可建立仿真模型计算直流输电系统的过电压。根据 ±800 kV 宾金直流接地极线路避雷器的参数,接地极线路出现的最大过电压为 275 kV,频率约为 75 Hz。图 6 为招弧角间隙距离与工频击穿电压的关系。当间隙距离为 550 mm 时,招弧角在 275 kV 下不会发生击穿。考虑各种因素的影响,在 10% 的误差范围内,招弧角在最大故障过电压 275 kV 不发生击穿的间隙距离至少为 560 mm。

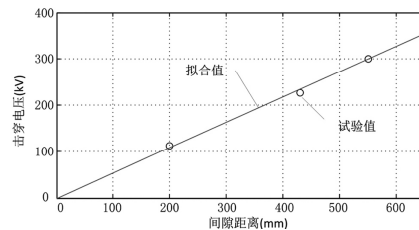


图 6 招弧角的工频击穿电压(峰值)与间隙距离的关系

4 结 论

针对 2016 年 4 月 16 日 ±800 kV 宾金直流发生的接地极线路不平衡保护动作事件,分析了接地极线路绝缘设计问题,得出以下结论和建议:

1) 宾金直流接地极线路绝缘强度较低,直线塔的招弧角工频 50% 击穿电压为 109 kV。中性极母线的故障录波显示过电压幅值为 104 kV,主频为 75 Hz。考虑到试验环境和现场环境的差异、招弧角的安装偏差以及高压试验本身的离散性,招弧角在此过电压下击穿属于正常现象。

2) 极 II 线路重启成功前,接地极线路的击穿点电弧一直未熄灭,导致左右导线分流不平衡,不平衡电流最大值约 2 000 A。由于线路重启成功,接地极线路电流减小至 0,燃弧时间约 600 ms。因电流小、续流时间短,因此未出现招弧角烧断、绝缘子掉串的严重后果。

3) 接地极线路不平衡保护在第 2 次重启中正 (下转第 23 页)

as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System ,1969 ,88(4) :316 -329.

[3] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论 [J]. 电网技术 ,2006 ,30(10) :29 -33.

[4] 韩志勇. 电力系统低频振荡的分析和控制 [D]. 北京: 华北电力大学 ,2005.

[5] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会, 等. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析 [J]. 电网技术 ,2007 ,31(8) :13 -16.

[6] 韩志勇, 贺仁睦, 马进, 等. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析 [J]. 电力系统自动化 ,2009 ,33(3) :16 -19.

[7] Lei Chen , Yong Min , and Wei Hu. An Energy - based Method for Location of Power System Oscillation Source [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2013 ,28(3) :828 -836.

[8] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法 [J]. 中国电机工程学报 ,2012 ,32(1) :

78 -83.

[9] 檀斌, 薛萬胜. 多机系统混浊现象的研究 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(2) :3 -8.

[10] Wen - Show Kao , KAO The Effect of the Low - frequency Oscillations Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizer [C]. Power Engineering Society Summer Meeting 2001.

[11] 丁蓝, 薛安成, 李津, 等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别 [J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(22) :24 -28.

[12] 王超, 李继红, 李颖毅, 等. 淮沪特高压投产后的华东电网低频振荡特征分析 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(18) :120 -125.

作者简介:

张 航(1994) 硕士研究生,研究方向为交直流电网稳定性分析与控制。

(收稿日期:2016 -11 -29)

(上接第10页)

[3] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用 [J]. 吉林电力 ,2011 ,15(2) :45 -49.

[4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2010 ,31(12) :10 -20.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(8) :105 -106.

[6] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(9) :102 -104.

作者简介:

周 唯(1982) 硕士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;

刘翰柱(1978) 学士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;

谢 静(1981) 硕士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;

梁 明(1973) 学士、教授级高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作。

(收稿日期:2016 -12 -10)

(上接第18页)

确动作。系统会根据当前电流刷新参考值,使极线电流在重启过程中存在一定扰动。

4) 为保证接地极线路在故障过电压下不发生闪络,建议招弧角间隙距离应至少增大到560 mm。

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.

[2] 王彪, 王渝红, 丁理杰. 高压直流输电接地电极及相关问题综述 [J]. 电力系统及其自动化学报 ,2012 ,24(1) :66 -72.

[3] 赵杰, 何金良. 特高压和高压直流输电系统共用接地

极模式分析 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(10) :45 -47.

[4] 张劲松. 高压直流输电共用接地极主要设计原则 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(6) :48 -50.

[5] 张冯硕, 吴高波, 李健, 等. 特高压直流接地极线路绝缘配合研究 [J]. 电力建设 ,2015 ,36(2) :86 -90.

[6] 陈灿灿, 刘茂涛, 宋述波. ±800 kV 云广直流“12.15”事故原因分析及防范措施 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(23) :125 -129.

作者简介:

雷 潇(1988) 博士、工程师,主要从事电力系统过电压与接地技术研究工作。

(收稿日期:2016 -12 -03)