

# 特高压直流输电系统接地极线路 保护配置方案优化建议

刘俊杰<sup>1</sup> 李 琨<sup>1</sup> 陈沧杨<sup>2</sup> 李煜鹏<sup>1</sup> 刘 鑫<sup>3</sup>

(1. 国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

3. 国网山东省电力公司莒县供电公司, 山东 日照 276500)

**摘要:** 接地极是特高压直流输电系统中重要的组成部分, 结合宾金直流接地极调试及投运以来发生的两起接地极引线断线事件, 尤其是2015年7月13日接地极引线1断线接地事件, 利用单位电流法计算故障支路的电流分布系数, 理论分析接地极线路接地和断线故障时电流变化特征, 深入分析目前宾金直流接地极保护策略配置存在的缺陷, 将纵联差动保护与不平衡保护相结合, 形成一种能准确判断故障类型的新型保护配置方法, 优化目前的保护动作策略, 能有效提高接地极系统运行的稳定性。

**关键词:** 接地极; 纵联差动保护; 单位电流法; 电流分布系数; 不平衡保护

**Abstract:** Grounding electrode is the most important part of UHVDC transmission system. The comprehensive analysis for two broken faults in grounding electrode wire of Bin - Jin transmission system is given which occurred in commissioning period and operation period, especially broken fault occurred in line - 1 on July 13, 2015. The change characteristics of current with ground fault and broken fault in grounding line are analyzed by using unit current method to calculate the current distribution factor of fault branch. Based on deeply analysing the defects of current protection configuration and action strategy, a new protection configuration is proposed combing with longitudinal differential protection and unbalance protection. The method can judge the fault type accurately. And also the optimized action strategies is given which will effectively improve the stability of the grounding electrode system.

**Key words:** grounding electrode; longitudinal differential protection; unit current method; current distribution factor; unbalance protection

中图分类号: TM721.1 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2017)01 - 0089 - 06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.019

## 0 引言

接地极系统在特高压直流输电系统中起着重要作用, 它的主要作用是钳制中性点电位以及在单极大地回线方式运行时为直流输电系统提供回路<sup>[1]</sup>, 如果接地极线路发生故障时会对直流输电系统产生重要的影响, 将直接威胁输电系统的安全和稳定<sup>[2]</sup>。一般而言, 接地极距离换流站几十至一百千米之间, 主要是为了在单极大地回线方式下运行时接地极电流尽可能少地影响换流站等其他设施。比如宾金直流整流站的接地极距离宜宾站 101.062 km。当宾金直流双极平衡运行时, 流入接地极的不平衡电流很小, 一般不超过十几安培; 当直流以单极

大地回线方式运行时, 尤其在额定负荷运行时, 流入接地极的电流达上千安培<sup>[3]</sup>。根据宾金直流接地极1年的运行情况来看, 在目前的保护配置下, 要准确判断出故障类型, 实现对接地极故障的可靠保护是十分困难的。通过宾金直流接地线路调试和投运以来的两起引线断线事件, 发现目前的接地极引线保护并不完善。

结合宾金直流接地引线保护的配置策略及事故实例, 从理论上分析在单极大地回线方式下接地故障和断线故障时接地极引线上电流的变化量, 引入交流线路中应用较为成熟的纵联电流差动保护, 进一步优化原有的接地极引线保护方案。

# 1 单极大地回线下接地极线路故障类型特点

根据宾金直流大地回线的运行方式,将其等效为如图1所示模型。结合图1对接地极线路短路和断线故障现象进行对比分析。

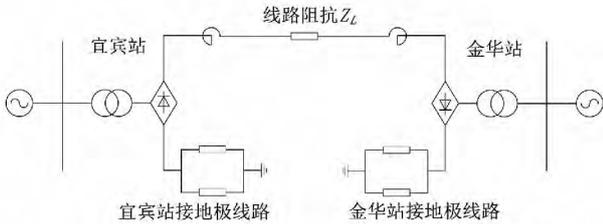


图1 单极大地回线运行方式等效模型

图1中宜宾站接地极线路模型进一步简化如图2所示。I号接地极线路阻抗为 $Z_1$ , II号接地极线路阻抗为 $Z_2$ , 此时接地线路阻抗 $Z = Z_1 \parallel Z_2$ 。

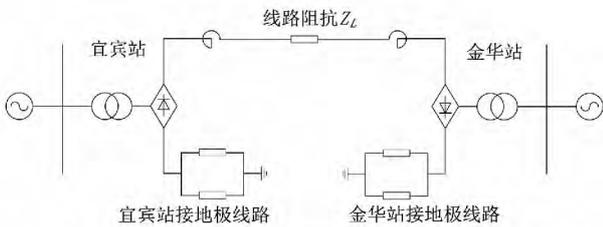


图2 宜宾站接地极线路等效电路图

## 1.1 接地极线路发生接地故障后接地极线路阻抗变化

当宜宾站至共乐接地极接地线路I发生接地故障时,如图3所示。 $Z_3$ 为接地点到宜宾站接地极出线等值阻抗, $Z_4$ 为接地点到接地极址的线路等值阻抗,有 $Z_3 + Z_4 = Z_1$ ,  $Z_{g0}$ 为接地点的等值阻抗。

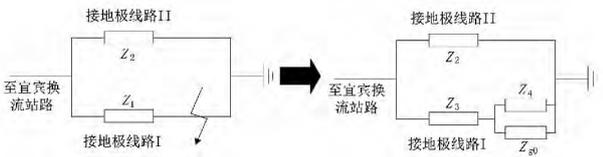


图3 宜宾站接地极线路接地故障等效电路图

发生接地故障后,无论是高阻接地、低阻接地还是接地短路,总有 $Z_3 + Z_4 // Z_{g0} < Z_1$ ,此时接地极回路阻抗相比于接地短路之前减小。因此,当宜宾站接地极线路发生接地故障之后,由于线路阻抗及金华站回路电抗没有变化,宜宾站接地极回路阻抗变小,直流输电系统回路中总的阻抗变小,直流输电系统中电流增大。同时在I、II两条接地极引线中会出现较大的电流差值。

## 1.2 接地极线路发生断线故障后接地极线路阻抗变化

当接地极线路发生断线故障后,等效短路图如图4所示。接地极线路总阻抗 $Z_2 > Z$ ,  $Z$ 为未发生断线之前接地极总阻抗。

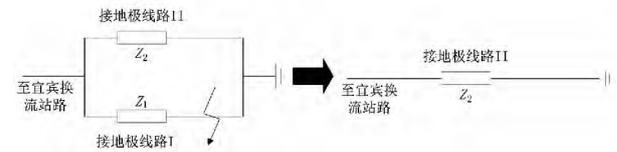


图4 宜宾站接地极线路断线故障等效电路图

因此,当宜宾站接地极线路发生断线故障之后,由于线路阻抗及金华站回路电抗没有变化,宜宾站接地极回路阻抗变大,直流输电系统回路中总的阻抗变大,直流输电系统中电流减小。未断线线路出现较大的电流,断线线路电流为0。

综上所述,当接地极系统发生接地或断线故障后,系统中电气量的变化如表1所示。

表1 单极大地回线下接地极引线接地和断线故障后直流系统电气量变化

故障类型	直流系统中电流和电压变化	I和II线路电流差值
接地	直流电流增大,电压下降	两线路出现较大的电流差值
断线	直流电流减小,电压升高	两线路出现较大的电流差值

# 2 宾金直流接地极保护配置及缺陷分析

## 2.1 宾金直流接地极引线过负荷保护及动作策略

宾金直流输电系统接地极过负荷保护是采用许继公司设计的保护策略<sup>[4]</sup>,其工作原理是检测接地极引线电流( $I_{DEL1}$ 和 $I_{DEL2}$ )是否超过定值,其保护具有定时限特性。保护判据及定值设置为

$$|I_{DEL1}| > \Delta_1 \text{ 或 } |I_{DEL2}| > \Delta_1; I_{D\_NOM} = 5\,000\text{ A}$$

典型定值为 $\Delta_1 = 0.75 \times I_{D\_NOM}$ 。

表2 宾金直流接地极引线过负荷保护配置及动作策略

运行方式	定值设定	动作策略
任何方式	$\Delta > \Delta_1$ 时,延时 0.5 s	告警
单极运行	$\Delta > \Delta_1$ 时,延时 120 s	功率回降
双极运行	$\Delta > \Delta_1$ 时,延时 120 s	平衡双极运行

## 2.2 宾金直流接地极不平衡保护及动作策略

宾金直流输电系统接地极不平衡保护的工作原理是采用横联差动保护原理<sup>[4]</sup>,即测量两条接地极

线路上的电流差值,如果当一根接地极线路发生接地或开路时会有比较大的差流,其动作策略为不平衡值达到动作值之后,发告警信号。动作判据为

$$I_{DEL\_DIFF} = |I_{DEL1} - I_{DEL2}| > \Delta_1; I_{D\_NOM} = 5000 \text{ A}$$

典型定值为  $\Delta_1 = 0.02 \times I_{D\_NOM}$

延时1s,告警。其中  $I_{DEL1}$ 、 $I_{DEL2}$  分别为两条接地极引线的电流。

表3 宾金直流接地极引线不平衡保护配置及动作策略

运行方式	定值设定	动作策略
单极运行	$\Delta > \Delta_1$ , 延时1s	告警
双极运行	$\Delta > \Delta_1$ , 延时1s	告警

### 2.3 目前宾金直流接地极保护配置存在的缺陷

通过这些年来接地极引线系统运行情况来看,接地极引线最常见的故障是接地故障和断线故障。宾金直流不平衡保护,无论单极或双极运行时发生断线还是接地故障,动作后果都是告警。显然这种配置策略是不合理的,因为当发生引线断线故障后,这类故障属于永久性故障,应采用极闭锁的保护策略,而不仅仅只是告警。

由第1节分析可知,当某一条接地极引线发生断线故障时,其主要特征是该断线引线无电流流过。当某一条接地极引线发生近站点接地故障时,将造成大部分电流流入故障点,会导致另一条线路测量电流值很小或是接近于0。在这两类故障情况下,电流大小会表现出相似的特征,两条引线都会出现较大的电流差值,因此目前宾金直流的接地极保护判据是无法准确判断是断线故障还是接地短路故障。同时,当接地极线路中的一条引线断线,将造成另一条线路长时间过流,对设备寿命造成巨大影响,甚至会进一步造成两条引线同时断线的严重后果。

表4 宾金直流接地极过负荷及不平衡保护动作策略缺陷

保护	动作判据	动作策略	故障类型
过负荷保护	$ I_{DEL1} $ 或 $ I_{DEL2}  > 0.75 \times I_{D\_NOM}$	单极运行: 延时120s 功率回降(不合理) 双极运行: 延时120s 平衡双极(不合理)	过负荷
不平衡保护	$ I_{DEL1} - I_{DEL2}  > 0.02 \times I_{D\_NOM}$	告警(不合理)	断线或接地(判断不明)

### 2.4 宾金直流接地极导线接地断线实例

宾金直流接地极线路自2014年6月以来,发生过2次接地极线路断线事件。第1次是宾金直流系统调试期间直流偏磁测试试验时,运行方式为大地回路4000A运行,接地极址线路断线故障,发生故障后,在现有的接地极保护下,不平衡保护和过负荷均无任何报警。第2次是2015年7月13日,宾金直流满负荷运行时极2直流闭锁,宾金、复奉直流共乐接地极线路电流瞬时增大,导致接地极线路引线1过负荷断裂。

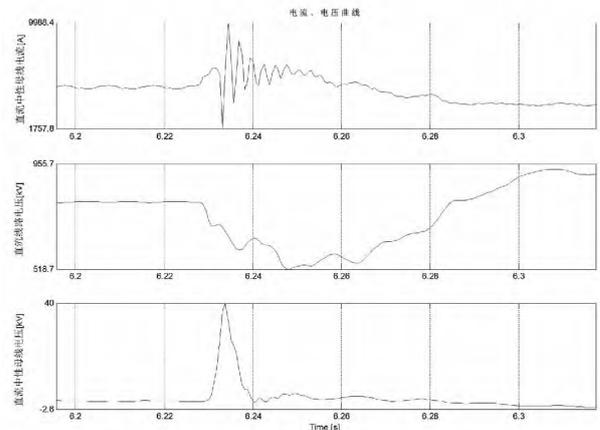


图5 中性极线操作过电压及直流系统电压、电流变化

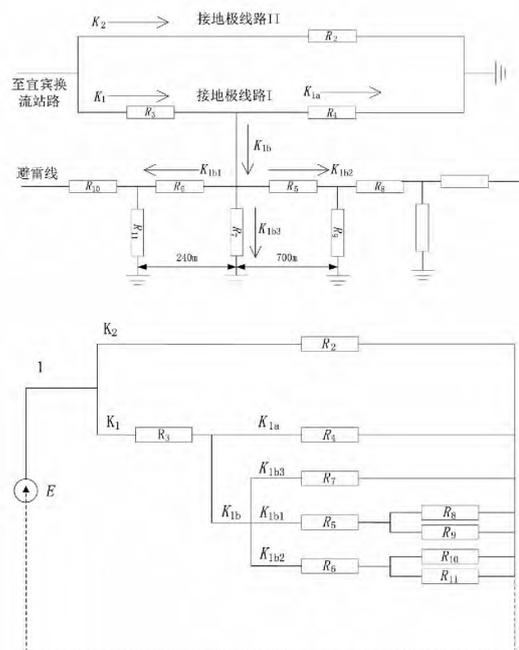


图6 接地极引线断线故障后等效电路图

7月13日事件过程中,由于宜宾站至共乐接地极线路上产生操作过电压,其峰值高达40kV,持续时间12ms,导致11号杆塔绝缘子串击穿后,接地极电流向避雷线和杆塔分流入地,随后过热导线在冲击力、张力及电流发热的共同作用下断裂。

由于流入接地极电流为直流,线路电抗  $X_L$  很小,计算时电抗可忽略不计,直接考虑电阻。宜宾站接地极线路导线电阻为  $0.0655 \Omega/\text{km}$ ,避雷线电阻为  $1.79 \Omega/\text{km}$ ,11号塔接地电阻约为  $9 \Omega$ 。下面根据单位电流法<sup>[5]</sup>计算流经避雷线及接地引线的电流,各支路分布系数计算等效图如图6所示(由于经过两级分流后,流经  $R_8$  之后的电流相对于较小,可忽略不计)。

根据图6,各支路分布系数计算式如下:

$$k_2 = \frac{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] // R_4 + R_3}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] // R_4 + R_3 + R_2}$$

$$k_{1b} = \frac{R_2}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] // R_4 + R_3 + R_2} \times \frac{R_4}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7 + R_4}$$

$$k_{1a} = \frac{R_2}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] // R_4 + R_3 + R_2} \times \frac{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7 + R_4}$$

$$k_{1b1} = \frac{(R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7}{[(R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] + (R_5 + R_8 // R_9)} \times \frac{R_4}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7 + R_4} \times k_1$$

$$k_{1b2} = \frac{(R_5 + R_8 // R_9) // R_7}{[(R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] + (R_5 + R_8 // R_9)} \times \frac{R_4}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7 + R_4} \times k_1$$

$$k_{1b3} = \frac{(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})}{[(R_6 + R_{10} // R_{11}) // R_7] + (R_5 + R_8 // R_9)} \times \frac{R_4}{[(R_5 + R_8 // R_9) // (R_6 + R_{10} // R_{11})] // R_7 + R_4} \times k_1$$

通过具体线路参数及上式可得出各支路电流分布系数为

$$k_1 = 0.883; k_2 = 0.117;$$

$$k_{1a} = 0.117; k_{1b} = 0.776;$$

$$k_{1b1} = 0.314; k_{1b2} = 0.314; k_{1b3} = 0.138。$$

在  $I_{DNE}$  为  $6000 \text{ A}$  电流下,计算结果为

流过避雷线的电流为  $k_{1b2} \times 6000 = 1884 \text{ A}$ ;

流过 I 引线的电流为  $I_{DEL1} = k_1 \times 6000 = 5298 \text{ A}$ ;

流过 II 引线的电流为  $I_{DEL2} = k_2 \times 6000 = 702 \text{ A}$ ;

根据以上计算出的分流结果,与故障录波中故障后的电流实际值基本吻合,故障录波  $I_{DEL1}$ 、 $I_{DEL2}$  电流值如图7所示。

根据宜宾站接地极目前保护配置策略,在单极大地回线运行方式下,线路电流大于额定电流的75%即  $3750 \text{ A}$  时,满足过负荷保护动作判据,系统

延时  $120 \text{ s}$  启动功率回降。而现场接地极保护实际动作结果为过负荷保护不平衡保护报警。过负荷保护并没有启动功率回降,说明过负荷保护定值不合理,延时太长。

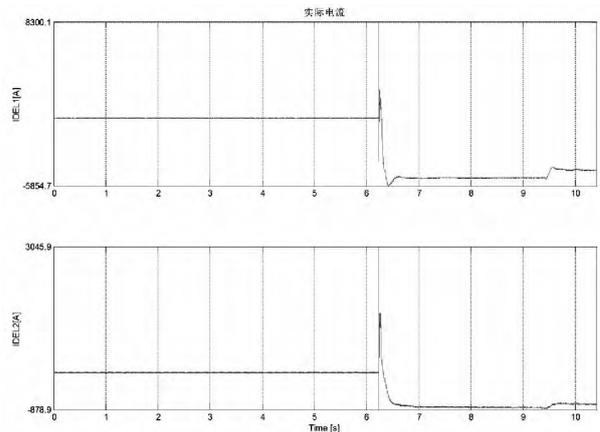


图7 接地极引线断线故障前后故障录波图

综上所述,目前接地极系统保护策略缺陷如下:

- 1) 接地极不平衡保护判据无法判断故障是接地故障还是断线故障;
- 2) 接地极不平衡保护的保护动作策略不完善,无论是断线永久故障还是接地瞬时故障,只有告警;
- 3) 单极大地运行方式下,接地极过负荷保护的定值设定不合理,延时太长。

### 3 基于纵联电流差动原理的接地极引线保护改进方案及优化建议

通过上述分析,可以看出,目前宜宾站接地极线路保护配置的缺陷是真实存在且无法满足目前运行要求。分析原因是:现有的不平衡保护是基于横联差动保护原理设计,设计中只在2条接地极引线的首端安装2个电流互感器,根据引线中的横差电流进行故障判断。设计如图8所示,虽然这种方法简单方便,但是从运行1年接地极出现的故障来看,亟待改进。



图8 宜宾站接地极线路电流互感器配置图

针对单极大地回线方式下故障类型的特点,提出基于纵联差动保护<sup>[6]</sup>与横联差动保护原理相结合的接地极故障判别方法,即在接地极引线的近站端和极址端均安装电流互感器。如图9所示,采集

接地极首末两端的电流,利用纵差电流保护与现有的横差电流保护(不平衡保护)进行配合。

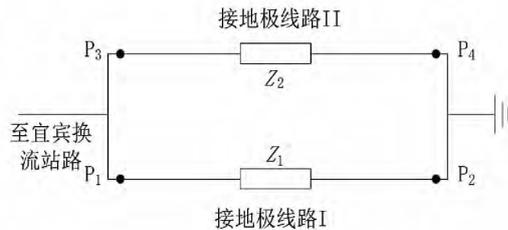


图9 宜宾站接地极线路电流互感器配置改进方案图

图9中 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 测量电流值为 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ ,纵联差动保护的动作为 $I_{set1}$ 、 $I_{set2}$ ,其值依照躲过电流互感器不平衡电流值设定。原不平衡保护的动作为 $I_{set2} = 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 。

1) 接地极线路发生断线故障时

当 $|I_1 - I_3| > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_1 = I_2 \approx 0$ 时,可以判断接地极引线I发生断线故障;

当 $|I_1 - I_3| > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_3 = I_4 \approx 0$ 时,可以判断接地极引线II发生断线故障;

当 $|I_1 - I_2| > I_{set1}$ , $|I_3 - I_4| > I_{set1}$ ,且 $I_2 = I_4 \approx 0$ 时,可以判断接地极引线发生双断线故障。

2) 接地极线路发生接地故障时

当 $|I_1 - I_2| > I_{set1}$ ,可以判断接地极引线I发生接地故障;

当 $|I_3 - I_4| > I_{set1}$ ,可以判断接地极引线II发生接地短路故障;

当 $|I_1 - I_2| > I_{set1}$ 且 $|I_3 - I_4| > I_{set1}$ ,可以判断接地极发生双引线接地故障。

3) 接地极线路发生复杂故障时

当 $|I_1 - I_2| > I_{set1}$ , $|I_1 - I_3| > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_2 \approx 0$ 时,可以判断接地极引线I发生断线接地短路故障;

当 $|I_3 - I_4| > I_{set1}$ , $|I_1 - I_3| > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_4 \approx 0$ 时,可以判断接地极引线II发生断线接地短路故障;

当 $|I_1 - I_2| > I_{set1}$ , $|I_3 - I_4| > I_{set1}$ , $|I_1 - I_3| > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_2 = I_4 \approx 0$ 时,可以判断接地极发生双引线断线接地短路故障。

通过第2节分析可知,宜宾直流目前的接地极保护动作策略不能完全满足运行条件,因此建议在单极大地回线运行方式时发生接地极引线断线故障的情况下闭锁直流。当发生接地极线路接地短路故障时,

虽然多为瞬时故障时,但直流往往无法自行灭弧,需要将直流停运后进行灭弧,因此建议移相重启,重启不成功则闭锁直流。具体优化方案如表5所示。

表5 优化方案判据及建议动作策略表

建议动作判据	故障类型	单极运行下建议动作策略
$ I_1 - I_2  > I_{set1}$	接地极引线1接地故障	移相重启,重启不成功闭锁直流
$ I_3 - I_4  > I_{set1}$	接地极引线2接地故障	移相重启,重启不成功闭锁直流
$ I_1 - I_2  > I_{set1}$ $ I_3 - I_4  > I_{set1}$	接地极发生双引线接地故障	移相重启,重启不成功闭锁直流
$ I_1 - I_3  > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_1 = I_2 \approx 0$	接地极引线1断线故障	极闭锁
$ I_1 - I_3  > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_3 = I_4 \approx 0$	接地极引线2断线故障	极闭锁
$ I_1 - I_2  > I_{set1}$ , $ I_3 - I_4  > I_{set1}$ , 且 $I_2 = I_4 \approx 0$	接地极引线发生双断线故障	极闭锁
$ I_1 - I_2  > I_{set1}$ , $ I_1 - I_3  > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_2 \approx 0$	接地极引线1断线接地短路故障	极闭锁
$ I_3 - I_4  > I_{set1}$ , $ I_1 - I_3  > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_4 \approx 0$	接地极引线2断线接地短路故障	极闭锁
$ I_1 - I_2  > I_{set1}$ , $ I_3 - I_4  > I_{set1}$ , $ I_1 - I_3  > 0.02 \times I_{DL\_NOM}$ 且 $I_2 = I_4 \approx 0$	接地极发生双引线断线接地短路故障	极闭锁

## 4 结论及建议

通过对宜宾直流7·13接地极引线1断线故障分析,发现目前宜宾直流接地极保护动作策略存在较大缺陷。对此,借鉴交流输电线路的纵联电流差动原理,根据接地极引线发生断线和接地故障情况下电气参数的变化特征,提出相应的改进措施,实现了对故障类型准确快速的识别。为保证接地极线路运行的安全与稳定,提出以下建议:

1) 建议在原有的不平衡保护的基础上增加纵联差动电流保护,以便准确判断故障类型,详见表5。

2) 单极大地回线运行方式下发生接地极引线断线或断线接地短路故障,因其是永久性故障,建议将动作策略由“告警”改为“极闭锁”。在双极大地回线运行方式下发生断线或断线接地短路故障,建议将动作策略由“告警”改为“平衡双极电流”。

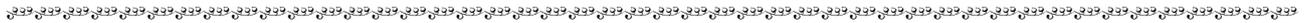
3) 单极大地回线运行方式下发生接地极引线接地故障,建议将动作策略由“告警”改为“极重启,重启不成功极闭锁”。双极大地回线运行方式下发生接地故障,建议将动作策略由“告警”改为“平衡双极电流”。

4) 针对单极大地回线运行方式下,在接地极过负荷保护中,建议减小启动功率回降的时间。

5) 建议加大接地极线路设计裕度,在一侧引线出现接地故障后,另一侧引线应能完全满足系统大负荷运行要求。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电



(上接第22页)

所提方法力求为基于特高压的跨区交易市场建设提供一定参考。下一步工作将进一步验证该方法的有效性,并加以完善。

参考文献

[1] 刘兴胜. 两部制电价方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

[2] 张森林, 孙延明. 关于南方电网西电东送输电电价形成机制的思考[J]. 广东电力, 2014, 27(4): 7-12.

[3] 王绵斌, 谭忠富, 乞建勋, 等. 我国电力市场环境两部制输配电价传递模型[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 77-83.

[4] 张文月, 张立岩. 入津特高压跨区跨省输电电价定价方法分析[J]. 天津经济, 2016(3): 55-57.

[5] 庄莹华. 我国销售电价交叉补贴研究[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1940-1943.

[6] 国家能源局. 可再生能源发展“十二五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2012.

[7] 胥威汀, 唐权, 王云玲, 等. 电力规划执行偏差对非化石能源发展目标的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 61-65.

[8] 赵庆波, 张正陵, 白建华, 等. 基于特高压输电技术的

力出版社, 2014.

[2] 郭琦, 韩伟强. 高压直流接地极过压保护反事故措施的仿真研究[C]. 南方电网技术论坛, 2009.

[3] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 26-29.

[4] G20121130, 溪洛渡左岸-浙江金华±800 kV特高压直流输电工程直流控制保护系统[B].

[5] 于歆杰, 朱桂萍, 陆文娟. 电路原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[6] 王颖, 王玉东. 超高压线路纵联保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 62-65.

作者简介:

刘俊杰(1989), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电;

李 琨(1985), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电;

陈沧杨(1988), 工程师, 研究方向为特高压直流输电控制保护。

(收稿日期: 2016-09-02)

电力规划理论创新及实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2523-2531.

[9] 刘福斌, 杨立兵, 吴敏. 基于灵活输电电价的跨地区电能撮合交易模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 88-92.

[10] 李沛盈. 电力市场撮合交易模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[11] 姚珺玉, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及时滞指标综合灵敏度的用户电价响应模式划分方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 30-36.

[12] E. Foruzan, S. D. Scott and J. Lin. A Comparative Study of Different Machine Learning Methods for Electricity Prices Forecasting of an Electricity Market [C]// North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, IEEE 2015: 1-6.

作者简介:

陶宇轩(1989), 工学硕士、工程师, 主要从事电网规划方面的工作和研究;

胥威汀(1985), 工学博士、工程师, 主要从事能源电力规划与电力市场方面的工作和研究;

李 婷(1979), 硕士、高级工程师, 主要从事电网规划、智能配电网方面的研究工作。

(收稿日期: 2016-11-07)