

高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究

曾祥君^{1,2}, 张奎², 阳韬², 邓曙光¹

(1. 湖南城市学院, 湖南 益阳 413099; 2. 长沙理工大学智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 接地极是高压直流输电系统中最重要的组成部分之一。为了提高接地极保护可靠性, 根据接地极线路参数及运行特性, 提出了一种基于纵联差动保护原理的接地极不平衡保护方法。该方法将互感器装设在接地极引线的近站端和极址端, 给出了纵差保护方案和保护判据, 优化了保护动作策略, 分析了保护动作特性。仿真结果表明, 提出的接地极不平衡保护能准确辨识故障类型, 准确动作隔离故障, 有效降低直流系统停运概率。

关键词: 接地极; 不平衡保护; 电子式互感器; 纵差保护

Improvement measures of electrodes line unbalance protection for HVDC system

ZENG Xiang-jun^{1,2}, ZHANG Xi², YANG Tao², DENG Shu-guang¹

(1. Hunan City University, Yiyang 413099, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Grounding electrode is the most important part of HVDC systems. In order to improve the reliability of grounding electrodes line protection, a new unbalance current protection based on the longitudinal differential protection principle is proposed. The protection transformers are installed in the head and end of the grounding electrode line, the longitudinal differential protection scheme and criterion are presented, the original action strategy is optimized and the protection action characteristics are analyzed. The simulation results show that the unbalance protection is effective, which could accurately distinguish the fault types and act to isolate faults, and reduce the probability of HVDC shutdown.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008 and No. 51207013), Hunan Provincial Science & Technology Key Grant Project Foundation (No. 2012FJ1003), and Hunan Province Academic Scientific Research Industrialization Project (No. 12CY007).

Key words: grounding electrode; unbalance protection; ECT; longitudinal differential protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0132-06

0 引言

在直流输电系统中, 接地极的主要作用是钳制中性点电位以及为直流输电提供回路, 如果接地极发生故障将直接威胁到直流输电的安全与稳定^[1]。接地极引线是接地极的一部分, 它与换流站相连, 通常为双回并行线路, 为了让接地极电流尽可能少影响换流站等其他设施, 通常将极址(接地极末端)建设在离换流站十几千米到几十千米的地方。直流输电系统在双极对称运行方式下, 流入接地极的不

平衡电流很小, 一般不超过直流额定电流的 1%; 在单极大地回线运行方式下, 流入接地极的电流等于线路上的运行电流, 可达到几千安培^[2]。因此, 要实现对接地极故障的可靠保护十分困难。国内外已经投运的直流输电系统中接地极引线保护通常配置不平衡电流保护(60EL)、过电压保护(59EL)和过电流保护(76EL)^[3]。其中, 不平衡电流保护的主要功能是检测接地极引线的短路和断线故障。

但是, 在南网所辖天广、高肇和兴安等由西门子公司设计的直流输电系统中, 接地极引线保护并不完善, 发生故障时因不能区分故障类型而致使动作策略均为直接关闭运行极^[4]。而通常对于不同的故障类型所采取的动作策略应有所不同, 过多的停运直流将直接威胁到直流系统的可靠运行^[5]。针对

基金项目: 国家自然科学基金(61233008, 51207013); 湖南省科技重大专项(2012FJ1003); 湖南省高校产业化培育项目(12CY007)

这一问题, 本文借鉴成熟运用在交流输电系统中输电线路纵联保护原理, 提出在原有的接地极不平衡保护方案上引入纵联保护原理, 实现对直流输电系统单极大地回线运行方式下故障类型的准确判断, 减少系统的停运概率, 提高系统运行的稳定性。

1 接地极线路不平衡保护介绍及缺陷分析

1.1 接地极不平衡保护介绍

目前天广、高肇和兴安等直流输电系统均采用西门子公司设计的接地极不平衡电流保护方案(60EL), 动作策略为在单极大地回线运行方式下, 接地极不平衡电流保护动作作为直接停运直流(极停运); 在双极运行方式下, 接地极不平衡电流保护动作先发出告警信号, 后调节双极直流电流平衡(极平衡)^[6]。其动作判据为 $|I_{L1}-I_{L2}|$, 其中 I_{L1} 、 I_{L2} 分别为两条接地极引线的电流。其动作整定值是参照正常运行接地极引线出现的最大电流差值所确定, 如表1所示^[7]。

表1 不平衡电流保护整定值

Table 1 Unbalance current based protection setting value

运行方式	定值/A	延时/ms	动作策略	备注/A
天 GR	$ I_{L1}-I_{L2} >90$	500	告警	
广 BP	$ I_{L1}-I_{L2} >90$	500	极闭锁	
高 BP	$ I_{L1}-I_{L2} >120$	500	极平衡	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})>550$
高 BP	$ I_{L1}-I_{L2} >22.5$	500	极平衡	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})<550$
肇 GR	$ I_{L1}-I_{L2} >120$	500	极闭锁	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})>550$
肇 GR	$ I_{L1}-I_{L2} >22.5$	500	极闭锁	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})<550$
兴 BP	$ I_{L1}-I_{L2} >120$	500	极平衡	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})>550$
兴 BP	$ I_{L1}-I_{L2} >22.5$	500	极平衡	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})<550$
安 GR	$ I_{L1}-I_{L2} >120$	500	极闭锁	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})>550$
安 GR	$ I_{L1}-I_{L2} >22.5$	500	极闭锁	$\text{Max}(I_{L1}, I_{L2})<550$

1.2 接地极不平衡保护缺陷分析

接地故障是接地极引线最常见故障之一, 而接地短路故障中绝大多数都是因为天气原因造成的暂时性故障, 对于此类型故障通常采用系统重启策略; 而接地极引线断线故障属于永久性故障, 对于此类型故障应立即采取极停运策略^[8]。在天广、高肇和兴安等直流输电的极控系统中配置了由线路主保护触发的重启动作, 当在单极大地回线运行方式下发生接地短路时, 应触发线路主保护的重启功能^[9]。但是根据实际使用情况来看, 这种保护方案存在诸多缺陷。2012年, 在天广直流输电系统单极大地回线运行方式下, 曾多次因为雷击事故造成接地极线路发生瞬时性故障导致直接闭锁直流运行极^[10]。显然, 在发生暂时性故障时如果能够及时触发系统重启策略, 可以有效降低直流停运的概率, 提高系统运行的稳定性。但是, 这将对保护功能提出更高的

要求。接地极引线通常为双回并行线路, 在单极大地回线运行方式中, 当某一条接地极引线发生断线故障时, 其主要特征是该接地极引线无电流流过; 而当某一条接地极引线发生短路故障时, 将会造成另一条接地极引线所测电流值很小且接近于0^[11]。因此, 单根接地极引线断线故障与单根接地极引线接地短路故障表现出的特征类似, 仅仅通过西门子公司设计的传统判据是无法准确判别这两种故障类型的。

根据西门子保护配置, 当某一条接地极引线发生故障时, 在无法准确识别故障类型的情况下, 均为发出告警信号后直接触发系统重启策略, 发生断线故障时, 不仅无法使接地极引线故障消除, 还会因重启动策略导致过电流保护动作失效, 造成正常线路长时间承受过流伤害, 对设备寿命和周边环境造成巨大影响。

2 基于纵联保护原理接地极不平衡保护

2.1 纵联保护原理的介绍

纵联保护是一种成熟运用在输电线路、发电机和电力变压器的保护方法^[12]。纵联保护的原理是通过利用某种通信通道将输电引线两端或者是各端的保护装置纵向连接起来, 将各端的电气量传送到对端加以比较, 根据电气量的变化情况以判断故障是在引线之内还是引线之外, 因而决定是否切除保护引线^[13]。纵联保护按所需要传输电气量的信息通道通常分为四种, 分别是导引线纵联保护、电力线载波纵联保护、微波纵联保护和光纤纵联保护。按照保护原理区分, 纵联保护可以分为方向比较式纵联保护和电流差动式纵联保护。

在直流输电系统接地极中, 接地极引线通常为双回并行线路, 传统的接地极不平衡保护为电流横差保护, 即分别在两条接地极引线的近站端(首端)安装电流互感器, 通过比较引线间的差动电流进行故障判断。这种方法简单有效但存在一定缺陷, 无法区分故障类型, 且采用分段式固定整定值降低了保护动作的灵敏性, 并对设备使用寿命有一定的影响。本文借鉴输电线路的纵联电流差动保护原理, 选择微波通道为电气量传输通道, 在原有接地极不平衡保护的基础上实现纵联电流差动保护, 通过横向和纵向的比较两条接地极引线的差动电流实现对故障类型的辨识, 并提出基于比率制动的整定值选取方法, 提高保护动作的灵敏性和可靠性。

2.2 基于纵联保护原理的不平衡保护方案的改进

结合单极大地回线运行方式的经典模型, 根据直流输电系统控制原理, 对接地极引线发生断线故

障和接地故障所表现的特征进行分析对比。图1为直流输电系统单极大地回线运行方式下的接线图，其中整流侧接地极的等值阻抗均为 R_1 ，逆变侧接地极的等值电阻为 R_2 。

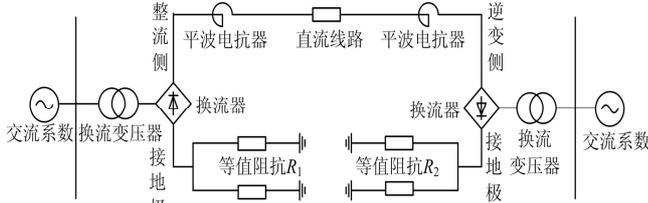


图1 直流输电系统单极大地回线运行方式
Fig. 1 HVDC system operation mode with monopolar grounded

针对接地极组成结构，分别在两条接地极引线的近站端和极址端安装专用的电子式电流互感器，较传统电磁式电流互感器相比，电子式互感器克服了磁芯饱和的弱点，动态范围更广，测量更精确。内嵌基于 GPRS 无线传输技术的通信模块和基于太阳能供电技术的锂电池，解决了纵联保护通信通道问题和极址端供电问题所带来的困扰。具体保护配置如图2所示。

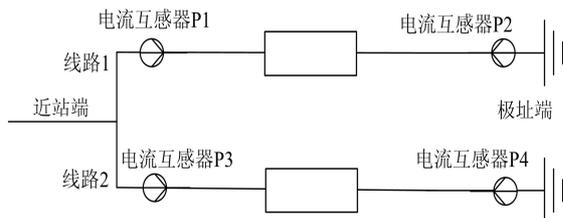


图2 接地极引线故障保护配置等效模型
Fig. 2 Equivalent model for electrode line protection setting

针对不同故障类型下电流变化特性不同的特点，对接地极引线保护进行改进，改进方案如图3所示。改进后的保护方案可以实现对单根接地极引线断线故障和接地故障的区分，其中 I_{set1} 为横差保护电流整定值， I_{set2} 为纵差保护电流整定值。

2.3 接地极不平衡保护动作判据的改进

传统的接地极不平衡保护采用的是电磁式互感器，其动作判据采用分段式固定阈值。而电磁式互感器存在饱和现象，且固定阈值降低了不平衡保护动作灵敏性。而改进后的不平衡保护方案采用基于电子式的电流互感器，阈值通过比率制动原理进行整定。根据电子式互感器的特点，阈值可以通过降低最小动作电流值和制动曲线斜率并取消第三段斜率的思想进行改进，在保证可靠性的前提下大幅度地提高不平衡保护的灵敏性。其中比率制动的动作判据为

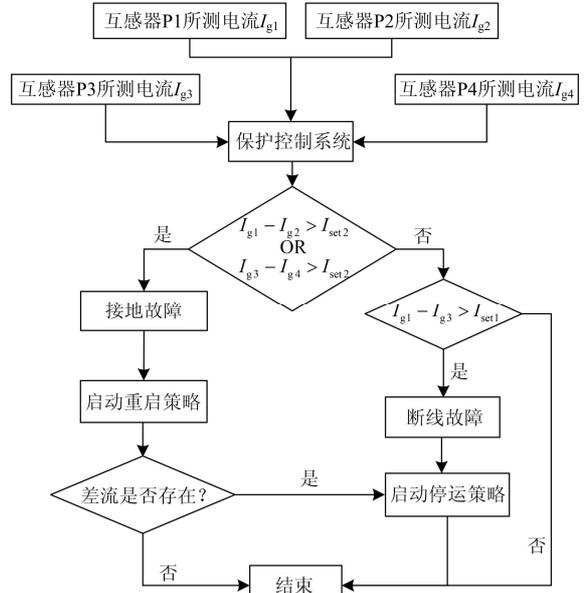


图3 接地极不平衡保护改进方案
Fig. 3 Improvement protection scheme for electrode line unbalance current based protection

$$\begin{cases} I_d > I_{set.min}, & I_{res} < I_{res.min} \\ I_d > S(I_r - I_{res.min}) + I_{set.min}, & I_{res} > I_{res.min} \end{cases} \quad (1)$$

式中： I_d 为动作电流； $I_{set.min}$ 为最小动作电流； $I_{res.min}$ 为最小制动电流； S 为制动曲线的斜率； I_{res} 为制动电流。制动电流的选取方法通常采用

$$I_{res} = |I_{L1} - I_{L2}|/2 \quad (2)$$

其中， I_{L1} 和 I_{L2} 分别为线路上互感器所测的电流值。最小动作电流值的选取应大于正常运行时接地极引线上的最大不平衡电流值 $I_{unb.r}$ ，即

$$I_{set.min} = K_{rel} I_{unb.r} = K_{rel} (K_{ss} K_{er} + \Delta m) I_n \quad (3)$$

式中： I_{unb} 不平衡电流； K_{rel} 为可靠系数，一般为 1.3~1.5； K_{ss} 为两侧电流互感器的同型系数，因线路两侧安装的电流互感器型号相同，则取 0.5； K_{er} 为电流互感器在流过额定电流时的幅值误差，目前国内大量使用的电子式互感器的准确级为 5P 和 5TPE，所以 K_{er} 取 0.02； I_n 为流过接地极线路的额定电流。分析可得

$$I_{set.min} = (1.3 \sim 1.5)(0.5 \times 0.02 + 0.05) I_n = (0.78 \sim 0.09) I_n \quad (4)$$

而最小制动电流 $I_{res.min}$ 的选取主要是由于接地极发生区外短路故障时，流经接地极引线的电流大于正常运行时的额定电流，为防止接地极保护出现误动作而实现的制动作用。基于电子式互感器的差动保护，由于电子式互感器不存在暂态饱和问题，差动保护的制动作用不需要提前产生作用。因此，

最小制动电流 $I_{res.min}$ 可取 $(0.9\sim 1.1)I_n$ 。

制动特性斜率主要通过以下三个参数整定：区外故障产生的最大不平衡电流 $I_{unb.max}$ 、制动系数 K_{res} 和最大制动系统 $K_{res.max}$ 。

(1) 最大不平衡电流的整定原则为

$$I_{unb.max} = (K_{np} K_{ss} K_{er} + \Delta m) I_{k.max} \quad (5)$$

其中： K_{np} 为非周期分量系数，由于电子式互感器暂态性能好、不容易饱和，非周期分量基本对其的影响基本可以忽略，故 K_{np} 可取 1； K_{er} 为幅值误差，由于发生区外故障，所以取 0.05； $I_{k.max}$ 为接地极线路外部短路时穿过电流互感器的短路电流。其他常量与式(3)一致。则最大不平衡电流为

$$I_{unb.max} = (1.0 \times 0.5 \times 0.05 + 0.05) I_{k.max} = 0.075 I_{k.max} \quad (6)$$

(2) 制动系数的整定原则为

$$K_{res} = \frac{I_{set}}{I_{res}} = \frac{I_{set.min} + S(I_{res} - I_{res.min})}{I_{res}} = \frac{I_{set.min} - S I_{res.min}}{I_{res}} \quad (7)$$

式中： S 为制动曲线斜率； $I_{set.min}$ 为最小动作电流， $I_{res.min}$ 为最小制动电流； I_{res} 为制动电流。当发生区外故障时，由于制动电流 I_{res} 远远大于 $I_{set.min} - S I_{res.min}$ ，故得出 $K_{res} \approx S$ 。

(3) 区外发生短路故障时最大制动系数的整定原则为

$$K_{res.max} = \frac{I_{set.max}}{I_{res.max}} = \frac{K_{rel} I_{unb.max}}{I_{k.max}} \quad (8)$$

发生接地极线路外部故障时，有 $I_{res.max} = I_{k.max}$ 。 K_{rel} 为可靠系数，一般为 1.5~2.0。因此可以得出制动曲线斜率 $S = I_{k.max} = 0.0975 \sim 0.1125$ 。

2.4 动作判据的对比

针对以上分析，将接地极不平衡保护改进前后的动作判据进行对比，如图 4 所示，其中 I_d 为差动电流， I_{reg} 为制动电流。

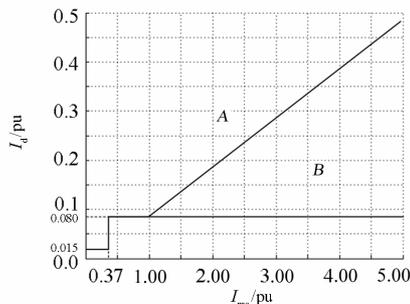


图 4 改进前后动作判据的比较

Fig. 4 Protection action criterion comparison before and after improvement

改进前的动作判据为 $A+B$ 区域，该区域为一个

矩形区域，根据分段式固定门槛值进行整定，因不存在制动特性，所以具有保护误动概率过高的缺陷。改进后的动作判据为 A ，该区域为基于比率制动曲线的梯形区域，门槛值根据制动量的变化而浮动，提高了保护的灵敏度，降低了保护误动的范围，保证了系统运行的可靠性。

3 仿真验证

对于以上改进分析，以兴安直流输电系统为实例，利用 Matlab 仿真软件搭建系统模型。兴安直流系统在单极运行模式下，直流输送功率为 900 MW，电压等级为 ± 500 kV，正常运行电流为 1.8 kA，兴仁站主控站，有控模式为 P-Mode，无控模式为 Q-Mode，换流变分接头控制位角度模式。为了更好地进行计算分析，搭建的仿真模型设置输送功率为 1 000 MW，电压等级为 ± 500 kV，正常运行电流为 2 kA，控制模式与兴安直流系统相同。

(1) 单极大地回线运行方式下逆变侧接地极发生极址端接地故障。故障前接地极线路 1 和线路 2 所测电流均为 1 kA，在 0.5 s 时整流侧接地极引线发生接地短路故障。故障瞬间互感器波形图如图 5 所示。显然图中 P3 和 P4 的差流达到 1 000 A，P1 与 P3 的电流差值在 140 A 左右，此时制动电流为 1 pu，保护整定值为 0.08 pu，即 80 A，因此触发接地极引线的纵差保护和横差保护动作，并根据触发动作量判定为接地极引线 2 发生接地短路故障。

(2) 单极大地回线运行方式下整流侧接地极发生断线故障。在 0.5 s 时整流侧接地极线路发生断线故障。故障瞬间互感器波形图如图 6 所示，显然 P1 和 P3 的电流差值达到了近 2 000 A，而 P3 和 P4 的电流差值不足 10 A，此时制动电流为 1 pu，保护整定值为 80 A，触发接地极引线横差保护，并根据触发动作量判断接地极引线 2 发生断线故障。

综上所述，如表 2 所示在单极大地回线运行方式下，接地极引线发生故障瞬间可以根据动作触发的不同来判断故障类型。其中， I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 分别互感器 P₁、P₂、P₃、P₄ 所测电流值， I_{set1} 、 I_{set2} 分别为改进后的横差保护动作整定值和纵差保护动作整定值。

表 2 单极大地回线运行方式下接地极故障类型判断

Table 2 Grounding fault types detection for electrode line with ground return operation

动作判据/A	延时/ms	故障类型	动作策略
$I_1 - I_2 > I_{set1}$	2 000	线路 1 发生接地故障	极重启
$I_3 - I_4 > I_{set2}$	2 000	线路 2 发生接地故障	极重启
$I_1 - I_3 > I_{set1}$ 且 $I_1 = I_2 \approx 0$	2 000	线路 1 发生断线故障	极停运
$I_1 - I_3 > I_{set1}$ 且 $I_3 = I_4 \approx 0$	2 000	线路 2 发生断线故障	极停运

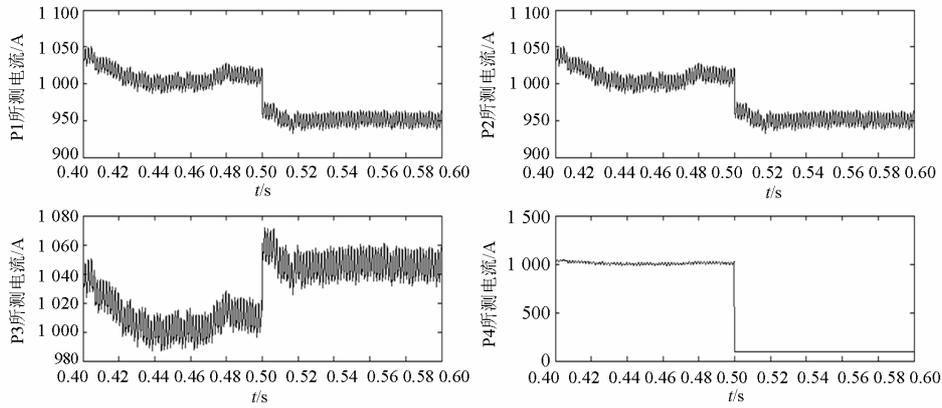


图 5 接地短路故障仿真电流波形

Fig. 5 Simulation current waveform for grounding faults

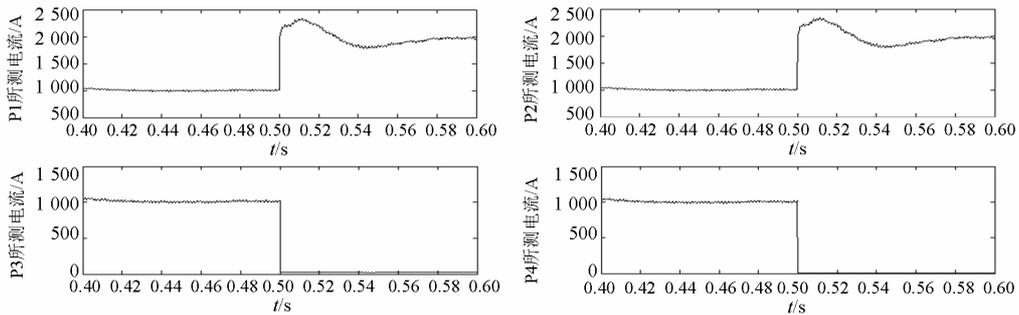


图 6 断线故障仿真电流波形

Fig. 6 Simulated current waveform for disconnection faults

4 结论

接地极引线故障属于直流输电系统中的最常见故障之一，目前高压直流输电系统中，在单极大地回线运行方式下接地极不平衡保护动作策略均存在较大缺陷。对此，本文借鉴输电线路的纵联保护的原理，根据接地极引线发生接地故障和断线故障所表现的电流变化特性的不同，提出了相应的改进措施，并对动作判据进行优化，实现准确、快速的识别接地极引线故障类型。对于接地极引线接地短路故障实施故障重启策略，接地极引线断线故障则直接实施极停运策略。改进后的接地极保护在很大程度上降低直流系统停运的概率，保证了直流系统输送功率的安全和稳定。

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: 122-136.
ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering echnology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 122-136.

[2] 余洋, 韦晨, 朱林. 直流输电接地极电流对不同结构

变压器影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 71-76.

YU Yang, WEI Chen, ZHU Lin. Impact of HVDC ground electrode current on transformers with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 71-76.

[3] 杨光, 朱韬析, 魏丽君, 等. 直流输电系统接地极线路故障研究[J]. 继电器, 2007, 35(7): 45-49.
YANG Guang, ZHU Tao-xi, WEI Li-jun, et al. Research on the faults of electrode line of HVDC transmission system in monopolar ground return operation[J]. Relay, 2007, 35(7): 45-49.

[4] 朱韬析, 何方, 何焯勇, 等. 南方电网直流输电系统接地极线路不平衡保护动作后果探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 112-116.
ZHU Tao-xi, HE Fang, HE Ye-yong, et al. Discussion on operation results of electrodecurrent imbalanced protection used in HVDC transmission system in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 112-116.

[5] 陈丹. 锦屏—苏南特高压直流输电入地电流在四川电网内分布的预测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 92-96.
CHEN Dan. Forecast and analysis of Jinping-Sunan UHVDC earth-return current distribution in Sichuan

- power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 92-96.
- [6] MELIOPOULOS A P S, CHRISTOFORIDIS G. Effects of DC ground electrode on converter transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 995-1002.
- [7] 汲广, 朱韬析. 广州换流站换流变压器运行异常情况 & 措施探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 115-120.
- JI Guang, ZHU Tao-xi. Abnormity of converter transformers in Guangzhou inverter station and its treatments[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 115-120.
- [8] 赵军, 曹森, 刘涛, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启动策略研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 127-132.
- ZHAO Jun, CAO Sen, LIU Tao, et al. Research and optimization on DC line fault recovery strategy used in Gui-Guang HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 127-132.
- [9] 王海军, 吕鹏飞, 曾南超, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启动功能研究[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 32-35.
- WANG Hai-jun, LÜ Peng-fei, ZENG Nan-chao, et al. Research on DC line fault recovery sequence of Guizhou-Guangdong HVDC project[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 32-35.
- [10] 欧开健, 韩伟强, 黄立滨. 兴安直流接地极不平衡保护电流定值问题仿真试验研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 98-100.
- OU Kai-jian, HAN Wei-qiang, HUANG Li-bin. Simulation and research on the settings of electrode current balance protection in Xing-An HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 98-100.
- [11] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.
- GAO Xi-ming, ZHANG Peng, HE Zhi. Analyse of performance of HVDC line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.
- [12] 余加霞, 张恒泰, 葛耀中, 等. 自适应变压器电流差动保护判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 115-119.
- YU Jia-xia, ZHANG Heng-tai, GE Yao-zhong, et al. The research of adaptive transformer current differential protection criterion[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 115-119.
- [13] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 17-21.
- ZHOU Hong-yang, YU Jiang, HUANG Jia-yin, et al. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.

收稿日期: 2014-03-10; 修回日期: 2014-08-06

作者简介:

曾祥君(1972-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统微机保护与控制的教学和研发工作; E-mail: eexjzeng@qq.com

张奎(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制;

阳韬(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化。