

直流输电系统单极金属回线运行方式下 线路接地故障及保护研究

朱韬析¹, 候元文², 王超³, 陈为化⁴

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 河南济源供电公司, 河南 济源 454650;
3. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007; 4. 湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 单极金属回线方式是直流输电系统中最常见的接线方式之一。首先从理论上分析了直流输电系统单极金属回线运行方式下发生线路接地故障时各特征量的变化情况, 并借助 RTDS 实时仿真系统进行了验证; 接着以此为依据, 以天广、高肇、兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流保护系统为例, 介绍了针对这一故障设置的相关保护; 然后结合运行实例和仿真, 分析了这些保护存在的缺陷如线路后备保护配合不当和无法快速、准确地检测金属回线线路故障等, 最后还提出了一些改进建议, 并讨论了各种方案的优缺点。这些分析研究, 不但有助于提高直流输电系统的运行维护水平, 而且对优化直流保护、提高直流输电系统运行的可靠性有很高的参考价值。

关键词: 直流输电; 单极金属回线方式; 线路故障; RTDS

Research on the line faults and its protection of HVDC transmission system in metallic return operation

ZHU Tao-xi¹, HOU Yuan-wen², WANG Chao³, CHEN Wei-hua⁴

(1. CSG EHV Power Transmission Company, GZ Bureau, Guangzhou 510405, China; 2. Jiyuan Electric Power Supply Co. of Henan, Jiyuan 454650, China; 3. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center, Hangzhou 310007, China; 4. Hubei Electrical Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: Metallic return operation is one of the most common configuration in HVDC transmission system. In this paper, the characteristic of the main parameters during the process of the line fault in metallic return operation is discussed and confirmed on RTDS first; then, based on the DC protection system of Tian-Guang, Gao-Zhao and Xing-An HVDC transmission projects, the correlative protection is introduced. Combined with example and simulation result, the defects, such as the cooperation of backup protection is not appropriate and the metallic line fault can not be detected quickly and exactly, are analyzed. At last, some useful suggestions are proposed.

Key words: HVDC; metallic return operation; line fault; RTDS

中图分类号: TM721.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0133-06

0 引言

直流输电系统有多种运行方式, 除双极运行方式之外, 常用的还有单极大地回线方式及单极金属回线方式^[1,2], 它们可以保证某一极因检修等工作停运时, 另一极仍可正常运行, 从而降低对整个系统的影响。但如果直流输电系统长期以单极大地回线方式大负荷运行, 直流电流可能经交流系统变压器中性点流入变压器, 产生的直流磁通将对变压器造成相当严重的影响^[3-9]。所以, 需要以单极方式运行较长时间时, 往往会采用单极金属回线接线方式。

直流线路距离长、跨越地区的情况复杂, 运行

经验证明, 属于较易出现故障的设备^[10]。单极金属回线方式下的线路接地故障, 由于其接线方式的特殊性, 与其它接线方式下的线路接地故障存在着一定的区别。对此, 本文首先从理论上分析了直流输电系统单极金属回线运行方式下发生线路接地故障时各特征量的变化情况, 并借助 RTDS 实时仿真系统进行了验证; 接着介绍了天广、高肇、兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流保护系统中针对这一故障设置的相关保护; 然后结合实例及仿真讨论了存在的线路后备保护配合不当和无法快速、准确地检测金属回线线路故障等缺陷, 最后还提出了一些改进建议, 并分析了各种方案的优缺点。

1 直流输电系统单极金属回线运行方式下线路接地故障现象分析

以图 1 所示的直流输电系统为例，设极 1 以单极金属回线方式运行，电流正方向为如图所示，直

流输电系统通过逆变侧高速接地开关接地、提供地电位钳制点，正常运行情况下，经高速接地开关流入大地的电流很小。

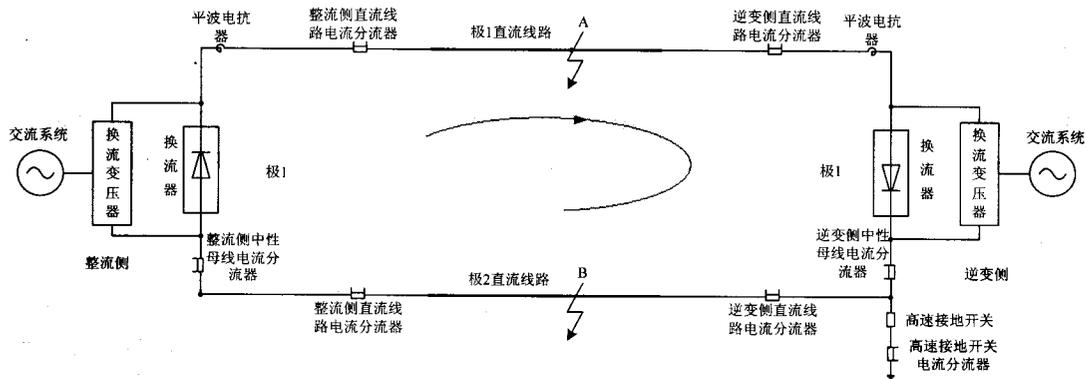


图 1 单极金属回线运行方式接线图

Fig.1 Configuration of monopolar metallic return operation

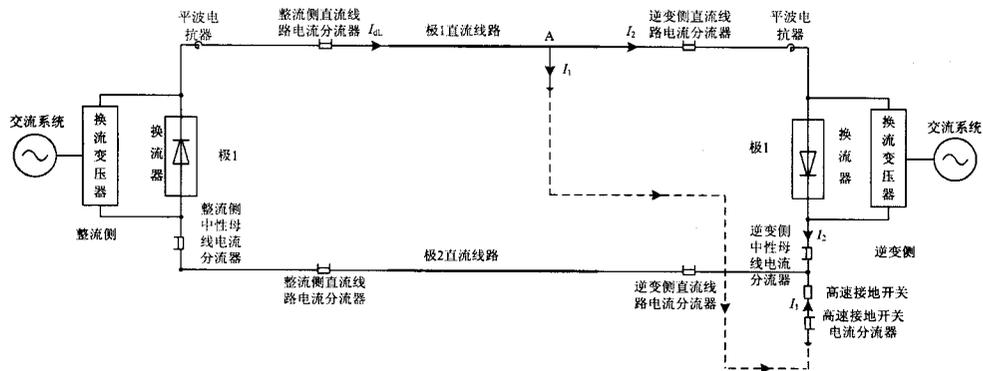


图 2 单极金属回线方式下运行极线路发生接地故障后电流流向示意图

Fig.2 Fault occurred in line of operation pole in monopolar metallic return operation

1.1 极 1 线路 A 点发生接地故障时的现象

假设在极 1 线路 A 点发生接地故障，故障后，系统中电流流向如图 2 所示。

此时，线路接地点经大地和高速接地开关构成回路，部分直流电流 (I_1) 将通过这一回路再流入极 2 线路，显然：

$$I_{dL} \approx I_1 + I_2 \quad (1)$$

其中： I_{dL} 、 I_2 分别为整流侧、逆变侧极 1 测量得到的直流线路电流， I_1 为流经高速接地开关的直流电流，电流方向如图所示。即高速接地开关将流经较大负向电流，而逆变侧极 1 直流线路与中性母线电流相对整流侧线路电流、逆变侧极 2 线路电流都将出现较大的差流。

对此，借助南方电网技术研究中心的 RTDS 仿真系统，对单极金属回线运行方式下运行极线路接

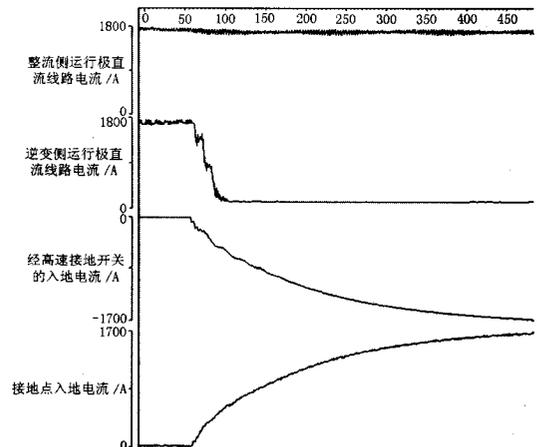


图 3 单极金属回线运行方式下运行极线路接地故障仿真录波

Fig.3 Recorder curve of line fault in the line of operation pole in metallic return operation

地故障的现象进行了模拟验证。南方电网技术研究中心 RTDS 实时数字仿真系统由 RTDS 实时数字仿真器和天广实际控制保护装置两部分构成, RTDS 仿真器用于模拟电网(包括直流系统)一次部分, 并与直流实际控制保护装置联接构成实时闭环仿真系统^[11,12]。为了验证理论分析结论, 在仿真过程中

取消了直流保护系统的出口功能。

仿真录波如图 3 所示, 显然, 与上述理论分析基本一致。

1.2 极 2 线路 B 点发生接地故障时的现象

不妨假设在极 2 线路 B 点发生接地故障, 故障后, 直流系统中电流流向如图 4 所示。

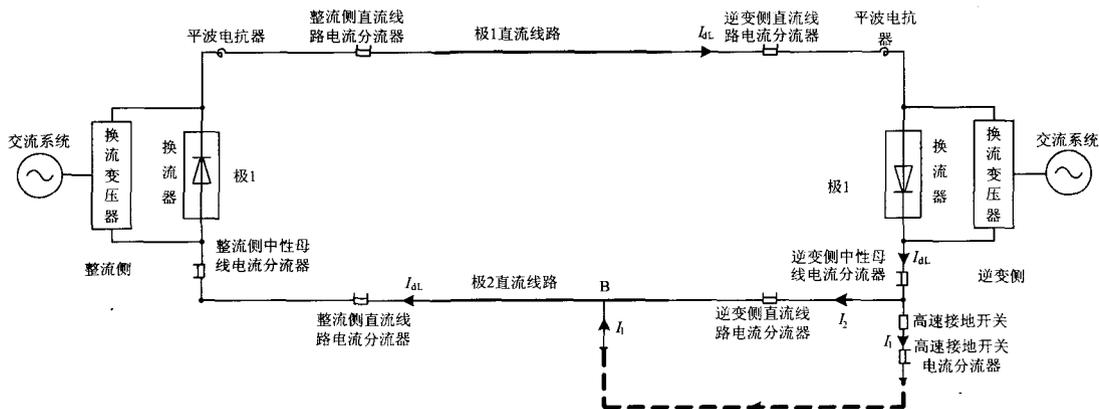


图 4 单极金属回线方式下金属回线发生接地故障后电流流向示意图

Fig.4 Fault occurred in metallic line in monopolar metallic return operation

此时, 高速接地开关经大地和线路接地点构成回路, 部分直流电流 (I_1) 将通过这一回路再流入极 2 线路, 显然:

$$I_{dL} \approx I_1 + I_2 \quad (2)$$

其中: I_{dL} 、 I_2 分别为逆变侧极 1、极 2 测量得到的直流线路电流, I_1 为流经高速接地开关的电流, 电流方向如图所示。即高速接地开关将流经较大正向电流, 而逆变侧极 2 线路电流相对极 1 线路、中性母线电流及整流侧线路电流, 都将出现较大的差流。借助南方电网技术研究中心的 RTDS 仿真系统, 对

单极金属回线运行方式下金属回线接地故障现象模拟验证如图 5 所示, 显然, 也与上述理论分析基本一致。

2 设置的相关保护简介

以图 1 为例, 当极 1 线路发生接地故障时, 极 1 各特征量的变化情况将与单极大地接线方式或双极运行方式下的变化情况基本一致, 再结合上文所述的其他特征量的变化情况, 除了以相同原理设置的行波保护、线路低电压保护及线路纵差保护外^[13,14], 在德国 Siemens 公司设计的天广、高肇、兴安等直流输电工程中, 还根据单极金属回线方式下发生线路接地故障时, 经高速接地开关将有较大电流流入站内接地网、逆变侧双极直流线路电流将出现差流等特点, 设置了如下后备保护。

3 存在的问题及改进建议

3.1 纵差保护与后备保护的配合不合理

直流线路故障, 一般是以遭受雷击、污秽或树枝等环境因素所造成线路绝缘水平降低而产生的对地闪络为主, 此时如果不采取措施切除直流电流源, 则熄弧是非常困难的^[15], 将对一次设备和系统稳定运行带来极大的危害。为了既能迅速切除直流电流源、帮助熄弧, 又尽可能地避免直流输电系统不必要的停运, 极控系统中设置了由线路主保护触发的

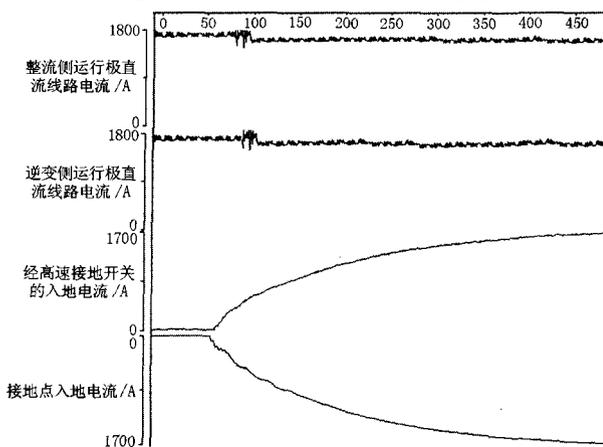


图 5 单极金属回线运行方式下金属回线接地故障仿真录波

Fig.5 Recorder curve of line fault in the metallic line in metallic return operation

重启动功能^[16]。

但在天广、高肇、兴安直流保护系统中，由于线路纵差保护的延时达到了 1.1 s，与后备保护配合不合理，所以发生高阻接地故障时，往往由触发角过大保护、低电压保护等后备保护动作，直接闭锁相应极，文献[13,14]对此进行了深入探讨并提出了相应的改进建议。

而在单极金属回线方式下，如果运行极线路发生高阻接地故障，还可能由 76SG-3（天广为 51MRGF）保护动作，直接闭锁直流输电系统。如 2004 年 07 月 08 日 19: 45: 05，高肇直流输电系统

极 2 单极金属回线方式运行，极 2 直流保护系统 76SG-3 动作，闭锁极 2，后初步分析认为故障原因为极 2 直流线路发生高阻抗接地故障。

3.2 金属回线发生接地故障时，将导致直流系统直接停运

在天广、高肇、兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流输电系统中，单极金属回线运行方式下如果金属回线出现线路故障，运行极的线路主保护将无法检测到故障、启动故障重启动，只能由后备保护动作、直接停运直流系统，丧失了通过重启动消除故障、恢复正常运行的机会。

表 1 直流输电工程金属回线方式下线路故障后备保护

Tab.1 Backup protection of line fault in metallic return operation

	开放前提	保护名	判据	动作延时	动作后果
天广输电系统	单极金属	51MRGF (金属回线故障保护)	$ I_{decc} > 90 \text{ A}$	800 ms	闭锁
高肇输电系统	回线方式	76SG-3 (站内接地网过流保护第 3 段)	$ I_{decc} > 90 \text{ A}$	900 ms	闭锁
		87DCLT (线路横差保护)	$ I_{dl} - I_{dl.op} > 150 \text{ A}$	2 s	闭锁
兴安输电系统		76SG-3 (站内接地网过流保护第 3 段)	$ I_{decc} > 90 \text{ A}$	900 ms	闭锁
		87DCLT (线路横差保护)	$ I_{dl} - I_{dl.op} > 150 \text{ A}$	2 s	闭锁

注： I_{decc} 为经高速接地开关流入站内接地网的电流， I_{dl} 和 $I_{dl.op}$ 分别为本极和另一极的高压直流线路电流。

3.2.1 运行实例

2007 年 07 月 26 日 21: 56，兴安直流输电系统极 2 单极金属回线方式运行时，极 1 线路故障，极 2 三套直流保护系统 76SG-3 动作，直接闭锁极 2。录波图如图 6。

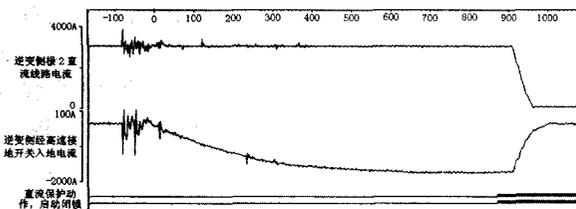


图 6 故障暂态录波

Fig.6 Recorder of transient fault

3.2.2 改进建议

运行经验证明，通过线路故障重启动，大部分直流线路故障都可以消除、直流输电系统可以恢复正常运行，以天广直流输电系统为例，2007 年一共发生了 10 次普通线路故障，其中有 9 次通过线路故障重启动恢复了正常运行。

但是，以图 1 为例，如果极 2 线路发生接地故障，按照目前天广、高肇及兴安直流保护系统的配置，各主保护均无法检测到故障并启动极 1 故障重启动功能，而只能由后备保护直接闭锁。对此，建

议采取合理的改进措施：或者设置专门针对单极金属回线方式下金属回线发生接地故障的保护，或者合理改进原有保护的延时及动作后果，当发生这类故障时，可以迅速检测并启动故障重启动功能，尽最大可能地使系统从线路故障中恢复，减少对电网的不良冲击。

3.2.2.1 在原有保护的基础上进行合理改进

(1) 改进方案一：合理设置逆变侧 76SG-3 或 87DCLT 动作延时，并将动作后果改为启动线路故障重启动。

优点：

(i) 76SG-3 和 87DCLT 为直流保护系统中原有保护，仅需修改动作延时和动作后果，实施起来非常简易；

(ii) 结合上文所述，无论是 76SG-3 还是 87DCLT 都可以迅速检测到金属回线上的线路故障。

缺点：

76SG-3 和 87DCLT 作为后备保护，选择性较差：单极金属回线方式下，直流系统任何位置出现接地故障，几乎都可以达到 76SG-3 的动作门槛值；而除了逆变侧双极高压直流线路电流分流器之间以外的任何区域，只要发生接地故障，都将达到 87DCLT 的动作条件。因此，改进 76SG-3 或

87DCLT, 需要考虑与几乎所有直流差动保护的配合, 必须采取较长的动作延时。

此外, 修改这一远后备保护的后果, 还可能对整个保护配置的完备性造成一定影响, 带来其他问题。

(2) 改进方案二: 单极金属回线方式下, 非运行极直流保护系统内纵差保护动作后果送至运行极极控并启动故障重启动功能。

优点:

选择性很高, 能够准确检测到发生在金属回线上的线路故障。

缺点:

由于金属回线电压较低, 所以与电压变化率相关的行波保护和线路低电压保护均不可能动作, 非运行极保护系统内也仅有纵差保护可以检测到故障, 但是纵差保护动作的信号并不会送至运行极控制系统, 所以, 这也需要增加专门的信号传输通道; 此外, 运行极采用非运行极的保护, 并不是非常合理。

3.2.2.2 设置针对性的新保护功能

(1) 改进方案一: 单极金属回线方式下, 运行极直流保护系统中增加另一极的纵差保护, 且动作后果设为启动运行极故障重启动功能。

优点:

选择性很高, 能够准确检测到发生在金属回线上的线路故障; 也不会影响到原有保护功能。

缺点:

在目前的天广、高肇及兴安直流保护系统中, 任一极直流保护系统均未引入对侧另一极的直流线路电流信号, 因此需要增加专门的数据传输通道, 实施相对较麻烦。

(2) 改进方案二: 增加专门监测金属回线接地故障的保护

判据: 逆变侧 $I_{dec4} > \delta$ (或 $I_{dec4} < -\delta$) 且整流侧、逆变侧 $|I_{dl} - I_{dlOp}| < \Delta$ 。

优点:

(i) 仅需对原有保护软件进行修改, 实现难度较小; 且对原有保护功能不会有任何影响。

(ii) 选择性较强: 结合上文第 1 节所述, 通过判据 1, 可以判断接地故障点在高速接地开关经金属回线至整流器区域; 而如果整流侧、逆变侧 $|I_{dl} - I_{dlOp}| < \Delta$, 则说明整流侧和逆变侧双极高压直流线路电流分流器之间的区域均无接地故障, 综合这些判据便可以较准确判断故障是否发生在金属回线上。

缺点:

(i) 实现这一保护, 两侧需要互送判断结果,

也需要增加专门的信号传输通道; 不过由于传送的为开关量, 不存在衰损等问题, 可靠性相对稍高。

(ii) 要求高速接地开关电流分流器能够判断电流方向。

(3) 改进方案三: 增加专门监测金属回线接地故障的保护

逆变侧 $I_{dec4} > \delta$ (相应的另一极为 $I_{dec4} < -\delta$)

优点:

(i) 仅需对原有保护软件进行修改, 实现难度较小; 也不会影响到原有保护功能。

(ii) 选择性相对较强: 结合上文第 1 节所述, 这一判据可以判断接地故障点在高速接地开关经金属回线至整流器区域; 而通过与中性母线差动保护、接地极母差保护等保护延时的合理配合, 便可以较准确地判断故障是否发生在金属回线上。

缺点:

(i) 同样, 这一判据的保护范围较广, 需要考虑与较多保护的配合, 并不得不采取较长的动作延时。

(ii) 要求高速接地开关电流分流器能够判断电流方向。

4 结论

灵活多样的接线方式, 是直流输电的重要优点, 单极金属回线方式便是最常见的接线方式之一。但是, 在单极金属回线方式下运行时, 如果直流线路发生接地故障, 故障接地点将通过高速接地开关构成回路, 各特征量的变化情况将有所不同。

本文首先对直流输电系统单极金属回线运行方式下发生线路接地故障时各特征量的变化情况进行了理论分析, 并借助 RTDS 实时仿真系统进行了验证; 接着介绍了天广、高肇、兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流保护系统中针对这一故障设置的相关保护。运行实例证明, 这些保护存在着一定的缺陷, 如果运行极发生高阻接地故障或金属回线发生接地故障, 往往会由后备保护动作直接停运直流系统, 丧失了通过线路故障重启动恢复正常运行机会。对这些问题的深入研究, 有助于提高直流输电系统的运行维护水平; 而本文提出的改进建议, 如果应用于直流输电工程, 也将有效提高直流输电系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 朱韬析, 王超, 张雪松, 等. 浅析空载投入换流变压器对直流输电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2007,

- 31 (23): 108-112.
- ZHU Tao-xi, WANG Chao, ZHANG Xue-song, et al. Analysis of Impacts on HVDC Transmission Systems When Converter Transformers Arc Energized[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 108-112.
- [3] 赵杰, 黎小林, 吕金壮, 等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (12): 88-91. ZHAO Jie, LI Xiao-lin, Lü Jin-zhuang, et al. Applying Series Resistor to Restrain Power Transformer DC Biasing[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2006, 30 (12): 88-91.
- [4] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (2): 81-82. KUAI Di-zheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and Handling of Impact of Geomagnetically Induced Current Upon Electric Network Equipment in DC Transmission[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2005, 29 (2): 81-82.
- [5] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高电压技术, 2006, 32 (9): 117-120. HUANGFU Cheng, RUAN Jiang-jun, ZHANG Yu, et al. DC Magnetic Bias Induced Current Effects on Transformer and Restricting Methods[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (9): 117-120.
- [6] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32 (8): 69-72. DU Zhong-dong, DONG Xiao-hui, WANG Jian-wu, et al. Test and Analysis on Restraining Transformer DC Bias by Changing Electric Potential of Grounding Grid[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (8): 69-72.
- [7] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直流感地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29 (8): 12-14. ZHONG Lian-hong, LU Pei-jun, QIU Zhi-cheng, et al. The Influence of Current of DC Earthing Electrode on Directly Grounded Transformer[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (8): 12-14.
- [8] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭, 等. 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置[J]. 电网技术, 2006, 30 (2): 62-65. MA Yu-long, XIAO Xiang-ning, JIANG Xu, et al. Optimized Grounding Resistance Configuration against DC Magnetic Bias of Large Capacity Power Transformer[J]. Power System Technology, 2006, 30 (2): 62-65.
- [9] 蒯狄正, 刘成民, 万达. 直流偏磁对变压器影响的研究[J]. 江苏电机工程, 2004, 23 (3): 1-5. KUAI Di-zheng, LIU Cheng-min, WAN Da. Experiment and Research of the Influence of Direct-current Magnetic Bias on Transformer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23 (3): 1-5.
- [10] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (14): 96-99.
- [11] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施(一)——国内外电力系统非实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (2): 24-29. OU Kai-jian. Research and Application of the AC&DC Hybrid Simulation System in CSG Part One——Analysis on the Non-real-time Simulation Technologies Worldwide[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2 (2): 24-29.
- [12] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施(二)——国内外电力系统实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (3): 30-33. OU Kai-jian. Research and Application of the AC&DC Hybrid Simulation System in CSG Part Two——Analysis on the Real-time Simulation Technologies in the World[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2 (3): 30-33.
- [13] 黄佳胤, 周红阳, 余江. “3.21”天广直流线路高阻抗接地故障的分析与仿真[J]. 广东电力, 2005, 18 (11): 15-17. HUANG Jia-yin, ZHOU Hong-yang, YU Jiang. Analysis and Simulation on “3.21” high Impedance Earth Fault of Tian-Guang HVDC Project[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18 (11): 15-17.
- [14] 刘东, 吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1 (5): 57-60. LIU Dong, WU Ze-hui. Analysis on the Tian-Guang DC line Protection Against High-impedance Ground Faults[J]. Southern Power System Technology Research, 2005, 1 (5): 57-60.
- [15] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] 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.

收稿日期: 2008-11-06; 修回日期: 2008-12-22

作者简介:

朱韬析(1980-), 男, 硕士, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

侯元文(1973-), 男, 本科, 工程师, 长期从事电力系统继电保护整定计算和运行管理工作;

王超(1981-), 男, 博士, 从事电力系统可靠性、电网安全稳定运行、特高压输电等方面的研究。