

直流输电系统接地极线路故障研究

杨光¹, 朱韬析², 魏丽君³, 李立杰⁴

(1. 河南郑州供电公司, 河南 郑州 450000; 2. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405;
3. 南阳电力勘测设计院, 河南 南阳 473000; 4. 河南电力物资公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 以天广、高肇和兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流输电系统中为例, 首先简介了所设置的接地极线路故障相关保护及运行实例, 然后从理论上分析了单极大地运行方式下接地极线路发生接地故障和断线故障时各特征量的变化特点, 并通过 RTDS 实时仿真系统进行了验证; 接着根据这些特点, 提出了可以准确判明故障类型的改进措施, 确保准确检测接地极线路接地故障, 并通过启动线路故障重启动功能, 提高直流输电系统运行的可靠性。

关键词: 直流输电; 单极大地回线; 接地极线路故障; RTDS

Research on the faults of electrode line of HVDC transmission system in monopolar ground return operation

YANG Guang¹, ZHU Tao-xi², WEI Li-jun³, LI Li-jie⁴

(1. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 45000, China; 2. GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China; 3. Nanyang Electric Power Survey and Research Institute, Nanyang 473000, China; 4. Zhengzhou Electric Power Material Company, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: According to the DC protection system of Tian-Guang, Gao-Zhao and Xing-An HVDC transmission projects, the electrode line protection and example are introduced first, then, the characteristics of some main parameters are analyzed and confirmed on RTDS. Based on this conclusion, the improvement suggestion to distinguish the fault type is discussed. In this way, the DC line fault recovery sequence could be initiated accurately and the reliability of HVDC transmission system would be improved.

Key words: HVDC; monopolar ground return operation; faults of electrode line; RTDS

中图分类号: TM721.1; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0045-05

0 引言

灵活多样的接线方式, 是直流输电的重要优点, 单极大地回线方式便是最常见的接线方式之一。利用大地作为回路, 相对同样长度的金属回路, 具有较低的电阻和相应较低的功率损耗, 而且为直流输电系统分期建设提供了条件; 此外, 还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^[1-3]。接地极线路便是将直流电流引入大地的线路。

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^[2], 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, 对此, 极控系统中设置了由线路主保护

触发的重启动功能^[4]。所以, 当接地极线路发生接地短路时, 如果能准确判断故障类型, 然后启动故障重启动, 不但可以降低接地极线路瞬时故障导致直流停运的概率, 对系统的功率输送以及系统稳定也有很大益处。

但是, 在天广、高肇和兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流输电系统中, 单极大地运行方式下, 接地极线路相关保护的動作后果均为直接闭锁运行极, 2007年, 天广直流输电系统中便两次在单极大地运行方式下因接地极线路遭雷击导致直接闭锁。针对这一问题, 本文以天广、高肇和兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流输电系统中为例, 首先简介设置的接地极线路故障相关保护及运行实例, 然后从理论上分析了单极大地运行方式下接地极线路发生接地短路和断线这两种最常见的故障时各特征量的变化特点, 并通过 RTDS 实时仿真系统进行了验证; 最后针对这两种故障的区别, 提出了可以准确

判明故障类型的改进措施，以保证在不同的故障情况下启动更合理的动作后果。

1 接地极线路故障相关保护及改进建议简介

1.1 接地极线路故障相关保护简介

直流输电系统接地极往往距换流站数十公里以上，采用双回架空线路。双极平衡运行方式下，流入接地极的电流非常小；仅在单极大地回线方式下，接地极线路电流较大。如果某一回线路出现故障，双回线路电流自然将出现一定的差流。根据这一原理及线路自身的相关参数，在天广、高肇和兴安等由德国 Siemens 公司设计的直流保护系统中，设置了接地极线路电流不平衡保护（60EL）和过流保护（76EL），见表 1 和表 2。

表 1 接地极线路电流不平衡保护

Tab.1 Electrode current imbalance protection

运行方式	定值	时间/ms	出口方式	备注	
天广	BP	90A	500	告警	
	GR、PL	90A	500	极闭锁	
高肇	BP	120A	500	极平衡	$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) > 550A$
		22.5A	500		$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) < 550A$
	GR	120A	500	极闭锁	$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) > 550A$
		22.5A	500		$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) < 550A$
兴安	BP	120A	500	极平衡	$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) > 550A$
		22.5A	500		$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) < 550A$
	GR	120A	500	极闭锁	$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) > 550A$
		22.5A	500		$\max(I_{dec1}, I_{dec2}) < 550A$

表 2 接地极线路过流保护

Tab.2 Electrode overcurrent protection

	定值	时间/s	出口方式
天广	I_{dec1} 或 $I_{dec2} > 810A$	1	极闭锁
高肇	I_{dec1} 或 $I_{dec2} > 2100A$	6	降低接地极线路电流
	I_{dec1} 或 $I_{dec2} > 2100A$	11	极闭锁
兴安	I_{dec1} 或 $I_{dec2} > 2100A$	6	降低接地极线路电流
	I_{dec1} 或 $I_{dec2} > 2100A$	11	极闭锁

1.2 改进建议^[5]

接地极线路电流不平衡保护的定值都是按照躲过正常运行可能出现的最大测量误差考虑，由于接地极线路本身通过接地极接地，保护的原理决定了有死区存在，即使提高测量精度，仍然不能从原理上解决问题。对此，如果将接地极线路不平衡保护的定值设计得与直流输送功率相关联，大负荷时采用较高定值，小负荷时采用较低定值，就可以改善这一状况。

此外，由于直流回路自身的特性，一旦接地极

线路上落雷或发生其他瞬时故障，直流电弧往往不能自行熄灭，需要将直流停运才能熄灭电弧。对于此类暂时性故障，一旦故障清除直流可以立即恢复运行。接地极电流不平衡保护动作后故障后采用自动重启逻辑，可以避免接地极线路上发生瞬时故障导致直流停运的概率，可以在一定程度上降低直流闭锁的概率，对于系统的功率输送以及系统稳定有很大益处。

1.3 运行实例简介

2007 年 06 月 08 日 22:04，天广直流输电系统极 1 单极大地方式运行，整流侧天生桥换流站接地极电流不平衡保护（60EL）动作，闭锁极 1。故障录波如图 1 所示。从图中可以看出，故障瞬间，接地极线路 1 中的电流约为 400 A，接地极线路 2 中的电流约为 300 A，差流达到 100 A，根据表 1，满足了 60EL 动作条件。

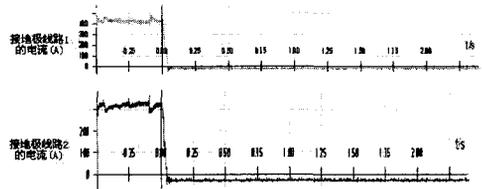


图 1 接地极线路故障时接地极线路电流的暂态录波

Fig.1 Recorder curve of current of electrode line

根据现场提供的资料，故障时天生桥换流站附近正处于雷雨交加天气，后在线路巡视中发现多处放电痕迹，从而判断为接地极线路落雷导致 60EL 动作。

此外，2007 年 5 月 27 日天生桥换流站接地极电流不平衡保护（60EL）动作、6 月 7 日兴安直流输电系统宝安侧接地极线路电流不平衡保护动作情况均与上述事故类似。

2 单极大地运行方式下接地极线路故障现象

2.1 单极大地运行方式下接地极线路故障时各特征量的变化特点分析

接地短路是最常见的线路故障，对于此类暂时性故障，一旦故障清除直流系统便可以立即恢复运行，所以采用重启，可以降低接地极线路上发生瞬时故障导致直流停运的概率。但是，这也对保护功能提出了更高的要求，必须准确判断故障类型为接地短路：按现有保护配置，单极大地运行方式下当某一条接地极线路发生断线故障时，并不能准确判明故障类型，如果也启动重启功能，不但不能使直流系统从故障中恢复，还将因重启导致 76EL

无法及时动作, 可能使正常线路不得不承受更长时间的过流, 对设备、人身造成危害。

对此, 接下来根据直流输电系统单极大地运行方式典型模型, 结合控制原理, 对接地极线路接地短路和断线故障的现象进行了分析对比。

图 2 为直流输电系统单极大地运行方式下的接线图, 假设电流正方向如图 2 所示。

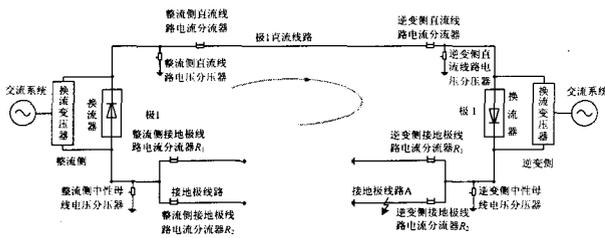


图 2 直流输电系统单极大地运行方式接线图

Fig.2 Configuration of HVDC system in monopolar ground return operation

正常运行情况下, 直流输电系统整流侧为定电流控制方式, 不妨视为一个电流源; 而逆变侧可以看作通过调节等值阻抗 R_N , 实现定电压控制方式^[1,6]; 等效模型如图 3 所示。

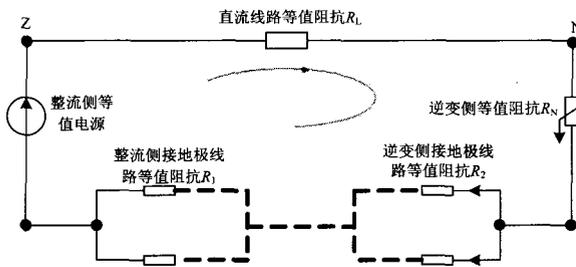


图 3 单极大地运行方式下等效模型

Fig.3 Equivalent model of HVDC system in monopolar ground return operation

此时, 整个回路的等值阻抗 R 可以通过式 (1) 进行计算:

$$R = R_L + R_N + 0.5(R_1 + R_2) \quad (1)$$

(1) 不妨假设如图 1 所示逆变侧接地极线路 A 点发生接地短路, 此时系统等效回路如图 4 所示。

不妨设 A 点至接地极母线的线路等值阻抗为 R_3 、至接地极的线路等值阻抗为 R_4 , A 点接地电阻等值阻抗为 R_E , 有:

$$R_3 + R_4 = R_2 \quad (2)$$

因此:

$$R_4 // R_E + R_3 < R_2 \quad (3)$$

显然, 此时的回路等值阻抗:

$$R' = R_L + R_N + 0.5R_1 + ((R_4 // R_E + R_3) // R_2) < R \quad (4)$$

所以, 在 A 点发生接地故障瞬间, 随着整个直流输电系统回路总电阻的减小, 直流电流将有所增大——但由于接地极线路电阻相对回路总电阻非常小, 所以, 电流增大幅度并不会很明显; 随后, 在整流侧定电流控制、逆变侧定电压控制的作用下, 通过调节两侧触发角, 逐渐使直流输电系统回到设定电压、电流参数的稳定运行状态。

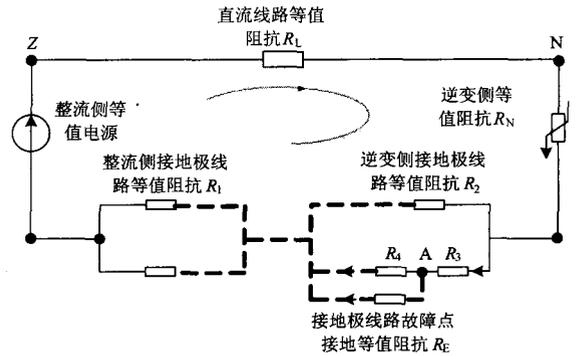


图 4 单极大地运行方式下接地极线路接地短路故障等效模型

Fig.4 Equivalent model of electrode line fault of HVDC system in monopolar ground return operation

(2) 假设如图 1 所示逆变侧接地极线路 A 点发生断线故障, 此时系统等效回路如图 5 所示。

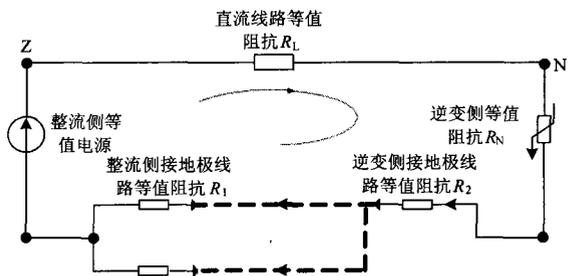


图 5 单极大地运行方式下接地极线路断线故障等效模型

Fig.5 Equivalent model of electrode line fault of HVDC system in monopolar ground return operation

显然, 此时的回路等值阻抗:

$$R' = R_L + R_N + 0.5R_1 + R_2 > R \quad (5)$$

于是, 在 A 点发生接地故障瞬间, 随着整个直流输电系统回路总电阻增大, 直流电流将有所减小——此时, 接地极线路电阻的变化相对回路总电阻较小, 所以, 电流增大幅度也不会很明显; 而且马上在控制系统的调节作用下, 恢复到原有稳定运行状态。

综上所述, 单极大地运行方式下接地极线路发生故障瞬间, 直流输电系统的运行并不会受到太大影响, 此时主要特征量的变化特点如表 3 所示。

表 3 单极大地运行方式下接地极线路故障瞬间特征

Tab.3 Characteristics of the moment of electrode line fault in ground return operation

故障类型	直流电流	直流电压	接地极线路电流差
接地短路故障	略有增大	略有减小	出现较大差流
断线故障	略有减小	略有增大	出现较大差流

2.2 仿真实验

针对上述分析, 利用南方电网技术研究中心的 RTDS 实时仿真系统对天广直流输电系统换流器开路保护的功能进行了仿真。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^[7,8]。

(1)单极大地运行方式下接地极线路发生接地短路故障

故障前系统运行情况:极 2 单极大地运行方式, 负荷 600 MW。

设置故障点: 逆变侧接地极线路 2 发生接地短路故障。

故障瞬间录波如图 6 所示, 显然, 故障瞬间, 除了接地极线路电流出现较大差流外, 直流电流首先增大、直流电压降低, 这些变化特点与上文所述相符。

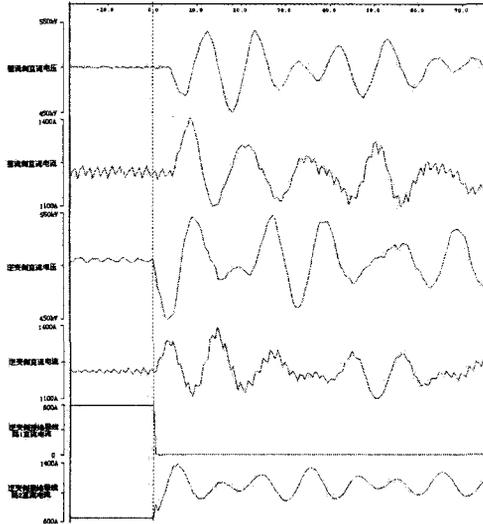


图 6 仿真录波

Fig.6 Transient recorder of simulation

(2)单极大地运行方式下接地极线路发生断线故障

故障前系统运行情况:极 2 单极大地运行方式,

负荷 600 MW。

设置故障点: 逆变侧接地极线路 2 发生断线故障。

故障瞬间录波如图 7 所示, 显然, 故障瞬间, 除了接地极线路电流出现较大差流外, 直流电流首先减小、直流电压升高, 这也与上文所述相符。

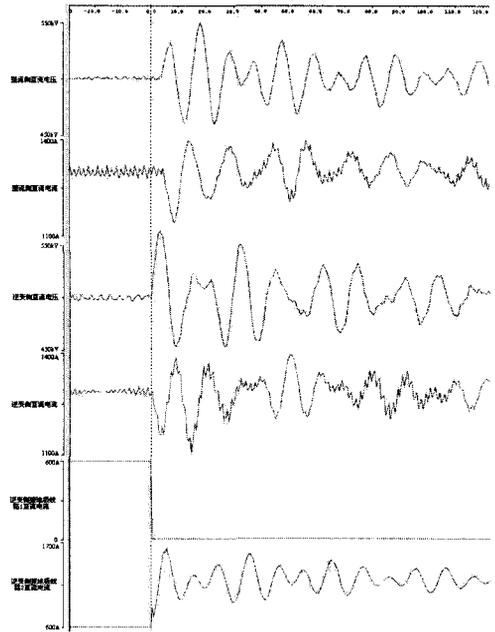


图 7 仿真录波

Fig.7 Transient recorder of simulation

3 改进建议

根据上文所述单极大地运行方式下接地极线路接地短路和断线故障的特征, 建议按图 8 对接地极线路保护进行改进。

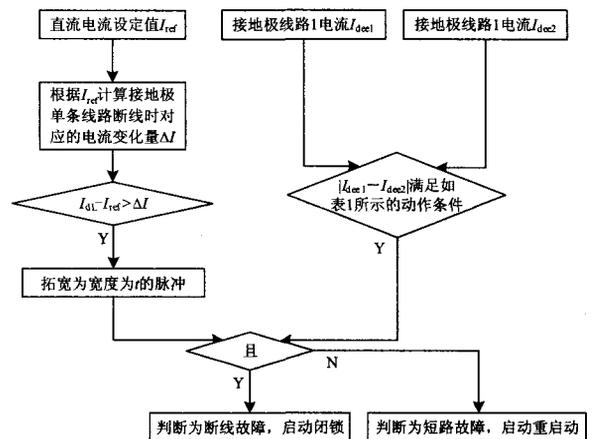


图 8 接地极线路保护改进建议

Fig.8 Suggestion on the protection of the electrode line

其中的 t , 需要与表 1 中 60EL 动作延时相配合。

4 结论

单极大地回线方式是直流输电系统中较常见的运行方式之一,接地极线路也属于较容易故障的设备。目前天广、高肇及兴安等直流输电系统单极大地回线方式下的接地极线路故障保护动作后果均为直接闭锁相应极,丧失了通过故障重启、恢复正常运行的机会。对此,本文根据接地极线路接地故障及断线故障的特点,提出了相应的改进措施,可以确保快速、准确地判别单极大地回线方式下接地极线路接地故障,随后启动故障重启动,不但可以降低接地极线路瞬时故障导致直流停运的概率,对系统的功率输送以及系统稳定也有很大益处。

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] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 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 are Energized[J]. Automatic of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 108-112.
- [4] 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.
- [5] 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[A].2007 第十一届全国保护和控制学术研讨会[C].武汉:2007.
YU Jiang, ZHOU Hong-yang, HUANG Jia-yin, et al. Issues of Electrode Line Unbalance Protection[A]. The 11th National Protection and Control Synposium[C]. Wuhan:2007.
- [6] 朱韬析,王超.浅析天广直流输电系统的基本控制策略[J].电网技术,2007,31(21):22-25.
ZHU Tao-xi, WANG Chao. Analysis of the Basic Control Technique Used in Tian-Guang HVDC Transmission System[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 22-25.
- [7] 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.
- [8] 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.

收稿日期:2009-02-14; 修回日期:2009-05-13

作者简介:

杨光(1978-),男,工程师,长期从事电力系统继电保护设备管理工作;

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

魏丽君(1971-),女,工程师,长期从事电力系统设计管理工作。

国网新源控股公司生产管理系统项目通过第一阶段验收

2009年10月16日,由北京许继承建的国网新源控股有限公司生产管理系统项目顺利通过了国网公司组织的第一阶段项目的验收。

国网新源生产管理系统项目是国家电网SG186工程重点项目之一,总合同额3380万,覆盖国网新源本部及下属18个电厂,包括生产管理与实时监控两大子系统的系统建设工作。该系统建成后,能够及时、准确地掌握发电企业生产运营状况,保证发电企业合法利益并促进电网的安全稳定运行,为总部生产经营决策提供科学、高效的支持。该项目于2008年11月开始实施,北京许继项目团队通过精心组织,对项目进行了精细化的量化管理,有效地控制了工期和质量,高质量地按期完成了第一阶段项目任务,得到用户高度肯定和好评。