

[直流输电线路]

直流输电线路不平衡电流问题分析与解决方案

文/李春

西南电力设计院有限公司

为避免直流输电线路不平衡电流对周边的其他设施造成影响，分析直流输电线路不平衡电流的产生原因，提出单回直流和双回直流系统接地极不平衡电流计算方法，以及通过提高控制系统准确度和改善设备测量准确度来降低不平衡电流的策略，并提出相关结论和建议，为换流站接地极的工程设计和运行提供参考。

随着全国电网联网战略的深入贯彻实施，特高压直流输电技术得到快速发展，直流输电工程已经成为电网中重要的组成部分。与交流输电相比，直流输电有着远距离、大功率输电、易于实现非同步联网、控制系统响应快速和调节精确等不可替代的优势。同时，直流输电线路及其接地极线路在直流系统不同的运行方式下，也不可避免地会对周边的其他设施造成一定的影响^[1-2]。

直流线路不平衡电流的定义

不平衡电流是指双极直流系统运行时两极电流之差^[3]。双极直流系统运行分为双极对称运行和双极不对称运行。目前大多数高压直流输电工程采用双极两端中性点接地方式，高压直流换流站其中一端的直流场主接线示意图如图1所示。

图1中IDL1和IDL2分别表示极1和极2直流线路电流；IDEL1和IDEL2表示2根接地极线路电流；IDP为换流阀高压侧电流；IDNC为换流阀中性线侧电流；UDL表示直流线路的电压；NBS表示直流中性母线快速开关；GRTB表示接地转换开关；MRTB表示金属会先转换转换开关；NGBS表示站内接地转换开关。

从图1中可知， $I_{DL}=I_{DP}=I_{DNC}$ ， $|I_{DEL1}+I_{DEL2}|$

$=|I_{DNC1}-I_{DNC2}|$ 。

根据直流线路不平衡电流的定义，不平衡电流 $I_{DE}=|I_{DL1}-I_{DL2}|=|I_{DNC1}-I_{DNC2}|=|I_{DEL1}+I_{DEL2}|$ 。

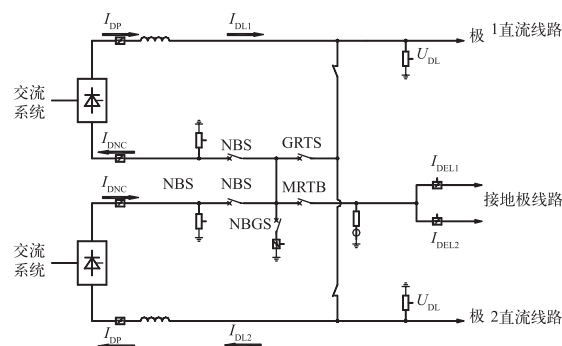


图1 直流场主接线示意图

对于特高压直流换流站，换流阀为两个阀组串联，直流线路和接地极线路的接线基本相同，其直流线路的电压更高、电流更大，不平衡电流影响也会更大。

单回直流系统的直流线路不平衡电流

1. 直流系统双极对称运行时直流线路不平衡电流

直流系统双极功率平衡运行时，直流控制保护系统给出的双极功率指令相等。理想情况下正、

负两极的直流电压相等，双极直流线路电流应相等，即 $I_{DL1}=I_{DL2}$ ，直流线路上不会有不平衡电流产生，接地极线路上也不应有电流流过，即 $I_{DE}=|I_{DEL1}+I_{DEL2}|=0$ 。但实际上，即使在双极功率平衡运行方式下，由于触发角和设备误差等因素的差异，接地极是有不平衡电流流过的。

2. 直流系统双极不对称运行时直流线路不平衡电流

双极不对称运行方式均为直流系统中出现故障或者双极失去通信时采用的运行方式，为系统短时运行方式，不是直流系统的正常运行方式。直流保护系统配置与接地极相关的一系列保护，如接地极过电流保护、接地极线路横差保护等。对这些保护可以和相关的调度部门协商，设置适当的保护告警定值，提醒运行人员及时清除故障，尽量使不平衡电流持续时间缩至更短。对非正常运行方式，本文不做详细论述。

3. 直流线路不平衡电流产生的原因

直流控制系统一般将不平衡电流控制器的死区设定为0，在换流站双极功率平衡运行时，直流控制系统是以接地极不平衡电流为0作为控制目标进行控制的。但是控制保护系统中显示接地极电流为0时，实测数据却不为0，也就是说实际运行中仍然有不平衡电流流过接地极。其原因是一次测量元件的误差及二次测量系统误差所致。

一次系统误差由直流测量装置一次设备本身的测量准确度所决定，直流测量装置的准确度要求为一般不低于0.2%。二次测量系统将模拟信号首先转换为数字信号，再利用总线进行数字信号传输。所有模拟信号进入I/O单元后，通过A/D转换直接转换为数字信号，A/D模数转换是采用逐位取精进行离散化，这样造成实际模拟量信号与转换后的数字量信号有一定的偏差，二次测量系统误差一般也低于0.2%。

4. 直流线路的不平衡电流数值

在双极正常运行时流过接地极线的不平衡电流很小^[4]。从已投运换流站的实测值来看，一般为零点几安培至几安培的水平。就理论分析而言，一次、二次系统测量的误差不超过 $0.2\%+0.2\%=0.4\%$ 。在实际工程中，直流控制系统的设计应能达到稳定的无漂移的运行要求，并能在

全部稳态运行范围内，把被测电流值的准确度保持在额定电流指令的 $\pm 0.5\%$ 的范围内。所以，在双极对称运行方式下，流过接地极的直流线路不平衡电流最大限制在额定电流的0.5%。对常规直流，若额定电流取3 200 A，则不平衡电流最大限制值为16 A。

双回直流系统共建的直流线路不平衡电流

双回直流系统共建直流输电工程的特点在于：

双回直流系统共起点、共落点、共换流站、共用接地极和两回直流线路同塔并架等，但是两回直流系统的直流场、直流线路和接地极线路是相对独立的。所以在正常运行时，上述对常规高压直流输电工程的直流线路不平衡电流的分析仍适用于双回直流系统共建直流输电工程的每回直流系统的直流线路。

每回直流系统的接地极线路上流过本回双极直流线路的不平衡电流，而在接地极处流过的电流则为两回直流线路的不平衡电流之和^[5-6]。由于双回直流系统的运行方式较常规直流增加很多，所以对于双回直流系统的直流控制保护系统来说，有必要采取协调双回直流系统运行方式，增加不同运行方式下接地极的电流平衡控制功能，完善接地极及线路保护功能等措施。

通常在双回直流协调控制中增加一个不平衡电流控制器，用于两回直流系统为异性单极大地回线运行时直流线路的不平衡电流的调节。该控制器在直流控制系统确定其运行方式为两回直流系统异性单极大地回线运行时才能启用，其输入电流直接取自于两回直流感地极线路上的CT，即两回直流系统的 $|I_{DEL1}+I_{DEL2}|$ 之和，控制器将采集到的电流与直流控制系统设定的控制目标值做比较，其差值作为积分器的输入。在接地极电流越限时，积分器的输出考虑到各极的极性差异后叠加到各极的电流控制器的电流指令上，通过调节两极阀组的电流，从而将流过接地极的电流即直流线路不平衡电流控制至目标值以内。

接地极不平衡电流周边设施的影响

1. 对周边地磁观测设施的影响

直流线路上承载电流产生的磁场附加到仪器观测的空间磁场会导致对地磁观测的干扰，线路不平

衡电流是干扰地磁观测的根本原因^[7-8]。在直流系统运行中,直流输电线路上的不平衡电流决定着直流线路、接地极与其周边地磁观测设施的最小距离^[9]。根据相关规程要求,高压直流输电线路距地磁观测点的最小距离为

$$R=0.4\beta I \quad (1)$$

$$\beta=\Delta I/I \quad (2)$$

式中, R 为高压直流输电线路与地磁观测点观测仪器的最小距离,km; I 为直流输电线路的额定电流,A; β 为直流输电线路允许的最大不平衡电流 ΔI 对额定电流 I 的比值。

在接地极附近,高压直流输电线路接地极与地磁观测点观测仪器的最小距离,为式(1)结果的1/2。

若在换流站直流测量装置的准确度及控制保护系统的设计满足相关要求的情况下,直流线路不平衡电流最大理论值为直流线路额定电流的0.5%。对于双回线路工程,即使考虑双回线路不平衡电流最大且同向时,直流线路不平衡电流最大理论值为 $2 \times 0.5\% \times 3\,200=32\text{ A}$ 。

当高压直流输电线路接地极与地磁观测点观测仪器的最小距离大于 $R=0.4 \times (32/3\,200) \times 3\,200=12.8\text{ km}$ 时,可满足规程要求。

2. 对周边长距离金属管道的影响

直流输电线路上的不平衡电流对金属管道安全运行主要影响为腐蚀。接地极产生的强大电流通过管道防腐层破损处或排流装置进入管道后,将沿着管道传送到阴极保护系统,导致阴极保护系统不能正常运行,甚至造成恒电位仪损坏,系统对直接与管道相连接的阀门影响较大。为防止电流流入管道系统,接地极应尽量远离管线路由,在管道中增设绝缘接头,缩短受干扰管线路长度^[10]。

同时,接地极不平衡电流对油气管道的影响也是有限的,据晋北—南京 $\pm 800\text{ kV}$ 直流工程计算及实测结果,对晋北一线长生的最大腐蚀速率为 $0.001 \sim 0.003\text{ mm/y}$,在接地极60年运行寿命周期内,管道最大腐蚀厚度为 $0.1 \sim 0.2\text{ mm}$ 。

结束语

1) 在双极对称运行方式下,直流控制系统具备直流线路电流平衡功能,直流控制系统通过对接地极电流的控制,能够将直流线路的不平衡电流即接

地极流过的不平衡电流限制在一定的范围之内。

2) 在直流系统运行在双极不对称方式下,直流线路不平衡电流可能无法调节,可以通过优化保护动作策略使不平衡电流持续时间缩至更短。

3) 双回直流系统输电工程中,由于其每回直流系统的直流场设备、直流线路、接地极线路都是相对独立的,常规直流输电工程中对直流线路不平衡电流的分析仍适用于其每回直流系统。

4) 为减少对周边环境的影响,通过提高控制系统准确度和改善设备测量准确度来降低不平衡电流的策略,同时,接地极线路尽量远离地磁观测设施和长距离金属管道。EA

(收稿日期:2024-09-27)

参考文献

- [1] 赵婉君等,高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 施世鸿.特高压换流站接地极线路不平衡电流分析[J].电气应用,2014,33(23):59-64.
- [3] 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规范:DL/T5224—2005[S].
- [4] 欧开建,韩伟强,黄立滨等.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.
- [5] 朱艺颖,多个特高压直流系统共用接地极的研究[J].电网技术,2007,31(10):23-25.
- [6] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等.共用接地极直流输电工程运行方式转换过程中换流站地网分流的影响及解决方案[J].南方电网技术,2022(2):103-110.
- [7] 迟兴江,耿军伟,姚磊.直流输电系统对地磁观测的干扰[J].电力学报,2011,26(4):276-281.
- [8] 熊万洲,汪雄,刘文勋,李健.多回直流输电线路对河池地磁台影响的计算[J].智能电网,2015(9):865-869.
- [9] 地震台站观测环境技术要求 第2部分:电磁观测:GB/T 19531.2—2004[S].
- [10] 应斌.高压直流输电系统接地极对长输管道安全运行的影响[J].油气田地面工程,2014(7):23-24.