

直流输电工程大地回线和金属回线转换过程及运行实例分析

冯 鹤^{1,2}, 宋天奇³, 杨洁民³, 张楠¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;
3. 中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400)

摘要: 笔者主要以贵广二回直流工程为例, 首先介绍了大地回线和金属回线的转换原理及其过程, 其次介绍了在调试和运行过程中导致大地回线和金属回线转换不成功的运行实例, 然后分析了直流保护逻辑存在的缺陷所导致的金属回线向大地回线转换时 MRTB、MRS 频繁分合的情况。笔者就这一情况提出了相应的保护逻辑修改方法, 并发现保护逻辑经修改后, 金属回线/大地回线转换正常, 在系统调试和实际运行中不再出现 MRTB、MRS 频繁分合的情况。

关键词: 直流输电工程; 大地回线; 金属回线; 金属回线转换开关(MRTB); 金属回线开关(MRS)

中图分类号: TM721.1

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)02-0126-04

Analysis and Case Study of Transfer between Ground Return and Metallic Return in the HVDC Project

FENG Dong^{1,2}, Song Tian-qi³, Yang Jie-min³, Zhang Nan¹

(1. Maintenance & Test Center, EHV, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
3. Tianshengqiao branch, EHV, China Southern Power Grid, Xingyi, 562400, China)

Abstract: Taking the Gui-Guang HVDC Project as example, this paper introduces both the principle and the process of the transfer between ground return and metallic return, discusses a case of unsuccessful transfer between GR and MR in this project, and analyzes the frequent switching on/off of the MRTB/MRS due to DC protection logic bugs during the transfer from MR to GR. Therefore, an approach to modify the DC protection logic is proposed. After the modification, the transfer between MR and GR becomes normal without frequent switching on/off of the MRTB/MRS during commissioning and operation of the HVDC system.

Key words: HVDC; ground return(GR); metallic return(MR); metallic return transfer breaker(MRTB); metallic return switch(MRS)

0 引言

直流输电技术在远距离大容量输电以及电力系统联网方面具有明显的优势, 在我国西电东送和全国联网工程中起到了重要的作用^[1,2]。目前, 贵州兴仁—深圳宝安直流输电工程(以下简称贵广二回直流)经过系统调试, 双极已投入运行。

在直流输电工程中, 大地回线和金属回线转换是一项十分重要的操作, 由直流站控的顺序控制功能控制, 可靠性较高。但无论在现场调试或是在现场运行中, 大地回线和金属回线的转换过程, 都存在不少问题。笔者结合贵广直流工程和贵广二回直流工程运行实例, 首先介绍了大地回线和金属回线的转换原理, 其次分析了大地回线和金属回线的转换过程, 分析了大地回线和金属回线转换中存在的问题, 并给出了相应的解决方法。

1 大地回线和金属回线转换的原理介绍

1.1 大地回线和金属回线运行方式介绍

在双极直流输电系统中, 正常情况下的运行方式是双极运行方式, 即采用正负两极对地、两端换流站的中性点均接地的系统构成方式, 利用正负两极导线和两端换流站的正负两极相连, 构成直流侧的闭环回路, 见图 1。

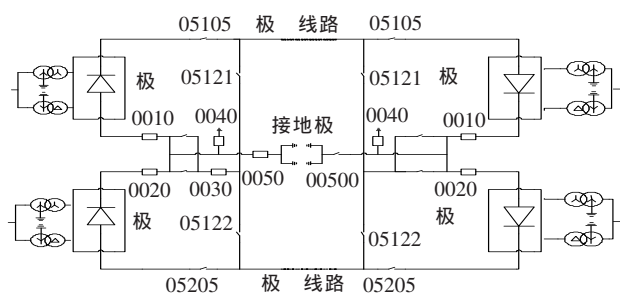


图1 贵广二回直流系统总览简图

收稿日期: 2008-09-16; 修回日期: 2008-11-23

作者简介: 冯 鹤(1982-), 男, 云南曲靖人, 助理工程师, 从事高压直流输电运行维护工作。

单极大地回线方式是利用一个极的输电导线和大地构成直流侧的单极回路,而单极金属回线方式是利用两个极输电线路构成直流侧的单极回路。为了确定直流侧的对地电压并提高运行的安全性,金属返回线的逆变侧需要接地,其不接地端(整流侧)的最高运行电压为最大直流电流时在金属返回线上的电压降。

1.2 大地回线和金属回线运行方式的转换

双极运行方式下,当换流站的某个极或者某极输电线路发生故障需要退出运行时,通常在故障极停运时,健全极的电流通过两端接地极和大地所构成的回路返回,首先自动形成单极大地回线方式。但由于在此种运行方式下,大地中长期有大直流电流通过(可达到3000A),将会引起中性点接地变压器直流偏磁增大造成变压器磁饱和,因此,一般会手动选择将单极大地回线方式转换为单极金属回线方式,以避免由于单极大地回线方式导致的变压器磁饱和等问题^[3]。当故障极恢复后,再将单极金属回线方式转换回单极大地回线方式,最后恢复为双极运行方式。为了提高运行的可靠性和直流输电系统的可用率,这两种运行方式中一般都需要在直流输电系统不停运的情况下带负荷转换^[4]。而对于单极首先投运的直流输电系统,在另一极投运之前,一般都采用单极金属回线方式。

2 大地回线和金属回线转换的特殊性

2.1 大地回线/金属回线转换的特殊性

在高压直流输电系统中,通过的电流为直流电流,而在大地回线和金属回线的转换过程中,涉及到带负荷分合开关的操作,例如当直流单极大地回线向金属回线转换时,合上MRS开关之后,直流顺序控制将会分开MRTB开关。

根据贵广二回直流工程系统研究报告,直流侧接地极线路电阻约为1.19Ω,逆变侧接地极线路电阻约为3.75Ω,而单极线路电阻为13.89Ω^[5],因此0050所在的接地极——大地——接地极回路电阻小于0030所在的极线路电阻。当进行大地回线向金属回线转换,根据分流原理,0030合上后,只能从大地回路分走一小部分电流,而大部分直流电流仍然经过0050流到对站。例如当极为大地回线方式,运行在满负荷方式(1500MW)下时,流过0050的电流将达到3000A,此时进行大地回线向金属回线转换,0030合上后,只能分走约787A电流,而约2213A的电流仍然通过0050流到对站。

2.2 MRTB/MRS开关及其振荡过零装置

由于直流电流没有过零点,并不像开断交流电流那样可以利用交流电流的过零点,开断直流电流必须强迫过零。此时,分开0050便存在较大的风险。

当直流电流强迫过零时,由于直流系统储存着巨大的能量要释放出来,而释放出的能量又会在回路上产生过电压,引起断路器端口间的电弧重燃,以致造成开断失败。因此吸收这些能量就成为断路器开断的关键因素。在贵广二回直流输电工程中,对MRTB/MRS开关采取了开关并联LC振荡回路拉弧的技术,见图2。

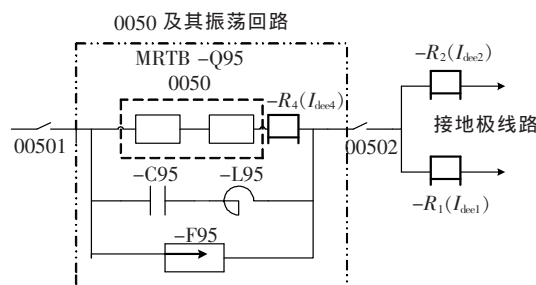


图2 直流输电工程 MRTB 开关及其振荡回路示意图

其结构由3部分组成:①断路器;②以形成电流过零点为目的的LC振荡回路;③以吸收直流回路中储存的能量为目的的耗能元件,采用金属氧化物避雷器。

3 金属回线/大地回线转换过程的运行实例分析

3.1 振荡过零装置故障导致大地/金属回线转换不成功情况分析

如前文所述,在大地/金属回线转换过程中,振荡过零装置具有重要的作用,贵广直流工程就曾出现由于振荡过零装置故障导致大地回线与金属回线转换不成功的情况。

贵广直流极由大地回线方式转为金属回线方式,安顺换流站自动顺序执行至断开MRTB开关0050时,极、极所有6套直流保护系统高速开关保护82MRTB动作,直流站控自动顺序停止。通过查看录波并结合故障分析,发现0050开关电流 I_{dec4} 在转换过程中接近于0,小于金属回路转换开关保护(82MRTB)2段定值的动作定值75A,而接地极线路电流($I_{dec1}+I_{dec2}$)在转换过程开始阶段减小,但仅仅持续了2.81ms就中止了,可能是避雷器的绝缘特性一直没有恢复,造成LC回路放电过快,LC回路振荡中止后 I_{dec1} 、 I_{dec2} 立即恢复到断开0050前的大小,远大于82MRTB保护动作定值而导致0050开关发生了重合。

检查故障录波发现,接地极线路见图2,电流($I_{dec1}+I_{dec2}$)略有减小,极直流线路电流略有增加,说明金属回路导通正常,部分电流从金属回路分流。

直流开关动作后进行耗能的元件为振荡装置中的直流避雷器,0050开关的熄能避雷器为16只并联运行,0050开关断开后,由于振荡装置的避雷器

回路旁通 0050 开关, 导致接地极线路电流 ($I_{dec1} + I_{dec2}$) 在 330 ms 内无法从断开 0050 前的直流电流值减少到 0, 从而出现了 0050 电流 I_{dec4} 很小, 而接地极线路电流 ($I_{dec1} + I_{dec2}$) 却很大的情况。

检查发现 MRTB 振荡过零装置的某只避雷器绝缘电阻为零, 对该只避雷器进行泄漏电流试验时, 电压无法升高, 检修人员立即对该只避雷器进行了更换, 并对更换下来的故障避雷器进行现场解体解剖, 发现该只避雷器已完全击穿烧毁。

因此, 此次大地回线向金属回线转换不成功的原因是由于该只避雷器击穿, 造成 LC 回路放电过快, LC 回路振荡中止后 I_{dec1} 、 I_{dec2} 立即恢复到断开 0050 前的大小, 0050 被直流保护合上, 从而导致大地回线方式无法转为金属回线方式。

更换这只避雷器后, 进行大地回线方式转为金属回线方式的试验, 转换成功完成。

3.2 直流保护软件缺陷导致金属/大地回线转换不成功情况分析

在金属回线向大地回线转换过程中, 直流站控系统的直流自动顺序将会依次合上 0050、分开 0030 开关, 直流保护系统会检测流过 0050、0030 的电流和 0050、0030 的开关位置 (判据分别为: I_{dec4} (流过 0050 开关的电流) $> \Delta$ 、 I_{dlp} (流过另一极的电流) $> \Delta$), 以判断 0050 是否真正合上、0030 是否真正断开^[6]。

在贵广二回直流系统调试过程中, 安排了金属回线/大地回线转换试验, 包括低负荷下转换试验和满负荷 (1 500 MW) 下转换试验等。为了验证直流站控的顺序控制逻辑与直流保护 MRTB、MRS 保护逻辑的配合, 还安排有极 金属回线运行方式向极 大地回线运行方式转换过程中, 模拟 0030 开关故障导致转换失败的试验^[7]。

试验状态为: 极 金属回线运行方式, 定功率模式, 输送功率为 450 MW。在金属向大地回线转换过程中, 模拟 0030 断开后仍有电流的情况, 即在直流保护系统中修改了 82MRS 保护逻辑中 (见图 3) 20MRS 模块的 X_1 管脚, 中断了 82MRS 保护逻辑中 I_{dlp} 的输入, 强制改为 5%, 以模拟 0030 一直有 0.05 p.u. (1 p.u. 对应 3 000 A) 的电流, 则根据 82MRS 保护功能的判据: $[I_{dlp} > 33.3 \text{ A}]$ 且 $[0030(\text{MRS}) \text{ 开关位置在分位}]$, 82MRS 动作, 直流保护通过硬接线方式发“禁止分 0030”和“重合 0030”信号给直流站控, 直流站控将自动执行返回金属回线运行方式的顺序, 直流接线方式将自动返回金属回线方式^[8, 9]。

在试验中, 当金属回线运行方式向大地回线运行方式转换进行到分开 0030 后, 由于预先在直流保护系统中的修改, 在分开 0030 后, I_{dl2} (极 线路电流) = 150 A $>$ 33.3 A, 满足直流保护动作条件, 37MRS、82MRS 动作, 发禁止分开 0030 信号给直流

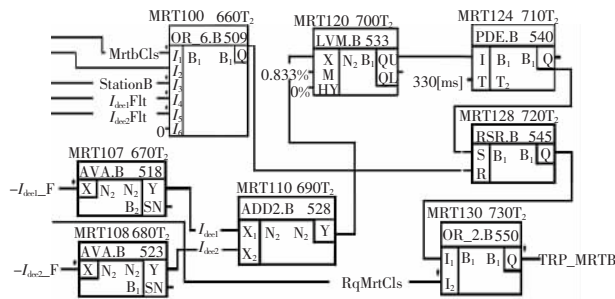


图 3 导致开关频繁分合的存在缺陷的 82MRTB 程序

站控系统并重合 0030。

继而, 站控的自动顺序控制执行返回金属回线顺序, 分开 0050。此时, 82MRTB 慢速段保护动作, 直流保护系统重新合上 0050。工作站报 0050 监视故障, 0050 位置不确定。

运行人员在工作站上确认故障后, 直流站控系统重新执行金属回线运行方式大地回线运行方式转换, 0030 再次被分开, 此时, 由于直流保护系统中 I_{dl2} 的输入仍为 150 A, 保护系统认为 0030 未真正分开, 37MRS、82MRS 动作, 0030 再次被直流保护系统合上。直流站控的自动顺序控制第 2 次执行大地回线运行方式返回金属回线运行方式顺序, 0050 (MRTB) 第 2 次被直流站控分开。此时, 直流保护 82MRTB 慢速段保护动作, 0050 第 2 次被 82MRTB 保护合上。

运行人员再次确认故障, 以上现象又重复了一次。至此, 0030、0050 开关共带负荷频繁分合 3 次, 情况十分危急, 若不能停止频繁分合的现象, 0030、0050 开关就有可能由于频繁带负荷分合而导致开关一次设备损坏甚至爆炸的严重后果。调试人员立即停止模拟 0030 故障, 运行人员停止确认故障, 直流系统才停止重复性的分合 0030、0050, 转换到大地回线运行方式。

检查发现, 直流站控对 MRTB、MRS 的控制是正确的, MRTB 的频繁分合是直流保护系统中有关 82MRTB 的软件中存在缺陷导致的, 见图 3。由于 0050 为合位, 功能块 MRT128 的端口 R 为 1, 端口 S 为 1, 该功能块被复位, Q 为 0。由于程序处理过程中, 功能块 MRT120 和 MRT124 的执行滞后于功能块 MRT100, 所以当 0050 分开时, 致使功能块 MRT128 的端口 R 为 0, 而功能块 MRT128 的端口 S 仍为 1, 则 Q 为 1, 保护出口释放, 合上 0050。

经过各方分析, 提出了 82MRTB 保护逻辑的修改方案, 见图 4。该程序将原软件中的 LVM 模块、PDE 模块和 RSR 模块更改为 DISA 模块 (其余模块保留), DISA 模块是保护功能和保护出口同时复位, 因此避免了由于程序处理顺序不当而造成的 0050 重合。

按照图 4 所示框图, 修改了直流保护中有关

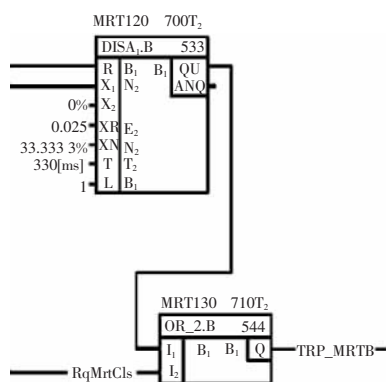


图4 修改后的82MRTB保护逻辑

82MRTB的逻辑之后,再次进行金属/大地回线转换试验,转换能正常进行。在转换过程中模拟开关故障,转换顺序能按照要求返回,证明该逻辑修改是正确的。

修改后的程序,避免了程序处理顺序不当造成的0050重合。更重要的是,该程序通过系统调试试验验证,避免了在正常运行中,由于直流保护逻辑存在缺陷,导致在金属回线/大地回线转换过程中,大负荷带电频繁分合直流开关,而可能造成的开关损坏甚至爆炸的严重后果。

4 结语

在直流输电系统中,大地回线/金属回线的转换是十分重要的操作。笔者主要以贵广二回直流工程为例,介绍了大地回线/金属回线转换的原理、过程

以及转换过程中的特殊性,并结合调试和运行实例,分析了直流输电工程金属回线与大地回线转换过程中出现的异常情况,给出了分析方法和相应的解决方案,避免了将来在运行中因为直流保护程序的缺陷,导致在金属/大地回线转换过程中频繁分合直流开关而可能引起的严重后果。另外,贵广直流工程的转换实例也给现场运行工作提供了参考。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [3] 李长益. 直流单极运行对交流变压器的影响[J]. 华东电力, 2005, 33(1): 36-39.
- [4] 严宇, 朱伟江, 刘皓, 等. 葛南直流输电系统中大地回线和金属回线转换的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 1-4.
- [5] XJ-SIEMENS. Main Circuit Parameters, XJ-Siemens Study Report[R]. XuChang: XJ-SIEMENS, 2005.
- [6] XJ-SIEMENS. DC Protection, XJ-Siemens System Information Manual[R]. XuChang: XJ-SIEMENS, 2005.
- [7] 杨洁民, 宋天奇. 贵广回直流输电系统调试期间控制保护系统发现的问题及解决方法[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 33-36.
- [8] XJ-SIEMENS. Pole Control, XJ-Siemens System Information Manual[R]. XuChang: XJ-SIEMENS, 2005.
- [9] XJ-SIEMENS. DC Station Control, XJ-Siemens System Information Manual[R]. XuChang: XJ-SIEMENS, 2005.

(上接第125页)

$$\frac{Z_d I_F - U_1 \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K'} \right)}{Z_d + Z_d'} < \frac{Z_d' I_F + U_1 \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K'} \right)}{Z_d + Z_d'}$$

因此, $I_2 < I_{10}$ 。若令 $I_1 = I_{e1}$ (I_{e1} 为第1台变压器额定电流), 此时两台变压器的最大容许负载电流 I_{ef} 为

$$I_{ef} = \frac{I_{e1} (Z_d + Z_d') - U_1 \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K'} \right)}{Z_d}$$

可见, 并列变压器的带荷能力受变比较小的一台的额定容量所限制, 如果按变比较大的一台的额定容量来带负荷, 变比较小的一台将会过负荷, 甚至被烧毁。

3 措施

3.1 严格管理

严格分接开关管理, 制定规章制度, 对分接开关的档位操作、检修、试验、并列变压器分接开关的档位的核对等明确要求, 建立档案, 对分接开关的档位、档位切换的时间、操作人、检修及试验情况进行记录。

3.2 检查试验

在变压器交接、大修、更换新分接开关或运行2年后的变压器, 必须测量其绝缘电阻值、直流电阻值, 核对档位。

3.3 规范操作

熟练掌握分接开关的换档操作的技能, 按照操作规程及有关规定进行操作, 做好档位的记录及核对, 确保并列变压器分接开关档位的一致。

4 结语

变压器并列运行分接开关的异位, 造成并列运行变压器的变比不相等, 空载时, 变压器线圈就会产生循环电流, 增加变压器的损耗, 减少变压器应带的额定负荷, 并且变压器分接开关的档位差别越大, 循环电流就越大, 甚至可能烧坏变压器; 带载时, 变压器负载分配不匀, 变比较小的会过负荷, 甚至被烧毁, 变比较大的负荷达不到额定容量, 损耗大, 容量得不到充分使用。应该采取严格管理、检查试验、规范操作等措施, 确保并列变压器的安全、经济运行。