

同塔双回直流输电系统中GRTS转换异常分析

李劲彬¹, 卢 军², 邓万婷¹, 全江涛¹, 涂彩琪¹

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077; 2. 国网湖北省电力公司, 武汉 430000)

摘要: 文中研究所涉实例为国内首次现场采用实施的直流线路同塔双回工程。由于直流线路同塔并架所造成的线路感应电压升高, 对换流站中性区域设备和直流开关的影响无可借鉴的历史经验。笔者结合一起 GRTS 直流开关转换异常事件, 研究分析了该类问题的起因与隐患, 并提出了相应的反事故措施建议, 对今后直流线路同塔并架系统中换流站内设备的绝缘水平设计、运维检修工作均有借鉴意义。

关键词: 直流开关; 大地回线转换开关; 金属回线转换断路器; 振荡回路; 同塔双回

Analysis of an Abnormal GRTS Transfer in DC Double Circuit Transmission System

LI Jinbin¹, LU Jun², DENG Wanting¹, QUAN Jiangtao¹, TU Caiqi¹

(1. Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. State Grid Electric Power Company, Wuhan 430000, China)

Abstract: This article involves the first DC double circuit transmission project in China. The double parallel lines on the same tower have caused the rise of the transmission line induced voltage. It has affected the neutral zone equipment in the DC field of the convertor station and has no experience reference. The article describes an abnormal GRTS transfer accident, and researches its cause and potential danger. According to the result, the article proposes some anti-accident measures and suggestions. The conclusion is useful both for the design of the equipments' insulation level and operational maintenance work.

Key words: DC switch; GRTS; MRTB; oscillation circuit; double circuit transmission line

0 引言

直流开关是直流输变电工程的重要设备, 其主要作用是改变直流系统的运行方式及隔离直流侧出现的故障。直流电流的开断无类似于交流电流的可利用电流过零点, 开断直流电流需强迫过零。但是, 当直流电流强迫过零时, 由于直流系统储存着巨大的能量需要释放, 而释放的能量将会在回路上产生过电压, 若灭弧触头间恢复电压的上升速度超过灭弧介质恢复速度, 将引起开关断口间的电弧重燃, 造成开断失败。因此吸收释放能量为直流开关开断的关键因素^[1-4]。

1 直流开关的原理与功能

直流开关一般由 3 部分构成: ①由交流断路器

改造而成的转换开关 B; ②以形成电流过零点为目的的 L 、 C 振荡回路; ③以吸收开断过程中产生能量为目的的非线性电阻 R 等耗能元件。直流开关一般采用无源型叠加振荡电流方式, 利用电弧电压随电流增大而下降的非线性负电阻效应, 在与电弧间隙并联的 LC 回路中产生自激振荡, 使电弧电流叠加上增幅振荡电流, 当总电流过零时实现遮断, 其非线性电阻、电感线圈、电容器安装于绝缘平台上^[5-10]。见图 1。

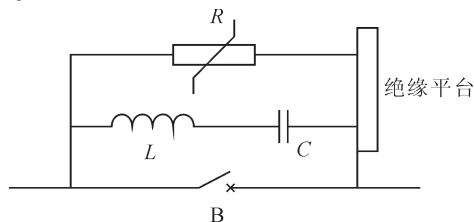


图 1 直流开关原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DC switch

在双极两端中性点接地的直流输电工程中, 高

压直流转换开关系统一般由 4 种不同类型的设备构成:金属回线转换断路器(MRTB)、大地回线转接开关(GRTS)、极中性线侧的低压高速开关(LVHS)和双极运行中性线临时接地开关(NBGS)。

2)GRTS 装设在接地极线与极线之间,用于在不停运情况下,将直流电流从单极金属回线转换至单极大地回线。

3) LVHS 装设在中性母线上, 当单极计划停运时, 换流器在没有投旁通对的情况下闭锁, 换流器将使该极直流电流降为 0, LVHS 在无电流情况下分闸。这也是当换流器内发生出了接地故障以外的故障时利用 LVHS 进行隔离的正常程序。当正常双极运行时, 如果一个极的内部出现接地故障, 故障极带投旁通对闭锁, 则利用 LVHS 将正常极注入接地故障点的直流电流转换至接地极线路。

4)NBGS 装设于中性线与换流站接地网之间。当接地极线路断开时,不平衡电流将使中性母线电压抬升,为防止双极闭锁,提高高压直流输电系统的稳定性,利用 NBGS 的合闸建立中性母线与大地的连接,以保持双极继续运行,从而提高直流输电系

统的可用率。当接地极线路恢复正常运行时,NBGS将流至换流站接地网的电流转换至接地极线路。

MRTB 和 GRTS 与通常直流开关的运行条件有所不同,断开直流电流的过程是在两条导线的并联回路中,将一条回路断开,使其电流全部转移到另一回路的过程。通常大地回线的电阻很小,仅为两端接地极和接地极引线电阻之和,而金属回线的电阻取决于输电线路导线的截面和线路长度。因此,MRTB 由于其回路电阻小而需要断开较大的直流电流,而 GRTS 因其回路电阻大,需要断开的直流电流则较小。

2 直流开关转换异常情况

某换流站近年多次在金属回线与大地回线运行方式转换期间出现异常,单极金属/大地回线转换示意图见图 2。在大地—金属,金属—大地转换过程中 GRTS(图 2 中 0040)保护均动作合闸。异常情况如下:

1)2014 年 5 月 14 日、5 月 28 日,直流系统单极大地回线运行,在单极大地回线运行方式向金属回线运行方式转换的过程中,送端站 00401、00402 开关和受端站 00300 隔离开关合闸后,0040 开关保护动作合闸。

2)2014 年 5 月 27 日，直流系统单极金属回线运行，由金属回线转大地回线运行方式过程中，0040 开关分闸后，0040 开关保护动作合闸。

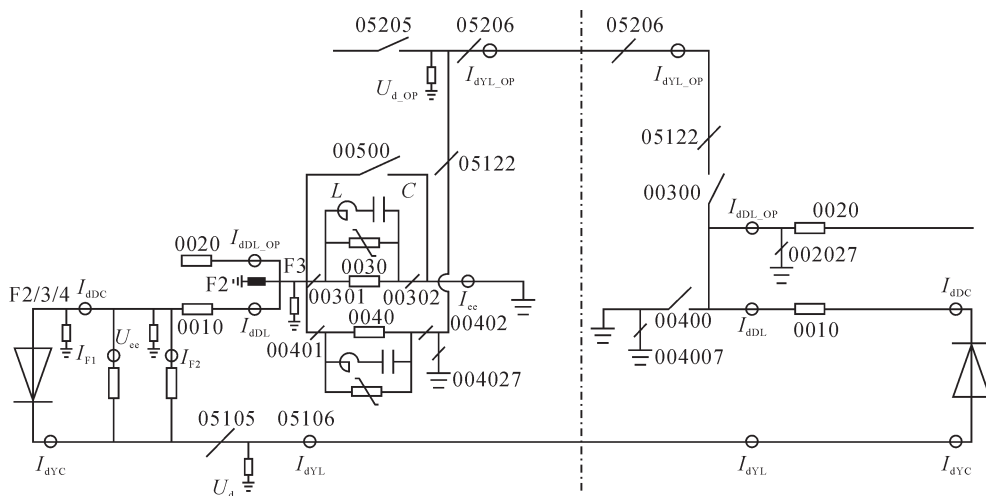


图 2 单极金属/大地回线转换示意图

Fig. 2 Monopole metal-ground operation mode

直流系统进行大地—金属回线转换与金属—大地回线转换时,送端站与受端站的直流场设备的操作流程分别见表 1、2(以极 1 为例)。

3 异常情况分析

单极大地回线转金属回线时，需先合上 0040

开关两侧隔离开关 00401 和 00402, 然后合上 0040 开关, 再断开 0030 开关。由 5 月 14 日第 1 次出现转换异常时的故障录波见图 3, 由图 3 可见, 00401 和 00402 合闸前, 极 1 直流线路上已存在约 170 kV 的异常电压。

1)转换异常原因分析。00401、00402 隔离开关

表 1 大地—金属回线转换操作流程

Table 1 Metal-ground operation procedure

序号	送端站	受端站
1	拉开 004027	拉开 004007
2	合上 05122	合上 05122
3	合上 00401、00402	—
4	—	合上 00300
5	合上 0040	—
6	拉开 0030(MRTB)	—
7	—	合上 002027
8	拉开 00301、00302	拉开 00400

表 2 金属—大地回线转换操作流程

Table 2 Ground-metal operation procedure

序号	送端站	受端站
1	合上 00301、00302	合上 00400
2	—	拉开 002027
3	合上 0030	—
4	拉开 0040	—
5	拉开 00401、00402	拉开 00300
6	拉开 05122	拉开 05122
7	合上 004027	合上 003007

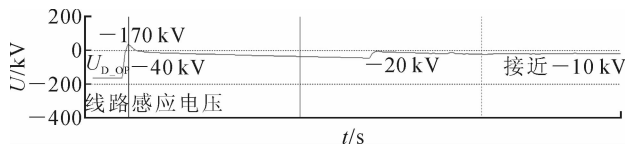


图 3 第 1 次故障录波图

Fig. 3 First fault-recorded waveform

合闸后, 00401 通过 0030 接地, 00402 隔离开关与直流线路相连, 因此 0040 开关断口及其 R/LC 振荡回路元件的两端电压为直流线路上电压。由于直流线路上电压远超避雷器额定电压(18 kV), 在持续较长时间的高感应电压作用下, 避雷器动作导通, 避雷器呈现高阻导通状态后残压先降到 48 kV, 再降到 20 kV, 后电压降至接近 10 kV, 最后电压降至为 0。故障录波图反应的电压变化, 反应出了避雷器的性能逐步恶化至损坏的过程。

在后续的数次直流开关转换过程中, 由于 0040 避雷器已损坏, 导致 0040 开关保护动作, 直流开关转换异常。

0040 开关的绝缘平台上共装设避雷器 5 只, 结合停电检修, 对避雷器进行直流参考电压、直流泄漏电流等试验检测项目, 诊断发现已有 3 只避雷器故障。

2) 异常电压产生原因分析。该变电站 0040 开关在安装后的调试过程中, 各方式转换无异常, 保护未动作。在近年的直流线路改造中, 该站出线与

另一直流线路进行了同塔双回改造。该站线路长 1 110 km, 另一直流线路长 978 km, 同塔并架部分 918 km。根据分析, 线路上异常电压产生的原因为长距离的直流线路同塔并架运行后, 在该站单极运行状态下, 在停电极线路上产生的直流感应电压^[1]。

经后期在单极运行状态下, 对停电极上感应电压进行监测 (2014 年 7 月 25 日 11 时至 7 月 27 日 23 时, 每小时采集一次数据, 共采集 60 次), 发现停电极上的感应电压变化范围为 119.0~177.8 kV, 见图 4。

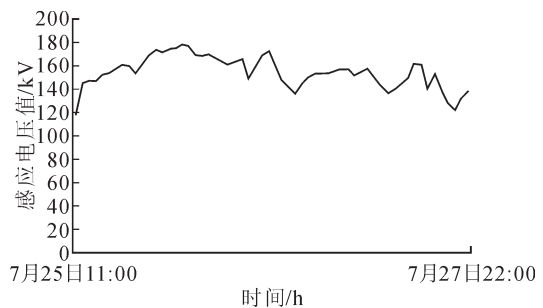


图 4 单极运行状态下停电极上感应电压变化情况

Fig. 4 Blackout pole's induced voltage behavior in monopole operation mode

4 隐患分析

在直流线路同塔并架后, 单极大运行运行时另一极直流线路存在较高的感应电压, 存在如下隐患:

1) 存在直流开关损坏或爆炸隐患。由于线路感应电压过大, 使得 GRTS 回路避雷器已经不适用于直流系统运行方式转换, 释能能力严重不足, GRTS 失去原有设计开断功能。若再次带负荷操作 GRTS, 极有可能无法成功切断直流电流, 导致 GRTS 损坏或爆炸, 造成重大设备损坏事故, 同时威胁现场人员人身安全。

2) 存在隔离开关拉开直流负荷隐患。在金属转大地回线过程中, 即使 GRTS 分闸成功, 但回路仍然有直流电流, 下一步的顺控操作为隔离开关拉开直流电流负荷。直流电流较大时, 隔离开关不具备切断能力。

3) 对中性线区域设备影响。在进行单极运行方式转换时, 另一极直流线路的高感应电压对中性区域设备的绝缘水平设计、运维检修工作带来了影响。

5 结论

对于今后直流线路同塔双回设计在电网中的应用, 提出如下反事故措施建议:

1) 需综合考虑金属回线和中性线上设备的设计, 提高 GRTS 的转换电压和各类设备的持续运行

电压,校核非线性电阻释能能力和振荡回路其他参数,提高振荡回路平台对地绝缘水平;

2)电网中由于振荡回路元件故障而导致的直流开关转换失败事件时有发生^[12-17],可考虑对直流开关进行研发与改造,研制不带辅助回路的直流断路器,例如基于晶闸管技术的混合型无弧高压直流断路器^[18-24],并进行型式试验验证。

3)增加金属回线避雷器,以保护金属回线和中性线上的设备;

4)调整单极大地转金属回线运行方式的顺控逻辑,使悬浮的极线先通过受端站的接地极接地之后再闭合送端站的 GRTS 及其相应的隔离开关。进行大地—金属回线转换时,两站的直流场设备操作流程可考虑修改为表 3。

表 3 建议的大地—金属回线转换操作流程

Table 3 Recommended metal-ground operation procedure

序号	送端站	受端站
1	拉开 004027	拉开 004007
2	—	合上 00300
3	合上 05122	合上 05122
4	合上 00401、00402	—
5	合上 0040	—
6	拉开 0030	—
7	—	合上 002027
8	拉开 00301、00302	拉开 00400

参考文献:

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:328-330.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technologies[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004:328-330.
- [2] 郑占锋,邹积岩,董恩源,等. 直流开断与直流断路器[J]. 高压电器,2006,42(6):445-449.
ZHENG Zhanfeng,ZOU Jiyang,DONG Enyuan,et al. DC interruption and DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(6):445-449.
- [3] 吉嘉琴,张节容,张力超. 高压直流电路的开断及其能量吸收装置用的氧化锌阀片[J]. 高压电器,1991,27(5):16-19.
JI Jiaqin,ZHANG Jierong,ZHANG Lichao. Breaking HVDC circuit and ZnO arrester for energy absorber[J]. High Voltage Apparatus,1991,27(5):16-19.
- [4] 徐学亭,赵冬一,胡淑慧,等. 高压直流转换开关用避雷器的工况分析及关键技术研究[J]. 电瓷避雷器,2013(3):66-70.
XU Xueting,ZHAO Dongyi,HU Shuhui,et al. Operating condition analysis and key technologies of surge arrester for HVDC transfer switch[J]. Insulators and Surge Arresters,2013(3):66-70.
- [5] 那虎,丁正平,孙晋峰,等. 高压直流输电用无源型直流转换开关电弧电流特性研究[J]. 高压电器,2012,48(9):67-71.
NA Hu,DING Zhengping,SUN Jinfeng,et al. Arc current characteristic of DC circuit breaker in HVDC transmission and distribution system[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(9):67-71.
- [6] 张万荣,苟锐锋,赵伯楠,等. 直流断路器转移直流电流过程的仿真计算研究[J]. 高压电器,2002,38(2):1-4.
ZHANG Wanrong,GOU Ruifeng,ZHAO Bainan,et al. Study on digital simulation of transferring direct current using DC breakers[J]. High Voltage Apparatus,2002,38(2):1-4.
- [7] 厉天威,王浩,项阳,等. 高压直流工程直流转换开关分析与仿真[J]. 南方电网技术,2014,8(4):33-36.
LI Tianwei,WANG Hao,XIANG Yang,et al. Analysis and simulation of HVDC project DC current transfer switch[J]. Southern Power System Technology,2014,8(4):33-36.
- [8] 马元社,李宾宾,王蔚华,等. 高压直流断路器振荡回路特性[J]. 南方电网技术,2011,5(3):10-13.
MA Yuanshe,LI Binbin,WANG Weihua,et al.Characteristic of oscillation circuit in HVDC circuit breakers[J]. Southern Power System Technology,2011,5(3):10-13.
- [9] 彭畅,温家良,王秀环,等. 特高压直流输电系统的直流转换开关研制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):151-156.
PENG Chang,WEN Jialiang,WANG Xiuhuan,et al. Development of DC transfer switch for ultra high voltage DC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):151-156.
- [10] 彭畅,温家良,马国华,等. 特高压直流输电系统中直流转换开关的电流转换分析与仿真[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):1-7.
PENG Chang,WEN Jialiang,MA Guohua,et al. Analysis and simulation on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(36):1-7.
- [11] 廖志超,贺恒鑫,韩云,等. 同塔双回直流输电系统过电压特性研究[J]. 高压电器,2013,49(5):60-68.
LIAO Zhichao,HE Hengxin,HAN Yun,et al. Research on overvoltage protection for ± 500 kV double-circuit HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(5):60-68.
- [12] 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):5-8.
YAN Yu,ZHU Weijiang,LIU Hao,et al. Research on transmission between ground return and metal return in

- Gezhouba-Nanqiao HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(21):5-8.
- [13] 雷鸣东. 天广直流金属/大地回线转换不成功原因分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8):86-88.
- LEI Mingdong. Analysis of an unsuccessful conversion from metallic return to ground return in Tianshengqiao-Guangzhou HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):86-88.
- [14] 冯 鹄, 宋天奇, 杨洁民, 等. 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[J]. 高压电器, 2009, 45(2):126-129.
- FENG Dong, SONG Tianqi, YANG Jiemin, et al. Analysis and case study of transfer between ground return and metallic return in the HVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):126-129.
- [15] 张 致, 娄殿强, 郑 劲, 等. 葛洲坝换流站金属转换开关操作引起的避雷器事故分析及对策[J]. 高压电器, 2002, 38(2):8-11.
- ZHANG Zhi, LOU Dianqiang, ZHENG Jin, et al. Analysis and countermeasure of surge arrester damage caused by MRTB operation in Gezhouba converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2):8-11.
- [16] 刘劲松, 林 睿. 楚雄换流站金属回线转换断路器并联谐振回路失效分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1):22-26.
- LIU Jinsong, LIN Rui. Analysis on the resonance circuit failure of metallic return transfer breaker in Chuxiong converter station[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1):22-26.
- [17] 林庆标, 汪 洋, 宋述波, 等. 云广直流中性母线开关及其谐振回路分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2):72-74.
- LIN Qingbiao, WANG Yang, SONG Shubo, et al. Research of the high-speed neutral bus switch of Yunnan-Guangdong UHVDC system and its resonance circuit[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2):72-74.
- [18] 周万迪, 魏晓光, 高 冲, 等. 基于晶闸管的混合型无弧高压直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18):2990-2996.
- ZHOU Wandi, WEI Xiaoguang, GAO Chong, et al. Thyristor based hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18):2990-2996.
- [19] 杜 翼, 江道灼, 陈 可, 等. 混合式高压直流断路器的控制策略与实验研究[J]. 电力建设, 2014, 35(8):6-11.
- DU Yi, JIANG Daozhuo, CHEN Ke, et al. Control strategy and experimental study of hybrid HVDC circuit breaker[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(8):6-11.
- [20] 朱泽安, 刘 巍, 姚晓君. 一种适用于电压源型换流器多端直流输电系统的协调控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2014(5):34-36.
- ZHU Ze'an, LIU Wei, YAO Xiaojun. Coordinated control strategy for voltage source converter multi-terminal high voltage DC transmission system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(5):34-36.
- [21] 李印龙, 唐思文, 胡向平, 等. 直流网络功率特性与直流有源电力滤波器的研究[J]. 低压电器, 2014(4):63-34.
- LI Yinlong, TANG Siwen, HU Xiangping, et al. Research on DC grid power characteristics and DC active power filter [J]. Low Voltage Apparatus, 2014(4):63-34.
- [22] 马 钊. 直流断路器的研发现状及展望[J]. 智能电网, 2013(1):12-16.
- MA Zhao. R & D status and prospects of HVDC circuit breakers[J]. Smart Grid, 2013(1):12-16.
- [23] 江道灼, 张 弛, 郑 欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4):65-71.
- JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4):65-71.
- [24] 洪贞贤, 潘平东, 周锦涛. 真空断路器故障引起电容器组带电原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 36(4):67-69.
- HONG Zhenxian, PAN Pingdong, ZHOU Jintao. Analysis of capacitor bank energisation caused by fault of vacuum circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 36(4):67-69.
- 李劲彬(1988—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事高压开关技术和状态评价方面的研究工作。