

高压直流线路电压异常波动对分接开关控制的影响

朱韬析¹, 欧开健²

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 高压直流线路电压波动异常是目前困扰天广、高肇及兴安直流输电系统的主要疑难问题之一, 主要由逆变侧高压直流线路电压测量异常引起, 而至今其根本原因仍不十分明朗。根据分接开关控制原理及实例, 探讨了当逆变侧电压测量发生异常时, 不仅可能直接影响到本侧分接开关的调整, 还可能影响对侧的分接开关调整, 并将带来分接开关频繁调节、换流变阀侧电压偏低、传输功率偏低等一系列问题, 甚至可能导致低负荷情况下相应极闭锁。这些分析对提高直流输电运行维护水平、在当前状况下确保直流输电系统的稳定运行有一定的帮助。

关键词: 直流输电; 电压波动; 分接开关控制

Influence of the abnormal DC voltage fluctuation on transformer tap changer control

ZHU Tao-xi¹, OU Kai-jian²

(1. GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China; 2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Tian-Guang, Gao-Zhao and Xing-An HVDC transmission system are all puzzled by the abnormal DC voltage fluctuation, and the reason is not very clear up today. In this paper, combined with theory of converter transformer tap changer control and operational examples, the influence of the abnormal DC voltage fluctuation on transformer tap changer control, such as the frequent action of tap changer, decrease of valve side voltage of the transformer and DC load, is discussed. The analysis is useful to improve the operation and maintenance ability of HVDC system and reliability of HVDC transmission system now.

Key words: HVDC; abnormal DC voltage fluctuation; transformer tap changer control

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0152-04

0 引言

直流输电系统的控制和调节主要通过快速调节换流器的触发相位来实现, 除此之外, 还可以通过调节换流变压器的分接开关的位置改变换流器的交流电压, 达到扩大调节范围和保持系统处于良好的运行状态的目的^[1]。在天广、高肇及兴安直流输电系统中, 换流变分接开关的控制均由极控系统实现。

近年来, 这三条直流输电工程均陆续出现了逆变侧高压直流线路电压测量异常的故障, 故障的根本原因至今仍不十分明朗。这一异常不仅可能直接影响到直流控制保护功能, 还可能通过影响换流变压器分接开关的控制, 产生更复杂、更隐蔽的后果。本文基于电压波动异常, 根据换流器控制及换流变压器分接开关控制原理, 结合实例分析了高压直流线路电压测量异常对换流变压器分接开关控制的影响、以及这一不良影响可能对直流输电系统稳定运行造成的危害。这些分析对提高直流输电运行维护

水平、在当前状况下确保直流输电系统的稳定运行有一定的帮助。

1 换流变压器分接开关的控制

根据文献[1], 直流输电系统的稳态直流电流为:

$$I_d = \frac{V_{doz} \cos \alpha - V_{don} \cos \beta}{d_{rz} + R + d_m} \quad (1)$$

其中: V_{doz} 和 V_{don} 分别为整流器和逆变器的无相控理想空载直流电压, 与各自交流侧的线电压 E_z 和 E_n 成正比; α 和 β 分别为整流器的触发滞后角和逆变器的触发超前角; R 为等值线路电阻; d_{rz} 和 d_m 分别为整流侧和逆变侧的等值换相电阻。

显然, 调节式(1)中的 α 或 β , 即可快速有效地对直流输电系统运行状态进行调控; 而调节换流器的交流电势 E_z 和 E_n , 也可以调控直流输电系统运行状态, 这主要靠改变换流变压器的分接开关位

置实现, 由于调节换流变分接开关档位速度缓慢且范围有限, 所以一般作为控制极调节的补充。如在天广直流输电系统中, 换流变压器分接开关的控制由极控系统自动控制, 控制方式主要有^[2]:

(1) 定角度控制方式

分接开关定角度控制是通过调节分接开关档位来保持控制角在一定范围, 当检测的控制角大于其范围的上限值时, 则通过切换分接开关位置, 使换流变压器变比降低, 再通过换流器控制器的作用, 减小控制角; 当检测控制角小于其范围的下限时, 则反方向切换分接开关位置, 通过调高换流变压器变比来增大控制角。

天广直流输电系统中, 在整流侧, 分接开关定角度控制将触发角 α 保持在 $15^\circ \sim 17^\circ$ 范围内; 在逆变侧, 分接开关定角度控制将熄弧角 r 保持在 $17.5^\circ \sim 20.5^\circ$ 范围内。

(2) 定电压控制方式

直流输电系统中, 空载直流电压与换流器交流侧电压成正比^[1], 所以通过调节换流器交流侧电压便可以实现空载直流电压的控制。

天广直流输电系统中, 分接开关定电压控制便是通过调节分接开关位置来保持换流变压器阀侧电压在一定的范围内, 用于分接开关定电压控制中的电压量 $U_{diocalc}$ 通过下式计算:

$$U_{diocalc} = \frac{U_{AcMea}}{(U_{ACminSec} - 1\%) + \frac{TCP}{100}} \quad (2)$$

其中: U_{ACMea} 为交流电压测量值; TCP 为分接开关档位; $U_{ACminSec}$ 为二次侧最小交流电压百分比, 天广直流输电工程中设定为 94%。

如果 $U_{diocalc}$ 高于 100.9%, 则调高分接开关档位; 如果 $U_{diocalc}$ 低于 99.1%, 则降低分接开关档位。而在降压运行时, 其切换至相应的门槛值, 如 80% 降压运行时, 其动作门槛值分别为 80.9% 和 79.1%。

(3) 除了上述控制方式之外, 还设置了基于直流线路电压的控制方式:

如果直流线路电压 U_{dL} 大于 1.02 pu, 将禁止调低分接开关;

如果直流线路电压 U_{dL} 大于 1.03 pu, 将直接发出升高分接开关的命令;

目前在天广直流输电系统中, 整流侧天生桥换流站分接开关控制采用了定电压控制方式, 逆变侧广州换流站分接开关采用了定熄弧角控制方式。

2 直流输电系统出现的直流电压测量异常

2.1 逆变侧直流线路电压绝对值偏低

近年来, 天广、高肇及兴安直流输电系统陆续出现了逆变侧极控主系统测量电压绝对值偏低异常^[3-6], 这时, 由于逆变侧将在定电压控制的作用下增大触发角, 逆变侧实际电压将增大并导致线路直流电流减小, 接着整流侧在定电流控制方式下, 将通过减小触发角的方式增大本侧直流电压。这就导致出现了逆变侧直流电压较正常值偏低、整流侧直流电压较正常值偏高的现象。

天广直流输电系统异常期间, 广州站极 1 和极 2 的直流电压录波图对比如图 1 所示。

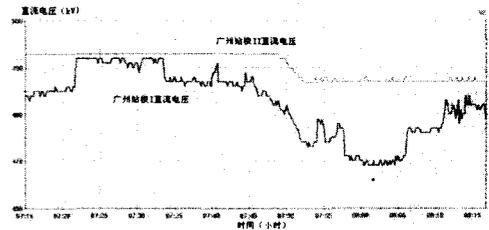


图1 广州换流站极1和极2的直流电压录波图

Fig.1 HVDC voltage of bipolar of Guangzhou converter station

2.2 逆变侧直流线路电压绝对值偏高^[6,7]

2007年5月02日, 广州换流站更换了极1高压直流线路电压测量回路中的9只光电传感器, 运行至今, 其中有4只出现故障, 导致直流电压测量偏高, 测量值往往突然增大数百千伏, 电压波形如图2所示。

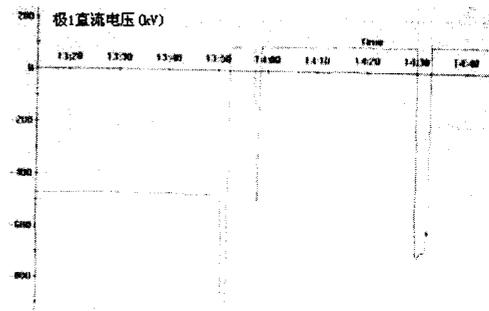


图2 广州换流站极1直流电压录波图

Fig.2 HVDC voltage of pole 1 of Guangzhou converter station

3 直流电压测量异常对分接开关控制的影响

上述异常期间, 换流变压器分接开关的控制均受到了一定的影响, 甚至威胁到直流输电系统的稳定运行。

3.1 影响直流输电系统功率的传输

2008年03月26日, 天广直流输电系统极1出

现电压波动异常期间，直流输电系统实际输送功率相对设定值低约 20 MW，工作站显示如图 3 所示。



图3 广州换流站工作站显示

Fig.3 Figure of workstation in Guangzhou converter station

如图，天广直流输电系统双极功率设定值 500 MW，但实际传输功率(天侧)极1仅为242 MW、极2为238 MW，此时，天侧极1电压工作站显示为-509 kV、触发角为5°，广侧电压工作站显示为-474 kV，极2电压则为491 kV，而此时天侧双极换流变分接开关档位如图4所示。

由图 4 可见，此时天侧极 1 换流变分接开关档位为 15 档，而对应极 2 换流变分接开关档位仅为 8 档。

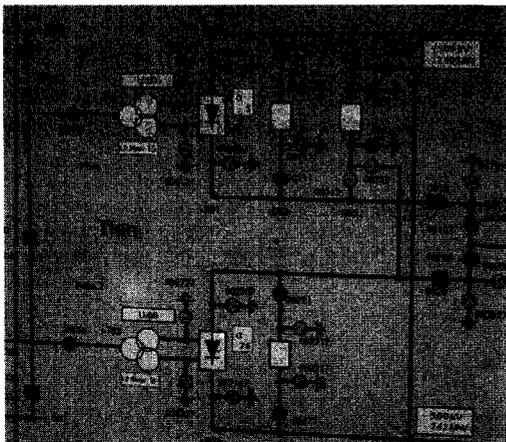


图4 天生桥换流站分接开关档位显示

Fig.4 Step of transformer tapchanger in Tianshengqiao converter station

上述异常原因简要分析如下：

(1) 由上文所述“直流线路电压 U_{dL} 大于 1.03 pu，将直接发出升高分接开关的命令”，所以，当广侧极 1 电压测量偏低引起天侧实际电压升高，高于门槛值后将直接调高分接开关档位；

注：工作站显示直流电压为“ $U_{dL} - U_{dN}$ ”， U_{dN} 为相应极中性母线电压。

(2) 天侧极 1 换流变分接开关档位升高，导致换流变阀侧电压降低，于是在定电流控制的作用下，

极控必须减小触发角以维持直流电压和电流；

(3) 天侧极 1 触发角降至 5° 后，在最小触发角限制^[8]作用下无法再降低，直流电压也无法再升高；

(4) 天侧极 1 直流电压无法继续升高，而过高的广侧实际直流电压可能引起线路压差偏低，于是极 1 实际直流电流无法达到设定值 I_{ref} (如图 3 所示的情况下，线路压差仅可以维持约 480 A 左右的电流)；

(5) 在极控电流补偿功能 CBC (Current Balance Control) 的作用下，极 2 电流设定值降低，以保证双极平衡运行，于是双极实际传输负荷为 480 MW。

注：CBC 功能即在本极的电流设定值中，减去双极实际电流差，以保证双极平衡运行。

可见，逆变侧直流电压测量异常影响整流侧分接开关的误调整后，可能导致直流输电系统实际功率降低。而这在低负荷运行情况下，甚至可能引起保护误动。

3.2 低负荷情况下引起直流零电流保护误动

2007 年 04 月 27 日，天广直流输电系统双极负荷 200 MW 运行期间，便因上述原因引起了极 1 直流零电流保护动作，导致极 1 停运^[9]。故障期间，极 1 整流器触发角为 5°，交流侧电压录波如图 5 所示。

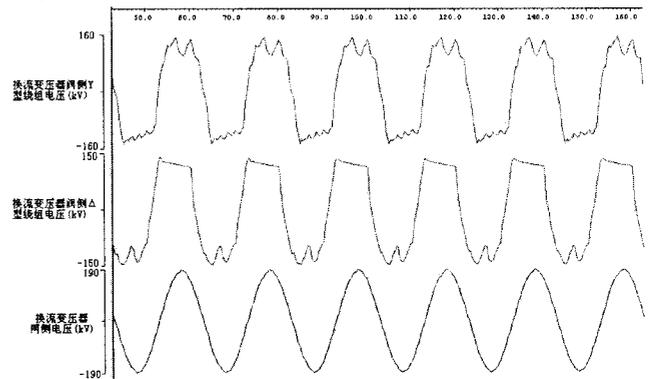


图 5 故障期间天生桥换流站极 I 交流侧电压录波图

Fig.5 Voltage of AC side of pole I of Tianshengqiao

而天广直流系统整流侧交流侧额定电压为 $230/\sqrt{3}$ kV，换流变星形绕组和角形绕组额定电压分别为 $208.6/\sqrt{3}$ kV和208.6 kV，正常情况下交流侧电压录波如图6所示。

对比图5和图6，可以发现，虽然换流变网侧电压基本一致，但由于故障期间分接开关档位受直流电压异常波动的影响，换流变阀侧电压已处于非常低的水平。

鉴于上述异常, 为保持运行, 天广直流输电系统在电压测量异常期间, 不得不保持双极负荷不低于 400 MW 运行。

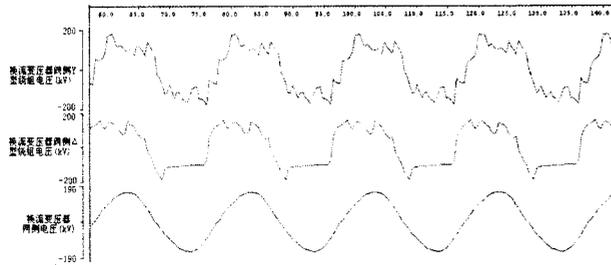


图 6 正常时天生桥换流站极 I 交流侧电压录波图

Fig.6 Voltage of AC side of pole I of Tianshengqiao converter station

3.3 引起分接开关频繁调整^[4,5]

逆变侧直流电流测量异常还可能引起分接开关频繁调节, 如高肇直流输电电压异常波动期间, 仅 2005 年 7 月 09 日 13 时 42 分至 7 月 10 日 7 时 10 分, 安顺站极 2 换流变分接开关便动作了 353 次。分接开关的频繁动作还引起了无功波动, 甚至出现了交流滤波器频繁投切现象。

这是由于安顺站分接开关控制采用了定角度模式, 当逆变侧电压测量异常引起触发角降低后, 在定角度控制的模式下, 可能会调低分接开关档位; 但同时由于直流电压偏高, 又可能会调高分接开关档位, 因此导致分接开关频繁调节。此时, 将分接开关控制方式设为定电压模式, 可以在一定程度上避免这一问题, 如 2005 年 7 月 10 日 07:10 之后, 安顺换流站将极 2 分接开关控制模式由定角度控制模式转为定电压控制模式之后, 分接头动作次数便明显减少。

3.4 直流电压测量偏高导致分接开关档位不断调高

2007 年 09 月 11 日, 天广直流输电系统极 1 直流线路电压测量值偏高, 导致换流器开路保护误动^[7]。极 1 停运后, 由于极 1 直流线路电压测量值仍然偏高, 导致分接开关档位不断调高, 直至最高档位 (23 档)。由于天广直流输电系统极在定义的备用状态时要求逆变侧换流变分接开关档位必须为 7 档, 因此, 在恢复极 1 正常运行时, 不得不手动逐步将分接开关档位由 23 档调至 7 档, 浪费了大量宝贵的时间。

4 结语

直流输电系统电压测量异常是目前困扰天广、高肇及兴安直流输电系统的主要疑难问题之一, 至今其根本原因仍不十分明朗。

虽然兴安直流输电系统采用的电压测量回路二次母线分段接法可以在一定程度上避免保护误动、提高检修效率, 但仍然无法消除对控制系统的影响; 文献[6,7]对逆变侧电压测量异常对直流保护及控制的影响进行了探讨, 而本文在其基础上, 进一步根据分接开关控制原理及实例分析了当逆变侧电压测量发生异常时, 不仅可能直接影响到本侧分接开关的调整, 还可能影响对侧的分接开关调整, 并将带来分接开关频繁调节、换流变阀侧电压偏低、传输功率偏低等一系列问题, 甚至可能导致低负荷情况下相应极闭锁。这些结论对当前未能彻底解决电压测量异常状况下的运行维护工作, 有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电电教研组. 直流输电[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.16-17.
Zhejiang University HVDC Research Group. Direct Current Transmission[M]. Beijing:China Electric Power Press, 1985.16-17.
- [2] 李标俊. 天广直流输电系统换流变压器有载分接头控制特性分析[J]. 电力设备, 2004, 5 (9): 44-46.
LI Biao-jun. Characteristics Analysis of Tap Changer Control for Tianguang HVDC Power Transmission System[J].Electrical Equipment, 2004, 5 (9): 44-46.
- [3] 张海凤, 朱韬析. 天广直流输电系统极 I 电压异常波动原因及其影响分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (24): 102-104.
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Analysis of the Abnormal DC Voltage Fluctuation of the Pole I in the Tian-Guang HVDC Transmission System and its Negative Influence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (24): 102-104.
- [4] 段卫国, 陆岩, 阳少军. 高肇直流极 II 直流电压异常波动分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(3): 23-24
DUAN Wei-guo, LU Yan, YANG Shao-jun. Analysis of the Abnormal DC Voltage Fluctuation of the Pole II in the Gui-Guang HVDC Transmission System[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(3): 23-24.
- [5] 吴泽辉, 张鹏, 左干清. 高肇高压直流系统电压波动的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (5): 104-107.
- [6] 朱韬析, 欧开健. 逆变侧送极控主系统直流电压测量结果影响分析(一)[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 54-57.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of the Influence on HVDC Transmission System of DC Voltage Measurements of Master Pole Control System at the Inverter Side: I [J].Southern Power System Technology, 2008, 2 (2): 54-57.

(下转第 159 页 continued on page 159)

发现: 1#变 $X_{01}=0.18 \Omega$, 2#变 $X_{02}=1.48 \Omega$, 2#变超出国家关于变电所各接地点对土壤阻值不大于 0.5Ω 的标准。由于 X_{01} 和 X_{02} 并联接在变电所地网上, 假设该站变压器 110 kV 中性点对地零压为 $3U_0$, I_{01} 和 I_{02} 为接地故障时流向两台主变中性点实际的一次零序电流, 则以下公式成立

$$3U_0 = X_{01} \times I_{01} = X_{02} \times I_{02},$$

即有: $0.18 \Omega \times 1101 \text{ A}/3 = 1.48 \Omega \times I_{02}$, 可计算出 $I_{02} = 44.6 \text{ A}$

在 CT 变比为 100/5 的情况下, 2#主变保护中的零序电流为 $44.6/20=2.23 \text{ A}$, 小于保护定值, 因此 2#变零序保护不会动作。即使在 2#主变已超过绝缘能力的情况下, 保护仍有可能不符合动作条件而拒动作, 从而进一步引起上一级保护设备跳闸。

3 结论及反措建议

3.1 结论

此次事故发生后, 我们和运行单位经过认真检查分析后认为: 04#线路发生 A、C 接地故障, 由于线路 CT 极性接反, 线路保护不动作, 进一步引起上一级保护设备该站 1#主变零序保护动作跳闸; 另外, 在同样运行方式条件下, 由于 2#变中性点对地土壤阻值严重超出国家标准, 2#变零序保护未能动作跳闸。

3.2 反措处理

通过此次事故的分析处理, 发现一些影响电网安全运行的缺陷, 实施了以下反事故处理措施:

(1)调整了 04#线路 CT 极性, 使其正确。

(2)调整了 2 台主变中性点 CT 变比, 使其符合设计变比要求。

(3)建议运行单位在以后的大检中, 实施对 2#变中性点接地网处对地土壤阻值严重超标的情况进行处理, 使其符合国家标准。

参考文献

- [1] 王维俭. 发电机变压器继电保护整定计算例 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [5] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [6] 贺家李. 电力系统继电保护原理(增订版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2008-11-04; 修回日期: 2009-03-27

作者简介:

李敏霞 (1968-), 女, 工程师, 从事继电保护产品设计和调试; E-mail: yuanwenjia@sohu.com

袁文嘉 (1971-), 男, 工程师, 从事继电保护产品设计和调试;

席小娟 (1978-), 女, 助理工程师, 从事继电保护产品设计和调试。

(上接第 155 页 continued from page 155)

- [7] 朱韬析, 欧开健. 逆变侧送极控主系统直流电压测量结果影响分析(二) [J]. 南方电网技术录用
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of the Influence on HVDC Transmission System of DC Voltage Measurements of Master Pole Control System at the Inverter Side: II [J]. Southern Power System Technology, processing.
- [8] 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.

- [9] 朱韬析, 欧开健. 天广直流输电系统直流零电流保护动作原因分析 [J]. 南方电网技术录用.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of Action of DC Zero Current Protection in Tian-Guang HVDC Transmission Project [J]. Southern Power System Technology, processing.

收稿日期: 2008-11-30

作者简介:

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

欧开健 (1974-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流系统仿真、交直流电力系统仿真分析。