

特高压直流输电工程无功控制逻辑的优化

陈 兵, 张 强

(中国南方电网超高压输电公司昆明局, 昆明 650217)

摘要: 无功控制功能是特高压直流输电工程设计的重要组成部分, 目的是满足换流站的直流系统无功需求、滤除交流侧谐波、保持交流侧母线电压稳定的要求。 ± 800 kV 普洱换流站是云广 II 回特高压直流输电工程中的整流站, 其直流站控系统中无功控制功能的电压有效性选择逻辑存在缺陷, 文中提出了优化的措施, 对特高压直流输电工程的可靠运行有着重要意义。

关键词: 无功控制; 特高压; 直流站控; 电压有效性

Optimization of Reactive Power Control Logic for UHVDC Transmission Project

CHEN Bing, ZHANG Qiang

(Kunming Bureau, CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China)

Abstract: The purposes of reactive power control for UHVDC transmission project are to meet DC converter station's reactive power demand, filter harmonics at AC side, and keep AC side bus voltage stable. The ± 800 kV Pu'er converter station is in the Yun-Guang II UHVDC transmission project, however a flaw exists in voltage effectiveness selection logic of the reactive power control function of its DC station control system. This paper proposes optimization measures to eliminate this flaw, thus to benefit reliable operation of UHVDC transmission projects.

Key words: reactive power control; UHV; DC station control; voltage effectiveness

0 引言

特高压直流输电工程的直流站控是重要的控制设备, 其主要功能是对换流站内直流场的设备进行控制与监控和实现换流站的无功控制。直流站控的正常稳定工作是特高压直流系统稳定运行的保障。

无功控制功能是直流站控的一部分, 是特高压直流输电工程^[1-10]的重要组成部分, 目的是保证直流系统的无功需求^[11-19], 并减少谐波对交直流系统及主设备的危害, 同时保持交流母线电压的稳定。无功控制功能的稳定可靠, 对特高压直流输电工程的可靠运行有着重要意义。文中针对 ± 800 kV 普洱换流站的无功控制中电压有效性选择逻辑进行分析, 提出优化的改进措施, 对特高压直流输电工程的安全稳定运行起着重要作用。

1 ± 800 kV 普洱换流站无功控制模式

1.1 Q 模式

正常运行情况下, 普洱换流站的无功控制模式为自动控制模式, 自动控制模式下有 Q 模式和 U 模式两种运行模式。

在 Q 模式的运行模式中, 由式(1)决定交流滤波器小组的投入^[20]。

$$Q_{\text{sys}} - Q_{\text{next}} - Q_{\text{margin}} > Q_{\text{min}} \quad (1)$$

式(1)中: Q_{sys} 是通过换流器消耗的无功功率和交流滤波器提供无功功率的差额计算出来的; Q_{next} 为下一组投入的小组滤波器提供的无功功率; Q_{margin} 为裕度值, 目的是防止小组滤波器的投退频繁; Q_{min} 为无功功率下限值。

当直流站控系统判断满足式(1)的时候, 5 s 后投入一小组交流滤波器。

由式(2)决定交流滤波器小组的退出

$$Q_{\text{sys}} < Q_{\text{min}} \quad (2)$$

式(2)中: Q_{sys} 是通过换流器消耗的无功功率和

交流滤波器提供无功功率的差额计算出来的; $Q_{\min}$ 为无功功率下限值。

只要直流站控系统判断满足式(2),那么 10 s 后退出一小组交流滤波器。

一般情况下,无功控制模式采用自动控制模式下的 Q 模式。

1.2 U 模式

U 模式的运行模式,是根据交流母线电压值的高低来决定是否投退交流滤波器。当交流母线电压低于下限值,延迟 5 s,自动投入交流滤波器,当交流母线电压高于上限值,延迟 5 s,自动退出交流滤波器。U 模式的上限值和下限值设定见表 1。

表 1 U 模式整定值

项目	范围	默认值
上限值	510~550	530
下限值	500~540	520
范围	10~50	—

2 ±800 kV 普洱换流站交流母线极限电压控制

直流系统运行时,不管无功控制模式处于 Q 模式还是 U 模式,交流母线极限电压控制始终有效。当交流滤波器小组只剩下 1 A+1 B 时,交流母线电压仍过高,电压控制不会再切除滤波器小组,以利于故障恢复后极换流器重新启动。

交流母线极限电压控制整定值见表 2。

表 2 交流母线极限电压控制整定值

交流母线电压/kV	投退延时/ms	命令
≤ 490	—	投入
≤ 495	—	禁止退出
≥ 577	—	禁止投入
≥ 588	1 000	退出
≥ 632	300	跳闸 1
≥ 676	100	跳闸 2
≥ 703	90	跳闸 3(孤岛运行时)
≥ 735	20	跳闸 4(孤岛运行时)

当前无功控制的模式为自动 Q 模式时,此时如果交流母线电压低于 490 kV,因为交流母线极限电压控制始终有效,优先级别比 Q 模式高,那么直流站控系统就会无延时的发出投入交流滤波器小组的命令。

3 ±800 kV 普洱换流站交流滤波器异常投入

2013 年 10 月 28 日,云广 II 回特高压直流输电

工程(普侨直流)系统处于极 2 低端阀组金属回线方式运行,输送功率 1 250 MW。普洱换流站无功控制模式为自动 Q 模式,投入的交流滤波器为 2 A+1 B+1 C,除了交流滤波器第 3 大组为检修状态,其余 3 大组滤波器大组正常运行,交流母线电压为 530 kV 左右。上午 7 时 8 分左右,无功控制的交流母线极限电压控制功能突然动作,开始连续投入小组交流滤波器,导致所有的热备用的小组交流滤波器均投入,交流母线电压最高升至 574 kV。

4 ±800 kV 普洱换流站交流滤波器异常投入分析

4.1 电压取值逻辑

直流站控系统根据交流电压来实现 U 模式、Q 模式、交流母线极限电压控制的功能,该取值的交流电压来自于交流滤波器大组的电压。

普洱换流站共有 4 大组交流滤波器,电压取值按照第 4 大组、第 3 大组、第 2 大组、第 1 大组的交流电压值优先顺序进行,见图 1。

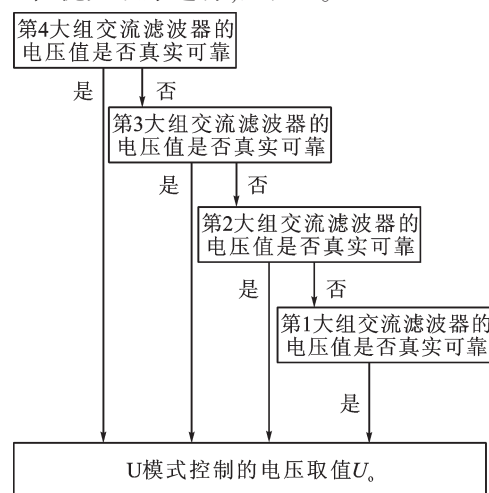


图 1 无功控制的电压取值逻辑

Fig. 1 Voltage value logic in reactive power control

当第 4 大组交流滤波器的电压值真实可靠,那么直流站控系统根据第 4 大组交流滤波器的电压值 U_4 来实现 U 模式、Q 模式、交流母线极限电压控制。

交流滤波器的电压值是否真实可靠根据式(3)–(6)(式中单位都为 kV)判断。

$$\begin{cases} \min(U_3, U_2, U_1) - 15 < U_4 \\ U_4 < \max(U_3, U_2, U_1) + 15; \\ U_0 = U_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \min(U_4, U_2, U_1) - 15 < U_3 \\ U_3 < \max(U_4, U_2, U_1) + 15; \\ U_0 = U_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \min(U_4, U_3, U_1) - 15 < U_2 \\ U_2 < \max(U_4, U_3, U_1) + 15; \\ U_0 = U_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \min(U_4, U_3, U_2) - 15 < U_1 \\ U_1 < \max(U_4, U_3, U_2) + 15。 \\ U_0 = U_1 \end{cases} \quad (6)$$

式(3)-(6)中: U_4 为第4大组交流滤波器的电压值; U_3 为第3大组交流滤波器的电压值; U_2 为第2大组交流滤波器的电压值; U_1 为第1大组交流滤波器的电压值; U_0 为直流站控中无功控制中U模式、Q模式、交流母线极限电压控制的电压取值。

当 U_4 只要满足式(3)时,那么直流站控系统就会根据第4大组交流滤波器的电压值 U_4 来实现U模式、Q模式、交流母线极限电压控制。如果 U_4 不满足式(3),直流站控系统则继续判断 U_4 是否真实可靠,当 U_3 满足式(4)时,直流站控系统就会根据第3大组交流滤波器的电压值 U_3 来实现U模式、Q模式、交流母线极限电压控制,以此类推。

4.2 电压取值逻辑的缺陷

直流站控系统根据交流电压来实现U模式、Q模式、交流母线极限电压控制,该取值的交流电压来自于交流滤波器大组的电压,优先取第4大组交流滤波器的电压值。

正常情况下4大组交流滤波器均带电,优先取第4大组交流滤波器的电压值 U_4 ,此逻辑无问题。但2013年10月28日普洱换流站交流滤波器异常投入时,第1、2交流滤波器大组带电, U_1 和 U_2 正常,均为530 kV,第3大组交流滤波器为检修, $U_3=0$,因此,根据式(3), U_4 只要大于-15 kV而小于545 kV,则直流站控系统判定真实可靠,则将用于无功控制中作为电压的取值。但是 U_4 发生较大的跌落,只要大于-15 kV,此逻辑仍然有效,这是直流站控系统中无功控制功能的电压取值逻辑缺陷所在。普洱换流站交流滤波器异常投入时,第4大组交流滤波器的实际电压为530 kV,但直流站控采集到的 U_4 有误且数值一直低于490 kV,所以优先级别高的交流母线极限电压控制起作用,直流站控系统就会无延时的不断发出投入交流滤波器小组的命令。

因此,无功控制功能的电压取值逻辑缺陷,是导致普洱换流站不断投入交流滤波器小组的重要因素,也给特高压直流输电工程的安全稳定运行埋下了隐患。

5 无功控制功能的逻辑优化

5.1 电压有效性选择的优化

根据式(3),不管 U_1 、 U_2 和 U_3 的数值如何,即便

为零,都会参与到公式的判断,这给直流站控系统中无功控制功能的电压取值逻辑造成了隐患。于是根据该缺陷,提出了电压取值逻辑的优化,以直流站控系统根据第4大组交流滤波器的电压值 U_4 来实现控制为例。

当 U_1 、 U_2 、 U_3 的值均有效不为零时(式中单位都为kV)

$$\begin{cases} \min(U_3, U_2, U_1) - 15 < U_4 \\ U_4 < \max(U_3, U_2, U_1) + 15 \\ U_1 \neq 0, U_2 \neq 0, U_3 \neq 0 \\ U_0 = U_4 \end{cases} \quad (7)$$

当有1大组交流滤波器停电时,以第1大组交流滤波器停电为例(式中单位都为kV)

$$\begin{cases} \min(U_3, U_2) - 15 < U_4 \\ U_4 < \max(U_3, U_2) + 15 \\ U_1 = 0, U_2 \neq 0, U_3 \neq 0 \\ U_0 = U_4 \end{cases} \quad (8)$$

当有2大组交流滤波器停电时,以第1、2大组交流滤波器停电为例(式中单位都为kV)

$$\begin{cases} U_3 - 15 < U_4 \\ U_4 < U_3 + 15 \\ U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 \neq 0 \\ U_0 = U_4 \end{cases} \quad (9)$$

当有3大组交流滤波器停电时,以第1、2、3大组交流滤波器停电为例

$$\begin{cases} U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0 \\ U_0 = U_4 \end{cases} \quad (10)$$

通过电压有效性选择逻辑的优化,从而排除了停电的交流滤波器大组参与电压取值逻辑,使得电压取值的逻辑更为可靠有效。

5.2 闭锁投入小组滤波器的优化

当4大组交流滤波器均停电时, U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 均为0, $U_0=U_4$,无功控制的交流母线极限电压控制功能依旧判断交流电压过低,根据表2的整定值,即使4大组交流滤波器停电,但无功控制功能仍会无延时的发出投入交流滤波器小组的命令,这无形中给直流站控系统带来了不稳定的隐患。

根据此缺陷,提出了闭锁投入小组滤波器的优化。当4大组交流滤波器均停电时,则直流站控系统判断 U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 均异常,则交流母线极限控制功能会闭锁投入小组滤波器,使得无功控制功能不会不断地发出投入交流滤波器小组的命令,从而避免了直流站控系统不稳定的发生。

6 结语

针对±800 kV普洱换流站的无功控制中U模

式、Q 模式、交流母线极限电压控制的电压取值逻辑进行分析,指出存在缺陷,并提出了无功控制逻辑的优化。电压有效性选择和闭锁投入小组滤波器的优化,不仅对 ± 800 kV 普洱换流站、云广 II 回特高压直流输电工程的安全运行有着重要作用,同时也是对其他特高压直流输电工程的无功控制功能起着启发与借鉴的作用。

参考文献:

- [1] 中国南方电网有限责任公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
China Southern Power Grid Company Limited. ± 800 kV DC transmission technology research[M]. Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [2] 田邑安,张万荣,行 鹏,等. ± 800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器,2012,48(10):73-77.
TIAN Yi'an,ZHANG Wanrong,XING Peng,et al. Study on the DC filter design for ± 800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(10):73-77.
- [3] 杨光亮,邵能灵,郑晓冬,等. ± 800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析[J]. 高电压技术,2012,38(12):3277-3283.
YANG Guangliang,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong,et al. Discussion of ± 800 kV UHVDC transmission control and protection system[J]. High Voltage Engineering,2012,38(12):3277-3283.
- [4] 罗德彬,汪 峰,徐叶玲. 国家电网公司直流输电系统典型故障分析[J]. 电网技术,2006,30(1):35-39.
LUO Debin,WANG Feng,XU Yeling. Analysis on typical faults in SGCC's HVDC projects[J]. Power System Technology,2006,30(1):35-39.
- [5] 尹 明,李庚银,牛同义,等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):34-39.
YIN Ming,LI Gengyin,NIU Tongyi,et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):34-39.
- [6] 任 震,曾 艳,戴保明. 高压直流输电系统中 C 型阻尼滤波器的优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):123-126.
REN Zhen,ZENG Yan,DAI Baoming. Optimization model and algorithm of type-c damped filter in high voltage direct current transmission system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(12):123-126.
- [7] 张桂斌,徐 政,王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):17-22.
ZHANG Guibin,XU Zheng,WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(1):17-22.
- [8] 李金丰,李广凯,赵成勇,等. 三相电压不对称时带有电压源换流器的 HVDC 系统的控制策略[J]. 电网技术,2005,29(16):16-20.
LI Jinfeng,LI Guangkai,ZHAO Chengyong,et al. Control strategy for VSC-HVDC system under unsymmetry of three phase voltage[J]. Power System Technology,2005,29(16):16-20.
- [9] 徐秉雁. 特高压输电与超高压输电经济性比较[J]. 山西电力,2009(1):57.
XU Bingyan. The economic comprising between EHV transmission and UHV transmission[J]. Shanxi Electric Power,2009(1):57.
- [10] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
LIU Zhenya. Ultra high voltage power grid[M]. Beijing:China Electric Power Press,2013.
- [11] 张 强,梁迪团,刘 宁. ± 800 kV 普洱换流站无功配置的研究分析[J]. 高压电器,2015,51(3):117-121.
ZHANG Qiang,LIANG Dituan,LIU Ning. Reactive power compensation scheme and configuration for ± 800 kV Pu'er converter station[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(3):117-121.
- [12] 殷威扬,杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术,2006,32(9):50-54.
YIN Weiyang,YANG Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):50-54.
- [13] 王雁凌,任 震,王官洁. 静止无功补偿器在高压直流系统中的应用[J]. 电网技术,1996,20(12):34-37.
WANG Yanling,REN Zhen,WANG Guanjie. Application of SVC in HVDC system[J]. Power System Technology,1996,20(12):34-37.
- [14] 张宝金,王 昭,王晓阳. 电网结构对直流换流站无功补偿分组容量影响分析[J]. 电网与清洁能源,2008,24(9):10-12.
ZHANG Baojin,WANG Zhao,WANG Xiaoyang. Effect of grid structure on the capacity-grouping of the reactive power compensation in DC converter station[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2008,24(9):10-12.
- [15] 赵晓君. 高压直流输电工程[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun. HVDC power transmission project[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [16] EPRI. High-voltage direct current handbook[Z]. California: Electric Power Research Institute,1994.
- [17] WILHELM D. High-voltage direct current handbook[Z]. New York:GE Industrial and Power Systems,1994.

(下转第 28 页)

断口电压分布的测试,确定了均压电容器的优选值为400 pF,使电压分布的不均匀系数最小;

5)文中提出的用于投切电容器组的40.5 kV双断口真空断路器设计方案是完全可行的,可满足容性电流及短路电流开合的要求。

参考文献:

- [1] 李 电,金百荣,洪金琪,等. 真空断路器投切电容器组性能的现状与对策[J]. 高压电器,2003,39(5):44-46.
LI Dian,JIN Bairong,HONG Jinqi,et al. The current situation and countermeasures of switching capacitor bank using vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(5):44-46.
 - [2] 李 电. 35 kV 真空断路器投切电容器组早期重击穿率的研究[J]. 高电压技术,2002,28(9):22-23.
LI Dian. Study on forepart restrike rate of 35 kV vacuum circuit breaker in the closing-opening process of capacitor group[J]. High Voltage Engineering,2002,28(9):22-23.
 - [3] 徐国政,张节容,钱家骊,等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng,ZHANG Jierong,QIAN Jiali,et al. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000.
 - [4] 廖敏夫,邹积岩,段雄鹰,等. 多断口真空开关技术的发展与研究现状[J]. 高压电器,2006,42(6):456-459.
LIAO Minfu,ZOU Jiyan,DUAN Xiongying,et al. Development and current status of vacuum switch with multiple breaks[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(6):456-459.
 - [5] 舒胜文,阮江军,黄道春,等. 三断口真空断路器的动态均压措施[J]. 电网技术,2010,34(10):43-48.
SHU Shengwen,RUAN Jiangjun,HUANG Daochun,et al. Dynamic voltage-sharing measures for vacuum circuit breaker with triple breaks[J]. Power System Technology,2010,34(10):43-48.
 - [6] GB 1984—2014 高压交流断路器[S].2014.
GB 1984—2014 High-voltage alternating current circuit-breakers[S].2014.
 - [7] GB 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S].2011.
GB 11022—2011 Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards[S].2011.
 - [8] KAMIKAWAJI T, SHIOIRI T, FUNAHASHI T, et al. An investigation into major factors in shunt capacitor switching performances by vacuum circuit breakers with CuCr contacts [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1993,8(4): 1789-1795.
 - [9] DULLNI E, GENTSCH D, KLEBERG I, et al. Switching of capacitive currents and the correlation of restrike and pre-ignition behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 65-71.
 - [10] KÖRNER F, LINDMAYER M, KURRAT M, et al. Contact behavior in vacuum under capacitive switching duty [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(3):643-648.
 - [11] NIAYESH K,RAGER F,SCHACHERER C.Electrode phenomena before long delayed breakdowns in vacuum after switching capacitive currents[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(2):258-259.
 - [12] KÖRNER F,LINDMAYER M,KURRAT M,et al. Requirements for vacuum circuit -breakers under capacitive switching duty[C]//19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED).Vienna:CIRED, 2007:1-4.
 - [13] DENIS V,MICHEL L,MICHEL R,et al. A 3D calculation method for assessing the voltage distribution across breaks of HV circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999,14(3):954-959.
- 耿英三(1963—),男,教授,博导,研究方向为新型高压开关电器理论与应用、电器智能化理论与技术、电器计算机辅助设计与仿真。
- 陈榆秀(1953—),女,高级工程师,研究方向为真空灭弧室、真空断路器和固体绝缘技术及产品开发。
-
- (上接第23页)
- [18] KANNIESSER K W. HVDC systems and their planning [Z]. Erlangen:Siemens AG,1994.
 - [19] 王海林,黎 岚,吴安平. 向家坝±800 kV 特高压换流站容性无功配置研究[J]. 四川电力技术,2008,31(3):9-11.
WANG Hailin,LI Lan,WU Anping. Research on capacitive reactive power division scheme of ±800 kV xiangjiaba UHVDC converter station[J]. Sichuan Electric Power Technology,2008,31(3):9-11.
 - [20] 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局. ±800 kV 普洱换流站运行规程[M]. 昆明:中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局,2015.
Kunming Bureau,CSG EHV Transmission Company. ±800 kV Pu'er converter station operating procedures[M]. Kunming:Kunming Bureau,CSG EHV Transmission Company,2015.
- 陈 兵(1966—),男,高级工程师,从事特高压交直流并联系统运行维护的管理工作。
- 张 强(1985—),男,工学硕士,从事特高压交直流并联系统运行维护工作,研究方向为电力系统最优运行与规划。