

# 天广直流输电系统直流站控设计缺陷分析

朱韬析<sup>1</sup>, 毛海鹏<sup>1</sup>, 欧开健<sup>2</sup>

(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:** 天广直流输电系统采用直流站控系统根据交流电压、直流负荷和系统无功状况自动控制交流滤波器的投退, 以提供换流所需的无功, 并滤除换流产生的谐波。但是, 逆变侧广州换流站直流控制系统在判断交流滤波器是否可用时, 并未考虑广州换流站交流侧的接线方式, 基于天广直流输电系统广州换流站无功控制原理, 对这一设计上的缺陷进行了分析, 利用 RTDS 实时数字仿真系统对其可能造成的后果进行了仿真, 提出了改进建议。

**关键词:** 直流输电; 直流站控; RTDS; 交流接线方式

## Analysis of design defect in reactive power control strategy used in Tian-Guang HVDC transmission project

ZHU Tao-xi<sup>1</sup>, MAO Hai-peng<sup>1</sup>, OU Kai-jian<sup>2</sup>

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

**Abstract:** In order to provide the reactive power which convert process needed and filter the harmonic produced in convert process, DC station control system is adopted by Tian-Guang HVDC transmission system to control switching of AC filter automatically based on AC voltage, DC load and reactive power of AC system. But, when DC station control system used in Guangzhou converter estimates whether AC filter could be used or not, configuration of AC side is not considered. Based on theory of reactive power control of Guangzhou converter station, this hidden trouble of design and its negative impacts are discussed based on the simulation on RTDS. At last, some useful suggestions are proposed.

**Key words:** HVDC; DC control system; RTDS; configuration of AC side

中图分类号: TM721.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2010)02-0086-04

## 0 引言

天广±500 kV 直流输电工程全长 960 km, 额定容量为双极 1 800 MW, 自 2001 年 6 月双极投运以来, 输送电量累计超过 300 亿度, 为西电东送发挥了重要而积极的作用<sup>[1]</sup>。其直流控制系统由德国西门子公司设计, 从实际运行情况来看, 有效地保证了功率传输的准确稳定和换流站一次主设备安全运行, 改善了交、直流系统运行性能。

直流输电系统在传输有功功率时, 无论是整流器或逆变器, 都将从交流电网侧吸收容性无功功率<sup>[2]</sup>。直流输电系统吸收的无功功率主要来自换流站内投入的交流滤波器, 以及交流系统提供的无功支持。由无功控制系统控制投切的交流滤波器, 除了为直流系统提供无功补偿外, 还可以滤除谐波<sup>[3]</sup>。

天广直流输电系统逆变侧广州换流站交流侧

采用双母线联络接线方式, 共有 11 小组交流滤波器, 分三大组, 分别挂靠在两条母线上。但是, 逆变侧广州换流站无功控制系统在判断交流滤波器是否可用时, 并未考虑大组交流滤波器母线侧刀闸、母线联络开关及刀闸的位置, 本文基于天广直流输电系统逆变侧无功控制原理, 根据广州换流站交流侧的接线方式, 对这一设计缺陷可能造成的后果利用 RTDS 实时数字仿真系统对其可能造成的后果进行了仿真分析, 并提出了改进建议。

## 1 广州换流站无功控制原理

广州换流站无功控制采用了定无功控制方式: 在满足换流站交流母线电压在规定范围之内和滤除谐波的要求的前提下, 通过投切交流滤波器和调整换流变压器分接头将交直流系统间的无功交换控制在设定范围之内。

无功控制系统计算换流器消耗的无功功率, 然后按照投入滤波器的情况计算出系统无功, 从而根据无功情况确定滤波器的投切:

当  $Q_{\text{sys}} > Q_{\text{max}}$ , 经一定时间的延时后, 投入一组交流滤波器;

当  $Q_{\text{sys}} < Q_{\text{min}}$ , 经一定时间的延时后, 退出一组交流滤波器;

小组交流滤波器的投切由直流站控控制。

## 2 广州换流站交流系统接线方式及交流滤波器设置简介

### 2.1 广州换流站交流系统接线方式

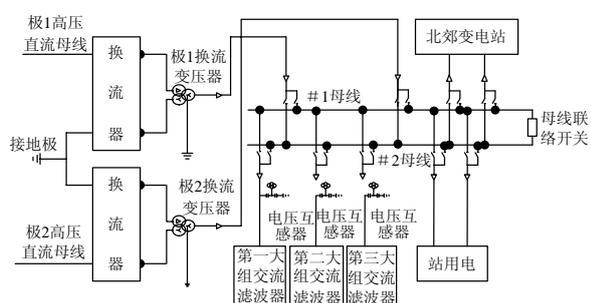


图1 广州换流站交流系统接线方式

Fig.1 Configuration of AC side of Guangzhou converter station

如图1所示, 广州换流站交流侧采用双母线联络接线方式, 正常运行时, 双极直流出线、两回联络线和两回站用电分别挂在 220 kV #1 母线和 #2 母线上; 第一、三大组交流滤波器连于 #1 母线、第二大组交流滤波器连于 #2 母线。

### 2.2 广州换流站交流滤波器简介

#### 2.2.1 广州换流站交流滤波器配置

12脉动的直流输电系统, 实际运行中, 其交流侧存在  $n=12k \pm 1$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 等特征谐波, 同时由于交流系统存在非线性负荷或三相参数不完全对称, 所以同时也存在 3、24、36...等 3 倍次特征谐波<sup>[2]</sup>。交流滤波器不仅要在满负荷运行方式下保证一定的无功裕度, 同时还必须满足滤除谐波的要求。

广州换流站交流滤波器具体配置如表1所示。

#### 2.2.2 广州换流站交流滤波器投切限制

控制系统自动投切交流滤波器的原则是:

(1) 保持交流母线电压在 217~245 kV 范围之内;

(2) 按滤除谐波的最优效果进行小组的组合;

(3) 保持全站的无功功率在规定范围之内。

以上三个条件首先要满足条件 1, 然后是条件 2, 最后是条件 3。

表1 广州换流站交流滤波器配置

Tab.1 AC filter configuration of Guangzhou converter station

类型 组别	双调谐		单调谐	
	12/24	3/36	36	48
	A型	B型	C型	C型
第一大组	2		1	1
第二大组	1	1		1
第三大组	1	1		2

无功功率的正常范围为  $-100 \sim +30$  Mvar。

滤波的限制则由控制系统自动完成: 以双极全电压运行方式为例, 控制系统根据当前可用的交流滤波器计算双极直流系统可输送的最大直流功率, 如果目前输送的直流负荷高于该最大值, 控制系统将按表2自动将负荷降至该限值之下。

表2 双极运行方式下谐波控制对滤波器配置要求

Tab.2 AC filter configuration based on harmonics control

电流/%	滤波器配置要求
110	3A+2B+1C(48)+1C(36)或3A+2B+2C(48)或 4A+2B+1C(48)或4A+1B+1C(48)+1C(36)或 4A+2B+1C(36)或4A+1B+2C(48)
100	3A+2B+1C(48)或3A+2B+1C(36)或 4A+1B+1C(48)或4A+1B+1C(36)或4A+2B
85	2A+2B+1C(48)或2A+2B+1C(36)或 3A+1B+1C(48)或3A+1B+1C(36)或3A+2B
70	3A+1B或2A+1B+1C(48)或2A+1B+1C(36)或 2A+2B
55	2A+1B
40	1A+1B
25	1A+1B
10	1A+1B

## 3 广州换流站无功控制系统缺陷和隐患分析

自天广直流投运以来, 广州换流站无功控制系统及交流滤波器在运行中出现了若干问题<sup>[3,5]</sup>。虽然, 控制系统在判断小组交流滤波器是否可用时未考虑大组交流滤波器母线侧刀闸、母线联络开关及刀闸的位置这一隐患暂未给实际运行带来影响, 但仍应引起高度重视, 分析其原因及可能导致的后果, 防患未然。

### 3.1 控制系统判断某小组交流滤波器可用的依据

控制系统判断某小组交流滤波器可投入的判断如下:

(1) 该交流滤波器的地刀在定义的分位;

(2) 该交流滤波器的刀闸在定义的合位;

(3) 该交流滤波器的断路器在定义的分位;

(4) 该交流滤波器的断路器和刀闸都暂未收到任何动作指令;

(5) 该交流滤波器的断路器、刀闸和地刀的操作方式不是现场操作方式;

(6) 该交流滤波器的断路器没有任何故障和告警信号,且没有任何保护跳闸指令;

(7) 该交流滤波器投退方式设为“自动选择”状态——由控制系统自动控制;

(8) 该大组交流滤波器母线运行正常、交流电压测量正常。

如果上述任一条件不满足,控制系统就会认为该小组交流滤波器无法投入,从而根据谐波控制条件对直流系统可输送的最大负荷进行限制。

### 3.2 缺陷及隐患分析

结合广州换流站交流系统接线,其无功控制原理存在着以下缺陷:

(1) 控制系统在判断某小组交流滤波器是否可用时,并未考虑交流母线联络开关及刀闸的位置;

(2) 大组交流滤波器既可以连接在#1母线上,也可以连接在#2母线上,但是控制系统并未对此进行判别。

不妨假设直流输电系统双极满负荷正常运行,所有交流滤波器均投入运行,此时母线联络开关突然断开。控制系统按上文所述的条件,仍然认为所有小组交流滤波器运行正常,满足滤除谐波的需要。但实际上,对于极2,仅有第二大组交流滤波器的三组小组交流滤波器可用,这并不能完全滤除极2满负荷运行时产生的谐波,将导致大量的谐波流入交流系统,产生不良影响。

再假如三大组交流滤波器均连接在#1母线上,当母联开关断开后,对于极2,实际上已经没有交流滤波器为其滤除谐波和提供无功,但控制系统却仍然无法判别,这将对交流系统产生更恶劣的影响。

### 3.3 仿真分析

针对这一问题,利用南方电网技术研究中心RTDS实时数字仿真系统进行了仿真分析。RTDS仿真系统由用于模拟电网(包括直流系统)一次部分的RTDS实时数字仿真器和天广实际控制保护装置两部分联接构成。

#### (1) 仿真试验一

系统运行方式:双极1 800 MW。

交流侧接线方式:双母联络运行。

#1 母线带极1、第一和第三大组交流滤波器、交流系统为一个电压幅值为230 kV的等值交流电压电源,该电源的内阻抗幅值为4.232 Ω,阻抗角为

84°,短路容量为12.5 GVA(短路比SCR为12 500/1 800=6.94)。

#2 母线带极2、第二大组交流滤波器、交流系统为一个电压幅值为230 kV的等值交流电压电源,该电源的内阻抗幅值为5 Ω,阻抗角为84°,短路容量为10.58 GVA(短路比SCR为10 580/1 800=5.887)。

手动断开母线联络开关2012后,双极直流系统正常运行,交流侧#1母线和#2母线电压波形如图2所示。

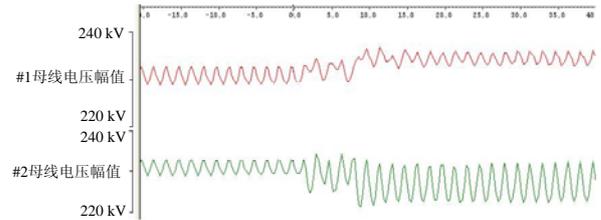


图2 2012断开后的双母电压  
Fig.2 Voltage of #1 and #2 bus after 2012 opening

现象分析:母线联络开关断开后,控制系统按上文所述的条件,仍然认为所有小组交流滤波器运行正常,满足无功和滤除谐波的需要。但实际上,对于极1,有第一和第三大组交流滤波器可用,而对于极2,仅有第二大组交流滤波器的三组小组交流滤波器可用,极1将出现无功过剩、而极2却会出现无功不足,所以导致两条母线电压出现较大偏差;同时,极2满负荷运行时产生的谐波无法完全滤除,大量的谐波将流入交流系统。

#### (2) 仿真试验二

系统运行方式:双极1 800 MW。

交流侧接线方式:双母联络运行。

#1 母线带极1、第一、第二和第三大组交流滤波器、交流系统为一个电压幅值为230 kV的等值交流电压电源,该电源的内阻抗幅值为4.232 Ω,阻抗角为84°,短路容量为12.5 GVA(短路比SCR为12 500/1 800=6.94)。

#2 母线带极2、交流系统为一个电压幅值为230 kV的等值交流电压电源,该电源的内阻抗幅值为5 Ω,阻抗角为84°,短路容量为10.58 GVA(短路比SCR为10 580/1 800=5.887)。

手动断开母线联络开关2012后,双极直流系统正常运行,交流侧#1母线和#2母线电压波形如图3所示。

现象分析:同上,母线联络开关断开后,控制系统按上文所述的条件,仍然认为所有小组交流滤波器运行正常,满足无功和滤除谐波的需要。但实际上,极2无交流滤波器可用,两条母线电压将出现

更大的偏差;同时,极2换流产生的谐波将全部流入交流系统。

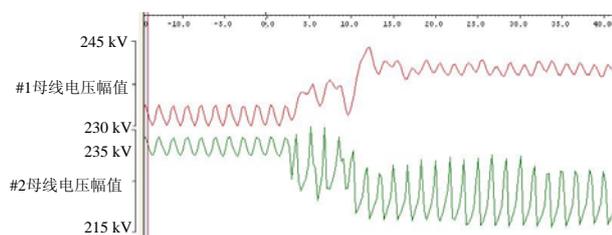


图3 2012断开后的双母电压  
Fig.3 Voltage of #1 and #2 bus after 2012 opening

### (3) 仿真结论

广州换流站母线联络开关 2012 偷跳后,直流站控系统无法识别,对直流系统的运行不会造成直接影响,但其无功控制及谐波问题将对交流系统产生严重影响。

### 3.4 改进措施

针对这一设计缺陷,在控制系统判断某交流滤波器是否可用时,在上文所述的 8 个条件的基础上,应再加入母线联络开关、刀闸及所属大组交流滤波器母线侧刀闸的位置条件加以判断,修改后的判断条件(以连于#1 母线侧的极为例)如图 4 所示。

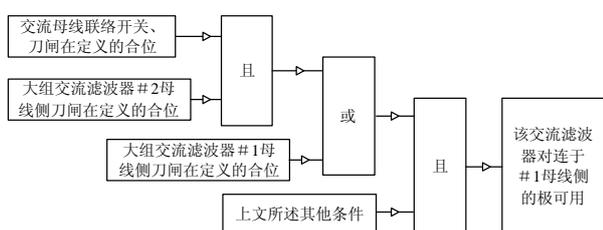


图4 交流滤波器可用的判断条件  
Fig.4 Conditions that AC filter could be used

类似地,可以得到某交流滤波器对极 2 可用的判断条件。

## 4 结论

随着大批直流输电系统的投运,我国已跨入交直流混合大电网时代,这也更加重视交直流电力系统间的相互作用<sup>[7]</sup>。交流滤波器是直流输电系统的重要组成部分,可以提供换流所需的无功,并滤除换流产生的谐波,显然,交流滤波器的运行状况,将直接对交直流电力系统产生较大影响。

天广直流输电系统采用直流站控系统根据交流电压、直流负荷和系统无功状况自动控制交流滤波器的投退。但是,逆变侧广州换流站控制系统在判断某交流滤波器是否可用时,存在着一定的缺陷;并未考虑到交流系统接线方式,结合母线联络开关

和大组交流滤波器母线侧刀闸的位置进行判断。当母线联络开关偷跳故障时,这一缺陷将导致某极实际可用的交流滤波器不足以提供换流所需的无功,并无法完全滤除换流产生的谐波,将会对交流系统产生不良影响,在 RTDS 实时数字仿真系统的仿真结果也证明了这一分析。最后,本文对直流站控系统判断交流滤波器是否可用的逻辑提出了改进建议,这对我国目前直流输电系统的运行和未来直流输电工程的实施,有一定的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 丁钊,韩伟强.天广直流输电系统双极运行情况总结[J].电网技术,2003,27(9):49-54.  
DING Zhao, HAN Wei-qiang. Summary of Bipolar Operation Situation of Tian-Guang DC Power Transmission System[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-54.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组.直流输电[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 朱韬析,黄俊波,王超.直流输电系统无功功率的控制原理及存在的问题分析[J].高电压技术,2006,32(增刊):32-35.  
ZHU Tao-xi, HUANG Jun-bo, WANG Chao. Theory of Reactive Power Control of HVDC System with the Analysis of Problems Existing in It[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(S): 32-35.
- [4] 段卫国,魏俊杰,陆岩.天广直流并联电容器损坏原因及改进措施.南方电网技术研究,2006,2(4):19-21  
DUAN Wei-guo, WEI Jun-jie, LU Yan. Causes of Damage and Improvement Measures of Shunt Capacitors on the Tian-Guang HVDC Transmission Project[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2(4): 19-21.
- [5] 朱韬析,王超.广州换流站交流滤波器运行存在的问题[J].电力设备,2007,8(10):66-68.  
ZHU Tao-xi, WANG Chao. Problems of AC Filters in Guangzhou Inverter Station[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(10): 66-68.
- [6] 陈亦平.直流系统无功控制对交流系统电压调整的影响分析[J].南方电网技术研究,2005,1(6):35-37.  
CHEN Yi-ping. Analysis of the Influence of HVDC Reactive Power Control on the Voltage regulation of AC System[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2005 1(6): 35-37.
- [7] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:机械工业出版社,2005.

收稿日期:2009-02-14

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

毛海鹏(1978-),男,工程师,目前从事直流输电技术管理工作;

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。