

## 贵广直流肇庆换流站阀冷切换控制系统浅析

刘森, 宋述波, 刘俊, 梁家豪, 蒋道宇

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

**摘要:** 2007年06月01日贵广直流肇庆换流站阀冷系统的一次切换过程中, 本应保持合位的两处小开关意外跳开, 造成阀冷主泵及主泵电源失去冗余。分析了该异常现象的成因, 指出贵广直流肇庆换流站阀冷系统切换控制当前存在的缺陷, 讨论了相应可采用的解决措施, 并对实际采用的解决方案进行了说明。

**关键词:** 换流站; 阀冷; 切换; 主泵; 冗余

### Basic analysis on the valve cooling system's switching control problem of Zhaoqing converter station, Gui-Guang HVDC project

LIU Sen, SONG Shu-bo, LIU Jun, LIANG Jia-hao, JIANG Dao-yu

(Guangzhou Electric Power Bureau, EHV Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** During one switching course of Zhaoqing Converter Station's valve cooling system, two switches that should have been kept closed tripped by accident which made the valve cooling system lose its redundancy. The paper analyses the reason that caused the abnormal phenomenon and points out the living defects of the valve cooling system's switching control. Also, it discusses the available ways that can solve the problem and introduces the way that is actually adopted.

**Key words:** converter station; valve cooling system; switch; main pump; redundancy

中图分类号: TM712 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)12-0109-03

## 0 引言

肇庆换流站作为西电东送的主通道之一, 对于南方电网的安全稳定运行有着举足轻重的作用。肇庆换流站内有两套独立的阀冷系统, 分别对极一和极二阀塔设备进行冷却。每套阀冷却系统由阀内冷却系统与喷淋水系统组成。阀内冷却系统主要功能是为可控硅阀提供冷却水, 吸收换流器工作中产生的热量, 维持阀厅换流设备正常工作温度, 确保设备的可靠运行, 其中冷却水的循环则由两台互为备用的主泵提供动力, 当两套主泵故障时将引起相应极的紧急停运。图1给出了该部分系统的电气接线图<sup>[1,2]</sup>。可以看出站内各极主泵均配备有两路电源, 分别由10kV母线101M和102M供给, 正常情况下一路投入一路备用, 若所投入电源因故丢失则由继电器K1将主泵电源切至另一路, 不会引起切泵或跳小开关。此外, 肇庆换流站为10kV母线配置了备自投功能。一旦发生任何原因导致的102M电压低于额定值85%情况, 则将延时跳开开关12DL并合上开关023DL, 转由10kV母线103M带102M运行。这里需要指出, 由于备自投装置切换期间仅

固有延时已达300ms, 而阀冷主泵电源切换的延时设计为200ms, 故备自投的动作无法避免阀冷主泵电源系统的切换。2007年06月01日, 极一主泵当时由第二路电源供电, 泵二运行; 极二主泵由第一路电源供电, 泵二运行。随后102M因扰动电压低于85%额定值, 备自投装置动作, 后极一主泵电源由电源二切至电源一运行正常, 主泵保持在泵二运行; 极二主泵则由泵二切换至泵一运行, 供电电源仍为第一路, 同时检查发现极二主泵二电源小开关Q1跳开, 相应MCC小开关Q4跳开。本文针对此次异常展开分析, 研究了肇庆换流站阀冷系统切换控制的现状, 讨论了相应的改进措施, 并对工程实际中最终所采用的方案作出说明。

## 1 阀冷系统切换异常成因浅析

肇庆换流站阀冷主泵电机为鼠笼转子异步电机, 该类电机瞬间断电后重新投入电网时, 相应的状态方程及其解法与启动时相同, 仅需采用不同的初值。与感应电机瞬间断电后重启情况对应的初值可由式(1)、(2)、(3)求出, 已知重投时定子三相电流的初值为0。其中,  $t=t_1$ 时定子三相断电,  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$

分别为定子断电瞬间转子电流的初值,  $T_r$  为转子回路的时间常数,  $T_M$  为机组的机械时间常数,  $\Omega_1$ 、 $\theta_1$

分别为  $t=t_1$  时转子的机械角速度和转角<sup>[3,4]</sup>。

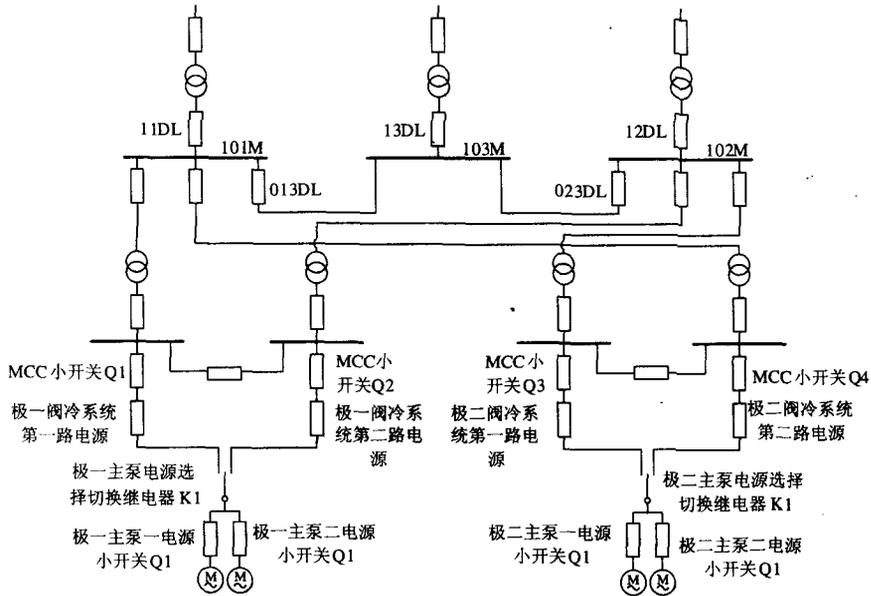


图 1 阀冷系统主泵供电回路图

Fig.1. Circuit diagram of main pump's power supply

$$i_a = I_a e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} \quad i_b = I_b e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} \quad i_c = I_c e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} \quad (1)$$

$$\Omega = \Omega e^{-\frac{t-t_1}{T_M}} - \frac{T_{L0}}{R_L + R_\Omega} (1 - e^{-\frac{t-t_1}{T_M}}) \quad (2)$$

$$\theta = \theta_1 + p_0 \int_{t_1}^t \Omega dt \quad (3)$$

可以看出, 三相感应电机瞬间断电后重新投入电网时定子侧产生的冲击电流取决于掉电时间。这主要因为: 一方面, 掉电时间越长, 机端反电动势越小, 重新投入电网时的情况越接近于电机冷启动; 另一方面, 从同步电机的“准确整步”观点看, 如在阀冷主泵电机重新投入电网时机端反电动势与第二路三相交流电源的相角差达到 $180^\circ$ 电角(即反相位), 定子电流和电磁转矩的冲击将接近最大。

06月01日切换过程中极二跳开的主泵二电源小开关 Q1, 相应 MCC 小开关 Q4 自身均带有过负荷保护功能, 电流阈值分别为 1250 A 和 1550 A。当 102 M 因扰动失电后, 经过 200 ms 延时阀冷切换系统控制选择切换继电器 K1 将极二主泵电源由第一路切至第二路。同时, 期间录波装置明显观察到泵二电机的机端存在反电动势, 反电动势的幅值及频率均逐渐下降。综上, 分析是由于反电动势和第二路电源相位上不同步导致电源切换的瞬间产生

冲击电流, 跳开主泵二电源小开关 Q1 及相应 MCC 小开关 Q4, 造成极二阀冷系统第二路电源并主泵二丢失, 最终由阀冷切换系统将极二主泵由泵二切换至泵一运行, 并将供电电源切回第一路。随后进行的仿真试验也验证了以上结论。

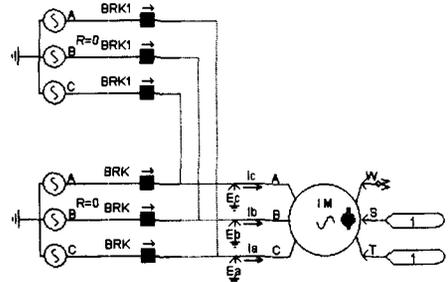


图 2 阀冷系统仿真模型

Fig.2 Valve cooling system's simulation model

阀冷切换异常过程的仿真分析如下:

经过对肇庆换流站阀冷系统主泵供电回路及相应的切换逻辑进行简化, 我们在 EMTDC 平台上搭建了仿真模型, 如图 2 所示, 通过控制两组共六台单相开关 BRK 和 BRK1 的通断模拟阀冷系统两路三相交流电源间的切换(仿真中通过设置 BRK 三台开关在  $t_1=20$  s 时刻断开来模拟主泵断电, BRK1 三台开关在  $t_2=20.2$  s 时刻合上模拟电机重新投入电网), 其中三台 BRK 开关对应第一路三相交流电源,

三台BRK1开关对应第二路三相交流电源;通过修改第二路三相交流电源的相位调整重新投入电网时电机第二路三相交流电源与反电动势之间的相位差;通过输入转速曲线对阀冷主泵电机的运行进行模拟。得出仿真结果如图3所示。可见,在阀冷主泵电机重新投入电网的瞬间,若机端反电动势与第二路三相交流电源之间反相,A相定子绕组电流可达到1384 A,是稳定运行时的12.58倍(主泵正常运转时定子电流正常约为110 A),达到主泵二电源小开关Q1的过流保护定值,若计及为供给其余负荷需提供的约250 A电流,则也将超过相应MCC小开关Q4的过流保护定值,因此Q1及Q4跳开。另一方面,若机端反电动势与第二路三相交流电源之间几乎同相,定子电流峰值则出现在B相,为1090 A,约是稳定运行时的9.91倍,仿真表明,若不修改停复电时刻,电机重新并网瞬间定子电流值随着机端反电动势与第二路电源间相差的增加而增加。

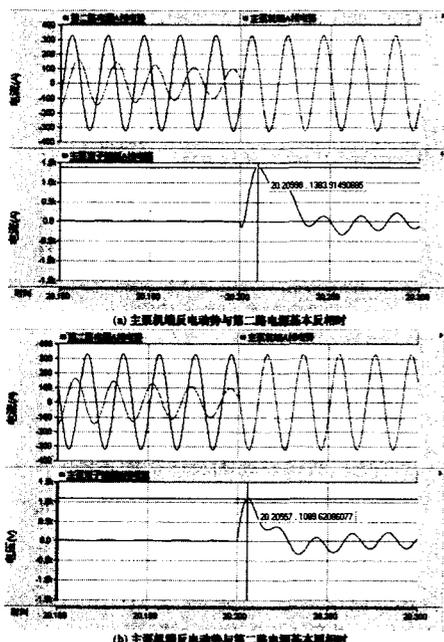


图3 主泵投入电网第二路电源电压、瞬间机端电压及定子绕组电流波形

Fig.3 Curves of the second power supply's voltage, the transient induction motor's stator voltage and current

## 2 阀冷切换系统改造方案

上述分析表明,正是由于电源切换过程中主泵机端反电动势和第二路电源在相位上的不同步导致了06月01日阀冷切换系统的异常,对高肇直流系统这是严重的安全隐患。南方夏季多雷雨,常造成阀冷电源的切换,而在跳开MCC小开关Q4后极二阀冷系统第二路电源丢失,此时如因扰动再失去第

一路电源,两台主泵将停止工作,最终导致极二的紧急停运。因此,需要对阀冷切换系统进行改造。经过研究,我们最终提出两套方案:

1) 为阀冷切换系统增加检同期装置,检测掉电后机端反电动势和备用电源电压,通过计算选择冲击较小的时刻,如待机端反电动势与第二路电源相位相近的时刻,将主泵重新接入电网。但因电源切换过程中影响冲击电流大小的因素错综复杂,检同期装置往往难以保证发挥预期的功能。因此最终选用的是方案2。

2) 将主泵电源切换延时由200 ms调整为一个更长的定值,待机端反电动势降至足够小时再重新并网。这时,即便投入瞬间机端反电动势和备用电源电压分处正、负极值,也不足以产生过大的冲击电流。对此,我们进行了多次仿真和动模试验,其中将定值设置为1.5 s时的仿真结果如图4所示。

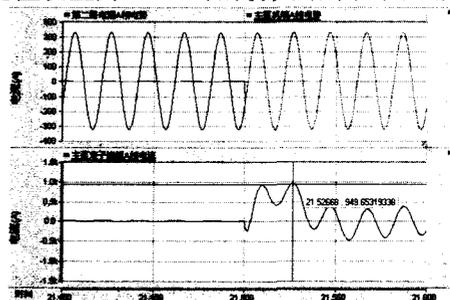


图4 主泵1.5 s后重新投入电网第二路电源电压、瞬间机端电压及定子绕组电流波形

Fig.4 Curves of the second power supply's voltage, the transient induction motor's stator voltage and current when modifying the power supply's switching time to 1.5s

可见,掉电1.5 s后主泵的机端反电动势有很大程度的衰减,这时再重新并入电网,过程类似于电机的冷启动,形成的冲击电流大小也基本相同(此处主泵定子绕组A相电流为950 A,冷启动时为896 A)。增加主泵电源切换延时虽然可以有效降低电机在重新投入电网瞬间冲击电流的大小,但如采用该方案,必须确保增加延时后电机转速下降对内冷却水的循环没有显著影响。随后多次动模试验中对内冷水主水压力进行检测的有关数据表明,将延时整定在1.5 s以内主水压力均无明显下降,满足运行条件。肇庆换流站遂于2008年01月将阀冷主泵电源切换延时整定为1.5 s,后虽因雷雨扰动主泵电源多次切换,终未发生跳开主泵二电源小开关Q1及相应MCC小开关Q4的异常情况,成功消除了阀冷切换系统的这一隐患。

(下转第117页 continued on page 117)

和 SHJc 返回, 因此 0.59 A 的保持电流最终全部流过 SHJB, 从而使得 SHJB 持续发出合闸令, 而此时由于 A 相开关的防跳继电器卡滞失效, 造成了 A 相开关的多次跳跃, 而 B、C 相防跳继电器正常, B、C 相开关未发生跳跃现象。

### 3 改进措施

运行中, 当线路发生故障, 由于开关防跳继电器失效, 可能造成开关第二次合闸, 但是, 由于开关典型防跳回路设计在取消保护防跳回路时存在 SHJ 和开关防跳继电器的配合问题, 当断路器防跳继电器触点发生某种卡滞现象时, 由于操作箱 SHJ 和开关本体防跳继电器的配合不当, 可能造成开关反复出现跳跃现象, 不但严重损害断路器的使用寿命, 还将严重损害输电线路及用电设备, 这是我们在运行中必须防止的, 针对本典型防跳回路, 可以采取以下改进措施:

1) 保持原防跳回路不变, 调高防跳继电器的

(上接第 111 页 continued from page 111)

### 3 结论

本文对贵广直流肇庆换流站阀冷切换系统 2007 年 06 月 01 日发生的异常进行了深入分析, 得出以下结论:

① 当天发生主泵二电源小开关 Q1 及相应 MCC 小开关 Q4 跳开的异常是由主泵电源切换期间产生的冲击电流引起, 该冲击电流则由电机掉电后机端存在的反电动势和即将并入的第二路电源在相位上不同步造成。

② 通过将主泵电源切换延时由 200 ms 整定为一个更长的定值, 待机端反电动势降至足够小时再进行切换, 可显著减小电机重新投入电网瞬间产生的冲击电流。实验和生产实际表明, 该延时设为 1.5 s 即可有效避免当天阀冷切换异常的出现, 同时不会对内冷却水的循环造成影响, 是行之有效的解决方案。

(上接第 114 页 continued from page 114)

### 参考文献

- [1] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 2001.  
HE Jia-li. Theory of Power System Relay Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 2001.
- [2] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
XIA Dao-zhi. Power System Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

电阻  $R$ , 使得  $R$  满足以下条件:  $R \geq 3UI_{SHJFHMIN}$  ( $I_{SHJFHMIN}$  为三相 SHJ 的最小返回电流)。

2) 将开关防跳取消, 改为保护防跳, 可彻底解决问题, 由于开关本体防跳继电器安装在开关汇控箱, 随着年限增长, 运行状况会变坏, 而当防跳继电器触点出现问题时, 又无可靠的监视回路, 不易被发现, 容易发生开关防跳失效的情况, 而且由于这种跳跃现象难以立即人为控制, 开关一般会一直跳跃到操作能量消失或防跳卡滞触点返回后方会停止。相对来说保护本体防跳回路在保护操作箱, 防跳回路为印刷电路, 不易损坏, 而且有监视防跳继电器触点的回路, 容易提前发现, 从而可以有效避免开关发生这种防跳失效后的反复跳跃现象。

收稿日期: 2008-09-03

作者简介:

徐春新(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为继电保护运行与管理技术。E-mail: 99225880@163.com

### 参考文献

- [1] 李兴, 等.  $\pm 500$  kV 贵广直流输电系统肇庆换流站运行规程[Z].
- [2] 赵明, 等.  $\pm 500$  kV 贵广直流输电系统肇庆换流站设备操作手册[Z].
- [3] 汤晓燕. 三相感应电动机瞬间断电重新投入电网时的瞬态[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2): 98-102.  
TANG Xiao-yan. Reclosing Transient of Three Phase Induction Motor[J]. Electric Machine and Control, 2001, 5(2): 98-102.
- [4] 汤蕴璆. 交流电机的动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

收稿日期: 2008-07-25; 修回日期: 2008-08-08

作者简介:

刘森(1977-), 男, 硕士, 中级工程师, 从事高压直流系统运行管理工作;

宋述波(1978-), 男, 硕士, 中级工程师, 从事高压直流系统运行管理工作;

刘俊(1980), 男, 硕士, 助理工程师, 从事高压直流系统运行维护工作。E-mail: liujunvii@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-08-04; 修回日期: 2009-02-27

作者简介:

雷善春(1972-), 男, 电力工程师, 长期从事电力生产管理工作;

刘震(1973-), 男, 本科, 电力工程师, 从事继电保护工作; E-mail: liuzn05@sohu.com

陈勇军(1973-), 男, 专科, 电力工程师, 长期从事电力安全生产管理工作。