

云广直流晶闸管失效原因分析与控制保护逻辑优化研究

刘涛, 赵晓斌, 李凌飞, 李岩

(南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要: 2012年4月23日云广特高压直流孤岛调试后发生了晶闸管失效事件。分析了晶闸管失效原因, 梳理了控制保护紧急停运及闭锁流程, 指出了控制保护逻辑存在的问题, 提出了逻辑优化方案, 并进行了EMTDC和RTDS仿真。仿真试验验证了旁路开关合闸逻辑优化后的有效性和正确性。优化方案已在云广及糯扎渡特高压直流输电工程控制保护程序中实施, 并在云广工程后续的孤岛调试过程中发挥了积极作用, 未再发生由于孤岛双极闭锁试验导致晶闸管失效的事件。

关键词: 孤岛运行方式; 晶闸管; 控制保护; 双极闭锁; 仿真

Analysis of thyristor failure event and logic optimization controlling and protection in Yun-Guang Project

LIU Tao, ZHAO Xiao-bin, LI Ling-fei, LI Yan

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Thyristor failure event occurred after Ultra HVDC island commissioning on April 23, 2012. This paper analyzes the reason of thyristor failure, introduces the process of the emergency shutdown and block of controlling and protection, and points out the controlling and protection logic problems. The logic optimization solutions are proposed and EMTDC and RTDS simulations are carried out. Simulation results verify the validity and correctness after the optimization of bypass switch closing. Optimization program has been widely implemented in the Yun-Guang and Nuozhadu Ultra HVDC controlling and protection system. The optimization scheme has played an active role in the end of project commissioning process, and the thyristor failure caused by the island bipolar block test never occurred.

Key words: islanded mode; thyristor; controlling and protection; bipolar block; simulation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0093-04

0 引言

南方电网目前已建设世界上第一回±800 kV、输电容量为5 GW的特高压直流输电工程——云广直流输电工程, 以满足“十二五”初云南小湾、金安桥等电站向广东送电的需要。云广直流输送容量巨大, 对南方电网的安全稳定产生很大的影响^[1-3]。如果云广直流采用孤岛运行方式, 可以较大地提高云电外送的稳定水平, 效益显著, 并可以简化直流安稳系统的配置。因此, 云广直流的孤岛运行方式被确认作为正常运行方式中的一种^[4-5]。

为了提高云南到广东的输电能力, 在重负荷季节需要满负荷输送直流功率时, 云广特高压直流系统的送端交流系统应运行在孤岛模式。在孤岛运行方式下, 正常输电方向中作为整流器运行的楚雄换流站只通过四条500 kV, 长度为250 km以上的交

流输电线路与小湾和金安桥水电站相连。交流系统很弱, 短路比(SCR)甚至低于1.7。低短路比会导致楚雄站交流母线在直流停运特别是双极同时闭锁情况下出现非常高的过电压。因此分析直流停运顺序, 优化控制保护策略, 对降低过电压水平, 避免对一次设备的损害具有重要的意义^[6-10]。

本文针对孤岛调试中晶闸管失效问题, 分析了云广工程的紧急停运及保护闭锁流程, 指出了孤岛运行方式下, 控制保护停运逻辑存在的问题, 提出了对应的优化方案, 并利用云广特高压直流输电控制保护EMTDC和RTDS实时仿真系统验证了优化方案的正确性。为云广以及糯扎渡直流工程的控制软件修改提供了技术支持。

1 孤岛调试中遇到的问题

2012年4月23日19时11分, 云广直流工程

第四阶段孤岛试验结束后，将极 2 高端阀组由备用状态操作至闭锁状态，当极 2 高端阀组进线 5023 断路器合上后，SER 报 4 只晶闸管无回检信号，因失效晶闸管超过 3 只，最终导致极 2 高端阀组跳闸。更换备件后，运行过程中又发现 4 只晶闸管失效，除其中 1 只位于极 1 高端阀组外，其余均为极 2 高端阀组的晶闸管。

极 1 高端阀组晶闸管失效的原因是光纤损坏导致的过电压击穿。

经过对极 2 高端阀组失效晶闸管的解剖分析，可将晶闸管失效原因分为两类，第 I 类为微弱能量的“尖峰”过电压造成的损坏；第 II 类为放大门极损坏，属于 di/dt 过大造成的损伤。如图 1 所示。



图 1 楚雄站其中两个失效后的晶闸管

Fig. 1 Two thyristors which failed in Chuxiong Converter Station

2 晶闸管失效问题分析

2.1 抽检运行的晶闸管

为查找损坏原因，对晶闸管进行了抽检，从楚雄换流站拆下 9 只运行中的晶闸管，其中 6 只取自极 2 高端 A 相阀塔，3 只取自极 1 高端 A 相阀塔，于 2012 年 6 月 18 至 19 日在西安电力电子研究所进行了详细的测试，试验项目有漏气率检测、高温测试、高温阻断试验、室温测试，并增加了 V_{BOD} 、 V_{RSM} 的测试，测试结果如下：

1) 测试压力，断态重复峰值电压，反向重复峰值电压，断态不重复峰值电压，反向不重复峰值电压，反向击穿电压与出厂测试结果相符。

2) 正向击穿电压、通态峰值电压与出厂参数有微小偏差，在许可的范围内。

断态电压临界上升率，通态电流临界上升率，关断时间，反向恢复电荷等是芯片级的性能参数，本次没有测试。分析测试结果，9 只 T2563N 80T S34 型光控晶闸管性能正常，满足云广直流输电换流阀晶闸管技术协议要求。基本可以排除晶闸管生产质量或老化等因素导致其损坏。

因此，需要仔细分析现场波形，梳理双极闭锁停运试验过程中控制保护的响应流程，采取措施尽

可能降低过电压及过高 di/dt 的水平，避免类似情况下换流阀等设备的损坏。

2.2 试验过程分析

2012 年 4 月 23 日 14 时 22 分左右，楚雄站孤岛试验，6 机 4 线，双极功率 2 500 MW，执行双极 4 阀组同时闭锁，孤岛方式下整流站双极闭锁时控制保护设计的停运过程如下：

1) 极控收到双极闭锁指令后，首先执行降电流操作，约 3 个周波电流降至最小后执行移相闭锁。

2) 站控在收到双极闭锁指令后，为降低交流过电压，执行跳交流滤波器大组进线开关，延时 20 ms 跳换流变进线开关。

以极 1 高端阀组 1 的波形为例，如图 2 所示，结合 SER 事件进行分析，整个闭锁停运过程基本符合设计要求，但也发现了几个异常现象。

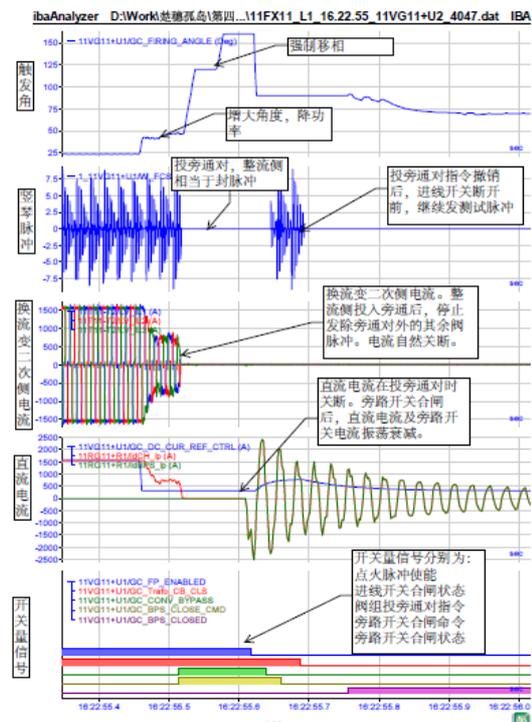


图 2 孤岛调试双极闭锁试验极 1 阀组 1 波形图 (楚雄站)
Fig. 2 Waves of pole1 group1 when bipole blocking in Chuxiong Converter Station

1) 闭锁开始后 30 ms，发出跳换流变进线开关命令，14 ms 后，整流侧投旁通对指令生效，停发其他阀臂触发脉冲，此时直流电流 610 A 左右。由于直流侧电压仍然存在，中性母线上无法产生高于直流极线的电压，旁通对不具备导通条件，旁通对实际未能投入，导致电流强制关断。

2) 闭锁开始后 45 ms，强制移相逻辑开始执行，顺序为：触发角执行移相至 120° (约 4.5° /ms)，

触发角在 120° 保持约 30 ms 后移至 160° 移动,在 160° 保持约 40 ms 后,停止触发脉冲,阀闭锁。由于楚雄站投旁通对在强制移相之前执行,强制移相逻辑实际未起到作用。

3) 闭锁开始后约 140 ms , 高压阀组和低压阀组的旁路开关合上, 两个阀组旁路开关合闸时间相差约 3 ms , 旁路开关合上后, 与其并联的阀组上的电压降至零; 但由于双阀组旁路开关合闸不同步, 使得直流电压加在后合的旁路开关及其并联的阀两端, 导致阀组上产生过电压, 阀组 C 型避雷器 F5 动作。

综上, 在双极闭锁过程中, 由于整流侧的控制系统在强制移相降电流之前执行了投旁通对、合旁路开关的逻辑, 导致换流阀脉冲在直流电流未降至最小值就已闭锁, 电流被强制关断使得晶闸管产生较高的 di/dt ; 又由于串联双阀组的旁路开关合闸无法保证完全同步, 导致旁路开关后合上的阀组两端产生过电压, 均会对晶闸管的安全产生一定的危害。因此需要进一步分析控制逻辑并进行优化。

3 云广直流闭锁停运逻辑分析

根据云广工程控制保护设计规范, 直流系统故障后的闭锁停运流程如图 3 所示。

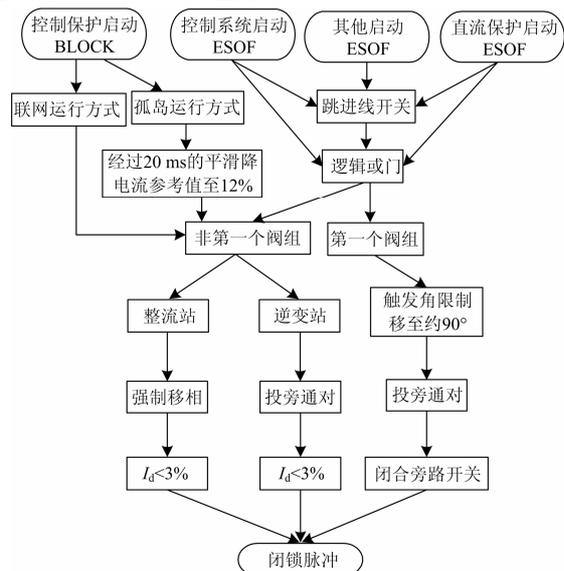


图 3 云广直流闭锁停运顺序

Fig. 3 BLOCK and ESOF sequence in Yun-Guang project

此外, 根据相关研究, 为防止孤岛双极闭锁后, 换流变压器的谐振, 增加了一条控制策略即: 孤岛运行方式下, 若发生双极闭锁, 在跳交流滤波器大组开关命令发出后 20 ms , 发出跳换流变进线开关的命令。

而“外部跳闸信号”会启动阀组 ESOF 逻辑执行投旁通对、合旁路开关的动作行为。

因此, 在实际工程试验中, 出现了以下两条与控制保护设计逻辑不一致的地方。即:

1) 极 ESOF 时, 整流侧只需强制移相降电流, 但实际工程中若保护没有发出禁止投旁通对的指令, 整流侧也会投入旁通对, 合上旁路开关。这是由于 ESOF 会导致进线开关跳闸, 而外部跳闸信号又会启动投旁通对, 合旁路开关逻辑。

2) 孤岛运行方式下, 发生双极闭锁或者最后一极闭锁时, 跳交流滤波器大组开关后也会接着跳开换流变进线开关。同样外部跳闸信号也会启动投旁通对, 合旁路开关逻辑。

4 孤岛运行时闭锁停运逻辑优化与仿真

针对上述问题, 提出了软件逻辑的优化方案:

在整流侧增加禁止投旁通对、合旁路开关的逻辑。使得在极 ESOF 或孤岛运行双极闭锁时不投旁通、不合旁路开关。

同时, 根据对整个跳闸回路的分析, 为确保整个极闭锁过程特别是强制移相逻辑的完整执行, 将直流站控程序中大组开关跳闸与分进线开关的延时由 20 ms 修改为 30 ms 。

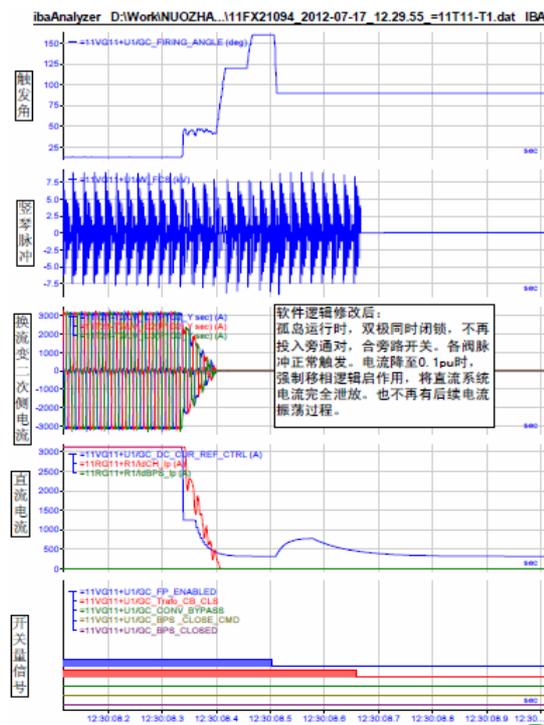


图 4 逻辑优化后双极闭锁试验极 1 阀组 1 波形图 (楚雄站)

Fig. 4 Waves of pole1 group1 when bipole blocking in Chuxiong Converter Station after logic optimization

为验证优化方案的有效性和正确性，分别在云广直工程控制保护的 EMTDC 和 RTDS 仿真系统上进行了大量的仿真试验，包括不同运行方式、不同功率水平下单阀组，单极以及双极的跳闸闭锁试验。

逻辑优化后的典型 RTDS 仿真波形如图 4 所示。孤岛运行双极闭锁，整流站不再投入旁通对、不再合旁路开关，未出现由于旁路开关合闸后引起的直流电流振荡问题，各阀触发脉冲正常，电流降至 10% 后，强制移相逻辑启动将直流系统电流完全泄放，换流阀的 di/dt 和过电压水平均明显降低。

5 结论

通过对云广特高压直流输电工程孤岛调试过程中晶闸管失效事件进行分析，梳理紧急停运及保护闭锁流程，指出了控制保护逻辑存在的问题，提出了逻辑优化方案，并进行了 EMTDC 和 RTDS 仿真。

仿真试验验证了旁路开关合闸逻辑优化后的正确性。逻辑优化后直流极闭锁停运过程更平稳，没有了后续合旁路开关动作，解决了两阀组旁路开关合闸不同步引起的后合阀组的过电压问题。也验证了逻辑优化对直流系统未修改的功能没有产生负面影响。

优化方案已在云广及糯扎渡特高压直流输电工程控制保护程序中实施。在云广工程后续的孤岛调试过程中发挥了积极作用，未再发生由于孤岛双极闭锁试验导致晶闸管失效的事件。

参考文献

[1] 张爱玲, 刘涛, 李少华. 云广特高压工程紧急停运及旁路开关操作策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 121-125.
ZHANG Ai-ling, LIU Tao, LI Shao-hua. Research on control strategy for ESOF & bypass switch operation in Yunnan-Guangdong UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 121-125.

[2] 李少华, 刘涛, 苏匀, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84-87.
LI Shao-hua, LIU Tao, SU Yun, et al. Research on de-blocking & blocking operation in ± 800 kV UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 84-87.

[3] 周君文, 刘涛, 李少华. 云广特高压工程控制系统功能分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 70-75.
ZHOU Jun-wen, LIU Tao, LI Shao-hua. Research on control functions in UHVDC system[J]. Power System

Protection and Control, 2009, 37(10): 70-75.

[4] 陈允鹏. 南方电网特高压输电技术应用展望[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(1): 10-12.
CHEN Yun-peng. A prospect of UHV transmission technology application in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(1): 10-12.

[5] ED4 341 CS-C. 2007.11.9. 云广工程直流极控系统设计规范书[S].
ED4 341 CS-C. 2007.11.9. Yunnan-Guangdong line ± 800 kV DC transmission project C/P design specification[S].

[6] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ai-ling. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.

[7] 陶瑜, 龙英, 韩伟. 高压直流输电控制保护技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 8-10.
TAO Yu, LONG Ying, HAN Wei. Status and development of HVDC control and protection[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 8-10.

[8] 洪潮, 饶宏. 南方电网交直流实时仿真系统的结构和功能[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1(3): 15-18.
HONG Chao, RAO Hong. The structure and functions of an AC/DC real time simulation system[J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2005, 1(3): 15-18.

[9] 王瑶. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.

[10] 刘洪涛, 李建设, 苏寅生, 等. 云广 800 kV 直流控制系统的功能[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2): 35-38.
LIU Hong-tao, LI Jian-she, SU Yin-sheng, et al. Characteristics of Yunnan-Guangdong ± 800 kV DC transmission project control system[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 35-38.

收稿日期: 2013-07-14; 修回日期: 2013-09-04

作者简介:

刘涛 (1978-), 男, 本科, 工程师, 主要从事直流输电系统的控制保护研究工作; E-mail: liutao@csg.cn

赵晓斌 (1985-), 男, 工程师, 主要从事直流输电系统研究及成套设计工作;

李凌飞 (1985-), 女, 工程师, 主要从事直流输电系统研究及成套设计工作。