

换流站阀水冷系统导致直流停运隐患分析

杨光亮^{1,2}, 邵能灵¹, 郑晓冬¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司超高压输电变电公司, 上海 200063)

摘要: 以南桥换流站水冷系统为例, 介绍了其存在问题及改造过程, 阐述了水冷保护的原理和定值。对近年来的阀水冷系统故障导致的停运事故进行了分析, 列举了国内6条直流输电工程内外水冷系统缺陷分布。分析了换流站水冷系统存在的导致直流单双极闭锁隐患有未双重化的传感器元件、电源失却、回路渗漏水、不合理的定值设置等, 并提出了应对措施。通过对隐患的及时整改, 大大减少了直流系统的强迫停运率。

关键词: 直流停运; 水冷保护误动; 隐患排查; 水冷改造; 阀冷却

Analysis of potential dangers leading to HVDC outage in valve cooling system

YANG Guang-liang^{1,2}, TAI Neng-ling¹, ZHENG Xiao-dong¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. EHV Power Transmission Company of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200063, China)

Abstract: Taking the valve cooling system of Nanqiao converter station as an example, its problems and the transformation process are presented. Then, the valve cooling system protection theory and its settings are introduced. The HVDC outage accidents caused by valve-cooling system in recent years are listed and analyzed. The defect distribution of inner and outer valve cooling system in the six domestic HVDC transmission projects is illustrated. The hidden danger of single or dual poles blocking includes single sensors, power lost, water leakage, wrong settings, etc. Their corresponding countermeasures are also presented. After taking the necessary corrective and remedial measures, the HVDC forced outage rate is greatly reduced.

Key words: HVDC outage; misoperation of cooling protection; investigation of hidden danger; cooling system transformation; valve cooling

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0199-05

0 引言

2007年以来, 全国直流系统发生多起由于阀水冷系统引起的停运事故。南桥换流站对水冷系统进行了隐患排查改造, 对近年来历次水冷系统导致直流停运的原因进行了分析。调查结果表明, 元件和保护完全双重化, 定值和跳闸逻辑设置合理是提高水冷系统可靠性的重要技术措施。本文介绍了南桥站水冷系统改造的过程, 介绍了水冷保护原理及改进原因。对导致直流输电系统停运的水冷隐患进行了排查, 并对几次水冷系统事故进行了分析。

1 换流阀冷却系统介绍

冷却系统是换流阀的一个重要组成部分, 它将阀体上各元器件的功耗热量排放到阀厅外, 保证晶闸管结温在正常允许范围^[1]。冷却水系统分为内冷

水系统和外冷水系统。内冷却水又称一次循环水, 较低温度的冷却水经循环水泵加压后进入冷却水管流入阀内全部散热器, 吸收晶闸管及其辅助元件产生的热量, 水温将升高。一次循环水经过外冷却系统冷却后, 水温降至初值, 开始下一个循环冷却。

2 南桥站水冷改造过程

南桥换流站原有内冷水系统存在单元件故障引起极闭锁的危险点。为尽可能地利用现有条件提高系统可靠性, 降低单双极闭锁风险, 于2007年10月~11月葛南直流大修期间, 实施了南桥站水冷系统第一阶段技术改造工程: 之前的MACH1(Modular Advanced Control System for HVDC and SVC 1st Edition)屏柜依旧保留, MACH1中水冷保护以及部分控制功能则被移至PCP(Pole Control and Protection), 以实现补水以及启停内水冷系统功能, 传感器改造方面则实现了主水流量计以及膨胀箱模拟信号的双重化。经过试验验证, 第一阶段改造后

基金项目: 国家电网公司科技项目

的水冷系统符合设计要求，能够达到改造前预期设想，MACH2(Modular Advanced Control System for HVDC and SVC 2nd Edition)系统和 MACH1 系统有机结合，工作良好，双重化的水冷保护一定程度上提高了系统运行的可靠性。

但经历过初步改造后的南桥站水冷系统目前还存在以下问题：①水冷控制 QHLA 屏柜是由可编程控制器以及 MACH1 系统的板卡实现的，若板卡故障则会由于无备品（且已停产）而无法更换；② MACH1 系统软件升级更新不方便；保护和部分水冷控制功能是在 PCP 中实现，水冷系统没有成为独立且双重化配置的系统，不方便维护；部分环节仍存在单元件故障导致极误闭锁的可能性。

鉴于此，在第二阶段的南桥站水冷系统改造中将原 QHLA 屏柜进行拆除，采用南瑞 CCP (Cooling Control and Protection) 屏柜，将 QHLA 柜功能转移到新的 CCP 柜，PCP 中与水冷相关功能也全部移至 CCP，使得 CCP 成为相对独立系统。

水冷相关信号由 CVI(Cooling and Valve Interface)柜改接到 CCP 柜，并在柜中实现 A, B 套冗余配置，最终实现从传感器、回路到输入输出板卡、处理器板卡所有环节的双重化配置。另外，由于电源屏柜内设备已较为老化，所以第二阶段改造将原有的动力电源屏柜拆除，安装 ABB 公司新的 MCC (Motor Control Center) 屏柜。此次改造中，将温度传感器、电导率传感器更换，增加一台进水压力传感器、一台出水压力传感器以及百吨水池水位计等元件。

改造完成后，为了避免水冷保护误动，对主水流量跳闸逻辑进行了修改，原有逻辑是主水流量低于额定流量的 60%时跳闸，现在改为主水流量低于额定流量的 60%，同时分支流量之和低于额定流量的 60%，则由值班系统出口跳闸^[2]。

3 南桥站目前水冷系统保护原理及定值

南桥换流站目前水冷系统保护原理及定值如表 1 所示。

表 1 南桥站目前水冷系统保护原理及定值

Tab.1 Protection principles and settings of valve cooling system in Nanqiao station

保护名称	报警定值	跳闸定值
主水流量	低于额定流量 200 T/H 的 80%时，流量低报警，主泵切换	低于额定流量的 60%时，延时 2.5 s 引起系统切换，如果切换系统后主流量恢复正常，则系统继续保持运行；如果延时 6.5 s 后如果仍旧发现主水流量低于额定 60%，同时分支流量之和低于额定*60%，则由值班系统出口跳闸。
分支流量	低于额定流量的 80%延时 1 s 发报警，低于额定的 60%延时 6.5 s 发紧急报警，相应编号的分支报“分支流量低”	不跳闸
主水流量表计故障	流量高于 350 T/H 以及低于 -50 T/H，发“流量表计故障”告警，该故障会引起系统立即切换，同时封锁主水流量低跳闸。	不跳闸
电导率	大于 0.5 μs/cm，延时 5 s 发“电导率高”报警，“水冷系统需要维修”报警	不跳闸
膨胀箱水位	膨胀箱水位低于 45%，发“膨胀箱水位低位超限”报警；膨胀箱水位高于 75%，发“膨胀箱水位高位超限”	不跳闸
膨胀箱液位计故障	高于 95%，或者低于 5%，发“膨胀箱液位计故障”，一方面作为轻微故障引起系统切换，另一方面封锁漏水跳闸以及漏水报警信号，同时报“水冷系统需要维修”信号。	不跳闸
微分泄漏保护		水位低于 10%处延时 10 s 发出漏水跳闸信号。3 个连续 10 s 内下降水位都超过 1%，微分泄露保护延时 1 s 动作
高温保护（进出阀水温度保护）	全压：进水>41℃，回水>50℃ 降压：进水>41℃，回水>54℃ 报警	全压：进水>43℃，回水>52℃ 降压：进水>43℃，回水>56℃ 延时 1 s 系统切换，延时 2 s 跳闸。
水冷系统 380 V AC 电源双路电源均丢失	将引起四个冷却塔以及主泵 1, 2 均报故障	水冷 ESOF 跳闸
冷却塔的任何一泵或者风扇故障	报“冷却塔故障”	不跳闸
任何一个冷却塔故障	报“备用冷却塔故障”	不跳闸
喷淋泵发生故障时	将报喷淋泵故障信号	不跳闸
百吨水池	低于 50%，发“百吨水池水位低”，高于 70%，发“百吨水池水位高”报警	不跳闸

续表 1

保护名称	报警定值	跳闸定值
阀温度计故障	测温高于80.0℃或者低于-20.0℃。报“进水温度计故障”，或“出水温度计故障”。作为严重故障引起系统切换，会报“水冷系统需要维修”信号。	不跳闸
结冰保护	温度低于5℃时，发“水温接近冰点”信号报警。	不跳闸
压差保护	回水压差<0或>0.95 MPa，切系统，告警；进水压差<0或>1.5 MPa，切系统，告警；主泵压差<0.2 MPa，切主泵	不跳闸
水冷控制保护值班系统与极控之间失去通信联系	如果仅是备用系统与极控系统失去联系，系统仅报警。	切换水冷控制保护系统，切换后仍旧发现失去通信联系则跳闸
380 V AC双路工作电源丢失一路	发“备用380 V AC电源丢失”告警	不跳闸

4 近年来水冷系统导致的直流停运事故

4.1 南桥站分支流量传感器故障导致闭锁

2007年6月23日06时11分，南桥换流站极I控制保护A、B系统控制主机(P1PCPA1/B1)发极I阀内冷水3B分支流量低保护动作报警，导致水冷ESOF(Emergency Shut Off)紧急停运，极I直流系统闭锁^[3]。

原因为3B流量计表头由于在阀厅内长时间受震动影响，导致传感器到表头运行过程中容易受到干扰，存在偶然性的运行不稳定情况，因此导致表头显示和后台OWS(Operator Workstation)显示同时为零。

事故后，取消了南桥站水冷分支流量跳闸的功能，保留其报警功能。当时葛南水冷控制保护系统为单系统设计，底层传感器和采样表计都是单一元件，不能满足控制保护系统冗余配置的要求，且跳闸回路的单一元件故障将直接导致直流系统停运。同时，水冷控制保护系统为单系统，给运行时的设备检修维护工作带来了很大风险。这就是南桥站后来水冷改造的原因，将水冷系统改造成独立且双重化配置的系统。

4.2 高岭站泄漏保护定值过于灵敏致误动

2009年8月15日，高岭背靠背换流站单元1因水冷设备厂家给定的阀冷却系统泄漏保护定值不当(过于灵敏)且未及时发现，在环境温度变化导致膨胀水箱液面高度变化超过定值情况下，阀泄漏保护误动，造成单元1闭锁，经修改泄漏保护定值(由连续三次10s内膨胀水箱液位降低3mm改为6mm)后，单元1恢复运行。

4.3 宜都站进水温度保护动作致极II闭锁

2009年8月16日，宜都换流站站用电电源电压波动，极II外冷水喷淋泵、冷却风扇电源失电全停，造成阀冷却系统进水温度高保护动作跳闸，极II闭锁，切三峡一台机组。

4.4 南桥站外冷水房喷淋泵被淹致极I停运

2009年7月30日晚，上海奉贤地区突降数十

年一遇的特大暴雨，导致南桥站站内存水无法及时排出，极I、极II外冷水房被淹。极I喷淋泵进水后，全部跳闸，阀冷却能力不足，向调度申请极I停运。极II经运行人员全力辅助排水，喷淋泵未跳闸。

4.5 灵宝站内冷水管脱落导致直流停运

2008年2月8日，灵宝换流站220kV LTT阀(Light Trigger Thyristor, 光触发晶闸管)第二层阀塔电抗器元件上DN6小水管有一接口脱落，造成内冷水漏水。“220kV侧阀冷系统膨胀罐液位超低”告警，导致直流停运^[4]。通过对更换下的小水管对比分析，发现脱落水管上没有卡痕，接头上双戒指卡箍安装时没有突出部分，接头无法卡紧，正常运行水压很小，不容易暴露，但经过长时间运行过程中的振动和热胀冷缩，导致接头脱落造成LTT阀水冷系统喷水，引起液位急剧下降，造成保护动作后直流系统停运。相关水冷保护动作及信号正确。脱落水管与正常水管如图1所示。

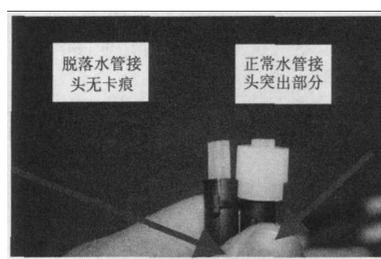


图1 脱落水管与正常水管比较

Fig.1 Comparison of shed water pipe and normal water pipe

5 六条直流工程水冷缺陷分布统计

对2000年后陆续投运的6个常规直流输电工程(天广直流、高肇直流、龙政直流、江城直流、宜华直流和灵宝背靠背直流输电工程)的水冷系统缺陷进行了统计，外冷水系统的缺陷分布统计表如表2所示^[5]。由表2知，外冷水系统的缺陷主要是管道、阀门等渗漏水，风扇、反渗透膜、空压机及喷淋泵等故障。渗漏水主要发生在阀门、法兰及喷淋泵轴封处，风扇故障主要是由于电机或轴承损坏，

运行时间较长,机械磨损严重,引起绝缘降低,内部短路等。反渗透膜是由于水质较差,管道堵塞需要清洗的缘故。空压机是由于橡皮塞等密封不严或者磨损,不能建立压力。喷淋泵的故障主要由轴封破损引起。

表 2 外冷水系统的缺陷统计表

Tab.2 Defect statistics of outer cooling system

年份	2002	2003	2004	2005	2006	合计
故障设备						
渗漏水	6	9	15	19	13	62
风扇	0	11	12	11	9	43
反渗透膜	4	13	16	18	26	77
空压机	0	6	4	3	7	20
喷淋泵	0	9	10	13	18	50
其他	7	11	16	12	21	67
传感器故障		21	24	20	19	84
合计	17	80	97	96	113	403

上述 6 个直流工程内冷水系统的缺陷统计表如表 3 所示^[5]。由表 3 知,内冷水系统的缺陷主要是传感器、电导率表、小开关元件、电磁阀及渗漏水等故障。传感器及电导率表故障主要是本体元件故障和显示面板故障,内冷水系统的渗漏水问题主要出现在阀门及主循环泵上。

表 3 内冷水系统的缺陷统计表

Tab.3 Defect statistics of inner cooling system

年份	2002	2003	2004	2005	2006	合计
故障设备						
传感器	6	5	9	15	7	42
电导率表	2	2	1	7	3	15
小开关烧毁	2	1	4	9	0	16
渗漏水	1	1	2	4	2	10
电磁阀	3	2	4	7	2	18
合计	14	11	21	42	13	101

6 隐患排查及应对措施

通过吸取以上事故的教训,对阀冷却系统导致直流停运的隐患进行了深入的排查,隐患列举如下:

① 内水冷系统泄漏保护误动

当前隐患:在冬季,直流系统长期停运时,水冷温度低于 18℃,内冷水系统通过旁通回路运行,室外的冷却塔管道中的水温很低。当室外环境温度上升或直流系统刚解锁时,水冷温度升高到 22℃,由旁通回路运行改为经过冷却塔循环运行,内外水温的突变将会导致水位急速下降,导致泄漏保护动

作引起单极闭锁。

预控措施:为防止冬季直流系统刚启动时,类似的原因导致泄漏保护动作。对于龙政、宜华直流,在冬季内冷水温度降至 20℃以下后直流系统解锁启动运行前应先手动投入加热器使内水冷系统由旁通运行改为外循环。或者通过修改软件,直接取消内外循环逻辑,一直保持外循环。由于葛南直流无内外循环逻辑,在冬季内冷水温度降至 20℃以下后,应断开该极所有喷淋泵及冷却塔风扇电源。

② 内水冷主泵轴封漏水导致泄漏保护动作。

当前隐患:内冷水主泵将经冷却后的低温去离子水泵至可控硅系统,带走可控硅工作时产生的热量;在主泵工作过程中,由于长期摩擦发热会引起主泵轴封磨损,随着损坏程度的增加,最终会引起内冷水的渗漏,严重时会出现大泄漏,微分泄漏保护动作,运行极闭锁。

预控措施:在年度检修期间,检查主泵运行时,同心度是否满足要求,轴封有无破损;实施主泵漏水检测,实时监控主泵漏水情况,在主泵出现微漏时就能及时发现并处理。检查主泵备品齐全,主泵故障时可及时更换。

③ 380 V AC 双路水冷工作电源丢失一路。

当前隐患:380 V AC 双路水冷工作电源丢失一路,引起运行主泵切换,若切至备用主泵后,备用主泵由于一些不能被监测到的故障(如机械卡涩)不能正常启动时,备用主泵将再次切回原运行主泵,但原运行主泵已失电,导致单极闭锁。

预控措施:若 380 V AC 双路水冷工作电源丢失一路,380 V 电源延时 3 s 切换,导致喷淋泵及冷却塔暂时失电,但并不会引起跳闸。若丢失的是运行主泵的电,控制系统通过压差、主水流量、电源监视等任一判据均可立即切至备用主泵运行,主泵 5 s 即可达到额定流量,小于主水流量低跳闸延时 6.5 s,故 380 V AC 双路水冷工作电源丢失一路,不会造成水冷跳闸。

若切至备用主泵后,备用主泵由于一些不能被监测到的故障(如机械卡涩)不能正常启动时,导致单极闭锁。消除此隐患,需要对站用电进行改造,增加备用投装置,使得失电 380 V 母线瞬间恢复供电,因备用泵不能启动时,切换回原运行主泵可正常运行。

④ 葛南直流外冷水回路设备老化严重,影响直流安全运行。

当前隐患:喷淋塔、喷淋泵、三次冷凝装置等设备老化陈旧,工作效率不高。南桥站阀厅水冷管道放气阀已出现 2 次漏水,应是由于长期温度变化

和振动所致。

防控措施: 建议对喷淋塔、喷淋泵、三次冷凝装置等老化陈旧设备进行更换。停电时, 对水冷回路进行检查, 紧固松动端子、螺丝、内冷水软水管接头等。

⑤ 特大暴雨时, 防汛设施排水能力不足, 外冷水房可能被淹。

当前隐患: 遇到特大暴雨时, 可能导致站内积水无法及时排出, 导致外冷水泵房被淹, 使水冷系统冷却能力严重下降, 导致水温保护动作, 造成单极或双极 ESOF。

防控措施: 将雨水泵房的雨水泵更换为更大功率的雨水泵, 遇到特大暴雨, 加强巡视, 保证雨水泵正常启动。对极 I、极 II 外冷水房分别增加 3 台潜水泵, 当外冷水房有积水时, 立即启动备用潜水泵进行排水。对所有可能进水至外冷水房的孔洞进行了封堵, 并砌墙以确保不渗水。

7 总结

换流站水冷隐患排查的目的是要做到: 回路上所有环节结构冗余, 且保护跳闸出口前先切换系统, 不存在单元件误动导致误动的可能性, 回路上所涉及的部件备品齐备充足, 回路接线图和回路上所涉及的所有部件说明书等资料完整齐备, 动作门槛值和延时合理, 与其他保护配合适当, 程序逻辑设计合理。

本文介绍了南桥站水冷改造的背景和过程, 列举了南桥站所有水冷保护及其定值。对近年来几次

水冷系统导致的直流停运事故进行了分析, 列出了国内 6 条直流输电工程内外水冷系统缺陷分布和直流系统普遍存在的导致单双极闭锁的水冷系统隐患。通过对隐患的及时整改, 大大减小了直流系统的强迫停运率。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 王安全, 等. ± 500 kV 葛南直流输电系统南桥换流站运行规程[R]. 上海: 上海市电力公司超高压输变电公司, 2009.
- [3] 国网运行有限公司. 南桥站 2007 年 06 月 23 日极 I 内冷水 3B 分支流量传感器故障导致闭锁分析报告[R]. 北京: 国网运行有限公司, 2006.
- [4] 国网运行有限公司. 灵宝站 2008 年 2 月 8 日 LTT 阀电抗器冷却水管脱落导致闭锁分析报告[R]. 北京: 国网运行有限公司, 2006.
- [5] 国网运行有限公司. 常规直流运行经验总结及对特高压工程的建议[R]. 北京: 国网运行有限公司, 2007.

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-12-08

作者简介:

杨光亮 (1981-) 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流输电控制保护、换流站运行维护; E-mail: yangguang615@sina.com

邵能灵 (1972-) 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护教学及科研;

郑晓冬 (1985-) 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流输电控制保护。

许继集团海外市场创佳绩

许继集团在坚持稳固国内市场的同时, 积极开拓海外市场, 今年上半年开创了海外工程项目的两个第一: 取得第一个海外电气设备总包合同——越南莱州投资总额达 8500 万元的水电站总包项目, 取得第一个海外电力工程总包项目——成功中标肯尼亚阿西河重油发电站项目。该集团上半年海外市场预算订货率达 120%, 完成年度目标的 47%。

许继集团为了顺利实施海外发展战略, 积极完善进军海外市场的组织架构和市场布局, 成立了亚洲事业部, 完成了缅甸市场的调研工作, 并就仰光-内比都 230 kV 线路改造工程与缅甸工程方达成了初步合作意向, 同时争取到多份中国进出口银行针对缅甸项目的融资函。许继集团还成立了越南办事处, 积极开展越南市场调研工作, 莱州项目就是他们开拓越南市场的具体成果。