

柔性直流阀冷喷淋水反渗透处理优化研究

鲁翔¹, 徐中亚², 王建武², 曾庆荷¹

- (1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663;
2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 文章旨在解决换流站阀冷喷淋水水质破坏导致系统故障问题。[方法] 分析了水质破坏机理及常规直流换流阀冷却喷淋水对管路破坏的过程, 研究提炼出水处理内容。[结果] 研究成果为柔性直流换流阀冷却喷淋水提出一种优化反渗透处理技术方案, 可高效去除喷淋水中破坏管路的各个因素。[结论] 该处理工艺出水基本杜绝喷淋水在冷却塔盘管外壁结垢及其他水质破坏的问题, 确保整个阀冷系统可靠的冷却效能和稳定的运行。

关键词: 柔性直流换流阀; 换流阀冷却系统; 喷淋水; 反渗透处理; 优化

中图分类号: TM721.1

文献标志码 A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0111-04

Optimization Research on Reverse Osmosis Treatment Technology for Flexible DC Valve Cooling Spay Water

LU Xiang¹, XU Zhongya², WANG Jianwu², ZENG Qinghe¹

- (1. EHV Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to solve the problem of system failure caused by quality destruction of valve cooling spray water in converter station. [Method] This article analyzed the water quality damage mechanism, analyzed the process of LCC valve cooling spray water to the pipeline damage, researched out the content needed to be removed. [Result] Propose an optimization reverse osmosis treatment plan for VSC valve cooling spray water. Efficient removal of the various factors in the spray water that damage pipeline. [Conclusion] The spray water will not scale on the cooling coils or generate other damage by treated with the solution, and ensures reliable cooling performance and stable operation of the valve cooling system.

Key words: VSC valve; valve cooling system; spray water; reverse osmosis treatment; optimization

能源资源与负荷中心极不均衡的分布态势决定了我国需要建设大规模远距离的电能输送通道, 高压直流输电技术在我国电网中得到了大规模应用, 目前已建设高压直流输电线路 20 余条^[1]。换流阀冷却系统的可靠性已成为影响整个直流输电安全运行的重要因素, 据不完全统计, 在 2011 年 11 月之前, 南方电网公司 4 条直流输电系统因换流阀冷却系统故障而发生的单双极直流闭锁事故有 22 起^[2-4], 换流阀水冷喷淋水水质破坏问题一直是换

流阀冷却系统故障的一个重要因素。

换流阀水冷喷淋水一旦结垢, 会降低整个阀冷系统的冷却效能, 换流阀的热量不能完全散发引起换流阀跳闸, 整个直流输电线路停运, 造成严重的电力事故。随着电力电子器件和控制技术的进步, 基于电压源变流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统已经成为直流输电系统发展的主流趋势^[5]。为确保柔性直流输电的安全稳定运行, 解决换流阀水冷喷淋水水质破坏问题尤为重要。

1 水质破坏机理

换流阀冷却系统外冷采用水冷方式时, 主冷却设备为蒸发型密闭式冷却塔, 外冷水采用敞开式喷

淋循环水系统。喷淋水系统持续向冷却塔盘管喷淋冷水，冷水受热后一部分被蒸发，另一部分则回流至下部的喷淋水池，进行回收循环利用。喷淋水补充水水质执行生活饮用水水质标准，喷淋循环水在运行过程中，不断地受热、蒸发、循环，水质会不断恶化。

喷淋水在循环过程中水质发生以下变化：

- 1) 喷淋水在冷却盘管受热时，生成不溶于水的 CaCO_3 和 MgCO_3 等，并以结晶状态析出。
- 2) 喷淋循环水不断的蒸发、循环，不断的被浓缩，加速晶体的析出。
- 3) 水中的胶体为晶体析出提供附着载体，晶体析出更便利。
- 4) 冷却盘管处冷热、干湿环境利于析出晶体的附着，大部分晶体附着在冷却盘管外表面，逐渐在冷却盘管外表面形成一层 CaCO_3 和 MgCO_3 等水垢，且垢层逐渐加厚。
- 5) 日光、水温及喷淋循环水中的营养成分均有利于微生物的繁殖，日光照射部分常产生大量藻类，不受日光照射部分，由于细菌、真菌的大量繁殖，产生污泥。

喷淋水在循环过程中水质的变化造成以下危害：

- 1) 冷却盘管的垢层导热性很低，阻碍密闭式循环水热量的散发，最终导致整个冷却系统的功能失效，换流阀结温超限跳闸，直流线路跳闸。
- 2) 藻类和污泥影响整个喷淋水的过水通道，造成过水通道的堵塞、金属构件的腐蚀、阻碍冷却盘管的散热等，降低阀冷系统冷却效能和使用寿命。

2 水质处理内容

根据喷淋水水质破坏机理，补充水中的胶体、微生物及溶解的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子进入喷淋循环水运行后，由于水质的恶化，对换流阀冷却系统造成以下的破坏：降低系统使用寿命、降低阀冷系统冷却效能甚至功能失效。

为确保阀冷系统持续稳定的工作效能，需去除补充水进入喷淋水后引起破坏的元素，去除内容主要包括：胶体、微生物及溶解的钙镁离子等。

目前水处理技术水平去除水中胶体及微生物的工艺较为成熟，难度不大；但高效去除水中钙镁离子的处理技术不是太成熟，特别是去除率很难提

高，而钙镁离子由于在冷却盘管上结垢，最终导致阀冷系统功能的失效，因此对于喷淋循环水补充水钙镁离子的高效去除尤为重要且困难。

3 钠型离子交换处理方案

国内早期建设的常规直流换流站阀冷喷淋水水质处理基本采用钠型离子交换处理方案，详细工艺如下：石英砂过滤器 - 活性炭过滤器 - 精密过滤器 - 钠型树脂软化装置，投加杀菌灭藻剂、阻垢剂，石英砂过滤器和活性炭过滤器配套设置反洗装置。

该处理方案中软化树脂采用钠型离子交换法，用钠离子置换补充水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子，去除水中钙镁离子，同时投加阻垢剂减少水垢的生产。钠离子置换补充水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子，置换率有限，并不能完全置换出补充水中的钙镁离子，只能将出水硬度控制在 50 mg/L (CaCO_3) 以下，部分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子仍然会进入喷淋循环水，而阻垢剂也不能完全阻止 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子结晶结垢，仍然会在冷却盘管外表面形成垢层。因此该方案并不能完全杜绝冷却盘管外表面垢层的生成，仅仅降低了垢层的生成速度。

4 反渗透处理优化方案

4.1 反渗透技术现状

反渗透是一种借助于选择透过(半透过)性膜的功能以压力为推动力的膜分离技术，当系统中所加的压力大于进水溶液渗透压时，水分子不断地透过膜，经过产水流道流入中心管，然后在另一端流出水中的杂质，如离子、有机物、细菌、病毒等，被截留在膜的进水侧，然后在浓水出水端流出，从而达到分离净化目的。

反渗透水处理技术目前已广泛应用于城市用水、企业生产用水、工业废水处理及海水淡化等领域^[6]。本文针对换流阀冷却系统喷淋水的处理内容和特点，提出一种阀冷喷淋水反渗透处理的优化技术方案。

4.2 方案工艺

根据阀冷喷淋水处理内容及运行特点，本文提出的反渗透处理方案详细工艺如下：袋形过滤器 - 微氧化还原过滤器 - UF 超滤膜 - 稳流罐 - 高压泵 - RO 反渗透膜，投加杀菌灭藻剂、阻垢剂。各

处理设备主要功能如下:

4.2.1 袋形过滤器

为整个处理管路的第一个过流设备,采用具备标准过滤精度的滤袋作为杂质过滤载体的机械过滤器,主要去除水中悬浮物,具有以下优点:

1)滤速大,一般可达 1 m/s,罐体尺寸小,占用空间小。

2)无填充滤料,过水压力损失小,节约能耗。

3)袋形机械过水截面,便于收集拦截物,不需设置反洗管路,定期更换滤袋,更换简单快速,更换后滤袋清洗后可重复使用,无反清洗水的排放,系统及运行维护简单便捷、费用省。

4.2.2 微氧化还原过滤器

位于袋形过滤器下游,采用原子化高纯度的多金属合金作为滤料,主要金属成分为 Cu、Zn 及少量稀土元素,主要功能包括:去除水中 99% 的余氯、HS 等;去除水中 98% 的 Fe、Mn、As 等重金属;利用原电池反应场的电荷影响,影响胶体物质稳定性,使后续的超滤组件轻易去除水体中的胶体。同时还具有以下优点:

1)滤速大,一般可达 300 m/h,罐体尺寸小,占用空间小。

2)反洗需求低,采用进水反洗即可,不需设置专用反洗泵,滤料也不需定期取出清洗或更换,滤料使用寿命达 10 年,无反清洗水的排放,系统及运行维护简单便捷、费用省。

4.2.3 UF 超滤膜

位于微氧化还原过滤器下游,采用中空丝膜,额定孔径约 0.01 μm ,主要去除水中菌类及胶体等。UF 超滤膜孔径较大,进水压力需求不大,不需设置专用加压泵;清洗要求低,采用进水简单清洗排污即可,使用寿命达 6~10 年。

4.2.4 稳流罐及高压泵

位于 UF 超滤下游,用于 RO 膜过滤前端加压,利用无负压稳流增压原理,在高压泵前端设置稳流罐,不设置调节水箱,在确保高压泵安全稳定的情况下充分利用上游供水压力,减少 RO 膜前端加压组件的占用空间,减少能耗浪费。

4.2.5 RO 反渗透膜

位于高压泵下游,采用卷膜,额定孔径约 0.1 nm,去除水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属离子及放射性物质等,去除率基本达到 99%。

RO 膜使用寿命较长,因此本文建议换流站阀冷喷淋水反渗透处理系统 RO 膜不设置清洗装置,RO 膜堵塞失效后直接更换,这样大大降低了运行维护的工作难度和工作量,也不会增加太多运行费用。

4.2.6 杀菌灭藻剂

在补水泵吸水口投加,在整个处理工艺的起端投加并与进水充分均匀混合,在起端杀灭藻类和菌类,使整个处理管路的过流部分免遭藻类和淤泥的堵塞及腐蚀等破坏。

4.2.7 阻垢剂

在 RO 膜高压泵吸水口处投加阻垢剂,防止部分钙镁离子在 RO 膜表面形成垢层堵塞 RO 膜,在高压泵吸水口处投加,可使阻垢剂与进水充分均匀混合。进水在 RO 膜前端并未受热,胶体也被上游处理设备去除,无促进钙镁离子结垢的环境条件和附着载体,因此在 RO 膜前端仅需投加少量阻垢剂作为预防即可。

4.3 处理效果

根据工艺流程及各设备的功能可见,该优化方案可更有效地去除水中悬浮物、胶体、余氯及臭味等,钙镁离子去除率基本达到 99%,出水晶莹清澈,基本为纯水,进入喷淋循环运行后,基本杜绝在冷却盘管外壁产生结垢及其他水质破坏的问题。同时还具有以下优点:

1)设备总体外形更小巧,减少占地空间。

2)无脱落的滤料对下游管路造成堵塞。

3)反洗需求降低,不需单独设置反洗水泵,不需定时反洗,不需定期取出滤料清洗,降低运行维护成本和工作量。

4)RO 反渗透膜,在不增加运行费用的基础上,不设清洗装置,降低运行维护的工作难度和工作量。

5)在 RO 膜前端投加阻垢剂作为预防钙镁离子在 RO 膜前端结构堵塞,且 RO 膜前端并无促进钙镁离子结垢的环境条件和附着载体,所以只需投加少量阻垢剂即可。

5 结论

通过本文的研究分析,换流阀冷却系统喷淋水影响系统安全运行的因素主要包括水中杂质和微生物的繁殖,而水中杂质按颗粒由大到下大致包括:

悬浮物、胶体和溶解的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子等。喷淋水中的杂质和微生物的繁殖均会对喷淋水管路造成破坏而降低系统的冷却效能和使用寿命,因此必须去除喷淋水中的杂质和抑制微生物的繁殖。

本文逐个击破、定点清除,按颗粒由大到小,依次去除水中杂质,同时抑制微生物繁殖,各处理工艺处于最优的工作条件,发挥出最大的处理潜能,各尽所能。特别是最后一级 RO 反渗透膜前端预处理水,基本只剩钙镁离子待处理,有效地提高了处理效率和膜使用寿命。其他处理环节也基本采用了新型工艺,设备紧凑、维护简便。整个处理系统更有效的去除水中悬浮物、胶体、余氯及臭味等,出水晶莹清澈,基本为纯水,进入喷淋循环运行后,基本杜绝在冷却盘管外壁产生结垢及其他水质破坏的问题。

柔性直流输电具有不存在换相失败问题,控制相应系统快速、调节精确,有功无功独立控制,在可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市配网供电等方面具有极大的技术应用优势^[7],是我国未来智能电网领域重点研究课题。柔性直流换流阀冷却喷淋水引入该处理方案,可确保喷淋水管理在免清洗除垢的情况下安全稳定运行3年以上,可为我国柔性直流的快速发展提供强有力的保障。在实际运行过程中,需同步监测系统反洗水和排污水的水质状况,为今后进一步研究系统反洗水和排污水的处理提供一些基础数据。

参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 34(34): 6007-6020.
YAO L Z, WU Q, WANG Z B, et al. Pattern analysis of future hvdc grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 34(34): 6007-6020.
- [2] 姜海波,翟宾,贺新征,等. 高压直流输电换流阀冷却系统可靠性评估[J]. 电力安全技术, 2014, 16(5): 60-63.
JIANG H B, ZHAI B, HE X Z, et al. Reliability assessment of DC high-voltage transmission converter valve cooling system leakage protection analysis [J]. Electric Safety Technology, 2014, 16(5): 60-63.
- [3] 杜斌,徐敏,柳勇军,等. 异步联网后云南电网直流闭锁故障稳定特性及控制措施[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 72-76.
DU B, XU M, LIU Y J, et al. Stability characteristic of DC interlocking fault of Yunnan Power Grid after asynchronous inter-

connection and control measures [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 72-76.

- [4] 邓晖,楼伯良,华文,等. 基于直流闭锁事故的华东电网频率特性及控制措施[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 76-81.
DENG H, LOU B L, HUA W, et al. Frequency characteristic of East China Power Grid based on DC block accidents and control measures [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 76-81.
- [5] 钟杰峰,陈丽萍,袁康龙,等. 多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 38-45.
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 38-45.
- [6] 孙照新,吕本福,朱晓东,等. 反渗透水处理技术的应用[J]. 化肥工业, 2011, 38(2): 60-62.
SUN Z X, LV B F, ZHU X D, et al. Use of reverse osmosis water treatment technology [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2011, 38(2): 60-62.
- [7] 曾建兴. 柔性直流输电换流阀冷却系统研究[J]. 自动化应用, 2014(12): 89-91.
ZENG J X. Study on cooling system of converter valve of HVDC-flexible [J]. Automation Application, 2014(12): 89-91.

作者简介:



LU X

鲁翔(通信作者)

1985-, 男, 广东广州人, 工程师, 学士, 主要从事特高压直流工程建设项目管理工 作 (e-mail) dianqi_lu@126.com。

徐中亚

1978-, 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 学士, 主要从事变电站及换流站水工、消防及阀冷的设计及研究工作 (e-mail) xuzhongya@gedi.com.cn。

曾庆荷

1981-, 男, 江西萍乡人, 工程师, 学士, 主要从事变电站土建工程施工管理工作 (e-mail) 122533494@qq.com。

王建武

1981-, 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 博士, 主要从事高电压与绝缘研究及变电一次设计工作 (e-mail) wangjianwu@gedi.com.cn。

(责任编辑: 高春萌)